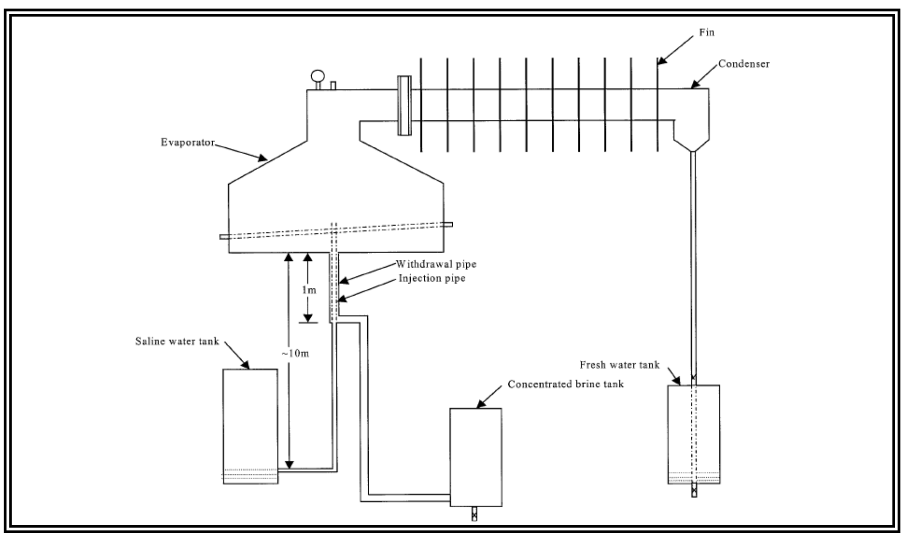
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεωργίου Παλιεράκη

«Αφαλάτωση με χρήση ηλιακών συλλεκτών»

Επιβλέπων καθηγητής: Λέκτορας Χ. Τζιβανίδης



Αθήνα 2007

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ
ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΩΝ
ΠΡΟΛΟΓΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΑ

1. ΤΟ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΕΛΛΕΙΨΗΣ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ
   Γενικά στοιχεία
   Το πρόβλημα της λειψυδρίας είναι παγκόσμιο
   Τα αίτια της έλλειψης φρέσκου νερού
   Οι επιπτώσεις από την έλλειψη φρέσκου νερού
   Η κατάσταση στην Ελλάδα
   Μέθοδοι αντιμετώπισης της λειψυδρίας

2. Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ
   Τι είναι η αφαλάτωση
   Η χρήση της αφαλάτωσης σε παγκόσμιο επίπεδο
   Μέθοδοι αφαλάτωσης
   Οι απαιτήσεις σε ενέργεια μίας μονάδας αφαλάτωσης
   Το κόστος του αφαλατωμένου νερού

3. ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ
   Αφαλάτωση με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας
   Χρήση ηλιακής ενέργειας για αφαλάτωση
   - Έμμεσα συστήματα (indirect systems)
   - Άμεσα συστήματα (direct systems)

4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ-ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ
   Ανάλυση ενός καινοτόμου συστήματος αφαλάτωσης ύδατος που χρησιμοποιεί ηλιακή θερμότητα χαμηλής βαθμίδας (low grade)
   Multi-effect thermal regeneration solar desalination unit with horizontal tube falling film evaporation
   Μονάδα αφαλάτωσης συνδυασμένη με ηλιακούς συλλέκτες και δεξαμενή αποθήκευσης

Ύγρανση και αφύγρανση με αέρα για ένα σύστημα αφαλάτωσης που χρησιμοποιεί ηλιακή ενέργεια
Single stage σύστημα αφαλάτωσης με χρήση ηλιακής ενέργειας για οικιακή χρήση
Αφαλάτωση με αντίστροφη όσμωση και χρήση ηλιακής ενέργειας I
Αφαλάτωση με αντίστροφη όσμωση και χρήση ηλιακής ενέργειας II

5. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΠΟΥ ΚΑΝΕΙ ΧΡΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΒΑΘΜΙΔΑΣ

- **Περιγραφή και αρχές λειτουργίας του συστήματος**
- **Θεωρητική ανάλυση**
- **Πειραματική ανάλυση**
- **Παραμετροποίηση του συστήματος**
- **Πρόγραμμα επίλυσης MATLAB**

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ

ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

- **A** = επιφάνεια σε m2
- **C** = συγκέντρωση άλατος (%)
- C_A = συγκέντρωση της ουσίας Α στο μείγμα (M)
- C_p = ειδική θερμότητα (J/Kg °C)
- **D** = διάμετρος (m)
- D_c = διάμετρος σωλήνα μετώπου στον συλλέκτη (m)
- F_R = παράγοντας θερμικής απολαβής συλλέκτη (αδιάστατος)
- **FT** = συντελεστής εναλλάκτη θερμότητας ($W/m^2 °C$)
- **g** = επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s2)
- **Gr** = αριθμός Grashof (αδιάστατος)
- **h** = συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με αγωγή (W/m^2K), οροφή (m)
- h_{fg} = λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης (J/kg)
- H_C = κάθετο ύψος από τον πυθμένα του ατμοποιητή έως την κορυφή του συλλέκτη (m)
- **I** = άμεση ηλιακή ακτινοβολία (W/m2), συνάρτηση Bessel πρώτης τάξης
- **Ja** = αριθμός Jacob (αδιάστατος)
- **k** = θερμική αγωγιμότητα (W/m K)
- **K** = συνάρτηση Bessel δεύτερης τάξης
- K_H = σταθερά νόμου Henry
- **l** = μήκος (m)
- L_1 = μήκος καναλιού υγρού στον συλλέκτη (m)
- **m** = ρυθμός ροής μάζας (kg/s)
- m_d = ημερήσια παραγωγή αφαλατωμένου νερού ανά μονάδα επιφανείας (kg/m2)
- m_e = στιγμιαία παραγωγή αφαλατωμένου νερού ανά μονάδα επιφανείας (kg/m2 s)
- m_y = ετήσια παραγωγή αφαλατωμένου νερού ανά μονάδα επιφανείας (kg/m2 y)
- **n** = ωφέλιμη ζωή (έτη)
- N_c = αριθμός παράλληλων μετώπων στον συλλέκτη
- $N_{d,I}$ = αριθμός ημερών στον μήνα I
- **NTU** = αριθμός μεταφερόμενων μονάδων (αδιάστατος)
- **Nu** = αριθμός Nusselt (αδιάστατος)
- **p** = περίμετρος (m)
- **P** = πίεση (Pa)
- P_A = πίεση ατμών του συστατικού Α (atm)
- **Pr** = αριθμός Prandtl (αδιάστατος)

- **Q** = ρυθμός μεταφοράς θερμότητας (W)

- **r** = ακτίνα (m)
- **r_p** = λόγος της πτώσης πίεσης στους συνδετικούς σωλήνες και στον εναλλάκτη θερμότητας προς αυτή στον συλλέκτη
- **Re** = αριθμός Reynolds (αδιάστατος)
- **S(F)** = εντροπία κορεσμένου υγρού (kJ/kg K)
- **S(FCR)** = εντροπία κορεσμένου υγρού στην κρίσιμη θερμοκρασία (kJ/kg K)
- **S(G)** = εντροπία κορεσμένου ατμού (kJ/kg K)
- **S(GCR)** = εντροπία κορεσμένου ατμού στην κρίσιμη θερμοκρασία (kJ/kg K)
- **t** = λεπτότητα (m), χρόνος (ώρες)
- **T** = θερμοκρασία (^{o}C)
- **T(CR)** = κρίσιμη θερμοκρασία (K)
- **T(S)** = θερμοκρασία κορεσμού (K)
- **U** = ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (W/m2 K)
- **V** = όγκος (m3)
- **V′** = ροή όγκου (m3/sec)
- **v** = ταχύτητα (m/s)
- **v′** = ρυθμός ατμοποίησης ανά μονάδα επιφανείας
- **Z** = ανύψωση (m)

Ελληνικά σύμβολα

- **ρ** = πυκνότητα (kg/m^3)
- **θ** = γωνία κλίσης
- **μ** = ιξώδες (N.s/m^2)
- **γ** = κινηματικό ιξώδες (m^2/s), ειδικό βάρος (N/m^3)
- **η** = αποδοτικότητα
- **ε** = αποδοτικότητα εναλλάκτη θερμότητας (αδιάστατη)
- **δ** = πάχος στρώματος (m)
- **β** = ογκομετρικός συντελεστής θερμικής επέκτασης (K^{-1}), γωνία κλίσης
- **β_T** = ογκομετρικός συντελεστής θερμικής επέκτασης (= 5*10^{-4} °C^{-1})
- **β_C** = συντελεστής επέκτασης άλατος(= 8*10^{-3} %$^{-1}$)
- **β_2** = εμπειρικός συντελεστής (= 4178.4 J/kg.°C)
- **α** = απορροφητικότητα (αδιάστατη)
- **τ** = διαπερατότητα του καλύμματος του συλλέκτη (αδιάστατη)

Δείκτες

- **a** = αναφοράς (ambient)
- **b** = πυθμένας (bottom)
- **c** = ψυχρό, υγροποιητής, συλλέκτης
- **D** = διάμετρος
- **e** = ατμοποίηση (evaporation)
- **env** = περιβάλλον
- **f** = φρέσκο νερό, παράγωγο (product), υγρό (fluid)
- **h** = θερμό, υδραυλικό, εναλλάκτης θερμότητας
- **i** = injection pipe, εσωτερικό (inside)
- **in** = είσοδος (input)
- **ins** = μόνωση (insulation)
- **L** = απώλειες (Loss)
- **max** = μέγιστο (maximum)
- **min** = ελάχιστο (minimum)
- **o** = εξωτερικό, έξοδος
- **s** = από το θάλαμο θαλασσινού νερού ή τον ατμοποιητή, επιφάνεια
- **Sat** = συνθήκες κορεσμού
- **u** = ωφέλιμο
- **v** = συνθήκες κορεσμένου ατμού
- **w** = σωλήνας αποβολής (withdrawal pipe)
- **0** = κατάσταση αναφοράς

Εκθέτες

- **1** = παρούσα τιμή
- **0** = προηγούμενη τιμή

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αφαλάτωση με χρήση ηλιακής ενέργειας. Έτσι στις σελίδες που ακολουθούν θα διαπιστώσουμε τους λόγους που διάφορα κράτη ανά τον πλανήτη επιλέγουν αυτήν την ενεργοβόρο και οικονομικά ασύμφορη διαδικασία για την παραγωγή φρέσκου νερού, τις μεθόδους με τις οποίες αυτή πραγματοποιείται καθώς και διάφορα συστήματα στα οποία κύρια πηγή ενέργειας είναι η ηλιακή, η οποία και συλλέγεται με απλούς εμπορικούς συλλέκετες.

Ιδιαίτερη ανάλυση γίνεται για ένα πρωτοποριακό σύστημα αφαλάτωσης το οποίο κάνει χρήση θερμότητας χαμηλής βαθμίδας και εκμεταλλεύεται για τη λειτουργία του φυσικές δυνάμεις όπως η βαρυτική. Στο πειραματικό τμήμα της εργασίας μάλιστα, γίνεται εφαρμογή για πιθανή λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος στην περιοχή των Αθηνών, με ενδιαφέροντα αποτελέσματα.

Όπως θα γίνει κατανοητό στα επόμενα κεφάλαια, η αφαλάτωση είναι μια πολλά υποσχόμενη διαδικασία. Η χρήση όμως ανανεώσιμων πηγών ως κύρια πηγή ενέργειας βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο, παρά τα συγκριτικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει.

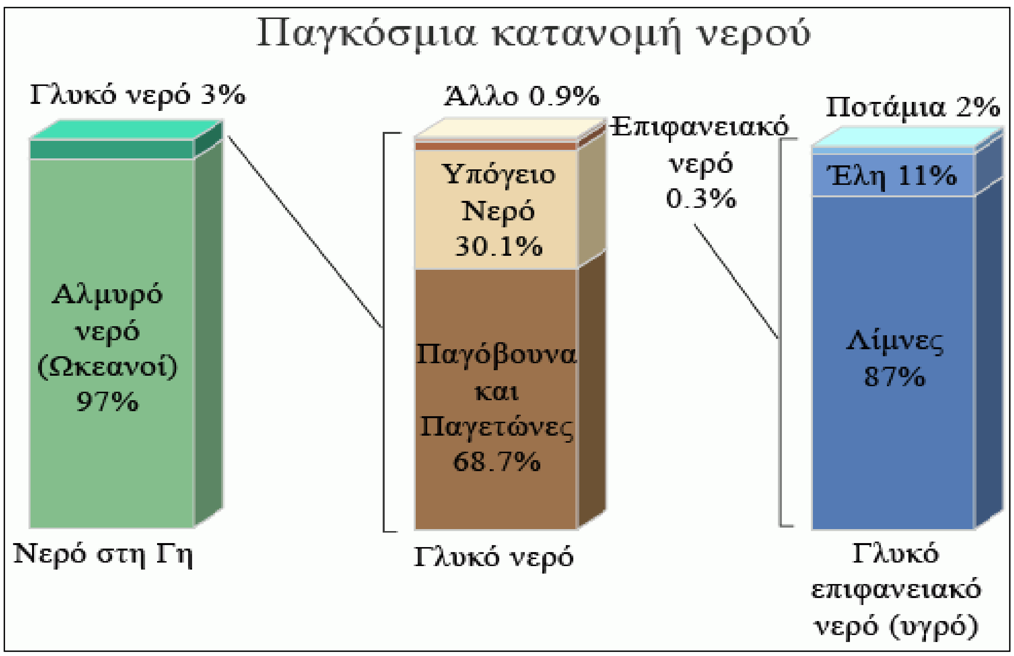
Γεώργιος Παλιεράκης

Αθήνα 2007

1. Το παγκόσμιο πρόβλημα της έλλειψης πόσιμου νερού

1.1 Γενικά στοιχεία

Το νερό αναμφισβήτητα αποτελεί πηγή ζωής για τον πλανήτη και κινητήρια δύναμη του ανθρώπινου πολιτισμού. Από τα παγκόσμια αποθέματα νερού, υπολογίζεται ότι το 97% περίπου αποτελεί το νερό των ωκεανών, το οποίο κυρίως λόγω της αλατότητάς του είναι σε πρώτη φάση ακατάλληλο προς χρήση από τους ανθρώπους. Το υπόλοιπο 3% είναι φρέσκο νερό, δυνητικά κατάλληλο για χρήση από τους ανθρώπους. Το μεγαλύτερο ποσοστό του φρέσκου νερού (68,7% περίπου) βρίσκεται με τη μορφή παγετώνων στους πόλους και στις κορυφές των οροσειρών. Ένα ποσοστό της τάξεως του 30,1% αποτελούν τα υπόγεια ύδατα, ενώ μόλις το 0,9% των παγκοσμίων αποθεμάτων φρέσκου νερού βρίσκεται σε λίμνες, ποτάμια, έλη κλπ.



Εικόνα 1: Παγκόσμια κατανομή υδάτινων πόρων

1.2 Το πρόβλημα της λειψυδρίας είναι παγκόσμιο

Νερό. Όσοι το έχουμε, θεωρούμε την ύπαρξή του λίγο έως πολύ δεδομένη. Αλλά μία γρήγορη ματιά ανά τον κόσμο και κυρίως η ανάγνωση των στοιχείων που αφορούν τις μετρήσεις των αποθεμάτων φρέσκου νερού παγκοσμίως, αποδεικνύουν ότι τα τελευταία μειώνονται δραματικά. Και ο κίνδυνος δεν είναι μακροπρόθεσμος, αλλά βρίσκεται πλέον στο κατώφλι μας. Ορισμένα χαρακτηριστικά παραδείγματα παρουσιάζονται παρακάτω:

- Στο **Μέξικο Σίτυ**, ο τοπικός πληθυσμός των 20 εκατομμυρίων κατοίκων αντιμετωπίζει οξύτατο πρόβλημα έλλειψης πόσιμου νερού, αφού αυτό καταναλώνεται με ρυθμούς κατά πολύ μεγαλύτερους από την αποκατάσταση του υδροφόρου στρώματος.

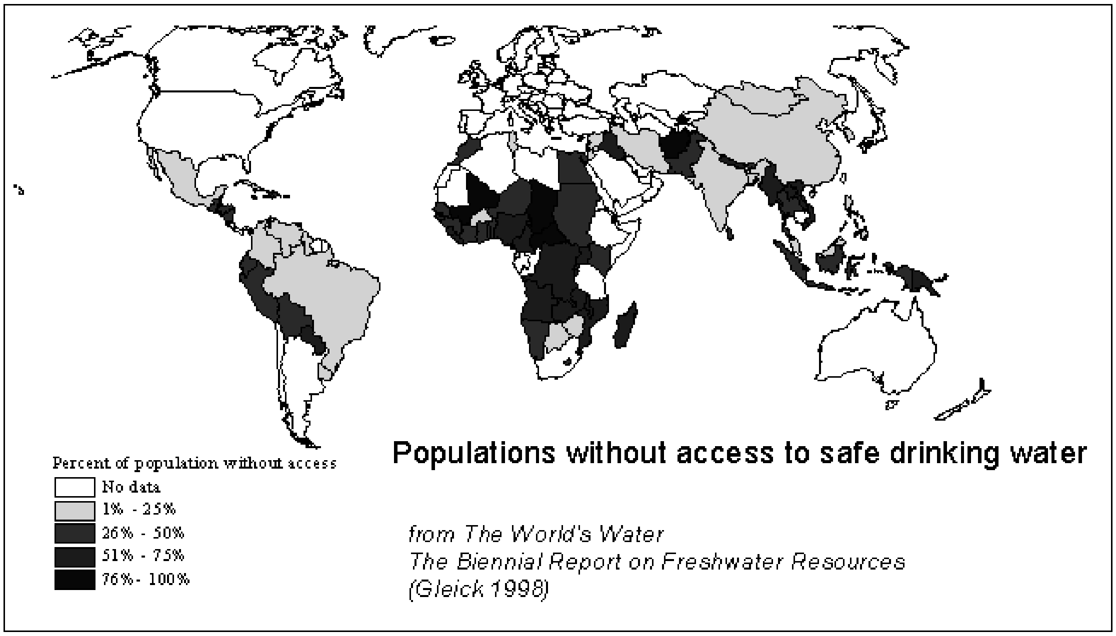
- Στην **περιοχή της Μεσοποταμίας**, η οποία υδροδοτείται κυρίως από τους ποταμούς Τίγρη και Ευφράτη, η απόφαση της Τουρκίας να κατασκευάσει φράγματα λόγω της λειψυδρίας, προκάλεσε την έντονη αντίδραση της Συρίας και του Ιράκ που έχουν σαν μοναδική πηγή φρέσκου νερού τους δύο αυτούς ποταμούς.

- Στην ξηρή και άνυδρη **βόρεια Κίνα** περίπου 300 πόλεις αντιμετωπίζουν πρόβλημα με τα αποθέματα φρέσκου νερού. Το πρόβλημα δημιουργήθηκε λόγω της μείωσης των βροχοπτώσεων αλλά και της υπερκατανάλωσης στις αγροτικές καλλιέργειες. Τώρα οι τοπικές αρχές περιορίζουν την χρήση νερού στα χωράφια με αποτέλεσμα πολλοί αγρότες να οδηγούνται στην οικονομική καταστροφή.

- Στην **Ινδία** του ενός και πλέον δισεκατομμυρίου κατοίκων τα σημαντικότερα υδροφόρα στρώματα υπόκεινται σε υπερεκμετάλλευση, ενώ λόγω μόλυνσης του φρέσκου νερού με το νερό άρδευσης το χώμα πλέον εμφανίζει πολύ υψηλά ποσοστά αλατότητας και καθίσταται ακατάλληλο προς καλλιέργεια.

- Στο **Ισραήλ**, αν και χρησιμοποιούνται πολλές επαναστατικές τεχνολογίες εξοικονόμησης νερού, η υπερεκμετάλλευση των υδροφόρων στρωμάτων στην ακτογραμμή έχει σαν αποτέλεσμα να μολύνεται το πόσιμο νερό με θαλάσσιο. Αντίστοιχα προβλήματα αντιμετωπίζει και η γειτονική **Ιορδανία** της οποίας κύρια πηγή φρέσκου νερού είναι ο Ιορδάνης ποταμός.

- Στην **Αίγυπτο** της οποίας ο πληθυσμός αναμένεται να αγγίξει τα 100 εκατομμύρια μέχρι το 2025, οι βροχοπτώσεις είναι περιορισμένες. Η άρδευση στηρίζεται στις πλημμύρες του Νείλου και στο φράγμα του Ασουάν στα νότια. Οποιαδήποτε εμπλοκή στη ροή του νερού από το Σουδάν και την Αιθιοπία (όπου και βρίσκονται οι πηγές του ποταμού), θα οδηγήσουν την Αίγυπτο στη λιμοκτονία.



Εικόνα 2: Πληθυσμοί χωρίς πρόσβαση σε πόσιμο νερό

1.3 Τα αίτια της έλλειψης φρέσκου νερού

Σύμφωνα με ορισμένους επιστήμονες, η **κυριότερη αιτία** για την έλλειψη φρέσκου νερού σε παγκόσμιο επίπεδο είναι το **φαινόμενο της παγκόσμιας θέρμανσης ή αλλιώς φαινόμενο του θερμοκηπίου**. Μία αύξηση της μέσης θερμοκρασίας κυρίως στις ορεινές περιοχές μπορεί να αλλάξει την αναλογία πτώσης χιονοπτώσεων και βροχοπτώσεων, οδηγώντας σε περισσότερη βροχή και λιγότερο χιόνι. Αυτή η αλλαγή σημαίνει περισσότερες πλημμύρες και μεγαλύτερη απορροή κατά τη διάρκεια της περιόδου βροχών, ενώ λιγότερο νερό παραμένει με τη μορφή πάγου και χιονιού στα βουνά, προς χρήση κατά την περίοδο της ξηρασίας. Αυτοί λοιπόν οι παγετώνες των βουνών λιώνουν στο σύνολό τους. Για παράδειγμα η μάζα πάγου και χιονιού στα Ιμαλάια (η τρίτη μεγαλύτερη στον κόσμο μετά από αυτές των πόλων), αρχίζει να ελαττώνεται με επιταχυνόμενο ρυθμό. Το ανησυχητικό είναι ότι όλα τα μεγάλα ποτάμια της Ασίας έχουν τις πηγές τους σε αυτήν την παγωμένη μάζα. Ήδη σε αυτούς τους ποταμούς παρατηρείται μια πτώση της στάθμης των υδάτων κατά 12-20%.

Η **πληθυσμιακή αύξηση** αποτελεί επίσης μια σημαντική αιτία έλλειψης φρέσκου νερού παγκοσμίως. Ας μην ξεχνάμε άλλωστε ότι η ζήτηση φρέσκου νερού είναι άμεσα εξαρτημένη και μεταβάλλεται ανάλογα με τη δημογραφική αύξηση σε παγκόσμια κλίμακα. Οι περισσότερες προβλέψεις υπολογίζουν ότι ο παγκόσμιος πληθυσμός θα σταθεροποιηθεί στα 8,5 με 9 δισεκατομμύρια ανθρώπους έως το 2050 ενώ το μεγαλύτερο μέρος της πληθυσμιακής αύξησης θα αφορά τις αναπτυσσόμενες χώρες. Η αύξηση του πληθυσμού δεν πυροδοτεί μόνο την κατανάλωση φρέσκου νερού για οικιακή χρήση, αλλά επιπλέον αυξάνει και την κατανάλωση για τις γεωργικές καλλιέργειες, για βιομηχανική χρήση, για την παραγωγή ενέργειας κλπ. Άλλωστε δεν είναι τυχαίο ότι ο τριπλασιασμός του παγκόσμιου πληθυσμού τον τελευταίο αιώνα συνοδεύτηκε από εξαπλασιασμό της κατανάλωσης φρέσκου νερού.

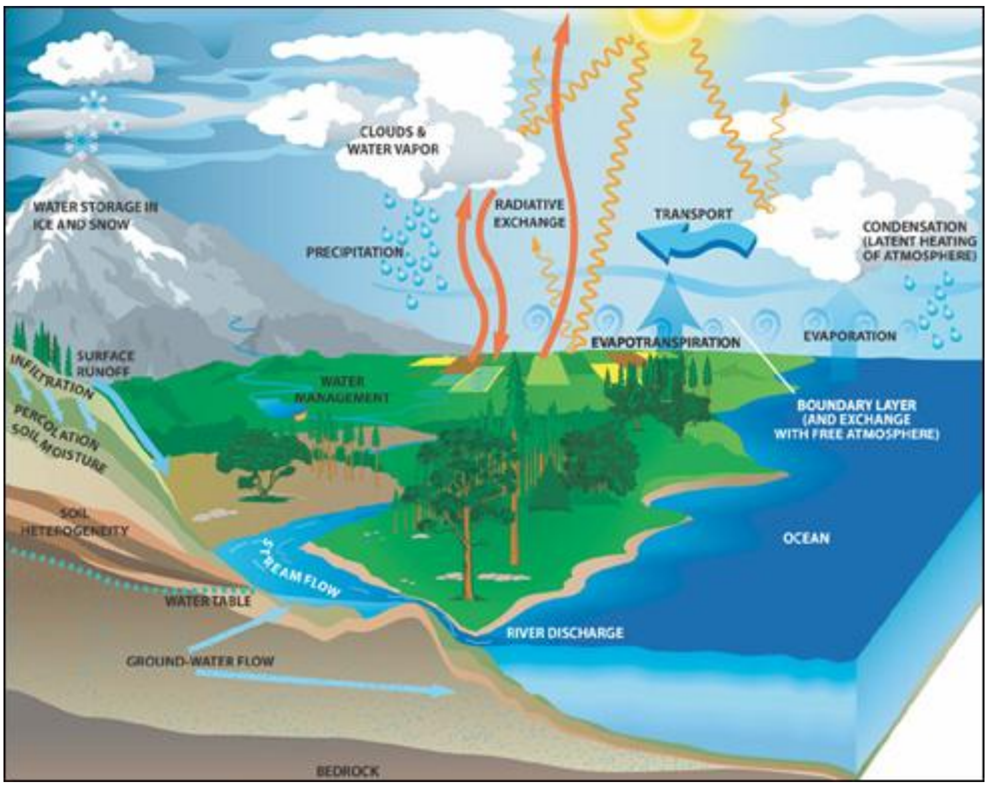
Υψηλότερα εισοδήματα σημαίνουν μεγαλύτερη κατανάλωση αγαθών, η παραγωγή των οποίων απαιτεί νερό. Τα εισοδήματα αυξάνουν σε ορισμένες χώρες όπως η Κίνα και η Ινδία, παράλληλα με την οικονομική ανάπτυξη και η αποσύνδεση τους από την κατανάλωση νερού αποτελεί μεγάλη πρόκληση για το μέλλον.

Η **αστυφιλία** είναι και αυτή μια δημογραφική παράμετρος που οδηγεί σε αλόγιστη χρήση νερού. Το ποσοστό του παγκόσμιου πληθυσμού που κατοικεί στις πόλεις, από 14% που ήταν το 1900 έφτασε στο 29% στα 1950 και αναμένεται να ξεπεράσει το 60% μέχρι το 2030. Η αστυφιλία είχε δύο πολύ σημαντικές επιπτώσεις στην χρήση φρέσκου νερού. Καταρχήν πολλές πόλεις εκτρέπουν τους τεράστιους όγκους των επιφανειακών υδάτων ή υπερεκμεταλλεύονται τα υδροφόρα στρώματα, ενώ και τα μη επεξεργασμένα λύματα από αυτές αποτελούν πολύ σημαντική εστία ρύπανσης του υδροφόρου ορίζοντα.

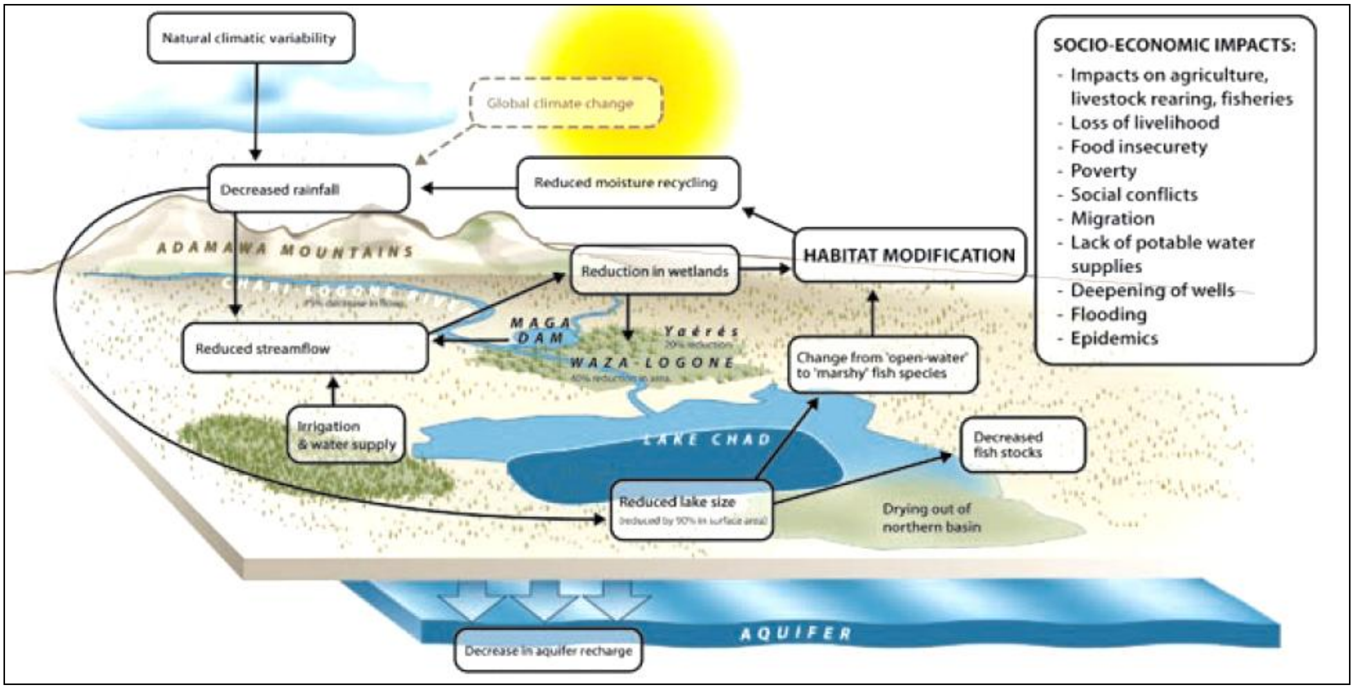
Όπως είναι φυσιολογικό ένας πληθυσμός συνεχώς αυξανόμενος καταναλώνει περισσότερη τροφή, για την παραγωγή της οποίας απαιτούνται όλο και μεγαλύτεροι όγκοι φρέσκου νερού. Άρα η **αλόγιστη χρήση του φρέσκου νερού στις αγροτικές καλλιέργειες, στην κτηνοτροφία, στο εμπόριο** αποτελεί σημαντική αιτία της παρατηρούμενης μείωσης των αποθεμάτων. Η βασισμένη στην άρδευση γεωργία, έχει καλύψει το 80% της αύξησης στη ζήτηση τροφής παγκοσμίως από το 1960 μέχρι σήμερα. Στις περισσότερες περιοχές η εκτροπή της ροής των ποταμών, οι γεωτρήσεις για την εξαγωγή υπόγειων υδάτων και η αυξημένη δυνατότητα αποθήκευσης του νερού καθιστούν την άρδευση εφικτή. Σε αρκετές περιπτώσεις όμως η άρδευση πραγματοποιείται με εξαιρετικά αντιοικονομικό τρόπο. Για παράδειγμα στον Σενεγάλη ποταμό στην κεντρική Αφρική, ποσοστό μικρότερο του 50% του νερού χρησιμοποιείται αποδοτικά στις καλλιέργειες ρυζιού και καλαμποκιού. Οι περισσότεροι καλλιεργητές δεν κατανοούν το οικονομικό κόστος της σπατάλης νερού ή δεν διαθέτουν τα απαραίτητα κεφάλαια για την βελτίωση των τεχνολογιών άρδευσης. Όσον αφορά το **εμπόριο** αυτό παρέχει και δυνατότητες αλλά και κινδύνους για τα παγκόσμια αποθέματα νερού. Από τη μία μπορεί να προωθήσει την πιο αποτελεσματική χρήση του νερού για την παραγωγή προϊόντων, από την άλλη όμως οι αυξανόμενες τιμές στις εξαγωγές αγροτικών προϊόντων και η απελευθέρωση του παγκοσμίου εμπορίου μπορεί να οδηγήσουν στην εξάπλωση μεθόδων άρδευσης που απαιτούν υψηλές ποσότητες φρέσκου νερού.

Εικόνα 3: Η επιφάνεια της Νεκράς Θάλασσας έχει μειωθεί κατά το 1/3 από το 1975 έως σήμερα.

Τέλος δεν θα πρέπει να ξεχνάμε ότι σχεδόν το 20% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρισμού, προέρχεται από **υδροηλεκτρικά εργοστάσια**, ενώ υπάρχει και προοπτική περεταίρω αύξησης ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες. Παρά το γεγονός ότι η υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελεί το επίκεντρο σε πολλά προγράμματα τοπικής και περιφερειακής ανάπτυξης, πολλές φορές οδηγούμαστε σε πολύ υψηλά περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά κόστη. Στην ακτή της Σομαλίας για παράδειγμα, λιγότερο από το 50% της παραγόμενης ενέργειας αξιοποιείται κι όμως το αντίκτυπο στα αποθέματα φρέσκου νερού είναι ήδη ορατά. Ανάλογα προβλήματα αντιμετωπίζουν και χώρες όπως η Κίνα, το Λάος και η Καμπότζη όπου νέα υδροηλεκτρικά εργοστάσια έχουν ήδη παραδοθεί ή πρόκειται να παραδοθούν τα αμέσως επόμενα χρόνια.



Εικόνα 4: Ο κύκλος του νερού



Εικόνα 5: Η αλλαγή του κλίματος προκαλεί μείωση των αποθεμάτων στη λίμνη Τσαντ με σοβαρές επιπτώσεις στο οικοσύστημα

1.4 Οι επιπτώσεις από την έλλειψη φρέσκου νερού

Σήμερα υπολογίζεται ότι περίπου 1.1 δισεκατομμύρια άνθρωποι δεν έχουν πρόσβαση σε καθαρό πόσιμο νερό. Τα Ηνωμένα Έθνη βέβαια υπολογίζουν σε 2,6 δισεκατομμύρια τους ανθρώπους που δεν διαθέτουν νερό κατάλληλο για απολύμανση. Τα δύο ζητήματα είναι αλληλένδετα μεταξύ τους, αφού ελλείψη νερού για απολύμανση επέρχεται μόλυνση και του πόσιμου νερού από τα απόβλητα. Άμεσο αποτέλεσμα είναι **οι ασθένειες και οι θάνατοι** ανθρώπων που χρησιμοποιούν μολυσμένα αποθέματα νερού. Οι ασθένειες πλήττουν κυρίως τους πληθυσμούς του λεγόμενου τρίτου κόσμου, όπου υπολογίζεται ότι περίπου 3900 παιδιά πεθαίνουν κάθε μέρα από διάρροια λόγω μη ύπαρξης πηγών φρέσκου πόσιμου νερού.

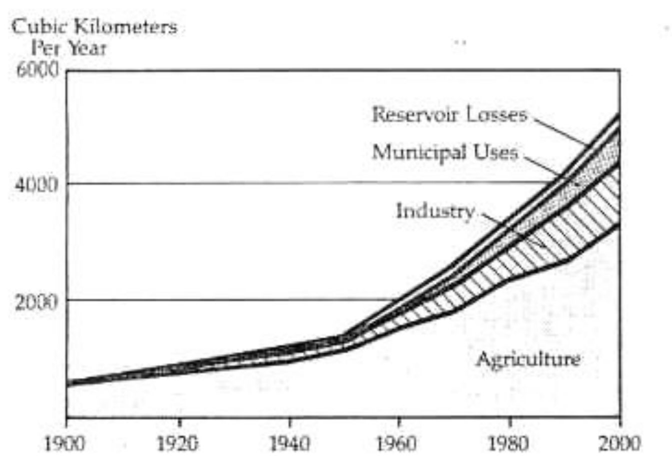
Επιπλέον με δεδομένο ότι παγκοσμίως υπάρχουν περίπου 260 ποτάμια συστήματα από τα οποία υδροδοτούνται με φρέσκο νερό πάρα πολλές χώρες, είναι φυσικό να **αναπτύσσονται διαμάχες** μεταξύ αυτών για τον **έλεγχο των υδάτινων αποθεμάτων**. Ήδη έχουμε αναφέρει την περίπτωση των ποταμών Τίγρης και Ευφράτης οι οποίοι παρέχουν νερό σε Τουρκία, Συρία και Ιράκ. Το γεγονός ότι οι ανάγκες των τριών αυτών χωρών είναι πολύ μεγαλύτερες από τα αποθέματα των ποταμών αποτελεί αιτία έντασης και διαμάχης. Ανάλογα περιστατικά προέκυψαν μεταξύ Ουγγαρίας και Τσεχίας για τα νερά του Δούναβη, μεταξύ Βορείου και Νοτίου Κορέας, Ισραήλ και Παλαιστίνης, Αιγύπτου και Αιθιοπίας κλπ.

Σημαντική είναι και η έλλειψη φρέσκου νερού για την χλωρίδα και την πανίδα, δηλαδή το οικοσύστημα. Λίμνες, ποτάμια, ρεύματα, βάλτοι είναι προφανώς άμεσα εξαρτημένα από την διαθεσιμότητα νερού, αλλά το ίδιο συμβαίνει και με τα δάση και άλλα πιο ορεινά οικοσυστήματα τα οποία αντιμετωπίζουν **σημαντικές μεταβολές στην παραγωγικότητα** όσο τα αποθέματα νερού ελαττώνονται. Στην Ευρώπη η ραγδαία εξαφάνιση των υγροτόπων είχε σαν αποτέλεσμα ανάλογη **μείωση στην βιοποικιλότητα**. Για παράδειγμα στην Σκωτία, στην περιοχή του Αμπερντήν η ξήρανση των βάλτων είχε σαν αποτέλεσμα την εξαφάνιση πολλών ειδών, μεταξύ των οποίων και ένα σπάνιο είδος χήνας.

Τέλος φαινόμενα όπως η **μετανάστευση**, οι **πλημμύρες λόγω διάβρωσης** και η **φτώχεια** θα κλιμακωθούν τα επόμενα χρόνια ακριβώς λόγω της εξάντλησης των αποθεμάτων φρέσκου νερού σε παγκόσμιο επίπεδο.

Itaipú Dam, Paraguay/Brazil. The world's largest hydroelectric facility.
Credit: Itaipu Binacional

Εικόνα 6: Τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια έχουν σημαντικές οικολογικές επιπτώσεις



Εικόνα 7: Η γεωργία καταναλώνει την μερίδα του λέοντος σε φρέσκο νερό

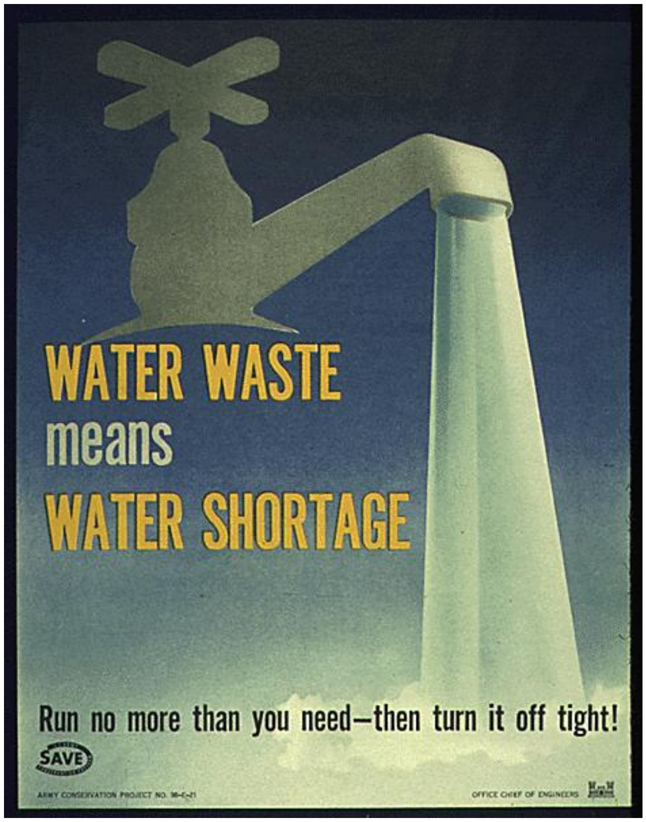
1.5 Η κατάσταση στην Ελλάδα

Η Ελλάδα, όπως εξάλλου και ολόκληρος ο πλανήτης, βρίσκεται τα τελευταία χρόνια αντιμέτωπη με το μείζον πρόβλημα της **λειψυδρίας**. Η κατάσταση αυτή οφείλεται σε μια σειρά από αίτια όπως **η έλλειψη σχεδιασμού, η κακή διαχείριση των υδάτινων αποθεμάτων-πόρων, η καταστροφή των δασών, η περιφρόνηση των σχετικών νόμων και η μείωση των βροχοπτώσεων λόγω κλιματικών αλλαγών**. Οι προβλέψεις είναι εφιαλτικές. Έως και το 2100 προβλέπεται αύξηση της μέσης θερμοκρασίας έως και 2 βαθμούς Κελσίου, οι βροχοπτώσεις θα μειωθούν σημαντικά ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες, ενώ θα υπάρχει και αστάθεια στην ένταση και την συχνότητα τους. Όλα αυτά συνεπάγονται μείωση της απορροής και υποβάθμιση της ποιότητας του νερού που σε συνδυασμό με την αυξημένη αστική και γεωργική κατανάλωση, θα οδηγήσει σε μείωση της γεωργικής παραγωγής, αποδυνάμωση του αγροτικού πληθυσμού και πιθανόν διαμάχες για τη χρήση νερού. Τα ποσοστά βροχοπτώσεων ανά την χώρα ελαττώνονται σε περιοχές όπως η Κρήτη, τα νησιά του Αιγαίου αλλά και τμήματα της ηπειρωτικής Ελλάδας. Άμεση συνέπεια είναι οι περιοχές αυτές να αντιμετωπίζουν τον μεγαλύτερο κίνδυνο εξάντλησης των υδάτινων αποθεμάτων τους στο εγγύς μέλλον.

1.6 Μέθοδοι αντιμετώπισης της λειψυδρίας

Οι ειδικοί σε θέματα περιβάλλοντος και νερού, κρούουν τον κώδωνα του κινδύνου για την ανάγκη έναρξης μιας παγκόσμιας «Μπλε Επανάστασης», μέσω της οποίας θα επιτευχθεί η συντήρηση και η καλύτερη διαχείριση των αποθεμάτων φρέσκου νερού υπό το πρίσμα της αυξανόμενης ζήτησης αλλά και της περιβαλλοντικής μόλυνσης. Μπορεί για ορισμένες χώρες με ραγδαία πληθυσμιακή αύξηση, να είναι ήδη πολύ αργά για να αποφύγουν την κρίση, εντούτοις η «Μπλε Επανάσταση» είναι απαραίτητη για να κατευθύνει τις λύσεις για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας σε τοπικό, εθνικό ή ακόμα και υπερεθνικό επίπεδο. Τέτοιου είδους στρατηγικές διαχείρισης θα περιλαμβάνουν τον **καθαρισμό και την επαναχρησιμοποίηση των αστικών λυμάτων**, την **βελτίωση της απόδοσης των τεχνολογιών άρδευσης**, την **οικονομία στη χρήση νερού για βιομηχανικές εφαρμογές**, τον **περιορισμό της αλόγιστης χρήσης νερού εντός και εκτός οικίας ή ακόμα και τη χρήση φυτών με μικρές ανάγκες σε νερό και αντοχή στην ξηρασία και υλικών που έχουν την ικανότητα να διατηρούν την υγρασία**. Σε εθνικό επίπεδο η δημιουργία ενός ενιαίου φορέα διαχείρισης των υδάτινων αποθεμάτων κρίνεται απαραίτητη.

Για την ενίσχυση των αποθεμάτων φρέσκου νερού σε παγκόσμια κλίμακα, μια τεχνολογικά εφικτή και συμφέρουσα λύση είναι και η **αφαλάτωση**, ουσιαστικά η διαδικασία μετατροπής του νερού των ωκεανών σε πόσιμο και κατάλληλο για χρήση. Με δεδομένο ότι, όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή, το 97% του νερού στον πλανήτη είναι θαλάσσιο, η αφαλάτωση φαντάζει ως η μοναδική λύση για ουσιαστική αντιμετώπιση του προβλήματος της λειψυδρίας σε παγκόσμιο επίπεδο.



Εικόνα 8: Το πρόβλημα της λειψυδρίας είναι διαχρονικό. Αφίσα της περιόδου 1941 – 1945 που καλεί τους πολίτες να κάνουν οικονομία.

2. Η αφαλάτωση

2.1 Τι είναι η αφαλάτωση

Με τον όρο **αφαλάτωση** αναφερόμαστε σε κάθε επιμέρους διαδικασία απομάκρυνσης του πλεονάζοντος αλατιού και άλλων μετάλλων από το νερό, με σκοπό να παράγουμε φρέσκο νερό κατάλληλο για κατανάλωση από ζώα και άρδευση. Επιπλέον στην περίπτωση που απομακρυνθεί το σύνολο του αλατιού, το παραγόμενο νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για κατανάλωση από τους ανθρώπους. Το νερό το οποίο υφίσταται αφαλάτωση μπορεί να είναι θαλάσσιο, υφάλμυρο ή ακόμα και επεξεργασμένα λύματα. Σε ορισμένες περιπτώσεις η διαδικασία παράγει **επιτραπέζιο αλάτι** ως υποπροϊόν.

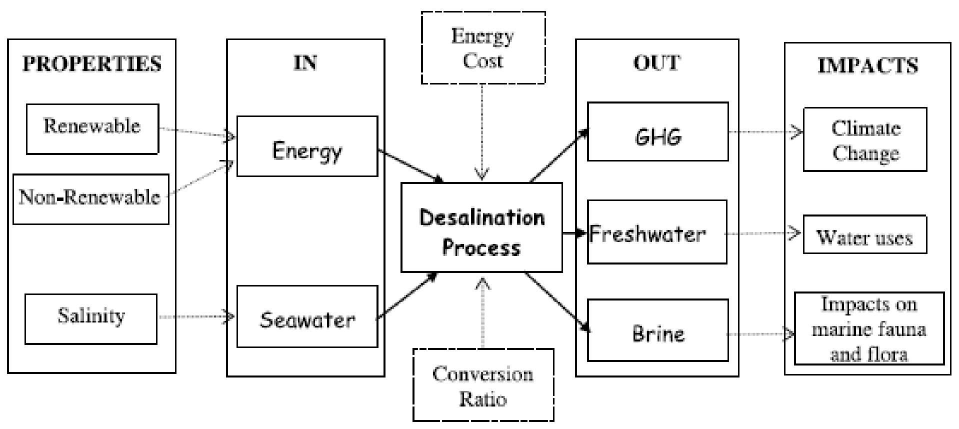


Fig. 1. Overall metabolism of the desalination process (own elaboration).

Εικόνα 9: Σχηματικό διάγραμμα των εισόδων και των παραμέτρων ενός συστήματος αφαλάτωσης. Εισόδους αποτελούν η ενέργεια (ανανεώσιμη ή μη) και το αλμυρό νερό και εξόδους το φρέσκο νερό, η άλμη (brine) και τα αέρια του θερμοκηπίου (GHG)

2.2 Η χρήση της αφαλάτωσης σε παγκόσμιο επίπεδο

Η **αφαλάτωση θαλάσσιου νερού** είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στη Μέση Ανατολή (εξαιτίας της εκτεταμένης ερημοποίησης) και στην Καραϊβική. Επιπλέον τα τελευταία χρόνια βρίσκει εφαρμογή και σε περιοχές όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Βόρεια Αφρική, η Σιγκαπούρη, η Ισπανία, η Αυστραλία και η Κίνα. Η **αφαλάτωση υφάλμυρου νερού** πραγματοποιείται κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες, λόγω συμφωνιών που έχουν υπογραφεί με την κυβέρνηση του Μεξικό σχετικά με την ποιότητα του νερού των ποταμών που εισέρχονται σε αυτό. Τέλος ορισμένες χώρες της Μέσης Ανατολής, με τεράστια ενεργειακά αποθέματα, παράγουν **αφαλατωμένο νερό και για άρδευση**. Ενδεικτικό είναι ότι οι μονάδες αφαλάτωσης της Σαουδικής Αραβίας καλύπτουν το 24% της παγκόσμιας παραγωγής. Η μεγαλύτερη μονάδα βρίσκεται στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, χρησιμοποιεί τη μέθοδο MSF (multi stage flash distillation) και παράγει 300 εκατομμύρια κυβικά μέτρα αφαλατωμένου νερού ετησίως.

2.3 Μέθοδοι αφαλάτωσης

Μέθοδοι αφαλάτωσης (Desalination methods):

- **Απόσταξη (Distillation)**

- Multi stage flash (MSF)
- Multiple effect evaporator (MED/ME)
- Συμπύκνωση ατμού (Vapor compression evaporation, VC)
- Εξαέρωση/Συμπύκνωση (evaporation/condensation)

- **Μέθοδοι με μεμβράνες (Membrane processes)**

- Ηλεκτρόλυση (Electro dialysis reversal, EDR)
- Αντίστροφη όσμωση (Reverse osmosis, RO)
- Νανόφιλτρα (Nanofiltration, NF)
- Ευθεία όσμωση (Forward osmosis, FO)
- Διύλιση με μεμβράνες (Membrane distillation, MD)

- **Πάγωμα (freezing)**
- **Γεωθερμική αφαλάτωση (Geothermal desalination)**
- **Κρυσταλλοποίηση με υδρικό αιθάνιο (Methane hydrate crystallization)**
- **Υψηλής ποιότητας ανακύκλωση νερού (High grade water recycling)**
- **Αφαλάτωση με χρήση ηλιακών συλλεκτών (Solar humidification HDH, MEH)**

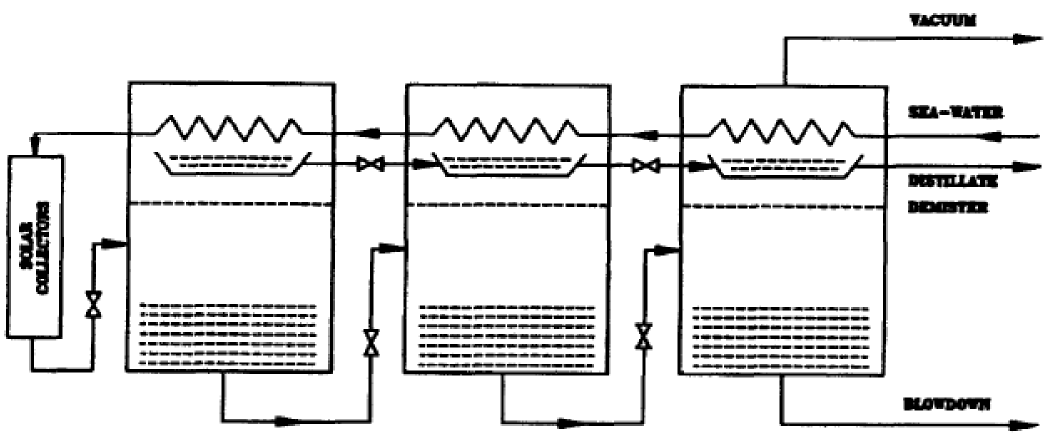
Πίνακας 1: Συνοπτική παρουσίαση των μεθόδων αφαλάτωσης

Διάφορα είδη μεθόδων αφαλάτωσης έχουν αναπτυχθεί. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να διακριθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- **<u>Θερμικές διεργασίες ή διεργασίες αλλαγής φάσης (Phase Change or Thermal Processes)</u>**

Πηγές θερμικής ενέργειας, όπως ορυκτά καύσιμα, πυρηνική ενέργεια ή ηλιακή ενέργεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την **ατμοποίηση (evaporation)** του αλμυρού νερού, το οποίο στην συνέχεια υπόκειται σε **υγροποίηση (condensation)** παράγοντας φρέσκο νερό. Οι διεργασίες αλλαγής φάσης που περιγράφονται εδώ είναι οι multi-stage flash, multi-effect boiling, vapor compression και freezing processes.

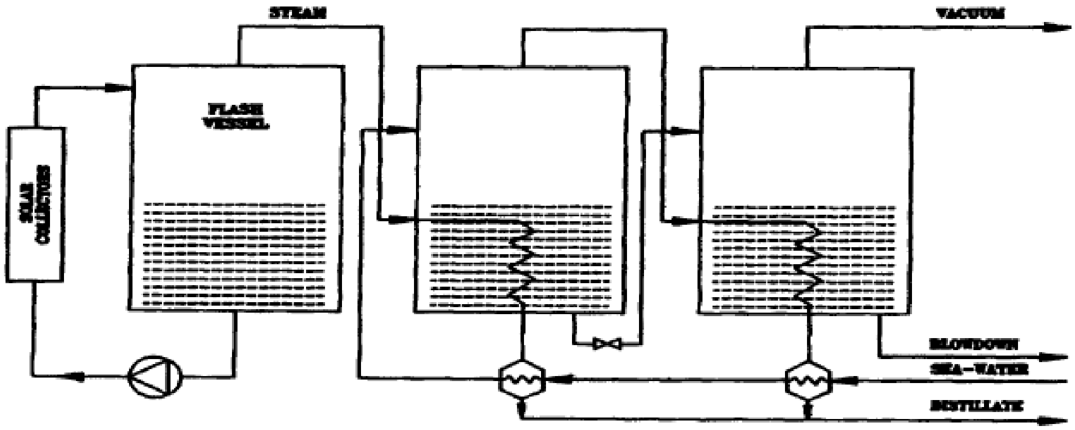
Η διαδικασία **Multi stage flash (MSF)**, αποτελείται από διάφορα στάδια. Σε κάθε στάδιο ο ατμός που έχει ήδη παραχθεί στο προηγούμενο, συμπυκνώνεται και προθερμαίνει το τροφοδοτικό νερό. Έτσι η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην θερμή πηγή και το θαλασσινό νερό διαχωρίζεται σε έναν αριθμό επιμέρους σταδίων. Γι' αυτόν το λόγο το όλο σύστημα πλησιάζει έναν ιδεατό βαθμό ανάκτησης της λανθάνουσας θερμότητας. Η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος απαιτεί κλίσεις πίεσης σε διαφορετικά στάδια. Δηλαδή η ελάχιστη πίεση στο επόμενο στάδιο είναι μικρότερη από την ελάχιστη πίεση στο προηγούμενο στάδιο. Η Εικόνα 10 δείχνει ένα τέτοιο σύστημα.



Εικόνα 10: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου Multi Stage Flash (MSF).

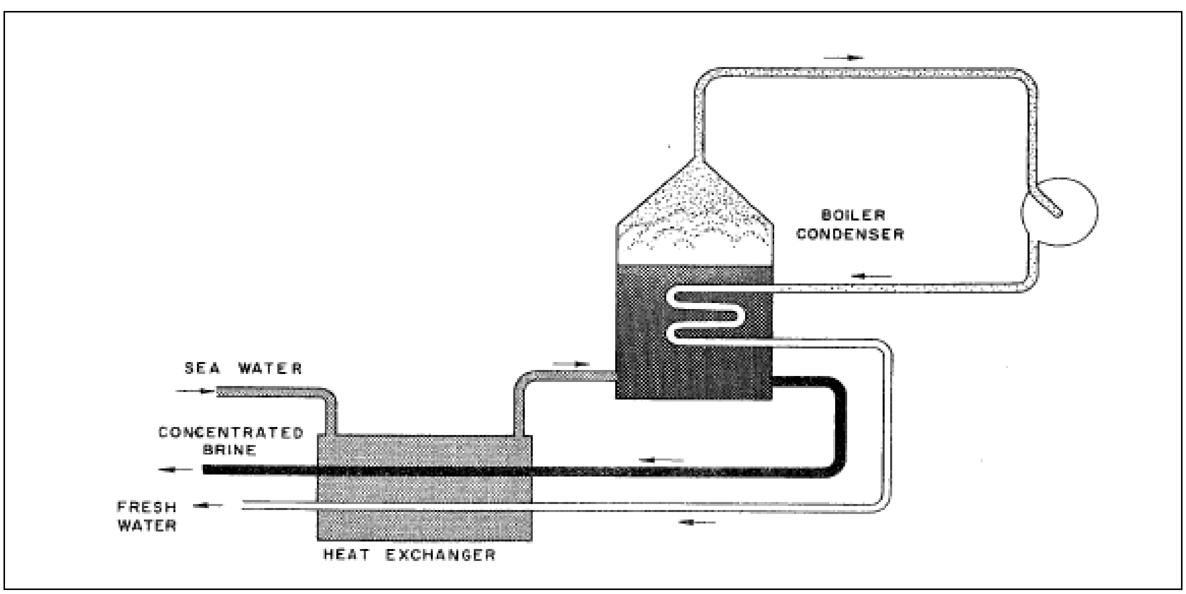
Το θαλασσινό νερό, προθερμασμένο στα διάφορα στάδια, εισέρχεται στον ηλιακό συλλέκτη, όπου θερμαίνεται κοντά στην θερμοκρασία κορεσμού στην μέγιστη πίεση λειτουργίας του συστήματος. Καθώς το νερό εισέρχεται στο πρώτο στάδιο, μέσω ενός στομίου, η πίεση του ελαττώνεται και υπερθερμαίνεται οπότε μεταπίπτει σε ατμό. Ο ατμός που παράγεται περνάει μέσα από έναν διαχωριστή για την απομάκρυνση σταγονιδίων άλμης και στην συνέχεια οδηγείται στον εναλλάκτη θερμότητας όπου και συμπυκνώνεται. Η διεργασία αυτή επαναλαμβάνεται σε διάφορα στάδια.

Η μέθοδος **Multiple effect evaporator (MED/ME) ή Multi-effect boiling (MEB)** αποτελείται από έναν αριθμό στοιχείων που καλούνται διεθνώς effects. Ο ατμός από το ένα effect περνάει στο επόμενο, όπου συμπυκνώνεται προκαλώντας ταυτόχρονα εξάτμιση ενός μέρους του θαλασσινού νερού. Και αυτή η διαδικασία απαιτεί ότι το επόμενο effect θα πρέπει να διατηρείται σε πίεση χαμηλότερη σε σχέση με το προηγούμενο από το οποίο προήλθε ο ατμός. Στην Εικόνα 11 που ακολουθεί φαίνεται ένα σχηματικό διάγραμμα του εν λόγω συστήματος.



Εικόνα 11: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου Multiple Effect Evaporator (MED/ME)

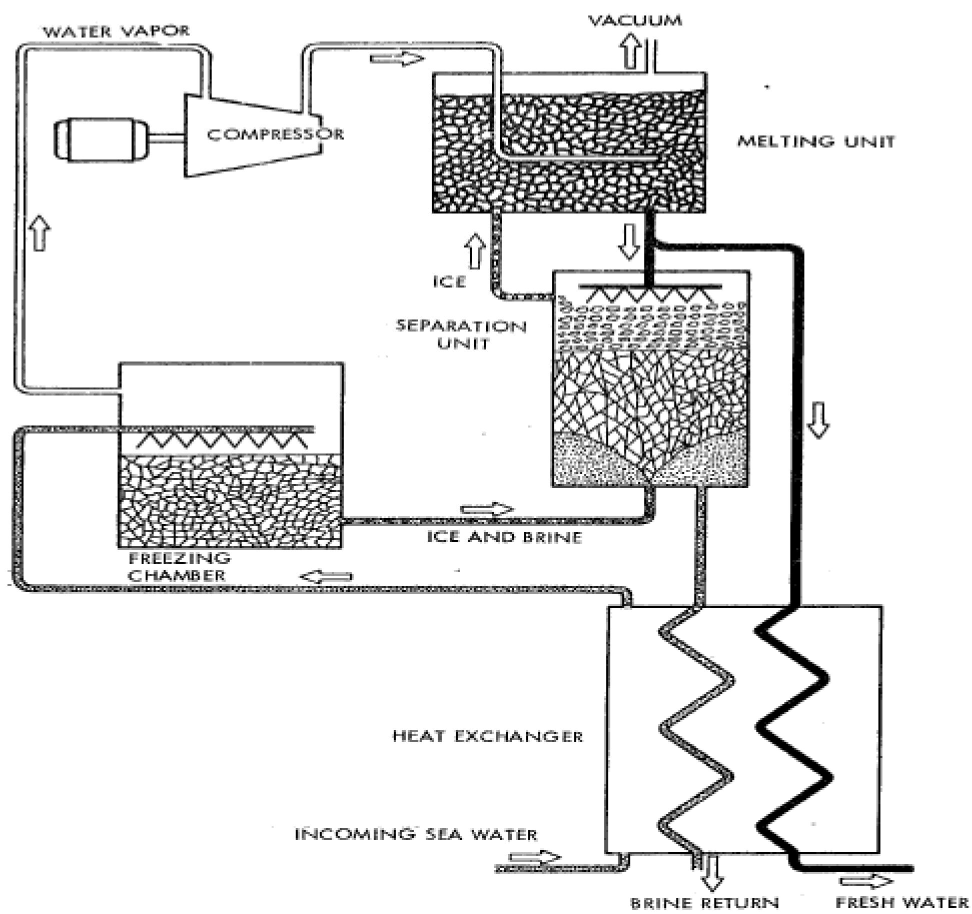
Σε αυτό το σύστημα το τροφοδοτικό νερό περνάει μέσα από εναλλάκτες θερμότητας για προθέρμανση και στην συνέχεια αντί να εισέρχεται στον ηλιακό συλλέκτη ή στον θερμαντή, εισέρχεται στην κορυφή του πρώτου effect όπου το θερμό ρεύμα ανεβάζει την θερμοκρασία του σε αυτήν του κορεσμού για την αντίστοιχη πίεση. Στην συνέχεια μία επιπλέον ποσότητα ατμού από τον ηλιακό συλλέκτη χρησιμοποιείται για την εξάτμιση. Ο παραγόμενος ατμός χρησιμοποιείται κατά ένα τμήμα για την θέρμανση του εισερχόμενου νερού και κατά το υπόλοιπο παρέχει θερμότητα στο επόμενο effect. Επιπλέον η αισθητή θερμότητα της συμπύκνωσης χρησιμοποιείται για την θέρμανση του τροφοδοτικού νερού.



Εικόνα 12: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου Vapor Compression (VC)

Η μέθοδος **Vapor compression evaporation (VC)**, στηρίζεται στο ότι η συμπίεση του ατμού οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης αυτού. Σε αυτή τη διεργασία η τροφοδοσία θερμαίνεται συνήθως με ατμό, και μέρος αυτής ατμοποιείται. Ο παραγόμενος ατμός, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 12, συμπιέζεται χρησιμοποιώντας έναν μηχανικό συμπιεστή ή με ανάμειξη με μικρές ποσότητες ατμού υψηλής πίεσης και επιστρέφει μέσω ενός αγωγού στο θάλαμο, όπου συμπυκνώνεται και η λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης αποδίδεται στην τροφοδοσία ένα μέρος της οποία ατμοποιείται και συμπιέζεται ξανά ακολουθώντας μία κυκλική διαδικασία. Στη μηχανική συμπίεση που είναι και η πιο συνηθισμένη, μία ξεχωριστή πηγή ατμού απαιτείται μόνο για την έναρξη , αφού στην συνέχεια η διαδικασία μετασχηματίζει μηχανική ενέργεια για να παράγει θερμότητα κάνοντας με αυτόν τον τρόπο περιττή την ύπαρξη ενός μεγάλου ατμοπαραγωγού.

Η **μέθοδος παγώματος ή Freezing process** στηρίζεται στο φαινόμενο του ότι όταν το αλμυρό νερό ψύχεται δημιουργούνται κρύσταλλοι πάγου που δεν περιέχουν αλάτι. Το προς ψύξη θαλασσινό νερό εισέρχεται στον θάλαμο παγώματος (Εικόνα 13) για τον σχηματισμό πάγου και μικρής ποσότητας υδρατμού.



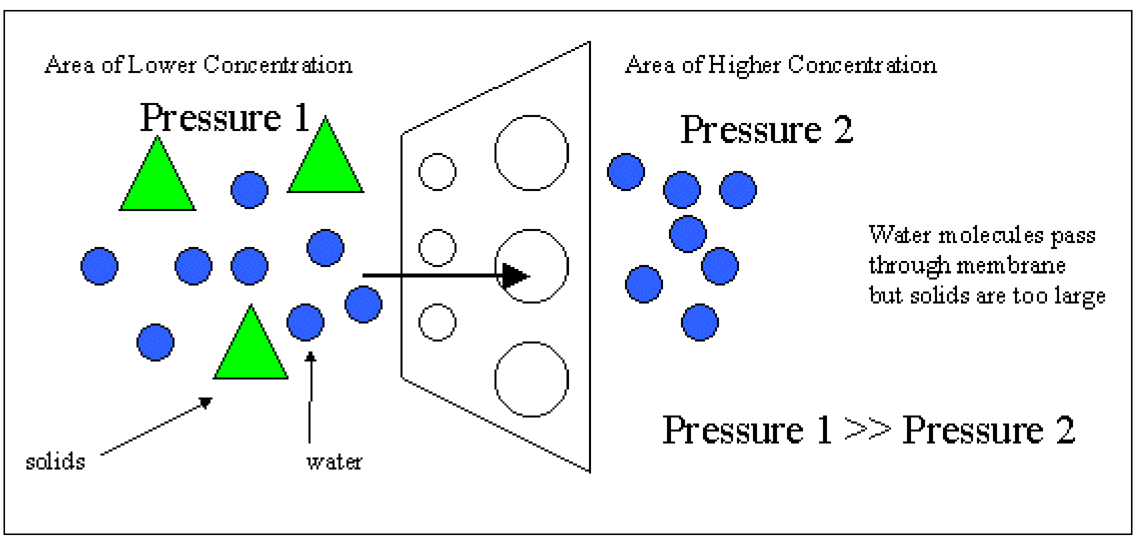
Εικόνα 13: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου παγώματος (Freezing process)

Ο πάγος και η άλμη τότε μεταφέρονται σε έναν θάλαμο διαχωρισμού όπου οι κρύσταλλοι πάγου πλένονται από το αλάτι και οδηγούνται στον θάλαμο για υγροποίηση. Ο υδρατμός που παράγεται στον θάλαμο παγώματος συμπιέζεται και παρέχεται στον θάλαμο υγροποίησης, προκαλώντας το λιώσιμο του πάγου ενώ ο ίδιος ο ατμός συμπυκνώνεται, αποτελώντας τμήμα του προϊόντος. Κύριο πλεονέκτημα αυτής της διεργασίας είναι ότι λειτουργεί σε αρκετά χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τις προηγούμενες.

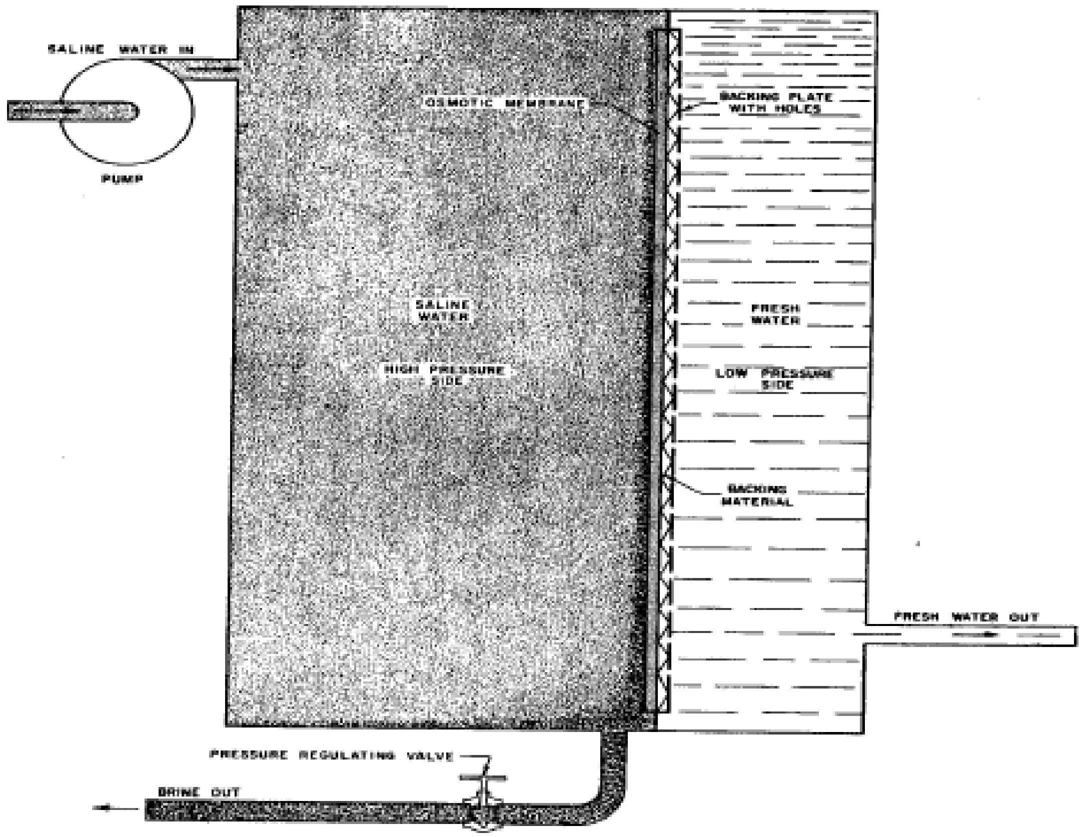
- **Διεργασίες μονής φάσης ή διεργασίες με μεμβράνες (Single Phase or Membrane Processes)**

Οι διεργασίες που απαιτούν ηλεκτρισμό ή μηχανική δύναμη για την αφαλάτωση περιλαμβάνουν:

Την **αντίστροφη όσμωση ή reverse osmosis (RO)** κατά την οποία όταν το φρέσκο νερό και το θαλάσσιο νερό διαχωρίζονται σε τμήματα από μία ημιπερατή μεμβράνη , το φρέσκο νερό θα περάσει διαμέσου της μεμβράνης λόγω όσμωσης. Στις Εικόνες 14,15 που ακολουθούν φαίνεται η όλη διαδικασία. Η όσμωση αναφέρεται στην κίνηση του νερού από μια περιοχή υψηλής συγκέντρωσης σε μια περιοχή χαμηλής συγκέντρωσης. Άρα η αντίστροφη όσμωση είναι η εξαναγκασμένη (με χρήση αντλιών) κίνηση του νερού από μια περιοχή χαμηλής συγκέντρωσης σε μια περιοχή υψηλής συγκέντρωσης. Όταν λοιπόν η πίεση του αλμυρού νερού ξεπερνά την φυσική πίεση όσμωσης, το φρέσκο νερό θα περάσει διαμέσου της ημιπερατής μεμβράνης στην αντίστοιχη πλευρά, αφήνοντας τα άλατα στην συγκεντρωμένη άλμη. Όσο υψηλότερη είναι η συγκέντρωση αλατιού στο τροφοδοτικό νερό, τόσο υψηλότερη είναι και η πίεση που απαιτείται. Όσο βέβαια η πίεση αυξάνεται θα χρειάζεται και ανθεκτικότερη μεμβράνη για να μπορεί να κατακρατεί τα άλατα. Η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης είναι ιδανική για υφάλμυρο νερό.

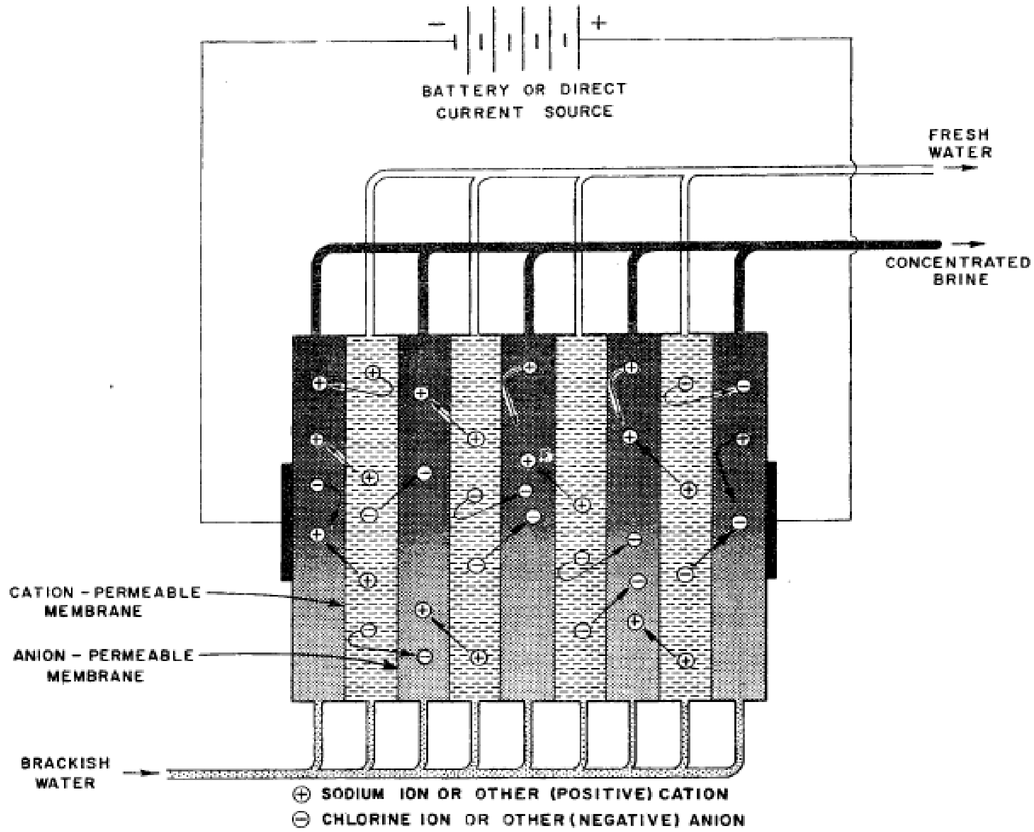


Εικόνα 14: Λειτουργία των μεμβρανών στην αντίστροφη όσμωση

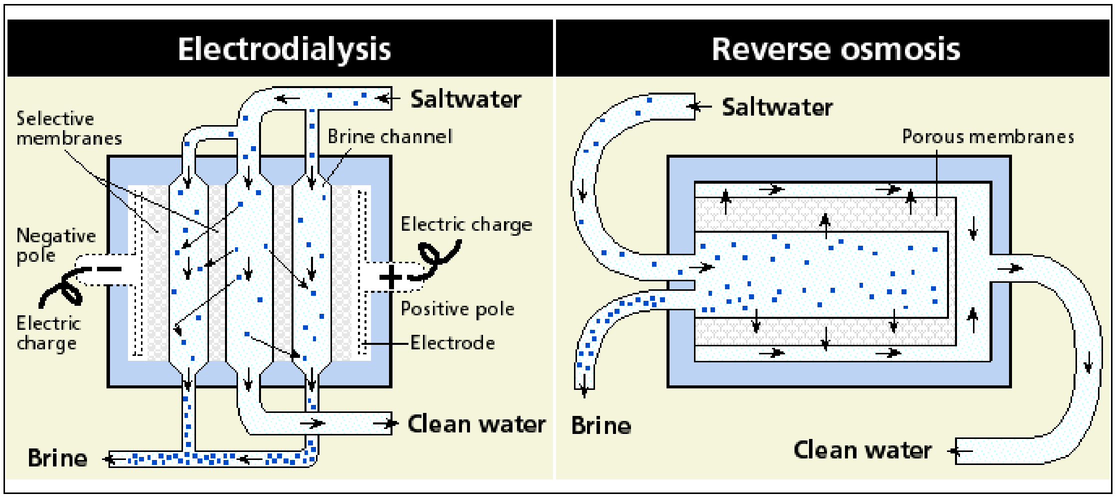


Εικόνα 15: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου της αντίστροφης όσμωσης

Η μέθοδος της **ηλεκτρόλυσης (Electro dialysis reversal, EDR),** στηρίζεται στην διαδικασία κατά την οποία η μείωση της αλατότητας του θαλάσσιου νερού πραγματοποιείται μεταφέροντας ιόντα από το θαλάσσιο νερό, μέσω μιας μεμβράνης, υπό την επίδραση διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού. Η διεργασία αυτή συνδυάζει ένα ηλεκτρικά φορτισμένο κελί και μία ημιπερατή μεμβράνη για την αφαλάτωση του νερού. Τα άλατα παρουσιάζονται στο αλμυρό νερό με τη μορφή ιόντων. Τα θετικά φορτισμένα καλούνται κατιόντα και τα αρνητικά φορτισμένα ανιόντα. Καθώς λοιπόν το νερό περνάει μέσα από το κελί ηλεκτρόλυσης, τα κατιόντα θα ελχθούν από το αρνητικό ηλεκτρόδιο και τα ανιόντα από το θετικό. Μεμβράνες περατές από κατιόντα επιτρέπουν την διέλευση μόνο των κατιόντων όπως το ασβέστιο. Μεμβράνες περατές από ανιόντα επιτρέπουν την διέλευση μόνο των ανιόντων όπως το χλώριο και το θείο. Στην πράξη βέβαια χρησιμοποιείται ένας μεγάλος αριθμός μεμβρανών μεταξύ των ηλεκτροδίων, σχηματίζοντας έναν αριθμό τμημάτων συγκέντρωσης άλμης και κατακράτησης μεταλλικών στοιχείων.

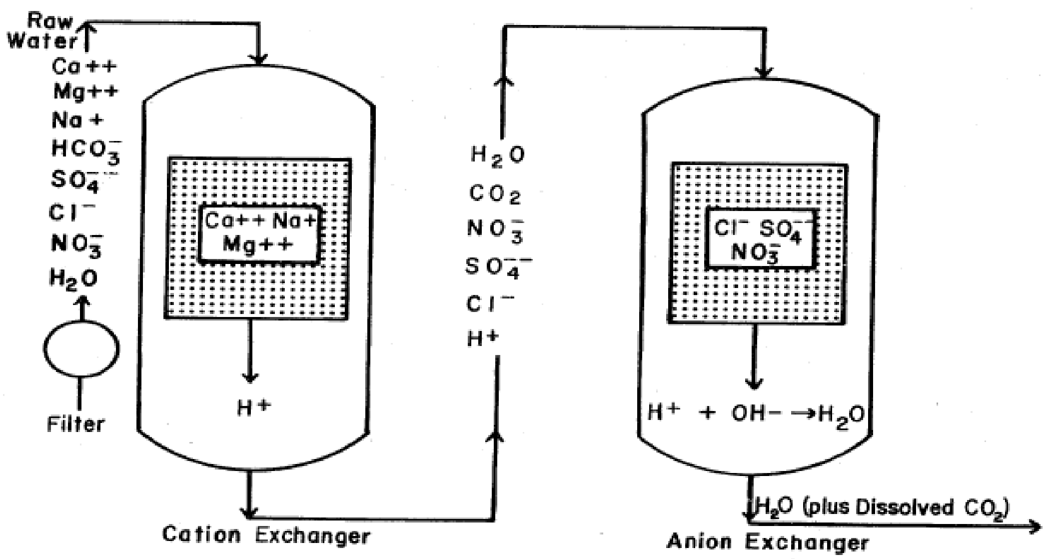


Εικόνα 16: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου Electro Dialysis Reversal (EDR). Πολύ σημαντικό πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα χρήσης επιλεκτικών μεμβρανών που επιτρέπουν σε ωφέλιμα ιόντα όπως το ασβέστιο να παραμένουν στο παραγόμενο φρέσκο νερό.



Εικόνα 17: Διαφορές στη λειτουργία των μεθόδων EDR και RO

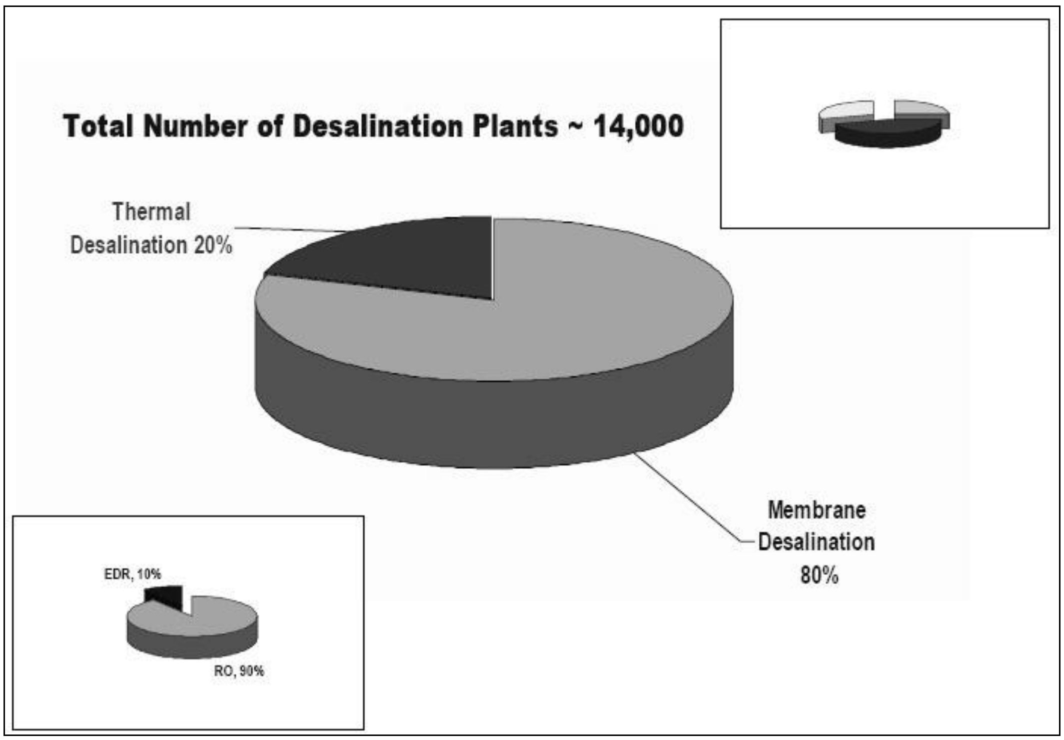
Τέλος η μέθοδος της **ανταλλαγής ιόντων ή ion exchange** περιλαμβάνει ένα πορώδες στρώμα από συνθετικές ρητίνες που έχουν την ικανότητα να ανταλλάσσουν ιόντα με εκείνες στα μεταλλικά νερά που έρχονται σε επαφή με το στρώμα. Τα στρώματα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 18 είναι τοποθετημένα σε σειρά ώστε το μεταλλικό νερό να έρχεται πρώτα σε επαφή με τον ανταλλακτήρα κατιόντων και στην συνέχεια με τον αντίστοιχο των ανιόντων. Στον ανταλλακτήρα κατιόντων αφαιρούνται από το νερό κατιόντα και στην θέση τους τοποθετούνται κατιόντα υδρογόνου. Στον ανταλλακτήρα ανιόντων αφαιρούνται από το νερό ανιόντα και στην θέση τους τοποθετούνται ιόντα υδροξυλίου. Έτσι οι προσμίξεις αφαιρούνται από το αλμυρό νερό αφήνοντας φρέσκο νερό, ενώ υδρογόνο και υδροξύλιο αντιδρούν μεταξύ τους δίνοντας επιπλέον φρέσκο νερό. Όταν οι ρητίνες φτάνουν σε σημείο κορεσμού λόγω της κατακράτησης ιόντων χάνουν την ικανότητα τους να αφαιρούν ιόντα και πρέπει να καθαριστούν με οξέα και βάσεις για να ανακτήσουν τις ιδιότητές τους.



Εικόνα 18: Η μέθοδος της ανταλλαγής ιόντων (Ion exchange)

Αν θέλαμε να **συγκρίνουμε τις τεχνικές απόσταξης με τις αντίστοιχες που κάνουν χρήση μεμβρανών** (κυρίως της αντίστροφης όσμωσης) θα λέγαμε ότι η απόσταξη προσφέρει μια μεγαλύτερη δυνατότητα για τις οικονομίες κλίμακας. Οι μονάδες απόσταξης δεν χρειάζεται να διακόπτουν τη λειτουργία τους τόσο συχνά για καθάρισμα και συντήρηση του εξοπλισμού, όπως συμβαίνει με τις μονάδες RO, παρόλο που μπορούν και πρέπει να σβήνουν κυρίως για καθαρισμό και αντικατάσταση σωλήνων. Η ανάγκες προετοιμασίας του τροφοδοτικού νερού είναι μεγαλύτερες στις μονάδες RO, κυρίως στο στάδιο προ της εισόδου στις μεμβράνες. Τέλος σε αντίθεση με τις μονάδες RO, οι μονάδες απόσταξης δεν παράγουν απόβλητα από το πλύσιμο ή την προετοιμασία των μεμβρανών.

Στον αντίποδα τα κυριότερα **πλεονεκτήματα της μεθόδου RO** είναι ότι γενικά δεν χρειάζεται θέρμανση του τροφοδοτικού νερού, με αποτέλεσμα οι θερμικές απώλειες να είναι χαμηλότερες. Έχουν λιγότερα προβλήματα διάβρωσης, έχουν χαμηλότερες απαιτήσεις ενέργειας, υψηλότερο βαθμό απόδοσης, μπορούν να απομακρυνθούν εκτός από αλάτι και άλλα ανεπιθύμητα συστατικά όπως βακτήρια, ενώ για την ίδια ποσότητα παραγόμενου νερού οι εγκαταστάσεις είναι πολύ μικρότερες σε όγκο



Εικόνα 19: Παγκόσμια κατανομή των μονάδων και των μεθόδων αφαλάτωσης. Βλέπουμε ότι ευρύτατη χρήση παρουσιάζουν οι μέθοδοι με χρήση μεμβρανών και κυρίως η αντίστροφη όσμωση (RO).

Όσον αφορά την **ποιότητα του νερού** που παράγεται, οι μονάδες απόσταξης παράγουν νερό υψηλής ποιότητας με συγκεντρώσεις από 1.0 έως 50 ppm tds (**tds**=total dissolved solids), ενώ οι μονάδες αντίστροφης όσμωσης παράγουν νερό με συγκεντρώσεις 10 – 500 ppm tds. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι τα διεθνή όρια για το πόσιμο νερό είναι 500 mg/L, που αντιστοιχούν περίπου σε 500 ppm. Στις μονάδες αφαλάτωσης που παράγουν νερό για οικιακή χρήση, εφαρμόζονται διαδικασίες περεταίρω επεξεργασίας με σκοπό να εξασφαλίσουν ότι το παραγόμενο νερό πληροί τις προδιαγραφές υγιεινής για πόσιμο νερό καθώς και τα προτεινόμενα αντιδιαβρωτικά επίπεδα. Το αφαλατωμένο νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην καθαρή μορφή του (π.χ ως νερό προετοιμασίας σε boiler παραγωγικών μονάδων), ή να αναμειχθεί με λιγότερο καθαρό νερό και να χρησιμοποιηθεί για άρδευση, πόση κλπ. Συνήθως είναι πολύ πιο καθαρό από αυτό που προσδιορίζουν οι προδιαγραφές υγιεινής και γι' αυτό όταν προορίζεται για δημόσια χρήση, μπορεί να αναμειχθεί με νερό που περιέχει μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σε αδιάλυτες στερεές ουσίες. Το καθαρό αφαλατωμένο νερό, επίσης, είναι αρκετά όξινο και άρα διαβρώνει τους σωλήνες, γι' αυτό και θα πρέπει να αναμειχθεί με άλλες πηγές νερού ώστε να εξισορροπηθούν οι τιμές PH, σκληρότητας καθώς και η περιεκτικότητα σε αλκάλια προτού παραδοθεί για χρήση.

Το αφαλατωμένο νερό που παράγεται αντιστοιχεί στο **15 – 50%** του τροφοδοτικού νερού που αποτελεί είσοδο της μονάδας αφαλάτωσης. Για κάθε 100 κυβικά μέτρα θαλάσσιου νερού, παράγονται 15 με 50 κυβικά μέτρα φρέσκου νερού μαζί με νερό που περιέχει στερεά κατάλοιπα.

Διαδικασίες προετοιμασίας είναι απαραίτητες προκειμένου να απομακρυνθούν όσα συστατικά μπορούν να παρεμποδίσουν τη διαδικασία της αφαλάτωσης. Άλγη και βακτήρια μπορούν να αναπτυχθούν σε μονάδες απόσταξης ή αντίστροφης όσμωσης, οπότε η βιοκτονία – συνήθως με χλώριο – είναι απαραίτητη για καθαρισμό. Ορισμένες μεμβράνες RO είναι ευαίσθητες στο χλώριο οπότε η απομάκρυνση των θαλασσίων οργανισμών πρέπει να γίνει με διαφορετική τεχνική, συνήθως με όζον ή υπεριώδη ακτινοβολία. Το όζον βέβαια θα πρέπει να απομακρυνθεί από την εγκατάσταση προτού έρθει σε επαφή με τις μεμβράνες. Πρόσφατα αναπτύχθηκε μέθοδος RO που δεν απαιτεί την χημική προεργασία.

Οι μονάδες αφαλάτωσης παράγουν **υγρά απόβλητα** που μπορεί να περιέχουν το σύνολο ή κάποια από τα συστατικά που αναφέρονται παρακάτω: υψηλές συγκεντρώσεις αλατιού, χημικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του καθαρισμού της μονάδας ή κατά τη διάρκεια των διαδικασιών προετοιμασίας και τοξικά μέταλλα (από την επαφή με τα μεταλλικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των εγκαταστάσεων). Τα υγρά απόβλητα μπορούν να αποβληθούν είτε απευθείας στη θάλασσα μαζί με το νερό ψύξης της μονάδας ή η αποβολή να γίνει στον υπόνομο και από κει να ακολουθήσει η επεξεργασία σε μια μονάδα επεξεργασίας λυμάτων. Τέλος μπορεί να γίνει αποξήρανση και κατόπιν αποβολή σε κάποιο χώρο υγειονομικής ταφής απορριμμάτων. Οι μονάδες αφαλάτωσης παράγουν και μικρή ποσότητα στερεών αποβλήτων.

2.4 Οι απαιτήσεις σε ενέργεια μίας μονάδας αφαλάτωσης

Multistage Flash (MSF)	3,500	—	7,000	kWh/AF
Multiple Effect Distillation (MED)	2,500	—	5,000	kWh/AF
Vapor Compression (VC)	10,000	—	15,000	kWh/AF
Reverse Osmosis (RO) — single pass	5,800	—	11,000	kWh/AF
Reverse Osmosis (RO) — double pass	6,500	—	12,000	kWh/AF

(Source: Wilf, 1991.)

Πίνακας 2: Ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια ανάλογα με την μέθοδο αφαλάτωσης

Η ενέργεια η οποία χρησιμοποιείται κατά την αφαλάτωση είναι κυρίως **ηλεκτρισμός** και **θερμότητα**. Οι ενεργειακές ανάγκες μιας μονάδας αφαλάτωσης εξαρτώνται από την αλατότητα και τη θερμοκρασία του τροφοδοτικού νερού, την ποιότητα του παραγόμενου νερού και την τεχνολογία αφαλάτωσης που χρησιμοποιείται. Οι εκτιμήσεις για την χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για τις διάφορες μεθόδους φαίνονται στον Πίνακα 2. Εκτός από την ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια, οι μονάδες που χρησιμοποιούν τεχνολογίες MSF, MED και VC χρησιμοποιούν και θερμική ενέργεια για θέρμανση του τροφοδοτικού νερού. Εξαιτίας της χαμηλής αποδοτικότητας της μετατροπής θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρισμό, υπάρχει ένα υψηλό ενεργειακό πέναλτι αν η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιηθεί για την θέρμανση του τροφοδοτικού νερού. Για παράδειγμα, σε αντιδιαστολή με τα 3,500 με 7,000 kWh/AF (AF= acre foot=1233,5 m3) ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτούνται για μία μονάδα διύλισης MSF, η θερμική ενέργεια που απαιτείται είναι περίπου 270 εκατομμύρια Btu/AF (~ 26,000 kWh/AF). Για τις μονάδες τεχνολογίας MED οι απαιτήσεις θερμικής ενέργειας υπολογίζονται σε 230 εκατομμύρια Btu/AF (~ 22,000 kWh/AF). Συνολικά οι ολικές ενεργειακές ανάγκες για τις μονάδες απόσταξης είναι αρκετά υψηλότερες από αυτές που χρησιμοποιούν μεμβράνες.

Γενικά πάντως οι ανάγκες σε ενέργεια των μονάδων αφαλάτωσης είναι πάρα πολύ υψηλές. Για παράδειγμα στις Η.Π.Α και πιο συγκεκριμένα στην Santa Barbara, υπολογίζεται ότι θα απαιτούντο 50 εκατομμύρια kWh/yr ούτως ώστε η τοπική μονάδα αφαλάτωσης να παράγει 7,500 AF/yr φρέσκου νερού. Στον αντίποδα η ενέργεια που θα χρειαζόταν για να αντληθεί αντίστοιχη ποσότητα νερού από τον ποταμό Colorado κυμαίνεται μεταξύ 15 - 26 εκατομμύρια kWh/yr . Τόσο οι μονάδες απόσταξης όσο και οι RO, θα μπορούσαν να περιορίσουν τις ανάγκες τους με τη χρήση μονάδων συμπαραγωγής.

Energy Consumption (kWh/m^3)

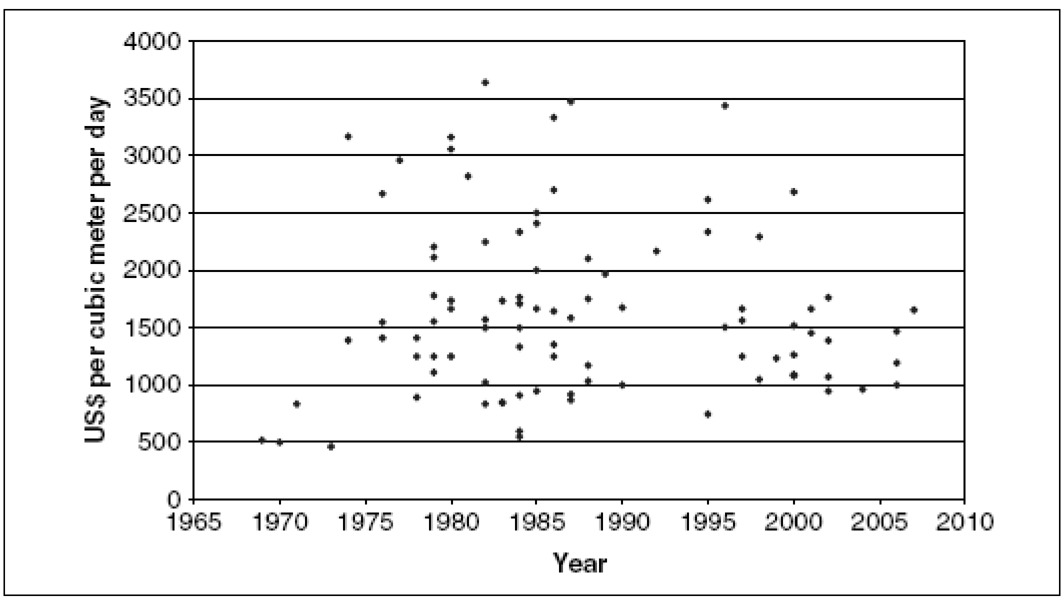
Process	Thermal/Remark	Electrical
MSF	42 (stand alone) 23 (Co-generation)	3.6
MED	42 (stand alone) 23 (Co-generation)	2.3
RO	Seawater Brackish water	2-10 (energy recovery or not ?) 1-3
ED	Brackish water (depends on salinity)	0.5 – 10 (e.g. 1.5, 4 for 1500, 3500 ppm)

Πίνακας 3: Η συμπαραγωγή (co generation) μειώνει σημαντικά τις ενεργειακές ανάγκες

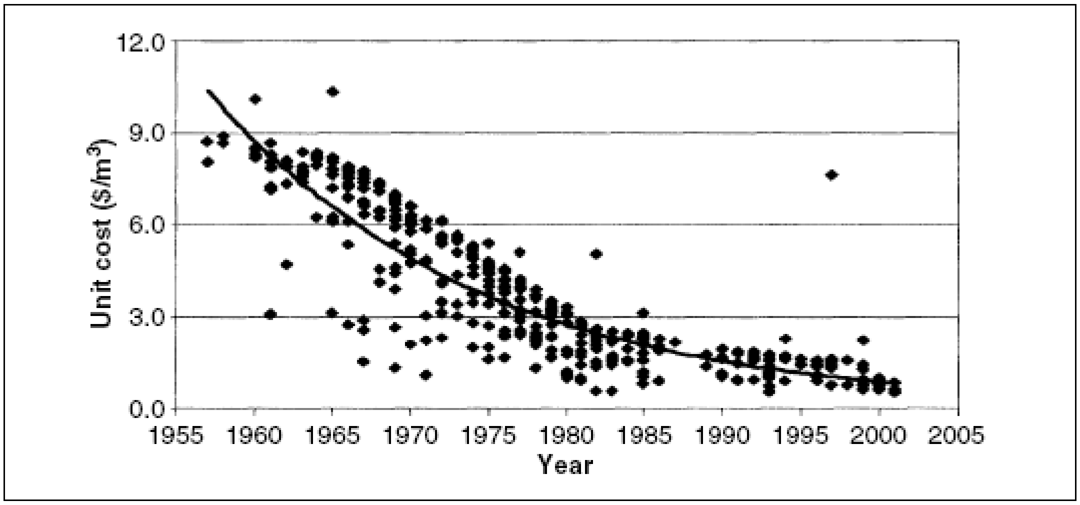
2.5 Το κόστος του αφαλατωμένου νερού

Το κόστος της παραγωγής νερού σε μία μονάδα αφαλάτωσης **εξαρτάται κυρίως από την τεχνολογία που χρησιμοποιείται και την παραγωγική ικανότητα της μονάδας**. Στην περίπτωση των μονάδων **τεχνολογίας MSF** το κόστος παραγωγής ήταν αρκετά υψηλό κατά την δεκαετία του 1960 όταν και κατασκευάστηκαν οι πρώτες μονάδες, αλλά διάφορες βελτιώσεις υιοθετήθηκαν σε αρχικό σχέδιο και αφορούσαν κυρίως τα υλικά κατασκευής. Στους Πίνακες 4 και 5 φαίνεται το κόστος παραγωγής ενός κυβικού μέτρου νερού την ημέρα σε δολάρια συναρτήσει των ετών, καθώς και το κόστος ενός κυβικού μέτρου αφαλατωμένου νερού για οικιακή χρήση σε cent ανά έτος. Αν και τα στοιχεία εμφανίζουν μεγάλη διασπορά, είναι προφανές ότι το επενδυτικό κόστος μέχρι και το 1990 κινούνταν στα 1000 – 2000 US$/m3/day, ενώ από το 1995 και μετά σταθεροποιήθηκε στα 1000 – 1500 US$/m3/day. Σε μία άλλη μέθοδο απόσταξης, την **MED**, το κόστος της μονάδας κυμαίνεται στα 0.55 – 0.7 US$/m3, ενώ το επενδυτικό κόστος είναι US$850 m3/day και φυσικά οι ενεργειακές ανάγκες μικρότερες από την μέθοδο MSF.

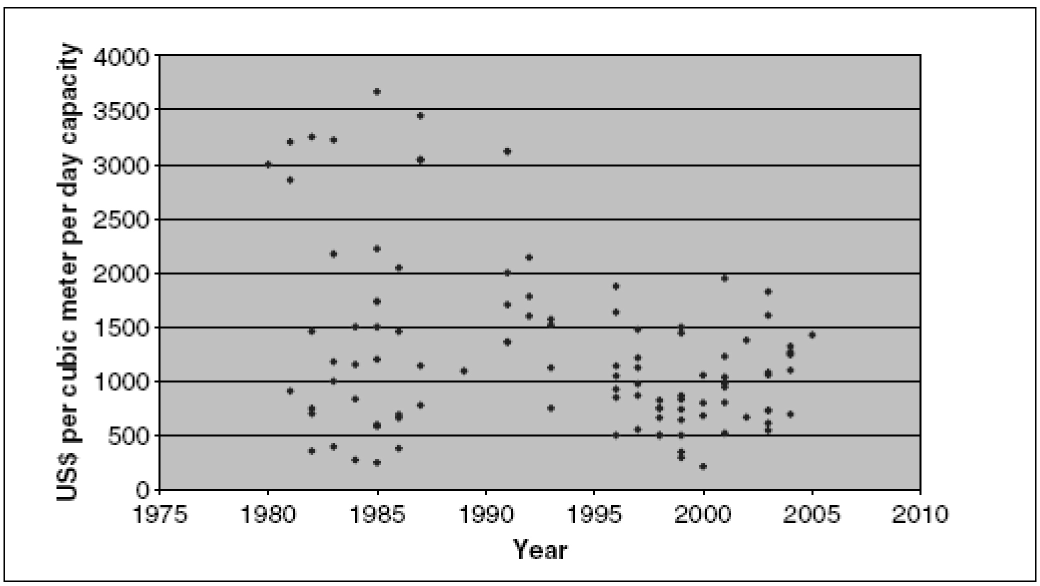
Η κατασκευή των πρώτων μονάδων που χρησιμοποιούσαν την μέθοδο της **αντίστροφης όσμωσης** πραγματοποιήθηκε πολύ αργότερα από την κατασκευή μονάδων απόσταξης. Στον Πίνακα 6 φαίνεται ότι πριν το 1995 τα στοιχεία για το επενδυτικό κόστος σε μονάδες RO ήταν αραιά και διεσπαρμένα. Αντίθετα μετά το 1995 φαίνεται ότι αυτό κινείται μεταξύ 500 και 1000 US$ ανα m3/day. Η τιμή της μονάδας του αφαλατωμένου νερού έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια και κυμαίνεται στα 0.5 US$/m3, δηλαδή φθηνότερα από οποιαδήποτε άλλη μέθοδο.



Πίνακας 4: Επενδυτικό κόστος για την μέθοδο MSF σε δολάρια ανά κυβικό μέτρο και ημέρα, συναρτήσει των ετών.

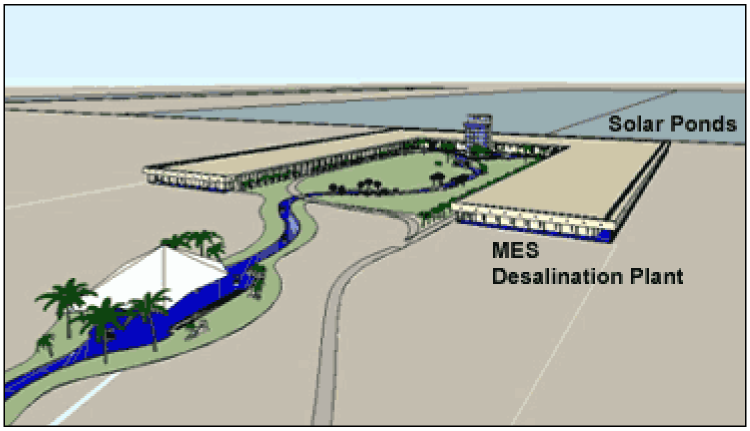


Πίνακας 5: Διακύμανση της τιμής ενός κυβικού μέτρου αφαλατωμένου νερού με χρήση της μεθόδου MSF, από τη δεκαετία του 1950 έως σήμερα.

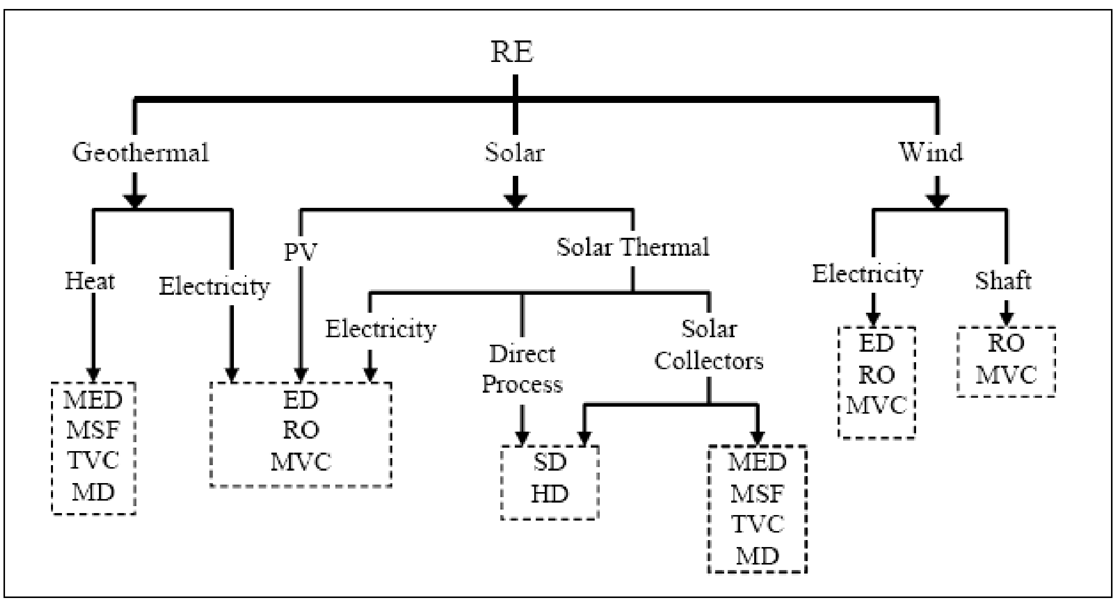


Πίνακας 6: Επενδυτικό κόστος για τη μέθοδο αντίστροφης όσμωσης

3. Αφαλάτωση με χρήση ηλιακών συλλεκτών



3.1 Αφαλάτωση με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας



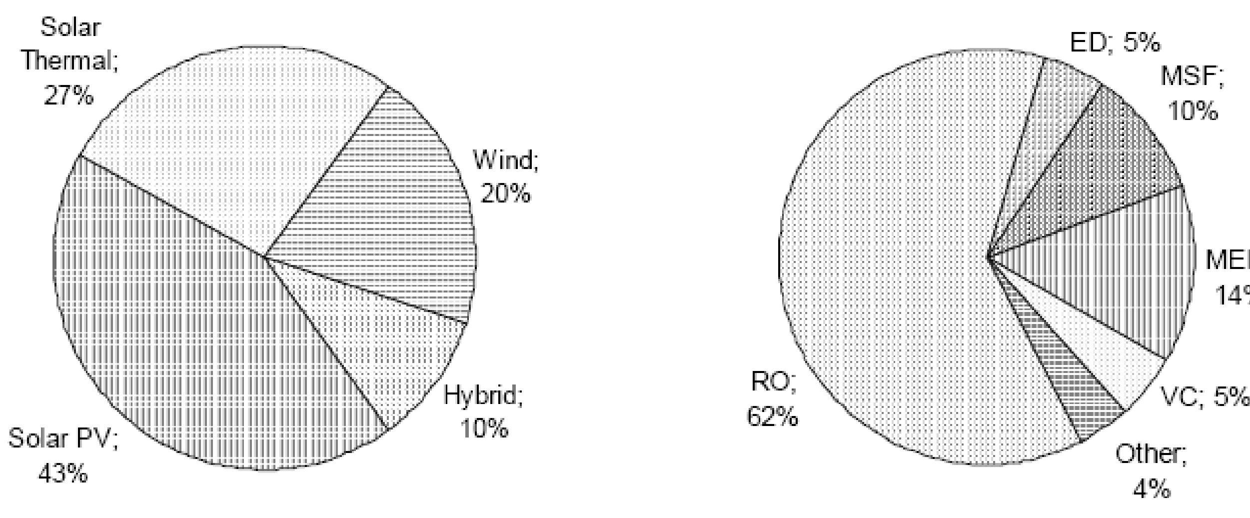
Εικόνα 20: Συνδυασμοί ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με μεθόδους αφαλάτωσης

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και οι μονάδες αφαλάτωσης είναι δύο διαφορετικές τεχνολογίες, που όμως **μπορούν να συνδυαστούν με ποικίλους τρόπους**. Η διασύνδεση μεταξύ του συστήματος ανανεώσιμης ενέργειας (ΑΕ) και του συστήματος αφαλάτωσης συναντάται στο υποσύστημα εκείνο όπου η ενέργεια που παράγεται από το σύστημα ΑΕ προωθείται στην μονάδα αφαλάτωσης. Αυτή η ενέργεια μπορεί να είναι σε διάφορες μορφές όπως θερμική ενέργεια, ηλεκτρική ενέργεια κλπ. Οι πιθανοί συνδυασμοί φαίνονται στην Εικόνα 20.

Τα συστήματα αφαλάτωσης που κάνουν χρήση ανανεώσιμης ενέργειας, διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες: σε **θερμικών διεργασιών** και σε **ηλεκτρομηχανικών διεργασιών**. Όσον αφορά την πηγή ενέργειας, μια μονάδα αφαλάτωσης που τροφοδοτείται από ανανεώσιμη ενέργεια κατά πάσα πιθανότητα είναι μια μονάδα τύπου stand-alone, σε μια περιοχή που δεν υπάρχει δίκτυο ηλεκτρισμού. Τα συστήματα stand-alone είναι συνήθως υβριδικά συστήματα, που συνδυάζουν περισσότερες από μια μορφές ανανεώσιμης ενέργειας, για παράδειγμα αιολική και ηλιακή ή κάνουν χρήση και γεννήτριας diesel. Για να εξασφαλιστεί μάλιστα η απρόσκοπτη λειτουργία ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες, τα συστήματα stand-alone είναι εξοπλισμένα με συσκευές αποθήκευσης της ενέργειας.

Τα τελευταία χρόνια λόγω κυρίως της εμπειρίας που προέκυψε από την εντατική εφαρμογή, οι **συμβατικές μονάδες αφαλάτωσης** εξελίχθηκαν εμφανίζοντας πλέον καλούς βαθμούς απόδοσης και χαμηλό κόστος λειτουργίας. Από την άλλη η κατάσταση με την **χρήση ανανεώσιμης ενέργειας** είναι αρκετά διαφορετική. Στις μέρες μας τα συγκεκριμένα συστήματα είναι ακόμα υπό εξέλιξη και οι όποιες εφαρμογές έχουν κυρίως πιλοτικό χαρακτήρα επίδειξης τεχνολογίας, με παραγωγική ικανότητα που κυμαίνεται από μερικά έως 100 m3 την ημέρα. Μόλις πρόσφατα εμφανίστηκαν μονάδες μεσαίου μεγέθους που κάνουν χρήση ηλιακής ενέργειας, αλλά και πάλι λίγα σχέδια εμφάνισαν αξιόπιστα λειτουργικά χαρακτηριστικά.

Όπως είναι εύκολα κατανοητό, **δεν είναι όλοι οι συνδυασμοί ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποδοτικοί** για χρήση σε κάποια μονάδα αφαλάτωσης, καθώς μπορεί να μην είναι βιώσιμοι υπό ορισμένες συνθήκες. Η βέλτιστη επιλογή συνήθως προκύπτει έπειτα από μελέτη των τοπικών παραμέτρων της τοποθεσίας που θα κατασκευαστεί η μονάδα, όπως: τις γεωγραφικές συνθήκες, την τοπογραφία της περιοχής, το είδος και τη διαθεσιμότητα της ενέργειας με χαμηλό πάντα κόστος, τις τοπικές υποδομές (π.χ. δίκτυο ηλεκτρισμού, συγκοινωνίες), το μέγεθος της μονάδας, την αλατότητα του νερού κλπ.



Εικόνα 21: Η χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων και αντίστροφης όσμωσης αποδεικνύεται ο πιο δημοφιλής και επιτυχημένος συνδυασμός

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 21 ο πιο δημοφιλής συνδυασμός είναι η χρήση PV (φωτοβολταϊκών) με αντίστροφη όσμωση. Στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται οι προτεινόμενοι συνδυασμοί, με συγκεκριμένες παραμέτρους εισόδου, και με την σημείωση ότι και άλλοι συνδυασμοί είναι πιθανοί. Πράγματι, η PV θεωρείται η καταλληλότερη μέθοδος για μικρές εφαρμογές και περιοχές με μεγάλη ηλιοφάνεια. Αντίθετα για μεγαλύτερες μονάδες η αιολική ενέργεια είναι πιο ελκυστική, αφού έχει μικρότερες απαιτήσεις σε έκταση και επιφάνεια

Feed water quality	Product water	RE resource available	System size			Suitable combination
			Small (1–50 $m^3 d^{-1}$)	Medium (1–50 $m^3 d^{-1}$)	Large (1–50 $m^3 d^{-1}$)	
Brackish water	Distillate	Solar	*			Solar distillation
	Potable	Solar	*			PV–RO
	Potable	Solar	*			PV–ED
	Potable	Wind	*	*		Wind–RO
	Potable	Wind	*	*		Wind–ED
Seawater	Distillate	Solar	*			Solar distillation
	Distillate	Solar		*	*	Solar thermal–MED
	Distillate	Solar			*	Solar thermal–MED
	Potable	Solar	*			PV–RO
	Potable	Solar	*			PV–ED
	Potable	Wind	*	*		Wind–RO
	Potable	Wind	*	*		Wind–ED
	Potable	Wind		*	*	Wind–MVC
	Potable	Geothermal		*	*	Geothermal–MED
	Potable	Geothermal			*	Geothermal–MED

Πίνακας 7

Η γενικότερη κατεύθυνση πάντως, είναι ο συνδυασμός τεχνολογιών θερμικής ενέργειας (ηλιακή και γεωθερμική) με θερμικές μεθόδους αφαλάτωσης και τεχνολογιών ηλεκτρομηχανικής ενέργειας με ηλεκτρικές ή μηχανικές μεθόδους αφαλάτωσης. Γι' αυτό και οι παρακάτω συνδυασμοί είναι οι πιο συνηθισμένες επιλογές που χρησιμοποιούνται όταν η μονάδα αφαλάτωσης κάνει χρήση ανανεώσιμης ενέργειας:

- αντίστροφη όσμωση (RO), ηλεκτρόλυση (EDR) ή συμπύκνωση ατμού (VC) με χρήση PV ή αιολικής ενέργειας
- μέθοδοι απόσταξης με χρήση ηλιακής ή γεωθερμικής ενέργειας.

Αν και δεν υπάρχουν εκτενείς αναφορές σχετικά με το πραγματικό κόστος του νερού που παράγεται από αυτές τις διεργασίες, ο θεωρητικός υπολογισμός των τιμών για μεγάλη παραγωγικότητα κατέδειξε, ότι αυτές είναι υψηλότερες σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους αφαλάτωσης.

3.2 Χρήση ηλιακής ενέργειας για αφαλάτωση

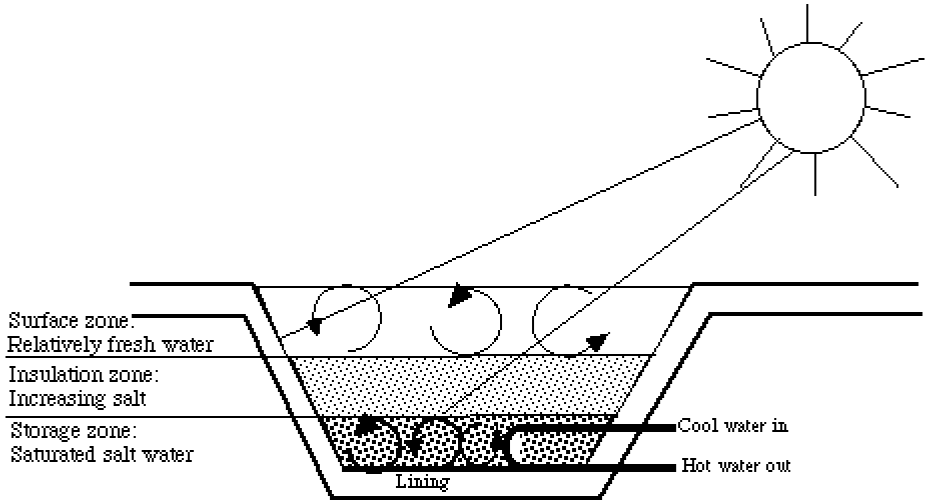
Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παροχή της απαιτούμενης ενέργειας σε μια διεργασία αφαλάτωσης, είτε με τη μορφή θερμικής ενέργειας είτε με τη μορφή ηλεκτρισμού. Σε κάθε περίπτωση, το κόστος του φρέσκου νερού αυξάνει δραματικά όταν η εγκατάσταση αφαλάτωσης δεν καταναλώνει το σύνολο της ενέργειας που παρέχεται από τους ηλιακούς συλλέκτες. Γι' αυτόν το λόγο για συγκεκριμένες απαιτήσεις παραγωγής φρέσκου νερού η μονάδα αφαλάτωσης θα πρέπει να είναι σχεδιασμένη να καταναλώνει το σύνολο της παρεχόμενης από το ηλιακό πεδίο, ενέργειας. Η αφαλάτωση με ηλιακή ενέργεια μπορεί να διακριθεί σε δύο κατηγορίες:

- **Έμμεσα συστήματα (indirect systems)**

Η αρχή λειτουργίας των εν λόγω συστημάτων συνίσταται στη χρήση δύο ξεχωριστών υποσυστημάτων: έναν ηλιακό συλλέκτη για συλλογή της ηλιακής ενέργειας και μία μονάδα που χρησιμοποιεί αυτήν την ενέργεια για την παραγωγή φρέσκου νερού. Αυτή η μονάδα μπορεί να χρησιμοποιεί μία οποιαδήποτε από τις διεργασίες που περιγράψαμε στην παράγραφο 2.3.

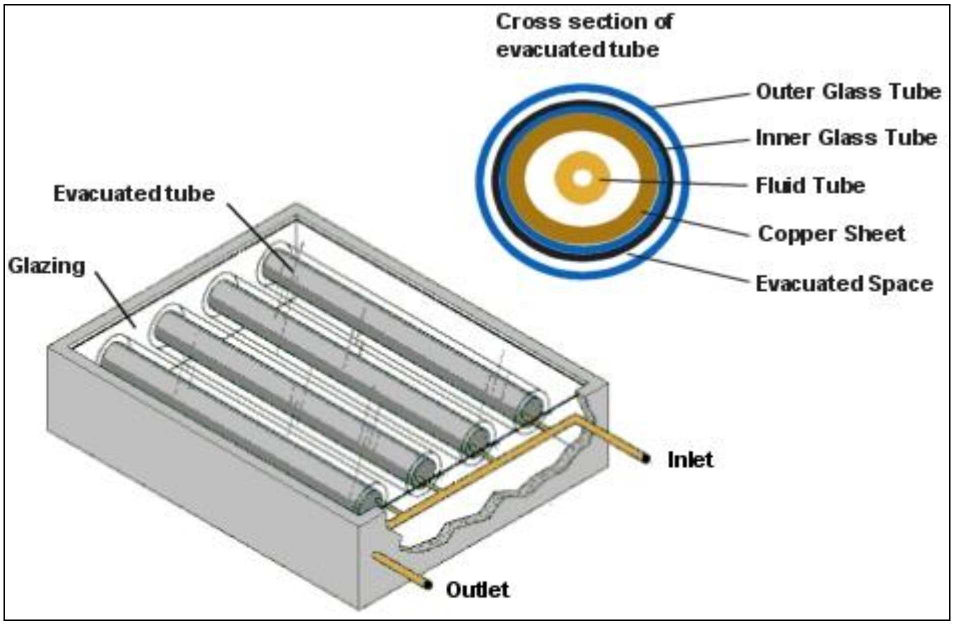
Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του κατάλληλου ηλιακού συλλέκτη για τη διαδικασία της αφαλάτωσης. Οι **συλλέκτες τύπου flat plate** είναι ιδανικοί για διεργασίες όπου επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες. Τέτοιες διεργασίες συνήθως περιλαμβάνουν την δημιουργία συνθηκών κενού αέρος, που επιτυγχάνονται είτε με αντλίες δημιουργίας κενού, είτε με εκτοξευτές ατμού, είτε τέλος με εκτοξευτές νερού. Οι **συλλέκτες τύπου evacuated tube** εξασφαλίζουν ενέργεια ακόμα και τις μέρες που επικρατεί νέφωση, ενώ η απόδοση τους σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας ή σε χαμηλή ηλιοφάνεια είναι αισθητά καλύτερη από τους συλλέκτες τύπου flat plate. Οι συλλέκτες τύπου **cylindrical tracking** μπορεί να είναι πιο αποδοτικοί από τους evacuated tube, αλλά έχουν σχεδόν μηδενική παραγωγή τις συννεφιασμένες ημέρες, εκτός του ότι συλλέγουν ένα πολύ μικρό τμήμα της διάχυτης ακτινοβολίας. Οι συλλέκτες τύπου **parabolic concentrating** απαιτούν έναν εξαιρετικά ακριβή μηχανισμό ιχνηλάτισης δύο αξόνων και αποδίδουν θερμοκρασίες της τάξης των 120^{o}C που είναι φυσικά πολύ υψηλότερες από αυτές που απαιτούνται για την αφαλάτωση. Γενικά για τον σχεδιασμό μίας optimum μονάδας αφαλάτωσης με χρήση ηλιακής ενέργειας θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη παράμετροι όπως: η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος, ο τύπος του ηλιακού συλλέκτη, τα μέσα μεταφοράς της θερμότητας στη διεργασία και το είδος της μονάδας που θα χρησιμοποιηθεί.

Καθώς ορισμένες διεργασίες αφαλάτωσης μπορούν να λειτουργήσουν με πηγές θερμότητας χαμηλής βαθμίδας (low grade), συμβατικοί ηλιακοί συλλέκτες μέσης θερμοκρασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Εξαιτίας όμως των τεράστιων ποσοτήτων θερμότητας χαμηλής βαθμίδας που απαιτούνται για να συντηρηθεί η διαδικασία, η επιφάνεια που θα πρέπει να καλυφθεί με ηλιακούς συλλέκτες είναι μεγάλη. Η κατασκευή τέτοιων ηλιακών πάρκων δεν είναι ιδιαίτερα πρακτική αν αναλογιστούμε τις ανάγκες υδραυλικής ένωσης, σταθερότητας της ροής, συντήρησης, αποθήκευσης θερμότητας και άντλησης. Ένα ηλιακό σύστημα που θα ήταν ιδανικό για τέτοιες εφαρμογές είναι ένα **solar pond (SP)**, μια ηλιακή λίμνη που συνδυάζει αποθήκευση θερμότητας, παθητική συλλογή θερμότητας και μεταφορά θερμότητας με χαμηλά κόστη άντλησης. Επιπλέον το σύστημα αυτό παρουσιάζει και χαμηλό λειτουργικό κόστος. Η θερμοκρασία λειτουργίας ενός SP μπορεί να κυμανθεί μεταξύ 30-95 °C. Γενικότερα ένα



Εικόνα 22: Ηλιακή λίμνη (solar pond)

σύστημα SP αποτελείται από ένα λεπτό ανώτερο στρώμα μεταφοράς, ένα στρώμα στο κάτω μέρος για την αποθήκευση της ενέργειας που συλλέχθηκε και ένα στρώμα μόνωσης μεταξύ του ανώτερου και του κατώτερου στρώματος, που εμποδίζει την μεταφορά μέσω μιας επιλεγμένης βαθμίδας πυκνότητας. Αυτό κάνει το σύστημα SP να λειτουργεί ως παγίδα θερμότητας. Οι μονάδες αφαλάτωσης που μπορούν να ενσωματώσουν μια ηλιακή λίμνη περιλαμβάνουν τις μεθόδους multi-effect distillation system, multistage flash distillation system, vapor compression distillation, και reverse osmosis. Από τη στιγμή βέβαια που τα συστήματα RO και VC απαιτούν και μηχανικό έργο, η λειτουργία τους με μία ηλιακή λίμνη απαιτεί ένα μέρος της ηλιακής ενέργειας να μετασχηματίζεται σε έργο κάτι που είναι ιδιαίτερα ακριβό. Μια ηλιακή λίμνη είναι επίσης αρκετά αποδοτική στο να τροφοδοτήσει ένα σύστημα multi-effect χαμηλής θερμοκρασίας για τους ακόλουθους λόγους: η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας που παρέχεται από την ηλιακή λίμνη (60-75 °C), ταιριάζει με την απαιτούμενη για συστήματα αφαλάτωσης MED/ME θερμοκρασία που κυμαίνεται στους 50-60 °C, ενώ ένα σύστημα MED/ME είναι εξαιρετικά ευέλικτο σε αλλαγές στην παροχή ενεργείας και είναι εξαιρετικά σταθερό υπό συνθήκες μεταβαλλόμενης παροχής θερμότητας. Ο συνδυασμός της ηλιακής λίμνης με συστήματα αφαλάτωσης αποδείχθηκε εξαιρετικά βιώσιμος για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού σε ξηρές και άνυδρες περιοχές.

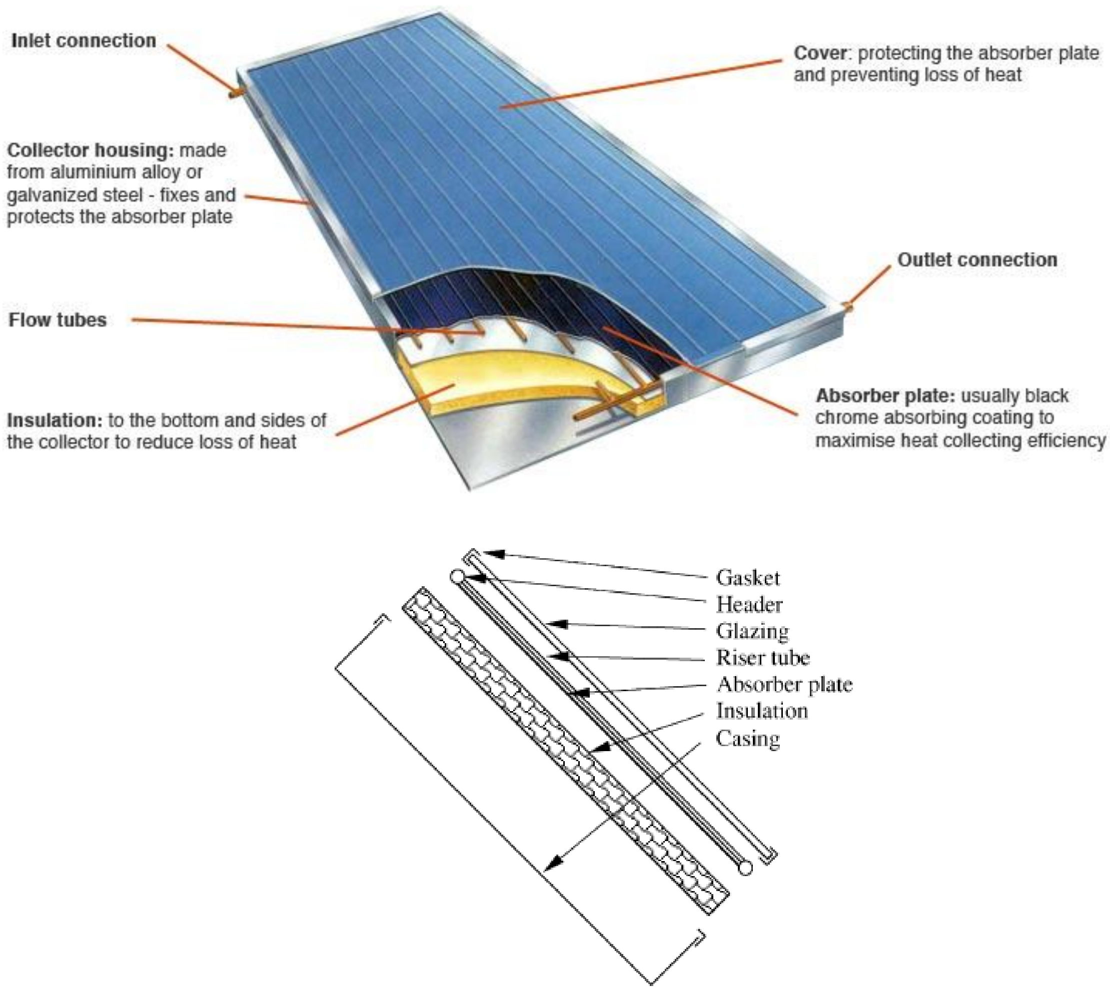


Εικόνα 23: Συλλέκτης τύπου evacuated tube

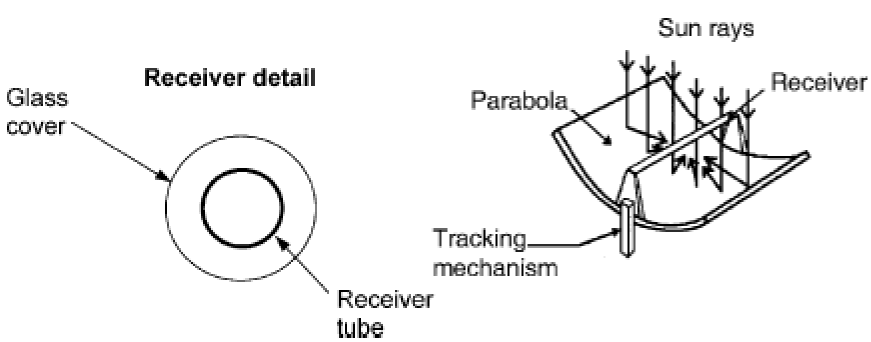
Ορισμένοι μελετητές έχουν προτείνει τον συνδυασμό μεθόδων αφαλάτωσης και παραβολικών συλλεκτών. Πιο συγκεκριμένα προτείνεται οι παραβολικοί συλλέκτες, οι οποίοι θα έχουν σαν εργαζόμενο μέσο φρέσκο νερό, να λειτουργούν ως μονάδα απευθείας ατμοπαραγωγής για την λειτουργία ενός συστήματος MED. Συγκρίνοντας μάλιστα τα κόστη εγκαταστάσεων MED που χρησιμοποιούσαν παραβολικούς συλλέκτες, συνδυασμό ηλιακής ενέργειας και ορυκτών καυσίμων καθώς και συμβατικών μονάδων, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ηλιακή τεχνολογία είναι άκρως ανταγωνιστική με την αντίστοιχη συμβατική.

Άλλοι μελετητές ασχολήθηκαν με συλλέκτες τύπου evacuated tube σε συνδυασμό με εγκαταστάσεις τύπου MED/ME. Η μονάδα αποτελείται από μία κεραία με συλλέκτες τύπου evacuated tube, αποθήκευση θερμότητας και έναν εξατμιστή θαλασσινού νερού. Ο σχεδιασμός προβλέπει απόλυτα αυτόματη λειτουργία καθώς η διαδικασία συλλογής θερμότητας ξεκινάει αυτόματα μέσω ενός αισθητήρα ο οποίος μετρά την ηλιακή ακτινοβολία. Επιπλέον η λειτουργία του εξατμιστή ελέγχεται από αισθητήρες που ελέγχουν τη θερμοκρασία καθώς και το θερμικό φορτίο που παραμένει στη δεξαμενή αποθήκευσης.

Οικονομικές μελέτες έδειξαν ότι τα ηλιακά συστήματα αφαλάτωσης μπορούν να είναι ανταγωνιστικά κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, ειδικότερα σε απομακρυσμένες περιοχές, καθώς και ότι είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται ηλιακή ενέργεια για μερική κάλυψη των αναγκών παρά σε απόλυτο ποσοστό 100%.



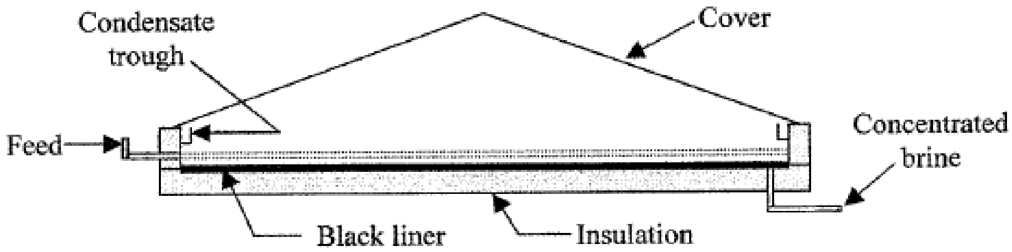
Εικόνα 24: Συλλέκτης τύπου flat plate



Εικόνα 25: Parabolic concentrating συλλέκτης

- **<u>Άμεσα συστήματα (direct systems)</u>**

Τα άμεσα συστήματα είναι εκείνα στα οποία η συλλογή θερμότητας και η διαδικασία της αφαλάτωσης λαμβάνουν χώρα στην ίδια εγκατάσταση. Η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για να παράγει το αφαλατωμένο νερό απευθείας στον **ηλιακό αποστακτήρα (solar still)**. Ο αποστακτήρας λειτουργεί ως μία παγίδα για την ηλιακή ακτινοβολία (φαινόμενο θερμοκηπίου). Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία περνά μέσα από το διάφανο κάλυμμα απορροφάται από τον απορροφητή και κατά ένα μέρος από το αλμυρό νερό. Σαν αποτέλεσμα η θερμοκρασία του νερού, και ως εκ τούτου και η πίεση ατμών, αυξάνεται και γίνεται υψηλότερη από αυτή του καλύμματος. Το νερό εξατμίζεται στον περιβάλλοντα αέρα και ο ατμός ανεβαίνει στο κάλυμμα με φυσική συναγωγή, όπου και συμπυκνώνεται στο εσωτερικό τμήμα του καλύμματος. Το συμπύκνωμα ρέει υπό την επίδραση της βαρύτητας στην δεξαμενή συλλογής. **Ο πλέον κοινός ηλιακός αποστακτήρας είναι ο τύπου θερμοκηπίου**. Αυτός διακρίνεται σε δύο επιμέρους κατηγορίες: στον συμμετρικού και στον ασύμμετρου τύπου.



Εικόνα 26: Ηλιακός αποστακτήρας

Οι ηλιακοί αποστακτήρες τύπου θερμοκηπίου είναι πολύ απλοί στην κατασκευή και τη λειτουργία. Τα κυριότερα τμήματα είναι τα εξής:

- **Η βάση**: είναι το τμήμα όπου κρατείται το αλμυρό νερό. Η βάση πρέπει να είναι μονωμένη στο κάτω μέρος ούτως ώστε να ελαττώνεται η απώλεια θερμότητας προς το έδαφος. Πρέπει να είναι βαμμένη μαύρη ή καλυμμένη με μαύρο ύφασμα ώστε να αυξάνεται η απορροφητικότητά της. Τα βάθος της ξεκινά από τα 10-20 mm και μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 100 mm. Πρέπει να είναι ελαφρώς κεκλιμένη, περίπου 1^o , για να εξασφαλίζει την εύκολη απομάκρυνση της συγκεντρωμένης άλμης. Τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του αποστακτήρα πρέπει να είναι ανθεκτικά στην διάβρωση λόγω της παρουσίας του αλμυρού νερού. Προτιμάται μάλιστα τα υλικά αυτά να είναι φθηνά, με μεγάλη διάρκεια ζωής και διαθέσιμα σε τοπικό επίπεδο.
- **Το διάφανο κάλυμμα:** Το κάλυμμα εμποδίζει τις απώλειες και κρατάει τον αέρα μακριά από το να ψύχει το θερμό νερό. Η εσωτερική του επιφάνεια λειτουργεί επιπλέον και ως συμπυκνωτής όπου ο ατμός συμπυκνώνεται και συλλέγεται ως προϊόν. Η κλίση

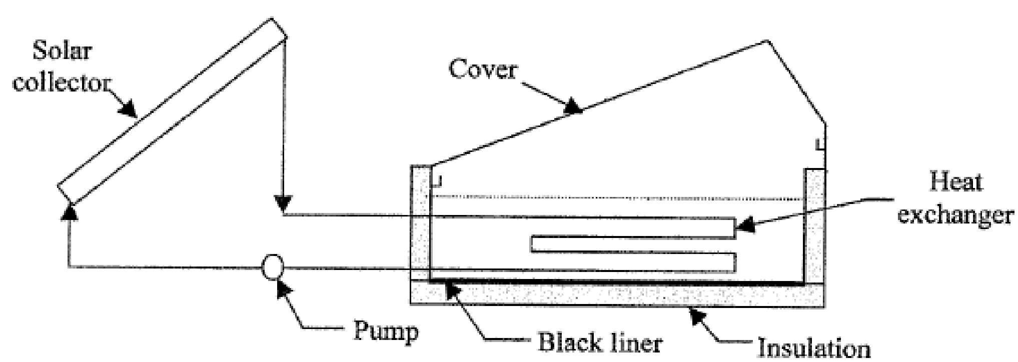
του καλύμματος πρέπει να είναι τέτοια ώστε η τάση επιφανείας του νερού να το αναγκάζει να ρέει όλη την απόσταση μέχρι τις κοιλότητες συλλογής

χωρίς να ξαναπέφτει μέσα στην βάση. Η βέλτιστη γωνία κλίσης του καλύμματος είναι 10-50°. Το υλικό κατασκευής είναι γυαλί ή πλαστικό. Το γυαλί προτιμάται κυρίως λόγω της πολύ υψηλής διαπερατότητας που εμφανίζει, αλλά φυσικά έχει και το μειονέκτημα ότι θραύεται εύκολα. Όσον αφορά το πλαστικό εμφανίζει μικρό βάρος, χαμηλό κόστος, δεν θραύεται και είναι εύκολο στον χειρισμό. Σημαντικό μειονέκτημα είναι η περιορισμένη διάρκεια ζωής λόγω ευαισθησίας στην υπεριώδη ακτινοβολία.

- **Οι κοιλότητες συλλογής** είναι τοποθετημένες στις χαμηλότερες άκρες του καλύμματος προκειμένου να συλλέγουν το αφαλατωμένο νερό. Οι κοιλότητες θα πρέπει να είναι κατασκευασμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπουν στο αφαλατωμένο νερό να ρέει στα κατώτερα τμήματα του αποστακτήρα και να συλλέγεται ως προϊόν.

Η σχεδίαση ενός ηλιακού αποστακτήρα απαιτεί βελτιστοποίηση πολλών παραγόντων: το βάθος της άλμης, η αποφυγή διαρροής του ατμού, η θερμική μόνωση, η μορφή και το υλικό του αποστακτήρα.

Ένας καλοσχεδιασμένος αποστακτήρας πρέπει να έχει επιπρόσθετη πρόβλεψη για τη συλλογή της βροχής που πέφτει σε αυτόν, έτσι ώστε το γύρω έδαφος να μην πλημμυρίζει και να μην διαβρώνεται. Τα τμήματα του αποστακτήρα πρέπει να κατασκευάζονται έτσι ώστε να συνδυάζονται εύκολα. Επιπλέον ένας μεγάλος αριθμός σχεδίων για βάσεις έχουν χρησιμοποιηθεί. Διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τα υλικά κατασκευής, τη γεωμετρία, τον τρόπο υποστήριξης του καλύμματος και τις προβλέψεις για παροχή ή αποβολή νερού. Ένας αποστακτήρας απαιτεί συχνή απόπλυση του αλμυρού νερού προκειμένου να αποφευχθεί η
μείωση της απορροφητικότητας και ως εκ τούτου η μείωση της απόδοσης. Η απόδοση του αποστακτήρα, η οποία και ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την εξάτμιση προς την ηλιακή ενέργεια που συλλέγεται, είναι συνήθως χαμηλή και δεν ξεπερνά το 50%. Συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 30-40 %. Η ημερήσια παραγωγή του ηλιακού αποστακτήρα είναι 3-4 l/m^2



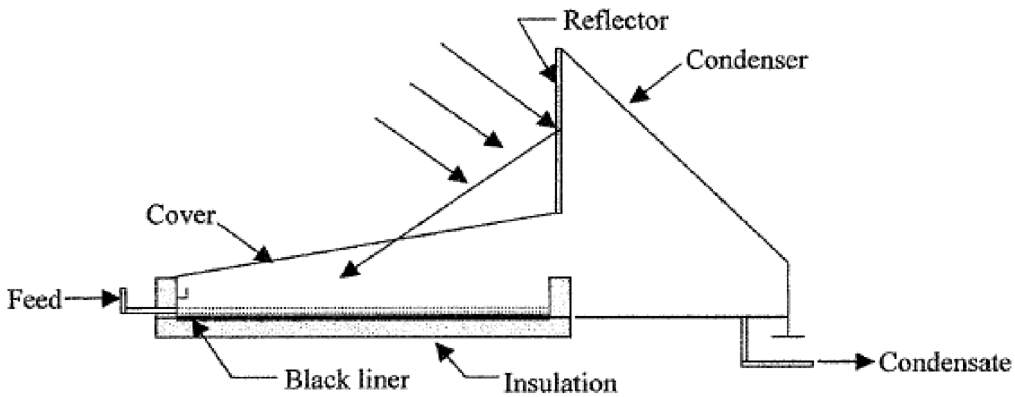
Εικόνα 27: Συνδυασμός ηλιακού αποστακτήρα και flat plate συλλέκτη

Σύμφωνα με μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί από ερευνητές, η μεταφορά μάζας μέσα στον αποστακτήρα εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας του νερού και του γυάλινου καλύμματος. Προκειμένου να αυξήσουν αυτή τη διαφορά θερμοκρασίας ορισμένοι προτείνουν τον **συνδυασμό του ηλιακού αποστακτήρα με έναν ηλιακό συλλέκτη τύπου flat plate** όπως φαίνεται και στην Εικόνα 27.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η απόδοση του αποστακτήρα μπορεί να αυξηθεί σημαντικά, αλλά παράλληλα θα αυξηθεί και το κόστος της όλης κατασκευής. Σε ορισμένες μάλιστα περιπτώσεις η παραγωγή του αποστακτήρα αυξήθηκε από περίπου 4 l/m2 σε 8 l/m2.

Ένας άλλος τρόπος για να αυξηθεί η απόδοση του αποστακτήρα, είναι να μειωθεί η θερμοκρασία του γυάλινου καλύμματος.

Η αύξηση της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ της επιφάνειας του αλμυρού νερού και του καλύμματος, μπορεί να πραγματοποιηθεί και με την προσθήκη ενός συμπυκνωτή στον αποστακτήρα (Εικόνα 28),αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την θερμοχωρητικότητα και κατ' επέκταση και την απόδοση.

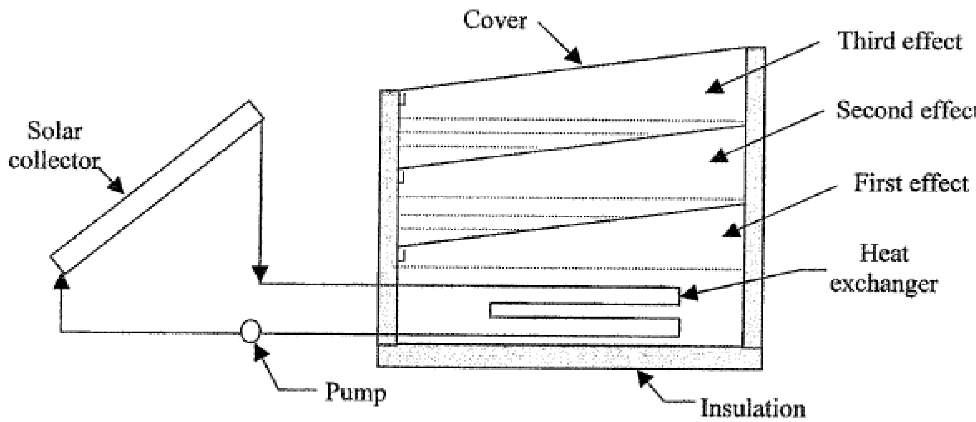


Εικόνα 28: Ηλιακός αποστακτήρας με προσθήκη συμπυκνωτή

Η εξάτμιση σε χαμηλή θερμοκρασία, με τη χρήση συνθηκών κενού αέρος, οδηγεί σε μια σημαντική βελτίωση της απόδοσης του συστήματος καθώς ο ρυθμός εξάτμισης αυξάνεται με την μείωση της πίεσης. Παραγωγικότητα συστήματος υψηλότερη σε σχέση με παρόμοια συστήματα αφαλάτωσης με χρήση ηλιακής ενέργειας που λειτουργούν σε ατμοσφαιρική πίεση, έχει αναφερθεί από πολλούς ερευνητές.

Όπως είναι προφανές, σε όλες τις διαμορφώσεις που περιγράψαμε προηγουμένως, η λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης απλώς διοχετευόταν στο περιβάλλον. Παρ' όλα αυτά η λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού, κάτι που θα οδηγήσει σε βελτίωση της απόδοσης του συστήματος.

Η λανθάνουσα θερμότητα της συμπύκνωσης θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί για την εξάτμιση ενός μέρους του αλμυρού νερού, σε έναν **αποστακτήρα multi effect** (Εικόνα 29).



Εικόνα 29: Multi effect αποστακτήρας

Σε έναν τέτοιο αποστακτήρα η θερμότητα αποδίδεται στο πρώτο effect από έναν ηλιακό συλλέκτη, ο ατμός που παράγεται σε αυτό κινείται προς τα πάνω μέσω φυσικής συναγωγής και συμπυκνώνεται όταν έρχεται σε επαφή με το κάτω μέρος του δεύτερου effect, αποδίδοντας τη λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης σε αυτό το στάδιο, εξατμίζοντας με αυτόν τον τρόπο ένα τμήμα του νερού από αυτό και η διαδικασία συνεχίζεται έως το τελευταίο effect, το οποίο πιθανώς να καλύπτεται από διάφανο κάλυμμα, κερδίζοντας με αυτόν τον τρόπο επιπλέον ποσά θερμότητας απευθείας από τον ήλιο. Αυτή η μέθοδος οδηγεί όπως είπαμε σε σημαντική βελτίωση της απόδοσης του συστήματος.

Η νυκτερινή λειτουργία ενός ηλιακού αποστακτήρα τροφοδοτούμενου από αποβαλλόμενη θερμότητα η αποθηκευμένη ενέργεια είναι επίσης ένα θέμα υπό έρευνα.

Φρέσκο νερό μπορεί επίσης να παραχθεί από αλμυρό μέσω ενός **κύκλου ύγρανσης – αφύγρανσης (humidification-dehumidification cycle).** Σε αυτήν την διαδικασία ο αέρας ανακυκλώνεται με φυσική ή εξαναγκασμένη συναγωγή πάνω από θερμό νερό που τροφοδοτείται από τον ηλιακό συλλέκτη. Ο αέρας γίνεται υγρός και στην συνέχεια περνάει μέσα από τον συμπυκνωτή για αφύγρανση. Πιο συγκεκριμένα, όταν ο αέρας που κυκλοφορεί έρχεται σε επαφή με το θερμό αλμυρό νερό στον εξατμιστή, μια συγκεκριμένη ποσότητα ατμού εξάγεται στον αέρα. Μέρος του ατμού του ανακατεμένου με αέρα μπορεί να ανακτηθεί ως συμπύκνωμα φέρνοντας τον υγρό αέρα σε επαφή με μία ψυχρή επιφάνεια σε άλλον εναλλάκτη, όπου το τροφοδοτικό νερό παράλληλα προθερμαίνεται με την λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης.

Στα άμεσα συστήματα θα μπορούσαμε να κατατάξουμε και αυτά που χρησιμοποιούν την **μέθοδο απόσταξης με μεμβράνες (membrane distillation)**. Η μέθοδος εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας που παρατηρείται ανάμεσα σε μια ποσότητα τροφοδοτικού νερού όταν έρχεται σε επαφή από τη μία με την επιφάνεια της μεμβράνης και από την άλλη με την περιοχή μετά την μεμβράνη. Αυτή η διαφορά θερμοκρασίας, οδηγεί σε μια διαφορά πίεσης του ατμού, οδηγώντας στην μετάδοση του παραγόμενου ατμού μέσω της μεμβράνης στην επιφάνεια συμπύκνωσης. Η όλη διαδικασία στηρίζεται στην χρήση υδροφοβικών μεμβρανών, διαπερατών μόνο από τον ατμό, οπότε με αυτόν τον τρόπο αποκλείεται η μεταφορά υγρής φάσης και πιθανώς διαφόρων μη διαλυμένων σωματιδίων.

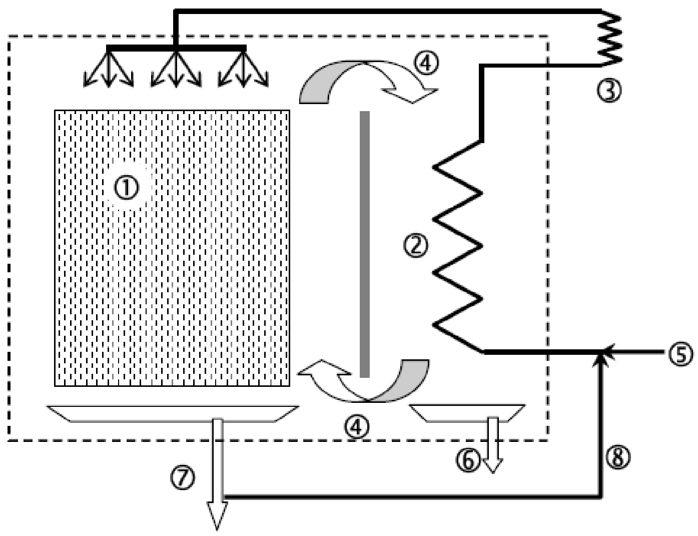


Fig. 3. General layout of an HD unit:1 evaporation area, 2 condensation area, 3 heat source, 4 air circulation, 5 feed saline water, 6 distillate, 7 brine, 8 brine recirculation reflux.

Εικόνα 30: Μονάδα ύγρανσης - αφύγρανσης (HD)

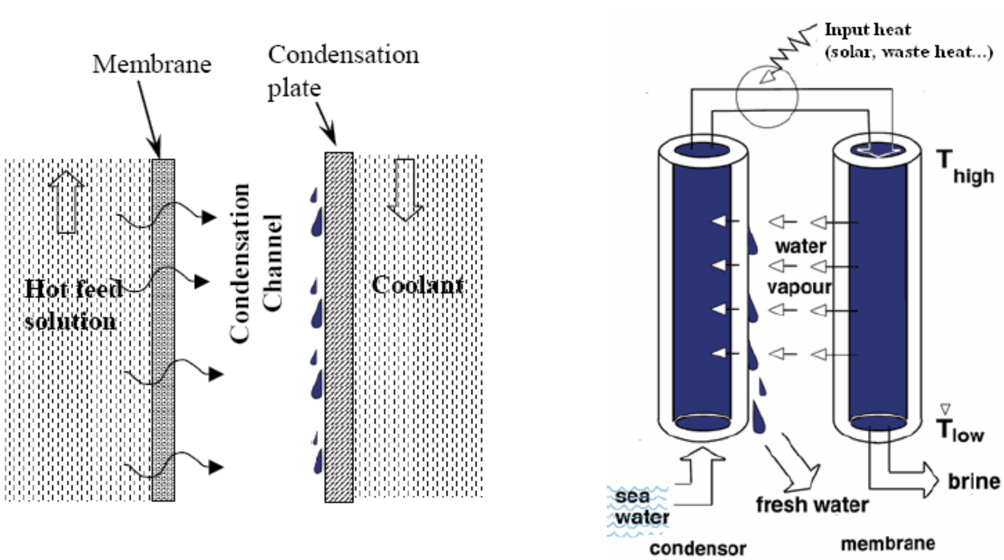


Fig. 4. Principle of the MD process (left) and schematic diagram of a typical MD system (right).

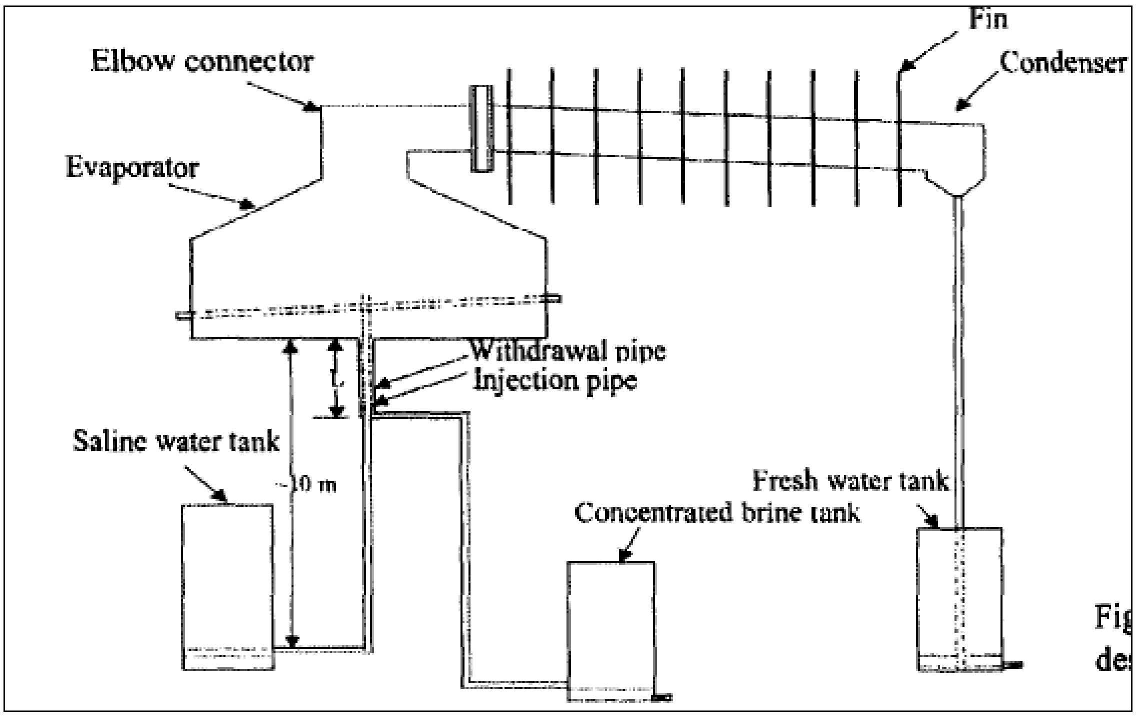
Εικόνα 31: Μέθοδος απόσταξης με μεμβράνες (Membrane Distillation)

Σε ένα τυπικό σύστημα MD, το τροφοδοτικό νερό (με θερμοκρασία εισόδου περίπου 25°C), περνά διαμέσου του καναλιού συμπύκνωσης (condensation channel) και θερμαίνεται (65°C περίπου θερμοκρασία εξόδου). Η τροφοδοσία (hot feed solution, T_{high} = 80°C θερμοκρασία εισόδου), κατευθύνεται ακριβώς στην μεμβράνη περνώντας από το κανάλι εξάτμισης (evaporator channel) ψυχόμενο παράλληλα (T_{low} = 40°C στο τέλος της εξάτμισης). Η θερμότητα η απαραίτητη για την κάλυψη της διαφοράς θερμοκρασίας 80°C- 65°C, μεταξύ των δύο καναλιών εισάγεται στο σύστημα ανάμεσα στην έξοδο του συμπυκνωτή και στην είσοδο του εξατμιστή, από το θερμικό ενδιάμεσο (πχ ηλιακή ενέργεια)

Πρέπει να παρατηρήσουμε ότι η διαδικασία MD λαμβάνει χώρα σε ατμοσφαιρική πίεση και σε θερμοκρασίες που δεν ξεπερνούν τους 80°C, οπότε οι ενεργειακές απαιτήσεις αφορούν μόνο το κομμάτι της θερμικής ενέργειας. Για αυτόν τον λόγο η MD είναι μια διαδικασία με πολλά πλεονεκτήματα όσον αφορά την ενσωμάτωσή της στα πλαίσια ενός θερμικού ηλιακού συστήματος αφαλάτωσης.

4. Εφαρμογές

4.1 Ανάλυση ενός καινοτόμου συστήματος αφαλάτωσης ύδατος που χρησιμοποιεί ηλιακή θερμότητα χαμηλής βαθμίδας (low grade)



Εικόνα 32: Σύστημα αφαλάτωσης ύδατος που χρησιμοποιεί θερμότητα χαμηλής βαθμίδας

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 εφαρμογή αυτή παρουσιάζει το πλεονέκτημα της απόσταξης υπό κενό αέρος, χωρίς όμως να απαιτείται επιπλέον ενέργεια για τη δημιουργία του κενού αέρος.

Η ατμοσφαιρική πίεση είναι αντίστοιχη με την υδροστατική πίεση που αναπτύσσεται από μία 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 μία μονάδα ηλιακής θέρμανσης, ένας ατμοποιητής (evaporator) και ένας υγροποιητής (condenser) τοποθετημένα σε απόσταση 10 μέτρων από το έδαφος και συνδεδεμένα μέσω σωλήνων με την παροχή αλμυρού νερού, την αποβολή της άλμης (brine tank) και μία 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 βρόχου. Το τροφοδοτικό νερό και οι συγκεντρωμένη άλμη περνάνε μέσα από έναν 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.

Εάν δύο δεξαμενές νερού συνδεθούν μεταξύ τους, η απόσταξη του νερού θα γίνει 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 ίδια, η απόσταξη θα πραγματοποιηθεί από την πλευρά του φρέσκου νερού προς αυτήν του αλμυρού νερού. Για να επιτύχουμε την απόσταξη κατά την αντίστροφη διαδρομή το αλμυρό νερό θα πρέπει να διατηρείται σε υψηλότερη θερμοκρασία. Εδώ αυτό επιτυγχάνεται με την 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 λειτουργούν και με καλύτερο βαθμό απόδοσης λόγω χαμηλότερων θερμοκρασιών λειτουργίας.

Η εξάτμιση 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 της άλμης και εξάτμισης. Η αποβαλλόμενη άλμη θα βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία έτσι είναι σημαντικό να ανακτηθεί θερμότητα από αυτή. Ένας εναλλάκτης θερμότητας με σωλήνες θα χρησιμοποιηθεί γι' αυτόν τον σκοπό έτσι που το τροφοδοτικό νερό θα ρέει στον εσωτερικό σωλήνα και η αποβαλλόμενη άλμη σε δέσμη σωλήνων 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 υπό 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 αλατιού. Κατά την εφαρμογή αυτών των ισολογισμών υποτίθεται ότι καμία 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:

- Διατήρηση της μάζας:

$$\boxed{\rho_i \dot{V}_i = \rho_w \dot{V}_w + \rho_e \dot{V}_e}$$

- Διατήρηση της συγκέντρωσης της διαλυόμενης ουσίας:

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

- Διατήρηση της ενέργειας:

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

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 αποβάλει το ποσό ενέργειας που δίνεται από τη σχέση:

$$Q_c = \dot{m} h_{fg}^*$$

όπου h^*_{fg} δίνεται από τη σχέση:

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

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

$$\dot{m} h_{fg}^* = \frac{2\pi l_c k_c \left(T_{ci} - T_{co}\right)}{\ln\left(r_{co}/r_{ci}\right)}$$

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

$$Q_c = \left(h_{co,\text{tip}} N A_{f,\text{tip}} \eta_f + h_{co} N A_{f,\text{sides}} \eta_f + h_{co} A_b\right) \left(T_{co} - T_a\right)$$

Η πίεση λειτουργίας της προτεινόμενης μονάδας μπορεί να υπολογισθεί 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 υπολογισθεί εφαρμόζοντας την εξίσωση συνέχειας πίεσης και ενέργειας μεταξύ της εισόδου και της εξόδου της στήλης.

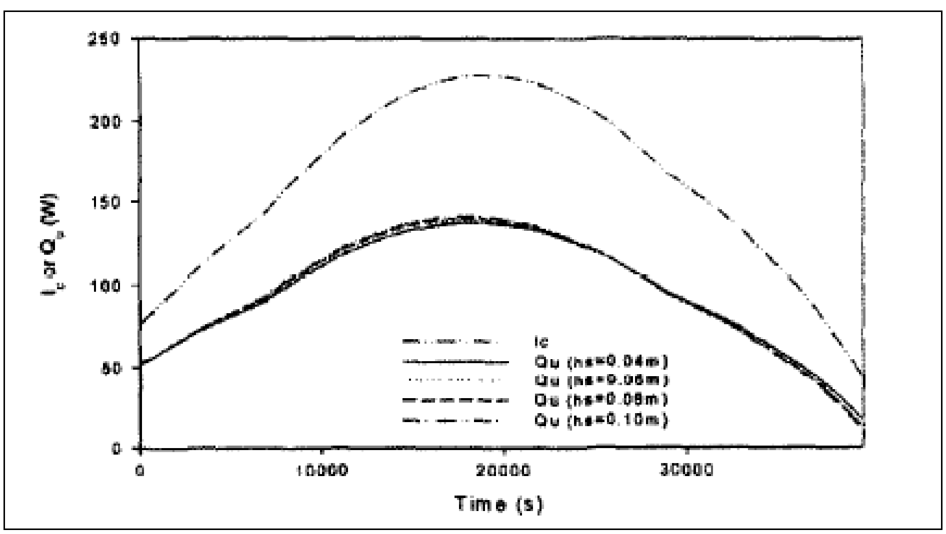
$$(\rho A v)_{in} = (\rho A v)_{out}$$

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

Η μονάδα η οποία τέθηκε προς δοκιμή διέθετε έναν ατμοποιητή κυλινδρικού σχήματος με επιφάνεια 0.2 m2 και ύψος 0.2 m ενώ είχε προστεθεί και ένας συνδετικός κώνος στην κορυφή του. Ο εξατμιστής τροφοδοτείται με αλμυρό νερό μέσω ενός χαλκοσωλήνα διαμέτρου 12,7 mm, ο οποίος περικλείεται μέσα σε έναν σωλήνα PVC διαμέτρου 25,4mm , ο οποίος χρησιμοποιείται για την αποβολή της συγκεντρωμένης άλμης. Οι δύο σωλήνες συγκροτούν έναν εναλλάκτη θερμότητας τύπου σωλήνα-σωλήνα. Ο υγροποιητής είναι ένας χαλκοσωλήνας διαμέτρου 101.6 mm, μήκους 0.5 m και πάχους 2,5 mm. Στην επιφάνεια του βρίσκονται τοποθετημένοι 10 ανεμιστήρες διαμέτρου 254 mm και πάχους 0.635 mm τοποθετημένοι ανά 40 mm. Η άλλη άκρη του υγροποιητή συνδέεται με έναν υποδοχέα συμπυκνώματος μέσω ενός σωλήνα PVC διαμέτρου 12.7mm. Για τους θεωρητικούς υπολογισμούς θεωρήθηκαν θερμοκρασία αναφοράς 25^{o}C , συγκέντρωση σε αλάτι 3.5% και πυκνότητα αναφοράς 1021 kg/m3. Ο ηλιακός συλλέκτης που χρησιμοποιήθηκε είχε απόδοση που δίνεται μέσω του τύπου:

$$\eta = 0.72 - \frac{5.6\Delta T}{I_c}$$

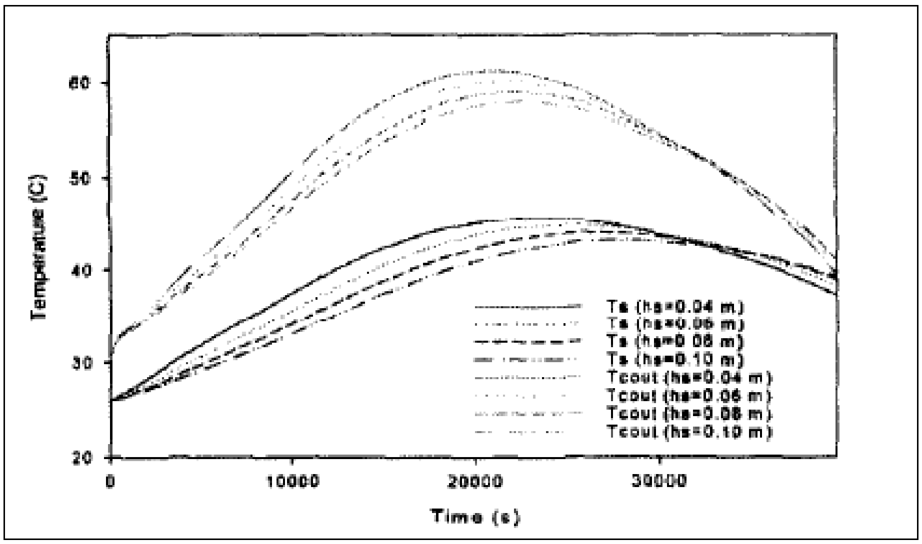
Η επιφάνεια του συλλέκτη θεωρήθηκε ίση με αυτή του εξατμιστή δηλαδή 0.2 m2, ενώ για όλους τους υπολογισμούς η θερμοκρασία περιβάλλοντος θεωρήθηκε ίση με 25^{o}C. Οι τιμές ηλιακής ακτινοβολίας ελήφθησαν για μια ηλιόλουστη μέρα του Ιουλίου στην περιοχή της Φλόριδας (29.68^o N, 82.27^{o}W), με τον συλλέκτη να είναι στραμμένος κατά τη νότια κατεύθυνση.



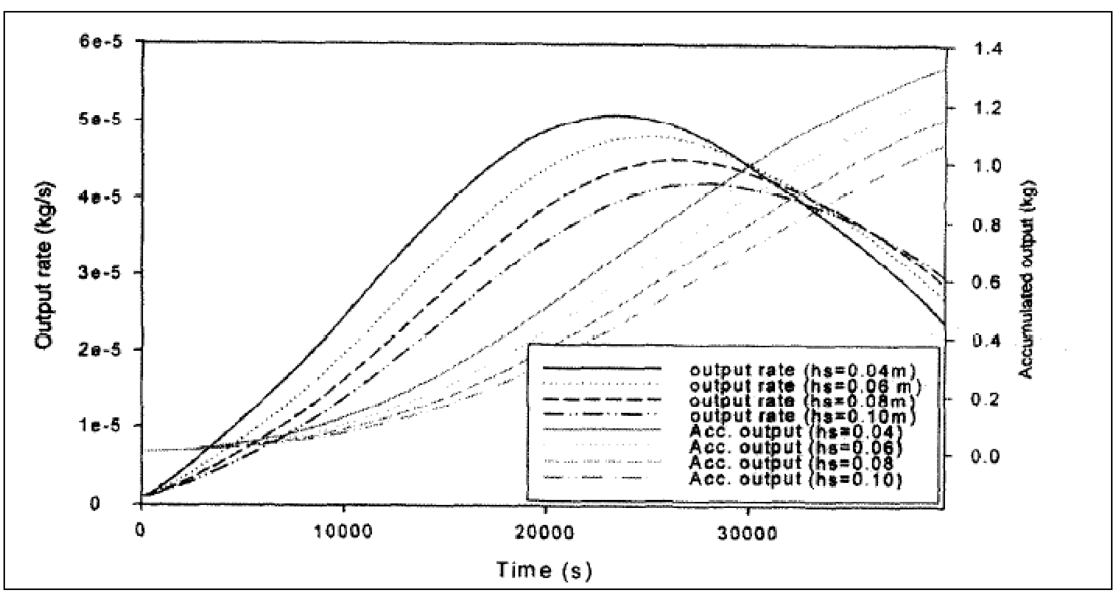
Εικόνα 33: Διάγραμμα προσπίπτουσας ακτινοβολίας και ωφέλιμης ισχύος

Το παραπάνω διάγραμμα της Εικόνας 33 δείχνει το ποσό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο συλλέκτη και το ποσό της ωφέλιμης ισχύος που παρέχεται από το συλλέκτη στο σύστημα. Το τελευταίο ποσό δίνεται σε συνάρτηση με το βάθος του νερού μέσα στον ατμοποιητή. Όπως φαίνεται όσο μικρότερο είναι το βάθος τόσο μικρότερη είναι και η ωφέλιμη ισχύς. Στο απόγειο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας η απόδοση του συλλέκτη είναι περίπου 60%.

Στο διάγραμμα της Εικόνας 34 φαίνεται η διακύμανση της θερμοκρασίας του νερού μέσα στον ατμοποιητή καθώς και η θερμοκρασία στην έξοδο του συλλέκτη πάλι για διάφορα βάθη νερού.



Εικόνα 34: Διάγραμμα θερμοκρασίας εξόδου του συλλέκτη και θερμοκρασίας του νερού στον ατμοποιητή

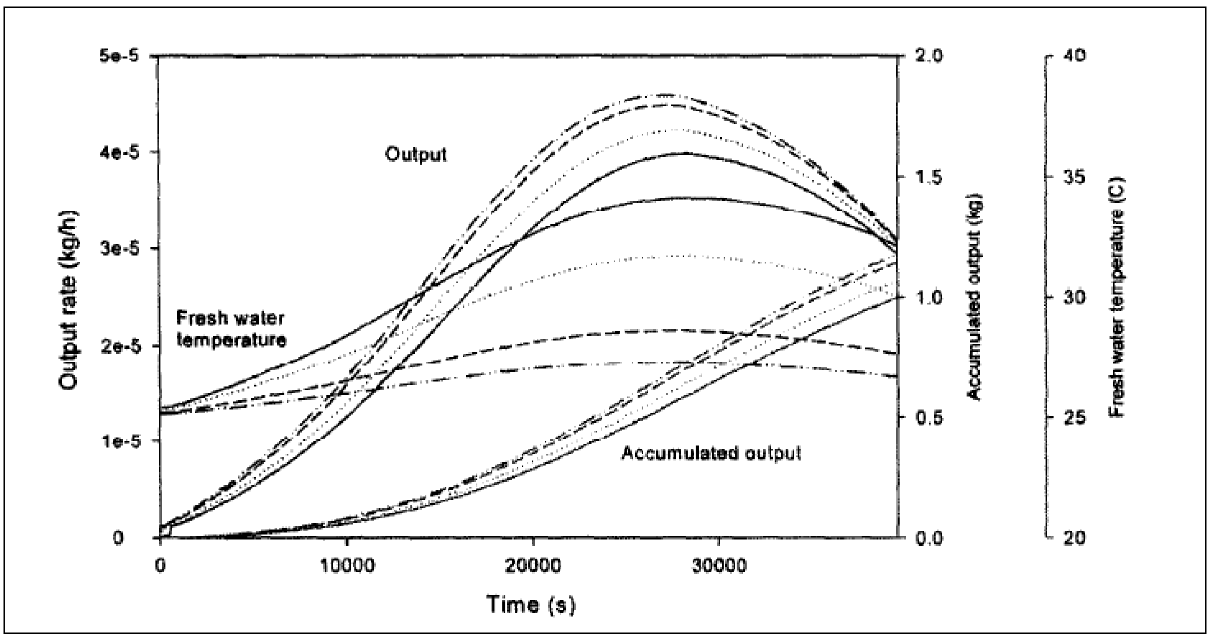


Εικόνα 35: Διάγραμμα παραγωγικής ικανότητας του συστήματος συναρτήσει του χρόνου

Είναι προφανές ότι όσο μικρότερο το βάθος του νερού τόσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία στο απόγειο της ηλιακής ακτινοβολίας.

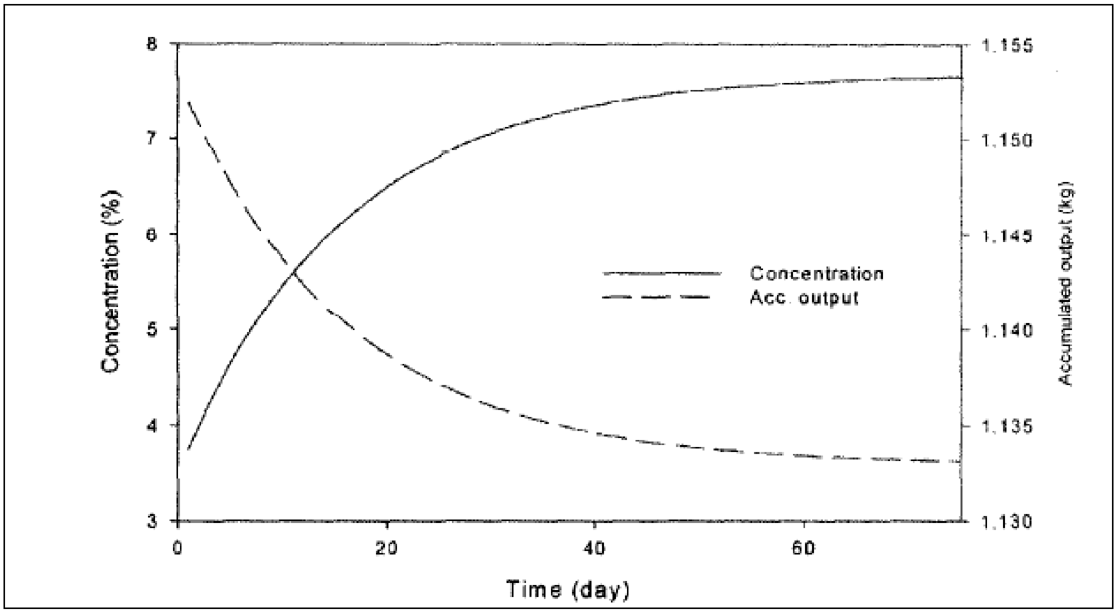
Η διακύμανση της εξόδου του συστήματος σε συνάρτηση με τον χρόνο για διάφορες ποσότητες νερού μέσα στον εξατμιστή φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 35. Η υψηλότερη παραγωγή αντιστοιχεί στην χαμηλότερη ποσότητα νερού.

Η επίδραση της θερμοκρασίας του φρέσκου νερού φαίνεται στην Εικόνα 36. Διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας φρέσκου νερού μπορούν να επιτευχθούν μεταβάλλοντας την επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας στον υγροποιητή. Όσο η επιφάνεια μεγαλώνει, η θερμοκρασία του φρέσκου νερού ελαττώνεται ενώ η παραγωγή αυξάνεται. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι εάν ο αριθμός των ανεμιστήρων στον συμπυκνωτή αυξηθεί από 10 σε 20 , η ημερήσια παραγωγή θα ανέλθει στα 1.17kg από 1.07kg. Βέβαια θα πρέπει να υπάρξει κάποιος συμβιβασμός ανάμεσα στην αυξανόμενη παραγωγή και το αυξανόμενο κόστος του υγροποιητή όσο η επιφάνεια μεγαλώνει.



Εικόνα 36: Επίδραση της θερμοκρασίας φρέσκου νερού στην παραγωγική ικανότητα

Το διάγραμμα της Εικόνας 36 δείχνει τη μεταβολή της πίεσης και της συγκέντρωσης συναρτήσει του χρόνου. Η απόλυτη πίεση φτάνει μία μέγιστη τιμή περίπου ίση με 4,7kPa ενώ η συγκέντρωση συνεχίζει να αυξάνει έως το τέλος της ημέρας δοκιμής. Θεωρώντας ότι η τιμή στο τέλος της μέρας αποτελεί την αρχική συγκέντρωση την επόμενη ημέρα μια σταθερή τιμή της τάξης του 7.53% θα επιτευχθεί μετά από 53 ημέρες.



Τέλος πρέπει να αναφέρουμε ορισμένα λειτουργικά στοιχεία της εγκατάστασης όπως τη θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας που ήταν ίση με 60°C, η ενέργεια που απαιτήθηκε ήταν 158W για την πειραματική διάταξη ενώ η θεωρητική προσομοίωση είχε υπολογίσει 150,8W και η παραγωγή ανήλθε σε 0.598kg για εξάωρη δοκιμή σε σχέση με τα 0.675kg που θεωρητικά υπολογίσαμε.

4.2 Multi-effect thermal regeneration solar desalination unit with horizontal tube falling film evaporation

Μία βελτιωμένη μονάδα η οποία χρησιμοποιεί falling film εξάτμιση και διαδικασίες θερμικής αναγέννησης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Έχει προκύψει από την ενδελεχή μελέτη των πλεονεκτημάτων των μεθόδων απόσταξης με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία.

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 37 η μονάδα αποτελείται κυρίως από τον ατμοποιητή (ένα ορθογώνιο κουτί με πολλούς οριζόντιους σωλήνες), τον ψεκαστή θαλάσσιου νερού, τον διανομέα θαλάσσιου νερού, μια αντλία κυκλοφορίας νερού, μια αντλία θερμού νερού, έναν ανεμιστήρα κυκλοφορίας, έναν συσσωρευτή, έναν διαχωριστή υγρού – ατμού και ένα σύστημα προσομοίωσης θερμότητας. Η λειτουργία της μονάδας έχει ως εξής: το νερό που έχει θερμανθεί μέσω των ηλιακών συσσωρευτών ή της αποβαλλόμενης θερμότητας εισέρχεται στην μονάδα μέσω της εισόδου και περνάει μέσα από πολλούς οριζόντιους σωλήνες (15) στον

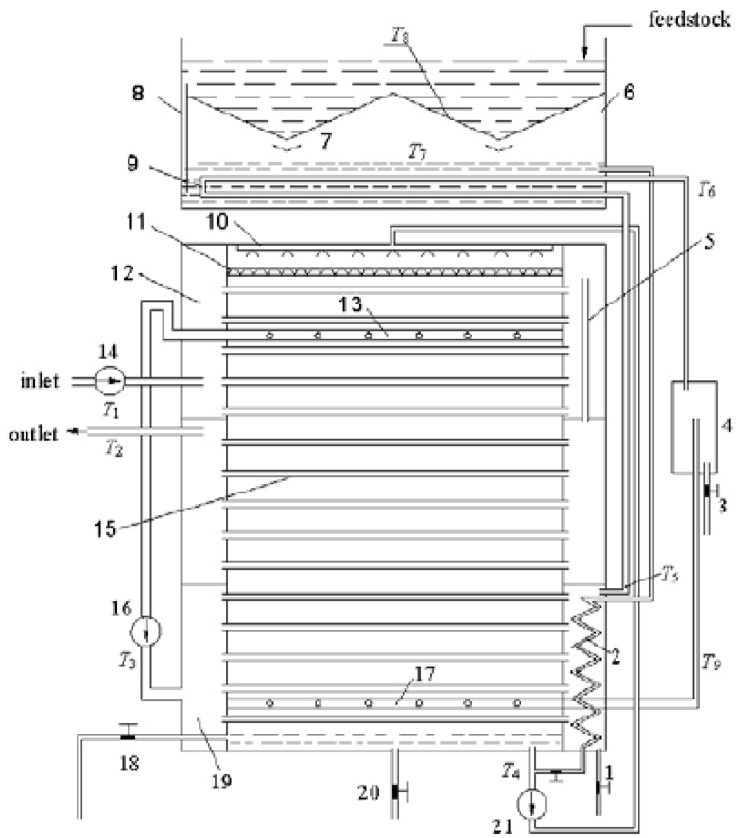


Fig. 1. Schematic diagram of the unit. 1. freshwater valve; 2. heat exchanger; 3. freshwater valve; 4. gas–liquid separator; 5. link tuber; 6. stacked tray still; 7. V-shape troughs; 8. link tube; 9. heat exchanger; 10. sprayer; 11. holed plate distributor; 12. distribution chamber; 13. drawing vapor tubes; 14. hot water pump; 15. horizontal tubes; 16. air-fan; 17. delivering air tube; 18. overflow valve; 19. condensation cavity; 20. valve; 21. circulation water pump.

Εικόνα 37: Σχηματικό διάγραμμα της εγκατάστασης

διανομέα (12). Το θαλάσσιο νερό που ρέει έξω από τους οριζόντιους σωλήνες θερμαίνεται και εξατμίζεται. Το νερό θέρμανσης ρέει στο πρώτο επίπεδο του διανομέα από την είσοδο (inlet) και στη συνέχεια στο δεύτερο επίπεδο μέσω ενός σωλήνα – συνδέσμου (5). Τελικά εξέρχεται από την μονάδα μέσω της εξόδου (outlet). Η τροφοδοσία σε θαλάσσιο νερό στο πρώτο επίπεδο γίνεται από τη θέση (6) μέσω του σωλήνα (8). Μετά περνάει μέσα από το δεύτερο επίπεδο και έναν χάλκινο σωλήνα τύπου σερπαντίνα (2) στο δεξιό μέρος της κοιλότητας συμπύκνωσης (19), όπου αντλείται στην κορυφή του εξατμιστή μέσω της αντλίας νερού (21) και ανακυκλοφορεί συνεχώς. Το τροφοδοτικό αλμυρό νερό τελικά φτάνει στον πυθμένα του εξατμιστή. Στην κορυφή του εξατμιστή, το μείγμα τροφοδοσίας και άλμης από τον ψεκαστή (10), ψεκάζεται ισότροπα από έναν διάτρητο διανομέα (11) και στη συνέχεια πέφτει στους οριζόντιους σωλήνες. Η άλμη η οποία ρέει κάθετα λόγω της βαρύτητας από τους ανώτερους προς τους κατώτερους σωλήνες, δημιουργεί ένα φιλμ στις επιφάνειες γύρω από τους οριζόντιους σωλήνες φτάνοντας τελικά στον πυθμένα του εξατμιστή. Η συμπυκνωμένη άλμη αποβάλλεται από την βαλβίδα υπερχείλισης (18).

Όταν η άλμη ρέει από τον ένα οριζόντιο σωλήνα στον άλλο, απορροφά ένα μεγάλο ποσό της θερμότητας από το θερμό νερό που ρέει μέσα στους σωλήνες και εξατμίζεται σε υδρατμό. Ειδικά κάτω από συνθήκες αρνητικής πίεσης η εν λόγω διαδικασία εμφανίζεται ενισχυμένη. Ο ατμός στην συνέχεια αποστέλλεται στην κοιλότητα συμπύκνωσης (19), όπου συμπυκνώνεται υπό συνθήκες θετικής πίεσης και απελευθερώνει το σύνολο σχεδόν της λανθάνουσας θερμότητας από τον ανεμιστήρα (16) μέσω του σωλήνα ατμού (13). Κατά τη διαδικασία, η λανθάνουσα θερμότητα μεταφέρεται στο φιλμ άλμης που καταπέφτει στους οριζόντιους σωλήνες, προκαλούν την εξάτμιση της άλμης. Στο δεξιό τμήμα της κοιλότητας συμπύκνωσης, τμήμα του ατμού ανταλλάσει θερμότητα με την τροφοδοσία που ρέει στον σωλήνα (2) και μετατρέπεται σε καθαρό νερό. Στη συνέχεια το μείγμα συμπυκνωμένου ατμού και νερού στέλνεται στον εναλλάκτη θερμότητας (9) στη θέση (6) για να παράγει επιπλέον φρέσκο νερό. Τελικά το μείγμα με χαμηλή θερμοκρασία αποστέλλεται στον διαχωριστή υγρού – ατμού (4), όπου το αέριο ρεύμα συμπυκνώνεται ακόμα περισσότερο με συνέπεια την απόσταξη περισσότερου φρέσκου νερού. Το υπόλοιπο αέριο ρεύμα ανακυκλώνεται στον εξατμιστή μέσω του σωλήνα (17). Έτσι η ανακυκλοφορία ολοκληρώνεται. Το φρέσκο νερό λαμβάνεται από τις βαλβίδες (1) και (3).

Όπως είναι προφανές ο θάλαμος εξάτμισης είναι το κύριο τμήμα της όλης εγκατάστασης. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα ορθογώνιο κουτί με διστάσεις 1000×550×280 mm, κατασκευασμένο από πλάκες ανοξείδωτου ατσαλιού πάχους 1.5 mm. Ο θάλαμος εξάτμισης περιλαμβάνει και 117 οριζόντιους χαλκοσωλήνες μέσα από τους οποίους διέρχεται το θερμό νερό ή ο ατμός. Για να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη ύγρανση των σωλήνων χρησιμοποιείται ένας ψεκαστής (sprayer) και ένας διανομέας θαλάσσιου νερού (seawater distributor) , στην κορυφή του θαλάμου. Ο διαχωριστής είναι ουσιαστικά μία διάτρητη πλάκα με οπές διαμέτρου 2 mm τοποθετημένες σε απόσταση 20×20 mm μεταξύ τους. Οι οριζόντιοι σωλήνες αποτελούνται από χαλκοσωλήνες πάχους 1.0 mm και εξωτερικής διαμέτρου 20 mm. Είναι τοποθετημένοι σταυρωτά με βάθος 40 mm κατά την κάθετη και 50 mm κατά την οριζόντια κατεύθυνση. Το μήκος των σωλήνων είναι 550 mm.

Η εξωτερική ενέργεια που παρέχεται στην μονάδα είναι θερμό νερό θερμοκρασίας 65–90^{o}C.

Ο εναλλάκτης θερμότητας (2) αποτελείται από χαλκοσωλήνες εξωτερικής διαμέτρου 8 mm, πάχους 0.5 mm και μήκους 4000 mm. ο εναλλάκτης θερμότητας (9) αποτελείται από χαλκοσωλήνες με διαστάσεις 12x0.5x3500 mm.

Οι σωλήνες του σχηματιζόμενου ατμού (13) αποτελούνται ουσιαστικά από δύο τμήματα συνδεδεμένα παράλληλα μεταξύ τους. Η εξωτερική τους διάμετρος είναι 25 mm και το μήκος τους 550 mm. Στις δύο αντιδιαμετρικές πλευρές αυτών των σωλήνων υπάρχουν οπές οι οποίες επιτρέπουν την δημιουργία αέριου ρεύματος. Ο σωλήνας μεταφοράς αέρα (17) είναι χαλκοσωλήνας με εξωτερική διάμετρο 20 mm και μήκος 540 mm.

Η διεθνής βιβλιογραφία μας δίνει τις παρακάτω ενδεικτικές σχέσεις για την μονάδα:

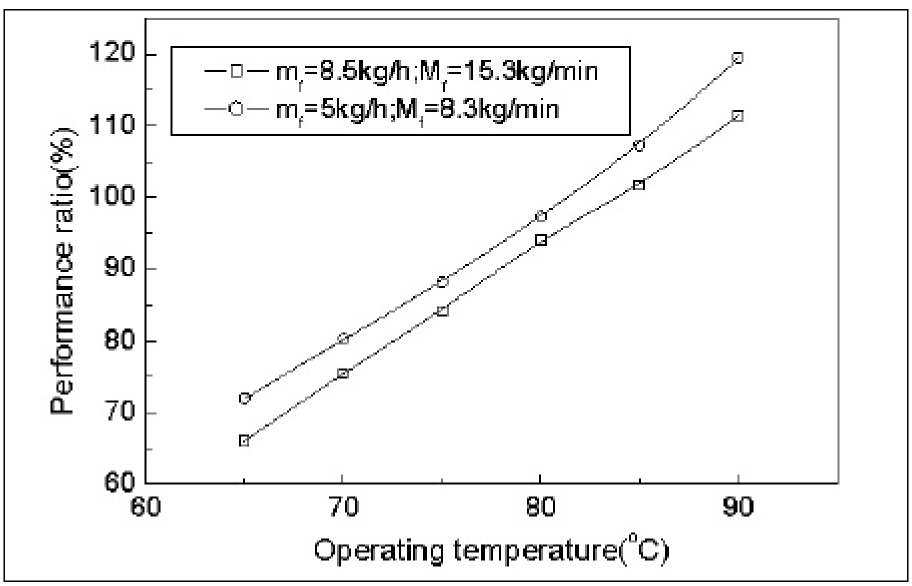
- Λόγος απόδοσης (performance ratio, PR)

$$PR = \frac{m_e h_{fg}}{Q} = \frac{(m_{e1} + m_{e2}) h_{fg}}{M_f C_p (T_1 - T_2) + W_p}$$

Όπου:

$m_e =$ Παροχή φρέσκου νερού σε kg/h
$h_{fg} =$ Θερμότητα ατμοποιήσεως του νερού σε KJ/kg
$Q =$ Προσφερόμενη θερμότητα στη μονάδα σε KJ
$m_{e1} =$ Παροχή φρέσκου νερού στο κυρίως τμήμα της μονάδας σε kg/h
$m_{e2} =$ Παροχή φρέσκου νερού στον σταθερό ηλιακό αποστακτήρα σε kg/h
$T =$ Θερμοκρασία σε Kelvin
$\dot{M}_f =$ Ρυθμός ροής θερμού νερού
$W_P =$ Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς σε KJ/h

Οι πειραματικές μετρήσεις αποδεικνύουν ότι ο λόγος απόδοσης είναι αρκετά καλός και γενικά φτάνει στο 80%. Πολλοί βέβαια είναι οι παράγοντες από τους οποίους επηρεάζεται με σημαντικότερο το ρυθμό ροής του θερμού νερού M_f.



Εικόνα 38: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας

Επιπλέον μέσω των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι προφανές ότι η συμβολή του μεγέθους m_{e1} στον λόγο απόδοσης είναι της τάξης του 10-15% όταν T_1>70°C. Η μεταβολή του PR συναρτήσει της θερμοκρασίας λειτουργίας φαίνεται στο διάγραμμα 38.

Φαίνεται ότι ο λόγος απόδοσης αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας για σταθερές συνθήκες. Δηλαδή η μονάδα έχει μεγαλύτερα πλεονεκτήματα λειτουργώντας σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Κατά τη διεργασία, ο ανακυκλούμενος αέρας στην μονάδα υπόκειται σημαντικές μεταβολές με μεταφορά μάζας και θερμότητας. Σαν αποτέλεσμα τόσο ο ρυθμός ροής όσο και η ενθαλπία μεταβάλλονται. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας των υπολογισμών, προχωρούμε σε απλοποίηση των υπολογισμών της μεταφοράς μάζας και θερμότητας, θεωρώντας ότι ο αέρας υγροποιείται στην τοπικά επικρατούσα θερμοκρασία. Οι απώλειες θερμότητας μέσω των τοιχωμάτων και της βάσης του κυρίως σώματος θεωρούνται αμελητέες. Εδώ παρατίθενται οι υπολογισμοί για μία συγκεκριμένη θερμοκρασία (85°C). Οι σχετικές θερμοκρασίες και άλλες καταστάσεις παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Productivity and relevant temperatures under steady-state with operating temperature of 85°C

T_1	T_2	T_3	T_4 °C	T_5	T_6	T_9	T_7	m_f (kg/h)	M_f (kg/h)	$V_{a,m}$ (m^3/h)	m_{e1} (kg/h)	m_{e2} (kg/h)	PR (%)
84.9	83.0	80.7	81.1	75.5	59.7	47.5	66.5	20.0	830	6.50	2.85	0.4	103.9

Για τους υπολογισμούς θεωρήθηκε ότι η πίεση μέσα στην μονάδα είναι 101.3 kPa, ενώ τόσο ο ατμός όσο και ο αέρας θεωρούνται ιδανικά αέρια.

Η υγρασία του υγρού αέρα δίνεται από τη σχέση:

$$\omega = 0.622 p_v / (101.3 - p_v)$$

Αν τα m_v και V_a αντιστοιχούν στην μάζα υδρατμού ανά μονάδα όγκου και στη ροή όγκου του αέρα στη θερμοκρασία T αντίστοιχα, τότε:

$$m_v = 0.622 p_v / (R_a T)$$

$$V_a = V_{a,m} T / 320.7 \times (101.3 - p_v(320.7)) / (101.3 - p_v)$$

Όπου Ra η σταθερά των αερίων ίση με 287J/kgK.

Αν η ενθαλπία του ξηρού αέρα και του νερού στους 0 °C, θεωρηθεί ίση με το μηδέν τότε η ενθαλπία του υγρού αέρα ανά μονάδα μάζας ξηρού αέρα στην θερμοκρασία T, θα είναι:

$$H_{a,s} = (1.005 + \omega C_{p,v})(T - 273.15) + \omega h_{fg}$$

Η ροή μάζας του υδρατμού και ο ρυθμός ροής θερμότητας είναι:

$$G_v = V_a m_v$$

$$Q_{a,s} = V_a H_{a,s} m_v / \omega$$

Όπου:

$p_v =$ η πίεση των υδρατμών σε kPa

$V_{a,m} =$ η ροή αέρα μετρούμενη στην έξοδο του διαχωριστή σε m3/h

Μετά τη δοκιμή του συστήματος σε κλειστό χώρο και σταθερές συνθήκες, η σύνδεση μεταξύ της θερμοκρασίας λειτουργίας και της αποσταγμένης ποσότητας, καθώς επίσης και ο λόγος απόδοσης του συστήματος και άλλοι παράγοντες είναι γνωστοί. Με βάση αυτά τα δεδομένα μπορούμε να σχεδιάσουμε ένα κατάλληλο ηλιακό σύστημα για την μονάδα. Εδώ ο επιλεγμένος συλλέκτης είναι τύπου σωλήνων, κατασκευάστηκε στην Κίνα και δοκιμάστηκε στην Ελβετία. Η απόδοσή του δίνεται μέσω της σχέσης:

$$\eta = 0.803 - 2.01\frac{T_i - T_a}{I} - 0.0034\frac{(T_i - T_a)^2}{I}$$

Όπου:

$T_a =$ η θερμοκρασία περιβάλλοντος σε ^oC

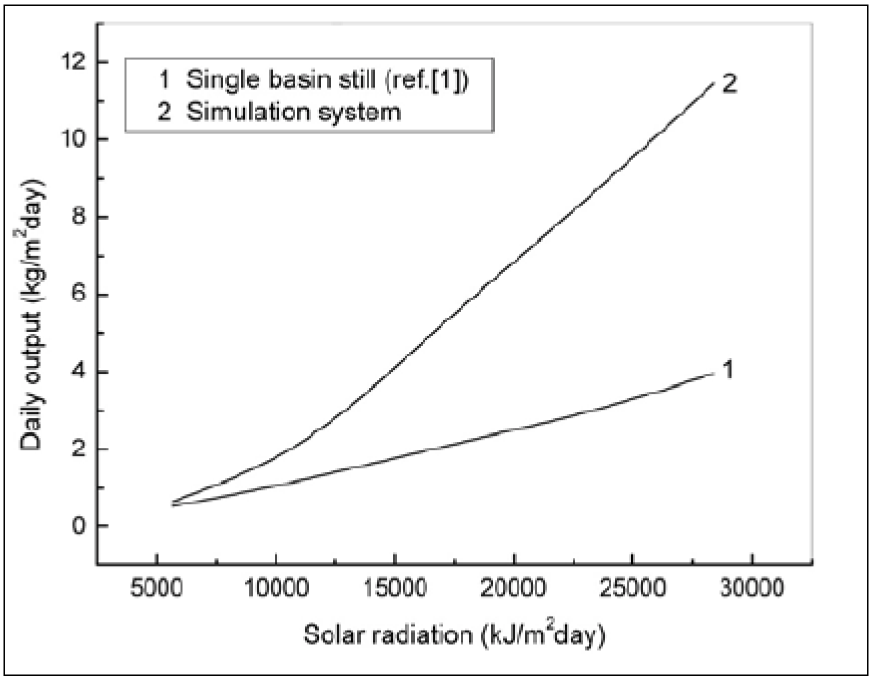
$T_i =$ η θερμοκρασία στην είσοδο του ηλιακού συλλέκτη σε ^oC

$I =$ ηλιακή ακτινοβολία σε W/m2

Από τις παρατηρήσεις προέκυψε ότι το ετήσιο μέσο κόστος καθώς και το προϊόν της απόσταξης μεταβάλλονταν με την λειτουργούσα θερμοκρασία, την επιφάνεια των συλλεκτών καθώς και την χωρητικότητα της δεξαμενής θερμού νερού. Αναλυτικά αποτελέσματα φαίνονται στους πίνακες και τα διαγράμματα που ακολουθούν.

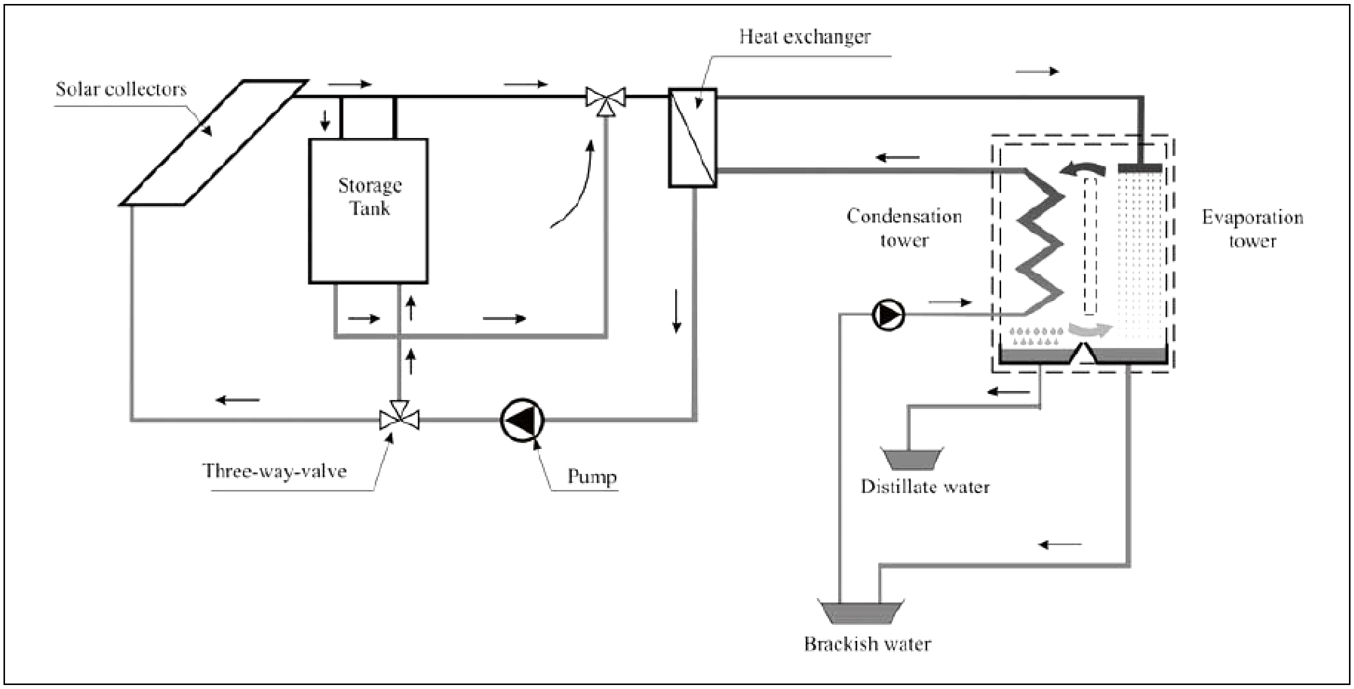
Simulation results of the solar system under practical weather conditions

Year	1998	1999	2000	2001	2002
Average cost of fresh water($/m^3)	14.9	14.43	14.24	15.19	14.98
Daily output (kg/m^{2}day)	8.09	8.16	8.1	8.17	8.11



Εικόνα 39: Ημερήσια παραγωγή συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας

4.3 Μονάδα αφαλάτωσης συνδυασμένη με ηλιακούς συλλέκτες και δεξαμενή αποθήκευσης



Εικόνα 40: Μονάδα αφαλάτωσης συνδυασμένη με ηλιακούς συλλέκτες και δεξαμενή αποθήκευσης

Η μονάδα αυτή αποτελεί παραλλαγή αυτής που περιγράφηκε στην Εφαρμογή 4.1. Περιλαμβάνει τους ηλιακούς συσσωρευτές που παρέχουν την απαραίτητη θερμική ενέργεια, και το τμήμα αφαλάτωσης που χρησιμοποιεί τη μέθοδο ύγρανσης (humidification) για να επεξεργαστεί το υφάλμυρο νερό.
Στο σχήμα φαίνονται τα επιμέρους τμήματα της μονάδας μαζί με περιγραφή των διαφορετικών λειτουργιών (αποθήκευση κατά την ημερήσια ή νυκτερινή λειτουργία). Η ηλιακή μονάδα αποτελείται από:

- Ένα πεδίο συλλογής flat plate
- Μία συμβατική δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας (storage tank)
- Εναλλάκτη θερμότητας (heat exchanger)
- Μονάδα ελέγχου, αντλία κυκλοφορίας (circulation pump) και βαλβίδες ανάμειξης που ελέγχονται ηλεκτρικά μέσω θερμοκρασίας (three way valve).

Το τμήμα αφαλάτωσης αποτελείται από δύο περιοχές: μία για την ατμοποίηση και μία για την υγροποίηση. Η περιοχή ατμοποίησης (evaporation chamber), είναι υπενδεδυμένη με ένα στρώμα, όπου το ζεστό υφάλμυρο νερό διανέμεται ομοιόμορφα. Το υφάλμυρο νερό εξατμίζεται υπό ατμοσφαιρική πίεση και ο ατμός μεταφέρεται με ελεύθερη ή εξαναγκασμένη μεταφορά στην περιοχή υγροποίησης, όπου υγροποιείται στην επιφάνεια του πλαστικού εναλλάκτη θερμότητας. Ο αέρας κυκλοφορεί στην αντίθετη κατεύθυνση από το νερό, γι' αυτό και προθερμαίνεται από την λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης. Ο υγροποιητής κατασκευάζεται από διπλές πλάκες πολυπροπυλενίου, μέσα από τις οποίες το ψυχρό υφάλμυρο νερό ρέει προς τα πάνω. Με την εγκατάσταση της βαλβίδας ανάμειξης (three way valve), εξασφαλίζονται σχεδόν σταθερές συνθήκες για την εξάτμιση ακόμα και κατά τη διάρκεια της ημερήσιας λειτουργίας. Αν η θερμοκρασία στην έξοδο των συσσωρευτών είναι μεγαλύτερη από αυτήν στην οποία έχει ρυθμιστεί η βαλβίδα ανάμειξης, προστίθεται νερό από τον πυθμένα της δεξαμενής αποθήκευσης. Παράλληλα η δεξαμενή αυτόματα γεμίζει από την οροφή της με το πλεόνασμα του ζεστού νερού. Η συσκευή ελέγχου της ηλιακής μονάδας ρυθμίζει ολόκληρο το σύστημα αφαλάτωσης. Όταν μία από τις επόμενες συνθήκες ικανοποιούνται η βαλβίδα ανάμειξης ρυθμίζει το σύστημα σε λειτουργία αποθήκευσης αυτόματα (νυκτερινή λειτουργία):

- Το θερμοκρασιακό επίπεδο στην έξοδο του συλλέκτη είναι χαμηλότερο από την ελάχιστη θερμοκρασία εξάτμισης.
- Το κριτήριο ασφαλείας της δεξαμενής, π.χ η μέγιστη θερμοκρασία του πυθμένα, ικανοποιείται.

Η αντλία του ηλιακού τμήματος λειτουργεί στην κατάσταση αποθήκευσης, έως ότου επιτευχθεί η ελάχιστη θερμοκρασία εξάτμισης.

Η μοντελοποίηση της παραπάνω μονάδας επιτυγχάνεται ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

- **<u>Μοντέλο ηλιακού συλλέκτη</u>**

Το μοντέλο του ηλιακού συλλέκτη ή μοντέλο των δύο θερμοκρασιών, μπορεί να γραφεί ως:

$$\boxed{\begin{cases} \dfrac{T_f}{t} = -v\dfrac{T_f}{x} + c_1\left(T_c - T_f\right) \\ \dfrac{\mathrm{d}T_c}{\mathrm{d}t} = a_1\left(f\left(t\right) - T_c\right) + b_1\left(T_f - T_c\right) \end{cases}}$$

Με:

$$\boxed{\begin{array}{l} v = L\dfrac{m_f}{M_f},\ a_1 = \dfrac{SU'}{M_c C_c},\ b_1 = \dfrac{Sh}{M_c C_c} \\ c_1 = \dfrac{Sh}{M_f C_f},\ f\left(t\right) = \dfrac{BI\left(t\right)}{U'} + T_a\left(t\right) \end{array}}$$

Όπου:

T_f = θερμοκρασία ρευστού σε Kelvin
T_a = θερμοκρασία περιβάλλοντος σε Kelvin
T_c = θερμοκρασία ψυκτικού νερού στον πύργο συμπύκνωσης σε Kelvin
C_f = ειδική θερμοχωρητικότητα νερού σε J/kg K
C_c = θερμοχωρητικότητα απορροφούμενης μάζας
M = μάζα σε kg

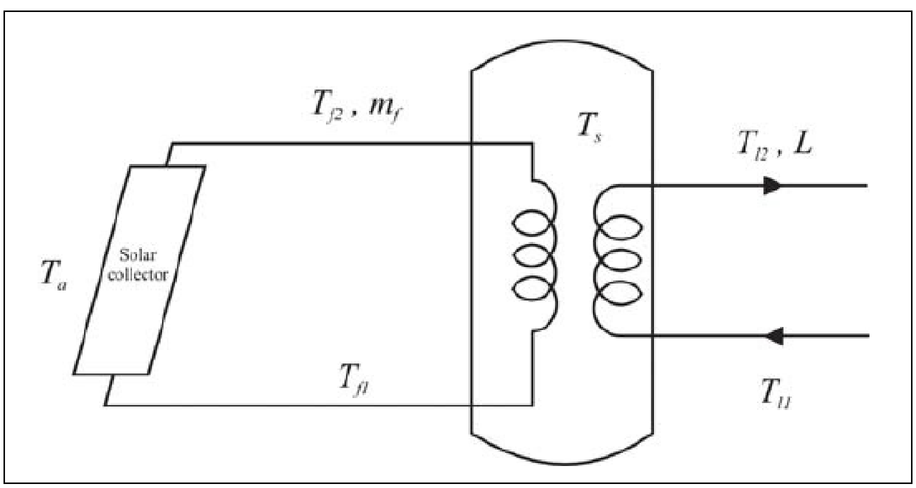
α = ανά μονάδα όγκου επιφάνεια συναλλαγής αέρα-νερού στον πύργο ατμοποίησης

h = συντελεστής συναλλαγής απορροφητήρα-υγρού στον ηλιακό συλλέκτη

S = επιφάνεια απορροφητήρα σε m2

- **<u>Μοντέλο δεξαμενών αποθήκευσης</u>**

Η εικόνα παρουσιάζει το μοντέλο που υιοθετήθηκε για την δεξαμενή αποθήκευσης θερμού νερού, με δύο εσωτερικούς εναλλάκτες θερμότητας. T_{f1} και T_{f2} είναι οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου αντίστοιχα του ηλιακού συλλέκτη. m_f είναι ο ρυθμός ροής του συλλέκτη, ενώ T_s είναι η θερμοκρασία της δεξαμενής νερού. Θεωρούμε ότι η δεξαμενή είναι απόλυτα πληρωμένη με νερό. T_{l2} είναι η θερμοκρασία εισόδου στο επάνω μέρος του πύργου εξάτμισης. T_{l1} είναι η θερμοκρασία εξόδου του νερού στο κάτω μέρος του πύργου εξάτμισης. L είναι το νερό που ψεκάζεται στο επάνω μέρος του πύργου εξάτμισης. Με ορισμένες παραδοχές προκύπτουν οι κάτωθι εξισώσεις που αντιστοιχούν στο μοντέλο.



$$MC_f \frac{\mathrm{d}T_s}{\mathrm{d}t} = m_f C_f \left(T_{f2} - T_{f1}\right) - LC_f \left(T_{l2} - T_{l1}\right)$$

$$m_f C_f \left(T_{f2} - T_{f1}\right) = U_1 A_1 \frac{\Delta T_{f2} - \Delta T_{f1}}{\ln\left(\Delta T_{f2} / \Delta T_{f1}\right)}$$

$$LC_f \left(T_{l2} - T_{l1}\right) = U_2 A_2 \cdot \frac{\Delta T_{l2} - \Delta T_{l1}}{\ln\left(\Delta T_{l2} / \Delta T_{l1}\right)}$$

Όπου:

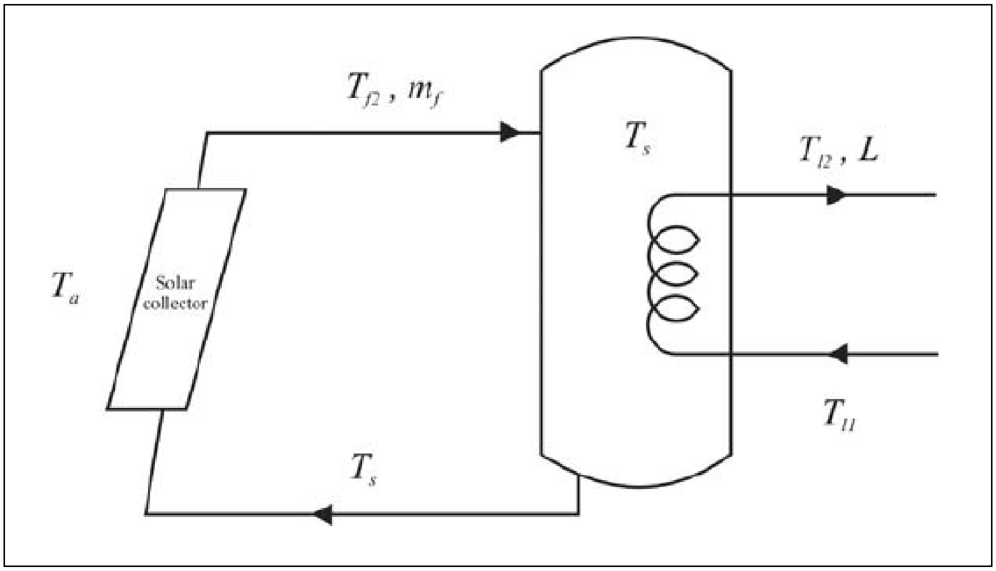
$$\Delta T_{f2} = T_{f2} - T_s, \quad \Delta T_{f1} = T_{f1} - T_s$$
$$\Delta T_{l2} = T_{l2} - T_s, \quad \Delta T_{l1} = T_{l1} - T_s$$

Άρα οι θερμοκρασίες T_{f1} και T_{l2} υπολογίζονται ως εξής:

$$T_{f1} = \left(T_{f2} - T_s\right) e^{-\left(\frac{u_1 A_1}{m_f C_f}\right)} + T_s$$

$$T_{l2} = \left(T_{l1} - T_s\right) \frac{1}{e^{-\left(\frac{U_2 A_2}{LC_f}\right)}} + T_s$$

Μια παραλλαγή του παραπάνω μοντέλου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Οι σχετικές εξισώσεις είναι:

$$\boxed{\begin{gathered} MC_f \frac{\mathrm{d}T_s}{\mathrm{d}t} = m_f C_f \left(T_{f2} - T_s\right) \\ - LC_f \left(T_{l2} - T_{l1}\right) \end{gathered}}$$

$$\boxed{LC_f \left(T_{l2} - T_{l1}\right) = U_2 A_2 \frac{\Delta T_{l2} - \Delta T_{l1}}{\ln\left(\Delta T_{l2} / \Delta T_{l1}\right)}}$$

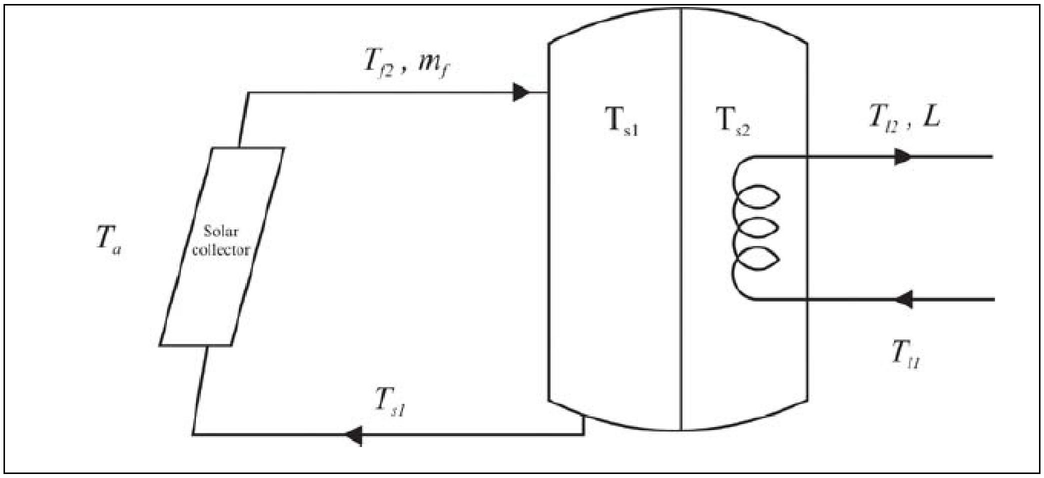
Όπου:

$$\boxed{\Delta T_{l2} = T_{l2} - T_s, \quad \Delta T_{l1} = T_{l1} - T_s}$$

Τέλος:

$$\boxed{T_{l2} = \left(T_{l1} - T_s\right) \frac{1}{e^{-\left(\frac{U_2 A_2}{LC_f}\right)}} + T_s}$$

Μία τρίτη παραλλαγή είναι να χωρίσουμε τη δεξαμενή αποθήκευσης με την ταυτόχρονη παρουσία ενός εσωτερικού εναλλάκτη θερμότητας. Αυτή η διαμόρφωση πραγματοποιεί την μεταφορά θερμότητας μέσω μιας ενδιάμεσης επιφάνειας. *V*1 και *V*2 είναι οι όγκοι των τμημάτων της δεξαμενής και *A*3 είναι η ενδιάμεση επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας.



Οι σχετικές εξισώσεις είναι:

$$\boxed{\begin{aligned} M_1 C_f \frac{\mathrm{d}T_{s1}}{\mathrm{d}t} &= m_f C_f \left(T_{f2} - T_{s1}\right) \\ &- U_3 A_3 \left(T_{s1} - T_{s2}\right) \end{aligned}}$$

$$\boxed{\begin{aligned} M_2 C_f \frac{\mathrm{d}T_{s2}}{\mathrm{d}t} &= L C_f \left(T_{l2} - T_{l1}\right) \\ &+ U_3 A_3 \left(T_{s1} - T_{s2}\right) \end{aligned}}$$

$$\boxed{L C_f \left(T_{l2} - T_{l1}\right) = U_2 A_2 \frac{\Delta T_{l2} - \Delta T_{l1}}{\ln\left(\Delta T_{l2} / \Delta T_{l1}\right)}}$$

Όπου:

$$\boxed{\Delta T_{l2} = T_{l2} - T_s, \quad \Delta T_{l1} = T_{l1} - T_s}$$

Και:

$$\boxed{T_{l2} = \left(T_{l1} - T_S\right) \frac{1}{e^{-\left(\frac{U_2 A_2}{L C_f}\right)}} + T_s}$$

Για το υπόλοιπο τμήμα της εγκατάστασης έχουμε επιπλέον εξισώσεις:

$$\varepsilon_l \rho_l C_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = L C_l \frac{\partial T_l}{\partial z} - h_l a\left(T_l - T_i\right)$$

$$\varepsilon_g \rho_g C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = -G C_g \frac{\partial T_g}{\partial z} + h_g a\left(T_i - T_g\right)$$

$$h_l\left(T_l - T_i\right) + h_g\left(T_g - T_i\right) = L_v k_g\left(X_i - X_g\right)$$

$$\varepsilon_g \rho_g \frac{\partial X_g}{\partial t} = -G \frac{\partial X_g}{\partial z} + k_g a\left(X_i - X_g\right)$$

$$X_i = 0.62198 \frac{P_{ws}}{1 - P_{ws}}$$

$$\varepsilon_c \rho_c C_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = -D_c C_c \frac{\partial T_c}{\partial z} + UA\left(T_{ic} - T_c\right)$$

$$\varepsilon_G \rho_G C_G \frac{\partial T_G}{\partial t} = G C_G \frac{\partial T_G}{\partial z} - h_G A\left(T_G - T_{ic}\right)$$
$$-L_v k_G A\left(X_G - X_{ic}\right)$$

$$h_G\left(T_G - T_{ic}\right) + U\left(T_c - T_{ic}\right)$$
$$= L_v k_G\left(X_{ic} - X_G\right)$$

$$\varepsilon_G \rho_G \frac{\partial X_G}{\partial t} = G \frac{\partial X_G}{\partial z} + k_G A\left(X_G - X_{ic}\right)$$

$$X_{ic} = 0.62198 \frac{P_i}{1 - P_i}$$

$$\mathrm{d}W_c = k_G A\left(X_{ic} - X_G\right)\mathrm{d}z$$

$$\ln(P_{ws}) = -6096.938\frac{1}{T_i} + 21.240964$$
$$-2.71119\times10^{-2}T_i + 1.67395\times10^{-5}T_i^2$$
$$+2.43350\ln(T_i)$$

Τα σύμβολα εξηγούνται παρακάτω ενώ δίνεται και ένα διάγραμμα 41 σχετικό με την παραγωγική ικανότητα της εγκατάστασης:

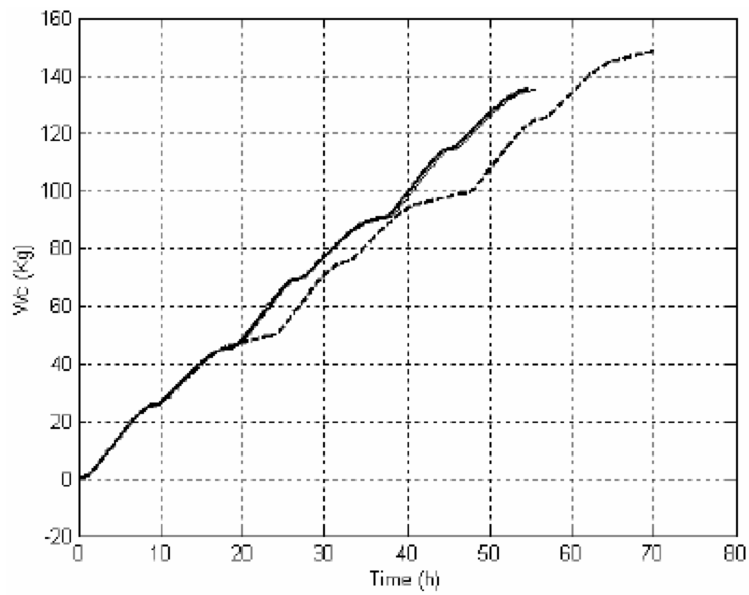


Fig. 9. Simulated distilled water production with different storage tank configurations (V = 1 m³).

Εικόνα 41: Παραγωγική ικανότητα εγκατάστασης

Η επεξήγηση των συμβόλων που χρησιμοποιήσαμε στις παραπάνω σχέσεις έχει ως εξής:

C_f = ειδική θερμοχωρητικότητα νερού σε J/kg K

C_c = θερμοχωρητικότητα απορροφούμενης μάζας σε J/kg K

C_l = ειδική θερμοχωρητικότητα νερού στον πύργο ατμοποίησης σε J/kg K

$C_c =$ ειδική θερμοχωρητικότητα νερού στον πύργο υγροποίησης σε J/kg K

$X_g =$ υγρασία αέρα στον πύργο ατμοποίησης σε $kg_{water}/kg_{dry\ air}$

$X_G =$ υγρασία αέρα στον πύργο υγροποίησης σε $kg_{water}/kg_{dry\ air}$

$X_i =$ υγρασία κορεσμού στον πύργο ατμοποίησης σε $kg_{water}/kg_{dry\ air}$

$X_{ic} =$ υγρασία κορεσμού στον πύργο υγροποίησης σε $kg_{water}/kg_{dry\ air}$

$k_g =$ συντελεστής μεταφοράς μάζας υδρατμών στη διεπιφάνεια αέρα νερού στον πύργο ατμοποίησης σε kg/m2s

$k_G =$ συντελεστής μεταφοράς μάζας υδρατμών στη διεπιφάνεια αέρα νερού στον πύργο υγροποίησης σε kg/m2s

$h =$ συντελεστής μεταφοράς απορροφητήρα – υγρού στον ηλιακό συλλέκτη σε W/m2K
$h_l =$ συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο νερό στη διεπιφάνεια αέρα νερού στον πύργο ατμοποίησης σε W/m2K

$h_g =$ συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο νερό στη διεπιφάνεια αέρα νερού στον πύργο υγροποίησης σε W/m2K

$h_G =$ συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο στρώμα αέρα στον πύργο υγροποίησης σε W/m2K

$\varepsilon_l =$ όριο όγκου νερού στον πύργο ατμοποίησης

$\varepsilon_g =$ όριο όγκου αέρα στον πύργο ατμοποίησης

$\varepsilon_c =$ όριο όγκου ψυκτικού νερού στον πύργο υγροποίησης

$\varepsilon_G =$ όριο όγκου αέρα στον πύργο υγροποίησης

$\varepsilon_p =$ όριο όγκου στρώματος στον πύργο ατμοποίησης

$\varepsilon_{pc} =$ όριο όγκου πλακών υγροποίησης

4.4 Ύγρανση και αφύγρανση με αέρα για ένα σύστημα αφαλάτωσης που χρησιμοποιεί ηλιακή ενέργεια.

Η αφαλάτωση με χρήση ηλιακής ενέργειας και ύγρανση – αφύγρανση (Solar desalination with humidification–dehumidification (SDHD)), αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη τεχνική για την παραγωγή φρέσκου νερού σε απομονωμένες και ηλιόλουστες περιοχές. Αυτή η μέθοδος αφαλάτωσης στηρίζεται βασικά στην ικανότητα του αέρα να αναμειγνύεται με μεγάλες ποσότητες υδρατμού.

Το σύστημα το οποίο εξετάζεται συνδυάζει ηλιακούς συλλέκτες για τον αέρα και το νερό και φυσικά εξατμιστή και συμπυκνωτή. Σχηματικό διάγραμμα της εγκατάστασης φαίνεται παρακάτω. Το θαλάσσιο νερό το οποίο προθερμαίνεται στον συμπυκνωτή και θερμαίνεται από τον ηλιακό συλλέκτη έρχεται σε επαφή με ένα θερμό αέριο ρεύμα στον εξατμιστή. Εξαιτίας της εναλλαγής θερμότητας και μάζας ανάμεσα στον θερμό νερό και στον αέρα στον εξατμιστή, ο αέρας ‘φορτώνεται’ με υγρασία.

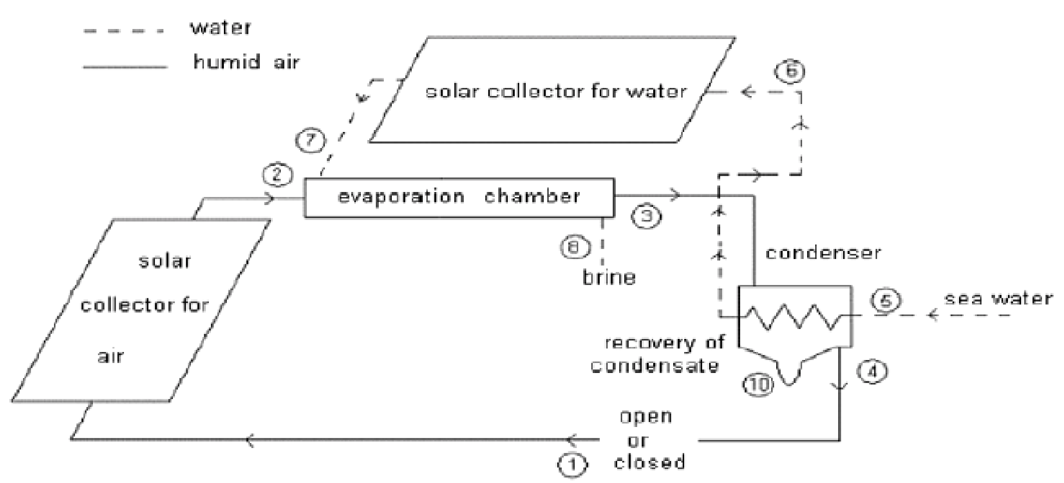


Fig. 1. Schematic diagram of the solar desalination system.

Εικόνα 42: Ύγρανση - αφύγρανση με χρήση ηλιακής ενέργειας

Μια αποδοτική διαδικασία στον υγραντή είναι να λάβουμε στην έξοδό του υγρό αέρα διαποτισμένο με μία μεγάλη ποσότητα ατμού. Η επόμενη διαδικασία περιλαμβάνει τη συμπύκνωση αυτού του ατμού, στον συμπυκνωτή που ψύχεται από το νερό τροφοδοσίας και ανακτά το φρέσκο νερό.

Το εν λόγω σύστημα έχει τα εξής κύρια χαρακτηριστικά:

- Ο κύκλος του αέρα μπορεί να είναι ανοικτός ή κλειστός
- Η λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης ανακτάται και χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού.

- Ο υγρός αέρας στην έξοδο του εξατμιστή μπορεί να επιστραφεί στον ηλιακό συλλέκτη, ούτως ώστε να θερμανθεί και να υγρανθεί δύο και τρεις φορές. Έτσι ο αέρας θα μπορεί να χρεωθεί με μια σημαντική ποσότητα ατμού.

Η ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου της συγκεκριμένης εγκατάστασης στηρίζεται στην αρχή διατήρησης της μάζας και της ενέργειας σε κάθε επιμέρους τμήμα αυτής. Οι υποθέσεις τις οποίες κάναμε περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων την θεώρηση μονοδιάστατης και σταθερής ροής υγρών και αερίων καθώς και την ύπαρξη ενός πολύ λεπτού στρώματος υγρού αέρα ανάμεσα στα ρεύματα αερίου και υγρού. Αυτό το στρώμα θεωρούμε ότι έχει θερμοκρασία *Tf*. Οι παρακάτω εξισώσεις αφορούν τον εξατμιστή και μας δίνουν τις ισορροπίες μάζας και θερμότητας.

$$\boxed{\dot{m}_l(x) = \dot{m}_5 + \dot{m}_a\left(\omega - \omega_3\right)}$$

$$\boxed{\dot{m}_a \frac{\mathrm{d}\,\omega}{\mathrm{d}\,x} = U_{m,ev} P_{ev}\left(\omega_{sat\_at\_Tf} - \omega\right)}$$

$$\boxed{\frac{\mathrm{d}\,T_l}{\mathrm{d}\,x} = \frac{U_{l,ev} P_{ev}\left(T_l - T_f\right)}{\dot{m}_l C_{pl}}}$$

$$\boxed{\frac{\mathrm{d}\,T_a}{\mathrm{d}\,x} = \frac{U_{a,ev} P_{ev}\left(T_f - T_a\right)}{\dot{m}_a\left(C_{pl} + \omega C_{pv}\right)}}$$

$$\boxed{\begin{aligned} \dot{m}_a \frac{\mathrm{d}\,\omega}{\mathrm{d}\,x} i_{vl} &= U_{l,ev} P_{ev}\left(T_l - T_f\right) \\ &+ U_{a,ev} P_{ev}\left(T_a - T_f\right) \end{aligned}}$$

Οι οριακές συνθήκες είναι:

$$\boxed{\dot{m}_1\,(l) = \dot{m}_5,\ \ \omega(0) = \omega_2,\ \ T_1\,(l) = T_7,\ \ T_a(0) = T_2}$$

Στον συμπυκνωτή οι αντίστοιχες εξισώσεις γράφονται:

$$\boxed{\dot{m}_c = \dot{m}_a\,(\omega_3 - \omega)}$$

$$\boxed{\dot{m}_{air} \frac{\mathrm{d}\,\omega}{\mathrm{d}\,x} = U_{m,cond} P_{cond}\left(\omega_{sat\_at\_Tf} - \omega\right)}$$

$$\frac{\mathrm{d}\,T_l}{\mathrm{d}\,x} = \frac{U_{l,cond} P_{cond} \left(T_l - T_f\right)}{\dot{m}_5 C_{pl}}$$

$$\frac{\mathrm{d}\,T_a}{\mathrm{d}\,x} = \frac{U_{a,cond} P_{cond} \left(T_f - T_a\right)}{\dot{m}_{air}\left(C_{pa} + \omega C_{pv}\right) + \dot{m}_c C_{pc}}$$

$$\dot{m}_a \frac{\mathrm{d}\,\omega}{\mathrm{d}\,x} i_{vl} = U_{l,cond} P_{cond} \left(T_l - T_f\right) + U_{a,cond} P_{cond} \left(T_a - T_f\right)$$

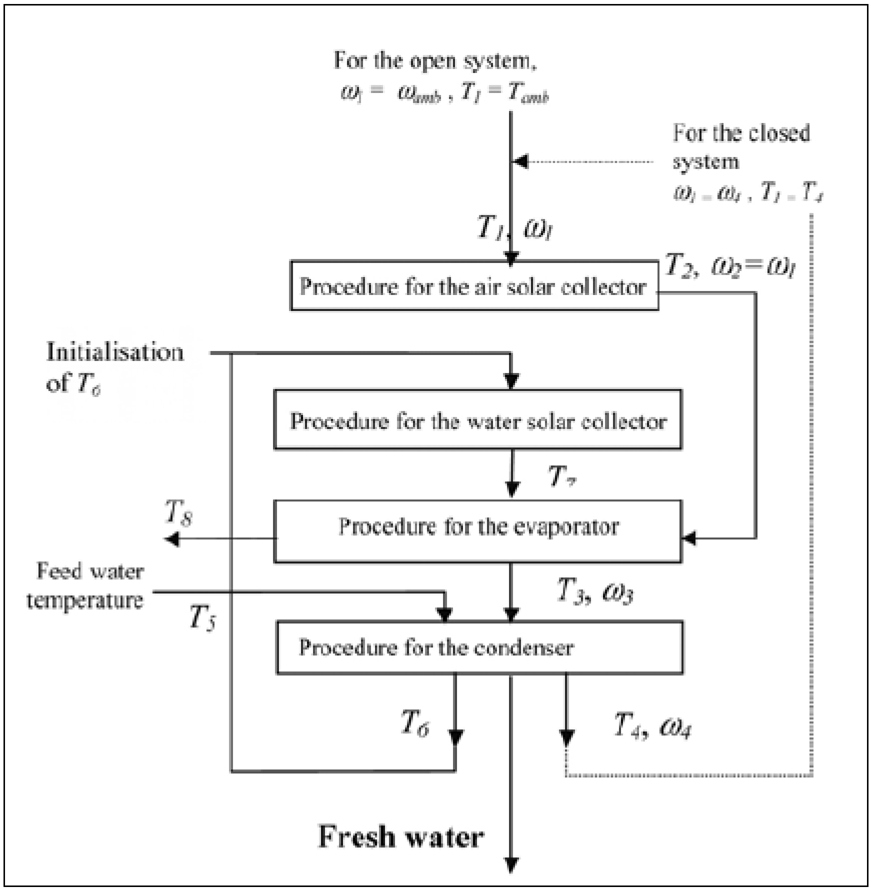
Οι οριακές συνθήκες είναι :

$$\dot{m}_c(0) = 0,\ \omega(0) = \omega_3,\ T_a(0) = T_3,\ T_1(1) = T_5$$

Η επεξήγηση των συμβολισμών που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω εξισώσεις είναι η εξής:

$T =$ Θερμοκρασία σε K ή ^{o}C
$U =$ συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (ή μάζας) σε W/m2K (ή kg/m2s)
$\dot{m} =$ ροή μάζας σε kg/s
$P =$ βρεχόμενη περίμετρος σε m ή πίεση σε Pa
$\omega =$ υγρασία σε $kg_{vap}/kg_{dry\ air}$
$x =$ συντεταγμένη κατά τη διεύθυνση ροής σε m

Ο χάρτης ροών του συστήματος φαίνεται στην επόμενη εικόνα:



4.5 Single stage σύστημα αφαλάτωσης με χρήση ηλιακής ενέργειας για οικιακή χρήση

Η εγκατάσταση που περιγράφεται, αποτελεί ένα σύστημα αφαλάτωσης μονού σταδίου (single stage), για οικιακή χρήση που αποδίδει περίπου 10 λίτρα φρέσκο νερό ημερησίως. Το σύστημα αποτελείται από έναν flat plate συλλέκτη, έναν ατμοποιητή, μία αντλία κενού και έναν υγροποιητή. Ο συλλέκτης έχει επιφάνεια 2m2, και λειτουργεί ως σύστημα συλλογής θερμότητας, που θερμαίνει το εισερχόμενο θαλάσσιο νερό στο σημείο 1 του σχήματος. Το νερό περνάει μέσα από τους σωλήνες του συλλέκτη και απορροφά την θερμότητα. Το θερμό νερό εγκαταλείπει τον συλλέκτη στο σημείο 2 και εισέρχεται στον ατμοποιητή, όπου η πίεση διατηρείται αρκετά κάτω από την ατμοσφαιρική. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας αντλία κενού (vacuum pump). Η πίεση μέσα στον ατμοποιητή διατηρείται κάτω από την πίεση κορεσμού του θερμού νερού που εισάγεται στον ατμοποιητή. Έτσι το νερό εξατμίζεται και παράγεται ατμός. Ο ατμός που παράγεται στο σημείο 5 περνάει στον συμπιεστή όπου και συμπυκνώνεται. Το αφαλατωμένο νερό λαμβάνεται στη θέση 6. Ο τύπος του συμπιεστή που χρησιμοποιείται είναι shell and coil, όπου το ψυκτικό νερό κυκλοφορεί μέσα στον συμπιεστή

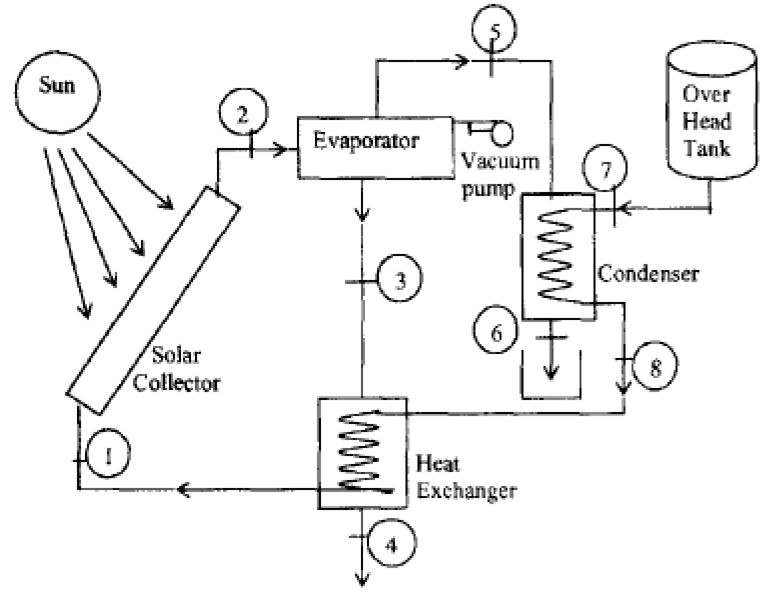


Fig. 1. Schematic diagram of the single-stage solar desalination system.

Εικόνα 43: Σύστημα αφαλάτωσης για οικιακή χρήση

παραλαμβάνοντας την αποβαλλόμενη θερμότητα από το συμπυκνούμενο ρεύμα. Το ψυκτικό νερό εισέρχεται στον συμπυκνωτή στη θέση 7 από την δεξαμενή και εξέρχεται στη θέση 8. Βαλβίδες αντεπιστροφής είναι διαθέσιμες στην είσοδο του θερμού νερού από τον συλλέκτη στον εξατμιστή και στην έξοδο του ατμού από τον εξατμιστή προς τον συμπυκνωτή. Από τον εξατμιστή η άλμη αποβάλλεται με σταθερό ρυθμό από τη θέση 3. Από τη στιγμή μάλιστα που αυτή έχει ποσό αισθητής θερμότητας, ένας εναλλάκτης χρησιμοποιείται για να ανακτήσει αυτήν την θερμότητα. Το νερό που έρχεται από τον συμπυκνωτή επιτρέπεται να περάσει μέσα από τον εναλλάκτη, όπου απορροφά την θερμότητα της άλμης και μετά επανακυκλοφορεί στον συλλέκτη. Η άλμη αποβάλλεται από τον εναλλάκτη από τη θέση 4.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα είναι οι εξής:

- <u>**Ηλιακός συλλέκτης:**</u>

$$E_{in} = I_t \cdot A_c \cdot 0.933$$

$$E_{out} = m_1 c_{pf} \left[\left(T_2 - T_1 \right) - T_0 \ln \left(T_2 / T_1 \right) \right]$$

- **<u>Ατμοποιητής:</u>**

$$\boxed{\begin{aligned} E_{in} &= m_3\left[c_p\left(T_3 - T_0\right) - c_p T_0 \ln\left(T_3 / T_0\right)\right] \\ &\quad - m_2\left[c_p\left(T_2 - T_0\right) - c_p T_0 \ln\left(T_2 / T_0\right)\right] \\ \\ E_{out} &= m_5\Big\{L_{v(T_{sat})}\left[1 - \left(T_0 / T_{sat}\right)\right] \\ &\quad + c_{pf}\left(T_{sat} - T_0\right) - T_0 \ln\left(T_{sat} / T_0\right)\Big\} \end{aligned}}$$

- **<u>Υγροποιητής:</u>**

$$\boxed{\begin{aligned} E_{in} &= m_7 c_{pcw}\left[\left(T_8 - T_7\right) - T_0 \ln\left(T_8 / T_7\right)\right] \\ \\ E_{out} &= m_5\Big\{L_{v(T_{sat})}\left[1 - \left(T_0 / T_{sat}\right)\right] \\ &\quad + c_{pf}\left(T_6 - T_5\right) - T_0 \ln\left(T_6 / T_5\right)\Big\} \end{aligned}}$$

- **<u>Βαθμός απόδοσης:</u>**

$$\boxed{\eta = E_{out} / E_{in}}$$

- **<u>Ηλεκτρικό Κόστος:</u>**

$$\boxed{P \cdot t \cdot C_e}$$

$$\boxed{\begin{aligned} &C_t = \text{electrical cost} + \text{fixed cost} \\ &C_w = C_t / D \end{aligned}}$$

Όπου:

A_c = επιφάνεια συλλέκτη σε m2
C_e = κόστος ηλεκτρικού σε $/kWh
c_p = ειδική θερμοχωρητικότητα σε KJ/kg K
c_{pf} = θερμοχωρητικότητα για σταθερή πίεση τροφοδοσίας
C_t = ολικό κόστος σε $/ημέρα
C_w = κόστος νερού σε cent/λίτρο
D = αποσταγμένη ποσότητα ανά ημέρα σε lit/ημέρα
E = απαιτούμενη ισχύς σε Watt
h = ενθαλπία σε KJ/kg
I_t = προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε W/m2
L_v = ενθαλπία αλλαγής φάσης
$\dot{m}$ = ροή μάζας σε kg/sec
P = χωρητικότητα αντλιών κενού σε KW
T = θερμοκρασία σε K
t = ώρες λειτουργίας αντλιών κενού σε hours/day
η = βαθμός απόδοσης, %

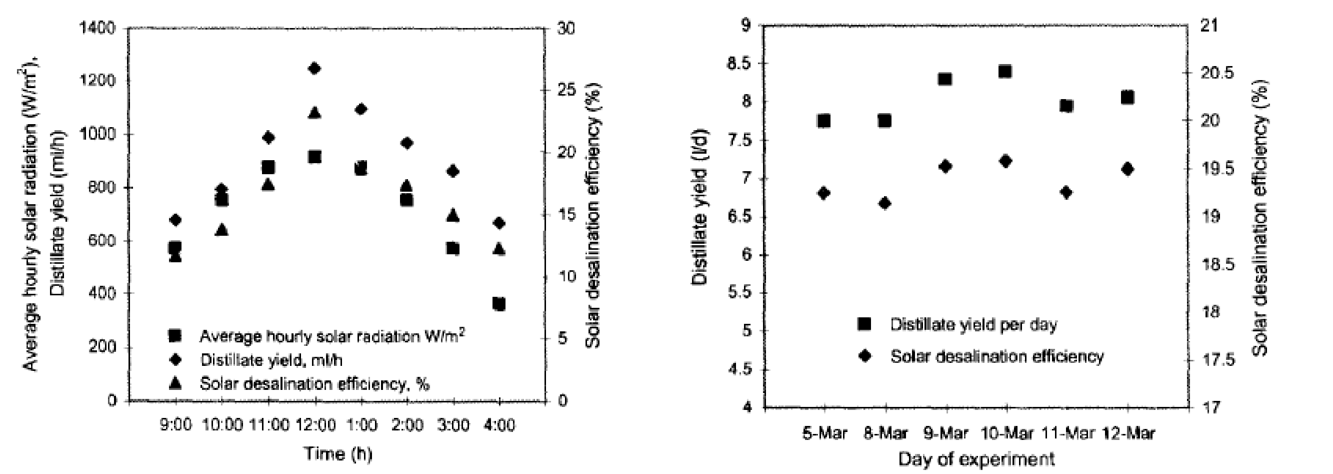


Fig. 3. Variation in average hourly solar radiation, solar desalination efficiency and distillate yield for different time intervals.

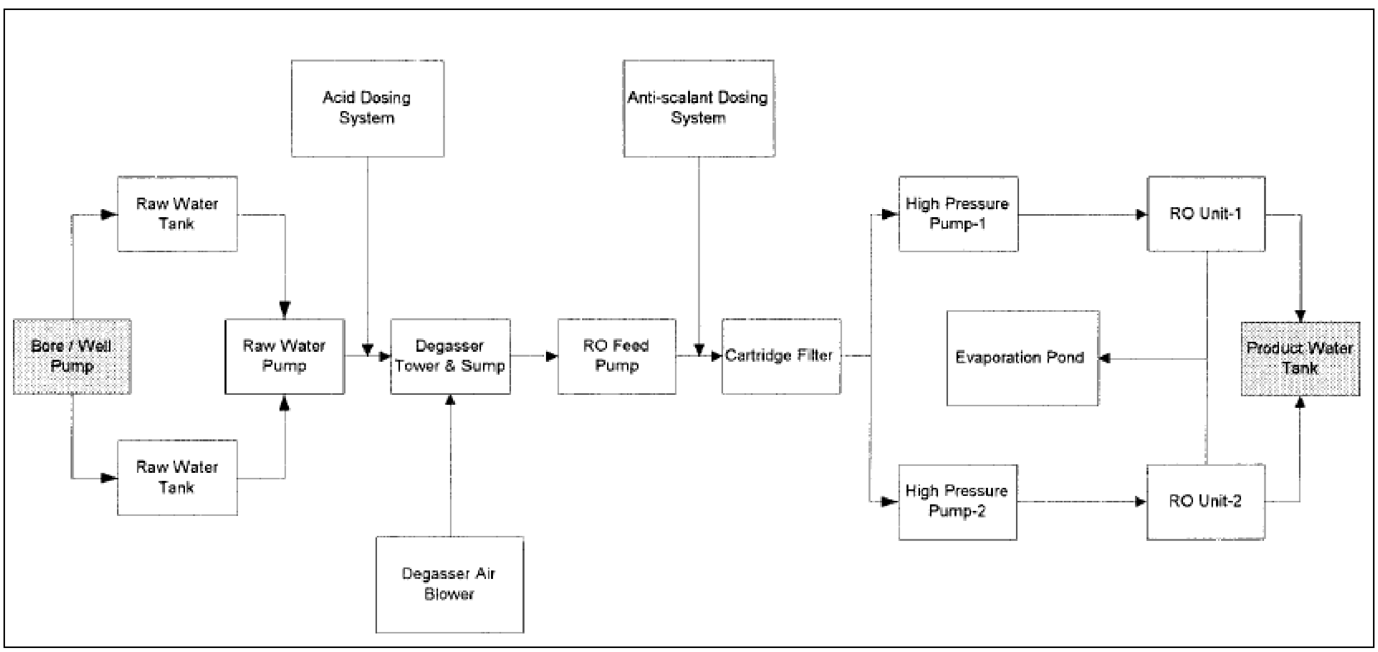
Fig. 4. Variation in distillate yield and solar desalination efficiency for different days of experiment.

Εικόνα 44: Πειραματικά αποτελέσματα

4.6 Αφαλάτωση με αντίστροφη όσμωση και χρήση ηλιακής ενέργειας Ι

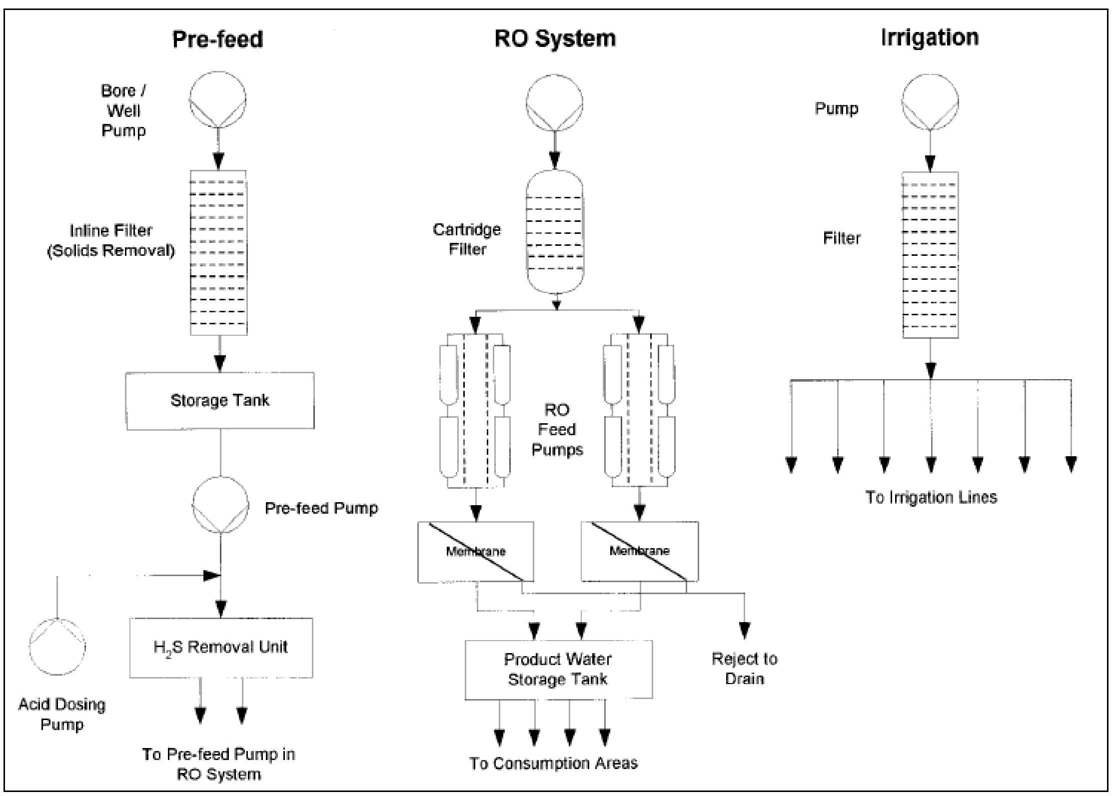
Η εγκατάσταση η οποία περιγράφεται παρακάτω είναι σε λειτουργία στην έρημο Nejd στο νοτιοδυτικό Ομάν. Αποτελείται από:

- Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συλλογής ηλιακής ενέργειας και ηλεκτρικά συστήματα
- Αντλία παροχής σκληρού νερού (με άλατα, μεταλλικά στοιχεία κλπ)
- Ένα σύστημα χορήγησης οξέος
- Ένα σύστημα αντιδιάβρωσης
- Ένα σύστημα απομάκρυνσης αερίων
- Ένα φίλτρο
- Δύο αντλίες υψηλής πίεσης
- Σύστημα αντίστροφης όσμωσης
- Σωληνώσεις για το αποβαλλόμενο και το καθαρό νερό
- Ατμοποιητή



Εικόνα 45: Αφαλάτωση με αντίστροφη όσμωση και χρήση ηλιακής ενέργειας

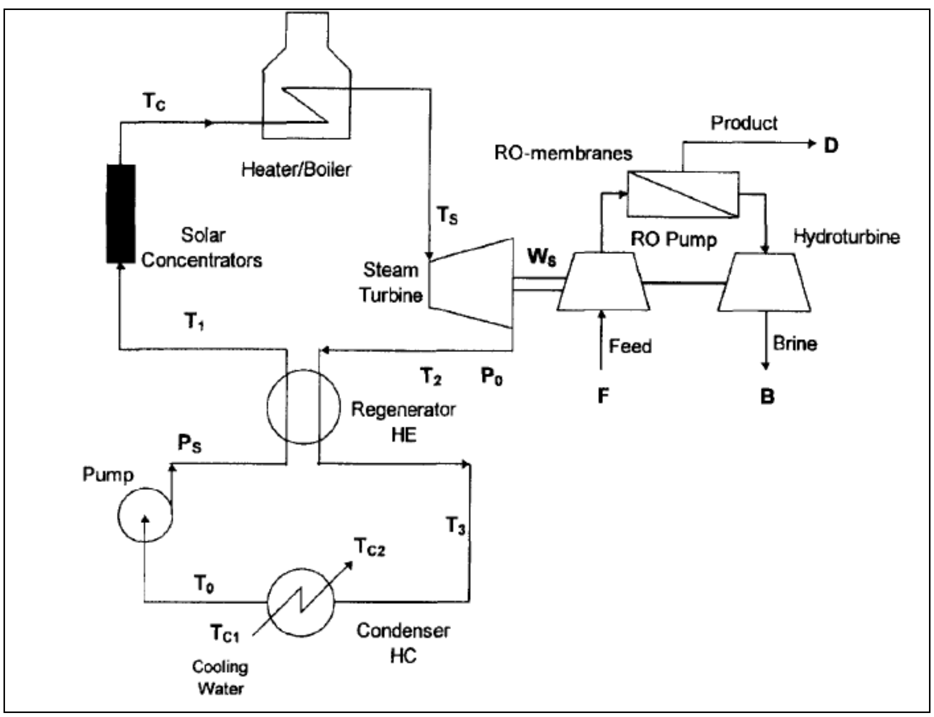
Το υπόγειο νερό μεταφέρεται σε δεξαμενές αποθήκευσης (raw water tanks) με τη χρήση αντλιών άρδευσης εξωτερικά από το σύστημα αφαλάτωσης. Με τη βοήθεια μιας αντλίας (raw water pump), το νερό οδηγείται στη είσοδο του πύργου αποβολής αερίων όπου και αφαιρείται το υδρόθειο (H_2S). Προηγουμένως το νερό έχει περάσει από το σύστημα χορήγησης οξέως (acid dosing system) όπου και αναμειγνύεται με 1-2 ppm HCl, διαδικασία απαραίτητη προκειμένου να ελαττωθούν οι ακαθαρσίες. Στον πύργο αποβολής αερίων είναι διαθέσιμος και ένας φυσητήρας αέρα (degasser air blower), ο οποίος παρέχει τον απαραίτητο αέρα για την διαδικασία της αποθείωσης του υδάτινου ρεύματος. Μετά από αυτές τις διαδικασίες το νερό αποθηκεύεται σε μία δεξαμενή (degassed water tank), απ' όπου και τροφοδοτεί το σύστημα αντίστροφης όσμωσης μέσω ειδικής τροφοδοτικής αντλίας (RO feed pump). Η δόση σε αντιδιαβρωτικό είναι 6 ppm Flocon 100 διαδικασία που πραγματοποιείται στο αντίστοιχο σύστημα (anti scalant dosing system). Στην συνέχεια το νερό περνάει μέσω ενός φίλτρου (cartridge filter) το οποίο και αφαιρεί όλα τα σωματίδια μεγέθους <5μm , για να αποφευχθεί φράξιμο των μεμβρανών. Τότε το νερό διαχωρίζεται σε δύο RO ρεύματα, που καθένα περνάει από μία αντλία υψηλής πίεσης, στρώσεις μεμβρανών και διάφορες βαλβίδες απόρριψης. Κάθε σύστημα μεμβρανών αποτελείται από 3 σωλήνες πίεσης –τρία στάδια- τοποθετημένους διαδοχικά. Κάθε σωλήνας πίεσης περιλαμβάνει δύο σπιράλ μεμβράνες διαμέτρου 100 mm. Έτσι το ρεύμα νερού διαχωρίζεται σε δύο επιμέρους: ένα με χαμηλή συγκέντρωση σε άλατα και ένα με υψηλή συγκέντρωση σε άλατα. Αυτό το ρεύμα του πρώτου σταδίου αποτελεί την τροφοδοσία για το δεύτερο στάδιο όπου ξαναχωρίζεται σε δύο επιμέρους ρεύματα χαμηλής και υψηλής συγκέντρωσης. Το ίδιο συμβαίνει και στο τρίτο στάδιο του οποίου είσοδος είναι το ρεύμα υψηλής συγκέντρωσης του δεύτερου σταδίου. Το ρεύμα υψηλής συγκέντρωσης στο τέλος του τρίτου σταδίου τελικά οδηγείται στον ατμοποιητή, ενώ το φρέσκο νερό που συλλέχθηκε στα τρία στάδια οδηγείται στην αντίστοιχη δεξαμενή αποθήκευσης. Η ηλιακή ενέργεια που συλλέγεται από τα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιείται στην κίνηση όλων των αντλιών του συστήματος.



Εικόνα 46: Επιμέρους τμήματα της μονάδας

4.7 Αφαλάτωση με αντίστροφη όσμωση και χρήση ηλιακής ενέργειας ΙΙ

Το συγκεκριμένο σύστημα αποτελεί υβριδικό σύστημα, εξέλιξη αυτού που περιγράφεται στην προηγούμενη εφαρμογή. Περιλαμβάνει λειτουργία του κύκλου Rankine με υποβοήθηση ηλιακής ενέργειας, περιλαμβάνοντας ηλιακούς συλλέκτες και το κλασσικό σύστημα αντίστροφης όσμωσης. Όπως συμβαίνει στα συστήματα αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση και χρήση ηλιακής ενέργειας, υπάρχει το τμήμα διαχωρισμού με χρήση μεμβρανών που τροφοδοτείται από μία αντλία υψηλής πίεσης (πρεσάροντας το τροφοδοτικό ρεύμα στα επιθυμητά επίπεδα πίεσης), και που είναι κατάλληλα συνδεδεμένο με έναν υδροστρόβιλο, για την ανάκτηση της ενέργειας του ρεύματος άλμης που αφήνει την διαδικασία. Το ρεύμα που εγκαταλείπει τις μεμβράνες αποτελεί και το τελικό προϊόν. Το θερμικό – ηλιακό υποσύστημα, παρέχει το απαραίτητο έργο για την κίνηση της αντλίας υψηλής πίεσης της μονάδας με την βοήθεια ενός ατμοστρόβιλου. Θερμότητα παρέχεται είτε από τους ηλιακούς συλλέκτες είτε από ορυκτά καύσιμα και στο boiler όπου το νερό (που αποτελεί και το εργαζόμενο μέσο του κύκλου Rankine) εξατμίζεται και στη συνέχεια υπερθερμαίνεται. Το υπέρθερμο ρεύμα εισέρχεται σε ένα στρόβιλο που με τη σειρά του κινεί την αντλία του συστήματος αντίστροφης όσμωσης. Το εργαζόμενο υγρό που εγκαταλείπει τον στρόβιλο είναι ακόμα ατμός αλλά σε χαμηλότερη πίεση και θερμοκρασία. Επιστρέφει στην υγρή μορφή του στον υγροποιητή και η λανθάνουσα θερμότητα απορρίπτεται στη θάλασσα. Αφού περάσει από τον υγροποιητή το υγρό επιστρέφει στο boiler και ο κύκλος επαναλαμβάνεται. Ανάκτηση ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί με έναν εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ του ρεύματος χαμηλής πίεσης που αφήνει τον στρόβιλο και το υπόψυκτο υγρό που εισέρχεται στο boiler.



Εικόνα 47: Αφαλάτωση με αντίστροφη όσμωση και χρήση ηλιακής ενέργειας

5. Θεωρητική και πειραματική ανάλυση ενός συστήματος αφαλάτωσης που κάνει χρήση ηλιακής θερμότητας χαμηλής βαθμίδας.

Στο τμήμα αυτό της εργασίας θα ασχοληθούμε με την θεωρητική ανάλυση του συστήματος αφαλάτωσης που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.1 και με την πειραματική εφαρμογή των δεδομένων που έχουμε για πιθανή λειτουργία της εν λόγω εγκατάστασης στην περιοχή της Αττικής.

- **Περιγραφή και αρχές λειτουργίας του συστήματος**

Σχηματικό διάγραμμα της εγκατάστασης φαίνεται στην εικόνα. Αν και στην παράγραφο 4.1 έχουμε προχωρήσει σε παρουσίαση της εγκατάστασης παραθέτοντας μάλιστα σχέσεις και πειραματικά αποτελέσματα από τη διεθνή βιβλιογραφία, εδώ θα είμαστε πιο αναλυτικοί.

Η όλη ιδέα της σχεδίασης βασίζεται στην δημιουργία κενού αέρος με την χρήση φυσικών μέσων. Ο λόγος για τον οποίο επιδιώκουμε τη δημιουργία κενού είναι ότι το νερό μπορεί να εξατμιστεί σε πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες και με πολύ λιγότερη ενέργεια σε σχέση με τις συμβατικές τεχνικές. Αυτό ακριβώς επιτρέπει την χρήση πηγών θερμότητας χαμηλής βαθμίδας (low grade heat sources), όπως flat plate ηλιακοί συλλέκτες και απορριπτόμενη θερμότητα. Η μοναδικότητα αυτής της ιδέας βρίσκεται στον τρόπο με τον οποίο οι φυσικές δυνάμεις της βαρύτητας και η ατμοσφαιρική πίεση χρησιμοποιούνται για την δημιουργία συνθηκών κενού και η ενσωμάτωση σε ένα σχέδιο μονού συστήματος όπου η εξάτμιση και η συμπύκνωση πραγματοποιούνται σε κατάλληλες θέσεις χωρίς καμία είσοδο εξωτερικής ενέργειας άλλης από την θερμότητα χαμηλής βαθμίδας. Αυτό βοηθάει και στην μείωση της θερμικής ενέργειας που εισέρχεται στη διαδικασία, μιας και στις συμβατικές διεργασίες για τη μείωση της πίεσης απαιτούνται αντλίες κενού, εκτοξευτές ατμού κλπ.

Το σύστημα αποτελείται από ένα θάλαμο ατμοποίησης (evaporation chamber), όπου και υπάρχει πρόβλεψη να τροφοδοτείται το κρύο υγρό απευθείας στον θάλαμο και να παρέχεται ηλιακή ή άλλη θερμική ενέργεια χαμηλής βαθμίδας μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας κλειστού βρόχου. Επιπλέον υπάρχει πρόβλεψη και γα την αποβολή της συγκεντρωμένης άλμης. Ο θάλαμος εξάτμισης είναι συνδεδεμένος με έναν υγροποιητή (condenser), ο οποίος και διαχέει τη θερμότητα της συμπύκνωσης στο περιβάλλον. Ο υγροποιητής είναι συνδεδεμένος με έναν σωλήνα αποβολής ύψους περίπου 10 m. Το εισερχόμενο κρύο υγρό και η αποβαλλόμενη άλμη περνάνε μέσα από έναν εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα (tube-in-tube heat exchanger) με σκοπό να αξιοποιήσουμε 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 10 m 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.

Είναι γνωστό ότι η πίεση ατμών του θαλασσινού νερού είναι κατά 1.84% μικρότερη σε σχέση με αυτή του φρέσκου νερού στο θερμοκρασιακό εύρος 0-100^{o} 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 προαναφέραμε 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, ελαττώνοντας έτσι 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 και 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 νερού. Εξάλλου ο μέσος αριθμός των μορίων νερού 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 οι 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. Για αυτόν τον 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.

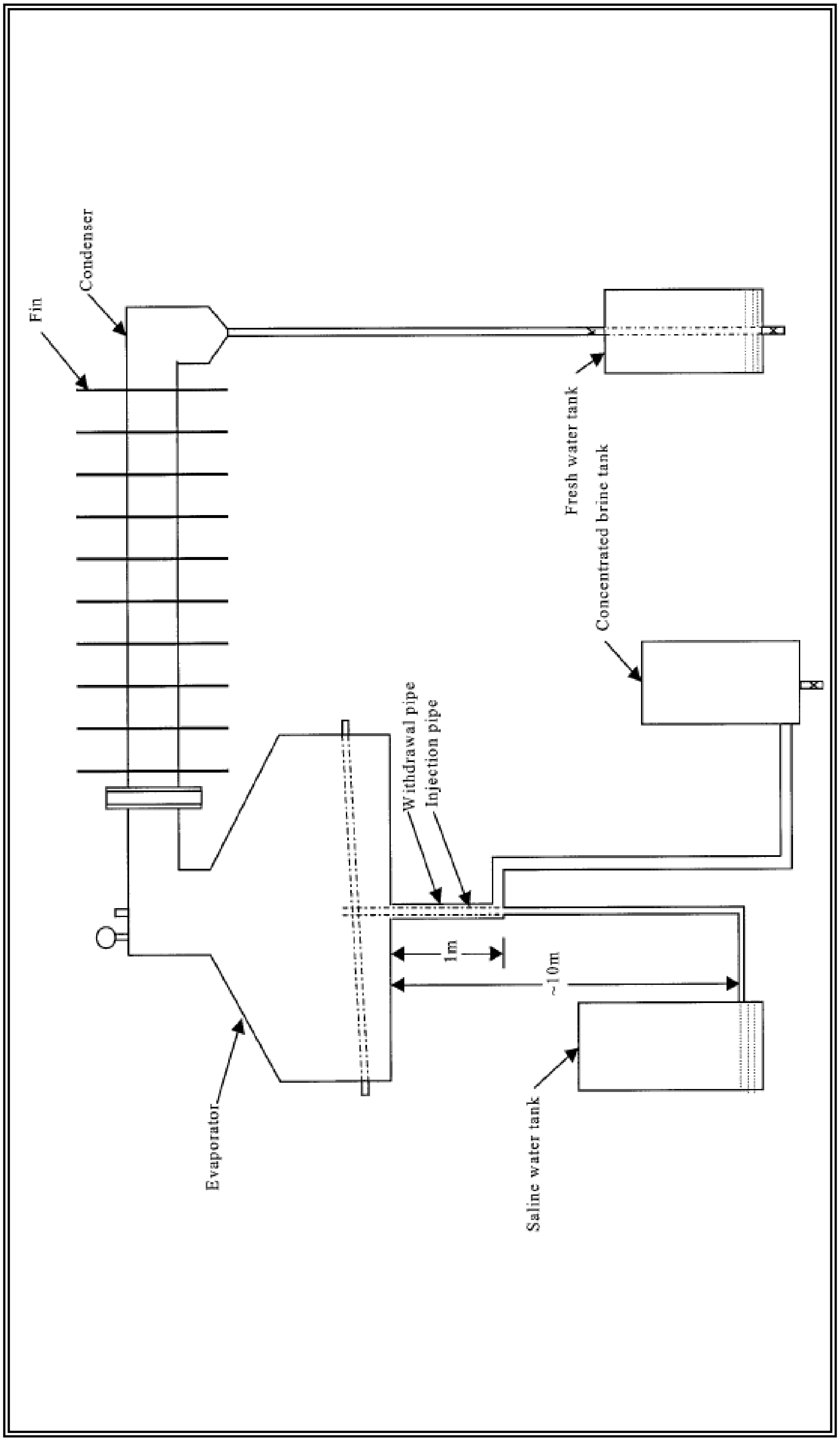
Λόγω της ύπαρξης κενού στην επιφάνεια του αλμυρού νερού στον ατμοποιητή ο ψεκασμό μπορεί να πραγματοποιηθεί υπό ατμοσφαιρική πίεση και έτσι δεν είναι απαραίτητη η κατανάλωση ενέργειας για λειτουργία αντλιών.

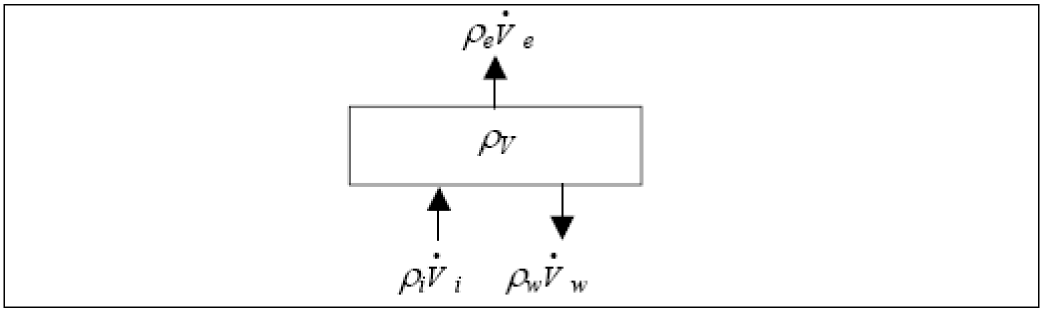
- **<u>Θεωρητική ανάλυση</u>**

Σε αυτό το τμήμα θα παρουσιαστούν οι μαθηματικές εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία κάθε επιμέρους συστήματος της εγκατάστασης.

- **Μάζα, συγκέντρωση άλατος και ενεργειακή ισορροπία**

Μία 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 48 έχουμε:


Fin
Condenser
Fresh water tank
Concentrated brine tank
Withdrawal pipe
Injection pipe
1m
~10m
Evaporator
Saline water tank



Εικόνα 48: Διατήρηση μάζας στον ατμοποιητή

η διατήρηση της μάζας δίνει:

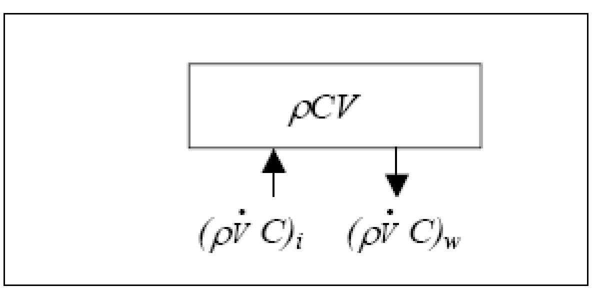
$$\boxed{\frac{d}{dt}(\rho V) = \rho_i \dot{V}_i - \rho_w \dot{V}_w - \rho_e \dot{V}_e} \text{........................(1)}$$

Με αρχική συνθήκη:

$$\boxed{(\rho V)\ (0) = \rho_0 V} \text{...................................(2)}$$

Οι δείκτες i, w και e αναφέρονται στην είσοδο του αλμυρού νερού, στην αποβολή της συγκεντρωμένης άλμης και στην μάζα που ατμοποιείται αντίστοιχα. Ο δείκτης o αναφέρεται στην κατάσταση αναφοράς του αλμυρού νερού στους 25^o 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 ποσότητα που ατμοποιείται:

$$\boxed{\rho_f \dot{V}_f = \rho_e \dot{V}_e} \text{.............................(3)}$$



Εικόνα 49: Ισορροπία άλατος στο νερό του ατμοποιητή

Η εφαρμογή της διατήρησης του άλατος (Εικόνα 49) δίνει:

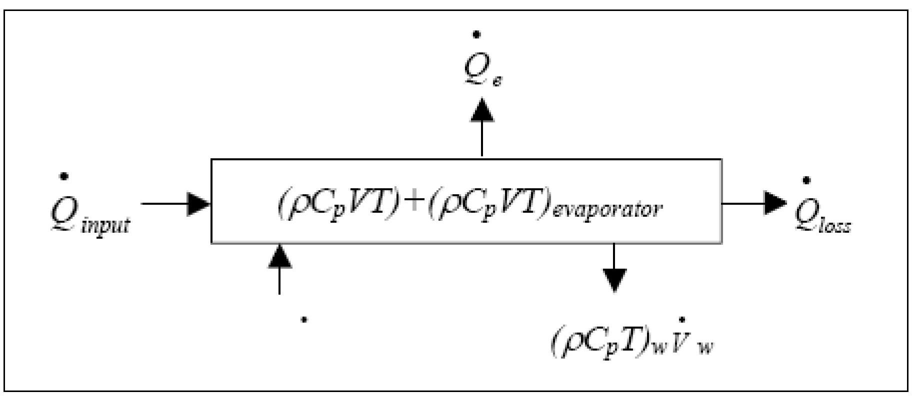
$$\boxed{\frac{d}{dt}(\rho C\, V) = (\rho C)_i\, \dot{V}_i - (\rho C)_s\, \dot{V}_w} \text{......................(4)}$$

Με αρχική συνθήκη:

$$\boxed{(\rho C V)\;(0) = \rho_0 C_0 V} \text{.........................(5)}$$

Όπου C είναι η συγκέντρωση σε αλάτι.

Στην επιφάνεια του νερού οι θερμοκρασίες του ατμού και του υγρού θεωρούνται ίσες, οπότε τα φαινόμενα ακτινοβολίας θεωρούνται αμελητέα. Από η στιγμή που ο θάλαμος είναι και κενός τα φαινόμενα συναγωγής θεωρούνται επίσης αμελητέα. Εφαρμογή της εξίσωσης της ενέργειας δίνει (Εικόνα 50):



Εικόνα 50: Ενεργειακή ισορροπία στο νερό στον ατμοποιητή

$$\boxed{\frac{d}{dt}(\rho C_p VT) + \frac{d}{dt}(\rho C_p VT)_{evaporator} = \dot{Q}_{input} + (\rho C_p T)_i\, \dot{V}_i - (\rho C_p T)_w\, \dot{V}_w - \dot{Q}_e - \dot{Q}_{loss}} \text{..........(6)}$$

Με αρχική συνθήκη:

$$(\rho C_p VT)\ (0) = \rho_0 C_{p,0} V T_0 \text{, and}$$

$$(\rho C_p VT)_{evaporator}(0) = (\rho C_p V)_{evaporator} T_0$$ ....(7)

- **Μεταφορά μάζας (mass transfer)**

Οι μέθοδοι της απόσταξης σε κενό μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με τον τρόπο που σχηματίζεται ο ατμός σε τρείς κατηγορίες:

Α) απόσταξη με ατμοποίηση (evaporatine distillation) που πραγματοποιείται όταν η πίεση κορεσμού του ατμού είναι μικρότερη από αυτήν του περιβάλλοντος αερίου.

Β) με ebullition όταν η πίεση κορεσμού του ατμού είναι μεγαλύτερη από αυτήν του περιβάλλοντος αερίου.

Γ) με μοριακή απόσταξη (molecular distillation) που είναι η διαδικασία της ατμοποίησης σε ένα χώρο χωρίς αέρια (κενό)

Η μεταφορά μάζας στην προτεινόμενη μονάδα είναι παρόμοια με την μοριακή απόσταξη. Ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής κατά τη μοριακή απόσταξη δίνεται από τη σχέση Langmuir-Knudsen:

$$\dot{m} = \frac{P_s A}{\sqrt{2\pi MRT_s}}$$ ....(8)

όπου A, P, R, M και T είναι η επιφάνεια του ατμοποιητή, η πίεση ατμών, η σταθερά των αερίων, το μοριακό βάρος, και η θερμοκρασία του υγρού μέσα στον ατμοποιητή. Η σχέση σε αυτήν την μορφή ισχύει αν πληρούνται κάποιες προδιαγραφές όπως: μεγάλο εύρος των τμημάτων που βρίσκονται σε κενό αέρος ώστε να αποφεύγονται διαφορές πίεσης, το υγρό είναι κατανεμημένο στην μορφή ενός πολύ λεπτού στρώματος, η θερμοκρασία της συμπύκνωσης είναι κατά 50-100^{o}C κάτω από τη θερμοκρασία ατμοποίησης, η προς απόσταξη ουσία υφίσταται απαέρωση κλπ.
Όπως είναι προφανές η εγκατάσταση μας δεν ικανοποιεί πλήρως τις παραπάνω προϋποθέσεις οπότε η σχέση (8) δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακριβώς σε αυτήν την 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:

$$\boxed{\dot{m}+ = \rho\sqrt{\frac{RT_s}{2\pi}} = p_s\sqrt{\frac{1}{2\pi RT_s}}} \ldots\ldots\ldots\ldots(9)$$

Όπου m+ είναι ο ρυθμός ατμοποίησης ανά μονάδα επιφανείας.

Ρυθμός υγροποίησης:

$$\boxed{\dot{m}- = -\left(\frac{\rho_{gi}}{\rho_{gs}}\right)\left(\frac{T_{gi}}{T_s}\right)^{1/2}\Gamma\,\dot{m}+} \ldots\ldots\ldots\ldots(10)$$

Όπου Γ ένας διορθωτικός παράγοντας που δίνεται από τη σχέση:

$$\boxed{\Gamma = \exp(-\beta_{gi}^2 U_{gi}^2) - \beta_{gi} U_{gi} \pi^{1/2}(1 - \Phi \beta_{gi} U_{gi})} \ldots\ldots\ldots\ldots(11)$$

Φ είναι ένας συντελεστής πιθανότητας, ενώ ο δείκτης g αναφέρεται στο αέριο και ο i στη διεπαφή.

Άρα συνολικά θα έχουμε:

$$\boxed{\begin{gathered}\dot{m} = \sigma\left[\dot{m}+ -\left(\frac{\rho_{gi}}{\rho_{gs}}\right)\left(\frac{T_{gi}}{T_s}\right)^{1/2}\Gamma\,\dot{m}+\right] \\ \dot{m} = \frac{\sigma}{(2\pi R)^{1/2}}\left(\frac{p_s}{T_s^{1/2}} - \Gamma\frac{p_{gi}}{T_{gi}^{1/2}}\right)\end{gathered}} \ldots\ldots\ldots\ldots(12)$$

όπου σ είναι ένας συντελεστής για την ατμοποίηση ή τη συμπύκνωση.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση ο Bemporad υπολόγισε το ρυθμό ατμοποίησης από το θάλαμο του θαλασσινού νερού προς το θάλαμο του φρέσκου νερού ως:

$$\dot{v}_e = \frac{\alpha_m}{\rho_f}\left[f(C)\frac{p(T_s)}{(T_s+273)^{0.5}} - \frac{p(T_f)}{(T_f+273)^{0.5}} \right]$$ …………(13)

Όπου:

$$f(C) = 1 - \alpha_1 C$$ ……………………(14)

διορθωτικός παράγοντας , a_m, a_1 εμπειρικοί συντελεστές, ρ_f η πυκνότητα του φρέσκου νερού και Ts, Tf η θερμοκρασία του θαλάσσιου και του φρέσκου νερού αντίστοιχα σε ^oC.

Σε περίπτωση που δεν θεωρήσουμε αμελητέα την πτώση πίεσης μεταξύ ατμοποιητή και υγροποιητή τότε η (13) γράφεται:

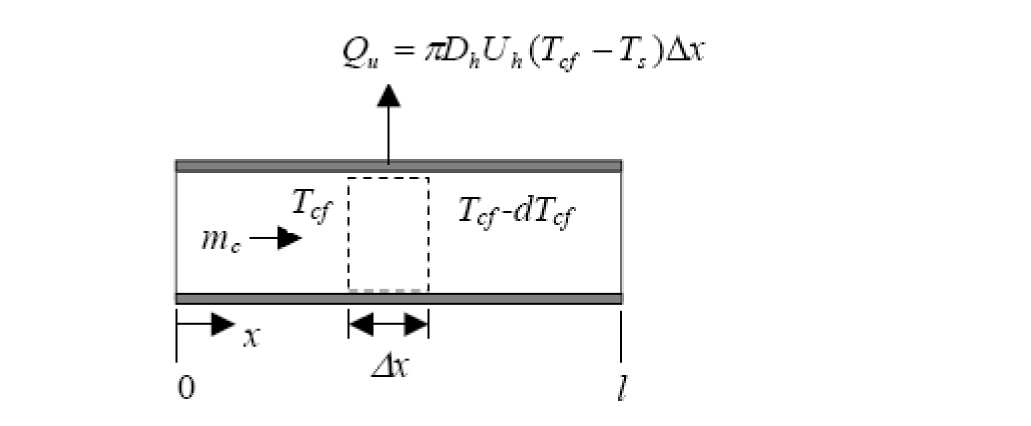
$$\dot{v}_e = \frac{\alpha_m}{\rho_f}\left[f(C)\frac{p(T_s)}{(T_s+273)^{0.5}} - \frac{p(T_f)+\Delta p}{(T_f+273)^{0.5}} \right]$$ ……………………(15)

Η ενέργεια της ατμοποίησης δίνεται από τη σχέση :

$$\dot{Q}_e = \rho_f h_{fg}(T_s)\dot{V}_e$$ ……………………………….(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 μία 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:



. Control volume for the flow through the evaporator heat exchanger

Εικόνα 51: Όγκος ελέγχου για τη ροή διαμέσου του ατμοποιητή

Για ένα στοιχειώδες στοιχείο μήκους ΔΧ η εξίσωση της ενέργειας δίνει:

$$\boxed{\dot{m}_c C_{p,cf} \frac{dT_{cf}(x)}{dx}\Delta x = -\pi D_h U_h (T_{cf} - T_s)\Delta x} \quad \text{.................(17)}$$

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:

$$\boxed{T_{cf}(x)=T_{co} \ at \ x=0} \quad \text{..................................(18)}$$

όπου ο δείκτης $_{co}$ αφορά το υγρό στην έξοδο του συλλέκτη.

Με επίλυση της (17) προκύπτει:

$$\boxed{T_{cf}(x) = T_s + (T_{co} - T_s)\exp\left[\frac{-\pi D_h U_h x}{\dot{m}_c C_{p,cf}}\right]} \quad \text{....................(19)}$$

Η καθαρή ποσότητα της θερμότητας που παρέχεται στο νερό είναι:

$$\boxed{\dot{Q}_u = \pi D_h U_h l_h (\overline{T}_{cf} - T_s)} \quad \text{.....................(20)}$$

όπου l_h είναι το μήκος του ατμοποιητή και T_{cf} είναι η μέση θερμοκρασία του υγρού που δίνεται μέσω της σχέσης:

$$\boxed{\overline{T}_{cf} = \frac{1}{l_h}\int_0^{l_h} T_{cf}(x)dx} \quad \text{...........................(21)}$$

Συνδυάζοντας τις (19) και (21) και αντικαθιστώντας στην (20) βρίσκουμε:

$$\boxed{\dot{Q}_u = \dot{m} C_{pcf} (T_{co} - T_s)\left[1 - \exp\left(\frac{-\pi D_h U_h l_h}{\dot{m}_c C_{p,cf}}\right)\right]} \quad \text{.................(22)}$$

Από την εξίσωση (19) η θερμοκρασία του υγρού στην έξοδο του εναλλάκτη θερμότητας γράφεται ως :

$$\boxed{T_{cf,outlet} = T_s + (T_{co} - T_s)\exp\left[\frac{-\pi D_h U_h l_h}{\dot{m}_c C_{p,cf}}\right]} \quad \text{.....................(23)}$$

Θεωρώντας αμελητέες τις απώλειες θερμότητας στου σωλήνες η θερμοκρασία του υγρού που εισέρχεται στον συλλέκτη T_{ci} δίνεται από την ισότητα:

$$\boxed{T_{ci} = T_{cf,outlet}} \quad \text{.......................................(24)}$$

όπου $T_{cf,outlet}$ είναι η θερμοκρασία του υγρού του συλλέκτη στην έξοδο του ατμοποιητή.

Ο συντελεστής θερμότητας U_h δίνεται από τη σχέση:

$$U_h = \frac{1}{1/h_f + FT}$$ ....(25)

Με το FT να παίρνει τιμές από 0.0005 για καθαρούς σωλήνες έως 0.001 W/m2oC.

Το h_f υπολογίζεται ως εξής:

Αν η ροή είναι στρωτή δηλαδή:

$$\mathrm{Re}_D = \frac{4\rho_0 \dot{V}_h}{\pi D_h \mu} \leq 2300$$ ....(26)

Τότε:

$$Nu_D = 3.66$$ ....(27)

Αν η ροή είναι τυρβώδης, δηλαδή:

$$\mathrm{Re}_D > 2300$$ ....(28)

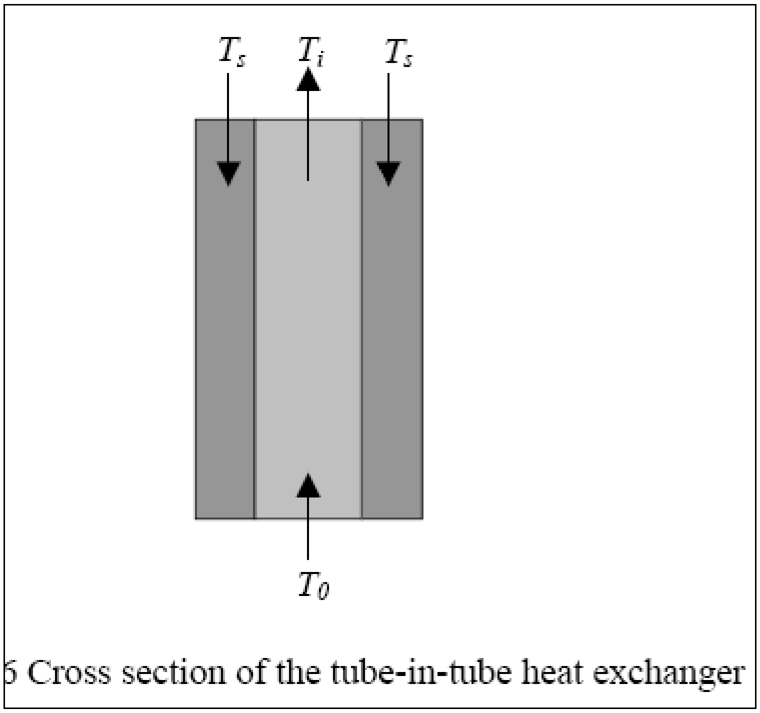
Τότε:

$$Nu_D = 0.023\,\mathrm{Re}_D^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{0.4}$$ ....(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:

$$T_i = \frac{\dot{Q}_h}{\rho_0 \dot{V}_i C_{p0}} + T_0$$ ....(30)



Εικόνα 52: Σχηματικό διάγραμμα του εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα

Ο Q_h είναι ο πραγματικός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας που δίνεται μέσω της σχέσης:

$$\dot{Q}_h = \varepsilon \dot{Q}_{max}$$ ....(31)

όπου Qmax είναι ο μέγιστος ρυθμός μεταφοράς θερμότητας που δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{Q}_{max} = C_{min}(T_s - T_0)$$ ....(32)

Και ε συντελεστής που προκύπτει από την σχέση:

$$\boxed{\varepsilon = \frac{1-\exp[-NTU(1-C_r)]}{1-C_r\exp[-NTU(1-C_r)]}} \quad \text{.....................(33)}$$

Στην σχέση (33) το NTU δίνεται από τη σχέση:

$$\boxed{NTU = \frac{UA}{C_{\min}}} \quad \text{............................(34)}$$

Και:

$$\boxed{C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}} \quad \text{............................(35)}$$

όπου C_{min} και C_{max} το ελάχιστο και το μέγιστο αντίστοιχα των Cc και Ch που δίνονται από τις σχέσεις:

$$\boxed{C_c = \rho_0 \dot{V}_i C_{p0}} \quad \text{....................(36)}$$

$$\boxed{C_h = \rho_s \dot{V}_w C_{ps}} \quad \text{...................(37)}$$

Η παραγωγή UA δίνεται ως:

$$\boxed{UA = \frac{1}{\frac{1}{2\pi r_i l h_i} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k l} + \frac{1}{2\pi r_o l h_o}}} \quad \text{...........(38)}$$

Ο συντελεστής h_i υπολογίζεται από τις σχέσεις (26)-(29). Ο συντελεστής ho αν η ροή είναι στρωτή υπολογίζεται ως:

$$\boxed{Re_D = \frac{\rho(D_o - D_i)}{\mu} \frac{\rho_s \dot{V}_w}{0.25\rho\pi(D_o^2 - D_i^2)} \leq 2300} \quad \text{..........(39)}$$

Ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται από τον παρακάτω πίνακα:

Table 3.1 Nusselt number for laminar flow in annulus [69]

D_i/D_o	Nu_i
0	-
0.05	17.46
0.1	11.56
0.25	7.37
0.5	5.74
1	4.86

Αν η ροή είναι τυρβώδης χρησιμοποιούμε τη σχέση (29).

- **Ανάλυση του υγροποιητή**

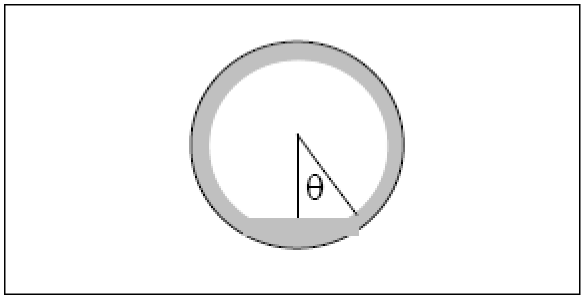
Η ατμοποίηση του νερού από θαλασσινό νερό έχει την τάση να το ψύχει, ενώ η συμπύκνωση του ατμού έχει την τάση να θερμαίνει το φρέσκο νερό. Άρα για να είναι συνεχής η διαδικασία της απόσταξης, θα πρέπει να παρέχεται συνεχώς θερμότητα στον ατμοποιητή και να απορρίπτεται από τον υγροποιητή. Έτσι ο υγροποιητής θα πρέπει να μπορεί να διαχέει στο περιβάλλον θερμότητα που δίνεται από τη σχέση:

$$\boxed{\dot{Q}_c = \dot{m}(h_{fg} + 0.68C_p(T_s - T_{if}))} \quad \text{.........................(40)}$$

Στην παραπάνω 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 την σχέση:

$$\boxed{\bar{h}_c = 0.725\left[1 - \frac{\theta}{\pi}\right]\left[\frac{h_{fg}^{*} g k_c^3 (\rho_l - \rho_v)}{\gamma_l D (T_s - T_{if})}\right]^{1/4}} \quad \text{.....................(41)}$$

Με τη γωνία θ να φαίνεται στην Εικόνα 53:



Εικόνα 53: Η γωνία θ

Τα μεγέθη του στρώματος του συμπυκνώματος που παρουσιάζονται εξετάζονται για μία θερμοκρασία ενδιάμεση μεταξύ αυτής της ενδιάμεσης επιφάνειας T_i και της εσωτερικής επιφάνειας του υγροποιητή T_{ci}, έτσι που το θερμοκρασιακό άλμα υπολογίζεται ως:

$$T_{film} = T_{ci} + 0.25(T_i - T_{ci}) \qquad \text{......................(42)}$$

Όπου T_i όπως προαναφέραμε είναι η θερμοκρασία της ενδιάμεσης επιφάνειας ατμοποιητή – υγροποιητή που υπολογίζεται θεωρώντας ότι όλη η θερμότητα που προσφέρεται από τον ατμό στην ενδιάμεση επιφάνεια Q_{s-i} άγεται μέσω του υγρού στρώματος στην επιφάνεια του συμπυκνωτή, Q_{i-ci}. Έτσι :

$$\dot{Q}_{s-i} = \dot{Q}_{i-ci} \qquad \text{..................................(43)}$$

ή

$$\dot{Q}_c = \bar{h}_c A_i (T_i - T_{ci}) \qquad \text{.............................(44)}$$

Όπου A_i είναι η επιφάνεια του υγρού στρώματος στην ενδιάμεση επιφάνεια.

Για την αγωγή θερμότητας μέσω του τοιχώματος του υγροποιητή:

$$\dot{Q}_c = \frac{2\pi l_c k_c (T_{ci} - T_{co})}{\ln(r_{co}/r_{ci})} = \frac{T_i - T_{co}}{\dfrac{1}{2\pi r_{ci} l_c \bar{h}_c} + \dfrac{\ln(r_{co}/r_{ci})}{2\pi l_c k_c}} \qquad \text{.................(45)}$$

Όπου T_{co}, r_{ci}, r_{co}, l_c, και k_c είναι η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του υγροποιητή, η εσωτερική και εξωτερική καμπυλότητα, το μήκος και η θερμική αγωγιμότητα αντίστοιχα.
Ο υγροποιητή θεωρείται ότι είναι ένας οριζόντιος αγωγός με κυκλικά πτερύγια. Η μέση μεταφορά θερμότητας από τα άκρα των πτερυγίων είναι:

$$\boxed{Nu_s = cRa_s^b} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(46)$$

Η παραπάνω εξίσωση ισχύει όταν:

$$\boxed{2 \le Ra_s \le 10^4} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(47)$$

Και

$$\boxed{1.36 < 1/\xi < 3.73} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(48)$$

Όπου:

$$\boxed{\xi = \frac{D_{co}}{D_{fin}}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(49)$$

$$\boxed{Ra_s = \frac{g\beta(T_{co} - T_a)S^3}{\alpha\gamma}\frac{S}{D_{fin}}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(50)$$

$$\boxed{\begin{array}{l} b = 0.29 \\ c = 0.44 + 0.12/\xi \end{array}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(51)$$

Και S η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πτερυγίων.

Αντίστοιχα η μεταφορά θερμότητας από τον κύλινδρο και τις επιφάνειες των πτερυγίων είναι:

$$\boxed{Nu_s = \frac{Ra_s}{12\pi}\left\{2 - \exp\left[-\left(\frac{c1}{Ra_s}\right)^{3/4}\right] - \exp\left[-\beta\left(\frac{c1}{Ra_s}\right)^{3/4}\right]\right\}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(52)$$

Όπου:

$$1.67 < 1/\xi < \infty$$

$$\beta = 0.17\xi + \exp(-4.8\xi)$$

$$c1 = \left[\frac{23.7 - 1.1(1 + 152\xi^2)^{1/2}}{1 + \beta}\right]^{4/3}$$

Συνολικά η θερμότητα που μεταφέρεται από τον συμπυκνωτή δίνεται από τη σχέση:

$$Q_c = [h_{co,tip} N A_{f,tip} \eta_f + h_{co} N A_{f,sides} \eta_f + h_{co} A_b](T_{co} - T_a) \quad \text{.......................(53)}$$

Όπου N ο αριθμός των πτερυγίων και:

$$\eta_f = C \frac{K_1(mr_{co}) I_1(mr_{2c}) - I_1(mr_{co}) K_1(mr_{2c})}{I_0(mr_{co}) K_1(mr_{2c}) + K_0(mr_{co}) I_1(mr_{2c})} \quad \text{....................................(54)}$$

Με:

$$C = \frac{2r_{co}/m}{r_{2c}^2 - r_{co}^2}$$

$$r_{2c} = r_{fin} + t/2$$

$$m = \left(\frac{2h_{co}}{k_c t_{fin}}\right)^{1/2} \quad \text{..(55)}$$

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:

$$\boxed{Q_u = \dot{m}_c\, C_{p,cf}\,(T_{co} - T_{ci})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(56)$$

η οποία γράφεται και:

$$\boxed{Q_u = F_R A_c [I_c(\tau\alpha) - U_L (T_{ci} - T_a)]} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(57)$$

Από τις εξισώσεις (56) και (57) είναι προφανές ότι η θερμοκρασία στην έξοδο του συλλέκτη δίνεται από τη σχέση:

$$\boxed{T_{co} = T_{ci} + \frac{Z F_R A_c}{\dot{m}_c\, C_{p,cf}}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(58)$$

όπου:

$$\boxed{Z = I_c(\tau\alpha) - U_L (T_{ci} - T_a)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(59)$$

Αν ο ηλιακός συλλέκτης λειτουργεί ως θερμοσίφωνας η ροή μάζας μπορεί να υπολογισθεί ως:

$$\boxed{\dot{m}_c = \left[A_c Z \frac{\pi N_c D_c^4 g \beta_f \rho_f f'}{128 L_1 \gamma C_{p,cf} (1 + r_p)} \left(\frac{L_c}{2} \sin\beta + H_c \right) \right]^{0.5}} \quad \ldots\ldots\ldots(60)$$

- **Θερμική απόδοση**

Ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης ορίζεται ως:

$$\boxed{\eta_t = \frac{\dot{m}_f \, .h_{fg}}{\dot{Q}_u}} \quad \text{...(61)}$$

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:

$$\boxed{\eta_{daily} = \frac{\int \dot{m}\, h_{fg}\, dt}{\int \dot{Q}_u \, dt} \cong \frac{m_{day}\ h_{fg}(av.)}{\Delta t \Sigma \dot{Q}_u}} \quad \text{..................................(63)}$$

- **<u>Πειραματική ανάλυση</u>**

Η πειραματική ανάλυση θα πραγματοποιηθεί με την προοπτική κατασκευής και λειτουργίας μιας μονάδας αφαλάτωσης με χρήση ηλιακής ενέργειας στην περιοχή της Αθήνας (Γεωγραφικό πλάτος: Φ=37.97^{o}).

Με βάση στοιχεία προερχόμενα από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Κ.Α.Π.Ε) η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος έχει τιμές που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

ΜΗΝΑΣ	**ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (^{O} C)**
Ιανουάριος	10.3
Φεβρουάριος	10.0
Μάρτιος	12.1
Απρίλιος	15.9
Μάιος	20.6
Ιούνιος	25.5
Ιούλιος	28.4
Αύγουστος	27.9
Σεπτέμβριος	24.3
Οκτώβριος	19.4
Νοέμβριος	14.5
Δεκέμβριος	11.9

Είναι προφανές ότι η λειτουργία του ηλιακού τμήματος της εγκατάστασης προσομοιάζει προς αυτήν του θερμοσίφωνα. Ουσιαστικά σε αυτό το τμήμα το νερό προθερμαίνεται και στην συνέχεια εισερχόμενο στον θάλαμο ατμοποίησης ατμοποιείται.

Άρα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έναν απλό εμπορικό ηλιακό συλλέκτη ο οποίος όμως επειδή θα εργάζεται με θαλάσσιο (αλμυρό νερό) θα πρέπει να εμφανίζει ιδιαίτερη αντοχή στη διάβρωση.

Επιλογή μας είναι ο επιλεκτικός ηλιακός συλλέκτης από ενιαίο φύλλο χαλκού, με υψίσυχνη μοριακή συγκόλληση Ultrasonic FPS 2.0 της εταιρίας «Helional Solar Systems» ο οποίος έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Συλλέκτης

Βάρος: 42,5 kg
Διαστάσεις: 2000X1000X100 mm
Εμβαδόν: 1,98 m^2
Εμβαδόν παραθύρου: 1,78 m^2
Εμβαδόν απορροφητή: 1,81 m^2
Αριθμός καλυμμάτων: 1
Υλικό καλύμματος: Mistlite tempered Glass
Διαπερατότητα καλύμματος: 95%
Πάχος καλύμματος: 4 mm
Διαστάσεις καλύμματος: 1960X960 mm
Αριθμός σωληνών: 12
Διάμετρος σωληνών:
- Κύριες σωλήνες: ∅22
- Κάθετες: ∅10

Απόσταση μεταξύ σωληνών: 93 mm
Υγρό μεταφοράς θερμότητας: Μείγμα νερού με μονοαιθυλενογλυκόλη

Απορροφητής

Υλικό: Χαλκός με επίστρωση οξειδίων τιτανίου
Επιφάνεια: Επιλεκτική
Πάχος: 0,2 mm
Εμβαδόν: 1,81 m^2
Εκπομπή: 5%
Απορρόφηση: 95%
Σύνδεση μεταξύ των σωληνών: Υψίσυχνη μοριακή συγκόληση Ultrasonic Welding

Μόνωση

Θερμική αγωγιμότητα: 0,03kcal /m h °C
Υλικό: Πετροβάμβακας
Πάχος πλευρικής μόνωσης: 30 mm
Πάχος μόνωσης πλάτης: 40 mm

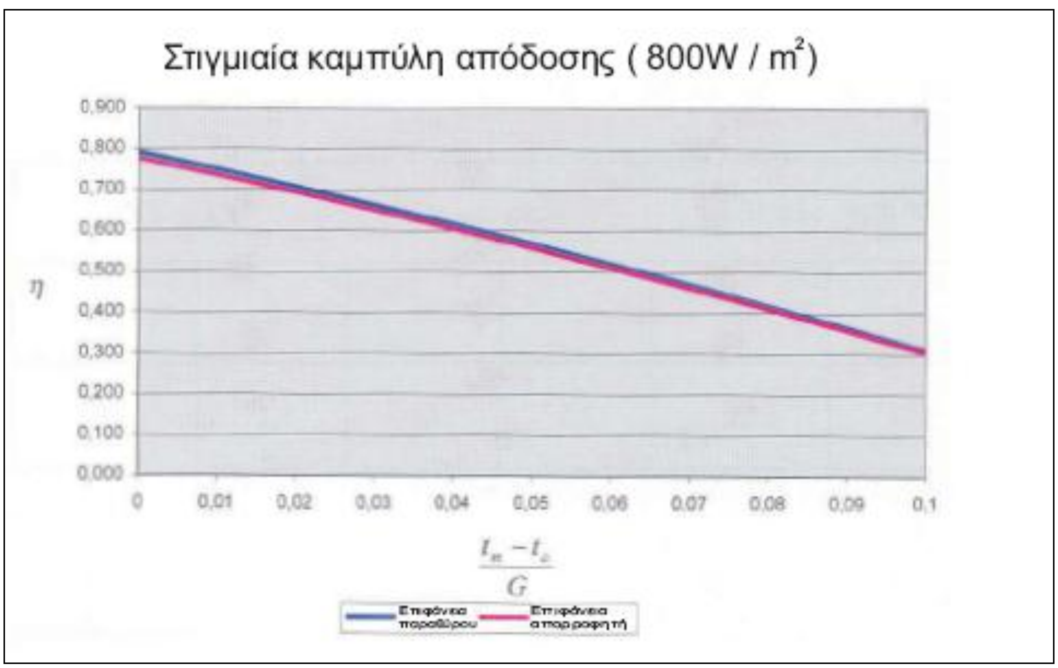
Πλαίσιο

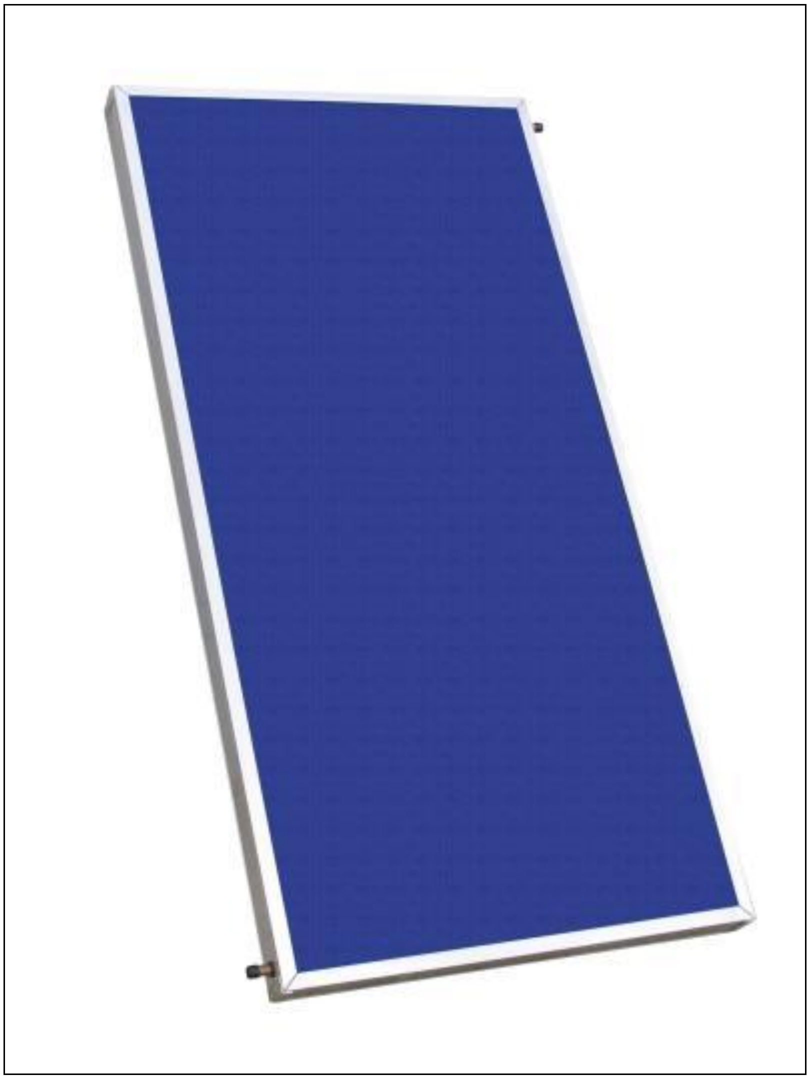
Υλικό: Αλουμίνιο
Διαστάσεις: 1992 x 996 x 98 mm
Διαστάσεις παραθύρου: 1919 x 925 mm
Στεγανοποίηση: Διπλό EPDM

Περιορισμοί

Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας: 150 °C
Μέγιστη πίεση λειτουργίας: 8 atm
Μέγιστη και ελάχιστη γωνία κλίσης:
- Μέγιστη: 90°
- Ελάχιστη: 0°

Προφανώς το υγρό μεταφοράς θερμότητας στην δική μας περίπτωση θα είναι το αλμυρό νερό. Επιπλέον δίδεται η στιγμιαία καμπύλη απόδοσης:





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 λοιπόν δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$\boxed{q_\mathrm{u} = A_\mathrm{c}[G_\mathrm{t}\tau\alpha - U_\mathrm{L}(T_\mathrm{p} - T_\mathrm{a})] = mc_p[T_\mathrm{o} - T_\mathrm{i}]}$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί να λάβει την μορφή:

$$\boxed{q_\mathrm{u} = A_\mathrm{c}F_\mathrm{R}[G_\mathrm{t}(\tau\alpha) - U_\mathrm{L}(T_\mathrm{i} - T_\mathrm{a})]}$$

εάν αντικαταστήσουμε τη μέση θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης T_p, με τη θερμοκρασία εισόδου του υγρού στον συλλέκτη, T_i. Η επεξήγηση των συμβόλων που χρησιμοποιούνται παραπάνω έχει ως εξής:

$q_u =$ ωφέλιμη ενέργεια που παρέχεται από το συλλέκτη σε W

$A_c =$ συνολική επιφάνεια του συλλέκτη σε m2

$G_T =$ ολική στιγμιαία τιμή της ακτινοβολίας σε W/m2

$\tau\alpha =$ γινόμενο διαπερατότητας – απορροφητικότητας

$U_L =$ συντελεστής συνολικών θερμικών απωλειών σε W/m2 ^oC

$T_p =$ μέση θερμοκρασία της επιφάνειας απορρόφησης σε ^oC

$T_a =$ θερμοκρασία περιβάλλοντος σε ^oC

$T_o =$ θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον συλλέκτη σε ^oC

$T_i =$ θερμοκρασία εισόδου του νερού στον συλλέκτη.

$\dot{m} =$ ροή μάζας σε kg/sec

$c_p =$ ειδική θερμοχωρητικότητα σε σταθερή πίεση σε J/kg K

$F_R =$ παράγων θερμικής απολαβής του συλλέκτη

Όπως είναι προφανές για να προσδιορίσουμε την ωφέλιμη ενέργεια που παρέχει ο συλλέκτης πρέπει πρωτίστως να προσδιορίσουμε το μέγεθος G_T, δηλαδή την στιγμιαία ολική τιμή της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο συλλέκτη.

Από το βιβλίο «Θερμικά – Ηλιακά Συστήματα, Κ. Αντωνόπουλου, Αθήνα 2004, σελ. 22», προκύπτει ο τύπος:

$$\boxed{G_T = G_b R_b + G_d\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + (G_b + G_d)\rho\left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right)}$$

Όπου:

$R_b =$ ο λόγος άμεσης ακτινοβολίας

$G_b =$ η στιγμιαία άμεση ακτινοβολία σε W/m2

$G_d =$ η στιγμιαία διάχυτη ακτινοβολία σε W/m2

$\beta =$ η κλίση του επιπέδου συλλέκτη

Στην περίπτωση που εξετάζουμε:

$$\boxed{\beta = \phi = 37.97^o}$$

Επιπλέον ισχύουν οι σχέσεις:

$$G_b = M_t + A_t \sin(\frac{360}{365} D - P_t)$$
$$G_d = m_t + a_t \sin(\frac{360}{365} D - P_t)$$

όπου οι συντελεστές προκύπτουν από σχετικούς πίνακες.

Με χρήση των παραπάνω τύπων συμπληρώνονται οι παρακάτω πίνακες:

ΩΡΑ	**M_t (KW/m2)**	**A_t (KW/m2)**	**P_t (°)**	**G_b (KW/m2)**
07.00	0.007	0.046	86.18	0.050
08.00	0.057	0.068	87.31	0.122
09.00	0.119	0.104	87.94	0.218
10.00	0.191	0.129	88.31	0.314
11.00	0.258	0.153	89.35	0.405
12.00	0.319	-0.181	-88.88	0.495
13.00	0.342	-0.194	-89.18	0.530
14.00	0.325	0.183	87.21	0.499
15.00	0.269	0.166	86.22	0.426
16.00	0.183	0.147	82.10	0.318
17.00	0.078	0.131	79.85	0,196
18.00	-0.025	0.114	77.36	0,076

Οι μετρήσεις γίνονται για την **17η Ιουλίου** δηλαδή D=198.

Αντίστοιχα για τη διάχυτη ακτινοβολία έχουμε:

ΩΡΑ	**m_t (KW/m2)**	**a_t (KW/m2)**	**P_t (°)**	**G_d (KW/m2)**
07.00	0.048	0.111	81.23	0.149
08.00	0.134	0.127	82.45	0.251
09.00	0.208	0.133	83.94	0.332
10.00	0.261	0.129	85.60	0.382

11.00	0.283	0.117	86.05	0.394
12.00	0.271	0.095	82.71	0.359
13.00	0.243	0.081	81.95	0.317
14.00	0.210	0.083	87.23	0.289
15.00	0.176	0.087	89.53	0.260
16.00	0.141	-0.085	-88.19	0.224
17.00	0.104	-0.079	-88.97	0.181
18.00	0.051	0.091	86.79	0.137

Για την εφαρμογή της σχέσεως μένει να υπολογίσουμε το R_b το οποίο προκύπτει μέσω της:

$$\boxed{R_b = \frac{\sin\delta\sin(\varphi-\beta)+\cos\delta\cos(\varphi-\beta)\cos\omega}{\sin\delta\sin\varphi+\cos\delta\cos\varphi\cos\omega}}$$

Όπου:

$$\boxed{\beta = \phi = 37.97^o}$$

$$\boxed{\delta = 23.45\sin\left(\frac{360(284+n)}{365}\right) = 21.2^o}$$ για n=198 που αντιστοιχεί στην $17^{η}$ Ιουλίου.

Τέλος :

$$\boxed{\omega = 0.25(\min\_\alpha\pi o\_\eta\lambda\iota\alpha\kappa o\_\mu\varepsilon\sigma\eta\mu\varepsilon\rho\iota)}$$

Άρα:

ΩΡΑ	**ω (°)**	**R_b**
07.00	-75	0.584
08.00	-60	0.790
09.00	-45	0.888
10.00	-30	0.940
11.00	-15	0.966
12.00	0	0.974
13.00	15	0.966
14.00	30	0.940
15.00	45	0.888

16.00	60	0.790
17.00	75	0.584
18.00	90	0.000

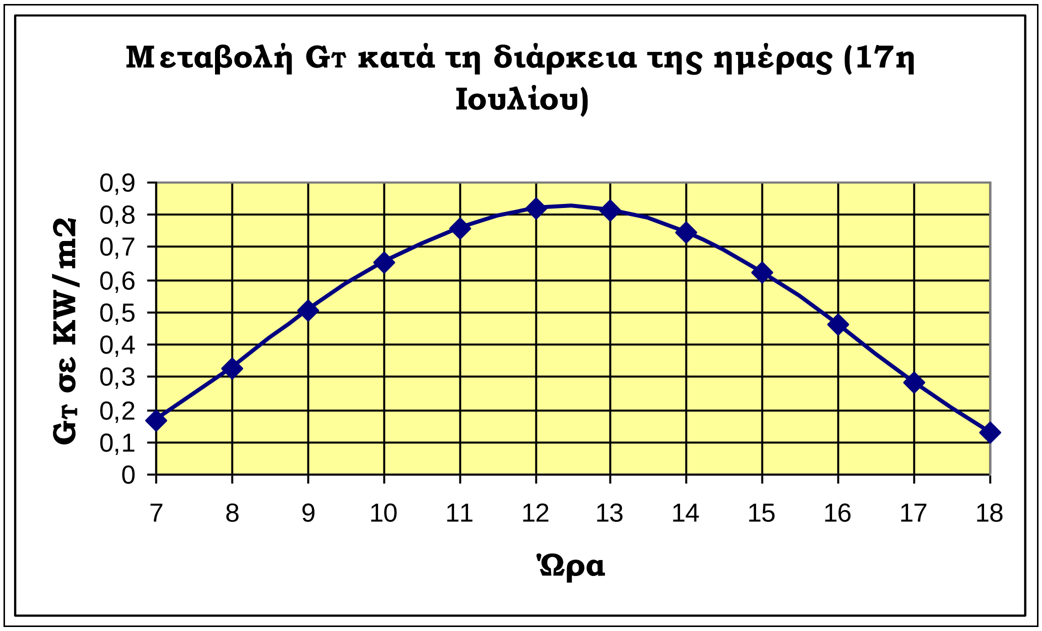
Από το βιβλίο «Θερμικά – Ηλιακά Συστήματα, Κ. Αντωνόπουλου, Αθήνα 2004, σελ. 22», έχουμε για συνηθισμένο έδαφος:

$\boxed{\rho = 0.2}$

Άρα είμαστε πλέον σε θέση να υπολογίσουμε την τιμή της G_T για κάθε ώρα της ημέρας:

ΩΡΑ	**G_b (KW/m2)**	**G_d (KW/m2)**	**R_b**	**G_T (KW/m2)**
07.00	0.050	0.149	0.584	0.167
08.00	0.122	0.251	0.790	0.329
09.00	0.218	0.332	0.888	0.503
10.00	0.314	0.382	0.940	0.652
11.00	0.405	0.394	0.966	0.760
12.00	0.495	0.359	0.974	0.821
13.00	0.530	0.317	0.966	0.813
14.00	0.499	0.289	0.940	0.744
15.00	0.426	0.260	0.888	0.624
16.00	0.318	0.224	0.790	0.462
17.00	0,196	0.181	0.584	0.285
18.00	0,076	0.137	0.000	0.128

Στο παρακάτω διάγραμμα λοιπόν φαίνεται η μεταβολή της G_T κατά τη διάρκεια της ημέρας:



Διάγραμμα 1: Μεταβολή της στιγμιαίας ολικής ακτινοβολίας ($17^{η}$ Ιουλίου)

Πλέον μπορούμε να προσδιορίσουμε και την αποδιδόμενη ισχύ από τον συλλέκτη αφού είναι γνωστά τα :

- **GT** που υπολογίσαμε στους προηγούμενους πίνακες
- **Ac**, δηλαδή το εμβαδόν του συλλέκτη που ισούται με 1,98m2
- $F_R \mathrm{U_L} = 3.3\ \mathrm{W/m^2K}$ και $\mathrm{F_R}(\tau\alpha)_n = 0.72$ που είναι χαρακτηριστικά του συλλέκτη
- **Ta** είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η μέση τιμή της οποίας για τον μήνα Ιούλιο προκύπτει από σχετικό πίνακα και ισούται με 28.4^{o}C.
- **Ti** είναι η θερμοκρασία εισόδου του νερού στον συλλέκτη. Με δεδομένο ότι το νερό αυτό είναι θαλάσσιο αυτή η θερμοκρασία θα ισούται με 27^{o}C περίπου λαμβάνοντας υπόψιν και την προθέρμανση στον εναλλάκτη διπλού σωλήνα.

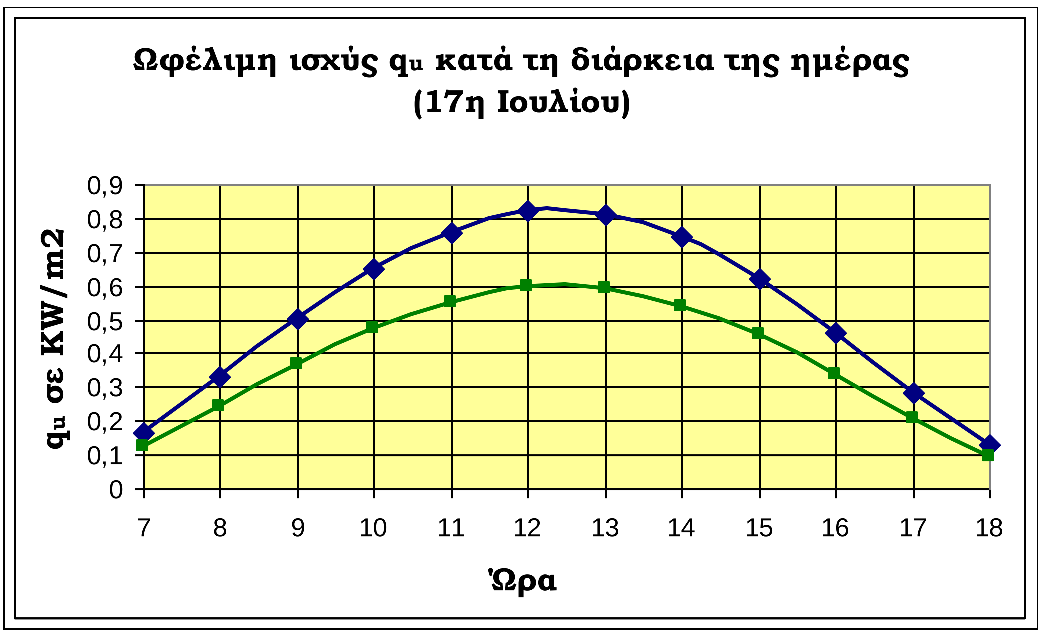
Άρα με εφαρμογή της σχέσης:

$$\boxed{q_{\mathrm{u}} = A_{\mathrm{c}} F_{\mathrm{R}} [G_{\mathrm{t}}(\tau\alpha) - U_{\mathrm{L}}(T_{\mathrm{i}} - T_{\mathrm{a}})]}$$

προκύπτει η ωφέλιμη ισχύς που αποδίδει ο συλλέκτης για προθέρμανση του θαλασσίου νερού πριν αυτό εισέλθει στον ατμοποιητή:

ΩΡΑ	G_T (KW/m2)	q_u (KW/m2)
07.00	0.167	0.125
08.00	0.329	0.242
09.00	0.503	0.367
10.00	0.652	0.474
11.00	0.760	0.552
12.00	0.821	0.596
13.00	0.813	0.590
14.00	0.744	0.540
15.00	0.624	0.454
16.00	0.462	0.337
17.00	0.285	0.210
18.00	0.128	0.097

Προκύπτει λοιπόν το παρακάτω διάγραμμα της ωφέλιμης ισχύος:

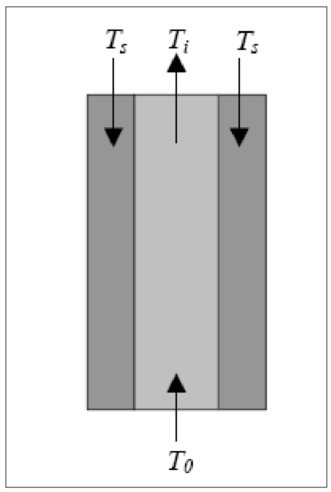


Διάγραμμα 2: Μεταβολή της ωφέλιμης ισχύος και της στιγμιαίας ολικής ακτινοβολίας (17η Ιουλίου)

στο οποίο με πράσινο χρώμα απεικονίζεται η μεταβολή της **q_u** και με κυανό η μεταβολή της **G_T.**
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 αλμυρό νερού στον θάλαμο ατμοποίησης θα δίνεται από την σχέση (30):

$$\boxed{T_i = \frac{\dot{Q}_h}{\rho_0 \dot{V}_i C_{p0}} + T_0}$$

όπου:



- $T_i =$ η θερμοκρασία εισόδου στον ατμοποιητή
- $\dot{Q}_h =$ ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας που με βάση την ανάλυση που κάναμε στο θεωρητικό τμήμα δίνεται από τη σχέση (31):

$$\boxed{\dot{Q}_h = \varepsilon \dot{Q}_{max}}$$

όπου:

$$\boxed{\dot{Q}_{max} = C_{min}(T_s - T_0)}$$

είναι ο μέγιστος δυνατός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας και:

$$\boxed{\varepsilon = \frac{1-\exp[-NTU(1-C_r)]}{1-C_r\exp[-NTU(1-C_r)]}}$$

χαρακτηριστικό μέγεθος του εναλλάκτη.

- $\rho_0, C_{p0}, T_0 =$ μεγέθη του αλμυρού νερού στην δεξαμενή τροφοδοσίας

- $\dot{V}_i =$ ροή όγκου σε m3/sec

Κατασκευαστικά θα πρέπει να αναφέρουμε ότι ο εναλλάκτης θερμότητας διπλού σωλήνα αποτελείται από έναν εσωτερικό χαλκοσωλήνα διαμέτρου 127mm, ο οποίος περικλείεται σε ένα σωλήνα κατασκευασμένο από CPVC διαμέτρου 254mm. Στον εξωτερικό σωλήνα κυκλοφορεί το θαλάσσιο νερό ενώ στον εξωτερικό η αποβαλλόμενη άλμη. Με βάση στοιχεία της βιβλιογραφίας για μια εγκατάσταση παρόμοια με την εξεταζόμενη, η κατάσταση αναφοράς του αλμυρού νερού στον ατμοποιητή θα είναι:

Θερμοκρασία : 27 °C
Περιεκτικότητα άλατος: 3.5%
Πυκνότητα: 1021kg/m3

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (60):

$$\boxed{\dot{m}_c = \left[A_c Z \frac{\pi N_c D_c^4 g \beta_f \rho_f f'}{128 L_1 \gamma C_{p,cf}(1+r_p)}\left(\frac{L_c}{2}\sin\beta + H_c\right)\right]^{0.5}}$$

και με δεδομένο ότι η λειτουργία του συλλέκτη είναι τύπου θερμοσίφωνα, μπορούμε να προσδιορίσουμε τη ροή μάζας στον συλλέκτη. Τα σύμβολα που εμφανίζονται στην εξίσωση εξηγούνται ως εξής:

$A_c =$ συνολική επιφάνεια του συλλέκτη σε m2 (1,98m2)
$Z =$ ανύψωση σε m (12 m)
$N_C =$ αριθμός παραλλήλων μετώπων στον συλλέκτη (1)
$D_C =$ διάμετρος του σωλήνα μετώπου του συλλέκτη σε m (0.022 m)
$g =$ επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/sec2 (9,81 m/sec2)
$\beta_f =$ ογκομετρικός συντελεστής θερμικής επέκτασης σε 1/K (250 x 10 $^{-6}$ 1/K)

ρ_f = πυκνότητα σε kg/m3 (1021 kg/m3)

L_1 = μήκος του καναλιού ρευστού στον συλλέκτη σε m (1 m)

γ = κινηματική συνεκτικότητα σε m2/sec (0.9 x 10 $^{-6}$ m2/sec)

$C_{p,cf}$ = ειδική θερμότητα σε J/kg ^{o}C (3995 J/K kg)

r_p = λόγος της πτώσης πίεσης στους συνδετικούς σωλήνες και στον εναλλάκτη προς αυτή του συλλέκτη (~1)

L_C = μήκος συλλέκτη σε m (2.00 m)

H_C = κατακόρυφη απόσταση του πυθμένα του ατμοποιητή από την κορυφή του συλλέκτη (2 m)

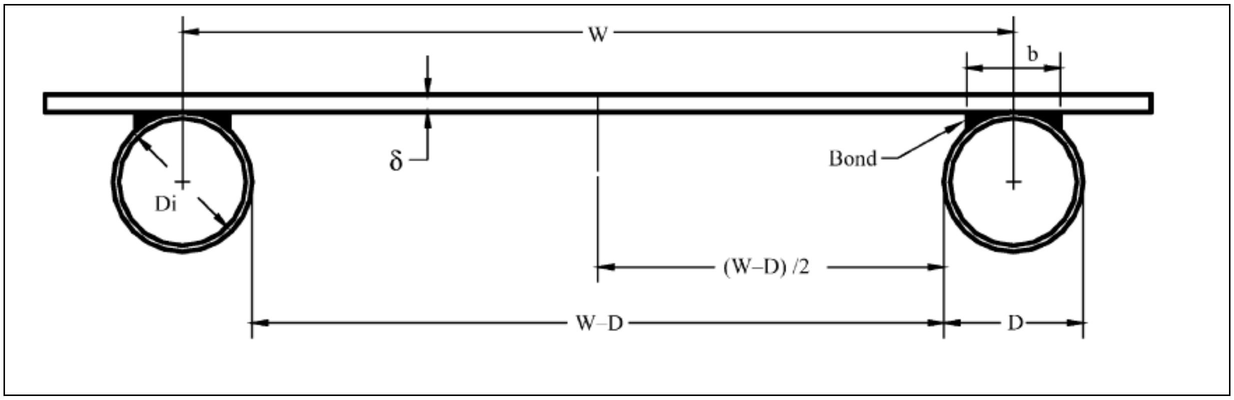
Το μέγεθος f είναι συντελεστής που δίδεται από την σχέση:

$$\boxed{f = (1 - 0.04h_w + 0.0005h_w^2)(1 + 0.091N_g)}$$

Όπου:

$$\boxed{h_w = 5.7 + 3.8W}$$

Και N_g ο αριθμός των υάλινων περιβλημάτων του συλλέκτη. Το W είναι απόσταση η οποία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



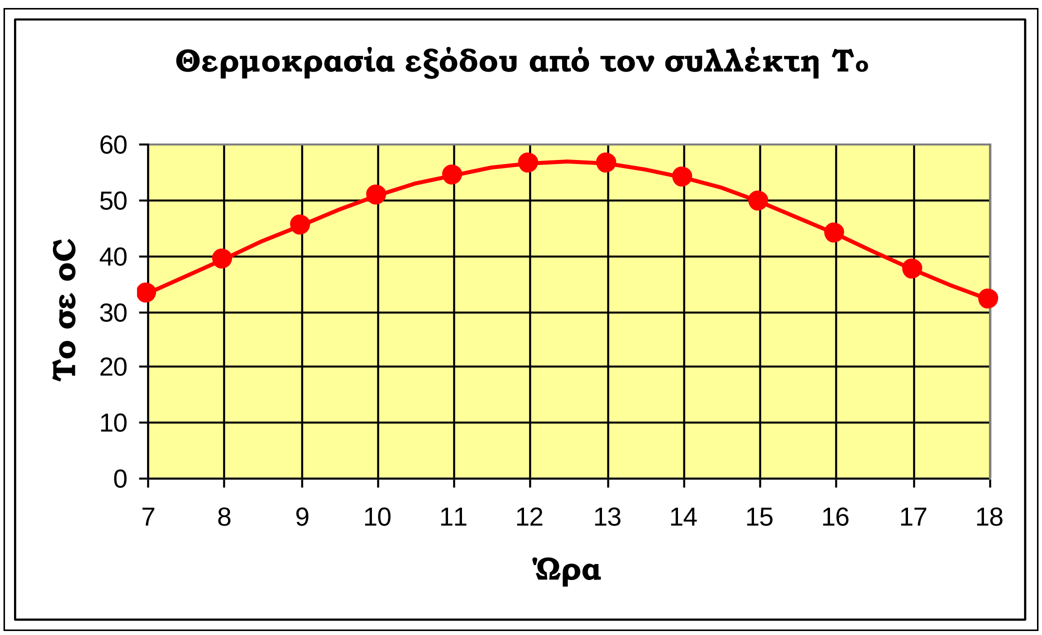
Για W=0.093m προκύπτει : h_w=6.05 άρα f=0.847.

Με αυτά τα δεδομένα η παροχή προσδιορίζεται ως:

$$\boxed{\dot{m}_c = 37\, kg/h}$$

Για αυτήν την τιμή της παροχής μπορούμε να προσδιορίσουμε τη θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον συλλέκτη που συμπίπτει με τη θερμοκρασία εξόδου από τον ατμοποιητή.

ΩΡΑ	**ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΞΟΔΟΥ T_o σε ^oC**
07.00	33.20
08.00	39.00
09.00	45.19
10.00	50.49
11.00	54.36
12.00	56.54
13.00	56.24
14.00	53.76
15.00	49.50
16.00	43.70
17.00	37.41
18.00	31.81



Πίνακας 3: Θερμοκρασία νερού στην έξοδο του ηλιακού συλλέκτη ($17^η$ Ιουλίου)

Με δεδομένα την θερμοκρασία εξόδου του συλλέκτη T_o, την θερμοκρασία εισόδου στον συλλέκτη η οποία είναι σταθερή και ίση με 27^o C σε κάθε περίπτωση και την στιγμιαία καμπύλη απόδοσης η οποία δίδεται από τον κατασκευαστή, μπορούμε να προσδιορίσουμε τον στιγμιαίο βαθμό απόδοσης του συλλέκτη. Αρκεί να υπολογίσουμε το ημιάθροισμα των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου στον συλλέκτη και να διαιρέσουμε με την στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία. Δηλαδή να σχηματίσουμε τον λόγο:

$$\boxed{\frac{t_m - t_a}{G}}$$

όπου :

$$\boxed{t_m = \frac{t_{εισοδου} + t_{εξοδου}}{2}}$$

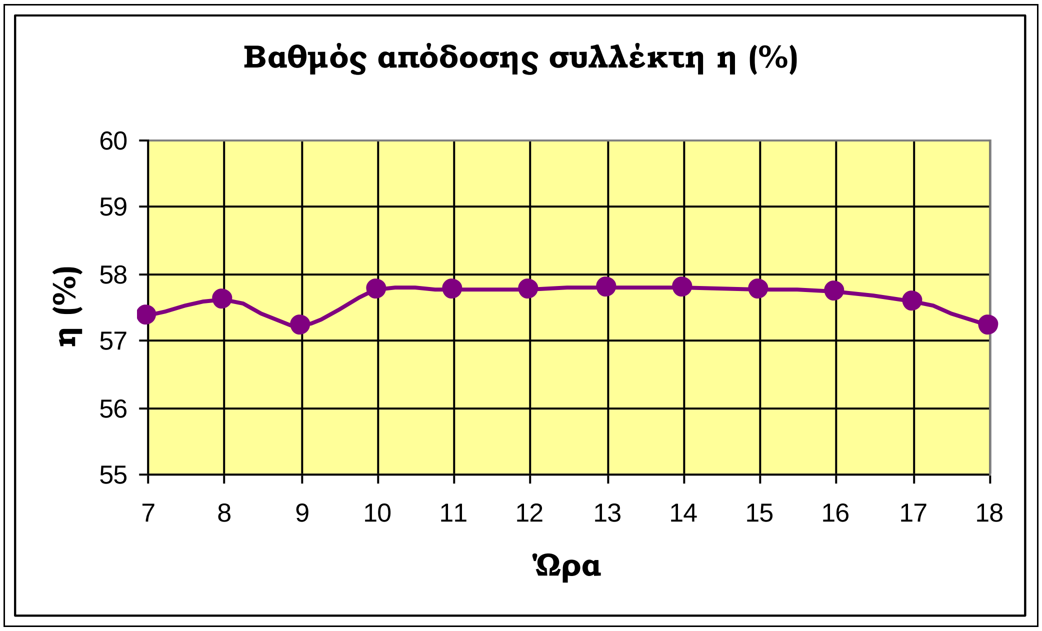
και $t_α$ είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος.
Στην συνέχεια πηγαίνουμε στην καμπύλη απόδοσης του κατασκευαστή και προσδιορίζουμε τον στιγμιαίο βαθμό απόδοσης.
Η καμπύλη απόδοσης που διατίθεται για τον συλλέκτη που επιλέξαμε αναφέρεται σε προσπίπτουσα ακτινοβολία 800W/m2, η οποία όπως φαίνεται και από 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 που προκύπτει από τη διεθνή βιβλιογραφία:

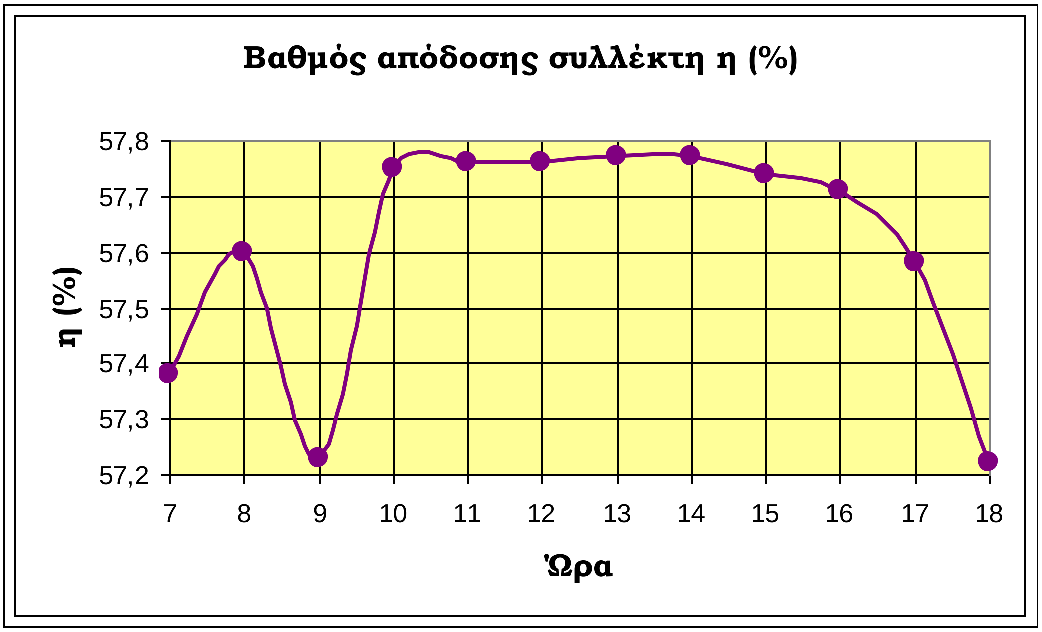
$$\boxed{\eta = 0.70 - 3.4\frac{\Delta T}{G_T}}$$

η οποία και προφανώς αποδίδει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο.
Βρίσκουμε λοιπόν:

ΩΡΑ	**ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ η (%)**
07.00	57.38
08.00	57.60
09.00	57.23
10.00	57.75
11.00	57.76
12.00	57.76
13.00	57.77
14.00	57.77

15.00	57.74
16.00	57.71
17.00	57.58
18.00	57.22





Διαγράμματα 4,5: Βαθμός απόδοσης ηλιακού συλλέκτη (17η Ιουλίου)

Τέλος ένα βασικό μέγεθος το οποίο πρέπει να υπολογίσουμε είναι το φρέσκο νερό το οποίο παράγεται με την διαδικασία της αφαλάτωσης.

Από τη διεθνή βιβλιογραφία ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός συστήματος αφαλάτωσης που κάνει χρήση ηλιακών συλλεκτών είναι περίπου 80%.

Έτσι χρησιμοποιώντας την σχέση (61):

$$\boxed{\eta_t = \frac{\dot{m}_f \cdot h_{fg}}{\dot{Q}_u}}$$

μπορούμε να προσδιορίσουμε την στιγμιαία παραγωγή φρέσκου νερού για τις ώρες που έχουμε προεπιλέξει. Ισοδύναμα η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$\boxed{\eta = \frac{\dot{m}\, h_{fg}}{\dot{m}_c\, C_p (T_{co} - T_{ci})} = \frac{\dot{m}\left[3146 * 10^3 - 2360(T_s + 273)\right]}{\dot{m}_c\, C_p (T_{co} - T_{ci})}}$$

Αντικαθιστούμε:

$\eta = 0.80$

$T_s = 27\,^oC$

$\dot{m}_c = 37\, kg/h$

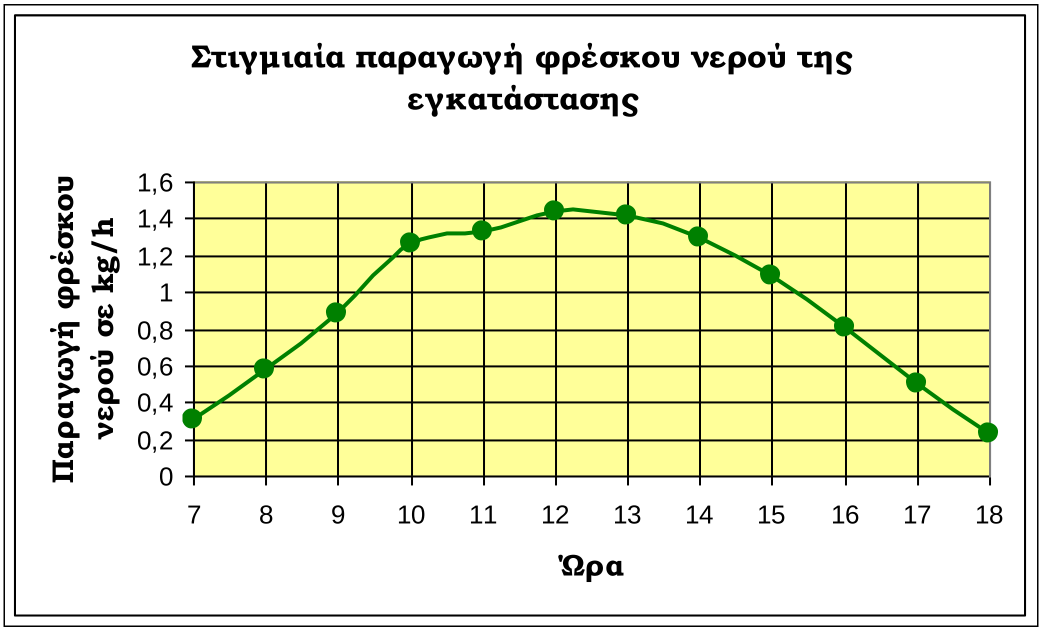
$T_{co}, T_{ci} \rightarrow$ προκύπτουν από τους σχετικούς πίνακες

Άρα με απλή επίλυση της σχέσης που μας δίνει το βαθμό απόδοσης μπορούμε αν προσδιορίσουμε την παραγωγή φρέσκου νερού για τις επιλεγμένες ώρες κατά τη διάρκεια της 17ης Ιουλίου.

Συγκεντρωτικά προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

ΩΡΑ	**ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΞΟΔΟΥ To σε °C**	**ΣΤΙΓΜΙΑΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ σε kg/h**
07.00	33.20	0.301
08.00	39.00	0.582
09.00	45.19	0.883
10.00	50.49	1.260
11.00	54.36	1.327

12.00	56.54	1.433
13.00	56.24	1.419
14.00	53.76	1.298
15.00	49.50	1.092
16.00	43.70	0.810
17.00	37.41	0.505
18.00	31.81	0.233



Διάγραμμα 6: Παραγωγή φρέσκου νερού κατά την $17^{η}$ Ιουλίου

Εξυπακούεται βέβαια ότι σε μία πραγματική εγκατάσταση δεν θα υπάρχει ένας αλλά περισσότεροι συλλέκτες οπότε και η αντίστοιχη παραγωγή θα είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε εδώ είναι ενδεικτική και αποτελεί πρότυπο για εφαρμογές σε διαφορετικές ημέρες του έτους, με διαφορετικό αριθμό συλλεκτών κλπ.

Παρακάτω υπάρχουν σχετικά διαγράμματα και πίνακες για άλλους μήνες του έτους καθώς και ένα συγκριτικό της παραγωγικής ικανότητας της μονάδας καθώς μεταβάλλεται με το χρόνο.

17^{η} Οκτωβρίου

ΩΡΑ	M_t (KW/m2)	A_t (KW/m2)	P_t (°)	G_b (KW/m2)
07.00	0.007	0.046	86.18	-0,008
08.00	0.057	0.068	87.31	0,035
09.00	0.119	0.104	87.94	0,087
10.00	0.191	0.129	88.31	0,152
11.00	0.258	0.153	89.35	0,214
12.00	0.319	-0.181	-88.88	0,273
13.00	0.342	-0.194	-89.18	0,291
14.00	0.325	0.183	87.21	0,266
15.00	0.269	0.166	86.22	0,213
16.00	0.183	0.147	82.10	0,123
17.00	0.078	0.131	79.85	0,020
18.00	-0.025	0.114	77.36	-0,079

ΩΡΑ	m_t (KW/m2)	a_t (KW/m2)	P_t (°)	G_d (KW/m2)
07.00	0.048	0.111	81.23	0.002
08.00	0.134	0.127	82.45	0.153
09.00	0.208	0.133	83.94	0.158
10.00	0.261	0.129	85.60	0.216
11.00	0.283	0.117	86.05	0.243
12.00	0.271	0.095	82.71	0.233
13.00	0.243	0.081	81.95	0.210
14.00	0.210	0.083	87.23	0.183
15.00	0.176	0.087	89.53	0.151
16.00	0.141	-0.085	-88.19	0.120
17.00	0.104	-0.079	-88.97	0.084
18.00	0.051	0.091	86.79	0.021

$$\boxed{R_b = \frac{\sin\delta\sin(\varphi-\beta)+\cos\delta\cos(\varphi-\beta)\cos\omega}{\sin\delta\sin\varphi+\cos\delta\cos\varphi\cos\omega}}$$

$$\boxed{\beta = \phi = 37.97^{o}}$$

$$\boxed{\delta = 23.45\sin(\frac{360(284+n)}{365}) = -10.3^{o}}$$

$$\boxed{\omega = 0.25(\min\_\alpha\pi o\_\eta\lambda\iota\alpha\kappa o\_\mu\varepsilon\sigma\eta\mu\varepsilon\rho\iota)}$$

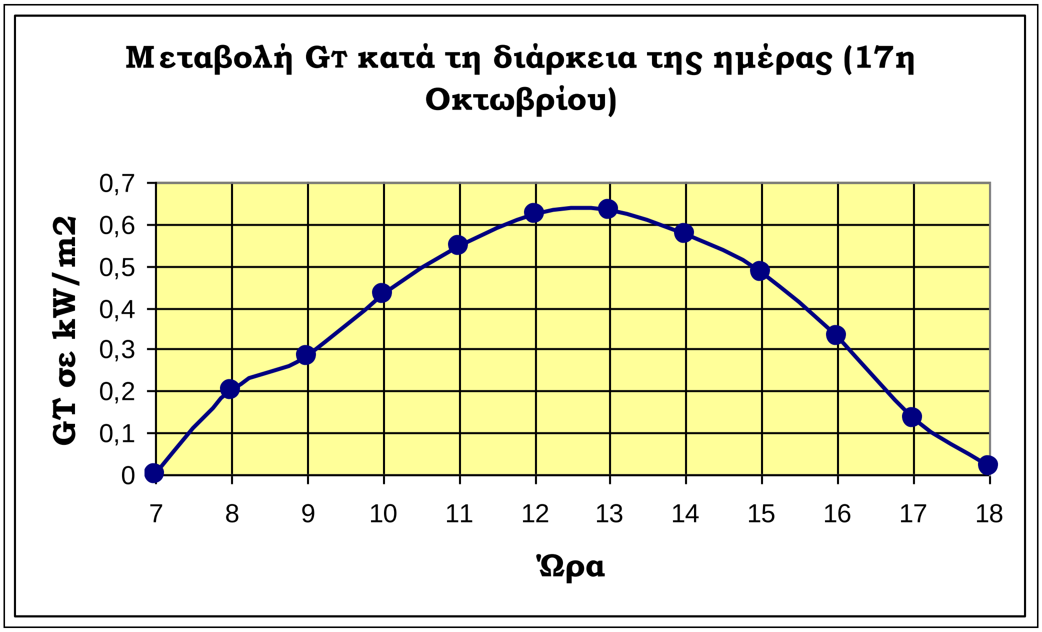
ΩΡΑ	**ω (o)**	**R_b**
07.00	-75	2.805
08.00	-60	1.770
09.00	-45	1.589
10.00	-30	1.516
11.00	-15	1.487
12.00	0	1.480
13.00	15	1.487
14.00	30	1.516
15.00	45	1.589
16.00	60	1.770
17.00	75	2.805
18.00	90	0.000

ΩΡΑ	**G_b (KW/m2)**	**G_d (KW/m2)**	**R_b**	**G_T (KW/m2)**
07.00	-0,008	0.002	2.805	0.000
08.00	0,035	0.153	1.770	0.203
09.00	0,087	0.158	1.589	0.284
10.00	0,152	0.216	1.516	0.431
11.00	0,214	0.243	1.487	0.546
12.00	0,273	0.233	1.480	0.623
13.00	0,291	0.210	1.487	0.632
14.00	0,266	0.183	1.516	0.576
15.00	0,213	0.151	1.589	0.482
16.00	0,123	0.120	1.770	0.330
17.00	0,020	0.084	2.805	0.133
18.00	-0,079	0.021	0.000	0.019

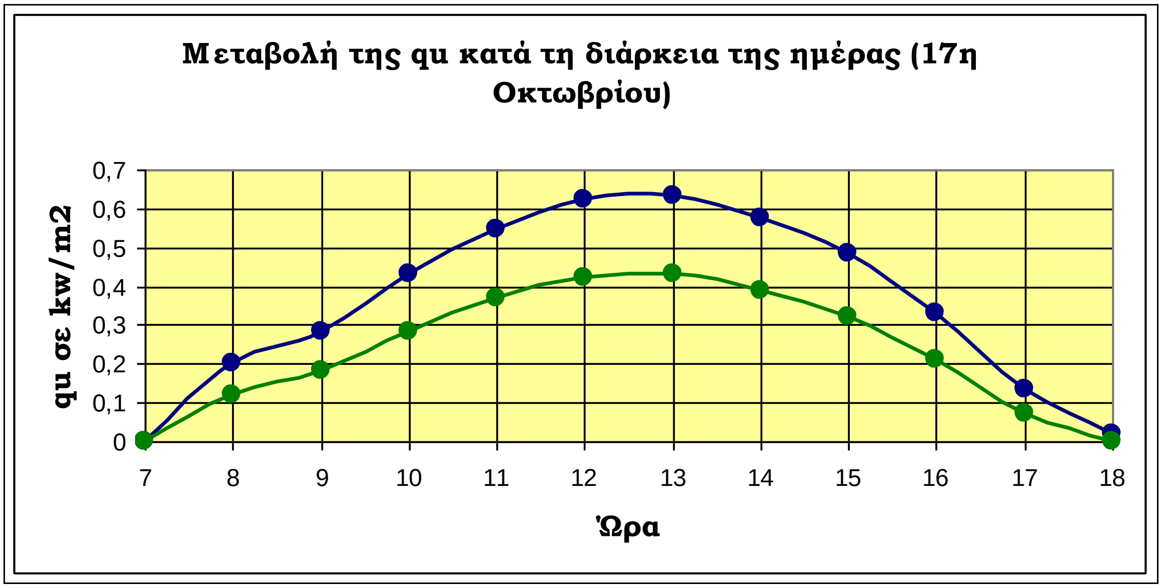
ΩΡΑ	**G_T (KW/m2)**	**q_u (KW/m2)**
07.00	0.000	0.000
08.00	0.203	0.121
09.00	0.284	0.180
10.00	0.431	0.285
11.00	0.546	0.368
12.00	0.623	0.424
13.00	0.632	0.430
14.00	0.576	0.390
15.00	0.482	0.322
16.00	0.330	0.213
17.00	0.133	0.071
18.00	0.019	0.000

ΩΡΑ	**ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΞΟΔΟΥ T_o σε ^oC**
07.00	27.00
08.00	33.00
09.00	35.92
10.00	41.13
11.00	45.24
12.00	48.01
13.00	48.31
14.00	46.33
15.00	42.96
16.00	37.56
17.00	30.52
18.00	27.00

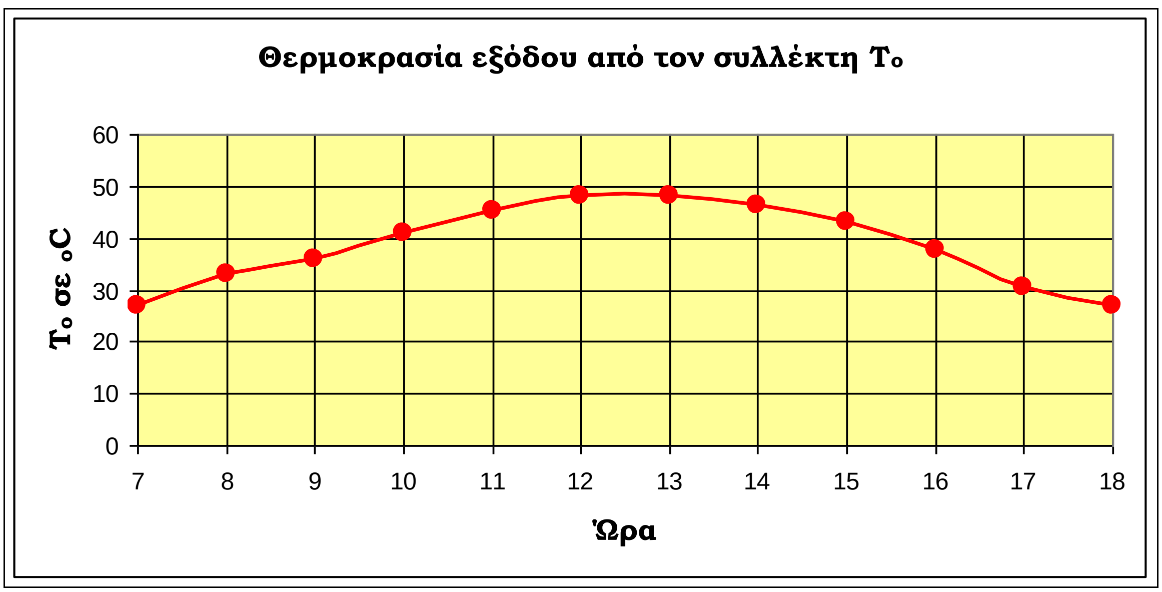
ΩΡΑ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΞΟΔΟΥ To σε °C	ΣΤΙΓΜΙΑΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ σε kg/h
07.00	27.00	0.000
08.00	33.00	0.230
09.00	35.92	0.343
10.00	41.13	0.543
11.00	45.24	0.701
12.00	48.01	0.808
13.00	48.31	0.819
14.00	46.33	0.743
15.00	42.96	0.614
16.00	37.56	0.406
17.00	30.52	0.135
18.00	27.00	0.000



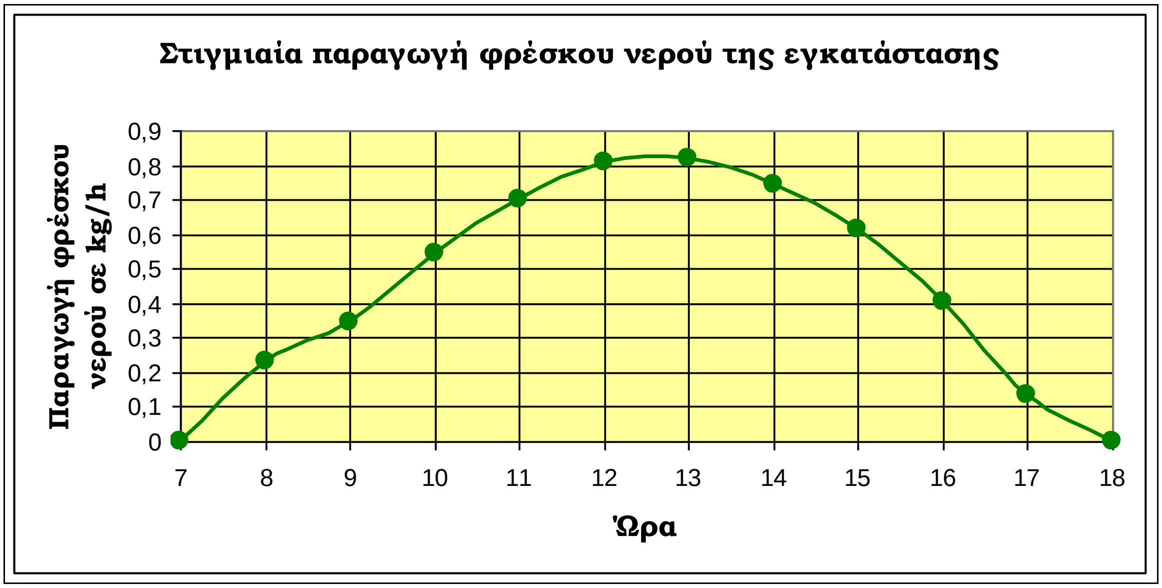
Διάγραμμα 7: Μεταβολή της στιγμιαίας ολικής ακτινοβολίας ($17^η$ Οκτωβρίου)



Διάγραμμα 8: Μεταβολή της ωφέλιμης ισχύος και της στιγμιαίας ολικής ακτινοβολίας (17η Οκτωβρίου)

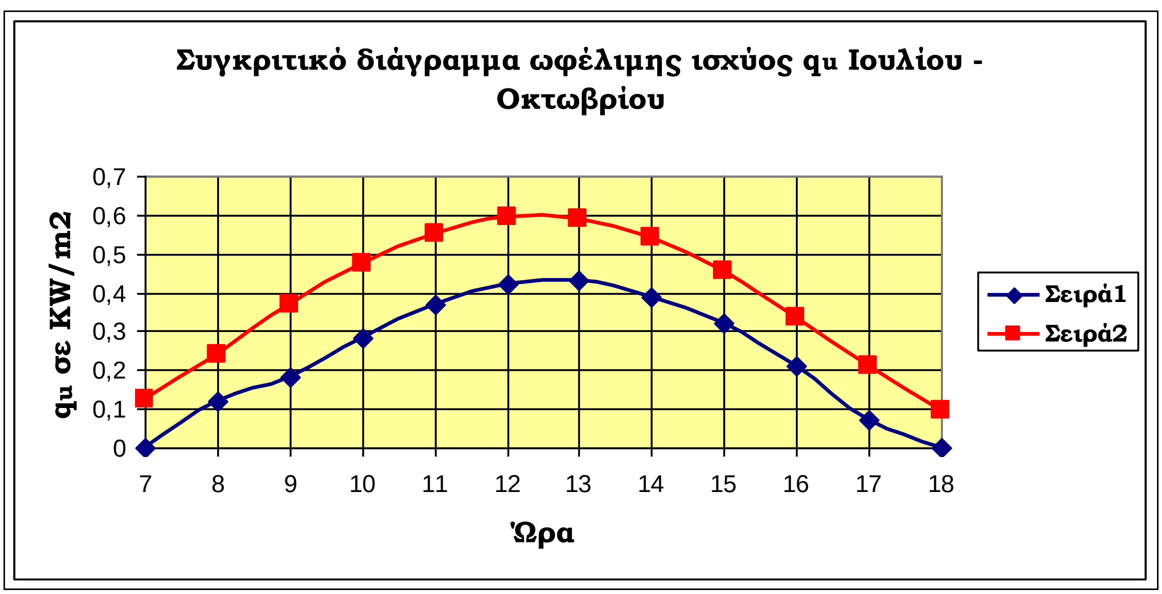


Διάγραμμα 9: Θερμοκρασία νερού στην έξοδο του συλλέκτη (17η Οκτωβρίου)

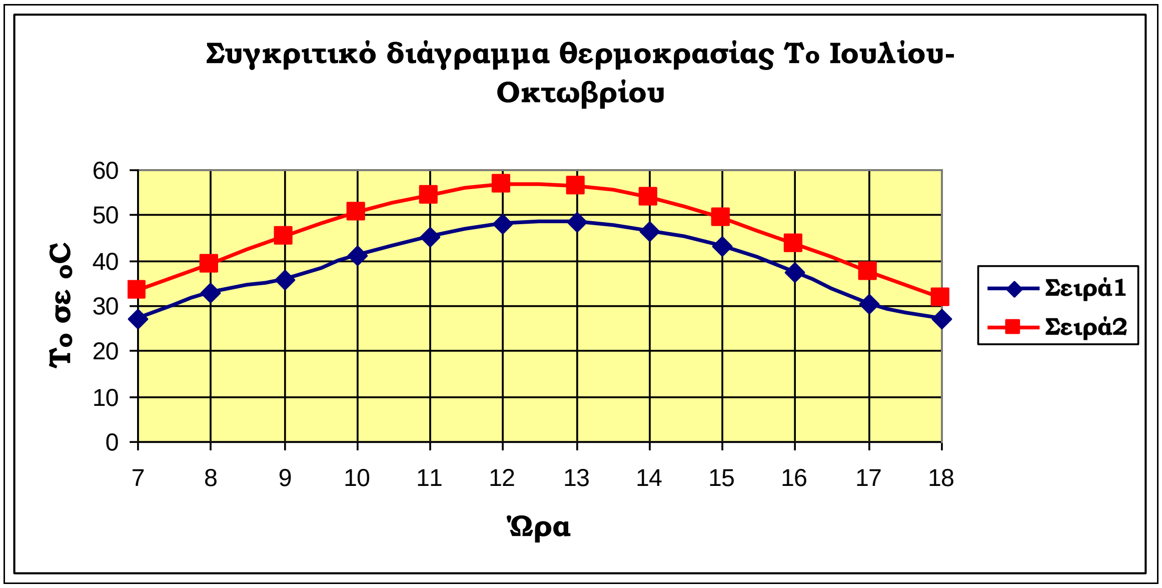


Διάγραμμα 10: Παραγωγή φρέσκου νερού της εγκατάστασης την 17η Οκτωβρίου

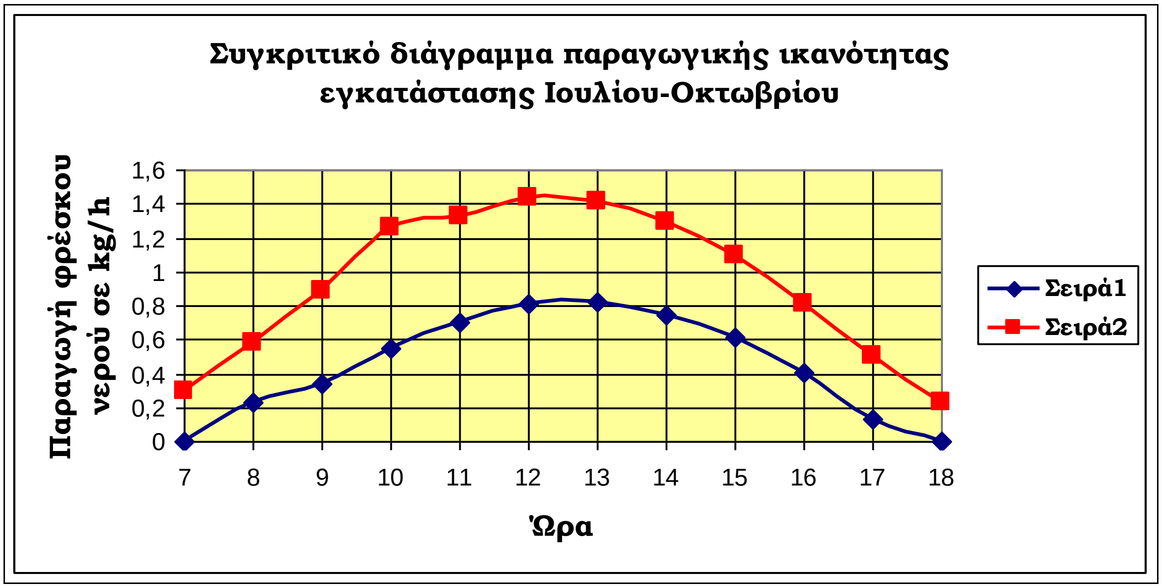
- **Συγκριτικά διαγράμματα Ιουλίου – Οκτωβρίου**



Διάγραμμα 11: Συγκριτικό διάγραμμα της ωφέλιμης ισχύος για την 17η Ιουλίου (Σειρά 2) και την 17η Οκτωβρίου (Σειρά 1). Όπως είναι προφανές τους καλοκαιρινούς μήνες η ακτινοβολία άρα και η ωφέλιμη ισχύς είναι μεγαλύτερη.



Διάγραμμα 12: Συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας νερού στην έξοδο του συλλέκτη για την 17η Ιουλίου (Σειρά 2) και την 17η Οκτωβρίου (Σειρά 1). Μεγαλύτερη ωφέλιμη ισχύς σημαίνει και μεγαλύτερη δυνατότητα παροχής θερμότητας στο νερό, άρα και μεγαλύτερη τελική θερμοκρασία.



Διάγραμμα 13: Η παραγωγική ικανότητα της εγκατάστασης είναι μεγαλύτερη κατά τον Ιούλιο (Σειρά 2) απ' ότι τον Οκτώβριο (Σειρά 1). Επιπλέον βλέπουμε ότι τον Οκτώβριο έχουμε δύο 'νεκρές' ώρες (07.00 και 18.00) όπου η παραγωγική ικανότητα της εγκατάστασης είναι μηδενική. Αυτό οφείλεται στο ότι κατά τις ώρες αυτές η προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι ανύπαρκτη.

- **Παραμετροποίηση του συστήματος**

Η αρχή της ομοιότητας θα χρησιμοποιηθεί για την μελέτη παραμετροποίησης του συστήματος. Γεωμετρικές, κινηματικές και δυναμικές ομοιότητες πρέπει να υφίστανται μεταξύ μοντέλου και πρωτοτύπου. Αυτές οι ομοιότητες μπορούν να ερμηνευθούν με βάση αδιάστατες ομάδες και μεταβλητές, των οποίων οι αριθμητικές τιμές θα πρέπει να παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Ένας τρόπος για να σχηματίσουμε αυτές τις αδιάστατες ομάδες και μεταβλητές είναι να μετατρέψουμε τις διάφορες μεταβλητές (μάζα, αλατότητα και ενέργεια) σε αδιάστατη μορφή. Έτσι εισαγάγουμε τις κάτωθι αδιάστατες παραμέτρους:

$$\dot{V}_{in}^* = \frac{\dot{V}_{in}}{(\frac{V}{t_R})}, \dot{V}_i^* = \frac{\dot{V}_i}{(\frac{V}{t_R})}, \dot{V}_w^* = \frac{\dot{V}_w}{(\frac{V}{t_R})}, \dot{V}_e^* = \frac{\dot{V}_e}{(\frac{V}{t_R})}$$

όπου t_R είναι χρόνος αναφοράς τον οποίο και θα επεξηγήσουμε αργότερα.

$$\rho^* = \frac{\rho_s}{\rho_0}, \rho_{in}^* = \frac{\rho_{in}}{\rho_0}, \rho_i^* = \frac{\rho_i}{\rho_0}, \rho_e^* = \frac{\rho_e}{\rho_0}, \rho_{evaporator}^* = \frac{\rho_{evaporator}}{\rho_0}$$

$$C_p^* = \frac{C_{p,s}}{C_{p,0}}, C_{p,in}^* = \frac{C_{p,in}}{C_{p,0}}, C_{p,i}^* = \frac{C_{p,i}}{C_{p,0}}, C_{p,evaporator}^* = \frac{C_{p,evaporator}}{C_{p,0}}$$

$$T^* = \frac{T_s}{T_0}, T_{in}^* = \frac{T_{cout} - T_{cinlet}}{T_0}, T_i^* = \frac{T_i}{T_0}, T_{evaporator}^* = \frac{T_{evaporator}}{T_0}, T_{top}^* = \frac{T_{top} - T_a}{T_0}, T_{side}^* = \frac{T_{side} - T_a}{T_0},$$

$$T_{bottom}^* = \frac{T_{bottom} - T_a}{T_0}$$

$$C^* = \frac{C_s}{C_0}$$

$$t^* = \frac{t}{t_R}$$

$$V^* = \frac{V_{evaporator}}{V}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση διατήρησης μάζας (1) αυτή γράφεται:

$$\frac{d\rho^*}{dt^*} = \rho_i^* \dot{V}_i^* - \rho^* \dot{V}_w^* - \rho_e^* \dot{V}_e^*$$

Αρχική συνθήκη:

$$\rho^*(0) = 1$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση διατήρησης της αλατότητας (4) αυτή γράφεται:

$$\frac{d}{dt^*}(\rho^* C^*) = \dot{V}_i^* \rho_i^* - \dot{V}_w^* \rho^* C^*$$

Αρχική συνθήκη:

$$\rho^* C^*(0) = 1$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση διατήρησης της ενέργειας (6) έχουμε:

$$\frac{d}{dt^*}(\rho^* C_p^* T^*) + \frac{d}{dt^*}(\rho^* V^* C_p^* T^*)_{evaporator} = \dot{V}_{in}^* \rho_{in}^* C_{p,in}^* T_{in}^* + \dot{V}_i^* \rho_i^* C_{p,i}^* T_i^* - \dot{V}_w^* \rho^* C_p^* T^* - \dot{V}_e^* \rho_e^* \frac{h_{fg}}{C_{p,0} T_0} -$$
$$- \frac{h_{top} A_{top} t_R}{\rho_0 C_{p,0} V} T_{top}^* - \frac{h_{side} A_{side} t_R}{\rho_0 C_{p,0} V} T_{side}^* - \frac{h_{bottom} A_{bottom} t_R}{\rho_0 C_{p,0} V} T_{bottom}^*$$

Οι ποσότητες $\frac{hAt_R}{\rho_0 C_{p,0} V}$ πρέπει να είναι αδιάστατες.

Όσον αφορά τον χρόνο αναφοράς, μπορεί να οριστεί ως: $t_R = \frac{\rho_0 C_{p,0} V}{h_{top} A_{top}}$ έτσι ώστε η αδιάστατη ποσότητα:

$$\frac{h_{top} A_{top} t_R}{\rho_0 C_{p,0} V} = 1$$

Επιπλέον μπορούμε να ορίσουμε την ακόλουθη αδιάστατη ποσότητα:

$$\frac{h_{fg}}{C_{p,0} T_0} = \frac{1}{Ja}$$

όπου Ja ο αριθμός Jakob. Θεωρώντας ότι η πυκνότητα, η ειδική θερμοχωρητικότητα και ο όγκος του υλικού του ατμοποιητή, παραμένουν σταθερά για όλο το εύρος της θερμοκρασίας λειτουργίας, η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας γράφεται:

$$\frac{d}{dt^*}(\rho^* C_p^* T^*) + (\rho^* V^* C_p^*)_{evaporator} \frac{dT^*_{evaporator}}{dt^*} = \dot{V}^*_{in} \rho^*_{in} C^*_{p,in} T^*_{in} + \dot{V}^*_i \rho^*_i C^*_{p,i} T^*_i - \dot{V}^*_w \rho^* C^*_p T^* - \frac{\dot{V}^*_e \rho^*_e}{Ja} -$$

$$- T^*_{top} - \frac{h_{side} A_{side}}{h_{top} A_{top}} T^*_{side} - \frac{h_{bottom} A_{bottom}}{h_{top} A_{top}} T^*_{bottom}$$

Αρχική συνθήκη:

$\rho^* C^*_p T^*(0) = 1$ και $T^*_{evaporator}(0) = 1$

- **Πρόγραμμα MATLAB**

Στην διεθνή βιβλιογραφία (Theoretical and experimental analysis of water desalination system using low grade solar heat, Saleh Al Kharabsheh) συναντούμε ένα πρόγραμμα επίλυσης γραμμένο με το πρόγραμμα Matlab για την εν λόγω εγκατάσταση το οποίο και παρατίθεται παρακάτω:

```
%***Computer program written in MATLAB (version 5.1)***
%****************************************************
%**Calculations of areas, perimeter, volume and length*
%**required for subsequent calculations***************
%****************************************************
Af=pi*rci^2;
Aci=pi*dci*lc;
Aco=pi*dco*lc;
As=pi*rs^2;
Ahe=SF*(pi*dhe*lh);
Pside=2*pi*rs;
lbottom=As/Pside;
Aside=Pside*lside;
Abottom=As;
vbottom=As*tbottom;
vside=Aside*tside;
vtop=Atop*ttop;
vtotal=vbottom+vside+vtop;
v=As*hs;
vt=As*ht+0.5*(As+Af)*0.15+Af*lc;
vnet=vt-v;
%****************************************************
%************************Gas pressure**********
%*******************************************
massAr=pl*ppmAr*v*D0/1e6;
massC=pl*ppmC*v*D0/1e6;
massN2=pl*ppmN2*v*D0/1e6;
massO2=pl*ppmO2*v*D0/1e6;
PAr=massAr*(R/MAr)*Ts/vnet;
PC=massC*(R/MC)*Ts/vnet;
PN2=massN2*(R/MN2)*Ts/vnet;
PO2=massO2*(R/MO2)*Ts/vnet;
Pgas=PAr+PC+PN2+PO2;
%****************************************************
%****************Specific heat calculations*******
%****************************************************
Cp=a2*C+b;
Cpi=a2*Ci+b;
```

```
%Cp=4186*(1.0049-0.01621*C+3.5261e-4*C^2-((3.2506-
1.4795*C+0.07765*C^2)*10^-4*Ts)+((3.8013-1.2084*C+0.06212*C^2)*10^-
6*Ts^2));
%****************************************************
%***Pressure calculations************************
%****************************************************
Ps=exp(63.042-7139.6/(Ts+273)-6.2558*log(Ts+273))*100;
Pf=exp(63.042-7139.6/(Tf+273)-6.2558*log(Tf+273))*100;
dp=0.5*Dv*((mf/(Dv*Af))^2-
(mf/(Dv*As))^2)+Dv*((klc+kle)/2)*(mf/(Dv*As))^2;
Pu=Pgas+Pf+dp;
%****************************************************
%*****Density calculations**************************
%****************************************************
Ds=D0*(1-bt*(Ts-T0)+bc*(C-C0));
Di=D0*(1-bt*(Ti-T0)+bc*(Ci-C0));
%****************************************************
%****************Latent heat of vaporization*****
%****************************************************
hfg=2.3246e3*(1.0727e3-1.0167*Ts+1.4087e-4*Ts^2-5.1462e-6*Ts^3);
%hfg=(3146-2.36*(Ts+273))*1000;
%****************************************************
%*********Evaporation rate****************************
%****************************************************
fc=1-a1*C;
qe=(am/Df)*((fc*Ps)/(Ts+273)^0.5-(Pf+dp)/(Tf+273)^0.5);
Qe=qe*As;
mf=Qe*Df;
he=mf*hfg;
%****************************************************
%**********************Heat Loss Calculation***********
%****************************************************
%****************************Side*********************
Taverageside=(Twside+Ta)/2;
Bside=1/(Taverageside+273);
Raside=g*Bside*(Twside-Ta)*lside^3/(alphaa*nua);
Nuside=0.68+(0.67*Raside^0.25)/(1+(0.492/Pr)^(9/16))^(4/9);
hside=Nuside*ka/lside;
X1side=1/(hside*2*pi*rs3*lside);
X2side=log(rs2/rs)/(2*pi*ksteel*lside)+log(rs3/rs2)/(2*pi*kinsulation*lside);
Y1side=(Twside-Ta)/X1side;
Y2side=(Ts-Twside)/X2side;
while abs (Y1side-Y2side)>0.1
if Y1side>Y2side
Twside=Twside-0.05;
else
Twside=Twside+0.1;
```

```
end
Taverageside=(Twside+Ta)/2;
Bside=1/(Taverageside+273);
Raside=g*Bside*(Twside-Ta)*lside^3/(alphaa*nua);
Nuside=0.68+(0.67*Raside^0.25)/(1+(0.492/Pr)^(9/16))^(4/9);
hside=Nuside*ka/lside;
X1side=1/(hside*2*pi*rs3*lside);
X2side=log(rs2/rs)/(2*pi*ksteel*lside)+log(rs3/rs2)/(2*pi*kinsulation*lside);
Y1side=(Twside-Ta)/X1side;
Y2side=(Ts-Twside)/X2side;
end
Qlossside=Aside*hside*(Twside-Ta);
%******************************Bottom*****************
Taveragebottom=(Twbottom+Ta)/2;
Bbottom=1/(Taveragebottom+273);
Rabottom=g*Bbottom*(Twbottom-Ta)*lbottom^3/(alphaa*nua);
Nubottom=0.27*Rabottom^0.25;
hbottom=Nubottom*ka/lbottom;
X1bottom=1/(hbottom*As);
X2bottom=tbottom/(ksteel*As)+tinsulation/(kinsulation*As);
Y1bottom=(Twbottom-Ta)/X1bottom;
Y2bottom=(Ts-Twbottom)/X2bottom;
while abs (Y1bottom-Y2bottom)>0.1
if Y1bottom>Y2bottom
Twbottom=Twbottom-0.05;
else
Twbottom=Twbottom+0.1;
end
Taveragebottom=(Twbottom+Ta)/2;
Bbottom=1/(Taveragebottom+273);
Rabottom=g*Bbottom*(Twbottom-Ta)*lbottom^3/(alphaa*nua);
Nubottom=0.27*Rabottom^0.25;
hbottom=Nubottom*ka/lbottom;
X1bottom=1/(hbottom*As);
X2bottom=tbottom/(ksteel*As)+tinsulation/(kinsulation*As);
Y1bottom=(Twbottom-Ta)/X1bottom;
Y2bottom=(Ts-Twbottom)/X2bottom;
end
Qlossbottom=As*hbottom*(Twbottom-Ta);
%******************************top*******************
Taveragetop=(Twtop+Ta)/2;
Btop=1/(Taveragetop+273);
Ratop=g*Btop*(Twtop-Ta)*ltop^3/(alphaa*nua);
Nutop=0.56*(Ratop*cos(theta))^0.25;
htop=Nutop*ka/ltop;
X1top=1/(htop*Atop);
X2top=ttop/(ksteel*Atop)+tinsulation/(kinsulation*Atop);
```

```
Y1top=(Twtop-Ta)/X1top;
Y2top=(Ts-Twtop)/X2top;
while abs (Y1top-Y2top)>0.1
if Y1top>Y2top
Twtop=Twtop-0.05;
else
Twtop=Twtop+0.1;
end
Taveragetop=(Twtop+Ta)/2;
Btop=1/(Taveragetop+273);
Ratop=g*Btop*(Twtop-Ta)*ltop^3/(alphaa*nua);
Nutop=0.56*(Ratop*cos(theta))^0.25;
htop=Nutop*ka/ltop;
X1top=1/(htop*Atop);
X2top=ttop/(ksteel*Atop)+tinsulation/(kinsulation*Atop);
Y1top=(Twtop-Ta)/X1top;
Y2top=(Ts-Twtop)/X2top;
end
Qlosstop=Atop*htop*(Twtop-Ta);
Qloss=Qlossside+Qlossbottom+Qlosstop;
%************************************************
%Solution of the set of coupled equations to find the new
%values of temperature, density, specific heat and solute
%********************concentration****************
%************************************************
Qi=(Qw*Ds+mf)/Di;
mi=Qi*Di;
mw=Qw*Ds;
mwater=v*Ds;
a=v/dt;
const=Dsteel*Cpsteel*vtotal;
w1=const/dt;
w=w1/a;
X0=Ds*Cp*Ts;
Xi=Di*Cpi*Ti;
hhe=3.66*kcf/dhe;
Uh=1/((1/hhe)+FT);
Z=1-exp(-Ahe*Uh/(m*Cpc));
X=(1/a)*(X0*(a-Qw)-m*Cpc*Ts*Z+w1*Ts+m*Cpc*Tcout*Z-he+Xi*Qi-
Qloss);
%***********surface temperature of the heat exchanger**
Uhe=1/(1/hhe);
Zhe=1-exp(-Ahe*Uhe/(m*Cpc));
Qcollectoruseful=m*Cpc*(Tcout-Tcinlet);
The=Tcout-(Qcollectoruseful/(Zhe*m*Cpc));
%************************************************
Y0=Ds*C;
```

```
Yi=Di*Ci;
Y=(1/a)*(Yo*(a-Qw)+Yi*Qi);
C1=Y/(Do*(1-bt*(X*C/(Y*a2*C+Y*b+w*C)-To)+bc*(C-Co)));
while abs(C1-C)>0.01
C=C1;
C1=Y/(Do*(1-bt*(X*C/(Y*a2*C+Y*b+w*C)-To)+bc*(C-Co)));
end
C=C1;
Cp=a2*C+b;
%Cp=4186*(1.0049-0.01621*C+3.5261e-4*C^2-((3.2506-
1.4795*C+0.07765*C^2)*10^-4*Ts)+((3.8013-1.2084*C+0.06212*C^2)*10^-
6*Ts^2));
Ds=Y/C;
Ts1=X/(Ds*Cp+w);
%*****calculate the amount of gases librated********
massAr=pl*ppmAr*Qi*Di*dt/1e6;
massC=pl*ppmC*Qi*Di*dt/1e6;
massN2=pl*ppmN2*Qi*Di*dt/1e6;
massO2=pl*ppmO2*Qi*Di*dt/1e6;
PAr=massAr*(R/MAr)*Ts/vnet;
PC=massC*(R/MC)*Ts/vnet;
PN2=massN2*(R/MN2)*Ts/vnet;
PO2=massO2*(R/MO2)*Ts/vnet;
dPgas=PAr+PC+PN2+PO2;
Pgas=Pgas+dPgas;
%****************************************************
%*****************Tube-in-tube heat exchanger*********
%****************************************************
Cc=Di*Qi*Cpi;
Ch=Ds*Qw*Cp;
if Cc-Ch<0
Cmin=Cc;
Cmax=Ch;
else
Cmin=Ch;
Cmax=Cc;
end
Re=(4*Di*Qi)/(pi*di*us);
hi=(Nu*ks)/di;
ho=(Nui*ks)/dhy;
UA=1/(1/(pi*di*l*hi)+log((ri+ti)/ri)/(2*pi*kc*l)+1/(pi*(di+2*ti)*l*ho));
NTU=UA/Cmin;
Cr=Cmin/Cmax;
E=(1-exp(-NTU*(1-Cr)))/(1-Cr*exp(-NTU*(1-Cr)));
qmax=Cmin*(Ts-To);
q=E*qmax;
Ti=q/Cc+To;
```

```
Tcinlet=Ts+(Tcout-Ts)*exp(-Ahe*Uh/(m*Cpc));
%*****************************************************
%*************Condenser calculations****************
%*****************************************************
Re=(4*mf)/(pi*dci*uv);
Tfa=(Tco+Ta)/2;
ka=1.163*(0.021+(0.66e-4)*Tfa);
ua=(1/3600)*(6.1848e-2+(1.6632e-4)*Tfa);
Da=353.44/(Tfa+273.15);
Cpa=4186*(0.2317+1.6213e-5*Tfa+3.9593e-8*Tfa^2-1.6213e-11*Tfa^3);
Pr=ua*Cpa/ka;
mf=mf;
hfgm=hfg+(3/8)*Cpf*(Ts-Tif);
hc=0.555*((g*Df*(Df-Dv)*kf^3*hfgm)/(uf*dco*(Ts-Tif)))^0.25;
coeff=1/(2*pi*rci*lc*hc)+log(rco/rci)/(2*pi*lc*kc);
Tif=(1/(1+0.68*mf*Cpf*coeff))*(mf*coeff*hfg+0.68*mf*Cpf*Ts*coeff+Tco);
Tci=mf*(hfg+0.68*Cpf*(Ts-Tif))*log(rco/rci)/(2*pi*lc*kc)+Tco;
%Tci=(mf*hfg*log(rco/rci)+0.68*Cpf*mf*log(rco/rci)*Ts+2*pi*lc*kc*Tco)/
(2*pi*lc*kc+0.68*Cpf*mf*log(rco/rci));
xi=dco/Dfin;
B=1/(Tfa+273);
Tco=Tco;
RaS=(g*B*(Tco-Ta)*Pr*S^3/(nua)^2)*(S/Dfin);
Beta=(0.17*xi)+exp(-4.8*xi);
CC=((23.7-1.1*(1+(152*xi^2))^0.5)/(1+Beta))^(4/3);
hco=(ka/S)*(RaS/(12*pi))*(2-exp(-(CC/RaS)^0.75)-exp(-
Beta*(CC/RaS)^0.75));
CCC=0.44+0.12/xi;
hcot=(ka/S)*(CCC*RaS^0.29);
rfin=Dfin/2;
r2c=(Dfin/2)+(tfin/2);
Aftip=N*pi*Dfin*tfin;
Afside=N*2*pi*(rfin^2-rco^2);
Ab=2*pi*rco*(lc-N*tfin);
mm=sqrt((2*hco)/(kc*tfin));
C2=(2*rco/mm)/(r2c^2-rco^2);
fineff=C2*(BESSELK(1,(mm*rco))*BESSELI(1,(mm*r2c))-
BESSELI(1,(mm*rco))*BESSELK(1,(mm*r2c)))/(BESSELI(0,(mm*rco
))*BESSELK(1,(mm*r2c))+BESSELK(0,(mm*rco))*BESSELI(1,(mm*r2c)));
constant=N*fineff*hcot*Aftip+N*fineff*hco*Afside+hco*Ab;
Tco1=(1/((log(rco/rci)*constant)+2*pi*lc*kc))*(2*pi*lc*kc*Tci+log(rco/rci)
*Ta*constant);
while abs(Tco1-Tco)>0.0001
Tco=Tco1;
Tfa=(Tco+Ta)/2;
ka=1.163*(0.021+(0.66e-4)*Tfa);
ua=(1/3600)*(6.1848e-2+(1.6632e-4)*Tfa);
```

```
	Da=353.44/(Tfa+273.15);
	Cpa=4186*(0.2317+1.6213e-5*Tfa+3.9593e-8*Tfa^2-1.6213e-11*Tfa^3);
	Pr=ua*Cpa/ka;
	hfgm=hfg+(3/8)*Cpf*(Ts-Tif);
	hc=0.555*((g*Df*(Df-Dv)*kf^3*hfgm)/(uf*dco*(Ts-Tif)))^0.25;
	coeff=1/(2*pi*rci*lc*hc)+log(rco/rci)/(2*pi*lc*kc);
	Tif=(1/(1+0.68*mf*Cpf*coeff))*(mf*coeff*hfg+0.68*mf*Cpf*Ts*coeff+Tco);
	Tci=mf*(hfg+0.68*Cpf*(Ts-Tif))*log(rco/rci)/(2*pi*lc*kc)+Tco;
	%Tci=(mf*hfg*log(rco/rci)+0.68*Cpf*mf*log(rco/rci)*Ts+2*pi*lc*kc*Tco)/
(2*pi*lc*kc+0.68*Cpf*mf*log(rco/rci));
	xi=dco/Dfin;
	Tfa=(Tco+Ta)/2;
	B=1/(Tfa+273);
	RaS=(g*B*(Tco-Ta)*Pr*S^3/(nua)^2)*(S/Dfin);
	Beta=(0.17*xi)+exp(-4.8*xi);
	CC=((23.7-1.1*(1+(152*xi^2))^0.5)/(1+Beta))^(4/3);
	hco=(ka/S)*(RaS/(12*pi))*(2-exp(-(CC/RaS)^0.75)-exp(-
Beta*(CC/RaS)^0.75));
	CCC=0.44+0.12/xi;
	hcot=(ka/S)*(CCC*RaS^0.29);
	rfin=Dfin/2;
	r2c=(Dfin/2)+(tfin/2);
	Aftip=N*pi*Dfin*tfin;
	Afside=N*2*pi*(rfin^2-rco^2);
	Ab=2*pi*rco*(lc-N*tfin);
	mm=sqrt((2*hco)/(kc*tfin));
	C2=(2*rco/mm)/(r2c^2-rco^2);
	fineff=C2*(BESSELK(1,(mm*rco))*BESSELI(1,(mm*r2c))-
BESSELI(1,(mm*rco))*BESSELK(1,(mm*r2c)))/(BESSELI(0,(mm*rco))*BESSE
LK(1,(mm*r2c))+BESSELK(0,(mm*rco))*BESSELI(1,(mm*r2c)));
	constant=N*fineff*hcot*Aftip+N*fineff*hco*Afside+hco*Ab;
	Tco1=(1/((log(rco/rci)*constant)+2*pi*lc*kc))*(2*pi*lc*kc*Tci+log(rco/rci)
*Ta*constant);
	end
	Tco=Tco1;
	Tci=(mf*hfg*log(rco/rci)+0.68*Cpf*mf*log(rco/rci)*Ts+2*pi*lc*kc*Tco)/(
2*pi*lc*kc+0.68*Cpf*mf*log(rco/rci));
	q2=2*pi*lc*kc*(Tci-Tco)/log(rco/rci);
	Tf=Tif;
	%****************************************************
	%****************************************************
	%****************************************************
	%***********Exergy analysis**************************
	%****************************************************
	%********collector outlet*************************
	if (Tcout+273.15)>=273.15&(Tcout+273.15)<300
	ah=0;bh=0;ch=0;dh=0;e1h=6.24698837e2;e2h=-2.34385369e3;
```

```
e3h=-9.50812101e3;e4h=7.16287928e4;e5h=-1.63535221e5;
e6h=1.66531093e5;e7h=-6.47854585e4;hfcr=2.0993e3;
as=0;bs=0;cs=0;ds=0;e1s=-1.83692956e3;e2s=1.47066352e4;
e3s=-4.31466046e4;e4s=4.86066733e4;e5s=7.9975096e3;
e6s=-5.83339887e4;e7s=3.31400718e4;sfcr=4.4289;
else
(Tcout+273.15)>=300&(Tcout+273.15)<600;
ah=8.839230108e-1;bh=0;ch=0;dh=0;e1h=-2.67172935;e2h=6.22640035;
e3h=-1.31789573e1;e4h=-1.91322436;e5h=6.87937653e1;
e6h=-1.24819906e2;e7h=7.21435404e1;hfcr=2.0993e3;
as=9.12762917e-1;bs=0;cs=0;ds=0;e1s=-1.75702956;e2s=1.68754095;
e3s=5.82215341;e4s=-6.33354786e1;e5s=1.88076546e2;
e6s=-2.52344531e2;e7s=1.28058531e2;sfcr=4.4289;
end
Tcr=647.3;
Tccout=(Tcr-(Tcout+273.15))/Tcr;
hcout=1000*hfcr*(ah+bh*Tccout^(1/3)+ch*Tccout^(5/6)+dh*Tccout^(7/
8)+e1h*Tccout+e2h*Tccout^2+e3h*Tccout^3+e4h*Tccout^4+e5h*Tccout^5+e6
h*Tccout^6+e7h*Tccout^7);
scout=1000*sfcr*(as+bs*Tccout^(1/3)+cs*Tccout^(5/6)+ds*Tccout^(7/8)
+e1s*Tccout+e2s*Tccout^2+e3s*Tccout^3+e4s*Tccout^4+e5s*Tccout^5+e6s*T
ccout^6+e7s*Tccout^7);
%*******************collector inlet***************
if (Tcinlet+273.15)>=273.15&(Tcinlet+273.15)<300
ah=0;bh=0;ch=0;dh=0;e1h=6.24698837e2;e2h=-2.34385369e3;
e3h=-9.50812101e3;e4h=7.16287928e4;e5h=-1.63535221e5;
e6h=1.66531093e5;e7h=-6.47854585e4;hfcr=2.0993e3;
as=0;bs=0;cs=0;ds=0;e1s=-1.83692956e3;e2s=1.47066352e4;
e3s=-4.31466046e4;e4s=4.86066733e4;e5s=7.9975096e3;
e6s=-5.83339887e4;e7s=3.31400718e4;sfcr=4.4289;
else
(Tcinlet+273.15)>=300&(Tcinlet+273.15)<600;
ah=8.839230108e-1;bh=0;ch=0;dh=0;e1h=-2.67172935;e2h=6.22640035;
e3h=-1.31789573e1;e4h=-1.91322436;e5h=6.87937653e1;
e6h=-1.24819906e2;e7h=7.21435404e1;hfcr=2.0993e3;
as=9.12762917e-1;bs=0;cs=0;ds=0;e1s=-1.75702956;e2s=1.68754095;
e3s=5.82215341;e4s=-6.33354786e1;e5s=1.88076546e2;
e6s=-2.52344531e2;e7s=1.28058531e2;sfcr=4.4289;
end
Tccinlet=(Tcr-(Tcinlet+273.15))/Tcr;
hcinlet=1000*hfcr*(ah+bh*Tccinlet^(1/3)+ch*Tccinlet^(5/6)+dh*Tccinlet
^(7/8)+e1h*Tccinlet+e2h*Tccinlet^2+e3h*Tccinl
et^3+e4h*Tccinlet^4+e5h*Tccinlet^5+e6h*Tccinlet^6+e7h*Tccinlet^7);
scinlet=1000*sfcr*(as+bs*Tccinlet^(1/3)+cs*Tccinlet^(5/6)+ds*Tccinlet^(
7/8)+e1s*Tccinlet+e2s*Tccinlet^2+e3s*Tccinlet^3+e4s*Tccinlet^4+e5s*Tccinlet
^5+e6s*Tccinlet^6+e7s*Tccinlet^7);
%************************withdrawal*****************
```

```
if (Ts+273.15)>=273.15&(Ts+273.15)<300
as=0;bs=0;cs=0;ds=0;e1s=-1.83692956e3;e2s=1.47066352e4;
e3s=-4.31466046e4;e4s=4.86066733e4;e5s=7.9975096e3;
e6s=-5.83339887e4;e7s=3.31400718e4;sfcr=4.4289;
else
(Ts+273.15)>=300&(Ts+273.15)<600;
as=9.12762917e-1;bs=0;cs=0;ds=0;e1s=-1.75702956;e2s=1.68754095;
e3s=5.82215341;e4s=-6.33354786e1;e5s=1.88076546e2;
e6s=-2.52344531e2;e7s=1.28058531e2;sfcr=4.4289;
end
Tcs=(Tcr-(Ts+273.15))/Tcr;
hs=1000*(4.2045016*Ts-0.0678226*C*Ts+1.47532e-3*C^2*Ts-
6.8002552e-4*Ts^2+3.095114e-4*C*Ts^2-0.1624438e-
4*C^2*Ts^2+5.3015464e-6*Ts^3-1.6853152e-6*C*Ts^3+0.0853674e-
6*C^2*Ts^3-0.04881);
ssw=1000*sfcr*(as+bs*Tcs^(1/3)+cs*Tcs^(5/6)+ds*Tcs^(7/8)+e1s*Tcs+e2
s*Tcs^2+e3s*Tcs^3+e4s*Tcs^4+e5s*Tcs^5+e6s*Tcs^6+e7s*Tcs^7);
Xs=1.42185e-3-3.1337e-7*Ts+4.2446e-9*Ts^2;
Ys=-2.1762e-4+4.1426e-7*Ts-1.6285e-9*Ts^2;
Zs=1.0201e-5+1.5903e-8*Ts-2.3525e-10*Ts^2;
sss=(Xs*(C*10)+Ys*(C*10)^1.5+Zs*(C*10)^2)/1000;
massofsalt=mw*C/100;
m_water=mw-massofsalt;
ss=(m_water/mw)*ssw+(massofsalt/mw)*sss;
%********Saline water-old values*****************
if (Tsold+273.15)>=273.15&(Tsold+273.15)<300
as=0;bs=0;cs=0;ds=0;e1s=-1.83692956e3;e2s=1.47066352e4;
e3s=-4.31466046e4;e4s=4.86066733e4;e5s=7.9975096e3;
e6s=-5.83339887e4;e7s=3.31400718e4;sfcr=4.4289;
else
(Tsold+273.15)>=300&(Tsold+273.15)<600;
as=9.12762917e-1;bs=0;cs=0;ds=0;e1s=-1.75702956;e2s=1.68754095;
e3s=5.82215341;e4s=-6.33354786e1;e5s=1.88076546e2;
e6s=-2.52344531e2;e7s=1.28058531e2;sfcr=4.4289;
end
Tcsold=(Tcr-(Tsold+273.15))/Tcr;
hsold=1000*(4.2045016*Tsold-0.0678226*C*Tsold+1.47532e-
3*C^2*Tsold-6.8002552e-4*Tsold^2+3.095114e-4*C*Tsold^2-0.1624438e-
4*C^2*Tsold^2+5.3015464e-6*Tsold^3-1.6853152e-6*C*Tsold^3+0.0853674e-
6*C^2*Tsold^3-0.04881);
ssw=1000*sfcr*(as+bs*Tcsold^(1/3)+cs*Tcsold^(5/6)+ds*Tcsold^(7/8)+e
1s*Tcsold+e2s*Tcsold^2+e3s*Tcsold^3+e4s*Tcsold^4+e5s*Tcsold^5+e6s*Tcsol
d^6+e7s*Tcsold^7);
Xs=1.42185e-3-3.1337e-7*Tsold+4.2446e-9*Tsold^2;
Ys=-2.1762e-4+4.1426e-7*Tsold-1.6285e-9*Tsold^2;
Zs=1.0201e-5+1.5903e-8*Tsold-2.3525e-10*Tsold^2;
sss=(Xs*(C*10)+Ys*(C*10)^1.5+Zs*(C*10)^2)/1000;
```

```
massofsalt=mwater*C/100;
m_water=mwater-massofsalt;
ssold=(m_water/mwater)*ssw+(massofsalt/mwater)*sss;
%************************discharge********************
Td=Ts-(q/(Qw*Ds*Cp));
if (Td+273.15)>=273.15&(Td+273.15)<300
as=0;bs=0;cs=0;ds=0;e1s=-1.83692956e3;e2s=1.47066352e4;
e3s=-4.31466046e4;e4s=4.86066733e4;e5s=7.9975096e3;
e6s=-5.83339887e4;e7s=3.31400718e4;sfcr=4.4289;
else
(Td+273.15)>=300&(Td+273.15)<600;
as=9.12762917e-1;bs=0;cs=0;ds=0;e1s=-1.75702956;e2s=1.68754095;
e3s=5.82215341;e4s=-6.33354786e1;e5s=1.88076546e2;
e6s=-2.52344531e2;e7s=1.28058531e2;sfcr=4.4289;
end
Tcd=(Tcr-(Td+273.15))/Tcr;
hd=1000*(4.2045016*Td-0.0678226*C*Td+1.47532e-3*C^2*Td-
6.8002552e-4*Td^2+3.095114e-4*C*Td^2-0.1624438e-
4*C^2*Td^2+5.3015464e-6*Td^3-1.6853152e-6*C*Td^3+0.0853674e-
6*C^2*Td^3-0.04881);
sdw=1000*sfcr*(as+bs*Tcd^(1/3)+cs*Tcd^(5/6)+ds*Tcd^(7/8)+e1s*Tcd+
e2s*Tcd^2+e3s*Tcd^3+e4s*Tcd^4+e5s*Tcd^5+e6s*Tcd^6+e7s*Tcd^7);
Xs=1.42185e-3-3.1337e-7*Td+4.2446e-9*Td^2;
Ys=-2.1762e-4+4.1426e-7*Td-1.6285e-9*Td^2;
Zs=1.0201e-5+1.5903e-8*Td-2.3525e-10*Td^2;
sss=(Xs*(C*10)+Ys*(C*10)^1.5+Zs*(C*10)^2)/1000;
massofsalt=mw*C/100;
m_water=mw-massofsalt;
sd=(m_water/mw)*sdw+(massofsalt/mw)*sss;
%********inlet to tube-in-tube heat exchanger*******
if (T0+273.15)>=273.15&(T0+273.15)<300
as=0;bs=0;cs=0;ds=0;e1s=-1.83692956e3;e2s=1.47066352e4;
e3s=-4.31466046e4;e4s=4.86066733e4;e5s=7.9975096e3;
e6s=-5.83339887e4;e7s=3.31400718e4;sfcr=4.4289;
else
(T0+273.15)>=300&(T0+273.15)<600;
as=9.12762917e-1;bs=0;cs=0;ds=0;e1s=-1.75702956;e2s=1.68754095;
e3s=5.82215341;e4s=-6.33354786e1;e5s=1.88076546e2;
e6s=-2.52344531e2;e7s=1.28058531e2;sfcr=4.4289;
end
Tc0=(Tcr-(T0+273.15))/Tcr;
hinlet=1000*(4.2045016*T0-0.0678226*C0*T0+1.47532e-3*C0^2*T0-
6.8002552e-4*T0^2+3.095114e-4*C0*T0^2-0.1624438e-
4*C0^2*T0^2+5.3015464e-6*T0^3-1.6853152e-6*C0*T0^3+0.0853674e-
6*C0^2*T0^3-0.04881);
sinletw=1000*sfcr*(as+bs*Tc0^(1/3)+cs*Tc0^(5/6)+ds*Tc0^(7/8)+e1s*Tc
0+e2s*Tc0^2+e3s*Tc0^3+e4s*Tc0^4+e5s*Tc0^5+e6s*Tc0^6+e7s*Tc0^7);
```

```
Xs=1.42185e-3-3.1337e-7*To+4.2446e-9*To^2;
Ys=-2.1762e-4+4.1426e-7*To-1.6285e-9*To^2;
Zs=1.0201e-5+1.5903e-8*To-2.3525e-10*To^2;
sss=(Xs*(Co*10)+Ys*(Co*10)^1.5+Zs*(Co*10)^2)/1000;
massofsalt=mi*C/100;
m_water=mi-massofsalt;
sinlet=(m_water/mi)*sinletw+(massofsalt/mi)*sss;
%***********************injection********************
if (Ti+273.15)>=273.15&(Ti+273.15)<300
as=0;bs=0;cs=0;ds=0;e1s=-1.83692956e3;e2s=1.47066352e4;
e3s=-4.31466046e4;e4s=4.86066733e4;e5s=7.9975096e3;
e6s=-5.83339887e4;e7s=3.31400718e4;sfcr=4.4289;
else
(Ti+273.15)>=300&(Ti+273.15)<600;
as=9.12762917e-1;bs=0;cs=0;ds=0;e1s=-1.75702956;e2s=1.68754095;
e3s=5.82215341;e4s=-6.33354786e1;e5s=1.88076546e2;
e6s=-2.52344531e2;e7s=1.28058531e2;sfcr=4.4289;
end
Tci=(Tcr-(Ti+273.15))/Tcr;
hi=1000*(4.2045016*Ti-0.0678226*Co*Ti+1.47532e-3*Co^2*Ti-
6.8002552e-4*Ti^2+3.095114e-4*Co*Ti^2-0.1624438e-
4*Co^2*Ti^2+5.3015464e-6*Ti^3-1.6853152e-6*Co*Ti^3+0.0853674e-
6*Co^2*Ti^3-0.04881);
siw=1000*sfcr*(as+bs*Tci^(1/3)+cs*Tci^(5/6)+ds*Tci^(7/8)+e1s*Tci+e2s
*Tci^2+e3s*Tci^3+e4s*Tci^4+e5s*Tci^5+e6s*Tci^6+e7s*Tci^7);
Xs=1.42185e-3-3.1337e-7*Ti+4.2446e-9*Ti^2;
Ys=-2.1762e-4+4.1426e-7*Ti-1.6285e-9*Ti^2;
Zs=1.0201e-5+1.5903e-8*Ti-2.3525e-10*Ti^2;
sss=(Xs*(Co*10)+Ys*(Co*10)^1.5+Zs*(Co*10)^2)/1000;
massofsalt=mi*C/100;
m_water=mi-massofsalt;
si=(m_water/mi)*siw+(massofsalt/mi)*sss;
%************************fresh**********************
if (Tif+273.15)>=273.15&(Tif+273.15)<300
ah=0;bh=0;ch=0;dh=0;e1h=6.24698837e2;e2h=-2.34385369e3;
e3h=-9.50812101e3;e4h=7.16287928e4;e5h=-1.63535221e5;
e6h=1.66531093e5;e7h=-6.47854585e4;hfcr=2.0993e3;
as=0;bs=0;cs=0;ds=0;e1s=-1.83692956e3;e2s=1.47066352e4;
e3s=-4.31466046e4;e4s=4.86066733e4;e5s=7.9975096e3;
e6s=-5.83339887e4;e7s=3.31400718e4;sfcr=4.4289;
else
(Tif+273.15)>=300&(Tif+273.15)<600;
ah=8.839230108e-1;bh=0;ch=0;dh=0;e1h=-2.67172935;e2h=6.22640035;
e3h=-1.31789573e1;e4h=-1.91322436;e5h=6.87937653e1;
e6h=-1.24819906e2;e7h=7.21435404e1;hfcr=2.0993e3;
as=9.12762917e-1;bs=0;cs=0;ds=0;e1s=-1.75702956;e2s=1.68754095;
e6s=-2.52344531e2;e7s=1.28058531e2;sfcr=4.4289;
```

```
    end
    Tcif=(Tcr-(Tif+273.15))/Tcr;
    hif=1000*hfcr*(ah+bh*Tcif^(1/3)+ch*Tcif^(5/6)+dh*Tcif^(7/8)+e1h*Tcif
+e2h*Tcif^2+e3h*Tcif^3+e4h*Tcif^4+e5h*Tcif^5+e6h*Tcif^6+e7h*Tcif^7);
    sif=1000*sfcr*(as+bs*Tcif^(1/3)+cs*Tcif^(5/6)+ds*Tcif^(7/8)+e1s*Tcif+e
2s*Tcif^2+e3s*Tcif^3+e4s*Tcif^4+e5s*Tcif^5+e6s*Tcif^6+e7s*Tcif^7);
    %**************************vapor*********************
    ahv=1;bhv=4.57874342e-1;chv=5.08441288;dhv=-1.48513244;
    e1hv=-4.81351884;e2hv=2.69411792;e3hv=-7.39064542;
    e4hv=1.04961689e1;e5hv=-5.46840036;e6hv=0;e7hv=0;hgcr=2.0993e3;
    asv=1;bsv=3.77391e-1;csv=-2.78368;dsv=6.93135;
    e1sv=-4.34839;e2sv=1.34672;e3sv=1.75261;e4sv=-6.22295;
    e5sv=9.99004;e6sv=0;e7sv=0;sgcr=4.4289;
    Tcv=(Tcr-(Ts+273.15))/Tcr;
    hv=1000*hgcr*(ahv+bhv*Tcv^(1/3)+chv*Tcv^(5/6)+dhv*Tcv^(7/8)+e1hv*
Tcv+e2hv*Tcv^2+e3hv*Tcv^3+e4hv*Tcv^4+e5hv*Tcv^5+e6hv*Tcv^6+e7hv*Tc
v^7);
    sv=1000*sgcr*(asv+bsv*Tcv^(1/3)+csv*Tcv^(5/6)+dsv*Tcv^(7/8)+e1sv*T
cv+e2sv*Tcv^2+e3sv*Tcv^3+e4sv*Tcv^4+e5sv*Tcv^5+e6sv*Tcv^6+e7sv*Tcv^7
);
    %****************************************************
    ahr=0;bhr=0;chr=0;dhr=0;e1hr=6.24698837e2;e2hr=-2.34385369e3;
    e3hr=-9.50812101e3;e4hr=7.16287928e4;e5hr=-1.63535221e5;
    e6hr=1.66531093e5;e7hr=-6.47854585e4;hfcr=2.0993e3;
    asr=0;bsr=0;csr=0;dsr=0;e1sr=-1.83692956e3;e2sr=1.47066352e4;
    e3sr=-4.31466046e4;e4sr=4.86066733e4;e5sr=7.9975096e3;
    e6sr=-5.83339887e4;e7sr=3.31400718e4;sfcr=4.4289;
    Tcr=647.3;
    Tcr=(Tcr-(To+273.15))/Tcr;
    hr=1000*hfcr*(ahr+bhr*Tcr^(1/3)+chr*Tcr^(5/6)+dhr*Tcr^(7/8)+e1hr*T
cr+e2hr*Tcr^2+e3hr*Tcr^3+e4hr*Tcr^4+e5hr*Tcr^5+e6hr*Tcr^6+e7hr*Tcr^7
);
    sr=1000*sfcr*(asr+bsr*Tcr^(1/3)+csr*Tcr^(5/6)+dsr*Tcr^(7/8)+e1sr*Tcr
+e2sr*Tcr^2+e3sr*Tcr^3+e4sr*Tcr^4+e5sr*Tcr^5+e6sr*Tcr^6+e7sr*Tcr^7);
    %****************************************************
    ecout=(hcout-hr)-To*(scout-sr);
    ecinlet=(hcinlet-hr)-To*(scinlet-sr);
    es=(hs-hr)-To*(ss-sr);
    ed=(hd-hr)-To*(sd-sr);
    einlet=(hinlet-hr)-To*(sinlet-sr);
    ei=(hi-hr)-To*(si-sr);
    eif=(hif-hr)-To*(sif-sr);
    ev=(hv-hr)-To*(sv-sr);
    E1=mwater*((hs-hr)-To*(ss-sr));
    Eo=mwater*((hsold-hr)-To*(ssold-sr));
    %****************************************************
    Qcollectoruseful=Qcollectoruseful;
```

```
aaa=m*(ecout-ecinlet);
Ed=m*(ecout-ecinlet)+mi*ei-mw*es-mf*ev-(1-T0/Twside)*Qlossside-(1-
T0/Twbottom)*Qlossbottom-(1-T0/Twtop)*Qlosstop-(E1-E0)/dt;
Ed_tube=mw*(es-ed)+mi*(einlet-ei);
Ed_he=m*(ecout-ecinlet)+(1-T0/The)*(-Qcollectoruseful);
Ed_cond=mf*(ev-eif)+(1-T0/Tco)*(-mf*hfgm);
eff2=(mf*hfg)/(m*(ecout-ecinlet));
eff1=mf*hfg/Qcollectoruseful;
%*****************************************************
%*****************************************************
end
%*****************************************************
%*****************************************************
%**************Night time performance****************
%*****************************************************
%*****************************************************
Cp=a2*C+b;
Ps=exp(63.042-7139.6/(Ts+273)-6.2558*log(Ts+273))*100;
Pf=exp(63.042-7139.6/(Tf+273)-6.2558*log(Tf+273))*100;
dp=0.5*Dv*((mf/(Dv*Af))^2-
(mf/(Dv*As))^2)+Dv*((klc+kle)/2)*(mf/(Dv*As))^2;
Ds=D0*(1-bt*(Ts-T0)+bc*(C-C0));
hfg=2.3246e3*(1.0727e3-1.0167*Ts+1.4087e-4*Ts^2-5.1462e-6*Ts^3);
fc=1-a1*C;
qe=(am/Df)*((fc*Ps)/(Ts+273)^0.5-(Pf+dp)/(Tf+273)^0.5);
Qe=qe*As;
mf=Qe*Df;
he=mf*hfg;
%*****************************************************
%************Heat Loss Calculation****************
%*****************************************************
%***************************Side********************
Taverageside=(Twside+Ta)/2;
Bside=1/(Taverageside+273);
Raside=g*Bside*(Twside-Ta)*lside^3/(alphaa*nua);
Nuside=0.68+(0.67*Raside^0.25)/(1+(0.492/Pr)^(9/16))^(4/9);
hside=Nuside*ka/lside;
X1side=1/(hside*2*pi*rs3*lside);
X2side=log(rs2/rs)/(2*pi*ksteel*lside)+log(rs3/rs2)/(2*pi*kinsulation*lside);
Y1side=(Twside-Ta)/X1side;
Y2side=(Ts-Twside)/X2side;
while abs (Y1side-Y2side)>0.1
if Y1side>Y2side
Twside=Twside-0.05;
else
Twside=Twside+0.1;
end
```

```
Taverageside=(Twside+Ta)/2;
Bside=1/(Taverageside+273);
Raside=g*Bside*(Twside-Ta)*lside^3/(alphaa*nua);
Nuside=0.68+(0.67*Raside^0.25)/(1+(0.492/Pr)^(9/16))^(4/9);
hside=Nuside*ka/lside;
X1side=1/(hside*2*pi*rs3*lside);
X2side=log(rs2/rs)/(2*pi*ksteel*lside)+log(rs3/rs2)/(2*pi*kinsulation*lside);
Y1side=(Twside-Ta)/X1side;
Y2side=(Ts-Twside)/X2side;
end
Qlossside=Aside*hside*(Twside-Ta);
%******************************Bottom*****************
Taveragebottom=(Twbottom+Ta)/2;
Bbottom=1/(Taveragebottom+273);
Rabottom=g*Bbottom*(Twbottom-Ta)*lbottom^3/(alphaa*nua);
Nubottom=0.27*Rabottom^0.25;
hbottom=Nubottom*ka/lbottom;
X1bottom=1/(hbottom*As);
X2bottom=tbottom/(ksteel*As)+tinsulation/(kinsulation*As);
Y1bottom=(Twbottom-Ta)/X1bottom;
Y2bottom=(Ts-Twbottom)/X2bottom;
while abs (Y1bottom-Y2bottom)>0.1
if Y1bottom>Y2bottom
Twbottom=Twbottom-0.05;
else
Twbottom=Twbottom+0.1;
end
Taveragebottom=(Twbottom+Ta)/2;
Bbottom=1/(Taveragebottom+273);
Rabottom=g*Bbottom*(Twbottom-Ta)*lbottom^3/(alphaa*nua);
Nubottom=0.27*Rabottom^0.25;
hbottom=Nubottom*ka/lbottom;
X1bottom=1/(hbottom*As);
X2bottom=tbottom/(ksteel*As)+tinsulation/(kinsulation*As);
Y1bottom=(Twbottom-Ta)/X1bottom;
Y2bottom=(Ts-Twbottom)/X2bottom;
end
Qlossbottom=As*hbottom*(Twbottom-Ta);
%******************************top*******************
Taveragetop=(Twtop+Ta)/2;
Btop=1/(Taveragetop+273);
Ratop=g*Btop*(Twtop-Ta)*ltop^3/(alphaa*nua);
Nutop=0.56*(Ratop*cos(theta))^0.25;
htop=Nutop*ka/ltop;
X1top=1/(htop*Atop);
X2top=ttop/(ksteel*Atop)+tinsulation/(kinsulation*Atop);
Y1top=(Twtop-Ta)/X1top;
```

```
Y2top=(Ts-Twtop)/X2top;
while abs (Y1top-Y2top)>0.1
if Y1top>Y2top
Twtop=Twtop-0.05;
else
Twtop=Twtop+0.1;
end
Taveragetop=(Twtop+Ta)/2;
Btop=1/(Taveragetop+273);
Ratop=g*Btop*(Twtop-Ta)*ltop^3/(alphaa*nua);
Nutop=0.56*(Ratop*cos(theta))^0.25;
htop=Nutop*ka/ltop;
X1top=1/(htop*Atop);
X2top=ttop/(ksteel*Atop)+tinsulation/(kinsulation*Atop);
Y1top=(Twtop-Ta)/X1top;
Y2top=(Ts-Twtop)/X2top;
end
Qlosstop=Atop*htop*(Twtop-Ta);
Qloss=Qlossside+Qlossbottom+Qlosstop;
%******************************************************
%****Solution of the set of coupled equations to find the new*****
%****values of temperature, density, specific heat and solute*****
%***********************concentration******************
%******************************************************
a=v/dt;
const=Dsteel*Cpsteel*vtotal;
w1=const/dt;
w=w1/a;
X0=Ds*Cp*Ts;
X=(1/a)*(X0*a+w1*Ts-he-Qloss);
Cp=a2*C+b;
Ds=D0*(1-bt*(Ts-T0)+bc*(C-C0));
Ts=X/(Ds*Cp+w);
%******************************************************
%*********Condenser calculations**************
%******************************************************
Re=(4*mf)/(pi*dci*uv);%To check whether the flow is laminar or not
Tfa=(Tco+Ta)/2;
ka=1.163*(0.021+(0.66e-4)*Tfa);
ua=(1/3600)*(6.1848e-2+(1.6632e-4)*Tfa);
Da=353.44/(Tfa+273.15);
Cpa=4186*(0.2317+1.6213e-5*Tfa+3.9593e-8*Tfa^2-1.6213e-11*Tfa^3);
Pr=ua*Cpa/ka;
mf=mf;
hfgm=hfg+(3/8)*Cpf*(Ts-Tif);
hc=0.555*((g*Df*(Df-Dv)*kf^3*hfgm)/(uf*dco*(Ts-Tif)))^0.25;
coeff=1/(2*pi*rci*lc*hc)+log(rco/rci)/(2*pi*lc*kc);
```

```
    Tif=(1/(1+0.68*mf*Cpf*coeff))*(mf*coeff*hfg+0.68*mf*Cpf*Ts*coeff+Tco;
    Tci=mf*(hfg+0.68*Cpf*(Ts-Tif))*log(rco/rci)/(2*pi*lc*kc)+Tco;
    xi=dco/Dfin;
    B=1/(Tfa+273);
    Tco=Tco;
    RaS=(g*B*(Tco-Ta)*Pr*S^3/(nua)^2)*(S/Dfin);
    Beta=(0.17*xi)+exp(-4.8*xi);
    CC=((23.7-1.1*(1+(152*xi^2))^0.5)/(1+Beta))^(4/3);
    hco=(ka/S)*(RaS/(12*pi))*(2-exp(-(CC/RaS)^0.75)-exp(-
Beta*(CC/RaS)^0.75));
    CCC=0.44+0.12/xi;
    hcot=(ka/S)*(CCC*RaS^0.29);
    rfin=Dfin/2;
    r2c=(Dfin/2)+(tfin/2);
    Aftip=N*pi*Dfin*tfin;
    Afside=N*2*pi*(rfin^2-rco^2);
    Ab=2*pi*rco*(lc-N*tfin);
    mm=sqrt((2*hco)/(kc*tfin));
    C2=(2*rco/mm)/(r2c^2-rco^2);
    fineff=C2*(BESSELK(1,(mm*rco))*BESSELI(1,(mm*r2c))-
BESSELI(1,(mm*rco))*BESSELK(1,(mm*r2c)))/(BESSELI(0,(mm*rco))*BESSE
LK(1,(mm*r2c))+BESSELK(0,(mm*rco))*BESSELI(1,(mm*r2c)));
constant=N*fineff*hcot*Aftip+N*fineff*hco*Afside+hco*Ab;
    Tco1=(1/((log(rco/rci)*constant)+2*pi*lc*kc))*(2*pi*lc*kc*Tci+log(rco/rci)
*Ta*constant);
    while abs(Tco1-Tco)>0.0001
    Tco=Tco1;
    Tfa=(Tco+Ta)/2;
    ka=1.163*(0.021+(0.66e-4)*Tfa);
    ua=(1/3600)*(6.1848e-2+(1.6632e-4)*Tfa);
    Da=353.44/(Tfa+273.15);
    Cpa=4186*(0.2317+1.6213e-5*Tfa+3.9593e-8*Tfa^2-1.6213e-11*Tfa^3);
    Pr=ua*Cpa/ka;
    hfgm=hfg+(3/8)*Cpf*(Ts-Tif);
    hc=0.555*((g*Df*(Df-Dv)*kf^3*hfgm)/(uf*dco*(Ts-Tif)))^0.25;
    coeff=1/(2*pi*rci*lc*hc)+log(rco/rci)/(2*pi*lc*kc);
    Tif=(1/(1+0.68*mf*Cpf*coeff))*(mf*coeff*hfg+0.68*mf*Cpf*Ts*coeff+Tco;
    Tci=mf*(hfg+0.68*Cpf*(Ts-Tif))*log(rco/rci)/(2*pi*lc*kc)+Tco;
    xi=dco/Dfin;
    Tfa=(Tco+Ta)/2;
    B=1/(Tfa+273);
    RaS=(g*B*(Tco-Ta)*Pr*S^3/(nua)^2)*(S/Dfin);
    Beta=(0.17*xi)+exp(-4.8*xi);
    CC=((23.7-1.1*(1+(152*xi^2))^0.5)/(1+Beta))^(4/3);
    hco=(ka/S)*(RaS/(12*pi))*(2-exp(-(CC/RaS)^0.75)-exp(-
Beta*(CC/RaS)^0.75));
    CCC=0.44+0.12/xi;
```

```
    hcot=(ka/S)*(CCC*RaS^0.29);
    rfin=Dfin/2;
    r2c=(Dfin/2)+(tfin/2);
    Aftip=N*pi*Dfin*tfin;
    Afside=N*2*pi*(rfin^2-rco^2);
    Ab=2*pi*rco*(lc-N*tfin);
    mm=sqrt((2*hco)/(kc*tfin));
    C2=(2*rco/mm)/(r2c^2-rco^2);
    fineff=C2*(BESSELK(1,(mm*rco))*BESSELI(1,(mm*r2c))-
BESSELI(1,(mm*rco))*BESSELK(1,(mm*r2c)))/(BESSELI(0,(mm*rco))*BESSE
LK(1,(mm*r2c))+BESSELK(0,(mm*rco))*BESSELI(1,(mm*r2c)));
    constant=N*fineff*hcot*Aftip+N*fineff*hco*Afside+hco*Ab;
    Tco1=(1/((log(rco/rci)*constant)+2*pi*lc*kc))*(2*pi*lc*kc*Tci+log(rco/rci)
*Ta*constant);
    end
    Tco=Tco1;
    Tci=(mf*hfg*log(rco/rci)+0.68*Cpf*mf*log(rco/rci)*Ts+2*pi*lc*kc*Tco)/(
2*pi*lc*kc+0.68*Cpf*mf*log(rco/rci));
    Tf=Tif;
    %****************************************************
    %****************************************************
```

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. «Theoretical and experimental analysis of water desalination system using low grade solar heat», Saleh Al Kharabsheh, University of Florida 2003

2. «Economic analysis of a solar assisted desalination system» Renewable Energy, Kalogirou, S., 1997

3. «Solar energy and desalination in advances in solar energy, an annual review of research and development» Delyannis E. and Belessiotis V., 2001, Goswami, D.Y. American Solar Energy Society, Inc, Boulder, Colorado

4. «Survey of solar desalination systems and system selection» Energy, Kalogirou S., 1997

5. «Steady-state experimental studies on a multi-effect thermal regeneration solar desalination unit with horizontal tube falling film evaporation», Chen Ziqian, Zheng Hongfeia, He Kaiyanb, Ma Chaochena, Desalination 207, pp 59-70.

6. «Desalination unit coupled with solar collectors and a storage tank: modelling and simulation», H. Ben Bacha, T. Dammak, A.A. Ben Abdalah, A.Y. Maalej, H. Ben Dhia, Desalination 206, pp 341-352

7. «Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art», E. Mathioulakis, V. Belessiotis, E. Delyannis, Desalination 203 pp. 346-365

8. «Air humidification–dehumidification for a water desalination system using solar energy», J. Orfi, N. Galanis, M. Laplante, Desalination 203 pp. 471-481

9. «Studies on a single-stage solar desalination system for domestic applications», J. Joseph, R. Saravanan, S. Renganarayanan, Desalination 173 pp. 77-82

10. «‘‘Direct’’ and socially-induced environmental impacts of desalination», G.L. Meerganz von Medeazza, Desalination 185 pp. 57-70

11. «Modelling of water–energy systems. The case of desalination», Gregor Meerganz von Medeazza, Vincent Moreau, Energy 32 pp. 1024-1031

12. «Overview of the cost of desalinated water and costing methodologies», K.V. Reddy, N. Ghaffour, Desalination 205 pp. 340-353

13. «Desalination by solar-powered reverse osmosis in a remote area of the Sultanate of Oman», Zaher Al Suleimani , V. Rajendran Nair, Applied Energy 65 pp. 367-380

14. «Solar thermal collectors and applications», S. Kalogirou, Progress in energy and combustion science 30 pp. 231-295

15. «A solar pond assisted multi-effect desalting system», AlHawaj, O., Darwish, M.A., Desalination 99 pp. 119-135

16. «Desalination coupled with salinity-gradient solar ponds», Lu H., Walton J.C., Swift A.H.P., Desalination 136 pp. 13-23

17. «A solar still with minimum inclination, coupled to an outside condenser»,El-Bahi A. and Inan D., Desalination 123 pp. 79-83

18. «Performance of a flash desalination unit intended to be coupled to a solar pond» Safi, M.J., Renewable Energy, 14(1-4), pp. 339-343.

19. «The analysis and performance of large-scale stand-alone solar desalination plants» Tsilingiris, P.T., Desalination 103, pp. 249-255.

20. «High-energy efficiency desalination project using a full titanium desalination unit and a solar pond as the heat supply» Caruso G., Naviglio A., Principi P., Ruffini E., Desalination 136 pp. 199-212

21. «An optimal design of a solar desalination plant», El-Nashar A.M., Desalination 93 pp. 579-614

22. «The economic feasibility of small solar MED seawater desalination plants for remote areas» El-Nashar, A.M., Desalination 134 pp. 173-186.

23. «Coupling of a PV-powered R.O. brackish water desalination plant with solar stills» Hasnain S.M., Alajlan S., Renewable Energy, 14(1-4) pp. 281-286.

24. «A simulation-optimization programme for designing hybrid energy systems for supplying electricity and fresh water through desalination to remote areas. Case study: the Merssini village, Donoussa island, Aegean Sea, Greece», Manolakos D., Papadakis G., Papantonis D., and Kyritsis S., Energy 26 pp. 679-704.

25. «Small reverse osmosis units using PV systems for water purification in rural places», Joyce A., Loureiro D., Rodrigues C., and Castro S., Desalination 137, pp. 39-44

26. «Operation experience of a solar-and wind-powered desalination demonstration plant» Weiner D., Fisher D., Moses E.J., Katz, B., Meron, G., Desalination 137 pp. 7-13.

27. «Theoretical evaluation of solar distillation under natural circulation with heat exchanger» Lawrence S.A. , Tiwari G.N., Energy Conversion and Management, 30(3) pp. 205-213

28. «Basic hydrodynamic aspects of a solar energy based desalination process», Bemporad G.A., Desalination 54(2) pp. 125-134

29. «Principles of vacuum engineering» Pirani M.,Yarwood, J., 1961, Chapman and Hall, London.

30. «A theoretical study of interphase mass transfer», Schrage R.W., 1953, Columbia University Press, New York.

31. «Small-scale thermal seawater desalination simulation and optimization of system design», Muller-Holst H., Engelhardt M., and Scholkopf W., 1999, Desalination, 122 pp. 255-262.

32. «Heat and mass transfer processes in a solar still with an indirect evaporator-condenser», Tchinda R., Kaptouom E., and Njomo D., 1999, Energy Conversion & Management 41 pp. 93-107.

33. «Fundamentals of heat and mass transfer», Incropera F.P. and DeWitt D.P., 1996 fourth edition, John Wiley & Sons, New York.

34. «Desalination and water purification, 2. Measurements and control in water desalination», Lior N., 1986, Elsevier scientific publishing company, Amsterdam.

35. «Perspective of solar-powered desalination with the SMCEC technique», Ben Bacha H., Maalej A.Y., Ben Dhia H., Ulber I., Uchtmann H., Engelhardt M., and Krelle J., 1999, Desalination 122 pp. 177-183

36. «Solar desalination with a humidification-dehumidification cycle: performance of the unit» Desalination 120 pp. 273-280.

37. «Performance of a double-basin solar still in the presence of dye», Dutt D.K., Kumar A., Anand J.D. and Tiwari G.N., 1989, Applied Energy 32 pp. 207-223.

38. "Determining the thermal losses to the atmosphere from a solar still," Bobrovnikov G.N., Achilov B.M., Kamilov O.S., Kakharov S., and Odinaev A., Geliotekhnika 15(4) pp. 70-71.

39. «Nocturnal water production by tubular solar stills using waste heat to preheat brine», Tiwari G.N., 1988, Desalination, 69, pp. 309-318.

40. «Solar thermal desalination system with heat recovery», Schwarzer K., Vieira M.E., Farber C. and Muller C., 2001, Desalination 137 pp. 23-29.

41. «Development of a solar desalination plant», Saghafi M., 1994, Renewable Energy, 5, Part I, pp. 529-531.

42. «Vacuum desalination for water purification using waste heat», Tay J.H., Low S.C. and Jeyaseelan S., 1996, Desalination, 106, pp. 131-135.

43. «Numerical modeling of a multi-stage solar still», Jubran B.A., Ahmed M.I., Ismail A.F., and Abakar Y.A., 2000, Energy Conversion & Management, 41, pp. 1107-1121.

44. «Θερμικά – Ηλιακά Συστήματα Μέρος Πρώτο», Κ. Αντωνόπουλου, Αθήνα 2004

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ

- http://www.ag.arizona.edu/AZWATER/awr/dec99/Feature2.htm
- http://whyfiles.org/131fresh_water/2.html
- http://www.greatlakesdirectory.org/zarticles/080902_water_shortages.htm
- http://www.iht.com/articles/2007/08/03/europe/dry.php
- http://www.sfgate.com/cgi-bin/article.cgi?f=/c/a/2005/11/17/MNG4EFPHK51.DTL&type=science
- http://www.desware.net/desa7.aspx
- http://www.lahmeyer.de/projects/ge/libya_e.pdf
- http://www.globalwarmingsolutions.co.uk/large_scale_solar_desalination_using_multi_effect_humidification.htm
- http://nariphaltan.virtualave.net/desalination.pdf
- http://www.lenntech.com/specific-questions-water-quantities.htm
- http://en.wikipedia.org/wiki/Desalination
- http://www.crcsalinity.com.au/newsletter/SeaNews/dpap0102.htm
- http://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea59e/ch35.htm
- http://www.coastal.ca.gov/desalrpt/dchap1.html