



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

*ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΥΓΡΑΝΣΗ–ΑΦΥΓΡΑΝΣΗ ΚΑΙ
ΦΥΣΙΚΗ ΑΝΑΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΑΕΡΑ :
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ*

ΜΑΚΡΥΛΑΚΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ
ΛΥΚΟΓΙΑΝΝΗΣ ΒΑΣΙΛΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Δρ. Β. ΜΠΟΝΤΟΖΟΓΛΟΥ

ΒΟΛΟΣ , ΙΟΥΝΙΟΣ 2019

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτέρως τον επιβλέποντα καθηγητή, Δρ. Βασίλειο Μποντόζογλου για την πολύτιμη βοήθεια και συνεισφορά του στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής. Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, Δρ. Δημήτριο Βαλουγεώργη και Δρ. Αλέξη Κερμανίδη για την προσεχτική και ενδελεχή ανάγνωση της εργασίας μας. Τέλος, δεν θα μπορούσαμε να μην αναφερθούμε στους γονείς μας οι οποίοι ήταν πάντα στο πλευρό μας όλα αυτά τα χρόνια και μας στήριζαν σε κάθε βήμα.

*Λυκογιάννης Βασίλης
Μακρυλάκης Παναγιώτης*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η λειψυδρία και ειδικότερα η έλλειψη πόσιμου νερού είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει ο πλανήτης μας και αναμένεται να ενταθεί τα επόμενα χρόνια. Για το λόγο αυτό, η ανάπτυξη και εξέλιξη τεχνολογιών που μπορούν να εκμεταλλευτούν τα ανεξάντλητα αποθέματα θαλασσινού νερού, όπως η αφαλάτωση, καθίστανται ιδιαίτερα σημαντικές για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος.

Στην παρούσα διπλωματική, μελετάται μία συσκευή αφαλάτωσης που χρησιμοποιεί την καινοτόμο και οικονομική μέθοδο της ύγρανσης-αφύγρανσης (HDH), με μοναδική πηγή ενέργειας τον Ήλιο. Η διάταξη αποτελείται από μία κατακόρυφη μαύρη πλάκα πάνω στην οποία ρέει το θαλασσινό νερό με μορφή υμένα, ποσοστό του οποίου εξατμίζεται λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας που διαπερνά ένα γυάλινο περίβλημα και θερμαίνει την πλάκα. Οι παραγόμενοι ατμοί ενσωματώνονται ως υγρασία στον περιβάλλοντα αέρα που κινείται ανοδικά λόγω ρευμάτων φυσικής συναγωγής και φτάνουν στο συμπυκνωτή όπου μέρος του υγρού αέρα συμπυκνώνεται με αποτέλεσμα την παραγωγή αφαλατωμένου νερού.

Στη διάρκεια της μελέτης, παρουσιάζονται ορισμένα χρήσιμα μεγέθη για τη διεκπεραίωση των υπολογισμών, αναπτύσσονται οι βασικές παραδοχές για τη λειτουργία της συσκευής και έπειτα μελετάται διεξοδικά η διαφορική ανάλυση κατά μήκος του εξατμιστήρα, η λειτουργία του οποίου αποτελεί τον κορμό της διπλωματικής.

Στο τέλος, πραγματοποιείται μία παραμετρική διερεύνηση για κάποια σημαντικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά και παρουσιάζονται μέσω διαγραμμάτων τα αποτελέσματα και συμπεράσματα της μελέτης για τέσσερις διαφορετικές μέρες του χρόνου. Από αυτά προκύπτει ότι στην ισημερία του Σεπτεμβρίου η παραγωγή αφαλατωμένου νερού φτάνει τα 7.0115 Kg/day ενώ ο δείκτης GOR υπερβαίνει οριακά τη μονάδα. Αυτές οι τιμές είναι σχετικά χαμηλές αλλά θα μπορούσαν να βελτιωθούν αισθητά αν υπήρχε η δυνατότητα χειρισμού της κλίσης της συσκευής.

ABSTRACT

The water scarcity and especially the lack of potable water is one of the most important problems that our planet faces and is expected to exacerbate the next few years. For this reason, the development and progress of technologies that can exploit the inexhaustible seawater reserves, like desalination, become particularly essential for the address of this issue.

In this diploma thesis, a desalination device is developed that uses the innovative and economical Humidification-Dehumidification (HDH) method, while the Sun is the sole source of energy. The device consists of a vertical black plate on which the seawater flows in the form of a film, percentage of which evaporates due to the solar radiation that penetrates a glass casing and heats the plate. The vapor produced is integrated as humidity into the ambient air that moves upward due to natural convection currents and reaches the condenser where part of the moist air is condensed, resulting in the production of desalinated water.

During the study, some useful terms are presented to carry out the calculations, the basic assumptions about the operation of the device are developed and then the differential analysis along the evaporator is thoroughly studied, the operation of which is the core of this diploma thesis.

Finally, a parametric investigation is performed for some important geometric characteristics and the results and conclusions of the study are presented through diagrams for four different days of the year. It follows that at the equinox of September the production of desalinated water reaches 7.0115 Kg/day while GOR exceeds the unit marginally. These values are relatively low but could be improved considerably if there was a possibility of manipulating the tilt of the device.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ – ABSTRACT

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
1.1. Ορισμός Αφαλάτωσης.....	3
1.2. Ιστορική Αναδρομή της Αφαλάτωσης.....	4
1.2.1. Η αφαλάτωση στο παρελθόν.....	4
1.2.2. Η αφαλάτωση σήμερα.....	5
1.3. Τεχνολογίες Αφαλάτωσης.....	7
1.3.1. Θερμικές Μέθοδοι.....	8
1.3.2. Μέθοδοι Μεμβρανών.....	11
1.3.3. Αναπτυσσόμενες Μέθοδοι.....	16
1.3.4. Υβριδικές Μέθοδοι.....	19
1.4. Σύγκριση Μεθόδων Αφαλάτωσης.....	21
2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΥΓΡΑΝΣΗ -ΑΦΥΓΡΑΝΣΗ (HDH).....	23
2.1. Περιγραφή και Ταξινόμηση της μεθόδου.....	23
2.2. Ιστορική Αναδρομή και Εξέλιξη των Τεχνολογιών HDH.....	27
3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	37
3.1. Κατερχόμενος Λεπτός Υμένας.....	37
3.2. Συναγωγή.....	39
3.3. Ψυχομετρία.....	47
3.4. Ηλιακή Ακτινοβολία.....	52
4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΥΓΡΑΝΣΗ –ΑΦΥΓΡΑΝΣΗ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΗ ΑΝΑΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΑΕΡΑ.....	60
4.1. Θεωρητική Περιγραφή.....	60
4.1.1. Μέρη της συσκευής.....	61
4.1.2. Βασικές Παραδοχές.....	64
4.2. Αναλυτική Υπολογιστική Περιγραφή-Ανάλυση Εξατμιστήρα.....	66
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	71
5.1. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Ηλιακής Ακτινοβολίας.....	72
5.2. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Ανάλυσης Εξατμιστήρα.....	76
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	87

7. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ.....	89
7.1. Πρακτικά Προβλήματα προς Διερεύνηση.....	89
7.2. Θεωρητικές Προεκτάσεις για Βελτιστοποίηση της Συσκευής...	90
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	92

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

A. Πίνακας Συμβόλων

B. Κώδικες Matlab

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή

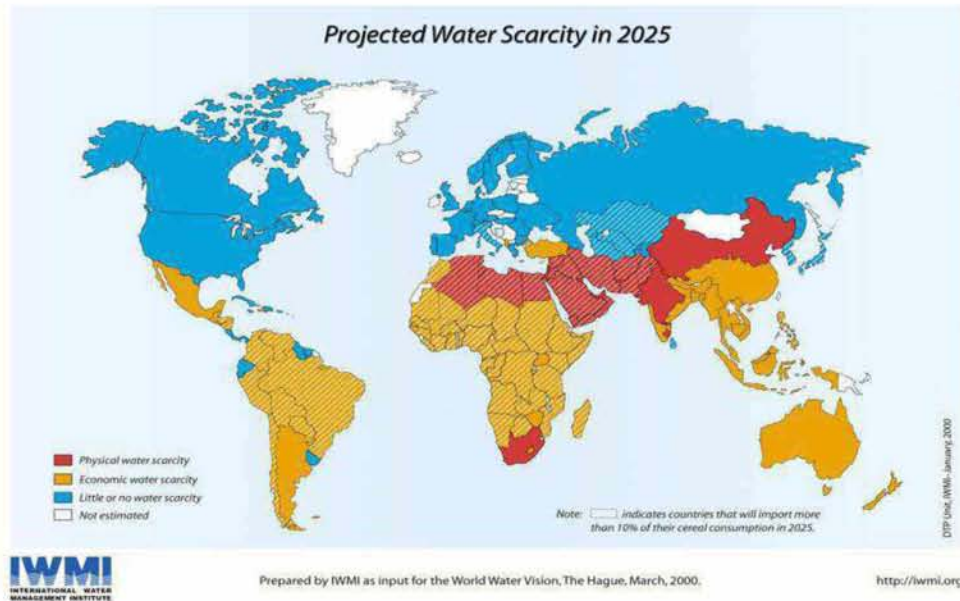
1.1. Ορισμός Αφαλάτωσης

Είναι ευρέως γνωστό ότι το 97% των παγκόσμιων αποθεμάτων νερού βρίσκεται στη θάλασσα αναμειγμένο με μεγάλες ποσότητες διαλυμένων αλάτων, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα να καθίσταται αδύνατη η εκμετάλλευση του είτε για ανθρώπινες είτε για βιομηχανικές ανάγκες. Έτσι, δημιουργήθηκε η ανάγκη για αξιοποίηση των υδάτων αυτών μέσω μίας διεργασίας που ονομάστηκε αφαλάτωση.

Με τον όρο αφαλάτωση (« από + άλας ») εννοούμε τη διαδικασία κατά την οποία αφαιρούνται άλατα ή μεταλλικά στοιχεία από μία αλατούχα ουσία και κυρίως από αλατούχα ύδατα (θάλασσα, ποτάμια και λίμνες). Εφαρμόζεται συνήθως σε θαλασσινό νερό και ανάλογα το βαθμό αφαίρεσης των αλάτων, μπορεί να παραχθεί πόσιμο νερό, νερό άρδευσης ή υφάλμυρο νερό.

Η τεχνική της αφαλάτωσης εφαρμόζεται κυρίως σε περιοχές με ξηρό κλίμα που είναι φτωχές σε πόσιμο νερό αλλά βρίσκονται κοντά σε θαλασσινό νερό. Έτσι η εγκατάσταση μονάδων αφαλάτωσης σε άνυδρες και με ελάχιστη ποσότητα διαθέσιμου νερού περιοχές είναι ζωτικής σημασίας για την οικονομική τους ανάπτυξη. Πιο συγκεκριμένα η αφαλάτωση είναι μια σημαντική πηγή νερού για άνυδρες περιοχές όπως η Μέση Ανατολή και τα νησιά της Καραϊβικής όπου η φυσική διαθεσιμότητα του πόσιμου νερού δεν επαρκεί για να καλύψει τις βασικές ανάγκες και οι παραδοσιακές επιλογές ύδρευσης ή η μεταφορά νερού από άλλα μέρη έχουν χαρακτηριστεί αδύνατες ή αντιοικονομικές.

Σύμφωνα με έρευνα της UNESCO για τα παγκόσμια αποθέματα νερού που πραγματοποιήθηκε το 2003, υπολογίστηκε ότι στα επόμενα 20 χρόνια η ποσότητα του νερού που αναλογεί στον καθένα θα μειωθεί κατά 30% ενώ περίπου 40% των ανθρώπων που ζουν στη γη δεν θα έχουν επαρκές νερό ακόμα και για υποτυπώδη υγιεινή. Επίσης, σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας και τη UNICEF, 1.1 δις άνθρωποι ζουν χωρίς πρόσβαση σε καθαρό πόσιμο νερό και 2.2 εκατ. άνθρωποι έχουν πεθάνει από το 2002 λόγω ασθενειών που σχετίζονται με την κατανάλωση μολυσμένου νερού ή με τη ξηρασία (*Συσκάκη, 2013*). Κατόπιν αυτού, γίνεται σαφές ότι η ανάπτυξη και η σωστή διαχείριση της τεχνικής της αφαλάτωσης ίσως είναι η λύση για το μείζον πρόβλημα της έλλειψης πόσιμου νερού και γενικότερα της λειψυδρίας που αντιμετωπίζει ο πλανήτης μας.



Σχήμα 1.1: ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΗ ΕΛΛΕΙΨΗ ΝΕΡΟΥ ΓΙΑ ΤΟ 2025 (International Water Management Institute-IWMI, 2000)

1.2. Ιστορική Αναδρομή της Αφαλάτωσης

1.2.1. Η αφαλάτωση στο παρελθόν

Η ιδέα της αφαλάτωσης ξεκινά από τους αρχαίους Έλληνες ναυτικούς οι οποίοι εξάτμιζαν το θαλασσινό νερό γύρω στον 4^ο αιώνα π.χ. όπως αναφέρει ο Αριστοτέλης. Άλλη περιγραφή αφαλάτωσης εντοπίζεται σε Άραβα συγγραφέα του 8^{ου} αιώνα που βασίζεται στη θερμική απόσταξη θαλασσινού νερού. Πολύ αργότερα, με την ανάπτυξη της ατμοπλοΐας, παρουσιάστηκε μεγάλη ανάγκη ποσοτήτων καθαρού ύδατος για την κίνηση των ατμομηχανών ώστε να μην προκαλείται ταχύτατη διάβρωση λόγω των αλάτων, με συνέπεια η προσπάθεια για αφαλάτωση του θαλασσινού νερού να καθίσταται αναγκαία.

Το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για αφαλάτωση νερού δόθηκε στην Αγγλία το 1869. Τον ίδιο χρόνο οι Άγγλοι εγκατέστησαν την πρώτη μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού στο Άντεν της Υεμένης για τις ανάγκες του στόλου τους. Το πρώτο μεγάλο εργοστάσιο αφαλάτωσης θαλασσινού νερού εγκαταστάθηκε στις Ολλανδικές Αντίλλες το 1930. Το 1950 η αμερικανική κυβέρνηση δημιουργεί ειδική υπηρεσία (Office of Saline Water-OSW) για την ανάπτυξη της αφαλάτωσης ενώ τη δεκαετία του 1970 αρχίζουν οι πρώτες σύγχρονες εφαρμογές θερμικής αφαλάτωσης σε χώρες της Μέσης Ανατολής (Δαλιούρης, 2013; Καραχάλιου, 2010).

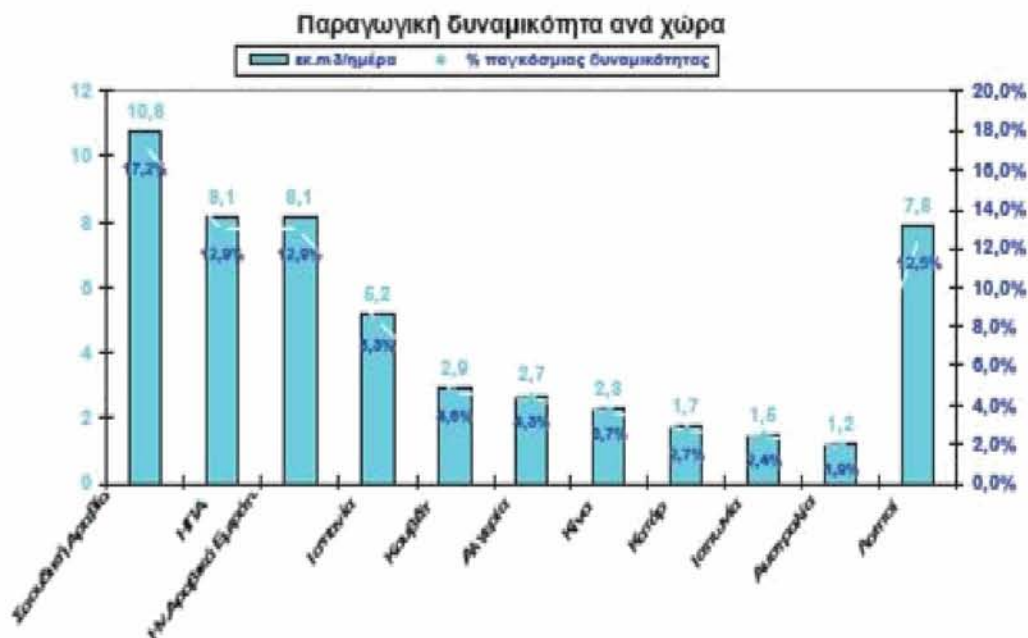
1.2.2. Η αφαλάτωση σήμερα

Στις μέρες μας, σύμφωνα με επίσημα στοιχεία της IDA (International Desalination Data) το 2009 υπήρχαν σε λειτουργία πάνω από 14000 μονάδες αφαλάτωσης σε 155 χώρες ανά τον κόσμο και η συνολικά εγκατεστημένη δυναμικότητα την ίδια χρονιά υπολογίστηκε στα 59.9 εκατομμύρια m^3 /ημέρα ενώ άλλα 9.1 εκατομμύρια m^3 /ημέρα βρίσκονταν υπό κατασκευή (Ράπτης, 2012). Περισσότερο από το μισό της παγκόσμιας δυναμικότητας είναι εγκατεστημένο στις άνυδρες χώρες της Μέσης Ανατολής και της Βόρειας Αφρικής οι οποίες καλύπτουν σημαντικότατο τμήμα των αναγκών τους με θερμικές διεργασίες αφαλάτωσης. Άλλες χώρες με επίσης σημαντικό δυναμικό όπως οι ΗΠΑ, η Ισπανία, η Κίνα, η Ιαπωνία, η Αυστραλία, το Ισραήλ και η Κύπρος χρησιμοποιούν κυρίως μεθόδους μεμβρανών. Σύμφωνα με τις προβλέψεις της Global Water Intelligence η παγκόσμια δυναμικότητα αφαλάτωσης επρόκειτο να φτάσει τα 107 εκατομμύρια m^3 /ημέρα το 2016 ενώ οι απαιτούμενες επενδύσεις θα ξεπερνούσαν τα 65 δις δολάρια (Ράπτης, 2012).

Τα παρακάτω διαγράμματα δείχνουν την εγκατεστημένη και υπό κατασκευή παγκόσμια δυναμικότητα αφαλάτωσης αλλά και τη δυναμικότητα των 10 πρώτων χωρών σε παραγωγή αφαλατωμένου νερού σύμφωνα με έρευνα της IDA για το 2009:



Σχήμα 1.2: ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΚΑΙ ΥΠΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ (Ράπτης, 2012)



Σχήμα 1.3: ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ 10 ΠΡΩΤΩΝ ΧΩΡΩΝ ΣΕ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΦΑΛΑΤΩΜΕΝΟΥ ΝΕΡΟΥ (Ράπτης, 2012)

Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι σε παγκόσμια κλίμακα είναι η πολυβάθμια εκτόνωση (Multiple Stage Flashing, MSF) και η αντίστροφη ώσμωση (Reverse Osmosis, RO), καθεμιά από τις οποίες παράγει το 43% του παγκόσμιου αφαλατωμένου νερού. Παρ' ότι όμως αυτές οι μέθοδοι έχουν την ίδια παραγωγή, η RO χρησιμοποιείται στο 68% των περιπτώσεων και μία τυπική μονάδα έχει μέση παραγωγή 1200 m³/ημέρα ενώ η MSF χρησιμοποιείται σε ποσοστό μόλις 9% και μία τυπική μονάδα έχει μέση παραγωγή 8800 m³/ημέρα (Συσκάκη, 2013). Ακολουθούν σε παραγωγικότητα η ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis, ED) με το 6% της παγκόσμιας ποσότητας αφαλατωμένου νερού, η μηχανική συμπίεση ατμών (Mechanical Vapor Compression, MVC) με 4% και η πολυβάθμια εξάτμιση (Multiple-Effect Distillation, MED) επίσης με 4%.

Στην Ελλάδα η τεχνολογία της αφαλάτωσης βρίσκει εφαρμογή στα νησιά του Αιγαίου όπου επικρατεί το ξηρό μεσογειακό κλίμα, οι υδάτινοι πόροι είναι περιορισμένοι και το κόστος του μεταφερόμενου νερού είναι υψηλό. Η μοναδική χρησιμοποιούμενη μέθοδος αφαλάτωσης στα ελληνικά νησιά είναι η αντίστροφη ώσμωση. Σύμφωνα με επίσημα στοιχεία του Υπουργείου Περιβάλλοντος, στην Ελλάδα λειτουργούν σήμερα περίπου 50 μονάδες αφαλάτωσης οι οποίες εξυπηρετούν την ύδρευση δήμων και κοινοτήτων με συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα αφαλάτωσης περίπου 35000 m³/ημέρα, ενώ υπάρχουν και εκατοντάδες μικρότερες για ιδιωτική χρήση (ξενοδοχεία, βιομηχανίες, κατοικίες). Οι σημαντικότερες εξ αυτών βρίσκονται στη Σύρο, στη Μύκονο και στη Χίο ενώ το λειτουργικό κόστος και το κόστος συντήρησης για τέτοιες μονάδες κυμαίνεται στα 0.3-2 €/m³ (Μαθιουδάκης, 2011).

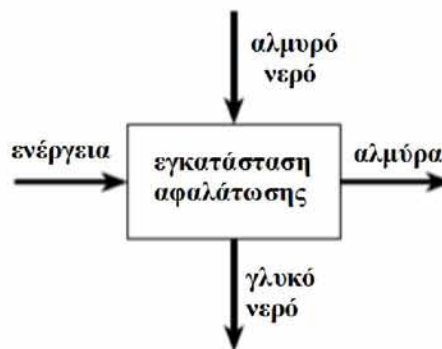
1.3. Τεχνολογίες Αφαλάτωσης

Η αφαλάτωση γενικά μπορεί να χαρακτηριστεί ως μία φυσική διαδικασία καθώς αποτελεί μέρος του υδρολογικού κύκλου. Από τη στιγμή που το νερό της βροχής φθάνει στο έδαφος, ρέει προς τη θάλασσα και καθώς κυλάει επάνω και διαμέσου της γης, διαλύει ορυκτά και άλλα υλικά με αποτέλεσμα να γίνεται σε σημαντικό βαθμό αλμυρό. Με το που φθάνει το νερό στη θάλασσα ή σε άλλα χαμηλά σημεία όπως η Νεκρά Θάλασσα, ένα μέρος του νερού της επιφάνειας εξατμίζεται μέσω της ηλιακής ενέργειας αφήνοντας πίσω του άλατα, ενώ οι υδρατμοί που προκύπτουν σχηματίζουν τα σύννεφα τα οποία παράγουν τη βροχή, συνεχίζοντας έτσι τον κύκλο.



Σχήμα 1.4: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Σήμερα υπάρχουν πολλές μέθοδοι με τις οποίες μπορεί να πραγματοποιηθεί η αφαλάτωση. Σε όλες, όμως, τις μεθόδους επιτελείται μία κοινή λειτουργία: το αλμυρό νερό εισέρχεται σε μία συσκευή η οποία το διαχωρίζει σε ένα ρεύμα ύδατος με χαμηλή συγκέντρωση σε διαλυμένα άλατα (ρεύμα προϊόντος) και σε ένα ρεύμα με υψηλή συγκέντρωση στα παραμένοντα άλατα (συμπύκνωμα ή άλμη).



Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι η συσκευή απαιτεί ενέργεια για να λειτουργήσει και για να μπορέσει να επιτευχθεί ο διαχωρισμός αυτός έχουν προσδιοριστεί διάφορες τεχνολογίες. Ανάλογα

με τη διαδικασία που ακολουθείται οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τέσσερις κατηγορίες:

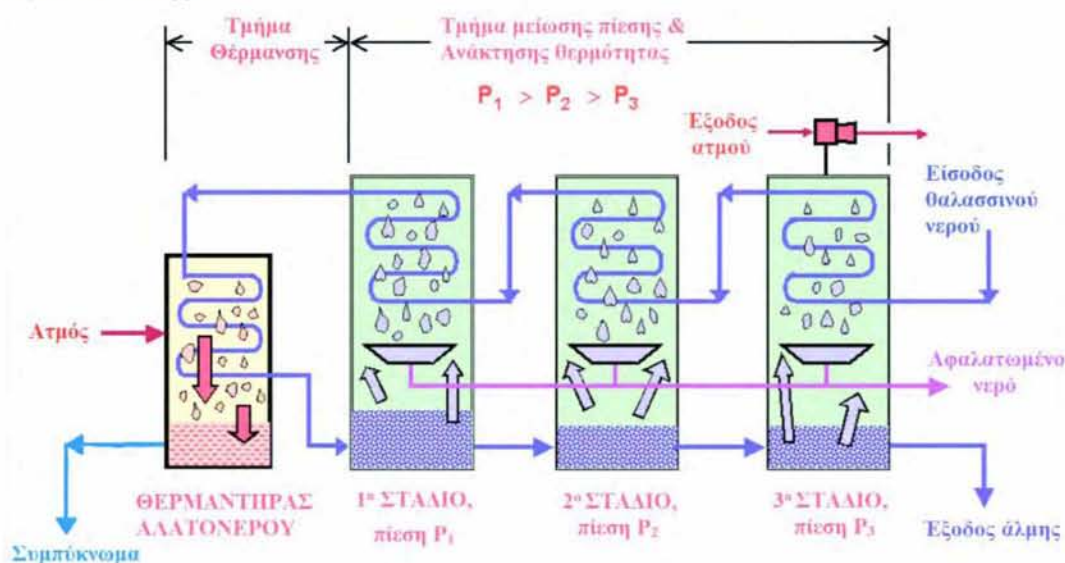
- I. **Στις μεθόδους αλλαγής φάσης (θερμικές διεργασίες),** όπου απαιτείται θερμότητα και παρατηρείται αλλαγή της φυσικής κατάστασης. Αυτές είναι η εξάτμιση και η κρυστάλλωση η οποία δεν χρησιμοποιείται ευρέως. Όσον αφορά την εξάτμιση οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι είναι η Πολυβάθμια Εκτόνωση (Multi-Stage Flash Distillation, MSF), η Πολυβάθμια Εξάτμιση (Multi -Effect Evaporation ή Distillation, ME ή MED), η Εξάτμιση με Μηχανική Συμπίεση Ατμών (Mechanical Vapor Compression, MVC) και η Ηλιακή Απόσταξη (Solar Distillation).
- II. **Στις μεθόδους μιας φάσης (υγρή) ή μεθόδους μεμβρανών** στις οποίες για την απομάκρυνση των αλάτων από τα ύδατα χρησιμοποιούνται μεμβράνες. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν η Αντίστροφη Ώσμωση (Reverse Osmosis, RO), η Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis, ED), η Αντίστροφη Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis Reversal, EDR), η Νανοδιήθηση (Nanofiltration, NF) και η Απόσταξη Μεμβρανών (Membrane Distillation, MD).
- III. **Στις αναπτυσσόμενες μεθόδους** οι οποίες έχουν χαμηλή εμπορευσιμότητα και γενικά βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο λειτουργίας όπως η Ύγρανση-Αφύγρανση (Humidification - Dehumidification, HDH), το Πάγωμα (Freezing), η Ιοντοανταλλαγή (Ion - Exchange Methods) και η Γεωθερμική Αφαλάτωση (Geothermal Desalination).
- IV. **Στις υβριδικές μεθόδους** (Methane Hydrate Crystallization) οι οποίες συνδυάζουν κάποιες από τις προαναφερθείσες μεθόδους ή χρησιμοποιούν Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ).

1.3.1. Θερμικές Μέθοδοι

α) Πολυβάθμια Εκτόνωση (Multi-Stage Flash Distillation, MSF)

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το θαλασσινό νερό αφού θερμανθεί σε θερμοκρασία λίγο χαμηλότερη από το σημείο βρασμού, εισέρχεται στον πρώτο θάλαμο όπου επικρατεί πίεση χαμηλότερη από την πίεση κορεσμού με συνέπεια να ατμοποιείται. Ο ατμός έρχεται σε επαφή με τους σωλήνες που μεταφέρουν το κρύο θαλασσινό νερό και υγροποιείται με αποτέλεσμα να συλλέγεται ως καθαρό νερό. Το φαινόμενο επαναλαμβάνεται στους επόμενους θαλάμους με την υπολειπόμενη άλμη

και με πίεση συνεχώς μειούμενη (λόγω της αντίστοιχης μείωσης της θερμοκρασίας της άλμης). Αυτές οι εγκαταστάσεις συμφέρει να βρίσκονται κοντά σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς ώστε να γίνεται καλύτερη αξιοποίηση του καυσίμου, δηλαδή ο ατμός υψηλής πίεσης πρώτα να εκτονώνεται στον ατμοστρόβιλο για την παραγωγή ισχύος και κατόπιν να χρησιμοποιείται για την αφαλάτωση. Μπορούμε δυνητικά να θεωρήσουμε ως βαθμό απόδοσης των θερμικών μονάδων αφαλάτωσης το πηλίκο της μάζας του παραγόμενου αποσταγμένου νερού προς την μάζα του ατμού που χρησιμοποιήθηκε. Για τη συγκεκριμένη μέθοδο, ένας τυπικός βαθμός απόδοσης είναι περίπου 8, ενώ μία μονάδα 20 βαθμίδων απαιτεί περίπου 290 kJ/kg προϊόντος (Καραχάλιου, 2010). Τέτοιες εγκαταστάσεις χρησιμοποιούνται κυρίως στη Μέση Ανατολή (Σαουδική Αραβία, Η.Α.Ε., Κουβέιτ) καλύπτοντας το 40% της παγκόσμιας χρήσης αφαλάτωσης.

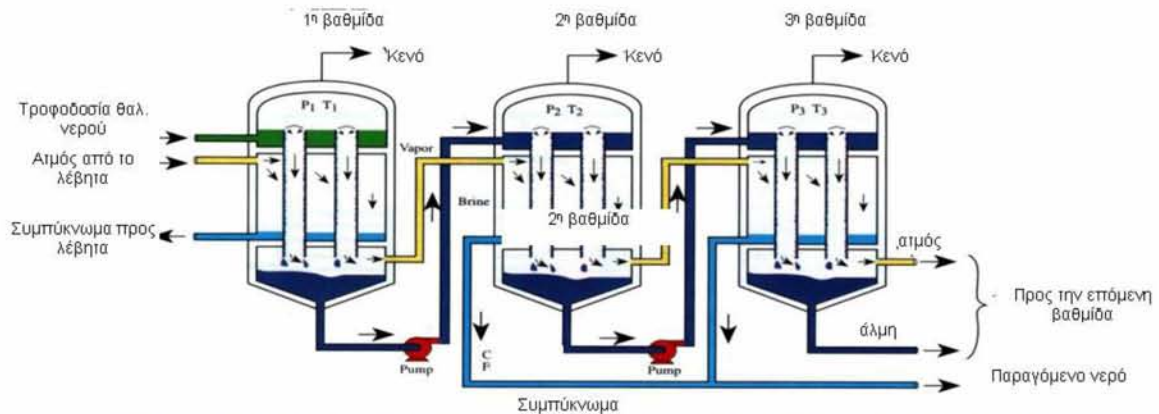


Σχήμα 1.5: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΑ ΕΚΤΟΝΩΣΗ

β) Πολυβάθμια Εξάτμιση (Multi-Effect Distillation, MED)

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι μια θερμική μέθοδος η οποία έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για περισσότερα από 100 χρόνια και είναι προγενέστερη της πολυβάθμιας εκτόνωσης. Είχε σταματήσει να εφαρμόζεται αφού αντικαταστάθηκε από την πολυβάθμια εκτόνωση όμως αρχίζει ξανά να κερδίζει έδαφος καθώς ο βαθμός απόδοσης της είναι καλύτερος από αυτόν της πολυβάθμιας εκτόνωσης. Στην πολυβάθμια εξάτμιση ο ατμός περνάει μέσα από σωλήνες, ενώ το κρύο θαλασσινό νερό ψεκάζεται πάνω τους δημιουργώντας ένα πολύ λεπτό στρώμα νερού, το οποίο εξατμίζεται άμεσα. Έτσι, μέρος του ατμού συμπυκνώνεται και συλλέγεται σαν καθαρό νερό, ενώ συνεχίζουν στην επόμενη βαθμίδα ο υπόλοιπος ατμός μαζί με το θαλασσινό νερό που απέμεινε από την ατμοποίηση. Σε κάθε θάλαμο υπάρχει αντλία κενού που υποβοηθά την εξάτμιση, με βαθμιαία μειούμενη πίεση σε κάθε βαθμίδα, ώστε το διάλυμα της άλμης να βράζει σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

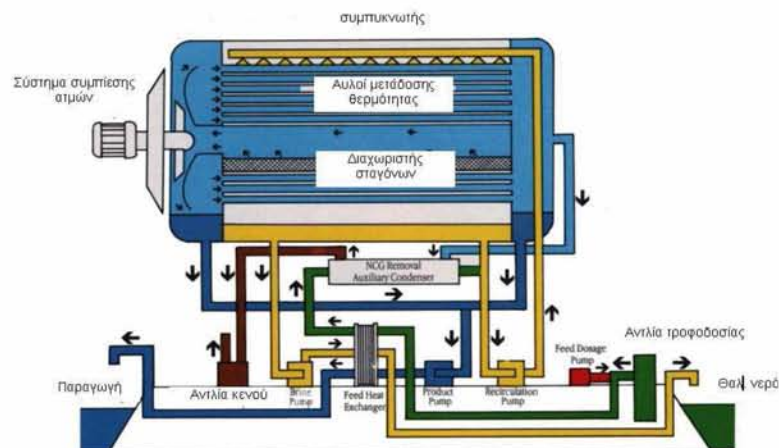
Στη μέθοδο αυτή συχνά χρησιμοποιούνται και συμπιεστές (μηχανικοί ή θερμικοί), ενώ οι παραλλαγές της προκύπτουν από την οριζόντια ή κάθετη διάταξη των σωλήνων ατμού και τη φορά του ατμού σε σχέση με την άλμη (ομορροή, αντιρροή ή παράλληλη).



Σχήμα 1.6: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΑ ΕΞΑΤΜΙΣΗ

γ) Εξάτμιση με Μηχανική Συμπίεση Ατμών (Mechanical Vapor Compression, MVC)

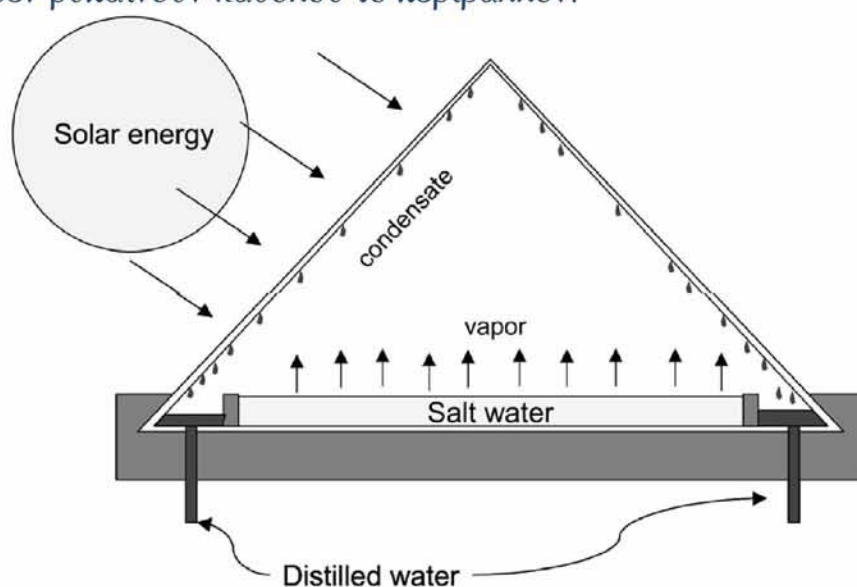
Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται συνήθως για μικρού ή μεσαίου μεγέθους μονάδες αφαλάτωσης και παράγει μέχρι και 3000m³ / ημέρα (π.χ. θέρετρα και βιοτεχνίες). Είναι απλούστερη σε σχέση με τις δύο προηγούμενες και πιο αποτελεσματική. Το κρύο νερό της θάλασσας ψεκάζεται πάνω σε σωλήνες που τους διαπερνά καυτός ατμός, θερμαίνεται και εξατμίζεται με τη βοήθεια αεροσυμπιεστή που δημιουργεί υποπίεση. Σκόπιμη είναι η δημιουργία λεπτού στρώματος νερού πάνω στους σωλήνες για την καλύτερη απόδοση της εγκατάστασης. Κατόπιν οι καθαροί υδρατμοί συλλέγονται, συμπυκνώνονται και λαμβάνονται ως προϊόν. Η μέθοδος αυτή διαφέρει από τις προαναφερθείσες στο γεγονός ότι λειτουργεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και η εξάτμιση προκαλείται αποκλειστικά και μόνο από την χαμηλή πίεση. Επομένως δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη πηγής θερμότητας.



Σχήμα 1.7: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΕΞΑΤΜΙΣΗ ΜΕΣΩ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΑΤΜΩΝ

δ) Ηλιακή Απόσταξη (Solar Distillation)

Η τεχνική που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό ενός ηλιακού αποστακτήρα βασίζεται στην αρχή του θερμοκηπίου. Οι ακτίνες του ήλιου διέρχονται μέσα από μια διαφανή οροφή και θερμαίνουν το θαλασσινό νερό που βρίσκεται στον πυθμένα ο οποίος είναι καλυμμένος με φωτοαπορροφητικό υλικό, συνήθως χρωστική μαύρου χρώματος ή διάφορα πολυμερή υλικά. Το νερό αυτό εξατμίζεται και ανεβαίνει στην οροφή που είναι κεκλιμένη, οπότε συμπυκνώνεται και συλλέγεται ως προϊόν από κατάλληλη διάταξη. Η μέγιστη θερμοκρασία ενός τέτοιου θερμοκηπίου φτάνει περίπου τους 45°C – 55°C το καλοκαίρι. Οι συσκευές αυτές δεν είναι πολύ αποτελεσματικές αφού χρησιμοποιούν μόνο το 50% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και παράγουν μόλις 4 λίτρα/ημέρα καθαρό νερό ανά m^2 εδάφους το οποίο δεν είναι απαλλαγμένο από μικροοργανισμούς αφού δεν βράζει σε μεγάλες θερμοκρασίες και άρα χρειάζεται περεταίρω επεξεργασία (Καραχάλιου, 2010). Όμως αυτού του είδους οι εγκαταστάσεις έχουν ελάχιστο ή μηδενικό κόστος λειτουργίας καθώς δεν χρησιμοποιούν κανένα είδους καυσίμου και ως εκ τούτου δεν ρυπαίνουν καθόλου το περιβάλλον.



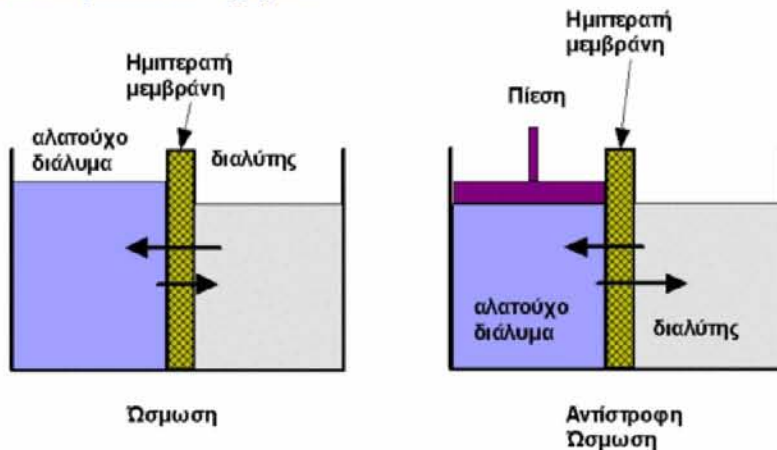
Σχήμα 1.8: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΗΛΙΑΚΗ ΑΠΟΣΤΑΞΗ

1.3.2. Μέθοδοι Μεμβρανών

α) Αντίστροφη Ώσμωση (Reverse Osmosis, RO)

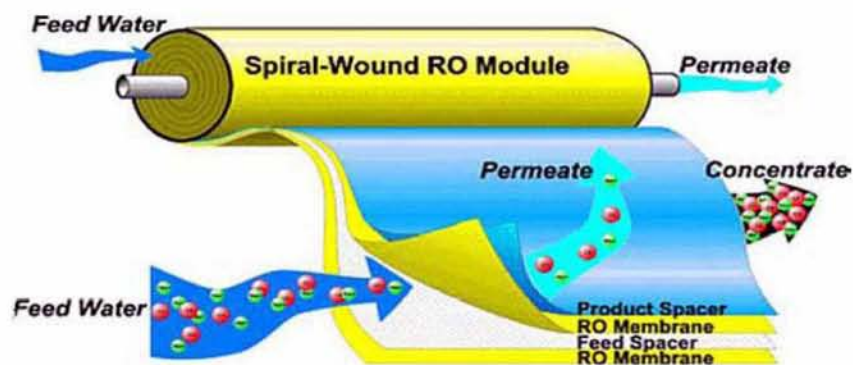
Η διεργασία αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση στηρίζεται σε αντιστροφή του φυσικού φαινομένου της ώσμωσης, κατά το οποίο ο διαλύτης (αραιότερο διάλυμα) κινείται αυθόρμητα προς τη διαλυμένη ουσία (πυκνότερο διάλυμα) μέσω μεμβράνης που είναι διαπερατή για τα μόριά του, όχι όμως και για τα μόρια της διαλυμένης ουσίας, μέχρι να εξισωθούν οι συγκεντρώσεις τους. Χωρίς την ύπαρξη της μεμβράνης θα

συνέβαινε απλή ανάμιξη των δυο διαλυμάτων και η διαδικασία αυτή ονομάζεται διάχυση. Η πίεση που πρέπει να ασκηθεί στο πυκνότερο διάλυμα για να λάβει χώρα το φαινόμενο της ώσμωσης ονομάζεται οσμωτική πίεση. Αν λοιπόν ασκήσουμε πίεση μεγαλύτερη της οσμωτικής στο πυκνότερο διάλυμα τότε η ροή αντιστρέφεται και έχουμε έξοδο του καθαρού νερού από το πυκνότερο διάλυμα (αλατούχο) στο αραιότερο (διαλύτη). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αντίστροφη ώσμωση. Η διαδικασία της ώσμωσης και της αντίστροφης ώσμωσης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



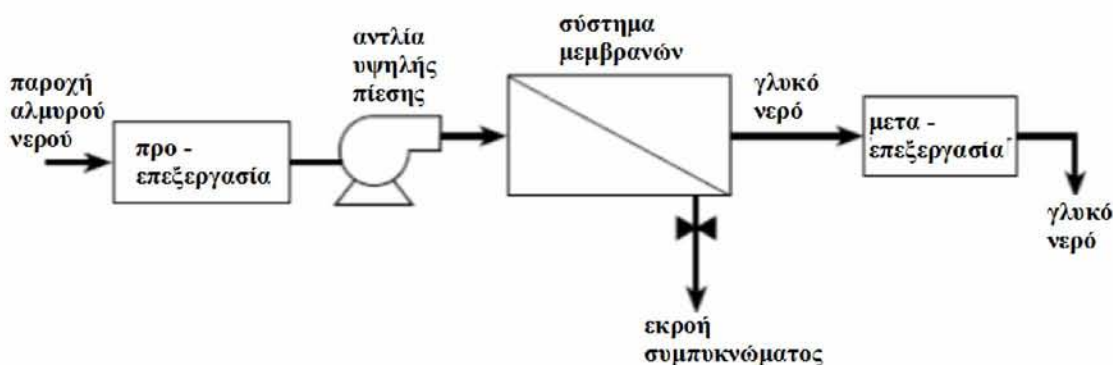
Σχήμα 1.9: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΩΣΜΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ

Στις σύγχρονες εφαρμογές αφαλάτωσης η διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης είναι συνδεδεμένη με μία αντλία υψηλής πίεσης που διοχετεύει συνεχώς θαλασσινό νερό σε μεμβράνες που βρίσκονται μέσα σε ένα δοχείο υψηλής πίεσης (high pressure vessel). Το διάλυμα τροφοδοσίας (feed water) διαχωρίζεται στο διήθημα (καθαρό νερό, 30 - 40 % του νερού εισόδου) που διέρχεται από τις μεμβράνες (permeate water) και στο απορριπτόμενο διάλυμα υψηλής συγκέντρωσης αλάτων, την άλμη (brine). Το απορριπτόμενο διάλυμα είναι το 60 - 70 % του νερού τροφοδοσίας και εκεί παραμένει το 99.8 % των αλάτων του διηθήματος. Το διήθημα είναι νερό εξαιρετικά χαμηλής περιεκτικότητας σε άλατα κατάλληλο για ύδρευση, άρδευση και τις περισσότερες βιομηχανικές χρήσεις (Ράπτης, 2012).



Σχήμα 1.10: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΩΣΜΩΣΗ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙ ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΗ ΜΕΜΒΡΑΝΗ

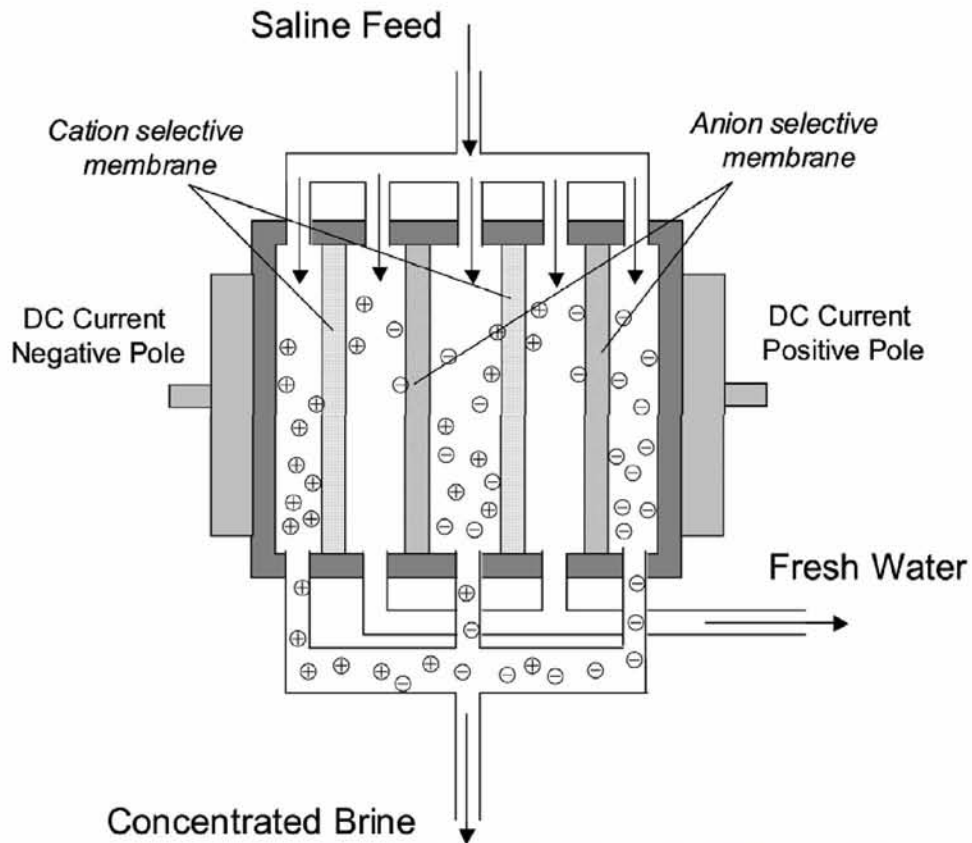
Μία μονάδα αντίστροφης όσμωσης αποτελείται από τρία υποσυστήματα: α) το σύστημα προ-επεξεργασίας, β) το κυρίως σύστημα αφαλάτωσης και γ) το σύστημα μετά-επεξεργασίας. Πραγματοποιείται μέσα σε χαλύβδινα δοχεία που περιέχουν διατάξεις διαδοχικών ζευγών μεμβρανών που φτάνουν μέχρι τις 200 ενώ η διάρκεια ζωής των μεμβρανών είναι 1½ - 2 χρόνια. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να φτάσει τις 7 KWh ανά 5.000 lt πόσιμου νερού και μπορεί να προέρχεται από την ηλιακή ενέργεια μετά από φωτοβολταϊκή μετατροπή, καθιστώντας το σύστημα αυτοδύναμο (Καραχάλιον, 2010).



Σχήμα 1.11: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΤΑΔΙΩΝ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ

β) Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis, ED)

Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται η αρχή της ηλεκτρόλυσης για την απομάκρυνση των αλάτων από ένα υδατικό διάλυμα. Η ηλεκτροδιάλυση διαφέρει από τις άλλες μεθόδους διαχωρισμού με χρήση μεμβρανών στο γεγονός ότι η “κινούσα δύναμη” δεν είναι η διαφορά πίεσης ή η διαφορά συγκέντρωσης αλλά η διαφορά του ηλεκτρικού δυναμικού που εφαρμόζεται. Για την ηλεκτροδιάλυση χρησιμοποιούνται 100-400 μεμβράνες (επιφάνειας 0.5-2 m²) οι οποίες είναι διαπερατές μόνο από ανιόντα ή κατιόντα και τοποθετούνται εναλλάξ και παράλληλα σχηματίζοντας διαμερίσματα εύρους 1mm ενώ στα πλευρικά τοιχώματα υπάρχουν τα ηλεκτρόδια της συσκευής που συνδέονται με πηγή συνεχούς ρεύματος (100A στα 150V) (Συσκάκη, 2013). Το προς επεξεργασία διάλυμα διοχετεύεται διαμέσου των διαμερισμάτων που σχηματίζουν οι μεμβράνες, οπότε υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου τα κατιόντα οδεύουν προς την κάθοδο και τα ανιόντα προς την άνοδο. Όμως τα κατιόντα διέρχονται μόνο από τις μεμβράνες κατιόντων και ανακλώνται από τις μεμβράνες ανιόντων ενώ το αντίστροφο ισχύει για τα ανιόντα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πλήρη απομάκρυνση των ιόντων από ορισμένα διαμερίσματα και την αύξηση της συγκέντρωσης των ιόντων στα γειτονικά διαμερίσματα. Έτσι το απελευθερωμένο από ιόντα διάλυμα (αφαλατωμένο νερό) συλλέγεται ως το προϊόν της διεργασίας.



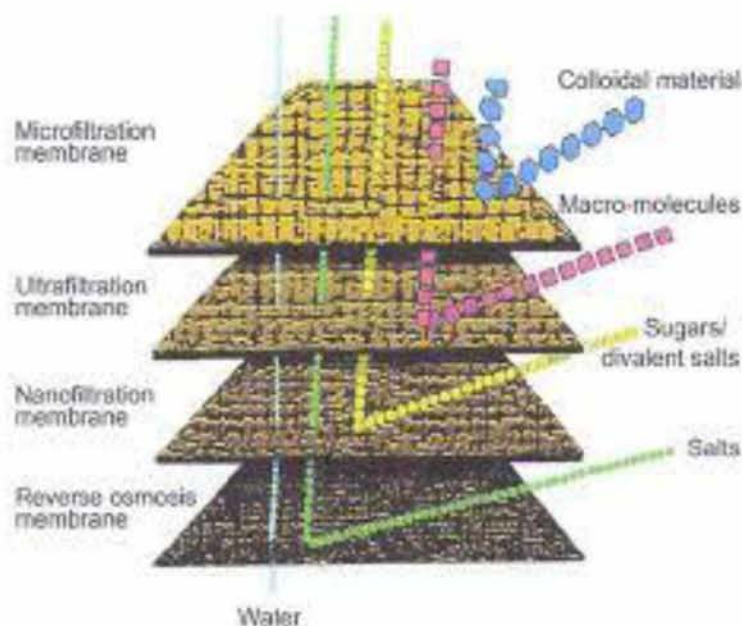
Σχήμα 1.12: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΛΥΣΗ

γ) Αντίστροφη Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis Reversal, EDR)

Μια μονάδα αντίστροφης ηλεκτροδιάλυσης λειτουργεί με την ίδια αρχή όπως μια πρότυπη μονάδα ηλεκτροδιάλυσης, με τη διαφορά ότι 3-4 φορές την ώρα η πολικότητα των ηλεκτροδίων αντιστρέφεται, με αποτέλεσμα το κανάλι της άλμης και η ροή του καναλιού του παραγόμενου νερού να ενεργοποιούνται. Αμέσως μετά την αντιστροφή, τα ιόντα έλκονται προς την αντίθετη κατεύθυνση κατά μήκος της στοιβας των μεμβρανών και το νερό που παράγεται χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της στοιβας και των γραμμών. Μετά την έκλυση η μονάδα επανέρχεται στην παραγωγή νερού. Η έκλυση επιτρέπει στη μονάδα να λειτουργεί με λιγότερα χημικά προεπεξεργασίας και ελαχιστοποιεί τη ρύπανση της μεμβράνης. Οι μονάδες αντίστροφης ηλεκτροδιάλυσης μπορούν να λειτουργήσουν ακόμα και αν η θολότητα του νερού τροφοδοσίας είναι υψηλή ενώ είναι λιγότερο επιρρεπείς σε βιορύπανση σε σχέση με τις μονάδες αντίστροφης όσμωσης.

δ) *Νανοδιήθηση (Nanofiltration, NF)*

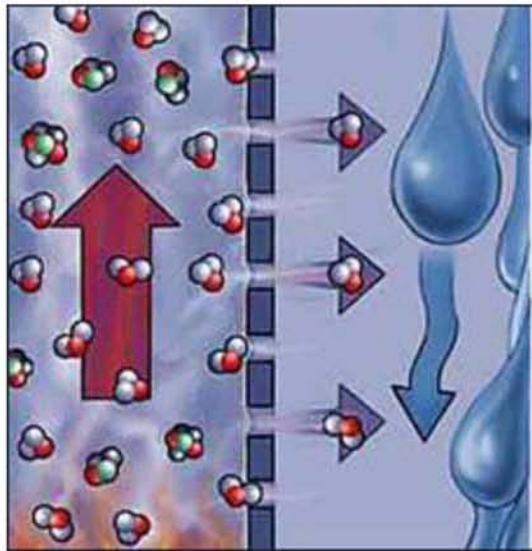
Η νανοδιήθηση είναι μία σχετικά πρόσφατη μέθοδος μεμβρανών, τα χαρακτηριστικά της οποίας παρομοιάζουν αυτά της αντίστροφης όσμωσης. Η NF αρχικά δημιουργήθηκε με σκοπό τον εκλεκτικό διαχωρισμό των διαλυμένων και οργανικών ουσιών από το νερό, αλλά πλέον συμπεριλαμβάνει μία ποικιλία διαμορφώσεων και υλικών μεμβρανών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές όπως η επεξεργασία των βιομηχανικών υδάτων και υγρών αποβλήτων. Οι μεμβράνες της επιτρέπουν την επιλεκτική διέλευση ιόντων και μη φορτισμένων διαλυμένων ουσιών βάσει φορτίου και μεγέθους ενώ μπορούν να λειτουργήσουν σε πολύ χαμηλότερες πιέσεις σε σχέση με αυτές της αντίστροφης όσμωσης.



Σχήμα 1.13: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΝΑΝΟΔΙΗΘΗΣΗ

ε) *Απόσταξη Μεμβρανών (Membrane Distillation, MD)*

Η MD είναι μία μέθοδος αφαλάτωσης που συνίσταται από τη θερμοκρασιακή διαβάθμιση διαμέσου δυο μεμβρανών (μία πορώδης και μία υδρόφοβη), ανάμεσα σε ένα ζεστό διάλυμα τροφοδοσίας και ένα κρύο διάλυμα διήθησης. Περιλαμβάνει ταυτόχρονη μεταφορά μάζας και θερμότητας όπως η εξάτμιση των μορίων του νερού, η μεταφορά των υδρατμών μέσα από πορώδη μεμβράνη και η συμπύκνωση των υδρατμών στη ψυχρή διεπιφάνεια. Έχει χαμηλό κόστος εξοπλισμού και καλή απόδοση υπό ήπιες συνθήκες λειτουργίας σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους απόσταξης όπως η MSF ή τις μεθόδους που χρησιμοποιούν πίεση αντί για θερμοκρασία ως κινητήρια δύναμη όπως η RO. Παρόλα αυτά τα πλεονεκτήματα, η απόσταξη μεμβρανών έχει κερδίσει λίγη αποδοχή και δεν έχει εφαρμοστεί ακόμα πλήρως σε βιομηχανικό επίπεδο.



Σχήμα 1.14: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ

1.3.3. Αναπτυσσόμενες Μέθοδοι

α) Υγρανση-Αφύγρανση (Humidification - Dehumidification, HDH)

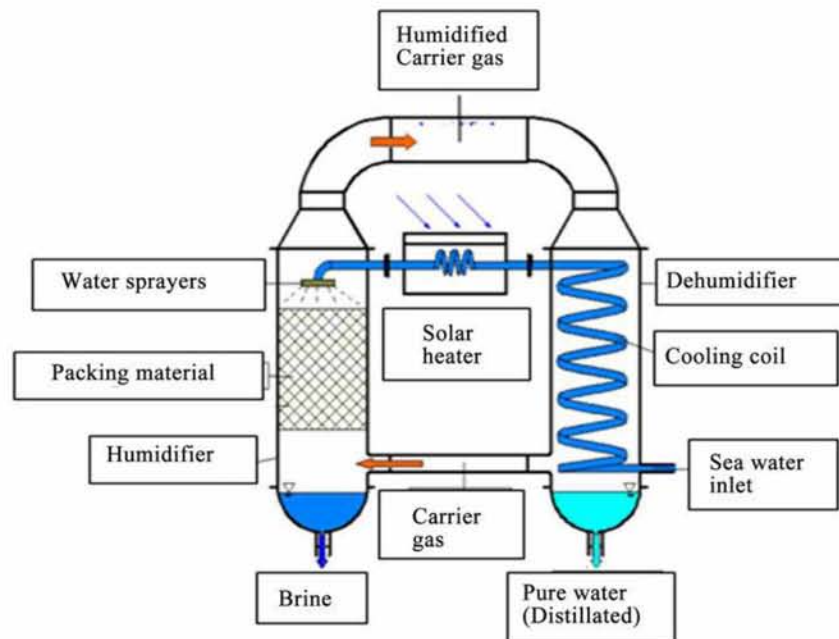
Η αφαλάτωση με HDH είναι μία καινοτόμος μέθοδος η οποία μιμείται το φυσικό κύκλο του νερού σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα και θεωρείται η μετεξέλιξη του ηλιακού αποστακτήρα. Βασίζεται στην εξάτμιση του θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού και στη συνεχή συμπίκνωση του παραγόμενου ατμού. Ο κύκλος της μεθόδου αποτελείται από τρία υποσυστήματα:

- ❖ το θερμαντήρα του θαλασσινού / υφάλμυρου νερού ή και του αερίου μεταφοράς, με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας
- ❖ τον υγραντήρα ή εξατμιστήρα
- ❖ τον αφυγραντήρα ή συμπυκνωτή

Η μέθοδος αυτή υπερτερεί σημαντικά της ηλιακής απόσταξης καθώς οι διάφορες λειτουργικές διαδικασίες (ηλιακή απορρόφηση, εξάτμιση, συμπίκνωση και ανάκτηση θερμότητας) λαμβάνουν χώρα σε ξεχωριστά τμήματα και όχι σε ένα ενώ πραγματοποιείται και ανάκτηση της λανθάνουσας θερμότητας συμπίκνωσης που χρησιμοποιείται για προθέρμανση του νερού και η οποία στην ηλιακή απόσταξη χάνεται μέσω του γυάλινου καλύμματος του αποστακτήρα. Οι παράγοντες αυτοί συντελούν στον περιορισμό των θερμικών απωλειών και βελτιώνουν τη συνολική απόδοση του συστήματος.

Μία πιο εξελιγμένη εκδοχή της μεθόδου είναι όταν ο αέρας που εισέρχεται, επανακυκλοφορεί σε ένα κλειστό βρόγχο ανάμεσα σε υγραντήρα και αφυγραντήρα ενώ και το νερό τροφοδοσίας

επανακυκλοφορεί μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή ανάκτηση. Ο αέρας σε αυτό το σύστημα κινείται μέσω φυσικής συναγωγής ή μέσω μηχανικών φυσητήρων ενώ το νερό τροφοδοσίας κυκλοφορεί με τη βοήθεια κάποιας αντλίας. Τέλος, περισσότερες παραλλαγές της μεθόδου αυτής θα συζητηθούν εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 1.15: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΥΓΡΑΝΣΗ-ΑΦΥΓΡΑΝΣΗ

β) Πάγωμα (Freezing)

Η αφαλάτωση με ψύξη ή πάγωμα εκμεταλλεύεται την αδιαλυτότητα των αλάτων στον πάγο. Κατά τη διαδικασία αυτή τα διαλυμένα άλατα εξαιρούνται με φυσικό τρόπο από τη διαδικασία σχηματισμού των κρυστάλλων του πάγου και στη συνέχεια απομακρύνονται με έκπλυση τα άλατα που είναι προσκολλημένα στους κρυστάλλους. Κατόπιν αυτού, ο πάγος υποβάλλεται σε τήξη. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνονται οι μικρές θεωρητικά απαιτήσεις σε ενέργεια, το ελάχιστο δυναμικό διάβρωσης και η ελάχιστη απόθεση αλάτων αλλά μειονεκτεί στο γεγονός ότι ο χειρισμός και η επεξεργασία του μίγματος νερού-πάγου έχουν μεγάλη τεχνική πολυπλοκότητα, με αποτέλεσμα να θεωρείται μέθοδος χαμηλής εμπορικότητας.

γ) Ιοντοανταλλαγή (Ion - Exchange)

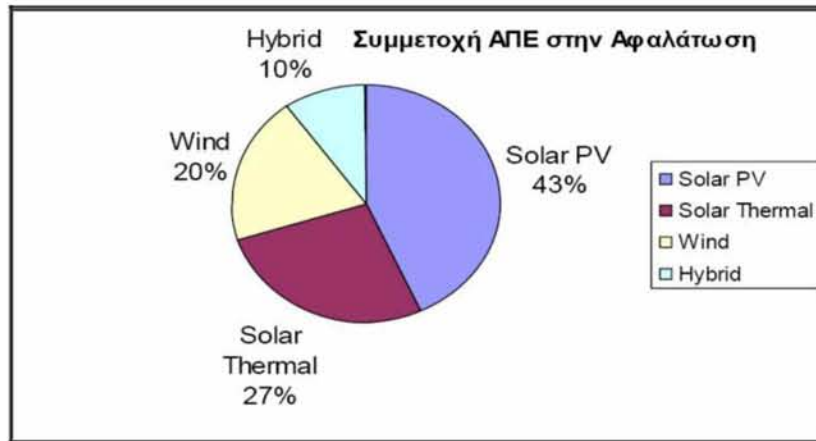
Η μέθοδος ανταλλαγής ιόντων χρησιμοποιεί ρητίνες για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων ιόντων στο νερό. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιεί ρητίνες ανιόντων και κατιόντων οι οποίες προσροφούν τα ιόντα του διαλύματος και τα ανταλλάζουν με τα κινητά ιόντα που βρίσκονται στο πλέγμα της ρητίνης. Η ιοντοανταλλαγή μπορεί να είναι μη εκλεκτική ή να έχει δεσμευτικές προτιμήσεις για ορισμένες κατηγορίες ιόντων ανάλογα με τη χημική τους δομή, το μέγεθος και το φορτίο. Σήμερα, βρίσκει κυρίως εφαρμογή στην προεπεξεργασία των ροών τροφοδοσίας άλλων μεθόδων με σκοπό την αποσκλήρυνση του νερού.



Σχήμα 1.16: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΙΟΝΤΟΑΝΤΑΛΛΑΓΗ

δ) Γεωθερμική Αφαλάτωση (Geothermal Desalination)

Η γεωθερμική αφαλάτωση είναι μία πρωτοπόρα μέθοδος αφαλάτωσης η οποία εκμεταλλεύεται τη θερμότητα που προέρχεται από τη γη για να παραγάγει πόσιμο νερό. Τα κύρια μέρη του συστήματος είναι: i) η πηγή θερμότητας, ii) ο ταμιευτήρας και iii) το ρευστό που είναι ο φορέας θερμότητας. Εάν οι γεωθερμικές πηγές περιέχουν στη μεγαλύτερη αναλογία ατμό υπό πίεση, τότε ο ατμός συμπυκνώνεται και παράγεται κατευθείαν αφαλατωμένο νερό. Η μέθοδος αυτή έχει αρκετά πλεονεκτήματα καθώς είναι οικονομική, εύκολη στο χειρισμό και δεν επιφέρει επιπτώσεις στο περιβάλλον.

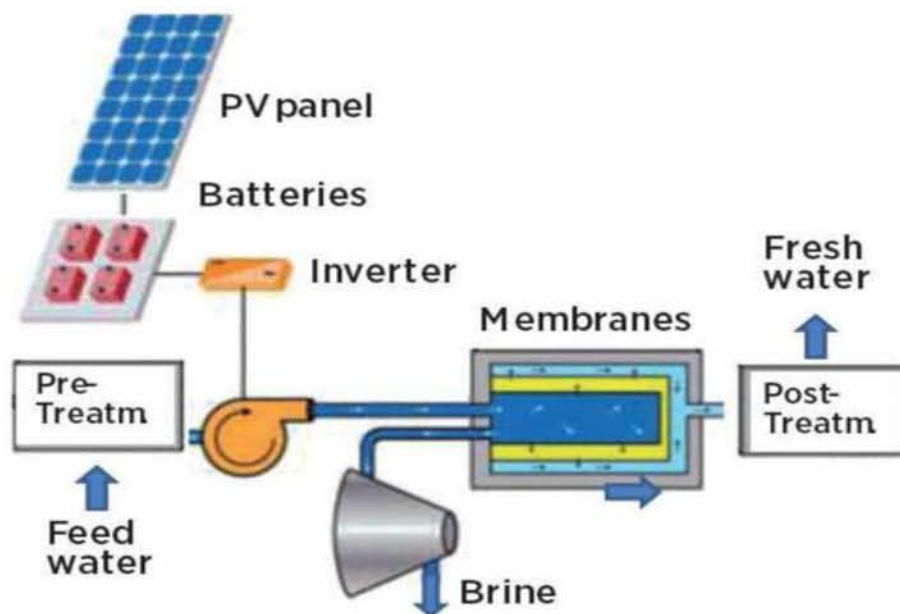


Σχήμα 1.18: ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΔΙΑΦΕΡΩΝ ΜΟΡΦΩΝ Α.Π.Ε. ΣΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ (Ράπτης, 2012)

Ωστόσο όλες οι μελέτες έδειξαν πως τα συστήματα αφαλάτωσης αντιμετωπίζουν προβλήματα όταν συνδέονται με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας καθώς:

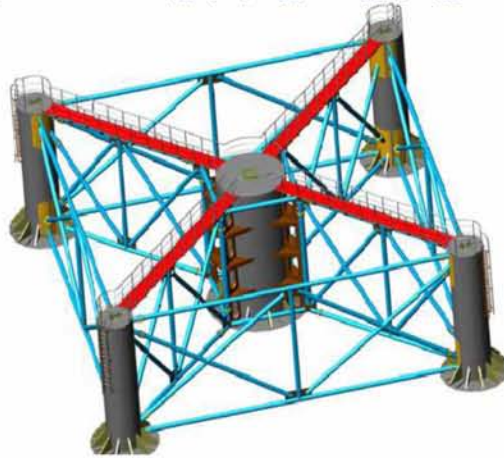
- Τα συστήματα Α.Π.Ε. δεν έχουν συνεχή παροχή ενέργειας ώστε να ανταποκρίνονται ανά πάσα στιγμή στη ζήτηση ενέργειας
- Η τεχνολογία συλλογής ή σύζευξης δεν έχει αναπτυχθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να παρέχει τη φθηνή ενέργεια σε χαμηλό κόστος

Όμως, ο συνδυασμός φωτοβολταϊκών πάνελ ή ανεμογεννήτριας με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο ή με γεννήτρια ντίζελ μπορεί να δώσει σημαντικές λύσεις στο πρόβλημα της ενεργειακής τροφοδοσίας συστημάτων αφαλάτωσης καθώς με αυτόν τον τρόπο αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της μη συνεχούς παροχής ενέργειας από τις Α.Π.Ε. πολύ αποτελεσματικά.



Σχήμα 1.19: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΩΣΜΩΣΗ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΠΑΝΕΛ

Ακόμη, είναι αξιοσημείωτο ότι η Ελλάδα έχει καινοτομήσει στο χώρο αυτό καθώς το 2007 εγκαινιάστηκε η «Υδριάδα», η πρώτη ενεργειακά αυτόνομη πλωτή μονάδα αφαλάτωσης στον κόσμο, η οποία αντλεί την ενέργειά της από μία πλωτή ανεμογεννήτρια και από μία συστοιχία φωτοβολταϊκών πάνελ. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί τον άνεμο για την κυρίως λειτουργία της πλωτής εγκατάστασης και επικουρικά τον ήλιο για την ηλεκτροδότηση των συστημάτων ελέγχου και τηλεχειρισμού της. Η μονάδα αυτή κόστισε 2.8 εκατ. ευρώ και μπορεί να αποδώσει 70m³/ημέρα πόσιμου νερού, ποσότητα αρκετή για 300 άτομα (Συσκάκη, 2013). Δυστυχώς, όμως, παρά την καινοτόμα κατασκευή της, σήμερα έχει απαξιωθεί και υπολειτουργεί λόγω οικονομικών συμφερόντων και χαμηλής απήχησης στην κοινωνία.



Σχήμα 1.20: ΤΡΙΣΕΛΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΙΑΔΑΣ (Συσκάκη, 2013)

Συμπερασματικά, παρά το γεγονός πως ο συνδυασμός Α.Π.Ε. και αφαλάτωσης είναι τεχνολογικά εφικτός και θεωρητικά μπορεί να αποτελέσει μία οικονομική λύση, πρακτικά οι εγκαταστάσεις αυτής της κατηγορίας είναι αρκετά περιορισμένες και έχουν εφαρμοστεί μόνο σε χαμηλής δυναμικότητας εγκαταστάσεις.

1.4. Σύγκριση Μεθόδων Αφαλάτωσης

Γενικά δεν υπάρχει κάποια μέθοδος που να θεωρείται δεδομένα καλύτερη από τις υπόλοιπες. Ανάλογα την περίπτωση και το πού θέλει να δώσει ο καθένας έμφαση, η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου επαφίεται στις εξής παραμέτρους:

- Την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας (θαλασσινό ή υφάλμυρο)
- Την ποσότητα και την ποιότητα του παραγόμενου νερού
- Το κόστος επένδυσης
- Τη διαθεσιμότητα χώρου
- Τις ενεργειακές απαιτήσεις και τις διαθέσιμες μορφές ενέργειας
- Τη διαθεσιμότητα και την εμπειρία του προσωπικού

Σε γενικές γραμμές η μέθοδος που έχει επικρατήσει παγκοσμίως στην αφαλάτωση θαλασσινού και υφάλμυρου νερού είναι η αντίστροφη ώσμωση. Αυτό οφείλεται στην αξιοπιστία της σε όλο το εύρος μεγεθών, στη σχετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας αλλά και στο χαμηλό επενδυτικό κόστος (500-1000 USD ανά m^3 /ημέρα) λόγω συνεχούς βελτίωσης και εξέλιξης των μεμβρανών και βελτίωσης της απόδοσης των αντλιών. Χονδρικά, όλες οι μέθοδοι αφαλάτωσης χαρακτηρίζονται ως ενεργοβόρες αφού οι ανάγκες τους σε ενέργεια ενδεικτικά μπορούν να φτάσουν τις 15 kWh/ m^3 για τις μονάδες MVC και τις 20 kWh/ m^3 για μονάδες MSF. Ακόμη, η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης με τη χρήση συστημάτων ανάκτησης ενέργειας έχει καταφέρει να μειώσει δραστικά την κατανάλωση ενέργειας περίπου στις 2.5 kWh/ m^3 για μεγάλες μονάδες αφαλάτωσης σε σχέση με τις 5-8 kWh/ m^3 που χρειαζόνταν χωρίς ανάκτηση ενέργειας (Καραχάλιου, 2010).

Ακολουθεί αναλυτικός πίνακας που συγκρίνει τα διάφορα κόστη που σχετίζονται με τη λειτουργία μίας μονάδας αφαλάτωσης για τις τέσσερις πιο εμπορικές μεθόδους:

Διεργασία Αφαλάτωσης	Αρχικό Κόστος Επένδυσης (€/m ³ ημέρα)	Ενεργειακό Κόστος (€/m ³)	Κόστος Αναλώσιμων (€/m ³)	Κόστος Εργατικών (€/m ³)	Κόστος Συντήρησης (€/m ³)	Συνολικό Κόστος (€/m ³)
Πολυβάθμια Εκτόνωση (MSF)	1000-2000	0.6-1.8	0.03-0.09	0.03 0.20	0.02-0.06	0.68-2.15
Πολυβάθμια Εξάτμιση (MED)	900-1800	0.38-1.12	0.02-0.15	0.03 0.20	0.02-0.06	0.45-1.53
Μηχανική Συμπίεση Ατμών (MVC)	900-2500	0.56-2.24	0.02-0.15	0.03 0.20	0.02-0.06	0.63-2.83
Αντίστροφη ώσμωση (RO)	800-1600	0.32-1.28	0.09-0.25	0.03 0.20	0.02-0.06	0.46-1.78

Σχήμα 1.21: ΔΙΑΦΟΡΑ ΚΟΣΤΗ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ: MSF, MED, MVC ΚΑΙ RO (Κύρου, 2017)

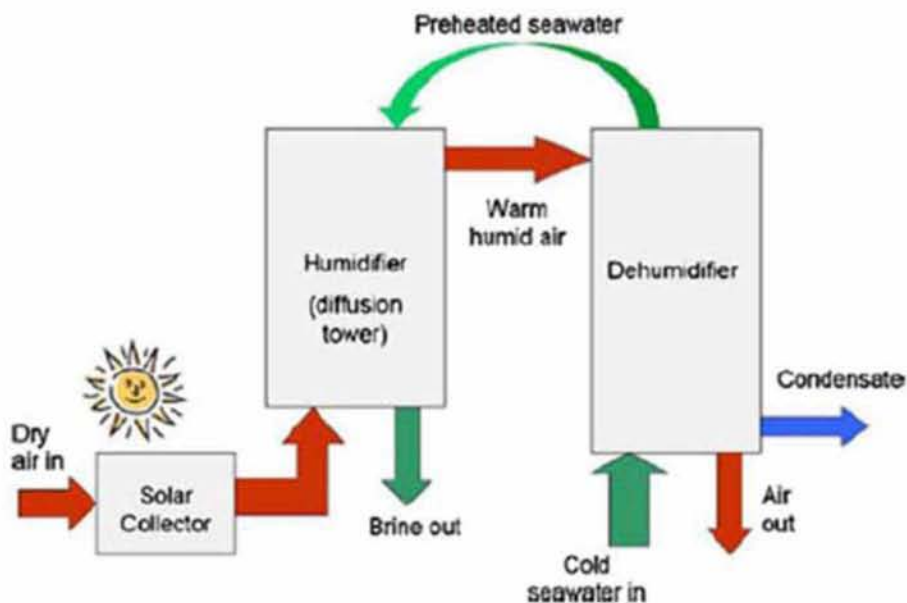
Ένας εξίσου σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το κόστος του παραγόμενου νερού είναι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που οφείλονται στο απορριπτό νερό (άλμη) από τις μονάδες αφαλάτωσης. Η μελέτη της θαλάσσιας περιοχής, η σωστή σχεδίαση του συστήματος απόρριψης (χρήση διανομέων άλμης -brine distributors) και η χρήση αγωγών νερού απόρριψης μεγάλου μήκους σε απόσταση από την ακτή ενδέχεται να αυξήσουν κατά ένα ποσοστό το κόστος επένδυσης, όμως θεωρούνται απαραίτητα μέσα πρόληψης για τη θαλάσσια ισορροπία της περιοχής.

Κεφάλαιο 2^ο: Περιγραφή και Εξέλιξη των Τεχνολογιών Αφαλάτωσης με Ύγρανση - Αφύγρανση (HDH)

2.1. Περιγραφή και Ταξινόμηση της μεθόδου

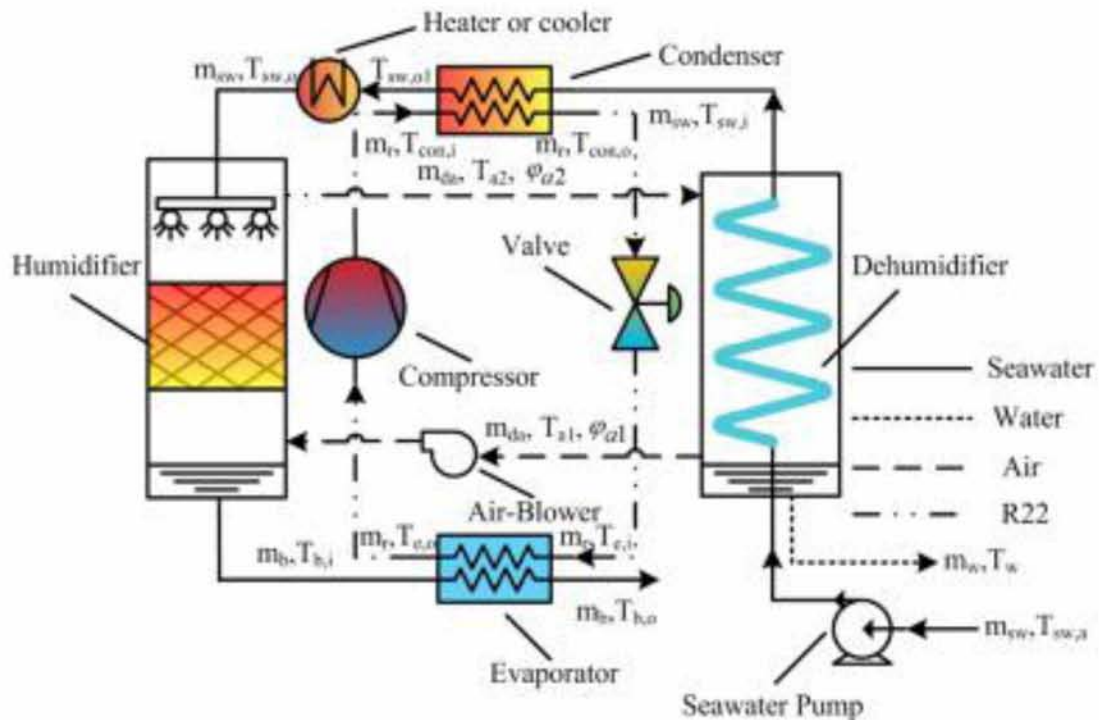
Οι διαδικασίες της ύγρανσης και της αφύγρανσης μπορούν να παρατηρηθούν στη φύση καθώς όταν το νερό της θάλασσας θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία, ένα μέρος του εξατμίζεται και υγραίνει τον περιβάλλοντα αέρα. Όταν αυτός ανυψωθεί, σχηματίζονται τα σύννεφα τα οποία κάποια στιγμή αφυγραίνονται προκαλώντας τη βροχή.

Μια απλή συσκευή HDH αποτελείται: α) από τον εξατμιστήρα ή υγραντήρα όπου το εργαζόμενο αέριο (συνήθως αέρας) θερμαίνεται και υγραίνεται από τους υδρατμούς του νερού που εξατμίζεται, β) από το συμπυκνωτή ή αφυγραντήρα όπου μέρος της υγρασίας του υγρού αέρα συμπυκνώνεται παράγοντας το αφαλατωμένο νερό και γ) από έναν εξωτερικό προθερμαντήρα ο οποίος θερμαίνει το νερό τροφοδοσίας ή/και τον εισερχόμενο αέρα.



Σχήμα 2.1: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΙΑΣ ΑΠΛΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ HDH

Σε αυτά τα μέρη, ανάλογα την πολυπλοκότητα της συσκευής και την απόδοση που απαιτείται, μπορούν να προστεθούν και άλλες συσκευές όπως ένας ηλιακός συλλέκτης, μία δεξαμενή αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας, ένας μηχανικός φυσητήρας ή μία βαλβίδα στραγγαλισμού.

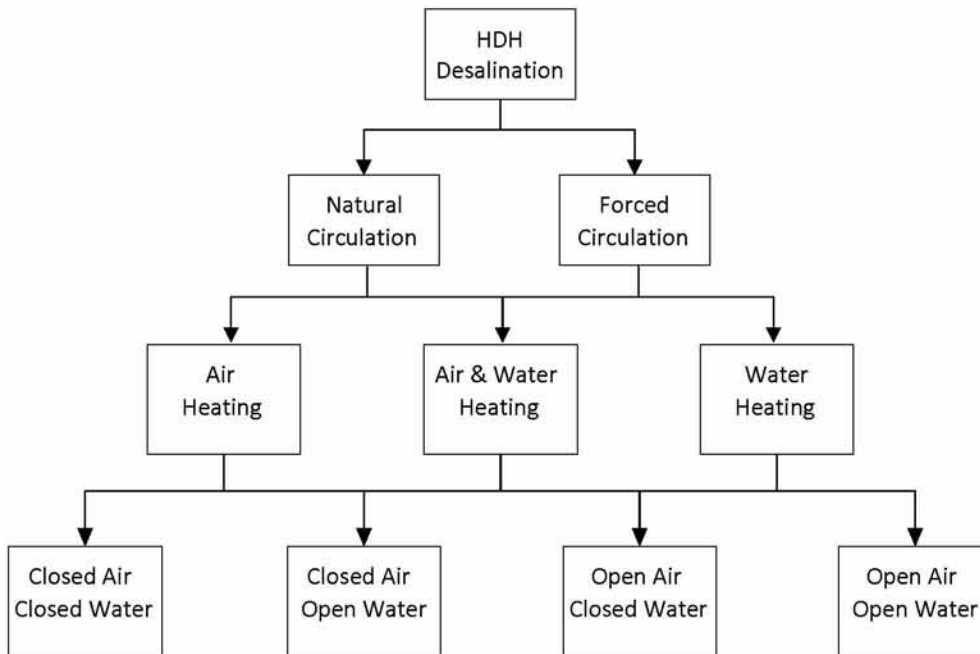


Σχήμα 2.2: : ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΙΑΣ ΠΟΛΥΠΛΟΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ HDH

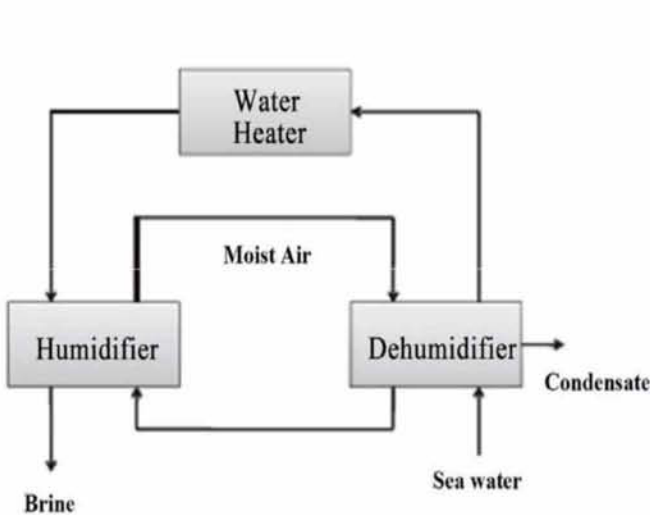
Η ταξινόμηση των τεχνολογιών HDH μπορεί να γίνει με βάση τρία κριτήρια (*Narayan et al.,2010; Kabeel et al.,2013*) : i) τη μορφή της ενέργειας που χρησιμοποιείται όπως ηλιακή, γεωθερμική ή υβριδική, ii) το θερμαινόμενο ρεύμα δηλαδή αν το ρεύμα που θερμαίνεται είναι το νερό, ο αέρας ή και τα δύο, iii) τον κύκλο που ακολουθείται μέσα στη συσκευή δηλαδή αν ο αέρας ή το νερό κυκλοφορούν σε ανοιχτό ή κλειστό βρόγχο. Επίσης σημαντικό ρόλο παίζει το γεγονός αν η συναγωγή είναι φυσική ή εξαναγκασμένη.

Καθώς, όμως, το τρίτο κριτήριο θεωρείται το πιο σημαντικό, συνήθως οι μονάδες HDH χωρίζονται σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες:

1. Closed-Air/Closed-Water συσκευές όπου και ο αέρας και το νερό παραμένουν στο σύστημα κυκλοφορώντας σε κλειστό βρόγχο.
2. Closed-Air/Open-Water συσκευές όπου ο αέρας ανακυκλοφορεί μεταξύ εξαμιστήρα και συμπυκνωτή ενώ η άλμη αποβάλλεται από το σύστημα.
3. Open-Air/Closed-Water συσκευές όπου το νερό ανακυκλοφορεί μέσα στο σύστημα ενώ ο αέρας εξέρχεται από αυτό.
4. Open-Air/Open-Water συσκευές όπου και ο αέρας και το νερό λειτουργούν σε ανοιχτό βρόγχο.

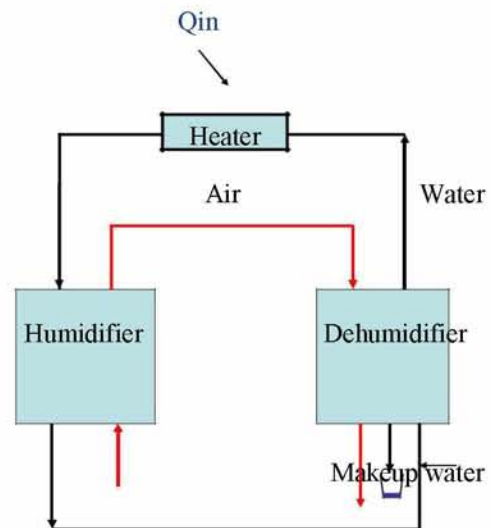


Σχήμα 2.3: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ HDH (Enayatollahi, 2016)



Σχήμα 2.4: Closed-Air/Open-Water system

(Kabeel et al., 2013)



Σχήμα 2.5: Open-Air/Closed-Water system

(Narayan et al., 2010)

Τέλος, για την πλήρη κατανόηση της μεθόδου και για την αξιολόγηση της απόδοσής της, είναι χρήσιμο να προσδιοριστούν ορισμένες σημαντικές παράμετροι όπως:

Α) Ο συντελεστής GOR (Gained-Output-Ratio) ο οποίος είναι ο λόγος της λανθάνουσας θερμότητας συμπύκνωσης του παραγόμενου αποστάγματος προς τη συνολική θερμότητα που εισάγεται στο σύστημα:

$$GOR = \frac{\text{latent heat of condensation of the distillate produced}}{\text{total heat input to the HDH unit}}$$

$$GOR = \frac{\dot{M}_d \cdot LH_v}{Q_{in}}, \quad \text{όπου } \dot{M}_d : \text{ το παραγόμενο απόσταγμα}$$

LH_v : η λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης

Q_{in} : η εισερχόμενη θερμότητα

Αυτή η παράμετρος είναι ουσιαστικά ένα μέτρο της ικανότητας παραγωγής αφαιρωμένου νερού και ένας δείκτης της ποσότητας ανάκτησης θερμότητας που επέδρασε στο σύστημα. Όταν υπάρχει εξαναγκασμένη συναγωγή, στο Q_{in} προστίθεται και η ενέργεια που καταναλώνει ο μηχανικός φυσητήρας. Γενικά επιθυμούμε όσο το δυνατόν υψηλότερο συντελεστή GOR καθώς αυτό σημαίνει ότι απαιτείται λιγότερη εισαγωγή θερμότητας στο σύστημα για την προσδοκώμενη παραγωγή αποστάγματος. Όταν η πηγή θερμότητας είναι ο ήλιος, υψηλός συντελεστής GOR σημαίνει μικρότερη επιφάνεια ηλιακού συλλέκτη και άρα μικρότερο επενδυτικό κόστος.

Β) Ο λόγος ανάκτησης (Recovery Ratio, RR) ο οποίος υποδηλώνει την ποσότητα του παραγόμενου αποστάγματος ανά Kg εισερχόμενου νερού τροφοδοσίας:

$$RR = \frac{\dot{M}_d}{\dot{M}_w + \text{makeup_water}}, \quad \text{όπου } \dot{M}_d : \text{ το παραγόμενο απόσταγμα}$$

\dot{M}_w : το εισερχόμενο νερό τροφοδοσίας

Αυτή η παράμετρος ονομάζεται και απόδοση εξαγωγής. Στα συστήματα HDH ο λόγος ανάκτησης είναι συνήθως μικρότερος από αυτόν στα συμβατικά συστήματα. Όμως, αυτό έχει ένα πλεονέκτημα καθώς με χαμηλό RR δεν είναι απαραίτητη η διαδικασία απόρριψης της άλμης.

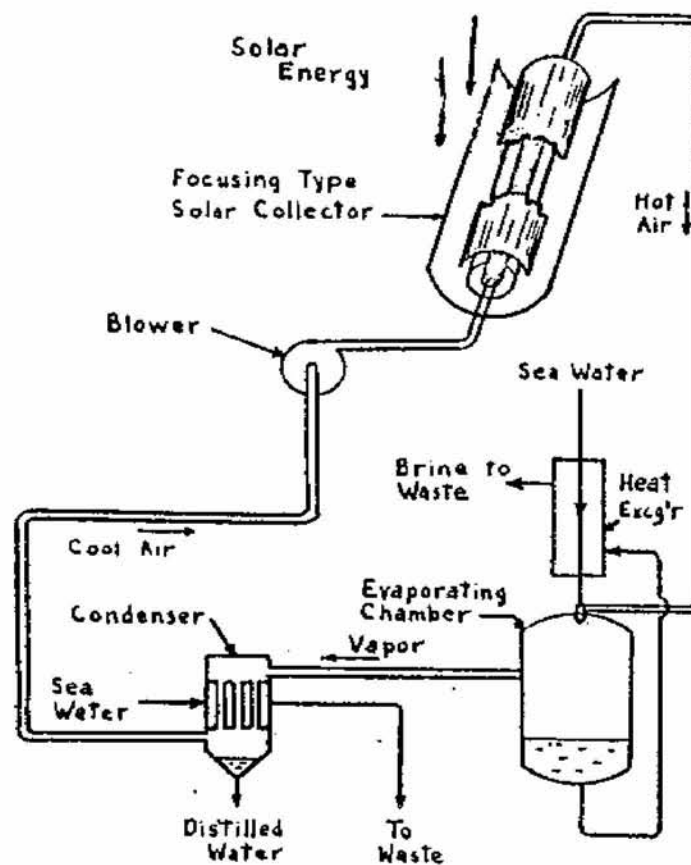
Γ) Η ειδική κατανάλωση ενέργειας (Specific Energy Consumption, SEC) η οποία εκφράζει την ενέργεια που καταναλώθηκε για τη θέρμανση του θαλασσινού νερού:

$$SEC = \frac{Q_{in}}{\dot{M}_d} = \frac{LH_v}{GOR}$$

2.2. Ιστορική Αναδρομή και Εξέλιξη των Τεχνολογιών HDH

Στα προϊστορικά χρόνια, η διαδικασία της αφύγρανσης είχε εφαρμοστεί σε λαξευμένες σπηλιές όπου ο εισερχόμενος αέρας κρύωνε από τις ψυχρές επιφάνειες των πετρωμάτων, με αποτέλεσμα ένα μέρος της υγρασίας του να συμπυκνώνεται και έτσι να παράγεται νερό το οποίο συλλέγονταν σε ειδικές λεκάνες.

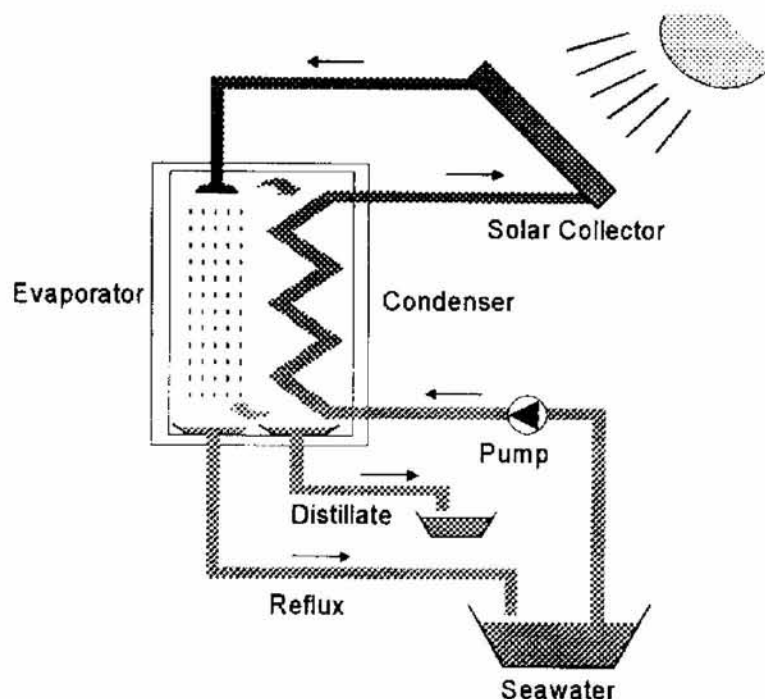
Στη σύγχρονη εποχή, σε μία προσπάθεια εξέλιξης της ηλιακής απόσταξης η οποία εφαρμόζονταν εδώ και αιώνες, το US Office of Saline Water (OSW) παρουσίασε το 1954 μία μελέτη για τη δυνατότητα πραγματοποίησης των διαδικασιών της θέρμανσης, της εξάτμισης και της συμπύκνωσης σε έναν ηλιακό αποστακτήρα σε ξεχωριστά τμήματα και όχι σε ένα όπως γινόταν προηγουμένως. Έτσι, τη δεκαετία του '60 σε συνεργασία του OSW με τα πανεπιστήμια της Αριζόνα και της Σονόρα τέθηκε σε εφαρμογή η κατασκευή μίας τέτοιας διάταξης στο Puerto Peñasco της Σονόρα του Μεξικό η οποία θεωρήθηκε από πολλούς η πρώτη συσκευή ύφανσης-αφύγρανσης στον κόσμο. Η συσκευή αυτή λειτούργησε πειραματικά για περίπου 2 χρόνια (1964-1965) και παρήγαγε μέχρι 18 m³ αφαλατωμένου νερού τους καλοκαιρινούς μήνες.



Σχήμα 2.6: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ 1^{ΗΣ} ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ HDH ΣΤΟ PUERTO PENASCO ΤΟΥ ΜΕΞΙΚΟ (Seifert et al., 2013)

Η πρώτη ολοκληρωμένη προσπάθεια για αφαλάτωση με ύγραση-αφύγραση ξεκίνησε το 1992 όταν η ΖΑΕ Bayern κατασκεύασε στα Κανάρια Νησιά μία πειραματική μονάδα πολυβάθμιας ύγρασης (Multi-Effect Humidification, MEH). Σε αυτό το σύστημα αέρας που υγραίνεται από τους ατμούς του ζεσταμένου νερού τροφοδοσίας, επανακυκλοφορεί λόγω φυσικής συναγωγής σε κλειστό βρόγχο μεταξύ εξατμιστήρα και συμπυκνωτή, παράγοντας έτσι πόσιμο νερό. Επίσης, υπάρχει ένας ηλιακός συλλέκτης που θερμαίνει το θαλασσινό νερό ενώ το απόσταγμα συλλέγεται σε μία δεξαμενή.

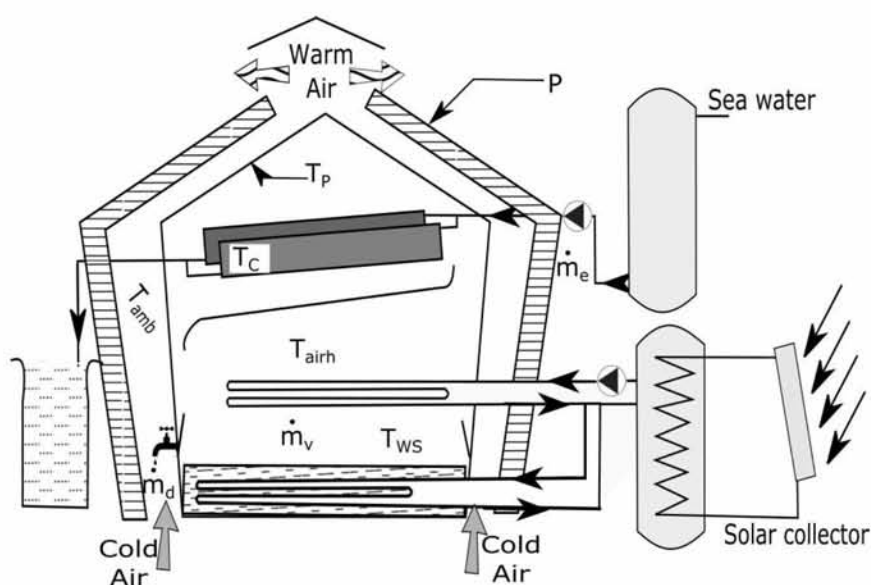
Το 1997 παρουσιάστηκε στη Σφαξ της Τυνησίας από το ίδιο ερευνητικό κέντρο μία βελτιωμένη έκδοση της προηγούμενης συσκευής η οποία περιέχει μία δεξαμενή αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας του ήλιου ώστε η μονάδα να λειτουργεί 24 ώρες/ημέρα και επομένως να υπάρχει μείωση του κόστους και αύξηση της απόδοσης. Τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα των δυο αυτών πειραματικών μονάδων παρουσιάστηκαν από την ομάδα των Müller-Holst et al. (1998).



Σχήμα 2.7: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ HDH ΤΗΣ ΖΑΕ ΒΑΥΕΡΝ (Müller-Holst et al., 1998)

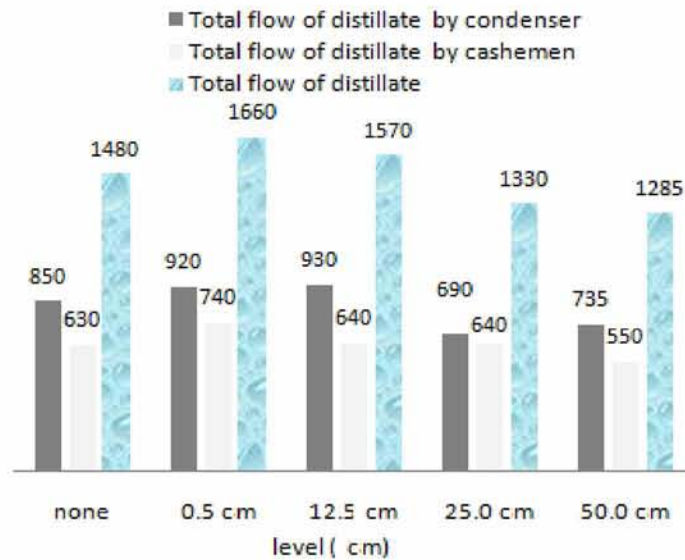
Το 2007 και πάλι ο Müller-Holst σε συνεργασία με την εταιρία TiNOX παρουσίασε μία μελέτη που δίνει έμφαση στην επιλογή των υλικών κατασκευής ώστε να μειωθεί το κόστος και να ελαχιστοποιηθούν οι όποιες απώλειες. Πιο συγκεκριμένα, προτείνει οι επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με την άλμη να είναι κατασκευασμένες από πολυπροπυλένιο ή υπέρ-κραματωμένο ανοξείδωτο χάλυβα ώστε να αποφεύγεται η διάβρωση ενώ οι επιφάνειες στις οποίες γίνεται μεταφορά μάζας και θερμότητας πρέπει να είναι από ενισχυμένο πολυπροπυλένιο.

Πιο πρόσφατα, προτάθηκε από το Mohammed V University του Μαρόκο (Ladouy and Khabbazi, 2015) ένα νέο σύστημα αφαλάτωσης HDH στο οποίο μελετάται η θέρμανση του υγρού αέρα σε διαφορετικά ύψη της συσκευής. Πιο αναλυτικά, χρησιμοποιείται μία ηλεκτρική αντίσταση των 500W σε 4 διαφορετικά επίπεδα της μονάδας (0.5cm, 12.5cm, 25cm και 50cm) σε συνδυασμό με έναν ηλιακό συλλέκτη για τη θέρμανση του θαλασσινού νερού. Έτσι, ο υγρός αέρας θερμαίνεται και ανακυκλοφορεί σε κλειστό βρόγχο μέσω φυσικής συναγωγής. Για τη συμπύκνωση του υγρού αέρα χρησιμοποιούνται δύο εναλλάκτες από πλάκες αλουμινίου ενώ στο εσωτερικό της μονάδας χρησιμοποιείται πλαστικό κάλυμμα που εξασφαλίζει το φαινόμενο του θερμοκηπίου εντός της συσκευής.



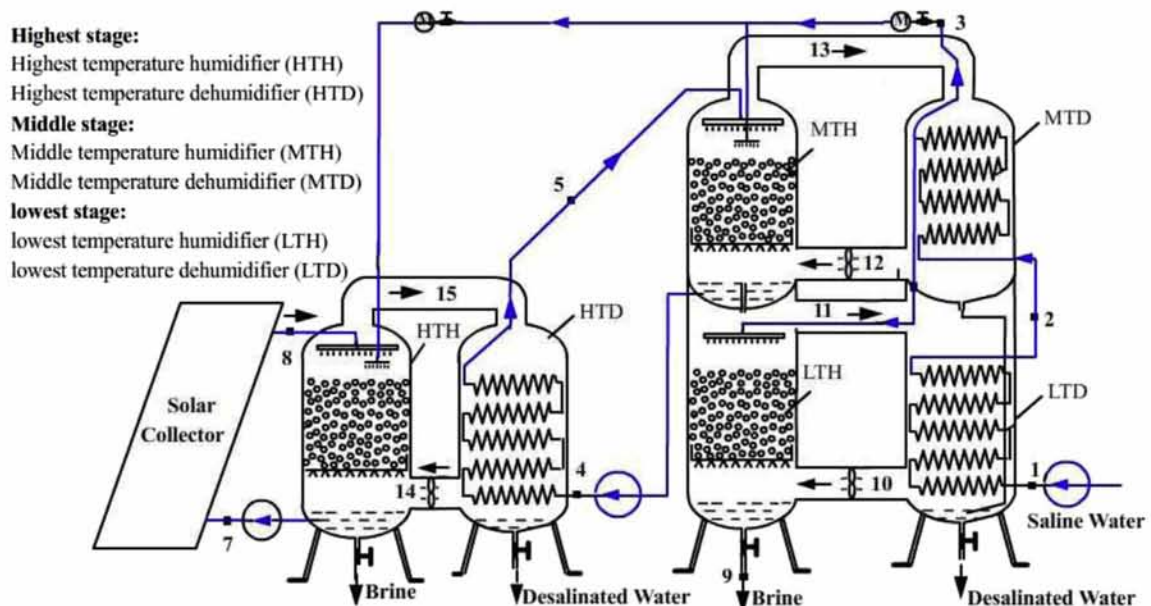
Σχήμα 2.8: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΑΝΑΦΕΡΘΕΙΣΑΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ HDH (Ladouy and Khabbazi, 2015)

Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν πως η ιδανικότερη θέση για την ηλεκτρική αντίσταση είναι κοντά στην επιφάνεια του θαλασσινού νερού καθώς όσο πιο κοντινή είναι η μεταξύ τους απόσταση, τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός παραγωγής του αποστάγματος. Επίσης, βγήκε το συμπέρασμα ότι η απόδοση της συσκευής είναι 6% μεγαλύτερη από αυτήν μίας συμβατικής μονάδας ηλιακής απόσταξης ενώ και ο ρυθμός παραγωγής της υπερτερεί κατά 8% της συμβατικής λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας του νερού στη ζώνη εξάτμισης.



Σχήμα 2.9: ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΑΦΑΛΑΤΩΜΕΝΟΥ ΝΕΡΟΥ (σε ml) ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΕΤΑΙ ΣΕ ΚΑΘΕ ΕΠΙΠΕΔΟ (Ladouy and Khabbazi, 2015)

Την ίδια περίοδο η ομάδα των Kang et al. (2015) από το Beijing Institute of Technology δημοσίευσε μία μελέτη για μία συσκευή αφαλάτωσης HDH τριών βαθμίδων με αναγέννηση. Πιο αναλυτικά, η διαδικασία περιλαμβάνει 3 φάσεις στις οποίες υπάρχει διακύμανση στις τιμές των θερμοκρασιών, δηλαδή η πρώτη φάση περιλαμβάνει υψηλές θερμοκρασίες, η δεύτερη φάση μεσαίες θερμοκρασίες και η τρίτη φάση χαμηλές θερμοκρασίες ενώ υπάρχει ένας υγραντήρας και ένας αφυγραντήρας σε κάθε φάση. Ο αέρας κυκλοφορεί σε τρεις κλειστούς βρόγχους με εξαναγκασμένη συναγωγή μέσω ενός ελικοειδούς ανεμιστήρα ενώ υπάρχει και ένας ηλιακός συλλέκτης για τη θέρμανση του θαλασσινού νερού.



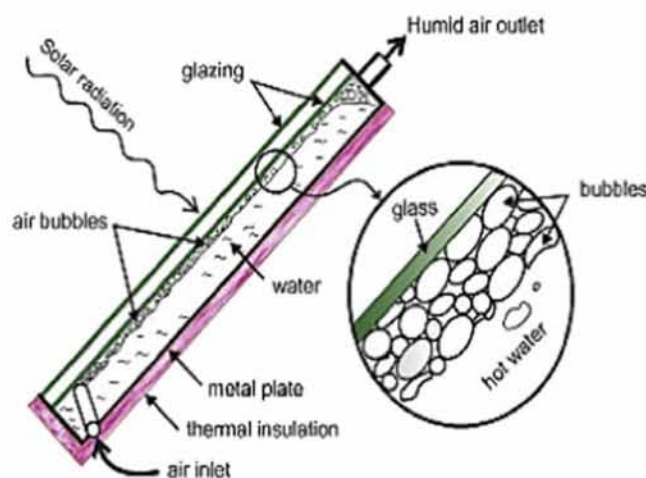
Σχήμα 2.10: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ HDH ΤΡΙΩΝ ΒΑΘΜΙΔΩΝ ΜΕ ΑΝΑΓΕΝΝΗΣΗ (Kang et al., 2015)

Η συσκευή αυτή υπερτερεί των συσκευών με μία ή δυο βαθμίδες καθώς επιτυγχάνει αποτελεσματικότερη ανάκτηση της λανθάνουσας θερμότητας συμπύκνωσης και ανακτά την υπολειπόμενη θερμότητα της άλμης. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση της κατανάλωσης θερμικής ενέργειας και την ελάττωση του επενδυτικού κόστους της μονάδας.

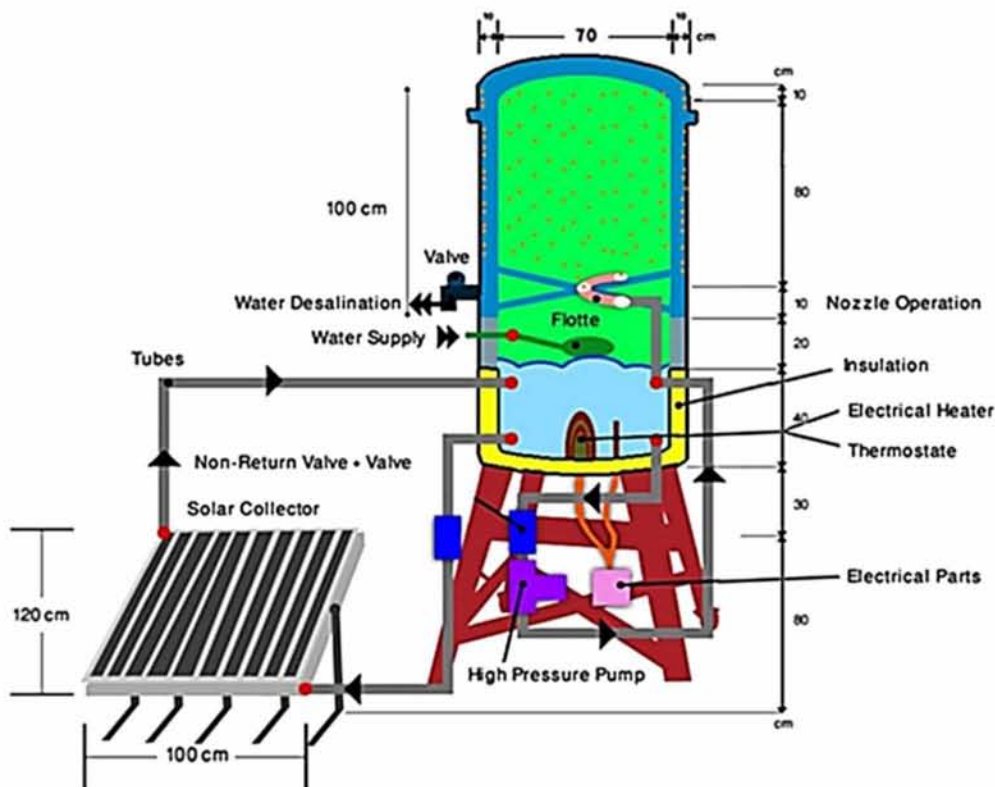
Ακόμη, οι ερευνητές παρουσίασαν μία σύγκριση των μονάδων με 3 και 2 βαθμίδες έτσι ώστε να αποτυπωθούν τα πλεονεκτήματα της πρώτης. Πιο συγκεκριμένα μία μονάδα με τρεις βαθμίδες σε θερμοκρασία 85°C μπορεί να φτάσει σε παραγωγή 91.1Kg/h αφαλατωμένου νερού και σε συντελεστή GOR=5.13 ενώ μία μονάδα δυο βαθμίδων μπορεί να φτάσει μόνο μέχρι 65.7Kg/h αφαλατωμένου νερού και GOR=2.34.

Τον επόμενο χρόνο, μελετήθηκε από τους Giwa et al. (2016) από το Masdar Institute of Science and Technology του Άμπου Ντάμπι η συμβατότητα των συσκευών HDH με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή και η γεωθερμική έτσι ώστε αυτές να αντικαταστήσουν τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα σαν πηγές θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα. Η δυνατότητα αυτή είναι πολύ σημαντική ειδικά για μικρής κλίμακας εφαρμογές σε απομακρυσμένα μέρη καθώς πέρα από τη φιλική στο περιβάλλον λειτουργία, επιτυγχάνεται και σημαντική μείωση του κόστους.

Ειδικότερα, στα συστήματα HDH με ηλιακή υποβοήθηση δόθηκε έμφαση στη δυνατότητα σχηματισμού φυσαλίδων αέρα εντός του ηλιακού συλλέκτη καθώς αυτό αυξάνει τη συνολική επιφάνεια επαφής αέρα-νερού και επομένως τη μεταφορά μάζας και θερμότητας μεταξύ τους, αλλά και στην προσθήκη ενός εξωτερικού ανακλαστήρα καθώς έτσι δεσμεύεται περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία και άρα αυξάνεται ο ρυθμός εξάτμισης του θαλασσινού νερού.



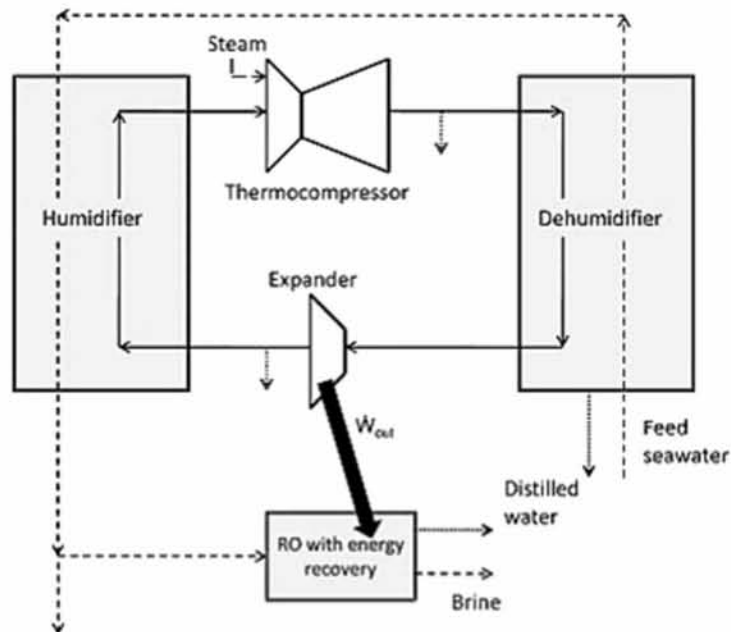
Σχήμα 2.11: ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΦΥΣΑΛΙΔΩΝ ΑΕΡΑ ΜΕΣΑ ΣΕ ΕΝΑΝ ΗΛΙΑΚΟ ΣΥΛΛΕΚΤΗ
(Giwa et al., 2016)



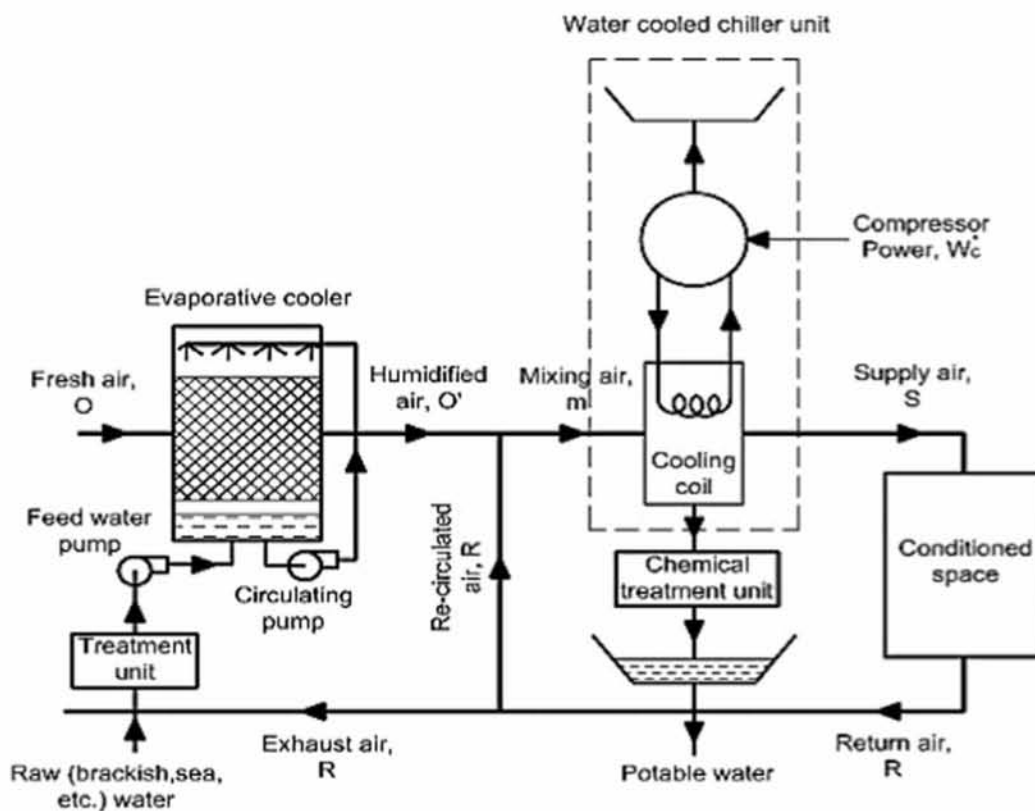
Σχήμα 2.12: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ HDH ΜΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΗΛΙΑΚΟ ΣΥΛΛΕΚΤΗ (Giwa et al., 2016)

Επιπροσθέτως, η ίδια ερευνητική ομάδα μελέτησε κάποιες επιπλέον καινοτομίες που μπορούν να εφαρμοστούν σε συσκευές HDH. Πιο συγκεκριμένα, για τη μείωση του μεγέθους του συμπυκνωτή ο οποίος καταλαμβάνει μεγάλο μέρος του κόστους εξετάστηκε η χρησιμοποίηση συμπυκνωτή άμεσης επαφής του υγρού αέρα με το ψυκτικό μέσο καθώς αυξάνει τη μεταφορά μάζας και θερμότητας χωρίς την ύπαρξη θερμικών αντιστάσεων, αλλά και η χρησιμοποίηση εργαζόμενου αερίου εκτός του αέρα όπως το ήλιο το οποίο βελτιώνει τη μεταφορά θερμότητας και το διοξείδιο του άνθρακα που βελτιώνει τη μεταφορά μάζας και μειώνει τις επικαθίσεις αλάτων.

Για τη μείωση της ενέργειας που απαιτείται μελετήθηκε ο συνδυασμός της μεθόδου αυτής με τη μέθοδο της μηχανικής συμπίεσης ατμών (MVC) αλλά και η πραγματοποίηση της διαδικασίας σε πολλές βαθμίδες. Τέλος, για την προσαρμογή της μεθόδου σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές, υπάρχει η δυνατότητα συνδυασμού της με μία μονάδα αντίστροφης όσμωσης (RO) ώστε να αξιοποιηθούν τα πλεονεκτήματα και των δυο τεχνολογιών ή η ενσωμάτωσή της σε ένα σύστημα κλιματισμού όπου και ο αέρας και το νερό κυκλοφορούν σε ανοιχτό βρόγχο.

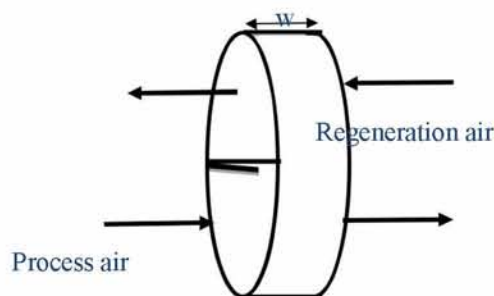


Σχήμα 2.13: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΗΔΗ ΜΕ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΑΤΜΩΝ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΩΣΜΩΣΗ (Giwa et al., 2016)



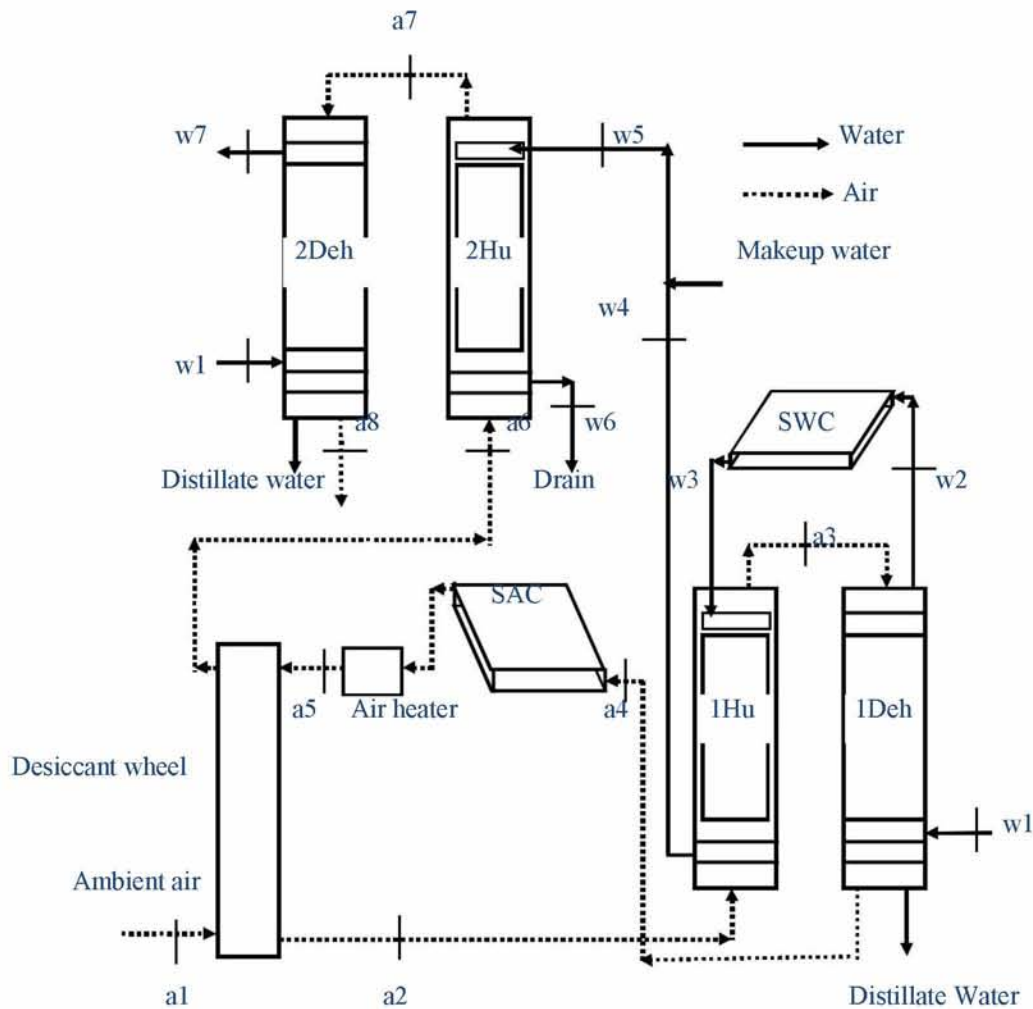
Σχήμα 2.14: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΗΔΗ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΗΣ ΣΕ ΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ (Giwa et al., 2016)

Το 2018 παρουσιάστηκε από τους El-Agouz et al. μία θεωρητική μελέτη για μία συσκευή αφαλάτωσης HDH δύο βαθμίδων που χρησιμοποιεί έναν αποξηραντικό τροχό ή εναλλάκτη θερμότητας έτσι ώστε να αυξήσει τη θερμοκρασία του αέρα που εισέρχεται στη μονάδα και να μειώσει την υγρασία του, κάνοντας τον ξηρότερο. Επίσης, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας χρησιμοποιείται ένας ηλιακός συλλέκτης για την αύξηση της θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού και ένας ηλιακός συλλέκτης σε συνδυασμό με ένα βοηθητικό θερμαντήρα αέρα ώστε ο αέρας να αποκτήσει την κατάλληλη θερμοκρασία αναγέννησης. Το συνολικό αφαλατωμένο νερό που παράγεται είναι το άθροισμα των αποσταγμάτων που προκύπτουν από τους δύο συμπυκνωτές.



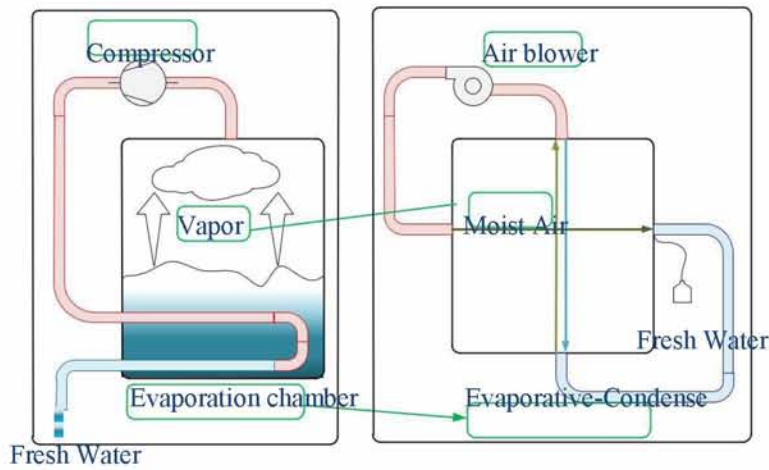
Σχήμα 2.15: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΕΝΟΣ ΑΠΟΞΗΡΑΝΤΙΚΟΥ ΤΡΟΧΟΥ (DESICCANT WHEEL) (El-Agouz et al., 2018)

Η αύξηση της θερμοκρασίας του εισερχόμενου αέρα και του ζεστού νερού αλλά και η αφύγρανση του αέρα στην είσοδο είναι εξόχου σημασίας καθώς επιδρούν ιδιαίτερα αποτελεσματικά στην απόδοση της συσκευής. Αυτό προκύπτει καθώς συμβάλλουν στην αύξηση της μεταφοράς μάζας και θερμότητας στην διεπιφάνεια αέρα-νερού στον εξατμιστήρα και άρα στην αύξηση του ρυθμού παραγωγής αφαλατωμένου νερού, δηλαδή συμπεραίνεται ότι η αφαλάτωση HDH με αποξηραντικό τροχό είναι πολύ πιο αποδοτική από μία απλή συσκευή HDH. Από τη μελέτη προέκυψε ότι μπορούν να παραχθούν μέχρι και $0.4603 \text{Kg}_{\text{water}}/\text{Kg}_{\text{air}}$, η ελάχιστη και η μέγιστη ειδική κατανάλωση ενέργειας (SEC) είναι αντίστοιχα 0.149KWh/Kg και 0.964KWh/Kg , ο συντελεστής GOR μπορεί να φτάσει στη τιμή 4.515 ενώ ο λόγος ανάκτησης (RR) στο 46.03%.



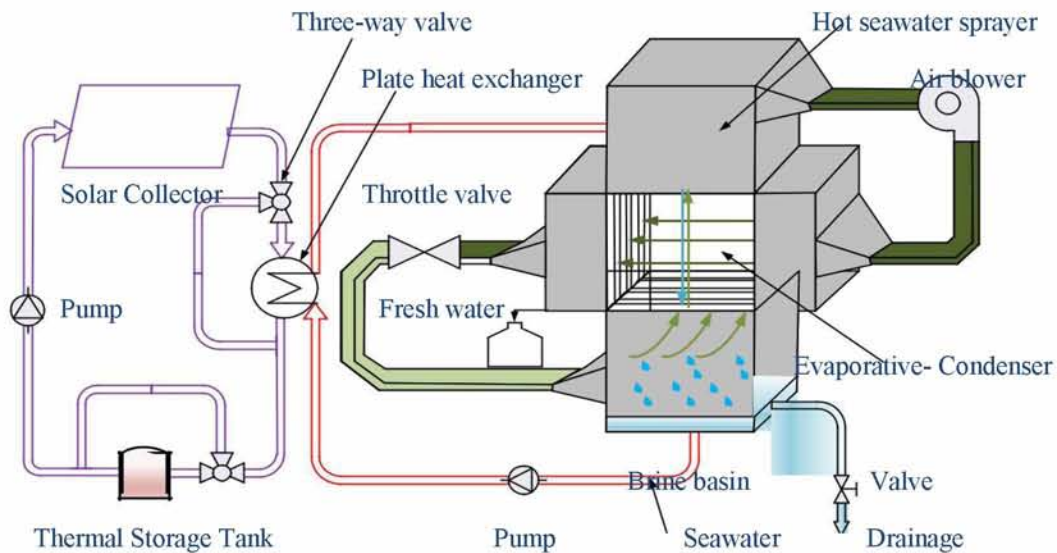
Σχήμα 2.16: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ HDH ΜΕ ΑΠΟΞΗΡΑΝΤΙΚΟ ΤΡΟΧΟ (El-Agouz et al., 2018)

Φτάνοντας στο σήμερα, η ομάδα των Xu et al. (2019) από το Shanghai Jiao Tong University επινόησε και μοντελοποίησε μία καινοτόμο HDH συσκευή με ηλιακή υποβοήθηση η οποία στηρίζεται στις αρετές της μηχανικής συμπίεσης ατμών (MVC). Πιο συγκεκριμένα, το εργαζόμενο μέσο είναι ο υγρός αέρας και όχι οι ατμοί του θαλασσινού νερού ενώ σε σχέση με ένα MVC σύστημα ο συμπιεστής έχει αντικατασταθεί από έναν φουσητήρα και ο θάλαμος εξάτμισης από ένα σύμπλεγμα εξατμιστήρα-συμπυκνωτή. Επίσης, λόγω του φουσητήρα υπάρχει εξαναγκασμένη συναγωγή η οποία συμβάλλει στην υψηλή μείωση της πίεσης και της θερμοκρασίας. Ακόμη, υπάρχει ένας ηλιακός συλλέκτης και μία δεξαμενή στην οποία αποθηκεύεται η θερμότητα που συλλέγεται καθώς αυτή χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας μέσω ενός εναλλάκτη πλακών. Αυτό σημαίνει πως η ηλιακή ενέργεια απαιτείται μόνο για την εκκίνηση του συστήματος ενώ δεν χρειάζεται έξτρα κρύο θαλασσινό νερό.



Σχήμα 2.17: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΟΥ MVC ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΡΟΑΝΑΦΕΡΘΕΙΣΑΣ HDH ΣΥΣΚΕΥΗΣ (Xu et al., 2019)

Τα πλεονεκτήματα αυτής της συσκευής απορρέουν από το γεγονός ότι: α) είναι πιο αποδοτική σε σχέση με τα συμβατικά HDH και MVC συστήματα ενώ με την πρόσθεση ενός PV πάνελ καθίσταται ενεργειακά αυτόνομη, β) η εξαναγκασμένη συναγωγή βελτιώνει την ικανότητα του υγρού αέρα να προσλαμβάνει υγρασία και γ) η λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης μπορεί να ανακτηθεί πλήρως. Τέλος, η αύξηση της διαφοράς πίεσης και της θερμοκρασίας ψεκασμού του ζεσταμένου θαλασσινού νερού μπορεί να βελτιώσει αισθητά την απόδοση της συσκευής καθώς στους 70°C η ειδική κατανάλωση ενέργειας (SEC) είναι μόνο 0.0545KWh/Kg και ο συντελεστής GOR φτάνει στο 12.24 ενώ σχεδόν σε όλες τις άλλες συσκευές HDH δεν ανεβαίνει πάνω από 6.



Σχήμα 2.18: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ HDH ΠΟΥ ΣΥΝΔΥΑΖΕΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΑΤΜΩΝ (Xu et al., 2019)

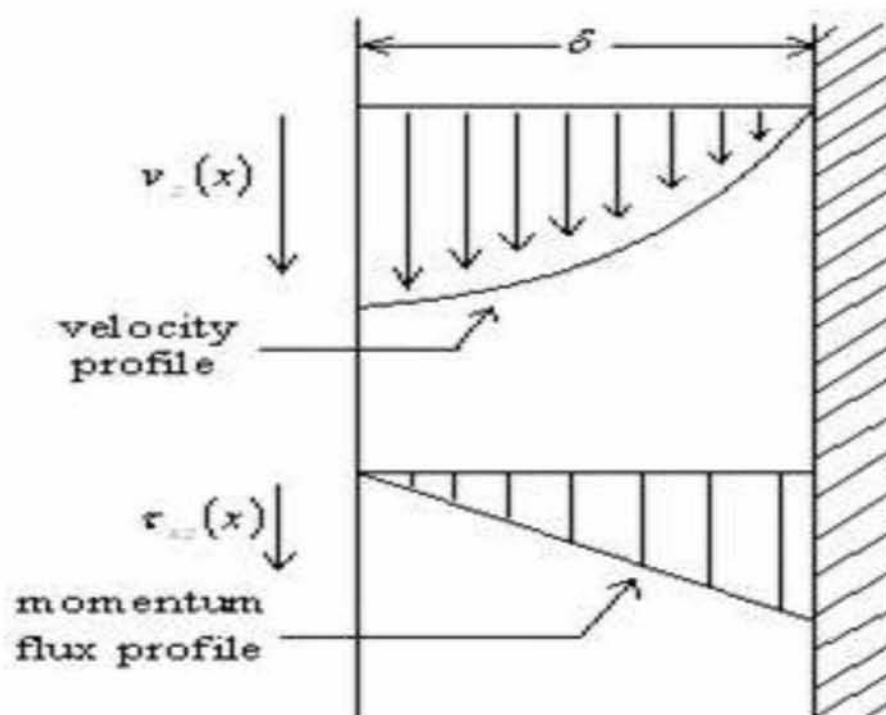
Συμπερασματικά, σε αυτό το σημείο έχει γίνει η παρουσίαση όλων των πιθανών παραλλαγών της τεχνολογίας αφαλάτωσης με ύγραση-αφύγραση που μελετήθηκαν στο παρελθόν με στόχο την πλήρη κατανόηση της μεθόδου αλλά και των καινοτομιών που προσφέρει η δική μας θεωρητική συσκευή η οποία θα αναλυθεί εκτενώς στο 4^ο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 3^ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο

Σε αυτό το κεφάλαιο θα συζητήσουμε βασικές έννοιες και προβλήματα που σχετίζονται με τη διπλωματική αυτή. Σκοπός είναι η ομαλή ροή πληροφοριών προς τον αναγνώστη, ώστε να αποκτήσει βαθιά κατανόηση των επιμέρους ζητημάτων που σχετίζονται με μία συσκευή αφαλάτωσης με ύγρανση-αφύγρανση.

3.1. Κατερχόμενος Λεπτός Υμένας

Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 3.1, εξετάζουμε ένα κατερχόμενο λεπτό υμένα (φίλμ) που παρέχεται με μαζική παροχή \dot{m} και έχει πάχος δ . Με εφαρμογή των ισοζυγίων μάζας και ορμής στο λεπτό φίλμ, μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε τη μέση ταχύτητα καθώς και το πάχος του, τα οποία προκύπτουν για δεδομένη μαζική παροχή υγρού.



Σχήμα 3.1: ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ

Αρχικά, διατυπώνουμε τις εξισώσεις διατήρησης μάζας και ορμής σε διαφορική μορφή ως εξής:

- $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{U} \nabla \rho + \rho \vec{\nabla} \vec{U} = 0$ (1) : Εξίσωση Συνέχειας (Α.Δ.Μ.)
- $\rho \frac{D\vec{U}}{Dt} = -\vec{\nabla} P + \mu \nabla^2 \vec{U} + \rho \cdot g$ (2) : Ισοζύγιο Ορμής (Α.Δ.Ο.)

Διατύπωση του προβλήματος του λεπτού υμένα

Έχουμε συνθήκες ασυμπίεστης ροής σε μόνιμη κατάσταση και θεωρούμε δισδιάστατο πεδίο ροής με μοναδιαία έκταση της πλάκας στην τρίτη διεύθυνση. Λαμβάνοντας υπ' όψιν και το γεγονός ότι δεν υπάρχει ταχύτητα στην οριζόντια διεύθυνση ($v=0$), συμπεραίνουμε ότι :

- Το πεδίο ροής είναι χρονικά αναλλοίωτο $[\frac{\partial}{\partial t} = 0]$.
- Το προφίλ ταχύτητας του υμένα δεν μεταβάλλεται κατά μήκος της πλάκας.
- Δεν υπάρχουν μεταβολές της πίεσης και της πυκνότητας.
 $[\vec{\nabla}\rho = 0, \vec{\nabla}P = 0]$

Στη συνέχεια, επαναδιατυπώνουμε τις εξισώσεις διατήρησης ως εξής :

$$(1) \rightarrow \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \rightarrow u = u(y)$$

$$(2) \rightarrow \frac{d^2 u}{dy^2} = -\frac{g\rho}{\mu}$$

Επίσης, εξ ορισμού ισχύει ότι : $\dot{m} = \int_0^\delta \rho \cdot u(y) dy$

Συνοριακές Συνθήκες

Εφαρμόζοντας συνοριακές συνθήκες μη-ολίσθησης για $y=0$ και συνοριακή συνθήκη μηδενικής διάτμησης για $y=\delta$, επιλύουμε αναλυτικά τη διαφορική εξίσωση απ' όπου προκύπτει το πάχος και το παραβολικό προφίλ ταχύτητας για το υγρό φιλμ :

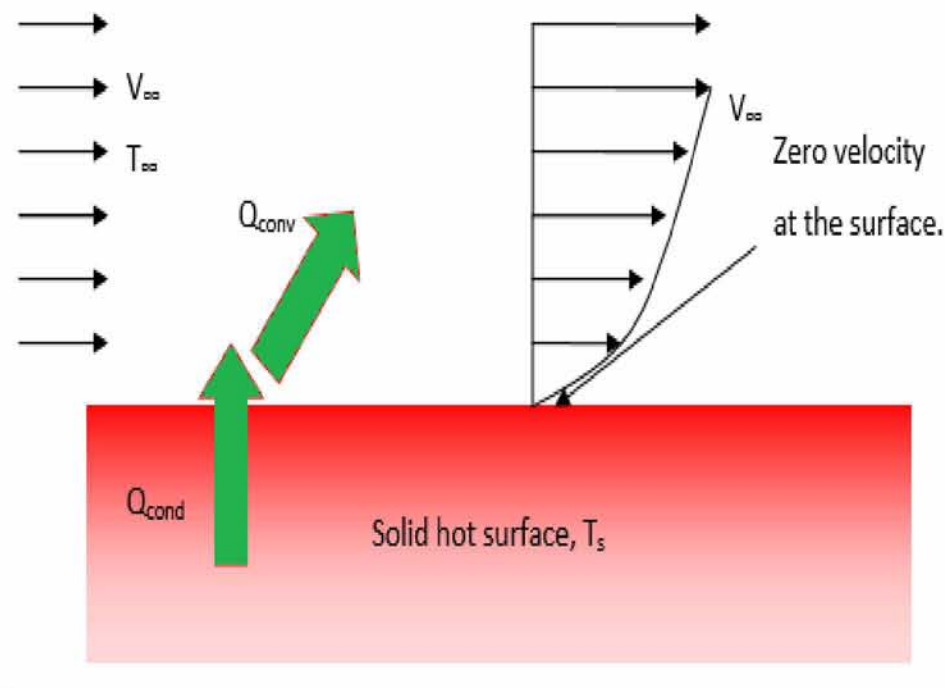
$$\bullet \delta = \left[\frac{3\mu \cdot \dot{m}}{g \cdot \rho^2} \right]^{1/3}, \quad u(y) = u_{\max} \cdot \left[2\left(\frac{y}{\delta}\right) - \left(\frac{y}{\delta}\right)^2 \right]$$

$$\bullet u_{\max}(\delta) = \frac{\rho \cdot g \cdot \delta^2}{2\mu}, \quad u_{\text{average}} = 2 \frac{u_{\max}}{3}$$

Όσον αφορά τη θερμοκρασιακή κατανομή, μπορεί να υπολογιστεί με εφαρμογή ισοζυγίου ενέργειας στο φιλμ, αλλά λόγω του μικρού πάχους του υμένα μπορούμε με ικανοποιητική ακρίβεια να θεωρήσουμε ότι η θερμοκρασία είναι σταθερή και ίση με αυτήν του τοιχώματος.

3.2. Συναγωγή

Σε αντίθεση με την αγωγή που είναι μετάδοση θερμότητας μεταξύ στερεών ή ακίνητων ρευστών, συναγωγή είναι ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας ο οποίος συνοδεύεται από κίνηση μάζας ρευστού. Έτσι, λόγω της κίνησης του ρευστού αυξάνεται σημαντικά η μεταφορά θερμότητας σε σχέση με την αγωγή. Ανάλογα με το αν η κίνηση του ρευστού προκαλείται από εξωτερικά μέσα (π.χ. ανεμιστήρας, αντλία) ή από διαφορά στη πυκνότητα του ρευστού, η συναγωγή ονομάζεται αντίστοιχα εξαναγκασμένη ή φυσική.



Σχήμα 3.2: ΣΥΝΑΓΩΓΗ ΠΛΑΝΩ ΑΠΟ ΕΠΙΠΕΔΗ ΠΛΑΚΑ

Στο Σχήμα 3.2 θεωρούμε μία επιφάνεια σε θερμοκρασία T_b , η οποία είναι εκτεθειμένη σε ένα ρεύμα αέρα με θερμοκρασία T_∞ και ταχύτητα V_∞ . Από το νόμο ψύξης του Νεύτωνα, η θερμοροή μέσω συναγωγής είναι ανάλογη της θερμοκρασιακής διαφοράς και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, δηλαδή: $\dot{q} = h \cdot (T_b - T_\infty)$.

Οριακά στρώματα

Στη συναγωγή μας ενδιαφέρει μία πολύ μικρή περιοχή γύρω από την επιφάνεια του σώματος όπου λόγω των ισχυρών δυνάμεων ιξώδους η ταχύτητα και η θερμοκρασία του ρευστού μεταβάλλονται αισθητά από σημείο σε σημείο. Εξαιτίας της συνθήκης μη-ολίσθησης το ακίνητο στρώμα ρευστού προκαλεί διατμητικές τάσεις ανάμεσα στα υπερκείμενα στρώματα ρευστού. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε στρώμα ρευστού εντός του οριακού στρώματος «φρενάρεται» από το στρώμα που βρίσκεται ακριβώς από κάτω του και η τοπική ροή παρεμποδίζεται. Αυτή η περιοχή ονομάζεται και περιοχή ιξώδους ροής και αποτελεί το κινηματικό και το θερμικό οριακό στρώμα.

Το πάχος του κινηματικού οριακού στρώματος ορίζεται ως η απόσταση δ_u από την επιφάνεια, μέσα στην οποία η ταχύτητα του αέρα μεταβάλλεται από την τιμή μηδέν έως την τιμή $0.99V_\infty$. Αντίστοιχα ορίζεται το πάχος του θερμικού οριακού στρώματος δ_T με βάση τη θερμοκρασία. Έξω από τα οριακά στρώματα, στην κύρια μάζα ρευστού, οι ιξώδεις δυνάμεις είναι αμελητέες και υπάρχει ομοιομορφία ταχύτητας και θερμοκρασίας.

Ο αριθμός Prandtl (Pr)

Το σχετικό πάχος μεταξύ του κινηματικού και του θερμικού οριακού στρώματος εξαρτάται άμεσα από μία αδιάστατη παράμετρο, τον αριθμό Prandtl (Pr), ο οποίος για τα αέρια είναι πολύ κοντά στη μονάδα. Ο αριθμός Prandtl ορίζεται ως ο λόγος της διαχυτότητας της ορμής προς τη θερμική διαχυτότητα, δηλαδή: $Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k_{fluid}}$.

Σε εφαρμογές μεταφοράς μάζας, ο αντίστοιχος αριθμός Prandtl είναι ο αριθμός Schmidt και στην περίπτωση συστημάτων νερού-αέρα οι δύο αυτοί αριθμοί είναι ίσοι.

Ο αριθμός Nusselt (Nu)

Εξαιτίας της συνθήκης μη-ολίσθησης, η μεταφορά θερμότητας στη διεπιφάνεια γίνεται αποκλειστικά με αγωγή και στη συνέχεια μεταφέρεται μέσω συναγωγής στα εξωτερικά στρώματα. Ο αριθμός Nusselt (Nu) είναι ένας αδιάστατος συντελεστής μετάδοσης θερμότητας που αναπαριστά την ενίσχυση της θερμικής ροής λόγω συναγωγής σε ένα στρώμα ρευστού, σε σχέση με την αγωγή στα άκρα του ίδιου στρώματος, δηλαδή: $Nu = \frac{h \cdot L}{k_{fluid}}$.

Χαρακτηρισμός ροής

Για χαμηλές ταχύτητες ροής V_∞ , τα οριακά στρώματα παρουσιάζονται ομαλά και οι ροϊκές γραμμές είναι ομαλές καμπύλες. Σε αυτήν την περιοχή η ροή χαρακτηρίζεται ως στρωτή. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα, αρχίζουν να παρουσιάζονται διακυμάνσεις και ανωμαλίες στη ροή (μεταβατική περιοχή) μέχρι την τελική μετάβαση στην περιοχή τυρβώδους ροής όπου τίποτα δεν είναι ομαλό και υπάρχει έντονο χάος μέσα στο οριακό στρώμα.

Ο αριθμός Reynolds (Re)

Η μετάβαση από τη στρωτή στην τυρβώδη ροή εξαρτάται από τη γεωμετρία της επιφάνειας, την τραχύτητα, τη θερμοκρασία, την ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος ρευστού και φυσικά το είδος του ρευστού. Το 1880 ο Osborne Reynolds ανακάλυψε ότι το καθεστώς της ροής εξαρτάται από το λόγο των δυνάμεων αδρανείας προς τις ιξώδεις δυνάμεις του ρευστού. Έτσι ορίστηκε ο αριθμός Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \cdot L \cdot V_\infty}{\mu}$$

Ο αριθμός Reynolds στον οποίο η ροή γίνεται τυρβώδης ονομάζεται κρίσιμος αριθμός Reynolds. Για επίπεδη πλάκα: $Re_{cr} = 5 \cdot 10^5$.

Αδιαστατοποίηση των διαφορικών εξισώσεων

Οι αδιάστατοι αυτοί αριθμοί και η σημασία τους γίνονται πιο ξεκάθαρα αν αδιαστατοποιήσουμε τις εξισώσεις διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνουμε και σημαντική μείωση των εξαρτημένων και ανεξάρτητων παραμέτρων του προβλήματος. Διαιρούμε λοιπόν τις χωρικές μεταβλητές ως προς το μήκος της πλάκας (χαρακτηριστικό μήκος), τις ταχύτητες ως προς τη χαρακτηριστική ταχύτητα V_∞ , την πίεση ως προς μία χαρακτηριστική πίεση και τη θερμοκρασιακή διαφορά οριακού στρώματος-περιβάλλοντος ως προς τη θερμοκρασιακή διαφορά επιφάνειας τοιχώματος-περιβάλλοντος. Καταλήγουμε σε ένα αδιαστατοποιημένο σύστημα τριών διαφορικών εξισώσεων που για δεδομένο τύπο γεωμετρίας, χαρακτηρίζεται από αυτούς τους αδιάστατους αριθμούς που τους χρησιμοποιούμε ως παραμέτρους ομοιότητας.

Στις παρακάτω εξισώσεις, τα μεγέθη $x', y', u', v', P', \theta$ είναι αδιάστατες ποσότητες με $x' = \frac{x}{L}$, $y' = \frac{y}{L}$, $u' = \frac{u}{V_\infty}$, $v' = \frac{v}{V_\infty}$, $P' = \frac{P}{\rho V_\infty^2}$ και $\theta = \frac{T-T_\infty}{T_b-T_\infty}$:

- $\frac{\partial u'}{\partial x'} + \frac{\partial v'}{\partial y'} = 0$: Εξίσωση Συνέχειας
- $u' \frac{\partial u'}{\partial x'} + v' \frac{\partial u'}{\partial y'} = \frac{1}{\text{Re}_L^2} \cdot \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2} - \frac{\partial P'}{\partial x'}$: Ισοζύγιο Ορμής
- $u' \frac{\partial \theta}{\partial x'} + v' \frac{\partial \theta}{\partial y'} = \frac{1}{\text{Pr} \cdot \text{Re}_L} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial y'^2}$: Ισοζύγιο Ενέργειας

Συνοριακές Συνθήκες :

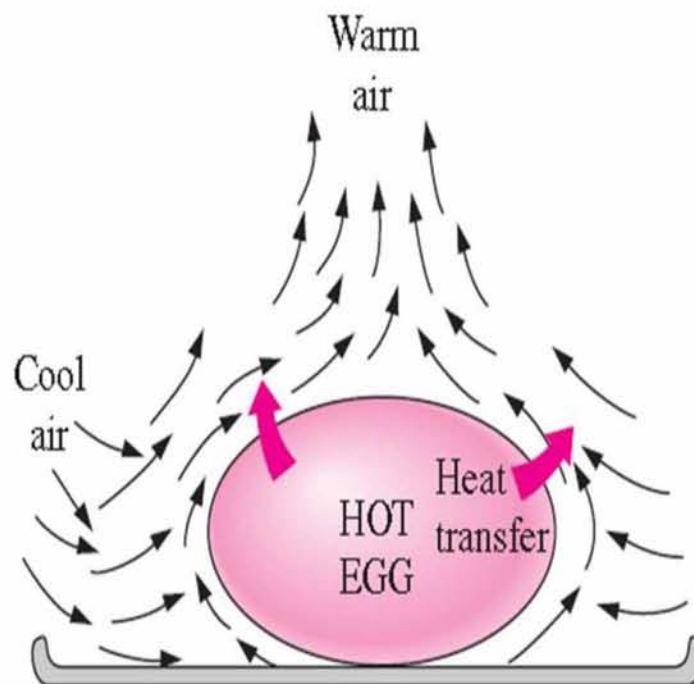
- $u'(0) = 0$, $u'(1) = V_\infty$
- $\theta(0) = 1$, $\theta(1) = 0$

Μέχρι στιγμής, έγινε μία εισαγωγή των διαφορικών εξισώσεων της συναγωγής για τον ορισμό των χαρακτηριστικών αριθμών του προβλήματος. Παρά τις αναρίθμητες εφαρμογές που έχει η εξαναγκασμένη συναγωγή, η παρούσα διπλωματική επικεντρώνεται και εκμεταλλεύεται τις δυνατότητες της φυσικής συναγωγής η οποία αναλύεται εκτενώς παρακάτω.

Ο Μηχανισμός της Φυσικής Συναγωγής

Κατά τη φυσική συναγωγή, η κίνηση προέρχεται από φυσικά μέσα όπως η δύναμη της άνωσης και οι ταχύτητες ροής οι οποίες είναι πολύ μικρότερες από αυτές που σχετίζονται με την εξαναγκασμένη συναγωγή. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3, όταν ένα θερμό στερεό σώμα εκτεθεί σε ψυχρότερο περιβάλλον, η θερμοκρασία της επιφάνειάς του ελαττώνεται ενώ η θερμοκρασία του αέρα που βρίσκεται σε άμεση επαφή με το σώμα αυξάνεται. Σύντομα το σώμα περιβάλλεται από ένα λεπτό στρώμα θερμού αέρα και στη συνέχεια η θερμότητα μεταφέρεται από το θερμό στρώμα προς τα εξωτερικά στρώματα αέρα που είναι ψυχρότερα.

Στο Σχήμα 3.3, βλέπουμε ένα στρώμα θερμού αέρα χαμηλής πυκνότητας που περιβάλλεται από ψυχρό αέρα υψηλής πυκνότητας. Επομένως, το θερμό (ελαφρύ) στρώμα θα κινηθεί ανοδικά ενώ ταυτόχρονα ο ψυχρός (βαρύς) αέρας θα αναπληρώσει τον κενό χώρο που άφησε πίσω του το θερμό στρώμα ενισχύοντας σημαντικά τη μεταφορά θερμότητας. Αυτή η κίνηση των αέριων μαζών θα συνεχιστεί μέχρις ότου η θερμοκρασία του σώματος να εξισωθεί με αυτή του περιβάλλοντος.



Σχήμα 3.3: ΨΥΞΗ ΕΝΟΣ ΑΥΓΟΥ ΜΕ ΦΥΣΙΚΗ ΣΥΝΑΓΩΓΗ

Επίσης, εισάγεται ο συντελεστής διαστολής όγκου : $\beta = \frac{(\frac{\partial V}{\partial T})_P}{V} = -\frac{(\frac{\partial \rho}{\partial T})_P}{\rho}$

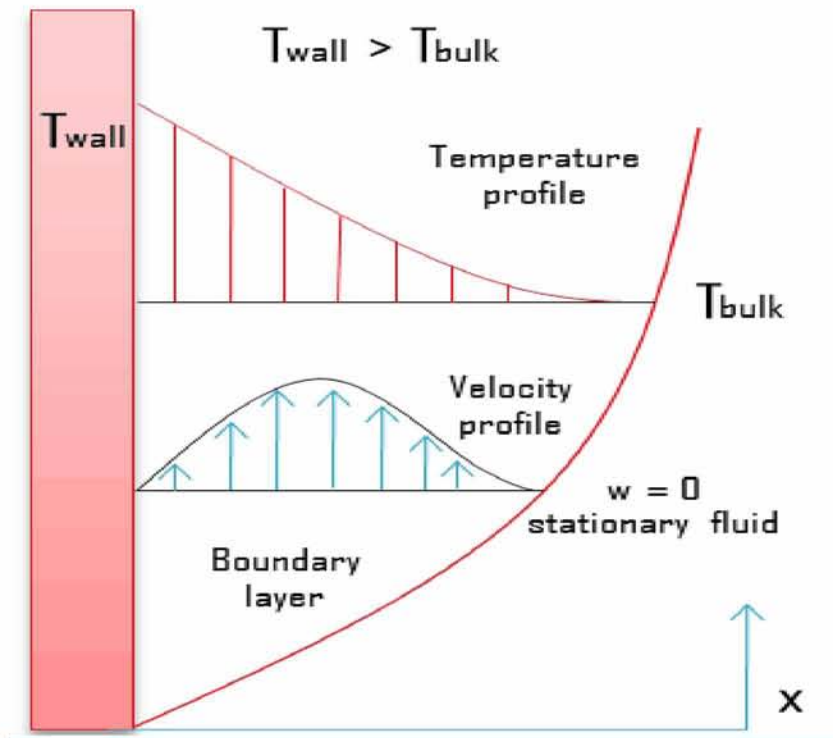
Το γινόμενο $\beta\Delta T$ παριστάνει το ποσοστό της μεταβολής όγκου ρευστού που αντιστοιχεί σε μεταβολή θερμοκρασίας ΔT υπό σταθερή πίεση. Θεωρώντας τον αέρα ως ιδανικό αέριο, προκύπτει ότι $\beta=1/T$.

Μαζική παροχή αέρα

Το μέτρο της μεταφοράς θερμότητας με φυσική συναγωγή μεταξύ μίας επιφάνειας και ενός ρευστού, σχετίζεται άμεσα με την παροχή μάζας του ρευστού. Σε μόνιμη κατάσταση, η άνωση οδηγεί τη ροή ενώ η τριβή λόγω επαφής του αέρα με την επιφάνεια αντισταθεί στη ροή. Καθώς δεν έχουμε εξαναγκασμένη συναγωγή, η παροχή του ρευστού ρυθμίζεται μόνη της (auto-tune) και εγκαθίσταται στο σημείο όπου υπάρχει δυναμική ισορροπία μεταξύ των δυνάμεων άνωσης και τριβής.

Φυσική συναγωγή σε κατακόρυφη πλάκα

Θεωρούμε μια κατακόρυφη θερμή πλάκα σε θερμοκρασία T_b εκτεθειμένη σε περιβάλλον με θερμοκρασία T_∞ . Αρχικά μπορούμε να αδιαστατοποιήσουμε τις εξισώσεις διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας ώστε να μπορέσουμε να εξάγουμε κάποιους αδιάστατους αριθμούς που χαρακτηρίζουν το πρόβλημα, όπως ακριβώς και στην εξαναγκασμένη συναγωγή.



Σχήμα 3.4: ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΠΛΑΚΑ

Η ειδοποιός διαφορά με την εξαναγκασμένη συναγωγή είναι ότι δεν υπάρχει κίνηση αέριας μάζας μακριά από την επιφάνεια, άρα δεν μπορούμε εύκολα να χρησιμοποιήσουμε μια χαρακτηριστική ταχύτητα V_{∞} . Διαιρούμε λοιπόν τις ταχύτητες ως προς μία χαρακτηριστική ταχύτητα που ορίζεται βάσει του αριθμού Reynolds, δηλαδή $V_{\infty} = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{Re_L}{L}$.

Επομένως θα έχουμε:

- $\frac{\partial u'}{\partial x'} + \frac{\partial v'}{\partial y'} = 0$: Εξίσωση Συνέχειας
- $u' \frac{\partial u'}{\partial x'} + v' \frac{\partial u'}{\partial y'} = \frac{Gr_L}{Re_L^2} \cdot \theta + \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2} / Re_L$: Ισοζύγιο Ορμής
- $u' \frac{\partial \theta}{\partial x'} + v' \frac{\partial \theta}{\partial y'} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial y'^2}$: Ισοζύγιο Ενέργειας

Ο αριθμός Grashof (Gr_L)

Ο αριθμός Grashof (Gr_L) ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων άνωσης προς τις ιξώδεις δυνάμεις που επενεργούν στο ρευστό, δηλαδή:

$$Gr_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_b - T_{\infty}) \cdot L^3}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)^2}$$

Όταν $Gr_L/Re_L^2 \ll 1$, $Gr_L/Re_L^2 \approx 1$ ή $Gr_L/Re_L^2 \gg 1$ τότε έχουμε αντίστοιχα πρόβλημα εξαναγκασμένης, μικτής ή φυσικής συναγωγής.

Ο αριθμός Grashof στη φυσική συναγωγή έχει το ρόλο που έχει ο αριθμός Reynolds στην εξαναγκασμένη. Καθορίζει δηλαδή το αν η ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης. Για κατακόρυφη πλάκα έχουμε μετάβαση στην περιοχή τυρβώδους ροής όταν $Gr_L > 10^9$.

Επίσης, υπάρχει ο αριθμός Rayleigh (Ra_L) που αποτελεί το γινόμενο του αριθμού Grashof με τον αριθμό Prandtl και παρατηρήθηκε ότι συσχετίζεται άμεσα με τον αριθμό Nusselt για διάφορες γεωμετρίες και τιμές του Grashof.

➤ Το Μοντέλο των Schmidt & Beckmann για στρωτή ροή:

Χωρίς αδιαστατοποίηση, οι εξισώσεις οριακού στρώματος στην κατεύθυνση της ροής διατυπώνονται ως εξής :

- $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$: Εξίσωση Συνέχειας
- $u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g \cdot \beta \cdot (T - T_\infty) + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial y}$: Ισοζύγιο Ορμής
- $u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = -\frac{1}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{\partial q}{\partial y}$: Ισοζύγιο Ενέργειας

Όπου $\tau = \mu \cdot \frac{\partial u}{\partial y}$ και $q = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial y}$

Με συνοριακές συνθήκες:

- $u(x, 0) = u(x, \infty) = 0$
- $T(x, 0) = T_b$, $T(x, \infty) = T_\infty$

Προσεγγιστική ολοκληρωτική λύση

Θεωρώντας ότι $V_\infty = 0$, και σταθερά μ , β , a , για τον προσδιορισμό της διατμητικής τάσης και της ροής θερμότητας στη διεπιφάνεια κατέληξαν ότι:

- $\tau_w = \int_0^\delta \rho \cdot \beta \cdot g \cdot (T - T_\infty) \cdot dy - \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_0^\delta \rho \cdot u^2 \cdot dy \right]$
- $q_w = \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_0^\delta \rho \cdot c_p \cdot u \cdot (T - T_\infty) \cdot dy \right]$

Ακόμα, θεώρησαν ότι $Pr \approx 1$ για να έχουμε ίδιο πάχος θερμικού και κινηματικού οριακού στρώματος και θεώρησαν λογικά προφίλ των $u(x,y)$ και $T(x,y)$ για την προσεγγιστική επίλυση του προβλήματος.

Προσεγγίζοντας το προφίλ ταχύτητας με πολυώνυμο τετάρτου βαθμού και με απαίτηση ικανοποίησης των συνοριακών συνθηκών προκύπτει:

- $\frac{u(x,\eta)}{u_0} = \eta - 3\eta^2 + 3\eta^3 - \eta^4$ (Όπου $\eta = \frac{y}{\delta}$ και $u_0 = u_0(x)$)
- $\theta = \frac{T(\eta) - T_\infty}{T_b - T_\infty} = (1 - \eta)^2$

Συνοριακές συνθήκες :

- $u(x, 1) = \frac{\partial u}{\partial \eta}(x, 1) = \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2}(x, 1) = 0$
- $T(0) = T_b$, $\frac{\partial T}{\partial \eta}(1) = 0$

Έχοντας υποθέσει τα προφίλ ταχύτητας και θερμοκρασίας, οι μόνοι άγνωστοι που παραμένουν είναι οι συναρτήσεις : $u_0(x)$ και $\delta(x)$.

Ορίζοντας τον τοπικό αριθμό Grashof ως $Gr_x = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_b - T_\infty) \cdot x^3}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)^2}$

προκύπτει ότι:

- $\frac{\delta(x)}{x} \cdot Gr_x^{1/4} = \left[\frac{336 \left(Pr + \frac{5}{9} \right)}{Pr^2} \right]^{1/4}$
- $u_0(x) = C_2 \sqrt{x}$, όπου $C_2 = 112 \sqrt{\frac{g \cdot \beta \cdot (T_b - T_\infty)}{336 \left(Pr + \frac{5}{9} \right)}}$
- $h(x) = 2 \frac{k}{\delta(x)}$

Πλέον όλα είναι γνωστά, και μπορούμε να υπολογίσουμε τη μεταφορά θερμότητας ως : $Q_w = A \cdot h_{average} \cdot (T_b - T_\infty)$ (W)

➤ Το Μοντέλο των Eckert & Jackson για τυρβώδη ροή:

Σε αυτό το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε η αναλογία Reynolds και στοιχεία εργασιών του Blasius για τον προσδιορισμό του τ_w .

Οι διαφοροποιήσεις με το μοντέλο στρωτής ροής είναι οι εξής:

- $\frac{u}{u_0} = \eta^{\frac{1}{7}} \cdot (1 - \eta)^4$
- $\theta = 1 - \eta^{1/7}$
- $\tau_w(x) = 0.0288 \frac{\rho^{3/4} \cdot \mu^{1/4} \cdot u_0(x)^{7/4}}{\delta(x)^{1/4}}$

Με αντίστοιχο τρόπο, οι ποσότητες που μας ενδιαφέρουν υπολογίζονται ως:

- $\delta(x) = 0.565 Gr^{-0.1} \cdot Pr^{-\frac{8}{15}} \cdot (1 + 0.494 Pr^{2/3})^{0.1} \cdot x$
- $u_0(x) = \frac{\mu}{\rho} \cdot 1.185 \frac{Gr^{0.5} (1 + 0.494 Pr^{2/3})^{-0.5}}{x}$
- $h(x) = 0.0295 \frac{k}{x} \cdot \left[\frac{Pr^{7/6} \cdot Gr_x}{1 + 0.494 Pr^{2/3}} \right]^{2/5}$

3.3. Ψυχομετρία

Ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι ένα μίγμα αερίων από τα οποία ξεχωρίζουν το οξυγόνο (21% v/v), το άζωτο (78% v/v) και οι υδρατμοί (0.001-5% v/v). Αέρας χωρίς καθόλου υδρατμούς στη σύστασή του ονομάζεται ξηρός αέρας και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο να θεωρούμε τον ατμοσφαιρικό αέρα ως μίγμα ξηρού αέρα- υδρατμών γιατί η σύσταση του πρώτου παραμένει πρακτικά σταθερή στις φυσικές διεργασίες που μας απασχολούν.

Με εφαρμογή του κανόνα των φάσεων του Gibbs αντιλαμβανόμαστε ότι χρειαζόμαστε γνώση για δύο ανεξάρτητες θερμοδυναμικές ποσότητες για να καθορίσουμε πλήρως οποιαδήποτε κατάσταση του υγρού αέρα, δηλαδή:

$$(\text{Βαθμοί Ελευθερίας}) = (\text{Συστατικά}) - (\text{Φάσεις}) + 2$$

Απόλυτη Υγρασία (w)

Η απόλυτη υγρασία αέρα που βρίσκεται σε ατμοσφαιρική πίεση P μπορεί να οριστεί ως η πυκνότητα των υδρατμών (kg/m³) ή ως ο λόγος μαζών (m), μερικών πιέσεων (P) ή γραμμομοριακών κλασμάτων (y):

$$W = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{dry air}}} = \frac{P_{\text{vapor}}}{P - P_{\text{vapor}}} = \frac{y_{\text{vapor}}}{1 - y_{\text{vapor}}}$$

Ο αέρας μπορεί να συγκρατήσει πεπερασμένη ποσότητα υδρατμών η οποία καθορίζεται κυρίως από τη θερμοκρασία. Πιο συγκεκριμένα, όταν η μερική πίεση των υδρατμών εξισωθεί με την πίεση κορεσμού των υδρατμών στη συγκεκριμένη θερμοκρασία, ο αέρας ονομάζεται κορεσμένος και ο λόγος υγρασίας υπολογίζεται ως $W_{\text{sat}} = \frac{P_{\text{sat}}}{P - P_{\text{sat}}}$.

Σχετική Υγρασία (RH)

Η σχετική υγρασία ορίζεται ως ο λόγος της μερικής πίεσης υδρατμών προς την πίεση κορεσμού στη συγκεκριμένη θερμοκρασία, δηλαδή: $RH = \frac{P_{\text{vapor}}}{P_{\text{sat}}} \cdot 100\%$. Επομένως, σε κατάσταση κορεσμού θα ισχύει ότι $RH=100\%$.

Οποιαδήποτε περαιτέρω προσθήκη υδρατμών στον κορεσμένο αέρα θα παρατηρείται είτε ως αιωρούμενα σταγονίδια είτε θα συμπυκνώνεται μόλις έρθει σε επαφή με μία επιφάνεια όπου κατά τη διεργασία της συμπύκνωσης ο αέρας θα παραμένει διαρκώς κορεσμένος.

Χρήσιμες Θερμοδυναμικές ποσότητες

Ο υγρός ειδικός όγκος ορίζεται ως ο όγκος που καταλαμβάνει μια ποσότητα αέρα που περιέχει 1 kg ξηρού αέρα και w kg υδρατμών. Με χρήση του νόμου των ιδανικών αερίων υπολογίζεται ως:

- $v_m = \frac{RT}{P} \cdot \left(\frac{1}{29} + \frac{w}{18} \right) \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg dry air}} \right]$

Η πυκνότητα του υγρού αέρα ορίζεται ως:

- $\rho = \frac{v_m}{1+w} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg moist air}} \right]$

Η υγρή ειδική θερμοχωρητικότητα ορίζεται ως:

- $cp_m = cp_{\text{dry air}} + w \cdot cp_{\text{vapor}}$

Η υγρή ειδική ενθαλπία ορίζεται με βάση μία θερμοκρασία αναφοράς (συνήθως 0°C) και λαμβάνει υπ' όψιν τη λανθάνουσα συνεισφορά ενθαλπίας των υδρατμών:

- $H_m = cp_m \cdot (T - T_0) + w \cdot LH_v$

Η μερική πίεση των υδρατμών (σε kPa) υπολογίζεται ως εξής :

$$\bullet P_{\text{vapor}} = \frac{\frac{29}{18} \cdot w}{1 + \frac{29}{18} \cdot w}$$

Η πίεση κορεσμού P_{sat} των υδρατμών υπολογίζεται με χρήση της σχέσης των Wagner και Prueß (*Vaisala, 2013*) συναρτήσει της T και των τιμών στο κρίσιμο σημείο (T_c και P_c) ως εξής:

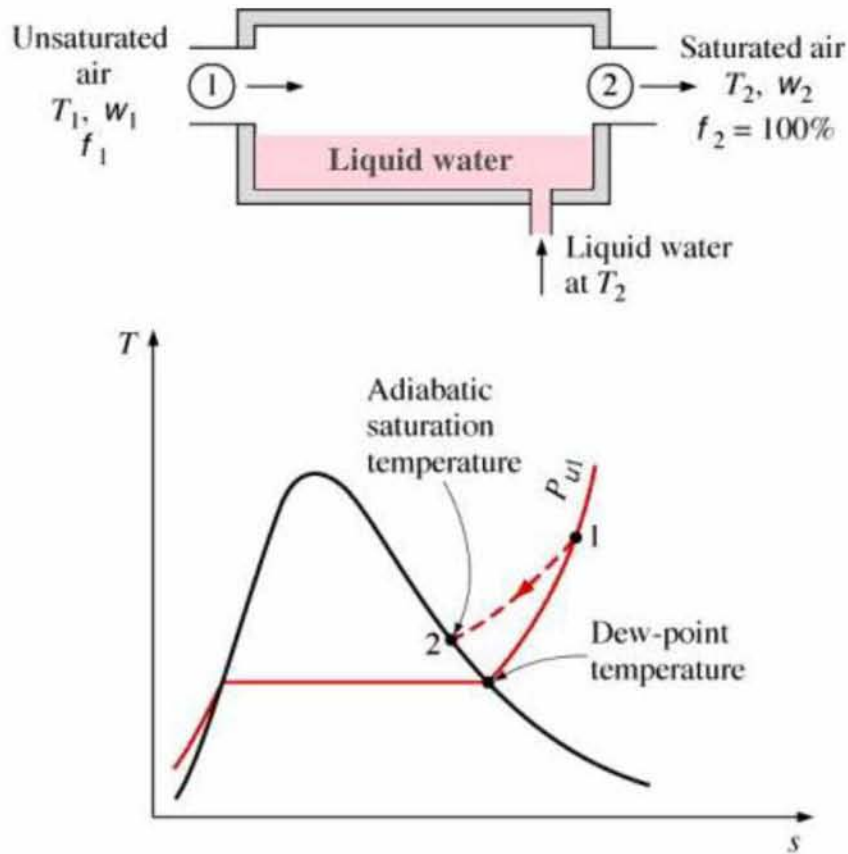
$$\bullet \vartheta = 1 - \frac{T}{T_c}$$
$$\bullet \ln\left(\frac{P_{\text{sat}}}{P_c}\right) = \frac{T_c}{T} \cdot (C_1 \vartheta + C_2 \vartheta^{1.5} + C_3 \vartheta^3 + C_4 \vartheta^{3.5} + C_5 \vartheta^4 + C_6 \vartheta^{7.5}) \quad \text{όπου: } C_1 = -7.859, \quad C_2 = 1.844, \\ C_3 = -11.787, \quad C_4 = 22.681, \quad C_5 = -15.962, \quad C_6 = 1.801$$

Θερμοκρασία Σημείου Δρόσου

Η θερμοκρασία σημείου δρόσου ορίζεται ως η θερμοκρασία κατά την οποία ξεκινάει η συμπύκνωση των υδρατμών, με τον αέρα να ψύχεται υπό σταθερή πίεση και άρα υπό σταθερή απόλυτη υγρασία. Όταν η θερμοκρασία μίας επιφάνειας πέσει κάτω από τη θερμοκρασία δρόσου του περιβάλλοντος, αρχίζει η συμπύκνωση της υγρασίας.

Θερμοκρασία Αδιαβατικού Κορεσμού

Αρχικά, με τον όρο αδιαβατικός εννοούμε ότι δεν υπάρχει εναλλαγή ενέργειας μεταξύ της συσκευής και του περιβάλλοντος. Σε μία διεργασία αδιαβατικού κορεσμού φέρνουμε σε επαφή σχετικά θερμό και ξηρό (ακόρεστο) ρεύμα αέρα με νερό (ή αλατόνερο). Στη διεπιφάνεια νερού -αέρα, λόγω τοπικής θερμοδυναμικής ισορροπίας ο αέρας είναι κορεσμένος σε υγρασία ενώ στην κύρια μάζα του είναι σχετικά ξηρός. Αυτή η διαφορά συγκέντρωσης υδρατμών ανάμεσα στη διεπιφάνεια και στην κύρια μάζα του αέρα είναι η κινούσα δύναμη για την εξάτμιση κάποιας ποσότητας νερού. Το αξιοσημείωτο εδώ είναι ότι ο αέρας που υγραίνεται αδιαβατικά στην ουσία ψύχεται. Αυτό συμβαίνει διότι η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης που πρέπει να απορροφήσει το υγρό για να εξατμιστεί, προέρχεται από τον ίδιο τον αέρα όταν η συσκευή λειτουργεί αδιαβατικά. Στο Σχήμα 3.5 βλέπουμε γραφικά τη διαφορά της θερμοκρασίας αδιαβατικού κορεσμού σε σχέση με αυτήν του σημείου δρόσου.



Σχήμα 3.5: ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΟΣ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΑΕΡΑ

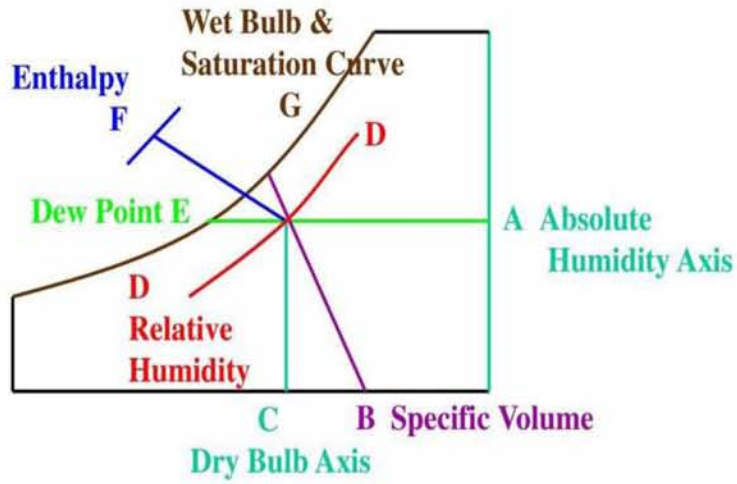
Θερμοκρασία Υγρού Βολβού

Η θερμοκρασία υγρού βολβού εν γένει διαφέρει από αυτήν του αδιαβατικού κορεσμού όμως για αέρα σε ατμοσφαιρική πίεση οι θερμοκρασίες αυτές είναι σχεδόν ταυτόσημες. Είναι η θερμοκρασία που δείχνει ένα θερμομέτρο τυλιγμένο με υγρό βαμβάκι όταν ο ρυθμός ψύξης του νερού λόγω εξάτμισης εξισωθεί με τον ρυθμό θέρμανσης λόγω συναγωγής από τον πλέον θερμότερο ξηρό περιβάλλοντα αέρα.

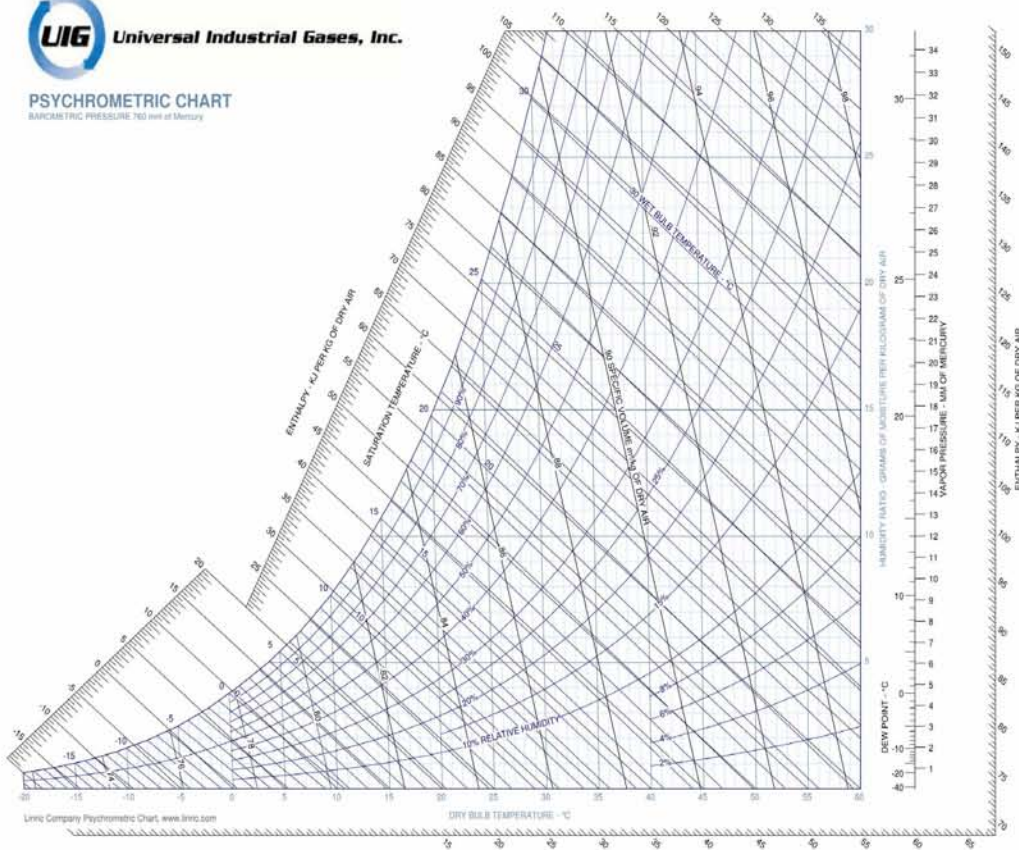
Ψυχομετρικό Διάγραμμα

Τα μεγέθη που ορίστηκαν παραπάνω, μπορούν να συλλεχθούν και να τοποθετηθούν πάνω σε ένα διάγραμμα ή «χάρτη» για την κατανόηση και γρήγορη προσέγγιση των άγνωστων χαρακτηριστικών ποσοτήτων όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.6 και 3.7.

The psychrometric chart has seven lines.



Σχήμα 3.6: ΟΙ ΓΡΑΜΜΕΣ ΤΟΥ ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

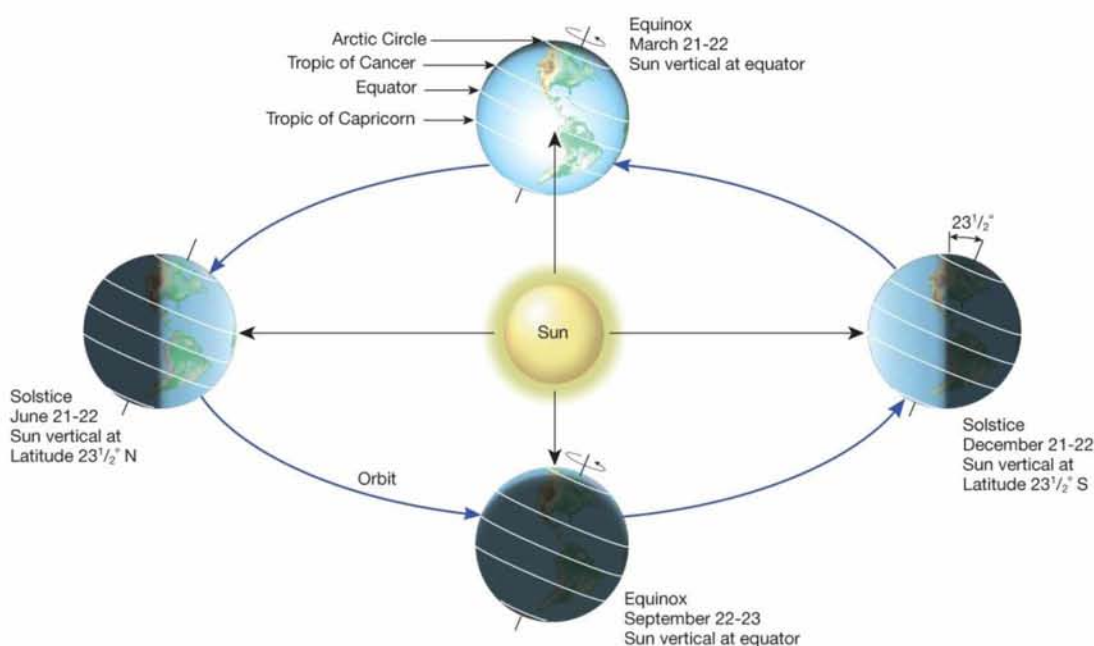


Σχήμα 3.7: Ο ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ

3.4. Ηλιακή Ακτινοβολία

Εισαγωγή

Ο Ήλιος είναι ένας αστέρας με διάμετρο ίση με 1.4×10^6 Km και μέση απόσταση από τη Γη περίπου 150×10^6 Km (1AU). Έχει μάζα ίση με 2×10^{27} τόνους και αποτελεί το 99.86% της μάζας ολόκληρου του ηλιακού συστήματος. Ο Ήλιος αποτελείται από πλάσμα και θεωρούμε ότι ακτινοβολεί ως μέλαν σώμα, δηλαδή ως τέλειος πομπός ή/και δέκτης ακτινοβολίας. Η θερμοκρασία του Ήλιου μεταβάλλεται από 40×10^6 °C στον πυρήνα μέχρι περίπου 5600 °C στην επιφάνεια.



Σχήμα 3.8: ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ ΤΗΣ ΓΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟΝ ΗΛΙΟ ΚΑΙ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟΝ ΕΑΥΤΟ ΤΗΣ

Ηλιακή σταθερά (G_s)

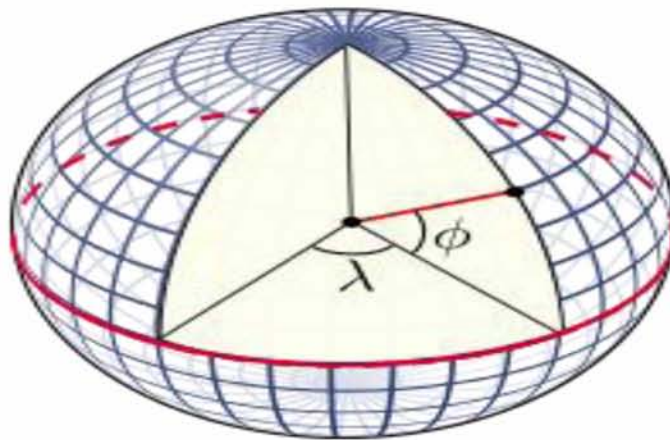
Η ηλιακή σταθερά ορίστηκε ως η ποσότητα ακτινοβολίας που δέχεται μια επιφάνεια εμβαδού 1 cm^2 σε απόσταση 1 AU, όταν εκτεθεί κάθετα στις ακτίνες για 1 min και υπολογίστηκε ότι $G_s = 1.367 \text{ KW/m}^2$. Φυσικά, λόγω της περιστροφής της Γης γύρω από τον εαυτό της αλλά και γύρω από τον Ήλιο, η ενέργεια που προσπίπτει σε μία δεδομένη περιοχή του πλανήτη μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια μίας ημέρας αλλά και κατά τη διάρκεια ενός έτους αντίστοιχα.

Γεωγραφικές Συντεταγμένες

Ως βάση των γεωγραφικών συντεταγμένων ορίζεται από σύμβαση ο ισημερινός και ο πρώτος μεσημβρινός (αυτός δηλαδή που διέρχεται από το αστεροσκοπείο του Γκρίνουιτς). Ο ισημερινός είναι το επίπεδο που είναι κάθετο στον άξονα περιστροφής της γης και ισαπέχει από τους δύο πόλους. Μεσημβρινοί είναι οι περιφέρειες των μέγιστων νοητών κύκλων που περιέχουν τον άξονα περιστροφής, άρα και τους πόλους.

Γεωγραφικό Πλάτος (ϕ): Είναι η γωνία ανάμεσα στο επίπεδο της εκάστοτε περιοχής και στο επίπεδο του ισημερινού ($-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$).

Γεωγραφικό Μήκος (λ): Είναι η γωνία ανάμεσα στον τοπικό μεσημβρινό που διέρχεται από μία περιοχή και στον πρώτο ισημερινό ($-180^\circ \leq \lambda \leq 180^\circ$).



Σχήμα 3.9: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΑΙ ΠΛΑΤΟΥΣ

Προσδιορισμός της θέσης του Ηλίου

Η θέση του Ηλίου στον ουρανό είναι συνάρτηση της τοποθεσίας μας πάνω στη Γη, της χρονικής στιγμής στη διάρκεια του έτους, και της ώρας στη διάρκεια της ημέρας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μας χρειαστούν η ηλιακή απόκλιση, η ωριαία ηλιακή γωνία και το ηλιακό ύψος. Λοιπές χαρακτηριστικές γωνίες που έχουν να κάνουν με τον ακριβή εντοπισμό του Ηλίου, είναι η ηλιακή αζιμούθια γωνία και η ηλιακή ζενιθιακή γωνία.

Ηλιακή απόκλιση ($-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$)

Είναι η γωνία μεταξύ του επιπέδου που ενώνει τα κέντρα Ήλιου-Γης και του επιπέδου του ισημερινού και μεταβάλλεται από μέρα σε μέρα. Κατά τις δύο ισημερίες (21/3 & 21/9) παίρνει μηδενική τιμή ενώ κατά το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο (21/6 & 21/12) παίρνει τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της αντίστοιχα.

Ωριαία ηλιακή γωνία (ω)

Είναι η γωνία που έχει περιστραφεί η Γη από το ηλιακό μεσημέρι μίας ημέρας. Παίρνει αρνητικές τιμές μέχρι το ηλιακό μεσημέρι και στη συνέχεια περνάει στην περιοχή των θετικών τιμών. Η περιστροφή αυτή πραγματοποιείται με ρυθμό περίπου 15 μοίρες ανά ώρα και αυτό μας επιτρέπει να υπολογίσουμε τη γωνία μεταξύ ανατολής-ηλιοβασιλέματος (ω_{ss}) καθώς και τη χρονική διάρκεια ηλιοφάνειας (t_d) για οποιαδήποτε ημέρα του έτους.

Ηλιακό ύψος (α)

Το ηλιακό ύψος ορίζεται για κάθε ώρα της καθεμίας ημέρας ως η γωνία μεταξύ του τοπικού ορίζοντα και του Ηλίου και είναι συμπληρωματική με την ηλιακή ζενιθιακή γωνία.

Οι παραπάνω ποσότητες προσδιορίζονται ως εξής :

- $\delta = 23.45^\circ \cdot \sin\left(360 \frac{n}{365}\right)$, $n = 1,2,3 \dots 365$ (days)
- $\omega = \frac{15^\circ}{\text{hour}} \cdot (t_{\text{solar}} - 12)$
- $\omega_{ss} = \cos^{-1}(-\tan \varphi \cdot \tan \delta)$
- $t_d = \frac{2}{15} \omega_{ss}$
- $\alpha = \sin^{-1}(\sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega)$

Ημερήσια ηλιακή ακτινοβολήση σε οριζόντια πλάκα

$$(H \equiv \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{day}})$$

Η ανάλυση ξεκινάει με τον υπολογισμό της ημερήσιας εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια οριζόντια πλάκα ως εξής:

- $H_0 = 24 \cdot \frac{3.6}{\pi} \cdot G_s \cdot \left[1 + 0.033 \cdot \cos\left(360 \frac{n}{365}\right)\right] \cdot (\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega_{ss} + \omega_{ss} \frac{\pi}{180} \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta)$

Στη συνέχεια λαμβάνεται υπ' όψιν η επίδραση της γήινης ατμόσφαιρας μέσω ενός συντελεστή καθαρότητας $0 \leq k_T \leq 1$. Η πραγματική ημερήσια ακτινοβολία που δέχεται η οριζόντια πλάκα ορίζεται πλέον ως: $H = k_T \cdot H_0$ και είναι το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας: $H = H_{\text{dir}} + H_{\text{diff}}$.

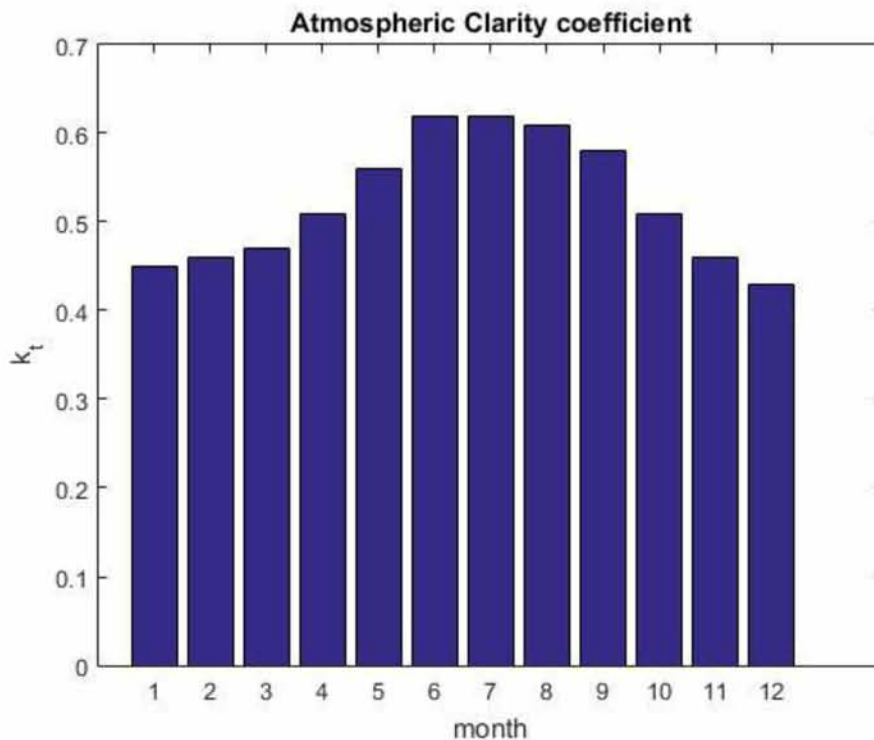
Ο συντελεστής καθαρότητας λαμβάνεται από δεδομένα του Υ.Π.Ε.Κ.Α. (T.O.T.E.E., 2010) για την Αγχίαλο και μας βοηθάει να υπολογίσουμε τη διάχυτη ημερήσια ακτινοβολία ως ποσοστό της ολικής ως εξής:

Αν $\omega_{ss} \leq 81.4^\circ$:

- $\frac{H_{diff}}{H} = 1 - 0.2727k_T + 2.4495k_T^2 - 11.9514k_T^3 + 9.3879k_T^4$,
για $k_T \leq 0.715$
- $\frac{H_{diff}}{H} = 0.143$, για $k_T > 0.715$

Αν $\omega_{ss} > 81.4^\circ$:

- $\frac{H_{diff}}{H} = 1 + 0.2832k_T - 2.5557k_T^2 + 0.8448k_T^3$, για $k_T \leq 0.722$
- $\frac{H_{diff}}{H} = 0.175$, για $k_T > 0.722$



Σχήμα 3.10: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΚΑΘΑΡΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΓΧΙΑΛΟ

Ωριαία ηλιακή ακτινοβολήση σε οριζόντια πλάκα

$$(I = I_{\text{dir}} + I_{\text{diff}} , \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{hour}})$$

Για τον υπολογισμό της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολήσης ορίζεται ο λόγος της ωριαίας προς την ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία ως $r_t = \frac{I}{H}$ και

$r_{\text{diff}} = \frac{I_{\text{diff}}}{H_{\text{diff}}}$ και υπολογίζεται μέσω των παρακάτω σχέσεων:

- $C1 = 0.409 + 0.5016 \cdot \sin(\omega_{ss} - 60)$
- $C2 = 0.6609 - 0.4767 \cdot \sin(\omega_{ss} - 60)$
- $r_t = \frac{\pi}{24} (C1 + C2 \cdot \cos \omega) \frac{(\cos \omega - \cos \omega_{ss})}{(\sin \omega_{ss} - \omega_{ss} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \cos \omega_{ss})}$
- $r_{\text{diff}} = \frac{r_t}{C1 + C2 \cdot \cos \omega}$

Ωριαία ηλιακή ακτινοβολήση σε πλάκα υπό κλίση s στο εσωτερικό γυάλινου περιβλήματος (I_T , $\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{hour}}$)

Όπως προτάθηκε από τους Hottel & Woertz (1942), ο συνδυασμός διάχυτης και ανακλώμενης από το έδαφος ακτινοβολίας μπορεί να θεωρηθεί ιστροπικός. Με αυτή την υπόθεση, το άθροισμα διάχυτης-ανακλώμενης ακτινοβολίας σε μια κεκλιμένη επιφάνεια θα είναι το ίδιο, ανεξάρτητα από τον προσανατολισμό.

Μία βελτίωση των παραπάνω ισχυρισμών έδωσαν οι Liu & Jordan (1963, Isotropic Diffuse Model). Η προσπίπτουσα ακτινοβολία θεωρείται ως το άθροισμα της άμεσης, της ιστροπικά διάχυτης, και της διαχυτικά ανακλώμενης από το έδαφος. Πιο συγκεκριμένα:

- $I_T = R_b \cdot I_{\text{dir}} + I_{\text{diff}} \cdot \frac{1 + \cos s}{2} + r_g \cdot I \cdot \frac{1 - \cos s}{2}$

Οι σταθερές $\frac{1 + \cos s}{2}$ και $\frac{1 - \cos s}{2}$ είναι οι συντελεστές όψεως της πλάκας με τον ουρανό και το έδαφος αντίστοιχα. Η ποσότητα r_g είναι η διαχυτική ικανότητα ανάκλασης του γύρω περιβάλλοντος και συνήθως παίρνει τιμές γύρω στο 0.25. Η ποσότητα R_b ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια κεκλιμένη πλάκα προς την αντίστοιχη μίας οριζόντιας πλάκας ($R_b = \frac{I_T}{I}$) και προσδιορίζεται για κάθε ώρα ηλιοφάνειας ως εξής:

- $R_b = \frac{\cos(\text{angle of attack})}{\sin(\text{solar height})}$

Διαπερατότητα και απορροφητικότητα περιβλήματος

Καθώς κατευθύνονται προς την πλάκα η άμεση, η διάχυτη και η ανακλώμενη ακτινοβολία, το γυάλινο περίβλημα θα επιτρέπει ένα μέρος της κάθε μορφής ακτινοβολίας να το διαπερνά ενώ το υπόλοιπο ποσοστό της ενέργειας θα απορροφάται από το γυαλί ή θα ανακλάται προς το περιβάλλον.

Έτσι, ορίζονται αντίστοιχα οι ποσότητες τ_{dir} , τ_{diff} , τ_{ref} , η κάθε μία από τις οποίες μπορεί να προσδιοριστεί ως το γινόμενο των ποσοτήτων τ_{abs} και τ_{ref} οι οποίες παίρνουν διαφορετικές τιμές για κάθε μορφή προσπίπτουσας ακτινοβολίας καθώς ορίζονται με βάση διαφορετικές γωνίες.

Επομένως η ποσότητα τ_{abs} ορίζεται ως ο λόγος της μεταδιδόμενης προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία λαμβάνοντας υπ' όψιν μόνο απώλειες απορρόφησης στο εσωτερικό του περιβλήματος ενώ η ποσότητα τ_{ref} ως η διαπερατότητα του περιβλήματος για αρχικά μη πολωμένη ακτινοβολία όπου λαμβάνονται υπ' όψιν μόνο απώλειες ανάκλασης.

➤ Διαπερατότητα σε άμεση ακτινοβολία (τ_{dir}):

Η γωνία πρόσπτωσης (angle of attack) της άμεσης ακτινοβολίας υπολογίζεται για κάθε ώρα της ημέρας ως εξής:

- $\theta_{1dir} = \cos^{-1}(\sin(\varphi - s) \cdot \sin \delta + \cos(\varphi - s) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega)$ (i)

Γνωρίζοντας ότι οι δείκτες διάθλασης του αέρα και του περιβλήματος είναι $n_{air} = 1$ και $n_g = 1.526$ αντίστοιχα και ορίζοντας ως θ_{2dir} τη γωνία διάθλασης, από τον νόμο του Snell υπολογίζουμε ότι:

- $\theta_{2dir} = \sin^{-1} \left[\frac{n_{air}}{n_g} \cdot \sin(\theta_{1dir}) \right]$

Πλέον μπορεί να υπολογιστεί η $\tau_{abs,dir}$ ως εξής:

- $\tau_{abs,dir} = \exp \left[-\frac{K \cdot l_g}{\cos \theta_{2dir}} \right]$, όπου $l_g = 0.004$ m το πάχος του περιβλήματος και $K = 10$ m⁻¹ η χαρακτηριστική σταθερά απόσβεσης.

Όσον αφορά το $\tau_{\text{ref,dir}}$, αυτό υπολογίζεται μέσω των ποσοτήτων r_{\parallel} και r_{\perp} , οι οποίες αποτελούν αντίστοιχα το παράλληλο και το κάθετο στην επιφάνεια τμήμα της μη πολωμένης άμεσης ακτινοβολίας και ορίζονται ως:

- $r_{\parallel} = \left(\frac{\sin(\theta_{2\text{dir}} - \theta_{1\text{dir}})}{\sin(\theta_{2\text{dir}} + \theta_{1\text{dir}})} \right)^2$
- $r_{\perp} = \left(\frac{\tan(\theta_{2\text{dir}} - \theta_{1\text{dir}})}{\tan(\theta_{2\text{dir}} + \theta_{1\text{dir}})} \right)^2$
- $\tau_{\text{ref,dir}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1-r_{\parallel}}{1+r_{\parallel}} + \frac{1-r_{\perp}}{1+r_{\perp}} \right)$

Άρα, τελικά το τ_{dir} υπολογίζεται ως: $\tau_{\text{dir}} = \tau_{\text{abs,dir}} \cdot \tau_{\text{ref,dir}}$

➤ Διαπερατότητα σε διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία
(τ_{diff} , τ_{ref}):

Οι ποσότητες αυτές προσδιορίζονται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο με τη μόνη διαφορά ότι ορίζεται διαφορετικά η γωνία πρόσπτωσης από τη σχέση (i). Πιο συγκεκριμένα, για το διάχυτο τμήμα αντικαθιστούμε την κλίση s με τη γωνία θ_{diff} και για το ανακλώμενο τμήμα στη θέση του s βάζουμε τη θ_{ref} όπως φαίνεται στις παρακάτω σχέσεις:

- $\theta_{\text{diff}} = 59.7^\circ - 0.1388 \cdot s + 0.001497 \cdot s^2$
- $\theta_{\text{ref}} = 90^\circ - 0.5788 \cdot s + 0.002693 \cdot s^2$

Αφού έχουν υπολογιστεί οι επιμέρους διαπερατότητες, οι αντίστοιχες ικανότητες απορρόφησης προσεγγίζονται ως :

- $\alpha_{\text{g,dir}} \approx 1 - \tau_{\text{abs,dir}}$
- $\alpha_{\text{g,diff}} \approx 1 - \tau_{\text{abs,diff}}$
- $\alpha_{\text{g,ref}} \approx 1 - \tau_{\text{abs,ref}}$

Όμως, όπως συνηθίζεται και στον οπτικό σχεδιασμό των ηλιακών συλλεκτών, θα πρέπει να οριστεί το «effective» κλάσμα ακτινοβολίας (τ_{eff}) που τελικά απορροφάται από την πλάκα και το οποίο συμπεριλαμβάνει την ικανότητα αντανάκλασης του περιβλήματος, τη διαπερατότητα αυτού και την ικανότητα απορρόφησης της μαύρης πλάκας. Η ποσότητα αυτή μπορεί να υπολογιστεί για κάθε μορφή προσπίπτουσας ακτινοβολίας (dir, diff, ref) ως εξής:

- $\tau\alpha_{\text{eff}} = \frac{\tau \cdot \alpha_p}{1 - (1 - \alpha_p) \cdot \rho_{\text{cover}}}$ όπου $\rho_{\text{cover}} = \left(\frac{n_g - 1}{n_g + 1}\right)^2$

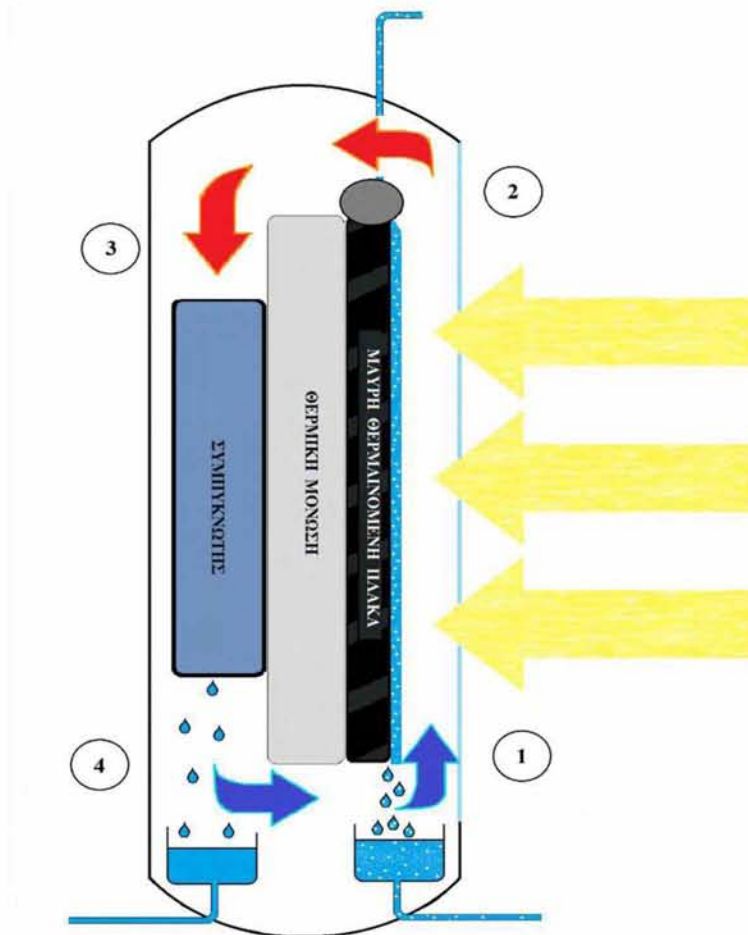
Επομένως, έχουμε πλέον τη δυνατότητα να υπολογίσουμε τις ποσότητες $(\tau\alpha_{\text{eff}} \cdot I)_T$ και $(\alpha_g \cdot I)_T$ που αποτελούν αντίστοιχα τη συνολική ωριαία ακτινοβολία που απορροφάται από την πλάκα και το γυάλινο περίβλημα ως εξής:

- $(\tau\alpha_{\text{eff}} \cdot I)_T = \tau\alpha_{\text{eff,dir}} \cdot I_{T,\text{dir}} + \tau\alpha_{\text{eff,diff}} \cdot I_{T,\text{diff}} + \tau\alpha_{\text{eff,ref}} \cdot I_{T,\text{ref}}$
- $(\alpha_g \cdot I)_T = \alpha_{g,\text{dir}} \cdot I_{T,\text{dir}} + \alpha_{g,\text{diff}} \cdot I_{T,\text{diff}} + \alpha_{g,\text{ref}} \cdot I_{T,\text{ref}}$

Οι ποσότητες αυτές καθίστανται ιδιαίτερα σημαντικές καθώς θα μας χρειαστούν για τα ισοζύγια ενέργειας της πλάκας απορρόφησης και του γυάλινου περιβλήματος κατά την ανάλυση του εξατμιστήρα της συσκευής αφαλάτωσης που θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 4^ο: Περιγραφή και Ανάλυση Συσκευής Αφαλάτωσης με Ύγρανση - Αφύγρανση και Φυσική Ανακυκλοφορία Αέρα

4.1. Θεωρητική Περιγραφή



Σχήμα 4.1: ΑΝΑΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ ΑΕΡΑ ΜΕΣΑ ΣΤΗ ΣΥΣΚΕΥΗ (Κουμεντάκος, 2018)

Σκοπός της συσκευής μας, η οποία όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1 ανήκει στην κατηγορία Closed-Air/Open-Water, είναι η αφαλάτωση θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού με τη μέθοδο ύγρανσης-αφύγρανσης με μοναδική πηγή ενέργειας την ηλιακή ακτινοβολία.

Οι ακτίνες του ηλίου αρχικά διαπερνούν το γυάλινο περίβλημα της συσκευής και στη συνέχεια θερμαίνουν μία μαύρη πλάκα, πάνω στην οποία ρέει το νερό με τη μορφή λεπτού υμένα. Όταν η πλάκα προσεγγίσει μία υψηλή θερμοκρασία, ένα ποσοστό του λεπτού υμένα αρχίζει να εξατμίζεται υγραίνοντας τον περιβάλλοντα αέρα.

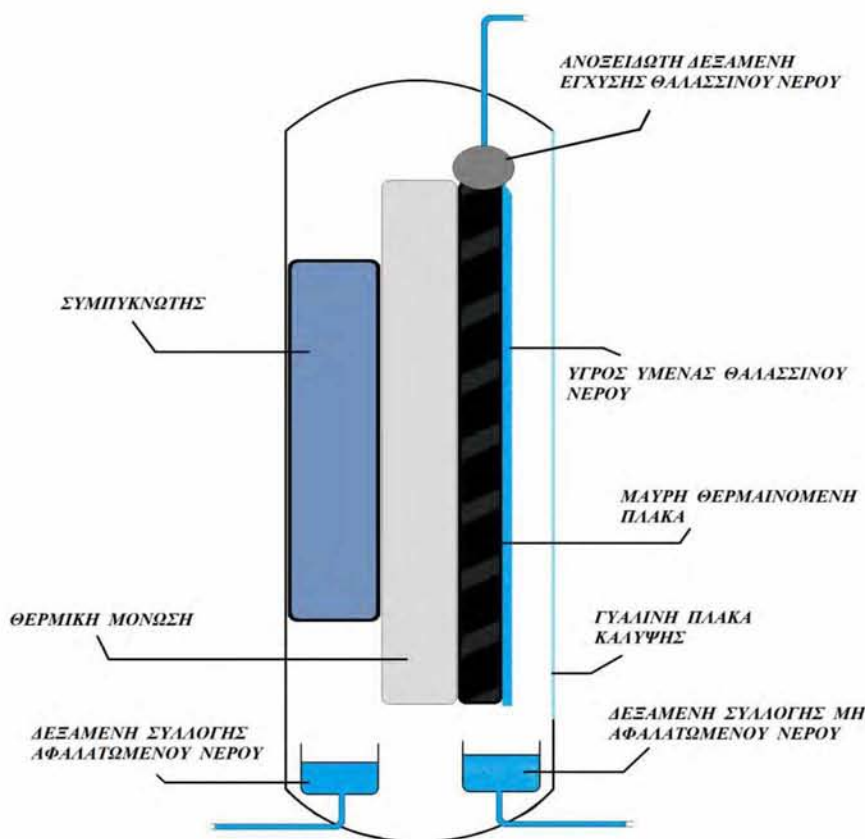
Παράλληλα, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας της μαύρης πλάκας αλλά και του γυάλινου περιβλήματος, δημιουργούνται ρεύματα φυσικής συναγωγής με αποτέλεσμα ο υγρός αέρας να κινείται ανοδικά με αντιορολογιακή φορά προς το μέρος του συμπυκνωτή.

Επίσης, το γυάλινο περίβλημα προκαλεί τη δημιουργία φαινόμενου του θερμοκηπίου, καθώς το γυαλί θα εμποδίζει την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από τη μαύρη πλάκα να διαφύγει από τη συσκευή.

Όταν ο θερμός και κορεσμένος σε υγρασία αέρας εισέλθει στον συμπυκνωτή, ψύχεται και ένα μέρος της υγρασίας του συμπυκνώνεται με αποτέλεσμα να παράγεται το επιθυμητό απόσταγμα, δηλαδή το αφαλατωμένο νερό, το οποίο συλλέγεται και αποθηκεύεται σε κατάλληλη δεξαμενή. Στη συνέχεια, ο ψυχρός και κορεσμένος αέρας είναι έτοιμος να εισέλθει εκ νέου στον εξατμιστήρα επαναλαμβάνοντας την όλη διαδικασία.

Τέλος, το πλούσιο σε άλατα μέρος του νερού που δεν εξατμίστηκε (άλμη) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προθέρμανση του εισερχόμενου στον εξατμιστήρα νερού, αυξάνοντας έτσι την απόδοση της συσκευής.

4.1.1. Μέρη της συσκευής



Σχήμα 4.2: ΤΑ ΜΕΡΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ HDH (Κουμμεντάκος, 2018)

Όπως φαίνεται στο σχήμα, η συσκευή μας είναι μια σχετικά απλή διάταξη και τα επιμέρους κομμάτια της διατίθενται στο εμπόριο. Δεν περιλαμβάνει κάποια σημαντική κατασκευαστική πρόκληση αλλά τα υλικά που χρησιμοποιούνται έχουν καθοριστική σημασία για τη λειτουργικότητα και την αξιοπιστία της συσκευής.

Πρέπει να τονιστεί, όμως, ότι η συγκεκριμένη συσκευή δεν υπάρχει στο εμπόριο και η παρούσα διπλωματική εργασία είναι μια προσπάθεια προκαταρκτικού σχεδιασμού, μοντελοποίησης του τμήματος ύγρανσης (εξατμιστήρας) και πρόβλεψης της παραγωγής αφαλατωμένου νερού.

I. Δίκτυο Σωληνώσεων

Εξωτερικά της συσκευής υπάρχει ένα δίκτυο σωληνώσεων το οποίο με τη βοήθεια μίας αντλίας τροφοδοτεί με αλατόνερο τον εξατμιστήρα από κάποια φυσική ή τεχνητή δεξαμενή. Όμως, για βελτιστοποίηση της απόδοσης της συσκευής, είναι προτιμότερο το αλατόνερο να περνάει αρχικά μέσα από τον συμπυκνωτή με σκοπό την προθέρμανσή του και την ανάκτηση της λανθάνουσας θερμότητας των υδρατμών. Οι σωληνώσεις που έρχονται σε επαφή με αλατόνερο πρέπει να είναι κατασκευασμένες από πολυπροπυλένιο ή υψηλά κραματωμένο ανοξείδωτο χάλυβα, ώστε να αποφεύγεται η διάβρωση και οι επικαθίσεις αλάτων.

II. Εξατμιστήρας

Στον εξατμιστήρα πραγματοποιείται η θέρμανση και η ύγρανση του εισερχόμενου αέρα. Περιλαμβάνει μια κατακόρυφη πλάκα μικρού πάχους, πιθανόν από κάποιο κράμα πίσσας και καουτσούκ, η οποία έχει αυστηρά μαύρη επικάλυψη έτσι ώστε να χαρακτηρίζεται από υψηλούς συντελεστές απορρόφησης και εκπομπής ακτινοβολίας. Φυσικά, η επιφάνεια της πλάκας είναι προσανατολισμένη προς το Νότο έτσι ώστε να επιταχύνεται η θέρμανσή της ενώ στο πίσω μέρος της τοποθετείται μία θερμομονωτική πλάκα η οποία ελαχιστοποιεί τις θερμικές απώλειες.

Στην κορυφή της πλάκας τοποθετείται ένα ανοιχτό ανοξείδωτο δοχείο στο οποίο καταλήγουν οι σωληνώσεις παροχής αλατόνερου. Το δοχείο θα έχει κατάλληλές εγκοπές διανομής έτσι ώστε, μέσω υπερχειλίσης, το αλατόνερο να ρέει όσο γίνεται ομοιόμορφα πάνω στην πλάκα ως κατερχόμενος υμένας (film). Επίσης, η τραχύτητα της πλάκας πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη ώστε να μεγιστοποιείται η διαβροχή της από το λεπτό υμένα και να ελαχιστοποιούνται οι

επικαθίσεις αλάτων. Τέλος, είναι απαραίτητο η πλάκα να παρουσιάζει υψηλή αντίσταση στη διάβρωση.

III. Συμπυκνωτής

Ο συμπυκνωτής είναι ένας κατακόρυφος εναλλάκτης θερμότητας αυλών-κελύφους που διαρρέεται εσωτερικά από ψυχρό αλατόνερο. Μόλις ο θερμός και υγρός αέρας που εξέρχεται από τον εξατμιστήρα έρθει σε επαφή με τις ψυχρές επιφάνειες των αυλών, ψύχεται και ένα μέρος των υδρατμών του συμπυκνώνεται ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνεται η ανάκτηση της λανθάνουσας θερμότητας συμπύκνωσης και η προθέρμανση του αλατόνερου. Το ύψος του συμπυκνωτή δεν θα πρέπει να ξεπερνάει το ύψος της πλάκας και ο όγκος του θα πρέπει να είναι ο ελάχιστος δυνατός. Επίσης, η πτώση πίεσης πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή ώστε να διατηρείται η φυσική ανακυκλοφορία του αέριου ρεύματος.

Η ακριβής ανάλυση του συμπυκνωτή είναι έξω από τα όρια της παρούσας διπλωματικής και συνίσταται μελλοντική διερεύνηση. Παρ' όλα αυτά, μπορούν να βγουν κάποια λογικά συμπεράσματα για το σχεδιασμό και τη λειτουργία του. Σε κάθε κύκλο, το θερμικό φορτίο του συμπυκνωτή θα ισούται με την ισχύ που προσδόθηκε στο αέριο ρεύμα από την πλευρά του εξατμιστήρα. Επίσης, κατά πάσα πιθανότητα ο εναλλάκτης ουσιαστικά είναι τύπου αυλών-κελύφους χωρίς κέλυφος και θα ήταν μη λειτουργικό να τοποθετηθούν ανακλαστήρες στη ροή του αέρα καθώς αυτό θα οδηγούσε σε ιδιαίτερα αυξημένη πτώση πίεσης.

IV. Δεξαμενές συλλογής

Στον πυθμένα τόσο του συμπυκνωτή όσο και του εξατμιστήρα υπάρχουν κατάλληλες δεξαμενές συλλογής γλυκού νερού και άλμης αντίστοιχα, οι οποίες θα πρέπει να είναι ανοξείδωτες και να έχουν αμελητέες διαστάσεις σε σχέση με τη συσκευή.

4.1.2. Βασικές Παραδοχές

I. Παραδοχές για τον Υγρό Υμένα

Το λεπτό φιλμ αλατόνευρου έχει πάχος της τάξης του χιλιοστού και για αυτό θεωρούμε ότι η μεταφορά θερμότητας διαμέσου του υμένα γίνεται αποκλειστικά με αγωγή. Γενικά, η θερμική αγωγιμότητα των υγρών είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από αυτήν των αερίων και αυτό σημαίνει πως η αντίσταση στη μετάδοση θερμότητας του υμένα θα είναι πολύ μικρότερη από αυτή του αέρα.

Θεωρούμε λοιπόν ότι ο λεπτός υμένας σταθεροποιείται «ακαριαία» σε θερμοκρασία περίπου ίση με αυτήν της μαύρης πλάκας όταν έρθει σε επαφή μαζί της. Όμως, για να αποκτήσει το υγρό φιλμ αυτή τη θερμοκρασία, αποσπά θερμική ενέργεια από τη μαύρη πλάκα, γεγονός που ισοδυναμεί με απώλειες ωφέλιμης ισχύος καθώς ο υγρός υμένας εξέρχεται της συσκευής. Φυσικά, όσο μεγαλύτερη η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ πλάκας και παροχής αλατόνευρου τόσο μεγαλύτερες θα είναι οι απώλειες. Επομένως, επιδιώκουμε τη μέγιστη δυνατή προθέρμανση του αλατόνευρου, πιθανόν με χρήση ενός ηλιακού συλλέκτη, ώστε να πλησιάσουμε τη θερμοκρασία της πλάκας.

II. Παραδοχές για τον Υγρό Αέρα

Αρχικά θεωρούμε ότι ο αέρας εισέρχεται στον εξατμιστήρα σε κατάσταση κορεσμού, δηλαδή με σχετική υγρασία 100% σε θερμοκρασία 15 °C, όπως δηλαδή θα έπρεπε να εξέλθει από το συμπυκνωτή. Η κινούσα δύναμη για την εξάτμιση των υδρατμών είναι η διαφορά υγρασίας στη διεπιφάνεια νερού-αέρα με την κύρια μάζα του αέριου ρεύματος.

Κατά την ανάλυση, όμως, του εξατμιστήρα παρατηρούμε ότι ο αέρας βρίσκεται σε ασταθή κατάσταση υπερκορεσμού ($RH > 100\%$). Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι παρόλο που το αέριο ρεύμα είναι κορεσμένο σε υδρατμούς, η εξάτμιση του υγρού υμένα επιβάλλεται από την επαφή με τη μαύρη πλάκα που βρίσκεται σε αρκετά υψηλότερη θερμοκρασία από τον αέρα.

Ακόμη, θεωρούμε ότι η ταχύτητα του αέρα είναι σταθερή και ομοιόμορφη κατά μήκος του εξατμιστήρα. Αυτό σημαίνει πως η πτώση πίεσης λόγω μεταβολής της πυκνότητας του αέρα θα εξισορροπεί την πτώση πίεσης που δημιουργείται εξαιτίας τριβών τόσο από τα τοιχώματα του εξατμιστήρα όσο και από την είσοδο και την έξοδο από αυτόν.

III. Παραδοχές για τους συντελεστές συναγωγής

Τα μοντέλα των Schmidt & Beckmann και Eckert & Jackson εφαρμόστηκαν για μεμονωμένες κατακόρυφες πλάκες όπου δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός για τα πάχη των οριακών στρωμάτων. Ωστόσο, λόγω του μικρού διακένου πλάκας-περιβλήματος εντός της συσκευής, τα οριακά στρώματα «συναντιούνται» πολύ γρήγορα στο κάτω μέρος του εξατμιστήρα. Από τη στιγμή που τα οριακά στρώματα αναπτυχθούν πλήρως, τα αντίστοιχα πάχη και οι συντελεστές φυσικής συναγωγής θα παραμείνουν σταθεροί κατά μήκος του εξατμιστήρα.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι είναι πιο ορθό να θεωρήσουμε σταθερούς μέσους αριθμούς Grashof και Nusselt από όπου προκύπτουν σταθεροί μέσοι συντελεστές συναγωγής, έχοντας θέσει ως χαρακτηριστικό μήκος το διάκενο πλάκας-περιβλήματος αντί του ύψους της συσκευής.

IV. Παραδοχές για την ηλιακή ακτινοβολία

Η ανάλυσή μας περιορίζεται σε ψευδό-μόνιμες συνθήκες λειτουργίας καθώς θεωρούμε σταθερή πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας για κάθε ώρα των ημερών που θα μελετήσουμε. Πιο συγκεκριμένα, οι ημέρες οι οποίες θα εξεταστούν είναι το θερινό ηλιοστάσιο (21/6), το χειμερινό ηλιοστάσιο (21/12) και οι δύο ισημερίες (21/3 & 21/9). Η ωριαία πρόσπτωση ακτινοβολίας στην κατακόρυφη πλάκα υπολογίζεται με χρήση του μοντέλου των Liu & Jordan.

Επίσης, θεωρούμε ότι τόσο η μαύρη πλάκα όσο και το γυάλινο περίβλημα βρίσκονται σε σταθερές θερμοκρασίες σε όλη την έκτασή τους, συμπέρασμα που προκύπτει από τη σχετικά υψηλή τους μάζα και θερμοχωρητικότητά. Οι θερμοκρασίες αυτές προκύπτουν από την επίλυση των αντίστοιχων ισοζυγίων ενέργειας τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια.

4.2. Αναλυτική Υπολογιστική Περιγραφή – Ανάλυση Εξατμιστήρα

Στην παρούσα ενότητα, αναπτύσσεται η λειτουργία του εξατμιστήρα από τη σκοπιά του υγρού αέρα. Όπως έχει αναφερθεί πιο πάνω, ο αέρας εισέρχεται στο κάτω μέρος του εξατμιστήρα σε κατάσταση κορεσμού, με θερμοκρασία $T_0 = 288 \text{ K}$ και απόλυτη υγρασία $w_0 = 0.0107 \frac{\text{kg vapor}}{\text{kg dry air}}$. Εκεί, θερμαίνεται σταδιακά και υγραίνεται καθώς κινείται ανοδικά λόγω ρευμάτων φυσικής συναγωγής.

Η κατακόρυφη πλάκα θεωρούμε ότι έχει μήκος $L = 2.5 \text{ m}$ και πλάτος $b=1 \text{ m}$ ενώ το διάκενο μεταξύ πλάκας και περιβλήματος ισούται με $d = 0.04 \text{ m}$. Η υδραυλική διάμετρος με βάση τον ορισμό της για ορθογώνιο κανάλι γράφεται ως: $d_h = \frac{2 \cdot d}{b+d} \approx 2 \cdot d$, ($b \gg d$).

Όσων αφορά τον υγρό υμένα, θεωρούμε μέση μαζική παροχή $\dot{m}_w = 0.01 \text{ kg/s}$ και με βάση τη σχετική ενότητα του κεφαλαίου 3 προκύπτει ότι το μέσο πάχος του υμένα είναι $\delta_w = 0.132 \text{ mm}$ και η μέση ταχύτητα πτώσης είναι $u_w = 7.6 \text{ cm/s}$.

Πριν την προθέρμανση (π.χ. σε ηλιακό συλλέκτη) η θερμοκρασία του υμένα θεωρούμε ότι ισούται με αυτή της θάλασσας του Βόλου: $T_{l,in} \approx T_0$. Η ποσότητα ενέργειας που θα μεταφερθεί στο αέριο ρεύμα θα περάσει αρχικά από τον υμένα μέσω αγωγής και με χρήση ισοζυγίου ενέργειας στον υμένα μπορούμε να επιβεβαιώσουμε την παραδοχή μας για τη σταθεροποίηση του υμένα στη θερμοκρασία της πλάκας.

Παρά το γεγονός ότι ο αέρας είναι κορεσμένος, έχοντας υποθέσει ότι το υγρό φιλμ βρίσκεται περίπου στην ίδια θερμοκρασία με την πλάκα, το στρώμα αέρα που βρίσκεται σε άμεση επαφή με το φιλμ θα έχει την υγρασία και την ενθαλπία που αντιστοιχεί σε συνθήκες ισορροπίας στη θερμοκρασία της πλάκας με τιμές w_b και H_b . Όσο πιο μεγάλη η θερμοκρασιακή διαφορά της πλάκας με την κύρια μάζα του αέρα, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η διαφορά ενθαλπίας και υγρασίας όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.3. Αυτή η διαφορά υγρασίας θα είναι η κινούσα δύναμη για την εξάτμιση του φιλμ.

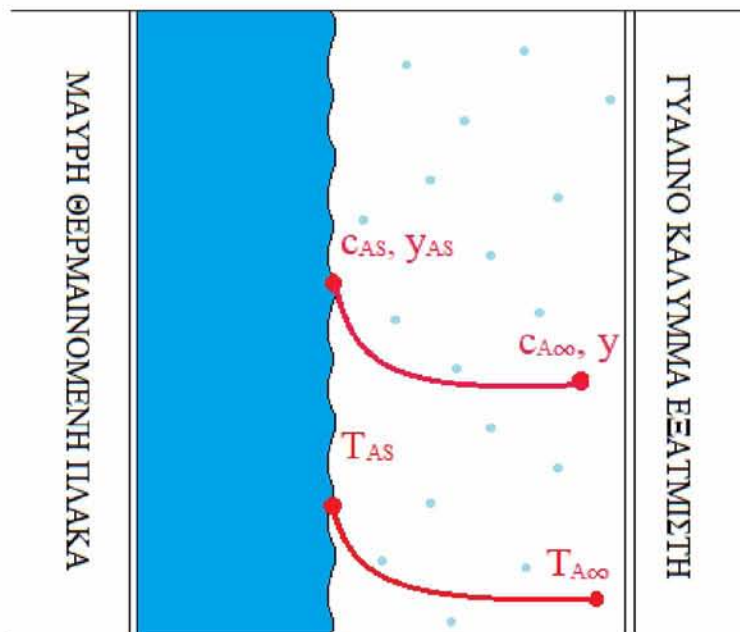
Πιο συγκεκριμένα, από το ισοζύγιο μάζας του νερού, κάθε ποσότητα αλατόνευρου που εξατμίζεται αντιστοιχεί σε μία αύξηση στην υγρασία του αέρα: $dm = G \cdot dw$, όπου G είναι η μαζική παροχή ξηρού αέρα σε kg/s . Η κινούσα δύναμη εκφράζεται ως:

- $G \cdot dw_{\text{air}} = (w_b - w_{\text{air}}) \cdot k_{\text{mass}} \cdot dx \cdot b$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο αντίστοιχος αριθμός Prandtl στα φαινόμενα μεταφοράς μάζας είναι ο αριθμός Schmidt και στην περίπτωση συστημάτων νερού-αέρα οι δύο αυτοί αριθμοί είναι ίσοι. Με αυτό ως δεδομένο, είναι γνωστό από την αναλογία Reynolds ότι ο συντελεστής μεταφοράς μάζας είναι ίσος με το λόγο του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας προς τη θερμοχωρητικότητα, δηλαδή $k_{\text{mass}} = \frac{h}{c_p}$. Επομένως:

- $G \cdot dw_{\text{air}} = (w_b - w_{\text{air}}) \cdot \frac{\bar{h}_b}{c_p} \cdot dx \cdot b$

Η σχέση αυτή ολοκληρώνεται αναλυτικά κατά μήκος της πλάκας και έτσι μπορεί να υπολογιστεί το προφίλ υγρασίας. Αυτόματα είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε τα προφίλ της υγρής θερμοχωρητικότητας και της μερικής πίεσης των υδρατμών.



Σχήμα 4.3: ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΥΔΡΑΤΜΩΝ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Η ανάλυση του εξατμιστήρα είναι μια επαναληπτική διαδικασία που πραγματοποιείται μέχρι να συγκλίνει στις πραγματικές τιμές των μεγεθών που μας απασχολούν. Αρχικά, υποθέτουμε τη θερμοκρασία της πλάκας T_b , του γυαλιού T_g , τη μαζική παροχή ξηρού αέρα G , τη μέση ειδική θερμοχωρητικότητα \bar{c}_p , τη μέση ταχύτητα \bar{u} και τη μέση θερμοκρασία \bar{T} του αέρα εντός του εξατμιστήρα. Έπειτα, με χρήση των μοντέλων που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 3, κάνουμε ανάλυση των οριακών στρωμάτων με σκοπό να υπολογίσουμε τελικά τους μέσους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας με φυσική συναγωγή \bar{h}_b και \bar{h}_g .

Στη συνέχεια καταστρώνουμε το ισοζύγιο ενέργειας για τον υγρό αέρα. Η μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου του ανοδικού αέριου ρεύματος είναι το άθροισμα της ενέργειας που παραλαμβάνει μέσω φυσικής συναγωγής και μέσω της αύξησης της υγρασίας του. Αυτό μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως εξής:

$$\bullet \quad G \cdot dH_{\text{air}} = \left[(H_b - H_{\text{air}}) \cdot \frac{\bar{h}_b}{c_p} + \bar{h}_g \cdot (T_g - T_{\text{air}}) \right] \cdot dx \cdot b$$

Με αντικατάσταση της υγρής ενθαλπίας με βάση τον ορισμό που δόθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο προκύπτει ότι οι όροι που έχουν να κάνουν με την υγρασία ουσιαστικά απαλείφονται:

$$\bullet \quad G \cdot \bar{c}_p \cdot dT_{\text{air}} = [(\bar{h}_b \cdot T_b + \bar{h}_g \cdot T_g) - (\bar{h}_b + \bar{h}_g) \cdot T_{\text{air}}] \cdot dx \cdot b$$

Η διαφορική εξίσωση που προκύπτει μπορεί να ολοκληρωθεί αναλυτικά επιτρέποντάς μας να γνωρίζουμε και το προφίλ της θερμοκρασίας του υγρού αέρα.

Γνωρίζοντας τη θερμοκρασία και την υγρασία του αέρα σε κάθε θέση κατά μήκος του εξατμιστήρα μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε τα προφίλ υγρής ειδικής ενθαλπίας, της πυκνότητας, του ειδικού όγκου και της πίεσης κορεσμού των υδρατμών. Η πτώση πίεσης λόγω φυσικής συναγωγής κατά μήκος της πλάκας υπολογίζεται ως:

$$\bullet \quad \Delta P_{\text{conv}} = \int_0^L g \cdot (\rho_0 - \rho) \cdot dx \cdot b .$$

Η ροή θα αποκατασταθεί στην ταχύτητα όπου αυτή η πτώση πίεσης θα εξισορροπείται από την πτώση πίεσης λόγω τριβών με την πλάκα και το περίβλημα. Αυτή η πτώση πίεσης υπολογίζεται ως:

$$\bullet \quad \Delta P_{\text{friction}} = \left(f \cdot \frac{d_h}{L} + k_{\text{in}} + k_{\text{out}} \right) \cdot \frac{\bar{\rho} \cdot \bar{u}^2}{2} , \quad k_{\text{in}} = 1.5 , \quad k_{\text{out}} = 1$$

Έτσι, προκύπτει ότι:

$$\bullet \quad \bar{u} = \sqrt{\frac{\frac{2 \Delta P_{\text{conv}}}{\bar{\rho}}}{\left(f \cdot \frac{d_h}{L} + k_{\text{in}} + k_{\text{out}} \right)}} \quad \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

$$\bullet \quad G = \bar{u} \cdot \frac{d_h}{v_m} \quad \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$$

Στη συνέχεια επιλύουμε τα ισοζύγια ενέργειας σε ολοκληρωτική μορφή για ολόκληρη τη μαύρη πλάκα και το γυάλινο περίβλημα. Σε αυτό το σημείο, η προσπίπτουσα ακτινοβολία που απορροφάται από την πλάκα και το γυαλί έχει ήδη υπολογιστεί για όλες της ώρες των τεσσάρων ημερών που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη μελέτη, όπως έχει εκτενώς περιγραφεί στο κεφάλαιο 3.

Επίσης, θεωρούμε λογικούς συντελεστές απωλειών λόγω του μη μηδενικού πάχους της πλάκας και λόγω συναγωγής στην εξωτερική πλευρά του περιβλήματος αντίστοιχα ως:

- $U_{\text{plate}} = 0.9 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ και $U_{\text{glass}} = 9 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

Ακολουθεί η διατύπωση των ολοκληρωτικών ισοζυγίων (σε W):

- $E_{\text{sun} \rightarrow \text{plate}} = E_{\text{plate} \rightarrow \text{air}} + E_{\text{plate} \rightarrow \text{glass}} + E_{\text{lossp}}$ (I.E. Πλάκας)
- $E_{\text{sun} \rightarrow \text{glass}} + E_{\text{plate} \rightarrow \text{glass}} = E_{\text{glass} \rightarrow \text{air}} + E_{\text{lossg}}$ (I.E. Γυαλιού)

Όπου:

- $E_{\text{sun} \rightarrow \text{plate}} = \int_0^L Q_{\text{sun} \rightarrow \text{plate}} \cdot dx \cdot b$,
όπου $Q_{\text{sun} \rightarrow \text{plate}} = (\tau \alpha_{\text{eff}} \cdot I)_T \cdot \frac{10^6}{3600}$ (W/m²)
- $E_{\text{plate} \rightarrow \text{air}} = \int_0^L (H_b - H_{\text{air}}) \cdot \bar{h}_b \cdot dx \cdot b$
- $E_{\text{plate} \rightarrow \text{glass}} = \int_0^L \frac{\epsilon_p \cdot \epsilon_g}{\epsilon_p + \epsilon_g - \epsilon_p \cdot \epsilon_g} \sigma \cdot (T_b^4 - T_g^4) \cdot dx \cdot b$,
όπου $\sigma = \frac{5.67}{10^8} \left(\frac{W}{m^2 K^4} \right)$, $\epsilon_p = \alpha_p = 0.95$, $\epsilon_g = 0.88$
- $E_{\text{lossp}} = \int_0^L U_{\text{plate}} \cdot (T_b - T_{\text{air}}) \cdot dx \cdot b$
- $E_{\text{lossg}} = \int_0^L U_{\text{glass}} \cdot (T_g - T_{\text{air}}) \cdot dx \cdot b$
- $E_{\text{glass} \rightarrow \text{air}} = \int_0^L \bar{h}_g \cdot (T_g - T_{\text{air}}) \cdot dx \cdot b$
- $E_{\text{sun} \rightarrow \text{glass}} = \int_0^L Q_{\text{sun} \rightarrow \text{glass}} \cdot dx \cdot b$,
όπου $Q_{\text{sun} \rightarrow \text{glass}} = (\alpha_g \cdot I)_T \cdot \frac{10^6}{3600}$ (W/m²)

Τέλος, με εφαρμογή του ισοζυγίου ενέργειας στον υγρό υμένα, προκύπτει για τη θερμοκρασία στη διεπιφάνεια ότι:

- $T_{\text{interface}} = T_b - \frac{E_{\text{plate} \rightarrow \text{air}}}{b \cdot L} \cdot \frac{\delta_w}{k}$, [K]

Επιλύοντας τα ισοζύγια προκύπτουν εκ νέου οι θερμοκρασίες της πλάκας και του περιβλήματος. Η επαναληπτική διαδικασία αντικαθιστά τις νέες τιμές των T_b , T_g , \bar{u} , \bar{c}_p , \bar{T} και $T_{\text{interface}}$ στις αρχικές εκτιμήσεις μέχρι οι τιμές αυτές να συγκλίνουν στις πραγματικές τιμές οι οποίες θα ικανοποιούν όλα τα ισοζύγια.

Πράγματι, η ελάχιστη τιμή που παίρνει ο λόγος θερμοκρασίας της διεπιφάνειας ως προς αυτήν της πλάκας είναι $(\frac{T_{\text{interface}}}{T_b})_{\text{min}} = 99.42\%$. Επομένως, η παραδοχή μας φαίνεται πως ευσταθεί.

Μετά τη σύγκλιση, είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε, για κάθε κύκλο λειτουργίας, ποσότητες όπως η αύξηση της υγρής ενθαλπίας και την αύξηση αισθητής και λανθάνουσας ενθαλπίας του αέρα ως ποσοστό της ολικής. Επιπροσθέτως, μπορούν πλέον να υπολογιστούν οι δείκτες G.O.R. (Gained-Output-Ratio), R.R. (Recovery Ratio) και S.E.C. (Specific Energy Consumption) οι οποίοι ορίστηκαν στο 2^ο κεφάλαιο και είναι ιδιαίτερα σημαντικοί:

- $G.O.R. = \frac{G \cdot (w_{\text{final}} - w_0) \cdot LH_v}{\dot{m}_w \cdot c_{p_w} \cdot (T_b - T_{l,\text{in}})}$, $\left[\frac{W_{\text{latent}}}{W_{\text{input}}} \right]$
- $R.R. \% = \frac{G \cdot (w_{\text{final}} - w_0)}{\dot{m}_w}$, $\left[\frac{\text{kg}_{\text{evaporated}}}{\text{kg}_{\text{pumped}}} \right]$
- $S.E.C. = \frac{LH_v}{G.O.R.} \cdot 2.78 \cdot 10^{-7}$, $\left[\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right]$

Τα τελικά αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν από την παραπάνω διαδικασία παριστάνονται γραφικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 5^ο : Αποτελέσματα

Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν γραφικά τα μεγέθη που μας απασχολούν κατά την ανάλυση της λειτουργίας του εξατμιστήρα της συσκευής.

Αρχικά θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα που σχετίζονται με την ηλιακή ακτινοβολία για τις ώρες ηλιοφάνειας στις ημέρες που μελετήθηκαν. Τα μεγέθη αυτά είναι η ωριαία πρόσπτωση ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο (I), ο λόγος της ωριαίας πρόσπτωσης σε κατακορυφό επίπεδο προς αυτήν σε οριζόντιο (R_b) και η ωριαία πρόσπτωση ακτινοβολίας σε κατακόρυφο επίπεδο (I_T). Επίσης θα παρασταθεί ο συντελεστής τ_{eff} για κάθε μορφή προσπίπτουσας ακτινοβολίας καθώς και οι ποσότητες ενέργειας που απορροφούνται τελικά από την απορροφητική πλάκα και το περιβλήμα.

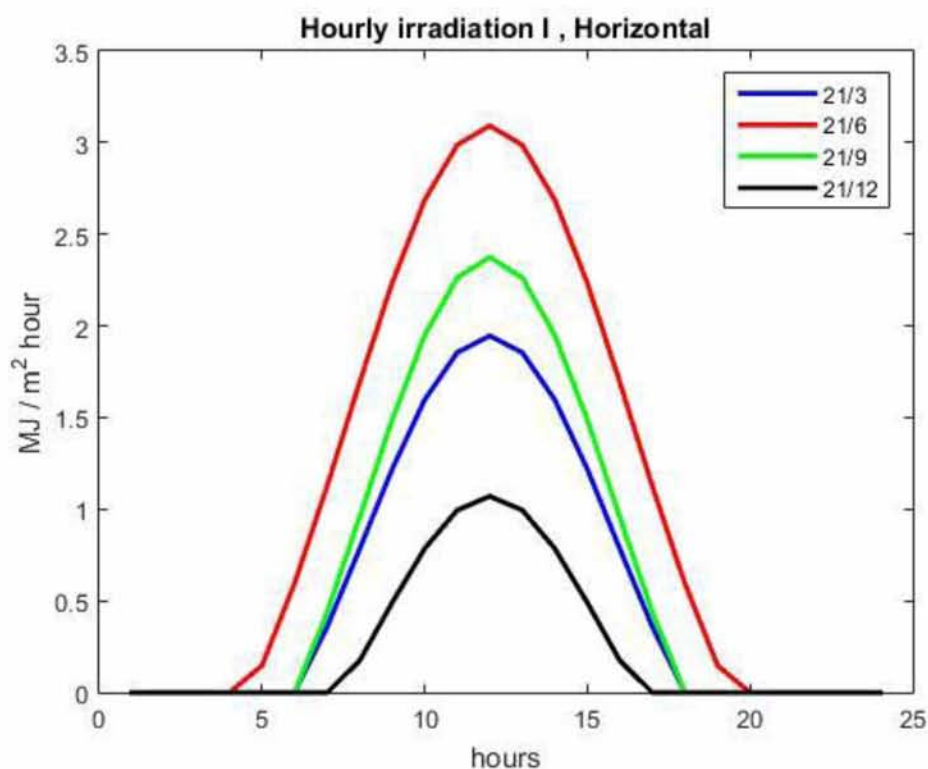
Στη συνέχεια, θα περάσουμε στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης του εξατμιστήρα, όπου αρχικά θα παρασταθούν ποιοτικά τα προφίλ της απόλυτης υγρασίας, της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα κατά μήκος του εξατμιστήρα στις 12:00 (ηλιακή ώρα) για κάθε ημέρα που μελετήθηκε.

Επίσης, θα παρουσιαστούν γραφικά, για όλες τις επιμέρους ώρες ηλιοφάνειας, ποσότητες όπως η θερμοκρασία της πλάκας, η θερμοκρασία του περιβλήματος και η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα. Επιπλέον, θα παρασταθούν η ωριαία παροχή υδρατμών, η ισχύς που απορροφάται από το αέριο ρεύμα, η πτώση πίεσης κατά μήκος του εξατμιστήρα, η μέση ταχύτητα του αέριου ρεύματος, οι μέσοι συντελεστές φυσικής συναγωγής, ο μέσος συντελεστής μεταφοράς μάζας και οι δείκτες G.O.R., R.R. και S.E.C.

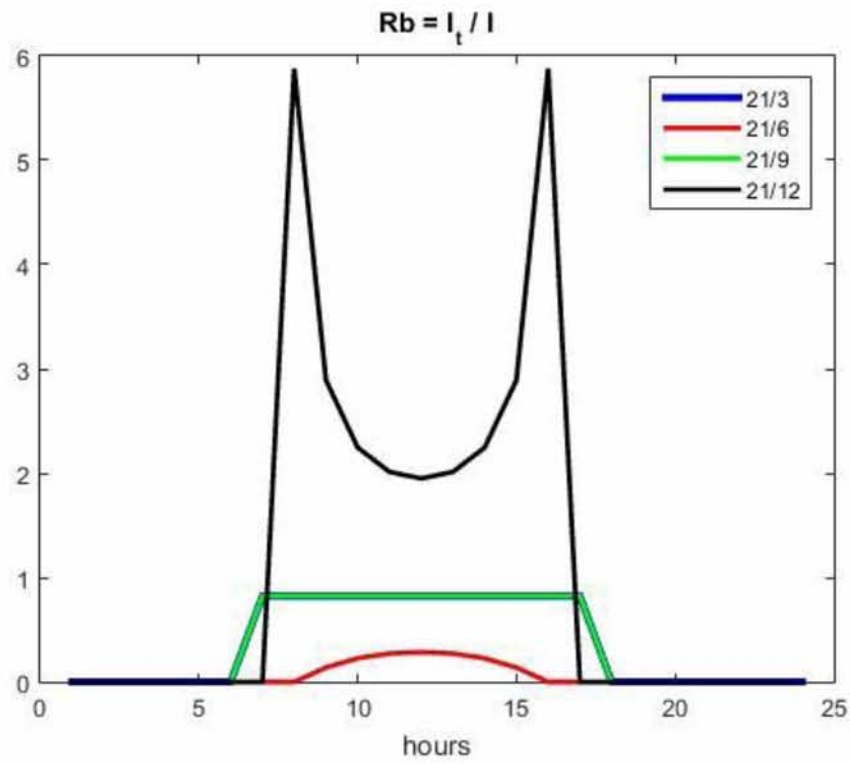
Τέλος, θα γίνει μία διερεύνηση της επίδρασης του ύψους της συσκευής καθώς και του διακένου μεταξύ απορροφητικής πλάκας και περιβλήματος στην παροχή υδρατμών.

5.1. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Ηλιακής Ακτινοβολίας

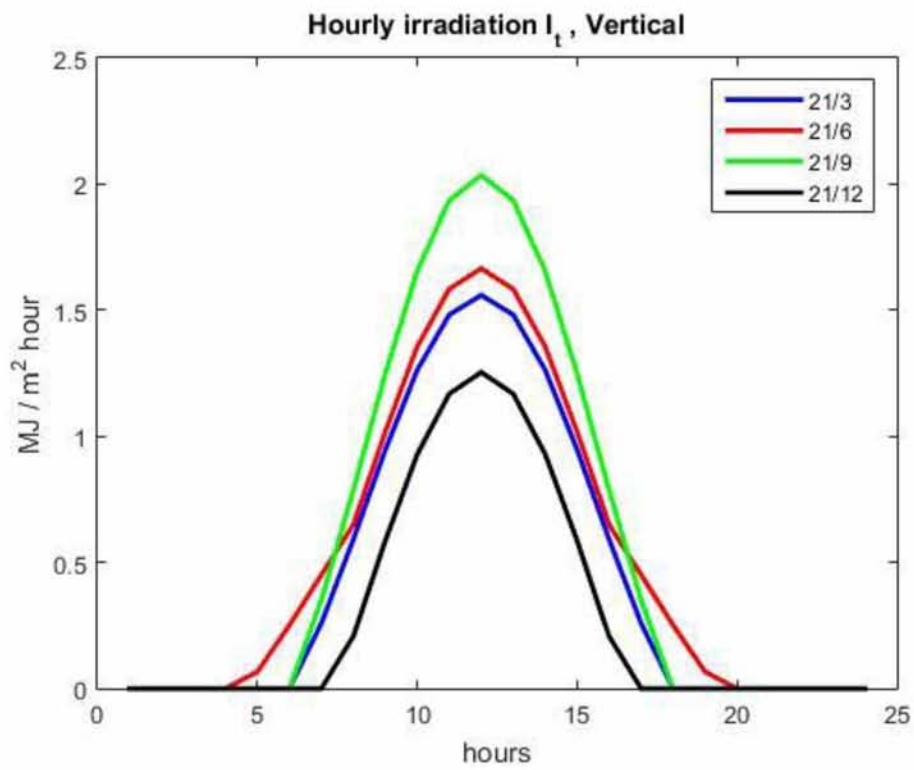
Όπως είναι αναμενόμενο, η μέγιστη ωριαία ηλιακή ακτινοβολή σε οριζόντια πλάκα παρατηρείται κατά το θερινό ηλιοστάσιο ενώ η ελάχιστη κατά το χειμερινό (Σχήμα 5.1). Όμως, καθώς η συσκευή βρίσκεται σε κατακόρυφη θέση (κλίση $s=90^\circ$), η γεωμετρική ποσότητα R_b παίρνει ιδιαίτερα χαμηλές τιμές στο θερινό ηλιοστάσιο (Σχήμα 5.2). Αυτό εξηγείται λόγω του μεγαλύτερου ηλιακού ύψους το καλοκαίρι σε σχέση με το χειμώνα, προκαλώντας έτσι μεγαλύτερη γωνία πρόσπτωσης. Επομένως, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 5.3, ο συνδυασμός έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της γωνίας πρόσπτωσης οδηγεί τη μέγιστη ωριαία ηλιακή ακτινοβολή σε κατακόρυφη πλάκα να παρουσιάζεται κατά την ισημερία του Σεπτεμβρίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η απουσία της απόλυτης συμμετρίας μεταξύ των δύο ισημεριών, όσον αφορά κάποια μεγέθη, οφείλεται κυρίως στην επίδραση της καθαρότητας της ατμόσφαιρας και στην κλίση της συσκευής.



Σχήμα 5.1: ΩΡΙΑΙΑ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΠΛΑΚΑ

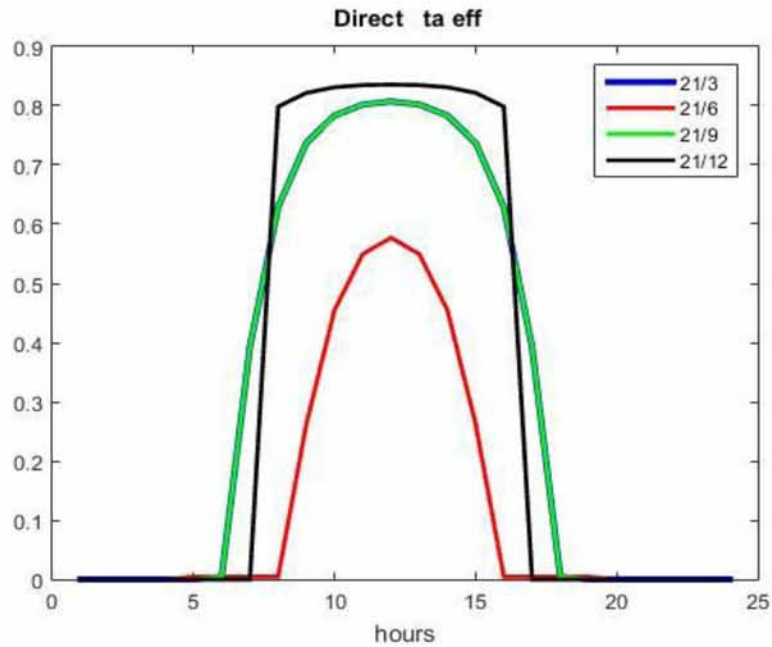


Σχήμα 5.2: ΛΟΓΟΣ ΩΡΙΑΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗΣ ΣΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΠΡΟΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

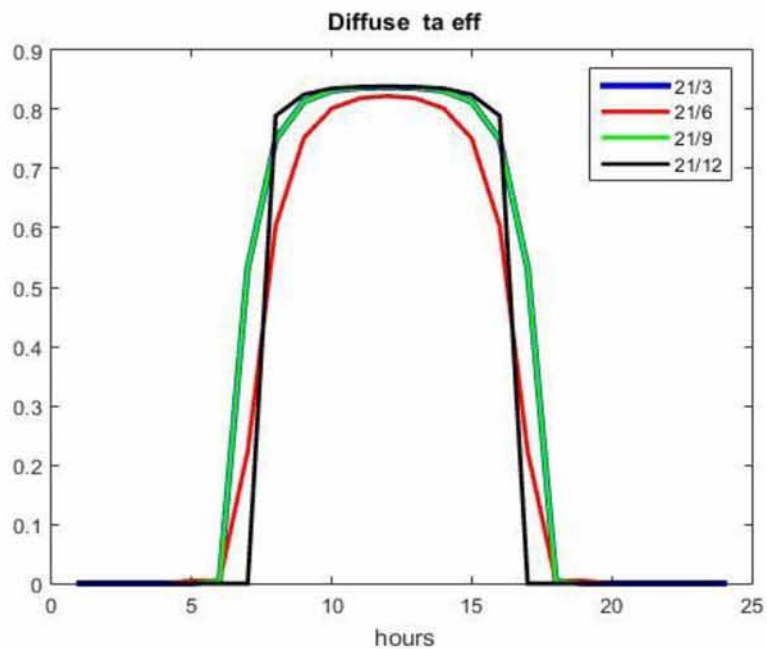


Σχήμα 5.3: ΩΡΙΑΙΑ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗ ΣΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΠΛΑΚΑ

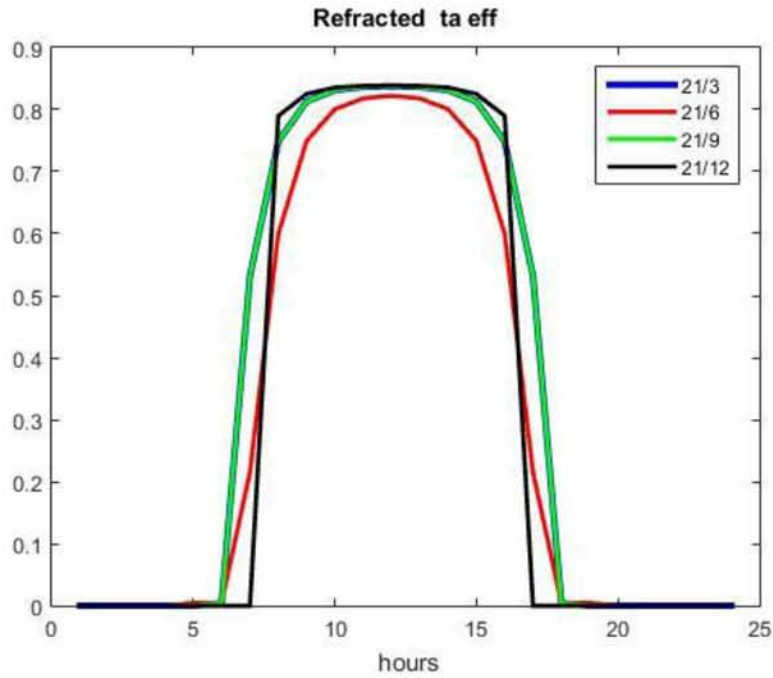
Μία ακόμα συνέπεια της σχετικά μεγάλης γωνίας πρόσπτωσης κατά τους θερινούς μήνες είναι η μείωση της διαπερατότητας του περιβλήματος στην άμεση ακτινοβολία, με αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή $\tau_{\text{eff,dir}}$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4. Οι διαπερατότητες σε διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες μεταβολές και άρα δεν υπάρχει αισθητή μεταβολή των συντελεστών $\tau_{\text{eff,diff}}$ και $\tau_{\text{eff,ref}}$ μεταξύ των 4 εξεταζόμενων ημερών (Σχήματα 5.5, 5.6).



Σχήμα 5.4: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ τ_{eff} ΣΤΗΝ ΑΜΕΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗ

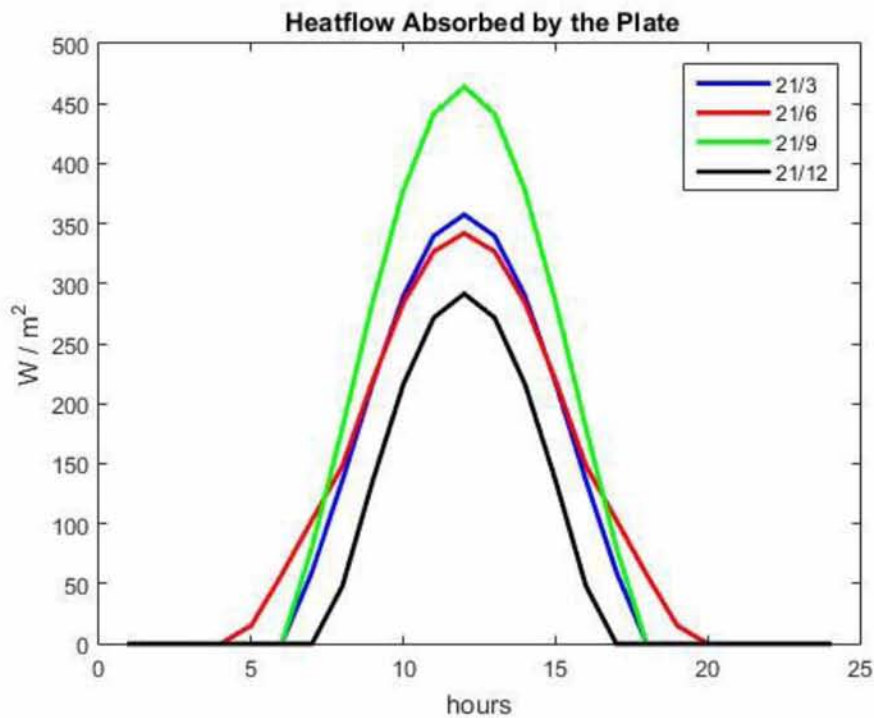


Σχήμα 5.5: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ τ_{eff} ΣΤΗ ΔΙΑΧΥΤΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗ

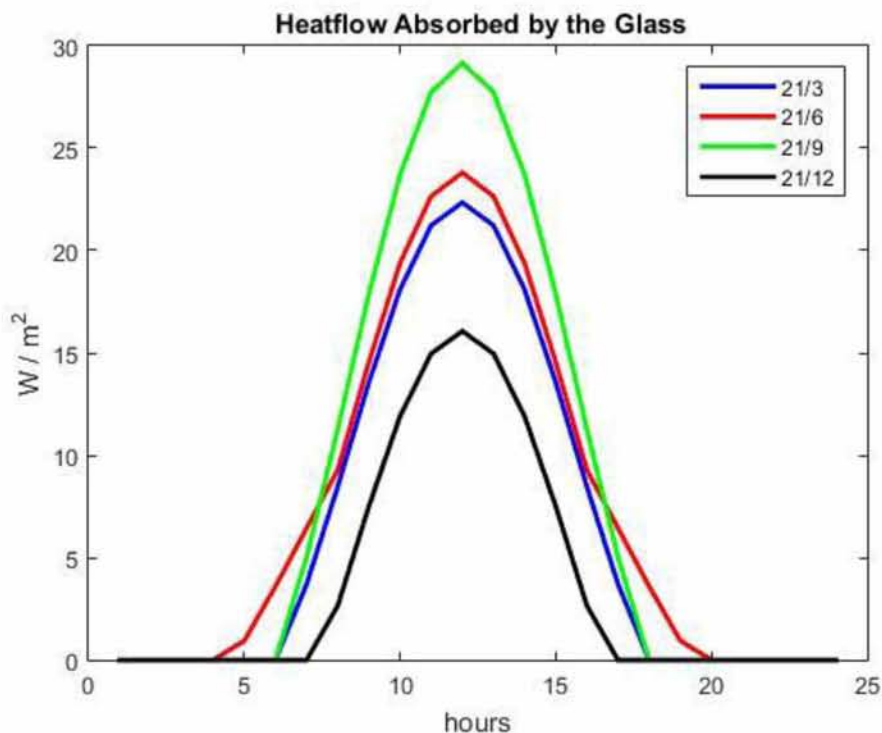


Σχήμα 5.6: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ $\tau_{a,eff}$ ΣΤΗΝ ΑΝΑΚΛΩΜΕΝΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗ

Η ελάττωση της γεωμετρικής ποσότητας R_b καθώς και της διαπερατότητας στην άμεση ακτινοβολία έχει ως αποτέλεσμα η ενέργεια που τελικά απορροφάται από τη μαύρη πλάκα και το γυάλινο περίβλημα να παρουσιάζεται λιγότερη από αυτήν που θα περιμέναμε κατά τους θερινούς μήνες και να μεγιστοποιείται κατά το Σεπτέμβριο, όπως παρουσιάζεται στα Σχήματα 5.7 και 5.8.



Σχήμα 5.7: ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟ ΤΗ ΜΑΥΡΗ ΠΛΑΚΑ



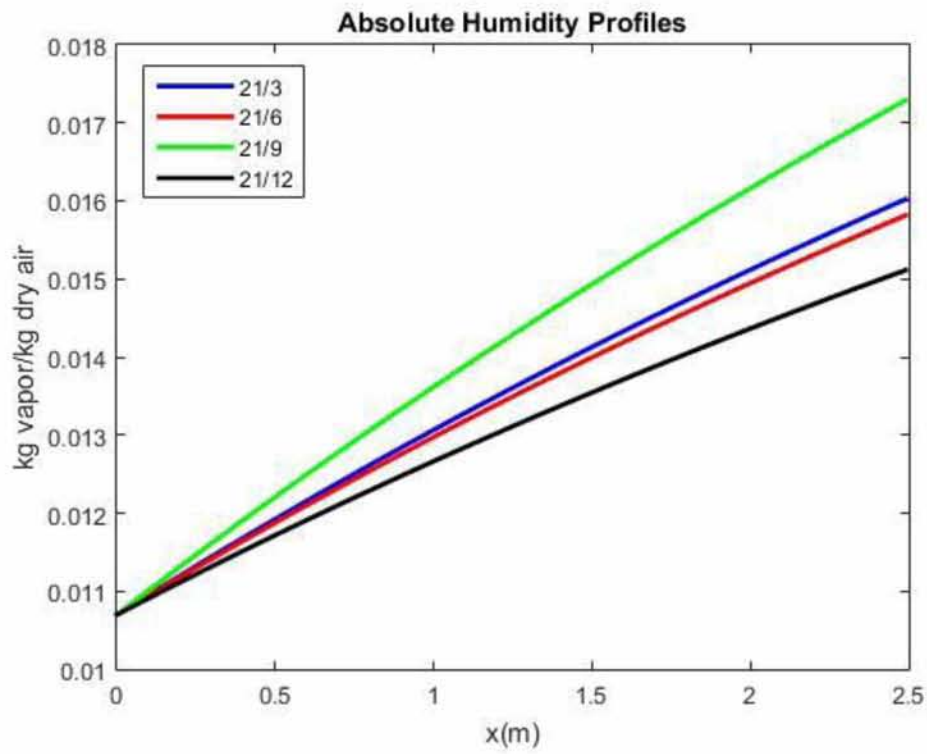
Σχήμα 5.8: ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟ ΤΟ ΓΥΑΛΙΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΜΑ

Πριν περάσουμε στην ανάλυση των αποτελεσμάτων του εξατμιστήρα, είναι εμφανές ότι για να μπορέσει η συσκευή να λειτουργεί αποτελεσματικά απαιτείται η ικανότητα περιστροφής της σε διαφορετικές κλίσεις ανάλογα με την εποχή του ηλιακού έτους. Αυτή η περιστροφή μπορεί να πραγματοποιείται είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα και αυτό θέτει ένα άνω όριο στο ύψος της συσκευής, ώστε να ελαχιστοποιείται η δυσκολία στήριξης και περιστροφής της.

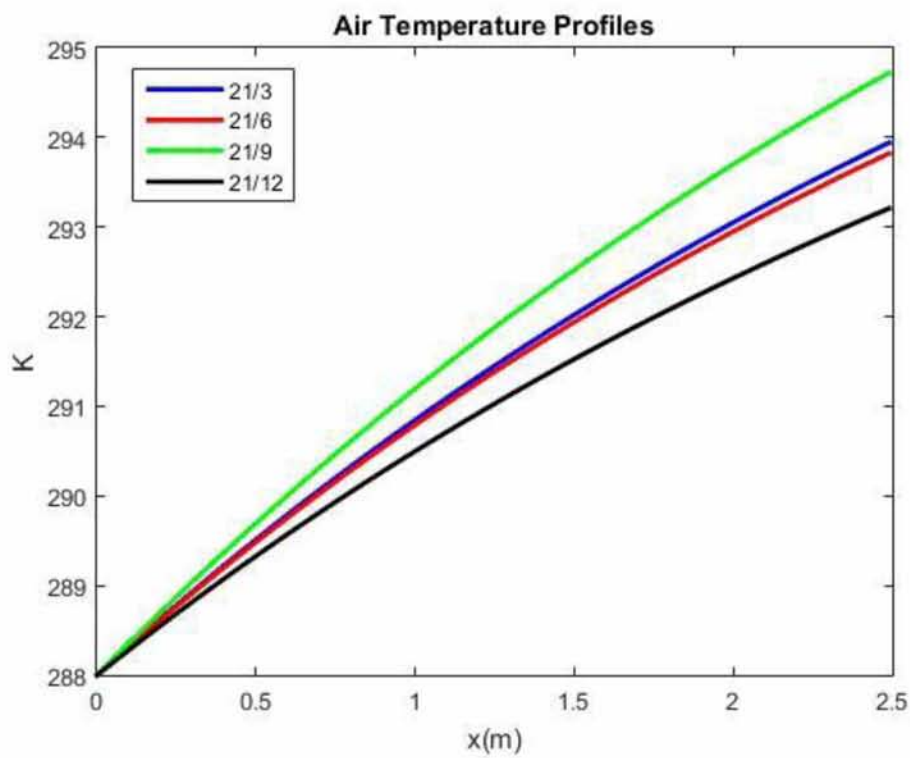
5.2. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Ανάλυσης Εξατμιστήρα

➤ Διαγράμματα κατά το Ηλιακό Μεσημέρι:

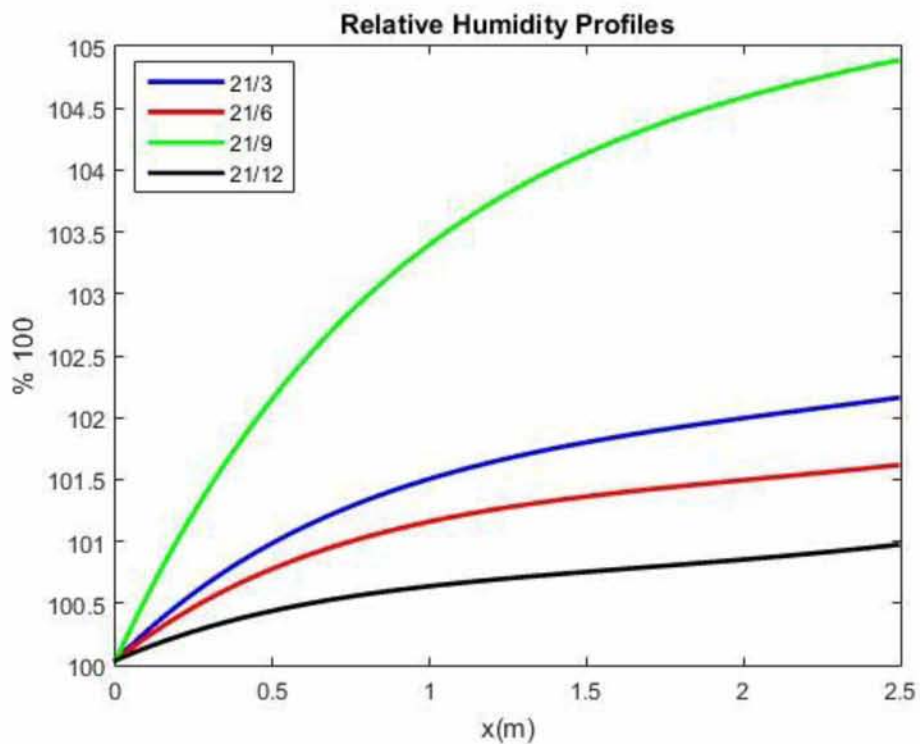
Τα προφίλ της απόλυτης υγρασίας, της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα στις 12:00 παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.9, 5.10 και 5.11. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο αέρας εντός του εξατμιστήρα είναι όντως υπέρκορος διότι υγραίνεται με ταχύτερο ρυθμό από αυτόν με τον οποίο θερμαίνεται. Για το λόγο αυτό, παρατηρούμε ότι η σχετική υγρασία υπερβαίνει το 100% και αγγίζει το 105%.



Σχήμα 5.9: ΑΠΟΛΥΤΗ ΥΓΡΑΣΙΑ ΤΟΥ ΑΕΡΑ

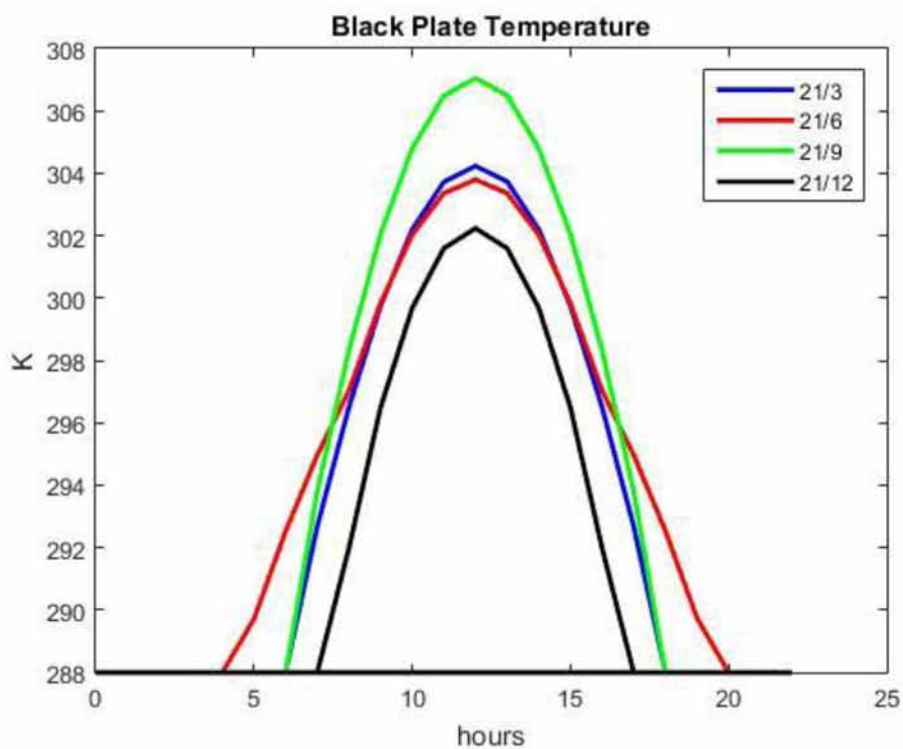


Σχήμα 5.10: ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΟΥ ΑΕΡΑ

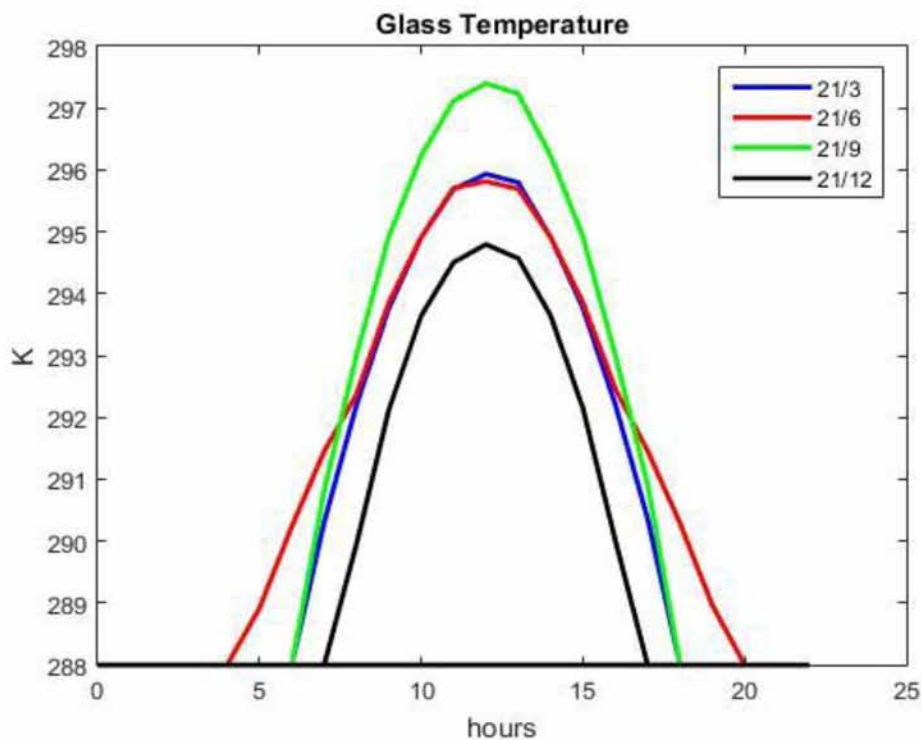


Σχήμα 5.11: ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ ΤΟΥ ΑΕΡΑ

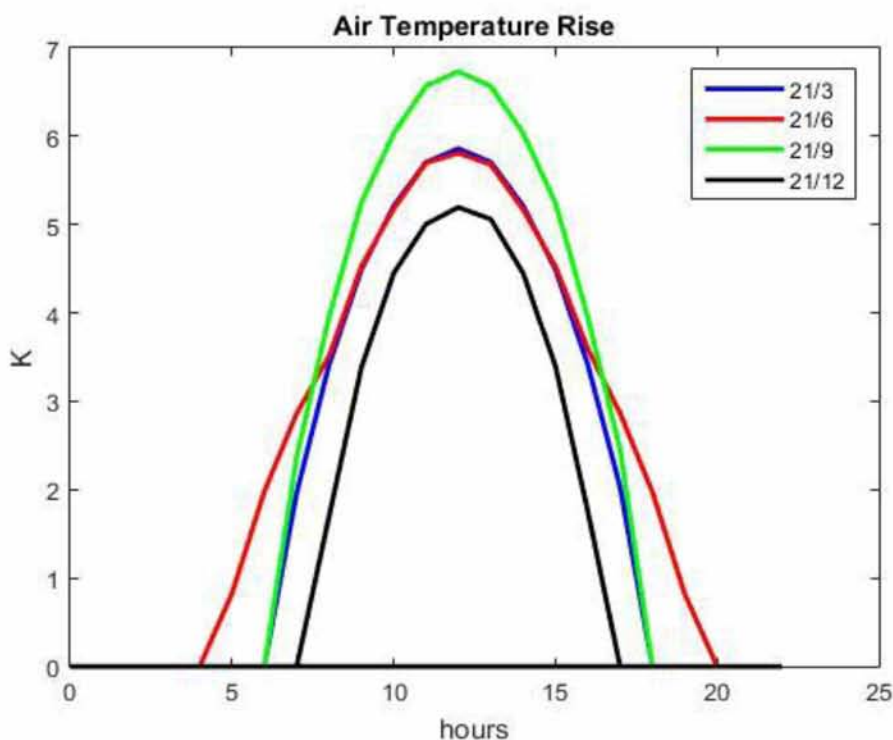
➤ Συγκεντρωτικά Ημερήσια Διαγράμματα:



Σχήμα 5.12: ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΗΣ ΜΑΥΡΗΣ ΠΛΑΚΑΣ

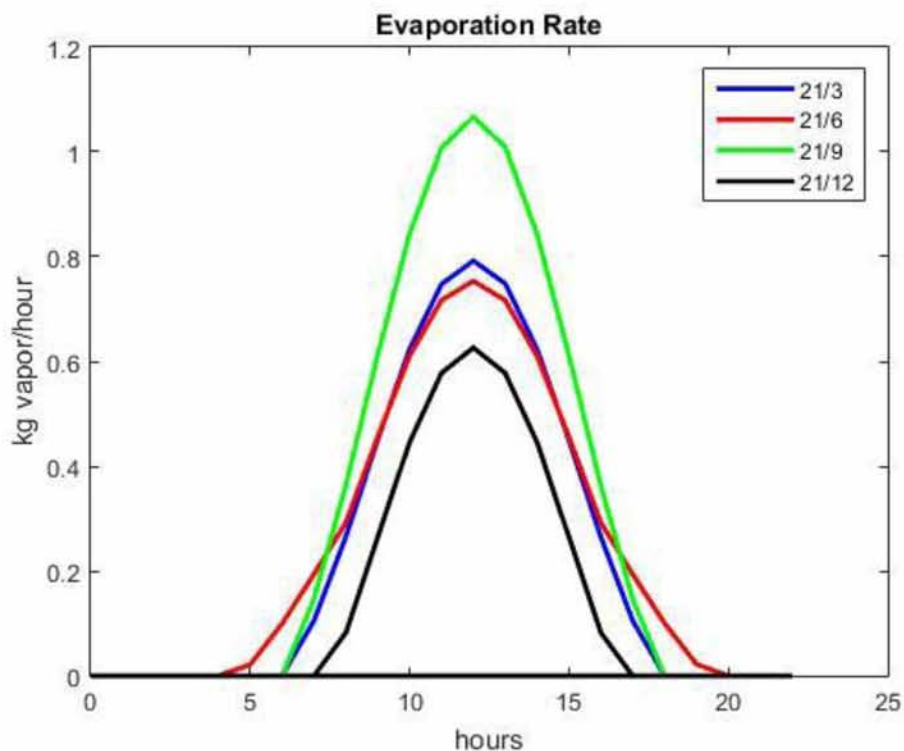


Σχήμα 5.13: ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΟΥ ΓΥΑΛΙΝΟΥ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑΤΟΣ

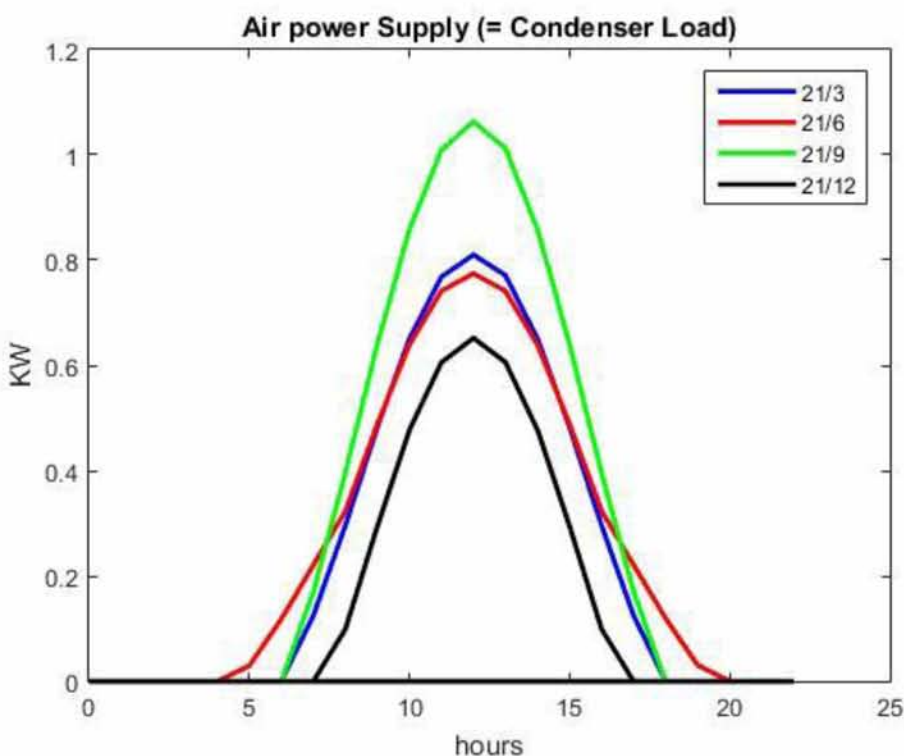


Σχήμα 5.14: ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ

Οι θερμοκρασίες του γυάλινου περιβλήματος, της απορροφητικής πλάκας και του αέριου ρεύματος στην έξοδο του εξατμιστήρα δεν προκύπτουν ιδιαίτερα υψηλές, γεγονός μάλλον αναμενόμενο από τη στιγμή που η ηλιακή ακτινοβολία δεν αξιοποιήθηκε με το βέλτιστο τρόπο.

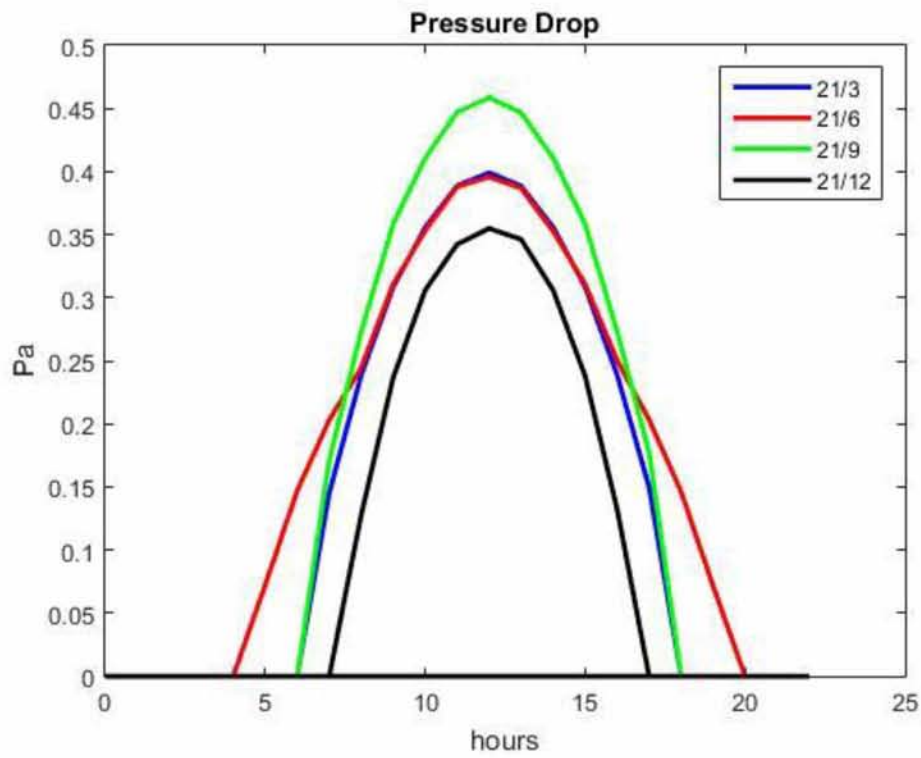


Σχήμα 5.15: ΩΡΙΑΙΑ ΠΑΡΟΧΗ ΥΔΡΑΤΜΩΝ

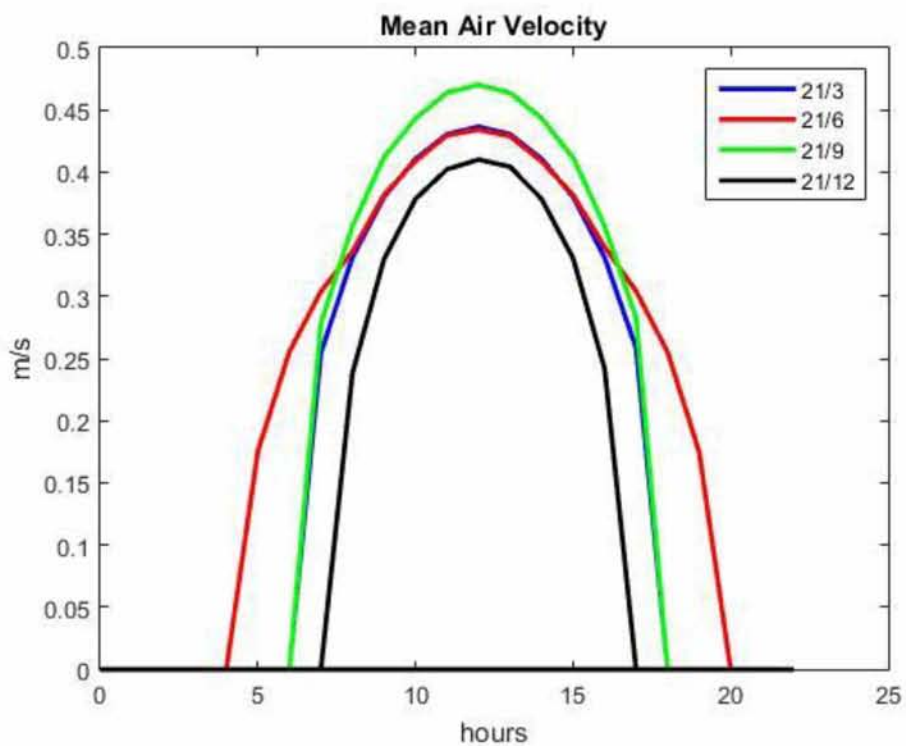


Σχήμα 5.16: ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΑΠΟ ΤΟ ΑΕΡΙΟ ΡΕΥΜΑ

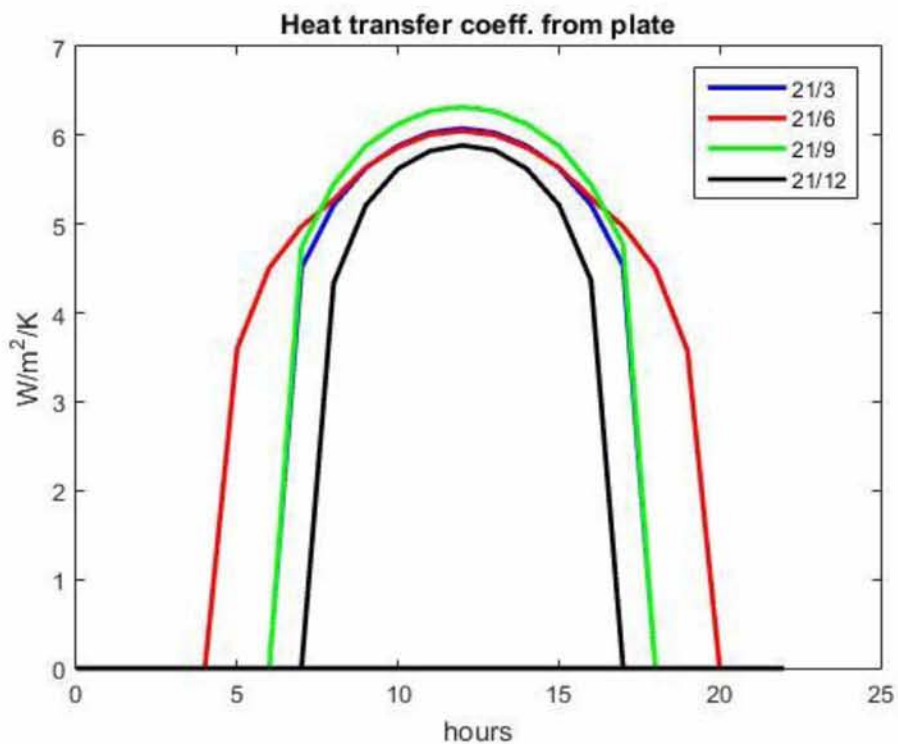
Η ισχύς που απορροφά το αέριο ρεύμα θα ισούται σε κάθε κύκλο με την ισχύ του συμπυκνωτή. Αυτή η σχετικά μικρή ποσότητα ισχύος δίνει τη δυνατότητα χρήσης μικρού και άρα σχετικά φθηνού συμπυκνωτή.



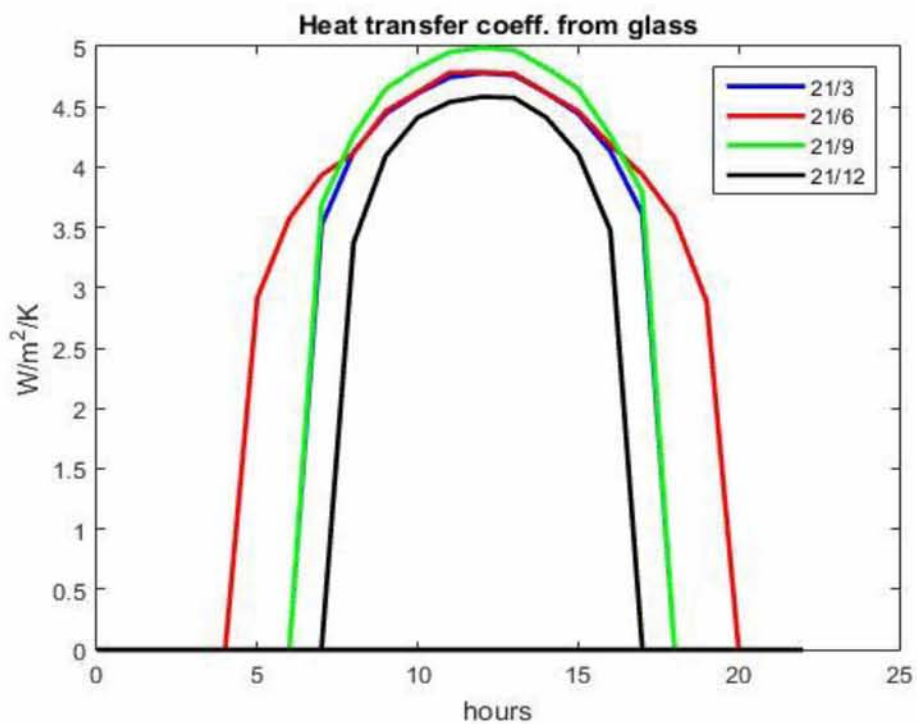
Σχήμα 5.17: ΠΤΩΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΟΝ ΕΞΑΤΜΙΣΤΗΡΑ



Σχήμα 5.18: ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

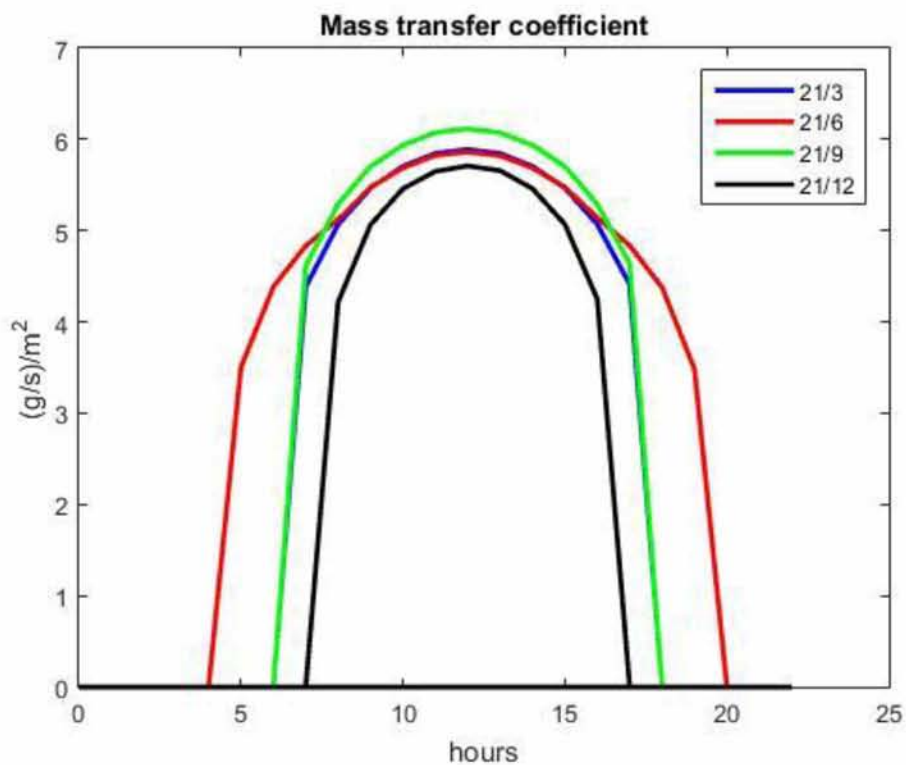


Σχήμα 5.19: ΜΕΣΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ ΣΤΗ ΜΑΥΡΗ ΠΛΑΚΑ

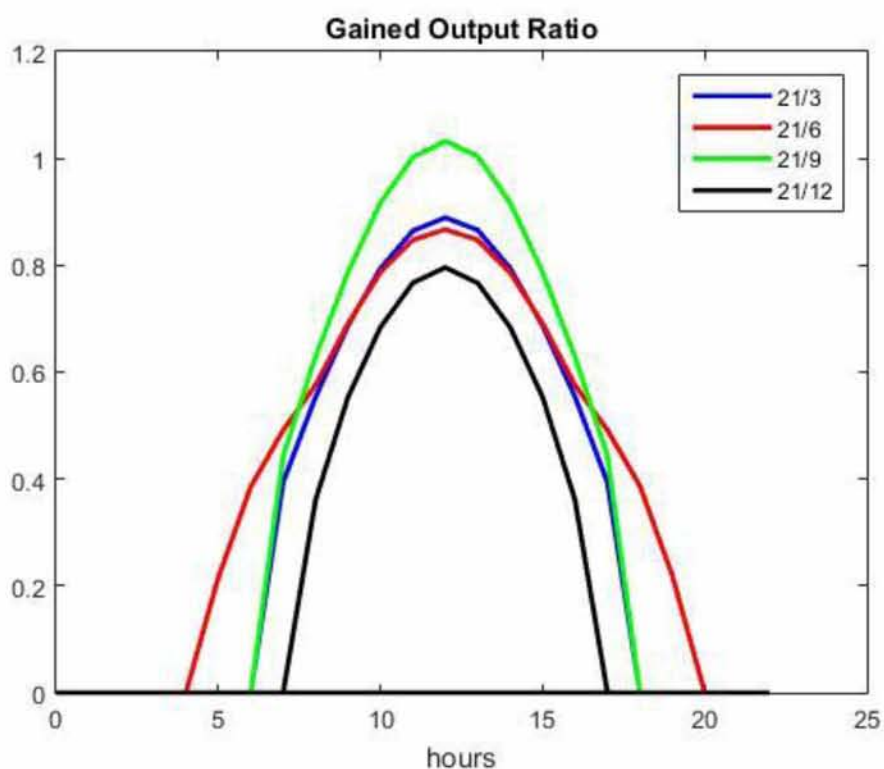


Σχήμα 5.20: ΜΕΣΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ΓΥΑΛΙΝΟ ΠΕΡΙΒΑΗΜΑ

Οι τιμές της πτώσης πίεσης, της μέσης ταχύτητας του αέριου ρεύματος και των συντελεστών συναγωγής είναι συμβατές με αυτές που παρατηρούνται σε φαινόμενα και εφαρμογές φυσικής συναγωγής.

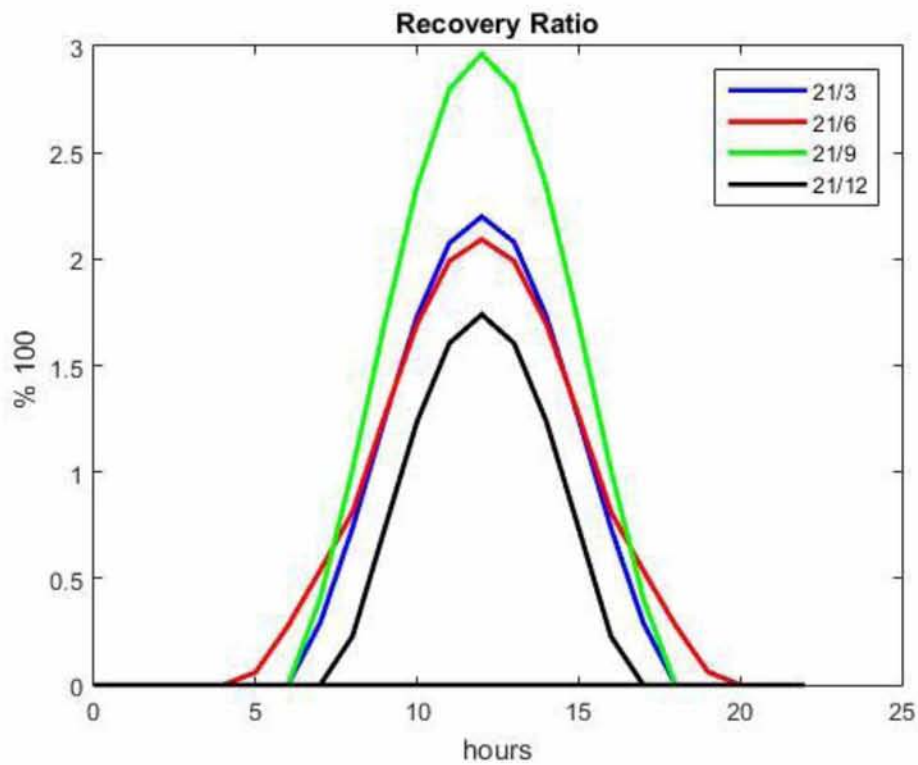


Σχήμα 5.21: ΜΕΣΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ



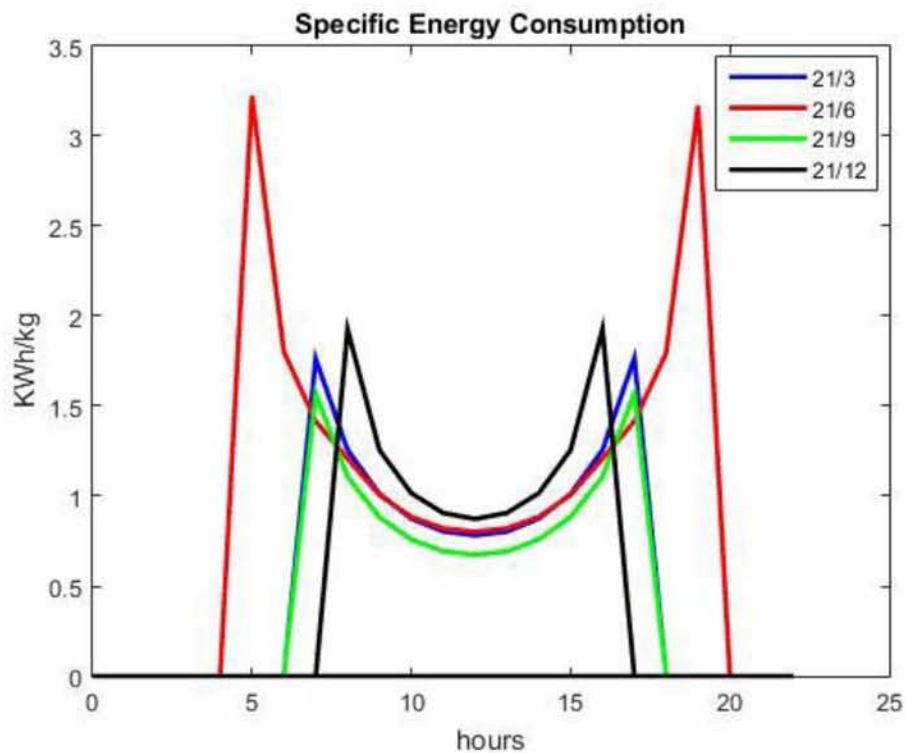
Σχήμα 5.22: ΔΕΙΚΤΗΣ G.O.R.

Η τιμή του δείκτη G.O.R. φαίνεται να είναι αρκετά χαμηλή αλλά αυτό είναι κάτι σχετικά συνηθισμένο σε εφαρμογές όπου υπάρχει μεγάλη διαθεσιμότητα ενέργειας με χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο.



Σχήμα 5.23: ΛΟΓΟΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ (R.R.)

Η τιμή του λόγου ανάκτησης αγγίζει μόλις το 3% αλλά μπορεί να αυξηθεί αρκετά με επαναροή της μέχρι τώρα απορριπτόμενης άλμης.



Σχήμα 5.24: ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (S.E.C.)

Η ελάχιστη τιμή του δείκτη S.E.C. είναι ικανοποιητικά χαμηλή, επομένως προβλέπεται ότι το λειτουργικό κόστος της συσκευής κατά τη διάρκεια της ημέρας δεν θα είναι ιδιαίτερα υψηλό.

Στον Πίνακα 5.A που ακολουθεί αναγράφονται οι ακραίες τιμές των ποσοτήτων που παρουσιάστηκαν στα Σχήματα 5.12 έως 5.24 κατά το ηλιακό μεσημέρι:

Μέγιστη Θερμοκρασία Πλάκας	(°C)	34
Μέγιστη Θερμοκρασία Τζαμιού	(°C)	24.4
Μέγιστη Αύξηση Θερμ. Αέρα	(°C)	6.73
Μέγιστη Παροχή Υδρατμών	(kg/h)	1.067
Μέγιστη Απορρόφηση Ισχύος	(kW)	1.063
Μέγιστη Πτώση Πίεσης	(Pa)	0.46
Μέγιστη Μέση Ταχύτητα Αέρα	(m/s)	0.47
Μέγιστος Συντελεστής h_b	(W/m ² K)	6.3
Μέγιστος Συντελεστής h_g	(W/m ² K)	5
Μέγιστος Συντ. Μεταφοράς Μάζας	(g/m ² s)	6.115
Μέγιστος Δείκτης G.O.R.	(W/W)	1.032
Μέγιστος Δείκτης R.R.	(kg/kg)	2.96 %
Ελάχιστος Δείκτης S.E.C.	(kWh/kg)	0.673

Πίνακας 5.A : ΑΚΡΑΙΕΣ ΤΙΜΕΣ (12:00 SOLAR TIME)

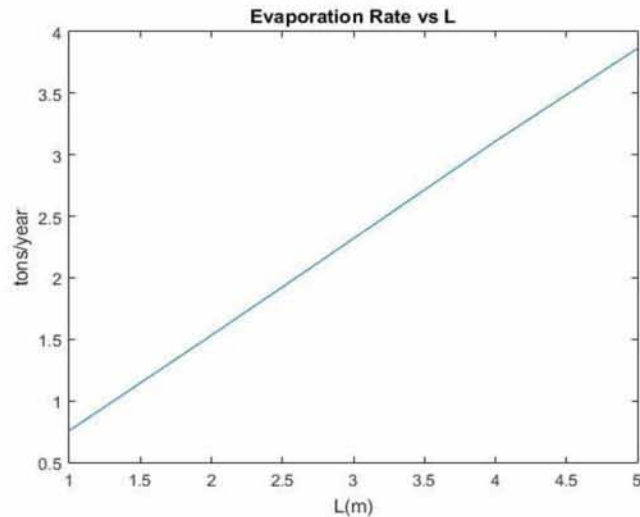
Θεωρώντας ότι όλη η προστιθέμενη υγρασία θα συμπυκνωθεί στην πλευρά του συμπυκνωτή, η ημερήσια δυναμικότητα της συσκευής στις 4 εξεταζόμενες ημέρες είναι η εξής:

Ημερομηνία	Δυναμικότητα (Kg/day)
21/3	5.1747
21/6	5.5327
21/9	7.0115
21/12	3.3661

Αν με βάση αυτές τις ποσότητες ορίσουμε μία μέση παραγωγικότητα (5.27 kg/day) τότε προκύπτει ότι η συσκευή δυνητικά μπορεί να παράγει ετησίως 1.924 τόνους αφαλατωμένου νερού. Η ποσότητα αυτή είναι σχετικά μικρή συγκρίνοντάς την με άλλες μονάδες αφαλάτωσης που χρησιμοποιούν τη μέθοδο HDH αλλά προβλέπεται να έχει ιδιαίτερα χαμηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης.

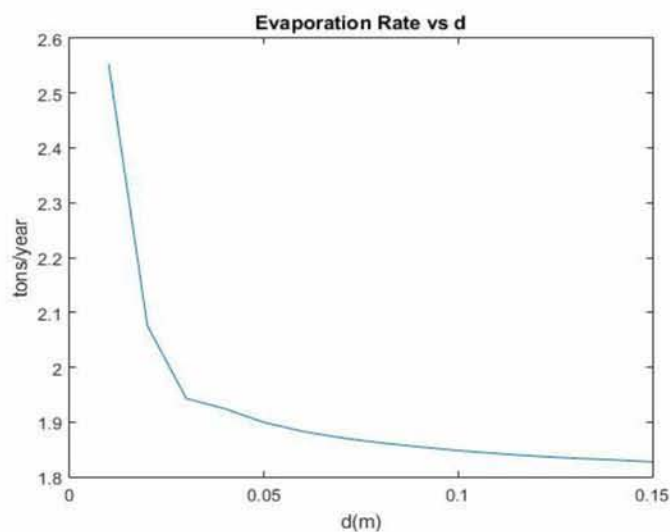
➤ Παραμετρική Διερεύνηση:

A) Ύψος L: Μεταβάλλουμε το ύψος L της συσκευής από τιμή 1 έως 5 m και παριστάνουμε γραφικά τη μεταβολή αυτή στην παροχή υδρατμών σε tons/year. Στο Σχήμα 5.25 παρατηρούμε ότι η παροχή υδρατμών αυξάνει αναλογικά με το ύψος της συσκευής.



Σχήμα 5.25: ΠΑΡΟΧΗ ΥΔΡΑΤΜΩΝ ΑΝΑΛΟΓΑ ΤΟ ΎΨΟΣ L

B) Διάκενο d: Μεταβάλλουμε το διάκενο d μεταξύ πλάκας-περιβλήματος από τιμή 0.01 έως 0.15 m και παριστάνουμε γραφικά τη μεταβολή στην παροχή υδρατμών σε tons/year (Σχήμα 5.26). Εδώ, παρατηρούμε ότι αρχικά η παροχή μειώνεται έντονα αλλά από την τιμή $d \approx 0.06$ m και μετά το διάκενο δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά την παροχή υδρατμών. Το γεγονός αυτό εκφράζει ότι για μεγάλα διάκενα η θέρμανση και ύγρανση του αέρα παύει να είναι αποτελεσματική, για αυτό και η διάμετρος του διακένου παύει να επηρεάζει την παροχή των υδρατμών.



Σχήμα 5.26: ΠΑΡΟΧΗ ΥΔΡΑΤΜΩΝ ΑΝΑΛΟΓΑ ΤΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟ ΤΟΥ ΔΙΑΚΕΝΟΥ d

Κεφάλαιο 6^ο: Συμπεράσματα

Καθώς ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξάνεται ραγδαία και η ζήτηση για πόσιμο νερό γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη, από τη μελέτη μας συμπεραίνεται το πόσο αναγκαία καθίσταται η περαιτέρω έρευνα και εξέλιξη των τεχνολογιών αφαλάτωσης.

Η μέθοδος αφαλάτωσης με Ύγρανση-Αφύγρανση (HDH) μπορεί συμπερασματικά να ειπωθεί ότι είναι μία σχετικά οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον μέθοδος η οποία καθίσταται ιδιαίτερα αποδοτική για χαμηλής δυναμικότητας εγκαταστάσεις (οικιακή χρήση, ξενοδοχεία, χώροι εστίασης).

Από τη μοντελοποίηση που πραγματοποιήθηκε κατά τη μελέτη της συσκευής μας, μπορούν να προκύψουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- ❖ Η συσκευή στην εξεταζόμενη κλίση ($s=90^\circ$) δεν εκμεταλλεύεται με τον πιο αποδοτικό τρόπο την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια, ιδίως κατά τις ώρες της ανατολής και του ηλιοβασιλέματος, όπου οι εξεταζόμενοι χαρακτηριστικοί δείκτες παίρνουν τις χειρίστες τιμές τους.
- ❖ Ο δείκτης G.O.R. προκύπτει ότι σε γενικές γραμμές είναι μικρότερος της μονάδας και την υπερβαίνει μόνο στο ηλιακό μεσημέρι της ισημερίας του Σεπτεμβρίου. Αυτό δείχνει πως στη συγκεκριμένη συσκευή δεν ανακτάται αρκετή ενέργεια από το αφαλατωμένο νερό (output) σε σχέση με την ενέργεια που παρέχεται από τον Ήλιο στο εισερχόμενο αλατόνερο (input).
- ❖ Από το γεγονός ότι η πτώση πίεσης δεν ξεπερνάει τα 0.5 Pa, τονίζεται ότι απαιτείται η ελάχιστη παρεμπόδιση της ροής του αέριου ρεύματος από την πλευρά του συμπυκνωτή ώστε να διατηρείται η φυσική ανακυκλοφορία του αέρα.
- ❖ Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι ένας μέσος άνθρωπος χρειάζεται ημερησίως 1.5-2 λίτρα πόσιμου νερού, από τη μελέτη μπορεί να βγει το συμπέρασμα ότι η διάταξή μας έχει τη δυνατότητα να καλύπτει τις ημερήσιες ανάγκες μίας τριμελούς οικογένειας σε πόσιμο νερό.

- ❖ Από την παραμετρική ανάλυση προκύπτει ότι η παραγωγή αφαλατωμένου νερού αυξάνει αναλογικά με το ύψος της συσκευής. Όμως, καθώς η αύξηση του ύψους δυσκολεύει τη δυνατότητα στήριξης και περιστροφής της διάταξης, συνίσταται να μην υπερβαίνει τα 2.5 μέτρα.
- ❖ Επίσης, από την παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης του διακένου προκύπτει ότι η βέλτιστη διάμετρός του κυμαίνεται στα 2 με 4 εκατοστά, καθώς σε μεγάλα διάκενα είναι μη αποτελεσματική η θέρμανση του υγρού υμένα ενώ σε μικρά διάκενα οι παραδοχές και τα αποτελέσματά μας χάνουν την αξιοπιστία τους.

Εν κατακλείδι, απαιτείται περαιτέρω έρευνα στην περιοχή της αφαλάτωσης με τη μέθοδο HDH, όπως απαιτείται και πειραματική αναπαράσταση της μονάδας ώστε να πιστοποιηθούν οι παραδοχές και τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

Η μονάδα επιδέχεται αρκετές βελτιώσεις και αναβαθμίσεις οι οποίες ενδέχεται να αυξήσουν κατά πολύ την παραγωγή αφαλατωμένου νερού και τους δείκτες που χαρακτηρίζουν τη συσκευή.

Τέλος, τα προβλήματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της εργασίας και οι προτάσεις για βελτιστοποίηση της συσκευής θα αναλυθούν εκτενώς στο 7^ο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 7^ο: Προτάσεις για Μελλοντική Διερεύνηση

7.1. Πρακτικά Προβλήματα προς Διερεύνηση

A) Όπως αναφέρθηκε στο 3^ο κεφάλαιο, η ανάλυσή μας περιορίζεται σε ψευδό-μόνιμες συνθήκες λειτουργίας. Το γεγονός αυτό, όμως, αφήνει ανοιχτό ένα ερώτημα όσον αφορά το χρόνο που απαιτείται για τη θέρμανση της πλάκας από τον ήλιο, τη δημιουργία των ρευμάτων φυσικής συναγωγής και την έναρξη της εξάτμισης του λεπτού υμένα. Επομένως, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί πειραματική ανάλυση της συσκευής για την εξακρίβωση της εγκυρότητας των παραδοχών και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν κατά τη μελέτη μας.

B) Επιπροσθέτως, η ανάλυση μας δε λαμβάνει υπ' όψιν την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στον υγρό υμένα και την απορρόφηση της ακτινοβολίας από τους υδρατμούς. Αυτοί οι παράγοντες πιθανότατα δεν επηρεάζουν σημαντικά τη λειτουργία της συσκευής και γι' αυτό δεν συμπεριελήφθησαν στην ανάλυση της καθώς θα την καθιστούσαν ιδιαίτερα περίπλοκη.

Γ) Ένα σημαντικό πρόβλημα είναι το ενδεχόμενο να συμπυκνωθούν σταγονίδια ή υδρατμοί σε επιφάνειες εκτός του συμπυκνωτή, με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης της συσκευής και της παραγωγής αφαλατωμένου νερού. Για το λόγο αυτό, θα ήταν χρήσιμο να προνοηθεί η συλλογή μέρους ή ολόκληρου του συμπυκνώματος αυτού κατά το σχεδιασμό της συσκευής.

Δ) Επιπλέον, τα αιωρούμενα σταγονίδια εντός του αέριου ρεύματος ενδέχεται να περιέχουν μικροποσότητες αλάτων στο εσωτερικό τους, οι οποίες θα υποβάθμιζαν την ποιότητα του παραγόμενου νερού και ίσως προκαλούσαν διάβρωση στις επιφάνειες του συμπυκνωτή.

E) Είναι επίσης πολύ πιθανό να παρατηρηθεί προσκόλληση αλάτων στην επιφάνεια της απορροφητικής πλάκας, γεγονός που θα οδηγούσε στη σταδιακή φθορά και αλλοίωση των ιδιοτήτων της. Ακόμη, θα προκαλούσε τη μείωση του ωφέλιμου εμβαδού της πλάκας αφού τα άλατα θα εμπόδιζαν την επαφή της με τον υγρό υμένα. Για την πρόληψη του προβλήματος αυτού απαιτείται τακτικός καθαρισμός της συσκευής και ιδίως της απορροφητικής πλάκας.

7.2. Θεωρητικές Προεκτάσεις για Βελτιστοποίηση της Συσκευής

A) Όπως έχει τονιστεί σε προηγούμενα κεφάλαια, καθίσταται αναγκαία η δυνατότητα ρύθμισης της κλίσης της συσκευής, ακόμα και κατά τη διάρκεια της ημέρας αν αυτό είναι εφικτό, με σκοπό τη βέλτιστη εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας.

B) Πέρα από τον προσανατολισμό, η μη αποδοτική αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι εμφανής και από το δείκτη GOR, ο οποίος σε γενικές γραμμές προκύπτει μικρότερος της μονάδας. Πιο συγκεκριμένα, κάθε Watt ηλιακής ενέργειας που απορροφάται από την πλάκα μεταφέρεται στον υγρό υμένα ο οποίος εξέρχεται από τη συσκευή. Για το λόγο αυτό, είναι αναγκαία η δυνατότητα εκμετάλλευσης της ενέργειας της απορριπτόμενης άλμης, η οποία μένει αναξιοποίητη. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε μέσω επανακυκλοφορίας της απορριπτόμενης άλμης εντός της συσκευής είτε με τη χρήση πολλαπλών βαθμίδων που λειτουργούν σε σειρά. Έτσι, ο δείκτης GOR είναι αρκετά πιθανό να αυξηθεί και να υπερβεί κατά πολύ τη μονάδα.

Γ) Όπως τονίστηκε στην προηγούμενη ενότητα, υπάρχει ανοιχτό ερώτημα για την απόκριση του συστήματος όσον αφορά τη θέρμανση της πλάκας, τη δημιουργία των ρευμάτων φυσικής συναγωγής και την εκκίνηση της εξάτμισης του υμένα. Για το λόγο αυτό, συνίσταται η χρήση ενός μικρού ανεμιστήρα, τουλάχιστον κατά την ώρα της ανατολής, που θα υποβοηθά την αέρια ροή. Μία ακόμα πρόταση είναι η δυνατότητα προθέρμανσης της πλάκας μέσω ηλεκτρικής αντίστασης πριν την ανατολή, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος που απαιτείται για την εκκίνηση της εξάτμισης του υγρού υμένα.

Δ) Επίσης, θα ήταν ιδιαίτερα αποδοτικό, ο αέρας με κάποιο τρόπο να εισέρχεται στον εξατμιστήρα όσο το δυνατόν ξηρότερος έτσι ώστε να μπορεί να κατακρατήσει μεγαλύτερες ποσότητες υδρατμών και να ενισχυθεί η μεταφορά μάζας και θερμότητας στη διεπιφάνεια αέρα-νερού. Με αυτόν τον τρόπο θα αυξηθεί σημαντικά ο ρυθμός παραγωγής του αφαλατωμένου νερού που είναι και το ζητούμενο της συσκευής.

Ε) Επιπλέον, η αντικατάσταση του αέρα με κάποιο άλλο εργαζόμενο αέριο θα ήταν μία ενδιαφέρουσα καινοτομία για τέτοιου είδους συσκευές καθώς σε εφαρμογές μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία ο αέρας είναι ανενεργός και ανεπηρέαστος, για αυτό και αντιμετωπίζεται ως κενό. Επομένως, θα μπορούσε να προταθεί η χρήση διοξειδίου του άνθρακα το οποίο απορροφά σημαντικές ποσότητες ακτινοβολίας στην υπέρυθη κυρίως περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού

φάσματος (όπως και οι υδρατμοί) ενώ επίσης θα μείωνε και τις επικαθίσεις αλάτων. Ακόμη, η χρησιμοποίηση υδρογόνου ή ηλίου τα οποία έχουν μικρότερο μοριακό βάρος από τον αέρα, πιθανολογείται ότι θα αύξανε το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας μέσα στον εξατμιστήρα (*Giwa et al., 2016*).

ΣΤ) Τέλος, ενθυμούμενοι την Υδριάδα, την αυτόνομη πλωτή ελληνική συσκευή αφαλάτωσης, είναι εύλογο να αναρωτηθεί κανείς αν θα ήταν δυνατόν η συσκευή μας να λειτουργούσε ως μία αυτόνομη πλωτή μονάδα, πιθανόν χωρίς σύστημα προθέρμανσης του αλατόνερου. Σε αυτή την περίπτωση οι ανάγκες για προστασία και στεγανοποίηση των επιμέρους τμημάτων της μονάδας θα ήταν πολλαπλάσιες, ενώ η συνεχής παροχή αλατόνερου θα ήταν ευκολότερη και φθηνότερη.

Κεφάλαιο 8^ο: Βιβλιογραφία

- Δαλιούρης Π., “Αφαλάτωση - Σύγχρονες Μονάδες Αφαλάτωσης: Εφαρμογές και Μέθοδοι”, Διπλωματική Εργασία, Τ.Ε.Ι. Πειραιά, (2013)
- Καραχάλιου Π., “Τεχνολογίες Αφαλάτωσης και Προοπτικές Εφαρμογής στον Ελληνικό χώρο”, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, (2010)
- Κουμεντάκος Α. Γ., “Σχεδιασμός Συσκευής Αφαλάτωσης με Ηλιακό Εξατμιστή Πίπτοντος Υγρού Υμένα”, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, (2018)
- Κύρου Γ., “Βιβλιογραφική Διερεύνηση της Τεχνολογίας Αφαλάτωσης Νερού”, Διπλωματική Εργασία, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, (2017)
- Μαθιουδάκης Β., “Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις Άλμης Εργοστασίου Αφαλάτωσης”, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, (2011)
- Μποντόζογλου Β., “Εισαγωγή στις Φυσικές Διεργασίες: Θεωρητικό Υπόβαθρο και Βασικές Εφαρμογές”, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Συγγράμματα και Βοηθήματα, (2015)
- Μποντόζογλου Β., “Συσκευές Θερμικών Διεργασιών (Διδακτικές Σημειώσεις)”, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, (2019)
- Πανάγου Β., “Τεχνολογία Αφαλάτωσης: Επιπτώσεις στην Υγεία και στο Περιβάλλον”, Διπλωματική Εργασία, Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας, (2018)
- Πασίσης Ι. Β., “Αφαλάτωση Νερού με χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας”, Διπλωματική Εργασία, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, (2011)
- Πασπαλάς Κ. Γ., “Εναλλάκτες Θερμότητας”, Εκδόσεις Τζιόλα, 1^η Έκδοση, (2014)
- Ράπτης Δ., “Μελέτη Αφαλάτωσης με Μικρές Μονάδες. Ειδικά με Αυτόνομη Μονάδα Αντίστροφης Ώσμωσης και χρήση ΑΠΕ”, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, (2012)
- Συσκάκη Κ., “Τεχνολογίες Αφαλάτωσης Νερού – Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων από την Εγκατάσταση και Λειτουργία Μονάδων Αφαλάτωσης με Αντίστροφη Ώσμωση”, Διπλωματική Εργασία, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, (2013)
- Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, “Κλιματικά Δεδομένα Ελληνικών Περιοχών”, Υ.Π.Ε.Κ.Α., 1^η Έκδοση, (2010)
- Çengel Y. A., Ghajar A. J., “Μεταφορά Μάζας και Θερμότητας”, Εκδόσεις Τζιόλα, 5^η Έκδοση, (2017), (επιμ. μτφρ. Τσιακάρης Π.)
- Duffie J. A., Beckman W. A., “Solar Engineering of Thermal Processes”, John Wiley & Sons, Inc., 4th Edition, (2013)

- Eckert E. R. G., Jackson T. W., “*Analysis of Turbulent Free – Convection Boundary – Layer on Flat Plate*”, NACA, (1950)
- El-Agouz S. A., Sathyamurthy R., Manokar M. A., “*Improvement of Humidification – Dehumidification Desalination Unit using a Desiccant Wheel*”, Chemical Engineering Research and Design Vol. 131: pp. 104-116, Elsevier Journal, (2018)
- Enayatollahi R., “*Development and Analysis of a Solar Humidification Dehumidification Desalination System*”, Doctoral Thesis, Auckland University of Technology, (2016)
- Giwa A., Akther N., Al Housani A., Haris S., Hasan S. W., “*Recent Advances in Humidification Dehumidification (HDH) Desalination Processes: Improved Designs and Productivity*”, Renewable and Sustainable Reviews Vol. 57: pp. 929-944, Elsevier Journal, (2016)
- Kabeel A. E., Hamed M. H., Omara Z. M., Sharshir S. W., “*Water Desalination using a Humidification–Dehumidification Technique: A Detailed Review*”, Natural Resources Vol. 4: pp. 286-305, Scientific Research, (2013)
- Kang H., Luo W., Zheng H., Yu Z., Cheng P., “*Performance of a 3-stage Regenerative Desalination System based on Humidification –Dehumidification Process*”, Applied Thermal Engineering Vol. 90: pp. 182-192, Elsevier Journal, (2015)
- Ladouy S., Khabbazi A., “*Experimental Study of the Effect of Heating the Humid Air in Different Positions in a New Desalination System, by HDH Process, using Solar Energy*”, 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference, IEEE, (2015)
- Müller-Holst H., Engelhardt M., Herve M., Schijlkopf W., “*Solar Thermal Seawater Desalination Systems for Decentralized Use*”, Renewable Energy Vol. 14: pp. 311-318, Elsevier Journal, (1998)
- Müller-Holst H., “*Solar Thermal Desalination using the Multiple Effect Humidification (MEH) Method*”, TiNOX GmbH, (2007)
- Narayan P. G., Sharqawy M. H., Summers E. K., Lienhard J. H., Zubair S. M., Antar M. A., “*The Potential of solar–driven Humidification – Dehumidification Desalination for small–scale Decentralized Water Production*”, Renewable and Sustainable Reviews Vol. 14: pp. 1187-1201, Elsevier Journal, (2010)
- Narayan P. G., “*Status of Humidification Dehumidification Desalination*”, Perth Presentation, IDA, (2011)
- Sakonidou E.P., Karapantsios T. D., Balouktsis A. I., Chassapis D., “*Modeling of the Optimum Tilt of a Solar Chimney for Maximum Air Flow*”, Solar Energy Vol. 82: pp. 80-94, Elsevier Journal, (2008)

- Seifert B., Kroiss A., Spinnler M., Sattelmayer T., “*About the History of Humidification – Dehumidification Desalination Systems*”, Tianjin Conference, IDA, (2013)
- Thakkar H., Sankhala A., Ramana P. V., Panchal H., “*A Detailed Review on Solar Desalination Techniques*”, International Journal of Ambient Energy, (2018)
- Treybal R. E., “*Mass Transfer Operations*”, McGraw-Hill Book Company, 3rd Edition, (1980)
- Vaisala, “*Humidity Conversion Formulas*”, Vaisala Oyj, (2013)
- White F. M., “*Heat and Mass Transfer*”, Addison – Wesley Publishing Company, 2nd Edition, (1991)
- Xu H., Sun X.Y., Dai Y. J., “*Thermodynamic Study on an Enhanced Humidification – Dehumidification Solar Desalination System with weakly Compressed Air and Internal Heat Recovery*”, Energy Conversion and Management Vol. 181: pp. 68-79, Elsevier Journal, (2019)
- www.checalc.com
- www.el.wikipedia.org
- www.engineeringtoolbox.com
- www.researchgate.net
- www.sciencedirect.com
- www.webbook.nist.gov

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Α. Πίνακας Συμβόλων

b: Πλάτος επίπεδης πλάκας, m	I_T: Ωριαία ηλιακή ακτινοβολήση σε κατακόρυφη πλάκα, $MJ/m^2 \cdot hour$
\overline{cp}: Μέση ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα, $KJ/Kg \cdot K$	k: Θερμική αγωγιμότητα λεπτού υμένα, $W/m \cdot K$
cp_w: Ειδική θερμοχωρητικότητα λεπτού υμένα, $KJ/Kg \cdot K$	k_{mass}: Μέσος συντελεστής μεταφοράς μάζας, $g/m^2 \cdot s$
d: Διάκενο πλάκας-περιβλήματος, m	k_T: Συντελεστής καθαρότητας της ατμόσφαιρας, -
d_h: Υδραυλική διάμετρος εξατμιστήρα, m	L: Μήκος επίπεδης πλάκας, m
f: Συντελεστής τριβής, -	LH_v: Λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης, KJ/Kg
G: Μαζική παροχή ξηρού αέρα, Kg/s	\dot{M}_d: Παραγόμενο απόσταγμα, Kg/day
GOR: Gained output ratio, -	\dot{m}_w: Μαζική παροχή νερού τροφοδοσίας, Kg/s
Gr_L: Αριθμός Grashof, -	Nu: Αριθμός Nusselt, -
G_s: Ηλιακή σταθερά, KW/m^2	n: Εκάστοτε ημέρα του έτους, -
g: Επιτάχυνση βαρύτητας, m/s^2	Pr: Αριθμός Prandtl, -
H: Ημερήσια ηλιακή ακτινοβολήση σε οριζόντια πλάκα, $MJ/m^2 \cdot hour$	Q_{sun→glass}: Απορροφούμενη ενέργεια από το γυάλινο περίβλημα, W/m^2
H_{air}: Ενθαλπία αέρα, KJ/Kg	Q_{sun→plate}: Απορροφούμενη ενέργεια από τη μαύρη πλάκα, W/m^2
H_b: Ενθαλπία στη διεπιφάνεια πλάκας-υμένα, KJ/Kg	Ra_L: Αριθμός Rayleigh, -
H₀: Ημερήσια εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολήση σε οριζόντια πλάκα, $MJ/m^2 \cdot hour$	R_b: Λόγος ωριαίας ακτινοβολήσης σε κατακόρυφο προς οριζόντιο επίπεδο, -
$\overline{h_b}$: Μέσος συντελεστής συναγωγής στη μαύρη πλάκα, $W/m^2 \cdot K$	Re: Αριθμός Reynolds, -
$\overline{h_g}$: Μέσος συντελεστής συναγωγής στο γυάλινο περίβλημα, $W/m^2 \cdot K$	RH(%): Σχετική υγρασία αέρα, -
I: Ωριαία ηλιακή ακτινοβολήση σε οριζόντια πλάκα, $MJ/m^2 \cdot hour$	RR(%): Λόγος ανάκτησης, -
	SEC: Ειδική κατανάλωση ενέργειας, KWh/Kg

s: Κλίση της συσκευής, -	α: Ηλιακό ύψος, -
\bar{T}: Μέση θερμοκρασία αέρα, K	α_g: Συντελεστής απορρόφησης γυάλινου περιβλήματος, -
T_b: Θερμοκρασία της μαύρης πλάκας, K	ϵ_g: Συντελεστής εκπομπής γυάλινου περιβλήματος, -
T_g: Θερμοκρασία του γυάλινου περιβλήματος, K	ϵ_p: Συντελεστής εκπομπής μαύρης πλάκας, -
T_0: Θερμοκρασία αέρα στην είσοδο του εξατμιστήρα, K	ΔP_{conv}: Πτώση πίεσης λόγω φυσικής συναγωγής, Pa
$T_{interface}$: Θερμοκρασία στη διεπιφάνεια υμένα-αέρα, K	$\Delta P_{friction}$: Πτώση πίεσης λόγω τριβών, Pa
t_d: Διάρκεια ηλιοφάνειας, sec	δ: Ηλιακή απόκλιση, -
U_{glass}: Συντελεστής απωλειών λόγω συναγωγής εξωτερικά του περιβλήματος, $W/m^2 \cdot K$	δ_w: Μέσο πάχος λεπτού υμένα, m
U_{plate}: Συντελεστής απωλειών λόγω μη μηδενικού πάχους της πλάκας, $W/m^2 \cdot K$	μ: Δυναμικό ιξώδες λεπτού υμένα, Pa·s
\bar{u}: Μέση ταχύτητα αέρα, m/s	$\bar{\rho}$: Μέση πυκνότητα αέρα, Kg/m^3
u_w: Μέση ταχύτητα λεπτού υμένα, m/s	ρ_{cover}: Ικανότητα αντανάκλασης γυάλινου περιβλήματος, -
\bar{V}_m: Μέσος υγρός ειδικός όγκος, $m^3/Kg_{dry\ air}$	σ: Σταθερά Stephan-Boltzmann, $W/m^2 \cdot K^4$
w_{air}: Απόλυτη υγρασία αέρα, $Kg_{vapor}/Kg_{dry\ air}$	τ: Συντελεστής διαπερατότητας γυάλινου περιβλήματος, -
w_b: Απόλυτη υγρασία στη διεπιφάνεια πλάκας-υμένα, $Kg_{vapor}/Kg_{dry\ air}$	τ_{eff}: Τελικό κλάσμα ακτινοβολίας που απορροφάται από την πλάκα, -
w_0: Απόλυτη υγρασία αέρα στην είσοδο του εξατμιστήρα, $Kg_{vapor}/Kg_{dry\ air}$	φ: Γεωγραφικό πλάτος, -
	ω: Ωριαία ηλιακή γωνία, -
	ω_{ss}: Γωνία μεταξύ ανατολής-ηλιοβασιλέματος, -

B. Κώδικες Matlab

i. Solar irradiation code:

```
% Location inputs
G_solar=1.367; % kW/m2
phi=39.4; % degrees for Volos
s=90; % degrees
gama_s=0; % South orientation
kapa=10; % 1/m
l_g=0.004; % m
r_ground=0.35;
n_glass=1.526;
r_cover=((n_glass-1)/(n_glass+1))^2; % Normal reflectivity
ab=0.95; % Plate absorbance

... (Matrices allocation)

% For a HORIZONTAL plate, for everyday of the year (day=1,...,365)
for j=1:365
    day(j)=j;
    delta(j)=23.45*sind(360*(284+j)/365);
end

for j=1:365
    omg_ss(j)=acosd(-tand(phi)*tand(delta(j))); % Angle between
sunrise and sunset

% Total extraterrestrial DAILY irradiation : H_0= MJ/m2/day
H_0(j)=24*3.6/pi*G_solar*(1+0.033*cosd(360*j/365))*(cosd(phi)*
*cosd(delta(j))*sind(omg_ss(j))+pi*omg_ss(j)/180*sind(phi)*
*sind(delta(j)));

    day_time(j)=(2*omg_ss(j)/15) ; % hours of sunlight
    sunrise(j)=(12-day_time(j)/2) ; % hours
    omega_rise(j)=-(omg_ss(j)/2);
    sunset(j)=(12+day_time(j)/2) ; % hours
    omega_set(j)=(omg_ss(j)/2);
end

for i=1:24
    hour(i)=i;
    omega(i)=15*(hour(i)-12);
end

mm=1;
month(mm)=mm;

for j=1:365

% Calculation of H_diff and H_dir for any given k_t, in MJ/m2/day
if day(j)==32 || day(j)==60 || day(j)==91 || day(j)==121 ||
day(j)==152 || day(j)==182 ... % The change of month
|| day(j)==213 || day(j)==244 || day(j)==274 || day(j)==305
|| day(j)==335
    mm=mm+1;
    month(mm)=mm;
end
```

```

if mm==1
    k_t(mm)=0.45;
elseif mm==2
    k_t(mm)=0.46;
elseif mm==3
    k_t(mm)=0.47;
elseif mm==4
    k_t(mm)=0.51;
elseif mm==5
    k_t(mm)=0.56;
elseif mm==6
    k_t(mm)=0.62;
elseif mm==7
    k_t(mm)=0.62;
elseif mm==8
    k_t(mm)=0.61;
elseif mm==9
    k_t(mm)=0.58;
elseif mm==10
    k_t(mm)=0.51;
elseif mm==11
    k_t(mm)=0.46;
elseif mm==12
    k_t(mm)=0.43;
end

H(j)=k_t(mm)*H_0(j) ; % Beacause of clouds, weather ,scattering etc

if omg_ss(j)<=81.4
    if k_t(mm)<0.715
        H_diff(j)=H(j)*(1-0.2727*k_t(mm)+2.4495*k_t(mm)^2-
-11.9514*k_t(mm)^3+9.3879*k_t(mm)^4);
    else
        H_diff(j)=H(j)*0.143;
    end
else
    if k_t(mm)<0.722
        H_diff(j)=H(j)*(1+0.2832*k_t(mm)-
-2.5557*k_t(mm)^2+0.8448*k_t(mm)^3);
    else
        H_diff(j)=H(j)*0.175;
    end
end
H_dir(j)=H(j)-H_diff(j);

for i=1:24
    sol_height(j,i)=asind(sind(delta(j))*sind(phi)+cosd(delta(j))*
*cosd(phi)*cosd(omega(i))); % Solar Height
end

for i=1:24
if sol_height(j,i)>=0
    % HOURLY Solar I in MJ/m2/hour on Horizontal plate
    c1(j)=0.409+0.5016*sind(omg_ss(j)-60);
    c2(j)=0.6609-0.4767*sind(omg_ss(j)-60);
    r_t(j,i)=pi/24*(c1(j)+cosd(omega(i))*c2(j))*
*(cosd(omega(i))-cosd(omg_ss(j)))/(sind(omg_ss(j))-
-pi*omg_ss(j)/180*cosd(omg_ss(j)));
    if r_t(j,i)<0
        r_t(j,i)=0;
    end
    r_t_diff(j,i)=r_t(j,i)/(c1(j)+cosd(omega(i))*c2(j));
end

```

```

if r_t_diff(j,i) > 0
    r_t_diff(j,i) = 0;
end
I(j,i) = r_t(j,i) * H(j);
I_diff(j,i) = r_t_diff(j,i) * H_diff(j);
I_dir(j,i) = I(j,i) - I_diff(j,i);
% DIRECT Penetration Coefficient of glass:
theta_attack(j,i) = asind(sind(phi-s) * cosd(delta(j))) +
cosd(phi-s) * cosd(omega(i)) * cosd(delta(j));
theta_ref_dir(j,i) = asind(sind(theta_attack(j,i)) / n_glass);
r_vert_dir(j,i) = sind(theta_ref_dir(j,i)) -
-theta_attack(j,i) / sind(theta_ref_dir(j,i) + theta_attack(j,i)) ^ 2;
r_parallel_dir(j,i) = tand(theta_ref_dir(j,i)) -
-theta_attack(j,i) / tand(theta_ref_dir(j,i) + theta_attack(j,i)) ^ 2;
if r_vert_dir(j,i) > 1
    r_vert_dir(j,i) = 0.99;
end
if r_parallel_dir(j,i) > 1
    r_parallel_dir(j,i) = 0.99;
end
% DIFFUSE Penetration Coefficient of glass:
theta_diff = 59.7 - 0.1388 * s + 0.001497 * s ^ 2;
theta_attack_dir(j,i) = acosd(sind(phi - theta_diff) * cosd(omega(i)) *
cosd(delta(j))) +
theta_ref_dir(j,i) = asind(sind(theta_attack_dir(j,i)) / n_glass);
r_vert_diff(j,i) = sind(theta_ref_dir(j,i)) -
-theta_attack_dir(j,i) / sind(theta_ref_dir(j,i) +
theta_attack_dir(j,i)) ^ 2;
r_parallel_diff(j,i) = tand(theta_ref_dir(j,i)) -
-theta_attack_dir(j,i) / tand(theta_ref_dir(j,i) +
theta_attack_dir(j,i)) ^ 2;
if r_vert_diff(j,i) > 1
    r_vert_diff(j,i) = 0.99;
end
if r_parallel_diff(j,i) > 1
    r_parallel_diff(j,i) = 0.99;
end
ta_eff_dir(j,i) = ta_dir(j,i) * ab / (1 - (1 - ab) * r_cover);
a_g_dir(j,i) = 1 - ta_dir(j,i);
ta_dir(j,i) = ta_dir(j,i) * ta_dir(j,i) * ta_dir(j,i);
end
ta_dir(j,i) = 0;
if ta_dir(j,i) < 0
    ta_dir(j,i) = 0;
end
ta_abs_dir(j,i) = exp(-kapa * L_g / cosd(theta_ref_dir(j,i))) +
(1 - r_parallel_dir(j,i)) / (1 + r_parallel_dir(j,i)) +
(1 - r_vert_dir(j,i)) / (1 + r_vert_dir(j,i));
end
if ta_dir(j,i) < 0
    ta_dir(j,i) = 0;
end
ta_abs_diff(j,i) = exp(-kapa * L_g / cosd(theta_ref_diff(j,i))) +
(1 - r_parallel_diff(j,i)) / (1 + r_parallel_diff(j,i)) +
(1 - r_vert_diff(j,i)) / (1 + r_vert_diff(j,i));
end
if ta_dir(j,i) < 0
    ta_dir(j,i) = 0;
end

```

```

taf_diff(j,i)=taf_r_diff(j,i)*taf_abs_diff(j,i);
a_g_diff(j,i)=1-taf_abs_diff(j,i);
ta_eff_diff(j,i)=taf_diff(j,i)*ab/(1-(1-ab)*r_cover);

% REFRACTED Penetration Coefficient of glass:
theta_ref=90-0.5788*s+0.002693*s^2;
theta_attack_ref(j,i)=acosd(sind
(phi-theta_ref)*sind(delta(j))+cosd
(phi-theta_ref)*cosd(omega(i))*cosd(delta(j)));

theta_ref_ref(j,i)=asind(sind(theta_attack_ref(j,i))/n_glass);

r_vert_ref(j,i)=(sind(theta_ref_ref(j,i))-
-theta_attack_ref(j,i))/(sind(theta_ref_ref(j,i)+
+theta_attack_ref(j,i)))^2;

r_paral_ref(j,i)=(tand(theta_ref_ref(j,i)-
-theta_attack_ref(j,i))/(tand(theta_ref_ref(j,i)+
+theta_attack_ref(j,i)))^2;
if r_vert_ref(j,i)>1
r_vert_ref(j,i)=0.99;
end
if r_paral_ref(j,i)>1
r_paral_ref(j,i)=0.99;
end

taf_abs_ref(j,i)=exp(-kapa*l_g/cosd(theta_ref_ref(j,i)));
taf_r_ref(j,i)=1/2*((1-r_paral_ref(j,i))/(1+r_paral_ref(j,i))+
+(1-r_vert_ref(j,i))/(1+r_vert_ref(j,i)));
if taf_r_ref(j,i)<0
taf_r_ref(j,i)=0;
end
taf_ref(j,i)=taf_r_ref(j,i)*taf_abs_ref(j,i);
a_g_ref(j,i)=1-taf_abs_ref(j,i);
ta_eff_ref(j,i)=taf_ref(j,i)*ab/(1-(1-ab)*r_cover);

% I_t For TILTED plate (vertical s=90)
Rb(j,i)=cosd(theta_attack(j,i))/sind(sol_height(j,i));
if Rb(j,i)<0
Rb(j,i)=0;
end
if sind(sol_height(j,i))<=0.1
Rb(j,i)=0; % Correction during sunrise and sunset
end
end
end

for i=4:22
I_t_dir(j,i)=I_dir(j,i)*Rb(j,i) ;
I_t_diff(j,i)=I_diff(j,i)*(1+cosd(s))/2;
I_t_ref(j,i)=I(j,i)*r_ground*(1-cosd(s))/2;
I_t(j,i)=I_t_dir(j,i) + I_t_diff(j,i) + I_t_ref(j,i); % MJ/m2/hour

ta_dir_max(j)=max(ta_eff_dir(j,:)); % We use them as constants, and
we choose to consider the maximum values

ta_diff_max(j)=max(ta_eff_diff(j,:));
ta_ref_max(j)=max(ta_eff_ref(j,:));
a_gdir_max(j)=max(a_g_dir(j,:));
a_gdiff_max(j)=max(a_g_diff(j,:));
a_gref_max(j)=max(a_g_ref(j,:));

```



```

% q on plate and glass

ta_eff_I(j,i)=ta_dir_max(j)*I_t_dir(j,i)+ta_diff_max(j)*I_t_diff(j,i)
+ta_ref_max(j)*I_t_ref(j,i); % MJ/m2/hour

alfa_I(j,i)=a_gdir_max(j)*I_t_dir(j,i)+a_gdiff_max(j)*I_t_diff(j,i)+
+a_gref_max(j)*I_t_ref(j,i); % MJ/m2/hour

q_onPlate(j,i)=106*ta_eff_I(j,i)/3600; % W/m2
q_inGlass(j,i)=106*alfa_I(j,i)/3600; % W/m2
    end

end

Rad_hour_plate_input=[q_onPlate(81,:) ' q_onPlate(172,:) '
q_onPlate(264,:) ' q_onPlate(355,:)'];
savefile_plate_hour='Rad_plate_hour.mat';
save(savefile_plate_hour,'Rad_hour_plate_input')

Rad_hour_glass_input=[q_inGlass(81,:) ' q_inGlass(172,:) '
q_inGlass(264,:) ' q_inGlass(355,:)'];
savefile_glass_hour='Rad_glass_hour.mat';
save(savefile_glass_hour,'Rad_hour_glass_input')

... (Radiation Plots script)

```

ii. Evaporator code:

```

P=1.; % atm
R_gas=0.00008206 ; % R=atm·m3/mol·K
gi=9.81; % m/s2
L=2.5; % Plate height
b=1; % plate width
d=0.04; % channel gap
n=250. ; % nods in x-direction
dx=L/n;
x0=0;
Ub=0.9 ; % W/m2K loss_Plate
Ug=9. ; % W/m2K loss_Glass

... (Matrices allocation)

% NaCl-Water film
Tl_in=287;
Pr1=4.;
lfg=2458500;
salt=3.500/100.; % Salt in water film
cpl=4020.; % J/kg water
mul=7.487/104;
rl=1003. ; % kg/m3
nul=mul/rl;
kl=0.622;
ml=0.01 ; % kg/s
dfilm=(3.*mul*ml/b/gi/rl2)(1./3); % film thickness m
uFilmAvg=1./3*rl*gi*dfilm2/mul; % film average velocity m/s

% Humid Air Properties at the bottom (initial conditions)
k=0.028; % W/mK
T0=288.; % K
r0=1.22; % kg/m3
P=1.; % atm

```

```

w0=0.0107; % kg vapor/kg dry air
mu=0.0000189; % kg/ms

% Vapor Properties
enth_vap0=2500000.; % J/kg at T=273K
Pc=22064.; % kPa
Tc=647.; % K

% Radiation Properties
eb=0.95;
ab=0.95;
eg=0.88;
e_eff=eb*eg/(eb+eg-eb*eg);
sigma=5.67/10^8; % W/m^2K^4

% Initial Estimations
Tb_old=312.; % K(plate)
Tg_old=303.; % K(glass)
u_last=0.3; % m/s
G=0.04; % kg/s dry air
T_mean=293.; % K
r_avg=1.18; % kg/m^3
vm_avg=0.83; % m^3/kg
cp_avg=1042.; % J/kgK
Pr=0.800; % Prandtl number

% Irradiation code output
load ('Rad_plate_hour.mat')
load ('Rad_glass_hour.mat')

for kk=1:4 % Days 21/3 , 21/6 , 21/9 , 21/12

    for ll=1:24 % Hours

        day(kk)=kk;
        hour(ll)=ll;
        Sun2Plate(ll,kk)=Rad_hour_plate_input(ll,kk); % W/m^2
        Sun2Glass(ll,kk)=Rad_hour_glass_input(ll,kk); % W/m^2
        Qsb=Sun2Plate(ll,kk);
        Qsg=Sun2Glass(ll,kk);
        if Qsb==0 || Qsg==0
            {'No Sunlight available, System closed' num2str(ll)}
        else
            while(1)
                Pr=mu*cp_avg/k;
                nu=mu/r_avg; % m^2/s
                Tb=Tb_old; Tg=Tg_old;

% Interface
                ws=(1-salt)*(SatPs(Tb).*0.622/(100.*P-SatPs(Tb))); % kg/kg
                cp_s=1007.+ws*1850.;
                Hs=cp_s*(Tb-273.)/1000.+enth_vap0*ws/1000.; % kJ/kg

                Grb=(Tb-T_mean)*gi*d^3/(nu^2)/T_mean;
                Grg=(Tg-T_mean)*gi*d^3/(nu^2)/T_mean;
                Rab=Grb*Pr; Rag=Grg*Pr;
                Nub=(0.825+0.387*(0.345*Rab)^(1./6))^2;
                Nug=(0.825+0.387*(0.345*Rag)^(1./6))^2;
                hb_avg=Nub*k/d; hg_avg=Nug*k/d;
            end
        end
    end
end

```

```

% Profiles w,T,H,Psat,Pvap,cp,r,vm,ky,deltaP,u_mean
function Sat_surf=SatPs(x)
Pc=22064; % kPa
Tc=647; % K
theta=(1-x/Tc);
polu=(-7.8595*theta+1.8441*theta^1.5-
-11.7866*theta^3+22.6807*theta^3.5-15.9619*theta^4+1.8012*theta^7.5);
Sat_surf=Pc*exp(Tc*polu./x); % kPa
end

w(1)=w0; T(1)=T0;
H(1)=(1007.+w0*1850.)*(T0-273.)/1000.+enth_vap0*w0/1000.; % kJ/kg d.a
Psat(1)=SatPs(T0);

for i=1:n-1
    x(i+1)=x0+i*dx;
    w(i+1)=w(i)+(ws-w(i))*hb_avg/cp_avg/G*dx*b; % kg vapor/kg dry air
    T(i+1)=T(i)+(hb_avg*Tb+hg_avg*Tg-
-(hb_avg+hg_avg)*T(i))/G/cp_avg*b*dx; % K

    Psat(i)=SatPs(T(i)); % kPa
end

wfun=@(x) ws-(ws-w0)*exp(-hb_avg/G/cp_avg*b*x);
w_avg=integral(wfun,0,L)/L;

H=(1007.+w*1850.)*(T-273.)/1000.+enth_vap0*w/1000. ; % kJ/kg dry air

Tfun=@(x) (hb_avg*Tb+hg_avg*Tg)/(hb_avg+hg_avg)-
-((hb_avg*Tb+hg_avg*Tg)/(hb_avg+hg_avg)-T0)*
*exp(-(hb_avg+hg_avg)/G/cp_avg*b*x);
T_avg=integral(Tfun,0,L)/L;

Psat(n)=SatPs(T(n)); % kPa
Pvap=29/18*w./(1+29/18*w)*100 ; % kPa
cp=1007.+w*1850.; % J/kgK
cp_avg=mean(cp);
r=29*P/R_gas/1000.*((1+w)./(1+29.000/18.*w))./T ; % kg/m³
r_avg=29*P/R_gas/1000.*((1+w_avg)/(1+29./18.*w_avg))/T_avg ;
dP=(r0-r(2:n))*gi*b*dx; % Differential dp
deltaP=sum(dP);
vm=(1+w)./r;
vm_avg=mean(vm);

dh=2*d;
frick=0.326*(u_last*dh/nu)^(-0.25);
c_in=1; c_out=1.;
u_mean=sqrt(2.*deltaP/r_avg/(frick*L/dh+c_in+c_out));
G_mean=u_mean*dh/vm_avg;

erru=abs(u_mean-u_last);
errT=abs(T_avg-T_mean);

% Check
for i=2:n
    dQ_G(i)=hg_avg*(Tg-T(i))*b*dx/1000.; % kW
    dQ_P(i)=hb_avg*(Hs-H(i))/cp_avg*b*dx; % kW
    errH(i)=G*(H(i)-H(i-1))-dQ_G(i)-dQ_P(i); % kW
end

QtotalP(ll,kk)=sum(dQ_P); % Total kW Plate2Air
QtotalG(ll,kk)=sum(dQ_G); % Total kW Glass2Air

```

```

function F=Balance_true(z)
Tbb=z(1); % K
Tgg=z(2); % K
Tbb=max(Tbb,Tgg);
Tgg=max(min(Tbb,Tgg),T(n));

wss=(1-3.5/100.)*SatPs(Tbb).*0.622/(100.*P-SatPs(Tbb));
cp_ss=1007.+wss*1850.;
Hss=cp_ss*(Tbb-273.)/1000.+enth_vap0*wss/1000.; % kJ/kg

dQ_Pp=hb_avg*(Hss-H(2:n))/cp_avg*b*dx; % kW
Plate2Air=sum(dQ_Pp);
dQ_Gg=hg_avg*(Tgg-T(2:n))*b*dx/1000.;
Glass2Air=sum(dQ_Gg); % kW

h_rad=sigma*e_eff*(Tbb+Tgg)*(Tbb^2+Tgg^2); % W/m^2K

Plate2Glass=h_rad*(Tbb-Tgg)*b*L/1000.; % kW

lossP=Ub*(Tbb-T_mean)*b*L/1000.;
lossG=Ug*(Tgg-T_mean)*b*L/1000.;
qu_sun=Qsb*b*L/1000.; % kW
qG_sun=Qsg*b*L/1000.;
EnergyRatio=(Plate2Air+Glass2Air)/(qu_sun+qG_sun);
F(1)= qu_sun - Plate2Glass - lossP - Plate2Air; % kW Plate
F(2)= qG_sun + Plate2Glass - Glass2Air - lossG; % kW Glass
end

% Energy Balance for Tb,Tg
options = optimoptions('fsolve','StepTolerance',1e-6,'Display',...
    'iter','TolX',1e-6,'OptimalityTolerance',1e-6...
    ,'FunValCheck','on','FunctionTolerance',1e-6);
options.Algorithm=('trust-region');

z_guess=[Tb Tg];
[anss, fval, exitflag,output]=fsolve(@BALANCE_real,z_guess,options);
Tb_new=anss(1);
Tg_new=anss(2);
errTb=abs(Tb_new-Tb);
errTg=abs(Tg_new-Tg);

if errTb<=0.100 && errTg<=0.100 && erru<=0.0100 && errT<=0.100
    fault(11,kk)=exitflag;
    % If exitflag=1, the solution of fsolve is accurate
    break
else
    G=G_mean; T_mean=T_avg;
    u_last=u_mean;
    Tb_old=max(Tb_new,Tg_new);
    Tg_old=max(min(Tb_new,Tg_new),T(n));
end
end

EnRat(11,kk)=EnergyRatio;
G_air(11,kk)=G; % kg/s
u_air(11,kk)=u_mean; % m/s
hbb(11,kk)=hb_avg; % W/m^2
hgg(11,kk)=hg_avg;
k_mass(11,kk)=hbb(11,kk)/cp_avg*1000; % g/s/m^2
GdH(11,kk)= G_air(11,kk)*(H(n)-H(1)); % kW
deltaPair(11,kk)=deltaP; % Pa

```

```

T_plate(11, kk)=Tb; % K
T_glass(11, kk)=Tg; % K
TempRise(11, kk)=(T(n)-T0); % K
SensRise(11, kk)=cp_avg*(T(n)-T0)/1000 ; % kJ/kg d.a
LatentRise(11, kk)=enth_vap0*(w(n)-w0)/1000 ; % kJ/kg d.a
EnthRise(11, kk)=H(n)-H(1);

VaporMass_hour(11, kk)=G*(w(n)-w0)*3600.; % kg/hour
% Theoretical Heat Recovery in the condenser
Tf_0=T0+1000*GdH(11, kk)/cpl*G_air(11, kk)/ml ;

GOR(11, kk)=G*(w(n)-w0)*enth_vap0/(ml*cpl*(Tb-Tf_0)); % W/W
RR(11, kk)=G*(w(n)-w0)/ml*100;
SEC(11, kk)=enth_vap0/GOR(11, kk)*2.78/10^7 ; % kWh/kg water
end

DailyProduct_mass(kk)=sum(VaporMass_hour(:, kk)); % kg/day
DailyProductVol(kk)=sum(VaporMass_hour(:, kk))/1000.; % m3/day

% Film Energy Balance
Ts=T_plate(11, kk)-GdH(11, kk)*1000/L/b*dfilm/k;
Tratio(11, kk)=Ts/T_plate(11, kk);
end
end

TotalW=mean(DailyProduct_mass)*365/1000 ; % tons/year

... (Evaporator Plots script)

```