

# 1. Νερό : Πολύτιμη Πηγή Ζωής

## 1.1 Αποθέματα του Νερού στον Πλανήτη

Στη γη περιέχονται  $1.4 \times 10^9 \text{ km}^3$  νερού, τα οποία καλύπτουν περίπου το 70% της επιφάνειάς του πλανήτη, με το ποσοστό του θαλασσινού νερού να ανέρχεται στο 97.5%. Το υπολειπόμενο 2.5% είναι το καθαρό νερό, το μεγαλύτερο ποσοστό του οποίου βρίσκεται στους πάγους ή σε μορφή υγρασίας στο έδαφος. Είναι προφανές ότι και οι δύο αυτές μορφές δεν είναι εύκολα αξιοποιήσιμες στον άνθρωπο. Ένα ποσοστό της υπολειπόμενης αυτής ποσότητας, περίπου 0.5% , θεωρείται επαρκής για να στηρίξει την ζωή στην γη. Δυστυχώς όμως το καθαρό νερό δεν είναι ισοδύναμα κατανεμημένο σε όλο τον πλανήτη με αποτέλεσμα να μην είναι διαθέσιμο σε επαρκής ποσότητες όποτε ή όπου το χρειαζόμαστε. Ακόμα και η μέση τιμή βροχοπτώσεων, η οποία ανέρχεται στα  $2 \times 10^{11} \text{ m}^3$  όπως παρατηρήθηκε σε παγκόσμια κλίμακα, είναι φτωχά και άνισα κατανεμημένη σε όλη την επιφάνεια της γης.

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί την κινητήριο δύναμη για την δημιουργία φρέσκου νερού από τους ωκεανούς. Η θερμική ενέργεια που απορροφάται από την επιφάνεια της γης παράγει επαρκείς θερμοκρασιακές διαβαθμίσεις, οι οποίες οδηγούν στην εξάτμιση του νερού από τις μεγάλες επιφάνειες των ωκεανών. Οι παραγόμενοι υδρατμοί ανυψώνονται μέσω του ατμοσφαιρικού αέρα και σχηματίζουν ένα στρώμα σύννεφου σε διάφορα υψόμετρα. Τα σύννεφα σχηματίζονται από απειροελάχιστες σταγόνες νερού μέσης διαμέτρου 10  $\mu\text{m}$  και αφού μεταφερθούν πάνω από την γη προκαλείται η βροχόπτωση.



Εικόνα 1: Ο Υδρολογικός Κύκλος. [2]

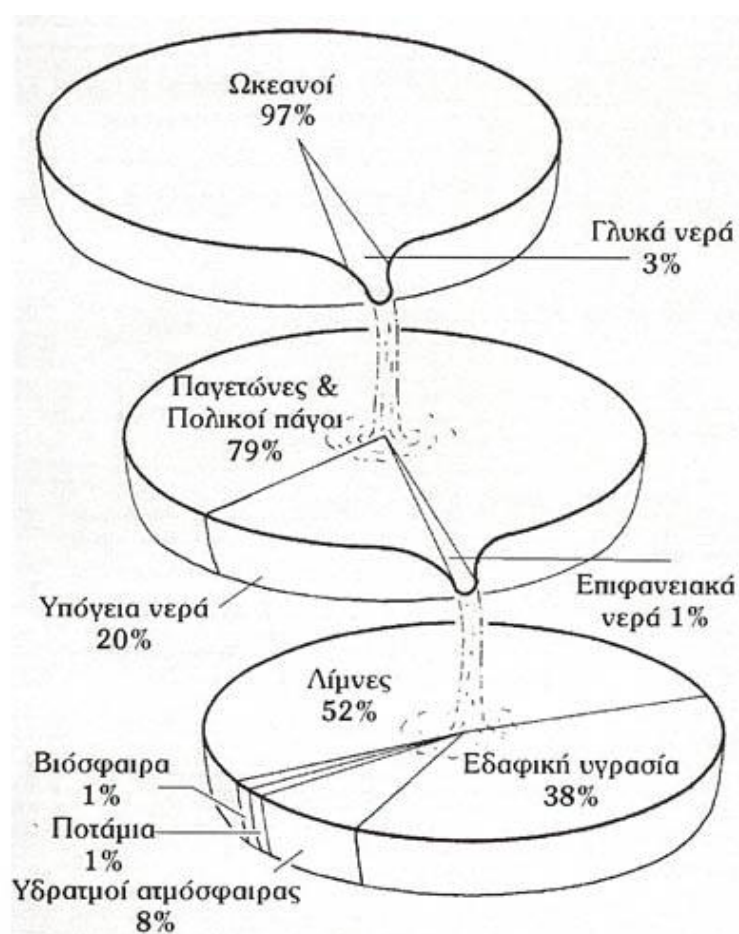
Η δημιουργία βροχοπτώσεων εξαρτάται κυρίως από την κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου. Έτσι, για τον λόγο αυτό έχουν κατασκευαστεί μοντέλα πρόβλεψης του ανάλογα με την περιοχή και τις περιοδικές μεταβολές της θερμοκρασίας. Επιπλέον, οι γεωγραφικές συνθήκες, όπως η πιθανή ύπαρξη βουνού ή πεδιάδας, αλλά και οι τοπικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, όπως η υγρασία και η θερμοκρασία, επηρεάζουν έντονα τον σχηματισμό των βροχοπτώσεων σε μια περιοχή. Γνωρίζοντας, λοιπόν, τον ανεμολογικό χάρτη, τον γεωγραφικό σχηματισμό αλλά και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες μπορούμε να προβλέψουμε τις ζώνες παραγωγής υψηλών βροχοπτώσεων, τις εποχές των μουσώνων και τέλος τις περιοχές πολύ χαμηλών βροχοπτώσεων.

Το νερό της βροχής δημιουργεί λίμνες, ποτάμια, υπόγεια αποθέματα νερού καθώς και βαθιά υδροφόρα στρώματα, τα οποία μπορεί να είναι είτε μόνιμα είτε παροδικά. Για παράδειγμα, η απότομη αύξηση της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας κατά την εαρινή περίοδο μπορεί να προκαλέσει το λιώσιμο μεγάλου ποσοστού των πάγων σε αρκετά μικρό χρονικό διάστημα, όπως έχει ήδη καταγραφεί σε πολλές περιοχές της Ευρώπης, Ρωσίας και Αμερικής. Επιπροσθέτως, μια ακόμα αιτία συγκέντρωσης μεγάλης ποσότητας νερού σε μικρό χρονικό διάστημα είναι οι μουσώνες, όπως παρατηρούνται έντονα στην Ινδία. Τέτοιου είδους έντονες βροχοπτώσεις είναι υπεύθυνες για πολλές καταστροφές περιουσιών ή ακόμα και θανάτους πολλών ανθρώπων. Για πολλές περιοχές ανά τον πλανήτη, τα μόνιμα ποτάμια που δημιουργούνται αποτελούν αρτηρίες ζωής καθώς μεταφέρουν το νερό από τις περιοχές των έντονων βροχοπτώσεων σε περιοχές πιο ξηρού κλίματος. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα για την περίπτωση αυτή αποτελεί ο ποταμός Νείλος, ο οποίος πηγάζει από τα ψηλά βουνά της Αιθιοπίας και της Κένυας και διασχίζει πάνω από 2000km γης. Μέσα από τους αιώνες, έδωσε ζωή στην κοιλάδα του Νείλου ενώ αποτέλεσε σημείο αναφοράς για την ανάπτυξη του Αιγυπτιακού πολιτισμού.

Ένα τεράστιο τμήμα του νερού της βροχής καταλήγει ως υγρασία του εδάφους υπό την μορφή υπογείων αποθεμάτων νερού ή υδροφόρων στρωμάτων. Συγκεκριμένα τα βαθιά υδροφόρα στρώματα είναι κατάλληλες πηγές για την παραγωγή πόσιμου νερού, καθώς λόγω της περιορισμένης εκμετάλλευσής τους εξασφαλίζεται φυσικά ο εμπλουτισμός τους από συστατικά. Επιπλέον, μέσω φυσικών διεργασιών διάφοροι ορυκτοί σχηματισμοί προσδίδουν στο νερό τα απαραίτητα μεταλλικά συστατικά και διατηρούν το pH του σε αποδεκτά επίπεδα.

Πηγές	Όγκος km	Ποσοστό Συνολικού Νερού	Ποσοστό Φρέσκου Νερού
Ατμοσφαιρικό Νερό	12900	0.001	0.01
Πολικοί Πάγοι	24064000	1.72	68.7
Πάγετώνες	300000	0.021	0.86
Ποτάμια	2120	0.0002	0.006
Λίμνες	176400	0.013	0.26
Έλη	11470	0.0008	0.03
Υγρασία Εδάφους	16500	0.0012	0.05
Υδροφόροι Ορίζοντες	10530000	0.75	30.1
Λιθόσφαιρα	23400000	1.68	
Ωκεανοί	1338000000	95.81	
Σύνολο	1396513390		

Πίνακας 1: Κατανομή Υδάτινων Πόρων στον Πλανήτη. [1]



Εικόνα 2: Ποιοτικό Σχήμα Κατανομής Υδάτινων Πόρων. [10]

## 1.2 Το Πρόβλημα της Λειψυδρίας

Μέσα από έρευνες που διεξάγονται, οι επιστήμονες κρούουν τον κώδωνα του κινδύνου για την δραματική μείωση των αποθεμάτων νερού στον πλανήτη. Οι κυριότερες ευθύνες αποδίδονται στο φαινόμενο της παγκόσμιας θέρμανσης ή αλλιώς το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το οποίο δεν αποτελεί πλέον κάποιο σενάριο αλλά μια υπαρκτή πραγματικότητα. Η άνοδος της θερμοκρασίας του πλανήτη και οι διάφορες κλιματικές αλλαγές που αυτή επιφέρει επηρεάζουν αναπόφευκτα τις αναλογίες βροχοπτώσεων και χιονοπτώσεων, οδηγώντας έτσι σε περισσότερη βροχή παρά χιόνι. Ως αποτέλεσμα η απορροή του νερού είναι μεγαλύτερη την περίοδο των βροχών ενώ η ποσότητά του υπό μορφή πάγων και χιονιού στα βουνά, η οποία είναι απαραίτητα προς χρήση σε περιόδους ξηρασίας, γίνεται όλο και μικρότερη. Οι ανησυχίες και οι φόβοι των επιστημών εντείνονται καθώς οι πάγοι και το χιόνι λιώνει ακόμα και στα Ιμαλάια, την τρίτη μεγαλύτερη ζώνη σε συγκέντρωση πάγου μετά τους πόλους, αλλά και την μείωση της στάθμης των υδάτων κατά 10-12% στα περισσότερα ποτάμια της Ασίας που έχουν τις πηγές τους σε αυτή την παγωμένη μάζα.

Η ποσότητα των πηγών του φρέσκου νερού είναι σταθερή από την αρχή ύπαρξης ζωής στον πλανήτη. Ωστόσο, ο πληθυσμός της γης έχει αυξηθεί ραγδαία μέσα στα τελευταία 200 χρόνια ενώ αναμένεται να αυξηθεί ακόμα μέσα στα επόμενα 50 χρόνια. Ανεπιθύμητη συνέπεια της αύξησης αυτής δεν είναι μόνο η μείωση της ποσότητας του νερού που αναλογεί σε κάθε έναν από εμάς για οικιακή χρήση αλλά και αυξάνει τις ανάγκες του πλανήτη σε νερό για γεωργική και βιομηχανική χρήση και παραγωγή ενέργειας.

Χαρακτηριστικά, ο πληθυσμός της γης το 1804 ήταν 1 δισεκατομμύριο κάτοικοι ενώ μέσα σε σχεδόν 200 χρόνια κατάφερε να πενταπλασιαστεί και έφτασε σήμερα να αγγίζει τα 6 δισεκατομμύρια. Οι δυσοίωνες προβλέψεις εντείνουν τις ανησυχίες καθώς ο πληθυσμός της γης αναμένεται το 2050 να φτάσει τα 9 δισεκατομμύρια.

Όπως είναι αναμενόμενο η αύξηση του πληθυσμού οδηγεί στην αύξηση των αναγκών των ανθρώπων για τροφή, για την παραγωγή της οποίας απαιτείται η κατανάλωση όλο και μεγαλύτερης ποσότητας νερού. Η βασισμένη στην άρδευση γεωργία έχει καλύψει για πολλά χρόνια, κυρίως στις αναπτυσσόμενες χώρες, τις ανάγκες για τροφή. Έτσι μέσω της εκτροπής της ροής των ποταμών αλλά και των γεωτρήσεων εξασφαλίζεται η απαραίτητη ποσότητα νερού. Ωστόσο σε αρκετές περιπτώσεις η άρδευση πραγματοποιείται με τελείως αντικοινωνικό τρόπο. Η αλόγιστη κατανάλωση του φρέσκου νερού στις καλλιέργειες στερεί πολύτιμες ποσότητες από τα αποθέματά του.



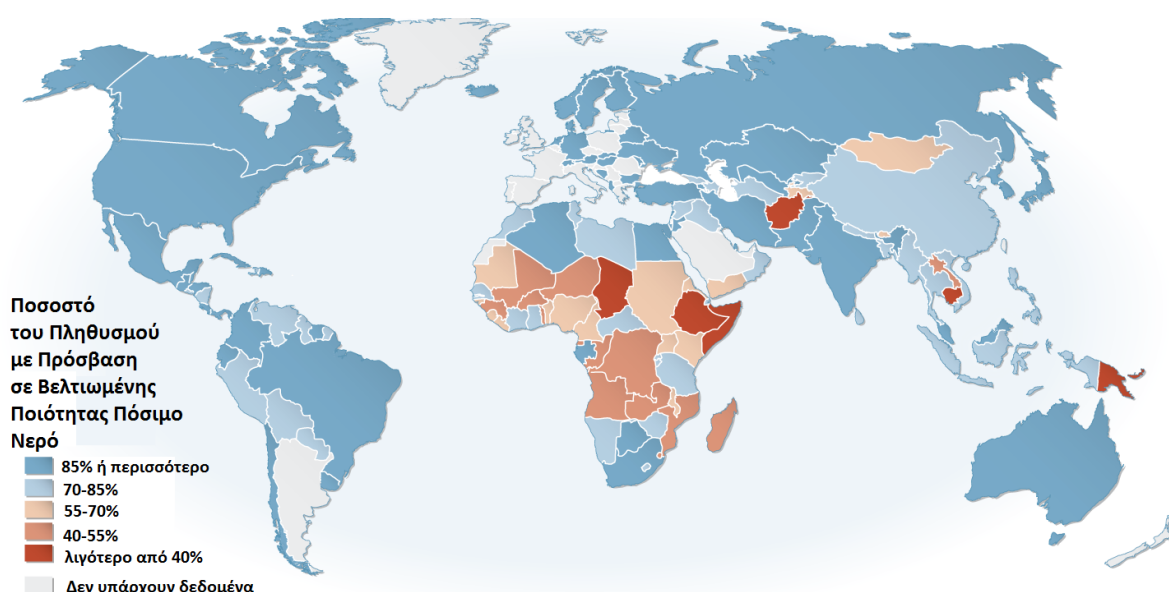
Εικόνα 3: Κατανάλωση του Νερού για τις διάφορες Δραστηριότητες. [36]

Μέσα από τη μελέτη του παγκόσμιου χάρτη παρουσιάζεται καθαρά το μέγεθος της ερημοποίησης αλλά και τα όρια των ζωνών ξηρασίας, οι οποίες καλύπτουν τεράστιες εκτάσεις σε όλες τις ηπείρους. Η πιο γνωστή έρημος είναι αυτή της Σαχάρας η οποία ξεπερνά αυτές της Αραβικής Χερσονήσου αλλά και της Βόρειας Αφρικής. Η Μεγάλη Σαχάρα, όπως αποκαλείται, ξεκινώντας από τις ανατολικές ακτές της Σαουδικής Αραβίας εκτείνεται σε απόσταση μεγαλύτερη των 4000km ως τις δυτικές ακτές του Μαρόκου. Χαρακτηριστικό γεγονός αποτελεί το ότι στην Αραβική Χερσόνησο, στην οποία περιλαμβάνονται η Σαουδική Αραβία, το Κουβέιτ, το Κατάρ, το Μπαχρέιν, τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα και το Ομάν δεν υπάρχει ούτε ένας φυσικός ποταμός. Άλλες μεγάλες έρημοι υπάρχουν στην Κίνα, στην Νότια και Νότιο Ανατολική Αμερική αλλά και στην μεγαλύτερη έκταση της Αυστραλίας.

Η αλόγιστη ανάπτυξη των τελευταίων ευθύνεται για την καταστροφή ευπαθών οικοσυστημάτων, όπως είναι τα δάση, τα τροπικά δάση, τα έλη και οι Σαβάνες, τα οποία θεωρούνται σημεία αναφοράς για την διατήρηση του κλίματος στον πλανήτη. Πολλές από τις πεδινές εκτάσεις οι οποίες χρησίμευαν ως βοσκοτόπια έχουν μετατραπεί σε ερήμους εξαιτίας της συνεχούς απώλειας του πλούσιου σε θρεπτικά συστατικά επιφανειακού εδάφους λόγω των φτωχών τεχνικών εκτροφής που χρησιμοποιούνταν. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν πολλές περιοχές της Σαβάνας, όπως το Σουδάν, η Κένυα, η Αιθιοπία, οι οποίες λόγω της υπερβόσκησης έχουν μετατραπεί σε ερήμους.

Η άπληστη ανθρώπινη δραστηριότητα σε συνδυασμό με τον σύγχρονο τρόπο ζωής και την αύξηση του πληθυσμού έχουν οδηγήσει στην κατασπατάληση ενέργειας και πόρων και στον περιορισμό των πηγών φρέσκου νερού. Η παρούσα κατάσταση είναι ανησυχητική καθώς ποσοστό 40% του πληθυσμού της γης,

περίπου δηλαδή 1.1 δισεκατομμύρια άνθρωποι, δεν έχει πρόσβαση σε αποθέματα φρέσκου νερού. Οι προβλέψεις είναι ακόμα πιο ανησυχητικές καθώς μέχρι το 2025 το ποσοστό αυτό αναμένεται να φτάσει το 60%. Επιπροσθέτως, υπολογίζεται ότι 2.6 δισεκατομμύρια άνθρωποι δεν έχουν νερό κατάλληλο για απολύμανση, έλλειψη που επιφέρει την μόλυνση και του πόσιμου νερού από τα απόβλητα. Άμεσο αποτέλεσμα είναι το ποσοστό των ασθενειών που προέρχεται από την κατανάλωση μολυσμένου νερού να ανέρχεται στο 80-90% ενώ των θανάτων στο 30% κυρίως στις αναπτυσσόμενες χώρες. Ακόμα και σε βιομηχανικές χώρες του ανεπτυγμένου κόσμου, μεγάλες περιόδους ξηρασίας και περιορισμένων βροχοπτώσεων ωθούν τις κυβερνήσεις να εφαρμόσουν αυστηρά μέτρα για την κατανάλωση του νερού.



**Εικόνα 4:** Πληθυσμοί με Πρόσβαση σε Πόσιμο Νερό. [37]

Ο φόβος έλλειψης του πολυτιμότερου αυτού αγαθού έχει πυροδοτήσει διαμάχες μεταξύ διαφόρων χωρών για τον έλεγχο των υδάτινων αποθεμάτων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι ποταμοί του Τίγρη και του Ευφράτη, οι οποίοι παρέχουν νερό σε Τουρκία, Συρία και Ιράκ. Οι ανάγκες των χωρών αυτών όμως ξεπερνούν τα αποθέματα νερού των ποταμών και έτσι προκαλούνται διαμάχες. Παρόμοια περιστατικά έχουν προκύψει μεταξύ Ουγγαρίας και Τσεχίας για τα νερά του Δούναβη, μεταξύ Βορείου και Νοτίου Κορέας, Ισραήλ και Παλαιστίνης, Αιγύπτου και Αιθιοπίας, ενώ πολλοί είναι αυτοί που υποστηρίζουν πως το νερό θα αποτελέσει την αιτία ενός Τρίτου Παγκοσμίου Πολέμου.

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

### 1.3 Τρόποι Αντιμετώπισης του Προβλήματος

Τα αποθέματα του νερού δεν είναι μια ανεξάντλητα διαθέσιμη κληρονομιά, όπως όλοι πιστεύαμε μέχρι σήμερα. Αντιθέτως μάλιστα, περιορίζονται σημαντικά χρόνο με τον χρόνο επηρεάζοντας έτσι τον τρόπο ζωής μας. Επιτακτική ανάγκη αποτελεί λοιπόν η εύρεση μιας κοινής πολιτικής συντηρητικής διαχείρισης των υδάτινων μαζών που απομένουν.

Μια πολιτική που γνωρίζει ήδη εφαρμογή σε αρκετές περιπτώσεις είναι αυτή του καθαρισμού και της επαναχρησιμοποίησης των αστικών λυμάτων. Η συμβολή της είναι σημαντική όχι μόνο για την οικονομία στην χρήση νερού για βιομηχανικές εφαρμογές, αλλά και για την βελτίωση της απόδοσης των τεχνολογιών άρδευσης.

Την επανάσταση, όμως, έρχεται να φέρει μια τεχνολογικά εφικτή και συμφέρουσα λύση για την ενίσχυση των αποθεμάτων φρέσκου νερού, αυτή της αφαλάτωσης. Με δεδομένο ότι το 97% του νερού στον πλανήτη είναι θαλασσινό, η παραγωγή φρέσκου νερού από αυτό μέσω της μεθόδου αφαλάτωσης φαντάζει ως αντίδοτο στην εκτεταμένη ανομβρία και στο πρόβλημα της λειψυδρίας σε παγκόσμιο επίπεδο.



**Εικόνα 5:** Κοινωνική Διαφήμιση για την Ευαισθητοποίησή μας στην Εξοικονόμηση Νερού. [11]

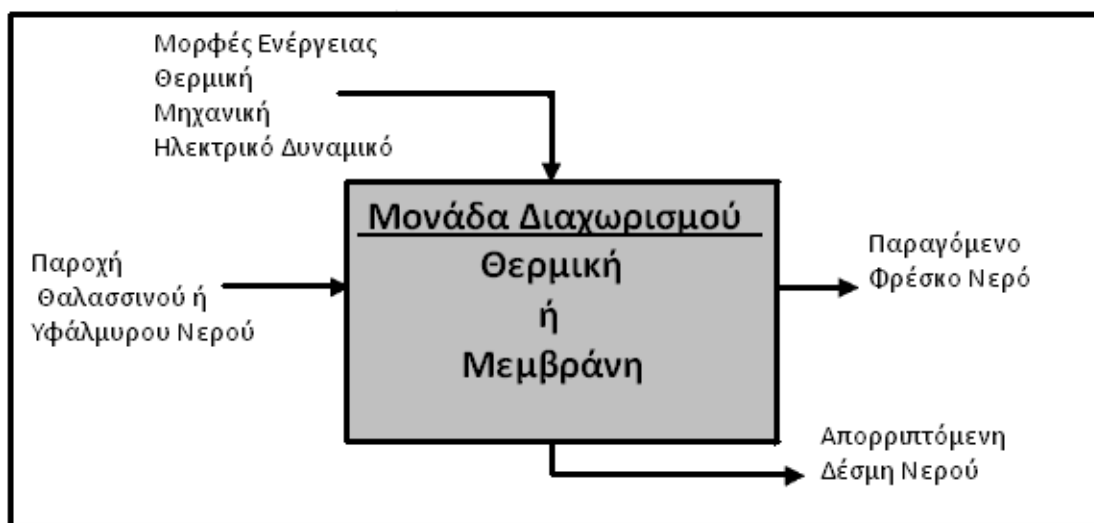
## 2. Η Αφαλάτωση

### 2.1 Τι είναι η Αφαλάτωση

Το θαλασσινό και το υφάλμυρο νερό είναι φυσικά εμπλουτισμένο σε άλας, μέταλλα, ιόντα, διάφορους μικροοργανισμούς αλλά και στερεά όπως άμμος και πυλός σε διαλυμένη μορφή. Με τον όρο αφαλάτωση αναφερόμαστε στα διάφορα στάδια της διαδικασίας απομάκρυνσης όλων αυτών των ουσιών. Το παραγόμενο νερό χρησιμοποιείται στην άρδευση, στην βιομηχανία ενώ είναι κατάλληλο για πόση από ζώα και ανθρώπους. Επιπλέον, σε πολλές περιπτώσεις κατά την διαδικασία αυτή παράγεται ως υποπροϊόν επιτραπέζιο αλάτι.

Η διαδικασία της αφαλάτωσης μπορεί να βασιστεί είτε σε θερμικές μεθόδους είτε στην χρήση μεμβρανών για την απομάκρυνση των αλάτων. Η τεχνική του θερμικού διαχωρισμού περιλαμβάνει δυο κύριες κατηγορίες : η πρώτη είναι της εξάτμισης και ακολουθείται από την συμπύκνωση των παραγόμενων υδρατμών, ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει πάγωμα και έπειτα λιώσιμο των παραγόμενων κρυστάλλων νερού.

Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιείται περισσότερο και σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις υποστηρίζεται από μονάδες παραγωγής ενέργειας, οι οποίες στηρίζονται σε συστήματα τουρμπίνων κίνησης είτε με ατμό είτε με αέρια. Η διαδικασία της εξάτμισης μπορεί να λάβει χώρα σε περιοχές μετάδοσης θερμότητας ενώ διακόπτεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα όταν αρχίζει ο βρασμός της υγρής μάζας και για τον λόγο αυτό είναι γνωστή ως εξάτμιση με εκτόνωση (flashing evaporation).



Εικόνα 6: Σχηματική Περιγραφή της Διαδικασίας Αφαλάτωσης. [1]

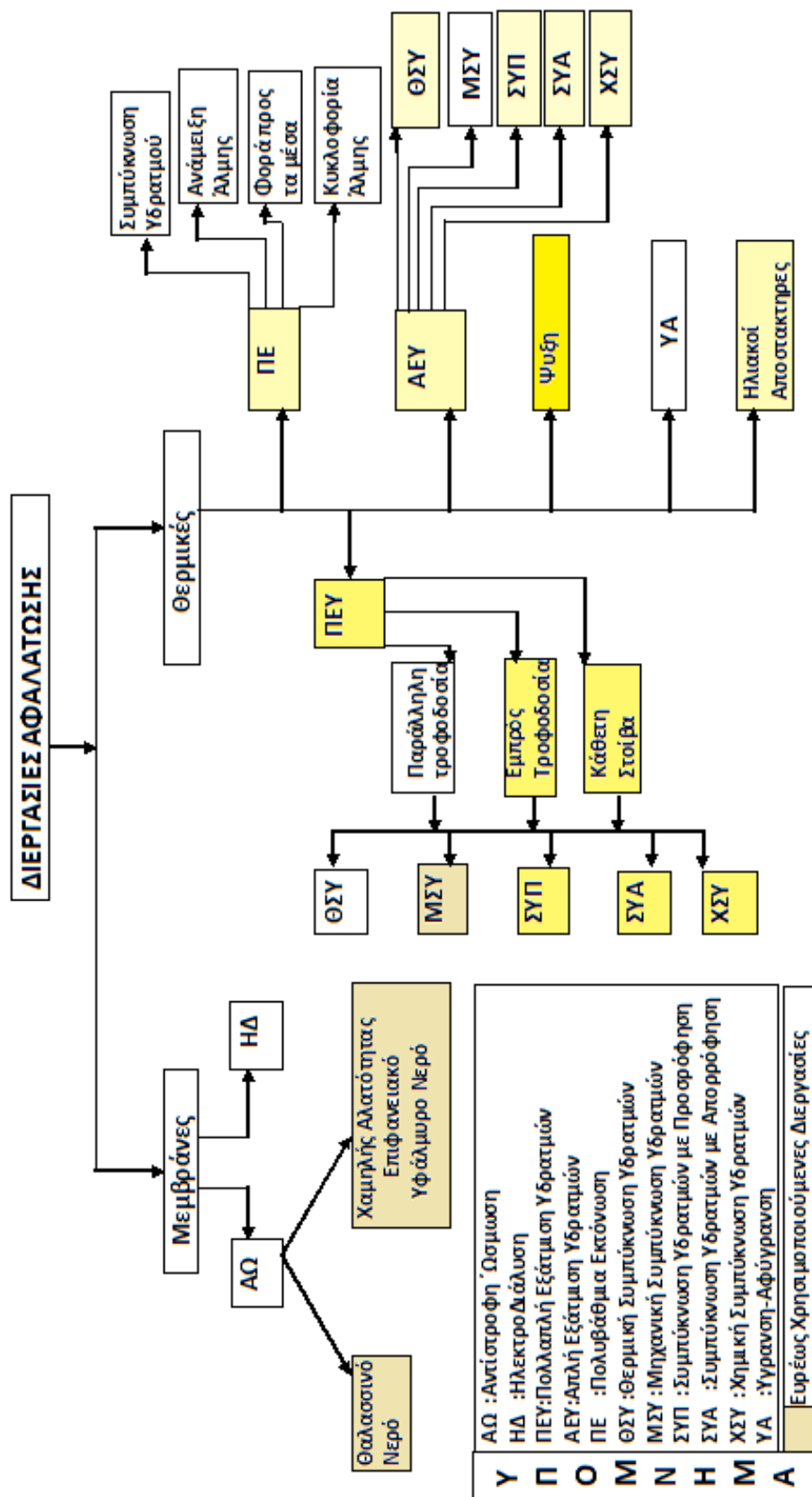


Στην κατηγορία της εξάτμισης περιλαμβάνονται ακόμα τα παρακάτω είδη: αφαλάτωση με πολυβάθμια εκτόνωση (MultiStage Flash desalination, MSF), αφαλάτωση με πολλαπλή εξάτμιση υδρατμών (Multiple Effect Evaporation, MEE), αφαλάτωση με εξάτμιση υδρατμού σε μια βαθμίδα (Single Effect Evaporation, SEE), ύγρανση- αφύγρανση (Humidification-DeHumidification, HD), αφαλάτωση με ηλιακούς αποστακτήρες (Solar Stills). Τα δύο τελευταία είδη διαφοροποιούνται από τα προηγούμενα εξαιτίας του γεγονότος ότι η εξάτμιση του νερού πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από αυτή του σημείου ζέσης του, καθώς η κινητήρια δύναμη εξάτμισης είναι η διαφορά συγκεντρώσεως που παρατηρείται στους υδρατμούς στο ρεύμα του αέρα.

Αναφορικά η συμπύκνωση υδρατμού σε μια βαθμίδα μπορεί να πραγματοποιηθεί με μηχανικό τρόπο (Mechanical Vapor Compression, MVC), με θερμικές μεθόδους (Thermal Vapor Compression, TVC), με απορρόφηση (Absorption Vapor Compression, AbVC), με προσρόφηση (Adsorption Vapor Compression, AdVC) και τέλος με χημικές διεργασίες (Chemical Vapor Compression, CVC). Για τον λόγο αυτό οι συσκευές συμπύκνωσης υδρατμού είναι εφοδιασμένες με μηχανικούς συμπιεστές, με εκτοξευτήρες ατμού (που χρησιμοποιούνται στις θερμικές μεθόδους), με κρεβάτια και στήλες προσρόφησης/εκρόφησης. Σε αρκετές περιπτώσεις η συμπύκνωση του υδρατμού συνδυάζεται με ενός ή και πολλαπλών βαθμίδων μονάδες αφαλάτωσης με σκοπό την βελτίωση της θερμικής απόδοσης της διεργασίας. Σε αυτή την τεχνική ο υδρατμός χαμηλής θερμοκρασίας, ο οποίος παράγεται είτε σε μια βαθμίδα είτε στη τελευταία από τις βαθμίδες της διεργασίας, συμπιέζεται σε υψηλότερη θερμοκρασία και έπειτα χρησιμοποιείται για να ξεκινήσει την διαδικασία της εξάτμισης στην ίδια ή στην πρώτη από τις βαθμίδες της διεργασίας.

Η δεύτερη μέθοδος αφαλάτωσης βασίζεται στην χρήση μεμβρανών. Η πιο αντιπροσωπευτική διεργασία της μεθόδους αυτής είναι η αντίστροφη ώσμωση (Reverse Osmosis, RO), κατά την οποία φρέσκο νερό εισέρχεται υπό υψηλή πίεση δια μέσου ημιπερατών μεμβρανών αφήνοντας πίσω του υψηλού βαθμού συγκέντρωσης άλμη. Μια ακόμα διεργασία, που εντάσσεται στην δεύτερη μέθοδο αλλά την συναντάμε ωστόσο σε ελάχιστες βιομηχανικές εφαρμογές, είναι αυτή της ηλεκτροδιάλυσης (ElectroDialysis, ED). Στην διεργασία αυτή, ηλεκτρικά φορτισμένα ιόντα αλάτων διαχωρίζονται μέσω επιλεκτικών μεμβρανών ανταλλαγής ιόντων αφήνοντας πίσω το προϊόν νερό χαμηλής αλατότητας. Κατά συνέπεια, από την άλλη πλευρά της μεμβράνης δημιουργείται ένα ρεύμα άλμης με υψηλό βαθμό συγκέντρωσης.

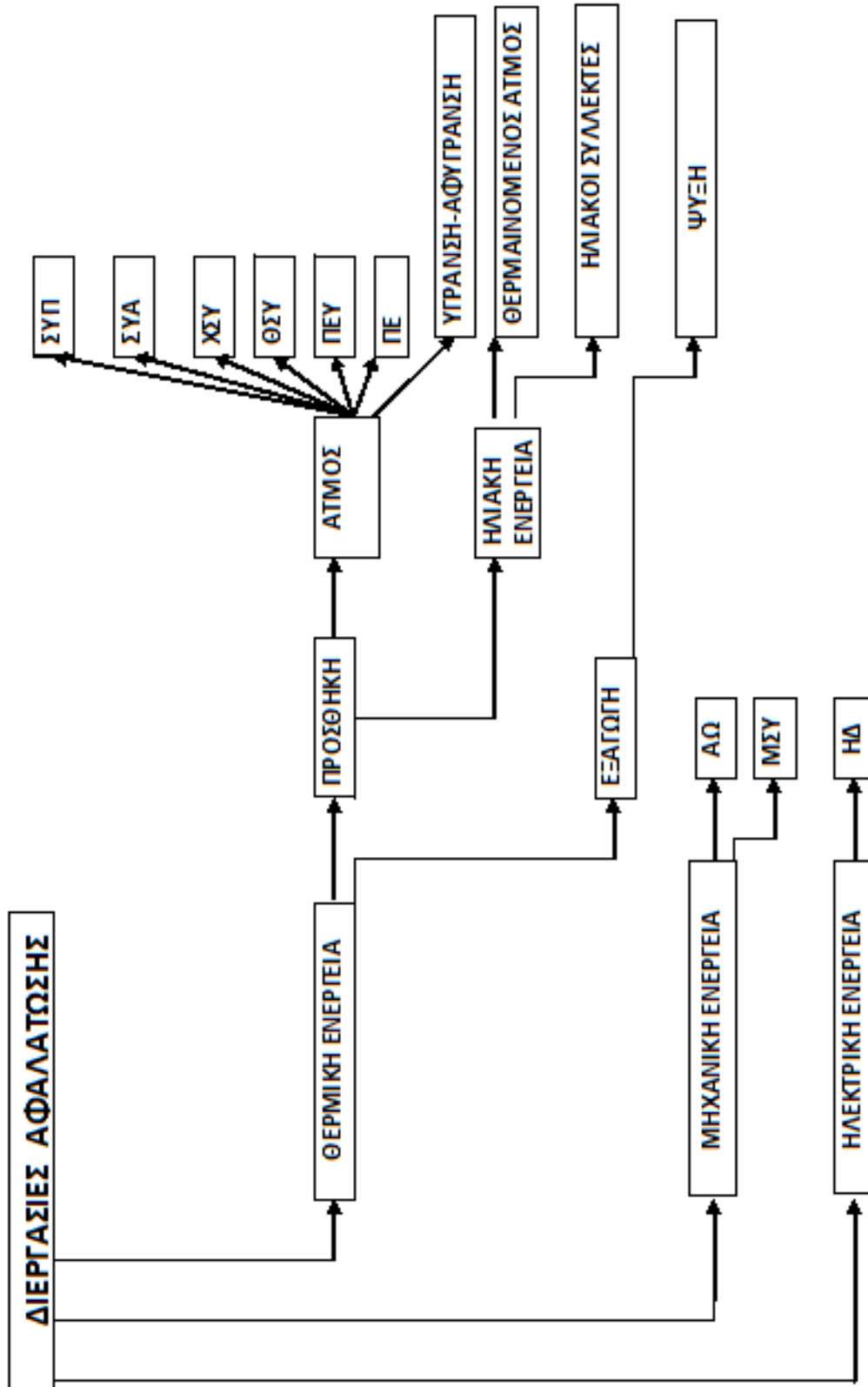
Παρακάτω, ακολουθεί σχηματική απεικόνιση των μεθόδων αφαλάτωσης καθώς και των διεργασιών που ανήκουν σε αυτές.



Εικόνα 7: Θερμικές και με χρήση Μεμβρανών Διεργασίες Αφαλάτωσης [1]

Μια διαφορετική κατηγοριοποίηση των μεθόδων αφαλάτωσης μπορεί να πραγματοποιηθεί σύμφωνα με την μορφή ενέργειας που χρησιμοποιείται σε κάθε διεργασία. Χαρακτηριστικά, λοιπόν, οι διεργασίες θερμικής ενέργειας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες όπου η ενέργεια είτε προστίθεται είτε αφαιρείται. Στην κατηγορία όπου προστίθεται ενέργεια περιλαμβάνονται, η πολυβάθμια εκτόνωση (ΠΕ, Multistage Flash Evaporation), η πολλαπλή εξάτμιση υδρατμών (ΠΕΥ, Multiple Evaporation), η ύγρανση- αφύγρανση (ΥΑ, Humidification-DeHumidification), καθώς και οι διεργασίες οι οποίες συνεργάζονται με αντλίες θερμικές, χημικές, προσρόφησης ή απορρόφησης θερμότητας. Ο ατμός θέρμανσης σε αυτές τις διεργασίες μπορεί να ληφθεί από ένα εργοστάσιο συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μια ειδική μονάδα λέβητα ή από την ηλιακή ενέργεια. Από την άλλη πλευρά, στις μεθόδους αφαλάτωσης μέσω αφαίρεση ενέργειας περιλαμβάνονται οι διεργασίες ψύξης. Η αντίστροφη ώσμωση (Reverse Osmosis) καθώς και η διεργασία της μηχανικής συμπύκνωσης ατμού (Mechanical Vapor Compression) ανήκουν στην κατηγορία μεθόδων αφαλάτωσης με χρήση μηχανικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά την αντίστροφη ώσμωση (RO) η διαφορά πίεσης παίζει το ρόλο της μηχανικής ενέργειας και είναι υπεύθυνη για τον διαχωρισμό των αλάτων ενώ κατά την διεργασία της μηχανική συμπύκνωσης του ατμού (MVC), η μηχανική ενέργεια του υδρατμού ευθύνεται για την αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας του αποσταγμένου υδρατμού που χρησιμοποιείται έπειτα για την θέρμανση του παρεχόμενου θαλασσινού νερού. Η τελευταία κατηγορία περιλαμβάνει τις διεργασίες που απασχολούν την ηλεκτρική ενέργεια με σκοπό τον διαχωρισμό νερού και άλατος. Εδώ ανήκει η διεργασία της ηλεκτροδιάλυσης (ElectroDialysis) όπου η ηλεκτρική ενέργεια κατευθύνει τα ηλεκτρικά φορτισμένα ιόντα μέσω επιλεκτικών μεμβρανών.

Ακολουθεί σχηματική απεικόνιση της παραπάνω κατηγοριοποίησης των μεθόδων αφαλάτωσης καθώς και των διεργασιών που ανήκουν σε αυτές.



Εικόνα 8: Ενεργειακή Κατηγοριοποίηση των Διεργασιών Αφαλάτωσης [1]

## 2.2 Στοιχεία της Αγοράς για τις Διεργασίες Αφαλάτωσης

Το 2000, οι θερμικές διεργασίες αφαλάτωσης υπήρξαν πρωτοπόρες όσον αφορά την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού. Επιπροσθέτως, η αφαλάτωση με πολυβάθμια εκτόνωση (ΠΕ, MSF) κατείχε ποσοστό μεγαλύτερο του 54% των επιχειρησιακών δυνατοτήτων όλων των διεργασιών της αφαλάτωσης όπως ακόμα και ποσοστό μεγαλύτερο του 93% όλων των υπόλοιπων θερμικών διεργασιών.

Στον **Πίνακα** που ακολουθεί παρουσιάζεται η ανάπτυξη στους δείκτες παραγωγής τις χρονιές 1996 και 2000 για τις μεγαλύτερες σε παραγωγή χώρες, στις οποίες περιλαμβάνονται τα Κράτη του Κόλπου, η Αμερική και όπως και πολλές ακόμα. Στον Πίνακα επίσης περιλαμβάνονται ποσοστά για την παραγωγική δυνατότητα των διαφόρων μεθόδων, όπου περιλαμβάνονται η πολυβάθμια εκτόνωση (MSF), η αντίστροφη ώσμωση (RO), η ηλεκτροδιάλυση (HD), η πολλαπλή εξάτμιση (ΜΕΕ) και τέλος η μηχανική συμπύκνωση ατμών (MVC).

Σύμφωνα με τον παραπάνω Πίνακα, παρατηρούμε ότι η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης (ΑΩ, Reverse Osmosis) κυριαρχεί στην αγορά της αφαλάτωσης στις χώρες της Αμερικής, της Ιαπωνίας και της Ισπανίας. Από την άλλη πλευρά, η πολυβάθμια εκτόνωση (ΠΕ, Multistage Flash Evaporation) είναι η κυρίαρχη σε χρήση διεργασία για τις χώρες του Κόλπου, με εξαίρεση το Μπαχρέιν, όπου η βιομηχανία μοιράζεται εξίσου μεταξύ των διεργασιών της πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) και της αντίστροφης ώσμωσης (RO). Ωστόσο, τα περισσότερα από τα έργα της αντίστροφης ώσμωσης (RO) στο Μπαχρέιν χρησιμοποιούν υφάλμυρο νερό, ως αποτέλεσμα οι χώρες του Κόλπου να χρησιμοποιούν λιγότερο την διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης λόγω των σκληρών συνθηκών της περιοχής. Ο περιορισμένος υδάτινος όγκος του Κόλπου έχει υψηλό δείκτη αλατότητας ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ 42000-51000ppm και εξαρτάται από την εποχιακή θερμοκρασία. Επιπλέον, η θερινή περίοδος εκτείνεται για μεγάλο χρονικό διάστημα από τον Απρίλιο έως τον Οκτώβριο με υψηλό μέσο όρο θερμοκρασιών, 40° C και 30° C για τον αέρα και το νερό αντίστοιχα. Η διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης που χρησιμοποιείται στην Αμερική, την Ιαπωνία και σε άλλες χώρες έχει να αντιμετωπίσει ηπιότερες συνθήκες καθώς η αλατότητα του θαλασσινού νερού σε ανοιχτή θάλασσα είναι πολύ λιγότερη με τιμή που αγγίζει τα 35000ppm ενώ η μέση θερμοκρασία τους καλοκαιρινούς μήνες τόσο για τον αέρα όσο και για το νερό είναι λιγότερο από 25° C.

Επί του παρόντος, η βιομηχανία της αφαλάτωσης γνωρίζει τεράστια ανάπτυξη ανά τον κόσμο. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της ζήτησης για νερό καθώς και στην αύξηση του κόστους παραγωγής φρέσκου νερού από φυσικές πηγές. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της επέκτασης συναντάμε στην Ισπανία, όπου η παραγωγική δυνατότητα έχει διπλασιαστεί τα τελευταία πέντε χρόνια. Επιπλέον, 720.000 m<sup>3</sup>/d παραγωγικής δυνατότητας δηλαδή περίπου το 20% των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης που ήδη υπάρχουν έχουν κατασκευαστεί στην

Σαουδική Αραβία για το συνολικό κόστος των  $2 \times 10^9$  \$, ενώ ακόμα υπολογίζεται ότι η παραγωγική δυνατότητα θα διπλασιαστεί μέσα στις επόμενες δύο δεκαετίες με την εγκατάσταση  $4,4 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/d για το συνολικό κόστος των  $50 \times 10^9$  \$. Μερικά ακόμη παραδείγματα μπορούν να εντοπιστούν και σε άλλες χώρες συμπεριλαμβανομένου την Ινδία, Αίγυπτο, Αμερική, Κίνα, καθώς και σε χώρες καινούργιες στην αγορά της αφαλάτωσης όπως η Συρία, Ινδονησία και η Σιγκαπούρη, ενώ πολλές ακόμα είναι στην διαδικασία επέκτασης της παραγωγής του με σκοπό να καλύψουν τις βασικές τους ανάγκες.

Χώρα	Συνολική Χωρητικότητα (m <sup>3</sup> /d)	Ποσοστό Συναρτήσεως της Συνολικής Παγκόσμια Παραγωγή	ΠΕ (%)	ΠΕΑ (%)	ΜΣΑ (%)	ΑΩ (%)	ΗΔ (%)
Σαουδική Αραβία	5253208 5429334	23.6 20.96	65.66 64.22	0.31 0.329	1.21 1.39	30.97 32.254	1.85 1.8
Αμερική	3092533 4327596	15.6 16.7	1.71 1.32	1.78 4.49	4.51 6.35	78.04 74.63	11.37 13.56
Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα	2164507 2890689	9.8 11.16	89.80 86.66	0.38 7.7	2.97 0.03	6.49 5.51	0.24 0.09
Κουβέιτ	1538426 1614861	6.8 6.2	95.47 96.52	0.68 0.08	0.00 0.00	3.39 3.25	0.33 0.15
Ιαπωνία	745318 945163	3.67 3.65	4.72 3.86	1.97 2.34	0.00 0.00	86.41 84.32	6.78 7.35
Λιβύη	683308 701303	3.37 2.71	67.70 65.66	0.94 10.7	1.84 0	19.56 15.91	9.79 7.73
Κατάρ	566904 572870	2.79 2.21	94.43 94.34	0.64 3.86	3.26 0	0.00 1.8	0.00 0.00
Ισπανία	529891 1233835	2.61 4.76	10.62 4.51	0.90 3.5	8.65 2.79	68.91 84.25	10.90 4.95
Ιταλία	518711 581478	2.56 2.24	43.22 43.76	1.88 12.4	15.1 4 6.53	20.43 21.67	19.16 16.24
Μπαχρέιν	309158 473391	1.52 1.83	52.02 62.74	0.00 9.67	1.46 0	41.73 26.88	4.50 0.71
Ομάν	192586 377879	0.95 1.21	84.06 87.31	2.18 1.111	0.00 3.7	11.73 7.63	0.00 0.237

Συνολική Παγκόσμια Παραγωγή (1996)=  $20,3 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/d

Συνολική Παγκόσμια Παραγωγή (2000)=  $25,909 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/d

**Πίνακας 2:** Παραγωγική Ικανότητα Αφαλάτωσης και Ποσοστά διαφόρων διεργασιών στις χώρες του Κόλπου, στην Αμερική και σε άλλες χώρες. Σε κάθε κατηγορία ο πρώτος αριθμός είναι για το 1996 και ο δεύτερος για το 2000. [1]

## 2.3 Ανάλυση των Διεργασιών Αφαλάτωσης

### 2.3.1 Εξάτμιση Υδρατμού Σε Μια Βαθμίδα (Single Effect Evaporation)

Τα συστήματα εξάτμισης υδρατμού μιας βαθμίδας (SEE) έχουν αρκετά περιορισμένες βιομηχανικές εφαρμογές. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε θαλάσσια σκάφη καθώς έχουν θερμικό βαθμό απόδοσης μικρότερο της μονάδας, πράγμα που σημαίνει ότι η ποσότητα του παραγόμενου νερού είναι μικρότερη από την ποσότητα του θερμαινόμενου ατμού που απαιτείται για την λειτουργία του συστήματος. Ωστόσο, η κατανόηση αυτής της διεργασίας είναι απαραίτητη αφού περιλαμβάνει πολλά από τα στοιχεία που συνθέτουν και άλλα συστήματα όπως απλής συμπίεσης ατμού καθώς και πολλαπλής εξάτμισης υδρατμού. Συνεπώς, έτσι θα διευκολύνουμε την κατανόηση αυτών των συστημάτων τα οποία είναι πολυπλοκότερα.

Τα κυρία στοιχεία μιας μονάδας εξάτμισης μιας βαθμίδας (SEE) είναι ο εξατμιστήρας και ο προθερμαντήρας παροχής ή ο συμπυκνωτής. Ο εξατμιστήρας αποτελείται από σωλήνες ανταλλαγής θερμότητας εξατμιστήρα/συμπυκνωτή, έναν θάλαμο υδρατμού, μια πιπίνα για το μη-εξατμισμένο νερό, μια γραμμή για την απομάκρυνση των μη συμπυκνωμένων αερίων, ένα σύστημα διανομής νερού και μια διάταξη απαγωγής ομίχλης. Ο προθερμαντήρας παροχής διαθέτει ένα κέλυφος καθώς και μια ειδική διαμόρφωση σωλήνων και λειτουργεί σε μια αντίστροφη κατάσταση, όπου η λανθάνουσα θερμότητα του συμπυκνωμένου υδρατμού μεταφέρεται στο θαλασσινό νερό πρόσληψης, στο οποίο περιλαμβάνονται τόσο το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας ( $M_f$ ) όσο και το θαλασσινό νερό ψύξης ( $M_{cw}$ ).

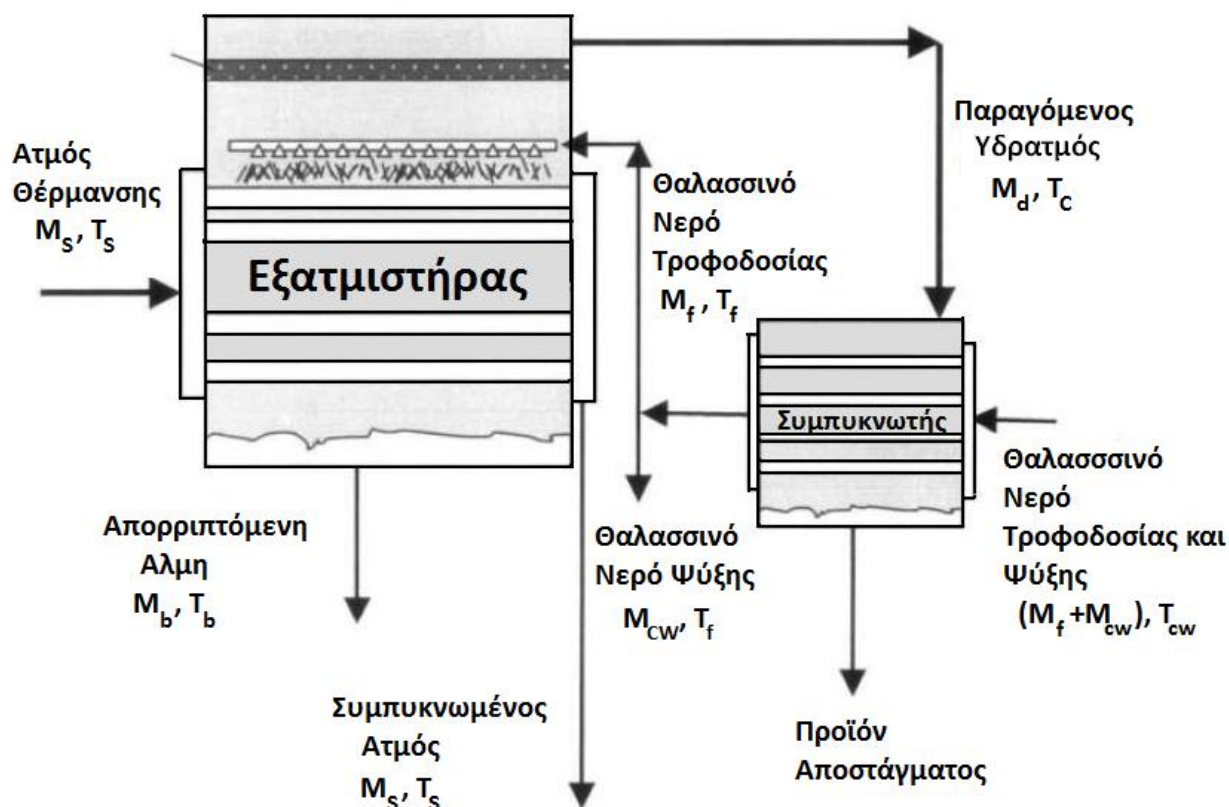
Το θαλασσινό νερό πρόσληψης ( $M_{cw} + M_f$ ), το οποίο βρίσκεται σε θερμοκρασία ( $T_{cw}$ ) και συγκέντρωση άλατος ( $X_f$ ), εισάγεται στον σωλήνα από την πλευρά όπου βρίσκεται ο προθερμαντήρας με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του ( $T_f$ ). Το νερό ψύξης ( $M_{cw}$ ) απορρίπτεται ξανά στην θάλασσα. Ο ρόλος του νερού ψύξης στον συμπυκνωτή είναι ουσιαστικά να απομακρύνει την περίσσεια θερμότητα που προστίθεται στο σύστημα του εξατμιστήρα από τον ατμό θέρμανσης. Αυτό συνεπάγεται ότι, ο εξατμιστήρας δεν καταναλώνει όλη την παρεχόμενη θερμότητα, αντίθετα, υποβαθμίζει την ιδιότητά της. Η θέρμανση του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας ( $M_f$ ) στους σωλήνες του συμπυκνωτή από ( $T_{cw}$ ) σε ( $T_f$ ) είναι απαραίτητη για την αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης της διεργασίας. Η αναγκαία θερμότητα για την θέρμανση του θαλασσινού νερού στο εσωτερικό των σωλήνων του συμπυκνωτή, παρέχεται από την συμπύκνωση των ατμών που έχουν δημιουργηθεί κατά την διαδικασία βρασμού στον εξατμιστήρα ( $M_d$ ).

Η θερμοκρασία συμπύκνωσης υδρατμού και κατά συνέπεια η πίεση στον θάλαμο υδρατμού τόσο για τον εξατμιστήρα όσο και για τον συμπυκνωτή, ελέγχεται από:

- Την ταχύτητα της ροής του νερού ψύξης,  $M_{cw}$ .
- Τη θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας,  $T_{cw}$ .
- Ο διαθέσιμος χώρος μεταφοράς θερμότητας στον συμπυκνωτή,  $A_c$ .
- Ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του υδρατμού συμπυκνώσεως και του κυκλοφορούν θαλασσινού νερού,  $U_c$ .

Κατά συνέπεια ο συμπυκνωτής έχει τρεις λειτουργίες:

- Απομακρύνει την περίσσεια θερμότητας από το σύστημα.
- Βελτιώνει τον βαθμό απόδοσης της διαδικασίας.
- Ρυθμίζει τη θερμοκρασία βρασμού εντός του εξατμιστήρα.

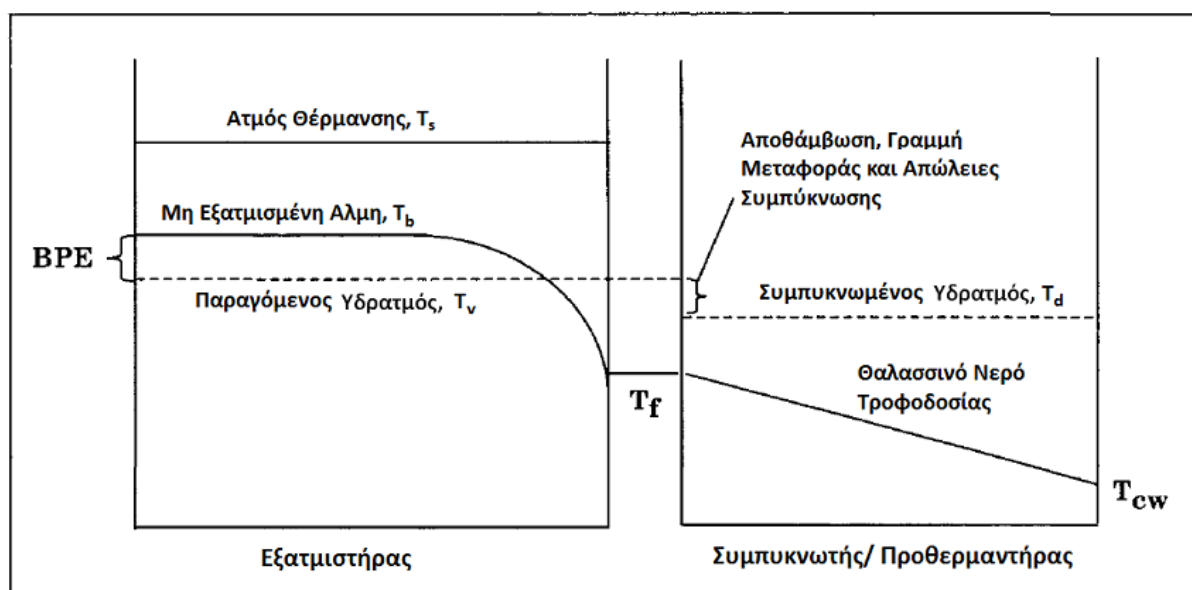


Εικόνα 9: Διεργασία Αφαλάτωσης με Σύστημα Εξάτμιση Υδρατμού Μιας Βαθμίδας (SEE). [1]

Το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας ( $M_f$ ) έχει υποστεί χημική επεξεργασία και εξαέρωση πριν να διοχετευθεί στον εξατμιστήρα. Η χημική επεξεργασία είναι απαραίτητη για να αποφευχθεί ο σχηματισμός ιζημάτων και αφρού στον εξατμιστήρα. Και οι δυο αυτοί παράγοντες είναι ικανοί να βλάψουν την λειτουργία της μονάδας. Εντός του εξατμιστήρα, το νερό τροφοδοσίας ψεκάζεται



στην κορυφή από όπου πέφτει με την μορφή μιας λεπτής στοιβάδας στις επόμενες σειρές σωλήνων με οριζόντια διάταξη. Η συμπύκνωση του κορεσμένου ατμού θέρμανσης και η αποδέσμευση της λανθάνουσας θερμότητάς του παρέχει την απαιτούμενη λογική και λανθάνουσα θερμότητα για την εξάτμιση του νερού από το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας. Σαν αποτέλεσμα, η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας ( $T_f$ ) αυξάνει και φτάνει έως την θερμοκρασία βρασμού ( $T_b$ ). Το μέγεθος ( $T_b$ ) υπαγορεύεται κυρίως από τη φύση των χημικών ουσιών που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της διαμόρφωσης των διαστάσεων και την κατάσταση του ατμού θέρμανσης. Ο υδρατμός που σχηματίζεται από τον βρασμό με ένα ποσοστό ( $M_d$ ) είναι απαλλαγμένος από άλατα. Στο παρακάτω σχήμα, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η θερμοκρασία του παραγόμενου υδρατμού ( $T_v$ ) είναι μικρότερη από την θερμοκρασία βρασμού κατά τη θερμοκρασιακή ανύψωση του σημείου βρασμού (BPE). Ομοίως, η θερμοκρασία του συμπυκνωμένου υδρατμού ( $T_d$ ) είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του υδρατμού που παράγεται από τις απώλειες οι οποίες προκαλούνται από την αποθάμβωση, τις γραμμές μεταφορά και τέλος τη συμπύκνωση.



**Εικόνα 10:** Προφίλ Θερμοκρασίας στον Εξατμιστήρα και στον Συμπυκνωτή για την Διεργασία Αφαλάτωσης με Εξάτμιση Υδρατμού Σε Μια Βαθμίδα. [1]

Ο παραγόμενος υδρατμός ρέει μέσω ενός πλεκτού συρμάτινου διαχωριστή ομίχλης, γνωστός και ως συρματόπλεγμα αποθάμβωσης, για να απομακρυνθούν τα παρασυρόμενα σωματίδια άλμης. Ο υδρατμός θα πρέπει να είναι πλήρως απελευθερωμένος από τα σταγονίδια άλμης για να αποφευχθεί η μόλυνση του παραγόμενου νερού. Αυτό εμποδίζει επίσης την επαφή των σωλήνων του ψυκτήρα με την άλμη, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε σχηματισμό ιζημάτων, διάβρωση εδάφους και μείωση των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας. Επίσης,

σε μονάδες θερμικής συμπίεσης υδρατμού η παρουσία παρασυρμένων σταγονιδίων νερού στον υδρατμό, ο οποίος ρέει μέσα στον εγχυτήρα ατμού, μπορεί να οδηγήσει σε διάβρωση των ακροφυσίων εκτίναξης και του διαχύτη. Η θερμοκρασία κορεσμού των υδρατμών μετά την αποθάμβωση είναι χαμηλότερη από ( $T_v$ ). Αυτή η κατάθλιψη θερμοκρασίας προκαλείται από την απώλεια πίεσης τριβής που λαμβάνει χώρα κατά την αποθάμβωση. Άλλη πτώση της πίεσης πραγματοποιείται κατά την διάρκεια της μεταφοράς του υδρατμού μεταξύ του εξατμιστήρα και του προθερμαντήρα, όπως επίσης και κατά την συμπύκνωση του υδρατμού. Αυτή θα είναι και η αιτία της περαιτέρω μείωσης της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του υδρατμού.

Τα μη συμπυκνώσιμα αέρια που βρίσκονται στον θάλαμο υδρατμού του συμπυκνωτή πρέπει να εξαερίζονται συνεχώς, ώστε να αποφευχθεί η υποβάθμιση της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας του συμπυκνωτή. Το στρώμα των μη συμπυκνώσιμων αερίων κρύβει ένα τμήμα της περιοχής μεταφοράς θερμότητας του συμπυκνωμένου υδρατμού. Επιπλέον, τα μη συμπυκνώσιμα αέρια μειώνουν τη μερική πίεση των συμπυκνωμένου υδρατμού και ως αποτέλεσμα η συμπύκνωση λαμβάνει χώρα σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Το γεγονός αυτό μειώνει την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας, λόγω της μείωσης της καθαρά κινητήριας δύναμης για τη μεταφορά θερμότητας και κατά συνέπεια μειώνεται η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας ( $T_f$ ). Η απομάκρυνση των αερίων γίνεται σε σημεία όπου η θερμοκρασία προσεγγίζει αυτήν του νερού τροφοδοσίας. Αυτό επιτρέπει την ψύξη των μη συμπυκνώσιμων αερίων με την ελάχιστη δυνατή θερμοκρασία, έτσι, ελαχιστοποιείται η ποσότητα του υδρατμού που μπορεί να διαφύγει με τα αέρια και μειώνεται ο όγκος των αντλούμενων αερίων. Επιπλέον, είναι δυνατή η αντίστροφη λειτουργία του συμπυκνωτή έτσι ώστε η θερμοκρασία του νερού στην έξοδό του να είναι εντός 3 έως 5° C της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του κορεσμένου υδρατμού. Αυτό βελτιώνει τη θερμική συμπεριφορά της μονάδας και ελαχιστοποιεί το ρυθμό ροής της μάζας του νερού ψύξης.

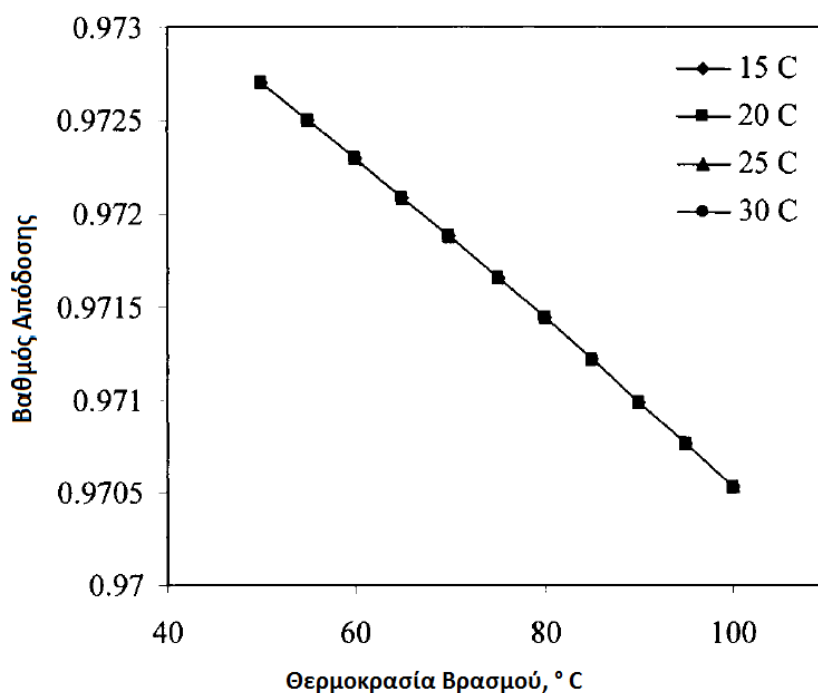
Οι παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση ενός συστήματος εξάτμισης ατμού μιας βαθμίδας (SEE) είναι:

- Η ποσότητα του παραγόμενου φρέσκου νερού ανά μονάδα μάζας του ατμού θέρμανσης ή ο βαθμός θερμικής απόδοσης.
- Η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας.
- Ο ειδικός ρυθμός ροής του νερού ψύξης.

Ο βαθμός θερμικής απόδοσης και ο ειδικός ρυθμός ροής του νερού ψύξης δίνουν ένα ενδεικτικό μέτρο για το κόστος λειτουργίας του συστήματος. Αύξηση στον θερμικό βαθμό απόδοσης, συνεπάγεται μείωση στην κατανάλωση της ενέργειας, η οποία ανέρχεται για το 30-50% του κόστους ανά μονάδα προϊόντος. Από την άλλη πλευρά, η συγκεκριμένη περιοχή μεταφοράς θερμότητας αποτελεί μέτρο του κεφαλαίου της διαδικασίας. Άλλες παράμετροι που μπορούν να επηρεάσουν

την απόδοση του συστήματος είναι η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού καθώς και η αλατότητά του, που ωστόσο επηρεάζονται από την τοποθεσία του έργου καθώς και τις εποχικές συνθήκες.

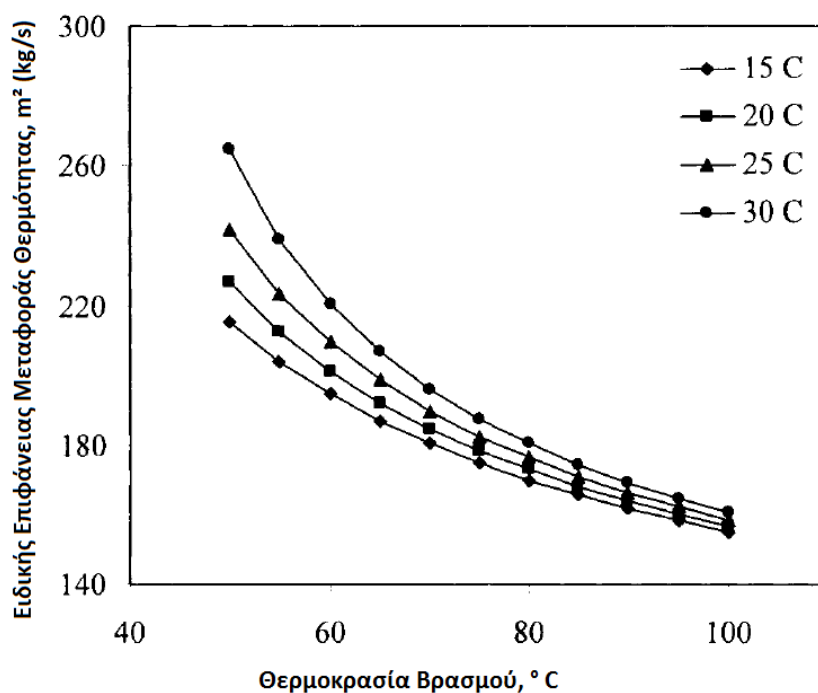
Οι διακυμάνσεις του βαθμού απόδοσης του συστήματος, της ειδικής επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας και του ειδικού ρυθμού ροής του νερού ψύξης ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού και της θερμοκρασίας βρασμού μπορούν να απεικονιστούν με τη βοήθεια διαγραμμάτων. Αναλυτικότερα, όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα της **Εικόνας 11**, ο βαθμός απόδοσης του συστήματος είναι ανεξάρτητος από τη θερμοκρασία πρόσληψης του θαλασσινού νερού ( $T_w$ ). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας ( $T_f$ ), καθορίζεται με βάση τη θερμοκρασία βρασμού ( $T_b$ ). Ως εκ τούτου, οι μεταβολές της θερμοκρασίας πρόσληψης του θαλασσινού νερού θα επηρεάσουν μόνο την ταχύτητα ροής του νερού ψύξης, καθώς και την περιοχή μεταφοράς θερμότητας του συμπυκνωτή. Ένα ακόμα σημαντικό αποτέλεσμα, το οποίο επίσης παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα, είναι η πολύ χαμηλή ευαισθησία του βαθμού απόδοσης του συστήματος σχετικά με τη θερμοκρασία βρασμού.



**Εικόνα 11:** Επίδραση της Θερμοκρασίας του Θαλασσινού Νερού και της Θερμοκρασίας Βρασμού στον Βαθμό Απόδοσης στην Διεργασία Αφαλάτωσης με Εξάτμιση Ατμού σε μια Βαθμίδα (SEE). [1]

Αντίστοιχα, στο διάγραμμα της **Εικόνας 12**, παρουσιάζονται οι επιδράσεις της θερμοκρασίας βρασμού καθώς και της θερμοκρασίας πρόσληψης του θαλασσινού νερού στην ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Όπως φαίνεται, η αύξηση της θερμοκρασίας βρασμού ( $T_b$ ) προκαλεί μείωση στη ειδική περιοχή μεταφοράς θερμότητας τόσο στον εξατμιστήρα όσο και στον συμπυκνωτή. Παρόμοιο

αποτέλεσμα προκαλεί επίσης και η μείωση της θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού πρόσληψης. Η μείωση του μεγέθους της ειδικής επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας του εξατμιστήρα μαζί με την αύξηση της θερμοκρασίας βρασμού προκαλείται από την αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητα στον εξατμιστήρα. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες βρασμού, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στον εξατμιστήρα αυξάνεται εξαιτίας της μείωσης της θερμικής αντίστασης μέσω της στοιβάδας του συμπυκνωμένου υδρατμού, της στοιβάδας της άλμης και του μεταλλικού τοίχου. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο συμπυκνωτή επίσης, αυξάνει σε υψηλότερη θερμοκρασία βρασμού, λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας των συμπυκνωμένων υδρατμών. Η μείωση της θερμοκρασίας πρόσληψης αυξάνει την κινητήρια δύναμη για τη μεταφορά θερμότητας στον συμπυκνωτή. Αυτό συνεπάγεται τη μείωση του μεγέθους της ειδικής επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας.

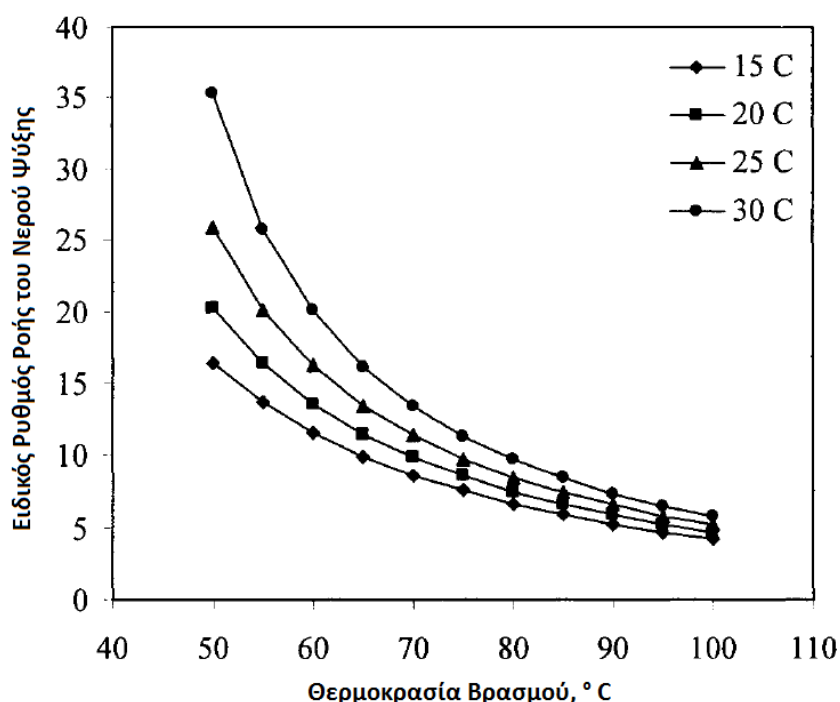


**Εικόνα 12:** Επίδραση της Θερμοκρασίας του Θαλασσινού Νερού και της Θερμοκρασίας Βρασμού στην Ειδική Επιφάνεια Μεταφοράς Θερμότητας στην Διεργασία Αφαλάτωσης με Εξάτμιση Ατμού σε μια Βαθμίδα (SEE). [1]

Οι μεταβολές στον ειδικό ρυθμό ροής του νερού ψύξης συναρτήσει της θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού πρόσληψης και της θερμοκρασίας βρασμού φαίνεται στο διάγραμμα της **Εικόνας 13**. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες βρασμού, το ποσό της θερμότητας που απορροφάται ανά μονάδα μάζας του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας ( $M_f$ ) αυξάνει λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας του θαλασσινού ύδατος τροφοδοσίας ( $T_f$ ). Αυτό μειώνει την επιπλέον θερμότητα, η οποία είναι ανεπιθύμητη και πρέπει να αφαιρείται από το θαλασσινό νερό ψύξης. Επίσης, το φορτίο του συμπυκνωτή είναι χαμηλότερο, λόγω της μείωσης της

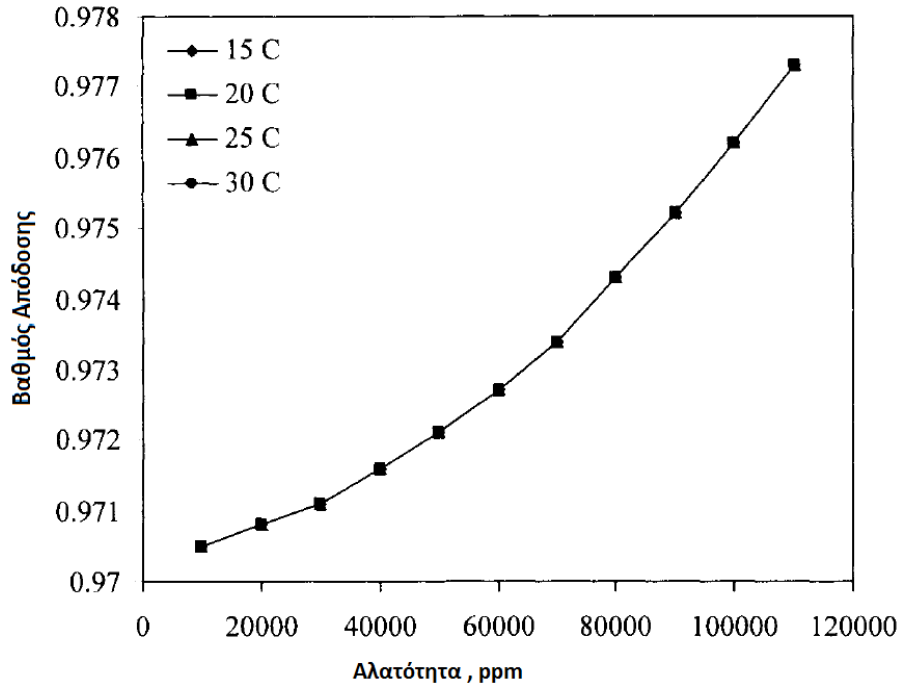
λανθάνουσας θερμότητας σε υψηλότερες θερμοκρασίες υδρατμού. Επιπλέον, η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού πρόσληψης αυξάνει το θερμικό φορτίο ανά μονάδα μάζας του θαλασσινού νερού ψύξης.

Όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα της **Εικόνας 14**, ο βαθμός απόδοσης του συστήματος είναι μικρότερος της μονάδας. Έχει ήδη αναφερθεί ότι ο βαθμός απόδοσης του συστήματος είναι ανεξάρτητος από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού, αλλά έχει ευαισθησία στις διακυμάνσεις της αλατότητάς του. Αυτό συμβαίνει επειδή εξαρτάται μόνο από την αναλογία της λανθάνουσας θερμότητας ατμού και του συμπυκνωμένου υδρατμού καθώς και την διαφορά των θερμοκρασιών μεταξύ ( $T_b$ ) και ( $T_f$ ), η οποία διατηρείται σταθερή.

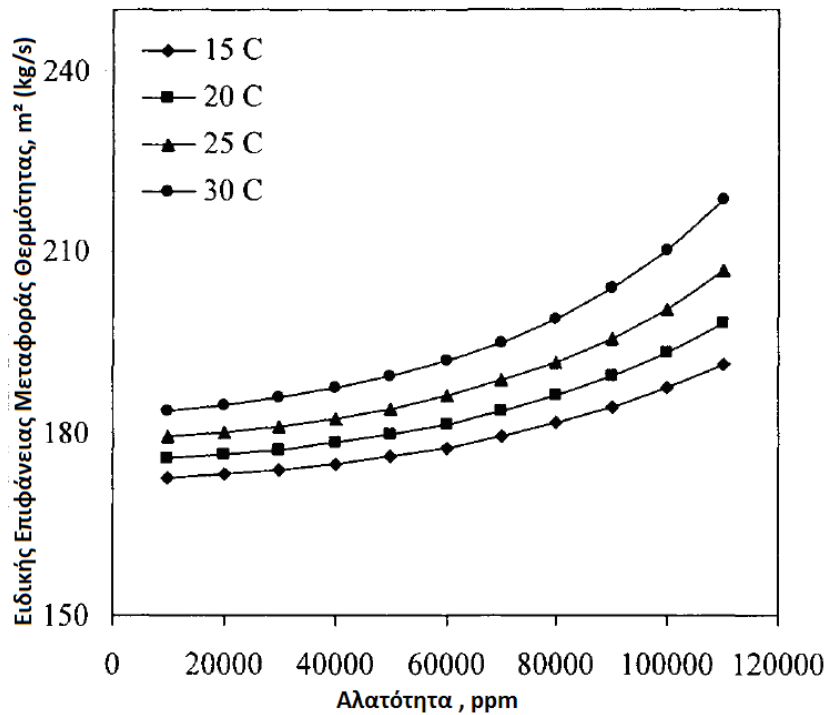


**Εικόνα 13:** Επίδραση της Θερμοκρασίας του Θαλασσινού Νερού και της Θερμοκρασίας Βρασμού στον Ειδικό Ρυθμό Ροής του Νερού Ψύξης στην Διεργασία Αφαλάτωσης με Εξάτμιση Ατμού σε Μια Βαθμίδα (SEE). [1]

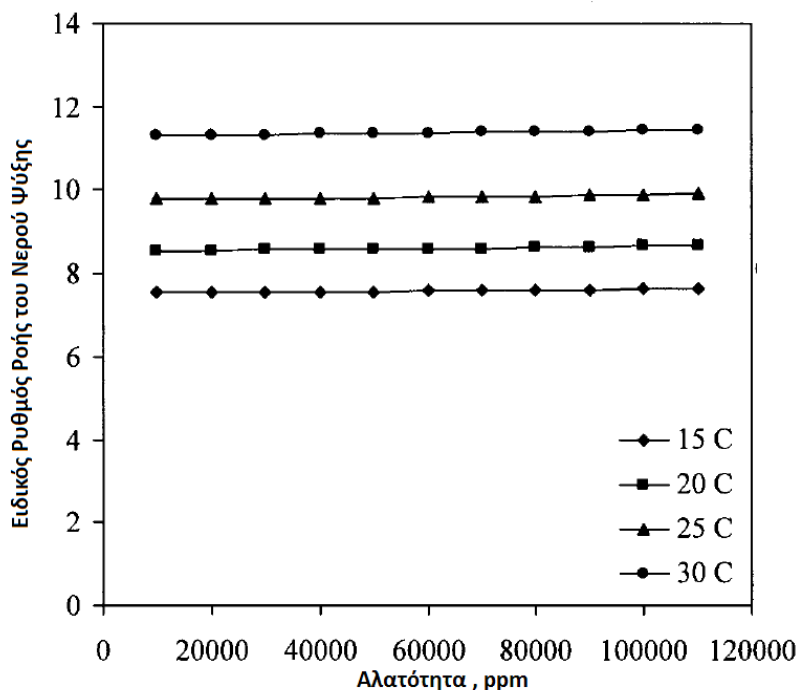
Οι μεταβολές στην ειδική περιοχή μεταφοράς θερμότητας καθώς και στον ειδικό ρυθμό ροής του θαλασσινού νερού ψύξης παρουσιάζονται στα διαγράμματα των **Εικόνων 15** και **16**. Και οι δυο παράμετροι σχεδιασμού και λειτουργίας είναι ανεξάρτητοι από την περιεκτικότητα του θαλασσινού νερού σε αλάτι και αυτό γιατί το σύστημα εξαρτάται κυρίως από την ανύψωση της θερμοκρασίας του σημείου βρασμού. Η επίδραση αυτή περιορίζεται σε 2 °C για υψηλότερες περιεκτικότητες σε αλάτι. Από την άλλη πλευρά, η ειδική περιοχή μεταφοράς θερμότητας καθώς και ο ρυθμός ροής του θαλασσινού νερού ψύξης επηρεάζονται από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του θαλασσινού ύδατος. Αυτό οφείλεται κυρίως στις διακυμάνσεις της κινητήριας δύναμης για τη μεταφορά θερμότητας στο συμπυκνωτή.



**Εικόνα 14:** Μεταβολές στο Βαθμό Απόδοσης του Συστήματος σαν Συνάρτηση της Θερμοκρασίας και της Αλατότητας του Θαλασσινού Νερού. [1]



**Εικόνα 15:** Μεταβολές στην Ειδική Περιοχή Μεταφοράς Θερμότητας του Συστήματος σαν Συνάρτηση της Θερμοκρασίας και της Αλατότητας του Θαλασσινού Νερού. [1]



**Εικόνα 16:** Μεταβολές στον Ειδικό Ρυθμό Ροής του Νερού Ψύξης του Συστήματος σαν Συνάρτηση της Θερμοκρασίας και της Αλατότητας του Θαλασσινού Νερού. [1]

Από την παραπάνω ανάλυση της μεθόδου αφαλάτωσης με μιας βαθμίδας εξάτμιση ατμού προέκυψαν τα εξής χρήσιμα συμπεράσματα:

- Ο βαθμός απόδοσης της διεργασίας αυτής είναι πάντα μικρότερος της μονάδας και αυτό εξαιτίας της απόρριψης μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας στην άλμη καθώς και στο αποσταγμένο προϊόν.
- Ο βαθμός απόδοσης δεν επηρεάζεται από μεταβολές στη θερμοκρασία βρασμού καθώς και στη θερμοκρασία πρόσληψης του θαλασσινού νερού, αλλά εξαρτάται από την λανθάνουσα θερμότητα του ατμού και του παραγόμενου υδρατμού στον εξατμιστήρα.
- Αντιθέτως, η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας καθώς και ο ρυθμός ροής του νερού ψύξης εξαρτώνται από την θερμοκρασία βρασμού και την θερμοκρασία πρόσληψης του θαλασσινού νερού. Και οι δύο αυτοί παράμετροι μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας του σημείου βρασμού και τη μείωση της θερμοκρασίας πρόσληψης του θαλασσινού νερού. Αυτό οφείλεται στην αύξηση του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον εξατμιστή και στο συμπυκνωτή, ενώ προκαλεί συγχρόνως μεγάλη αύξηση του ποσοστού μεταφοράς θερμότητας. Επιπλέον, η μείωση της θερμοκρασίας πρόσληψης του θαλασσινού ύδατος αυξάνει την κινητήρια δύναμη για την μεταφορά θερμότητας στο συμπυκνωτή και αυξάνει την ποσότητα της θερμότητας που αφαιρείται ανά μονάδα μάζας του νερού ψύξης.

- Τέλος, οι παράμετροι απόδοσης του συστήματος δεν επηρεάζονται από μεταβολές στην αλατότητα του θαλασσινού νερού και αυτό εξαιτίας της περιορισμένης επίδρασής της στο σύστημα που ανέρχεται σε λιγότερο από 2°C αύξηση της θερμοκρασίας του σημείου βρασμού, σε υψηλές θερμοκρασίες και υψηλή αλατότητα.

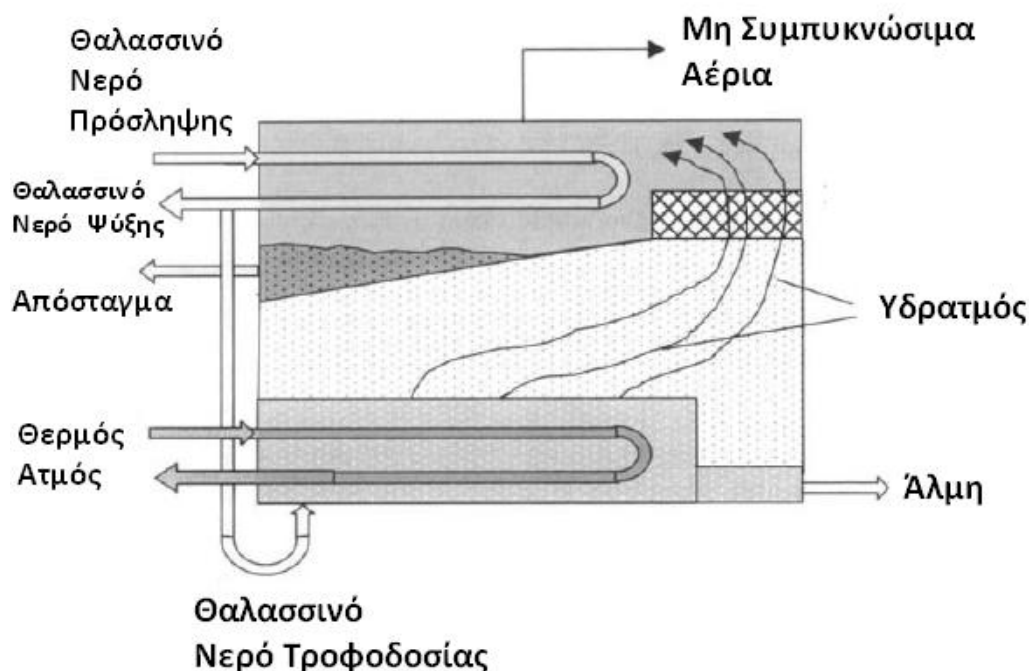
Συνοψίζοντας, με λίγα λόγια, η μελέτη του συστήματος αφαλάτωσης με εξάτμιση ατμού σε μια βαθμίδα (SEE) μας δείχνει την ανάγκη για πιο αποτελεσματική διαχείριση της ενέργειας του συστήματος. Επίσης, η λειτουργία του συστήματος συνιστάται σε υψηλότερες θερμοκρασίες βρασμού. Η σωστή διαχείριση της ενέργειας θα οδηγήσει σε υψηλότερους βαθμούς απόδοσης του συστήματος. Αυτό θα το συναντήσουμε σε άλλα συστήματα απλού και ενιαίου αποτελέσματος, όπου χρησιμοποιείται η συμπίεση ατμού ή συστήματα πολλαπλών διαμορφώσεων. Η λειτουργία του συστήματος σε υψηλότερες θερμοκρασίες βρασμού έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ειδική επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας καθώς και του ειδικού ρυθμού ροής του θαλασσινού νερού ψύξης. Η μείωση αυτή μειώνει το πρώτο κόστος, δηλαδή, το κόστος κατασκευής του εξατμιστήρα, συμπυκνωτή και αντλίας. Επιπλέον, το λειτουργικό κόστος είναι χαμηλότερο, ως αποτέλεσμα της μείωσης της ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία της αντλίας του θαλασσινού νερού.

Προτού συνεχίσουμε με την ανάλυση της επόμενης μεθόδου αφαλάτωσης θα κάνουμε μια μικρή αναφορά στους εξατμιστήρες, οι οποίοι αποτελούν την καρδιά κάθε διεργασίας αφαλάτωσης με εξάτμιση ενώ έχουν πολλές βιομηχανικές εφαρμογές στις οποίες περιλαμβάνονται χημικές διεργασίες, όπως επίσης διεργασίες πετρελαίου και τροφίμων. Η διαμόρφωση ενός εξατμιστήρα στηρίζεται στην δημιουργία μιας θερμής επιφάνειας, όπου ο θερμός ατμός συμπυκνώνεται από τη μια πλευρά και υδρατμοί σχηματίζονται από την άλλη πλευρά. Στους εξατμιστήρες περιλαμβάνονται τα παρακάτω είδη:

- ➔ Εξατμιστήρες με βυθισμένους σωλήνες

Αυτού του είδους οι εξατμιστήρες συναντώνται στις περισσότερες εφαρμογές. Όπως παρουσιάζεται και στην **Εικόνα 17**, αυτού του είδους τα συστήματα είναι μια συνδυασμένη μονάδα εξατμιστήρα και συμπυκνωτή. Οι σωλήνες σε αυτό τον τύπο εξατμιστήρα είναι βυθισμένοι μέσα σε μια πισίνα υγρού. Το υγρό που περιβάλλει τους βυθισμένους σωλήνες φτάνει σε θερμοκρασία κορεσμού και η διεργασία της εξάτμισης συνεχίζει καθώς ο θερμός ατμός συμπυκνώνεται μέσα στους σωλήνες. Ο σχηματιζόμενος υδρατμός ρέει μέσω ενός πλεκτού συρμάτινου διαχωριστή, ο οποίος απομακρύνει τα παρασυρόμενα υγρά σταγονίδια. Στη συνέχεια, ο υδρατμός ρέει προς το συμπυκνωτή, όπου συμπυκνώνεται στην εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων συμπυκνώσεως. Καθώς η συμπύκνωση λαμβάνει χώρα, η λανθάνουσα θερμότητα συμπυκνώσεως προθερμαίνει το υγρό τροφοδοσίας στο συμπυκνωτή πριν την είσοδό του στη μονάδα του εξατμιστήρα.





**Εικόνα 17:** Εξατμιστήρας με βυθισμένους σωλήνες. [1]

Στα χαρακτηριστικά αυτού του είδους εξατμιστήρα περιλαμβάνονται τα ακόλουθα:

- Αυτός ο τύπος εξατμιστήρα χρησιμοποιείται κυρίως ως αποστακτήρας ή βραστήρας αναθέρμανσης. Μια από τις πιο κοινές του χρήσεις είναι αυτή του υγραντήρα στα νοικοκυριά και του ηλεκτρικού βραστήρα. Έγινε ιδιαίτερα διάσημος κατά το πρώτο μισό του εικοστού αιώνα καθώς χρησιμοποιήθηκε σε πολλές εφαρμογές, όπως η αφαλάτωση.
- Γενικότερα, το σύστημα αυτό είναι κατάλληλο αν δεν υπάρχει κανένας κίνδυνος μόλυνσης ή δημιουργίας ιζήματος. Αν, ωστόσο, το σύστημα είναι επιρρεπές σε τέτοια φαινόμενα είναι απαραίτητη η χρήση μεθόδων ή η προσαρμογή των όρων εκμετάλλευσής του με σκοπό την αποφυγή ιζηματοποίησης. Αν δεν τηρηθούν μέτρα εναντίων αυτών των φαινομένων τότε η λειτουργία του συστήματος δεν θα είναι αποτελεσματική. Για το λόγο αυτό ο χρόνος καθαρισμού των μονάδων αυτών είναι συνήθως μεγαλύτερος από τον πραγματικό χρόνο λειτουργίας τους.
- Ο συντελεστής μεταφορά θερμότητας για αυτό τον τύπο εξατμιστήρα είναι αρκετά μικρότερος από αυτόν του εξατμιστήρα δημιουργίας πίπτουσας στοιβάδας ατμού. Αυτό συμβαίνει επειδή η υδροστατική πίεση που επιβάλλεται από το υγρό στην επιφάνεια του σωλήνα εμποδίζει τον σχηματισμό, την ανάπτυξη και τέλος την απελευθέρωση των φυσαλίδων υδρατμού στη ζεστή επιφάνεια.

- Η ανάπτυξη της χρήσης των εξατμιστήρων με βυθισμένους σωλήνες είναι υπό μελέτη, κυρίως όσον αφορά την αποφυγή δημιουργίας ιζήματος και μόλυνσης. Η έρευνα επικεντρώνεται στην χρήση προσθετικών υλικών τα οποία θα βελτιώσουν την διαδικασία της εξάτμισης και θα περιορίσουν την αντίσταση που προκαλείται από την υδροστατική πίεση.

➔ Εξατμιστήρες με δημιουργία πίπτουσας στοιβάδας υδρατμού

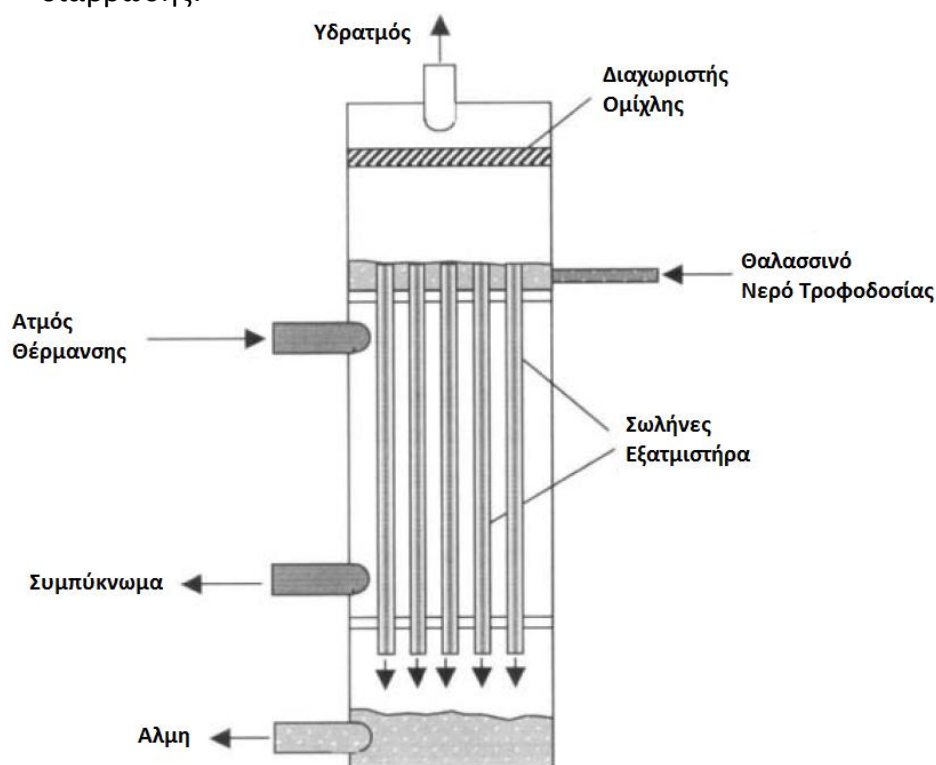
Αυτό το είδος εξατμιστήρα έχει δυο κύριες διαμορφώσεις, στις οποίες περιλαμβάνονται οριζόντιοι και κάθετοι σωλήνες, όπως παρουσιάζονται στις **Εικόνες 9** και **18**. Ο οριζόντιος σωλήνας αποτελεί τον πιο κοινό σχεδιασμό που χρησιμοποιείται στην βιομηχανία της αφαλάτωσης. Στα χαρακτηριστικά αυτού του τύπου περιλαμβάνονται τα ακόλουθα:

- Ο ατμός θέρμανσης ρέει στο εσωτερικό των σωλήνων, ενώ το υγρό ψεκάζεται, με καταιονισμό, στην εξωτερική τους επιφάνεια.
- Το υγρό ψεκάσμου σχηματίζει μια λεπτή στοιβάδα η οποία εμπίπτει στην εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα. Ως αποτέλεσμα, η δημιουργία, η ανάπτυξη και η διαφυγή των φυσαλίδων υδρατμού συναντούν μικρότερη αντίσταση σε σχέση με αυτή που διαπιστώθηκε στη διαμόρφωση του βυθισμένου σωλήνα.
- Οι σωλήνες τοποθετούνται σε διάφορες σειρές με τετράγωνη διαμόρφωση ώστε να απλοποιείται η διαδικασία καθαρισμού της μονάδας.
- Το κύριο πλεονέκτημα της οριζόντιας διαμόρφωσης σωλήνας είναι η πλήρης ύγρανση της επιφάνειας του σωλήνα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη σωστή επιλογή του βήματος σωλήνα, της διαμέτρου του, της ροής ψεκάσμου και του ρυθμού ροής του υγρού. Οι λεπτομέρειες της διαδικασίας της εξάτμισης στο πλαίσιο του συστήματος είναι αρκετά περίπλοκες, δεδομένου ότι προϋποθέτει την ταυτόχρονη εξάτμιση και συμπύκνωση. Αυτό οφείλεται στο ότι ο ανερχόμενος υδρατμός έρχεται σε επαφή με τα μη κορεσμένα σταγονίδια του νερού. Κατά συνέπεια, το τμήμα του ατμού απελευθερώνει τη λανθάνουσα θερμότητά του στα υγρά σταγονίδια προκαλώντας αύξηση της θερμοκρασίας του στις συνθήκες κορεσμού. Στη συνέχεια, τα κορεσμένα σταγονίδια νερού εξατμίζονται καθώς πέφτουν πάνω στη θερμή επιφάνεια των σωλήνων.

Αντίστοιχα στα χαρακτηριστικά της κάθετης διάταξης σωλήνων του εξατμιστήρα περιλαμβάνονται:

- Το υγρό εισάγεται από το πάνω μέρος των κάθετων σωλήνων, όπου σχηματίζεται μια λεπτή στοιβάδα ατμού στην εσωτερική επιφάνεια τους.

- Ο θερμαινόμενος ατμός ρέει στην εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων, όπου συμπυκνώνεται και απελευθερώνει τη λανθάνουσα θερμότητα του στο δημιουργημένο φιλμ.
- Η διαδικασία ανταλλαγής θερμότητας καταλήγει στη συμπύκνωση του ατμού και στην εξάτμιση των ιόντων του υγρού από την πλευρά των σωλήνων.
- Ο σχεδιασμός και η λειτουργία της διάταξης των κάθετων σωλήνων είναι πολυπλοκότερη σε σχέση με το σύστημα οριζόντιας διάταξης. Αυτό συμβαίνει διότι η στοιβάδα μπορεί να αποκολληθεί κατά την κάθοδό της και να προκαλέσει μερική ύγρανση της επιφάνειας. Αυτό οδηγεί στην δημιουργία ξηρών μπαλωμάτων ή περιοχών που καλύπτονται με πολύ μικρή ποσότητα υγρού. Ως αποτέλεσμα, η πλήρης εξάτμιση του υγρού, θα δημιουργούσε άλατα στην επιφάνεια των σωλήνων. Επιπλέον, η δημιουργία ξηρών μπαλωμάτων θα οδηγούσε στην αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας των σωλήνων, που με τη σειρά της θα προκαλούσε αύξηση στις θερμικές καταπονήσεις και άρα αύξησης της επέκτασης του σωλήνα στα θερμά σημεία. Τέλος, η ζωή του σωλήνα θα είχε μειωθεί εξαιτίας εμφάνισης τρανταγμάτων, δημιουργίας ιζημάτων και της αύξησης των ποσοστών διάβρωσης.



**Εικόνα 18:** Εξατμιστήρας δημιουργίας πίπτουσας στοιβάδας ατμού με κάθετη διάταξη σωλήνων. [1]

### ➤ Εξατμιστήρες με Πλάκες

Μια από τις πιο ελκυστικές εξελίξεις στον τομέα της αφαλάτωσης είναι η χρήση του εξατμιστήρα με πλάκες αντί του περιβλήματος και της διαμόρφωσης των σωλήνων. Παρόλα αυτά, έχει αναφερθεί ο σχηματισμός ιζήματος σε αυτού του είδους τους εξατμιστήρες καθώς και ο συχνός και χρονοβόρος καθαρισμός των μονάδων αυτών. Αυτά τα λειτουργικά προβλήματα απαιτούν περαιτέρω έρευνα για τη μείωση του σχηματισμού ιζήματος, όπου οι πλάκες έχουν σχεδιαστεί ώστε να μπορούν να καθαριστούν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους με μπάλες σφουγγαριού και άλλες συσκευές.

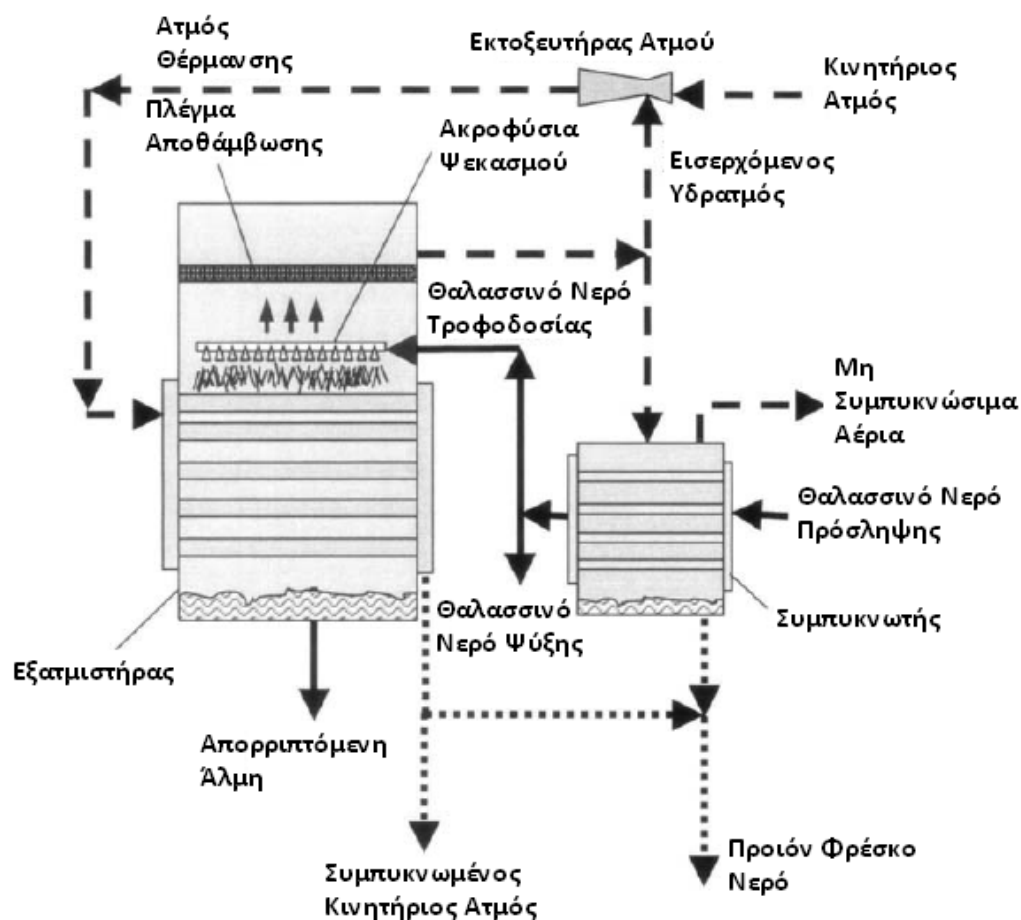
Αυτού του τύπου οι εξατμιστήρες/συμπυκνωτές συνήθως είναι κατασκευασμένοι από μέταλλα, πλαστικά ή πολυμερή επικάλυψη μετάλλων. Σε εμπορική κλίμακα, συνήθως είναι κατασκευασμένοι από ανοξείδωτο χάλυβα, ωστόσο όμως υπάρχουν και μονάδες από πλαστικό με τις επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας από 5-100 m<sup>2</sup> και πιέσεις και θερμοκρασίες κατά τη λειτουργία τους μέχρι 10 bars και 100°C αντίστοιχα. Οι εναλλάκτες θερμότητας με τη μορφή πλάκας καταλαμβάνουν μικρότερο όγκο, έχουν στενότερη προσέγγιση θερμοκρασίας, μικρότερο βάρος, υψηλότερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και μικρότερη αντίσταση ρύπανσης. Οι εν λόγω βελτιώσεις ποικίλουν σε ένα εύρος από 5-70%. Οι εξατμιστήρες/ συμπυκνωτές με πλάκες λειτουργούν στις ακόλουθες συνθήκες: θερμοκρασίες 35-150°C, πιέσεις των 10-15 bar, επιφάνειες πλακών 0,02-4,45 m<sup>2</sup>/πλάκα, βαθμός ροής 3500 m<sup>3</sup>/ώρα και αγγίζουν τις θερμοκρασίες του 1°C.

### 2.3.2 Θερμική Συμπύεση Υδρατμού Μιας Βαθμίδας (Single Effect Thermal Vapor Compression)

Η αφαλάτωση με χρήση της διεργασίας θερμικής συμπύεσης υδρατμού σε μια βαθμίδα (SE-TVC) είναι πολύ περιορισμένης χρήσης όσον αφορά την βιομηχανική κλίμακα. Ωστόσο, η θερμική συμπύεση υδρατμού χρησιμοποιείται ακόμα στα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης υδρατμού (ΠΕΥ, ΜΕΕ), τα οποία είναι γνωστά και ως συστήματα θερμικών μεθόδων πολλαπλής εξάτμισης υδρατμού (ΠΕΥ-ΘΣΥ, Thermal-MEE). Η μέθοδος της θερμικής συμπύεσης υδρατμού εμφανίζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της απλής της λειτουργίας, της ανέξοδης συντήρησής της, της απλής της γεωμετρίας και της απουσίας κινούμενων μερών. Η μοντελοποίηση, η προσομοίωση και η ανάλυση της μονάδας εξάτμισης ενός σταδίου αποτελεί τη βάση για τη μελέτη συστημάτων πολλαπλής εξάτμισης υδρατμού (ΜΕΕ) τόσο μόνα τους όσο και σε συνδυασμό με συμπύεση υδρατμού (VC).

Η διεργασία αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με θερμική συμπύεση υδρατμού μιας βαθμίδας (SE-TVC) στην απλή της μορφή παρουσιάζεται παρακάτω σχηματικά στην **Εικόνα 19**. Οι κύριες συνιστώσες της μονάδας είναι ο

εξατμιστήρας, ο εκτοξευτήρας ατμού καθώς και ο θερμαντήρας τροφοδοσίας ή ο συμπυκνωτής. Ο εξατμιστήρας αποτελείται από έναν εξατμιστήρα/ συμπυκνωτή εναλλάκτη θερμότητας, έναν θάλαμο υδρατμού, ένα σύστημα διανομής νερού και μια διάταξη απαγωγής ομίχλης. Από την άλλη πλευρά, το σύστημα εκτόξευσης ατμού αποτελείται από ένα ακροφύσιο ατμού, το θάλαμο αναρρόφησης, ένα ακροφύσιο ανάμιξης και έναν διαχύτη. Ο θερμαντήρας τροφοδοσίας ή ο απαγωγέας θερμότητας είναι συνήθως μια μονάδα συμπυκνωτή κατακόρυφης ροής από την οποία τα μη συμπυκνώσιμα αέρια εξέρχονται με θερμοκρασία που προσεγγίζει τη θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας. Αυτό επιτρέπει τη ψύξη των μη συμπυκνώσιμων αερίων στην ελάχιστη δυνατή θερμοκρασία, έτσι, ελαχιστοποιείται η ποσότητα του υδρατμού που ίσως διαφύγει μαζί με τα αέρια και μειώνει τον όγκο των αντλούμενων αερίων. Επιπλέον, είναι δυνατόν να λειτουργήσει το σύστημα αντίθετης συμπύκνωσης, έτσι ώστε η έξοδος του νερού να είναι εντός 3 έως 5°C της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του κορεσμένου υδρατμού. Αυτό βελτιώνει τη θερμική απόδοση της μονάδας και ελαχιστοποιεί το ρυθμό ροής της μάζας του νερού ψύξης.



**Εικόνα 19:** Διεργασία Αφαλάτωσης με Εξατμιστήρα Θερμικής Συμπύκνωσης Υδρατμού Σε Μια Βαθμίδα (SE-TV). [1]

Το θαλασσινό νερό πρόσληψης με ταχύτητα ροής ( $M_{cw} + M_f$ ), σε θερμοκρασία ( $T_{cw}$ ) και συγκέντρωση άλατος ( $X_f$ ), εισάγεται στον σωλήνα από την πλευρά όπου βρίσκεται ο συμπυκνωτής με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του ( $T_f$ ). Το νερό ψύξης ( $M_{cw}$ ) απορρίπτεται ξανά στην θάλασσα. Ο ρόλος κυκλοφορίας του νερού ψύξης μέσα στον συμπυκνωτή είναι ουσιαστικά να απομακρύνει την περίσσεια θερμότητα που προστίθεται στο σύστημα υπό τη μορφή κινητήριου ατμού απαραίτητος να οδηγήσει τους εκτοξευτήρες ατμού. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι ο εξατμιστήρας δεν καταναλώνει όλη την παρεχόμενη θερμότητα, αντίθετα, υποβαθμίζει την ιδιότητά της. Η θέρμανση του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας ( $M_f$ ) στους σωλήνες του συμπυκνωτή από ( $T_{cw}$ ) σε ( $T_f$ ) είναι απαραίτητη για την αύξηση του θερμοκινητικού βαθμού απόδοσης της διεργασίας. Η θερμότητα που απαιτείται για να ζεστάνει το θαλασσινό νερό στο εσωτερικό του ψυκτήρα παρέχεται από τη συμπύκνωση μιας ελεγχόμενης ποσότητας υδρατμού, ο οποίος σχηματίζεται από το βρασμό στον εξατμιστήρα ( $M_c$ ). Η θερμοκρασία συμπύκνωσης υδρατμού και κατά συνέπεια η πίεση στο θάλαμο υδρατμού τόσο για τον εξατμιστήρα όσο και στο συμπυκνωτή ελέγχεται από :

- Την ταχύτητα της ροής του νερού ψύξης,  $M_{cw}$ .
- Τη θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας,  $T_{cw}$ .
- Ο διαθέσιμος χώρος μεταφοράς θερμότητας στον συμπυκνωτή,  $A_c$ .
- Ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του υδρατμού συμπυκνώσεως και του κυκλοφορούν θαλασσινού νερού,  $U_c$ .

Κατά συνέπεια ο συμπυκνωτής έχει τρεις λειτουργίες:

- Απομακρύνει την περίσσεια θερμότητας από το σύστημα.
- Βελτιώνει τον βαθμό απόδοσης της διαδικασίας.
- Ρυθμίζει τη θερμοκρασία βρασμού εντός του εξατμιστήρα.

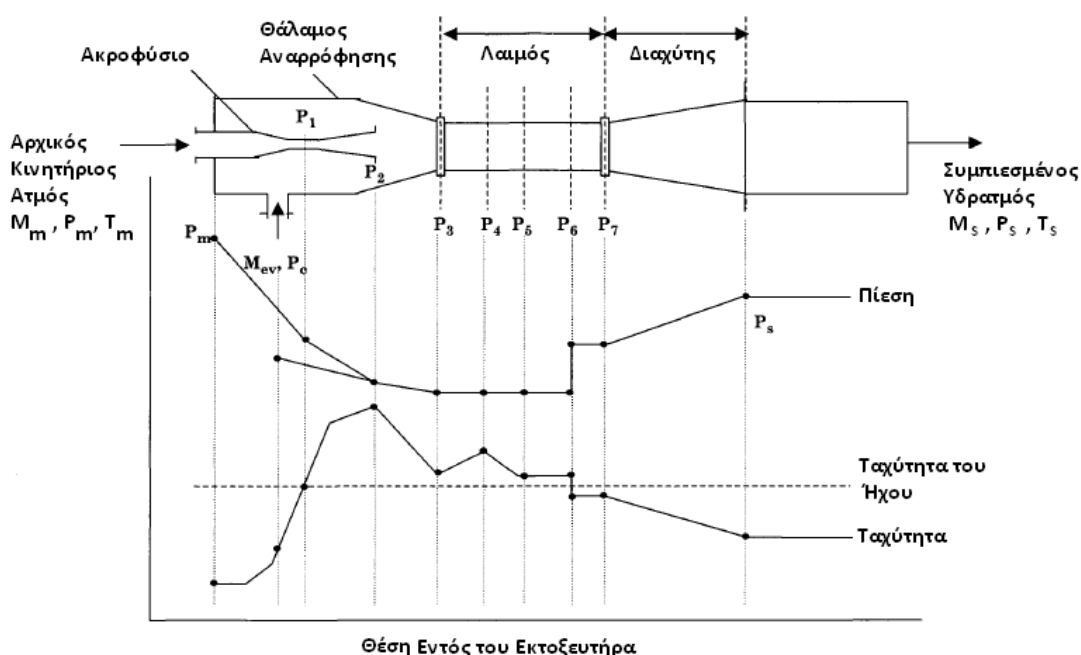
Το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας ( $M_f$ ) έχει υποστεί χημική επεξεργασία και εξαέρωση πριν να διοχετευθεί στον εξατμιστήρα. Η χημική επεξεργασία είναι απαραίτητη για να αποφευχθεί η ιζηματοποίηση και ο σχηματισμός αφρού στον εξατμιστήρα. Και οι δυο αυτοί παράγοντες είναι ικανοί να βλάψουν την λειτουργία της μονάδας. Εντός του εξατμιστήρα, το νερό τροφοδοσίας ψεκάζεται στην κορυφή από όπου πέφτει με την μορφή μιας λεπτής στοιβάδας στις επόμενες σειρές σωλήνων με οριζόντια διάταξη. Η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας αυξάνεται από ( $T_f$ ) σε θερμοκρασία βρασμού ( $T_b$ ) . Το μέγεθος της ( $T_b$ ) υπαγορεύεται από την φύση των χημικών ουσιών που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της διαμόρφωσης των διαστάσεων και την κατάσταση του ατμού θέρμανσης. Η θερμοκρασία αυτή έχει αποκτηθεί μέσα από την επικράτηση ισορροπίας της πίεσης στο θάλαμο υδρατμού του εξατμιστήρα. Ο υδρατμός που σχηματίζεται από τον βρασμό με ποσοστό ( $M_a$ ) είναι απαλλαγμένος από άλατα. Η θερμοκρασία του παραγόμενου υδρατμού ( $T_g$ ) είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία βρασμού ( $T_b$ ) κατά τη θερμοκρασιακή ανύψωση του σημείου βρασμού (BPE). Ο υδρατμός που παράγεται εκεί διασχίζει έναν πλεκτό συρμάτινο διαχωριστή ομίχλης, γνωστός και ως συρματοπλεγμά αποθάμβωσης, όπου κατακρατούνται τα παρασυρόμενα σταγονίδια άλμης. Ο

υδρατμός θα πρέπει να είναι πλήρως απελευθερωμένος από τα σταγονίδια άλμης για να αποφευχθεί τόσο η μόλυνση του παραγόμενου νερού όσο και των επιφανειών μεταφοράς θερμότητας στις οποίες συμπυκνώνεται. Επίσης, η παρουσία παρασυρόμενων σταγονιδίων νερού στον υδρατμό που ρέει εντός των εκτοξευτήρων ατμού θα διαβρώσει το ακροφύσιο εκτίναξης καθώς και τον διαχύτη. Η θερμοκρασία κορεσμού του υδρατμού μετά την αποθάμβωση είναι χαμηλότερη από ( $T_v$ ), εξαιτίας των απωλειών στην πίεση τριβής κατά την διεργασία της αποθάμβωσης. Ο υδρατμός ρέει μετά την αποθάμβωση στο συμπυκνωτή όπου χωρίζεται σε δύο τμήματα · το πρώτο μέρος ( $M_c$ ) συμπυκνώνεται έξω από τους σωλήνες του συμπυκνωτή, ενώ το υπόλοιπο ( $M_{ev}$ ) παρασύρεται από το σύστημα εκτόξευσης ατμού. Παρά το γεγονός ότι τα δύο ρεύματα σχεδιάζονται ξεχωριστά στο διάγραμμα ροής, για να δειχθεί η διεργασία, ρέουν από τον εξατμιστήρα στο συμπυκνωτή μέσα στον ίδιο αγωγό. Τα μη συμπυκνώσιμα αέρια που έχουν συγκεντρωθεί στον θάλαμο υδρατμού του συμπυκνωτή πρέπει να αερίζονται προκειμένου να αποφευχθεί η υποβάθμιση της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας του συμπυκνωτή. Το στρώμα των μη συμπυκνώσιμων αερίων κρύβει ένα τμήμα της περιοχής μεταφοράς θερμότητας από τη λειτουργία της συμπύκνωσης. Αν ο συμπυκνωτής λειτουργεί σε πίεση μικρότερη από την ατμοσφαιρική, μια συσκευή άντλησης όπως ένα σύστημα εκτόξευσης ή μια αντλία κενού, χρειάζεται για να αποβάλλει τα αέρια που διέρρευσαν από το σύστημα. Αξίζει να σημειωθεί ότι μέρη της περιγραφής της διεργασίας αυτής είναι παρόμοια με αυτά που ήδη αναφέρθηκαν παραπάνω, στην διεργασία της εξάτμισης ενός σταδίου. Ωστόσο, η επανάληψη προσφέρει στον αναγνώστη μια πληρέστερη εικόνα της κάθε διεργασίας.

Το σχηματικό διάγραμμα του εκτοξευτήρα ατμού του θερμοσυμπιεστή ή του ενισχυτή ατμού με αντίστοιχα σημεία κατάστασης και η διακύμανση τόσο στην ταχύτητα όσο και στην πίεση για τον κινητήριο αλλά και τον εισερχόμενο ατμό στον εκτοξευτήρα παρουσιάζονται στο διάγραμμα της **Εικόνας 20**. Ο εκτοξευτήρας χρησιμοποιείται για να αυξήσει την πίεση του εισερχόμενου ατμού ( $M_{ev}$ ) από πίεση ( $P_{ev}$ ) σε υψηλότερη πίεση ( $P_g$ ). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέσα από τη μετατροπή της ενέργειας της πίεσης του κινητήριου ατμού ( $M_m$ ), να δημιουργήσει κενό και να συμπιέσει τον εισερχόμενο υδρατμό στην απαιτούμενη πίεση. Καθώς ο κινητήριος ατμός με ταχύτητα ροής ( $M_m$ ) μεταβαίνει εντός του ακροφυσίου από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2, η ενέργεια λόγω της στατικής του πίεσης μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια. Το ακροφύσιο είναι συγκλίνουσας ή αποκλίνουσας μορφής για να αυξήσει την ταχύτητα του ατμού σε ταχύτητες υπερηχητικές, δηλαδή μεγαλύτερες ταχύτητες από αυτή του ήχου. Ο θάλαμος αναρρόφησης χρησιμοποιείται για να κρατήσει το ακροφύσιο σωστά τοποθετημένα σε σχέση με τον διαχύτη και να κατευθύνει τον εισερχόμενο ατμό. Ο υδρατμός ( $M_v$ ) εισέρχεται στο θάλαμο αναρρόφησης με πίεση ( $P_g$ ) και εκεί αναμιγνύεται με τον κινητήριο ατμό. Η διαδικασία ανάμιξης είναι γρήγορη και βίαιη. Τα δυο ρεύματα αναμιγνύονται καθώς περνούν μέσα από το συγκλίνον τμήμα του διαχύτη Venturi. Το μείγμα μπαίνει στο τμήμα του λαιμού του διαχύτη, πλήρως αναμεμιγμένο, στην ταχύτητα του ήχου του

μίγματος. Το αναμιγμένο ρεύμα συμπιέζεται από μόνο του μέσω των διαφορετικών τμημάτων του διαχύτη Venturi, όπου η περιοχή διασταύρωσης αυξάνεται και η ταχύτητα μειώνεται, μετατρέποντας έτσι την κινητική ενέργεια του μίγματος σε ενέργεια λόγω στατικής πίεσης. Το μίγμα αφήνει το σύστημα εκτόξευσης με πίεση ( $P_s$ ) που είναι ενδιάμεση στην πίεση του κινητήριου ατμού ( $P_m$ ) καθώς και της πίεσης αναρρόφησης ( $P_{ev}$ ).

Ο εκτοξευτήρας ατμού πρέπει να έχει σχεδιαστεί και να λειτουργεί σε κρίσιμες συνθήκες για να επιτραπεί η κανονική και σταθερή λειτουργία του. Η προϋπόθεση αυτή συνδέεται με την απουσία των βίαιων διακυμάνσεων στην πίεση αναρρόφησης. Αν ο εκτοξευτήρας έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί σε πλήρως σταθερό εύρος, θα έχει σταθερό ρυθμό ροής μάζας του εισερχόμενου υδρατμού για τις διάφορες πιέσεις αποφόρτισης όταν οι ανάντη συνθήκες παραμένουν σταθερές. Ο εκτοξευτήρας είναι κρίσιμος όταν ο λόγος συμπίεσης είναι μεγαλύτερος ή ίσος με την αναλογία πίεσης του ατμού αναρρόφησης. Για υδρατμό το ποσοστό αυτό είναι ίσο με 1,81. Αυτό σημαίνει ότι, η πίεση αναρρόφησης πρέπει να είναι μικρότερη από 0,55 φορές την πίεση αποφόρτισης ώστε να περιέχονται κρίσιμες ή σταθερές συνθήκες στο εσωτερικό του εκτοξευτήρα ατμού.

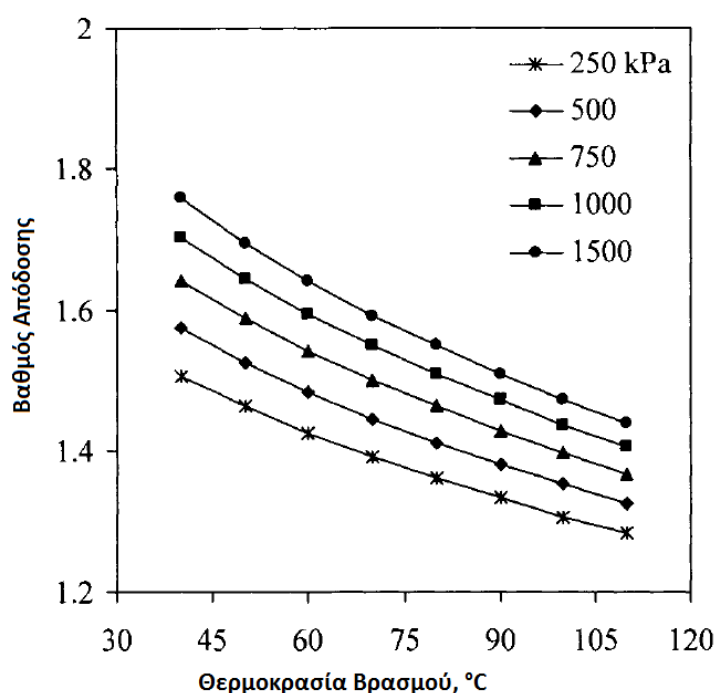


**Εικόνα 20:** Διακυμάνσεις στην Πίεση και την Ταχύτητα του Ρεύματος σαν Συνάρτηση της Θέση κατά Μήκος του Εκτοξευτήρα. [1]

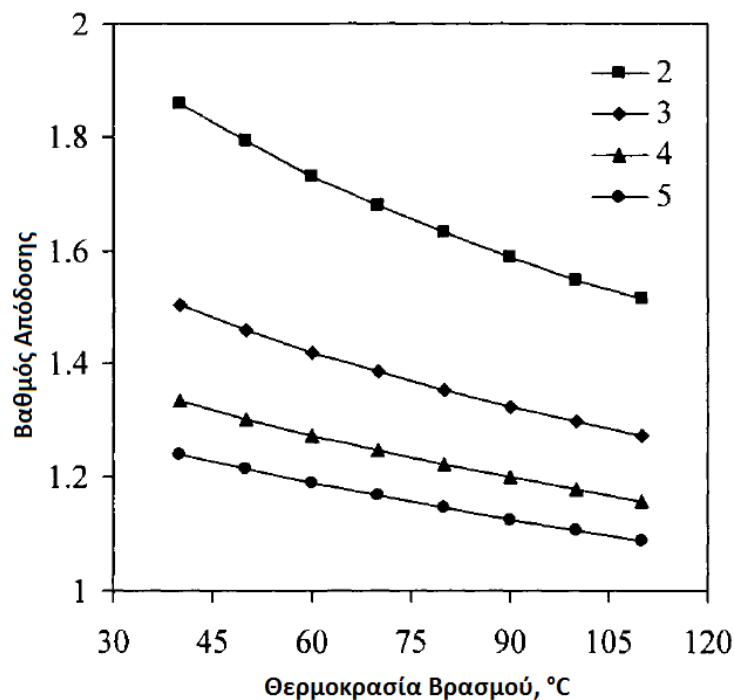


Η απόδοση του συστήματος παρουσιάζεται σε σχέση με τις διακυμάνσεις των παραμέτρων σχεδιασμού του σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία βρασμού ( $T_b$ ), το λόγο συμπίεσης ( $Cr$ ) και την πίεση του κινητήριου ατμού ( $P_m$ ). Στις παραμέτρους του συστήματος περιλαμβάνεται ακόμα ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στον εξατμιστήρα ( $U_e$ ) και στον συμπυκνωτή ( $U_c$ ), ο βαθμός απόδοσης ( $PR$ ), η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας ( $sA$ ) και ο ειδικός βαθμός ροής του νερού ψύξης ( $sM_{cw}$ ).

Διακυμάνσεις στον βαθμό απόδοσης του συστήματος σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας βρασμού, της πίεσης του κινητήριου ατμού και του βαθμού συμπίεσης παρουσιάζονται στα διαγράμματα των **Εικόνων 21, 22** και **23**. Όπως παρατηρούμε και από στο διάγραμμα ο βαθμός απόδοσης του συστήματος κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1-2. Οι υψηλότερες τιμές του βαθμού απόδοσης περιέχονται σε χαμηλές θερμοκρασίες βρασμού, χαμηλούς βαθμούς συμπίεσης και υψηλές τιμές στην πίεση του κινητήριου ατμού. Σε χαμηλές θερμοκρασίες βρασμού, η ποσότητα του κινητήριου ατμού που καταναλώνεται για να συμπιέσει τον παρασυσρόμενο υδρατμό είναι μικρή. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μικρής αύξησης της πίεσης του υδρατμού σε χαμηλές θερμοκρασίες. Για παράδειγμα, η πίεση υδρατμού θερμοκρασίας μεταξύ 55 και 60°C αυξάνεται από 15,8 σε 19,9 kPa κατά 26,5%. Από την άλλη πλευρά, η πίεση του υδρατμού αυξάνεται από 70,14 σε 84,55 kPa καθώς η θερμοκρασία αυξάνει από 90 σε 95° C.

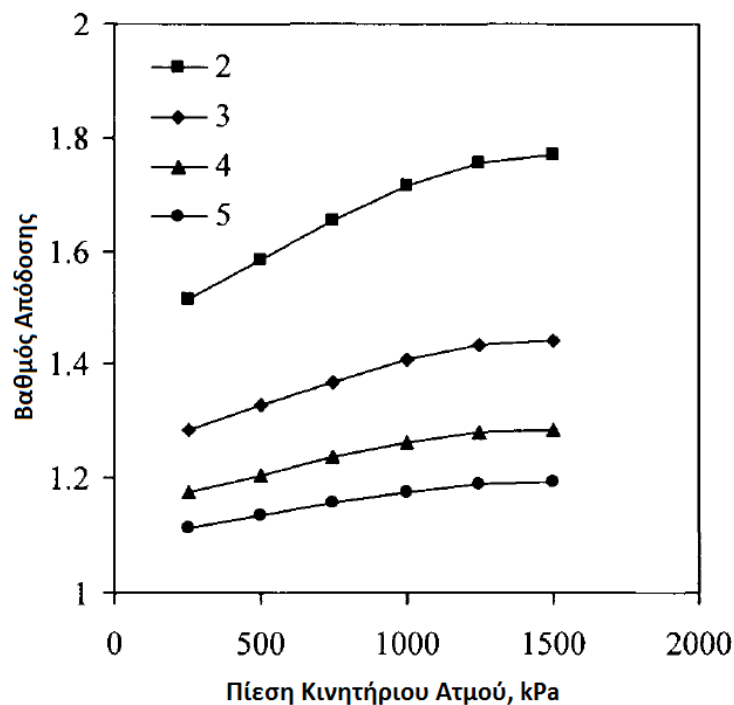


**Εικόνα 21:** Διακυμάνσεις στον Βαθμό Απόδοσης σαν Συνάρτηση της Θερμοκρασίας Βρασμού και της Πίεσης του Κινητήριου Ατμού. [1]



**Εικόνα 22:** Διακυμάνσεις στον Βαθμό Απόδοσης σαν Συνάρτηση της Θερμοκρασίας Βρασμού και του Βαθμού Συμπύκνωσης. [1]

Σε χαμηλούς βαθμούς συμπίεσης, η ποσότητα του κινητήριου ατμού που καταναλώνεται για την συμπίεση του παρασυρόμενου υδρατμού είναι μικρή. Έτσι, ο βαθμός απόδοσης του συστήματος είναι μεγαλύτερος. Το ίδιο αποτέλεσμα παρατηρείται επίσης σε υψηλές πιέσεις του κινητήριου ατμού. Ανεξάρτητα από αυτό, η ευαισθησία του βαθμού απόδοσης στις διακυμάνσεις της κινητήριας πίεσης είναι λιγότερο έντονες από εκείνες που βρίσκονται σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας βρασμού και της συμπίεσης. Διαγραμματικά, αυτό, παρουσιάζεται στην **Εικόνα 23** για περιορισμένες διακυμάνσεις του βαθμού απόδοσης του συστήματος καθώς η πίεση του κινητήριου ατμού αυξάνεται πάνω από τις τιμές 250-1750 kPa. Για κάθε ζεύγος δεδομένων του διαγράμματος αυτού, η θερμοκρασία βρασμού και ο βαθμός συμπίεσης παραμένουν σταθερά. Σε τέτοιες συνθήκες, η ποσότητα της λανθάνουσας θερμότητας που καταναλώνεται από την άλμη βρασμού είναι σταθερή, γεγονός που συνεπάγεται σταθερή θερμοκρασία για το συμπιεσμένο ατμό. Καθώς η πίεση του κινητήριου ατμού αυξάνεται η λανθάνουσα θερμότητά του μειώνεται. Έτσι, για να διατηρήσουμε σταθερή λανθάνουσα θερμότητα στον συμπιεσμένο υδρατμό, είναι απαραίτητο να εισάγουμε μεγαλύτερες ποσότητες υδρατμού που εξέρχεται από τον εξατμιστήρα. Αυτό μειώνει την ποσότητα του κινητήριου ατμού που καταναλώνεται.

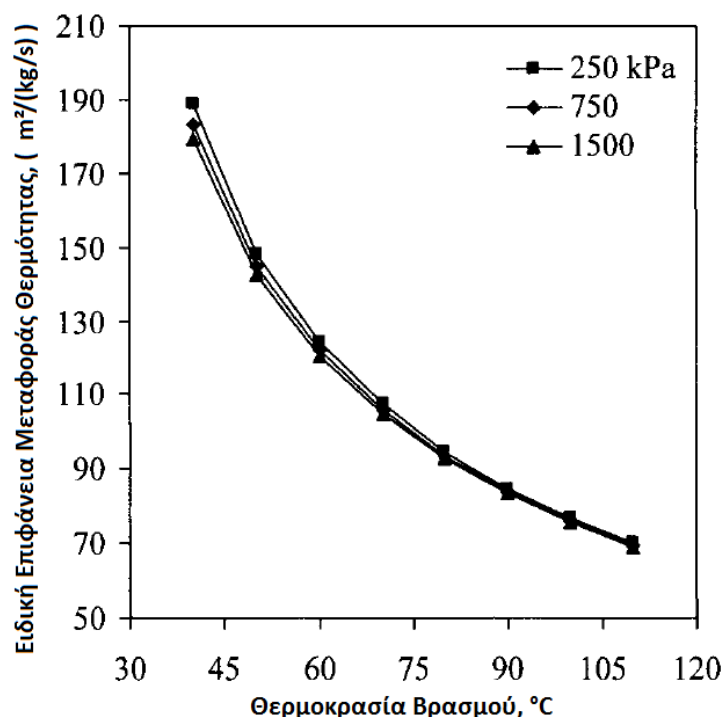


**Εικόνα 23:** Διακυμάνσεις στον Βαθμό Απόδοσης σαν Συνάρτηση της Πίεσης του Κινητήριου Ατμού και του Βαθμού Συμπύκνωσης. [1]

Διακυμάνσεις στην ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας παρουσιάζονται στα διαγράμματα των **Εικόνων 24, 25** και **26**. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας βρασμού, της πίεσης του κινητήριου ατμού και του βαθμού συμπίεσης. Συγκεκριμένα, όπως παρατηρούμε στο διάγραμμα της **Εικόνας 24**, η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας μειώνεται δραστικά καθώς η θερμοκρασία βρασμού αυξάνεται. Αυτό το αποτέλεσμα προέκυψε από την αύξηση του ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον εξατμιστήρα και στο συμπυκνωτή σε υψηλές θερμοκρασίες βρασμού. Καθώς ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αυξάνει, εξαιτίας της μείωσης στην αντίσταση της μεταφοράς θερμότητας, η επιφάνεια της μεταφοράς θερμότητας μειώνεται. Μείωση της ειδικής επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας παρατηρείται επίσης και σε υψηλότερες θερμοκρασίες βρασμού. Αυτό οφείλεται στο ότι η ποσότητα του παραγόμενου αποστάγματος εξαρτάται μόνο από την αλατότητα του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας και της απορριπτόμενης άλμης.

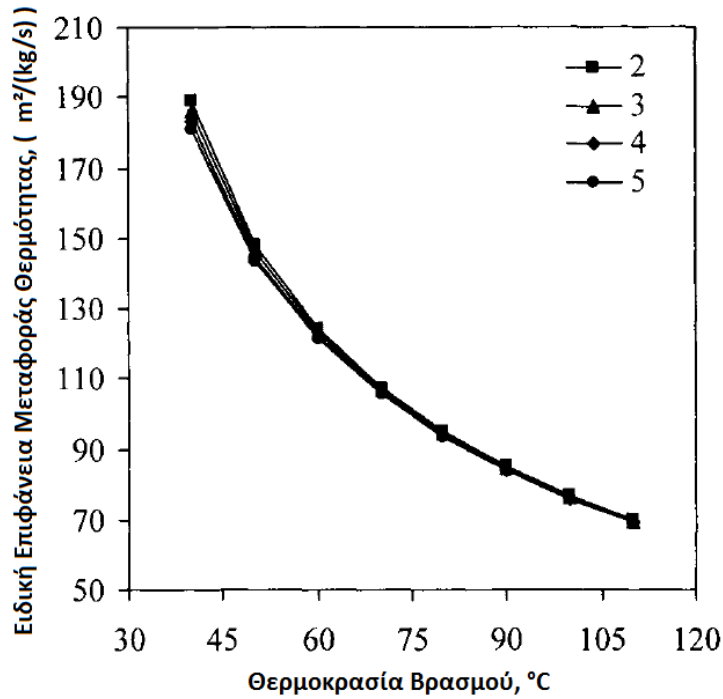
Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζονται στο διάγραμμα της **Εικόνας 25** για διακυμάνσεις στην ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας σαν συνάρτηση του βαθμού συμπίεσης. Σε σταθερές θερμοκρασίες βρασμού και υψηλούς βαθμούς συμπίεσης, η πίεση του συμπιεσμένου υδρατμού είναι μεγαλύτερη. Αυτό συμβαίνει καθώς η πίεση του παρασυρμένου υδρατμού δεν αλλάζει σε σταθερές θερμοκρασίες βρασμού. Την ίδια στιγμή, η θερμοκρασία του συμπιεσμένου υδρατμού επίσης αυξάνεται καθώς ο βαθμός συμπίεσης μεγαλώνει. Η αύξηση στην θερμοκρασία του συμπιεσμένου υδρατμού αυξάνει τα ποσοστά της

μεταφοράς θερμότητας. Αιτία αυτού είναι η αύξηση της κινητήριας δύναμης για τη μεταφορά θερμότητας κατά μήκος του εξατμιστήρα, η οποία μετράται από την διαφορά  $T_s-T_b$ . Σαν αποτέλεσμα, η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας του εξατμιστήρα μειώνεται σε υψηλότερους βαθμούς συμπίεσης. Ανεξάρτητα από αυτό, η περιοχή μεταφοράς θερμότητας αυξάνει στον συμπυκνωτή. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της αύξησης στο φορτίο του συμπυκνωτή, η οποία προκαλείται από τη μείωση της ποσότητας του παρασυρμένου υδρατμού σε υψηλούς βαθμούς συμπίεσης. Ωστόσο, η μείωση στην επιφάνεια του εξατμιστήρα είναι πιο έντονη από την αύξηση της επιφάνειας στο συμπυκνωτή. Το καθαρό αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η μείωση της ειδικής επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας από την αύξηση του βαθμού συμπίεσης.

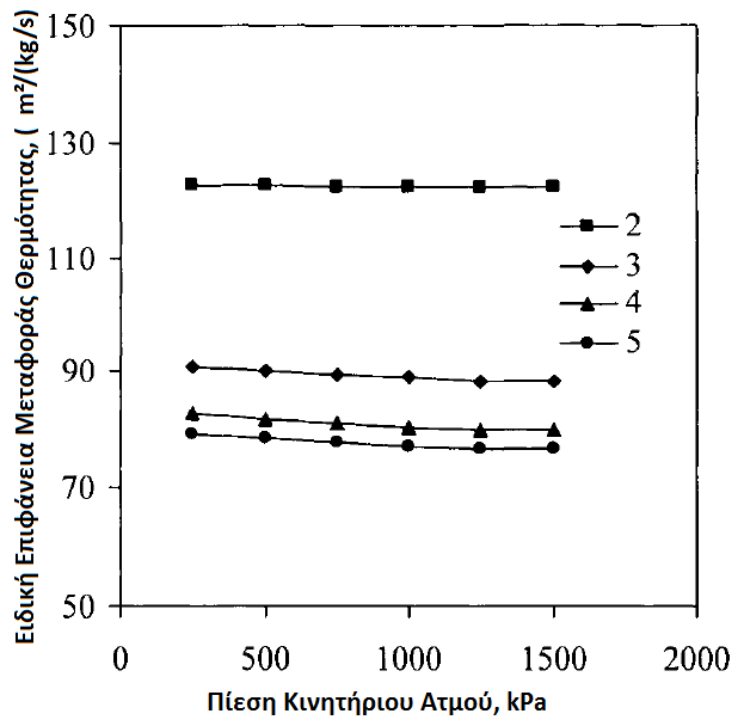


**Εικόνα 24:** Διακυμάνσεις της Ειδικής Επιφάνειας Μεταφοράς Θερμότητας Συνάρτησει της Θερμοκρασίας Βρασμού και της Πίεσης του Κινητήριου Ατμού. [1]

Η επίδραση της πίεσης του κινητήριου ατμού στην ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας, παρουσιάζεται στο διάγραμμα της **Εικόνας 26**. Τα αποτελέσματα προέκυψαν για βαθμό συμπίεσης ίσο με 1,895, θερμοκρασία βρασμού από 55 έως 82°C και είναι παρόμοια με αυτά που προέκυψαν για τις διακυμάνσεις του βαθμού απόδοσης του συστήματος, όπως παρουσιάζονται από στην **Εικόνα 21**. Παρατηρώντας το διάγραμμα της **Εικόνας 26** βλέπουμε ότι η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας είναι ανεξάρτητη των μεταβολών της πίεσης του κινητήριου ατμού, εξαιτίας των περιορισμένων διακυμάνσεων του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον εξατμιστήρα και το συμπιεστή όπως και της ποσότητας του παρασυρμένου υδρατμού.

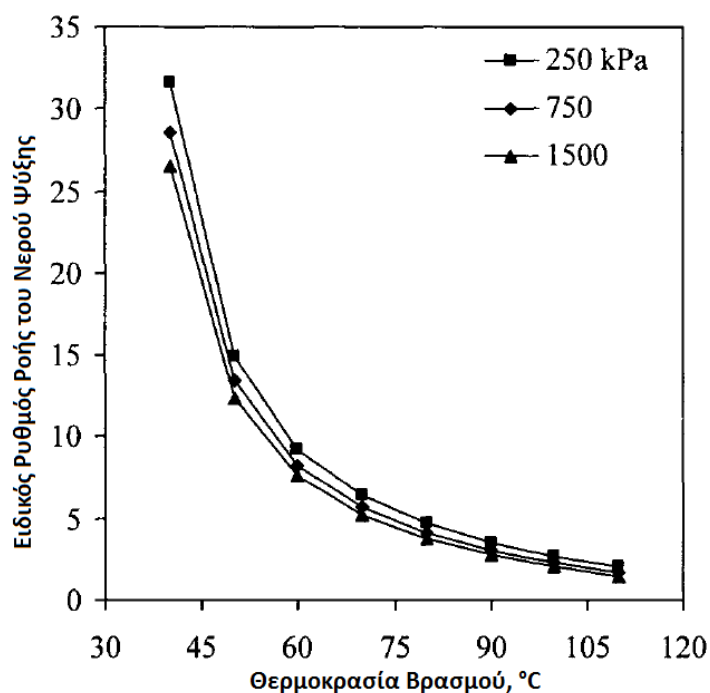


**Εικόνα 25:** Διακυμάνσεις της Ειδικής Επιφάνειας Μεταφοράς Θερμότητας Συναρτήσεως της Θερμοκρασίας Βρασμού και του Βαθμού Συμπιέσεως. [1]

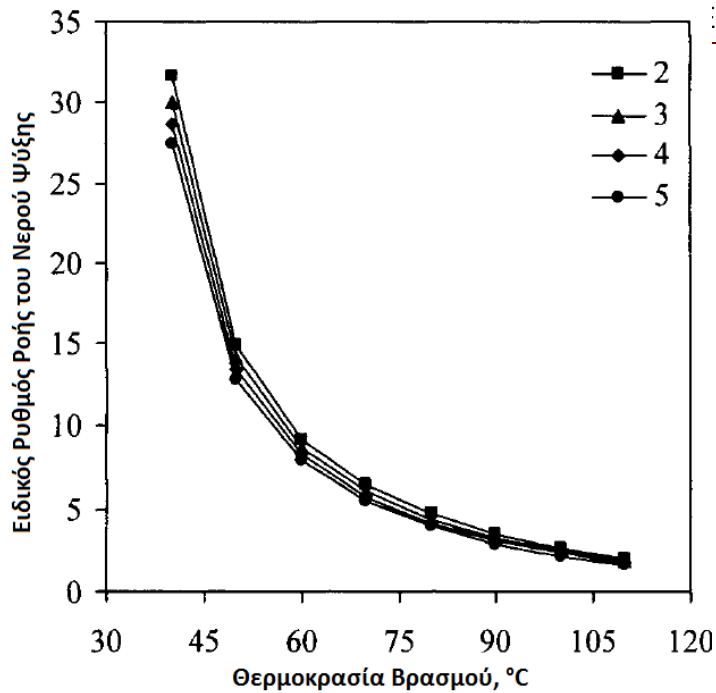


**Εικόνα 26:** Διακυμάνσεις της Ειδικής Επιφάνειας Μεταφοράς Θερμότητας Συναρτήσεως της Πίεσης του Κινητήριου Ατμού και του Βαθμού Συμπυκνώσεως. [1]

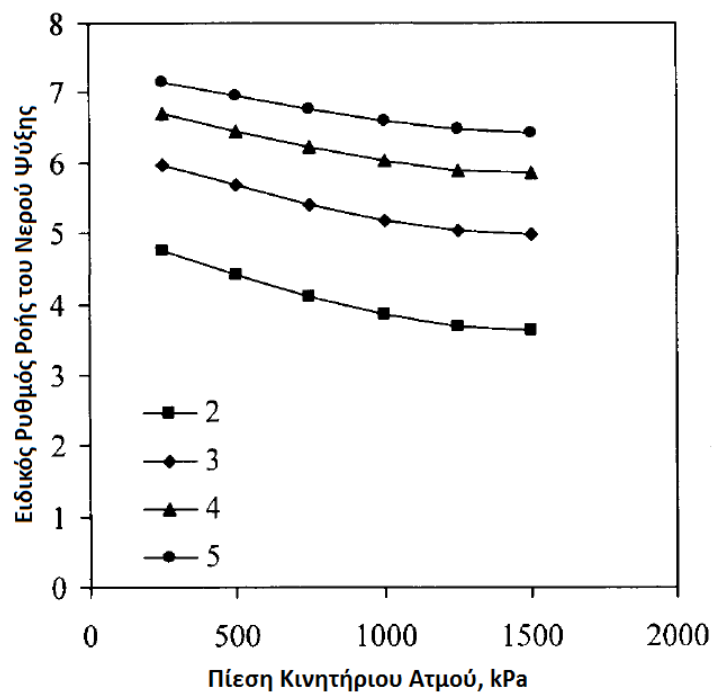
Τέλος, διακυμάνσεις στον ειδικό ρυθμό ροής του νερού ψύξης παρουσιάζονται στα διαγράμματα των **Εικόνων 27, 28** και **29**. Τα αποτελέσματα προέκυψαν με βάση τις ίδιες τιμές παραμέτρων που ορίστηκαν προηγουμένως. Όπως παρουσιάζεται στα διαγράμματα των **Εικόνων 27** και **28**, ο ειδικός ρυθμός ροής ψύξης είναι εξαιρετικά ευαίσθητος σε διακυμάνσεις της θερμοκρασίας βρασμού και του βαθμού συμπίεσης, ενώ δεν επηρεάζεται καθόλου από μεταβολές της πίεσης του κινητήριου ατμού, όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα της **Εικόνας 29**. Αυτό το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο δεδομένων των διακυμάνσεων σε άλλες παραμέτρους σχεδιασμού, δηλαδή, και του βαθμού απόδοσης και του βαθμού συμπίεσης του συστήματος. Η ευαισθησία του ειδικού ρυθμού ροής του νερού ψύξης σε σχέση με τη θερμοκρασία βρασμού και του βαθμού συμπίεσης, προκαλείται από τη μεγάλη αύξηση του ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον εξατμιστήρα και το συμπυκνωτή. Μια αντίθετη συμπεριφορά παρατηρείται κατά την αύξηση της πίεσης του κινητήριου ατμού. Σε αυτό το πλαίσιο, περιορισμένη ευαισθησία του ειδικού ρυθμού ροής του νερού ψύξης βρίσκεται από την αύξηση της πίεσης του κινητήριου ατμού.



**Εικόνα 27:** Διακυμάνσεις του Ειδικού Ρυθμού Ροής του Νερού Ψύξης Συναρτήσεως της Θερμοκρασίας Βρασμού και της Πίεσης του Κινητήριου Ατμού. [1]



**Εικόνα 28:** Διακυμάνσεις του Ειδικού Ρυθμού Ροής του Νερού Ψύξης συναρτήσει της Θερμοκρασίας Βρασμού και του Βαθμού Συμπιέσεως. [1]



**Εικόνα 29:** Διακυμάνσεις του Ειδικού Ρυθμού Ροής του Νερού Ψύξης συναρτήσει της Πίεσης του Κινητήριου Ατμού και του Βαθμού Συμπιέσεως. [1]

Συνοψίζοντας το σύστημα θερμικής συμπίεσης (TVC) δεν το συναντάμε σε βιομηχανική κλίμακα, ωστόσο, η μοντελοποίηση του σχεδιασμού του όπως και η ανάλυσή του είναι σημαντικοί καθώς μας παρέχουν τη βάση για περιπλοκότερα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης με θερμική συμπίεση υδρατμού. Η μαθηματική ανάλυση αυτού του συστήματος περιλαμβάνει εξισώσεις υλικής και ενεργειακής ανάλυσης του συμπυκνωτή και του εξατμιστήρα, ενώ στηρίζεται κυρίως στις

διακυμάνσεις του θερμικού βαθμού απόδοσης, της ειδικής επιφάνειας θερμότητας και του ειδικού ρυθμού ροής του νερού ψύξης. Η μελέτη διεξάγεται για ένα εύρος θερμοκρασιών βρασμού, πιέσεων κινητήριου ατμού και βαθμού συμπίεσης. Έτσι προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Ο βαθμός απόδοσης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας βρασμού και του βαθμού συμπίεσης. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της κατανάλωσης του κινητήριου ατμού, η οποία είναι απαραίτητη έτσι ώστε να επιτευχθεί το απαιτούμενο επίπεδο της συμπίεσης του υδρατμού.
- Ο βαθμός απόδοσης αυξάνει, άλλα με μειωμένη ευαισθησία, με την αύξηση της πίεσης του κινητήριου ατμού. Αυτό οφείλεται στη μικρή αύξηση της ποσότητας του παρασυρμένου υδρατμού σε υψηλές πιέσεις του κινητήριου ατμού, που με τη σειρά της μειώνει την ποσότητα του κινητήριου ατμού που καταναλώνεται.
- Η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας και ο ειδικός ρυθμός ροής του νερού ψύξης είναι ευαίσθητα στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας βρασμού και του βαθμού συμπίεσης. Και οι δυο σχεδιαστικές παράμετροι μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας βρασμού και του βαθμού συμπίεσης, εξαιτίας της αύξησης του ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον εξατμιστήρα και το συμπυκνωτή, η οποία με τη σειρά της προκαλεί μεγάλη αύξηση του μεγέθους μεταφοράς θερμότητας.
- Η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας καθώς και ο ειδικός ρυθμός ροής ψύξης έχουν περιορισμένη ευαισθησία στις διακυμάνσεις της πίεσης του κινητήριου ατμού.

Εν ολίγοις, προτείνεται η χρήση των συστημάτων συμπίεσης υδρατμού μιας βαθμίδας (SE-TVC) σε ενδιάμεσες τιμές θερμοκρασιών βρασμού, δηλαδή 70-80°C και χαμηλούς βαθμούς συμπίεσης, δηλαδή τιμές κοντά στο 2, έτσι ώστε να επιτυγχάνουμε τιμές του βαθμού απόδοσης μεγαλύτερες του 1,5. Επιπλέον, σε τέτοιες συνθήκες παρατηρείται μεγάλη μείωση στην ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας και στον ειδικό ρυθμό ροής του νερού ψύξης. Η μείωση αυτή είναι ικανή να μειώσει το πρωταρχικό κόστος, δηλαδή το κόστος κατασκευής του εξατμιστήρα, του συμπιεστή και της αντλίας θαλασσινού νερού. Όμως η μείωση στο πρωταρχικό κόστος προκύπτει και ως αποτέλεσμα της μείωσης της απαιτούμενης ενέργειας για την λειτουργία της μονάδας άντλησης του θαλασσινού νερού.



### 2.3.3 Μηχανική Συμπίεση Υδρατμού Μιας Βαθμίδας (Single Effect Mechanical Vapor Compression)

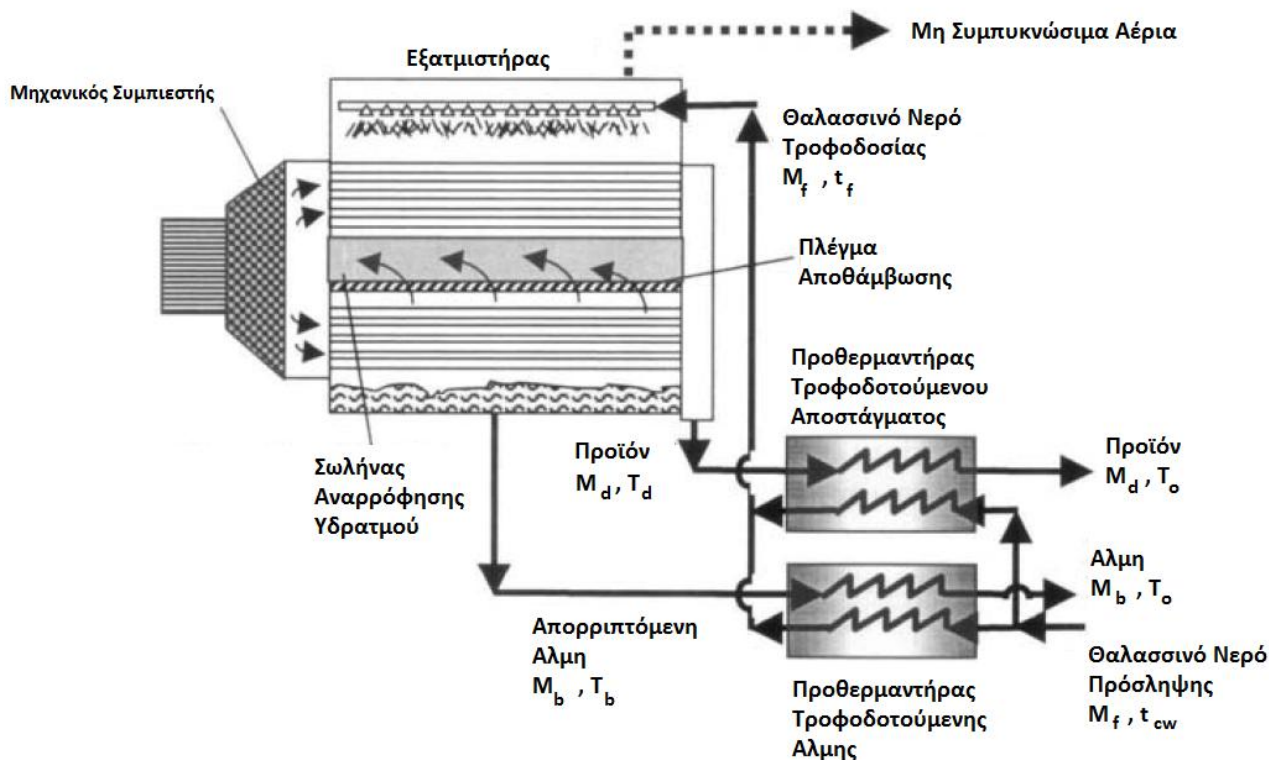
Η μηχανική συμπίεση υδρατμού μιας βαθμίδας (ΜΣΥ, SE-MVC) είναι η πιο ελκυστική ανάμεσα στις διάφορες διεργασίες αφαλάτωσης ενός σταδίου. Το σύστημα μηχανικής συμπίεσης υδρατμού είναι συμπαγές, καθηλωμένο και δεν απαιτεί εξωτερική πηγή θερμότητας, όπως συμβαίνει στη θερμική συμπίεση καθώς και στη συμπίεση υδρατμού με προσρόφηση και απορρόφηση. Το σύστημα λειτουργεί με τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας, ως εκ τούτου είναι κατάλληλο για απομακρυσμένες κατοικημένες περιοχές με πρόσβαση σε γραμμές πλέγματος ενέργειας. Ένα ακόμα πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι η απουσία του συμπυκνωτή με κατακόρυφη ροή και των απαιτήσεων νερού ψύξης. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της λειτουργίας του συμπιεστή με την ολική ποσότητα υδρατμού που σχηματίζεται μέσα στο σύστημα. Άλλα πλεονεκτήματα του συστήματος περιλαμβάνουν:

- Μέτριο κόστος επένδυσης.
- Αποδεδειγμένη αξιοπιστία για μακράν διάρκεια ζωής σε βιομηχανική λειτουργία.
- Απλή πρόσληψη θαλασσινού νερού και προεπεξεργασίας.
- Το σύστημα υιοθετεί την οριζόντια διάταξη σωλήνων, η οποία επιτρέπει υψηλούς συντελεστές μεταφοράς θερμότητας.
- Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας, 60°C, βοηθάει στη μείωση δημιουργίας ιζημάτων και των απωλειών θερμότητας για την ελάχιστη απαίτηση θερμομόνωσης.
- Το σύστημα είναι σπονδυλωτού τύπου και είναι εύκολη η μεγέθυνση του όγκου παραγωγής μέσω της ενσωμάτωσης επιπλέον ενοτήτων.
- Προϊόν υψηλής καθαρότητας.
- Απλή προσαρμογή του συστήματος για να δέχεται διακυμάνσεις, μέσω της χειροκίνητης μεταβολής της θερμοκρασίας.

Γενικά, τα συστήματα μηχανικής συμπίεσης υδρατμού (MVC) εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται σε περιορισμένη κλίμακα, ωστόσο έχουν υψηλή αξιοπιστία λειτουργίας, η ειδική κατανάλωση ενέργειας είναι συγκρίσιμη με αυτή των συστημάτων αντίστροφης ώσμωσης και η δυνατότητα παραγωγής τους είναι συμβατή τόσο με μικρούς όσο και με μεγάλους βαθμούς κατανάλωσης.

Αναλυτικότερα, τα συστήματα αυτά διαθέτουν πέντε βασικά στοιχεία στα οποία ανήκουν, ο μηχανικός συμπιεστής υδρατμού, ο εξατμιστήρας, προθερμαντήρες του θαλασσινού νερού πρόσληψης, αντλίες άλμης και προϊόντων και συστήματα εξαερισμού. Η **Εικόνα 30** παρουσιάζει το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος. Όπως παρατηρούμε, ο εξατμιστήρας και ο συμπιεστής σχηματίζουν μια ενιαία μονάδα. Ο εξατμιστήρας περιλαμβάνει οριζόντιους σωλήνες σχηματισμού πίπτουσας στοιβάδας, ακροφύσια ψεκασμού, σωλήνες αναρρόφησης υδρατμού και συρμάτινο πλέγμα απαγωγής ομίχλης. Οι προθερμαντήρες τροφοδοσίας είναι

εναλλάκτες θερμότητας με μορφή πλάκας, οι οποίοι λειτουργούν με το θαλασσινό νερό πρόσληψης και τα θερμά υγρά ρεύματα που φεύγουν από τον εξατμιστήρα.



Εικόνα 30: Μηχανική Συμπίεση Υδρατμού Μιας Βαθμίδας (ΜΣΥ). [1]

Το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας μπαίνει στον εξατμιστήρα με ρυθμό ροής ( $M_f$ ) και θερμοκρασία ( $T_f$ ). Πάνω από τις σειρές των οριζόντιων σωλήνων γίνεται ο καταιονισμός του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας και έτσι σχηματίζεται μια πίπτουσα στοιβάδα. Ο σχηματισμός αυτός ενισχύει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και κάνει την διεργασία του εξατμιστήρα πιο αποτελεσματική. Η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού αυξάνεται από ( $T_f$ ) σε ( $T_b$ ) πριν αρχίσει η διεργασία της εξάτμισης. Οι σχηματιζόμενοι υδρατμοί ( $M_d$ ) και σε θερμοκρασία ( $T_b$ ) μεταφέρονται από τον τομέα του εξατμιστήρα στο συμπιεστή μέσω των σωλήνων αναρρόφησης, οι οποίοι προφυλάσσονται από το συρμάτινο πλέγμα απαγωγής ομίχλης. Αυτό είναι απαραίτητο για να αποφευχθεί η παράσυρση των σταγονιδίων άλμης μαζί με το ρεύμα υδρατμού, οι οποίες θα μπορούσαν να προκαλέσουν ακόμα και καταστροφή των πτερυγίων του συμπιεστή. Περιορισμένη κατάθλιψη θερμοκρασίας πραγματοποιείται καθώς ο υδρατμός ρέει εντός του πλέγματος αποθάμβωσης. Οι υδρατμοί ρέουν επαφτομενικά μέσα στο συμπιεστή όπου υπερθερμαίνονται από ( $T_b$ ) σε ( $T_s$ ). Μετά τη συμπίεση, οι ατμοί οδηγούνται αναγκαστικά εντός των οριζόντιων σωλήνων, όπου χάνουν την ενέργεια υπερθέρμανσης και η θερμοκρασία τους πέφτει από ( $T_s$ ) στη θερμοκρασία κορεσμού ( $T_d$ ). Η συμπύκνωση λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασία ( $T_d$ ) και η απελευθερωμένη λανθάνουσα θερμότητα μεταφέρεται στη στοιβάδα άλμης. Η θερμοκρασιακή διαφορά  $T_s - T_b$  επηρεάζει την ενέργεια κατανάλωσης

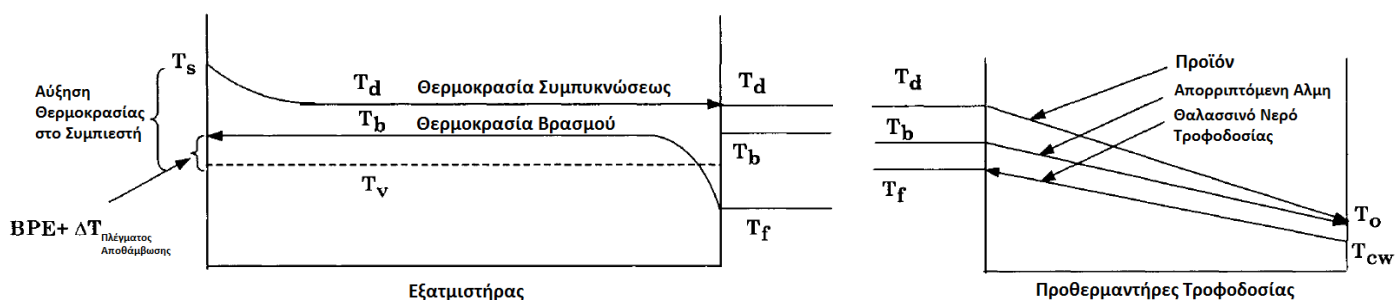
στο συμπιεστή και υπαγορεύεται από τη θερμοκρασία του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας.

Το ισοζύγιο της ενέργειας στα πλαίσια του συστήματος διατηρείται από την ανάκτηση του θερμικού φορτίου από την απορριπτόμενη άλμη και τα προϊόντα ρεύματα. Αυτό επιτυγχάνεται εντός του προθερμαντήρα τροφοδοσίας, ο οποίος είναι εναλλάκτης θερμότητας με μορφή πλάκας. Σε αυτή τη μελέτη, το θαλασσινό νερό πρόσληψης είναι σε χαμηλή θερμοκρασία ( $t_{cw}$ ) και ρυθμό ροής ( $M_f$ ). Η απορριπτόμενη άλμη και τα προϊόντα ρεύματα που βγαίνουν από τον εξατμιστήρα είναι σε υψηλότερες θερμοκρασίες, αυτές των ( $T_b$ ) και ( $T_d$ ) αντίστοιχα. Καθώς η θερμότητα ανταλλάσσεται μεταξύ των τριών ρευμάτων η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού αυξάνεται σε ( $T_f$ ) και η θερμοκρασία της απορριπτόμενης άλμης και του παραγόμενου ατμού μειώνεται σε ( $T_o$ ).

Το προφίλ της θερμοκρασίας του συστήματος φαίνεται στο διάγραμμα της **Εικόνα 31**. Όπως μπορούμε να δούμε, η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας αυξάνεται μέσα στη μονάδα του προθερμαντήρα από ( $T_{cw}$ ) σε ( $T_f$ ). Την ίδια στιγμή η θερμοκρασία στην απορριπτόμενη άλμη και στο παραγόμενο ρεύμα μειώνεται από ( $T_b$ ) και ( $T_d$ ), αντίστοιχα, στην ίδια θερμοκρασία ( $T_o$ ). Εντός του εξατμιστήρα, η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας αυξάνεται από ( $T_f$ ) στη θερμοκρασία βρασμού ( $T_b$ ). Ο σχηματιζόμενος υδρατμός είναι στη ίδια θερμοκρασία βρασμού, η οποία είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία κορεσμού ( $T_v$ ), κατά τη θερμοκρασιακή ανύψωση του σημείου βρασμού  $T_b - T_v$ . Ο σχηματιζόμενος υδρατμός συμπιέζεται και υπερθερμαίνεται σε θερμοκρασία ( $T_s$ ). Η συμπύκνωση του συμπιεσμένου υδρατμού λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασία ( $T_d$ ).

Η διατήρηση των θερμοκρασιακών διαφορών μέσα σε περιορισμένη κλίμακα είναι σημαντική για την επίτευξη των παρακάτω:

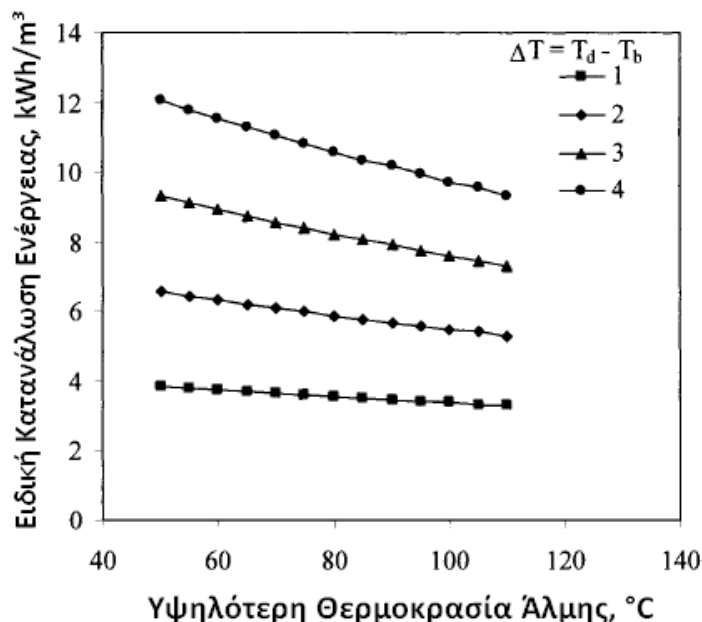
- Διατήρηση της ενεργειακής κατανάλωσης του συμπιεστή εντός πρακτικών ορίων.
- Αποφυγή υπερβολικής αύξησης στην επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας του εξατμιστήρα.
- Λειτουργία των μονάδων προθέρμανσης σε λογικές τιμές για να περιοριστεί στο ελάχιστο η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας.



Εικόνα 31: Προφίλ Θερμοκρασίας στην ΜΣΥ. [1]

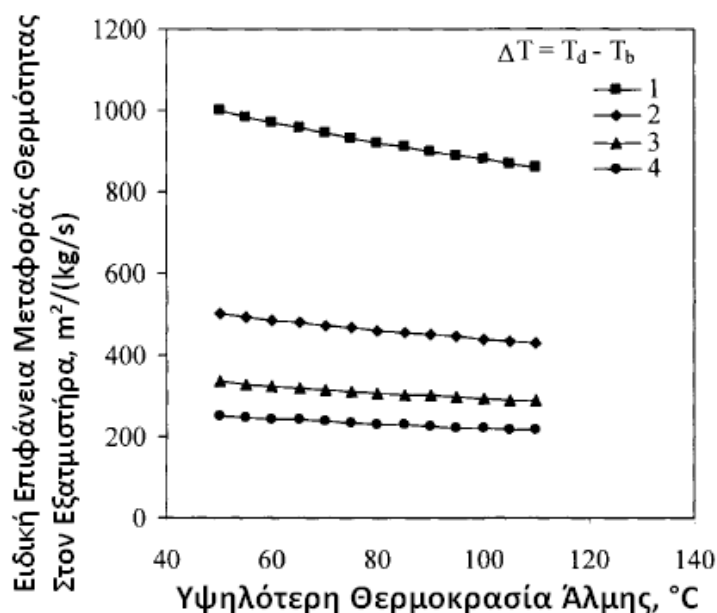
Η μελέτη του μοντέλου πραγματοποιείται συναρτήσει της θερμοκρασίας βρασμού της άλμης, ( $T_b$ ), και της θερμοκρασιακής διαφοράς του συμπυκνωμένου υδρατμού και της άλμης βρασμού, ( $T_d - T_b$ ). Η θερμοκρασία βρασμού της άλμης κυμαίνεται από 50 έως 105°C, ενώ η θερμοκρασιακή διαφορά από 1 ως 4°C. Στην ανάλυση περιλαμβάνεται η ειδική ενέργεια κατανάλωσης και η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας του εξατμιστήρα και των δυο προθερμαντήρων.

Η ειδική κατανάλωση ενέργειας του συστήματος παρουσιάζεται στο διάγραμμα της **Εικόνα 32**. Όπως μπορούμε να δούμε, η ειδική κατανάλωση ενέργειας αυξάνει σε χαμηλότερες θερμοκρασίες βρασμού και από την αύξηση της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του συμπυκνωμένου υδρατμού και της άλμης που βράζει. Η μείωση της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας σε υψηλότερες θερμοκρασίες βρασμού προκαλείται από τη μείωση στον ειδικό όγκο του υδρατμού. Παρόμοια, η αύξηση της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ των συμπυκνωμένων και σχηματισμένων υδρατμών δίνει μεγαλύτερο βαθμό συμπίεσης. Τα επίπεδα της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας όπως παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα κυμαίνονται για υψηλές τιμές των 25 kWh/m<sup>3</sup> και για χαμηλές τιμές κάτω από 10 kWh/m<sup>3</sup>. Στην πράξη η ειδική κατανάλωση ενέργειας παίρνει τιμές κοντά στα 15 kWh/m<sup>3</sup> για θερμοκρασία βρασμού 60°C. Υπέρβαση των τιμών αυτών όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα δηλώνει ότι το σύστημα λειτουργεί με θερμοκρασιακή διαφορά των 3°C για ( $T_s - T_d$ ) και μεταξύ 1-2 °C για ( $T_d - T_b$ ).



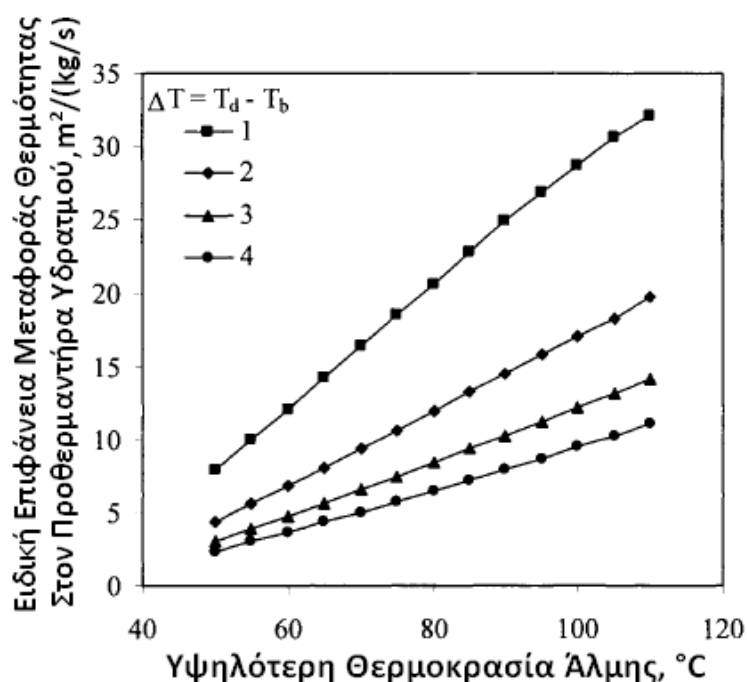
**Εικόνα 32:** Διακυμάνσεις στην Ειδική Κατανάλωση Ενέργειας για τον Εξατμιστήρα σαν Συνάρτηση των Υψηλότερων Θερμοκρασιών της Άλμης και της Θερμοκρασιακής Διαφοράς του Συμπυκνωμένου Υδρατμού και της Άλμης που Βράζει. [1]

Διακυμάνσεις για την ειδική επιφάνεια θερμότητας του εξατμιστήρα παρουσιάζονται στο διάγραμμα της **Εικόνα 33**. Η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας μειώνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες βρασμού ενώ αυξάνεται με τη μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του συμπυκνωμένου υδρατμού και της άλμης που βράζει. Υψηλότερες θερμοκρασίες βρασμού αυξάνουν τα ποσοστά μεταφοράς θερμότητας, αυτό συμβαίνει εξαιτίας αφενός της μείωσης της πυκνότητας και του ιξώδους του υγρού και αφετέρου της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας του υγρού και των μεταλλικών τοιχωμάτων. Σαν αποτέλεσμα, ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αυξάνει και προκαλεί μείωση της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας. Η θερμοκρασιακή διαφορά του συμπυκνωμένου υδρατμού και της άλμης που βράζει είναι η κινητήρια δύναμη για τη μεταφορά θερμότητας κατά μήκος των σωλήνων του εξατμιστήρα. Μειώνοντας την διαφορά αυτή, μειώνεται η κινητήρια δύναμη για μεταφορά θερμότητας και ως αποτέλεσμα μεγαλώνει η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Όπως παρουσιάζεται και στο παρακάτω διάγραμμα, η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας στον εξατμιστήρα παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στις διακυμάνσεις αυτής της θερμοκρασιακής διαφοράς. Στην πράξη, η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας του εξατμιστήρα κυμαίνεται μεταξύ 400-600 m<sup>2</sup>/(kg/s) για θερμοκρασία βρασμού 60°C. Γνωρίζοντας την εμπειρική αυτή πληροφορία το παρακάτω διάγραμμα δίνει 2°C για τη θερμοκρασιακή διαφορά κατά τη λειτουργία. Αυτό είναι ένα ενδιαφέρον αποτέλεσμα γιατί συνάδει με το προηγούμενο συμπέρασμα που βγάλαμε για την ειδική κατανάλωση ενέργειας.



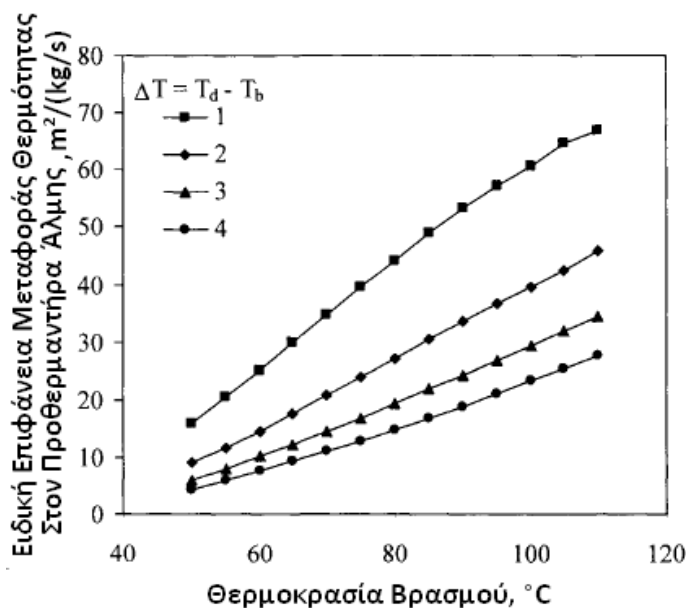
**Εικόνα 33:** Διακυμάνσεις στην Ειδική Επιφάνεια Μεταφοράς Θερμότητας για τον Εξατμιστήρα σαν Συνάρτηση των Υψηλότερων Θερμοκρασιών της Άλμης και της Θερμοκρασιακής Διαφοράς του Συμπυκνωμένου Υδρατμού και της Άλμης που Βράζει. [1]

Στο διάγραμμα της **Εικόνας 34** παρουσιάζεται η συμπεριφορά του μεγέθους της ειδικής επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας του προθερμαντήρα αποστάγματος τροφοδοσίας. Η επιφάνεια αυξάνει για υψηλότερες θερμοκρασίες βρασμού ( $T_b$ ) και χαμηλότερες διαφορές μεταξύ συμπυκνωμένου υδρατμού και άλμης που βράζει ( $T_d - T_b$ ). Το θερμικό φορτίο του προθερμαντήρα δίνεται συναρτήσει της θερμοκρασιακής διαφοράς ( $T_d - T_o$ ), η οποία αυξάνει για υψηλότερες θερμοκρασίες βρασμού ( $T_b$ ), αρκεί η ( $T_d$ ) να κρατείται σε υψηλότερα επίπεδα κατά 1-4°C. Μείωση της θερμοκρασιακής αυτής διαφοράς επιβάλλει τη μείωση της θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας ( $T_f$ ). Αυτή η μείωση είναι απαραίτητη για να εφοδιάσει τον εξατμιστήρα με μικρότερη ποσότητα ενέργειας με σκοπό να υπάρχει μια μικρότερη ενθαλπική διαφορά μεταξύ του συμπυκνωμένου και των σχηματισμένων υδρατμών.



**Εικόνα 34:** Διακυμάνσεις στην Ειδική Επιφάνεια Μεταφοράς Θερμότητας για τον Προθερμαντήρα Υδρατμού σαν Συνάρτηση των Υψηλότερων Θερμοκρασιών της Άλμης και της Θερμοκρασιακής Διαφοράς του Συμπυκνωμένου Υδρατμού και της Άλμης που Βράζει. [1]

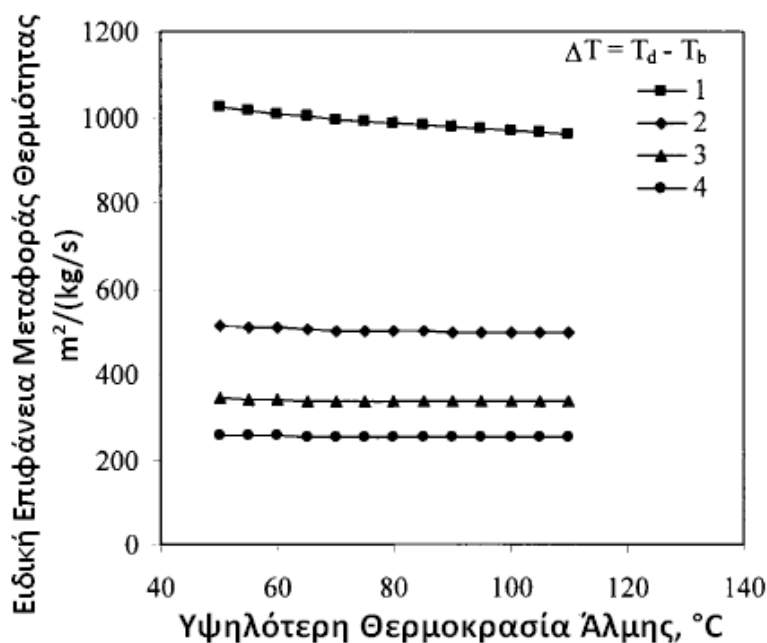
Η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας του προθερμαντήρα της άλμης τροφοδοσίας παρουσιάζεται στο διάγραμμα της **Εικόνας 35**, όπου παρατηρείται αύξηση του μεγέθους αυτού για αύξηση της θερμοκρασίας βρασμού και της θερμοκρασιακής διαφοράς συμπυκνωμένου ατμού και της άλμης που βράζει. Η αύξηση της θερμοκρασίας βρασμού της άλμης αυξάνει το θερμικό φορτίο του προθερμαντήρα, το οποίο καθορίζεται συναρτήσει της διαφοράς ( $T_b - T_o$ ).



**Εικόνα 35:** Διακυμάνσεις στην Ειδική Επιφάνεια Μεταφοράς Θερμότητας για τον Προθερμαντήρα Άλμης σαν Συνάρτηση των Υψηλότερων Θερμοκρασιών της Άλμης και της Θερμοκρασιακής Διαφοράς του Συμπυκνωμένου Υδρατμού και της Άλμης που Βράζει. [1]

Σύγκριση της ειδικής επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας και για τους δύο προθερμαντήρες δείχνει ότι η επιφάνεια του προθερμαντήρα άλμης είναι 3 με 5 φορές μεγαλύτερη από αυτή του προθερμαντήρα αποστάγματος. Αυτό είναι αποτέλεσμα του μεγαλύτερου θερμικού φορτίου που βρίσκουμε στον προθερμαντήρα άλμης, όπου ο ρυθμός ροής μάζας της άλμης ( $M_b$ ) είναι  $1,5\text{kg/s}$ , ενώ ο ρυθμός ροής του αποστάγματος ( $M_d$ ) είναι μόνο  $1\text{ kg/s}$ . Η εξάρτηση της διαφοράς βρίσκεται για διακυμάνσεις στην περιοχή των δυο προθερμαντήρων σε συνάρτηση της θερμοκρασιακής διαφοράς του συμπυκνωμένου υδρατμού και της άλμης που βράζει. Η επιφάνεια για τον προθερμαντήρα αποστάγματος τροφοδοσίας παρατηρούμε ότι αυξάνει σε χαμηλότερες διαφορές, ενώ η αντίθετη συμπεριφορά παρατηρείται για τον προθερμαντήρα άλμης τροφοδοσίας. Αυτό το αποτέλεσμα δηλώνει ότι η επιλογή της θερμοκρασιακής διαφοράς του συμπυκνωμένου υδρατμού και της άλμης που βράζει πρέπει να λαμβάνεται υπόψη εκ των προτέρων ώστε να ελαχιστοποιείται η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας και για τους δυο προθερμαντήρες καθώς και για τον προθερμαντήρα του εξατμιστήρα και της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας.

Αποτελέσματα για την ολική ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας παρουσιάζονται στο διάγραμμα της **Εικόνας 36**, όπου αυτή αυξάνει για αύξηση στη θερμοκρασία βρασμού της άλμης και στη θερμοκρασιακή του συμπυκνωμένου υδρατμού και της άλμης που βράζει. Η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας του εξατμιστήρα επιβάλλει αυτή την συμπεριφορά, αφού είναι μεγαλύτερη σε μέγεθος σε σχέση με την αντίστοιχη των δύο άλλων προθερμαντήρων που έχουν προαναφερθεί.



**Εικόνα 36:** Διακυμάνσεις στην Ειδική Επιφάνεια Μεταφοράς Θερμότητας σαν Συνάρτηση των Υψηλότερων Θερμοκρασιών της Άλμης και της Θερμοκρασιακής Διαφοράς του Συμπυκνωμένου Υδρατμού και της Άλμης που Βράζει. [1]

### 2.3.4 Συμπύεση Υδρατμού Με Απορρόφηση Σε Μια Βαθμίδα (Single Effect Absorption Vapor Compression)

Η διεργασία αφαλάτωσης με συμπύεση υδρατμού με απορρόφηση (ΣΥΑ, AbVC) μίας ή περισσοτέρων βαθμίδων δεν συναντάται σε πλήρη εμπορική ή βιομηχανική κλίμακα. Ωστόσο, η βιβλιογραφία περιλαμβάνει έναν μεγάλο αριθμό μελετών για την ανάπτυξη, την καινοτομία και την αξιολόγηση των επιδόσεων των συστημάτων αυτών για εφαρμογή σε διεργασίες ψύξης και κλιματισμού. Από την άλλη πλευρά, η αξιολόγηση των συνδυασμένων συστημάτων με αντλίες θερμότητας καθώς και διαφόρων θερμικών διεργασιών αφαλάτωσης είναι περιορισμένης βιβλιογραφίας σε έναν μικρό αριθμό μελετών. Πρώτος ο Weinberg et al. το 1980, μελέτησε τον συνδυασμό συστημάτων πολλαπλών βαθμίδων εξάτμισης με κενό ψύξης και αντλίες απορρόφησης θερμότητας με βρωμιούχο λίθιο (LiBr). Ο σκοπός της συνδυασμένης λειτουργίας ήταν η αύξηση του βαθμού απόδοσης του συστήματος πολλαπλής εξάτμισης σε υψηλές τιμές των 18-20 και θερμοκρασίες λειτουργίας από 0 έως 60 °C. Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας ελαχιστοποιεί την διάβρωση και τα προβλήματα από την δημιουργία ιζημάτων. Το 1985 δυο επιστήμονες, ο Alefeld και ο Ziegler, προτείνουν ένα πλήρως ολοκληρωμένο σύστημα αφαλάτωσης σε συνδυασμό με αντλία LiBr-H<sub>2</sub>O απορρόφησης θερμότητας. Το σύστημα περιλαμβάνει τρία στάδια, στα οποία επεξεργάζεται το θαλασσινό νερό και παράγει φρέσκο γλυκό νερό. Ο Aly αρχικά μόνος του το 1988 και λίγο αργότερα το 1991 μαζί με τον Fathalah, ανέλυσαν μια ηλιακά τροφοδοτούμενη αντλία LiBr-H<sub>2</sub>O θερμότητας, η οποία παράγει ατμό



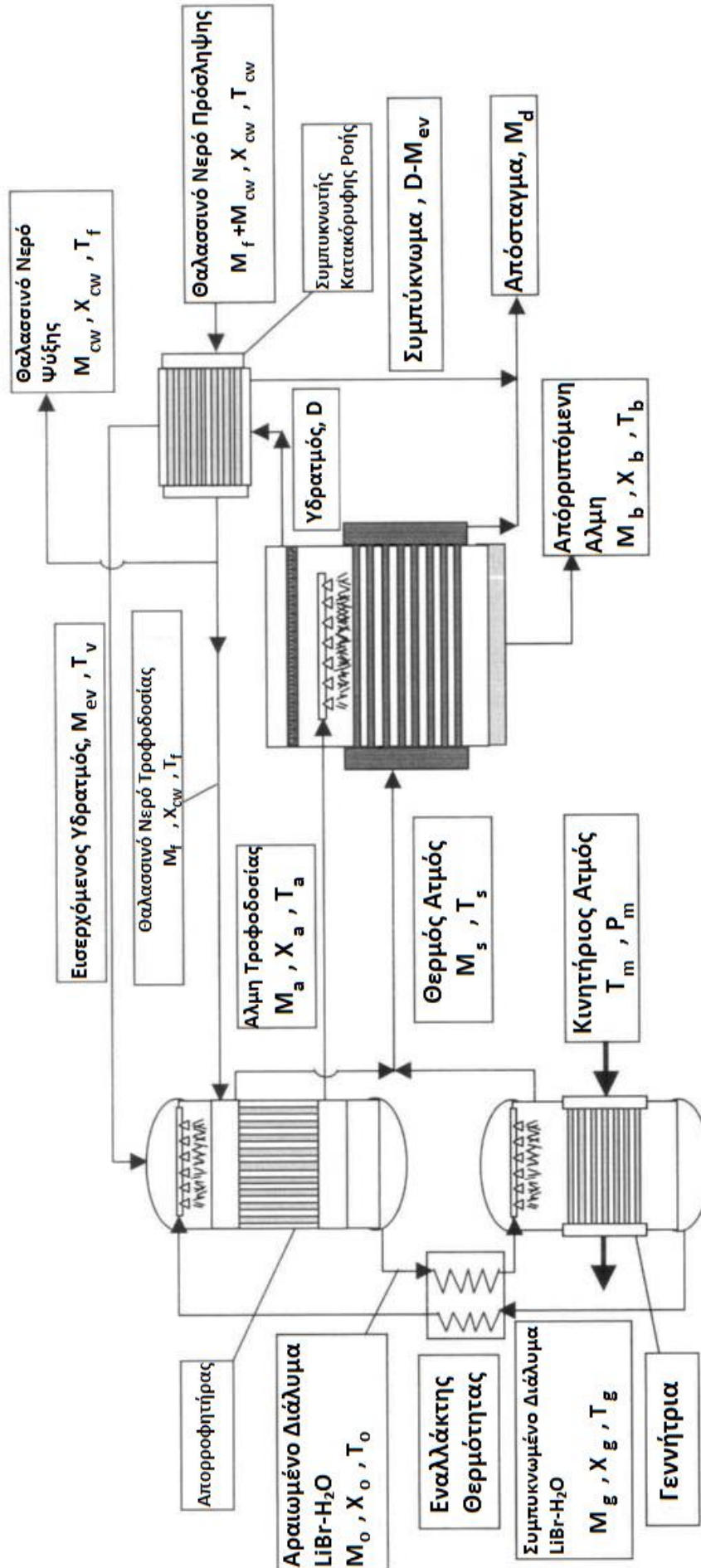
υψηλής θερμότητας για την λειτουργία συστημάτων αφαλάτωσης με πολλαπλή εξάτμιση. Μεγαλύτερη έμφαση έδωσαν ωστόσο στην απόδοση της μονάδας ηλιακής ενέργειας και του αέρα κλιματισμού στον εξατμιστήρα. Το 1996, οι Yanniotis και Pilavachi, διαμόρφωσαν την απόδοση των αντλιών θερμότητας υδροξειδίου του νατρίου στα συστήματα πολλαπλών εξατμίσεων. Τα αποτελέσματα του μοντέλου επικυρώθηκαν σε σχέση με πειραματικές μετρήσεις και διαπιστώθηκε ότι έχουν λογική συμφωνία. Ο Al-Juwayhel et al. το 1997 μελέτησε την απόδοση των συστημάτων εξάτμισης μιας βαθμίδας (SEE) σε συνδυασμό με διάφορους τύπους αντλιών θέρμανσης. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αποτελέσματα για τα συστήματα (ΣΥΑ, AbVC) έδωσαν θερμικούς βαθμούς απόδοσης σχεδόν τριπλάσιους σε σχέση με αυτούς των συστημάτων θερμικής συμπίεσης υδρατμού μιας βαθμίδας (SE-TVC). Από την άλλη πλευρά, την ίδια χρονιά οι El-Dessouky και Ettouney, έδειξαν 50% αύξηση στον θερμικό βαθμό απόδοσης για τα συνδυασμένα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης με συμπίεση υδρατμού με απορρόφηση (MEE-AbVC) και πολλαπλής εξάτμισης με συμπίεση υδρατμού με προσρόφηση (MEE-AdVC), σε σχέση με τα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης σε συνδυασμό με θερμική συμπίεση υδρατμού (MEE-TVC) με τιμές κοντά στο 20.

Τα στοιχεία του συστήματος συμπίεσης υδρατμού με απορρόφηση (AbVC), όπως παρουσιάζονται στην **Εικόνα 37**, είναι ο εξατμιστήρας με οριζόντιους σωλήνες σχηματισμού πίπτουσας στοιβάδας, τα ακροφύσια ψεκασμού άλμης, το πλέγμα αποθάμβωσης και η πισίνα άλμης. Ο συμπυκνωτής κατακόρυφης ροής έχει ένα παρόμοιο κέλυφος και τέτοια διάταξη σωλήνων, έτσι ώστε η συμπύκνωση να λαμβάνει χώρα στην πλευρά του κελύφους. Ο απορροφητήρας έχει επίσης κέλυφος και διάταξη σωλήνων σχηματισμού πίπτουσας στοιβάδας. Η απορρόφηση του υδρατμού από το διάλυμα LiBr-H<sub>2</sub>O πραγματοποιείται στην πλευρά του κελύφους του απορροφητήρα, ενώ η θέρμανση του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας και ο σχηματισμός υδρατμού λαμβάνει χώρα στην πλευρά των σωλήνων του απορροφητήρα. Στη γεννήτρια, η οποία έχει παρόμοια διάταξη με αυτή του εξατμιστήρα, σχηματίζεται μια πίπτουσα στοιβάδα από το διάλυμα LiBr-H<sub>2</sub>O στην εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων ενώ ο κινητήριος ατμός συμπυκνώνεται στο εσωτερικό τους. Η μονάδα ανταλλαγής θερμότητας λειτουργεί μεταξύ του συμπυκνωμένου και του αραιωμένου διαλύματος LiBr-H<sub>2</sub>O και έτσι βελτιώνεται η ολική αποτελεσματικότητα της διεργασίας. Τα κύρια σημεία της διαδικασίας είναι τα ακόλουθα:

- Το ρεύμα του θαλασσινού νερού πρόσληψης ρέει εντός του συμπυκνωτή κατακόρυφης ροής, όπου συμπυκνώνεται μέρος του υδρατμού που σχηματίστηκε στον εξατμιστήρα. Το υπολειπόμενο τμήμα του υδρατμού τροφοδοτείται στην πλευρά του κελύφους του απορροφητήρα στην αντλία θερμότητας.
- Η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού πρόσληψης αυξάνεται από ( $T_{cw}$ ) σε ( $T_f$ ), καθώς απορροφά τη λανθάνουσα θερμότητα της συμπύκνωσης του συμπυκνωμένου ατμού. Μέρος του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας απορρίπτεται πάλι στη θάλασσα ( $M_{cw}$ ) και είναι γνωστό ως θαλασσινό

νερό ψύξης. Η υπολειπόμενη μερίδα του θαλασσινού νερού πρόσληψης αποτελεί το ρεύμα του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας ( $T_f$ ) και υπόκειται σε χημική επεξεργασία και εξαέρωση πριν τροφοδοτήσουν την πλευρά των σωλήνων του απορροφητήρα.

- Το συμπυκνωμένο διάλυμα  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$  απορροφά το ρεύμα του υδρατμού που εισέρχεται στον απορροφητήρα. Η διεργασία της απορρόφησης είναι εξώθερμη και απελευθερώνει αρκετή ποσότητα θερμότητας, η οποία στηρίζει την θερμοκρασιακή αύξηση του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας ως την θερμοκρασία κορεσμού. Επίσης, υδρατμός σχηματίζεται και από το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας μέσα στον απορροφητήρα και αποτελεί μέρος του ατμού θέρμανσης του εξατμιστήρα.
- Η θερμοκρασία του απορροφημένου υδρατμού και η συγκέντρωση του εξωτερικού αραιωμένου διαλύματος  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ , καθορίζουν τις συνθήκες ισορροπίας μέσα στον απορροφητήρα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η θερμοκρασιακή ανύψωση του σημείου βρασμού για το διάλυμα  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$  ή η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του αραιωμένου διαλύματος  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$  και του απορροφημένου ατμού, κυμαίνεται μεταξύ το εύρος  $10\text{-}50^\circ\text{C}$  καθώς το κλάσμα μάζας του αραιωμένου διαλύματος αυξάνεται από  $0,25\text{-}0,45$ .
- Το αραιωμένο διάλυμα  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$  εισέρχεται στην γεννήτρια, όπου γίνεται ο καταιονισμός του στην εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων. Το διάλυμα απορροφά την λανθάνουσα θερμότητα του κινητήριου ατμού, η οποία συμπυκνώνεται στην πλευρά των σωλήνων της γεννήτριας. Η θερμοκρασιακή διαδικασία αυξάνει τη θερμοκρασία του διαλύματος σε κορεσμό και έχει ως αποτέλεσμα την εξάτμιση της ίδιας ποσότητας του νερού που απορροφάται από το διάλυμα στον απορροφητήρα. Η συγκέντρωση του συμπυκνωμένου διαλύματος και η θερμοκρασία του σχηματιζόμενου υδρατμού καθορίζουν τις συνθήκες ισορροπίας της γεννήτριας.
- Ο συνδυασμένος υδρατμός που σχηματίζεται στην γεννήτρια και στον απορροφητήρα προκαλεί την διεργασία εξάτμισης στον εξατμιστήρα. Το ρεύμα άλμης που αφήνει τον απορροφητήρα καταιονίζεται στην εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων του εξατμιστήρα, όπου απορροφά την λανθάνουσα θερμότητα από την συμπύκνωση του συμπυκνωμένου ατμού από την πλευρά των σωλήνων του εξατμιστήρα.
- Το συμπυκνωμένο ρεύμα άλμης που αφήνει τον εξατμιστήρα απορρίπτεται πάλι πίσω στη θάλασσα και ο σχηματιζόμενος υδρατμός οδηγείται στον συμπυκνωτή κατακόρυφης ροής. Το άθροισμα των συμπυκνωμάτων του ατμού θέρμανσης και του συμπυκνωμένου ατμού στον κάτω συμπυκνωτή σχηματίζει το ρεύμα του αποσταγμένου προϊόντος.
- Πλέγματα αποθάμβωσης σε διάφορες μονάδες εμποδίζουν την είσοδο παρασυρόμενων σταγονιδίων άλμης και  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ .



Εικόνα 37: Διεργασία Αφαλάτωσης Με Σύστημα Συμπύεσης Υδρατμού Με Απορρόφηση σε Μία Βαθμίδα (SE-ABVC) [1]

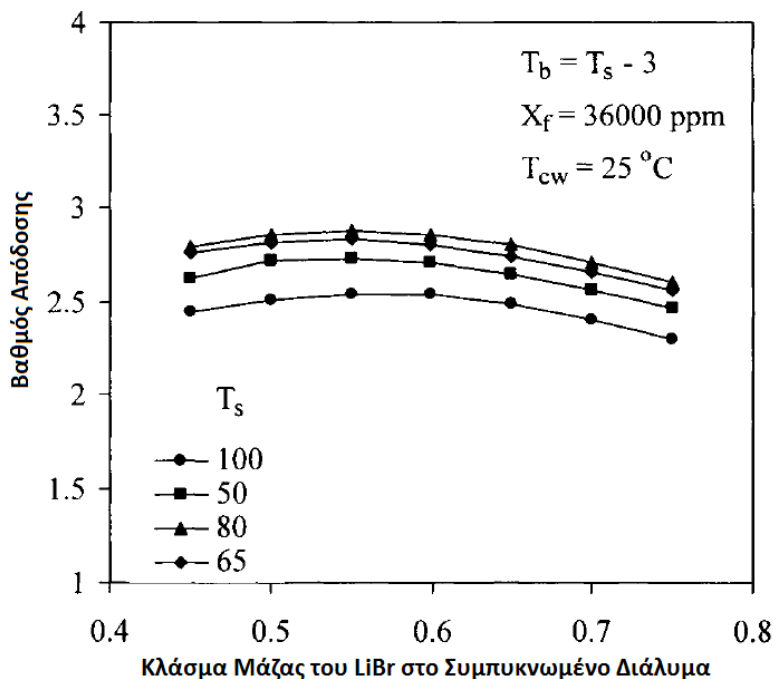
Η απόδοση του συστήματος εκτιμάται συναρτήσει τις θερμοκρασίας του ατμού θέρμανσης, της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του θερμού ατμού και της άλμης που βράζει και το κλάσμα μάζας του συμπυκνωμένου διαλύματος  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ . Οι επιδράσεις της θερμοκρασίας του θερμού ατμού και του κλάσματος μάζας του συμπυκνωμένου διαλύματος  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$  παρουσιάζονται στα διαγράμματα των **Εικόνων 38, 39** και **40**, για τις διακυμάνσεις του βαθμού απόδοσης, της ειδικής επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας και του ειδικού ρυθμού ροής του νερού ψύξης. Στα διαγράμματα αυτά μπορούμε να διακρίνουμε την αδρανή και ανεξάρτητη συμπεριφορά των παραμέτρων του συστήματος στο κλάσμα μάζας του  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$  στο συμπυκνωμένο διάλυμα. Το κύριο αποτέλεσμα της αύξησης του κλάσματος μάζας του  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$  στο συμπυκνωμένο διάλυμα είναι η αύξηση της ανάγκης για μεγαλύτερη πίεση του κινητήριου ατμού.

Παρακάτω αναλύονται οι λόγοι που ευθύνονται για αυτή την συμπεριφορά:

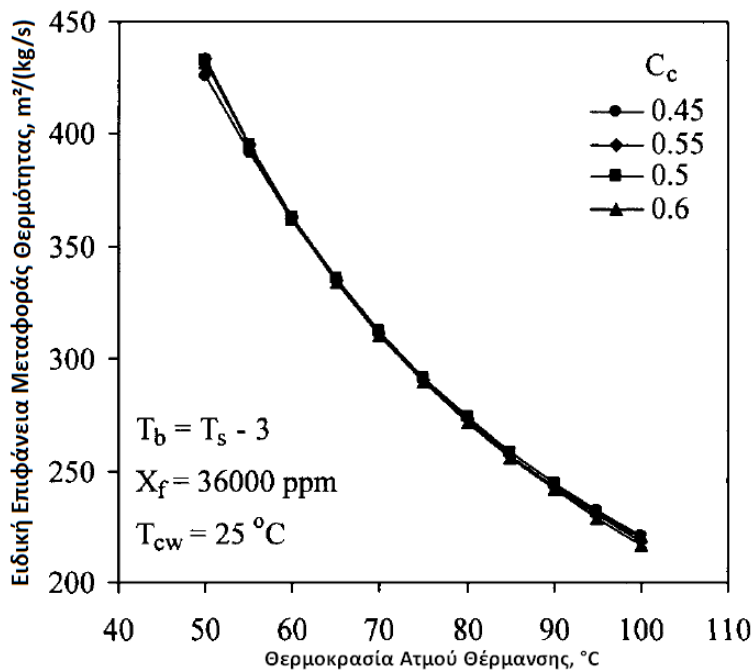
- Διάφορες θερμοκρασίες του συστήματος, στις οποίες περιλαμβάνονται αυτή του ατμού θέρμανσης, του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας, της άλμης τροφοδοσίας καθώς και η θερμοκρασία βρασμού είναι ανεξάρτητες του κλάσματος μάζας του  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$  στο συμπυκνωμένο διάλυμα. Αυτές οι θερμοκρασίες επηρεάζουν τις μεταβλητές του συστήματος, οι οποίες χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό των παραμέτρων απόδοσης του συστήματος.
- Αύξηση στο κλάσμα μάζας του  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$  στο συμπυκνωμένο διάλυμα επηρεάζει μόνο το ρυθμό ροής του συμπυκνωμένου διαλύματος. Σε υψηλότερες συγκεντρώσεις, η ενθαλπία του διαλύματος αυξάνει και έχει ως αποτέλεσμα μείωση του ρυθμού ροής του συμπυκνωμένου διαλύματος. Αυτό είναι απαραίτητο για την εξισορρόπηση της ενέργειας του συστήματος στον απορροφητήρα και στην γεννήτρια.

Στα παρακάτω διαγράμματα των **Εικόνων 38, 39** και **40**, παρουσιάζεται η επιρροή της θερμοκρασίας του θερμού ατμού στο βαθμό απόδοσης, η οποία είναι εντονότερη σε σχέση με την επιρροή του κλάσματος μάζας  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$  στο συμπυκνωμένο διάλυμα. Αυτή η συμπεριφορά είναι υπερβολική σε ότι αφορά την ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας και τον ειδικό ρυθμό ροής του νερού ψύξης. Ειδικότερα, στο διάγραμμα της **Εικόνας 38**, η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας παίρνει τιμές πάνω από  $400 \text{ m}^2/(\text{kg/s})$  για θερμοκρασίες ατμού θέρμανσης κοντά στους  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Από την άλλη πλευρά, η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας μειώνεται σε τιμές που κυμαίνονται μεταξύ  $200\text{-}250 \text{ m}^2/(\text{kg/s})$ , οι οποίες θεωρούνται κατάλληλες για βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται σε τιμές μεταξύ  $80\text{-}100^\circ\text{C}$ . Αυτή η συμπεριφορά αρχικά προκαλείται από την αύξηση στον ολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για υψηλότερες θερμοκρασίες. Έτσι, αυξάνεται το ποσοστό μεταφοράς θερμότητας και προκαλείται μείωση της απαιτούμενης επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας. Ένας λιγότερος σημαντικός παράγοντας είναι η μείωση της λανθάνουσας θερμότητας κατά την εξάτμιση ή τη συμπύκνωση για υψηλότερες θερμοκρασίες και ως αποτέλεσμα προκαλείται μείωση στο θερμικό φορτίο του εξατμιστήρα και

του συμπυκνωτή κατακόρυφης ροής. Πρέπει να τονιστεί ότι η θερμοκρασιακή διαφορά της κινητήριας δύναμης, μεταξύ του ατμού θέρμανσης και της άλμης που βράζει, δεν έχει καμία επίδραση καθώς θεωρείται σταθερή για όλη τη μελέτη.



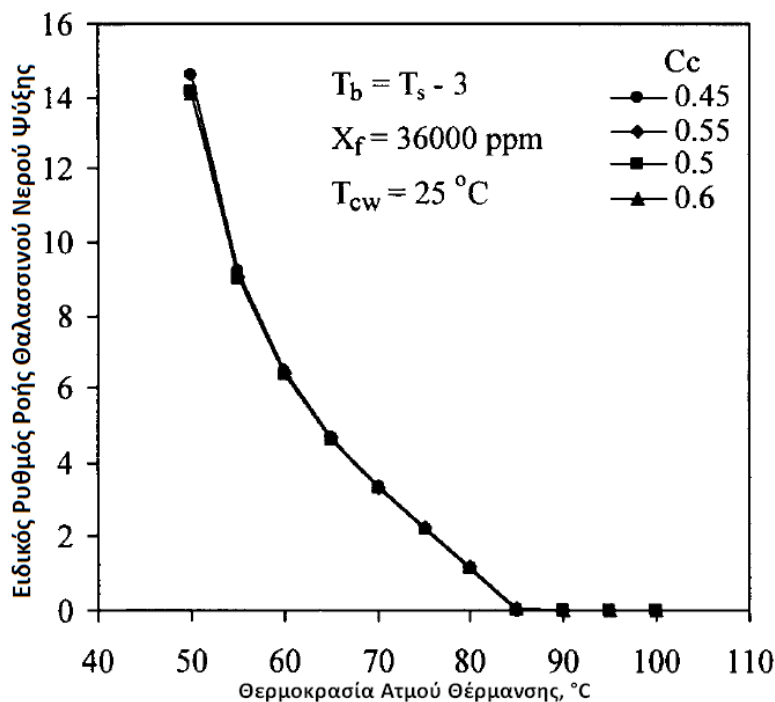
**Εικόνα 38:** Διακυμάνσεις του Βαθμού Απόδοσης σαν Συνάρτηση του Κλάσματος Μάζας του Συμπυκνωμένου Διαλύματος και της Θερμοκρασίας του Ατμού Θέρμανσης. [1]



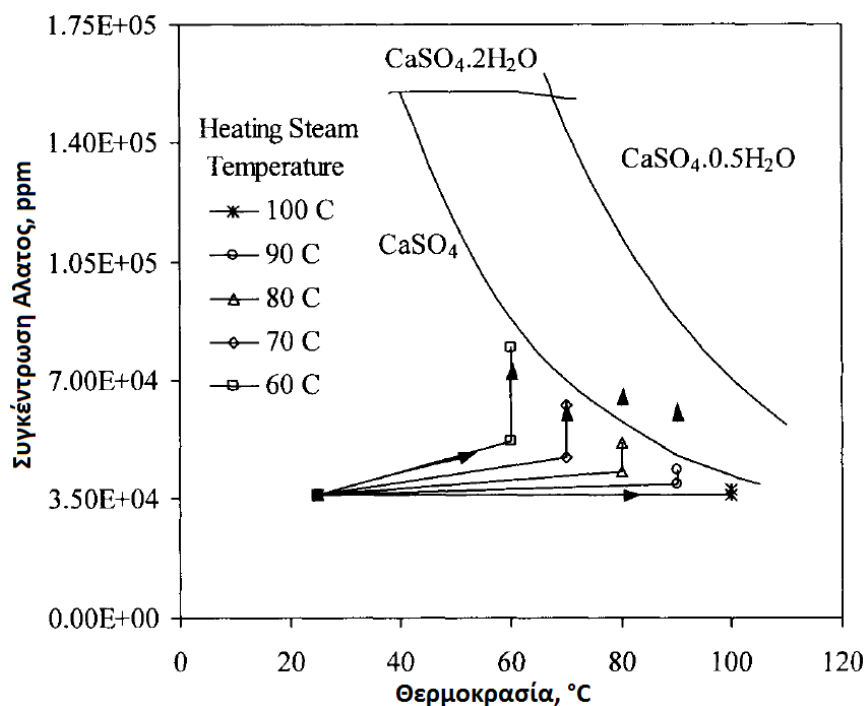
**Εικόνα 39:** Διακυμάνσεις στην Ειδική Επιφάνεια Μεταφοράς Θερμότητας Συναρτήσεσι του Κλάσματος Μάζας LiBr στο Συμπυκνωμένο Διάλυμα και της Θερμοκρασίας Ατμού Θέρμανσης. [1]

Για υψηλότερες θερμοκρασίες ατμού θέρμανσης, ο ειδικός ρυθμός ροής του νερού ψύξης γίνεται μηδέν, όπως παρουσιάζεται και στο διάγραμμα της **Εικόνας**

**40.** Αυτό οφείλεται στους περιορισμούς που επιβάλλονται στην αλατότητα του ρεύματος της άλμης η οποία απορρίπτεται από τον εξατμιστήρα, **Εικόνα 41**, όπου για υψηλότερες θερμοκρασίες η διαφορά στην αλατότητα του τροφοδοτούμενου θαλασσινού νερού και της απορριπτόμενης άλμης είναι μικρότερη από 1000-2000ppm. Εξαιτίας της σταθερής παραγωγικής ικανότητας, ο ρυθμός ροής τροφοδοσίας του θαλασσινού νερού αυξάνει σε υψηλότερες τιμές και μειώνεται ο ρυθμός ροής του θαλασσινού νερού ψύξης. Η αντίθετη συμπεριφορά λαμβάνει χώρα σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, όπου υψηλότερες αναλογίες μετατροπής πραγματοποιούνται. Έτσι μειώνεται ο ρυθμός ροής τροφοδοσίας και προκαλείται αύξηση στο ρυθμό ροής του θαλασσινού νερού ψύξης.

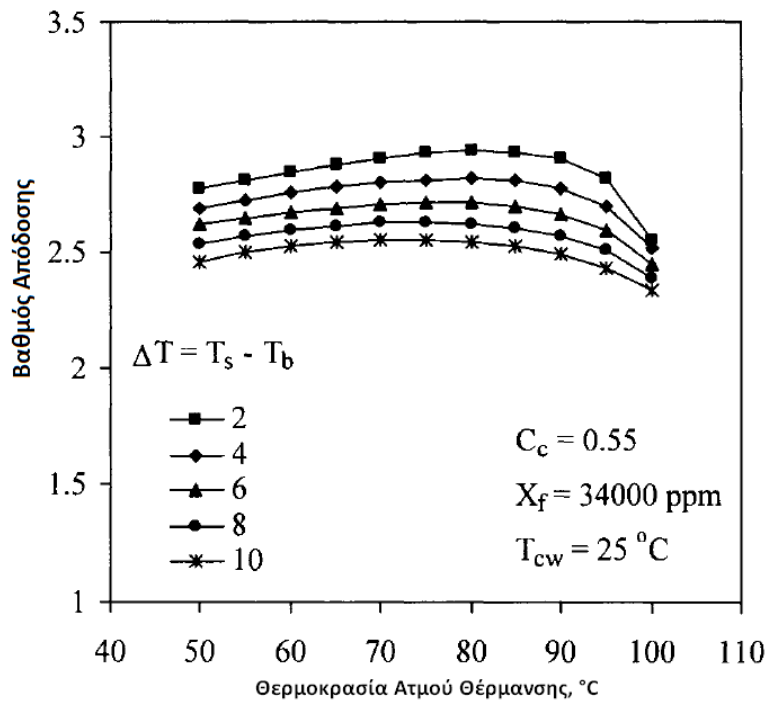


**Εικόνα 40:** Διακυμάνσεις στον Ειδικό Ρυθμό Ροής του Νερού Ψύξης Συναρτήσεως του Κλάσματος Μάζας του LiBr στο Συμπυκνωμένο Διάλυμα και της Θερμοκρασίας Ατμού Θέρμανσης. [1]

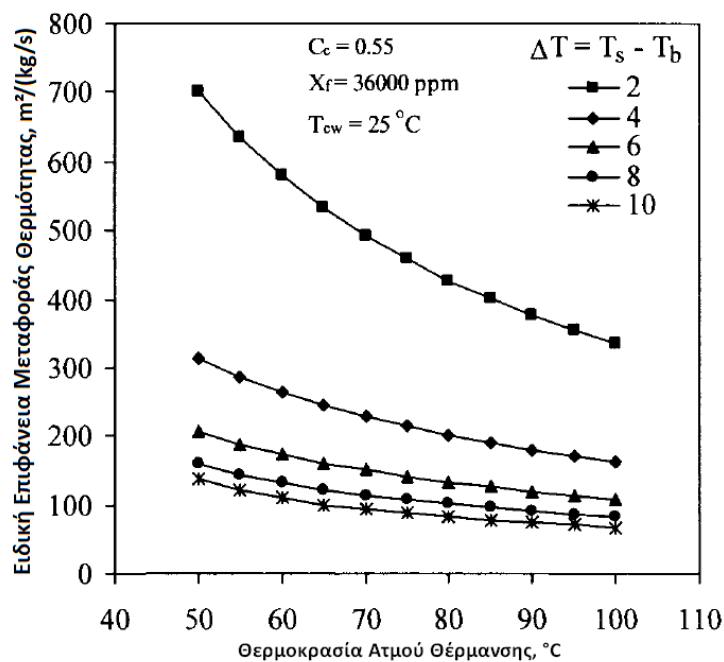


**Εικόνα 41:** Διαλυτότητα Θεικού Ασβεστίου και Υψηλότερες Θερμοκρασίες Άλμης για συστήματα ΣΥΑ (AbVC). [1]

Διακυμάνσεις του βαθμού απόδοσης του συστήματος συναρτηθεί της θερμοκρασίας του ατμού θέρμανσης και της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του ατμού θέρμανσης και της άλμης που βράζει παρουσιάζονται στα διαγράμματα των **Εικόνων 42, 43** και **44**. Όπως μπορούμε να δούμε οι δυο παράμετροι έχουν ισχυρή επίδραση στην ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας καθώς και στον ειδικό ρυθμό ροής του νερού ψύξης. Ειδικότερα, στο διάγραμμα της **Εικόνας 43**, η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Σε μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διαφορές, η κινητήρια δύναμη για την μεταφορά θερμότητας αυξάνει και ως αποτέλεσμα μειώνεται η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Συγχρόνως, αυτή η επίδραση αυξάνει την ποσότητα του αποσταγμένου προϊόντος, το οποίο αυξάνει την αναλογία μετατροπής. Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα αυξήσεις στην αναλογία αυτή σχετίζονται με την ταυτόχρονη μείωση στο ρυθμό ροής του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας και αύξησης στο ρυθμό ροής του θαλασσινού νερού ψύξης, όπως παρουσιάζεται και στο διάγραμμα της **Εικόνας 44**.

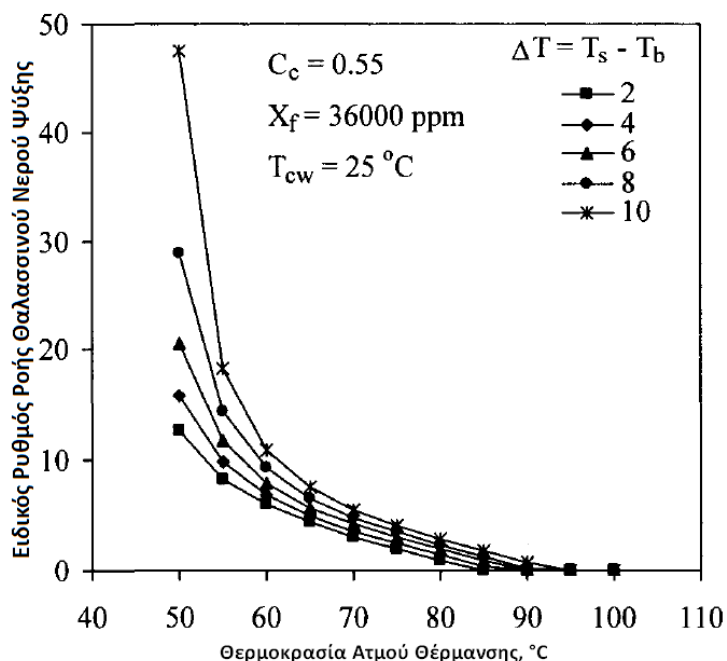


**Εικόνα 42:** Διακυμάνσεις του Βαθμού Απόδοσης συναρτήσει της Θερμοκρασιακής Διαφοράς του Θερμού Ατμού και των Υψηλών Θερμοκρασιών Άλμης και της Θερμοκρασίας Ατμού Θέρμανσης. [1]



**Εικόνα 43:** Διακυμάνσεις στην Ειδική Επιφάνεια Μεταφοράς Θερμότητας συναρτήσει της Θερμοκρασιακής Διαφοράς του Θερμού Ατμού και των Υψηλών Θερμοκρασιών Άλμης και της Θερμοκρασίας Ατμού Θέρμανσης. [1]





**Εικόνα 44:** Διακυμάνσεις στον Ειδικό Ρυθμό Ροής του Νερού Ψύξης Συναρτήσεως της Θερμοκρασιακής Διαφοράς του Θερμού Ατμού και των Υψηλών Θερμοκρασιών Άλμης και της Θερμοκρασίας Ατμού Θέρμανσης. [1]

Συνοψίζοντας, η αντλία απορρόφησης θερμότητας σε συνδυασμό με συστήματα διεργασιών αφαλάτωσης με εξάτμιση μια βαθμίδα αναλύεται συναρτήσεως των σχεδιαστικών και λειτουργικών παραμέτρων. Τα ακόλουθα αποτελέσματα έγιναν υπό το φώς των αποτελεσμάτων αναλύσεων των συστημάτων αυτών:

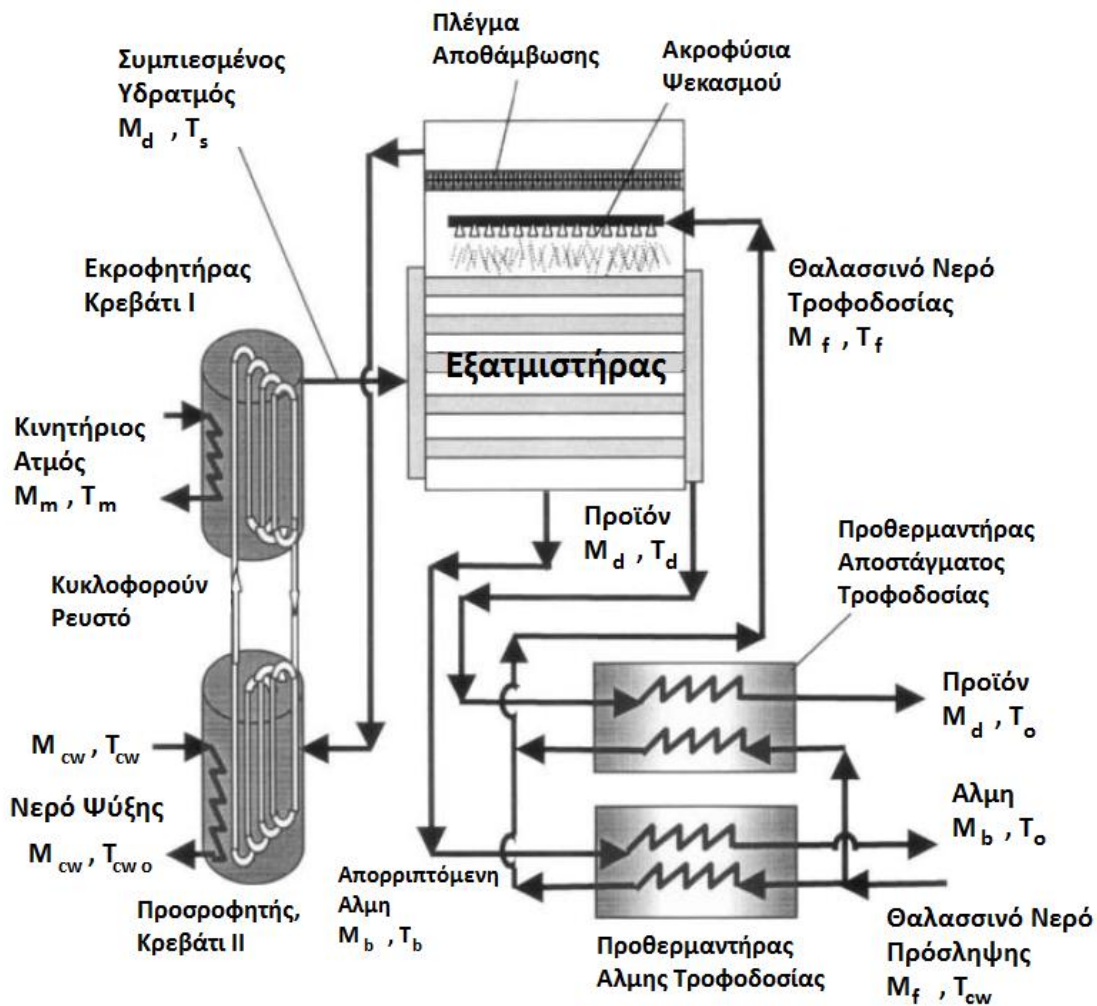
- Ο βαθμός απόδοσης κυμαίνεται σε κλίμακα τιμών 2.4-2.8 και είναι περίπου 50-70% υψηλότερος σε σχέση με αυτόν της θερμικής συμπίεσης υδρατμού μιας βαθμίδα.
- Επιδράσεις του κλάσματος μάζας του LiBr στο συμπυκνωμένο διάλυμα επιδρούν ελάχιστα στο βαθμό απόδοσης του συστήματος. Ωστόσο, η επιλογή της παραμέτρου αυτής εξαρτάται από την διαθεσιμότητα του ατμού.
- Η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του ατμού θέρμανσης και της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του ατμού θέρμανσης και της άλμης που βράζει.
- Ο ειδικός ρυθμός ροής του νερού ψύξης μειώνεται για υψηλότερες θερμοκρασίες του ατμού θέρμανσης και χαμηλότερες θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ του ατμού θέρμανσης και της άλμης που βράζει.

Εν ολίγοις, η επιλογή του βέλτιστου σχεδιασμού και των συνθηκών λειτουργίας πρέπει να συμπεριλαμβάνει ελκυστικά χαρακτηριστικά για τη λειτουργία του συστήματος σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Σε αυτές τις συνθήκες, λαμβάνει χώρα δραστηκή μείωση στον ειδικό ρυθμό ροής του νερού ψύξης και στην ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Και οι δύο παράγοντες έχουν ως αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση στο πρωταρχικό κόστος του συστήματος καθώς και στο κόστος παραγωγής.

### 2.3.5 Συμπύεση Υδρατμού Με Προσρόφηση Σε Μια Βαθμίδα (Single Effect Adsorption Vapor Compression)

Η αντλία προσρόφησης – εκρόφησης θερμότητας είναι φιλική προς το περιβάλλον. Η αντλία χρησιμοποιεί αβλαβή υγρά, τα οποία δεν συμβάλλουν στην καταστροφή του στρώματος του όζοντος. Ο ρόλος τους στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι αμελητέος, διότι μπορούν να οδηγηθούν από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή απόβλητα, αλλά και λόγω της υψηλής θερμικής αποδοτικότητάς τους. Επιπλέον, η διεργασία είναι απλή, δεν περιλαμβάνει κινούμενα μέρη, έχει μεγάλη διάρκεια ζωής και είναι απαλλαγμένη από κραδασμούς. Για αυτούς τους λόγους, τα τελευταία χρόνια, η αντλία προσρόφησης-εκρόφησης θερμότητας έχει προσελκύσει ολοένα και μεγαλύτερη προσοχή όσον αφορά την αντικατάσταση των παραδοσιακών συστημάτων που στηρίζονται σε συμπιεστές, τα οποία χρησιμοποιούν το όζον που είναι επιβλαβές υγρό για το περιβάλλον. Εφαρμογές της αντλίας προσρόφησης-εκρόφησης θερμότητας συναντάμε σε συστήματα κλιματισμού του αέρα και παραγωγής πάγου.

Το σύστημα συμπύεσης υδρατμού με προσρόφηση μιας βαθμίδας (SE-AdVC) παρουσιάζεται σχηματικά στην **Εικόνα 45**. Το σύστημα περιλαμβάνει την μονάδα εξατμιστήρα/ συμπυκνωτή, δυο κρεβάτια προσρόφησης, προθερμαντήρες τροφοδοσίας και έναν εναλλάκτη θερμότητας για το θερμικό υγρό το οποίο κυκλοφορεί μεταξύ των κρεβατιών προσρόφησης και εκρόφησης. Είναι ενδιαφέρον να αναφέρουμε ότι ο εξατμιστήρας και ο συμπυκνωτής σχηματίζουν μια ενιαία μονάδα σε αυτή την διάταξη, η οποία αντικαθιστά τον αυτόνομο συμπυκνωτή και εξατμιστήρα στις συμβατικές αντλίες προσρόφησης- εκρόφησης θερμότητας. Επίσης, οι προθερμαντήρες τροφοδοσίας είναι τύπου πλάκας και χρησιμοποιούνται για να ανταλλάσσουν θερμότητα μεταξύ του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας, του συμπυκνωμένου υδρατμού και της απορριπτόμενης άλμης. Η συσκευή προσρόφησης παίζει το ρόλο του κάτω συμπυκνωτή στα συστήματα θερμικής συμπύεσης υδρατμού, δηλαδή, είναι αυτή που απορροφά ή απορρίπτει την πλεονάζουσα θερμότητα που προστίθεται στο σύστημα στην δεύτερη συσκευή προσρόφησης.



Εικόνα 45: Εξάτμιση Μίας Βαθμίδας Οδηγούμενη από Αντλία Προσορόφησης Θερμότητας. [1]

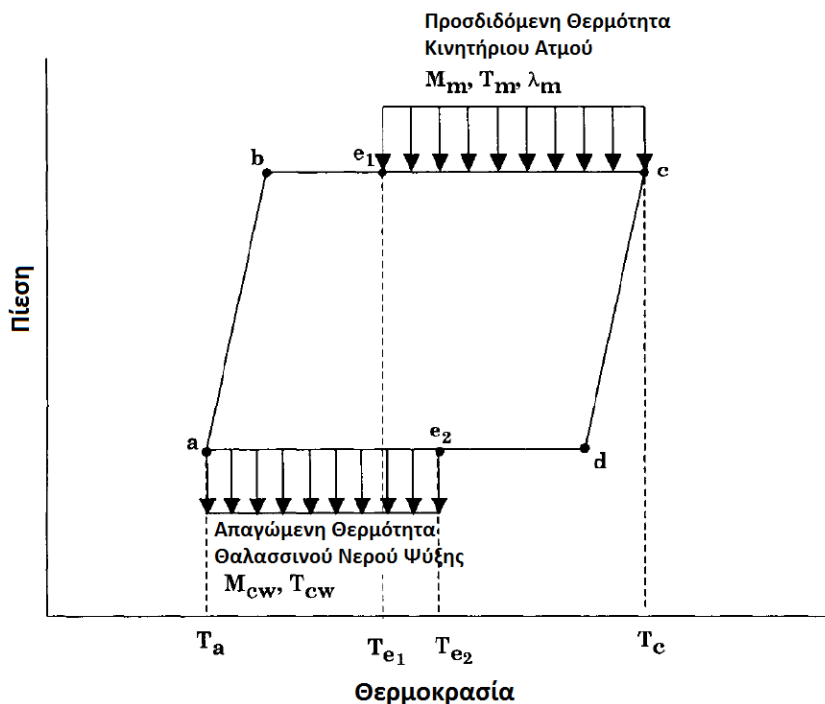
Ο κλειστός κύκλος της αντλίας θερμότητας αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

1. Αρχικά, το κρεβάτι I υποτίθεται ότι είναι κρύο και κορεσμένο με νερό. Η μάζα του κρεβατιού είναι η μάζα του προσοφημένου ( $M_z$ ) συν το συναφές νερό ( $M_a$ ). Η θερμοκρασία του κρεβατιού είναι ( $T_a$ ). Το δεύτερο κρεβάτι είναι ξηρό και θερμό σε θερμοκρασία ( $T_c$ ). Η θερμοκρασία του ψυχρού κρεβατιού ( $T_a$ ) πρέπει να είναι μικρότερη σε σχέση με τη θερμοκρασία του προσοφημένου νερού στο κρεβάτι. Η θερμοκρασία αυτή καθορίζεται από τη σχέση ισορροπίας του ζεύγους ζεόλιθος-νερό. Από την άλλη πλευρά, η θερμοκρασία του θερμού κρεβατιού ( $T_c$ ) είναι ίση με τη θερμοκρασία του ατμού θέρμανσης που ρέει στην πρώτη βαθμίδα. Το πρώτο βήμα ξεκινά όταν το κυκλοφορούν ρευστό αρχίζει να μεταφέρει θερμότητα μεταξύ των δύο κρεβατιών. Έτσι, η θέρμανση του πρώτου κρεβατιού και η ψύξη του δεύτερου πραγματοποιείται ταυτοχρόνως. Κατά την διάρκεια αυτής της φάσης, δεν ανταλλάσσεται καθόλου θερμότητα μεταξύ των συσκευών προσορόφησης, κάθε εξωτερικής πηγής θερμότητας αλλά και των λεκανών απορροής υγρού. Η θερμότητα που ρέει μέσα στην πρώτη συσκευή προσορόφησης,  $Q_{2-1}$ , αντιπροσωπεύεται από το μονοπάτι  $abe1$  στο

διάγραμμα Clapyeron της **Εικόνας 46**, ενώ η θερμότητα που μεταφέρεται από το δεύτερο κρεβάτι,  $Q_{2-1}$ , είναι η διαδρομή  $cde_2$  στο ίδιο διάγραμμα. Η διεργασία τελειώνει όταν το πρώτο κρεβάτι θερμαίνεται έως τη θερμοκρασία ( $T_{e1}$ ) και το δεύτερο ψύχεται έως ( $T_{e2}$ ). Όταν τελειώνει η μεταφορά θερμότητας θα πρέπει η ( $T_{e2}$ ) να είναι μεγαλύτερη της ( $T_{e1}$ ).

2. Το δεύτερο βήμα ξεκινά όταν το πρώτο κρεβάτι συνδέεται με μια εξωτερική πηγή ατμού θέρμανσης (boiler), όπου η θερμοκρασία του αυξάνεται από ( $T_{e1}$ ) έως ( $T_c$ ). Την ίδια στιγμή, ένα ρεύμα νερού ψύξης χρησιμοποιείται για να μειώσει τη θερμοκρασία του δεύτερου κρεβατιού από ( $T_{e2}$ ) έως ( $T_a$ ).
3. Κατά την διάρκεια της διεργασίας θέρμανσης και αφού η πίεση μέσα στο πρώτο κρεβάτι γίνει μεγαλύτερη από την πίεση του συμπυκνωτή, το κρεβάτι ανοίγει από την πλευρά του εξατμιστήρα του σωλήνα, όπου ο παραγόμενος ατμός συμπυκνώνεται.
4. Την ίδια στιγμή, όταν η πίεση στο δεύτερο κρεβάτι γίνει μικρότερη από αυτή του εξατμιστήρα, το κρεβάτι ανοίγει από την πλευρά του κελύφους του εξατμιστήρα, όπου σχηματίζεται ο υδρατμός και ο οποίος στην συνέχεια ρέει προς το κρεβάτι όπου προσροφάται.

Τα τέσσερα αυτά βήματα περιγράφουν το πρώτο μισό του κύκλου αντλίας θερμότητας. Το δεύτερο μισό του κύκλου δημιουργείται από την κυκλοφορία του υγρού μεταφοράς θερμότητας κατά την αντίθετη κατεύθυνση. Κατά την διάρκεια του δεύτερου μισού του κύκλου, το κρεβάτι I κρυώνει και προσροφά υδρατμό από τον εξατμιστήρα. Την ίδια στιγμή, το κρεβάτι II θερμαίνεται και παράγει ατμό θέρμανσης, ο οποίος συμπυκνώνεται μέσα στους σωλήνες του εξατμιστήρα.

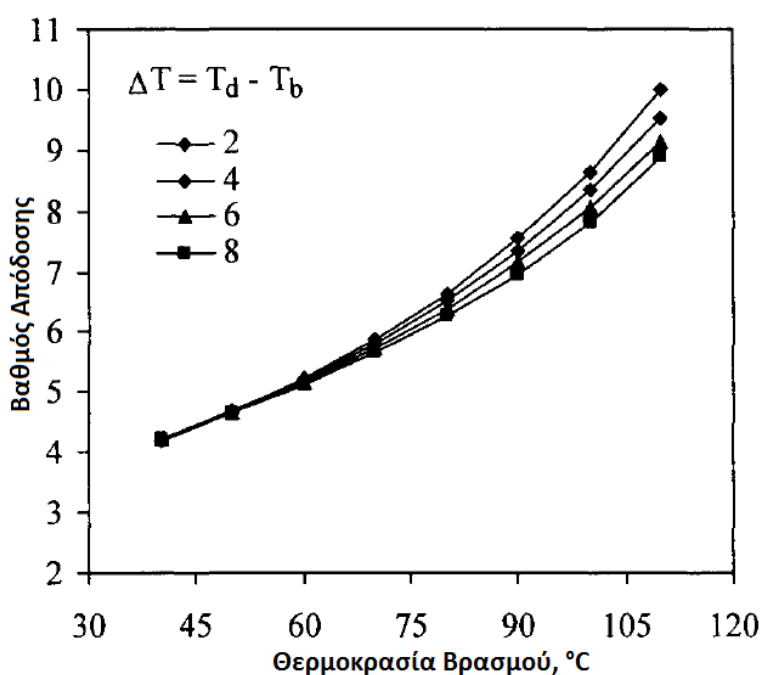


**Εικόνα 46:** Διάγραμμα Clapyeron για την προσρόφηση/ εκρόφηση κύκλου συμπίεσης υδρατμού. [1]

Η απόδοση του συστήματος εκτιμάται σαν συνάρτηση των ακόλουθων παραμέτρων:

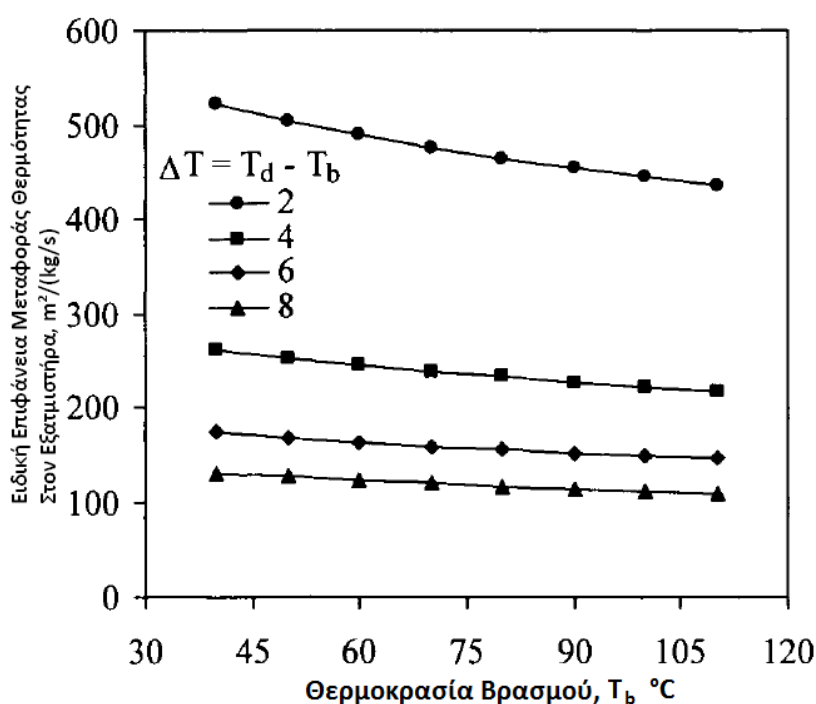
- Της θερμοκρασίας βρασμού της άλμης, ( $T_b$ ).
- Της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ της θερμοκρασίας του συμπυκνωμένου υδρατμού και της άλμης που βράζει, ( $T_d - T_b$ ).
- Το νερό που περιέχεται στο κρύο κρεβάτι προσρόφησης, ( $\alpha_a$ ).

Αναλυτικά, μεταβολές στο θερμικό βαθμό απόδοσης παρουσιάζονται στο διάγραμμα της **Εικόνας 47**, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας βρασμού της άλμης ( $T_b$ ) και της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του συμπυκνωμένου υδρατμού και της άλμης που βράζει ( $T_d - T_b$ ). Όπως μπορούμε να δούμε ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυξάνει για υψηλότερες θερμοκρασίες βρασμού και μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ του συμπυκνωμένου υδρατμού και της άλμης που βράζει. Σύμφωνα με το διάγραμμα, θερμικός βαθμός απόδοσης κοντά στο 10 μπορεί να επιτευχθεί όταν η θερμοκρασίες βρασμού φτάνει στους 110 °C. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η επίτευξη τόσο υψηλού θερμικού βαθμού απόδοσης υπόκειται στη μείωση του νερού που περιέχεται στην συσκευή προσρόφησης στο σημείο (g) και σε τιμές μεταξύ 0 και 0,01 kg H<sub>2</sub>O/kg ζεόλιθου. Από την άλλη πλευρά, ο θερμικός βαθμός απόδοσης κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 4-5 για θερμοκρασίες της άλμης που βράζει μεταξύ 40-60°C. Η ανώτατη απόδοση των ΣΥΠ είναι σίγουρα ανώτερη σε σύγκριση με άλλα συστήματα μιας βαθμίδας.

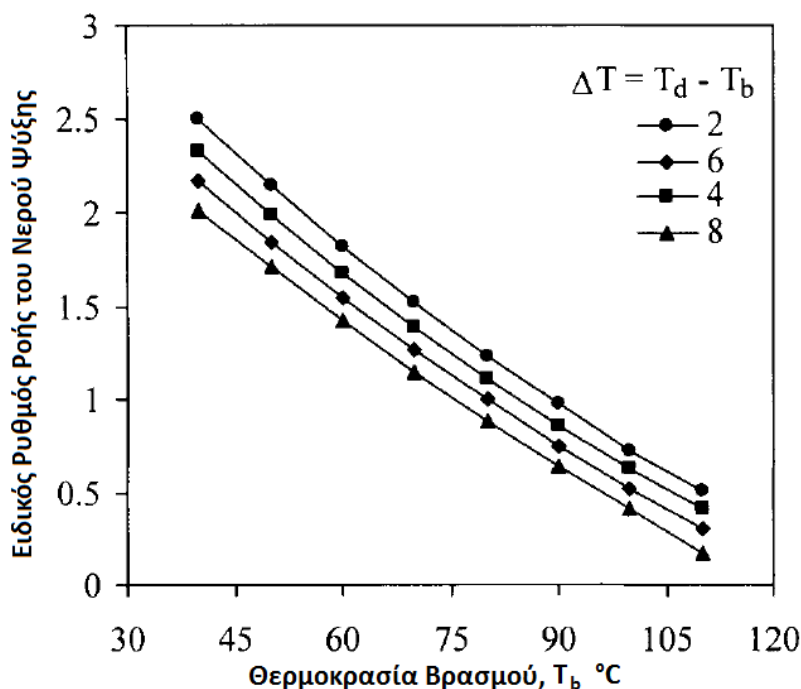


**Εικόνα 47:** Επίδραση της Θερμοκρασίας Βρασμού και της Θερμοκρασιακής Διαφοράς του Συμπυκνωμένου Υδρατμού και της Άλμης που Βράζει στο Θερμικό Βαθμό Απόδοσης σε συστήματα ΣΥΠ (AdVC). [1]

Ανεξάρτητα από υψηλούς θερμικούς βαθμούς απόδοσης, τα ΣΥΠ έχουν παρόμοια σχεδιαστικά χαρακτηριστικά με άλλα συστήματα συμπίεσης υδρατμού μιας βαθμίδας. Όπως παρουσιάζεται και στο διάγραμμα της **Εικόνας 48**, η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας του εξατμιστήρα μειώνεται δραστικά με την αύξηση της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του συμπυκνωμένου υδρατμού και της άλμης που βράζει. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας της κινητήριας δύναμης μεταξύ του συμπυκνωμένου υδρατμού και της άλμης που βράζει. Μια παρόμοια επίδραση λαμβάνει χώρα στον εναλλάκτη θερμότητας του θαλασσινού νερού ψύξης, **Εικόνας 49**, όπου η αύξηση της θερμοκρασίας του συστήματος προκαλεί αύξηση στην κινητήρια δύναμη μεταξύ του κρεβατιού και του ρεύματος θαλασσινού νερού ψύξης. Αυτό με τη σειρά του μειώνει το ρυθμό ροής του ρεύματος του θαλασσινού νερού ψύξης.

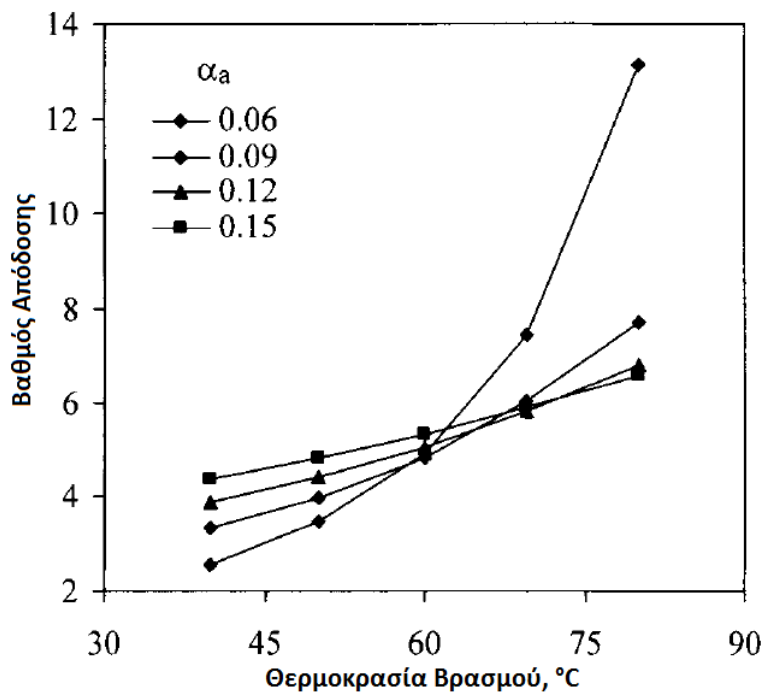


**Εικόνα 48:** Επίδραση της Θερμοκρασίας Βρασμού και της Θερμοκρασιακής Διαφοράς του Συμπυκνωμένου Υδρατμού και της Άλμης που Βράζει στην Ειδική Επιφάνεια Μεταφοράς Θερμότητας του Εξατμιστήρα σε συστήματα ΣΥΠ (AdVC). [1]

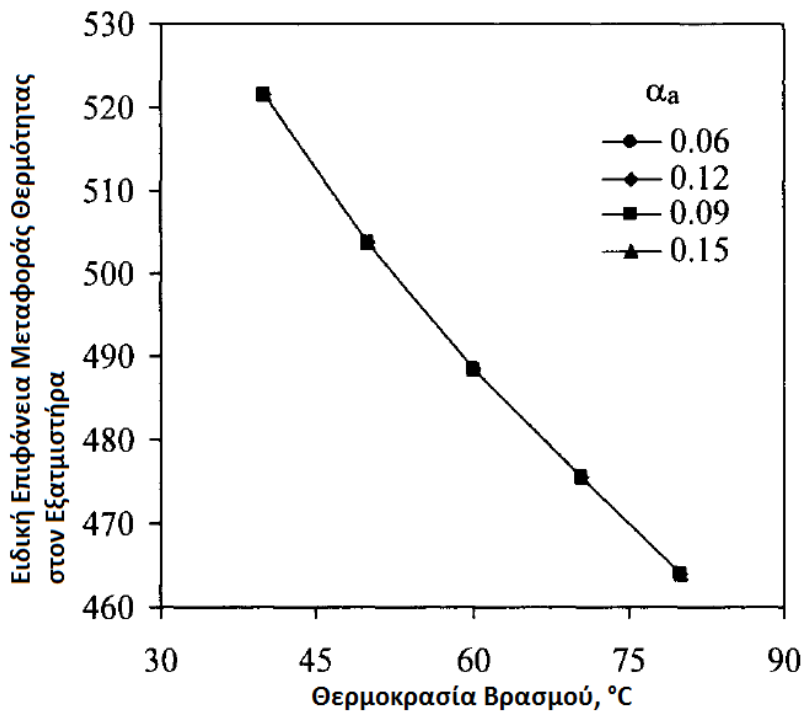


**Εικόνα 49:** Επίδραση της Θερμοκρασίας Βρασμού και της Θερμοκρασιακής Διαφοράς του Συμπυκνωμένου Υδρατμού και της Άλμης που Βράζει στον Ειδικό Ρυθμό Ροής του Νερού Ψύξης σε συστήματα ΣΥΠ (AdVC). [1]

Η απόδοση του συστήματος σαν συνάρτηση του νερού που περιέχεται στην συσκευή προσρόφησης στο σημείο (a) και στη θερμοκρασία βρασμού της άλμης παρουσιάζονται στα διαγράμματα των **Εικόνων 50, 51** και **52**. Ειδικότερα στο διάγραμμα της **Εικόνας 50** ο θερμοκός βαθμός απόδοσης κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 2 και 7. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο υψηλός βαθμός απόδοσης των 13 μπορεί μόνο να επιτευχθεί εάν το νερό που περιέχεται στη συσκευή της προσρόφησης στο σημείο (g) μειωθεί σε τιμές μικρότερες του 0,01 kg H<sub>2</sub>O/kg ζεόλιθου. Στο διάγραμμα της **Εικόνας 51**, η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας του εξατμιστήρα δεν έχει καμία εξάρτηση με το νερό που περιέχεται στο κρεβάτι για προσρόφηση στο σημείο (a) και εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία βρασμού της άλμης. Όσο για τον ειδικό ρυθμό ροής του νερού ψύξης, αυτός εξαρτάται και από τις δυο παραμέτρους, και έτσι μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας βρασμού της άλμης. Η επίδραση του νερού που περιέχεται στην συσκευή προσρόφησης ποικίλει, όπου για χαμηλές θερμοκρασίες βρασμού η αύξηση μειώνει τον ειδικό ρυθμό ροής του νερού ψύξης. Η αντίθετη επίδραση περιέχεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες βρασμού.

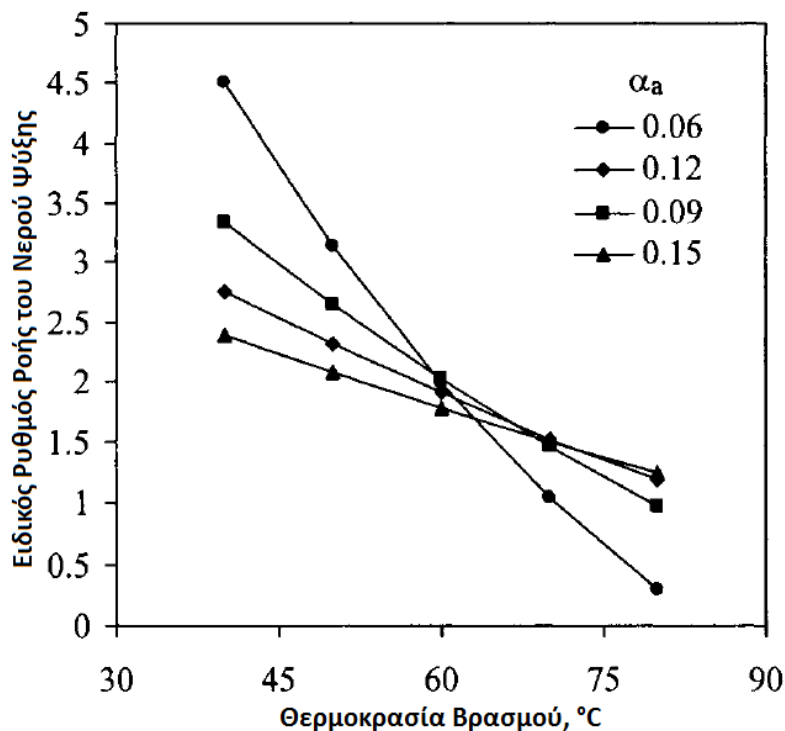


**Εικόνα 50:** Επίδραση της Θερμοκρασίας Βρασμού και του Νερού που Περιέχεται στη Συσκευή Προσρόφησης στο σημείο (α) στο θερμικό βαθμό απόδοσης σε συστήματα ΣΥΠ (AdVC). [1]



**Εικόνα 51:** Επίδραση της Θερμοκρασίας Βρασμού και του Νερού που Περιέχεται στη Συσκευή Προσρόφησης στο σημείο (α) στην Ειδική Επιφάνεια Μεταφοράς Θερμότητας του Εξατμιστήρα σε συστήματα ΣΥΠ (AdVC). [1]





**Εικόνα 52:** Επίδραση της Θερμοκρασίας Βρασμού και του Νερού που Περιέχεται στη Συσκευή Προσρόφησης στο σημείο (α) στον Ειδικό Ρυθμό Ροής του Νερού Ψύξης σε συστήματα ΣΥΠ. [1]

Συνοψίζοντας, τα συστήματα ΣΥΠ (AdVC) είναι από τα πιο αποτελεσματικά συστήματα αφαλάτωσης με συμπίεση υδρατμού σε μια βαθμίδα. Το σύστημα περιλαμβάνει συμβατική μονάδα διεργασίας, την οποία συναντάμε και σε άλλες διατάξεις συστημάτων μιας βαθμίδας, όπως επίσης εξατμιστήρα και προθερμαντήρες τροφοδοσίας. Επιπλέον, η αντλία θερμότητάς τους είναι απλή και περιλαμβάνει δύο κρεβατίνα με ζεόλιθο για προσρόφηση και εκρόφηση. Η λειτουργία αυτών των κρεβατιών ελέγχεται από την σχεδιαστική πίεση και τη θερμοκρασία προσρόφησης του υδρατμού και του παραγόμενου συμπιεσμένου υδρατμού. Επιπλέον, η ολική απόδοση του συστήματος μελετάται σαν συνάρτηση των κύριων σχεδιαστικών και λειτουργικών παραμέτρων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάστηκαν σε σχέση με διακυμάνσεις του θερμικού βαθμού απόδοσης, της ειδικής επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας του εξατμιστήρα και του ειδικού ρυθμού ροής του νερού ψύξης. Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος είναι ο υψηλότερος μεταξύ όλων των άλλων συστημάτων συμπίεσης υδρατμού σε μια βαθμίδα. Επίσης, η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας για τον εξατμιστήρα και ο ειδικός ρυθμός ροής νερού ψύξης είναι παρόμοια στα συστήματα.

### 2.3.6 Πολλαπλή Εξάτμιση (Multiple Effect Evaporation)

Τα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης (MEE) σχηματίζονται από μια ακολουθία εξατμιστήρων μιας βαθμίδας, όπου ο υδρατμός που σχηματίζεται στη μια βαθμίδα χρησιμοποιείται στην επόμενη. Η επαναχρησιμοποίηση του υδρατμού στα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης επιτρέπει μείωση της άλμης και της θερμοκρασίας σε χαμηλές τιμές και εμποδίζει την αποβολή μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας στο περιβάλλον, το οποίο ήταν και το μοναδικό μειονέκτημα των συστημάτων εξάτμισης υδρατμού μιας βαθμίδας. Εκτός από την βιομηχανία αφαλάτωσης, ο κύριος όγκος χρήσης των συστημάτων πολλαπλής εξάτμισης (MEE) βρίσκεται στον τομέα των τροφίμων, χαρτοπολτού και χαρτιού, πετρελαίου και βιομηχανίας πετροχημικών. Αναφορικά, οι ρίζες της πολλαπλής εξάτμισης χρονολογούνται πίσω στο 19 αιώνα με την ανάπτυξη της βιομηχανίας ζάχαρης, όπου ήταν απαραίτητη η χρήση αποτελεσματικής διεργασίας εξάτμισης ώστε να παραχθεί καλή ποιότητα κρυσταλλικής ζάχαρης σε χαμηλές τιμές.

Αν και τα πρώτα έργα αφαλάτωσης άνηκαν στον τύπο εξάτμισης η χρήσης τους δεν ήταν διαδεδομένη σε πλήρη βιομηχανική κλίμακα εξαιτίας της περιορισμένης εμπειρίας στο σχεδιασμό και στην λειτουργία των συστημάτων αυτών. Τα συστήματα αυτά μαστίζονται από υπερβολική μόλυνση, ιζηματοποίηση και διάβρωση. Ωστόσο, η συσσώρευση εμπειριών κατά το δεύτερο μισό του περασμένου αιώνα στις θερμικές διεργασίες αφαλάτωσης, στις οποίες ηγείται η πολυβάθμια εκτόνωση, έχουν οδηγήσει στη ραγδαία εξέλιξη και ανάπτυξη για αποτελεσματική και οικονομική χημική μεταχείριση ώστε να αποφευχθεί η μόλυνση, η δημιουργία ιζημάτων καθώς και η διάβρωση. Τέτοιες εξελίξεις καθιστούν ικανή τη διατήρηση των παραγόντων του έργου σε υψηλά επίπεδα του 90% και να κρατήσουν τα έργα αυτά σε συνεχή λειτουργία για περισσότερο από 2 χρόνια. Σαν αποτέλεσμα, πρόσφατη έρευνα, ανάπτυξη, έργα πιλοτικής λειτουργίας και τα πεδία αποτελεσμάτων δείχνουν ανώτατη απόδοση και πολλά ελκυστικά χαρακτηριστικά της πολλαπλής εξάτμισης σε σύγκριση με την προκάτοχό της, πολυβάθμια εκτόνωση.

Η διεργασία πολλαπλής εξάτμισης (MEE) μπορεί να ρυθμιστεί για λειτουργία με μπροστά (Forward Feed), προς τα πίσω (Backward Feed) ή παράλληλη τροφοδοσία (Parallel Feed), **Εικόνας 52**. Οι τρεις αυτές ρυθμίσεις διαφέρουν στις κατευθύνσεις της ροής του ατμού θέρμανσης και της εξατμισμένης άλμης. Η επιλογή μεταξύ αυτών των τριών βασίζεται στην διακύμανση της διαλυτότητας του αλατιού σαν συνάρτηση της υψηλότερης θερμοκρασίας άλμης καθώς και της μέγιστης συγκέντρωσης της άλμης. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες ή υψηλότερες συγκεντρώσεις άλμης, η δημιουργία ιζημάτων λαμβάνει χώρα τόσο στην εσωτερική όσο και στην εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα ακόλουθα:

- Μείωση της διαθέσιμης επιφάνειας ροής στο εσωτερικό των σωλήνων, η οποία προκαλεί αύξηση στην πτώση πίεσης και στην ενέργεια άντλησης.

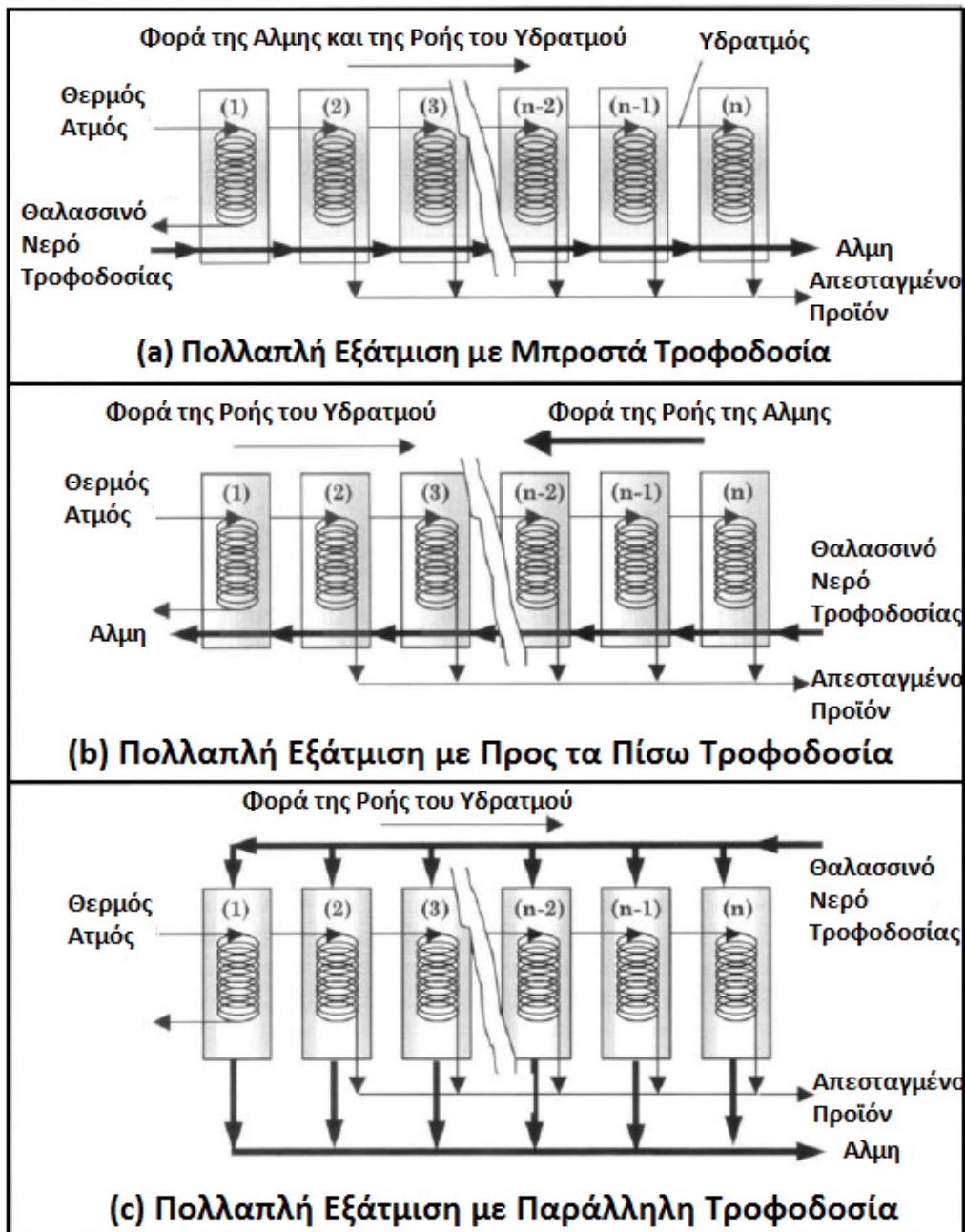
- Αύξηση της θερμικής αντίστασης για τη μεταφορά θερμότητας. Αυτό μειώνει την αποτελεσματικότητα της μεταφοράς θερμότητας, η οποία προκαλεί με τη σειρά της μικρότερο ρυθμό ροής προϊόντος.

Στην **Εικόνα 53** μπορούμε να δούμε τις διακυμάνσεις της διαλυτότητας του θειικού ασβεστίου σαν συνάρτηση της συγκέντρωσης και της θερμοκρασίας. Το διάγραμμα αυτό απεικονίζονται τα όρια διαλυτότητας των ενώσεων του θειικού ασβεστίου καθώς και οι διακυμάνσεις στα προφίλ της θερμοκρασίας-συγκέντρωσης για τους τρεις τύπους της πολλαπλής εκτόνωσης. Τα προφίλ αυτά αφορούν το θαλασσινό νερό και την άλμη κατά την διάρκεια της ροής τους στους προθερμαντήρες του συστήματος και τους εξατμιστήρες.

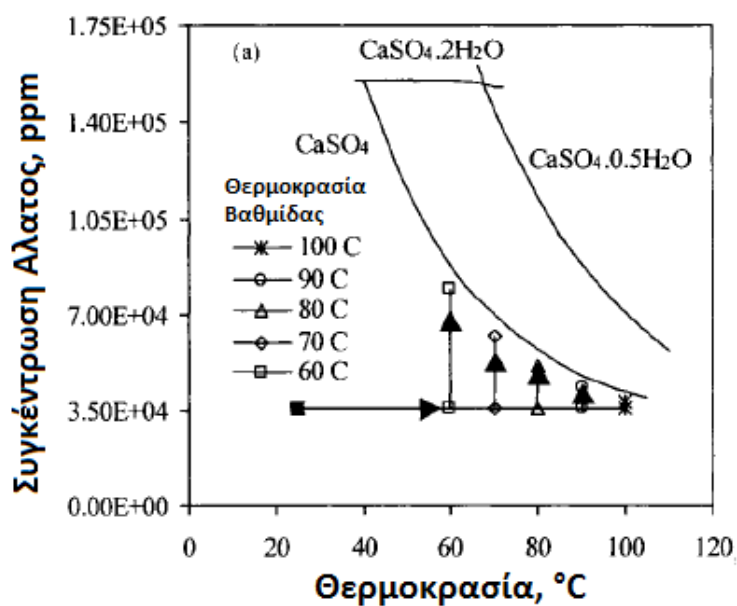
Στην προς τα πίσω τροφοδοσία (BF), το θαλασσινό νερό εισάγεται στην τελευταία βαθμίδα, η οποία έχει την χαμηλότερη θερμοκρασία και πίεση από αυτές του συστήματος. Η άλμη ρέει εντός διαδοχικών βαθμίδων προς την πρώτη βαθμίδα. Η αύξηση στην πίεση και στη θερμοκρασία κατά μήκος των βαθμίδων επιβάλλει τη χρήση μονάδων άντλησης της άλμης μεταξύ των βαθμίδων. Αυτό αποτελεί και ένα τεράστιο μειονέκτημα στα συστήματα προς τα πίσω τροφοδοσίας (BF), εξαιτίας της αύξησης της ενέργειας άντλησης, του κόστους συντήρησης και της αύξησης στο σημείο διαρροής του αέρα μέσω των συνδέσεων της αντλίας. Το δεύτερο μειονέκτημα του συστήματος παρουσιάζεται στο διάγραμμα της **Εικόνας 53c**, όπου η άλμη με την υψηλότερη συγκέντρωση υπόκειται στην υψηλότερη θερμοκρασία του συστήματος. Όπως μπορούμε να δούμε, το προφίλ θερμοκρασίας-συγκέντρωσης τέμνει τα όρια της διαλυτότητας για το θειικό ασβέστιο. Οι δύο παραπάνω παράγοντες κάνουν τα συστήματα με προς τα πίσω τροφοδοσία ακατάλληλα για αφαλάτωση θαλασσινού νερού.

Κάποια παραδείγματα βιομηχανικής εφαρμογής για συστήματα πολλαπλής εξάτμισης (MEE) με παράλληλη τροφοδοσία μπορούν να βρεθούν σε βιβλιογραφία, επίσης η σχηματική απεικόνιση του συστήματος δίνεται στην **Εικόνα 52c** ενώ το προφίλ θερμοκρασίας-συγκέντρωσης παρουσιάζεται στα διαγράμματα των **Εικόνων 53a** και **Εικόνων 53b**. Σε αυτή την διαρρύθμιση, η τροφοδοσία του θαλασσινού νερού χωρίζεται σε ένα σύνολο παράλληλων ρευμάτων, τα οποία τροφοδοτούν τις επιμέρους βαθμίδες. Σε κάθε βαθμίδα το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας θερμαίνεται στη θερμοκρασία κορεσμού της βαθμίδας, πριν ξεκινήσει η εξάτμιση. Τα ο κύριο πλεονέκτημα των συστημάτων παράλληλης τροφοδοσίας (PF) είναι η απλότητα της διαρρύθμισής τους σε σύγκριση με τους άλλους δύο τύπους.

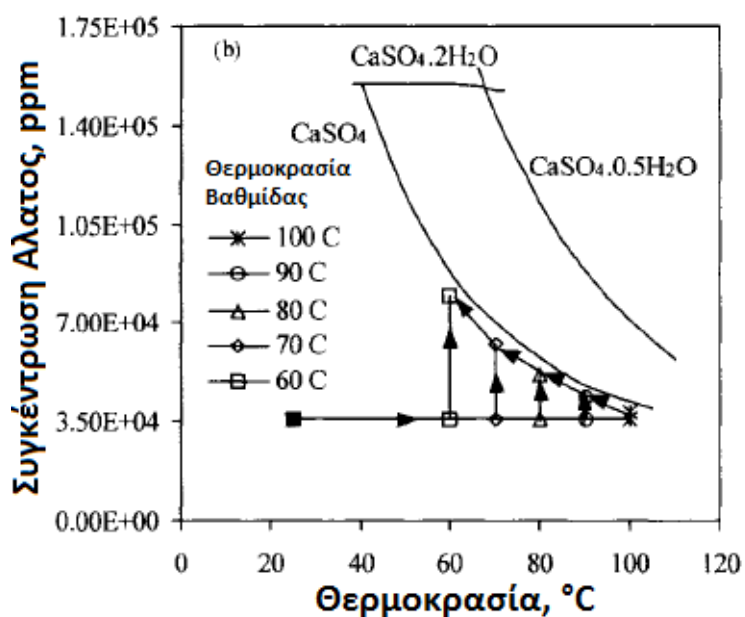
Το κύριο χαρακτηριστικό των συστημάτων με μπροστά τροφοδοσία (FF) είναι η ικανότητα να λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες άλμης. Λεπτομερής εκτίμηση των συστημάτων αυτών δίνεται στα παρακάτω κεφάλαια.



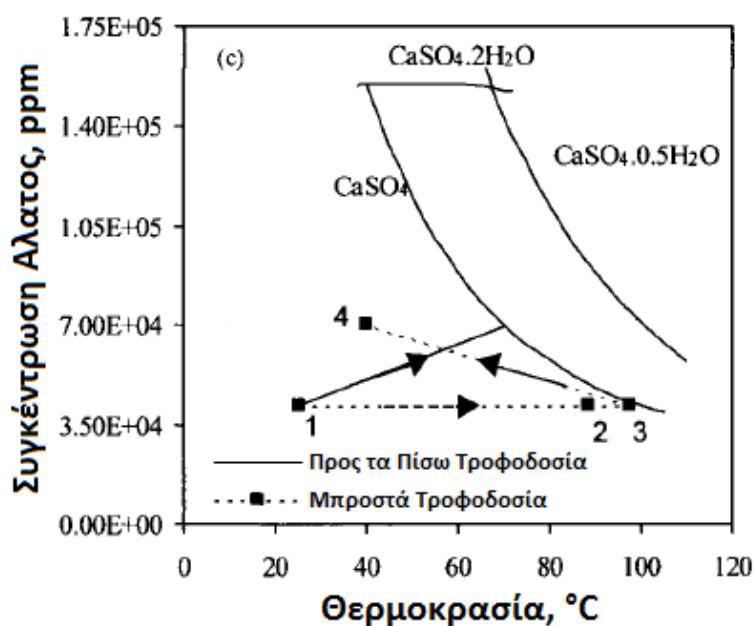
Εικόνα 52: Οι Τρεις Διαρρυθμίσεις της Πολλαπλής Εξάτμισης (ΜΕΕ). [1]



**Εικόνα 53a:** Διαλυτότητα Θεικού Ασβεστίου και Υψηλή Θερμοκρασία Άλμης για Σύστημα Πολλαπλής Εξάτμισης με Παράλληλη Τροφοδοσία (MEE-PF). [1]



**Εικόνα 53b:** Διαλυτότητα Θεικού Ασβεστίου και Υψηλή Θερμοκρασία Άλμης για Σύστημα Πολλαπλής Εξάτμισης με Παράλληλη/Διασταυρωμένη Τροφοδοσία (MEE-PCF). [1]



**Εικόνα 53c:** Διαλυτότητα Θεικού Ασβεστίου και Υψηλή Θερμοκρασία Άλμης για Σύστημα Πολλαπλής Εξάτμισης με Προς τα Πίσω και Μπροστά Τροφοδοσία (MEE-BF). [1]

### 2.3.6.a Πολλαπλή Εξάτμιση Με Μπροστά Τροφοδοσία (Multiple Effect Evaporation with Forward Feed)

Αν και το σύστημα πολλαπλής εξάτμισης με μπροστά τροφοδοσία (MEE-FF) δεν το συναντάμε σε βιομηχανική κλίμακα για χρήση σε διεργασίες αφαλάτωσης, είναι ευρέως χρησιμοποιούμε στη βιομηχανία ζάχαρης και χαρτιού. Το σύστημα μπροστά τροφοδοσίας (FF) δεν χρησιμοποιείται τόσο στη βιομηχανία αφαλάτωσης λόγω της συνθετότερης διάταξής του σε σχέση με το σύστημα παράλληλης τροφοδοσίας. Επιπλέον, το πρώτο σύστημα πολλαπλής εξάτμισης (MEE) που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ήταν αυτό της παράλληλης τροφοδοσίας (FF). Πεδίο αποτελεσμάτων των παράλληλων μονάδων ισχύος απέδειξε την αξιοπιστία τους, έτσι ως αποτέλεσμα οι μονάδες έκτοτε παρέμειναν σε αυτό το σχεδιασμό.

Ένα σχηματικό διάγραμμα του συστήματος αυτού παρουσιάζεται στην **Εικόνα 54**, και περιλαμβάνει τους εξατμιστήρες, ίσους με  $n$ , μια σειρά με προθερμαντήρες τροφοδοσίας, ίσους με  $n-2$ , μια σειρά από θαλάμους εκτόνωσης, ίσους με  $n-1$ , έναν συμπυκνωτή κατακόρυφης ροής και ένα σύστημα εξαερισμού. Στην διαρρύθμιση της μπροστά τροφοδοσίας, η φορά ροής της θερμότητας, της άλμης καθώς και του υδρατμού είναι από τα αριστερά προς τα δεξιά, δηλαδή από την βαθμίδα 1 στη βαθμίδα  $n$ . Κάθε βαθμίδα περιέχει σωλήνες ανταλλαγής θερμότητας, θάλαμο υδρατμού, ακροφύσια ψεκασμού άλμης, απαγωγέα ομίχλης

και ένα κουτί συλλογής της άλμης. Ο εξατμιστήρας δημιουργίας πίπτουσας στοιβάδας με οριζόντιους σωλήνες είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος στα συστήματα πολυβάθμιας εξάτμισης. Τα πλεονεκτήματα του συστήματος οριζόντιων σωλήνων είναι:

- Αποτελεσματική υδροδότηση και ύγρανση σωλήνων
- Υψηλά ποσοστά μεταφοράς θερμότητας
- Απουσία ξηρών περιοχών
- Μικρός σχηματισμός ιζημάτων και καταστροφή σωλήνων
- Κατάλληλος εξαερισμός των μη συμπυκνώσιμων αερίων, και
- Απλή καταγραφή της ιζηματοποίησης και της ρύπανσης.

Το κύριο μειονέκτημα του συστήματος πολλαπλής εξάτμισης (ΜΕΕ) με δημιουργία πίπτουσας στοιβάδας σε διάταξη οριζόντιων σωλήνων είναι η δημιουργία ιζημάτων καθώς και η ρύπανση στο εξωτερικό των σωλήνων. Αυτό δεν επιτρέπει τη χρήση του συστήματος καθαρισμού μπάλας, κοινή στην εσωτερική ροή του θαλασσινού νερού. Τέτοια συστήματα έχει αποδεχτεί ότι μειώνουν την ιζηματοποίηση και τη ρύπανση στο εσωτερικό κατά 50% της σχεδιαστικής τιμής.

Το θαλασσινό νερό πρόσληψης ρέει προς το συμπυκνωτή της τελευταίας βαθμίδας με ρυθμό ροής ( $M_{cw} + M_f$ ). Το ρεύμα αυτό απορροφά τη λανθάνουσα θερμότητα των υδρατμών που σχηματίζονται στη τελευταία βαθμίδα και στον τελευταίο θάλαμο εκτόνωσης. Το ρεύμα θαλασσινού νερού θερμαίνεται από την θερμοκρασία πρόσληψης ( $T_{cw}$ ), σε υψηλότερη θερμοκρασία ( $T_f$ ). Η λειτουργία του θαλασσινού νερού ψύξης ( $M_{cw}$ ) είναι να αφαιρεί την περίσσεια θερμότητα που προστίθεται στο σύστημα στην πρώτη βαθμίδα από τον κινητήριο ατμό. Στην τελευταία βαθμίδα, αυτή η θερμότητα είναι ισοδύναμη με τη λανθάνουσα θερμότητα των υδρατμών που έχουν βράσει. Από την άλλη πλευρά, το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας ( $M_f$ ) θερμαίνεται από τους εκτονωμένους υδρατμούς που σχηματίζονται στη τελευταία βαθμίδα και το σχετικό θάλαμο εκτόνωσης. Το θαλασσινό νερό ψύξης ( $M_{cw}$ ) απορρίπτεται πίσω στη θάλασσα. Το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας ( $M_f$ ) έχει υποστεί χημική επεξεργασία, εξαέρωση και έχει αντληθεί από μια σειρά προθερμαντήρων. Η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας αυξάνει από ( $T_f$ ) σε ( $t_2$ ) καθώς ρέει στο εσωτερικό των σωλήνων του προθερμαντήρα. Θέρμανση του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας γίνεται από τη συμπύκνωση των εκτονωμένων υδρατμών από τις βαθμίδες και το θάλαμο εκτόνωσης. Το νερό τροφοδοσίας ( $M_f$ ), αφήνει τον τελευταίο προθερμαντήρα (ο οποίος σχετίζεται με την δεύτερη βαθμίδα) και καταιονίζεται στο εσωτερικό της πρώτης. Ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι ο προθερμαντήρας της πρώτης βαθμίδας είναι ενσωματωμένος στον εναλλάκτη θερμότητας της βαθμίδας. Αυτό συμβαίνει καθώς δεν υπάρχει θάλαμος εκτόνωσης στην πρώτη βαθμίδα ή εκτονωμένοι υδρατμοί στο εσωτερικό της. Η άλμη που ψεκάζεται σχηματίζει μια λεπτή στοιβάδα μεταξύ των διαδοχικών σειρών των οριζοντίων σωλήνων. Η θερμοκρασία άλμης αυξάνει σε θερμοκρασία βρασμού ( $T_1$ ), η οποία ανταποκρίνεται στην πίεση του θαλάμου του υδρατμού. Η θερμοκρασία κορεσμού του σχηματιζόμενου υδρατμού ( $T_{v1}$ ), είναι μικρότερη από τη

Θερμοκρασία βρασμού της άλμης κατά τη θερμοκρασιακή ανύψωση του σημείου βρασμού (BPE)<sub>1</sub>.

Ένα μικρό τμήμα του υδρατμού ( $D_1$ ), σχηματίζεται από το βρασμό στην πρώτη βαθμίδα. Η απομένουσα άλμη ( $M_1-D_1$ ), ρέει στην δεύτερη βαθμίδα, η οποία λειτουργεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία και πίεση. Ο υδρατμός σχηματίζεται στις βαθμίδες 2 έως  $n$ , με δύο διαφορετικούς μηχανισμούς, τον βρασμό και την εκτόνωση. Η ποσότητα του υδρατμού που σχηματίζεται από τον βρασμό είναι ( $D_j$ ) και η ποσότητα που σχηματίζεται από την εκτόνωση είναι ( $d_j$ ). Η εκτόνωση λαμβάνει χώρα από την βαθμίδα 2 έως την  $n$ , επειδή η θερμοκρασία της άλμης που ρέει από την προηγούμενη βαθμίδα ( $T_{j-1}$ ) είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία κορεσμού της επόμενης βαθμίδας ( $T_{vj}$ ). Έτσι η εκτόνωση του ατμού επιβάλλεται από την ισοδύναμη βαθμίδα. Στις βαθμίδες 2 έως  $n$ , η θερμοκρασία του υδρατμού που σχηματίζεται από εκτόνωση ( $T'_{vj}$ ), είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία βρασμού της βαθμίδας ( $T_j$ ) κατά τη θερμοκρασιακή ανύψωση του σημείου βρασμού (BPE) <sub>$j$</sub>  και κατά την ανοχή της συνθήκης μη-ισορροπίας (NEA) <sub>$j$</sub> . Στα κουτιά που πραγματοποιείται η εκτόνωση, μια μικρή ποσότητα εκτονωμένων ατμών ( $\dot{d}_j$ ) σχηματίζεται με θερμοκρασία ίση με ( $T'_{vj}$ ). Αυτή η θερμοκρασία είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία συμπυκνώσεως του υδρατμού στην βαθμίδα  $j$  ( $T_{cj}$ ), κατά την ανοχή της συνθήκης μη-ισορροπίας (NEA) <sub>$j$</sub> .

Ο κινητήριος ατμός ( $M_s$ ), εξάγεται από τον εξωτερικό βραστήρα (boiler) οδηγεί στο σχηματισμό του υδρατμού στην πρώτη βαθμίδα. Ο υδρατμός που σχηματίζεται από το βρασμό στην πρώτη βαθμίδα ( $D_1$ ), χρησιμοποιείται για να οδηγήσει την δεύτερη βαθμίδα, η οποία λειτουργεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία κορεσμού ( $T_2$ ). Μείωση στη θερμοκρασία κορεσμού προκαλείται από την θερμοκρασιακή ανύψωση του σημείου βρασμού, την ανοχή της συνθήκης μη-ισορροπίας και τις απώλειες που προκαλούνται από τη συμπίεση της πίεσης του κορεσμένου υδρατμού εξαιτίας των απωλειών τριβής στο πλέγμα αποθάμβωσης, στις γραμμές μεταφοράς και κατά τη συμπύκνωση. Αυτές οι απώλειες μπορούν να αντιπροσωπευτούν σαν μια επιπλέον αντίσταση στη ροή της θερμότητας μεταξύ του συμπυκνωμένου υδρατμού και της άλμης που βράζει. Έτσι, χρίζεται απαραίτητη η αύξηση της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας ώστε να λαμβάνονται υπόψη αυτές οι απώλειες. Η ποσότητα του υδρατμού που σχηματίζεται στην βαθμίδα  $j$  είναι μικρότερη από την ποσότητα του υδρατμού που σχηματίζεται στην προηγούμενη βαθμίδα. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της λανθάνουσας θερμότητας κατά την δημιουργία υδρατμών με τη μείωση της θερμοκρασίας εξάτμισης.

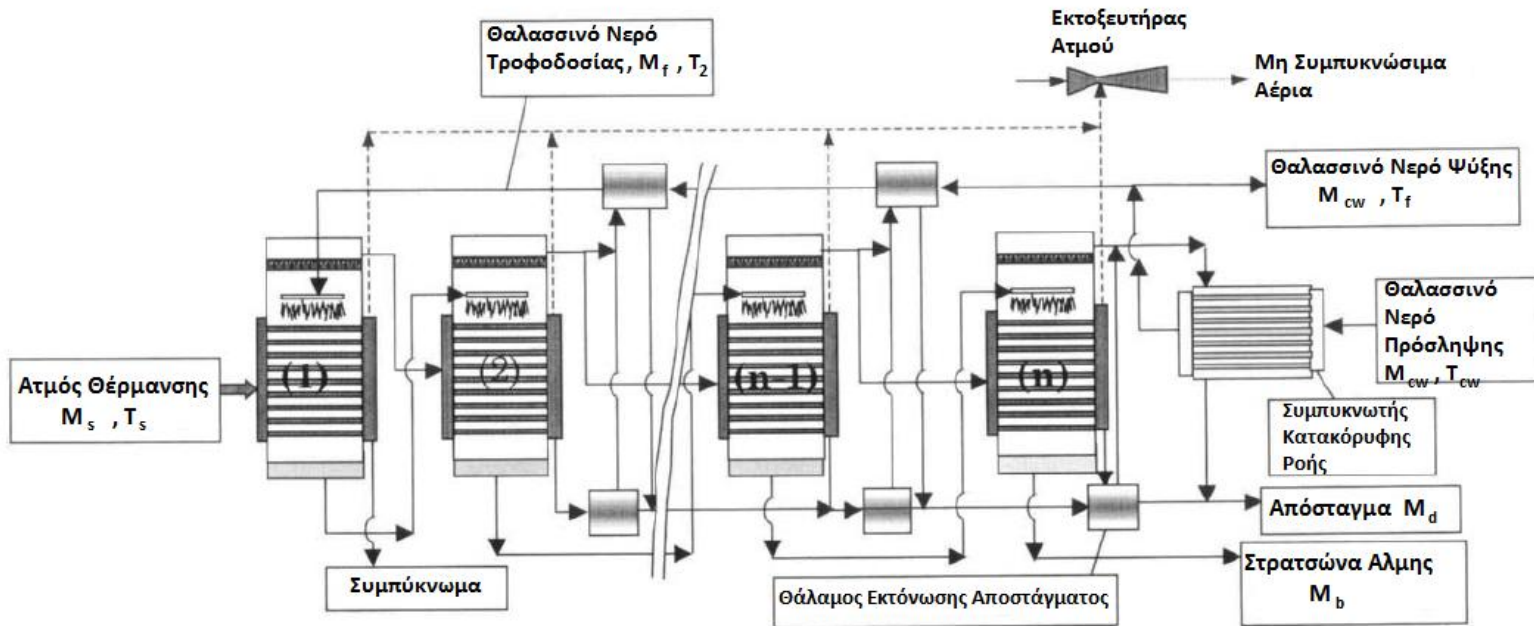
Ο συμπυκνωτής και οι θερμαντήρες άλμης πρέπει να εξοπλίζονται με καλούς αεραγωγούς, πρώτον για τον πρώτο καθαρισμό κατά την εκκίνηση και μετά για την αφαίρεση των μη συμπυκνώσιμων αερίων, που ίσως είχαν εισαχθεί με την τροφοδοσία ή μέσα από διαρροές του συστήματος. Η παρουσία των μη συμπυκνώσιμων αυτών αερίων όχι μόνο εμποδίζει την διαδικασία μεταφοράς θερμότητας αλλά επιπλέον μειώνει τη θερμοκρασία στην οποία ο ατμός



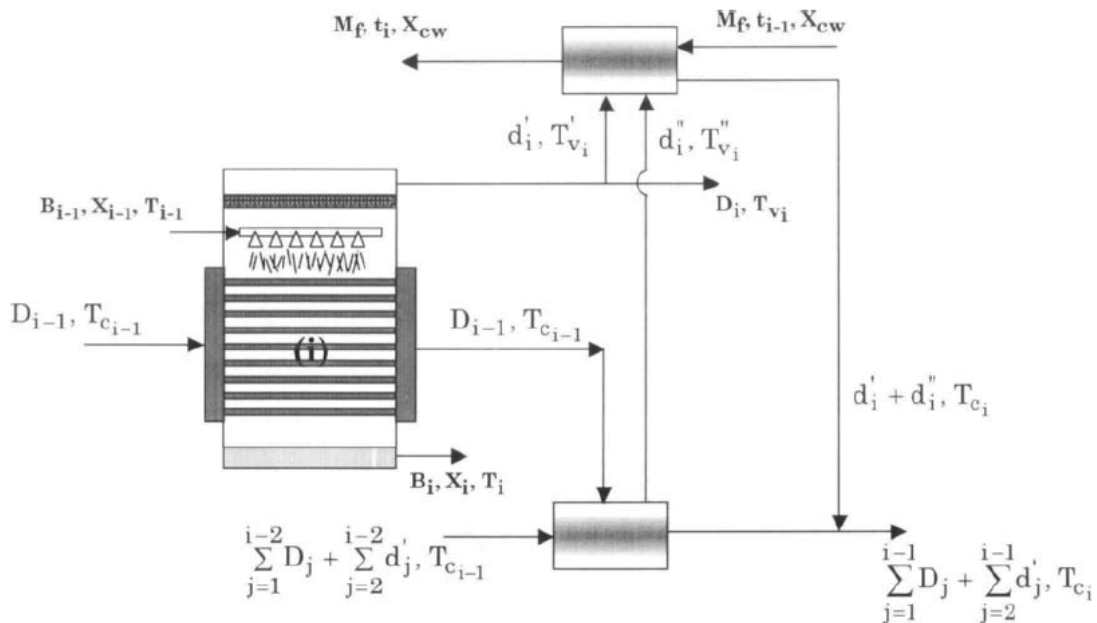
συμπυκνώνεται για δεδομένη πίεση. Αυτό συμβαίνει μερικώς εξαιτίας της μειωμένης μερικής πίεσης του υδρατμού σε μια στοιβάδα αερίων με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα στο περιβάλλον. Για να βοηθηθεί η διατήρηση της οικονομίας του ατμού εξαερισμού, ο ατμός φυγαδεύεται από τον ένα προθερμαντήρα και εισάγεται στον γειτονικό του. Η βαθμίδες που λειτουργούν με πίεση μικρότερη από την ατμοσφαιρική συνήθως αερίζονται στην ατμόσφαιρα. Τα μη συμπυκνώσιμα αέρια είναι πάντα κορεσμένα με υδρατμό. Ο εξαερισμός του τελευταίου συμπυκνωτή πρέπει να είναι συνδεδεμένος με ειδικό εξοπλισμό δημιουργίας κενού ώστε να συμπιέζει τα μη συμπυκνώσιμα αέρια στην ατμόσφαιρα. Ο εξοπλισμός αυτός είναι συνήθως ένας εκτοξευτήρας ατμού αν ατμός υψηλής πίεσης είναι διαθέσιμος. Οι εκτοξευτήρες ατμού είναι σχετικά οικονομικοί αλλά και σχετικά αναποτελεσματικοί. Όσο το κενό διατηρείται στην τελευταία βαθμίδα, η μη εξατμισμένη άλμη ρέει από μόνη της από βαθμίδα σε βαθμίδα και μόνο μια αντλία στρατσώνας απαιτείται στην τελευταία βαθμίδα.

Σύνοψη των διαφόρων διεργασιών που μπορούν να λάβουν χώρα σε κάθε βαθμίδα, στο αντίστοιχο κουτί εκτόνωσης και στον προθερμαντήρα τροφοδοσίας παρουσιάζεται σχηματικά στην **Εικόνα 55**. Όπως μπορούμε να δούμε η άλμη που αφήνει την βαθμίδα μειώνεται κατά το ποσό του υδρατμού που σχηματίζεται σε αυτή από βρασμό ( $D_j$ ) και από εκτόνωση ( $d_j$ ). Ο ρυθμός ροής του αποστάγματος που αφήνει το κουτί εκτόνωσης αυξάνει κατά την ποσότητα των συμπυκνωμένων υδρατμών της προηγούμενης βαθμίδας ( $D_{j-1}$ ) και ( $d_{j-1}$ ). Η συγκέντρωση της άλμης αυξάνεται από ( $X_{j-1}$ ) σε ( $X_j$ ) κατά τον σχηματισμό υδρατμού. Η θερμοκρασία της βαθμίδας καθώς και του κουτιού εκτόνωσης μειώνεται από ( $T_{j-1}$ ) σε ( $T_j$ ) και από ( $T'_{j-1}$ ) σε ( $T'_j$ ), αντίστοιχα.

Σύγκριση των διεργασιών της πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) και της πολλαπλής εξάτμισης (MEE), έδειξε ότι η πολυβάθμια εκτόνωση (MSF) είναι μια ειδική περίπτωση της πολλαπλής εξάτμισης (MEE). Αυτό συμβαίνει όταν όλος ο υδρατμός που σχηματίζεται στις βαθμίδες χρησιμοποιείται για την προθέρμανση της τροφοδοσίας στους προθερμαντήρες και έτσι δεν απομένει καθόλου για τους σωλήνες του εξατμιστήρα. Στην περίπτωση αυτή, η πρώτη βαθμίδα, τα κουτιά εκτόνωσης και ο κάτω συμπυκνωτής του συστήματος της πολυβάθμιας εξάτμισης αντικαθιστούν τον προθερμαντήρα άλμης, τους δίσκους συλλογής του αποστάγματος και τον τομέα αποβολής θερμότητας του συστήματος της πολυβάθμιας εκτόνωσης, αντιστοίχως.



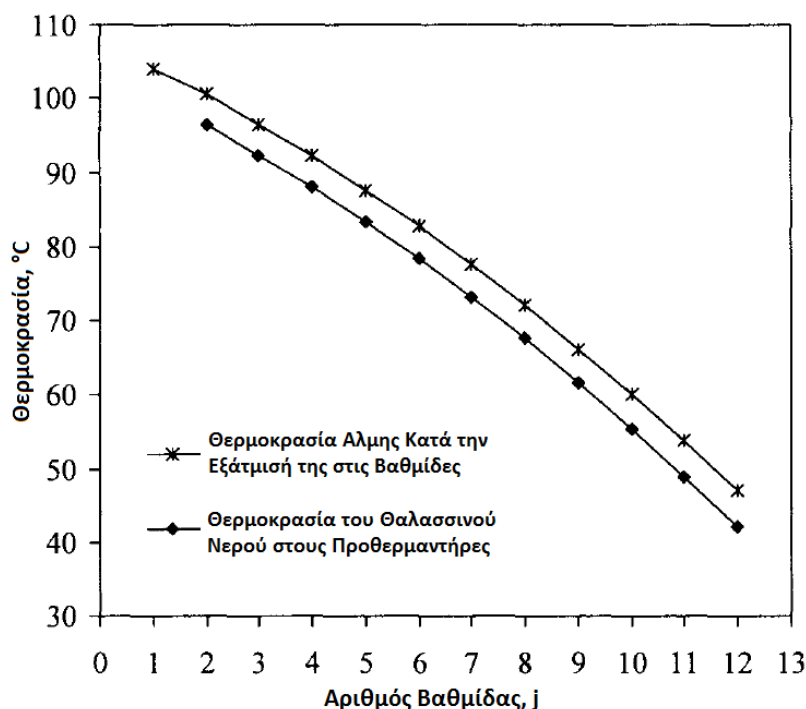
Εικόνα 54: Σχηματική Απεικόνιση Συστήματος Αφαλάτωσης με Πολλαπλή Εξάτμιση (MEE). [1]



Εικόνα 55: Μεταβλητές στον εξατμιστήρα, προθερμαντήρα και στο κουτί εκτόνωσης για την βαθμίδα  $j$ . [1]

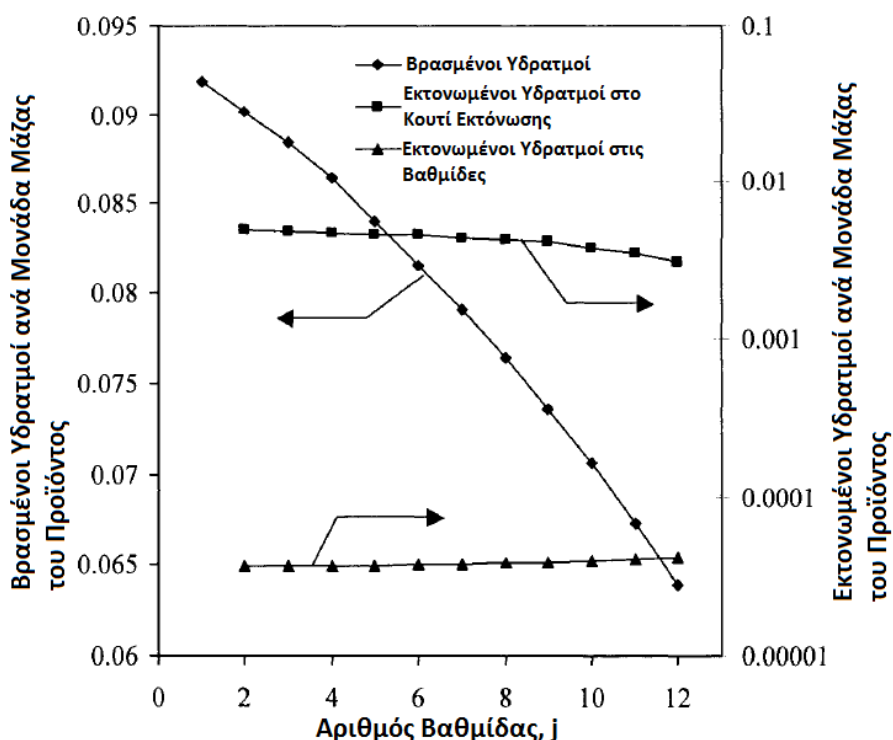
Η μελέτη του συστήματος πολλαπλής εξάτμισης (ΜΕΕ) περιλαμβάνει ανάλυση των προφίλ της θερμοκρασίας και του ρυθμού ροής του αποστάγματος κατά μήκος των βαθμίδων. Περαιτέρω ανάλυση περιλαμβάνει διακυμάνσεις στις παραμέτρους απόδοσης του συστήματος σαν συνάρτηση του αριθμού των βαθμίδων και της υψηλότερης θερμοκρασίας της άλμης.

Το προφίλ της θερμοκρασίας στις βαθμίδες και στους προθερμαντήρες παρουσιάζεται στο διάγραμμα της **Εικόνα 56**. Η μη γραμμική μορφή και των δυο καμπυλών κατά μήκος των βαθμίδων και των προθερμαντήρων δηλώνει μεγαλύτερη θερμοκρασιακή πτώση ανά βαθμίδα, η οποία πλησιάζει την ψυχρή πλευρά των βαθμίδων, με αριθμό βαθμίδων ίσο με  $n$ . Όσο η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας είναι σταθερή σε όλες τις βαθμίδες και τους προθερμαντήρες και οι ολικοί συντελεστές μεταφοράς θερμότητας είναι μεγαλύτεροι σε υψηλότερες θερμοκρασίες, είναι απαραίτητο να έχουμε μεγαλύτερη θερμοκρασιακή πτώση στην κρύα πλευρά των βαθμίδων έτσι ώστε να λάβουμε υπόψη μας τη μείωση στη τιμή του συντελεστή. Παρόμοια θερμικά φορτία στις βαθμίδες και τους προθερμαντήρες επιβάλλουν αυτή τη συμπεριφορά.



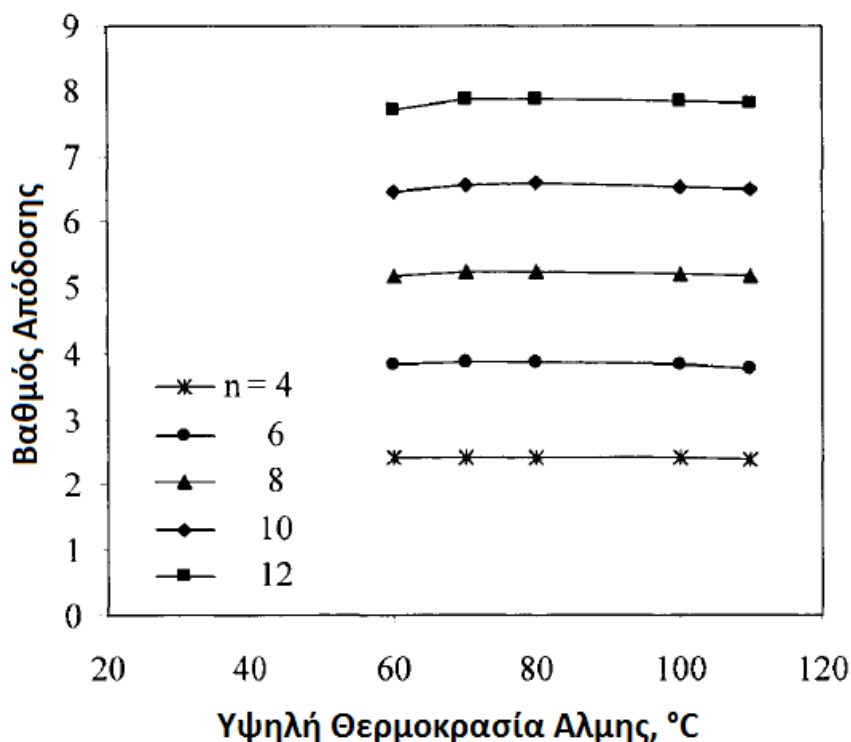
**Εικόνα 56:** Διακυμάνσεις στα Προφίλ Θερμοκρασίας του Εξατμιστήρα και του Προθερμαντήρα. [1]

Η **Εικόνα 57** περιλαμβάνει προφίλ για το ρυθμό ροής του αποστάγματος που παράγεται στο κουτί εκτόνωσης από το βρασμό και την εκτόνωση. Αποτελέσματα δείχνουν ότι η μεγαλύτερη μερίδα του ολικού προϊόντος σχηματίζεται από εξάτμιση μέσα στη βαθμίδα. Επιπλέον, τα ποσοστά της εξάτμισης είναι μεγαλύτερα στην πρώτη βαθμίδα και μειώνονται στις επόμενες βαθμίδες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης είναι μικρότερη σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Στο παρακάτω διάγραμμα μπορούμε να δούμε ότι η ποσότητα του αποστάγματος που σχηματίζεται από εκτόνωση στο εσωτερικό της κάθε βαθμίδας είναι αμελητέα σε σύγκριση με αυτή που σχηματίζεται στους θαλάμους εκτόνωσης. Σε κάθε βαθμίδα, ο ρυθμός ροής των εκτονωμένων υδρατμών είναι περίπου το 10% της ποσότητας που σχηματίζεται από βρασμό. Ανεξαρτήτως αυτού, η μικρή αυτή ποσότητα των εκτονωμένων υδρατμών έχει επαρκής θερμότητα ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας από τη χαμηλή τιμή των 25°C σε υψηλότερες τιμές που αγγίζουν αυτές της θερμοκρασίας της άλμης.



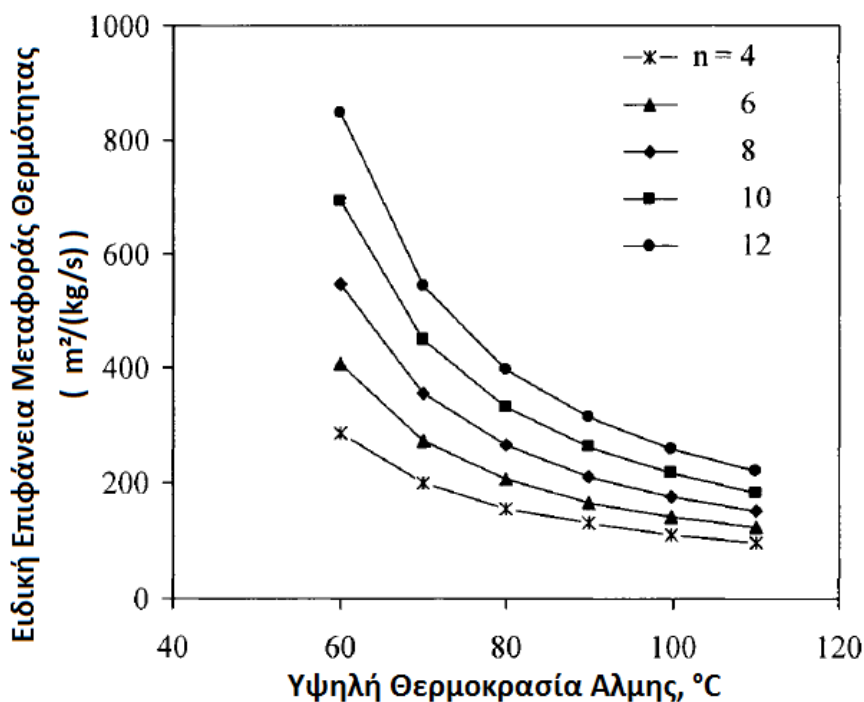
**Εικόνα 57:** Διακυμάνσεις στα Προφίλ του Αποστάγματος σαν Συνάρτηση του Αριθμού των Βαθμίδων για  $T_s=100^\circ\text{C}$ . [1]

Το διάγραμμα της **Εικόνας 58** παρουσιάζει την επίδραση της θερμοκρασίας της άλμης και του ολικού αριθμού των βαθμίδων στο βαθμό απόδοσης του συστήματος. Όπως μπορούμε να δούμε καθαρά, ο βαθμός απόδοσης είναι τελείως ανεξάρτητος από τη θερμοκρασία της άλμης ενώ σχετίζεται δυνατά με τον αριθμό των βαθμίδων. Αυτή η συμπεριφορά εξηγείται σε σχέση με το προφίλ του ρυθμού ροής του αποστάγματος, όπως αυτό παρουσιάζεται στην **Εικόνα 57** για ένα σύστημα 12 βαθμίδων. Όπως παρουσιάζεται, η ποσότητα του αποστάγματος που σχηματίζεται στην πλευρά υψηλών θερμοκρασιών είναι περίπου 1kg/s. Το ποσοστό αυτό μειώνεται για την πλευρά των χαμηλών θερμοκρασιών των βαθμίδων και παίρνει τιμές κοντά στα 0,7 kg/s. Ανεξάρτητα από αυτό, η ποσότητα του αποστάγματος σχηματίζει στην πλευρά των χαμηλών θερμοκρασιών ένα σημαντικό κλάσμα του ρυθμού ροής του συνολικού προϊόντος. Έτσι, αύξηση η αύξηση του αριθμού των βαθμίδων επιτρέπει την αύξηση του αριθμού επαναχρησιμοποίησης του ατμού και του σχηματισμού επιπλέον ποσότητας αποστάγματος.



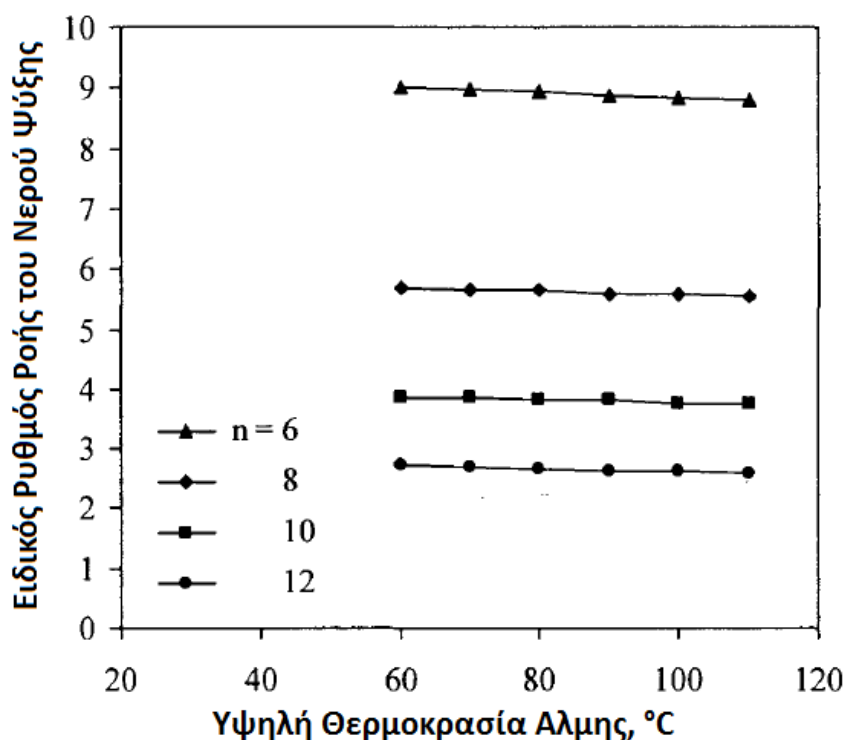
**Εικόνα 58:** Διακυμάνσεις στον Βαθμό Απόδοσης σαν Συνάρτηση της Υψηλής Θερμοκρασίας Άλμης και του Αριθμού των Βαθμίδων. [1]

Διακυμάνσεις στην ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας σα συνάρτηση της θερμοκρασίας της άλμης καθώς και του αριθμού των βαθμίδων, παρουσιάζονται στο διάγραμμα της **Εικόνας 59**. Όπως παρουσιάζεται, η απαιτούμενη επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα μάζας παραγόμενου νερού αυξάνεται με τη χρήση περισσότερων βαθμίδων και τη μείωση της θερμοκρασίας της άλμης. Η χρήση ενός τεράστιου αριθμού βαθμίδων μειώνει τη θερμοκρασιακή πτώση ανά βαθμίδα ή την κινητήρια δύναμη για μεταφορά θερμότητας. Έτσι, κρατώντας την υψηλή θερμοκρασία της άλμης σταθερή και αυξάνοντας τον αριθμό των βαθμίδων έχουμε ως αποτέλεσμα την αύξηση της ειδικής επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας. Από την άλλη πλευρά, κρατώντας τον αριθμό των βαθμίδων σταθερό και αυξάνοντας την υψηλή θερμοκρασία της άλμης έχουμε ως αποτέλεσμα την αύξηση του ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Αυτό μειώνει τη θερμική αντίσταση και δίνει μικρότερη επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Στην υψηλότερη θερμοκρασία άλμης, η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας είναι σχεδόν ανεξάρτητη από τον αριθμό των βαθμίδων. Σύμφωνα και με το διάγραμμα της **Εικόνας 59**, όλα τα προφίλ λαμβάνουν χαμηλότερες τιμές για την υψηλότερη θερμοκρασία άλμης, γεγονός που οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασιακής πτώσης ανά βαθμίδα, ειδικά σε μεγαλύτερους αριθμούς βαθμίδων.



**Εικόνα 59:** Επίδραση της Υψηλής Θερμοκρασίας Άλμης και του Αριθμού των Βαθμίδων Στην Ειδική Επιφάνεια Μεταφοράς Θερμότητας. [1]

Η επίδραση της υψηλότερης θερμοκρασίας της άλμης και του αριθμού των βαθμίδων στον ειδικό ρυθμό ροής του νερού ψύξης παρουσιάζεται στο διάγραμμα της **Εικόνας 60**. Οι διακυμάνσεις στον ειδικό ρυθμό ροής του νερού ψύξης είναι ανεξάρτητες από τις υψηλότερες τιμές της θερμοκρασίας της άλμης. Από την άλλη πλευρά, ο ειδικός ρυθμός ροής ψύξης μειώνεται ραγδαία με την αύξηση του αριθμού των βαθμίδων. Όπως είδαμε και πριν στο διάγραμμα της **Εικόνας 59**, ο βαθμός απόδοσης του συστήματος είναι ανεξάρτητος από την υψηλή θερμοκρασία της άλμης, όπου οι ποσότητες του αποστάγματος που παράγεται και του ατμού που χρησιμοποιείται μεταβάλλονται ελαφρώς καθώς η υψηλή θερμοκρασία της άλμης αυξάνεται. Σαν αποτέλεσμα, η ποσότητα του υδρατμού που σχηματίζεται στην τελευταία βαθμίδα, η οποία συμπυκνώνεται από το θαλασσινό νερό ψύξης, μεταβάλλεται ελαφρώς καθώς η υψηλή θερμοκρασία άλμης αυξάνει και αυτό με την σειρά του έχει ως αποτέλεσμα αμελητέες διακυμάνσεις στον ειδικό ρυθμό ροής του νερού ψύξης. Αύξηση στον αριθμό των βαθμίδων αυξάνει την ολική ποσότητα του παραγόμενου φρέσκου νερού και μειώνει την ποσότητα του παραγόμενου αποστάγματος ανά βαθμίδα. Με την σειρά της, μια μικρότερη ποσότητα του θαλασσινού νερού ψύξης χρειάζεται για την λειτουργία του συμπυκνωτή. Το καθαρό αποτέλεσμα είναι μια ραγδαία μείωση στον ειδικό ρυθμό ροής του νερού ψύξης.



**Εικόνα 59:** Επίδραση της Υψηλής Θερμοκρασίας της Άλμης και του Αριθμού των Βαθμίδων στον Ειδικό Ρυθμό Ροής Νερού Ψύξης. [1]

Συνοψίζοντας όσα ήδη αναφέρθηκαν προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Ο βαθμός απόδοσης των συστημάτων πολλαπλής εξάτμισης (ΜΕΕ) είναι σχεδόν ανεξάρτητη από την υψηλή θερμοκρασία άλμης ενώ επηρεάζεται έντονα από τον αριθμό των βαθμίδων. Μεγαλύτερος αριθμός βαθμίδων αυξάνει τον αριθμό επαναχρησιμοποίησης του υδρατμού και ως αποτέλεσμα την ποσότητα του παραγόμενου υδρατμού.
- Λειτουργία των συστημάτων πολλαπλής εξάτμισης (ΜΕΕ) σε υψηλότερες θερμοκρασίες άλμης έχει ως αποτέλεσμα τη δραστική μείωση της ειδικής επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας της κινητήριας δύναμης ανά βαθμίδα και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

### 2.3.6.b Πολλαπλή Εξάτμιση Με Παράλληλη Τροφοδοσία (Multiple Effect Evaporation with Parallel Feed)

Ένας μεγάλος αριθμός των συστημάτων πολλαπλής εξάτμισης με παράλληλη τροφοδοσία (ΜΕΕ-PF) υπάρχει στην βιομηχανία αφαλάτωσης και κατέχει το 3% σε ολόκληρη την αγορά αφαλάτωσης, IDA (2000). Τη διεργασία μπορούμε να τη βρούμε στην αυτόνομη μορφή της ή συνδυασμένη με θερμική ή μηχανική συμπίεση υδρατμού. Η διεργασία έχει εξελιχθεί από μικρές μονάδες παραγωγής με δυνατότητα μικρότερης από 5000 m<sup>3</sup>/d σε μεγαλύτερες μονάδες με δυνατότητες έως και 20000 m<sup>3</sup>/d, οι οποίες ανταγωνίζονται ακόμα και τις τιμές της διεργασίας πολυβάθμιας εκτόνωσης.

Στα διαγράμματα των **Εικόνων 53a** και **53b** είδαμε τις γραμμές λειτουργίας για τις δύο πιθανές διαρρυθμίσεις της διεργασίας συναρτήσεως της αλατότητας του ρεύματος και της θερμοκρασίας. Και στα δύο διαγράμματα η οριζόντια γραμμή αντιπροσωπεύει το ρεύμα τροφοδοσίας σε κάθε βαθμίδα. Όπως φαίνεται, για όλες τις βαθμίδες η τροφοδοσία έχει την ίδια αλατότητα και την ίδια θερμοκρασία. Μέσα στη βαθμίδα, η θερμοκρασία τροφοδοσίας αυξάνεται σε συνθήκες κορεσμού. Στη συνέχεια ακολουθεί εξάτμιση και αύξηση της αλατότητας, η οποία αντιπροσωπεύεται με κάθετες γραμμές. Περαιτέρω ανάλυση θα πραγματοποιηθεί παρακάτω.

Τα σχήματα που αφορούν την διεργασία πολλαπλής εξάτμισης με παράλληλη τροφοδοσίας (ΜΕΕ-PF) παρουσιάζονται στις **Εικόνες 60** και **61**. Οι βαθμίδες αριθμούνται από το 1 μέχρι το n από τα αριστερά προς τα δεξιά, όπως κι η φορά της ροής θερμότητας, και αποτελούνται από την επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας, τον θάλαμο υδρατμού, τον απαγωγέα ομίχλης και άλλα εξαρτήματα. Στα συστήματα παράλληλης τροφοδοσίας (PF), ο υδρατμός ρέει από τα αριστερά προς τα δεξιά, προς την κατεύθυνση της μείωσης της πίεσης, ενώ το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας ρέει σε μια κάθετη κατεύθυνση. Όσον αφορά τα συστήματα παράλληλης/διασταυρωμένης τροφοδοσίας (ParallelCross Feed), **Εικόνα 61**, το



ρεύμα της άλμης που αφήνει την πρώτη βαθμίδα ρέει στην δεύτερη, όπου εκτονώνεται και αναμιγνύεται με το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας. Κάθε σύστημα περιέχει έναν αριθμό εξατμιστήρων, μια σειρά από θαλάμους εκτόνωσης, έναν συμπυκνωτή κατακόρυφης ροής και ένα σύστημα εξαερισμού. Τα παράλληλα (PF) και τα παράλληλα/διασταυρωμένα (PCF) συστήματα τροφοδοσίας περιέχουν (n-1) θαλάμους εκτόνωσης για το αποσταγμένο προϊόν. Στο παράλληλο/διασταυρωμένο σύστημα τροφοδοσίας, η εκτόνωση της άλμης λαμβάνει χώρα μεταξύ των βαθμίδων 2 και n. Και οι δυο διαρρυθμίσεις χρησιμοποιούν οριζόντιους σωλήνες σχηματισμού πίπτουσας στοιβάδας, οι οποίοι έχουν την χαρακτηριστική ικανότητα να ελέγχουν την δημιουργία ιζήματος. Αυτό οφείλεται στα υψηλά ποσοστά ύγρανσης και στην αποδοτική διανομή νερού πάνω από τις επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας από μεγάλα ακροφύσια ψεκασμού. Έτσι περιορίζεται η δημιουργία ξηρών περιοχών καθώς και η κακή διανομή του νερού. Αυτή η διαρρύθμιση προσφέρει επιπλέον πλεονεκτήματα, αυτά του καλού εξαερισμού και της απομάκρυνσης των προϊόντων υδρατμού και/ή των μη συμπυκνώσιμων αερίων, υψηλούς συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και καταγραφή της δημιουργίας ιζημάτων αλλά και της μόλυνσης.

Το θαλασσινό νερό πρόσληψης εισάγεται στο συμπυκνωτή κατακόρυφης ροής, όπου απορροφά τη λανθάνουσα θερμότητα του συμπυκνωμένου υδρατμού από την τελευταία βαθμίδα. Ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού πρόσληψης αυξάνεται έως την θερμοκρασία τροφοδοσίας. Μέρος του θερμαινόμενου θαλασσινού νερού πρόσληψης απορρίπτεται πίσω στη θάλασσα και είναι γνωστό ως θαλασσινό νερό ψύξης. Η λειτουργία του θαλασσινού νερού ψύξης είναι η απομάκρυνση της περίσσειας θερμότητας που προστίθεται στο σύστημα από την πρώτη βαθμίδα. Το ρεύμα του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας είναι χημικά επεξεργασμένο, απαερωμένο και ψεκάζεται σε κάθε βαθμίδα. Τα σταγονίδια του θαλασσινού νερού πέφτουν υπό τη μορφή λεπτής στοιβάδας στις διαδοχικές σειρές των σωλήνων που έχουν οριζόντια κατανομή. Ανάμεσα σε κάθε στοιβάδα, η θερμοκρασία της άλμης αυξάνεται έως τη θερμοκρασία βρασμού αντίστοιχη της πίεσης του θαλάμου υδρατμού πριν το σχηματισμό μιας μικρής ποσότητας υδρατμού. Στην πρώτη βαθμίδα, η θερμότητα που απαιτείται για την προθέρμανση και την εξάτμιση παρέχεται από τη συμπύκνωση μιας ορισμένης μάζας συμπυκνωμένου ατμού στο εσωτερικό της δέσμης των σωλήνων. Ο ατμός παρέχεται στο σύστημα από ένα εξωτερικό boiler. Το υψηλής ποιότητας συμπύκνωμα από την πρώτη βαθμίδα επιστρέφεται πίσω στο boiler.

Η θερμοκρασία κορεσμού του υδρατμού που σχηματίζεται σε κάθε βαθμίδα είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία βρασμού της άλμης στο εσωτερικό της βαθμίδας κατά το σημείο θερμοκρασιακής ανύψωσης. Ο υδρατμός που παράγεται σε κάθε βαθμίδα ρέει μέσα από ένα πλεκτό συρμάτινο απαγωγέα ομίχλης, γνωστό και ως πλέγμα αποθάμβωσης, ο οποίος αφαιρεί τα εισερχόμενα παρασυρόμενα σταγονίδια άλμης. Η θερμοκρασία κορεσμού του υδρατμού που φεύγει από το πλέγμα αποθάμβωσης είναι μικρότερη από αυτή του σχηματιζόμενου υδρατμού εξαιτίας των απωλειών της πίεσης τριβής στο πλέγμα αποθάμβωσης. Ο υδρατμός

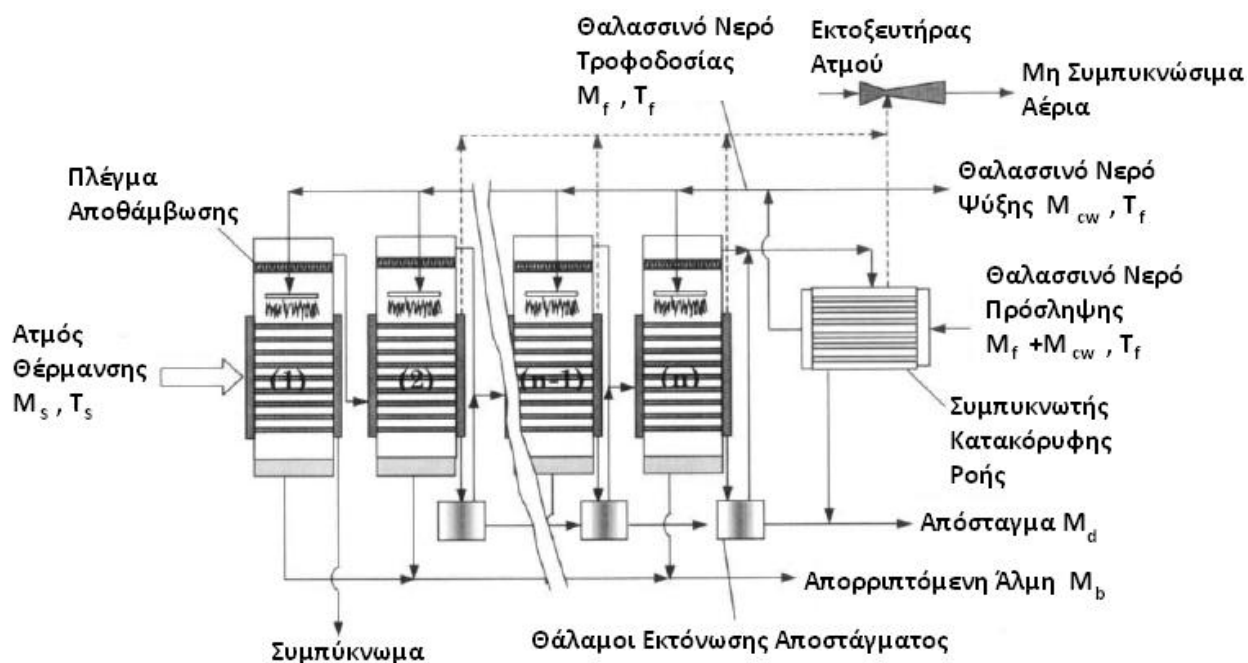
που ρέει από το πλέγμα αποθάμβωσης μεταφέρεται στην δεύτερη βαθμίδα. Η μεταφορά αυτή συνεπάγεται αναπόφευκτα μια πτώση της πίεσης και έτσι μια αντίστοιχη μείωση της θερμοκρασίας κορεσμού. Μια ακόμα πτώση της πίεσης και ως αποτέλεσμα κατάθλιψη στη θερμοκρασία κορεσμού του υδρατμού, σχετίζεται με τη συμπύκνωση του υδρατμού στο εσωτερικό των σωλήνων μεταφοράς θερμότητας των εξατμιστήρων ή πάνω στην επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας των προθερμαντήρων. Η λανθάνουσα θερμότητα της συμπύκνωσης του υδρατμού αξιοποιείται για την περαιτέρω εξάτμιση στην δεύτερη βαθμίδα.

Στο σύστημα παράλληλης/διασταυρωμένης ροής (PCF), ο υδρατμός που σχηματίζεται στις βαθμίδες 2 έως  $n$  είναι από τον βρασμό πάνω από τις επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας και από εκτόνωση ή ελεύθερο βρασμό μέσα στην υγρή μάζα. Η θερμοκρασία του υδρατμού που σχηματίζεται από εκτόνωση είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία βρασμού της βαθμίδας κατά στο σημείο θερμοκρασιακής ανύψωσης και την ανοχή της συνθήκης μη ισορροπίας. Μια ακόμα μικρή ποσότητα του υδρατμού σχηματίζεται στο θάλαμο εκτόνωσης εξαιτίας της εκτόνωσης του αποστάγματος που συμπυκνώνεται στη βαθμίδα  $i$ . Ο εκτονωμένος υδρατμός παράγεται σε θερμοκρασία μικρότερη από τη θερμοκρασία συμπύκνωσης του αποστάγματος κατά την ανοχή της συνθήκης μη ισορροπίας. Οι θάλαμοι εκτόνωσης αποτελούν ένα μέσο ανάκτησης θερμότητας από το συμπυκνωμένο φρέσκο νερό και το ρεύμα της άλμης. Η ανύψωση του σημείου βρασμού και η θερμοκρασιακή κατάθλιψη που αντιστοιχεί στις απώλειες πίεσης του πλέγματος αποθάμβωσης, των γραμμών μεταφοράς και κατά την διάρκεια της διεργασίας συμπύκνωσης μειώνουν την διαθέσιμη κινητήρια δύναμη για μεταφορά θερμότητας στους εξατμιστήρες και τους προθερμαντήρες. Έτσι, χρήζεται απαραίτητη η παροχή επιπλέον επιφάνειας ώστε να υπολογίζουμε αυτές τις θερμοκρασιακές υποβαθμίσεις. Με άλλα λόγια, οι θερμοκρασιακές απώλειες παρουσιάζουν μια επιπλέον αντίσταση στη ροή της θερμότητας μεταξύ του συμπυκνωμένου ατμού και του θαλασσινού νερού που βράζει. Ωστόσο, η μείωση της θερμότητας δεν επηρεάζει το θερμικό βαθμό απόδοσης του έργου ή την οικονομία ατμού. Ο βαθμός απόδοσης του έργου εξαρτάται από την εξέταση της κατάστασης ισορροπίας της θερμότητας και όχι από τον βαθμό μεταφοράς θερμότητας. Στα συστήματα παράλληλης/διασταυρωμένης ροής (PCF) ο υδρατμός που σχηματίζεται από την εκτόνωση της άλμης κατά το στάδιο  $i$  συμπυκνώνεται στο εσωτερικό της επιφάνειας των σωλήνων της βαθμίδας  $i+1$ . Ωστόσο, όλοι οι υδρατμοί τις τελευταίες βαθμίδας συμπυκνώνονται στην πλευρά του κελύφους του συμπυκνωτή κατακόρυφης ροής.

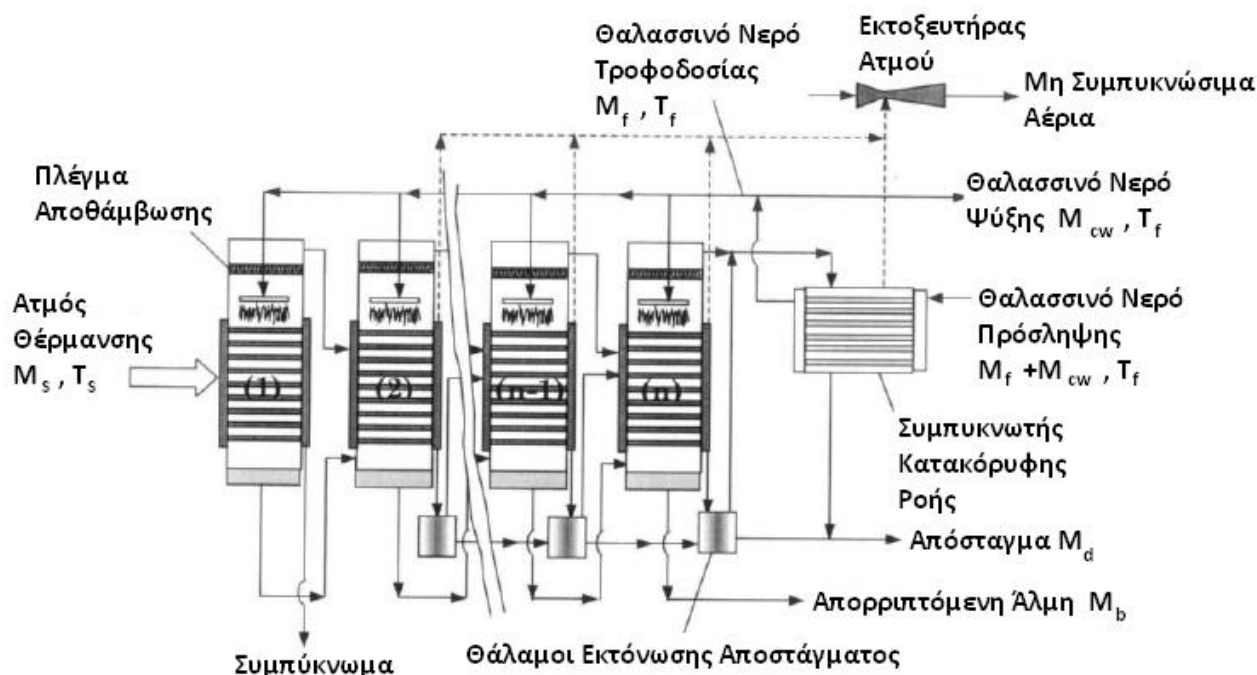
Η ποσότητα του ατμού που παράγεται από την εξάτμιση σε κάθε βαθμίδα είναι μικρότερη από αυτή που παράγεται σε κάθε προηγούμενη βαθμίδα. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της ειδικής λανθάνουσας θερμότητας κατά την δημιουργία των υδρατμών μετά τη μείωση της θερμοκρασίας της βαθμίδας. Ως αποτέλεσμα, η ποσότητα του υδρατμού που παράγεται σε έναν εξατμιστήρα από βρασμό είναι μικρότερη από την ποσότητα του συμπυκνωμένου ατμού που χρησιμοποιείται για την θέρμανση του επόμενου εξατμιστήρα. Και στις δύο

διαρρυθμίσεις, η αλατότητα του ρεύματος της άλμης που αφήνει κάθε βαθμίδα είναι περίπου στο όριο διαλυτότητας του  $\text{CaSO}_4$ , **Εικόνα 53α**. Το ρεύμα της άλμης που αφήνει την τελευταία βαθμίδα στο σύστημα παράλληλης (PF) ή παράλληλης/διασταυρωμένης τροφοδοσίας (PCF) απορρίπτεται πάλι στη θάλασσα.

Ο συμπυκνωτής κατακόρυφης ροής είναι εξοπλισμένος με καλούς αεραγωγούς, πρώτον για τον πρώτο καθαρισμό κατά την εκκίνηση και μετά για την αφαίρεση των μη συμπυκνώσιμων αερίων, που ίσως είχαν εισαχθεί με την τροφοδοσία ή μέσα από διαρροές του συστήματος. Η παρουσία των μη συμπυκνώσιμων αυτών αερίων όχι μόνο εμποδίζει την διαδικασία μεταφοράς θερμότητας αλλά επιπλέον μειώνει τη θερμοκρασία στην οποία ο ατμός συμπυκνώνεται για δεδομένη πίεση. Αυτό συμβαίνει μερικώς εξαιτίας της μειωμένης μερικής πίεσης του υδρατμού σε μια στοιβάδα αερίων με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα στο περιβάλλον. Για να βοηθηθεί η διατήρηση της οικονομίας του ατμού εξαερισμού, ο ατμός φυγαδεύεται από τον ένα προθερμαντήρα και εισάγεται στον γειτονικό του. Η βαθμίδες που λειτουργούν με πίεση μικρότερη από την ατμοσφαιρική συνήθως αερίζονται στην ατμόσφαιρα. Τα μη συμπυκνώσιμα αέρια είναι πάντα κορεσμένα με υδρατμό. Ο εξαερισμός του τελευταίου συμπυκνωτή πρέπει να είναι συνδεδεμένος με ειδικό εξοπλισμό δημιουργίας κενού ώστε να συμπιέζει τα μη συμπυκνώσιμα αέρια στην ατμόσφαιρα. Ο εξοπλισμός αυτός είναι συνήθως ένας εκτοξευτήρας ατμού αν ατμός υψηλής πίεσης είναι διαθέσιμος. Οι εκτοξευτήρες ατμού είναι σχετικά οικονομικοί αλλά και σχετικά αναποτελεσματικοί. Όσο το κενό διατηρείται στην τελευταία βαθμίδα, η μη εξατμισμένη άλμη ρέει από μόνη της από βαθμίδα σε βαθμίδα και μόνο μια αντλία στρατοώνας απαιτείται στην τελευταία βαθμίδα.



**Εικόνα 60:** Σχηματική Απεικόνιση Συστήματος Πολλαπλής Εξάτμισης με Παράλληλη Ροή (MEE-PF). [1]



**Εικόνα 61:** Σχηματική Απεικόνιση Συστήματος Πολλαπλής Εξάτμισης με Παράλληλη/Διασταυρωμένη Ροή (MEE-PCF). [1]

Η απόδοση και των δύο συστημάτων πολλαπλής εξάτμισης (MEE) αναλύεται σαν συνάρτηση της αλατότητας του θαλασσινού νερού πρόσληψης, του αριθμού των βαθμίδων και της υψηλής θερμοκρασίας της άλμης. Στις παραμέτρους της απόδοσης περιλαμβάνονται ο θερμικός βαθμός απόδοσης, ο ειδικός ρυθμός ροής του νερού ψύξης, ο λόγος μετατροπής και η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Επίσης, η ανάλυση γίνεται για την εξάρτηση της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας της εξάτμισης και της θέρμανσης της άλμης στις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Τελικά, γίνεται σύγκριση μεταξύ των προβλέψεων του μοντέλου και των συστημάτων πολλαπλής εξάτμισης με μπροστά τροφοδοσία (MEE-FF) και πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF).

Η **Εικόνα 62** παρουσιάζει την απόδοση των συστημάτων πολλαπλής εξάτμισης με παράλληλη τροφοδοσία (MEE-PF) σε συνάρτηση της θερμοκρασίας θέρμανσης του ατμού και της αλατότητας του θαλασσινού νερού. Όπως παρουσιάζεται, η μείωση του θερμικού βαθμού απόδοσης, που μειώνεται για υψηλότερες θερμοκρασίες του ατμού θέρμανσης, προκαλείται από τους παρακάτω τρεις παράγοντες:

- Αύξησης της ποσότητας της αισθητής θερμότητας που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας σε

υψηλότερες θερμοκρασίες βρασμού, μέχρι η θερμοκρασία τροφοδοσίας ( $T_f$ ) να διατηρηθεί σταθερή στους  $35^\circ\text{C}$ .

- Αύξηση της ποσότητας του ρυθμού ροής της τροφοδοσίας εξαιτίας της μείωσης του λόγου μετατροπής.
- Μείωση της λανθάνουσας θερμότητας του ατμού θέρμανσης σε υψηλότερες θερμοκρασίες.
- Αυτοί οι παράγοντες έχουν ως αποτέλεσμα την κατανάλωση μεγαλύτερων ποσοτήτων ατμού και άρα τη μείωση του θερμικού βαθμού απόδοσης. Αύξηση της θερμοκρασίας του ατμού θέρμανσης μειώνει την ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασιακής διαφοράς ανά στάδιο, η οποία με την σειρά της αυξάνει την κινητήρια δύναμη μεταφοράς θερμότητας. Επιπλέον, σε υψηλότερες θερμοκρασίες η τιμή του ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας αυξάνει προκαλώντας τη μείωση στην επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Μια ακόμα επίδραση προκαλείται από την αύξηση της αλατότητας της άλμης για χαμηλότερες θερμοκρασίες, η οποία προκαλεί με τη σειρά της αύξηση της ανύψωσης του σημείου βρασμού. Αυτό μειώνει τη θερμοκρασία του υδρατμού και ως αποτέλεσμα την κινητήρια δύναμη για την μεταφορά θερμότητας. Έτσι, για χαμηλότερες θερμοκρασίες του ατμού θέρμανσης αυξάνεται δραστικά η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Για υψηλότερες θερμοκρασίες, η μείωση της ποσότητας του ειδικού νερού ψύξης σχετίζεται με την αύξηση της ποσότητας του ρυθμού ροής τροφοδοσίας, η οποία προκαλείται από τη μείωση του λόγου μετατροπής. Η μείωση του λόγου μετατροπής για υψηλότερες θερμοκρασίες άλμης προκαλείται από τους περιορισμούς που θέτονται από τη μέγιστη αλατότητα της απορριπτόμενης άλμης.

Οι επιδράσεις της αλατότητας του θαλασσινού νερού στην απόδοση του συστήματος φαίνονται στο διάγραμμα της **Εικόνας 62**. Όπως παρουσιάζεται για μεγαλύτερες διαφορές στο βαθμό απόδοσης, το ειδικό θαλασσινό νερό ψύξης, και ο λόγος μετατροπής περιέχονται για υψηλότερες θερμοκρασίες ατμού θέρμανσης. Αυτό προκύπτει από τη μείωση του ορίου που επιβάλλεται στην αλατότητα της απορριπτόμενης άλμης, η οποία με τη σειρά της προκαλεί μεγάλη μείωση στο λόγο μετατροπής και αναμενόμενη αύξηση στο ρυθμό ροής τροφοδοσίας. Γενικότερα, ο θερμικός βαθμός απόδοσης του συστήματος, ο ρυθμός ροής του θαλασσινού νερού ψύξης και ο λόγος μετατροπής μειώνονται για υψηλότερες τιμές αλατότητας του θαλασσινού νερού. Ακόμα, μπορούμε να δούμε ότι η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας είναι ανεξάρτητη των αλλαγών της αλατότητας του θαλασσινού νερού, όσο εξαρτάται μόνο από το θερμικό φορτίο, τη θερμοκρασία του ατμού θέρμανσης, τη θερμοκρασιακή πτώση ανά στάδιο και τον ολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

Τα αποτελέσματα της αύξησης του αριθμού των βαθμίδων για το σύστημα πολλαπλής εξατμίσσης με παράλληλη τροφοδοσία (MEE-PF) παρουσιάζονται στο διάγραμμα της **Εικόνας 63**. Όπως μπορούμε να δούμε, αύξηση του αριθμού των

βαθμίδων δίνει υψηλότερο βαθμό θερμικής απόδοσης και μεγαλύτερη επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Η αύξηση στην ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας προκαλείται από τη μείωση της κινητήριας δύναμης για μεταφορά θερμότητας, ή της θερμοκρασιακής πτώσης ανά στάδιο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, η θερμοκρασία του ατμού θέρμανσης καθώς και της άλμης στην τελευταία βαθμίδα διατηρούνται σταθερές. Η αύξηση στο βαθμό απόδοσης του συστήματος για μεγαλύτερο αριθμό βαθμίδων είναι αποτέλεσμα της αύξησης του αριθμού επαναχρησιμοποίησης του ατμού στο σύστημα. Στην πρώτη βαθμίδα, η λανθάνουσα θερμότητα του ατμού θέρμανσης χρησιμοποιείται για να θερμάνει το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας έως τη θερμοκρασία κορεσμού και για να δημιουργήσει μια μικρή ποσότητα υδρατμού. Αυτή η διεργασία επαναλαμβάνεται στις επακόλουθες βαθμίδες, όπου το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας θερμαίνεται και μια επιπλέον ποσότητα υδρατμού δημιουργείται. Η μείωση στον ειδικό ρυθμό ροής του νερού ψύξης για μεγαλύτερο αριθμό βαθμίδων προκαλείται από τη μείωση της ποσότητας του υδρατμού που σχηματίζεται σε κάθε βαθμίδα. Η μείωση στο λόγο μετατροπής προκαλείται επίσης από τα όρια που θέτονται από τη μέγιστη αλατότητα της απορριπτόμενης άλμης. Όπως μπορούμε να δούμε και στην **Εικόνα 63**, ένα σύστημα 8 βαθμίδων σε παράλληλη λειτουργία περιορίζεται για ελάχιστη θερμοκρασία ατμού θέρμανσης αυτή των 70 °C. Για χαμηλότερες θερμοκρασίες του ατμού θέρμανσης το θερμοκρασιακό εύρος της άλμης στην πρώτη και την τελευταία βαθμίδα είναι μικρό. Έτσι, η συνδυασμένη επίδραση της ανύψωσης του σημείου βρασμού και της θερμοκρασιακής πτώσης ανά στάδιο καταλήγει σε μια μικρή αύξηση της μεταφοράς θερμότητας, δηλαδή η θερμοκρασία του υδρατμού στη βαθμίδα  $i$  είναι μικρότερη από αυτή της άλμης στη βαθμίδα  $i+1$ .

Ανάλυση των μεταβολών των επιφανειών μεταφοράς θερμότητας στην εξάτμιση και της θέρμανσης της τροφοδοσίας για συστήματα παράλληλης ροής δείχνει υψηλή ευαισθησία στη θερμοκρασία του ατμού θέρμανσης και κάποια εξάρτηση στον αριθμό των βαθμίδων. Για παράδειγμα, για θερμοκρασία του ατμού θέρμανσης αυτή των 100°C και τέσσερις βαθμίδες, η επιφάνεια για εξάτμιση αποτελεί το 78, 92, 96 και 98% της ολικής επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας από την πρώτη έως την τελευταία βαθμίδα αντιστοίχως. Για χαμηλότερη θερμοκρασία του ατμού θέρμανσης αυτή των 70°C, η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας κατά την εξάτμιση κυμαίνεται μέσα στο μικρό εύρος του 95 έως 98% της ολικής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ της πρώτης και της τελευταίας βαθμίδας. Αύξηση του αριθμού των βαθμίδων αυξάνει το εύρος στο οποίο κυμαίνεται η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας κατά την εξάτμιση. Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα 8 βαθμίδων και με θερμοκρασία ατμού θέρμανσης 100°C η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας κατά την εξάτμιση κυμαίνεται εντός ενός μεγαλύτερου εύρους, από 68 έως 99% από την πρώτη έως την όγδοη βαθμίδα. Από τα παραπάνω, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας κατά την εξάτμιση είναι μικρότερη για υψηλότερες θερμοκρασίες του ατμού θέρμανσης, γεγονός που οφείλεται στην αύξηση της απαιτούμενης ποσότητας αισθητής θερμότητας

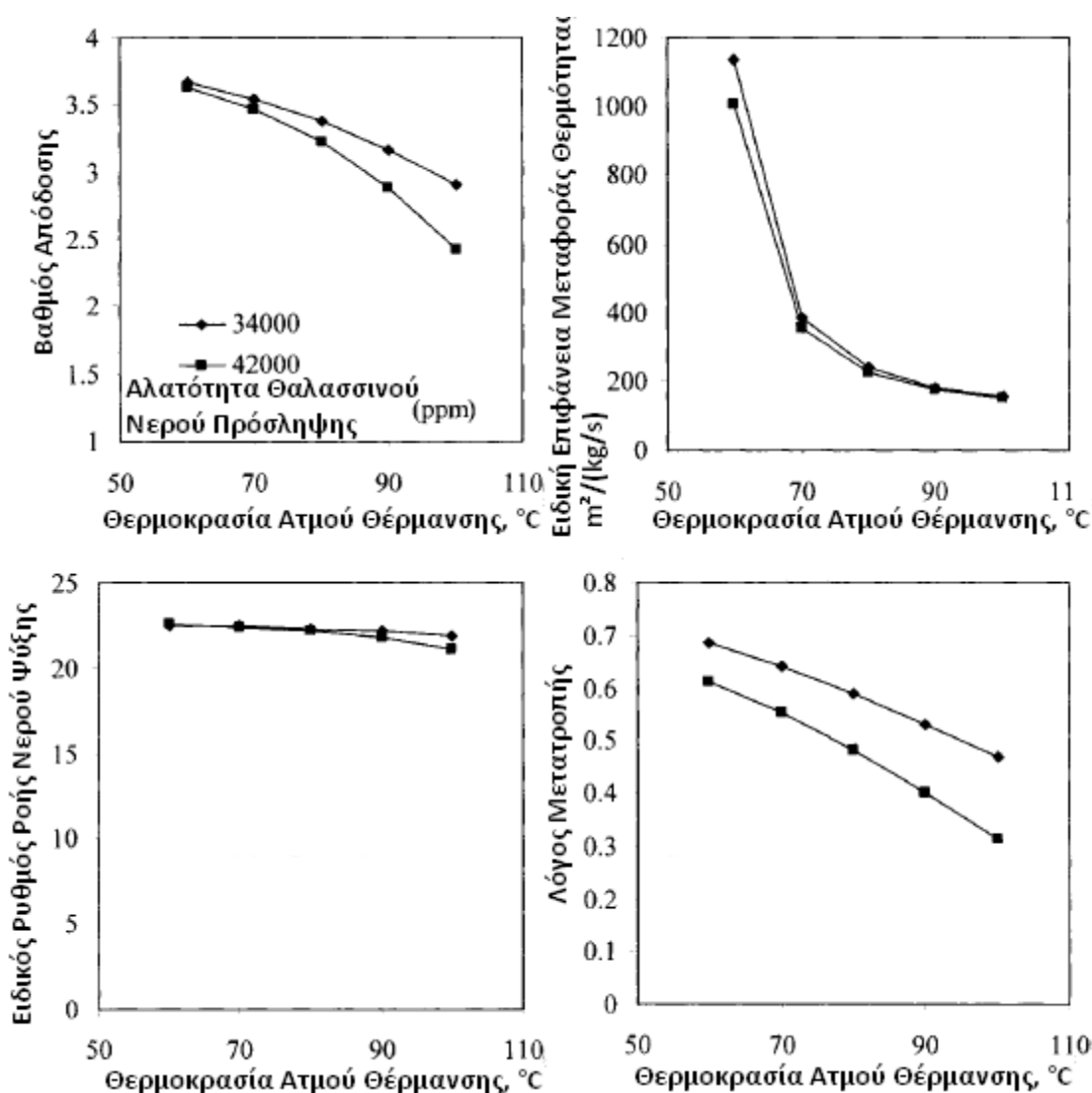
για την αύξηση της θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας έως τη θερμοκρασία κορεσμού.

Η απόδοση των συστημάτων πολλαπλής εξάτμισης με παράλληλη/διασταυρωμένη ροή (MEE-PCF) διαφέρει από αυτή των συστημάτων παράλληλη ροής (PF) στο λόγο μετατροπής και στον ειδικό ρυθμό ροής του νερού ψύξης. Από την άλλη πλευρά, μεταβολές στο θερμικό βαθμό απόδοσης και στην ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας είναι σχεδόν παρόμοιες. Όπως παρουσιάζεται στα διαγράμματα των **Εικόνων 64** και **65**, ο λόγος μετατροπής του συστήματος παραμένει σταθερός καθώς η θερμοκρασία του ατμού θέρμανσης αυξάνεται. Ωστόσο, ο λόγος μετατροπής αυξάνεται για χαμηλότερη αλατότητα του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας. Για το σύστημα αυτό, ο λόγος μετατροπής είναι ανεξάρτητος της θερμοκρασίας του ατμού θέρμανσης γιατί η αλατότητα της άλμης που αφήνει την τελευταία βαθμίδα ορίζεται στη ίδια θερμοκρασία, αυτή των 40°C. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει για μεταβολές στο λόγο μετατροπής σε συνάρτηση του αριθμού των βαθμίδων, **Εικόνα 65**. Η μικρή αύξηση στην ποσότητα του θαλασσινού νερού ψύξης για υψηλότερες θερμοκρασίες του ατμού θέρμανσης αλλά και της αλατότητας του θαλασσινού νερού προκύπτει από τη μείωση του θερμικού βαθμού απόδοσης του συστήματος για υψηλότερες θερμοκρασίες του ατμού θέρμανσης, και έτσι προκύπτει αύξηση της ειδικής θερμικής ενέργειας του συστήματος.

Σύγκριση της παράλληλης (PF) και παράλληλης/διασταυρωμένης τροφοδοσίας (PCF) για σύστημα 4 βαθμίδων παρουσιάζεται στην **Εικόνα 66** και περιλαμβάνει δυο ζεύγη δεδομένων για κάθε σύστημα. Το πρώτο ζεύγος περιορίζει τη μέγιστη συγκέντρωση άλμης στο 95% του ορίου διαλυτότητας του CaSO<sub>4</sub> και το δεύτερο έχει μέγιστο όριο τα 70.000 ppm. Όπως μπορούμε να δούμε τα δύο συστήματα έχουν παρόμοιες διακυμάνσεις στον θερμικό βαθμό απόδοσης και στην ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας, όπου και οι δυο παράμετροι μειώνονται σε υψηλές θερμοκρασίες του ατμού θέρμανσης. Διαφορές των δύο συστημάτων βρίσκονται έπειτα από σύγκριση του ειδικού ρυθμού ροής του νερού ψύξης και του λόγου μετατροπής. Επιλογή μεταξύ των τεσσάρων συνθηκών λειτουργίας έδειξε ότι τα συστήματα παράλληλης/διασταυρωμένης τροφοδοσίας (PCF) με όριο αλατότητας τα 70.000 ppm έχουν μικρότερο ειδικό ρυθμό ροής του θαλασσινού νερού ψύξης, υψηλότερο θερμικό βαθμό απόδοσης και μικρότερη ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Από την άλλη πλευρά, ο υψηλότερος λόγος μετατροπής συναντάται σε σύστημα παράλληλης/διασταυρωμένης τροφοδοσίας (PCF) με όριο αλατότητας να ορίζεται από την διαλυτότητα του CaSO<sub>4</sub>.

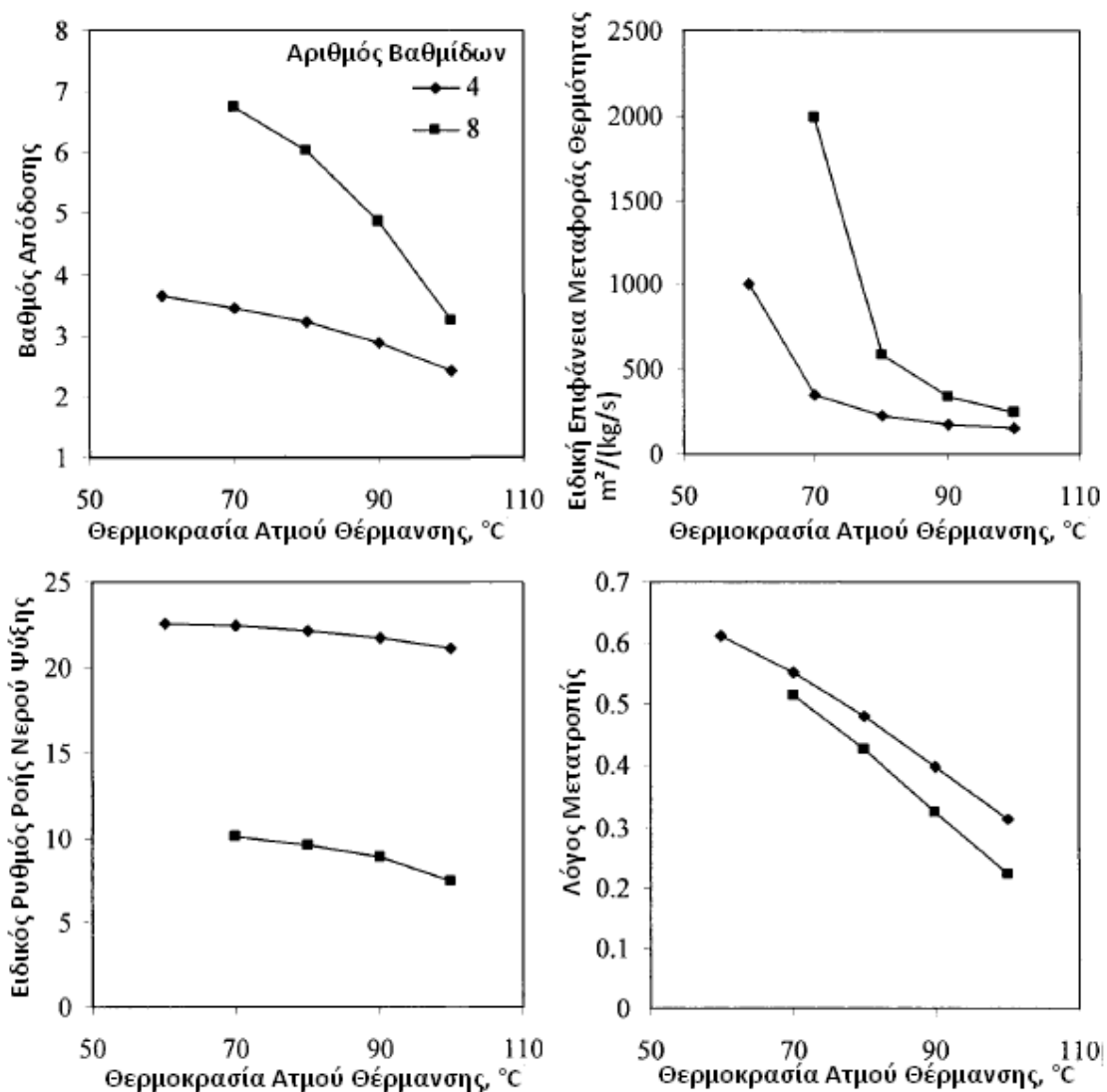
Σύγκριση σε συστήματα παράλληλης (PF) και παράλληλης/διασταυρωμένης τροφοδοσίας (PCF) παρουσιάζεται στην **Εικόνα 67**. Τα δεδομένα για σύστημα πολλαπλής εξάτμισης με μπροστά (MEE-FF) και παράλληλη/διασταυρωμένη τροφοδοσία (MEE-PCF) με 12 βαθμίδες, αλατότητα τροφοδοσίας 42.000 ppm, αλατότητα απορριπτόμενης άλμης 70.000 ppm, θερμοκρασία θαλασσινού νερού

πρόσληψης 25 °C, θερμοκρασία θαλασσινού νερού τροφοδοσίας 35 °C και θερμοκρασία απορριπτόμενης άλμης 40 °C. Το σύστημα παράλληλης/ διασταυρωμένης τροφοδοσίας (PCF) εμφανίζει μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας σε σχέση με το σύστημα μπροστά τροφοδοσίας, ειδικότερα για χαμηλότερες θερμοκρασίες άλμης. Αυτό οφείλεται στη μικρή κινητήρια δύναμη για μεταφορά θερμότητας, η οποία επιβάλλεται στα συστήματα παράλληλης/ διασταυρωμένης ροής (PCF) εξαιτίας της θέρμανσης του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας σε κάθε ένα, από το θαλασσινό νερό πρόσληψης έως τη θερμοκρασία κορεσμού. Ο βαθμός απόδοσης και για τα δύο συστήματα είναι σχεδόν ανεξάρτητος της θερμοκρασίας του ατμού θέρμανσης. Επιπλέον, ο βαθμός απόδοσης για το σύστημα παράλληλης/ διασταυρωμένης ροής (PCF) είναι υψηλότερος καθώς δεν είναι απαραίτητη η θέρμανση όλης της τροφοδοσίας έως την υψηλή θερμοκρασία άλμης.

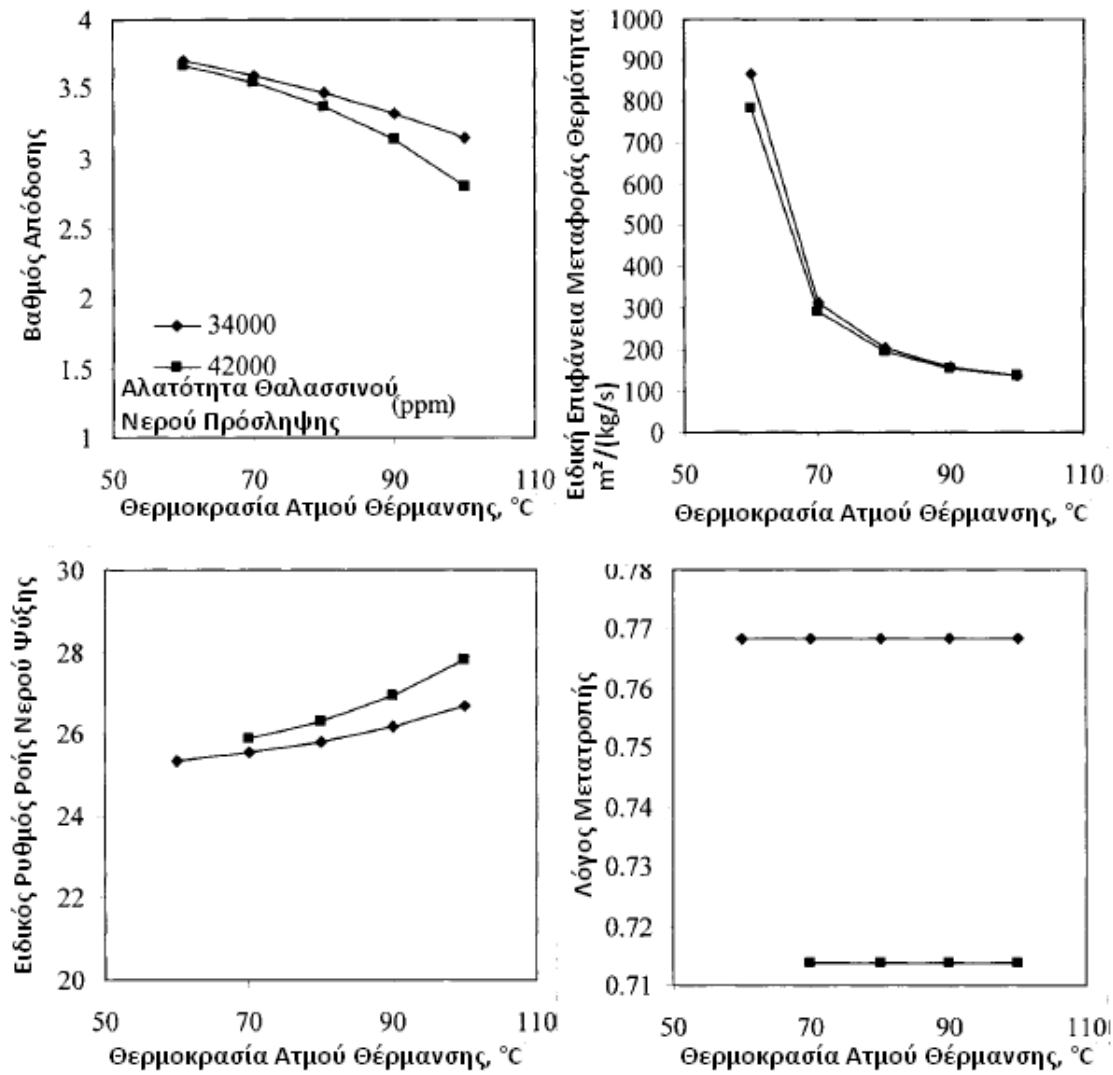


**Εικόνα 62:** Εξάρτηση του Συστήματος Πολλαπλής Εξάτμισης Με Παράλληλη Ροή (MEE-PF) από τη Θερμοκρασία του Ατμού Θέρμανσης και Της Αλατότητας του Θαλασσινού για n=4. [1]

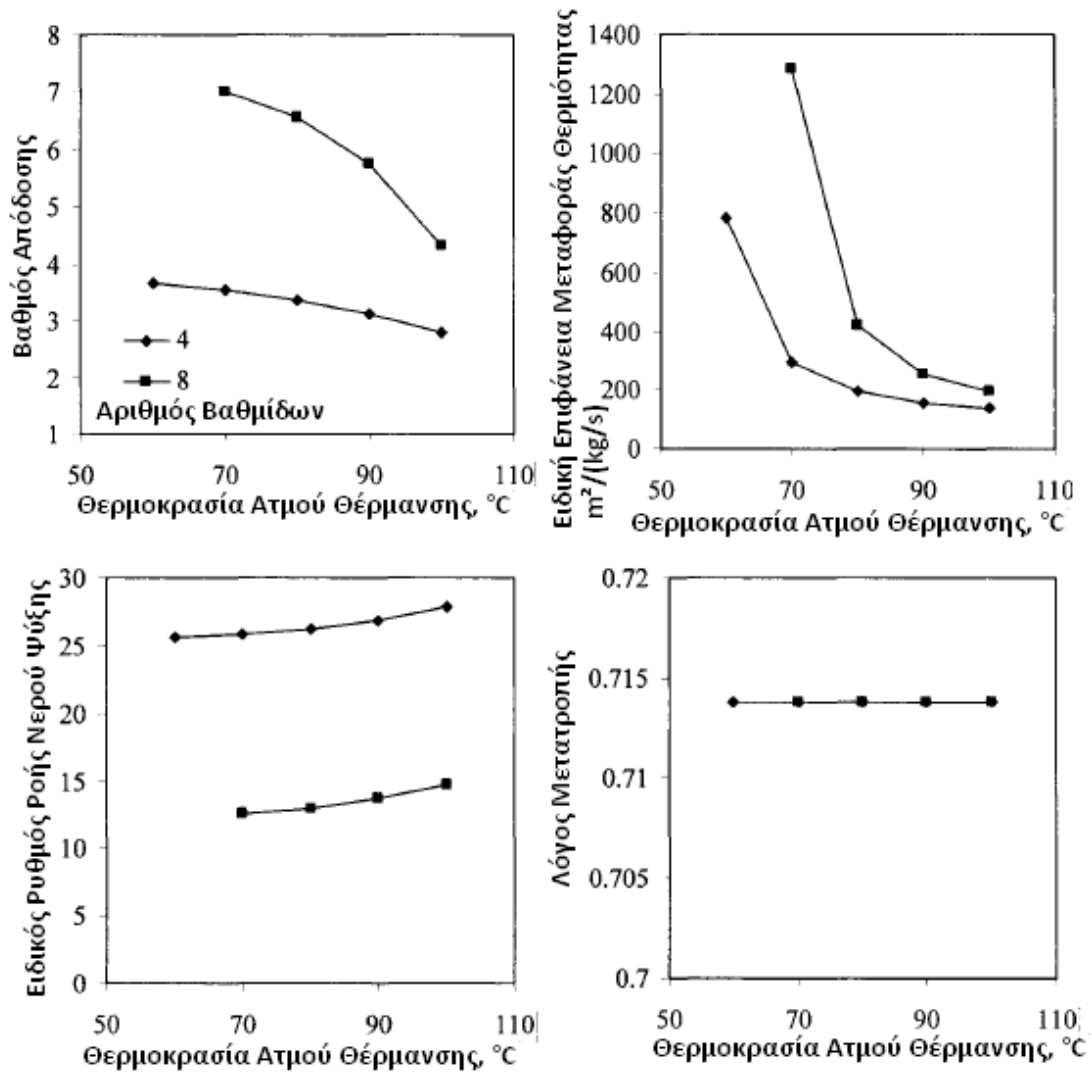




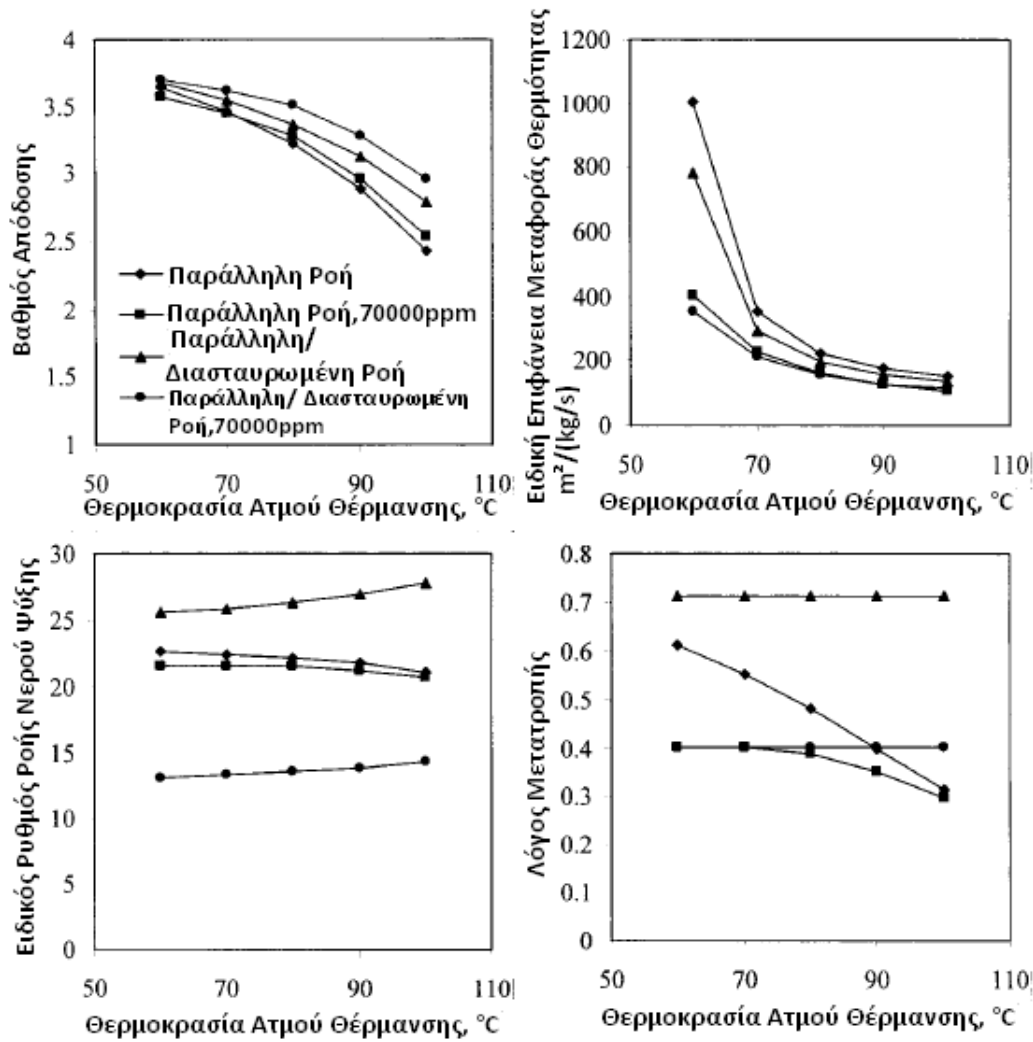
**Εικόνα 63:** Εξάρτηση του Συστήματος Πολλαπλής Εξάτμισης Με Παράλληλη Ροή (MEE-PF) από τη Θερμοκρασία του Ατμού Θέρμανσης και τον Αριθμό των Βαθμίδων για Αλατότητα Θαλασσινού Νερού ίση με 42.000ppm. [1]



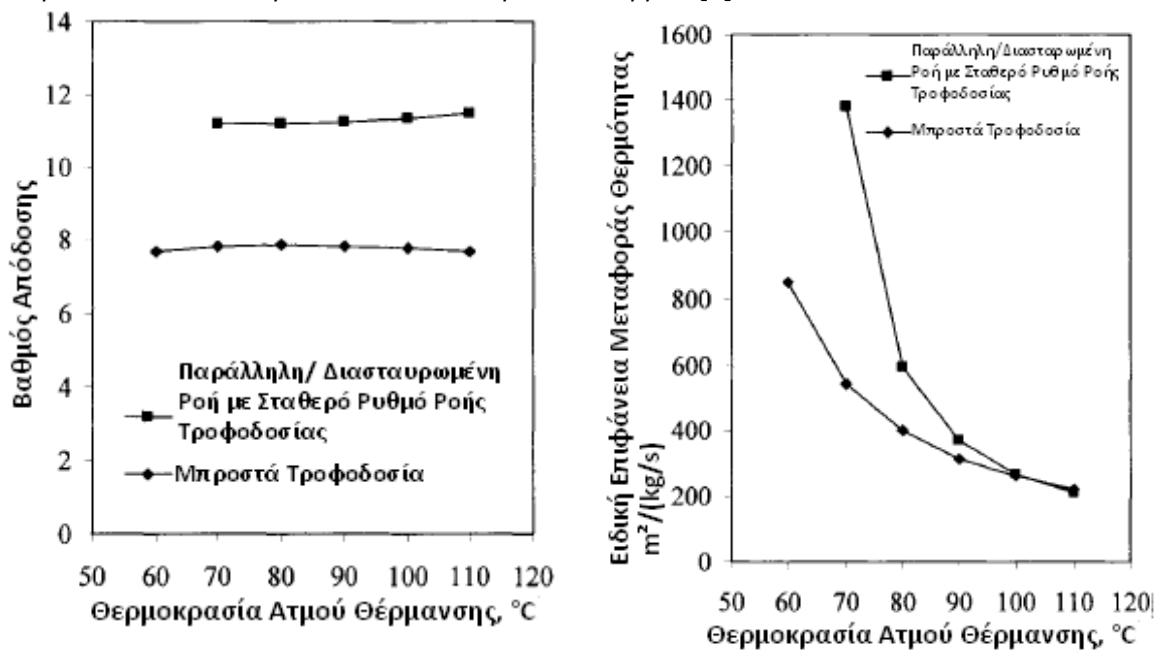
**Εικόνα 64:** Εξάρτηση του Συστήματος Πολλαπλής Εξάτμισης Με Παράλληλη/Διασταυρωμένη Ροή (MEE-PCF) από τη Θερμοκρασία του Ατμού Θέρμανσης και την Αλατότητα του Θαλασσινού Νερού για  $n=4$ . [1]



**Εικόνα 63:** Εξάρτηση του Συστήματος Πολλαπλής Εξάτμισης Με Παράλληλη /Διασταυρωμένη Ροή (MEE-PCF) από τη Θερμοκρασία του Ατμού Θέρμανσης και τον Αριθμό των Βαθμίδων για Αλατότητα Θαλασσινού Νερού ίση με 42.000ppt. [1]



Εικόνα 63: Σύγκριση των τεσσάρων Διαρρυθμίσεων των Συστημάτων Πολλαπλής Εξάτμισης για n=4 και Αλατότητα Θαλασσινού Νερού 42000ppm. [1]



Εικόνα 64: Σύγκριση των Συστημάτων Μπροστά (FF) και Παράλληλης Τροφοδοσίας (PF) για n=12. [1]

Σύγκριση της απόδοσης των συστημάτων παράλληλης τροφοδοσίας (PF) με τα συστήματα μπροστά τροφοδοσίας (FF) καθώς και τα συμβατικά συστήματα πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) παρουσιάζεται στον **Πίνακα 3**. Όπως μπορούμε να δούμε ο βαθμός απόδοσης ενός συστήματος πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) με 24 στάδια είναι ίσος με 8, για ένα σύστημα πολλαπλής εξάτμισης (ΜΕΕ) με διαμόρφωση 8 βαθμίδων κυμαίνεται από 4,9 έως 5,2 ενώ για μια διαμόρφωση 12 βαθμίδων είναι ίσος με 8. Η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας στα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης κυμαίνεται μεταξύ μιας κλίμακας των 200-500 m<sup>2</sup>/(kg/s). Πρέπει να σημειωθεί ότι τα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης με μπροστά τροφοδοσίας (ΜΕΕ-FF) δεν τα συναντάμε σε εμπορική κλίμακα και για το λόγο αυτό έγινε και περιορισμένα η ανάλυσή τους.

	Πολυβάθμια Εκτόνωση	Πολλαπλή Εξάτμιση	Πολλαπλή Εξάτμιση με Παράλληλη Ροή	Πολλαπλή Εξάτμιση με Παράλληλη/ Διασταυρωμένη Ροή
Αριθμός Βαθμίδων/Σταδίων	24	8	8	8
Βαθμός Απόδοσης	8	5,2	4,9	5,8
Ειδική Επιφάνεια Μεταφοράς Θερμότητας	259	212	335	255
Λόγος Μετατροπής	0,4	0,4	0,325	0,714
Αλατότητα Απορριπτόμενης Άλμης	70.000	70.000	62.247	146.776
Ειδικός Ρυθμός Ροής Νερού Ψύξης	2,4	2,6	8,9	13,7
Ειδική Ενέργεια Άντλησης	8,3	4,12	7,78	9,85

**Πίνακας 3:** Σύγκριση των Συστημάτων Παράλληλης/Διασταυρωμένης Τροφοδοσίας (PCF) με τα Συστήματα Μπροστά Τροφοδοσίας (FF) καθώς και τα Συμβατικά Συστήματα Πολυβάθμιας Εκτόνωσης (MSF) για Θαλασσινό Νερό Πρόσληψης Αλατότητας 42.000ppm και Θερμοκρασία Ατμού Θέρμανσης 90°C. [1]

Συνοψίζοντας, παρατηρούμε ότι έπειτα από την ανάλυση που προηγήθηκε για τις διάφορες διαρρυθμίσεις η καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται για συστήματα πολλαπλής εξάτμισης με παράλληλη/διασταυρωμένη ροή (PCF). Ωστόσο, τα συστήματα παράλληλης ροής (PF) έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά απόδοσης και άρα ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η λειτουργία τους είναι απλούστερα. Η λειτουργία και των δύο συστημάτων ευνοείται για υψηλότερες θερμοκρασίες εξαιτίας της δραστικής μείωσης της ειδικής επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας. Ωστόσο, η λειτουργία σε χαμηλότερες θερμοκρασίες δίνει μεγαλύτερη τιμή στο θερμικό βαθμό απόδοσης και μικρότερο ειδικό ρυθμό ροής του νερού ψύξης. Τελική επιλογή του πιο αποτελεσματικού και του λιγότερου ακριβού συστήματος καθώς και συνθηκών λειτουργίας απαιτεί πλήρης βελτιστοποίηση του συστήματος.

Τέλος, η παραπάνω σύγκριση μας δείχνει ότι τα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης με μπροστά τροφοδοσία (MEE-FF) παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλα συστήματα. Είναι δεδομένο ότι η μηχανική σχεδίαση των συστημάτων πολλαπλής εξάτμισης με μπροστά τροφοδοσία (MEE-FF) είναι αποτελεσματικότερη ενεργειακά εφόσον έχουν χαμηλότερη ειδική ενεργειακή κατανάλωση, ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας και ειδικό ρυθμό ροής νερού ψύξης. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του συστήματος σε σύγκριση με το σύστημα πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) βρίσκεται στο χαμηλό αριθμό βαθμίδων αλλά και της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας. Τα συστήματα μπροστά τροφοδοσίας (FF) και παράλληλης ροής (PF) έχουν παρόμοιους ή υψηλότερους βαθμούς απόδοσης σε σχέση με αυτούς των συστημάτων πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF), ωστόσο όμως, ο αριθμός των βαθμίδων είναι μόλις 12 για τα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης που ισοδυναμεί με 24 στάδια στα συστήματα πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF). Επιπλέον, στα τελευταία αυτά συστήματα η ειδική κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για την άντληση του κυκλοφορούν ρεύματος άλμης, είναι μεγαλύτερη.

### 2.3.7 Πολλαπλή Εξάτμιση - Συμπύεση Υδρατμού (Multiple Effect Evaporation- Thermal Vapor Compression)

#### 2.3.7.a Πολλαπλή Εξάτμιση Παράλληλης Τροφοδοσίας με Θερμική και Μηχανική Συμπύεση Υδρατμού (Multiple Effect Evaporation with Parallel Feed and Thermal and Mechanical Vapor Compression)

Η πολλαπλή εξάτμιση παράλληλης τροφοδοσίας (MEE-PF) είναι η διεργασία που χρησιμοποιείται κατά κόρον στην βιομηχανία για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού. Η διαρρυθμισμένη παράλληλη τροφοδοσία (PF) έχει ορισμένα ελκυστικά χαρακτηριστικά στα οποία περιλαμβάνεται η απλή διάταξη της διεργασίας, καθώς και σταθερό και ευρύ φάσμα λειτουργίας. Το μοντέλο της διαδικασίας καθώς και η απόδοσή της έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτά του συστήματος μπροστά τροφοδοσίας. Παρακάτω στο κεφάλαιο αυτό θα ακολουθήσει ανάλυση του συστήματος παράλληλης και παράλληλης/ διασταυρωμένης ροής (PCF).

Όπως έχει αναφερθεί και στα προηγούμενα, τα συνδυασμένα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης (MEE) και μηχανικής συμπύεσης υδρατμού (MVC) θεωρούν ότι αυξάνουν την δυναμικότητα του συστήματος, ενώ όπως θα αποδειχθεί και πιο μετά δεν έχουν καμία επίδραση στην ειδική κατανάλωση ενέργειας. Το μερίδιο της αγοράς αυτών των συστημάτων είναι μικρότερο από 1%. Από την άλλη πλευρά, τα συνδυασμένα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης και θερμικής συμπύεσης υδρατμού (MEE-TVC) έχουν υψηλότερο μερίδιο, περίπου το 5%. Και οι δυο διεργασίες έχουν ελκυστικά χαρακτηριστικά που τις κάνουν εξίσου υψηλά ανταγωνιστικές σε σχέση με άλλες καλά εδραιωμένες διεργασίες, στις οποίες περιλαμβάνονται οι πολυβάθμια εκτόνωση και η αντίστροφη ώσμωση.

Η σχηματική απεικόνιση των συστημάτων πολλαπλής εξάτμισης παράλληλης (MEE-PF) και παράλληλης/διασταυρωμένης ροής (MEE-PCF) παρουσιάζεται στην **Εικόνα 65a** και **65b**. Όπως μπορούμε να δούμε και τα δυο συστήματα έχουν  $n$  βαθμίδες και  $n-1$  θαλάμους εκτόνωσης. Κάθε βαθμίδα περιλαμβάνει έναν θάλαμο υδρατμού, ένα πλέγμα αποθάμβωσης, σωλήνες συμπυκνωτή/ εξατμιστήρα, ακροφύσια ψεκασμού άλμης και μια πισίνα άλμης. Και στα δύο συστήματα, οι βαθμίδες αριθμούνται από το 1 μέχρι το  $n$  από τα αριστερά προς τα δεξιά (όπως δηλαδή και η κατεύθυνση της ροής θερμότητας). Ο υδρατμός ρέει από τα αριστερά προς τα δεξιά, προς την κατεύθυνση της πτώσης πίεσης, ενώ η ροή του θαλασσινού νερού είναι προς κάθετη κατεύθυνση. Συμπιεσμένος υδρατμός εισάγεται στο εσωτερικό των σωλήνων κατά την πρώτη βαθμίδα, ενώ το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας από την πλευρά του κελύφους καταιονίζεται στις πρώτες σειρές σωλήνων. Τα σταγονίδια άλμης σχηματίζουν μια λεπτή πίπτουσα στοιβάδα στις διαδοχικές σειρές μέσα στον εξατμιστήρα. Στην πρώτη βαθμίδα, η

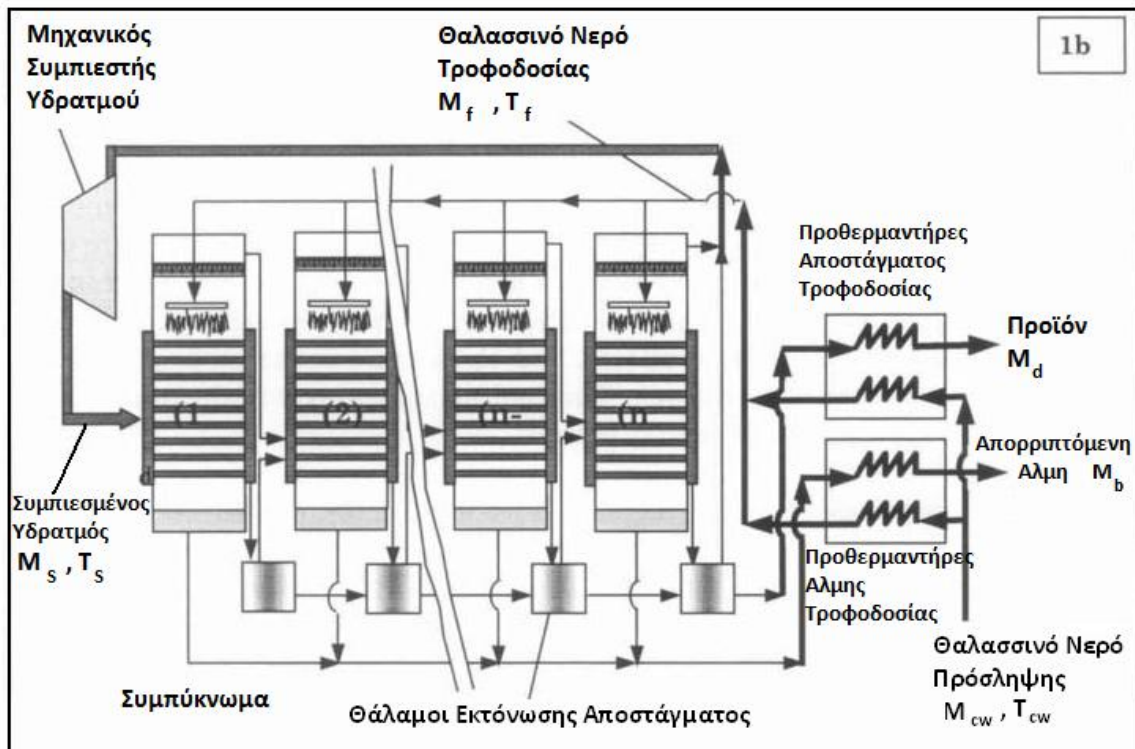
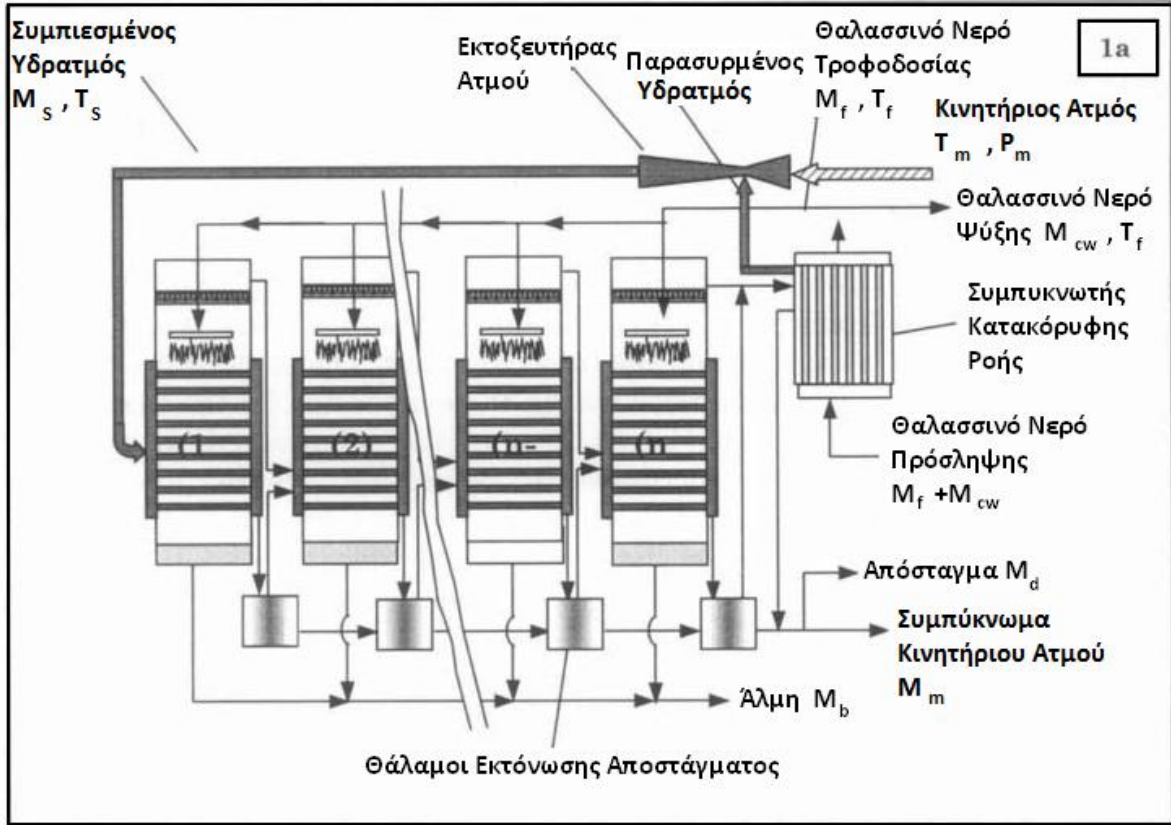
πίπτουσα στοιβάδα άλμης απορροφά τη λανθάνουσα θερμότητα του συμπιεσμένου υδρατμού. Σαν αποτέλεσμα, η θερμοκρασία άλμης αυξάνεται έως αυτή του κορεσμού, όπου ξεκινά η εξάτμιση και σχηματίζεται μια μικρή ποσότητα υδρατμού. Ο υδρατμός αυτός χρησιμοποιείται για την θέρμανση της δεύτερης βαθμίδας, όπου συμπυκνώνεται στους σωλήνες και απελευθερώνει τη λανθάνουσα θερμότητα στη στοιβάδα της άλμης. Αυτή η διεργασία επαναλαμβάνεται σε κάθε βαθμίδα, έως τη βαθμίδα  $n$ .

Και στα δυο συστήματα, ο συμπυκνωμένος υδρατμός στις βαθμίδες από 2 έως  $n$  εισάγεται στον αντίστοιχο θάλαμο εκτόνωσης, όπου η θερμοκρασία του συμπυκνωμένου υδρατμού μειώνεται μέσω της εκτόνωσης μιας μικρής ποσότητας υδρατμού. Οι εκτονωμένοι υδρατμοί δρομολογούνται εντός των σωλήνων της επόμενης βαθμίδας μαζί με τον υδρατμό που σχηματίζεται από βρασμό ή εκτόνωση εντός των προηγούμενων βαθμίδων.

Στο σύστημα πολλαπλής εξάτμισης παράλληλης ροής (MEE-PF), ο υδρατμός που σχηματίζεται στην τελευταία βαθμίδα εισάγεται στο συμπυκνωτή κατακόρυφης ροής. Μια ελεγχόμενη ποσότητα του θαλασσινού νερού πρόσληψης δρομολογείται στο εσωτερικό των σωλήνων του συμπυκνωτή κατακόρυφης ροής, όπου συμπυκνώνεται μέρος του υδρατμού που σχηματίστηκε στην τελευταία βαθμίδα. Ο εκτοξευτήρας υδρατμού εισάγει το μέρος του υδρατμού που έχει απομείνει, όπου συμπιέζεται από τον κινητήριο ατμό στην επιθυμητή πίεση και θερμοκρασία. Το θερμό ρεύμα του θαλασσινού νερού πρόσληψης που αφήνει το συμπυκνωτή χωρίζεται σε δυο μέρη, το πρώτο αποτελεί το ρεύμα του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας, το οποίο και μοιράζεται μεταξύ των βαθμίδων του εξατμιστήρα και το δεύτερο είναι το ρεύμα του θαλασσινού νερού ψύξης, το οποίο και απορρίπτεται πίσω στη θάλασσα. Το ρεύμα του θαλασσινού νερού ψύξης απομακρύνει τη θερμότητα που προστίθεται στο σύστημα από τον κινητήριο ατμό.

Στο συγκλίνον τμήμα του εκτοξευτήρα ατμού η κινητική ενέργεια του κινητήριου ατμού αυξάνεται δραστικά και η ταχύτητα γίνεται υπερηχητική κοντά στο σημείο συστολής. Κατά συνέπεια, η πίεση του πέφτει σε χαμηλές τιμές και επιτρέπει την αναρρόφηση του εισερχόμενου υδρατμού. Η ανάμειξη του κινητήριου ατμού και του παρασυρμένου υδρατμού γίνεται πριν την συστολή της εκτίναξης. Στο αποκλίνον τμήμα, η ταχύτητα του μίγματος μειώνεται, ενώ, η πίεσή του αρχίζει να αυξάνεται. Η διεργασία της συμπίεσης ελέγχεται από την γεωμετρία του εκτοξευτήρα και τις ιδιότητες του κινητήριου ατμού.



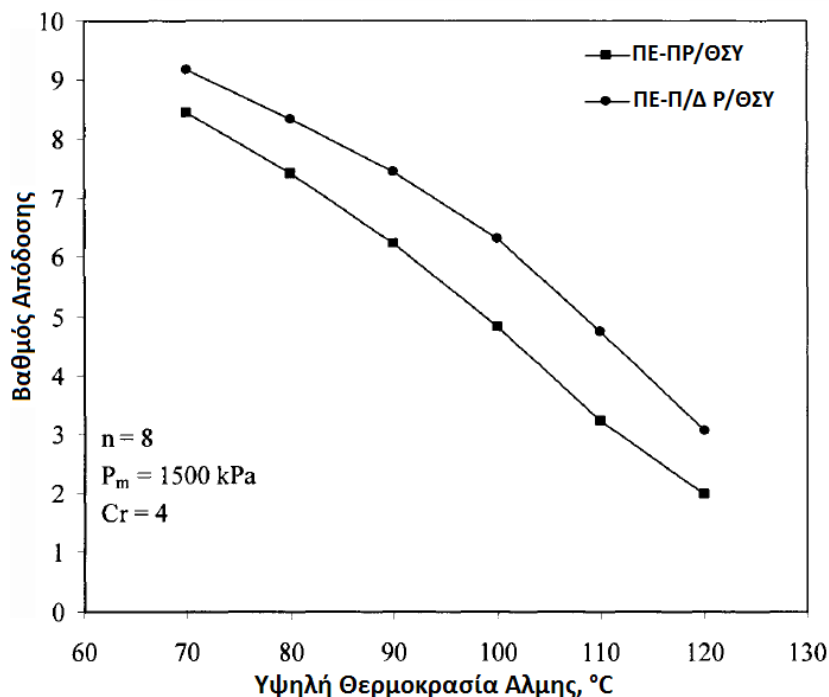


Εικόνα 65: Σχηματική Απεικόνιση Συστήματος Πολλαπλής Εξάτμισης με Συμπύεση Υδρατμού (MEE-VC) (1a: Σύστημα Παράλληλης Τροφοδοσίας με Θερμική Συμπύεση Υδρατμού (PF-TV) και (2b: Σύστημα Παράλληλης Τροφοδοσίας με Μηχανική Συμπύεση Υδρατμού (PF-MVC)). [1]

Το σύστημα μηχανικής συμπίεσης υδρατμού (MVC) το ξεχωρίζουμε από την απουσία του συμπυκνωτή και της χρήσης προθερμαντήρων τροφοδοσίας. Απομάκρυνση του συμπιεστή κατακόρυφης ροής είναι αποτέλεσμα δρομολόγησης του ολικού ατμού που σχηματίζεται στην τελευταία βαθμίδα στο μηχανικό συμπιεστή υδρατμού, όπου ο υδρατμός υπερθερμαίνεται στην επιθυμητή θερμοκρασία και πίεση. Στο άλλο τελικό τμήμα, οι προθερμαντήρες τροφοδοσίας ανακτούν μέρος της αισθητής θερμότητας που βρίσκεται στην απορριπτόμενη άλμη και στο ρεύμα του προϊόντος αποστάγματος. Αυτό βελτιώνει τη θερμική αποτελεσματικότητα του συστήματος και διατηρεί την παραγωγή στα σχεδιαστικά επίπεδα, ειδικά κατά την διάρκεια της χειμερινής λειτουργίας.

Η κύρια διαφορά των συστημάτων πολλαπλής εξάτμισης με παράλληλη (MEE-PF) και παράλληλη/ διασταυρωμένη ροή (MEE-PCF) είναι ότι στο δεύτερο σύστημα η άλμη που φεύγει από τη βαθμίδα  $i$  εισάγεται μέσα στην πίσινα της άλμης της βαθμίδας  $i+1$ . Σαν αποτέλεσμα της θετικής θερμοκρασιακής διαφοράς για την άλμη μεταξύ των βαθμίδων  $i$  και  $i+1$ , ένα μικρό μέρος της άλμης τροφοδοσίας εκτονώνεται καθώς εισάγεται στη βαθμίδα  $i+1$ . Οι εκτονωμένοι υδρατμοί βελτιώνουν την παραγωγικότητα του συστήματος και την θερμική αποδοτικότητα. Στην βαθμίδα  $i+1$ , οι εκτονωμένοι υδρατμοί προστίθενται στον σχηματιζόμενο από βρασμό υδρατμό μέσα στην ίδια βαθμίδα. Όσο για τα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης παράλληλη ροής (MEE-PF), η άλμη που αφήνει κάθε στάδιο απορρίπτεται απευθείας στη θάλασσα.

Τα χαρακτηριστικά του συστήματος θερμικής συμπίεσης υδρατμού (TVC) μελετώνται σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας θερμού ατμού. Η **Εικόνα 66** δείχνει τις μεταβολές στο θερμικό βαθμό απόδοσης για συστήματα ΠΕ-Παράλληλης Ροής/ΘΣΥ (ΠΕ-ΠΡ/ΘΣΥ, ΜΕΕ-PF/TVC) και ΠΕ-Παράλληλης/Διασταυρωμένης Ροής/ΘΣΥ (ΠΕ-Π/Δ Ρ/ΘΣΥ, ΜΕΕ-PVF/TVC) με 8 βαθμίδες, πίεση κινητήριου ατμού 1500 kPa και λόγο συμπίεσης 4. Όπως παρουσιάζεται, ο βαθμός απόδοσης μειώνεται με την αύξηση της υψηλής θερμοκρασίας της άλμης. Επίσης, για χαμηλές υψηλές θερμοκρασίες της άλμης ο θερμικός βαθμός απόδοσης για μονάδες συμπίεσης υδρατμού είναι σχεδόν 75-100% υψηλότερος από αυτόν του αυτόνομου συστήματος. Για παράδειγμα, για υψηλή θερμοκρασία άλμης αυτή των 60°C, ο θερμικός βαθμός απόδοσης στις μονάδες συμπίεσης υδρατμού είναι 12,2 και είναι ισοδύναμος με 7,3 για αυτόνομες μονάδες.



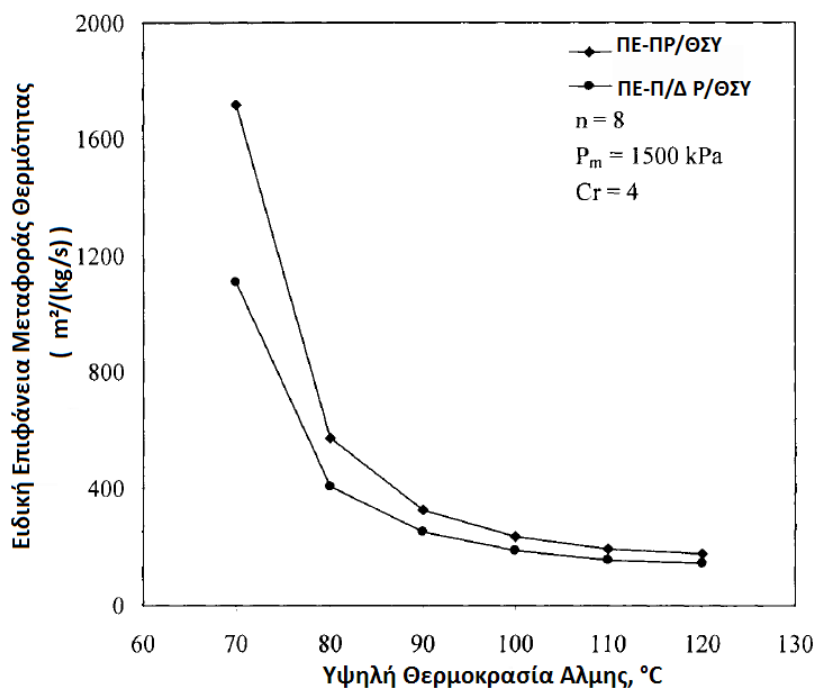
**Εικόνα 66:** Μεταβολές στο Θερμικό Βαθμό Απόδοσης σαν Συνάρτηση της Υψηλής Θερμοκρασίας της Άλμης. [1]

Η μείωση στο θερμικό βαθμό απόδοσης για υψηλότερες θερμοκρασίες ατμού προκαλείται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Τη μείωση της λανθάνουσας θερμότητας του συμπιεσμένου υδρατμού.
- Την αύξηση στην ποσότητα της αισθητής θερμότητας στην τροφοδοσία, όσο η θερμοκρασία τροφοδοσίας διατηρείται σταθερά στους 35°C.
- Την αύξηση στην ποσότητα του κινητήριου ατμού που απαιτείται για τη συμπίεση του υδρατμού σε υψηλότερες θερμοκρασίες, όσο ο παρασυρμένος υδρατμός διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία κάτω των 45°C.

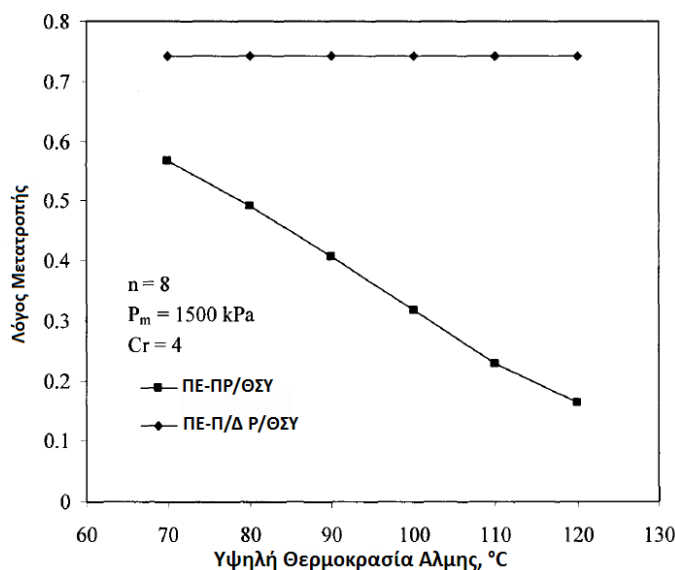
Διακυμάνσεις στην ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας τόσο για το σύστημα ΠΕ-ΠΡ/ΘΣΥ (MEE-PF/TVC) αλλά και του ΠΕ-Π/Δ P/ΘΣΥ (MEE-PCF/TVC) παρουσιάζονται στο διάγραμμα της **Εικόνας 67**. Όπως μπορούμε να δούμε, η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας μειώνεται απότομα καθώς η θερμοκρασία του ατμού θέρμανσης αυξάνει. Οι ακόλουθες επιδράσεις προκαλούν αυτή την συμπεριφορά:

- Η αύξηση του ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σαν αποτέλεσμα των υψηλότερων τιμών των φυσικών ιδιοτήτων της άλμης και του συμπυκνωμένου ατμού, ο οποίος αυξάνει το ποσοστό μεταφοράς θερμότητας και στα δυο ρεύματα.
- Η αύξηση της θερμοκρασίας της κινητήριας δύναμης ανά βαθμίδα, όπου για υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας άλμης και για τον ίδιο αριθμό βαθμίδων προκαλείται αύξηση της θερμοκρασιακής πτώσης ανά βαθμίδα.



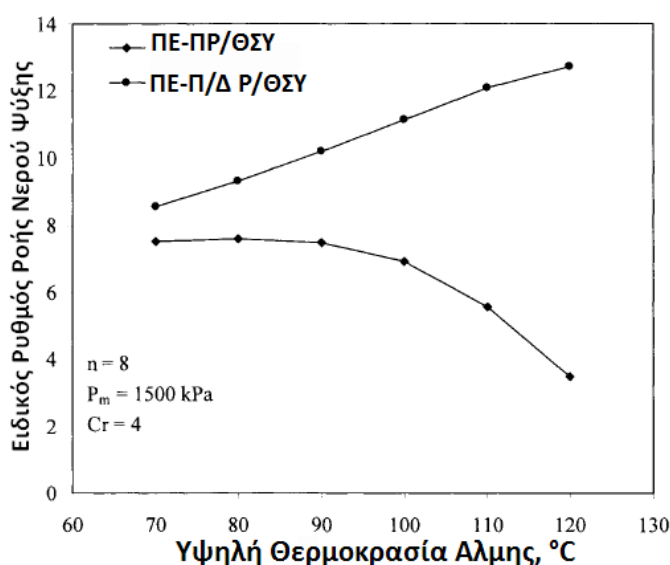
**Εικόνα 67:** Μεταβολές στην Ειδική Επιφάνεια Μεταφοράς Θερμότητας σαν Συνάρτηση της Υψηλής Θερμοκρασίας της Άλμης. [1]

Όπως παρουσιάζεται και στο διάγραμμα της **Εικόνας 68**, ο λόγος μετατροπής του συστήματος PE-Π/ΔΡ/ΘΣΥ (MEE-PCF/TVC) είναι ανεξάρτητος από την υψηλή θερμοκρασία της άλμης. Από την άλλη πλευρά, ο λόγος μετατροπής για το σύστημα PE-ΠΡ/ΘΣΥ (MEE-PF/TVC) μειώνεται καθώς η υψηλή θερμοκρασία άλμης αυξάνει. Ακόμα, για το σύστημα PE-Π/ΔΡ/ΘΣΥ (MEE-PCF/TVC) το ρεύμα τροφοδοσίας σε όλες τις βαθμίδες έχει σταθερή αλατότητα στα 42.000ppm, ενώ η αλατότητα του τελικού ρεύματος άλμης είναι 70.000ppm. Για το λόγο αυτό, η μελέτη αυτών των συστημάτων είναι ανεξάρτητη της υψηλής θερμοκρασίας άλμης. Σαν αποτέλεσμα, η ποσότητα του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας για το σύστημα PE-Π/ΔΡ/ΘΣΥ (MEE-PCF/TVC) παραμένει σταθερή καθώς η υψηλή θερμοκρασία άλμης αυξάνει. Όσο για το σύστημα PE-ΠΡ/ΘΣΥ (MEE-PF/TVC), ο λόγος μετατροπής μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του ατμού θέρμανσης, **Εικόνα 68**. Αυτό οφείλεται στη μείωση της αλατότητας της άλμης σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Έτσι, σε υψηλότερες θερμοκρασίες η ποσότητα του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας πρέπει να αυξάνεται ώστε να υπολογίζονται τα όρια που θέτονται για την αλατότητα της άλμης, ενώ με τη σειρά της μειώνεται η ποσότητα του θαλασσινού νερού ψύξης.



**Εικόνα 68:** Μεταβολές στο Λόγο Μετατροπής σαν Συνάρτηση της Υψηλής Θερμοκρασίας της Άλμης. [1]

Διακυμάνσεις στον ειδικό ρυθμό ροής του θαλασσινού νερού ψύξης και για τα δύο συστήματα παρουσιάζονται στο διάγραμμα της **Εικόνας 69**. Όπως μπορούμε να δούμε, για το σύστημα PE-Π/ΔΡ/ΘΣΥ (ΜΕΕ-PCF/TVC) ο ειδικός ρυθμός ροής του νερού ψύξης μειώνεται με την αύξηση της υψηλής θερμοκρασίας άλμης. Αυτό οφείλεται στη αύξηση του ειδικού θερμικού φορτίου, ή στη μείωση του θερμικού βαθμού απόδοσης, και το σταθερό λόγο μετατροπής, ή το σταθερό ρυθμό ροής τροφοδοσίας. Και οι δύο επιδράσεις απαιτούν την αύξηση στο ειδικό ρυθμό ροής του νερού ψύξης. Για τα συστήματα PE-ΠΡ/ΘΣΥ (ΜΕΕ-PF/TVC), η μείωση του ειδικού ρυθμού ροής του νερού ψύξης για υψηλότερες θερμοκρασίες άλμης επίσης οφείλεται στη μείωση του λόγου μετατροπής του συστήματος, ή στην αύξηση της ποσότητας του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας.

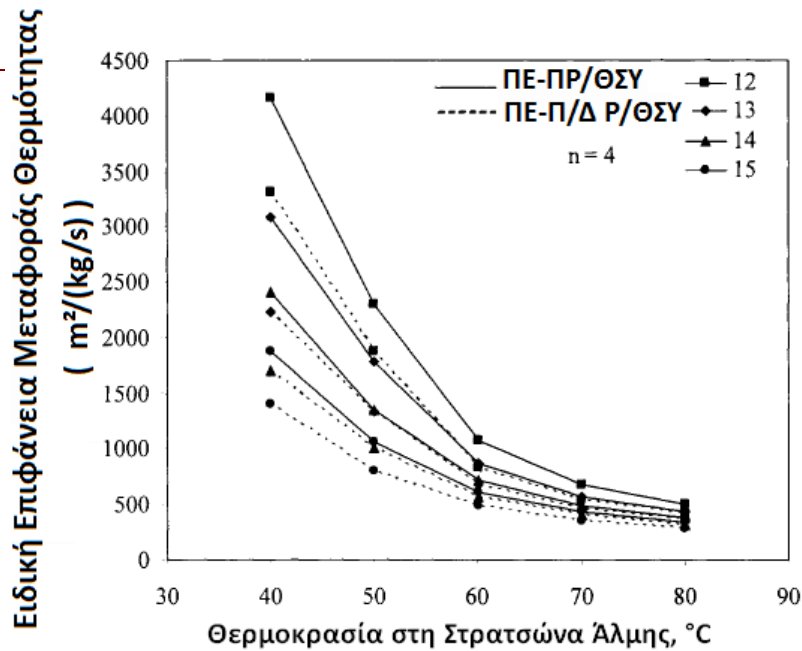


**Εικόνα 69:** Μεταβολές στον Ειδικό Ρυθμό Ροής του Νερού Ψύξης σαν Συνάρτηση της Υψηλής Θερμοκρασίας της Άλμης. [1]

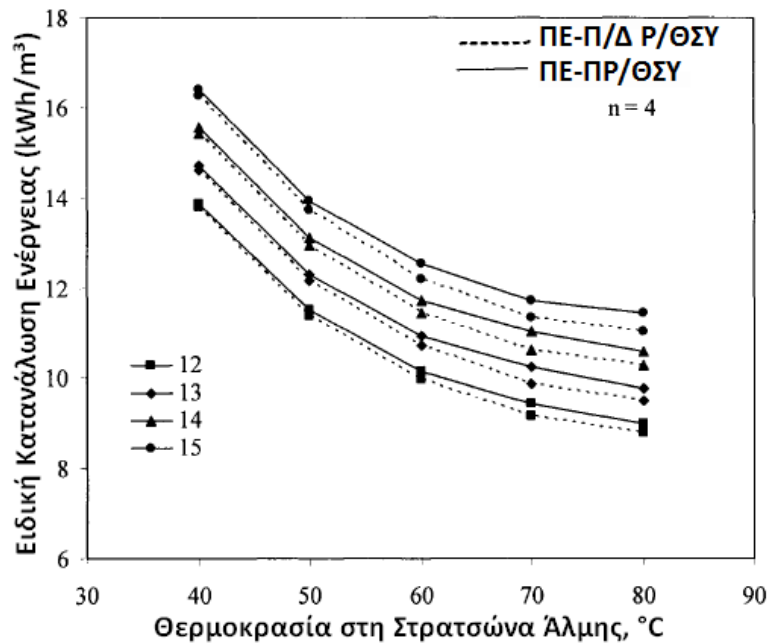
Ανάλυση για τα μηχανικά συστήματα συμπίεσης υδρατμού (MVC) δείχνει ότι έχουν μεγάλη ευαισθησία στο εύρος λειτουργίας των παραμέτρων, ειδικά στη θερμοκρασιακή διαφορά της άλμης στην πρώτη και τελευταία βαθμίδα και στη θερμοκρασία του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας.

Στα διαγράμματα της **Εικόνας 70** και **71** αντίστοιχα παρουσιάζεται η συμπεριφορά της ειδικής επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας και της ειδικής ενεργειακής κατανάλωσης αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα όπως μπορούμε να δούμε και στην **Εικόνα 70**, η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας μειώνεται με την αύξηση της υψηλής θερμοκρασίας της άλμης και τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του συμπυκνωμένου υδρατμού και της υψηλής θερμοκρασίας της άλμης. Από τη άλλη πλευρά, η ειδική ενεργειακή κατανάλωση μειώνεται με την αύξηση της υψηλής θερμοκρασίας της άλμης και τη μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του συμπυκνωμένου υδρατμού και της υψηλής θερμοκρασίας της άλμης, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 71**. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ειδική κατανάλωση ενέργειας και για τους δυο τύπους συστημάτων που προαναφέρθηκαν έχουν παρόμοιες τιμές για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας, **Εικόνα 71**. Αυτό συμβαδίζει με το μοντέλο του συμπιεστή, εφόσον εξαρτάται από την ποσότητα του παραγόμενου υδρατμού στην τελευταία βαθμίδα και στο θάλαμο εκτόνωσης, το εύρος συμπίεσης καθώς και τις θερμοκρασίες του συμπιεσμένου ρεύματος υδρατμού και του υδρατμού πρόσληψης. Και για τα δυο συστήματα η θερμοκρασία της άλμης στην πρώτη βαθμίδα, ο υδρατμός πρόσληψης και ο συμπιεσμένος υδρατμός ταυτίζονται. Ωστόσο, στο σύστημα ΠΕ-Π/ΔΡ/ΘΣΥ (MEE-PCF/TVC) η ποσότητα του υδρατμού που παράγεται στην τελευταία βαθμίδα είναι ελαφρώς μεγαλύτερη εξαιτίας της διεργασίας εκτόνωσης.

Όσο για την ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας, οι τιμές για το σύστημα ΠΕ-Π/ΔΡ (MEE-PCF) είναι μικρότερες σε σχέση με αυτές του συστήματος ΠΕ-ΠΡ(MEE-PF). Αυτό οφείλεται στην άμεση απόρριψη της άλμης από κάθε βαθμίδα για το σύστημα ΠΕ-ΠΡ(MEE-PF). Από την άλλη πλευρά, στον άλλο τύπο συστήματος, το ρεύμα της άλμης που αφήνει κάθε βαθμίδα απελευθερώνει μέρος της θερμότητας του μέσω της διεργασίας της εκτόνωσης στις ακόλουθες διαδοχικές βαθμίδες.



**Εικόνα 70:** Μεταβολές στην Ειδική Επιφάνεια Μεταφοράς Θερμότητας σαν Συνάρτηση της Θερμοκρασίας στη Στρατσώνα της Άλμης και της Θερμοκρασιακής Διαφοράς Μεταξύ του Συμπυκνωμένου Υδρατμού και της Απορριπτόμενης Άλμης. [1]



**Εικόνα 71:** Μεταβολές στην Ειδική Κατανάλωση Ενέργειας σαν Συνάρτηση της Θερμοκρασίας στη Στρατσώνα της Άλμης και της Θερμοκρασιακής Διαφοράς Μεταξύ του Συμπυκνωμένου Υδρατμού και της Απορριπτόμενης Άλμης. [1]

Έπειτα από την ανάλυση των συστημάτων με δύο διαρρυθμίσεις, της παράλληλης(PF) και παράλληλης/διασταυρωμένης ροής(PCF), για την θερμική (TVC)και μηχανική (MVC) λειτουργία συμπίεσης υδρατμού, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Ο βαθμός απόδοσης και των δύο συστημάτων, ειδικά για χαμηλές θερμοκρασίες άλμης, είναι περισσότερο από 50-100% μεγαλύτερος από αυτόν των συστημάτων αυτόνομης λειτουργίας.
- Η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας για όλες τις διαρρυθμίσεις, συμπεριλαμβανομένου της θερμικής και μηχανικής συμπίεσης υδρατμού,

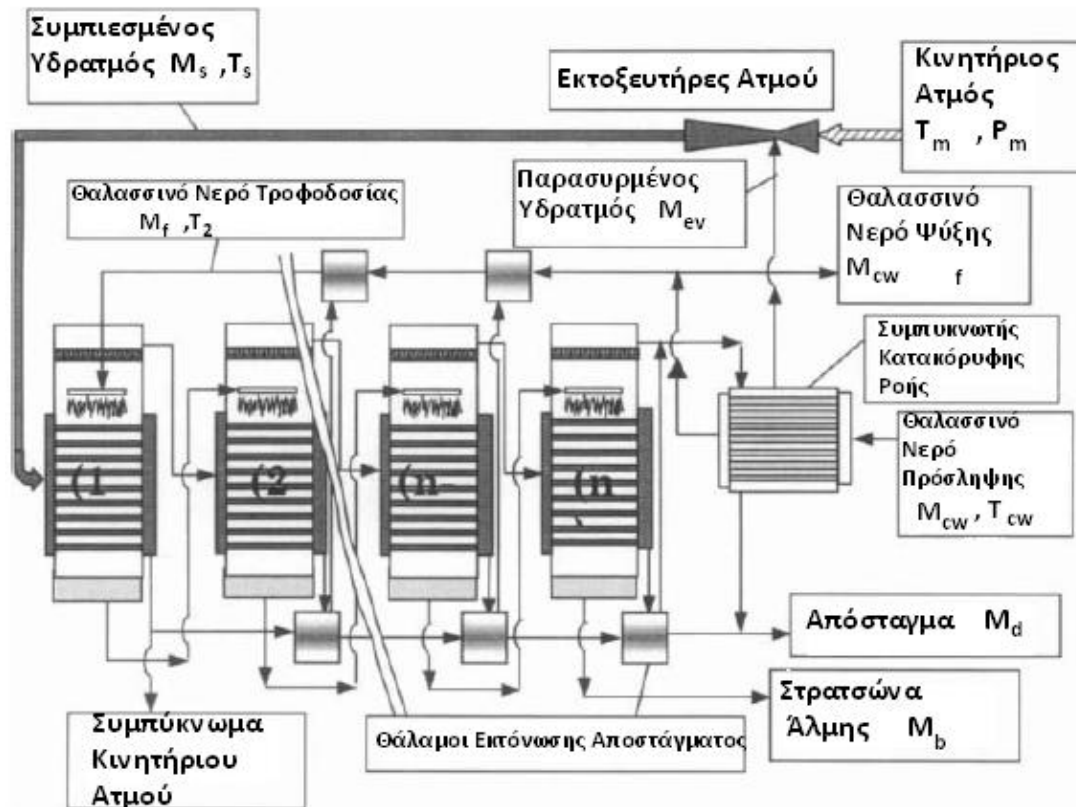
μειώνεται δραστικά για υψηλότερες θερμοκρασίες άλμης εξαιτίας της αύξησης της κινητήριας δύναμης για μεταφορά θερμότητας.

- Η ειδική κατανάλωση ενέργειας για τα συστήματα μηχανική συμπίεσης υδρατμού έχουν παρόμοιες τιμές και για τις δυο διαρρυθμίσεις εφόσον εξαρτώνται από τη θερμοκρασιακή διαφορά του υδρατμού πρόσληψης και του συμπιεσμένου υδρατμού, όπως επίσης και για την υψηλή θερμοκρασία άλμης, με όλα τα παραπάνω να παίρνουν παρόμοιες τιμές και για τα δύο συστήματα.
- Η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας για το σύστημα ΠΕ-Π/ΔΡ/ΘΣΥ είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή του συστήματος ΠΕ-ΠΡ/ΘΣΥ και αυτό οφείλεται στο γεγονός της αύξησης του ολικού ρυθμού ροής του προϊόντος, ο οποίος προκύπτει από την εκτόνωση της άλμης μέσα σε κάθε βαθμίδα.

### **2.3.7.b Πολλαπλή Εξάτμιση Μπροστά Τροφοδοσίας με Θερμική Συμπίεση Υδρατμού (Multiple Effect Evaporation with Forward Feed and Thermal Vapor Compression)**

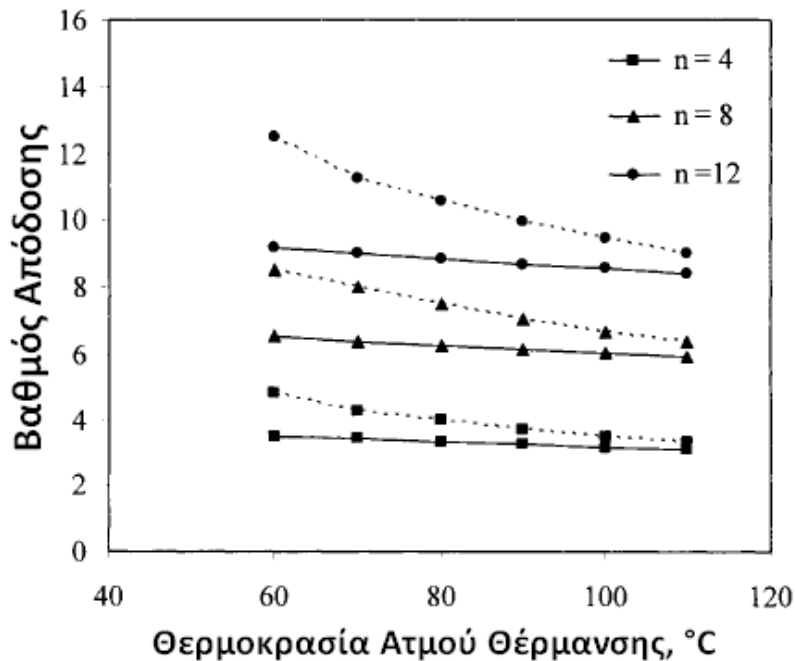
Η απεικόνιση αυτού του συστήματος δίνεται στο παρακάτω σχήμα της **Εικόνας 72**. Στοιχεία της διεργασίας είναι παρόμοια με αυτά του συστήματος μπροστά τροφοδοσίας, το οποίο αναλύθηκε στο κεφάλαιο **2.3.6**. Επίσης ο συνδυασμός του συστήματος με την διεργασία της θερμικής συμπίεσης υδρατμού (TVC) έχουν ίδια χαρακτηριστικά με το σύστημα παράλληλης τροφοδοσίας (PF) που αναφέρθηκε στην παραπάνω ενότητα.



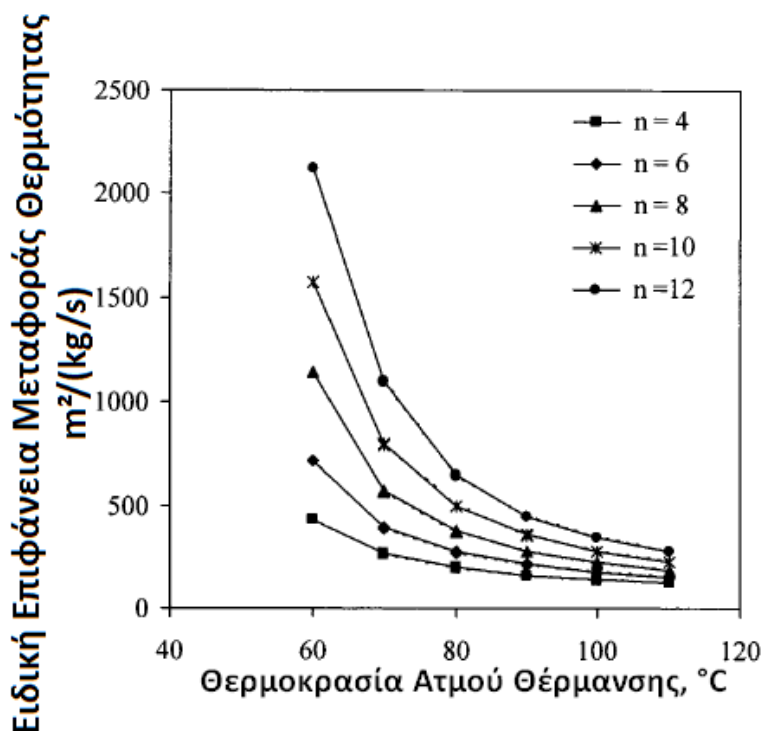


**Εικόνα 72:** Σύστημα Πολλαπλής Εξάτμισης Μπροστά Τροφοδοσίας με Θερμική Συμπίεση Υδρατμού (MEE-FF/TVC). [1]

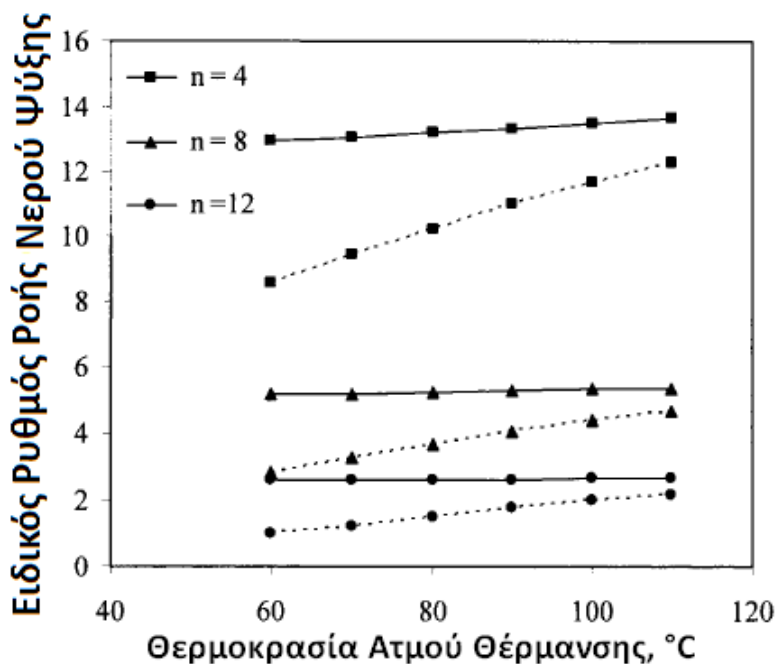
Η απόδοση των συνδυασμένων συστημάτων πολλαπλής εξάτμισης μπροστά τροφοδοσίας με θερμική συμπίεση υδρατμού (MEE-FF/TVC) μαζί με τα αυτόνομα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης μπροστά τροφοδοσίας (MEE-FF) σαν συνάρτηση του αριθμού των βαθμίδων και της θερμοκρασίας του ατμού θέρμανσης, παρουσιάζεται στα διαγράμματα των **Εικόνων 73** έως **75**. Όπως είναι και αναμενόμενο, ο βαθμός απόδοσης του συστήματος συμπίεσης υδρατμού είναι υψηλότερος, ειδικότερα για χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Η μείωση του βαθμού απόδοσης στα συστήματα θερμικής συμπίεσης υδρατμού για υψηλότερες θερμοκρασίες προκαλείται από την αύξηση του εύρους συμπίεσης. Έτσι, για μεγαλύτερες θερμοκρασίες απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα κινητήριου υδρατμού ώστε να επιτευχθεί το απαιτούμενο εύρος συμπίεσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν αύξηση του ειδικού ρυθμού ροής του νερού ψύξης στα συστήματα συμπίεσης υδρατμού για υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας και μικρότερο αριθμό βαθμίδων. Η αύξηση όμως στη θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος αυξάνει με την σειρά της την ποσότητα του κινητήριου ατμού, η οποία αυξάνει το θερμικό φορτίο του συστήματος και την απαιτούμενη ποσότητα του νερού ψύξης ανά kg αποσταγμένου προϊόντος.



**Εικόνα 73:** Επίδραση της Θερμοκρασίας του Ατμού Θέρμανσης και του Αριθμού των Βαθμίδων στον Βαθμό Απόδοσης των Συστημάτων Πολλαπλής Εξάτμισης(MEE) (—) και Πολλαπλής Εξάτμισης με Θερμική Συμπύεση Υδρατμού(MEE-TVC)(-----). [1]



**Εικόνα 74:** Επίδραση της Θερμοκρασίας του Ατμού Θέρμανσης και του Αριθμού των Βαθμίδων στην Ειδική Επιφάνεια Μεταφοράς Θερμότητας των Συστημάτων Πολλαπλής Εξάτμισης(MEE) (—) και Πολλαπλής Εξάτμισης με Θερμική Συμπύεση Υδρατμού(MEE-TVC) (-----). [1]

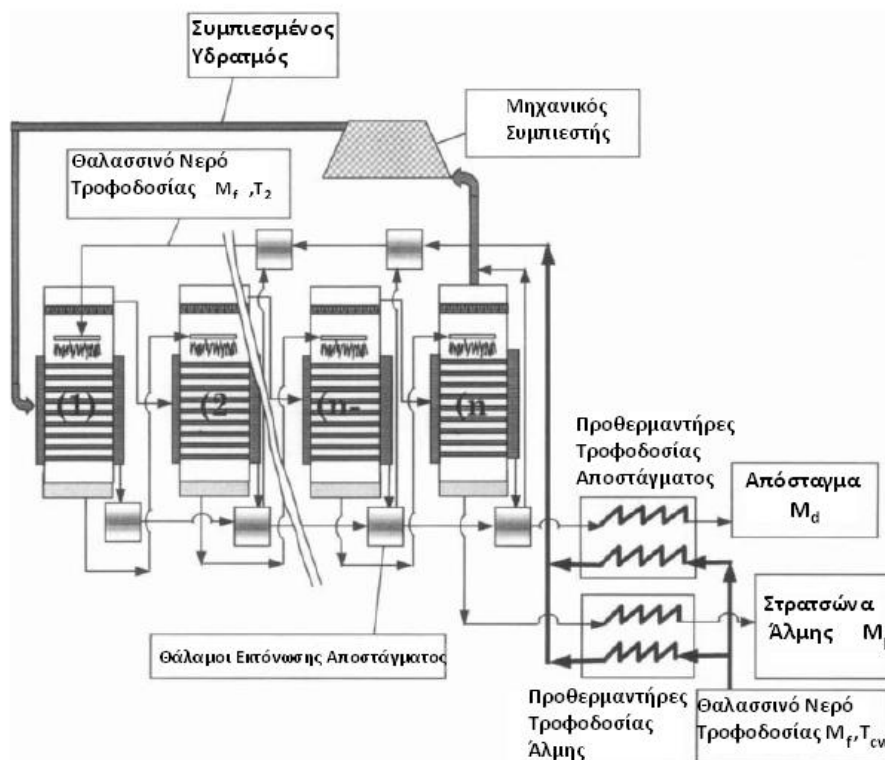


**Εικόνα 75:** Επίδραση της Θερμοκρασίας του Ατμού Θέρμανσης και του Αριθμού των Βαθμίδων στον Ειδικό Ρυθμό Ροής Νερού Ψύξης των Συστημάτων Πολλαπλής Εξάτμισης (MEE) (—) και Πολλαπλής Εξάτμισης με Θερμική Συμπύεση Υδρατμού (MEE-TVC) (-----). [1]

Η αύξηση του ειδικού ρυθμού ροής του νερού ψύξης για μικρότερο αριθμό βαθμίδων προκαλείται από την αύξηση της ποσότητας του παραγόμενου υδρατμού σε κάθε βαθμίδα. Έτσι, η ποσότητα του παραγόμενου υδρατμού στην τελευταία βαθμίδα αυξάνει και ως αποτέλεσμα απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα νερού ψύξης. Πρέπει να σημειωθεί ότι, η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας επηρεάζεται ελάχιστα από την διεργασία συμπίεσης υδρατμού και αυτό οφείλεται το γεγονός ότι οι θερμοκρασίες ανά βαθμίδα παραμένουν σταθερές με ή χωρίς συμπίεση υδρατμού. Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο συστημάτων εντοπίζεται στην ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας του συμπυκνωτή κατακόρυφης ροής, η οποία είναι μικρότερη στη λειτουργία με συμπίεση υδρατμού εξαιτίας του υδρατμού που παρασύρεται από τον εκτοξευτήρα ατμού. Γενικότερα, τα συνδυασμένα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης με θερμική συμπίεση έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα αυτόνομα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης. Πιο αναλυτικά, έχουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης κατά 45%, ο ειδικός ρυθμός ροής νερού ψύξης είναι χαμηλότερος κατά 41,8%, η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας του συμπυκνωτή είναι μικρότερη κατά 34,4% και τέλος η ολική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας είναι μικρότερη κατά 4,75%.

### 2.3.7.c Πολλαπλή Εξάτμιση Μπροστά Τροφοδοσίας με Μηχανική Συμπύεση Υδρατμού (Multiple Effect Evaporation with Forward Feed and Mechanical Vapor Compression)

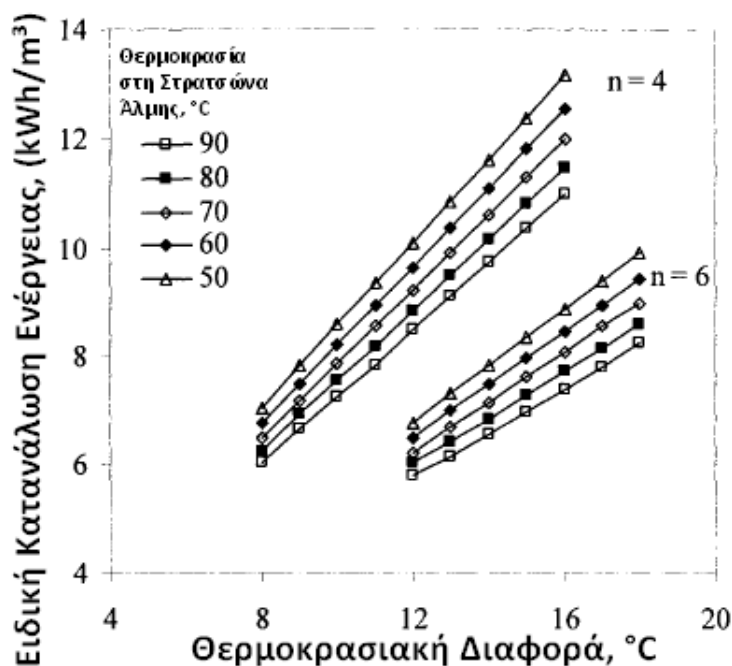
Το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος πολλαπλής εξάτμισης με μηχανική συμπύεση υδρατμού (MEE-MVC), **Εικόνα 76**, είναι παρόμοιο με αυτό του απλού συστήματος πολλαπλής εξάτμισης εκτός από την απομάκρυνση του συμπυκνωτή και την πρόσθεση των προθερμαντήρων τροφοδοσίας, του θαλάμου εκτόνωσης της πρώτης βαθμίδας, και του μηχανικού συμπιεστή. Η μονάδα του συμπιεστή λειτουργεί με την συνολική ποσότητα του παραγόμενου υδρατμού της τελευταίας βαθμίδας, όπου συμπιέζεται στην επιθυμητή πίεση και στην υπέρθερμη θερμοκρασία. Εδώ είναι απαραίτητο να λάβουμε υπόψη μας την ελάχιστη ποσότητα υδρατμού που παράγεται στην τελευταία βαθμίδα σε σχέση με αυτή που παράγεται στην πρώτη. Η δρομολόγηση όλης της ποσότητας του υδρατμού, που παράγεται στην τελευταία βαθμίδα, στον συμπιεστή έχει ως αποτέλεσμα της ελαχιστοποίηση της χρήσης του συμπυκνωτή. Ωστόσο, για να διατηρήσουμε την υψηλή θερμική αποτελεσματικότητα της διεργασίας προθερμαντήρες τύπου πλάκας χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν τη θερμοκρασία του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας από ( $T_{cw}$ ) σε ( $T_f$ ). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ανάκαμψης θερμότητας από τη στρατσώνα της άλμης και του ρεύματος αποσταγμένου προϊόντος σε δυο διαφορετικούς προθερμαντήρες τροφοδοσίας.



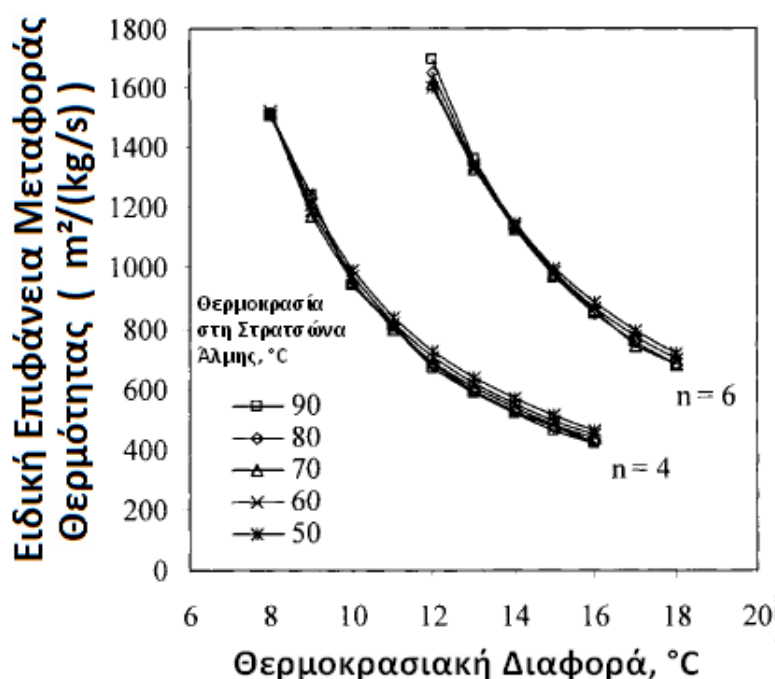
**Εικόνα 76:** Πολλαπλή Εξάτμιση Μπροστά Τροφοδοσίας με Μηχανική Συμπύεση Υδρατμού (MEE-MVC). [1]

Η απόδοση των συστημάτων πολλαπλής εξάτμισης μπροστά τροφοδοσίας (MEE-FF) παρουσιάζεται, στα διαγράμματα των **Εικόνων 77** και **78**, για την ειδική κατανάλωση ενέργειας και την ειδική επιφάνεια ενέργειας σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας στη στρατσώνα της άλμης, της θερμοκρασιακής διαφοράς της άλμης μεταξύ πρώτης και τελευταίας βαθμίδας και του αριθμού των βαθμίδων. Το διάγραμμα της **Εικόνας 77** παρουσιάζει διακυμάνσεις της ειδικής ενεργειακής κατανάλωσης και των δυο συστημάτων, η οποία μειώνεται για υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας και χαμηλές θερμοκρασιακές διαφορές της άλμης. Αυτό συμβαίνει διότι σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, ο ειδικός όγκος του υδρατμού μειώνεται και ως αποτέλεσμα μειώνεται και η ενεργειακή κατανάλωση για τη συμπίεση του υδρατμού. Από την άλλη πλευρά, μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διαφορές από τη θερμοκρασία κορεσμού του συμπιεσμένου υδρατμού και της άλμης που απορρίπτεται καταλήγουν σε αύξηση του εύρους συμπίεσης και άρα αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης για τη συμπίεση του υδρατμού.

Από το διάγραμμα της **Εικόνας 78** μπορούμε να διακρίνουμε ότι η ειδική επιφάνεια μεταφοράς ενέργειας έχει μεγαλύτερη εξάρτηση στη θερμοκρασιακή πτώση κάθε βαθμίδας από ότι στην υψηλή θερμοκρασία άλμης. Η θερμοκρασιακή πτώση ανά βαθμίδα επηρεάζεται από τον αριθμό των βαθμίδων και τη θερμοκρασιακή διαφορά της άλμης μεταξύ πρώτης και τελευταίας βαθμίδας. Από την άλλη πλευρά, η αύξηση της θερμοκρασίας του συστήματος έχει μικρότερη επίδραση στην ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας, ενώ έχει περιορισμένη επιρροή στο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.



**Εικόνα 77:** Διακυμάνσεις στην Ειδική Ενεργειακή Κατανάλωση για Σύστημα Πολλαπλής Εξάτμισης Μπροστά Τροφοδοσίας με Μηχανική Συμπίεση Υδρατμού (MEE-FF/MVC). [1]



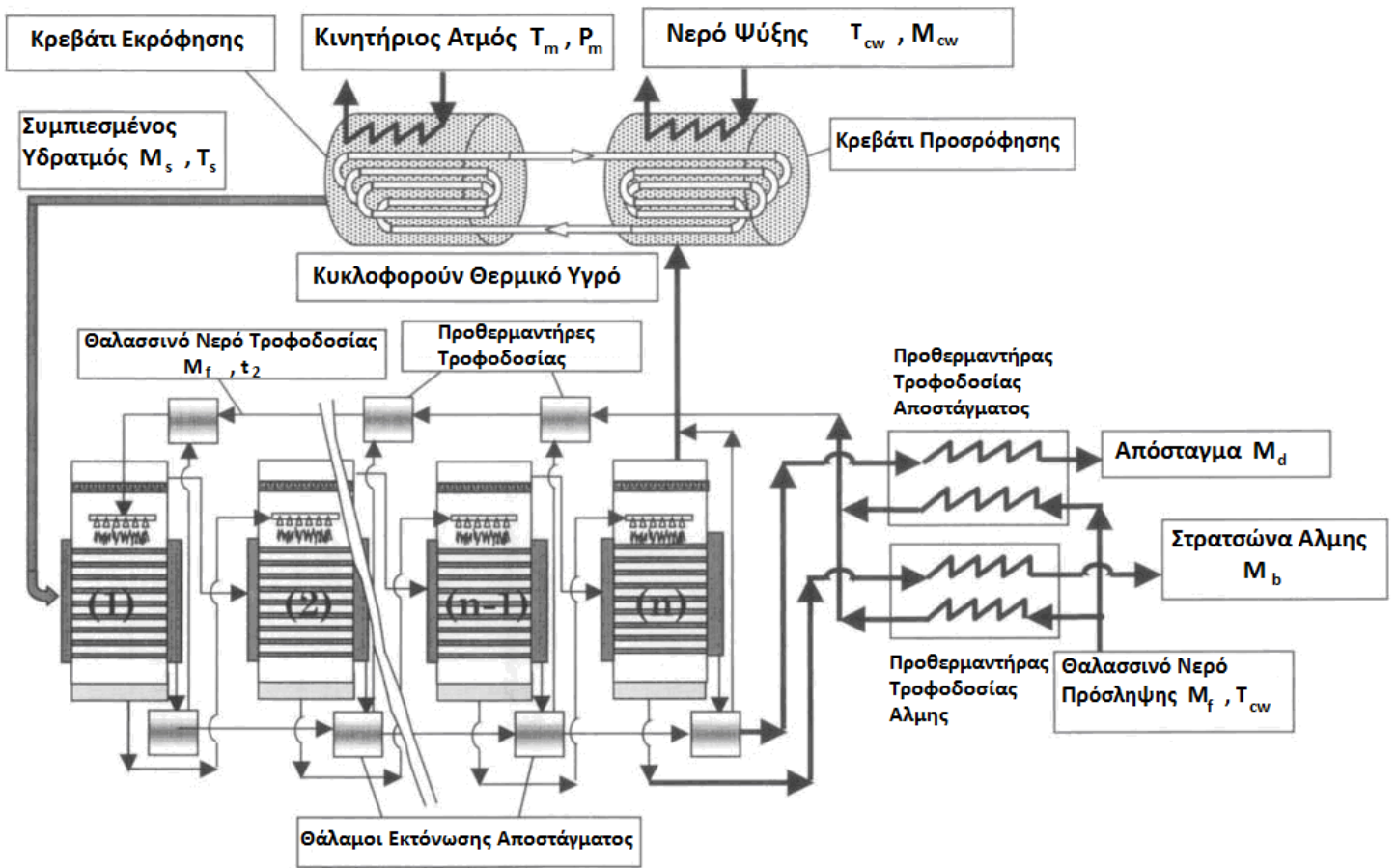
**Εικόνα 78:** Διακυμάνσεις στην Ειδική Επιφάνεια Μεταφοράς Θερμότητας για Σύστημα Πολλαπλής Εξάτμισης Μπροστά Τροφοδοσίας με Μηχανική Συμπύεση Υδρατμού (MEE-FF/MVC). [1]

### 2.3.7.d Πολλαπλή Εξάτμιση Μπροστά Τροφοδοσίας με Συμπύεση Υδρατμού με Προσρόφηση (Multiple Effect Evaporation with Forward Feed and Adsorption Vapor Compression)

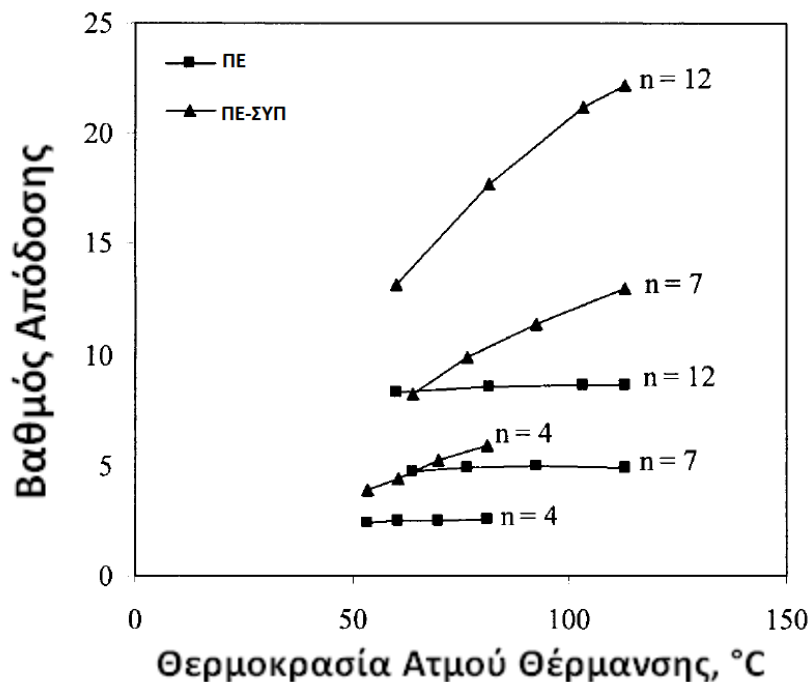
Το σύστημα πολλαπλής εξάτμισης μπροστά τροφοδοσίας με συμπύεση υδρατμού με προσρόφηση (MEE-FF/AdVC), περιλαμβάνει δυο κρεβάτια για την προσρόφηση και εκρόφηση του υδρατμού και όπως και στο συνδυασμένο σύστημα πολλαπλής εξάτμισης με μηχανική συμπύεση υδρατμού δεν περιλαμβάνεται συμπυκνωτής κατακόρυφης ροής, όπως παρουσιάζεται και στην **Εικόνα 79**. Το θαλασσινό νερό πρόσληψης θερμαίνεται σε δύο προθερμαντήρες τύπου πλάκας κατά την στρατσώνα άλμης και το αποσταγμένο προϊόν. Η λειτουργία της αντλίας θερμότητας προσρόφησης/εκρόφησης είναι παροδική και αυτό συνεπάγεται την ταυτόχρονη συμπύκνωση/προσρόφηση του σχηματιζόμενου υδρατμού στην τελευταία βαθμίδα/θάλαμο εκτόνωσης πάνω στο κρεβάτι προσρόφησης και εξάτμιση/εκρόφηση του ατμού θέρμανσης από το κρεβάτι εκρόφησης. Σε κάθε κρεβάτι χρησιμοποιείται στερεός ζεόλιθος ως το μέσο προσρόφησης/ εκρόφησης. Η προσρόφηση λαμβάνει χώρα σε μια ισοδύναμη θερμοκρασία η οποία ανταποκρίνεται στη θερμοκρασία του υδρατμού της τελευταίας βαθμίδας, ενώ η εκρόφηση διεξάγεται σε ισοδύναμη θερμοκρασία που ανταποκρίνεται στη

θερμοκρασία του ατμού θέρμανσης της πρώτης βαθμίδας. Εξωτερικές πηγές θέρμανσης/ψύξης χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη των διεργασιών προσρόφησης/ εκρόφησης. Το νερό ψύξης χρησιμοποιείται για την αφαίρεση της λανθάνουσας θερμότητας της συμπύκνωσης από το κρεβάτι προσρόφησης, ενώ ο κινητήριος ατμός χρησιμοποιείται για την προσθήκη λανθάνουσας θερμότητας κατά την εξάτμιση στο κρεβάτι εκρόφησης. Η διεργασία της εκρόφησης αγγίζει τις ισοδύναμες ξηρές συνθήκες αφού το νερό προσρόφησης απελευθερώνεται υπό τη μορφή υδρατμού. Παρόμοια, οι υγρά ισοδύναμες συνθήκες στο κρεβάτι της προσρόφησης επιτυγχάνονται καθώς το κρεβάτι από τη στερεή φάση γίνεται κορεσμένο με νερό. Κατά το τέλος των διεργασιών προσρόφησης/εκρόφησης, οι εξωτερικές πηγές ψύξης/θέρμανσης αποδεσμεύονται. Ως αποτέλεσμα, το θερμό ρευστό κυκλοφορεί μεταξύ των δυο κρεβατιών ώστε να αφαιρέσει την αισθητή θερμότητα από το ξηρό κρεβάτι στο υγρό. Αυτή η διεργασία ανταλλαγής θερμότητας αυξάνει τη θερμοκρασία του κρύου/υγρού κρεβατιού σε υψηλότερες τιμές, κοντά στην απαιτούμενη θερμοκρασία εκρόφησης. Παρόμοια, η θερμοκρασία του ξηρού/θερμού κρεβατιού μειώνεται έως μια θερμοκρασία που επιτρέπεται η εκκίνηση της διεργασίας προσρόφησης. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι αγγίζουμε τις επιθυμητές θερμοκρασίες για την εκκίνηση των διεργασιών προσρόφησης/εκρόφησης με την βοήθεια επιπρόσθετης ψύξης/θέρμανσης από το νερό ψύξης και τον κινητήριο ατμό.

Η ανάλυση αυτού του συστήματος είναι περιορισμένη στην εκτίμηση του θερμικού βαθμού απόδοσης και στη σύγκρισή του με τα αυτόνομα συστήματα, καθώς όλες οι άλλες παράμετροι έχουν παρόμοια συμπεριφορά με αυτή των αυτόνομων συστημάτων. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης σαν συνάρτηση σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας του θερμού ατμού και του αριθμού των βαθμίδων παρουσιάζεται στο διάγραμμα της **Εικόνας 80**. Όπως μπορούμε να δούμε, παρουσιάζει αύξηση μεγαλύτερη του 100% σε σχέση με τα αυτόνομα συστήματα, ειδικά σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Πρέπει να σημειωθεί ότι, ο θερμικός βαθμός απόδοσης του συστήματος αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας του συστήματος εξαιτίας της μείωσης της λανθάνουσας θερμότητας στην προσρόφηση για υψηλότερες θερμοκρασίες.



Εικόνα 79: Σύστημα Πολλαπλής Εξάτμισης Μπροστά Τροφοδοσίας με Συμπίεση Υδρατμού Με Προσρόφηση(MEE-FF/AdVC). [1]



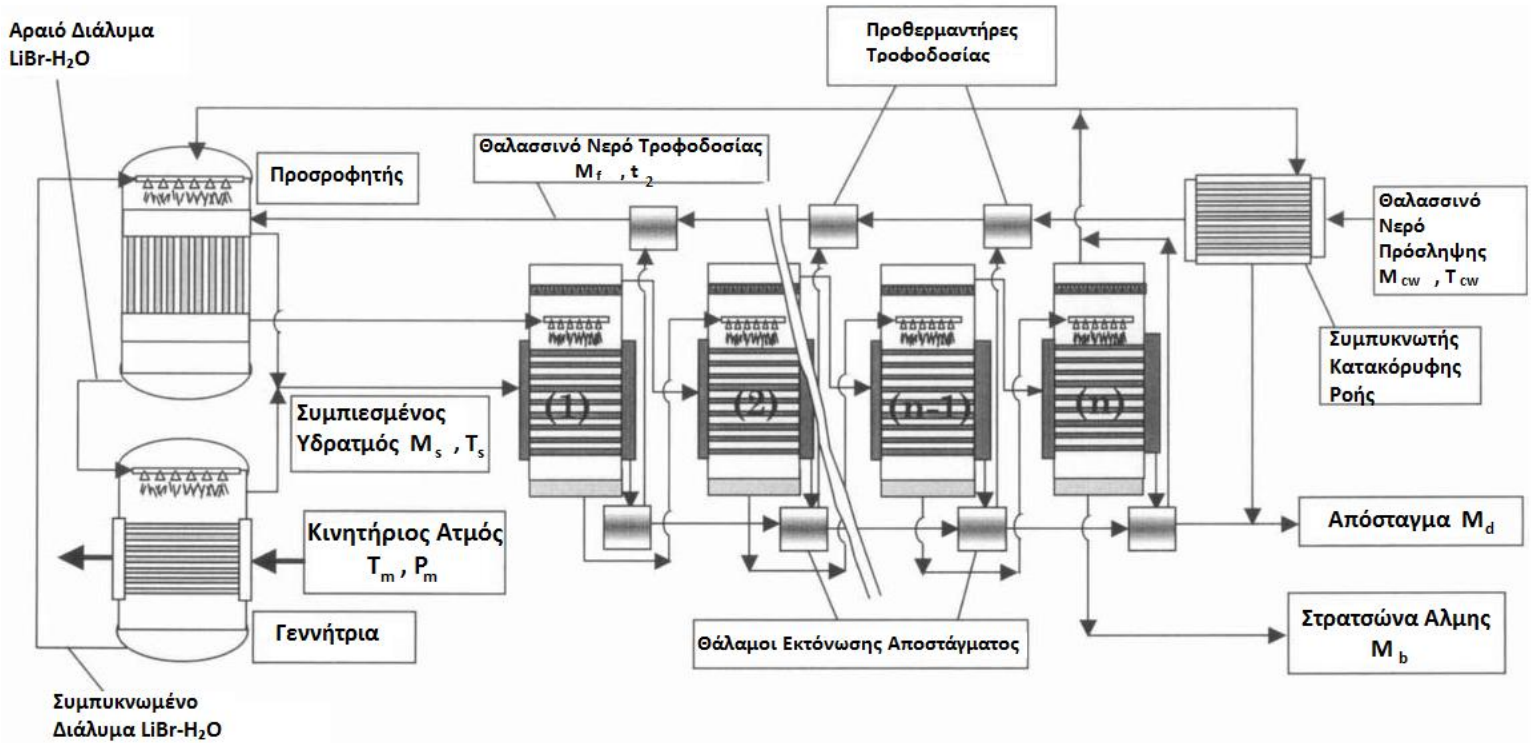
Εικόνα 80: Διακυμάνσεις στο Βαθμό Απόδοσης για Σύστημα Πολλαπλής Εξάτμισης Μπροστά Τροφοδοσίας με Συμπίεση Υδρατμού με Προσρόφηση(MEE-FF/AdVC). [1]



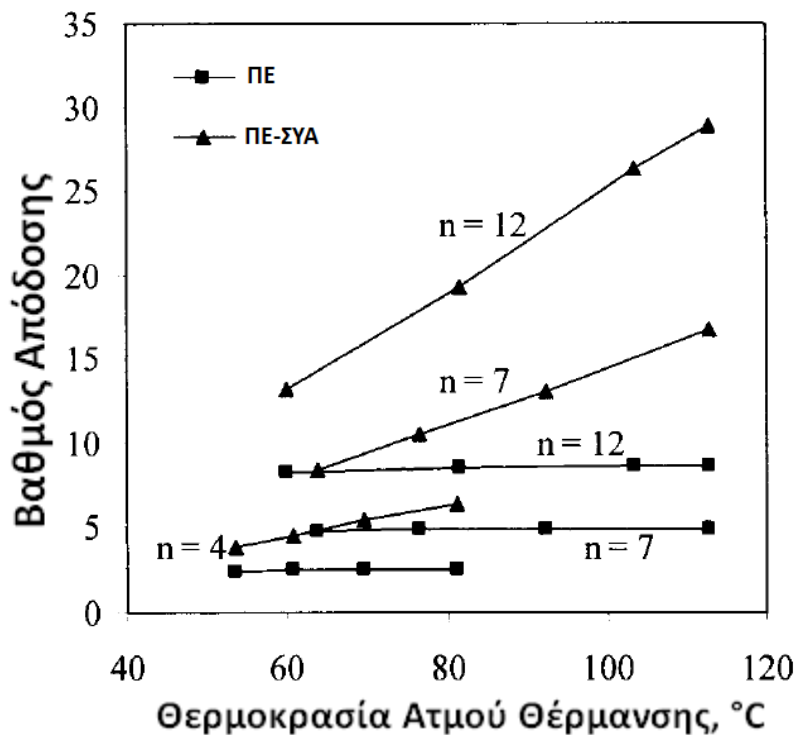
### 2.3.7.e Πολλαπλή Εξάτμιση Μπροστά Τροφοδοσίας με Συμπύεση Υδρατμού με Απορρόφηση (Multiple Effect Evaporation with Forward Feed and Absorption Vapor Compression)

Το σύστημα πολλαπλής εξάτμισης μπροστά τροφοδοσίας με συμπύεση υδρατμού με απορρόφηση (MEE-FF/AbVC), το οποίο παρουσιάζεται σχηματικά στην **Εικόνα 81**, περιλαμβάνει βαθμίδες εξάτμισης, θαλάμους εκτόνωσης, προθερμαντήρες τροφοδοσίας, συμπυκνωτές κατακόρυφης ροής, κρεβάτια έκπλυσης και απορρόφησης που περιλαμβάνουν διάλυμα βρωμιούχου λιθίου και ύδατος (LiBr-H<sub>2</sub>O). Όπως παρουσιάζεται, μέρος του σχηματιζόμενου ατμού στην τελευταία βαθμίδα/θάλαμο εκτόνωσης συμπυκνώνεται στον συμπυκνωτή κατακόρυφης ροής, όπου απελευθερώνει τη λανθάνουσα θερμότητά του στο θαλασσινό νερό τροφοδοσίας. Το απομένον τμήμα του υδρατμού ρέει εντός του κρεβατιού προσρόφησης, όπου απορροφάται το συμπυκνωμένο διάλυμα του (LiBr-H<sub>2</sub>O). Η διεργασία της προσρόφησης είναι εξώθερμη, όπου το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας απορροφά την απελευθερωμένη λανθάνουσα θερμότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη θέρμανση του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας ως τη θερμοκρασία κορεσμού και το σχηματισμό μιας μικρής ποσότητας κορεσμένου υδρατμού. Το αραιό διάλυμα (LiBr-H<sub>2</sub>O) τροφοδοτεί τη γεννήτρια ή τη συσκευή έκπλυσης, όπου η προστιθέμενη θερμότητα από τον κινητήριο ατμό έχει ως αποτέλεσμα την εξάτμιση του ατμού και την αύξηση της θερμοκρασίας του διαλύματος. Το συμπυκνωμένο διάλυμα (LiBr-H<sub>2</sub>O) αντλείται πίσω στο κρεβάτι προσρόφησης. Οι υδρατμοί που σχηματίζονται στην γεννήτρια και στη συσκευή προσρόφησης αναμιγνύονται και χρησιμοποιούνται για να οδηγήσουν τον αριθμό των βαθμίδων εξάτμισης.

Η απόδοση του συστήματος, εκτός από τον θερμικό βαθμό απόδοσης, είναι ίδια με αυτή του αυτόνομου συστήματος. Οι διακυμάνσεις στο θερμικό βαθμό απόδοσης σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας του ατμού θέρμανσης και του αριθμού των βαθμίδων παρουσιάζονται στο διάγραμμα της **Εικόνας 82**. Όπως μπορούμε να δούμε, ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται περισσότερο από 100% σε σχέση με αυτόν του αυτόνομου συστήματος, ειδικά για υψηλές θερμοκρασίες όπου μειώνεται η λανθάνουσα θερμότητα της εκρόφησης.



**Εικόνα 81:** Σύστημα Πολλαπλής Εξάτμισης Μπροστά Τροφοδοσίας με Συμπίεση Υδρατμού Με Απορρόφηση (MEE-FF/AbVC). [1]



**Εικόνα 82:** Διακυμάνσεις στο Βαθμό Απόδοσης για Σύστημα Πολλαπλής Εξάτμισης Μπροστά Τροφοδοσίας με Συμπίεση Υδρατμού με Απορρόφηση (MEE-FF/AbVC). [1]

Μελετήθηκαν τέσσερις διαρρυθμίσεις του συστήματος αφαλάτωσης με πολλαπλή εξάτμιση και μπροστά τροφοδοσίας. Τα συστήματα περιλάμβαναν συνδυασμούς με θερμική(TVC), μηχανική(MVC), με προσρόφηση(AdVC) και απορρόφηση (AbVC) συμπίεση υδρατμού. Τα συνδυασμένα συστήματα κάνουν αποτελεσματική χρήση των χαρακτηριστικών των συστημάτων πολλαπλής εξάτμισης και της συνδυασμένης αντλίας θερμότητας. Στα συνδυασμένα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης συμπίεσης υδρατμού με προσρόφηση και απορρόφηση, η πρώτη και η τελευταία βαθμίδα των συστημάτων πολλαπλής εξάτμισης αντικαθιστούν τις μονάδες του συμπυκνωτή και του εξατμιστήρα της αντλίας θέρμανσης. Επίσης, τα συνδυασμένα συστήματα επιτρέπουν τη θέρμανση του νερού χρήσης που παίζει μεγάλο ρόλο στη βιομηχανία. Αυτά τα χαρακτηριστικά δεν τα συναντάμε στα αυτόνομα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης ή τα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης συνδυασμένα με μηχανική συμπίεση υδρατμού και θερμική συμπίεση υδρατμού. Συνοψίζοντας:

- Παρατηρείται υψηλή αύξηση του βαθμού απόδοσης στα υβριδικά συστήματα σε σχέση με τα αντίστοιχα συμβατικά συστήματα πολλαπλής εξάτμισης,
- Αύξηση της υψηλής θερμοκρασίας άλμης μειώνει δραστικά την απαιτούμενη ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας για όλες τις διαρρυθμίσεις,
- Τα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης με μηχανική συμπίεση υδρατμού δεν απαιτούν νερό ψύξης, ωστόσο, είναι απαραίτητη η χρήση βοηθητικής θερμότητας για την οδήγηση της πρώτης βαθμίδας,
- Τα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης με θερμική συμπίεση υδρατμού απαιτούν μικρότερη ποσότητα νερού ψύξης από τα συμβατικά συστήματα πολλαπλής εξάτμισης,
- Τα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης με συμπίεση υδρατμού με προσρόφηση και απορρόφηση παράγουν θερμό νερό χρήσης, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές,
- Προβλέψεις για τις επιδόσεις όλων των μοντέλων σε ότι αφορά το βαθμό απόδοσης, ενεργειακή κατανάλωση, ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας και ειδικό ρυθμό ροής νερού ψύξης, έχουν καλή αντιστοιχία με τη βιομηχανική πρακτική,
- Υβριδικά συστήματα πολλαπλής εξάτμισης με αντλίες θερμότητας έχουν πολύ καλές προσδοκίες για την αντικατάσταση των συμβατικών συστημάτων πολυβάθμιας εκτόνωσης (που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην αφαλάτωση) στο εγγύς μέλλον.

### 2.3.8 Πολυβάθμια Εκτόνωση (MultiStage Flash Desalination)

Η διεργασία πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) είναι μια καινοτομική ιδέα, όπου ο σχηματισμός του υδρατμού λαμβάνει χώρα μεταξύ του υγρής μάζας αντί στην επιφάνεια των θερμών σωλήνων. Η θερμή άλμη επιτρέπεται να ρέει ελεύθερα και εκτονώνεται σε μια σειρά θαλάμων, χαρακτηριστικό που κρατά τη θερμή και συμπυκνωμένη άλμη από την εσωτερική ή την εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων θέρμανσης. Αυτό αποτελεί ένα πολύ μεγάλο πλεονέκτημα σε σχέση με τα αρχικά και απλοϊκά συστήματα θερμικής εξάτμισης, όπου οι βυθισμένοι σωλήνες για τη θέρμανση ατμού χρησιμοποιούνται για την διεξαγωγή της εξάτμισης του γλυκού νερού. Η απόδοση αυτής της διαρρύθμισης ήταν κάτι περισσότερο από ικανοποιητική, όπου ο σχηματισμός άλατος πραγματοποιείται σταδιακά στην εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων. Το σχηματιζόμενο ίζημα έχει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και λειτουργεί ως μονωτικό υπόστρωμα μεταξύ του ατμού θέρμανσης και του θαλασσινού νερού που βράζει. Συνεπώς, ο βαθμός εξάτμισης μειώνεται δραστικά και ο καθαρισμός θεωρείται αναγκαίος για την αποκατάσταση της αποτελεσματικότητας της διεργασίας. Πρώιμα σχέδια επλήγησαν από τέτοιου είδους προβλήματα, με αποτέλεσμα η λειτουργία τους να διαρκεί λιγότερο από δυο εβδομάδες και η διακοπή της λειτουργίας καθώς και ο καθαρισμός να διαρκεί περισσότερο από τέσσερις εβδομάδες.

Στα συμβατικά συστήματα πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) με δυναμικότητα από 27.000 έως 32.000 m<sup>3</sup>/d, το στάδιο εκτόνωσης έχει διαστάσεις 18x4x3 σε πλάτος, ύψος και μήκος. Η σχηματική απεικόνιση του σταδίου εκτόνωσης σε σύστημα πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) παρουσιάζεται στην **Εικόνα 83** και περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

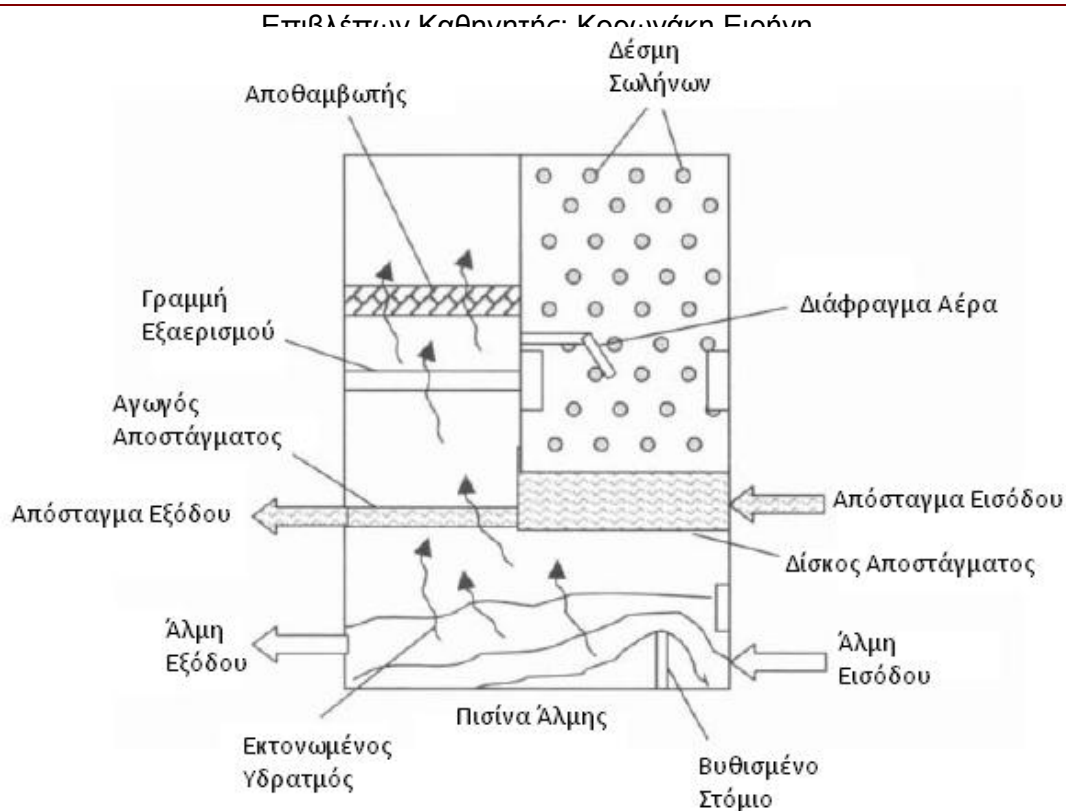
- Μια μεγάλη πισίνα άλμης με παρόμοιο πλάτος και μήκος με αυτό του σταδίου εκτόνωσης και βάθος να κυμαίνεται από 0,2-0,5m.
- Μια μηχανή μεταφοράς άλμης μεταξύ των σταδίων έχει σχεδιαστεί να σφραγίσει το θάλαμο υδρατμού μεταξύ των σταδίων και να αυξήσει την ανατάραξη και την ανάμειξη του εισαγόμενου ρεύματος άλμης. Αυτή η συσκευή προωθεί την εκτόνωση, ελέγχει το σχηματισμό των φυσαλίδων υδρατμού, την ανάπτυξή τους και την αναμενόμενη απελευθέρωσή τους.
- Το συρμάτινο πλέγμα αποθάμβωσης σε συνδυασμό με το σύστημα υποστήριξης, έχει σαν σκοπό του την απομάκρυνση των παρασυρμένων σταγονιδίων άλμης από τον εκτονωμένο υδρατμό. Αυτό είναι απαραίτητο για να αποφευχθεί η αύξηση της αλατότητας του παραγόμενου νερού ή ο σχηματισμός ιζήματος στην εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων του συμπυκνωτή.
- Στην εξωτερική επιφάνεια της δέσμης σωλήνων του συμπυκνωτή/προθερμαντήρα, πραγματοποιείται η συμπύκνωση του εκτονωμένου υδρατμού. Η απελευθερωμένη λανθάνουσα θερμότητα της συμπύκνωσης, έχει ως αποτέλεσμα τη θέρμανση του ρεύματος της ανακυκλούμενης άλμης που ρέει στο εσωτερικό των σωλήνων. Αυτή η ανάκτηση ενέργειας

είναι απαραίτητη για την διατήρηση της υψηλής απόδοσης του συστήματος.

- Στο δίσκο αποστάγματος συγκεντρώνεται το συμπυκνωμένο απόσταγμα το οποίο διαφεύγει μεταξύ των σταδίων. Το αποσταγμένο προϊόν συλλέγεται από το δίσκο του τελευταίου σταδίου.
- Τα δοχεία νερού και στις δυο άκρες της δέσμης των σωλήνων χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της ανακυκλούμενης άλμης μεταξύ των γειτονικών σταδίων.
- Σύνδεσμοι για το σύστημα εξαέρωσης, οι οποίοι απομακρύνουν τα μη συμπυκνώσιμα αέρια ( $O_2$ ,  $N_2$  και  $CO_2$ ), τα οποία διαλύονται στο θαλασσινό νερό τροφοδοσίας, ακόμα και μετά την εξαέρωση. Επίσης,  $CO_2$  μπορεί να παραχθεί κατά τη διάσπαση διττανθρακικών ενώσεων στις υψηλές θερμοκρασίες των σταδίων. Ακόμα μια σημαντική πηγή μη συμπυκνώσιμων αερίων είναι η εσωτερική διαρροή του αέρα από τον περιβάλλοντα χώρο μέσα στα στάδια εκτόνωσης για θερμοκρασία λειτουργίας κάτω από  $100^\circ C$ , που ανταποκρίνεται σε συνθήκες κενού.
- Όργανα τα οποία τοποθετούνται στην αρχή και στο τέλος κάθε βαθμίδας εκτόνωσης και στα οποία περιλαμβάνονται τα θερμοζεύγη, αισθητήρας επιπέδου καθώς και ένα μέτρο αγωγιμότητας. Τα δεδομένα μέτρησης από αυτά τα στάδια καταμετρούνται από το σύστημα ελέγχου του συστήματος. Αντίστοιχα με τις διαταραχές στις παραμέτρους του συστήματος, δηλαδή της θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας, τον διαθέσιμο ατμό καθώς και την αύξηση της μόλυνσης της θερμικής αντίστασης του συστήματος, πραγματοποιούνται προσαρμογές στο χειρισμό για την αποκατάσταση των επιθυμητών συνθηκών λειτουργίας. Η βαρύτητα αυτών των προσαρμογών εξαρτάται από τις μετρήσεις της πρώτης και της τελευταίας βαθμίδας.

Η διεργασία πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) πραγματοποιείται σε θερμοκρασιακό εύρος εντός των  $110-130^\circ C$ . Αυτό συνεπάγεται ότι η πλειονότητα των σταδίων εκτόνωσης λειτουργεί σε θερμοκρασία μικρότερη των  $100^\circ C$  ή σε συνθήκες κενού. Έτσι, όλα τα στάδια εκτόνωσης έχουν σχεδιαστεί να αντέχουν σε πλήρες κενό. Ωστόσο, το κάτω μέρος των βαθμίδων εκτόνωσης εκτίθεται στην υδροστατική πίεση της πύσινας της άλμης. Για το λόγο αυτό, το σύστημα έχει σχεδιαστεί να αντέξει μέγιστη πίεση των 2 bar.

Τα τοιχώματα, το πάνω μέρος και τα χωρίσματα των σταδίων εκτόνωσης κατασκευάζονται από ανθρακούχο χάλυβα με ανοξειδωτο χάλυβα ή εποξική επένδυση. Ανοξειδωτη επένδυση χάλυβα χρησιμοποιείται σε περιοχές υψηλής διάβρωσης. Όλες οι βαθμίδες ενισχύονται με μια δομή ανοξειδωτου χάλυβα και υψηλή μόνωση ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες θερμότητας.



**Εικόνα 83:** Στάδιο Εκτόνωσης Συστήματος Πολυβάθμιας Εκτόνωσης (MSF). [1]

Οι σωλήνες του συμπυκνωτή/προθερμαντήρα χρησιμοποιούνται για να ανακτήσουν και να απορρίψουν τη θερμότητα από τη διεργασία της πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF). Στα στάδια που αποτελούν τον τομέα ανάκτησης θερμότητας, η θερμότητα ανακτάται από τη συμπύκνωση του εκτονωμένου υδρατμού για να θερμάνει το ρεύμα της ανακυκλούμενης άλμης που ρέει στο εσωτερικό των σωλήνων. Αυτή η ανάκτηση της θερμότητας είναι απαραίτητη για την επίτευξη υψηλού θερμικού βαθμού απόδοσης. Στις βαθμίδες απόρριψης θερμότητας, το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας και ψύξης θερμαίνεται από την απορρόφηση της λανθάνουσας θερμότητας του συμπυκνωμένου εκτονωμένου υδρατμού. Συνεπώς, το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας θερμαίνεται έως μια θερμοκρασία ίση με τη θερμοκρασία της άλμης στην τελευταία βαθμίδα εκτόνωσης. Αυτό είναι απαραίτητο για την αποφυγή θερμικού σοκ κατά την ανάμειξη του θερμού ρεύματος τροφοδοσίας στην πισίνα άλμης της τελευταίας βαθμίδας. Το θερμικό σοκ μπορεί να προκαλέσει αποσύνθεση του διττανθρακικού ασβεστίου και του ανθρακικού ασβεστίου και κατακρήμνιση ανθρακικού ασβεστίου. Η διεργασία αποσύνθεσης μπορεί ακόμα να συσχετιστεί με την απελευθέρωση αερίου διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο θα μπορούσε να προωθήσει την αντίδραση διάβρωσης και να αυξήσει το φορτίο στους εκτοξευτήρες κενού. Η λειτουργία του ρεύματος του θαλασσινού νερού ψύξης στον τομέα απόρριψης θερμότητας είναι να απομακρύνει την περίσσεια θερμότητα που προστίθεται στο σύστημα στον προθερμαντήρα άλμης.

Η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας των σωλήνων του συμπυκνωτή αποτελεί ένα μεγάλο σχεδιαστικό χαρακτηριστικό που ελέγχει τη θερμοκρασία της ανακυκλούμενης άλμης που εισέρχεται στον προθερμαντήρα άλμης. Αυτή η παράμετρος έχει μεγάλη επίδραση στον βαθμό απόδοσης του συστήματος. Αν η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας είναι μικρότερη από το θερμικό φορτίο του συμπυκνωμένου υδρατμού, η πίεση της βαθμίδας θα αυξηθεί εξαιτίας της συσσώρευσης των μη συμπυκνωμένων υδρατμών. Αυτή η αύξηση της πίεσης θα μειώσει την ποσότητα του εκτονωμένου υδρατμού. Τελικά, το σύστημα θα φτάσει μια νέα σταθερή κατάσταση με χαμηλότερους βαθμούς εκτόνωσης και μικρότερους ρυθμούς ροής του αποσταγμένου προϊόντος. Επιπλέον, η θερμοκρασία της ανακυκλούμενης άλμης που εισέρχεται στον προθερμαντήρα άλμης θα γίνει μικρότερη, με αποτέλεσμα την αύξηση της απαιτούμενης ποσότητας του ατμού θέρμανσης και μείωση του βαθμού απόδοσης του συστήματος. Όμως, ο αρχικός σχεδιασμός του συστήματος παρέχει επαρκής μεταφορά θερμότητας μεταξύ των διαφόρων σταδίων, ωστόσο, φτωχή λειτουργία και αύξηση της αντίστασης λόγω μόλυνσης μειώνει το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και δημιουργεί τέτοιες συνθήκες, όπου ο ολικός λόγος μεταφοράς θερμότητας είναι μικρότερος από το σχεδιαστικό θερμικό φορτίο. Ακόμα, απόφραξη των σωλήνων μπορεί να προκαλέσει παρόμοια αποτελέσματα.

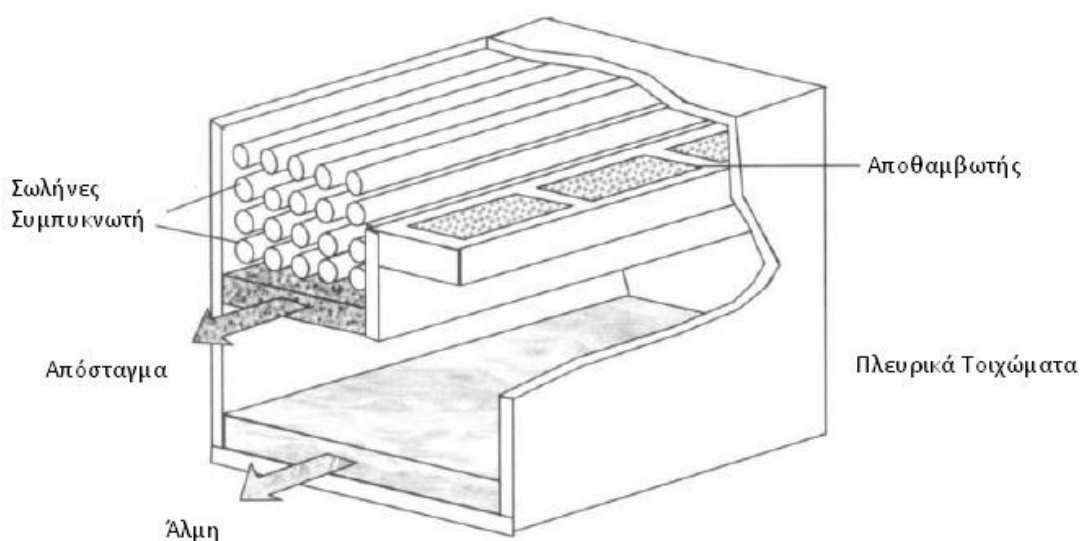
Το υλικό που χρησιμοποιείται στους σωλήνες του προθερμαντήρα/ συμπυκνωτή εξαρτάται από τη θερμοκρασία κάθε βαθμίδας, την αντίσταση στη διάβρωση όπως και την ιδιότητά στο να μην διαλύεται από το θαλασσινό νερό. Τα υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι χαλκός και διάφορα κράματά του, τιτάνιο, κράματα ατσαλιού ακόμα και μπρούτζος.

Όπως αναφέρθηκε και πριν υπάρχουν δύο είδη διαρρυθμίσεων όσον αφορά τα συστήματα πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF). Η πρώτη διαρρύθμιση είναι αυτή της κατανομής μακρών σωλήνων όπου οι σωλήνες είναι ευθυγραμμισμένοι με την κατεύθυνση της ροής της άλμης, όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 84**. Ανάλογα με το διαθέσιμο μήκος του σωλήνα, ακόμα και ένας σωλήνας μπορεί να καλύψει περισσότερα από ένα στάδια. Το όριο στο μήκος του σωλήνα επιβάλλεται από τις κατασκευαστικές εταιρίες και σχετίζεται με τις τεχνικές δυσκολίες στη μεταφορά και στο χειρισμό. Η συγκόλληση μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμη τεχνική για την κατασκευή του επιθυμητού μήκους σωλήνων. Πρακτικά, το διαθέσιμο μήκος στην διαρρύθμιση σωλήνων φτάνει τα 25m και περιλαμβάνει 8-10 στάδια εκτόνωσης. Τα χαρακτηριστικά αυτής της διαρρύθμισης σωλήνων περιλαμβάνει τα εξής:

- Η μόλυνση, το φράξιμο και η ιζηματοποίηση ακόμα και σε ένα σωλήνα έχει μεγάλη επίδραση στο βαθμό απόδοσης του συστήματος, αφού οι απώλειες ακόμα και του ενός σωλήνα προκαλούν μείωση της μεταφοράς θερμότητας σε 8-10 στάδια για κάθε χαμένο σωλήνα.
- Στη συντήρηση και στον καθαρισμό, η απόσπαση του σωλήνα δεν αποτελεί μια απλή διαδικασία. Ακόμα, ο συμβατικός μηχανικός καθαρισμός, με υψηλής ταχύτητας αέρα, απαιτεί ειδικά σχεδιασμένο μηχανισμό.

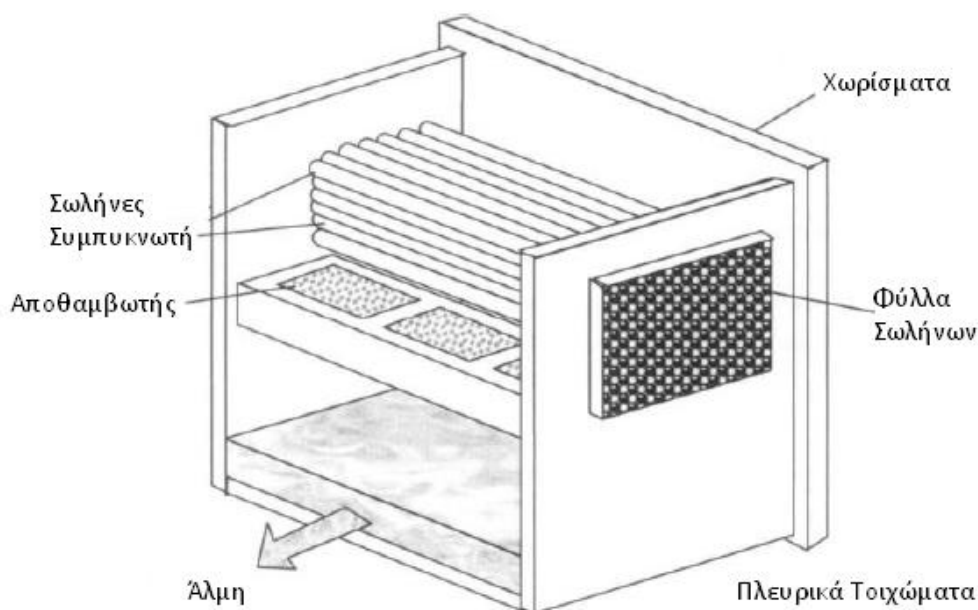
- Η μελέτη της επέκτασης για μακριούς σωλήνες απαιτεί ειδική μελέτη στο σχεδιασμό του κάθε σταδίου.
- Η διαρροή υδρατμού μεταξύ των σταδίων αποτελεί ένα σοβαρό πρόβλημα το οποίο απαιτεί σοβαρή μελέτη στο σχεδιασμό, στην εγκατάσταση αλλά και τον διεργασιών συντήρησης και καθαρισμού.
- Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της διαρρύθμισης είναι η μείωση της πτώσης πίεσης των σωλήνων κατά παράγοντα 25-30%. Αυτό μειώνει την αντίστοιχη ενέργεια άντλησης.
- Αυτός ο τύπος διαρρύθμισης θεωρείται ιδανικός για έργα με παραγωγικότητες μεγαλύτερες των 50.000 m<sup>3</sup>/d.
- Έχουμε ελαχιστοποίηση της χρήσης δοχείων νερού και στις δυο πλευρές των θαλάμων εκτόνωσης, όπως συναντάται και στην διασταυρωμένη διαρρύθμιση.

Στη δεύτερη διαρρύθμιση, αυτή των διασταυρωμένων σωλήνων, οι σωλήνες τοποθετούνται κατακόρυφα σε σχέση με την κατεύθυνση της ροής της άλμης, όπως στην **Εικόνα 85**. Είναι η πιο συνηθισμένη διαρρύθμιση καθώς συναντάται στα περισσότερα από τα συστήματα πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF). Για αυτό τον τύπο τοποθέτησης σωλήνων έχουμε συσσωρευμένη εμπειρία από τα χρόνια χρήσης του πάνω στο σχεδιασμό, την εγκατάσταση, τη λειτουργία, τη συντήρηση και την αντικατάσταση. Ακόμα, μικρότερη τεχνολογική εμπειρία απαιτείται για την κατασκευή, τη συντήρηση και την απομάκρυνση σε σχέση με την μακριά διαρρύθμιση των σωλήνων. Η επέκταση του σωλήνα στο σύστημα αυτό δεν αντιμετωπίζει κανένα πρόβλημα στο σχεδιασμό και στην κατασκευή. Το κύριο μειονέκτημα του συστήματος αυτού είναι η ανάγκη εγκατάστασης δοχείων νερού και στις δυο άκρες των σωλήνων μεταφοράς ανακυκλούμενης άλμης ή του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας μεταξύ των σταδίων, γεγονός που θα αυξήσει το κεφάλαιο της διεργασίας, την πτώση πίεσης αλλά και την ενέργεια άντλησης.



**Εικόνα 84:** Διαρρύθμιση Μακρών Σωλήνων. [1]





**Εικόνα 85:** Διαρρύθμιση Διασταυρωμένων Σωλήνων. [1]

Στα γενικά χαρακτηριστικά των συστημάτων πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) περιλαμβάνονται τα παρακάτω:

- Σταθερή και αξιόπιστη λειτουργία λόγω της εξασφάλισης επαρκούς επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας, κατάλληλων υλικών και εντός επιτρεπτών ορίων διάβρωση.
- Οι μονάδες αφαλάτωσης πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) λειτουργούν με έργα παραγωγής ενέργειας διπλού σκοπού. Ο σχεδιασμός των έργων συμπαραγωγής επιτρέπει την ευέλικτη λειτουργία κατά τη διάρκεια φορτίων αιχμής για την ενέργεια ή το νερό. Στο Κουβέιτ και στις χώρες του Κόλπου τα φορτία αιχμής για τον ηλεκτρισμό και το νερό παρατηρούνται κατά την διάρκεια των θερινών μηνών εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, η οποία σχετίζεται με την μαζική χρήση εσωτερικών μονάδων κλιματισμού και την αύξηση της οικιακής και βιομηχανικής κατανάλωσης νερού. Το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει τη χειμερινή περίοδο με ήπιες θερμοκρασίες και περιορισμένη χρήσης των εσωτερικών μονάδων θέρμανσης.
- Η πλειοψηφία των συστημάτων πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) είναι με κυκλοφορία άλμης, τα οποία είναι ανώτερα από αυτά με σχεδιασμό απευθείας ροής. Η κυκλοφορία της άλμης οδηγεί σε υψηλούς λόγους μετατροπής, μικρότερη χρήση χημικών προσθετικών και καλύτερο έλεγχο της θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας.
- Η διαρρύθμιση διασταυρωμένων σωλήνων έχει απλούστερες ιδιότητες κατασκευής και εγκατάστασης σε σχέση με την διαρρύθμιση μακρινών σωλήνων.

- Όλα τα βοηθητικά είναι μηχανοκίνητα και έχουν καλύτερα λειτουργικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις τουρμπινοκίνητες μονάδες, ακόμα και για μεγάλες αντλίες κυκλοφορίας άλμης.
- Η επεξεργασία προσθετικών είναι ανώτερη σε σχέση με την επεξεργασία οξέων, όπου τα όξινα διαλύματα μπορούν να αυξήσουν τα ποσοστά διάβρωσης των σωλήνων, των κελυφών και διαφόρων μεταλλικών μερών.
- Κατάλληλος σχεδιασμός του συστήματος επιτρέπει τις διακυμάνσεις του φορτίου μεταξύ 70-110% της ποσοστιαίας δυναμικότητας.

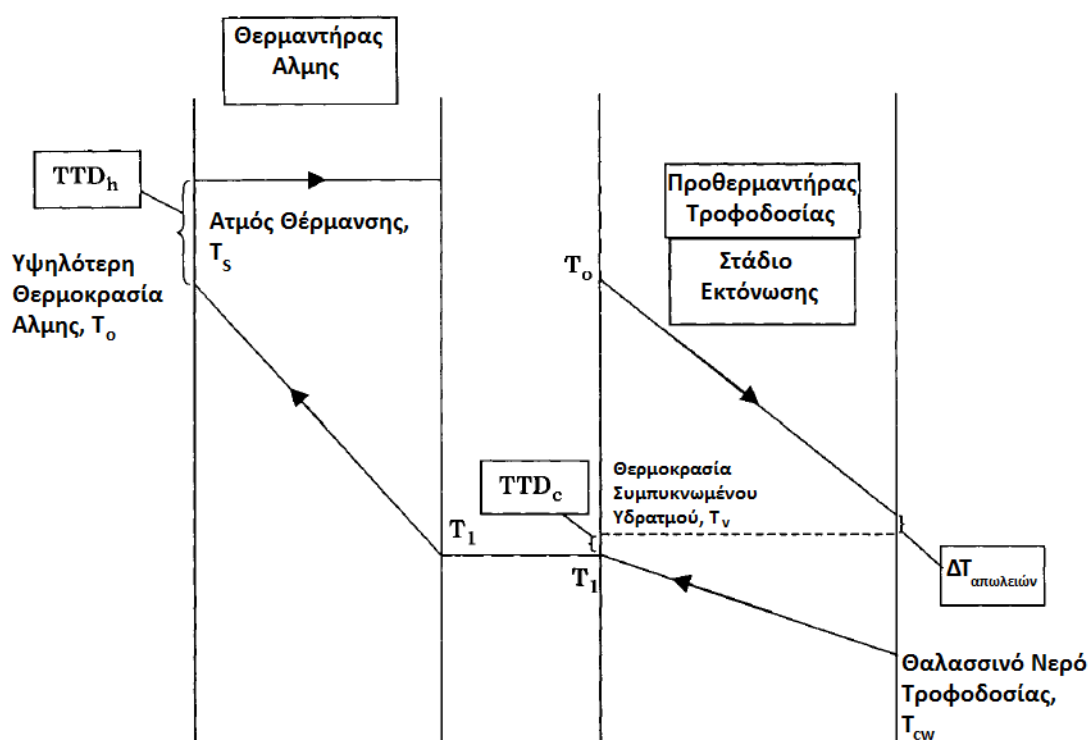
Σύμφωνα με τα παραπάνω τα συστήματα πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) αριθμούν περισσότερο από το 60% παγκοσμίως στην αγορά αφαλάτωσης, ενώ αποτελεί τεράστια πηγή παραγωγής γλυκού νερού στις χώρες του Κόλπου. Αναλυτικά, το σύστημα περιλαμβάνει τρεις μεγάλους τομείς: τον προθερμαντήρα άλμης, τον τομέα ανάκτησης θερμότητας και τον τομέα απόρριψης θερμότητας. Ο αριθμός των βαθμίδων στον τομέα ανάκτησης θερμότητας είναι μεγαλύτερος από αυτόν του τομέα απόρριψης θερμότητας. Ο προθερμαντήρας άλμης οδηγεί την διεργασία εκτόνωσης μέσω θέρμανσης του ρεύματος της ανακυκλούμενης άλμης στην υψηλή θερμοκρασία άλμης. Η εκτόνωση λαμβάνει χώρα σε κάθε στάδιο, όπου μια μικρή ποσότητα του παραγόμενου νερού παράγεται και συσσωρεύεται κατά τα στάδια των δυο τομέων. Ο σχηματισμός του υδρατμού προκαλείται εξαιτίας της μείωσης της θερμοκρασίας κορεσμού της άλμης, έτσι η θερμοκρασία της βαθμίδας μειώνεται από την θερμή στη ψυχρή πλευρά του έργου. Αυτό επιτρέπει την ροή της άλμης κατά μήκος των βαθμίδων χωρίς την χρήση βοηθητικής ενέργειας άντλησης. Οι εκτονωμένοι υδρατμοί συμπυκνώνονται στους σωλήνες των μονάδων του συμπιεστή/προθερμαντήρα. Η απελευθερωμένη λανθάνουσα θερμότητα από τη συμπύκνωση του υδρατμού χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του ρεύματος ανακυκλούμενης άλμης. Στην κρύα πλευρά του συστήματος, το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας και το θαλασσινό νερό ψύξης εισάγονται στους σωλήνες του συμπυκνωτή/προθερμαντήρα της τελευταίας βαθμίδας του τομέα απόρριψης θερμότητας. Καθώς το ρεύμα αυτό αφήνει τον τομέα απόρριψης θερμότητας, το θαλασσινό νερό ψύξης απορρίπτεται πίσω στη θάλασσα και το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας αναμιγνύεται στην πισίνα της άλμης της τελευταίας βαθμίδας του τομέα απόρριψης θερμότητας. Επίσης, στο στάδιο αυτό, δυο ρεύματα εξάγονται από την πισίνα άλμης, στα οποία περιλαμβάνονται η ανακυκλούμενη άλμη, η οποία εισάγεται στο τελευταίο στάδιο του τομέα ανάκτησης θερμότητας, καθώς και η άλμη που απορρίπτεται από την στρατσώνα πίσω στη θάλασσα. Η απόρριψη της άλμης είναι απαραίτητη για να ελέγξει την συγκέντρωση αλατότητας στο σύστημα. Όπως φαίνεται, η απόρριψη της άλμης έχει πραγματοποιηθεί πριν την ανάμειξη του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας και η ανακυκλούμενη άλμη έχει αποσυρθεί από μια τοποθεσία πριν του σημείου ανάμειξης. Πρόσθετες μονάδες στο σύστημα αφαλάτωσης περιλαμβάνουν προεπεξεργασία των ρευμάτων θαλασσινού νερού τροφοδοσίας και ψύξης. Η επεξεργασία του θαλασσινού νερού πρόσληψης είναι περιορισμένη σε προσυμπτωματικό έλεγχο και διήθηση. Από την άλλη πλευρά, η

επεξεργασία του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας είναι πιο εκτεταμένη και περιλαμβάνει εξαέρωση και προσθήκη αναστολέων πήξης και αφρίσματος. Στις άλλες βασικές μονάδες του συστήματος περιλαμβάνονται οι μονάδες άντλησης του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας και της ανακυκλούμενης άλμης. Επιπλέον, μονάδες εξαερισμού των αερίων λειτουργούν στα στάδια εκτόνωσης για την απομάκρυνση των μη συμπυκνώσιμων αερίων.

### 2.3.8.a Σύστημα Εκτόνωσης Μιας Βαθμίδας (Single Stage Flash Desalination)

Τα συστήματα πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) είναι αρκετά περίπλοκα, για τον λόγο αυτό η μελέτη για την κατανόηση της λειτουργίας τους θα πραγματοποιηθεί σε επιμέρους απλούστερες διαρρυθμίσεις. Η απλούστερη από αυτές είναι το σύστημα εκτόνωσης μιας βαθμίδας (SSFD). Τα κύρια στοιχεία του συστήματος αυτού είναι ο θερμαντήρας άλμης και ο θάλαμος εκτόνωσης, όπου περιλαμβάνονται οι σωλήνες του συμπυκνωτή/προθερμαντήρα, το πλέγμα αποθάμβωσης, η πισίνα της άλμης και ο δίσκος συλλογής αποστάγματος. Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος αυτού παρουσιάζεται στην **Εικόνα 86**, και όπως μπορούμε να δούμε κορεσμένος ατμός με ρυθμό ροής ( $M_s$ ) και θερμοκρασία ( $T_s$ ) οδηγεί τη μονάδα. Ο ατμός θέρμανσης συμπυκνώνεται στο εξωτερικό των σωλήνων του προθερμαντήρα άλμης, όπου απελευθερώνει τη λανθάνουσα θερμότητά του ( $\lambda_s$ ). Αυτή η ενέργεια αυξάνει τη θερμοκρασία του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας από ( $T_1$ ) έως την υψηλότερη θερμοκρασία ( $T_0$ ). Το είδος των χημικών πρόσθετων που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της δημιουργίας ιζήματος επιβάλλει το πάνω όριο στο ( $T_0$ ). Η θερμή άλμη εισάγεται στο θάλαμο εκτόνωσης, ο οποίος λειτουργεί σε πίεση μικρότερη από την πίεση κορεσμού που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία της άλμης που εκβάλλει στο στάδιο ( $T_0$ ). Με άλλα λόγια, η θερμοκρασιακή διαφορά ( $T_0 - T_1$ ) δίνει το βαθμό υπερθέρμανσης της άλμης καθώς ρέει στο στάδιο εκτόνωσης. Κατά την διεργασία εκτόνωσης, μέρος της αισθητής θερμότητας της άλμης μετατρέπεται σε λανθάνουσα θερμότητα από την εξάτμιση μιας μικρής ποσότητας της άλμης ( $M_d$ ). Ο σχηματισμός του αποστάγματος έχει επίσης ως αποτέλεσμα την αύξηση στην αλατότητα της άλμης από ( $X_f$ ) σε ( $X_b$ ). Ο σχηματισμένος υδρατμός ρέει εντός του πλέγματος αποθάμβωσης και μετά απελευθερώνει τη λανθάνουσα θερμότητα ( $\lambda_v$ ) καθώς συμπυκνώνεται στους σωλήνες του συμπυκνωτή/προθερμαντήρα του θαλασσινού νερού. Ο συμπυκνωμένος υδρατμός συλλέγεται στους δίσκους αποστάγματος. Η λανθάνουσα θερμότητα της συμπύκνωσης μεταφέρεται στο θαλασσινό νερό πρόσληψης ( $M_{cw} - M_f$ ), και αυξάνει τη θερμοκρασία του από ( $T_{cw}$ ) σε ( $T_1$ ). Το θαλασσινό νερό ψύξης ( $M_{cw}$ ) απορρίπτεται και το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας ( $M_f$ ) εισάγεται στον προθερμαντήρα άλμης. Ανάκτηση της λανθάνουσας θερμότητας από το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας βελτιώνει την ολική αποτελεσματικότητα της διεργασίας αφαλάτωσης. Αυτό μειώνει την ποσότητα του ατμού θέρμανσης που απαιτείται στον θερμαντήρα άλμης, όσο η

Θερμοκρασία του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας αυξάνει στον θερμαντήρα άλμης από ( $T_1$ ) σε ( $T_o$ ) αντί για ( $T_{cw}$ ) σε ( $T_o$ ). Από τη θερμοδυναμικής άποψης, η λειτουργία του προθερμαντήρα του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας είναι η ανάκτηση της ενέργειας που προστίθεται στο σύστημα από τον ατμό θέρμανσης στον θερμαντήρα άλμης. Επίσης, ελέγχει την πίεση κορεσμού στο εσωτερικό των θαλάμων εκτόνωσης. Από την άλλη πλευρά, η λειτουργία του πλέγματος αποθάμβωσης είναι η απομάκρυνση κάθε σταγονιδίου άλμης που παρασύρεται από τον εκτονωμένο υδρατμό. Αυτό είναι απαραίτητο για την αποφυγή μόλυνσης του προϊόντος και μείωση της ποιότητάς του, ενώ προστατεύει τους σωλήνες του προθερμαντήρα από την διάβρωση.



**Εικόνα 86:** Προφίλ Θερμοκρασιών για τον Ατμό Θέρμανσης, Θαλασσινό Νερό, Εκτονωμένη Άλμη και το Συμπύκνωμα. [1]

Τα κύρια μειονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι:

- Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος ενός σταδίου εξάτμισης είναι πάντα μικρότερος της μονάδας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ποσότητας του παραγόμενου αποσταγμένου νερού σε σχέση με την ποσότητα του ατμού θέρμανσης. Έτσι, το σύστημα εκτόνωσης μιας βαθμίδας δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανική κλίμακα.
- Ο ρυθμός ροής του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας είναι πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με την ποσότητα του παραγόμενου αποστάγματος. Το ποσοστό αυτό είναι μεγαλύτερο του δέκα. Έτσι, η

χρήση των χημικών πρόσθετων είναι υψηλή και η επεξεργασία του νερού τροφοδοσίας αλλά και του προϊόντος είναι αναγκαία.

- Ο ειδικός ρυθμός ροής του θαλασσινού νερού ψύξης είναι πολύ υψηλός. Αυτό μπορεί να αυξήσει το αρχικό κόστος άντλησης του θαλασσινού νερού πρόσληψης αλλά και της ενεργειακής κατανάλωσης.

Από την άλλη πλευρά το σύστημα εκτόνωσης μια βαθμίδας (SSFD) χαρακτηρίζεται από:

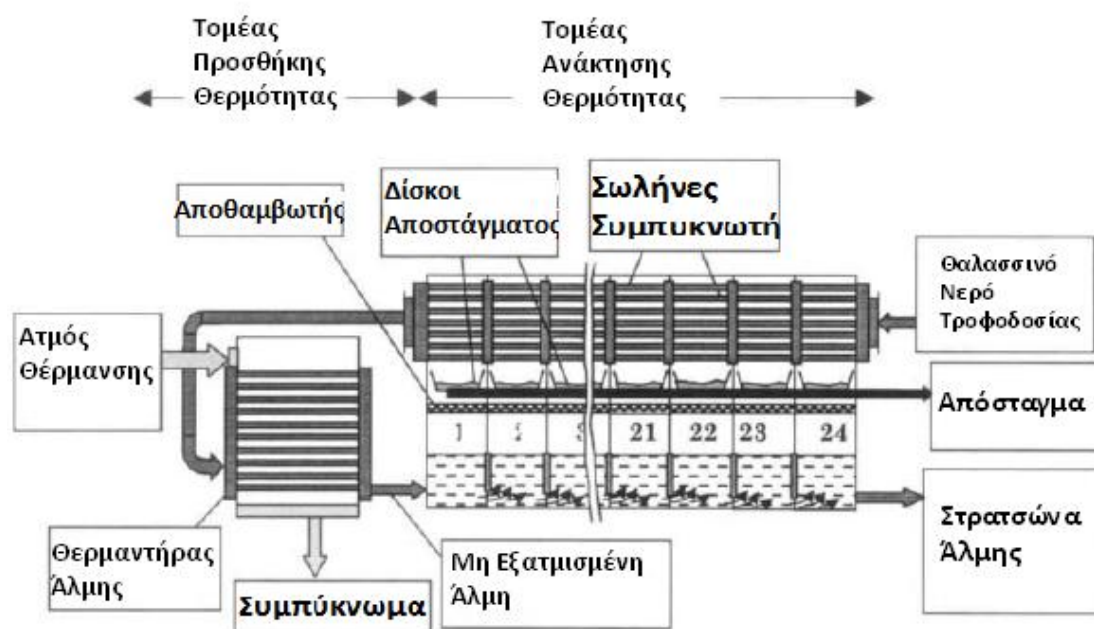
- Η αλατότητα της απορριπτόμενης άλμης είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με την επιτρεπόμενη σχεδιαστική τιμή που ορίζεται από τα όρια διαλυτότητας του  $\text{CaSO}_4$ .
- Η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας του θερμαντήρα άλμης και του συμπυκνωτή είναι μικρή, εξαιτίας της μεγάλης θερμοκρασιακής κινητήριας δύναμης.
- Η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας του θερμαντήρα άλμης είναι αντιστρόφως ανάλογη του βαθμού απόδοσης.
- Οι θερμοδυναμικές απώλειες επηρεάζουν την επιφάνεια του θερμαντήρα άλμης, ωστόσο, δεν έχει καμία επίδραση στην επιφάνεια του συμπυκνωτή.

Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας που προστίθεται στο σύστημα απορρίπτεται με το θαλασσινό νερό ψύξης. Με άλλα λόγια, το στάδιο της εκτόνωσης δεν καταναλώνει την περισσότερη ενέργεια που παρέχεται από τον ατμό θέρμανσης, αλλά απλά υποβαθμίζει την ποιότητα του.

### 2.3.8.b Σύστημα Πολυβάθμιας Εκτόνωσης Με Απευθείας Ροή (Multistage Flash Desalination Once Through)

Ένας άλλος τύπος συστήματος είναι αυτός της απευθείας ροής (MSF-OT), ο οποίος παρακάμπτει το κύριο μειονέκτημα των συστημάτων με ένα στάδιο εκτόνωσης καθώς βελτιώνει το βαθμό απόδοσης. Αυτό επιτυγχάνεται με την διαίρεση του εύρους εκτόνωσης πάνω σε έναν μεγάλο αριθμό βαθμίδων και ως αποτέλεσμα μειώνεται η θερμοκρασιακή πτώση στη βαθμίδα. Το σύστημα παρουσιάζεται στην **Εικόνα 87** και αποτελείται από  $n$  βαθμίδες και τον θερμαντήρα άλμης, ενώ δεν περιλαμβάνονται οι βαθμίδες εκτόνωσης για την απόρριψη θερμότητας. Τα στοιχεία της βαθμίδας είναι ίδια με αυτά της μονάδας ενός σταδίου. Στο σύστημα απευθείας ροής, η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού πρόσληψης αυξάνεται καθώς ρέει εντός των σωλήνων του προθερμαντήρα της κάθε βαθμίδας από  $(T_{cw})$  σε  $(t_1)$ . Το θαλασσινό νερό πρόσληψης ρέει από την βαθμίδα  $n$  στην βαθμίδα 1, δηλαδή από την πλευρά της χαμηλής θερμοκρασίας σε αυτή της υψηλής θερμοκρασίας του συστήματος. Το θαλασσινό νερό που αφήνει τον τελευταίο συμπυκνωτή εισέρχεται στον θερμαντήρα άλμης, όπου αυξάνει τη θερμοκρασία του από  $(t_1)$  σε  $(T_0)$ . Η άλμη που έχει θερμανθεί εκτονώνεται καθώς ρέει εντός των διαδοχικών σταδίων, όπου η θερμοκρασία της μειώνεται από  $(T_0)$  σε  $(T_n)$ . Την ίδια στιγμή, ο εκτονωμένος υδρατμός συμπυκνώνεται γύρω από τους σωλήνες του

συμπυκνωτή σε κάθε βαθμίδα, με αποτέλεσμα να θερμαίνει το θαλασσινό νερό που ρέει εντός αυτών των σωλήνων. Το απόσταγμα που συλλέγεται στους δίσκους συλλογής αποστάγματος ρέει κατά μήκος των σταδίων, όπου εγκαταλείπει το σύστημα από τη βαθμίδα  $n$ . Η διεργασία εκτόνωσης μειώνει τη θερμοκρασία άλμης και αυξάνει την αλατότητα από  $(X_f)$  σε  $(X_b)$ . Η άλμη που εγκαταλείπει την τελευταία βαθμίδα απορρίπτεται πίσω στη θάλασσα. Αυτό ορίζει τη διαδικασία της απευθείας ροής, καθώς δεν υπάρχει ανακύκλωση καμίας ποσότητας της μη εξατμισμένης άλμης στο σύστημα. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτού του τύπου συστήματα δεν περιέχουν ρεύμα νερού ψύξης, καθώς το ρεύμα απορριπτόμενης άλμης το οποίο έχει χαμηλή θερμοκρασία και μεγάλο ρυθμό ροής περιέχει την ενέργεια που πρέπει να απορρίπτει το σύστημα.



Εικόνα 87: Σύστημα αφαλάτωσης πολυβάθμιας εκτόνωσης με απευθείας ροή (MSF-OT). [1]

Τα κύρια μειονεκτήματα αυτού του τύπου συστημάτων είναι:

- Η απουσία του συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας. Αυτό περιορίζει την χρήση αυτού του τύπου συστημάτων σε περιοχές με μεγάλες θερμοκρασιακές αλλαγές ανά εποχή. Για παράδειγμα, η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού στις περιοχές του Κόλπου πέφτει σε χαμηλές τιμές που κυμαίνονται στους  $15^{\circ}\text{C}$  τους χειμερινούς μήνες. Η λειτουργία σε τέτοιες όμως συνθήκες, μπορεί να προκαλέσει δραστική μείωση του θερμικού βαθμού απόδοσης ή της παραγωγικής δυναμικότητας.
- Μείωση του θερμικού βαθμού απόδοσης για χαμηλές θερμοκρασίες του θαλασσινού νερού πρόσληψης μπορεί να εξισορροπηθεί με αύξηση του θερμοκρασιακού εύρους ή μείωση της θερμοκρασίας της τελευταίας βαθμίδας. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, ο ειδικός όγκος του εκτονομένου

υδρατμού αυξάνει, γεγονός που απαιτεί αύξηση του μεγέθους του θαλάμου εκτόνωσης. Αυτό είναι απαραίτητο για να μπορέσουμε να διατηρήσουμε την ταχύτητα του υδρατμού σε τιμές κάτω των 4m/s, ώστε να εμποδίσουμε την είσοδο των σταγονιδίων άλμης.

- Ο ρυθμός ροής του νερού τροφοδοσίας για την παραγωγή προϊόντος σε αυτού του τύπου τα συστήματα είναι μεγαλύτερος σε σχέση με αυτόν στα συστήματα κυκλοφορίας της άλμης. Αυτό σημαίνει ότι θα χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερη ποσότητα χημικών για τον έλεγχο της δημιουργίας ιζημάτων, αφρού αλλά και διάβρωσης.

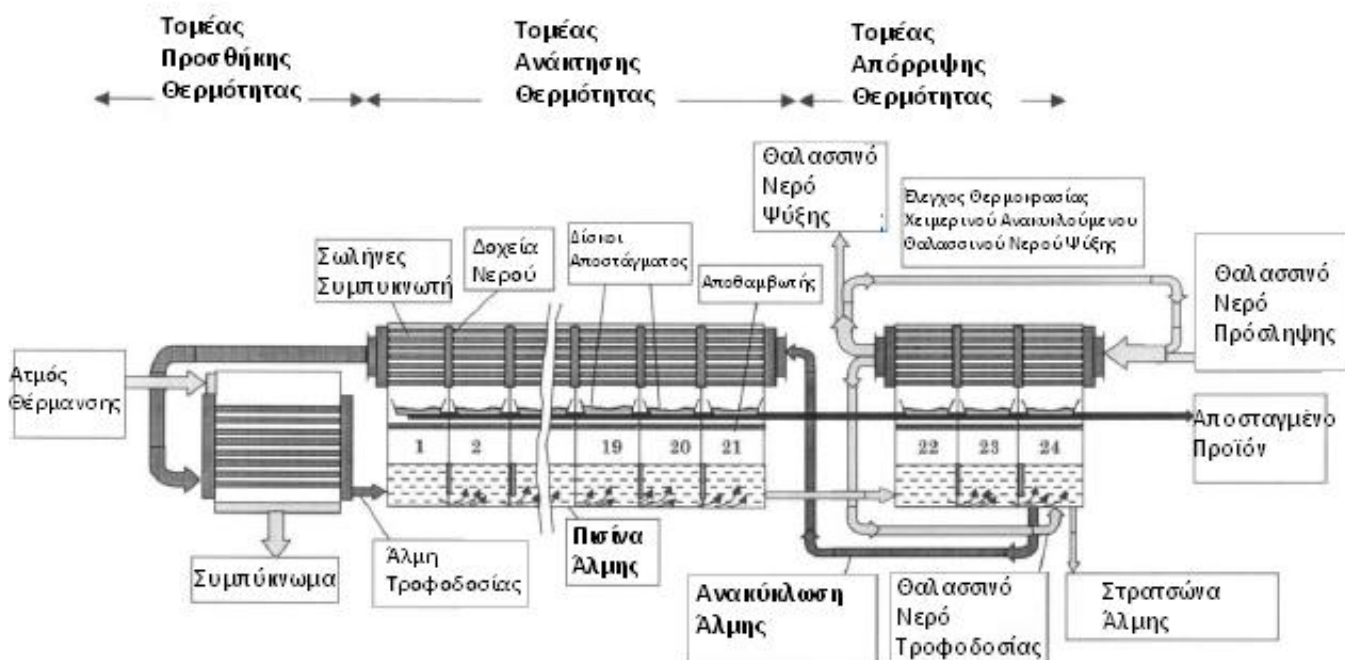
### 2.3.8.c Σύστημα Πολυβάθμιας Εκτόνωσης Με Κυκλοφορία της Άλμης (Multistage Flash Desalination with Brine Circulation)

Τα συστήματα πολυβάθμιας εκτόνωσης με κυκλοφορία της άλμης(MSF-BC) αποτελούν το βιομηχανικό πρότυπο. Τα στοιχεία της διεργασίας αποτυπώνονται στο σχήμα της **Εικόνας 88**, όπου τα στάδια της εκτόνωσης διακρίνονται σε αυτά της ανάκτησης θερμότητας και της απόρριψης θερμότητας. Το σύστημα οδηγείται από τον ατμό θέρμανσης, ο οποίος αυξάνει τη θερμοκρασία της ανακυκλούμενης άλμης ή του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας στην επιθυμητή τιμή εντός του θερμαντήρα της άλμης. Η θερμή άλμη εκτονώνεται στα διαδοχικά στάδια, όπου η ανακυκλούμενη άλμη ή το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας που ρέει εντός των σωλήνων του συμπυκνωτή ανακτά τη λανθάνουσα θερμότητα από το σχηματιζόμενο υδρατμό. Στον τομέα απόρριψης θερμότητας του συστήματος κυκλοφορίας της άλμης, η περίσσεια θερμότητα που προστίθεται στο σύστημα από τον ατμό θέρμανσης απορρίπτεται στο περιβάλλον από το ρεύμα του θαλασσινού νερού ψύξης. Στα συστήματα πολυβάθμιας εκτόνωσης(MSF) οι σωλήνες τοποθετούνται σε μια μακριά ή διασταυρωμένη διαρρύθμιση. Η διασταυρωμένη διαρρύθμιση σωλήνων αποτελεί το αυθεντικό σχέδιο των συστημάτων πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) και οι μονάδες αυτές έχουν παραγωγικές δυνατότητες εύρους 27.276-32.731 m<sup>3</sup>/d. Σε αυτή τη διαρρύθμιση οι σωλήνες είναι ευθυγραμμισμένοι κατά μήκος του εύρους των θαλάμων εκτόνωσης και συνδέονται δια μέσου εξωτερικών δοχείων νερού. Η μακριά τοποθέτηση των σωλήνων χρησιμοποιείται κυρίως σε μεγαλύτερες σε όγκο παραγωγές με δυνατότητες έως και 57.734 m<sup>3</sup>/d. Σε αυτό το σύστημα, μια μόνο δέσμη σωλήνων καλύπτει ολόκληρο το μήκος ενός περιορισμένου αριθμού θαλάμων εκτόνωσης. Αυτό ελαχιστοποιεί τα δοχεία νερού που βρίσκουμε στα συστήματα διασταυρωμένης ροής και επιτρέπει την αύξηση του ρυθμού ροής ανά πλάτος θαλάμου, χαρακτηριστικό που μειώνει το απαιτούμενο πλάτος θαλάμου.

Η διεργασία κυκλοφορίας της άλμης (BC) έχει πολλά ελκυστικά χαρακτηριστικά, που την κάνουν ξεχωριστή μεταξύ των διαφόρων διαρρυθμίσεων αφαλάτωσης. Από την εδραίωση των συστημάτων αυτών στα τέλη της δεκαετίας του πενήντα,

έχει συγκεντρωθεί μεγάλη εμπειρία στην τεχνολογία της διεργασίας, στο σχεδιασμό της διαδικασίας, στην πρακτική κατασκευή και στη λειτουργία. Αυτό οδήγησε στην εξέλιξη απλών και αξιόπιστων διεργασιών λειτουργίας. Επιπλέον, η εξέλιξη αυτή εντόπισε και επίλυσε διάφορα λειτουργικά προβλήματα, όπως η ιζηματοποίηση, η δημιουργία αφρού, η μόλυνση και η διάβρωση. Η αποκτηθείσα εμπειρία πάνω στη λειτουργία και τον σχεδιασμό των συστημάτων πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) οδήγησε στη χρήση οικονομικών κατασκευαστικών υλικών ικανά να αντέξουν σκληρές συνθήκες σε υψηλή αλατότητα. Τα συστήματα πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) δεν περιλαμβάνουν κινούμενα μέρη, εκτός από τις συμβατικές αντλίες. Η κατασκευή των συστημάτων πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) είναι απλή και περιλαμβάνει έναν μικρό αριθμό σωλήνων σύνδεσης, με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιούνται προβλήματα διαρροής και να απλοποιείται το έργο συντήρησής τους. Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι προφανές ότι τα συστήματα πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) θα παραμείνουν ως οι κύριες διεργασίες αφαλάτωσης, ειδικά στη Μέση Ανατολή. Αυτό οφείλεται στα παρακάτω στοιχεία:

- Η συντηρητική φύση του συστήματος αφαλάτωσης.
- Το προϊόν είναι στρατηγικό στοιχείο ζωικής υποστήριξης.
- Εκτεταμένη λειτουργία στο σχεδιασμό και την λειτουργία.
- Αξιοπιστία στη διαδικασία.
- Περιορισμένη εμπειρία, μικρή βάση δεδομένων και άγνωστοι κίνδυνοι με τις νέες τεχνολογίες.



Εικόνα 88: Κυκλοφορία Αλμης σε σύστημα αφαλάτωσης με Πολυβάθμια Εκτόνωση (MSF-BC). [1]



Όσον αφορά τη μελέτη των παραμέτρων του συστήματος, αυτή περιλαμβάνει:

- Προφίλ θερμοκρασίας της εκτονωμένης άλμης και του θαλασσινού νερού που ρέει στα σωλήνες του συμπυκνωτή.
- Θερμικός βαθμός απόδοσης, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του ρυθμού ροής του παραγόμενου γλυκού νερού ως προς τον ατμό θέρμανσης.
- Ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας, η οποία ορίζεται ως ο λόγος της ολικής επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας των σωλήνων του συμπυκνωτή και του θερμαντήρα άλμης ως προς το ρυθμό ροής του παραγόμενου γλυκού νερού.
- Ειδικός ρυθμός ροής του θαλασσινού νερού ψύξης, ο οποίος ορίζεται ως το λόγο του ρυθμού ροής του νερού ψύξης ως προς το παραγόμενο γλυκό νερό.

Οι παραπάνω παράμετροι έχουν ισχυρή επίδραση στο κόστος της μονάδας του προϊόντος. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης αποτελεί μέτρο της αποτελεσματικότητας της διεργασίας, όπου υψηλότεροι βαθμοί υπονοούν και μεγαλύτερο ρυθμό παραγωγής ανά μονάδα ρυθμού ροής του ατμού θέρμανσης. Όπως έχει αναφερθεί και στα προηγούμενα μια συνήθης τιμή του θερμικού βαθμού απόδοσης είναι αυτή του 8, ωστόσο, η λειτουργία του συστήματος σε καθαρές συνθήκες δίνει συνήθως τιμές κοντά στο 10. Καθώς η λειτουργία προχωρά, η διάβρωση και η ιζηματοποίηση μειώνουν τον ολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, ο θερμικός βαθμός απόδοσης μειώνεται σταδιακά και είναι λογικό να μην επιτρέπεται η λειτουργία του συστήματος για τιμές κάτω του 7, όπου γίνεται πλήρης απενεργοποίηση του συστήματος καθώς και καθαρισμός με οξύ ενώ πολλές φορές απαιτείται ακόμα και μηχανικός καθαρισμός ώστε να γίνει αποκατάσταση των αρχικών κατασκευαστικών χαρακτηριστικών της μονάδας.

Αντίστοιχα, η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας αποτελεί μέτρο του αρχικού κεφαλαίου συνεισφοράς στο κόστος της μονάδας προϊόντος καθώς και στην αποτελεσματικότητα του συστήματος. Το φαινόμενο της διάβρωσης και της ιζηματοποίησης επιβαρύνει αυτόν τον δείκτη και τον οδηγεί στα ανώτατα όριά του. Για την εξισορρόπηση αυτού του φαινομένου, με σκοπό την διατήρηση σταθερής παραγωγής, πραγματοποιείται αύξηση του ρυθμού ροής του ατμού θέρμανσης. Ως αποτέλεσμα, το σύστημα φτάνει τις οριακές συνθήκες λειτουργίας του, όπου η κατάσταση δεν μπορεί να εξισορροπηθεί, και έτσι η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας αρχίζει να αυξάνει και φτάνει σχεδόν τις τιμές των ανώτατων ορίων της.

Ο ειδικός ρυθμός ροής του θαλασσινού νερού ψύξης αποτελεί μέτρο της συνεισφοράς του κεφαλαίου του συστήματος, στο οποίο περιλαμβάνεται το κόστος των μονάδων άντλησης και του συστήματος πρόσληψης καθώς και της αποτελεσματικότητας της διεργασίας στο κόστος παραγωγής της μονάδας. Το θαλασσινό νερό ψύξης χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση της περίσσειας θερμότητας που προστίθεται στο σύστημα από τον ατμό θέρμανσης στον

θερμαντήρα άλμης. Κατάλληλος σχεδιασμός του συστήματος έχει ως σκοπό του την ελαχιστοποίηση της ποσότητας του θαλασσινού νερού ψύξης. Έτσι, το μέγεθος των μονάδων άντλησης μειώνεται όπως επίσης και του συστήματος πρόσληψης. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη την ενεργειακή και θερμοδυναμική συντήρηση του συστήματος, αυξάνουμε το ρυθμό ροής του θαλασσινού νερού ψύξης σε συνθήκες διάβρωσης ή δημιουργίας ιζήματος, με σκοπό την απομάκρυνση της περίσσειας θερμότητας που προστίθεται στο σύστημα.

Η θερμοκρασιακή διανομή για την άλμη που ρέει τόσο στο εσωτερικό των σωλήνων του συμπυκνωτή όσο και των θαλάμων εκτόνωσης, παρουσιάζεται στο διάγραμμα της **Εικόνας 89**. Μελέτη αυτού του διαγράμματος δείχνει ότι η διανομή της θερμοκρασίας στην άλμη που ρέει στο εσωτερικό των σωλήνων των προθερμαντήρων αποκλίνει περισσότερο από την ευθεία γραμμή σε σύγκριση με την εκτονωμένη άλμη. Επίσης, το ποσοστό της αύξησης της θερμοκρασίας της άλμης που ρέει στους προθερμαντήρες του τομέα απόρριψης θερμότητας είναι μεγαλύτερο από αυτό της αύξησης του τομέα ανάκτησης θερμότητας.

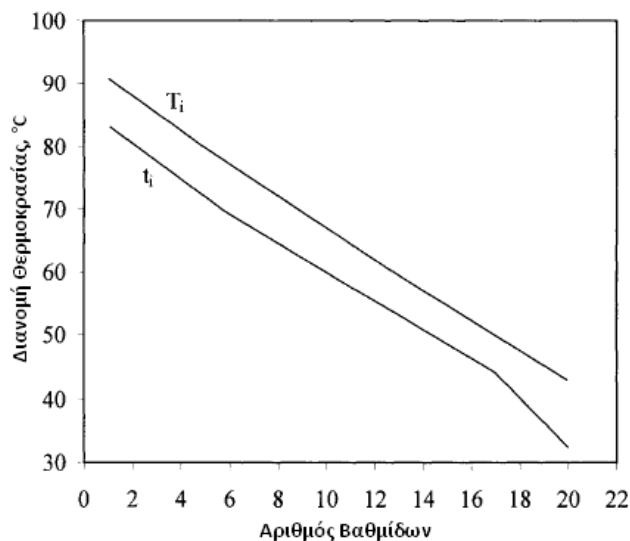
Η επίδραση του αριθμού των βαθμίδων στον βαθμό απόδοσης του έργου και στην ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας για διαφορετικές τιμές υψηλής θερμοκρασίας της άλμης, παρουσιάζεται στα διαγράμματα των **Εικόνων 90** και **91** αντίστοιχα. Το διάγραμμα της **Εικόνας 90** δείχνει την αύξηση του βαθμού απόδοσης σε σχέση με την αύξηση του αριθμού των βαθμίδων εκτόνωσης και της υψηλότερης θερμοκρασίας της άλμης. Αύξηση στον αριθμό των σταδίων προκαλεί μείωση της θερμοκρασιακής πτώσης ανά βαθμίδα, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη του βαθμού απόδοσης. Επίσης, η λειτουργία για υψηλότερες θερμοκρασίες της άλμης αυξάνει το εύρος εκτόνωσης, το οποίο με τη σειρά του αυξάνει την ποσότητα του παραγόμενου νερού ανά μονάδα μάζας ατμού θέρμανσης.

Το διάγραμμα της **Εικόνας 91** παρουσιάζει την αύξηση της ειδικής επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας για μεγαλύτερο αριθμό βαθμίδων και χαμηλές τιμές της υψηλής θερμοκρασίας της άλμης. Για σταθερό ρυθμό παραγωγής, αύξηση στον αριθμό των βαθμίδων προκαλεί αύξηση της ολικής επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας, η οποία με τη σειρά της αυξάνει την ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Παρόμοια, η λειτουργία για χαμηλότερες θερμοκρασιακές τιμές της άλμης μειώνει τη τιμή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και άρα απαιτείται μεγαλύτερη επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας.

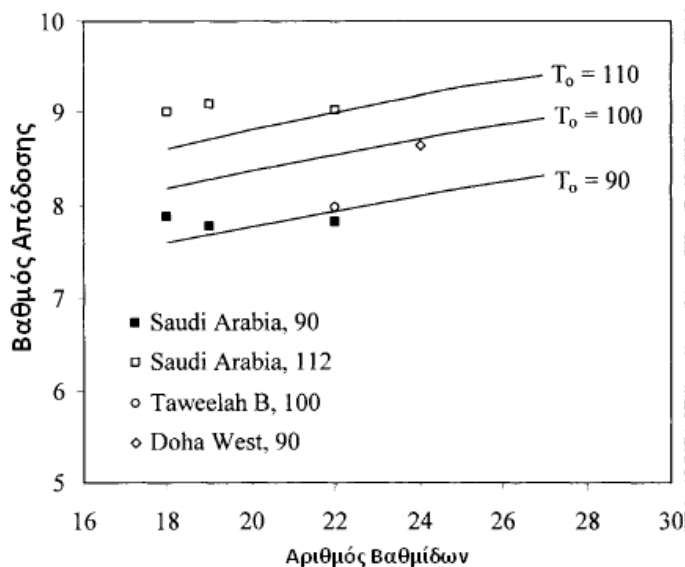
Αναφορικά, η υψηλή θερμοκρασία της άλμης έχει πολύ μικρή επιρροή στον ειδικό ρυθμό ροής του νερού ψύξης. Από την άλλη πλευρά, χρήση μεγαλύτερου αριθμού σταδίων μειώνει τον ειδικό ρυθμό ροής του θαλασσινού νερού ψύξης. Αυτό αιτιολογείται και από το διάγραμμα της **Εικόνας 90**, όπου ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται για μεγαλύτερο αριθμό βαθμίδων εκτόνωσης, πράγμα που σημαίνει ότι απαιτείται η χρήση μικρότερης ποσότητας ατμού θέρμανσης για σταθερό ρυθμό παραγωγής. Η μείωση της ποσότητας του ατμού θέρμανσης σχετίζεται με τη

μείωση της ποσότητας που προστίθεται στο σύστημα όπως και τη μείωση της ενέργειας που απομακρύνεται με το νερό ψύξης.

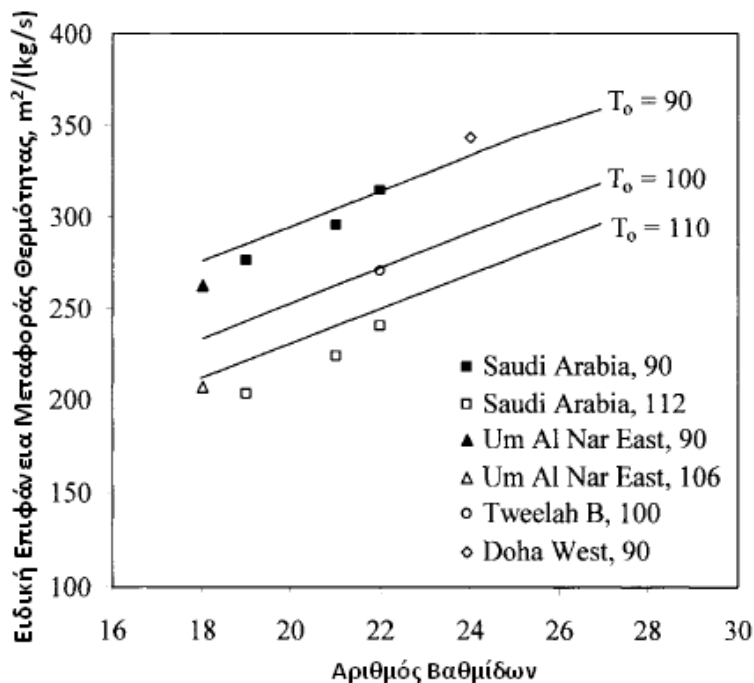
Τέλος, δεν υπάρχει καμία εξάρτηση μεταξύ του ειδικού ρυθμού ροής της κυκλοφορούσας άλμης και του αριθμού των βαθμίδων. Η τιμή αυτή μειώνεται καθώς η θερμοκρασία της άλμης αυξάνει, το οποίο αντιπροσωπεύει και την αύξηση της αποτελεσματικότητας του συστήματος. Τα διαγράμματα των **Εικόνων 92** και **93** παρουσιάζουν την επίδραση της υψηλής θερμοκρασίας άλμης για τις ίδιες μεταβλητές, ονομαστικά, το βαθμό απόδοσης του έργου και την ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας για διάφορους αριθμούς βαθμίδων. Για μια ακόμα φορά ο ειδικός ρυθμός ροής της κυκλοφορούσας άλμης έχει πολύ μικρή εξάρτηση σε σχέση με την υψηλή θερμοκρασία της άλμης. Όλα τα παραπάνω διαγράμματα βασίζονται σε στοιχεία που λήφθηκαν από εν λειτουργία έργα στις Αραβικές Χώρες του Κόλπου.



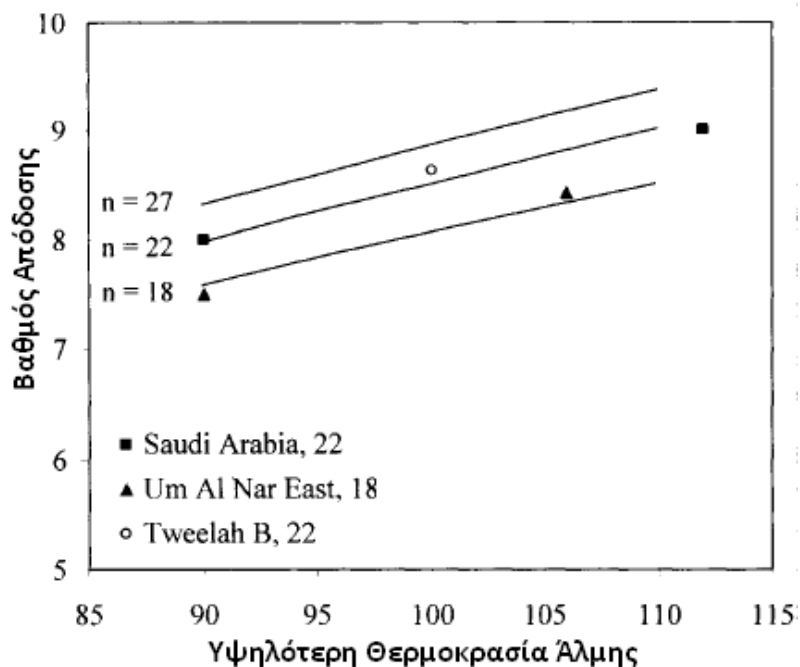
**Εικόνα 89:** Διανομή Θερμοκρασία για την Άλμη που Ρέει Τόσο στους Προθερμαντήρες όσο και Στο Εσωτερικό Των Θαλάμων Εκτόνωσης. [1]



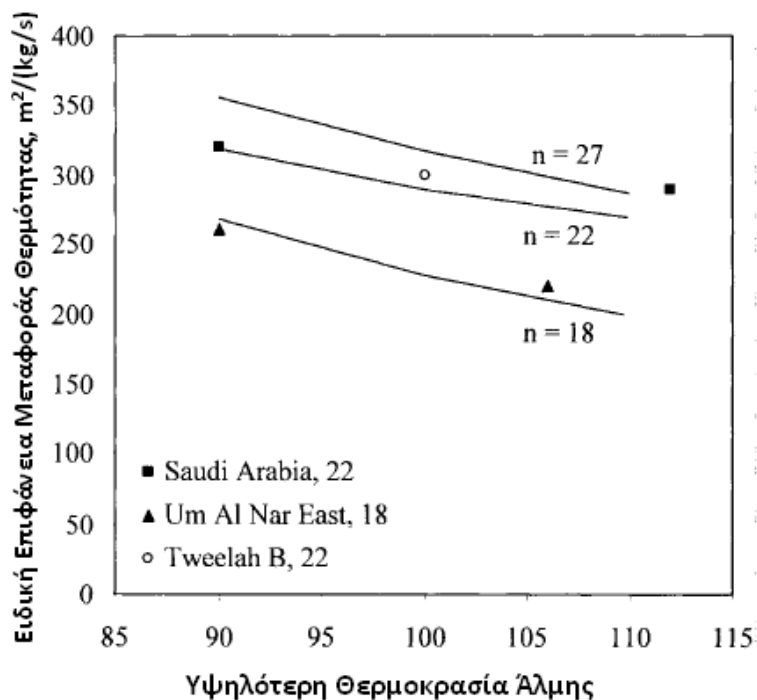
**Εικόνα 90:** Επίδραση του Αριθμού των Βαθμίδων στον Βαθμό Απόδοσης του Συστήματος. [1]



Εικόνα 91: Επίδραση του Αριθμού των Βαθμίδων στην Ειδική Επιφάνεια Μεταφοράς Θερμότητας. [1]



Εικόνα 92: Επίδραση της Υψηλής Θερμοκρασίας Άλμης στον Βαθμό Απόδοσης του Συστήματος. [1]



**Εικόνα 93:** Επίδραση της Υψηλής Θερμοκρασίας Άλμης στην Ειδική Επιφάνεια Μεταφοράς Θερμότητας. [1]

### 2.3.8.d Σύστημα Πολυβάθμιας Εκτόνωσης Με Θερμική Συμπύεση Υδρατμού (Multistage Flash Desalination with Thermal Vapor Compression)

Προσπάθειες για βελτίωση της ολικής απόδοσης του συστήματος πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) οδήγησαν στο σχεδιασμό συνδυαστικών διαρρυθμίσεων με συνδυασμό των συστημάτων μηχανικής συμπύεσης υδρατμού. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα με την πάροδο των χρόνων πολλά από τα συστήματα μηχανικής συμπύεσης υδρατμού να απαλειφθούν καθώς οι λειτουργίες τους παρεχόταν πια από τα συνδυαστικά συστήματα πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF). Στις λειτουργίες αυτές περιλαμβάνονται η προθέρμανση της άλμης, ο εξαερισμός των μη συμπυκνώσιμων αερίων, χημική δοσολογία, αντλίες αποστάγματος και στρατσώνα άλμης. Αποτελέσματα έδειξαν μικρότερη χημική και ειδική κατανάλωση καυσίμων με τιμές των 50% και 65-75% αντίστοιχα. Η ανάπτυξη των συστημάτων αυτών παρακινήθηκε από την δραστική αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης σε σχέση με τον αντίστοιχο των συστημάτων πολλαπλής εξάτμισης σε συνδυασμό με συμπύεση υδρατμού.

Σχηματικό διάγραμμα του προτεινόμενου συνδυαστικού συστήματος πολυβάθμιας εκτόνωσης με θερμική συμπύεση υδρατμού (MSF-TVC)

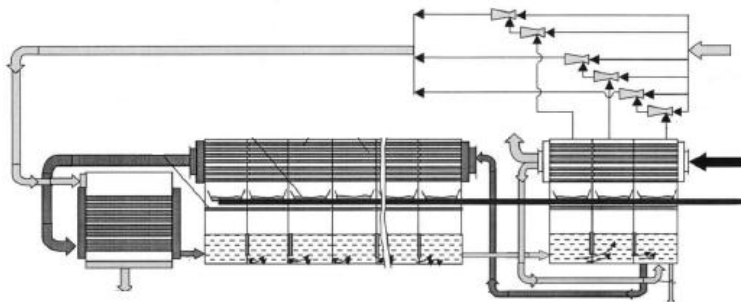
παρουσιάζεται στην **Εικόνα 94**. Το σύστημα αποτελείται από έναν θερμαντήρα άλμης, στα στάδια εκτόνωσης και έναν εκτοξευτήρα ατμού. Τα στάδια εκτόνωσης χωρίζονται μεταξύ του τομέα ανάκτησης θερμότητας και απόρριψης θερμότητας. Κάθε στάδιο εκτόνωσης περιλαμβάνει μια πισίνα άλμης, ένα βυθισμένο στόμιο, έναν αποθαμβωτή, έναν δίσκο συλλογής αποστάγματος και τους σωλήνες του συμπυκνωτή. Το σύστημα επίσης περιλαμβάνει έναν αριθμό μονάδων εξαερισμού, οι οποίες απομακρύνουν και αποτρέπουν την συγκέντρωση των μη συμπυκνώσιμων αερίων μέσα στον θάλαμο υδρατμού. Η διεργασία ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

- Το ρεύμα ανακυκλούμενης άλμης εισέρχεται στους σωλήνες του θερμαντήρα άλμης, όπου ο συμπιεσμένος υδρατμός συμπυκνώνεται στην εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων. Το ρεύμα της άλμης απορροφά την λανθάνουσα θερμότητα του συμπυκνωμένου ατμού και αυξάνεται η θερμοκρασία του στο ανώτατο σχεδιαστικό όριο, γνωστό και ως υψηλή θερμοκρασία της άλμης. Η τιμή αυτή εξαρτάται από την φύση των χημικών που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της δημιουργίας ιζήματος.
- Η θερμή άλμη εισέρχεται στα στάδια της εκτόνωσης, του τομέα ανάκτησης θερμότητας και μετά του τομέα απόρριψης θερμότητας, όπου σχηματίζεται μια μικρή ποσότητα υδρατμού από γλυκό νερό από την εκτόνωση της άλμης σε κάθε στάδιο. Η διεργασία της εκτόνωσης λαμβάνει χώρα εξαιτίας της μείωσης της θερμοκρασίας κορεσμού της βαθμίδας και προκαλεί με τη σειρά της μείωση της πίεσης της βαθμίδας.
- Σε κάθε βαθμίδα του τομέα ανάκτησης θερμότητας, οι εκτονωμένοι υδρατμοί συμπυκνώνονται στην εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων του συμπυκνωτή, στο εσωτερικό των οποίων ρέει το ρεύμα της ανακυκλούμενης άλμης από την ψυχρή προς τη θερμή πλευρά του συστήματος. Αυτή η ανάκτηση θερμότητας βελτιώνει την αποδοτικότητα του συστήματος εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας.
- Ο συμπυκνωμένος υδρατμός γλυκού νερού στο εξωτερικό των σωλήνων του συμπυκνωτή συγκεντρώνεται κατά μήκος των σταδίων και σχηματίζει το ρεύμα του αποσταγμένου προϊόντος. Αυτό το ρεύμα κινείται προς την ίδια κατεύθυνση με την εκτονωμένη άλμη από στάδιο σε στάδιο και συλλέγεται από το τελευταίο στάδιο του τομέα απόρριψης θερμότητας.
- Το ρεύμα του θαλασσινού νερού πρόσληψης εισάγεται στους σωλήνες του συμπυκνωτή του τομέα απόρριψης θερμότητας, όπου η θερμοκρασία του αυξάνεται σε υψηλότερη τιμή εξαιτίας της απορρόφησης της λανθάνουσας θερμότητας από το συμπυκνωμένο υδρατμό γλυκού νερού.
- Το θερμό ρεύμα του θαλασσινού νερού πρόσληψης χωρίζεται σε δυο μέρη: το πρώτο είναι το θαλασσινό νερό ψύξης το οποίο και απορρίπτεται πάλι πίσω στη θάλασσα και το δεύτερο είναι το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας το οποίο εξαερώνεται, επεξεργάζεται χημικά και στη συνέχεια αναμιγνύεται στην πισίνα της άλμης του τελευταίου σταδίου εκτόνωσης του τομέα απόρριψης θερμότητας.

- Το ρεύμα της ανακυκλούμενης άλμης εξάγεται από την πισίνα της άλμης του τελευταίου σταδίου του τομέα απόρριψης θερμότητας και εισάγεται στους σωλήνες του συμπυκνωτή της τελευταίας βαθμίδας του τομέα ανάκτησης θερμότητας. Καθώς το ρεύμα ρέει στους σωλήνες του συμπυκνωτή κατά μήκος των βαθμίδων απορροφά την λανθάνουσα θερμότητα της συμπύκνωσης του εκτονωμένου υδρατμού σε κάθε στάδιο.
- Η απομένουσα άλμη της τελευταίας βαθμίδας του τομέα απόρριψης θερμότητας αποβάλλεται πίσω στη θάλασσα από την στρατσώνα άλμης.
- Ο εκτοξευτήρας ατμού εισάγει μια συγκεκριμένη ποσότητα του υδρατμού που σχηματίζεται στα στάδια της εκτόνωσης του τομέα απόρριψης ή ανάκτησης θερμότητας. Ο κινητήριος ατμός συμπιέζει τον παρασυρόμενο υδρατμό στην επιθυμητή πίεση και θερμοκρασία. Ο συμπιεσμένος αυτός υδρατμός χρησιμοποιείται μετά για να θερμάνει το ρεύμα της ανακυκλούμενης άλμης στο εσωτερικό του θερμαντήρα άλμης.
- Ένας ακόμα εκτοξευτήρας ατμού χρησιμοποιείται για να απομακρύνει τα μη συμπυκνώσιμα αέρια, τα οποία απελευθερώνονται κατά την διάρκεια της εκτόνωσης από κάθε μια βαθμίδα. Η παρουσία και η συσσώρευση των αερίων αυτών έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για τους σωλήνες του συμπυκνωτή, ο οποίος με την σειρά του μειώνει την αποτελεσματικότητα της διεργασίας και την αποδοτικότητα του συστήματος.
- Ο εκτοξευτήρας ατμού σχηματίζεται από έναν συγκλινόν-αποκλινόν ακροφύσιο, από έναν συγκλινόν-αποκλινόν διαχύτη, έναν λαιμό, μια ζώνη ανάμιξης και έναν θάλαμο αναρρόφησης ή παράσυρσης. Ο κινητήριος ατμός διαστέλλεται μέσα στο ακροφύσιο με αποτέλεσμα η στατική ενέργεια της πίεσης να μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια. Η ταχύτητα του κινητήριου ατμού γίνεται μεγαλύτερη από αυτή της ταχύτητας του ήχου, υπερηχητική, καθώς αφήνει το ακροφύσιο. Ο θάλαμος αναρρόφησης κρατά το ακροφύσιο σωστά τοποθετημένο σε σχέση με τον διαχύτη και κατευθύνει τον παρασυρόμενο υδρατμό. Ο εισερχόμενος υδρατμός εισέρχεται στο θάλαμο αναρρόφησης όπου αναμιγνύεται γρήγορα και βίαια με τον κινητήριο ατμό. Τα δυο ρεύματα αναμιγνύονται μαζί καθώς περνούν κατά μήκος του τομέα μετατροπής μέσα από τον διαχύτη τύπου venturi. Το μίγμα εισέρχεται στο λαιμό του διαχύτη, πλήρως αναμεμιγμένο, και με την ηχητική του ταχύτητα. Ο συνδυασμός μίξης των δυο ροών αυτοσυμπιέζεται μέσα από τον αποκλινόν τομέα του διαχύτη venturi, όπου η επιφάνεια διασταύρωσης του τομέα αυξάνει και η ταχύτητα μειώνεται, μετατρέποντας έτσι την κινητική ενέργεια του μίγματος σε στατική ενέργεια πίεσης. Ο εκτοξευτήρας ατμού είναι σχεδιασμένος ώστε να λειτουργεί σε κρίσιμες συνθήκες, ώστε το υπερηχητικό ωστικό κύμα να βρίσκεται στην έξοδο του ακροφυσίου. Για να συμβεί αυτό ωστόσο πρέπει ο λόγος συμπίεσης της πίεσεως να είναι μεγαλύτερος του 1,8. Κατά τη λειτουργία, το ωστικό κύμα μπορεί να μετακινηθεί κατάντη μετά από μείωση της πίεσης στο συμπυκνωτή. Αυτό έχει αμελητέα επίδραση στην απόδοση του εκτοξευτήρα, ωστόσο, αν

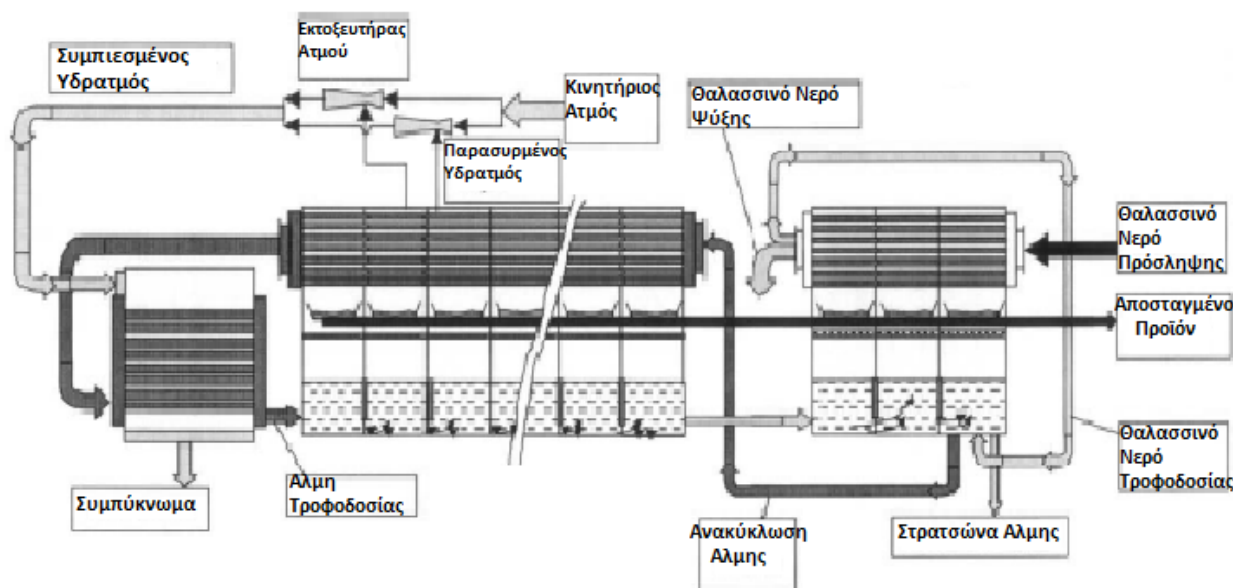
επικρατήσουν οι συνθήκες αποτροπής σχηματισμού του ωστικού κύματος, η απόδοση του εκτοξευτήρα χειροτερεύει και δεν λαμβάνει χώρα καμία συμπίεση ή εισαγωγή. Στο πλαίσιο της σταθερής λειτουργίας συνδέεται η απουσία βίαιων διακυμάνσεων της πίεσης αναρρόφησης. Αν ο εκτοξευτήρας είναι σχεδιασμένος ώστε να λειτουργεί σε πλήρως σταθερό εύρος, θα έχει ένα σταθερό ρυθμό ροής μάζας για τον παρασυρόμενο υδρατμό για τις διάφορες πιέσεις απαλλαγής, όταν οι ανάντη συνθήκες παραμένουν σταθερές.

Σε αυτό το σύστημα υπάρχουν δυο διαρρυθμίσεις που διαφέρουν σε σχέση με την τοποθεσία από όπου παρασύρεται ο υδρατμός. Στην πρώτη διαρρύθμιση (a), όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 94**, υδρατμός ίδιου θερμικού φορτίου και όχι ρυθμού ροής παρασύρεται από τα στάδια που σχηματίζουν τον τομέα απόρριψης θερμότητας. Αυτό είναι απαραίτητο εξαιτίας της ισορροπίας της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας και του θερμικού φορτίου του εκτονωμένου υδρατμού σε αυτά τα στάδια. Έτσι, μια ίση αύξηση παρουσιάζεται στην θερμοκρασία του ρεύματος του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας που ρέει στους σωλήνες του συμπυκνωτή του τομέα απόρριψης θερμότητας. Αυτό το σύστημα έχει ομοιότητες με την συμπίεση του υδρατμού στα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης, όπου ο παρασυρόμενος υδρατμός από τον εκτοξευτήρα ατμού ήταν σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η διαφορά μεταξύ αυτών των συστημάτων και των συστημάτων πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) είναι ότι στα δεύτερα συστήματα υπάρχει η ανάγκη συμπίεσης του υδρατμού σε υψηλότερες θερμοκρασίες και αυτό λόγω των περιορισμών που επιβάλλονται για το εύρος εκτόνωσης και τη θερμοκρασιακή πτώση ανά βαθμίδα. Σε αυτή τη διαρρύθμιση απαιτείται η χρήση δυο εκτοξευτήρων ατμού σε σειρά. Η δεύτερη διαρρύθμιση (b), παρουσιάζεται στην **Εικόνα 95** και περιλαμβάνει υδρατμό ισοδύναμου θερμικού φορτίου ο οποίος παρασύρεται εξίσου από δυο έως τέσσερα στάδια του τομέα ανάκτησης θερμότητας. Για μια ακόμη φορά, η ισοδύναμη επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας και το θερμικό φορτίο εκτόνωσης στον τομέα ανάκτησης θερμότητας επιβάλλουν τον παραπάνω περιορισμό ισοδυναμίας. Σε αυτή την περίπτωση, η υψηλή θερμοκρασία του υδρατμού απαιτεί την χρήση ενός μόνο εκτοξευτήρα. Ωστόσο, και στις δυο διαρρυθμίσεις, χρησιμοποιούνται διαφορετικοί εκτοξευτήρες για να παρασύρουν ή να συμπίεσουν τον υδρατμό σε κάθε στάδιο. Η χρήση ενός μόνο εκτοξευτήρα δεν είναι δυνατή εξαιτίας της διαφοράς πίεσεως στον παρασυρόμενο υδρατμό.



**Εικόνα 94:** Πολυβάθμια Εκτόνωση με Θερμική Συμπίεση Υδρατμού (MSF-TV), (a) Παράσυρση Υδρατμού από τα Στάδια Απόρριψης Θερμότητας. [1]





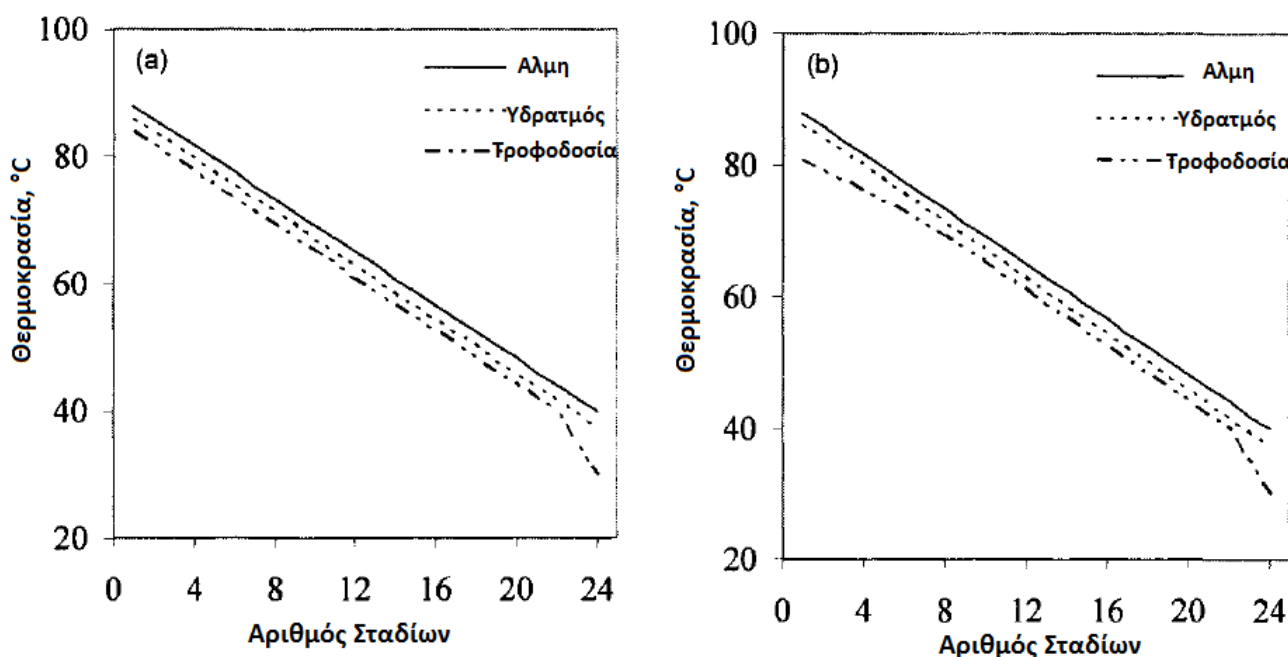
**Εικόνα 95:** Πολυβάθμια Εκτόνωση με Θερμική Συμπίεση Υδρατμού (MSF-TV), (b) Παράσυρση Υδρατμού από τα Στάδια Ανάκτησης Θερμότητας. [1]

Περίληπτικά, σχεδιαστικές διαφορές του συμβατικού συστήματος και του συστήματος πολυβάθμιας εκτόνωσης με θερμική συμπίεση υδρατμού (MSF-TV) περιλαμβάνουν τις εξής:

- Όπως έχει ήδη συζητηθεί το υβριδικό σύστημα έχει υψηλότερο βαθμό απόδοσης σε σχέση με το συμβατικό. Αυτό σημαίνει μείωση της ποσότητας ενέργειας που δίνεται στο σύστημα ανά μονάδα μάζας του παραγόμενου αποσταγμένου νερού. Σαν αποτέλεσμα απαιτείται μικρότερη επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας καθώς και μικρότερη δυνατότητα άντλησης θαλασσινού νερού ψύξης.
- Κατάργηση του βρόχου ελέγχου και των σχετικών διατάξεων για την θερμοκρασία και την πίεση του ατμού χαμηλής πίεσης, όπως παρατηρούνταν στα συμβατικά συστήματα. Στα υβριδικά συστήματα, ο κινητήριος ατμός βγαίνει απευθείας από το ρεύμα ατμού μέσης πίεσης.
- Αύξηση της πίεσης του ατμού στα υβριδικά συστήματα έχει ως αποτέλεσμα μείωση του μεγέθους των μονάδων άντλησης. Αυτό οφείλεται στην μείωση του ειδικού όγκου του ατμού σε μεγαλύτερες πιέσεις. Στα συμβατικά συστήματα, η χρήση ατμού χαμηλής πίεσης, ο οποίος είχε μεγαλύτερο ειδικό όγκο, απαιτούσε αντλίες μεγαλύτερης διαμέτρου.

Η απόδοση των συνδυαστικών αυτών συστημάτων περιλαμβάνει προφίλ θερμοκρασιών, διάγραμμα του βαθμού απόδοσης, της ειδικής επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας, του ειδικού ρυθμού νερού ψύξης και του μεγέθους της αντλίας.

Τα προφίλ θερμοκρασιών αφορούν την εκτονωμένη άλμη, την εκτονωμένη άλμη και το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας και παρουσιάζονται στην **Εικόνα 96**. Και στις δυο διαρρυθμίσεις τα προφίλ θερμοκρασιών της άλμης που εκτονώνεται και του υδρατμού που έχει εκτονωθεί είναι ίδια με τα αντίστοιχα του συμβατικού συστήματος πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF). Αυτό οφείλεται στο ότι το εύρος εκτόνωσης και η θερμοκρασιακή πτώση ανά βαθμίδα διατηρούνται σταθερά. Παρόμοια, τα προφίλ θερμοκρασιών του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας και της ανακυκλούμενης άλμης για την διαρρύθμιση (a) είναι ίδια με τα αντίστοιχα του συμβατικού συστήματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, οι θερμοκρασιακές διαφορές κατά μήκος του τομέα ανάκτησης και απόρριψης θερμότητας είναι ίδιες και στα δυο συστήματα. Έτσι, ο παρασυρόμενος υδρατμός στον τομέα απόρριψης θερμότητας θα προκαλέσει μόνο μείωση του θερμικού φορτίου, η οποία θα οδηγήσει σε μείωση του ρυθμού ροής του νερού ψύξης. Για την διαρρύθμιση (b) το προφίλ θερμοκρασιών για την ανακυκλούμενη άλμη του τομέα ανάκτησης θερμότητας διαφέρει από το αντίστοιχο του συμβατικού συστήματος. Η διαφορά εντοπίζεται στα στάδια 1-6 όπου παρασύρεται ο υδρατμός, και ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία της ανακυκλούμενης άλμης δεν αυξάνεται ως την ίδια τιμή που αφήνει τον τομέα ανάκτησης θερμότητας, όπως στην διαρρύθμιση (a) και τα συμβατικά συστήματα.

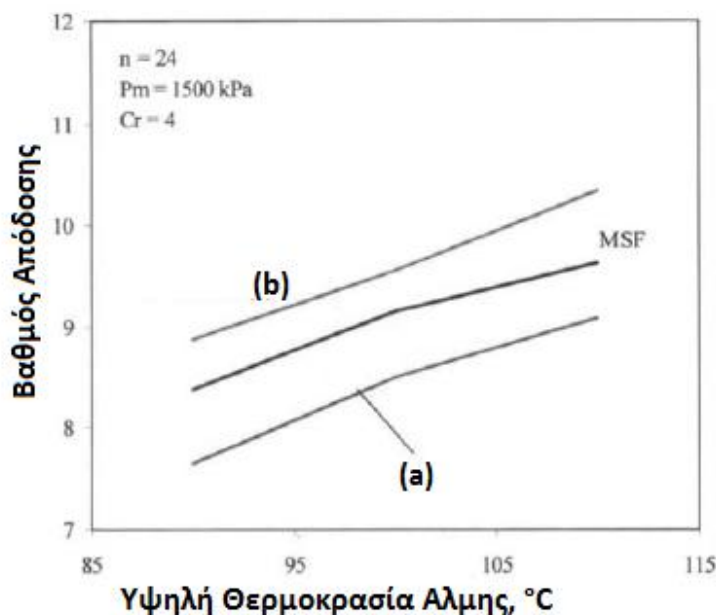


**Εικόνα 96:** Προφίλ Θερμοκρασιών για Συνδυαστικά Συστήματα Πολυβάθμιας Εκτόνωσης (a) Παράσυρση Υδρατμού από τα Στάδια Απόρριψης Θερμότητας, (b) Παράσυρση Υδρατμού από τα Στάδια Ανάκτησης Θερμότητας. [1]

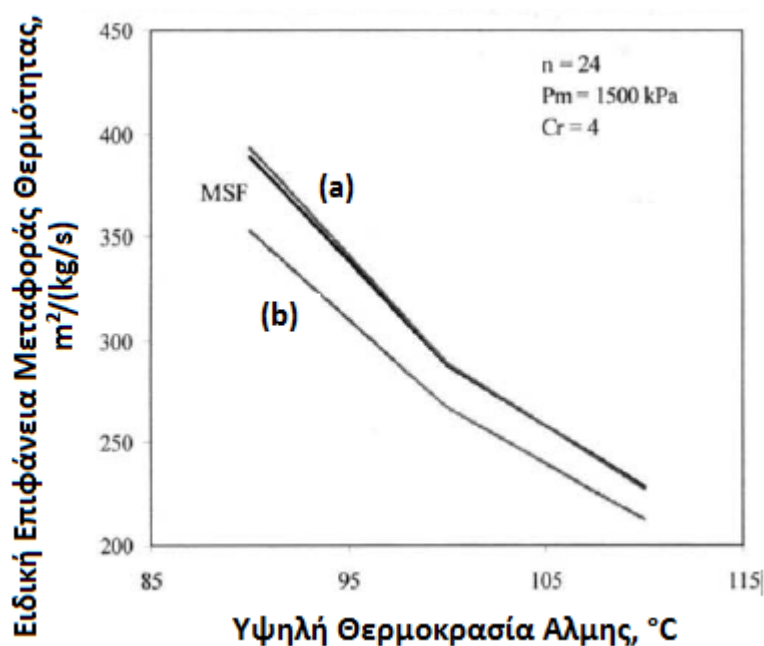
Οι διακυμάνσεις του βαθμού απόδοσης τόσο στις δυο διαρρυθμίσεις, όσο και στα συμβατικά συστήματα παρουσιάζονται στο διάγραμμα της **Εικόνας 97**. Και στα τρία συστήματα ο βαθμός απόδοσης αυξάνει με την αύξηση της υψηλής θερμοκρασίας της άλμης. Αυτό οφείλεται στο εύρος εκτόνωσης, το οποίο αυξάνει τη θερμοκρασιακή πτώση ανά βαθμίδα και άρα αυξάνει και την ποσότητα του

εκτονωμένου υδρατμού ανά βαθμίδα. Ο υψηλότερος βαθμός απόδοσης παρατηρείται για την διαρρύθμιση (b), εξαιτίας της μείωσης των απαιτήσεων του κινητήριου ατμού για συμπίεση του υδρατμού σε υψηλότερες θερμοκρασίες, με τιμές να κυμαίνονται μεταξύ 9 και 10,5 καθώς η υψηλή θερμοκρασία της άλμης παίρνει τιμές από 90 έως 110°C. Χαμηλότερος βαθμός απόδοσης παρατηρείται στην διαρρύθμιση (a) και ο κατώτερος στο συμβατικό σύστημα.

Τα αποτελέσματα της ειδικής επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας και για τα τρία συστήματα παρουσιάζεται στην **Εικόνα 98**. Η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας και για τα τρία συστήματα μειώνεται με την αύξηση της υψηλής θερμοκρασίας της άλμης. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της κινητήριας δύναμης για μεταφοράς θερμότητας. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας για την διαρρύθμιση (a) και τα συμβατικά συστήματα είναι σχεδόν ίδια, εξαιτίας των ίδιων προφίλ θερμοκρασιών που είχαν και για τους δύο τομείς απόρριψης και ανάκτησης θερμότητας. Όσον αφορά την διαρρύθμιση (b) έχει μικρότερη ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας σε σχέση με τα άλλα δυο συστήματα εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας της κινητήριας δύναμης μεταξύ του εκτονωμένου υδρατμού και του ρεύματος ανακυκλωμένης άλμης.

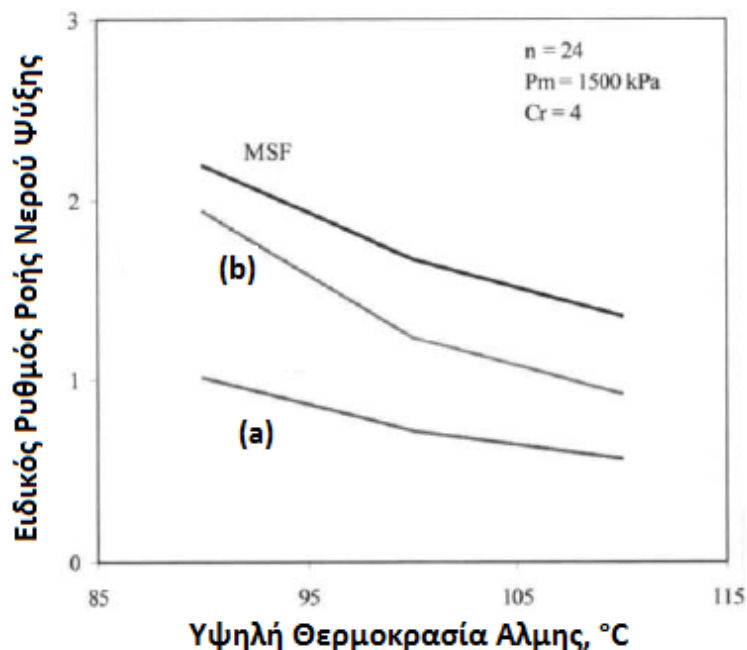


**Εικόνα 97:** Διακυμάνσεις του Βαθμού Απόδοσης σαν Συνάρτηση του Τύπου Συμπίεσης και της Υψηλής Θερμοκρασίας Άλμης. [1]



**Εικόνα 98:** Διακυμάνσεις της Ειδικής Επιφάνειας Μεταφοράς Θερμότητας σαν Συνάρτηση του Τύπου Συμπίεσης και της Υψηλής Θερμοκρασίας Άλμης. [1]

Μεταβολές στο ειδικό ρυθμό ροής του νερού ψύξης παρουσιάζονται και για τις τρεις διαρρυθμίσεις στα διαγράμματα της **Εικόνας 99** και όπως μπορούμε να δούμε αυτός μειώνεται για αύξηση της υψηλής θερμοκρασίας άλμης. Αυτό οφείλεται στην μείωση της ποσότητας του ατμού θέρμανσης ή του κινητήριου ατμού ανά μονάδα μάζας παραγόμενου νερού, ή στην αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης του συστήματος. Έτσι, το θερμικό φορτίο του συστήματος μειώνεται για υψηλές θερμοκρασίες άλμης και άρα μειώνεται και ο ειδικός ρυθμός ροής του νερού ψύξης. Η μικρότερη τιμή ειδικού ρυθμού ροής νερού ψύξης παρατηρείται για την διαρρύθμιση (a), ακολουθεί η (b) και τελευταίο έρχεται το συμβατικό σύστημα. Μεγάλη μείωση του ειδικού ρυθμού ροής του νερού ψύξης, οφείλεται στην παράσυρση του υδρατμού από τον τομέα απόρριψης θερμότητας και στην ταυτόχρονη αύξηση του βαθμού απόδοσης του συστήματος. Και οι δυο αυτοί παράγοντες μειώνουν το θερμικό φορτίο του τομέα απόρριψης θερμότητας και άρα τον ειδικό ρυθμό ροής νερού ψύξης.



**Εικόνα 99:** Διακυμάνσεις του Ειδικού Ρυθμού Ροής του Νερού Ψύξης σαν Συνάρτηση του Τύπου Συμπύεσης και της Υψηλής Θερμοκρασίας Άλμης. [1]

Συνοψίζοντας, το καινοτομικό συνδυαστικό αυτό σύστημα χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα:

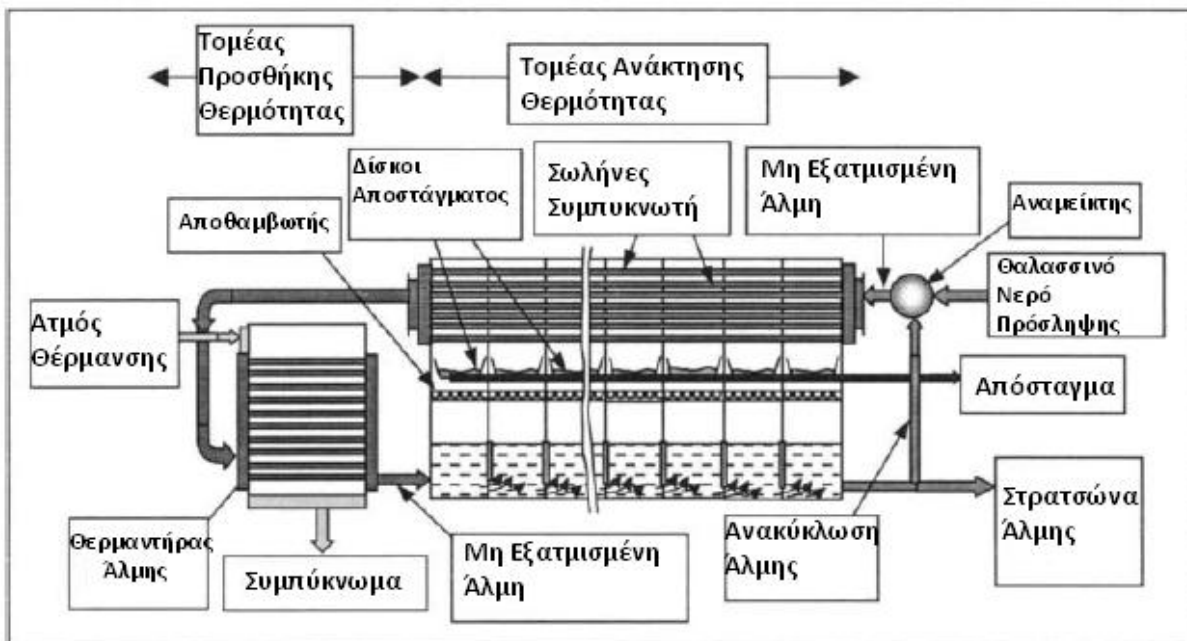
- Η θερμική συμπύεση υδρατμού αυξάνει την απόδοση των συστημάτων πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) και ως αποτέλεσμα μειώνει τον ειδικό ρυθμό ροής του νερού ψύξης και την ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας.
- Η συμπύεση υδρατμού σε στάδια που λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες στον τομέα ανάκτησης θερμότητας, δίνουν υψηλότερους βαθμούς απόδοσης σε σχέση με αυτά του τομέα απόρριψης θερμότητας.
- Η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας του υβριδικού αυτού συστήματος του τομέα ανάκτησης θερμότητας είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή του τομέα απόρριψης θερμότητας.
- Η διάμετρος της αντλίας του κινητήριου ατμού σε αυτά τα συστήματα είναι μικρότερη από την διάμετρο του ατμού θέρμανσης κατά 60%.

### 2.3.8.e Σύστημα Πολυβάθμιας Εκτόνωσης Με Ανάμειξη Άλμης (Multistage Flash Desalination with Brine Mixing)

Η διάταξη του συστήματος ανάμειξης της άλμης (BM) παρουσιάζεται στην **Εικόνα 100** και όπως μπορούμε να δούμε, είναι μέχρι ενός σημείου παρόμοια με την διαρρύθμιση του τομέα ανάκτησης θερμότητας των συμβατικών συστημάτων

πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) ή των συστημάτων πολυβάθμιας εκτόνωσης με απευθείας ροή (MSF-OT). Το σύστημα περιέχει τρεις βασικούς τομείς: τον τομέα προσθήκης θερμότητας όπου περιέχεται ο θερμοαντήρας άλμης, τον τομέα ανάκτησης θερμότητας όπου βρίσκονται τα στάδια εκτόνωσης και τον τομέα όπου βρίσκεται η δεξαμενή ανάμειξης της άλμης. Όπως μπορούμε να δούμε το ρεύμα της μη εξατμισμένης άλμης ανακύκλωσης ρέει σε μια αντίθετη κατεύθυνση σε σχέση με την εκτονωμένη άλμη και το αποσταγμένο προϊόν στα στάδια εκτόνωσης. Η μη εξατμισμένη άλμη ρέει από την ψυχρή πλευρά του συστήματος στην θερμή πλευρά, ενώ. Το αποσταγμένο προϊόν και η εκτονωμένη άλμη ρέει από την θερμή προς την ψυχρή πλευρά. Στον θερμοαντήρα άλμης, χρησιμοποιείται κορεσμένος ατμός για να αυξήσει τη θερμοκρασία της μη εξατμισμένης άλμης έως την ανώτατη υψηλή θερμοκρασία. Η θερμοκρασία του ατμού θέρμανσης είναι μεγαλύτερη από την ανώτατη θερμοκρασία άλμης κατά λίγους βαθμούς. Η θερμή άλμη εισέρχεται στον πρώτο θάλαμο εκτόνωσης, όπου σχηματίζεται μια μικρή ποσότητα αποστάγματος. Η διεργασία της εκτόνωσης μετατρέπει την περίσσεια αισθητή θερμότητα της μη εξατμισμένης άλμης σε λανθάνουσα θερμότητα που είναι απαραίτητη για την δημιουργία υδρατμού. Η διεργασία της εκτόνωσης συνεχίζει διαμέσου των σταδίων, όπου μικρές ποσότητες παραγόμενου αποστάγματος σχηματίζεται σε κάθε βαθμίδα. Σαν αποτέλεσμα της εξάτμισης του νερού, η αλατότητα της άλμης αυξάνεται κατά μήκος των σταδίων. Η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της συγκέντρωσης άλατος περιορίζεται στα 70.000 ppm ώστε να αποφευχθεί ο σχηματισμός ιζήματος θειικού ασβεστίου.

Ο σχηματιζόμενος υδρατμός περνά μέσα από το συρμάτινο αποθαμβωτή, όπου συγκρατούνται τα παρασυρμένα σταγονίδια άλμης από τον εκτονωμένο υδρατμό. Τα σταγονίδια άλμης σχηματίζονται λόγω της δημιουργίας αφρού, του σκασίματος των φυσαλίδων υδρατμού στην επιφάνεια της άλμης και εκτίναξη της άλμης στο στάδιο του στομίου. Ο διαχωρισμός των σταγονιδίων παρασυρόμενης άλμης είναι απαραίτητος για την αποφυγή της μόλυνσης του αποστάγματος και της μείωσης της ποιότητάς τους, όπως επίσης του σχηματισμού ιζημάτων στην εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων του συμπυκνωτή. Ο υδρατμός συμπυκνώνεται στην εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων του συμπυκνωτή/ προθερμαντήρα, όπου ρέει η μη εξατμισμένη άλμη. Ο υδρατμός απελευθερώνει τη λανθάνουσα θερμότητά του στο ρεύμα της άλμης και ως αποτέλεσμα αυξάνεται η θερμοκρασία της κατά μήκος των σταδίων. Το παραγόμενο απόσταγμα συλλέγεται στους δίσκους αποστάγματος και συγκεντρώνεται κατά μήκος των σταδίων.



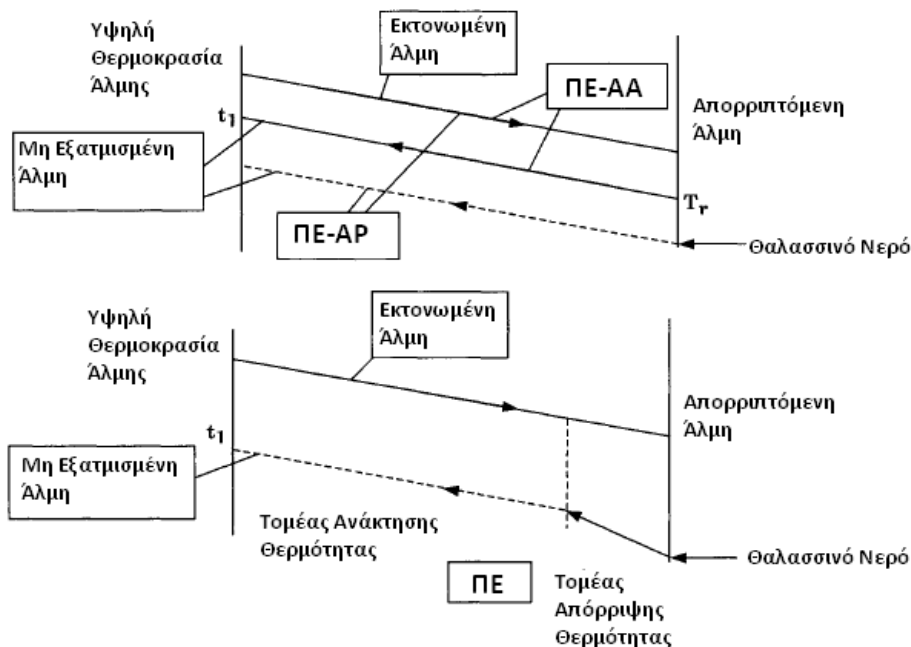
**Εικόνα 100:** Σχηματικό Διάγραμμα του Συστήματος Πολυβάθμιας Εκτόνωσης με Ανάμειξη Άλμης(MSF-BM). [1]

Σε κάθε στάδιο, η θερμοκρασία του σχηματιζόμενου υδρατμού είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία της εκτονωμένης άλμης κατά το σημείο θερμοκρασιακής ανύψωσης, η τιμή του οποίου επηρεάζεται από την αλατότητα της εκτονωμένης άλμης και τη θερμοκρασία βρασμού. Περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας κορεσμού του υδρατμού προκαλείται από την πτώση πίεσης στον αποθαμβωτή κατά την συμπτύκωση.

Η άλμη που φεύγει από την τελευταία βαθμίδα χωρίζεται σε δυο τμήματα: το πρώτο απορρίπτεται πίσω στη θάλασσα και το δεύτερο ανακυκλώνεται. Η αναλογία μεταξύ των δυο αυτών τμημάτων μπορεί να ελεγχθεί και εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία του θαλασσινού νερού πρόσληψης. Ο σκοπός της απόρριψης της άλμης πίσω στη θάλασσα είναι η διατήρηση της συγκέντρωσης άλατος μέσα στο σύστημα. Από την άλλη πλευρά, ο σκοπός της επανακυκλοφορίας της άλμης είναι η μείωση του ρυθμού ροής του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας και η ανάκτηση ενός μέρους από τη θερμότητα που προστίθεται στο σύστημα από τον θερμομαντήρα άλμης. Αυτό μειώνει την κατανάλωση πρόσθετων χημικών καθώς και το μέγεθος των εγκαταστάσεων επεξεργασίας για το ρεύμα τροφοδοσίας. Επίσης, όσο η ανακυκλούμενη άλμη περιέχει περισσότερη ενέργεια από το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας, η θερμική αποδοτικότητα της διεργασίας θα βελτιωθεί. Το τμήμα του ρεύματος της άλμης που αφήνει την τελευταία βαθμίδα αναμιγνύεται με το ρεύμα του θαλασσινού νερού πρόσληψης. Το προκύπτον μίγμα, έχει υψηλότερη αλατότητα και θερμοκρασία σε σχέση με το θαλασσινό νερό πρόσληψης. Η διεργασία ανάμειξης αναμένεται να προκαλέσει θερμικό σοκ εξαιτίας των διαφορών στη θερμοκρασία

του θαλασσινού νερού πρόσληψης και της ανακυκλούμενης άλμης. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε διάσπαση των διττανθρακικών ενώσεων και σχηματισμό αέριου διοξειδίου του άνθρακα. Έτσι, η μονάδα ανάμειξης πρέπει να εξαερίζεται σωστά ώστε να αποφεύγεται η συσσώρευση των μη συμπυκνώσιμων αερίων στο ρεύμα ανακυκλούμενης άλμης.

Η διεργασία εκτόνωσης και σχηματισμού υδρατμού περιορίζεται από την αύξηση του ειδικού όγκου υδρατμού σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και από τις δυσκολίες που παρουσιάζονται κατά τη λειτουργία σε χαμηλές πιέσεις. Η κοινή πρακτική περιορίζει τη θερμοκρασία της τελευταίας βαθμίδας σε τιμές 32 και 40°C, για χειμερινή και καλοκαιρινή λειτουργία αντίστοιχα. Περαιτέρω μείωση σε αυτές τις θερμοκρασίες έχει ως αποτέλεσμα δραστική αύξηση του όγκου του σταδίου και των διαστάσεών τους. Επιπλέον, αφού τα περισσότερα στάδια λειτουργούν για θερμοκρασίες κάτω των 100°C, η πίεση μεταξύ των σταδίων είναι σε κατάσταση κενού, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει διαρροή από τον εξωτερικό αέρα. Σε τέτοιες συνθήκες, ο αέρας είναι μη συμπυκνώσιμος και η παρουσία του στο σύστημα μπορεί να προκαλέσει σοβαρή μείωση στα ποσοστά μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των θαλάμων, αύξηση της πίεσης του θαλάμου, και μείωση των ποσοστών εκτόνωσης. Η συσσώρευση των μη συμπυκνώσιμων αερίων προκαλείται επίσης από ίχνη διαλυμένων αερίων, τα οποία δεν απομακρύνονται κατά τη διαδικασία εξαέρωσης. Αυτή η κατάσταση απαιτεί κατάλληλο εξαερισμό των σταδίων εκτόνωσης ώστε να βελτιωθεί η διεργασία εκτόνωσης και να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα του συστήματος



**Εικόνα 101:** Προφίλ Θερμοκρασιών για Την Συμβατική Πολυβάθμια Εκτόνωση (MSF), την Πολυβάθμια Εκτόνωση με Απευθείας Ροή (PE-AP,MSF-OT) και την Πολυβάθμια Εκτόνωση με Ανάμειξη Άλμης(MSF-BM). [1]



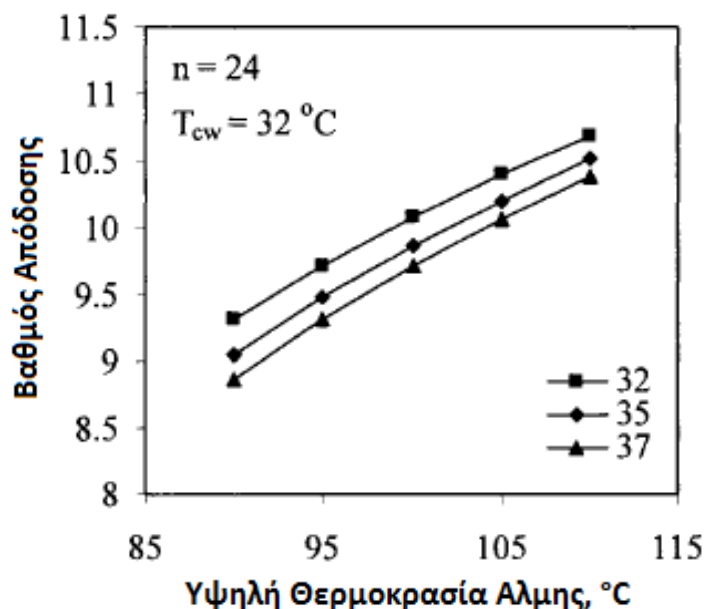
Περίληπτικά, οι κύριες διαφορές μεταξύ του συστήματος ανάμειξης της άλμης (MSF-BM) και των συμβατικών συστημάτων πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF), είναι:

- Η αφαίρεση του τομέα απόρριψης θερμότητας.
- Απουσία του βρόχου κυκλοφορίας του νερού ψύξης που χρησιμοποιείται στα συμβατικά συστήματα για τον έλεγχο της θερμοκρασίας εκτόνωσης της τελευταίας βαθμίδας και απομάκρυνση της περίσσειας ενέργειας που προστίθεται στο σύστημα από τον θερμαντήρα άλμης.
- Η εξάλειψη του βρόχου ανακύκλωσης του νερού ψύξης, που χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει τη θερμοκρασία εκτόνωσης του θαλασσινού νερού της τελευταίας βαθμίδας εκτόνωσης του τομέα απόρριψης θερμότητας, ειδικότερα κατά τη λειτουργία των χειμερινών μηνών.
- Η ανάμειξη της ανακυκλούμενης άλμης και του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας λαμβάνει χώρα σε μια εξωτερική δεξαμενή ανάμειξης αντί να πραγματοποιείται στο εσωτερικό των σταδίων εκτόνωσης.
- Η αλατότητα της απορριπτόμενης άλμης μπορεί να είναι μικρότερη από την οριακή τιμή των 70.000 ppm και αυτό εξαρτάται από τη θερμοκρασία του θαλασσινού νερού πρόσληψης.
- Ο ρυθμός ροής του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας δεν είναι σταθερός και ορίζεται σε σχέση με τη θερμοκρασία και την αλατότητα του θαλασσινού νερού.

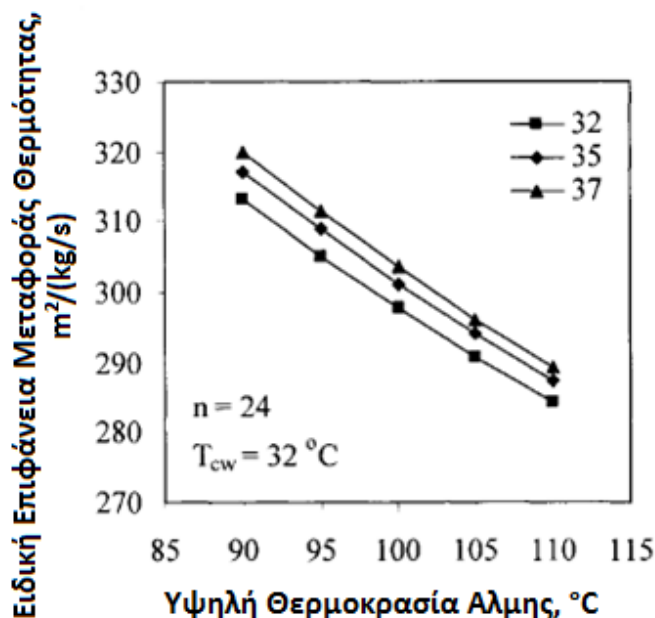
Διαφορές του συμβατικού συστήματος (MSF) και του συστήματος πολυβάθμιας εκτόνωσης με απευθείας ροή (MSF-OT), είναι:

- Μέρος της άλμης που ρέει στην τελευταία βαθμίδα επανακυκλοφορεί στο σύστημα.
- Η επανακυκλοφορία της άλμης μειώνει το ρυθμό ροής του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας και ως αποτέλεσμα χρησιμοποιούνται μικρότερες ποσότητες χημικών πρόσθετων και απαιτείται μικρότερο μέγεθος εγκατάστασης επεξεργασίας, στην οποία περιλαμβάνεται η διήθηση και ο εξαερισμός.
- Η χρήση της δεξαμενής ανάμειξης δίνει καλύτερο έλεγχο της θερμοκρασίας της άλμης τροφοδοσίας στους σωλήνες του συμπυκνωτή του τελευταίου σταδίου εκτόνωσης.
- Η αλατότητα της ανακυκλούμενης άλμης είναι υψηλότερη από αυτή του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας.
- Ο εξαερισμός του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας λαμβάνει χώρα στο εξωτερικό του σταδίου και με τον τρόπο αυτό μειώνεται και ο ρυθμός διάβρωσης στο εσωτερικό των σταδίων.
- Το σύστημα είναι λιγότερο ευαίσθητο στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας, καθώς αυτές μπορούν πια να ελεγχθούν μέσω του ρυθμού κυκλοφορίας της άλμης.

Η απόδοση του προτεινόμενου αυτού συστήματος με ανάμειξη άλμης (MSF-BM) αναλύεται σαν συνάρτηση της υψηλής θερμοκρασίας της άλμης, της θερμοκρασίας της ανακυκλούμενης άλμης και τέλος του αριθμού των βαθμίδων. Όπως μπορούμε να δούμε στο διάγραμμα της **Εικόνας 102**, ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυξάνει για υψηλότερες θερμοκρασίες άλμης και χαμηλότερες θερμοκρασίες ανακύκλωσης της άλμης. Σε αυτές τις συνθήκες, αυξάνεται το εύρος εκτόνωσης και ως αποτέλεσμα έχουμε μεγαλύτερη θερμοκρασιακή πτώση ανά βαθμίδα. Αυτό αυξάνει την ποσότητα του εκτονωμένου υδρατμού ανά βαθμίδα και άρα την ολική ποσότητα του παραγόμενου αποστάγματος. Στις ίδιες συνθήκες, ο ειδικός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μειώνεται για υψηλότερες θερμοκρασίες άλμης και χαμηλότερες θερμοκρασίες ανακύκλωσης, εξαιτίας της αύξησης της ποσότητας του αποσταγμένου προϊόντος. Επίσης, αύξηση της υψηλής θερμοκρασίας της άλμης βελτιώνει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας κατά μήκος των σωλήνων του συμπυκνωτή. Αυτό οφείλεται στη μείωση του ιξώδους και στην αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας για το θαλασσινό νερό και το ρεύμα αποστάγματος σε υψηλές θερμοκρασίες. Η επίδραση του αριθμού των βαθμίδων στον βαθμό απόδοσης παρουσιάζεται στο διάγραμμα της **Εικόνας 103** για θερμοκρασία ανακύκλωσης 37 °C, θερμοκρασία θαλασσινού νερού 32 °C και αριθμό σταδίων 20, 24, 28 και 32. Για μεγάλους αριθμούς σταδίων αυξάνεται τόσο ο βαθμός απόδοσης όσο και η ειδική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Η αύξηση του αριθμού των βαθμίδων μειώνει τη θερμοκρασιακή πτώση ανά βαθμίδα, έτσι μειώνεται η κινητήρια δύναμη για τη μεταφορά θερμότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ειδικής επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας των συμπυκνωτών κάθε βαθμίδας και άρα την ποσότητα του αποσταγμένου συμπυκνώματος ανά βαθμίδα.



**Εικόνα 102:** Επίδραση της Υψηλής Θερμοκρασίας της Άλμης και της Θερμοκρασίας της Ανακυκλούμενης Άλμης στον Βαθμό Απόδοσης. [1]



**Εικόνα 103:** Επίδραση της Υψηλής Θερμοκρασίας της Άλμης και της Θερμοκρασίας της Ανακυκλούμενης Άλμης στην Ειδική Επιφάνεια Μεταφοράς Θερμότητας. [1]

Συνοψίζοντας, ένα καινοτομικό σύστημα παρουσιάστηκε για τα συστήματα πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF). Στηρίζεται πάνω στη διαρρύθμιση του συμβατικού συστήματος και περιλαμβάνει δυο βασικά του στοιχεία, τον θερμαντήρα άλμης και τον τομέα ανάκτησης θερμότητας. Το ρεύμα νερού ψύξης, που ως τώρα ήταν βασικό στα συμβατικά συστήματα, επίσης εξαλείφεται. Το νέο σύστημα υιοθετεί ένα απευθείας ανακυκλούμενο ρεύμα άλμης από το ρεύμα άλμης που αφήνει την τελευταία βαθμίδα. Αυτό το ρεύμα αναμιγνύεται με το ρεύμα του θαλασσινού νερού πρόσληψης σε μια μονωμένη και εξαεριζόμενη δεξαμενή. Συνεπώς, η θερμοκρασία του ρεύματος τροφοδοσίας προσαρμόζεται με βάση τις συνθήκες λειτουργίας του χειμώνα και του καλοκαιριού. Με βάση αυτά, διαπιστώθηκαν τα παρακάτω:

- Ο έλεγχος της θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού πρόσληψης είναι απαραίτητος σε όλες τις διεργασίες θερμικής αφαλάτωσης. Αυτό το συναντάμε στην δεξαμενή ανάμειξης του συστήματος πολυβάθμιας εκτόνωσης με ανάμειξη άλμης (MSF-BM) και στον τομέα απόρριψης θερμότητας των συμβατικών συστημάτων πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF).
- Αυτός ο θερμοκρασιακός έλεγχος είναι απαραίτητος κυρίως στην χειμερινή λειτουργία. Έλλειψη αυτού του ελέγχου, όπως στα συστήματα πολυβάθμιας εκτόνωσης με απευθείας ροή (MSF-OT), προκαλεί μείωση της θερμοκρασίας της άλμης στην τελευταία βαθμίδα και έχει ως αποτέλεσμα τεράστια αύξηση της θερμοκρασιακής πτώσης κατά μήκος των βαθμίδων.
- Μείωση της θερμοκρασίας της άλμης στην τελευταία βαθμίδα κατά τη χειμερινή λειτουργία για την διαρρύθμιση απευθείας ροής, απαιτεί αύξηση των διαστάσεων της βαθμίδας ώστε να χωρέσει τον αυξημένο ειδικό όγκο του υδρατμού. Επίσης, μεγαλύτερη επιφάνεια ροής για το ρεύμα της άλμης είναι απαραίτητη για να εξισορροπήσει την υψηλή πτώση πίεσης κατά μήκος των βαθμίδων. Επίσης, η έλλειψη ελέγχου επιβάλλει αύξηση της δυναμικότητας του συστήματος κενού για τα μη συμπυκνώσιμα αέρια,

αύξηση του πάχους των τοιχωμάτων και του βαθμού διαρροής του εξωτερικού αέρα.

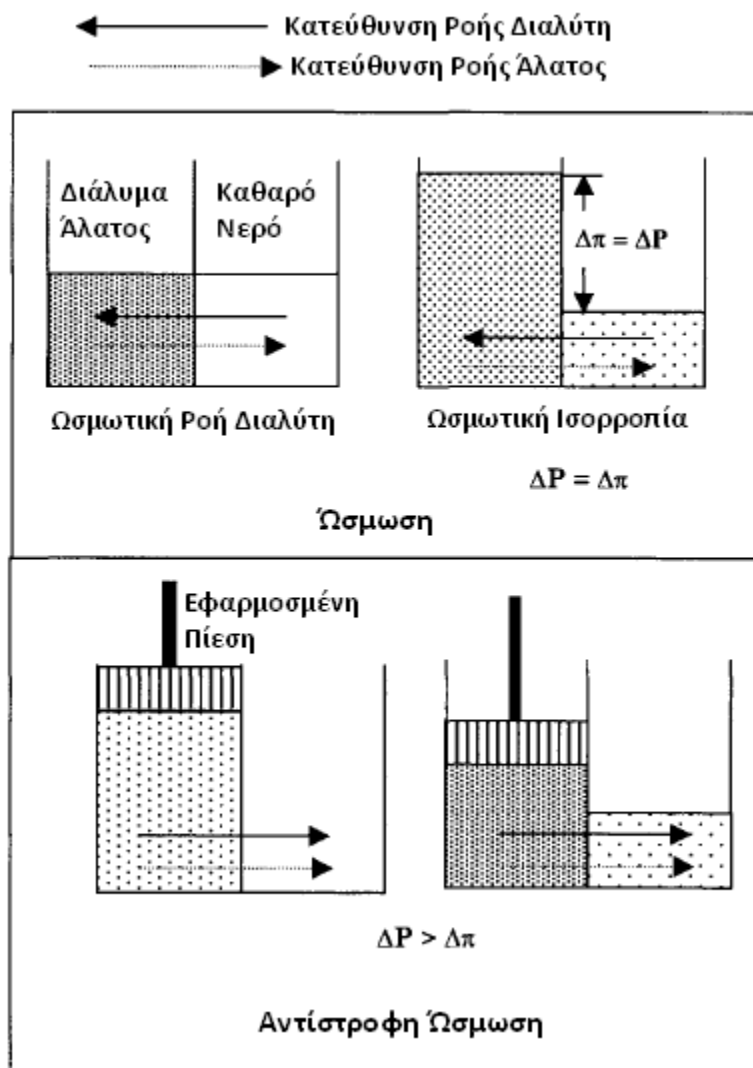
- Κατά τους θερινούς μήνες, όπου η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού είναι αρκετά υψηλή ώστε να διασφαλίσει υψηλή θερμοκρασία και για την άλμη της τελευταίας βαθμίδας, η λειτουργία των συστημάτων με ανάμειξη της άλμης μπορεί να πραγματοποιηθεί και χωρίς ανακύκλωση της άλμης και να λειτουργήσουν άρα ως συστήματα απευθείας ροής. Αυτή η κατάσταση μειώνει ακόμα την χρήσης χημικών για την αποφυγή ιζημάτων και την ελαχιστοποίηση της διάβρωσης.

### 2.3.9 Αντίστροφη Ώσμωση (Reverse Osmosis)

Ένας αριθμός διεργασιών αφαλάτωσης που στηρίζεται στη χρήση μεμβρανών χρησιμοποιείται αρκετά στην βιομηχανική κλίμακα. Σε αυτό τον τύπο διεργασιών ανήκουν η αντίστροφη ώσμωση (RO), νανοδιήθηση, υπερδιήθηση και μικροδιήθηση. Η διαφορά των παραπάνω διεργασιών έχει να κάνει με το εύρος μεγέθους των σωματιδίων, όπου στη μικροδιήθηση τα σωματίδια κυμαίνονται έως 0,15 μm, στην υπερδιήθηση από 0,15 μm έως  $5 \times 10^{-2}$  μm, στη νανοδιήθηση από  $5 \times 10^{-2}$  μm έως  $5 \times 10^{-3}$  μm και στην αντίστροφη ώσμωση από  $5 \times 10^{-3}$  μm έως  $10^{-4}$  μm. Ωστόσο, υπάρχει μια βασική διαφορά μεταξύ των διεργασιών διήθησης και της αντίστροφης ώσμωσης. Στην διήθηση, ο διαχωρισμός πραγματοποιείται μέσω ενός μηχανισμού, όπου περνάνε την μεμβράνη τα μικρότερα σωματίδια ενώ κατακρατούνται τα μεγαλύτερα. Στην ώσμωση (O) ή την αντίστροφη ώσμωση (RO), η μεμβράνη επιτρέπει την είσοδο μόνο στους διαλύτες και κατακρατεί την διαλυτή ουσία. Η μικροδιήθηση, η υπερδιήθηση και η νανοδιήθηση χρησιμοποιούνται κυρίως για τον διαχωρισμό αιωρούμενων υλικών, η αντίστροφη ώσμωση για τον διαχωρισμό διαλυμένων στερεών. Η νανοδιήθηση χρησιμοποιείται για μερική επεξεργασία του υφάλμυρου νερού, με σκοπό αυτό να γίνει πιο μαλακό.

Η σχηματική απεικόνιση της διεργασίας ώσμωσης (O) αλλά και αντίστροφης ώσμωσης (RO) παρουσιάζεται στην **Εικόνα 104**. Σε αυτή την διαρρύθμιση, η κατεύθυνση της ροής του διαλύτη καθορίζεται από το χημικό δυναμικό, το οποίο είναι συνάρτηση της πίεσης, της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης των διαλυμένων στερεών. Αν καθαρό νερό έρθει σε επαφή και με τις δυο πλευρές μιας ιδεατής ημιπερατής μεμβράνης με ισοδύναμη πίεση και θερμοκρασία, δεν θα υπάρξει καμία καθαρή ροή κατά μήκος της μεμβράνης εξαιτίας της ισοδυναμίας του χημικού δυναμικού και στις δυο πλευρές. Αν ένα διαλυτό άλας προστεθεί στη μια πλευρά, το χημικό δυναμικό αυτού του διαλύματος άλατος έχει μειωθεί. Η ωσμωτική ροή από την πλευρά του καθαρού νερού κατά μήκος της μεμβράνης προς την πλευρά του διαλύματος άλατος θα λάβει χώρα μέχρι την αποκατάσταση της ισορροπίας του χημικού δυναμικού. Η ισορροπία πραγματοποιείται όταν η διαφορά υδροστατικής πίεσης, η οποία οφείλεται στις αλλαγές του όγκου των δύο πλευρών, ισοδυναμεί με την ωσμωτική πίεση. Αυτό

αποτελεί ιδιότητα του διαλύματος ανεξαρτήτως της μεμβράνης. Εφαρμογή μιας εξωτερικής πίεσης στην πλευρά του διαλύματος άλατος ίση με την ωσμωτική πίεση θα προκαλέσει ισορροπία. Επιπρόσθετη πίεση θα αυξήσει το χημικό δυναμικό του νερού στην πλευρά του διαλύματος άλατος και θα προκαλέσει τη ροή του διαλύτη προς την πλευρά του καθαρού νερού, καθώς τώρα έχει μικρότερο χημικό δυναμικό.



**Εικόνα 104:** Διεργασία Ωσμωσης(O) και Αντίστροφης Ωσμωσης(RO). [1]

Οι παράμετροι που επηρεάζουν την διεργασία αντίστροφης ώσμωσης (RO)είναι:

- Η ωσμωτική πίεση καθώς και η πίεση λειτουργίας.
- Η δυνατότητα απόρριψης άλατος.
- Η δυνατότητα της ανάκτησης του διηθήματος.

Ακόμα όλες οι κατασκευαστικές εταιρίες ορίζουν τις ιδιαιτερότητες του κάθε συστήματος συναρτήσει πάντα της ποιότητας τροφοδοσίας, στην οποία λαμβάνονται υπόψη η αλατότητα και η θερμοκρασία.

Αντίστοιχα, στα χαρακτηριστικά των μεμβράνων περιλαμβάνονται τα παρακάτω:

- Οι μεμβράνες κατασκευάζονται από μια λεπτή στοιβάδα υλικού πολυμερούς φύσεως.
- Οι μεμβράνες του εμπορίου έχουν υψηλή περατότητα στο νερό και υψηλό βαθμό ημιπερατότητας, γεγονός που σημαίνει ότι το ποσοστό μεταφοράς του νερού πρέπει να είναι υψηλότερο σε σχέση με το ποσοστό μεταφοράς των διαλυμένων ιόντων.
- Η μεμβράνη πρέπει να είναι σταθερή εντός ενός μεγάλου εύρους pH και θερμοκρασίας, και να έχει καλή μηχανική αξιοπιστία.
- Η ζωή των μεμβρανών του εμπορίου κυμαίνεται από 3-5 χρόνια. Ο μέσος όρος αντικατάστασης μεμβρανών τον χρόνο ανέρχεται στα 5-15%, και εξαρτάται από την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας, τις συνθήκες προεπεξεργασίας καθώς και την σταθερότητα λειτουργίας.
- Οι μεγαλύτεροι τύποι εμπορικών μεμβρανών στην διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης περιλαμβάνουν αυτούς από οξική κυτταρίνη και πολυαμίδι.
- Πρέπει να σημειωθεί ότι η επιλογή μεμβρανών τις περισσότερες φορές ορίζεται με βάση τους περιορισμούς συμβατότητας αντί της αποδόσεώς τους στον διαχωρισμό και των σχετικών χαρακτηριστικών της ροής.

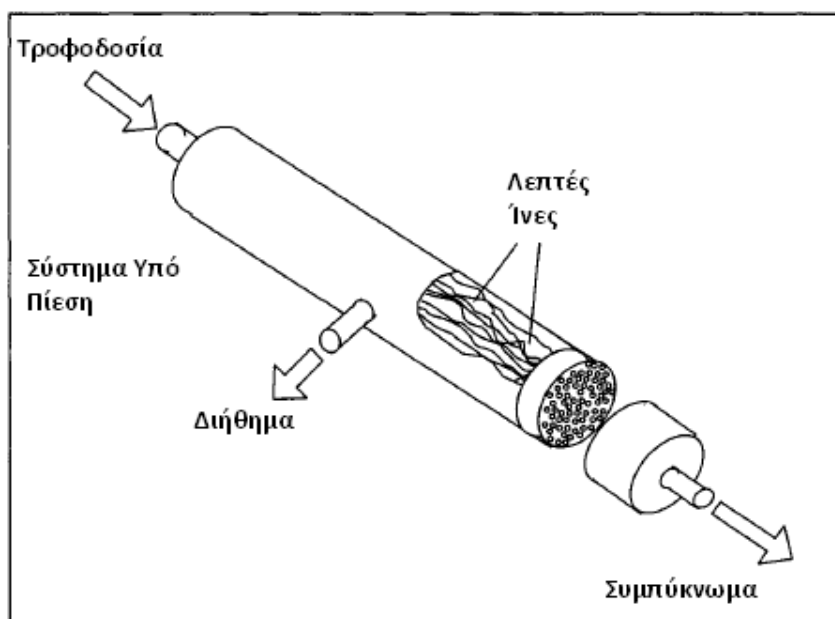
Οι δυο κύριοι τύποι μεμβρανών που χρησιμοποιούνται στην αντίστροφη ώσμωση (RO) είναι αυτός των κοίλων ινών καθώς και ο τύπος σπειροειδούς τυλίγματος. Ακόμα, στην βιομηχανία τροφίμων και γαλακτοκομικών χρησιμοποιούνται σωληνοειδής, πλακοειδής τύποι μεμβρανών αλλά και μεμβράνες τύπου περιγράμματος.

Ο τύπος μεμβράνης με κοίλες ίνες, **Εικόνα 105**, χρησιμοποιεί ίνες που έχουν εξαχθεί από κυτταρικό ή μη κυτταρικό υλικό, είναι ασύμμετρες στην δομή τους και είναι τόσο λεπτές όσο μια τρίχα από τα μαλλιά μας. Εκατομμύρια από αυτές τις ίνες συγκεντρώνονται και σχηματίζουν μια δέσμη που διπλώνεται στο μισό μήκος των περίπου 120 cm. Ένας διάτρητος πλαστικός σωλήνας, ο οποίος λειτουργεί ως διανομέας του νερού τροφοδοσίας εισέρχεται στο κέντρο και εκτείνεται ως το ολικό μήκος της δέσμης. Η δέσμη τυλίγεται και τα δύο άκρα της σφραγίζονται εποξιδικά ώστε να σχηματιστεί το ένα τέλος του σωλήνα σε ένα ημιπερατό φύλλο και το άλλο τέλος του να εμποδίζει το ρεύμα τροφοδοσίας να παρακάμπτει την άλμη εξόδου. Η συνδεσμολογία αυτή, έχει τη μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια, η οποία ορίζεται ως η ολική επιφάνεια ανά μονάδα όγκου, μεταξύ όλων των άλλων διαρρυθμίσεων. Το πεπιεσμένο νερό τροφοδοσίας εισέρχεται από το ημιπερατό άκρο του σωλήνα και ρέει εντός του κέντρου του σωλήνα διανομής, περνάει μέσω των τοιχωμάτων του, και ρέει ακτινωτά γύρω από την δέσμη ινών προς το εξωτερικό περίβλημα περατότητας πίεσεως. Το νερό

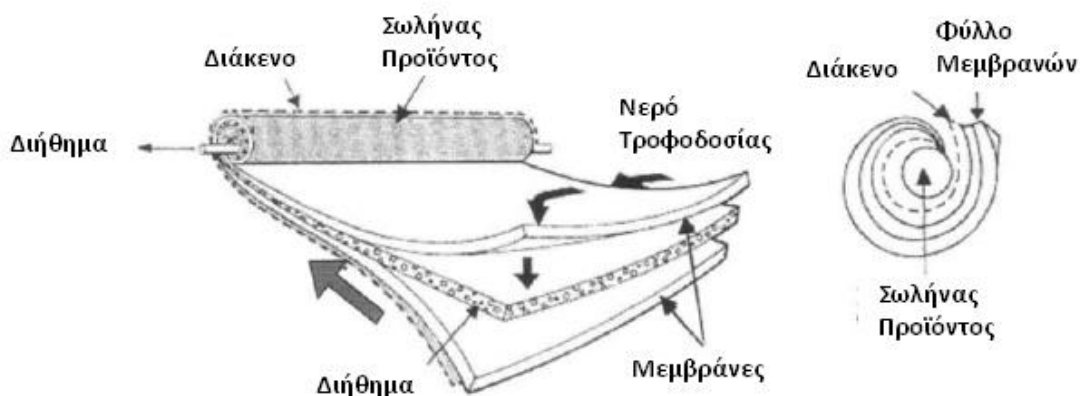
εισέρχεται από το εξωτερικό περίβλημα των ινών προς τον εσωτερικό τους πυρήνα και στην συνέχεια μέσω της οπής στο φύλλο του σωλήνα και εξάγεται μέσω της σύνδεσης του προϊόντος στην άκρη του σωλήνα τροφοδοσίας.

Σε αυτή τη διαρρύθμιση, η ροή του νερού που εισέρχεται ανά μονάδα επιφάνειας της μεμβράνης είναι μικρή και έτσι η συγκέντρωση πόλωσης δεν είναι υψηλή στην επιφάνεια της μεμβράνης. Το καθαρό αποτέλεσμα είναι ότι αυτές οι μονάδες λειτουργούν σε στρωτές ροές ή ροές χωρίς τύρβη. Επίσης πρέπει να λειτουργούν για μια ελάχιστη απορριπτόμενη ροή ώστε να ελαχιστοποιούν την συγκέντρωση πόλωσης και να διατηρούν ακόμα και την ροή διανομής δια μέσου της δέσμης των ινών. Τυπικά, μια μεμβράνη περατότητας με ίνες, μπορεί να λειτουργήσει σε ποσοστό έως και 50% της ανάκτησης και να πληρεί το ελάχιστο της απαιτούμενης απορριπτόμενης ροής. Αυτού του τύπου οι μεμβράνες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές θαλασσινού και υφάλμυρου νερού, ενώ εξαιτίας της πολύ πυκνής διαρρύθμισης των ινών απαιτούν νερό τροφοδοσίας καλύτερης ποιότητας, με χαμηλή δηλαδή συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων.

Στην διαρρύθμιση με σπειροειδές τύλιγμα, δυο φύλλα μεμβράνης χωρίζονται με έναν συλλέκτη περατότητας σχηματίζοντας κατά αυτόν τον τρόπο ένα ενιαίο φύλλο. Η συνδεσμολογία αυτή σφραγίζεται σε τρεις πλευρές με την τέταρτη πλευρά να αφήνεται ανοιχτή ώστε να μπορεί να διαφεύγει το διήθημα. Ένα φύλλο από υλικό δημιουργίας διακένου για την τροφοδοσία/άλμη προστίθεται στην συνδεσμολογία των φύλλων. Ένας αριθμός αυτής της συνδεσμολογίας ή φύλλων τυλίγεται γύρω από έναν κεντρικό πλαστικό σωλήνα διήθησης. Αυτός ο σωλήνας είναι διάτρητος ώστε να μπορεί να συλλέγει το διήθημα από τις πολλαπλές συνδεσμολογίες φύλλων. Ένα τυπικό βιομηχανικό σπειροειδές περιτύλιγμα μεμβράνης έχει μήκος 100 ή 150 cm και 10 ή 20 cm διάμετρο, όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 106**. Η άλμη τροφοδοσίας ρέει εντός του στοιχείου που είναι ένα ευθύ αξονικό μονοπάτι από το ένα άκρο της τροφοδοσίας στο αντίθετο άκρο της άλμης, που τρέχει παράλληλα προς την επιφάνεια της άλμης. Το κανάλι του διακένου προκαλεί τύρβη ενώ μειώνει την συγκέντρωση πόλωσης. Οι κατασκευαστές με σκοπό να περιορίσουν την συγκέντρωση πόλωσης μειώνουν τον βαθμό ανάκτησης (ή μετατροπής) του στοιχείου, ο οποίος αποτελεί συνάρτηση του μήκους που διανύει η άλμη τροφοδοσίας. Με σκοπό, λοιπόν, το σύστημα να λειτουργεί σε αποδεκτούς βαθμούς ανάκτησης, τα συστήματα αυτού του τύπου αποτελούνται από στάδιο των τριών έως έξι μεμβρανών που συνδέονται σε σειρά σε έναν σωλήνα πίεσης. Το ρεύμα της άλμης από το πρώτο στοιχείο αποτελεί την τροφοδοσία για το επόμενο, και αυτό συμβαίνει για κάθε στοιχείο στο εσωτερικό του σωλήνα. Το ρεύμα της άλμης από το τελευταίο στοιχείο φεύγει από τον σωλήνα πίεσης στα απόβλητα. Το διήθημα του κάθε στοιχείου εισάγεται στον σωλήνα συγκέντρωση διηθήματος και εξέρχεται του συστήματος ως ένα κοινό ρεύμα διηθήματος. Ένα μονό σύστημα πίεση με τέσσερα έως έξι στοιχεία μεμβρανών με σύνδεση σε σειρά μπορούν να λειτουργήσουν υπό κανονικές σχεδιαστικές συνθήκες έως και ποσοστό ανάκτησης 50%.



Εικόνα 105: Διαρρύθμιση Μembrάνης με Λεπτές Ίνες. [1]



Εικόνα 106: Διαρρύθμιση Μembrάνης Με Σπειροειδές Τύλιγμα. [1]

Τα συστήματα αντίστροφης ώσμωσης (RO) μπορούν να αποτελούνται από τα παρακάτω βασικά εξαρτήματα:

- Τη μονάδα παροχής τροφοδοσίας νερού.
- Το σύστημα προεπεξεργασίας.
- Τη μονάδα άντλησης υψηλής πίεσης.
- Τη μονάδα συγκρότησης των στοιχείων μεμβράνης.
- Το σύστημα ελέγχου και το σύστημα αρμονικής λειτουργίας των οργάνων.
- Τη μονάδα αποθήκευσης και τη μονάδα επεξεργασίας της περατότητας.
- Τη μονάδα καθαρισμού.



Στα χαρακτηριστικά της διεργασίας αντίστροφης ώσμωσης (RO) περιλαμβάνονται τα εξής:

- Τα μεγάλα σωματίδια απομακρύνονται από το νερό τροφοδοσίας, κυρίως όταν αυτό αντλείται από πηγάδι, με την χρήση συρμάτων πλεγμάτων.
- Αποτελεί μια κοινή πρακτική η απολύμανση του επιφανειακού νερού τροφοδοσίας, με σκοπό τον έλεγχο της βιολογικής δραστηριότητας. Συνήθως, η βιολογική δραστηριότητα στο νερό του πηγαδιού είναι πολύ χαμηλή και στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, το νερό που προέρχεται από πηγάδι δεν χρειάζεται χλωρίωση. Σε μερικές περιπτώσεις, η χλωρίωση είναι απαραίτητη για την οξείδωση του σιδήρου και του μαγγανίου πριν την διήθηση. Το νερό που προέρχεται από πηγάδι και περιέχει υδρόθειο δεν θα πρέπει να χλωριώνεται ή να εκτίθεται στον αέρα και αυτό γιατί η παρουσία ενός οξειδωτικού στο νερό μπορεί να προκαλέσει ζημιά στα στοιχεία των μεμβρανών.
- Η τοποθέτηση των επιφανειακών υδάτων σε μια δεξαμενή έχει ως αποτέλεσμα την κάποια μείωση των αιωρούμενων σωματιδίων. Η προσθήκη κροκιδωτικών, όπως ο σίδηρος ή άλατα αλουμινίου, οδηγεί στο σχηματισμό των αντίστοιχων υδροξειδίων, τα οποία εξουδετερώνουν τα επιφανειακά κολλοειδή σωματίδια, τα συγκεντρώνουν και τα απορροφούν πλωτά σωματίδια πριν πέσουν στο κάτω μέρος του διυλιστηρίου.
- Το τελευταίο φίλτρο, το οποίο αποτελεί και την τελευταία ασπίδα προστασίας τοποθετείται πριν από την αντλία υψηλής πίεσης, με σκοπό την απομάκρυνση και των τελευταίων σωματιδίων που ίσως υπάρχουν στο νερό.

Όλες οι πληροφορίες του **Κεφαλαίου 2** προήλθαν από την παρακάτω βιβλιογραφία:

[1] Hisham T. El-Dessouky , Hisham M. Ettouney, *Fundamentals Of Salt Water Desalination*, Elsevier 2002.

## 3. Η Αφαλάτωση Με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

### 3.1 Μονάδες Εκμετάλλευσης της Ηλιακής Ενέργειας

Στο πλαίσιο της προστασίας του περιβάλλοντος, μια εναλλακτική εφαρμογή των συστημάτων αφαλάτωσης, όσον αφορά στις ενεργειακές τους καταναλώσεις, είναι ο συνδυασμός τους με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Ο συνδυασμός των δύο τεχνολογιών είναι τεχνικά εφικτός και έχει πλέον αρκετές εφαρμογές παγκοσμίως. Η πλειονότητα των εφαρμογών αυτών αφορά σε μικρές, αυτόνομες πιλοτικές μονάδες που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο εθνικών ή κοινοτικών προγραμμάτων. Μέχρι σήμερα έχουν καταγραφεί παγκοσμίως πάνω από 100 εφαρμογές συνδυασμού των δύο τεχνολογιών για την αφαλάτωση θαλασσινού και υφάλμυρου νερού. Η μέχρι σήμερα έρευνα και λειτουργία πιλοτικών συστημάτων έχουν αποδείξει ότι υπάρχουν τεχνολογίες που είναι αρκετά υποσχόμενες όσον αφορά στη δυνατότητα κάλυψης μιας κυρίως απομακρυσμένης περιοχής χωρίς εύκολη πρόσβαση σε ηλεκτρισμό, με νερό καλή ποιότητας σε κόστος συγκρίσιμο ή χαμηλότερο σε ορισμένες περιπτώσεις από άλλες πηγές νερού.

Οι περισσότερες από τις υπάρχουσες εφαρμογές συνδυάζουν την τεχνολογία αφαλάτωσης με την ηλιακή και την αιολική ενέργεια ενώ λιγότερες αναφέρονται για την εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας. Στο παρών κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με την έρευνα των συστημάτων χρήσης της ηλιακής ενέργειας.

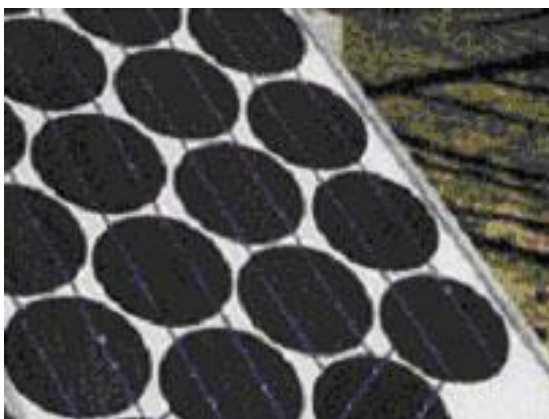
Γενικότερα, η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε άμεσα μέσω της θέρμανσης και της εξάτμισης του θαλασσινού ή του υφάλμυρου νερού στους ηλιακούς αποστακτήρες, είτε έμμεσα συλλαμβάνοντας την ηλιακή ενέργεια με κάποια από τις τεχνικές που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμική ή ηλεκτρική ενέργεια για την κίνηση μιας συμβατικής μεθόδου αφαλάτωσης. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην έμμεση εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και οι ηλιακές θερμικές μονάδες. Παρακάτω ακολουθεί σύντομη ανάλυση της λειτουργία των μονάδων αυτών:

#### ➔ Φωτοβολταϊκά Στοιχεία (*Photovoltaic Cells*)

Οι ηλιακές κυψέλες, κοινώς τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, είναι «συσκευές» που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια άμεσα σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Κατά το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το ηλιακό φως που «πέφτει» σε έναν ημιαγωγό δυο στρωμάτων δημιουργεί ηλεκτρικό δυναμικό μεταξύ τους. Η τάση αυτή μπορεί να ενεργοποιήσει μια, ανάλογης τάσης και ισχύς, συσκευή ή να διανεμηθεί στο ηλεκτρικό σύστημα. [11]

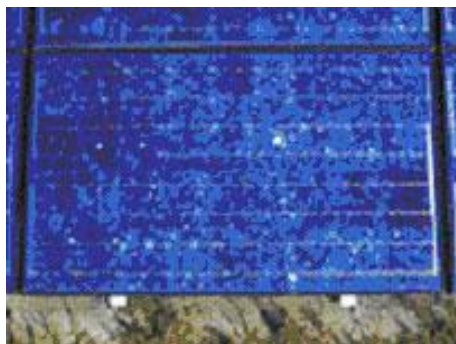
Αν και οι ηλιακές κυψέλες είναι διαθέσιμες από τα μέσα της δεκαετίας του '50, η επιστημονική έρευνα για τη φωτοβολταϊκό φαινόμενο άρχισε το 1839 και το υλικό στο οποίο παρατηρήθηκε η επίδραση ήταν το σελήνιο. Μερικά χρόνια αργότερα, οι ηλιακές κυψέλες έγιναν πιο αποδοτικές με την χρήση του πυριτίου και άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε πιο εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως οι διαστημικοί δορυφόροι. Τα σημερινά εμπορικά διαθέσιμα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν αποδοτικότητες μετατροπής της ενέργειας του ήλιου που πέφτει πάνω τους από 5% έως 25% ανάλογα με τον τύπο, μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό και άμορφου πυριτίου. [11]

Αναλυτικά, οι μονοκρυσταλλικές κυψέλες (m-Si) κατασκευάζονται τεμαχίζοντας έναν ενιαίο κρύσταλλο, (πάχος κυψέλης 1/3 έως 1/2 του χιλιοστού), από ένα μεγάλο πλίνθωμα ενιαίου κρυστάλλου που έχει επεξεργαστεί σε θερμοκρασίες περίπου 1400°C, κάτι που είναι μια πολύ ακριβή διαδικασία. Το πυρίτιο πρέπει να είναι πολύ υψηλής καθαρότητας και να έχει τέλεια δομή κρυστάλλου. Αυτού του είδους τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν και την μεγαλύτερη απόδοση, δηλαδή μετατρέπουν μεγαλύτερο ποσοστό της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό. Η απόδοση τους κυμαίνεται γύρω στο 18%-23%, δηλαδή αν η ηλιακή ακτινοβολία είναι 700 Wh/μ<sup>2</sup> την ημέρα τότε αυτά θα παράγουν για την συγκεκριμένη μέρα 120 Wh/μ<sup>2</sup> με 160 Wh/μ<sup>2</sup>. [11]



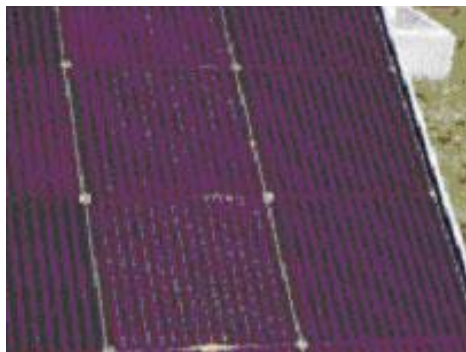
**Εικόνα 107:** Μονοκρυσταλλικές Κυψέλες. [11]

Οι πολυκρυσταλλικές κυψέλες (p-Si) γίνονται με μια διαδικασία χύτευσης στην οποία το λειωμένο βιομηχανικό πυρίτιο χύνεται σε μια φόρμα όπου και μορφοποιείται. Κατόπιν τεμαχίζεται στις γκοφρέτες. Δεδομένου ότι οι πολυκρυσταλλικές κυψέλες γίνονται από χύτευση είναι σημαντικά φτηνότερη η παραγωγή τους, αλλά όχι τόσο αποδοτικές όσο και οι μονοκρυσταλλικές. Αυτή η χαμηλότερη αποδοτικότητα, που κυμαίνεται μεταξύ 13% και 15%, οφείλεται στις ατέλειες στη δομή του κρυστάλλου ως αποτέλεσμα της διαδικασίας χύτευσης. [11]



**Εικόνα 108:** Πολυκρυσταλλικές Κυψέλες. [11]

Το άμορφο πυρίτιο, το οποίο αποτελεί μια από τις τεχνολογίες λεπτής μεμβράνης (thin film technology) , γίνεται με την εναπόθεση του πυριτίου επάνω σε ένα υπόστρωμα γυαλιού από ένα αντιδραστικό αέριο όπως το σιλάνιο ( $\text{SiH}_4$ ). Δεν έχει κρυσταλλική δομή, και το πάχος του (2-3  $\mu\text{m}$ ) είναι ιδιαίτερα μικρότερο από το κρυσταλλικής μορφής πυρίτιο (200-500  $\mu\text{m}$ ). Από κατασκευαστική άποψη είναι το απλούστερο και επομένως το πιο φθηνό, αλλά η απόδοσή του είναι συγκριτικά μικρότερη. Παρόλα αυτά, είναι ικανοποιητική ακόμη και σε συνθήκες έλλειψης ηλιοφάνειας. Τα ηλιακά στοιχεία άμορφου πυριτίου έχουν μια κοκκινωπή-καφέ απόχρωση, σχεδόν μαύρη, και επιφάνεια αποτελούμενη από στενές, μεγάλου μήκους λωρίδες. Η αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών άμορφου πυριτίου κυμαίνεται μεταξύ 4% και 11%, ανάλογα με την τεχνολογία και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν. [11]

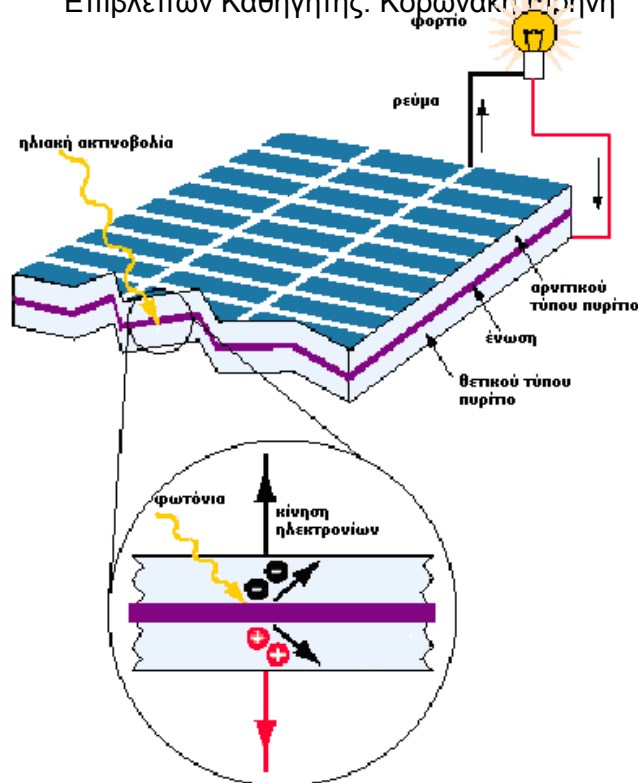


**Εικόνα 109:** Κυψέλες Άμορφου Πυριτίου. [11]

Εκτός από τους παραπάνω τρεις τύπους φωτοβολταϊκών κυψελών από πυρίτιο που διατίθενται στην παγκόσμια αγορά, γίνονται έρευνες και προσπάθειες για τη χρησιμοποίηση και άλλων στοιχείων (είτε μόνα τους ή σε συνδυασμό) όπως αρσενικούχο γάλλιο ( $\text{GaAs}$ ),θειούχο κάδμιο ( $\text{CdS}$ ), φωσφορούχο ίνδιο ( $\text{InP}$ ). Επίσης μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πολύ λεπτής μεμβράνης από χαλκό-ίνδιο-γάλλιο-diselenide, που έχουν μεγαλύτερη απόδοση (8-13%) από αυτή του άμορφου πυριτίου. Τέλος, μια τελείως νέα τεχνολογία αποτελεί το πρωτοποριακό προϊόν spherical solar, που βασίζεται σε υλικό που άρχισε να κατασκευάζεται από το 2004. Αντίθετα με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά κύτταρα, το νέο υλικό δεν επικάθεται σε άκαμπτη βάση πυριτίου, αλλά είναι φτιαγμένο από χιλιάδες πάμφθυνα σφαιρίδια πυριτίου (κατασκευάζονται από

υπολείμματα πυριτίου που προκύπτουν από τη βιομηχανία των chips των ηλεκτρονικών υπολογιστών), εγκλωβισμένα ανάμεσα σε δύο φύλλα αλουμινίου. Κάθε σφαιρίδιο έχει την δυνατότητα να λειτουργεί ως ανεξάρτητο μικροσκοπικό φωτοβολταϊκό κύτταρο, απορροφώντας την ηλιακή ακτινοβολία και μετατρέποντάς την σε ηλεκτρισμό. Τα φύλλα αλουμινίου προσδίδουν στο υλικό τη φυσική αντοχή που χρειάζεται, του επιτρέπουν να είναι εύκαμπτο αλλά και ελαφρύ, ενώ ταυτόχρονα παίζουν το ρόλο ηλεκτρικής επαφής. Η γεμάτη φυσαλίδες επιφάνεια που δημιουργούν τα σφαιρίδια επιτρέπει πολύ μεγαλύτερη απορρόφηση ηλιακού φωτός, χαρίζοντας στο υλικό αποδοτικότητα της τάξης του 11%. [11]

Η λειτουργία των ηλιακών κυψέλων στηρίζεται στην δυνατότητα απορρόφησης των φωτονίων, μέρη των μορίων του φωτός που περιέχουν ενέργεια, από τα φωτοβολταϊκά κύτταρα. Από την απορρόφηση ενός φωτονίου ένα ηλεκτρόνιο (αρνητικό φορτίο) απωθείται από ένα άτομο πυριτίου. Αυτό συμβαίνει όταν η ενέργεια του φωτονίου είναι τουλάχιστον ίση ή ξεπερνάει το ενεργειακό κενό του ημιαγωγού (χαρακτηριστική ιδιότητα κάθε υλικού) οπότε και απορροφάται από τα ηλεκτρόνια σθένους. Η ενέργεια που αποκτούν τους δίνει τη δυνατότητα να μεταπηδούν στη περιοχή αγωγιμότητας αφήνοντας πίσω μια θετικά φορτισμένη οπή, δημιουργώντας μια διαφορά δυναμικού. Το ελευθερωμένο ηλεκτρόνιο και το θετικό φορτίο έχουν την τάση να αλληλοεξουδετερωθούν μεταξύ τους. Χρησιμοποιώντας όμως μια δίοδο επιτρέπεται η ροή ηλεκτρονίων μόνο προς τη μία κατεύθυνση (από το θετικό προς το αρνητικό φορτίο), οπότε δεν μπορούν να εξουδετερωθούν παρά μόνο εάν κλείσει το κύκλωμα. Όταν όμως, οι ηλεκτρικές επαφές στο μπροστινό και οπίσθιο τμήμα του κύτταρου συνδέονται μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος, τα ελευθερωμένα ηλεκτρόνια κατευθύνονται στο θετικά φορτισμένο πυρίτιο, παράγοντας κατά συνέπεια το ρεύμα. [11]

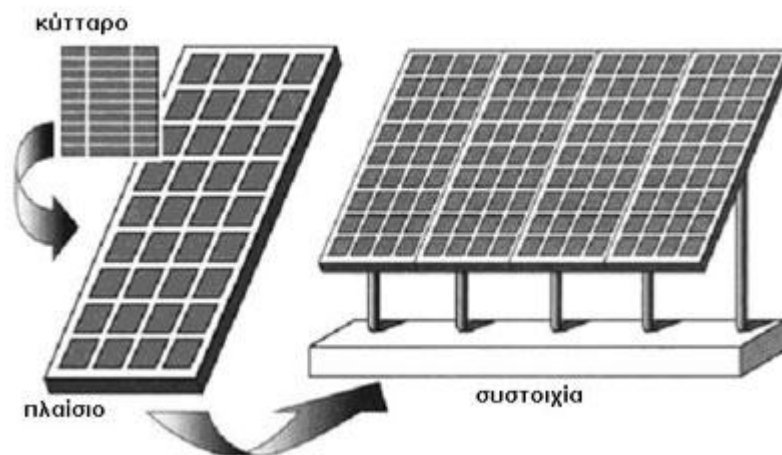


**Εικόνα 110:** Σχηματική Απεικόνιση Λειτουργίας Ηλιακών Κυψελών. [11]

Συνδυασμός των φωτοβολταϊκών κυττάρων δημιουργεί τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, τα οποία συνδέονται εν σειρά ή παράλληλα ανάλογα με την εφαρμογή που τα προορίζει ο κατασκευαστής τους. Καλύπτονται από το μπροστινό μέρος με γυαλί ή πλαστικό τύπου Tedlar ενώ το πίσω μέρος στεγανώνεται συνήθως με ένα πολυμερές υλικό, το EVA (Αιθυλένιο, βινύλιο και άλας οξικού οξέος). Οι κατασκευές αυτές πλαισιώνονται από προφίλ αλουμινίου για περιμετρική στεγανοποίηση και ευκολία στην τοποθέτηση. Αυτή η διαδικασία συμβαίνει στα πολυ-κρυσταλλικά και μονο-κρυσταλλικά Φ/Β πλαίσια. Στα πλαίσια άμορφου πυριτίου το υλικό της σιλικόνης εναποτίθεται κατά τη διάρκεια παραγωγής του επάνω στο γυαλί μειώνοντας αισθητά το κόστος κατασκευής του πλαισίου. Η στεγάνωση του πλαισίου γίνεται επίσης με τη χρήση EVA, όμως επειδή το υλικό που εναποτίθεται είναι πολύ πιο λεπτό (0.5μm αντί 350μm) από τα κρυσταλλικά κύτταρα δεν είναι απαραίτητο το αλουμινένιο πλαίσιο καθώς επιτυγχάνεται επαρκής στεγανότητα με την κάλυψη του EVA. [11]

Να σημειωθεί ότι η αποδοτικότητα του φωτοβολταϊκού πλαισίου, ιδιαίτερα των κρυσταλλικών τύπων, δεν είναι η ίδια με τα κύτταρα που χρησιμοποιούνε καθώς σημαντικό μέρος της επιφάνειας του πλαισίου μένει ανεκμετάλλετο λόγω του σχήματος των κύτταρων και του χώρου που χρειάζεται για τη συνδεσμολογία μεταξύ τους. Στα πλαίσια άμορφου πυριτίου όμως επειδή η εναπόθεση του υλικού καλύπτει όλη την επιφάνεια του γυαλιού, αυτό το μειονέκτημα ελαχιστοποιείται. [11]

Τέλος, πολλά Φ/Β πλαίσια σχηματίζουν τις Φ/Β συστοιχίες. Στις συστοιχίες ο εγκαταστάτης μπορεί να ενώσει τα πλαίσια σε σειρά ή παράλληλα ανάλογα την τάση και την ένταση του ρεύματος που επιθυμεί για το σύστημα του. [11]



**Εικόνα 111:** Φωτοβολταϊκά Πλαίσια και Φωτοβολταϊκές Συστοιχίες. [11]

Η καθημερινή ενεργειακή παραγωγή από φωτοβολταϊκά συστήματα ποικίλει ανάλογα με τον προσανατολισμό, τη θέση, τον καιρό και την εποχή. Η βέλτιστη θέση του φωτοβολταϊκού ως προς την ετήσια παραγωγή του είναι μια κλίση, ως προς το οριζόντιο επίπεδο, ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής και προσανατολισμό απολύτως νότιο (για την Ελλάδα που βρίσκεται στο Βόριο ημισφαίριο). Για έμφαση στην καλοκαιρινή περίοδο η κλίση πρέπει να είναι κατά 15 μοίρες μικρότερη ενώ για έμφαση στη χειμερινή περίοδο 15 μοίρες μεγαλύτερη. Οι συστοιχίες Φ/Β συνήθως τοποθετούνται σε σταθερές βάσεις. Αν όμως θέλουμε να μεγιστοποιήσουμε την απόδοση του Φ/Β συστήματος μας τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ειδικές βάσεις που ακολουθούν τον ήλιο μεταβάλλοντας συνεχώς την κλίση του συστήματος στη βέλτιστη γωνία ως προς τον ήλιο. Οι μεταβολές μπορούν να γίνουν σε δυο αλλά και σε τρεις άξονες. [11]

#### ➤ Ηλιακά Θερμικά Συστήματα (*Solar Thermal*)

Τα ηλιακά θερμικά συστήματα εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια με σκοπό την παραγωγή θερμότητας, η οποία συνήθως χρησιμοποιείται για την θέρμανση νερού. Η βασική αρχή λειτουργίας των ηλιακών θερμικών συστημάτων στηρίζεται στη χρήση ενός συλλέκτη. Καθώς η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του ήλιου διαπερνά τον συλλέκτη, παγιδεύεται στο εσωτερικό του και απορροφάται από την επιφάνειά που βρίσκεται μέσα στον συλλέκτη, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας αυτής. Αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την θέρμανση ή την αφαλάτωση νερού, την ξήρανση τροφών και για μαγείρεμα. [11]

Πολλές φορές τα θερμικά ηλιακά συστήματα αναφέρονται και ως ενεργητικά ηλιακά συστήματα, καθώς αποτελούνται από επιμέρους λειτουργικά τμήματα και μπορούν να συμπεριλάβουν αντλίες ή ανεμιστήρες. Γενικότερα, κάθε σύστημα μετατροπής και αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας περιλαμβάνει και κάποια υποσυστήματα, όπως το σύστημα συλλογής και μετατροπής και το σύστημα αποθήκευσης γιατί δεν έχουμε συνεχόμενη παροχή ηλιακής ενέργειας καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας, έτσι πρέπει να αποθηκεύουμε ότι συλλέγεται για να χρησιμοποιηθεί λίγο αργότερα. Ακόμα διαθέτουν σύστημα ελέγχου του όλου συστήματος και της καλής λειτουργίας και αυτό πρέπει να συνυπολογίζεται στο συνολικό σύστημα και στο κόστος του και τέλος ένα σύστημα μεταφοράς και χρήσης ενέργειας. [11]

Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται στις διεργασίες αφαλάτωσης για την εκμετάλλευση της θερμικής ενέργειας είναι οι ηλιακοί συλλέκτες και διακρίνονται σε στατικούς συλλέκτες και συλλέκτες εντοπισμού του ηλίου, οι οποίοι μπορούν να έχουν έναν ή δυο άξονες παρακολούθησης του ηλίου. Οι τύποι των συλλεκτών που χρησιμοποιούνται κυρίως στις μέρες μας και είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο είναι οι ηλιακές λίμνες με κλίμακα αλατότητας, οι επίπεδοι συλλέκτες, οι ηλιακοί συλλέκτες κενού και οι παραβολικοί συλλέκτες. [11]

Αναλυτικότερα, η ηλιακή δεξαμενή με κλίμακα αλατότητας είναι μια αβαθής λίμνη με μια κάθετη κλίμακα αλατότητας, όπως παρουσιάζεται και στην **Εικόνα 112**, έτσι ώστε το πυκνότερο και με μεγαλύτερη συγκέντρωση άλατος νερό να παραμένει στον πυθμένα της λίμνης και να μην αναμιγνύεται με το γλυκό νερό του ανωτάτου επιπέδου. Ως αποτέλεσμα, τα χαμηλότερα επίπεδα υψηλότερης συγκέντρωσης άλατος είναι και αυτά με τις υψηλότερες θερμοκρασίες, ενδεικτικά 70-85° C. Η θερμότητα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρισμού, με την χρήση επιπρόσθετης θερμότητας από κάποια συμβατική πηγή, για την παροχή ενέργειας σε διεργασίες αφαλάτωσης, όπως επίσης και για την παροχή θερμότητας με σκοπό την θέρμανση κτιρίων. Η ηλιακή δεξαμενή αποτελεί έναν τύπο ηλιακού συλλέκτη που διαθέτει το δικό του σύστημα αποθήκευσης. Η αρχή λειτουργίας της είναι η συλλογή ενέργειας μέσω της απευθείας απορρόφησης αλλά και διάχυσης του ηλιακού φωτός. Αποτελείται από τρία επίπεδα νερού διαφορετικής συγκέντρωσης αλατότητας. Ηλιακές δεξαμενές με κλίμακα αλατότητας, έχουν υψηλή συγκέντρωση άλατος κοντά στον πυθμένα, ένα μέσο επίπεδο μη συναγωγής και μέσης συγκέντρωσης και ένα επιφανειακό συναγωγίμο επίπεδο με χαμηλή συγκέντρωση άλατος. Η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια της δεξαμενής και εγκλωβίζεται στον πυθμένα της, όπου βρίσκεται η υψηλότερη συγκέντρωση άλατος. Το υψηλής αλατότητας νερό, θερμαίνεται εξαιτίας της απορρόφησης της ηλιακής ενέργειας στον πυθμένα της δεξαμενής αλλά δεν μπορεί να ανέλθει σε υψηλότερα επίπεδα της δεξαμενής λόγω της υψηλής του πυκνότητας. Έτσι, απλά παραμένει στον πυθμένα της όπου θερμαίνεται μέχρι να αρχίζει σχεδόν να βράζει, ενώ την ίδια στιγμή τα δυο παραπάνω στρώματα νερού παραμένουν σε σχετική ηρεμία. Το τελευταίο

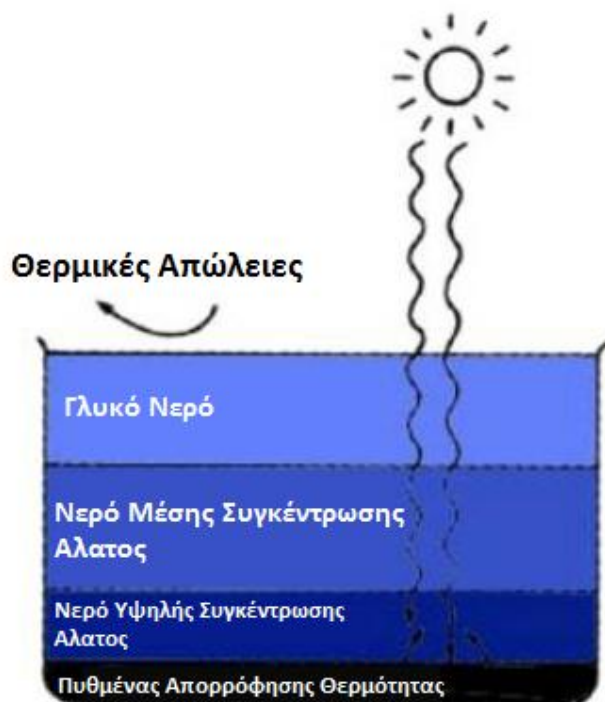


επίπεδο που βρίσκεται στον πυθμένα της δεξαμενής καλείται και ως ζώνη αποθήκευσης, είναι πολύ πυκνό και μπορεί να θερμανθεί έως και 100° C. Η θερμότητα αυτή άλμη μπορεί έπειτα να χρησιμοποιηθεί ως πηγή θερμότητας, τόσο κατά την διάρκεια της ημέρας όσο και της νύκτας, από την οποία μια ειδική τουρμπίνα οργανικών υγρών θα παράξει ηλεκτρισμό. Το επίπεδο μεσαίας αλατότητας λειτουργεί ως μόνωση στην δεξαμενή, αποτρέποντας συναγωγή και απώλεια θερμότητας προς την επιφάνεια. Θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ του επιπέδου του πυθμένα και της επιφάνειας στην δεξαμενή είναι ικανές να τροφοδοτήσουν μια γεννήτρια. Ένα υγρό μεταφοράς από το κατώτερο επίπεδο μεταφέρει την θερμότητα σε διεργασίες για άμεση εφαρμογή στην τελική χρήση. Η θερμότητα αυτή μπορεί επίσης να τροφοδοτεί και μια γεννήτρια και έτσι να παράγεται ηλεκτρισμός. [26]

Η ετήσια αποτελεσματικότητα συλλογής χρήσιμης ενέργειας για αφαλάτωση ανέρχεται στο 10-15%. Ωστόσο, το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των ηλιακών λιμνών είναι η δυνατότητα που προσφέρουν για αύξηση του βάθους τους από 1,5 m έως και 6,5 m. Έτσι, αυξάνουν την χωρητικότητα της λίμνης σε θερμότητα, η οποία υποδεικνύεται πολύτιμη κυρίως τις βραδινές ώρες, τις ημέρες που έχει συννεφιά καθώς και κατά την διάρκεια λειτουργίας τους χειμερινούς μήνες. Επιπλέον, μεγαλύτερες δεξαμενές αποδεικνύονται πιο αποδοτικές σε σχέση με τις μικρότερες εξαιτίας των απωλειών στην άκρη της λίμνης. [26]

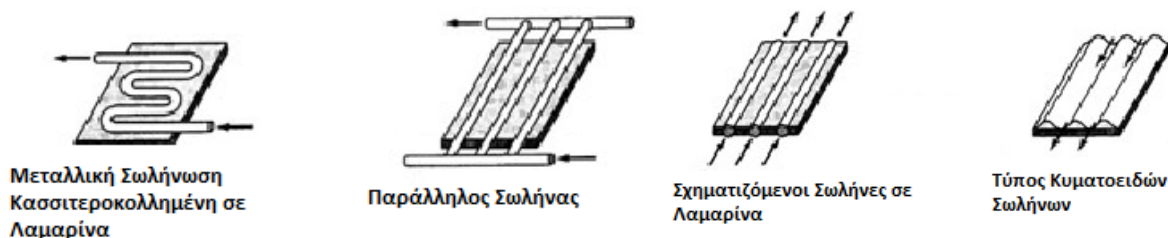
Τα κύρια μειονεκτήματα που παρατηρούνται κατά την λειτουργία των ηλιακών λιμνών είναι η έλλειψη διαφάνειας λόγω σωματιδίων, αλάτων ή ιζημάτων τα οποία δεν κατακάθονται στον πάτο της δεξαμενής καθώς και η αναταραχή των επιπέδων αλατότητας μεταξύ των στρωμάτων εξαιτίας κυμάτων, που δημιουργούνται από τον άνεμο. Σήμερα, και για τα δυο παραπάνω προβλήματα έχουν βρεθεί λύσεις, μέσω της προσθήκης χημικών αλλά και της τοποθέτησης ενός ειδικού διχτιού στην επιφάνεια της λίμνης, αντίστοιχα. Μερικά από τα προβλήματα που παρατηρούνται είναι η έλλειψη άλατος λόγω διάχυσης, η έλλειψη νερού λόγω της εξάτμισης και τέλος οι απώλειες θερμότητας λόγω διαρροής στο έδαφος. Τα παραπάνω αντιμετωπίζονται με κατάλληλη μόνωση και επιπλέον παραγωγή άλατος και νερού. [26]

Οι ηλιακές λίμνες παράγουν ηλιακή ενέργεια χαμηλής θερμοκρασίας, χαμηλότερη από 100° C, και για τον λόγο αυτό θεωρούνται κατάλληλες για την άμεση παροχή ενέργεια στις διεργασίες αφαλάτωσης. Ωστόσο, λόγω της δυνατότητάς τους να αποθηκεύουν ενέργεια, οι ηλιακές λίμνες μπορούν να παράγουν ηλεκτρισμό. Οι ηλιακές λίμνες είναι κατάλληλες για τον συνδυασμό τους με μεθόδους αφαλάτωσης, καθώς η απορριπτόμενη άλμη της διεργασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πηγή άλατος για τα διάφορα επίπεδα συγκέντρωσης αλατότητας. Έτσι, χρησιμοποιώντας την απορριπτόμενη άλμη στις ηλιακές λίμνες δεν παρέχεται μόνο μια εναλλακτική λύση στην περιβαλλοντική διάθεση αλλά και μια οικονομική και βολική πηγή αλατότητας για την δεξαμενή. [26]



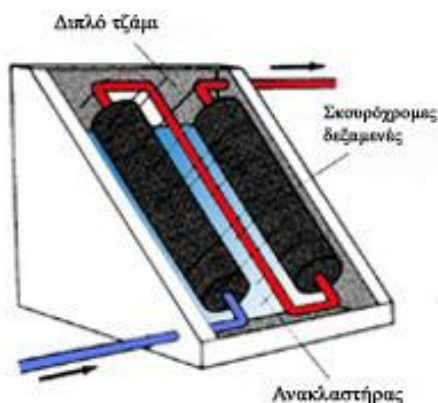
**Εικόνα 112:** Ηλιακή Λίμνη με Κλίμακα Αλατότητας. [12]

Ο πιο διαδεδομένος τύπος συλλέκτη είναι αυτός του επίπεδου συλλέκτη. Αποτελείται από απορροφητικές πλάκες, οι οποίες περιέχουν αγωγούς από τους οποίους διέρχεται το προς θέρμανση ρευστό. Η απορροφητική πλάκα περιέχεται σε ένα αεροστεγές και αδιάβροχο πλαίσιο, το οποίο είναι καλυμμένο από την πλευρά του ηλίου με γυαλί ή διαφανές ανθεκτικό πλαστικό και από την άλλη με θερμομονωτικό υλικό. Η απορροφητική πλάκα για να απορροφά το μέγιστο της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας είναι μαύρη και ματ και τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της προκύπτουν από ποικίλες τεχνικές (ηλεκτροχημικές κ.α.) προκειμένου να αυξηθεί η απορροφητικότητα της πλάκας. Τέλος, το σύστημα αγωγών νερού βρίσκεται μεταξύ του εξωτερικού πλαισίου και της εξωτερικής επιφάνειας σε ποικιλία σχημάτων όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, **Εικόνα 113**. [11]



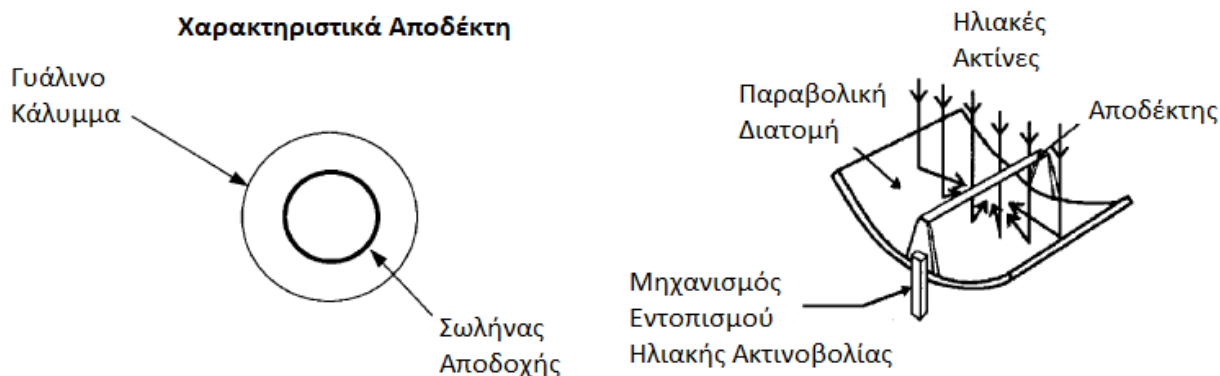
**Εικόνα 113:** Τύποι Επίπεδων Ηλιακών Συλλεκτών. [11]

Ένας ακόμα τύπος συλλέκτη είναι αυτός με σωλήνες κενού και παρουσιάζεται στην **Εικόνα 114**. Έχει την ίδια αρχή λειτουργίας με τους επίπεδους συλλέκτες, αλλά η απορροφητική επιφάνεια στην περίπτωση αυτή είναι ένα κυλινδρικό μαύρο γυαλί τοποθετημένο στο εσωτερικό άλλου προστατευτικού γυαλιού. Μεταξύ τους δημιουργείται κενό για την εξάλειψη των απωλειών αγωγιμότητας και συναγωγής. Οι συλλέκτες σωλήνων κενού απαιτούν πιο σύγχρονες εγκαταστάσεις σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες. Με αυτούς τους τύπους συλλεκτών μπορούν να επιτευχθούν υψηλότερες θερμοκρασίες, έως και 200° C, και άρα υψηλότερες αποδόσεις. [11]



**Εικόνα 114:** Ηλιακός Συλλέκτης Κενού . [11]

Το τελευταίο από τα είδη των ηλιακών συλλεκτών είναι ο παραβολικός συλλέκτης. Ο τύπος αυτός είναι ένας γραμμικός συλλέκτης με μια παραβολική διατομή, όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 115**. Η ανακλαστική επιφάνειά του συγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία στον σωλήνα αποδοχής που βρίσκεται κατά μήκος του σημείου συγκέντρωσης, θερμαίνοντας έτσι το υγρό μεταφοράς θερμότητας που ρέει εντός του. Οι παραβολικοί συλλέκτες έχουν τυπικούς βαθμούς συγκέντρωσης που κυμαίνονται από 10 έως 100 και θερμοκρασίες λειτουργίας 100-400° C. Αυτού του τύπου οι συλλέκτες απαιτούν έναν άξονα παρακολούθησης του ήλιου. Για τον λόγο αυτό μπορούν και επιτυγχάνουν πολύ πιο υψηλές θερμοκρασίες σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες και του συλλέκτες σωλήνων κενού. Τα συστήματα αυτά συνήθως περιλαμβάνουν ένα μηχανικό σύστημα ελέγχου που τα διατηρεί κατά τη φορά του ηλίου καθ' όλη τη διάρκεια της μέρας. Χρησιμοποιούνται σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές καθώς μπορούν να παρέχουν ζεστό νερό και ατμό. [11]



**Εικόνα 115:** Σχηματική Απεικόνιση Παραβολικού Συλλέκτη. [3]

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου ηλιακού συλλέκτη εξαρτάται κυρίως από τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες, τις απαιτήσεις αλλά και τις δυνατότητες επιλογής που προσφέρει το σύστημα για το οποίο προορίζονται. Ωστόσο, αξίζει να αναφερθούν τα παρακάτω γενικά χαρακτηριστικά [4]:

- Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες είναι κατάλληλοι για συστήματα χαμηλών θερμοκρασιών και για περιοχές με πολλές ηλιόλουστες μέρες. Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες με επιλεκτική επιφάνεια δίνουν, με κάποιο κόστος πάντα, μεγαλύτερη διάρκεια λειτουργίας και υψηλότερη αποδοτικότητα.
- Οι ηλιακοί συλλέκτες κενού εξασφαλίζουν κάποια εισαγωγή ενέργειας ακόμα και τις συννεφιασμένες μέρες. Αυτή η απόδοση για υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας και χαμηλή μόνωση είναι σημαντικά καλύτερη σε σχέση με αυτή των επίπεδων συλλεκτών και για τον λόγο αυτό δίνουν μεγαλύτερο αριθμό ωρών λειτουργίας.

Οι ηλιακοί παραβολικοί συλλέκτες απαιτούν μηχανισμό διπλού άξονα και μεγάλης ακρίβειας για τον εντοπισμό της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά μπορούν και παράγουν πολύ υψηλές θερμοκρασίες, περισσότερο από 120° C. Ενδεικτικά, για την ηλιακή αφαλάτωση η θερμοκρασία αυτή είναι υψηλότερη από την απαιτούμενη. [4]

## 3.2 Μέθοδοι Αφαλάτωσης με Χρήση Ηλιακής Ενέργειας

Όπως ήδη γνωρίζουμε, για τις συμβατικές μεθόδους αφαλάτωσης διακρίθηκαν δυο κύριες κατηγορίες: οι θερμικές διεργασίες και οι διεργασίες με χρήση μεμβρανών. Ένας αντίστοιχος διαχωρισμός μπορεί να γίνει και στις μεθόδους ηλιακής αφαλάτωσης. Έτσι, υπάρχουν τα συστήματα έμμεσης και άμεσης συλλογής. Όπως υποδηλώνουν και τα ονόματα των δυο κατηγοριών, τα συστήματα άμεσης συλλογής χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για να παράγουν απόσταγμα απευθείας στον ηλιακό συλλέκτη. Από την άλλη πλευρά, τα συστήματα έμμεσης συλλογής χρησιμοποιούν δυο υπομονάδες, μια για την συλλογή της ηλιακής ενέργειας και μια για την αφαλάτωση, με σκοπό την παραγωγή πόσιμου νερού. [5]

### 3.2.1 Ηλιακή Αντίστροφη Ώσμωση (Solar Reverse Osmosis)

Η ανάγκη εγκατάστασης μονάδων αφαλάτωσης σε απομακρυσμένες περιοχές χωρίς δυνατότητα πρόσβασης σε ηλεκτρισμό καθιστά μονόδρομο την επιλογή υβριδικών συστημάτων που κάνουν χρήση της ηλιακής ενέργειας. Όπως είδαμε και στο **Κεφάλαιο 2**, η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης αποτελεί μια από τις ευρέως χρησιμοποιούμενες διεργασίες αφαλάτωσης. Η υψηλή ωριμότητα και η αξιοπιστία και των δύο τεχνολογιών καθώς και η ελάχιστη απαιτούμενη συντήρησή τους, καθιστά την χρήση συστημάτων ηλιακής αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση (RO) τον πρώτο σε προτίμηση συνδυασμό.

Επιπλέον, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και κυρίως η άφθονη ηλιακή ενέργεια, μπορεί να επιλύσει προβλήματα σχετικά με την χρήση της περιορισμένης ποσότητας των στερεών καυσίμων. Η αντίστροφη ώσμωση (RO) μπορεί να συνδυαστεί και με τους δυο τρόπους έμμεσης εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας, δηλαδή τόσο με τα φωτοβολταϊκά στοιχεία όσο και με τα θερμικά ηλιακά συστήματα.

#### 3.2.1.a Αντίστροφη Ώσμωση με Φωτοβολταϊκά Στοιχεία (Reverse Osmosis with Photovoltaic Cells)

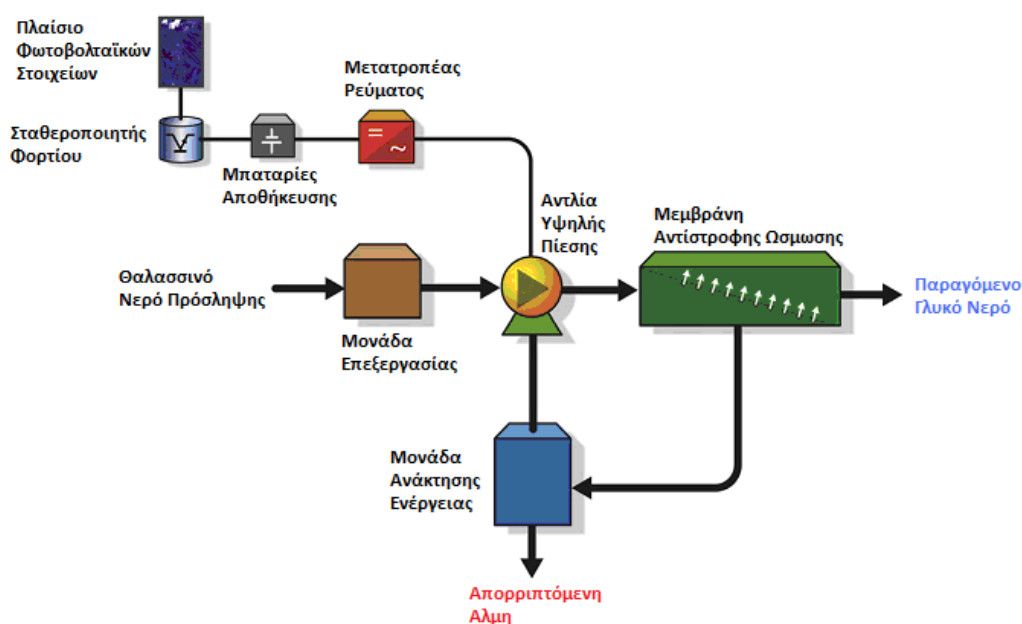
Η τροφοδότηση μονάδων αντίστροφης ώσμωσης από φωτοβολταϊκά στοιχεία (RO-PV) αποτελεί μια από τις πιο υποσχόμενες μορφές αφαλάτωσης με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ειδικά όταν χρησιμοποιείται σε απομακρυσμένες περιοχές. Έτσι, τα τελευταία χρόνια αυτού του τύπου τα συνδυασμένα συστήματα έχουν συγκεντρώσει την προσοχή μας και έχουν λάβει μεγάλη προβολή. Υπάρχουν δυο τύποι τέτοιων συστημάτων διαθέσιμα στην αγορά, αυτά που λειτουργούν με υφάλμυρο νερό και αυτά που λειτουργούν με θαλασσινό νερό. Διαφορετικά είδη μεμβρανών χρησιμοποιούνται για την αφαλάτωση υφάλμυρου νερού και είναι εφικτοί αρκετά

υψηλότεροι βαθμοί ανάκτησης, με αποτέλεσμα η ανάκτηση ενέργειας να είναι λιγότερο κρίσιμη. [6]

➔ Αντίστροφη Ώσμωση (RO) Υφάλμυρου Νερού με Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

Το υφάλμυρο νερό έχει πολύ χαμηλότερη ωσμωτική πίεση σε σχέση με το θαλασσινό νερό, έτσι η αφαλάτωση του απαιτεί πολύ λιγότερη ενέργεια και αρκετά μικρότερη διάταξη φωτοβολταϊκών στοιχείων. Επίσης, οι χαμηλές πιέσεις που συναντάμε σε αυτό τον τύπο συστήματος επιτρέπουν τη χρήση πλαστικών εξαρτημάτων χαμηλού κόστους. Έτσι, το συνολικό κόστος του παραγόμενου νερού από αυτού του είδους τα συστήματα είναι αρκετά μικρότερο σε σχέση με του ίδιου τύπου συστήματα που αφαλατώνουν θαλασσινό νερό. [6]

Το σύστημα αποτελείται από δυο κύριες υπομονάδες- την υπομονάδα παραγωγής ενέργειας και την υπομονάδα αφαλάτωσης, όπως παρουσιάζεται στην σχηματική απεικόνιση της **Εικόνας 116**. Ο τομέας στην υπομονάδα αφαλάτωσης όπου βρίσκεται η μεμβράνη διαχωρισμού τροφοδοτείται δια μέσου μιας παλινδρομικής αντλίας υψηλής πίεσης, στην οποία συμπιέζεται το ρεύμα τροφοδοσίας έως τα επιθυμητά επίπεδα πίεσης, και η οποία είναι κατάλληλα συνδεδεμένη με την υπομονάδα παραγωγής ενέργειας για την ανάκτηση ενέργειας από το ρεύμα της άλμης που αφήνει την διεργασία. Το ρεύμα διηθήματος που αφήνει την μεμβράνη αποτελεί το καθαρό προϊόν του συστήματος. Η αντλία υψηλής πίεσης λειτουργεί μέσω ενός τριφασικού μοτέρ το οποίο τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια από την υπομονάδα παραγωγής ενέργειας. Η υπομονάδα παραγωγής ενέργειας αποτελείται από ενότητες φωτοβολταϊκών, συσσωρευτές αποθήκευσης, ελεγκτή φορτίου μπαταρίας και έναν αντιστροφέα συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (DC / AC). [6]



**Εικόνα 116:** Αντίστροφη Ώσμωση (RO) Υφάλμυρου Νερού με Φωτοβολταϊκά Στοιχεία. [6]

Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια (DC) και μεταφέρεται στον ελεγκτή φορτίου μπαταρίας, ο οποίος προστατεύει τις μπαταρίες από υπερφόρτωση ή υπερβολικές απώλειες. Η αποθηκευμένη στις μπαταρίες ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν εφεδρική ηλεκτρική ενέργεια κατά τις περιόδους χαμηλής ηλιακής έκθεσης, για παράδειγμα κατά την διάρκεια συννεφιάς ή κατά τη νύχτα. Όσο το σύστημα αφαλάτωσης χρειάζεται εναλλασσόμενο ρεύμα για την λειτουργία των αντλιών του είναι απαραίτητη η ύπαρξη του αντιστροφέα. [6]

Πολλά από τα πρώιμα συστήματα αντίστροφης ώσμωσης υφάλμυρου νερού με φωτοβολταϊκά στοιχεία ήταν ουσιαστικά συμβατικά συστήματα αντίστροφης ώσμωσης που θα μπορούσαν να είχαν σχεδιαστεί για να λειτουργούν με ρεύμα ή πετρέλαιο, αλλά τροφοδοτούνται από μπαταρίες που φορτίζονται από φωτοβολταϊκά. Γενικά, αυτή η προσέγγιση απαιτεί αρκετά μεγάλη συστοιχία φωτοβολταϊκών για μια δεδομένη ροή προϊόντος εξαιτίας της φτωχής αποδοτικότητας και των μπαταριών των συμβατικών συστημάτων αντίστροφης ώσμωσης. Μεγάλες συστοιχίες φωτοβολταϊκών και τακτική ανανέωση των μπαταριών αυξάνει αυτόματα το κόστος του παραγόμενου νερού. [6]

➔ Αντίστροφη Ώσμωση (RO) Θαλασσινού Νερού με Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

Η ωσμωτική πίεση του θαλασσινού νερού είναι πολύ πιο υψηλή σε σχέση με αυτή του υφάλμυρου νερού, έτσι η αφαλάτωσή του απαιτεί πολύ περισσότερη ενέργεια και αναπόφευκτα μεγαλύτερη συστοιχία φωτοβολταϊκών. Επίσης, οι υψηλές πιέσεις που συναντάμε στα συστήματα αντίστροφης ώσμωσης (RO) θαλασσινού νερού απαιτούν μηχανικά δυνατότερα εξαρτήματα. Έτσι, το ολικό κόστος του νερού που παράγεται σε αυτού του τύπου συστήματα είναι πιθανό να βρίσκεται σε υψηλότερα επίπεδα σε σχέση με αυτό που παράγεται στα αντίστοιχα συστήματα αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού. [6]

### **3.2.1.b Αντίστροφη Ώσμωση με Θερμικά Ηλιακά Συστήματα (Reverse Osmosis with Solar Thermal)**

Η εμπειρία στο συνδυασμό της διεργασίας αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης (RO) τόσο θαλασσινού όσο και υφάλμυρου νερού με θερμικά ηλιακά συστήματα είναι αρκετά περιορισμένη. Αναφορικά, μόνο δυο είναι αυτές οι εφαρμογές, μαζί με ένα μειωμένο αριθμό θεωρητικών αναλύσεων και προτάσεων σχεδιασμού. Λόγω αυτής της έλλειψης, απαραίτητη θεωρείται η επανεξέταση των συστημάτων κατά την λειτουργία τους. [51]

Η χρήση της ηλιακής ενέργειας με σκοπό την τροφοδότηση των συστημάτων άντλησης νερού είναι μια τεχνική που μελετάται από τον 19<sup>ο</sup> αιώνα. Η ίδια η διεργασία συμβάλλει στην μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε μηχανική

ενέργεια η οποία χρησιμοποιείται για την άντληση του νερού σε ένα ορισμένο ύψος. Αυτός ο τύπος συστήματος που μετατρέπει την θερμική ηλιακή ενέργεια σε μηχανική ενέργεια συνήθως αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως θερμική ηλιακή μηχανή. [51]

➔ Αντίστροφη Ώσμωση (RO) με Παραβολικούς Ηλιακούς Συλλέκτες

Η ανάλυση αυτού του συστήματος θα γίνει με βάση την παρουσίαση του T.E. Bowman για ένα προκαταρκτικό μοντέλο ικανό να παράγει 7,6 και 26,5 m<sup>3</sup> αφαλατωμένου νερού από υφάλμυρο νερό αλατότητας 5400 ppm. Το σύστημα αυτό λειτουργεί ανεξάρτητα από το δίκτυο αλλά έχει έναν λέβητα πετρελαίου και ένα εφεδρικό σύστημα θερμικής αποθήκευσης. Η θερμική αυτή αποθήκη αποτελείται από έναν συσσωρευτή ατμού που συνδέεται με δυο κινητήρες εμβόλων ατμού. Ο ένας από τους κινητήρες συνδέεται απευθείας με την αντλία υψηλής πίεσης της μονάδας αντίστροφης ώσμωσης, ενώ ο άλλος με μια ηλεκτρική γεννήτρια για την παραγωγή βοηθητικού ηλεκτρισμού. Ο ατμός που παράγεται από την ανταλλαγή θερμότητας με το υγρό μεταφοράς θερμότητας που κυκλοφορεί σε βόρεια-νότια προσανατολισμένο ηλιακό πεδίο που αποτελείται από δυο σειρές παραβολικών συλλεκτών με άνοιγμα 133,4 m<sup>2</sup>. Στο συσσωρευτή παράγεται ξηρός κορεσμένος υδρατμός, ο οποίος διπλασιάζεται ως μια θερμική μονάδα αποθήκευσης και ο οποίος πρέπει να είναι σε θέση να προμηθεύει τη ζήτηση των κινητήρων ατμού μέχρι και μισή ώρα, όταν το σύστημα δεν μπορεί να λάβει ενέργεια τόσο από το ηλιακό πεδίο όσο και από τον λέβητα. Το ηλιακό πεδίο είναι σχεδιασμένο να παράγει αρκετή ενέργεια ώστε να εφοδιάζει την ποσότητα του ατμού που απαιτείται και από τους δυο κινητήρες για οκτώ ώρες σε μια μέση ηλιοφάνεια του καλύτερου μήνα του χρόνου για την εκάστοτε περιοχή εγκατάστασης. [51]

Όσον αφορά το σύστημα αντίστροφης ώσμωσης (RO) αυτό αποτελείται από δύο διαρρυθμίσεις λεπτών ινών με παράλληλη σύνδεση, ώστε να επιτρέπεται η μονή ή η διπλή λειτουργία τους ανάλογα με την διαθέσιμη ενέργεια, και ποσοστό μετατροπής να φτάνει το 75%. [51]

➔ Αντίστροφη Ώσμωση (RO) με Ηλιακούς Συλλέκτες Κενού

Ένα χαρακτηριστικό σύστημα αυτού του τύπου έχει εισηγηθεί από τον Δ. Μανωλάκο και λειτουργεί τόσο για υφάλμυρο όσο και για θαλασσινό νερό. Το νερό που κυκλοφορεί μέσα στους σωλήνες του συστήματος θερμαίνεται έως μια θερμοκρασία, ενδεικτικά 77°C, και στη συνέχεια μεταφέρεται στον εναλλάκτη θερμότητας όπου παράγει υπέρθερμο υδρατμό τετραφθοροαιθανίου. Ο υπέρθερμος υδρατμός χρησιμοποιείται σε συσκευές επέκτασης όπου παράγεται η απαιτούμενη μηχανική ενέργεια για τη λειτουργία των αντλιών στο σύστημα αντίστροφης ώσμωσης, στο βρόγχο κυκλοφορίας του νερού αλλά και στο βρόγχο του υπέρθερμου υδρατμού. Δεν υπάρχει μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια, έτσι η



μηχανική ενέργεια μεταφέρεται απευθείας στις συσκευές επέκτασης. Το σύστημα χρησιμοποιεί το νερό τροφοδοσίας του συστήματος της αντίστροφης ώσμωσης ως το υγρό ψύξης για την συμπύκνωση του υδρατμού. Αυτό επίσης συμβάλλει στην προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας στην μονάδα της αντίστροφης ώσμωσης(RO) . [52]

### **3.2.1.c Αντίστροφη Ώσμωση με Ηλιακή Λίμνη (Reverse Osmosis with Solar Pond)**

Γενικά, οι ηλιακές λίμνες μπορούν να τροφοδοτήσουν ένα σύστημα τόσο με θερμική όσο και με ηλεκτρική ενέργεια, αρκετά φθηνότερα σε σχέση με τις παραπάνω επιλογές. Αυτό που δεν διαθέτουν είναι διείσδυση στην αγορά αφαλάτωσης που έχουν οι παραπάνω μέθοδοι. Ο συνδυασμός της με συστήματα αντίστροφης ώσμωσης (RO) είναι εφικτός, ωστόσο οι εφαρμογές της στην βιβλιογραφία είναι ελάχιστες. [56]

### **3.2.2 Ηλιακή Πολλαπλή Εξάτμιση (Solar Multiple Effect Evaporation)**

Η πολλαπλή εξάτμιση (MEE) είναι μια θερμική διεργασία που μπορεί να εκμεταλλευτεί έμμεσα την ηλιακή ακτινοβολία. Ειδικότερα, τα τελευταία χρόνια που έχουν πραγματοποιηθεί πολλές εξελίξεις στις διεργασίες χαμηλών θερμοκρασιών, έχει παρατηρηθεί αύξηση της δυναμικότητας αυτών των συστημάτων αφαλάτωσης και παράλληλα μείωση της ενεργειακής τους κατανάλωσης, παρέχοντας με τον τρόπο αυτό μακροχρόνια λειτουργία υπό αξιοσημείωτα σταθερές συνθήκες. Επίσης, φαινόμενα όπως ο σχηματισμός ιζημάτων αλλά και η διάβρωση είναι ελάχιστα, οδηγώντας έτσι τα συστήματα αυτά σε διαθεσιμότητες που αγγίζουν ποσοστά από 94% έως 96%.

Η ηλιακή πολλαπλή εξάτμιση (SMEE) μπορεί να πραγματοποιηθεί με την χρήση ηλιακών λιμνών αλλά και την χρήση ηλιακών συλλεκτών. Ακολουθεί ανάλυση των διαφόρων περιπτώσεων.

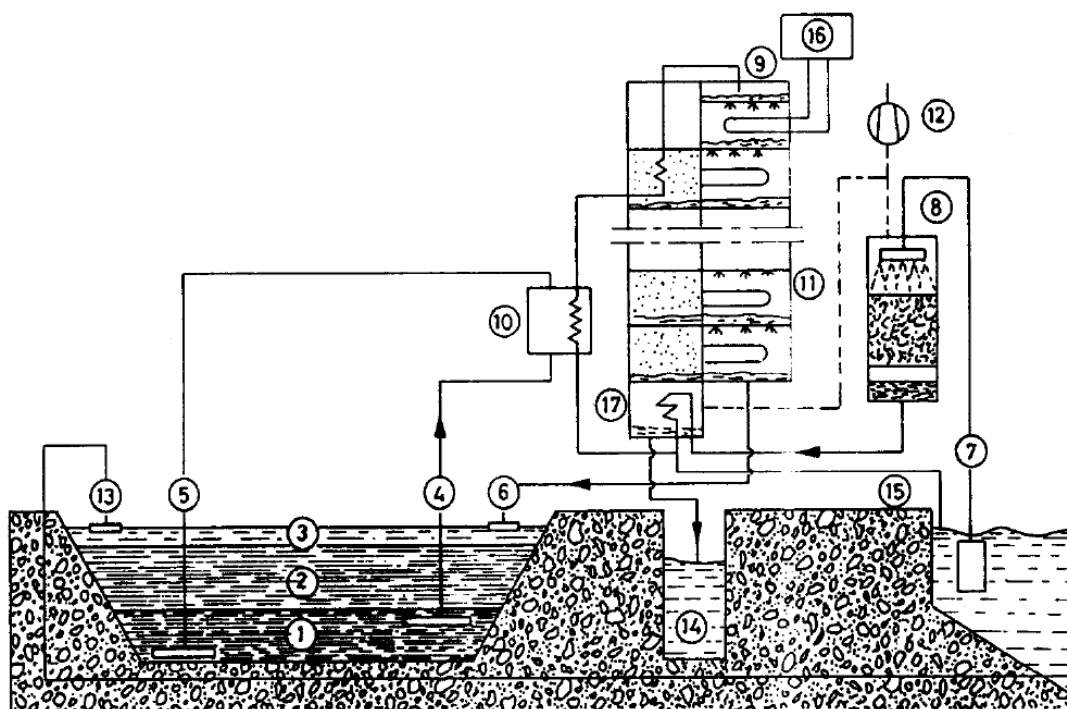
#### **3.2.2.a Πολλαπλή Εξάτμιση με Ηλιακή Λίμνη (Multiple Effect Evaporation with Solar Pond)**

Η ηλιακή λίμνη είναι ένας ιδανικός συνδυασμός με τα συστήματα αφαλάτωσης καθώς μπορεί και συλλέγει παθητικά την θερμότητα, την αποθηκεύει και την μεταφέρει με χαμηλά κόστη άντλησης. Επιπλέον, αυτού του τύπου υβριδικά συστήματα έχουν χαμηλά λειτουργικά κόστη και απαιτούν χαμηλό κεφάλαιο εγκατάστασης. [7]

Ειδικότερα, ο συνδυασμός των ηλιακών λιμνών με τα συστήματα πολλαπλής εξάτμισης (ΜΕΕ) αποδεικνύεται αρκετά αποδοτικός εφόσον η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας που παρέχεται από την ηλιακή λίμνη ( 60-75°C) ταιριάζει με την απαιτούμενη των συστημάτων αφαλάτωσης με πολλαπλή εξάτμιση, η οποία κυμαίνεται στους 50-60°C. Επίσης, αυτού του τύπου ηλιακά συστήματα είναι εξαιρετικά ευέλικτα σε αλλαγές της παροχής ενέργειας και η λειτουργία τους είναι εξαιρετικά σταθερή υπό συνθήκες μεταβαλλόμενης παροχής θερμότητας. [7]

Στις συμβατικές μονάδες πολλαπλής εξάτμισης(ΜΕΕ), η κύρια πηγή θερμότητας (ατμός ή ζεστό νερό) τροφοδοτεί την πρώτη βαθμίδα που έχει και την υψηλότερη θερμοκρασία, ενώ ο υδρατμός που παράγεται στην τελευταία βαθμίδα συμπυκνώνεται στον συμπυκνωτή. Μέρος του νερού ψύξης από τον συμπυκνωτή συνήθως λαμβάνεται ως τροφοδοσία της πρώτης βαθμίδας. Τελικά, η τροφοδοσία αυτή συνήθως προθερμαίνεται σε μια αναγεννητική συσκευή τροφοδοσίας από τμήματα του υδρατμού που παράγεται στις μεταγενέστερες βαθμίδες. Η διαφορά των συμβατικών συστημάτων με τα υβριδικά συστήματα είναι ότι η αναγεννητική συσκευή τροφοδοσίας είναι ένας ηλιακός προθερμαντήρας που τροφοδοτεί μέρος της απαιτούμενης ενέργειας στην τροφοδοσία που αφήνει την μονάδα του συμπυκνωτή και παρέχει την υπολειπόμενη ενέργεια σε ένα βοηθητικό boiler ατμού. Έτσι, η έξοδος της υπομονάδας παραγωγής ενέργειας που στην περίπτωση μας είναι η ηλιακή λίμνη αποτελεί την είσοδο για την υπομονάδα αφαλάτωσης με πολλαπλή εξάτμιση. Όσο η λειτουργία της ηλιακής λίμνης είναι να παρέχει αυτή την απαιτούμενη ενέργεια αντί του βραστήρα άλμης, ο απαιτούμενος βαθμός απόδοσης του boiler ατμού μειώνεται και έτσι αυξάνεται ο συνολικά κερδισμένος βαθμός απόδοσης. Η ηλιακή θερμότητα που παρέχεται στην τροφοδοσία στον ηλιακό προθερμαντήρα εξαρτάται από την θερμοκρασία της ζώνης αποθήκευσης της λίμνης, την θερμοκρασία της τροφοδοσίας που αφήνει τον συμπυκνωτή, τον ρυθμό τροφοδοσίας αλλά και την αποδοτικότητα του ηλιακού προθερμαντήρα που λαμβάνεται ίση με 0,75. Η θερμοκρασία της ζώνης αποθήκευσης της λίμνης δεν είναι μόνο συνάρτηση των καιρικών συνθηκών αλλά εξαρτάται και από τον βαθμό εξαγωγής του φορτίου, το οποίο είναι συνάρτηση της δυναμικότητας του συστήματος αφαλάτωσης με πολλαπλή εξάτμιση. Συνεπώς, η σωστή διαστασιολόγηση της ηλιακής λίμνης σε συνδυασμό με την δυναμικότητα της υπομονάδας αφαλάτωσης είναι κρίσιμοι παράγοντες για την απόδοση του υβριδικού ηλιακού συστήματος αυτού του τύπου. Με δεδομένη την παραπάνω αναλογία υπάρχει μια κρίσιμη περιοχή στον βαθμό για την οποία η μέση ετήσια εξαγωγή ενέργειας εξισορροπείται από την μέση ετήσια εισαγωγή ηλιακής ενέργειας, έτσι ώστε η μέση ετήσια θερμοκρασία της ζώνης αποθήκευσης να παραμένει σταθερή. Από την άλλη πλευρά, μεγαλύτερη ή μικρότερη τιμή από την κρίσιμη έχει ως αποτέλεσμα η αντίστοιχη ενέργεια να υπερβαίνει ή να υπολείπεται στην λίμνη και να προκαλείται μη σταθερή αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας της ζώνης αποθήκευσης της λίμνης, αντίστοιχα. [7]

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί για μια ακόμη φορά ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα αυτού του υβριδικού συστήματος και είναι η ανακυκλοφορία της άλμης. Στα συμβατικά συστήματα η άλμη που απέμενε απορριπτόταν στην θάλασσα. Αντίθετα, στην περίπτωση του υβριδικού συστήματος η άλμη απορρίπτεται στην ηλιακή λίμνη διατηρώντας τα επίπεδα ισορροπίας άλατος αλλά και την θερμοκρασία στην συναγωγήμη κάτω ζώνη της λίμνης σταθερή. Παρακάτω, στην **Εικόνα 117**, ακολουθεί σχηματική απεικόνιση της μονάδας πολλαπλής εξάτμισης με ηλιακή λίμνη. [7]



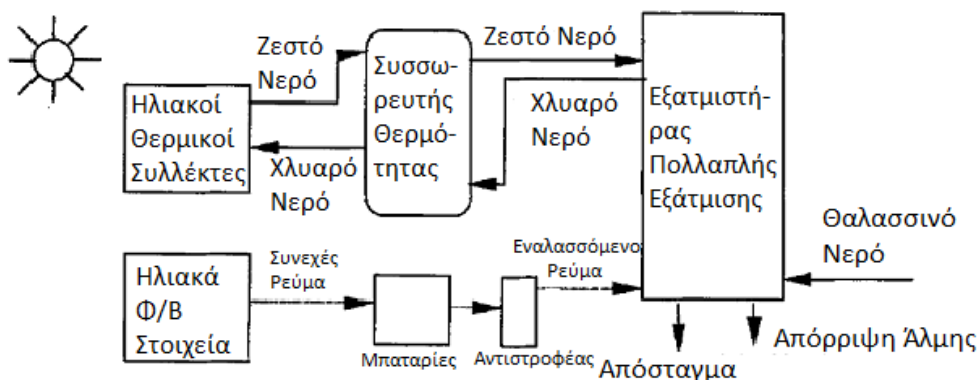
ΥΠΟΜΝΗΜΑ	
1. Ζώνη Αποθήκευσης	10. Ηλιακός Θερμαντήρας
2. Ζώνη Μέσης Αλατότητας	11. Βαθμίδες Εξατμιστήρα
3. Επιφανειακή Ζώνη	12. Σύστημα Κενού
4. Θερμικός Βρόγχος (Εξαγωγής)	13. Επαναχρησιμοποίηση Άλμης
5. Θερμικός Βρόγχος (Εισαγωγής)	14. Απόσταγμα
6. Σύστημα Έκπλυσης	15. Ψύξη Νερού
7. Πρόσληψη Θαλασσινού Νερού	16. Βοηθητικός Προθερμαντήρας
8. Προσθετικά Εξαέρωσης	17. Συμπυκνωτής Κατακόρυφης Ροής
9. Πρώτη Βαθμίδα	

**Εικόνα 117:** Σύστημα Πολλαπλής Εξάτμισης Με Ηλιακή Λίμνη(MEE-SP). [7]

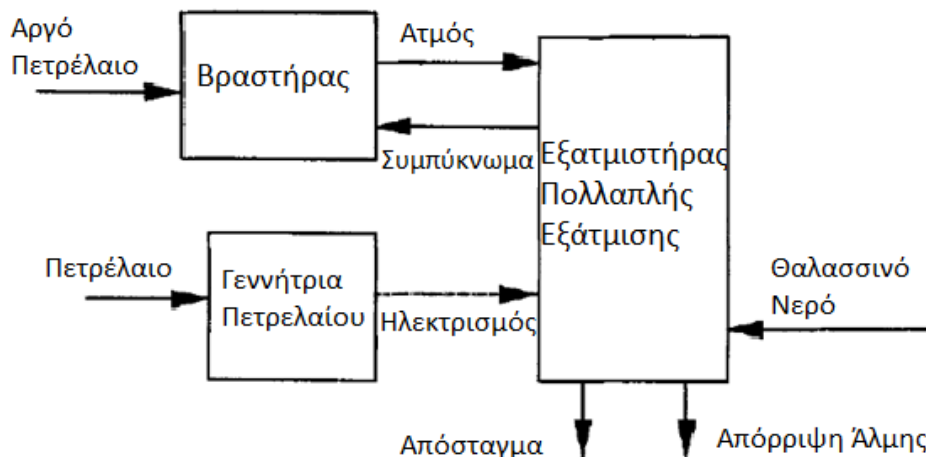
### 3.2.2.b Πολλαπλή Εξάτμιση με Ηλιακούς Συλλέκτες (Multiple Effect Evaporation with Solar Collectors)

Τα συστήματα αφαλάτωσης πολλαπλής εξάτμισης (ΜΕΕ) σε συνδυασμό με υπομονάδες παραγωγής ενέργειας, οι οποίες εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια, συνήθως σχεδιάζονται για να λειτουργήσουν με τρεις διαφορετικούς τρόπους που εξαρτώνται από τις πηγές θερμότητας. [8]

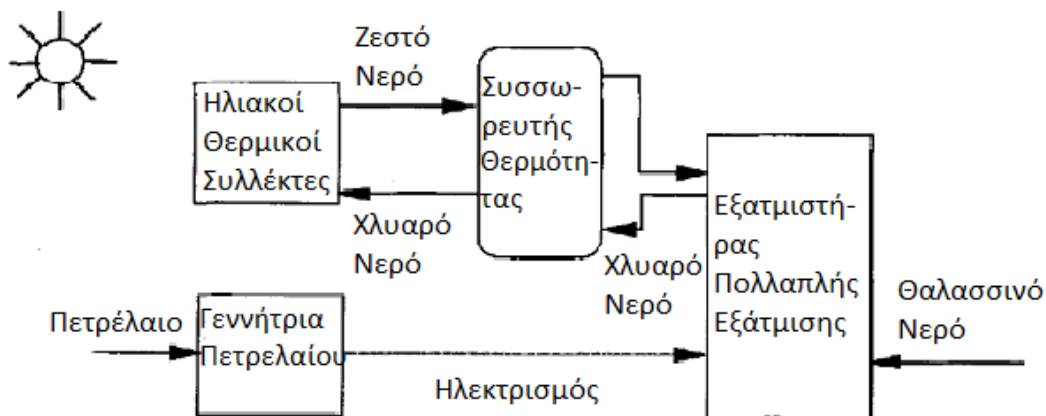
Αρχικά, υπάρχουν τα συστήματα λειτουργίας μόνο με εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, όπως παρουσιάζονται στην **Εικόνα 118**. Στην περίπτωση αυτή, η ενέργεια που εισέρχεται στην πρώτη βαθμίδα προέρχεται αποκλειστικά και μόνο από θερμική ενέργεια που παράγεται από συστοιχία θερμικών συλλεκτών. Οι αντλίες της διαρρύθμισης αυτής λειτουργούν με ηλεκτρισμό που παράγεται με την σειρά του από φωτοβολταϊκά στοιχεία. Στην συνέχεια, υπάρχουν τα συστήματα τα οποία λειτουργούν μόνο με καύσιμα, όπως βλέπουμε στην **Εικόνα 119**. Σε αυτό τον τύπο συστημάτων, οι αντλίες απορρόφησης θερμότητας τροφοδοτούν όλη την θερμότητα που απαιτείται από την μονάδα αφαλάτωσης. Τέλος, υπάρχουν τα συστήματα υβριδικής λειτουργίας στα οποία η ενέργεια που απαιτείται προέρχεται τόσο από τους ηλιακούς συλλέκτες όσο και από τις αντλίες απορρόφησης θερμότητας και παρουσιάζονται στην **Εικόνα 120**. Σε αυτή την περίπτωση λειτουργία υπάρχουν δυο διαφορετικές φιλοσοφίες που θέλουν είτε την αντλία θερμότητας να λειτουργεί συνεχώς για 24 ώρες και να έχει συνεισφορά 30% στην παρεχόμενη ενέργεια, είτε να λειτουργεί διακοπτόμενα κατά βούληση ανάλογα με την διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας. [8]



**Εικόνα 118:** Σύστημα Λειτουργίας Αποκλειστικά Μόνο με Εκμετάλλευση Ηλιακής Ενέργειας. [8]



**Εικόνα 119:** Σύστημα Λειτουργίας Αποκλειστικά Μόνο με Χρήση Καυσίμων. [8]

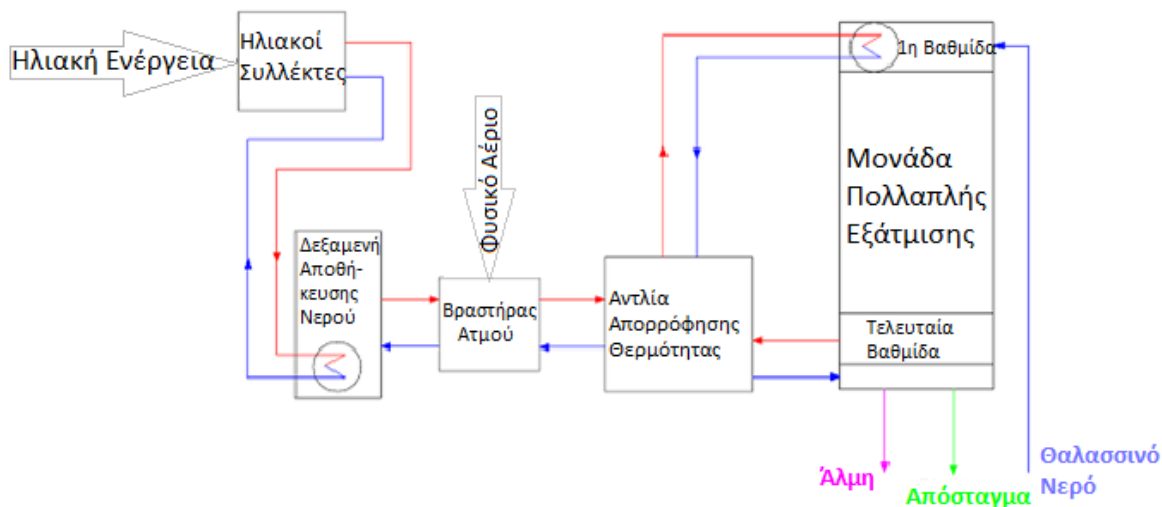


**Εικόνα 120:** Σύστημα Λειτουργίας Τόσο με Χρήση Ηλιακής Ενέργειας Όσο και με Χρήση Καυσίμων. [8]

Αναλυτικότερα, όπως μπορούμε να δούμε και στην **Εικόνα 121** το συνδυασμένο σύστημα αποτελείται από τους ηλιακούς συλλέκτες, την μονάδα αφαλάτωσης πολλαπλής εξάτμισης, το σύστημα αποθήκευσης θερμού νερού ή λαδιού, το boiler ατμού, και την αντλία μεταφοράς θερμότητας για την ανάκτηση θερμότητας από την τελευταία βαθμίδα της μονάδας αφαλάτωσης. [9]

Γενικά, η συνδεσμολογία περιλαμβάνει τις υπομονάδες παραγωγής ενέργειας και αφαλάτωσης, την δεξαμενή αποθήκευσης και την αντλία απορρόφησης θερμότητας. Οι ηλιακοί συλλέκτες συνδέονται με την μονάδα αφαλάτωσης πολλαπλής εξάτμισης και αποτελούν την πηγή ενέργειας του συστήματος. Σκοπός τους είναι η θέρμανση του υγρού μεταφοράς θερμότητας, νερό ή λάδι, που θα τροφοδοτήσει την πρώτη βαθμίδα της μονάδας αφαλάτωσης. Οι συλλέκτες που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις διαρρυθμίσεις είναι παραβολικού τύπου, επίπεδου τύπου και ηλιακοί συλλέκτες κενού. Οι θερμοκρασίες που μπορεί να φτάσει το

Θερμαινόμενο υγρό κυμαίνονται από 80°C για επίπεδους συλλέκτες έως και 95°C για παραβολικούς συλλέκτες και συλλέκτες κενού. [8]



Εικόνα 121: Συνδυασμένο Σύστημα Αφαλάτωσης Πολλαπλής Εξάτμισης με Ηλιακούς Συλλέκτες(MEE-SC). [9]

### 3.2.2.c Πολλαπλή Εξάτμιση με Θερμικά Φωτοβολταϊκά (Multiple Effect Evaporation With Thermal Photovoltaic Cells)

Μέχρι τώρα γνωρίζαμε ότι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία χρησιμοποιούνται για την απευθείας παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, απορρίπτοντας την παραγόμενη θερμότητα απευθείας στο περιβάλλον. Ωστόσο, μια νέα προοπτική συλλογής και εκμετάλλευσης της θερμότητας αυτής είναι διαθέσιμη για την παραγωγή θερμικής ενέργειας. Η ηλιακή θερμότητα είναι διαθέσιμη σε πολύ χαμηλό κόστος, εφόσον η επένδυση του συλλέκτη αφορά κυρίως την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Με βάση αυτή την δυνατότητα έχει μελετηθεί η συμπαραγωγή ψύξης και θέρμανσης του νερού, αναδεικνύοντας μια πολύ καλή αναλογία μεταξύ κόστους και αποδοτικότητας υπό συγκεκριμένες οικονομικές συνθήκες. [27]

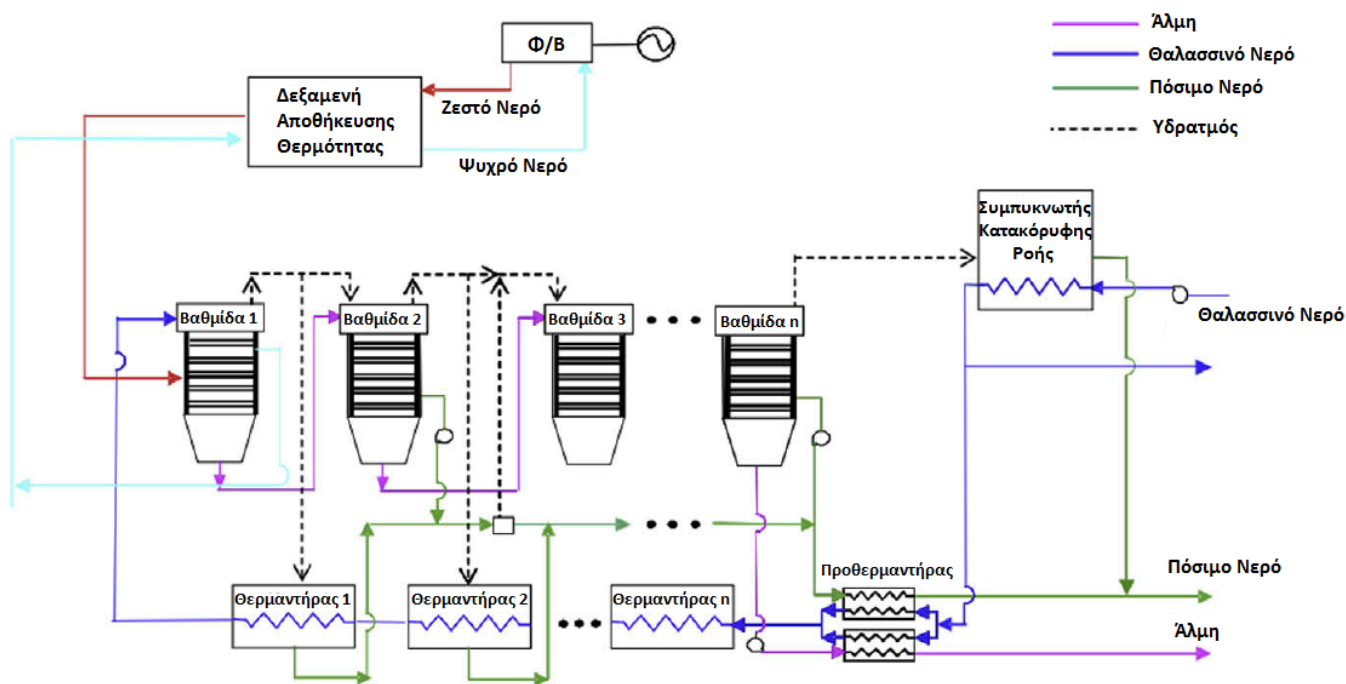
Μερικά θερμικά φωτοβολταϊκά συστήματα βασίζονται σε επίπεδους συλλέκτες χωρίς συγκέντρωση. Αυτός ο τομέας γνώρισε μεγάλη δραστηριότητα τον τελευταίο καιρό, με διάφορα σχήματα συλλεκτών να προσαρμόζονται σε διάφορες εφαρμογές. Ωστόσο, αυτού του τύπου οι συλλέκτες φτάνουν χαμηλές θερμοκρασίες αυτές των 40-60°C. Οι θερμικές διεργασίες όμως απαιτούν υψηλότερες θερμοκρασίες εισόδου προκειμένου να λειτουργήσουν με έναν ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης και να έχουν αξιόλογου μεγέθους εναλλάκτες θερμότητας. Πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία με συγκεντρωτική δυνατότητα λειτουργούν σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες, ενώ παράλληλα μπορούν και διατηρούν υψηλή αποδοτικότητα στην μετατροπή ηλεκτρικού ρεύματος. Έτσι ένα συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό στοιχείο με κατάλληλη παροχή νερού ψύξης μπορεί να δώσει ένα μεγάλο εύρος

θερμοκρασιών και να υποστηρίξει μια μονάδα αφαλάτωσης πολλαπλής εξάτμισης. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό που καθιστά το σύστημα αυτό αρκετά ελκυστικό είναι η δυναμική του να λειτουργεί σε ανταγωνιστικό κόστος ακόμα και με τις συμβατικές μονάδες και χωρίς την χρήση της απορριπτόμενης θερμότητας. [27]

Η συνδεσμολογία του συστήματος και σε αυτή την περίπτωση περιλαμβάνει την υπομονάδα των φωτοβολταϊκών, την υπομονάδα αφαλάτωσης πολλαπλής εξάτμισης και την δεξαμενή αποθήκευσης, εφόσον το σύστημα θεωρείται ότι είναι αυτόνομο ηλιακό. Αναλυτικότερα, η υπομονάδα συλλεκτών αποτελείται από θερμικά συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά στοιχεία τα οποία είναι εγκατεστημένα πάνω σε μια πλάκα ψύξης η οποία απορρίπτει την περίσσεια θερμότητα μεταφέροντάς την στο υγρό ψύξης. Συνήθως το υγρό αυτό είναι νερό, αν και για θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 100°C μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα υγρά. Το θερμό, πλέον, νερό ψύξης αφήνει την διάταξη των θερμικών συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών στοιχείων και κατευθύνεται προς τον εναλλάκτη θερμότητας, όπου παρέχει την ενέργειά του στην διεργασία αφαλάτωσης. Αντίστοιχα, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά παρέχεται στο δίκτυο. [27]

Η σχηματική απεικόνιση του συστήματος παρουσιάζεται στην **Εικόνα 122**. Το ζεστό υγρό που φεύγει από την διάταξη των συλλεκτών τροφοδοτεί την πρώτη βαθμίδα της μονάδας αφαλάτωσης πολλαπλής εξάτμισης. Η θερμότητα αυτή εξατμίζει ένα μέρος του εισερχόμενου θαλασσινού νερού και το απομένον υγρό (άλμη) ρέει στην επόμενη βαθμίδα. Η απομένουσα άλμη μετά και την τελευταία βαθμίδα απορρίπτεται πίσω στη θάλασσα. Ο υδρατμός που σχηματίζεται σε κάθε εξατμιστήρα συμπυκνώνεται στην επόμενη βαθμίδα, που είναι χαμηλότερης θερμοκρασίας, και έτσι παρέχεται η πηγή θερμότητας για επιπλέον εξάτμιση. Ο υδρατμός που σχηματίζεται στην τελευταία βαθμίδα προθερμαίνει το εισερχόμενο θαλασσινό νερό τροφοδοσίας στον συμπυκνωτή. Επιπλέον προθέρμανση επιτυγχάνεται και από τον υδρατμό που απορρέει από κάθε βαθμίδα. [27]

Τέλος, και εφόσον το σύστημα θεωρείται ηλιακά αυτόνομο, είναι απαραίτητη η ύπαρξη μιας θερμικής δεξαμενής αποθήκευσης. Πρέπει να είναι σχεδιασμένη με τέτοιο τρόπο ώστε να μην χάνει την ενέργεια που αποθηκεύεται και να μπορεί να υποστηρίξει το σύστημα για 24 ώρες κατά τους θερινούς μήνες. Κατά τους χειμερινούς μήνες, το σύστημα διακόπτει λειτουργία όσο η δεξαμενή αυτή είναι άδεια, μέχρι το επόμενο πρωί ηλιοφάνειας όπου θα ξαναγίνει φόρτισή της. Η δομή της δεξαμενής αυτής περιέχει ένα στρώμα κρύου υγρού που βρίσκεται στον πυθμένα της και ένα στρώμα θερμού υγρού που βρίσκεται στην επιφάνεια. Έτσι ο ρυθμός ψύξης του νερού ρυθμίζεται να είναι ίδιος με τον ρυθμό θέρμανσής του. [27]



**Εικόνα 122:** Σύστημα Αφαλάτωσης Πολλαπλής Εξάτμισης με Θερμικά Συγκεντρωτικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία (MEE-TPV). [27]

### 3.2.3 Ηλιακή Πολυβάθμια Εκτόνωση (Solar MultiStage Flash Desalination)

Η συμβατική μέθοδος της πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) αποτελεί μια από τις πιο αποδοτικές διεργασίες αφαλάτωσης. Συνεπώς, ο συνδυασμός της με την ηλιακή ενέργεια την καθιστά ελκυστική κυρίως για απομακρυσμένες και άγονες περιοχές.

Η ηλιακή πολυβάθμια εκτόνωση ανήκει στην κατηγορία των θερμικών διεργασιών με έμμεση εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Ο πιο κοινός τύπος συστημάτων είναι αυτός με χρήση ηλιακών λιμνών, όπως επίσης και ηλιακών παραβολικών συλλεκτών.



### 3.2.3.a Πολυβάθμια Εκτόνωση Με Ηλιακή Λίμνη (MultiStage Flash Desalination With Solar Pond)

Η ηλιακή λίμνη σε συνδυασμό με ένα τέτοιο αποδοτικό σύστημα αφαλάτωσης, προσφέρει υψηλές δυνατότητες για την παραγωγή πόσιμου νερού σε μεγάλη κλίμακα και σε ανταγωνιστικές τιμές σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες αφαλάτωσης με χρήση καυσίμων, για απομακρυσμένες και άγονες περιοχές. [26]

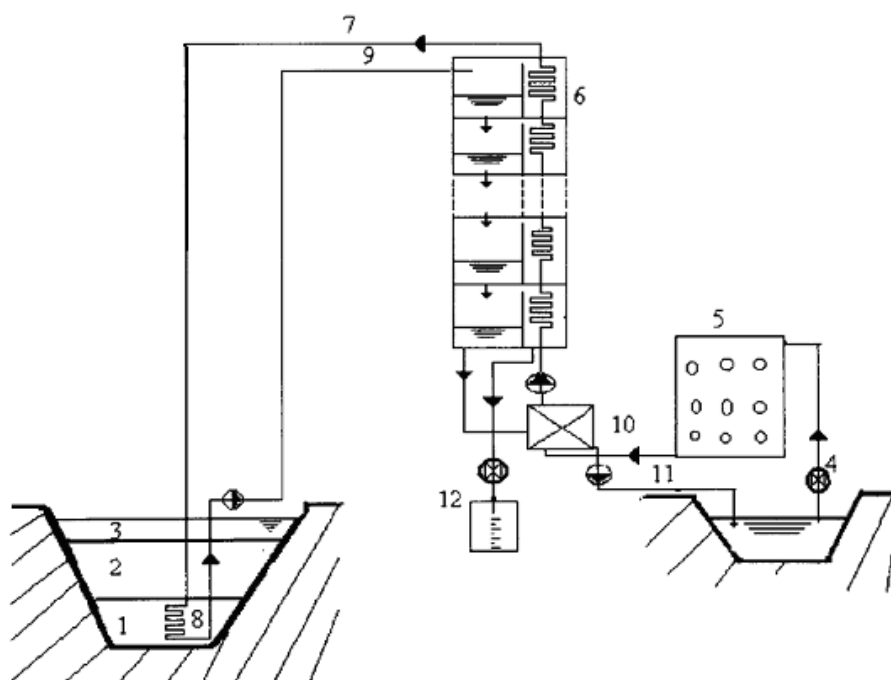
Αυτού του είδους συστήματα αποτελούνται από την συμβατική υπομονάδα αφαλάτωσης πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF), την υπομονάδα συλλογής ηλιακής ενέργειας, που στην περίπτωση μας είναι η ηλιακή λίμνη και λειτουργεί και ως μονάδα αποθήκευσης θερμότητας και το σύστημα επεξεργασίας του υφάλμυρου ή θαλασσινού νερού. Επίσης, διαθέτουν το σύστημα αντλιών διακίνησης που παίρνουν ενέργεια από κάποια γεννήτρια, ενώ ακόμα είναι δυνατόν να έχουν έναν βοηθητικό βραστήρα ατμού, ο οποίος θα τροφοδοτείται είτε από την γεννήτρια ή από φυσικό αέριο. Η διάταξη του συστήματος παρουσιάζεται σχηματικά στην **Εικόνα 123**. [26]

Πριν ξεκινήσει η περιγραφή της διεργασίας είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι για να γίνει η χρήση της ηλιακής λίμνης στο σύστημα πρέπει να έχει προηγηθεί λειτουργία προσαρμογής της τουλάχιστον για 2 χρόνια. Στο διάστημα αυτό η ηλιακή λίμνη αποκτά μια σταθερή θερμοκρασία στην ζώνη αποθήκευσής της, εξασφαλίζοντας έτσι την ισορροπημένη λειτουργία της. Η θερμοκρασία αυτή έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης, καθώς για θερμοκρασίες μικρότερες από αυτή το σύστημα δεν λειτουργεί αποδοτικά ενώ για μεγαλύτερες αυξάνονται οι θερμικές απώλειες της λίμνης. Συνεπώς, η θερμοκρασία της ζώνης αποθήκευσης της λίμνης δεν είναι μόνο συνάρτηση των καιρικών συνθηκών αλλά και του ρυθμού εξαγωγής θερμότητας, ο οποίος εξαρτάται από την δυναμικότητα της μονάδας αφαλάτωσης. Άρα, το μέγεθος της ηλιακής λίμνης σε συνδυασμό με την δυναμικότητα της μονάδας αφαλάτωσης καθορίζουν την αποδοτικότητα του συστήματος. [70]

Αρχικά, η ηλιακή λίμνη συλλέγει την ηλιακή ενέργεια στην ζώνη αποθήκευσής της και είναι υπεύθυνη για την θέρμανση του νερού. Αμέσως μετά, έχοντας το νερό την ανώτατη του θερμοκρασία, αναφορικά περίπου 90°C, εισέρχεται στην πρώτη βαθμίδα της μονάδας αφαλάτωσης. Ο ρυθμός εξάτμισης της διεργασίας πολυβάθμιας εκτόνωσης είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας της θερμικής ενέργειας που παρέχεται από την λίμνη. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία της παρεχόμενης ενέργειας, τόσο υψηλότερα είναι και τα ποσοστά εξάτμισης. [26]

Σε αυτή την περίπτωση του συστήματος, η ηλιακή λίμνη δεν συλλέγει απλώς την ηλιακή ενέργεια αλλά παράλληλα την αποθηκεύει. Η λειτουργία της ως δεξαμενή αποθήκευσης είναι αρκετά σημαντική για το σύστημα, καθώς είναι υπεύθυνη για

την εξασφάλιση της ισορροπημένης λειτουργίας του. Αυτό συμβαίνει γιατί ενώ τα συμβατικά συστήματα λειτουργούν με μια σχετικά σταθερή παροχή θερμικού φορτίου, τα συνδυασμένα συστήματα είναι αρκετά δύσκολο να λειτουργήσουν με μια ισχυρά μεταβαλλόμενη πηγή ενέργειας όπως είναι η φύση της ηλιακής ενέργειας, τόσο κατά της νυχτερινές ώρες όσο και τις ημέρες που δεν υπάρχει ηλιοφάνεια. [26]



ΥΠΟΜΝΗΜΑ	
1. Ζώνη Αποθήκευσης	7. Προθερμασμένο Υφάλμυρο Νερό
2. Ζώνη Μέσης Αλατότητας	8. Εναλλάκτης Θερμότητας
3. Επιφανειακή Ζώνη	9. Υφάλμυρο Νερό για Απόσταξη
4. Υφάλμυρο Νερό Πρόσληψης	10.
5. Επεξεργασία Νερού	11. Αποβολή Άλμης
6. Μονάδα Αφαλάτωσης Πολυβάθμιας Εκτόνωσης	12. Απόσταγμα

Εικόνα 123: Σύστημα Πολυβάθμιας Εκτόνωσης Συνδυασμένο Με Ηλιακή Λίμνη(MSF-SP). [13]

### 3.2.3.b Πολυβάθμια Εκτόνωση Με Ηλιακούς Συλλέκτες (MultiStage Flash Desalination with Solar Collectors)

Η συμβατική μέθοδος πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) έχει ποσοστό μεριδίου πάνω από 60% στην παγκόσμια αγορά αφαλάτωσης, ενώ στην Κεντρική Ανατολή το μέρος αυτό εκτοξεύεται σχεδόν στο 80%. Ο λόγος για μια τόσο ισχυρή κυριαρχία είναι η υψηλή αξιοπιστία σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος μιας πολύ ώριμης τεχνολογίας. [14]

Είναι λοιπόν αναμενόμενο με τέτοια ποσοστά επικράτησης να επικεντρωθεί το ενδιαφέρον της μελέτης στον συνδυασμό αυτών των συστημάτων με την ηλιακή ενέργεια. Η ηλιακή λίμνη, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, αποτελεί μια επιλογή που ωστόσο αποδεικνύεται κατάλληλη για συστήματα αφαλάτωσης μικρής παραγωγικότητας. Για συστήματα μεγάλης παραγωγικότητας που βρίσκονται σε άγονες και απομακρυσμένες περιοχές η επιλογή των ηλιακών συλλεκτών ως πηγή ενέργειας του συστήματος ενδείκνυται ως η καταλληλότερη. Οι τύποι ηλιακών συλλεκτών που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως οι παραβολικοί συλλέκτες και λιγότερο οι επίπεδοι συλλέκτες και οι συλλέκτες κενού, ενώ αναφέρονται συστήματα με τον συνδυασμό και των δυο τύπων, παραβολικών και επίπεδων συλλεκτών, για μεγαλύτερη αποδοτικότητα. [15]

Γενικά, το σύστημα αφαλάτωσης πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) αποτελείται από τρία κύρια υποσυστήματα, της συλλογής θερμότητας, της θερμικής αποθήκευσης και της πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF). Το σύστημα συλλογής θερμότητας στην περίπτωση αυτή αποτελείται από ηλιακούς συλλέκτες και πρέπει να λειτουργεί σε θερμοκρασίες κατάλληλες με τις απαιτήσεις του συστήματος πολυβάθμιας εκτόνωσης. Η σχηματική απεικόνιση του συστήματος παρουσιάζεται στην **Εικόνα 124**. [15]

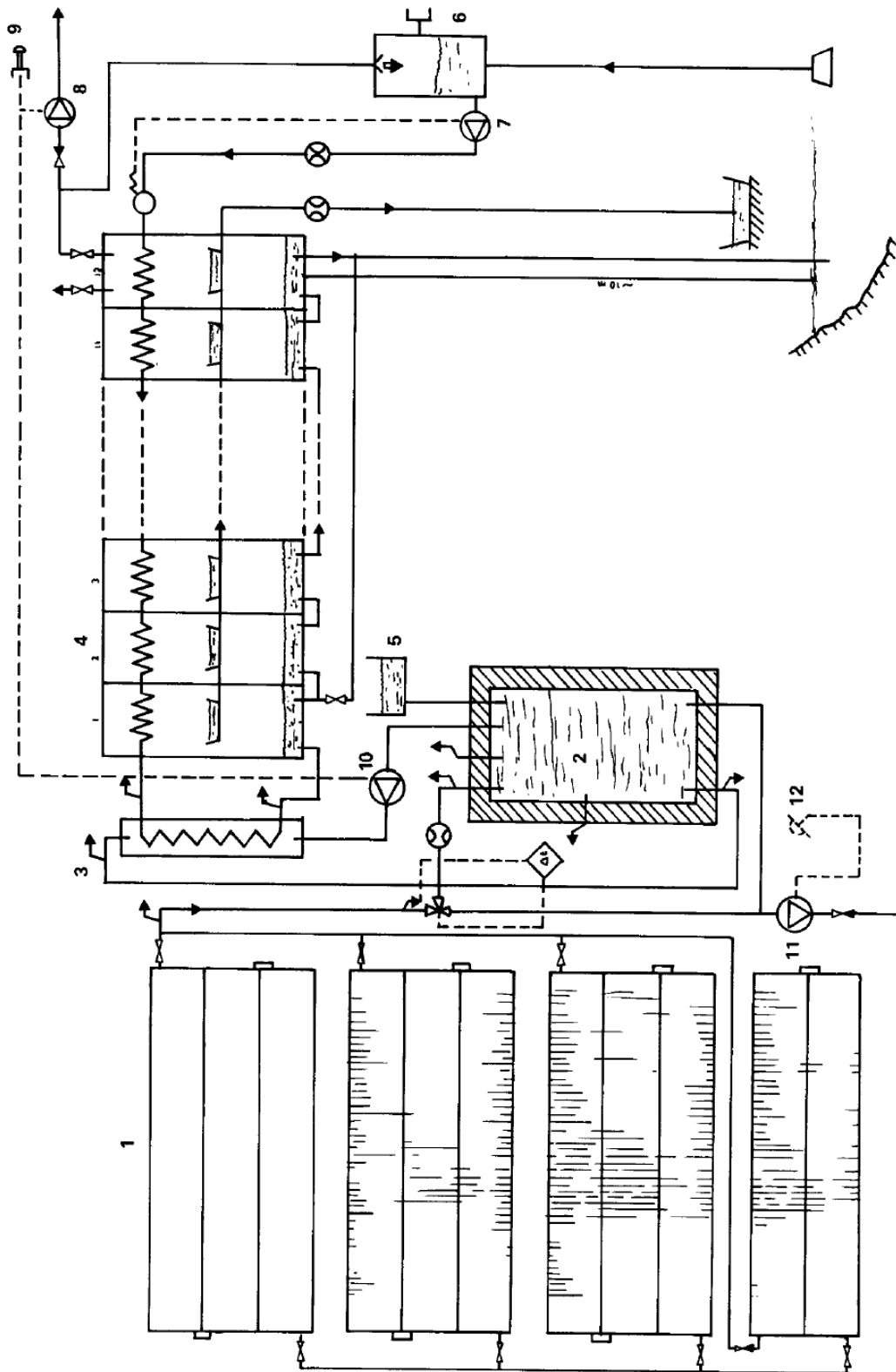
Αναλυτικότερα, η υπομονάδα ηλιακών συλλεκτών αποτελείται από μια διάταξη συγκεντρωτικών παραβολικών συλλεκτών, και λιγότερο συχνά επίπεδων ηλιακών συλλεκτών, οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με σύστημα εντοπισμού και παρακολούθησης ηλιακών ακτινών καθώς και ένα σύστημα κυκλοφορίας κλειστού βρόγχου. Η ηλιακή ακτινοβολία περνά μέσα από το γυάλινο κάλυμμα του συλλέκτη, αντανακλά από την παραβολική διατομή, στον χάλκινο σωλήνα απορρόφησης του καθενός. Το νερό, το οποίο λειτουργεί ως υγρό συλλογής θερμότητας, κυκλοφορεί μέσα στους σωλήνες αποθήκευσης μεταφέροντας παράλληλα μακριά την απορροφημένη θερμική ενέργεια. Η κυκλοφορία του νερού επιτυγχάνεται από το σύστημα της αντλίας συλλογής που λειτουργεί μόνο κατά τις ώρες ηλιοφάνειας. [15]

Η υπομονάδα θερμικής αποθήκευσης αποτελείται από μια δεξαμενή, μονωμένη με πολυουρεθάνης, και είναι συνδεδεμένη με το υποσύστημα συλλογής με τη βοήθεια ενός συστήματος αγωγών και της αντλίας του υποσυστήματος συλλογής. Η ρύθμιση της κυκλοφορίας πραγματοποιείται μέσω μιας βαλβίδας θερμοστατικής λειτουργίας τριών τρόπων, η οποία εξασφαλίζει την επιθυμητή θερμοκρασία εξόδου από την υπομονάδα των συλλεκτών. Κατά τη λειτουργία του συστήματος τις πρωινές ώρες, το υποσύστημα των συλλεκτών χρησιμοποιεί το ψυχρότερο πόσιμο νερό που βρίσκεται στον πυθμένα της δεξαμενής αποθήκευσης, το θερμαίνει και το επανακυκλοφορεί αδειάζοντας το αυτή τη φορά στην επιφάνεια της δεξαμενής. Παράλληλα με αυτή τη διαδικασία, το ζεστό νερό που βρίσκεται ήδη στην επιφάνεια της δεξαμενής χρησιμοποιείται από τους εναλλάκτες θερμότητας για τη θέρμανση της άλμης που εισέρχεται στους θαλάμους εκτόνωσης της υπομονάδας αφαλάτωσης. Κατά την διάρκεια αυτή της

διεργασίας, μέρος της θερμικής ενέργειας που έχει συλλεχθεί, χρησιμοποιείται για την θέρμανση του υγρού στην δεξαμενή αποθήκευσης. Συνεπώς, η δεξαμενή λειτουργεί ως ένας θερμικός αποσβεστήρας μεταξύ των υποσυστημάτων συλλογής ηλιακής ενέργειας και αφαλάτωσης. [15]

Τέλος, η υπομονάδα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση (MSF) είναι διασυνδεδεμένη με τα υποσυστήματα συλλογής και αποθήκευσης θερμότητας μέσω του κύριου εναλλάκτη θερμότητας (θερμαντήρας άλμης). Το ζεστό νερό αντλείται από την επιφάνεια της δεξαμενής αποθήκευσης στον θερμαντήρα άλμης μέσω της αντλίας θερμού νερού. Το ζεστό νερό αποδίδει κάποια από την θερμική του ενέργεια στην άλμη στον κύριο εναλλάκτη θερμότητας και ρέει πίσω στην δεξαμενή αποθήκευσης αλλά αυτή την φορά στον πυθμένα της. Το υποσύστημα αφαλάτωσης πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) αποτελείται από μια σειρά μονάδων εξατμιστήρων-συμπυκνωτών, μια αντλία κενού, μια αντλία κυκλοφορίας θαλασσινού νερού και ελεγκτήρες. Η διαδικασία που ακολουθείται περιγράφεται ως εξής: Το θαλασσινό νερό θερμαίνεται στον κύριο εναλλάκτη θερμότητας, θερμαντήρας άλμης, και ρέει στους θαλάμους εκτόνωσης της πρώτης βαθμίδας. Τμήμα του θερμασμένου αυτού θαλασσινού νερού εκτονώνεται και ο παραγόμενος υδρατμός συμπυκνώνεται στο εξωτερικό των σωλήνων του συμπυκνωτή της πρώτης βαθμίδας. Αυτό επιτυγχάνεται αφού ο υδρατμός διασχίσει το πλέγμα αποθάμβωσης και απαλλαγεί από τα ανεπιθύμητα σταγονίδια εισερχόμενης άλμης. Έτσι, όταν έρχεται σε επαφή με τους ψυχρούς σωλήνες του συμπυκνωτή, χάνει όλη του την θερμότητα και συμπυκνώνεται στην εξωτερική τους επιφάνεια. Οι σωλήνες του συμπυκνωτή είναι γεμάτοι με το δροσερό νερό που ρέει εξωτερικά του θερμαντήρα άλμης. Το απομένον τμήμα του θαλασσινού νερού ρέει στην επόμενη βαθμίδα, όπου η πίεση είναι μικρότερη με αποτέλεσμα μια επιπλέον ποσότητα εκτονώνεται και να δημιουργεί επιπλέον υδρατμό. Ο παραγόμενος υδρατμός συμπυκνώνεται και η ίδια διαδικασία ακολουθεί στις επόμενες βαθμίδες. Στην τελευταία βαθμίδα, η θερμοκρασία της άλμης είναι η χαμηλότερη και το επίπεδο κενού είναι υψηλότερο. [15]

Η αντλία κενού χρησιμοποιείται για να παρέχει το απαιτούμενο επίπεδο κενού και να το διατηρεί με την απομάκρυνση των μη συμπυκνώσιμων αερίων. Το επίπεδο κενού στις διάφορες βαθμίδες είναι αυτορυθμιζόμενο σύμφωνα με την θερμοκρασία της άλμης και του ρυθμού ροής της μέσα στο σύστημα. [15]

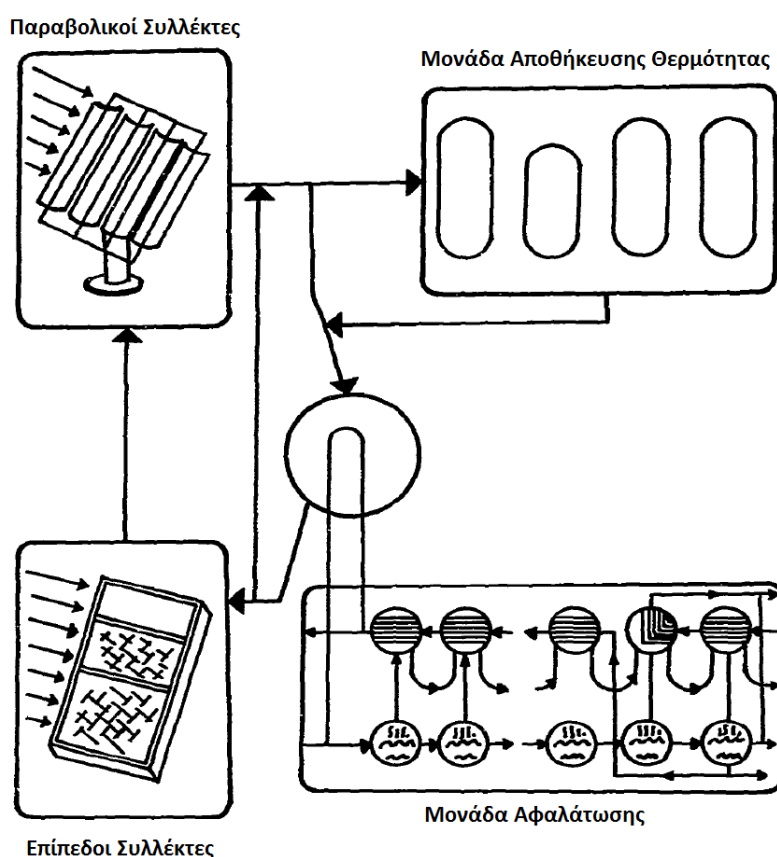


ΥΠΟΜΝΗΜΑ	
1. Υπομονάδα Ηλιακών Συλλεκτών	3. Θερμαντήρας Άλμης
2. Δεξαμενή Αποθήκευσης Θερμότητας	6. Απαερωτής
4. Ηλιακή Μονάδα Αφαλάτωσης Πολυβάθμιας Εκτόνωσης	9. Μπουτόν Εκκίνησης
5. Δοχείο Πίεσης και Διαστολής	12. Διακόπτης Αισθητήρα Ηλιακής Ακτινοβολίας
7. Αντλία Πρόληψης Θαλασσινού Νερού	
10. Βρόγχος Αντλίας Εναλλακτική Θερμότητας	
11. Βρόγχος Αντλίας Συλλογής	

Εικόνα 124: Σχηματική Απεικόνιση Συστήματος Αφαλάτωσης Πολυβάθμιας Εκτόνωσης (MSF) με Ηλιακούς Συλλέκτες. [15]

Ολόκληρη η ποσότητα της άλμης που αφήνει την τελευταία βαθμίδα απορρίπτεται. Η ροή του θαλασσινού νερού εντός των σωλήνων του συμπυκνωτή εξισορροπεί το σύνολο της απορριπτόμενης άλμης και της ροής του αποστάγματος. Εκτός των απωλειών θερμότητας μέσω των τοιχωμάτων, όλη η ενέργεια που απελευθερώνεται από το εκτονωμένο υγρό μεταφέρεται από τον υδρατμό στους σωλήνες του συμπυκνωτή. Οι διάφορες βαθμίδες του συστήματος μονώνονται ανεξάρτητα και συνδέονται με σωληνώσεις ροής της άλμης και σωληνώσεις ψύξης του συμπυκνωτή. Το σύστημα είναι επίσης εξοπλισμένο με τον απαερωτή και με μονάδες χημικής προεργασίας και παροχής δοσολογίας χλωρίου. [15]

Για την ολοκλήρωση αυτού του τύπου συστημάτων αξίζει να αναφερθεί και ο συνδυασμός δυο τύπων ηλιακών συλλεκτών, τόσο παραβολικών όσο και επίπεδων, σε μια μονάδα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση. Το σύστημα αποτελείται από τις ίδιες υπομονάδες μόνο που σε αυτή την περίπτωση προστίθεται στην υπομονάδα παραβολικών συλλεκτών μια διάταξη με επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες, η οποία αντικαθιστά την αντλία μεταφοράς θερμότητας του συστήματος. Έτσι, πραγματοποιείται η συλλογή και η κυκλοφορία του υγρού μεταφοράς θερμότητας βοηθώντας παράλληλα τους παραβολικούς συλλέκτες να φτάσουν υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας. Η σχηματική διάταξη του συστήματος αυτού παρουσιάζεται στην **Εικόνα 125**. [16]



**Εικόνα 125:** Σύστημα Αφαλάτωσης Πολυβάθμιας Εκτόνωσης (MSF) Με Χρήση Παραβολικών και Επίπεδων Ηλιακών Συλλεκτών. [16]

### 3.2.4 Ηλιακή Θερμική Συμπύεση Υδρατμού (Solar Thermal Vapor Compression)

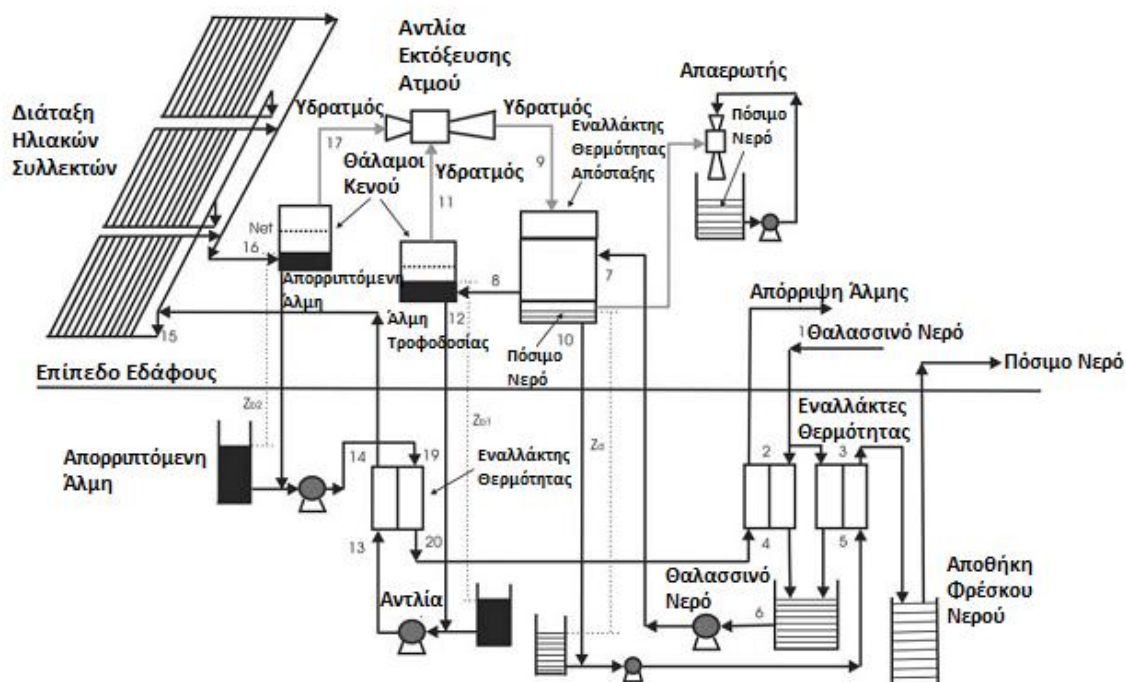
Η θερμική συμπύεση υδρατμού (TVC) είναι μια ακόμα διεργασία αφαλάτωσης που εντάσσεται στην κατηγορία λειτουργίας έμμεσης εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας. Για τον συνδυασμό αυτό, ως μονάδα συλλογής ενέργειας του συστήματος επιλέγονται οι ηλιακοί συλλέκτες. Ωστόσο, στο παρών κεφάλαιο δεν θα μελετηθεί ο απλούστερος συνδυασμός των δύο, αλλά, μια πρόσφατα εισηγημένη καινοτομική ιδέα με πολλές προοπτικές. Η ηλιακή βαρομετρική αφαλάτωση θαλασσινού νερού μέσω υπόγειας βαρομετρικής διάταξης, αποτελεί μια τεχνολογία που με την χρήση της θερμικής συμπύεσης υδρατμού έχει αρκετά καλή ενεργειακή αποδοτικότητα και πολλά υποσχόμενα τεχνοοικονομικά χαρακτηριστικά. [17]

Η τεχνολογία της ηλιακή βαρομετρική αφαλάτωσης θαλασσινού νερού μέσω υπόγειας βαρομετρικής διάταξης, αποτελεί μια απλή διεργασία ηλιακής αφαλάτωσης η οποία περιλαμβάνει μια υπόγεια βαρομετρική διάταξη και μια υπομονάδα ηλιακών συλλεκτών. Παρακάτω θα ακολουθήσει ανάλυση της διεργασίας αυτής για σύστημα μιας και δυο βαθμίδων με χρήση ηλιακών θερμοσυμπιεστών υδρατμού, οι οποίοι μπορούν και εκμεταλλεύονται ικανοποιητικά την ηλιακή ακτινοβολία αλλά μπορούν και εξασφαλίζουν την σταθερή λειτουργία του συστήματος. [17]

Το σύστημα και σε αυτή την περίπτωση αποτελείται από την υπομονάδα συλλογής ενέργειας, την υπομονάδα αφαλάτωσης, το σύστημα αντλιών και τους εναλλάκτες θερμότητας. Ως υπομονάδα συλλογής ενέργειας χρησιμοποιούνται ηλιακοί συλλέκτες και ειδικότερα τύπου κενού. Αυτοί οι συλλέκτες είναι εξοπλισμένοι με κυλινδρικούς διάφανους γυάλινους σωλήνες διπλής επίστρωσης και κλειστό ενδιάμεσο χώρο κενού. Η διάταξη των ηλιακών συλλεκτών κενού του συστήματος αποτελείται από μια σειρά διάφανων σωλήνων τοποθετημένοι σε οριζόντιο πλέγμα, αγωγούς, αισθητήρες, πολλαπλασιαστές εισαγωγής/ εξαγωγής και βαλβίδες ρύθμισης της ροής. [17]

Ένα απλοποιημένο διάγραμμα ενός τέτοιου συστήματος μιας βαθμίδας παρουσιάζεται στην **Εικόνα 126**. Το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας αντλείται από μια υπόγεια δεξαμενή βάθους περίπου 10m και προθερμαίνεται από την απορριπτόμενη άλμη και από το αποσταγμένο νερό, το οποίο παράγεται στους εναλλάκτες θερμότητας αντίστροφης λειτουργίας. Η προθέρμανση του πραγματοποιείται σε εναλλάκτη θερμότητας αποστάγματος που έχει τοποθετηθεί στο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας. Εκεί το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας απορροφά την λανθάνουσα θερμότητα του υδρατμού που συμπυκνώνεται σε παραγόμενο απόσταγμα και ως αποτέλεσμα εξατμίζεται μερικώς. Το μίγμα της άλμης τροφοδοσίας με τον υδρατμό και τον αέρα αφήνει τον εναλλάκτη

θερμότητας αποστάγματος και εισέρχεται στον πρώτο θάλαμο κενού από τον οποίο εξέρχεται το μίγμα υδρατμού και αέρα και εισέρχεται στην αντλία εκτόξευσης ατμού. Παράλληλα, η άλμη τροφοδοσίας ρέει σε έναν εναλλάκτη θερμότητας αντίστροφης λειτουργίας για να θερμανθεί από την απορριπτόμενη άλμη του δεύτερου θαλάμου κενού και μετά από το πεδίο ηλιακών συλλεκτών. Καθώς ρέει εντός των σωλήνων της υπομονάδας των ηλιακών συλλεκτών, η άλμη τροφοδοσίας απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία και μετατρέπεται σε ένα θερμότερο μίγμα απορριπτόμενης άλμης, υδρατμού και αέρα το οποίο απελευθερώνεται μέσα στον δεύτερο θάλαμο κενού. Από αυτόν, η απορριπτόμενη άλμη αντλείται σε ένα διαθέσιμο μέρος ενώ το θερμό και υπό πίεση μίγμα του υδρατμού και του αέρα ρέει στην αντλία εκτόξευσης ατμού. Εκεί αφού αναμιχθεί με το αναρροφώμενο υπό κατάθλιψη μίγμα υδρατμού και αέρα που έρχεται από τον πρώτο θάλαμο κενού, εισέρχεται στον εναλλάκτη θερμότητας αποστάγματος όπου ο υδρατμός συμπυκνώνεται σε παραγόμενο αποσταγμένο νερό και ο αέρας εξαερώνεται μέσω ενός συστήματος αντλιών. Τέλος, το παραγόμενο νερό στον εναλλάκτη θερμότητας αποστάγματος κατευθύνεται σε μια υπόγεια δεξαμενή αποθήκευσης όπου θα διανεμηθεί για χρήση. Η ομαλή λειτουργία του συστήματος εξασφαλίζεται από βαρομετρικές στήλες νερού με ρυθμισμένα επίπεδα και δεν παρουσιάζονται στο σχηματικό διάγραμμα. [17]

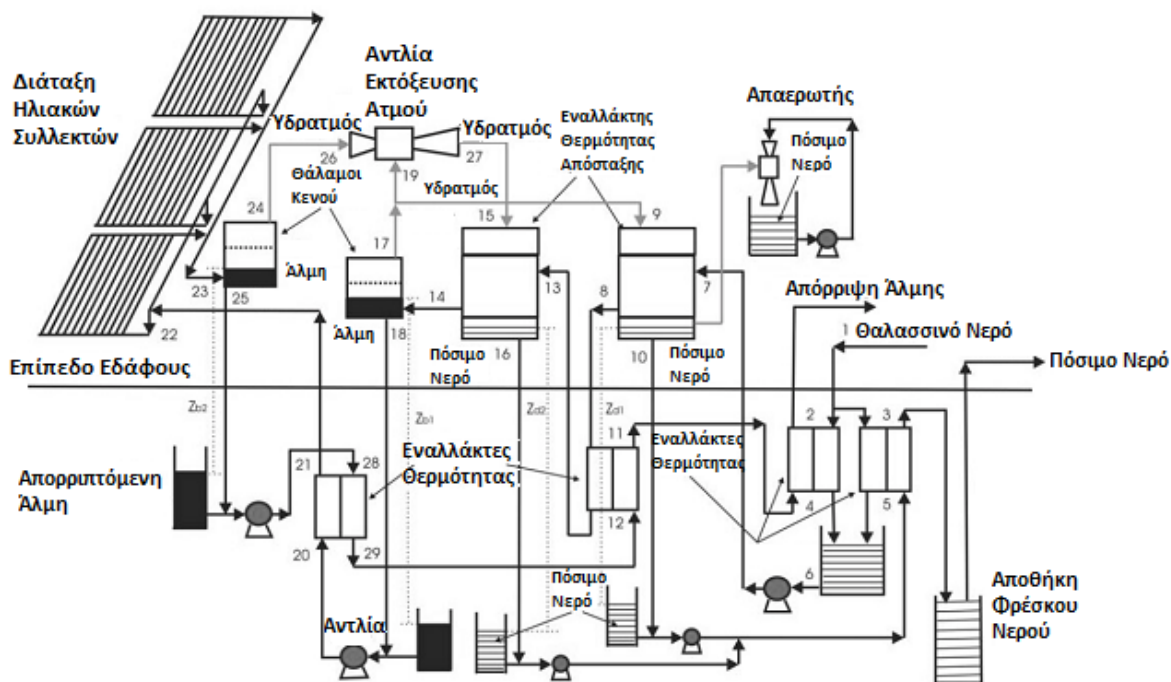


**Εικόνα 126:** Σχηματική Απεικόνιση Συστήματος Μιας Βαθμίδας Ηλιακής Βαρομετρικής Αφαλάτωσης με Χρήση Θερμικής Συμπύεσης Υδρατμού (TVC). [17]



Το αντίστοιχο σύστημα δυο βαθμίδων παρουσιάζεται στην **Εικόνα 127**. Το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας αντλείται από μια υπόγεια δεξαμενή βάθους περίπου 10m και προθερμαίνεται από την απορριπτόμενη άλμη και από το αποσταγμένο νερό, το οποίο παράγεται στους εναλλάκτες θερμότητας αντίστροφης λειτουργίας. Η προθέρμανση του πραγματοποιείται σε εναλλάκτη θερμότητας αποστάγματος που έχει τοποθετηθεί στο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας. Εκεί το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας θερμαίνεται απορροφώντας την λανθάνουσα θερμότητα του υδρατμού που συμπυκνώνεται σε παραγόμενο απόσταγμα. Στη συνέχεια ακολουθεί περεταίρω θέρμανσή του καθώς ρέει εντός του δεύτερου εναλλάκτη θερμότητας απορριπτόμενης άλμης και νερού τροφοδοσίας με αντίστροφη λειτουργία και εισέρχεται στον δεύτερο εναλλάκτη θερμότητας αποστάγματος, όπου απορροφώντας τη λανθάνουσα θερμότητα του υδρατμού που συμπυκνώνεται σε παραγόμενο απόσταγμα εξατμίζεται μερικώς. Το μίγμα άλμης τροφοδοσίας, υδρατμού και αέρα εξέρχεται από τον δεύτερο εναλλάκτη θερμότητας αποστάγματος και εισέρχεται στον δεύτερο θάλαμο κενού όπου χωρίζεται σε δύο ρεύματα: στο μίγμα υδρατμού και αέρα, το οποίο κατευθύνεται στην αντλία του εκτοξευτήρα ατμού και στον πρώτο εναλλάκτη θερμότητας αποστάγματος και στην άλμη τροφοδοσίας η οποία θερμαίνεται από την κυκλοφορία της στον εναλλάκτη θερμότητας απορριπτόμενης άλμης και άλμης τροφοδοσίας με αντίστροφη λειτουργία και την έπειτα εισαγωγή της στην υπομονάδα των ηλιακών συλλεκτών. Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τους σωλήνες ροής των ηλιακών συλλεκτών μετατρέπουν την άλμη τροφοδοσίας σε ένα θερμότερο μίγμα απορριπτόμενης άλμης, υδρατμού και αέρα το οποίο απελευθερώνεται από την διάταξη των ηλιακών συλλεκτών στον δεύτερο θάλαμο κενού. Από εκεί, η απορριπτόμενη άλμη αντλείται σε ένα διαθέσιμο χώρο, ενώ το θερμό υπό πίεση μίγμα υδρατμού και αέρα ρέει στην αντλία του εκτοξευτήρα ατμού και αφού αναμιχθεί με το αναρροφώμενο υπό κατάθλιψη μίγμα υδρατμού και αέρα που έρχεται από τον πρώτο θάλαμο κενού, εισέρχεται στον δεύτερο εναλλάκτη θερμότητας αποστάγματος όπου ο υδρατμός συμπυκνώνεται σε παραγόμενο αποσταγμένο νερό και ο αέρας εξαερώνεται μέσω ενός συστήματος αντλιών. [17]

Το παραγόμενο αποσταγμένο νερό και από τους δυο εναλλάκτες θερμότητας αποστάγματος κατευθύνεται σε μια υπόγεια δεξαμενή αποθήκευσης από όπου διατίθεται για χρήση. Και σε αυτή την διάταξη η ομαλή λειτουργία εξασφαλίζεται από βαρομετρικές στήλες νερού με ρυθμισμένα επίπεδα που δεν παρουσιάζονται στο σχηματικό διάγραμμα. [17]



**Εικόνα 127:** Σχηματική Απεικόνιση Συστήματος Δύο Βαθμίδων Ηλιακής Βαρομετρικής Αφαλάτωσης με Χρήση Θερμικής Συμπύεσης Υδρατμού(TVC). [17]

Μπορεί τα συστήματα ηλιακής βαρομετρικής αφαλάτωσης με χρήση θερμικής συμπύεσης υδρατμού να έχουν ως κινητήρια ενέργεια την ηλιακή, ωστόσο, η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη για την άντληση όλων των απαραίτητων υγρών, δηλαδή, του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας, του παραγόμενου αποστάγματος και της απορριπτόμενης άλμης, καθώς επίσης και για την λειτουργία του συστήματος απαέρωσης και όλων των μονάδων ελέγχου του συστήματος. [17]

Γενικότερα, αυτού του είδους τα συστήματα φαίνεται να συγκεντρώνουν το ενδιαφέρον λόγω του καλύτερου βαθμού απόδοσης σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα θερμικής συμπύεσης. Ακόμα, το γεγονός ότι μπορούν να λειτουργήσουν και με άλλες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, εκτός της ηλιακής, τα καθιστά ιδανικά τόσο για απομακρυσμένες και άγονες περιοχές όσο και για περιοχές χωρίς άμεση πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο. Τέλος, παρότι η μελέτη των ηλιακών θερμικών συστημάτων συμπύεσης υδρατμού πραγματοποιήθηκε για υπόγεια διάταξη, τα συστήματα με διάταξη πάνω από το έδαφος ακολουθούν την ίδια διαδικασία. [17]

### 3.2.5 Ηλιακή Μηχανική Συμπύεση Υδρατμού (Solar Mechanical Vapor Compression)

Η μηχανική συμπύεση υδρατμού (MVC) αποτελεί μια αρκετά ελκυστική τεχνολογία κατάλληλη για τον σχεδιασμό μονάδων αφαλάτωσης μικρής δυναμικότητας με έναν λογικό βαθμό κινητικότητας και συμπαγούς κατασκευής. Συνεπώς, ο συνδυασμός της με την ηλιακή ενέργεια εμφανίζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για περαιτέρω μελέτη.

Η μηχανική συμπύεση υδρατμού (MVC) ανήκει στην κατηγορία θερμικών διεργασιών και μπορεί να κάνει έμμεση χρήση της ηλιακής ενέργειας. Ωστόσο, η κατασκευή ενός αυτόνομου συστήματος που να εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από την ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι πρακτικά εφικτή. Αυτό οφείλεται στον μεγάλο αριθμό μπαταριών που είναι απαραίτητες ως εφεδρεία του συστήματος κατά τις βραδινές ώρες ή τις ώρες που δεν θα υπάρχει ηλιοφάνεια, το μεγάλο κόστος συντήρησης και εγκατάστασης καθώς και την μικρή του αξιοπιστία. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω στοιχεία, ένα ηλιακό σύστημα μηχανικής συμπύεσης με παράλληλη χρήση γεννήτριας αποτελεί την ιδανική επιλογή για να παρέχει με πόσιμο νερό μικρές κοινότητες αλλά και ταυτόχρονα να παράγει αρκετή ενέργεια για τη στέγαση φορέων εκμετάλλευσης και λειτουργίας των σταθμών με ελάχιστη περιβαλλοντική επιβάρυνση. Η μελέτη ενός τέτοιου συστήματος θα ακολουθήσει παρακάτω. [18]

Ένα υβριδικό ηλιακό σύστημα αφαλάτωσης με μηχανική συμπύεση υδρατμού (MVC) και χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων, γεννήτριας και εναλλακτών τύπου πλάκας για την ανάκτηση της θερμότητας, αποτελεί τον ιδανικό συνδυασμό για τους παρακάτω λόγους [18]:

- Μείωση των εκπομπών των αερίων καύσης.
- Συμπαγής κατασκευή με περιορισμένες ανάγκες για την επιφάνεια του εδάφους.
- Το σύστημα μπορεί να βασιστεί σε σχεδιασμό πακέτου και έτσι καθίσταται εύκολο στην διάλυση, την τοποθέτηση αλλά και την μεταφορά του.
- Χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις.
- Δεν υπάρχει ανάγκη επιπλέον θέρμανσης, δηλαδή επιπλέον χρήση boiler ή ηλεκτρικών θερμαντήρων.
- Ευκολία στην λειτουργία και την συντήρηση.
- Υψηλή αξιοπιστία και αντοχή χαρακτηρίζουν τα συστήματα μηχανικής συμπύεσης υδρατμού που βρίσκονται σε εξέδρες ανοιχτής θάλασσας.
- Καταλληλότητα για μονάδες μικρής δυναμικότητας που μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες μιας μικρής κοινότητας.
- Περιορισμένες δυνατότητες πρόσληψης.
- Ευνοϊκά χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας.
- Η εξάτμιση λαμβάνει χώρα σε μειωμένες θερμοκρασίες, γεγονός που ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο διάβρωσης και δημιουργίας ιζημάτων.

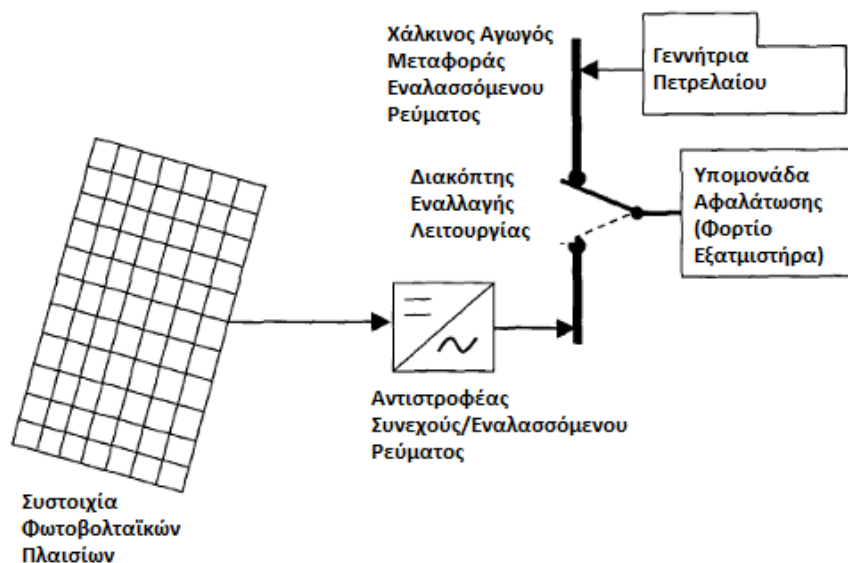
- Απλός εξοπλισμός χημικής επεξεργασίας.
- Πολλά από τα εξαρτήματα του συστήματος μπορούν να βρεθούν ανεξάρτητα στην αγορά έτσι η συναρμολόγησή του είναι εφικτή ακόμα και σε τοπικό επίπεδο.

Γενικότερα, τα χαρακτηριστικά του συστήματος τείνουν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις της συμπαγούς κατασκευής, της εύκολης λειτουργίας, της ενεργειακής αποδοτικότητας και της περιβαλλοντικής ασφάλειας. Για τον λόγο αυτό, πραγματοποιείται η επιλογή εξατμιστήρα τύπου ψεκασμού με οριζόντιους σωλήνες καθώς και εναλλακτών θερμότητας τύπου πλάκας για την ανάκτηση της θερμικής ενέργειας. Επίσης, η επιλογή τιτανίου για το υλικό κατασκευής των σωλήνων και των εναλλακτών καθώς και ανοξείδωτου αδρανοποιημένου χάλυβα για το κέλυφος του εξατμιστήρα καταπολεμά την διάβρωση και βελτιώνει την οικονομία του συστήματος. Η απουσία της μονάδας απαέρωσης και η λειτουργία του εξατμιστήρα για χαμηλές θερμοκρασίες άλμης ελαχιστοποιούν τον κίνδυνο διάβρωσης και σχηματισμού ιζημάτων και εξαλείφουν την ανάγκη εξειδικευμένης εργασίας για την διεξαγωγή καθαρισμού με οξύ, ενώ αντί αυτού, ένα απλό σύστημα δοσομετρητή οξέως μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Ωστόσο, η ποινή είναι ένας σχετικά χαμηλός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, η ανάγκη για ένα σύστημα κενού και ο χειρισμός μεγαλύτερων όγκων υδρατμού από τον συμπιεστή. Παρόλα αυτά, η χρήση των συμπιεστών τύπου ανεμιστήρα επιτρέπουν την εφαρμογή υψηλότερων βαθμών συμπίεσης με περιορισμένη αύξηση του κόστους επένδυσης του συμπιεστή. [18]

Μια ακόμα παρατήρηση όσον αφορά την επιλογή υλικών, είναι ότι το επιπλέον κόστος των σωλήνων τιτανίου σε σχέση με αυτούς από κράμα χαλκού-νικελίου εξοικονομείται από την χρήση λεπτότερων σωλήνων και εναλλακτών θερμότητας από τιτάνιο. Το τιτάνιο είναι λιγότερο πυκνό σε σχέση με τα κράματα χαλκού και περισσότερο ανθεκτικό στην διάβρωση από επιθετικά και διαβρωτικά μέσα που συναντάμε στην διεργασία της αφαλάτωσης. [18]

Η χρήση ενός τέτοιου υβριδικού συστήματος μειώνει την μόλυνση του αέρα και βοηθά στη μείωση του φαινομένου του θερμοκηπίου, εξοικονομεί τον ατμοσφαιρικό οξυγόνο και μειώνει τα έξοδα συντήρησης και λειτουργίας. [18]

Η συνδεσμολογία για το σύστημα παρουσιάζεται στην **Εικόνα 128**. Για την μεγαλύτερη ευελιξία του συστήματος προτείνεται η χρήση μιας ηλιακής διάταξης και μιας γεννήτριας πετρελαίου για κάθε έναν εξατμιστήρα και καθεμία μονάδα στέγασης καθώς έτσι μειώνεται η ταλαιπωρία σε περίπτωση διακοπής του ρεύματος. Παρακάτω παρατίθεται μόνο η συνδεσμολογία των φωτοβολταϊκών με την υπομονάδα αφαλάτωσης. [18]



**Εικόνα 128:** Προτεινόμενη Συνδεσμολογία για Υβριδικό Σύστημα Αφαλάτωσης με Μηχανική Συμπίεση Υδρατμού (MVC). [18]

Η συστοιχία των φωτοβολταϊκών στοιχείων τροφοδοτεί την μονάδα αφαλάτωσης με την απαιτούμενη ενέργεια, ενώ κατά την διάρκεια της νύχτας ή μέρες χωρίς ηλιοφάνεια αναλαμβάνει λειτουργία η γεννήτρια πετρελαίου. Το ρεύμα που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία περνάει από τον αντιστροφέα ρεύματος και αφού μετατραπεί σε εναλλασσόμενο ρεύμα είναι έτοιμο για χρήση από την μονάδα αφαλάτωσης. Στην συνέχεια η διεργασία που ακολουθείται στην υπομονάδα αφαλάτωσης δεν διαφέρει από την αντίστοιχη της συμβατικής. Το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας αντλείται στο σύστημα και διαχωρίζεται σε δυο ρεύματα. Το πρώτο περνάει εντός των σωλήνων του συμπυκνωτή και ανακτά την λανθάνουσα θερμότητα που παράγεται κατά την δημιουργία υδρατμών στο εξωτερικό της επιφάνειας των σωλήνων του συμπυκνωτή. Έτσι, αυξάνεται η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας. Στην συνέχεια ακολουθεί περαιτέρω θέρμανση του ήδη θερμού θαλασσινού νερού σε εναλλάκτη θερμότητας, αφού εκεί έρχεται σε επαφή με το θερμό ρεύμα της άλμης που αφήνει τον εξατμιστήρα. Το δεύτερο ρεύμα θερμαίνεται στον δεύτερο εναλλάκτη θερμότητας αφού εκεί έρχεται σε επαφή με το θερμό απόσταγμα που αφήνει τον θάλαμο υδρατμού στον εξατμιστήρα. [18]

Τα δυο αυτά ρεύματα αφήνουν τους εναλλάκτες και αφού αναμιχθούν σε ένα πια ρεύμα εισέρχονται στην πισίνα άλμης του εξατμιστήρα. Μια αντλία ανακύκλωσης αντλεί νερό από την πισίνα της άλμης και το ψεκάζει μέσω ακροφυσίων στην εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων οριζόντιας διάταξης του εξατμιστήρα, με σκοπό το σχηματισμό μιας λεπτής στοιβάδας. Η εξάτμιση πραγματοποιείται στο εξωτερικό των σωλήνων, καθώς η λεπτή στοιβάδα άλμης απορροφά όλη την λανθάνουσα θερμότητα από την συμπύκνωση των υδρατμών που πραγματοποιείται εντός των σωλήνων. [18]

### 3.2.6 Ηλιακή Συμπύεση Υδρατμού με Απορρόφηση (Solar Absorption Vapor Compression)

Η χρήση των συστημάτων συμπύεσης υδρατμού (AbVC) για την διεργασία της αφαλάτωσης είναι ευρέως γνωστή. Τα συστήματα αυτά, όμως, χρησιμοποιούν για ψυκτικά μέσα χλωροφθοράνθρακες (CFC), οι οποίοι ως γνωστόν είναι οι κύριοι υπεύθυνοι για την καταστροφή του στρώματος του όζοντος. Για τον λόγο αυτό, πρόσφατα αντικαταστάθηκαν στα συστήματα συμπύεσης υδρατμού με του υδροφθοράνθρακες (HFC). Ωστόσο, η χρήση αυτών των ψυκτικών μέσων έχει ως αποτέλεσμα πτώση 5-10% στην αποδοτικότητα και στην δυναμικότητα του συστήματος. Επιπλέον, οι υδροφθοράνθρακες (HFC) είναι ακριβότεροι στην παραγωγή τους σε σχέση με τους χλωροφθοράνθρακες (CFC). Επιπλέον, συστήματα επανασυμπύεσης υδρατμού χρησιμοποιήθηκαν για την διεργασία αφαλάτωσης, χωρίς όμως τα επιθυμητά αποτελέσματα. Τόσο τα συστήματα συμπύεσης όσο και τα συστήματα επανασυμπύεσης υδρατμού τροφοδοτούνταν από το ηλεκτρικό δίκτυο και οι συντελεστές απόδοσής τους παρουσιάζονταν χαμηλή όταν οι ανεπάρκειες της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνονταν υπόψη, ενώ παράλληλα είχαν πολύ υψηλά κόστη συντήρησης. [19]

Τα συστήματα απορρόφησης (AbVC) συγκέντρωσαν το ενδιαφέρον μελέτης καθώς χρησιμοποιούν φιλικά προς το περιβάλλον ψυκτικά μέσα, όπως το νερό, και η χρήση τους σε συστήματα συμπύεσης ή επανασυμπύεσης μείωσε σημαντικά τις εκπομπές του συστήματος σε CO<sub>2</sub>. Παρακάτω θα πραγματοποιηθεί ανάλυση διάφορων διαρρυθμίσεων αφαλάτωσης με χρήση των καινοτομικών συστημάτων απορρόφησης (AbVC). Το σύστημα απορρόφησης (AbVC) μπορεί να τροφοδοτηθεί από κάποια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, εν προκειμένω την ηλιακή ενέργεια, ή από μια υβριδική μέθοδο, δηλαδή παράλληλη χρήση ηλιακής ενέργειας και καυσίμων. Τα συστήματα απορρόφησης (AbVC) παρουσιάζουν μερικά ελκυστικά χαρακτηριστικά όπως ο υψηλός βαθμός απόδοσης, δεν απαιτείται καμία προεργασία ή χημική επεξεργασία, η εξαγωγή του νερού γίνεται σε χαμηλές θερμοκρασίες, απουσία ιζηματοποίησης αλλά και ελάχιστη διάβρωση. Επιπλέον, η διαδικασία συγκέντρωσης του συστήματος απορρόφησης πραγματοποιείται κοντά στην ατμοσφαιρική θερμοκρασία με το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτείται καμία επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Αυτό το σύστημα είναι αθόρυβο και απαιτεί ελάχιστη συντήρηση. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι η ηλιακή ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί υπό τη μορφή συγκεντρωμένου απορροφούμενου διαλύματος και το διάλυμα αυτό μπορεί να αναγεννηθεί για θερμοκρασία δωματίου και έναν αόριστο χρόνο χωρίς να απαιτείται μακροχρόνια δυνατότητα αποθήκευσης. Ακόμα, είναι ελκυστικό όσον αφορά τον τομέα του περιβάλλοντος γιατί το υγρό αποθήκευσης που χρησιμοποιεί είναι το νερό. [19]

Ο βασικός κύκλος ενός συστήματος απορρόφησης για αφαλάτωση του νερού παρουσιάζεται στην **Εικόνα 129**. Το σύστημα αποτελείται από μια

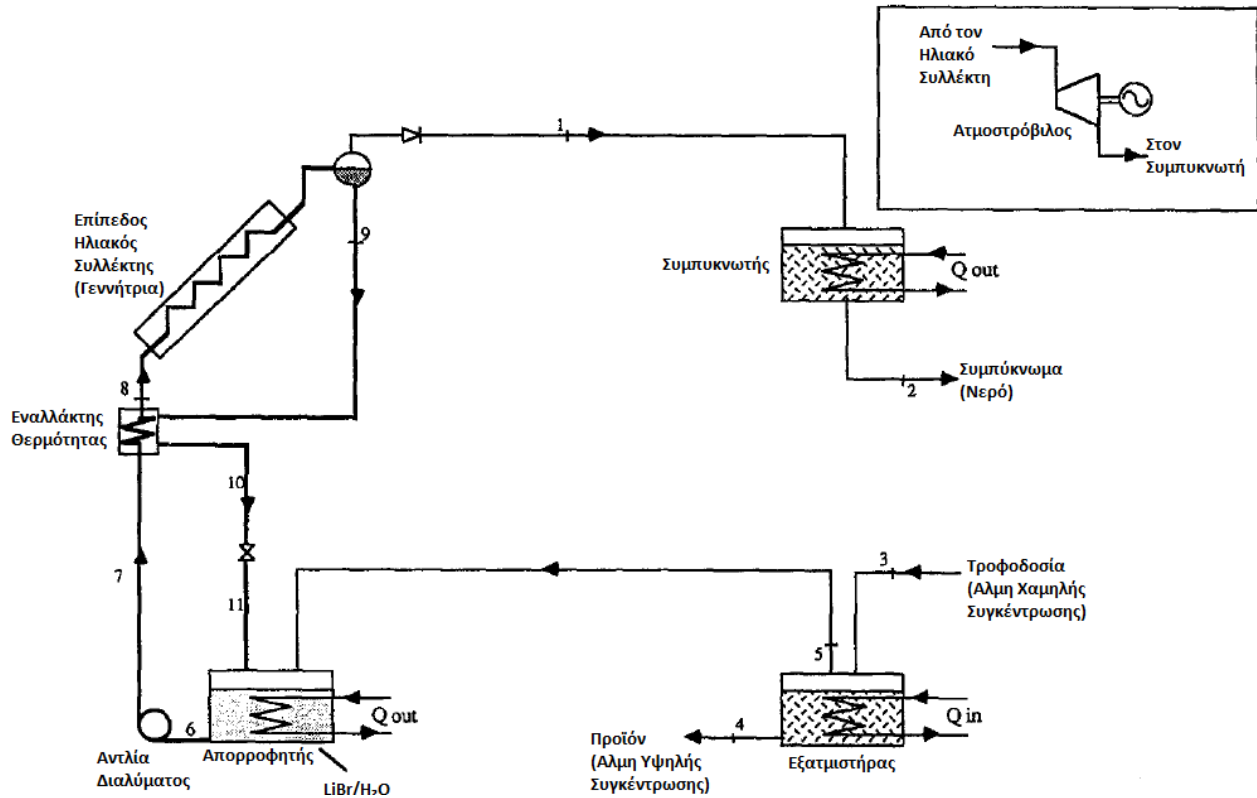
γεννήτρια/ηλιακό συλλέκτη, στην περίπτωση μας είναι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες, έναν απορροφητή, έναν συμπυκνωτή και έναν εξατμιστήρα. [19]

Το σύστημα λειτουργεί σε ανοιχτό κύκλο. Αρχικά, η άλμη τροφοδοτεί τον εξατμιστήρα, όπως φαίνεται στην γραμμή 3 του σχήματος. Η θερμότητα που εξάγεται από τον εξατμιστήρα προκαλεί την εξάτμιση του νερού. Ο υδρατμός που παράγεται από τον εξατμιστήρα απορροφάται από το διάλυμα λιθουόχου βρωμίου (LiBr) στον απορροφητή και έτσι δημιουργείται θερμότητα μέσω της διαδικασίας απορρόφησης. Η αντλία λαμβάνει ένα "αδύναμο" διάλυμα από τον απορροφητή, γραμμή 6 του σχήματος, και στην συνέχεια ανυψώνει την πίεσή του και το παραδίδει στην γεννήτρια/ηλιακό συλλέκτη μέσω της γραμμής 8. Η ηλιακή ενέργεια θερμαίνει το υγρό διάλυμα στην γεννήτρια και αυτό αποβάλλει τον υδρατμό που είχε προσληφθεί από το υγρό απορρόφησης. [19]

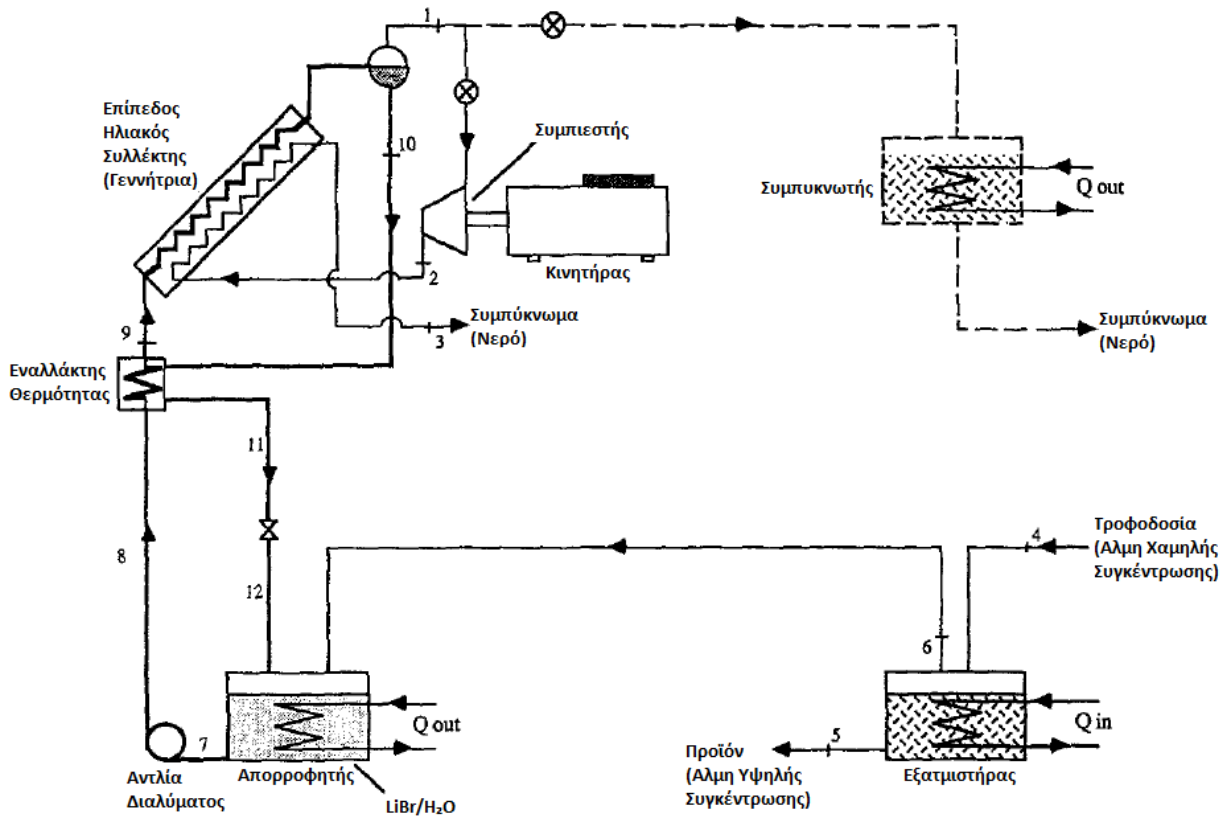
Ο υδρατμός αυτός είτε οδηγείται κατευθείαν μέσα στο σπείρωμα του συμπυκνωτή, είτε χρησιμοποιείται για να οδηγήσει μια τουρμπίνα ή μια διάταξη θετικής μετατόπισης, έτσι παράγει μηχανική ενέργεια και άρα ηλεκτρισμό. Το συμπύκνωμα, δηλαδή το αποσταγμένο νερό, αφήνει το σύστημα δια μέσου της γραμμής 2 του σχήματος. Το "ισχυρό" διάλυμα επιστρέφει στον απορροφητή, μέσω της γραμμής 11, αφού περάσει πρώτα μέσα από μια βαλβίδα εκτόνωσης. Το "αδύναμο" διάλυμα, μέσω της γραμμής 7, περνάει από τον απορροφητή μέσα από τον εναλλάκτη θερμότητας για να ανακτήσει την θερμότητα από το "ισχυρό" διάλυμα, που έρχεται από την γραμμή 9. Ο εναλλάκτης θερμότητας αποτελείται από μια μήτρα πυκνής διάταξης φύλλων μετάλλου. Το συμπυκνωμένο προϊόν, δηλαδή η συμπυκνωμένη άλμη, αφήνει το σύστημα δια μέσου της γραμμής 4. Οι ορολογίες "ισχυρό" και "αδύναμο" διάλυμα αναφέρονται στην υψηλή και χαμηλή συγκέντρωση, αντίστοιχα, του υγρού απορρόφησης στο μίγμα. [19]

Το σύστημα μπορεί να τροφοδοτηθεί και με υβριδικές μεθόδους. Για παράδειγμα, το σύστημα απορρόφησης μπορεί να συνδυαστεί με μια μονάδα επανασυμπίεσης υδρατμού, όπως στην **Εικόνα 130**. Η μονάδα επανασυμπίεσης υδρατμού μπορεί να οδηγηθεί από μια κινητήρια μονάδα, όπως ένας κινητήρας αερίου, όταν δεν είναι διαθέσιμη η ηλιακή ενέργεια. [19]

Το σύστημα απορρόφησης (AbVC) μπορεί να έχει τη μορφή μιας περιστροφικής μονάδας, όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 131**. Στην περίπτωση αυτή, η χρήση θα μπορούσε να γίνει από την εντατικοποίηση της διεργασίας, η οποία εκμεταλλεύεται την ακτινική ροή που παράγεται από την φυγόκεντρο δύναμη. Η εντατικοποίηση της διεργασίας επιτρέπει τεράστια μείωση του μεγέθους, του βάρους και του κόστους του συστήματος σε σχέση με τις συμβατικές σχεδιαστικές προσεγγίσεις. Πολλές από τις σωληνώσεις και τους εναλλάκτες μπορούν να απαλειφθούν από το σύστημα. [19]

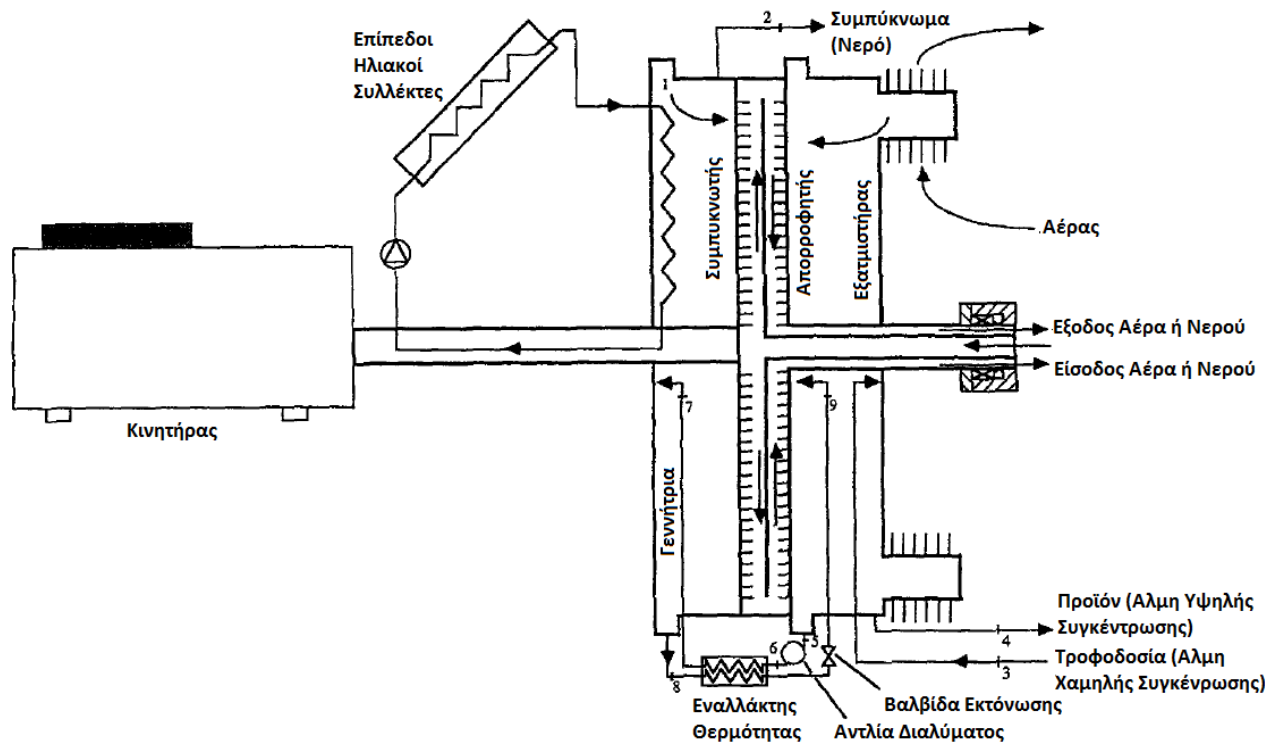


Εικόνα 129: Σύστημα Ηλιακής Αφαλάτωσης Μιας Βαθμίδας με Απορρόφηση (AbVC). [19]



Εικόνα 130: Υβριδικό Σύστημα Ηλιακής Αφαλάτωσης με Απορρόφηση (SAbVC). [19]





**Εικόνα 131:** Περιτροφική Μονάδα Αφαλάτωσης Μιας Βαθμίδας με Απορρόφηση(abVC). [19]

Αναφορικά, από θερμοδυναμική μελέτη που έγινε για τα συστήματα των **Εικόνων 129** και **131** βρέθηκε θερμικός συντελεστής απόδοσης ίσος με 1,04. Αντίστοιχα, για το υβριδικό σύστημα της **Εικόνα 130** υπολογίστηκε 7,9 για θερμοκρασίες εξατμιστήρα και απορροφητή 20 και 40°C αντίστοιχα., αλλά και θερμοκρασία γεννήτριας 80°C. [19]

### 3.2.7 Ηλιακή Συμπύεση Υδρατμού με Προσρόφηση (Solar Adsorption Vapor Compression)

Η χρήση ορυκτών καυσίμων σε συστήματα αφαλάτωσης έρχεται σε αντίθεση με την φύση της διεργασίας που έχει σαν σκοπό της την προστασία του περιβάλλοντος και την αντιμετώπιση των κλιματικών αλλαγών. Η αφθονία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και κυρίως της ηλιακής ενέργειας στρέφει το ενδιαφέρον μελέτης στον συνδυασμό της με τα συστήματα αφαλάτωσης. Μια αρκετά ελκυστική μέθοδος που εκπληρώνει αυτές τις προδιαγραφές είναι η ηλιακή συμπύεση του υδρατμού με προσρόφηση (SAdVC). [20]

Αυτού του τύπου συστήματα αφαλάτωσης είναι συνδυασμός μιας μονάδας αφαλάτωσης πολλαπλής εξάτμισης και μιας αντλίας προσρόφησης θέρμανσης ανοιχτού κύκλου με χρήση εσωτερικής ανάκτησης θερμότητας. Χαρακτηριστική λειτουργία της αντλίας αυτής είναι η εκτόνωση, μέσω της οποίας τροφοδοτεί τη μονάδα αφαλάτωσης πολλαπλής εξάτμισης με ατμό και θαλασσινό νερό. Η διαρρύθμιση αυτή είναι μια καινοτομική θερμική τεχνική αφαλάτωσης που προσφέρει πολλά υποσχόμενες δυνατότητες για ανάπτυξη. [20]

Το σύστημα αφαλάτωσης περιλαμβάνει έναν εξατμιστήρα, ο οποίος βρίσκεται ανάμεσα σε δυο αντιδραστήρες γεμάτους με προσροφητικό υλικό, και μια μονάδα αφαλάτωσης, στην παρούσα ανάλυση τριών βαθμίδων όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 132**. Ως στερεό προσροφητικό υλικό, ο ζεόλιθος επιλέχτηκε για τις μοναδικές προσροφητικές ιδιότητές του σε σύγκριση με άλλα προσροφητικά μέσα. Το όνομα "ζεόλιθος" έχει αρχαία ελληνική ρίζα και σημαίνει "πέτρα που βράζει", υποδηλώνοντας ουσιαστικά την φύση των ιδιοτήτων του. Γενικά, αναφέρεται σε ένα κρυσταλλικό μεταλλικό αργιλοπυριτικό υλικό με μικροσκοπικού μεγέθους, αλλά ακριβούς γεωμετρίας δομή πόρων. [20]

Η διαδικασία ανάκτησης θερμότητας που προτείνεται στηρίζεται στην ιδέα του θερμικού κύματος. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει στην θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας, η οποία απορρίπτεται από το κρεβάτι ψύξης, να χρησιμοποιηθεί άμεσα από το δεύτερο κρεβάτι που απαιτεί υψηλής θερμοκρασίας θερμότητα. Όσον αφορά τη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα του κρεβατιού, ο προσροφητής και το υγρό που δρα ως εναλλάκτης θερμότητας μπορεί να κατασκευαστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε η αντίσταση μεταφοράς θερμότητας από το υγρό στο προσροφητικό μέσο να είναι μικρότερη από την αντίσταση κατά μήκος της διαδρομής του ρευστού. Υπό αυτές τις συνθήκες, σχηματίζεται ένα μέτωπο θερμοκρασίας στο υγρό και στο κρεβάτι προσρόφησης και αυτό το κύμα κινείται αργά κατά μήκους του κρεβατιού. [20]

Επιπλέον, ο εξατμιστήρας και η πρώτη βαθμίδα του συστήματος πολλαπλής εξάτμισης είναι συνδεδεμένα με τα δυο κρεβάτια προσρόφησης και υποβάλλονται υπό την ίδια πίεση. Έτσι, θεωρητικά περιορίζεται ο κύκλος προσρόφησης- εκρόφησης σε μια βαθμίδα λειτουργώντας εναλλακτικά στην προσρόφηση και εκρόφηση. Με τον τρόπο αυτό τα δυο κρεβάτια λειτουργούν ως θερμικοί συμπιεστές υδρατμού. [20]

Το υγρό μεταφοράς θερμότητας ρέει εντός των σωλήνων των κρεβατιών προσρόφησης και δεν έρχεται σε άμεση επαφή με το προσροφητικό υλικό πλήρωσης του χώρου μεταξύ των σωλήνων. Το υγρό μεταφοράς θερμότητας κυκλοφορεί εντός των κρεβατιών και των εναλλακτών θερμότητας μέσω μιας αντιστρεπτής αντλίας. Εναλλακτικά, η θέρμανση και η ψύξη των κρεβατιών πραγματοποιείται από την αλλαγή της κατεύθυνσης της ροής του υγρού μεταφοράς θερμότητας. [20]

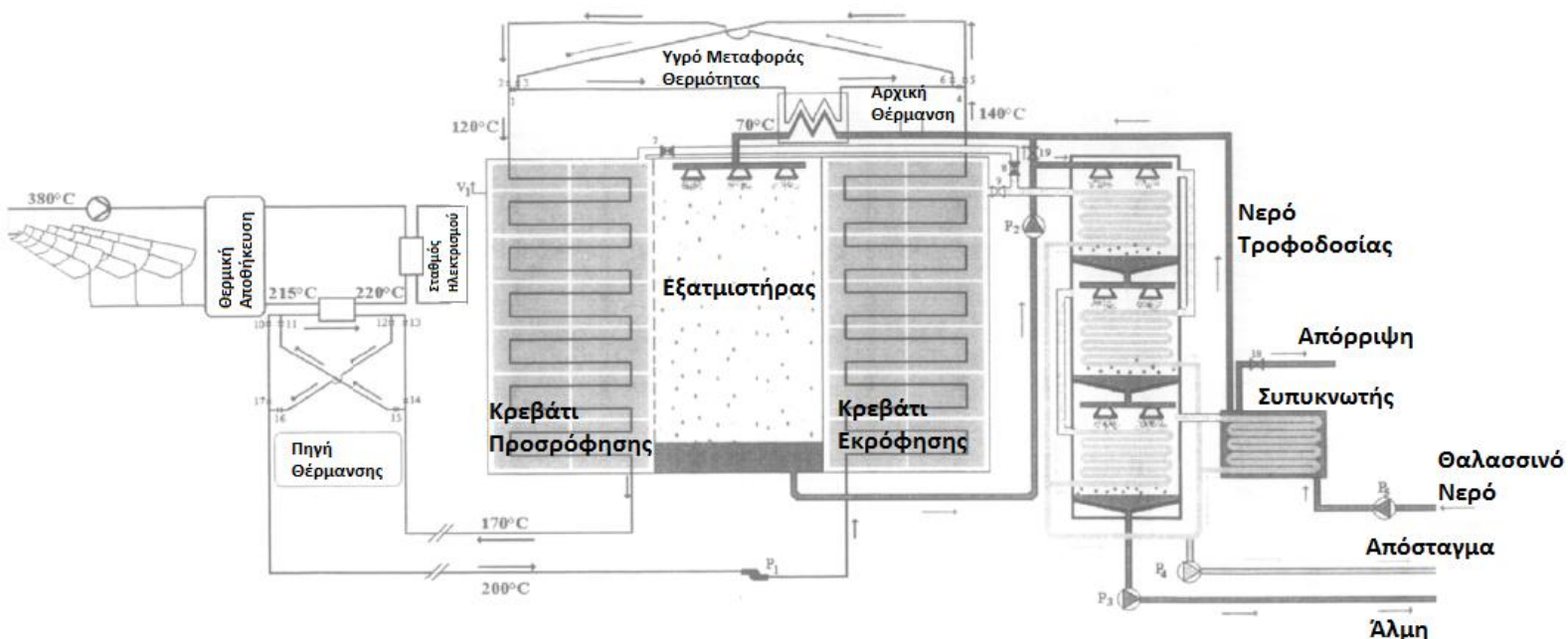
Οι ηλιακοί παραβολικοί συλλέκτες θερμαίνουν το υγρό μεταφοράς θερμότητας. Η εξισορροπημένη λειτουργία του συστήματος εξασφαλίζεται από την ύπαρξη της αποθήκης θερμότητας καθώς και ενός επιπλέον θερμαντήρα καυσίμων. [20]

Στο σύστημα που παρουσιάζεται στην **Εικόνα 132**, το νερό τροφοδοσίας προθερμαίνεται στον συμπυκνωτή, όπου ο ατμός που συμπυκνώνεται προέρχεται από την τελευταία βαθμίδα της μονάδας αφαλάτωσης πολλαπλής εξάτμισης. Πριν την εισαγωγή του στον εξατμιστήρα, το θαλασσινό νερό θερμαίνεται από το υγρό μεταφοράς θερμότητας. Όταν το υγρό μεταφοράς θερμότητας φτάσει την κατώτερή του θερμοκρασία, εισέρχεται σε αυτό το κρεβάτι το οποίο βρίσκεται στη φάση προσρόφησης και το ψύχει, έτσι ώστε να αφήσει στο κρεβάτι προσρόφησης την μεγαλύτερη δυνατή ποσότητα υδρατμού. [20]

Μια αντλία κενού διατηρεί μειωμένη την πίεση κάτω από αυτή που αντιστοιχεί στην πίεση κορεσμού του εισερχόμενου θαλασσινού νερού. Η μείωση της πίεσης στον εξατμιστήρα προκαλεί την εκτόνωση μιας μικρής ποσότητας του νερού σε υδρατμό, όπως ακριβώς πραγματοποιείται και μέσα σε μια βαθμίδα της μονάδας αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση. Η λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης παρέχεται από ισόποση μείωση της αισθητής θερμότητας του νερού που εξατμίζεται, και καταλήγει σε σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας του. [20]

Ο ατμός που παράγεται στον εξατμιστήρα εισέρχεται από την πλευρά του το κρεβάτι προσρόφησης, το οποίο βρίσκεται κατά την φάση προσρόφησης και έτσι προσροφάται. Η θερμότητα προσρόφησης αποβάλλεται από το κρεβάτι μέσω του υγρού μεταφοράς θερμότητας. Παράλληλα, το άνοιγμα της βαλβίδας 9 και το κλείσιμο των βαλβίδων 7 και 8 επιτρέπουν στον εκροφημένο ατμό που έρχεται από το δεύτερο κρεβάτι προσρόφησης να εισέλθει στην πρώτη βαθμίδα της μονάδας αφαλάτωσης με πολλαπλή εξάτμιση, η οποία στην παρούσα μελέτη διαθέτει συνολικά 3 βαθμίδες και χρησιμοποιεί την μέθοδο ψεκασμού σε οριζόντια συστοιχία σωλήνων. Ο ατμός συμπυκνώνεται σε μια συστοιχία σωλήνων που ψεκάζεται με νερό τροφοδοσίας. Η λανθάνουσα θερμότητα που απελευθερώνεται κατά την συμπύκνωση του υδρατμού επιτρέπει σε μέρος του νερού τροφοδοσίας που ψεκάζεται να εξατμίζεται στην κατώτερη θερμοκρασία και πίεση. [20]

Η ίδια διαδικασία συμπύκνωσης και εξάτμισης επαναλαμβάνεται στις βαθμίδες 2 και 3. Ο υδρατμός που παράγεται στην τρίτη βαθμίδα συμπυκνώνεται στον τελευταίο συμπυκνωτή, ο οποίος ψύχεται με θαλασσινό νερό. Το συλλεγόμενο αποσταγμένο νερό από τα διάφορα επίπεδα συμπύκνωσης εξάγεται με την βοήθεια μιας αντλίας αποστάγματος νερού, ενώ η άλμη εξάγεται από την τρίτη βαθμίδα μέσω μιας αντλίας άλμης. [20]



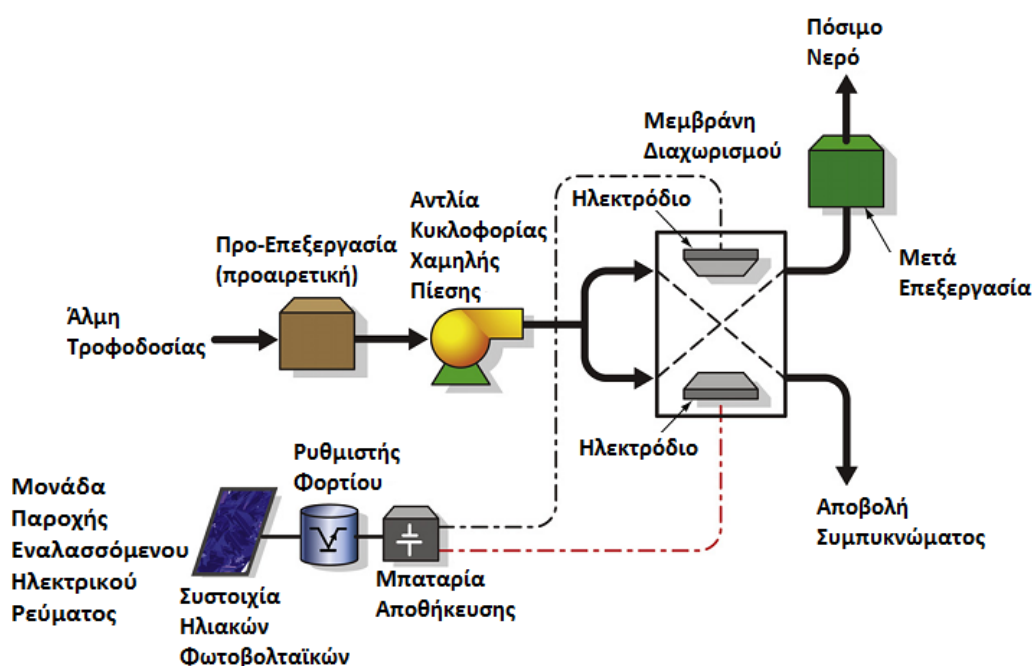
**Εικόνα 132:** Σύστημα Ηλιακής Αφαλάτωσης Συμπίεσης Υδρατμού με Προσρόφηση (SAVDC). [20]

Όλη η παραπάνω διαδικασία που μόλις περιγράφηκε αφορά τον μισό κύκλο, όπου στο κρεβάτι 1 πραγματοποιείται η προσρόφηση ενώ στο κρεβάτι 2 η εκρόφηση. Κατά τον άλλον μισό κύκλο, μόλις δηλαδή λάβει τέλος η παραπάνω διαδικασία, οι αντιστρεπτές αντλίες αντιστρέφουν την ροή κυκλοφορίας του ρευστού στο σύστημα. Το κρεβάτι προσρόφησης, το οποίο βρισκόταν σε φάση προσρόφησης, φέρεται σε μια υψηλότερη θερμοκρασία, αποσυνδέεται από τον εξατμιστήρα και συνδέεται στην πρώτη βαθμίδα του συστήματος πολλαπλής εξάτμισης. Έτσι, τώρα πια βρίσκεται στην φάση εκρόφησης. Το άλλο κρεβάτι προσρόφησης ψύχεται με την σειρά του, η σύνδεσή του με τον εξατμιστήρα γίνεται πια ανοιχτή, ενώ η σύνδεσή του με την πρώτη βαθμίδα του συστήματος πολλαπλής εξάτμισης κλείνει. Συνεπώς, αυτό το κρεβάτι βρίσκεται πια στην φάση της προσρόφησης. Μετά την ολοκλήρωση της δεύτερης φάσης του κύκλου λειτουργίας, η εγκατάσταση επιστρέφει στην αρχική της διαρρύθμιση. [20]

### 3.2.8 Ηλιακή Ηλεκτροδιάλυση (Solar Electrodialysis)

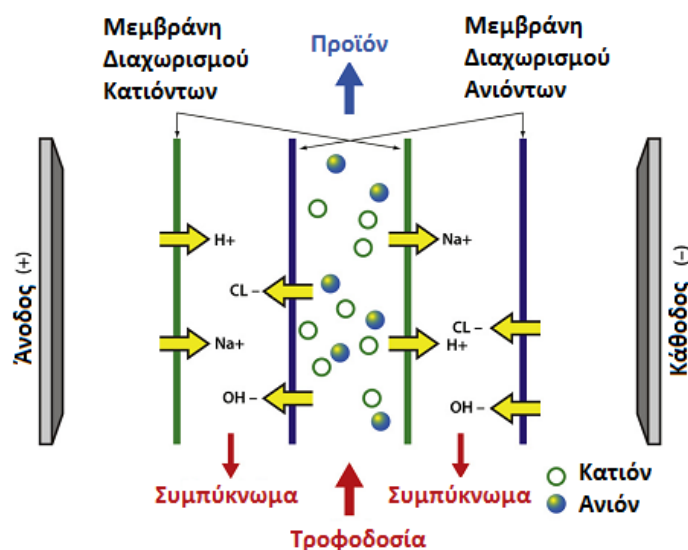
Μια μέθοδος αφαλάτωσης η οποία δεν αναπτύχθηκε μαζί με τις συμβατικές μεθόδους του **Κεφαλαίου 2** της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον ο έμμεσος συνδυασμός της με την ηλιακή ενέργεια, είναι αυτή της ηλεκτροδιάλυσης.

Η ηλεκτροδιάλυση (ED) είναι μια ηλεκτροχημική διεργασία και μια χαμηλού κόστους μέθοδος για την αφαλάτωση υφάλμυρου νερού. Λόγω της εξάρτησης της ενεργειακής κατανάλωσης της μεθόδου αυτής από την συγκέντρωση αλατότητας του νερού τροφοδοσίας, η ηλεκτροδιάλυση (ED) δεν θεωρείται οικονομικά ελκυστική για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού. Κατά την διεργασία ηλεκτροδιάλυσης (ED), τα ιόντα μεταφέρονται μέσω μιας μεμβράνης από το ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται κατά μήκος αυτής. Μια μονάδα ηλεκτροδιάλυσης(ED) αποτελείται από τα παρακάτω εξαρτήματα: το σύστημα προ-επεξεργασίας, την μεμβράνη διαχωρισμού, μια αντλία κυκλοφορίας χαμηλής πίεσης, το σύστημα τροφοδοσίας συνεχούς ρεύματος (ανορθωτής ή εν προκειμένω φωτοβολταϊκά στοιχεία) καθώς και ένα σύστημα επεξεργασίας του παραγόμενου νερού. Το σχηματικό διάγραμμα ενός τέτοιου συστήματος παρουσιάζεται στην παρακάτω **Εικόνα 133**. [21]



**Εικόνα 133:** Σχηματική Απεικόνιση Συστήματος Ηλιακής Ηλεκτροδιάλυσης (ED). [21]

Η βασική αρχή λειτουργίας ενός συστήματος αφαλάτωσης είναι αυτή που ακολουθεί: τα ηλεκτρόδια (γενικά κατασκευασμένα από νιόβιο ή τιτάνιο με πλατινένια επικάλυψη) είναι συνδεδεμένα με μια εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος όπως μπαταρίες ή φωτοβολταϊκά στοιχεία) σε ένα δοχείο αλμυρού νερού. Το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται μέσω του διαλύματος, με τα ιόντα να τείνουν να μεταναστεύσουν στο ηλεκτρόδιο με το αντίθετο φορτίο. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα κινούνται προς την κάθοδο, ενώ τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα στην άνοδο. Η αλατότητα του νερού απομακρύνεται καθώς το νερό διέρχεται μέσα από τις μεμβράνες επιλεκτικού διαχωρισμού που τοποθετούνται ανάμεσα στα δυο ηλεκτρόδια, όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. [6]



Εικόνα 134: Ανταλλαγή Ιόντων σε ένα Σύστημα Ηλεκτροδιάλυσης (ED). [22]

Αυτές οι μεμβράνες αποτελούνται από ένα επίπεδο φύλλο πολυμερούς το οποίο υπόκειται σε ειδική επεξεργασία ώστε να παράγονται μικρό ρωγμές ή χαραμάδες στην επιφάνειά τους. Αυτές οι μικρές σχισμές είναι που επιτρέπουν την μεταφορά των ιόντων, ενώ μικρά σημεία επιλεκτικής μεταφοράς των ιόντων είναι που ενισχύουν την ιδιότητα διαχωρισμού των μεμβρανών. Έτσι, οι μεμβράνες ανιόντων επιτρέπουν μόνο στα θετικά φορτισμένα ιόντα να περάσουν στο θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο, ενώ απορρίπτουν τα κατιόντα. Αντίστροφα, οι μεμβράνες κατιόντων επιτρέπουν στα αρνητικά φορτισμένα ιόντα να περάσουν στο αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο και απαγορεύουν στα ανιόντα. [22]

Μεταξύ κάθε ζεύγους μεμβρανών, ένα φύλλο κενού τοποθετείται για να αποτρέψει την κυκλοφορία του νερού κατά μήκος της επιφάνειας των μεμβρανών και για να μειώσει την δημιουργία της τύρβης. Ένα τέτοιο διαχωριστικό παρέχει ένα κανάλι μεταφοράς του νερού τροφοδοσίας και του παραγόμενου νερού αντίστοιχα, ενώ το επόμενο διαχωριστικό μεταφέρει την άλμη. Με βάση αυτή την διαρρύθμιση, το συμπυκνωμένο και το αραιωμένο διάλυμα δημιουργούνται στα διαχωριστικά μεταξύ των εναλλασσόμενων μεμβρανών. Οι θάλαμοι ηλεκτροδιάλυσης (ED) μπορούν να τοποθετηθούν είτε οριζόντια, είτε κάθετα. Πρακτικά, μερικά ζεύγη μεμβρανών χρησιμοποιούνται μεταξύ ενός μόνο ζευγαριού ηλεκτροδίων, δημιουργώντας έτσι μια διαρρύθμιση ηλεκτροδιάλυσης (ED). Το νερό τροφοδοσίας περνά ταυτόχρονα μέσα από κανάλια μεταξύ όλων των θαλάμων, παρέχοντας με αυτό τον τρόπο συνεχής ροή παραγόμενου νερού και άλμης εκτός των θαλάμων. Τα συστήματα ηλεκτροδιάλυσης (ED) που κυκλοφορούν στο εμπόριο, χρησιμοποιούν συνήθως μερικές εκατοντάδες ζεύγη θαλάμων. [22]

Μια διαφορετική διαρρύθμιση της διεργασίας ηλεκτροδιάλυσης (ED) είναι η αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση (ED). Το σύστημα ακολουθεί την ίδια αρχή

λειτουργίας μόνο που τα κανάλια προϊόντος και άλμης είναι ίδια στην κατασκευή τους. Σε αυτή την περίπτωση, η πόλωση των ηλεκτροδίων αλλάζει περιοδικά στον χρόνο αντιστρέφοντας έτσι την ροή μέσω των μεμβρανών. Αυτό εμποδίζει την εναπόθεση ιζημάτων και κολλοειδών ουσιών στις μεμβράνες χωρίς την προσθήκη χημικών στο θαλασσινό νερό τροφοδοσίας. Αυτό ενισχύει την βιωσιμότητα της διεργασία καθώς το σύστημα είναι σαν να καθαρίζεται μόνο του. Γενικά, αυτού του τύπου διαρρυθμίση απαιτεί ελάχιστη προεπεξεργασία του θαλασσινού νερού και προσθήκη χημικών με σκοπό τον καθαρισμό του συστήματος. [23]

Συνοψίζοντας, η ηλεκτροδιάλυση (ED) είναι μια διεργασία αφαλάτωσης που χρησιμοποιείται σε εμπορική κλίμακα περισσότερο από 10 χρόνια πριν την διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης. Τα συστήματά της είναι διαθέσιμα σε μεγάλος εύρος μεγεθών, από μικρές δυναμικότητες (κάτω από  $2 \text{ m}^3 / \text{day}$ ) μέχρι μεγάλες ( $145.000 \text{ m}^3 / \text{day}$ ). Αποτελεί ιδανική επιλογή για αφαλάτωση νερού χαμηλής αλατότητας ενώ είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος με αρκετές δυνατότητες βελτίωσής της. [6]

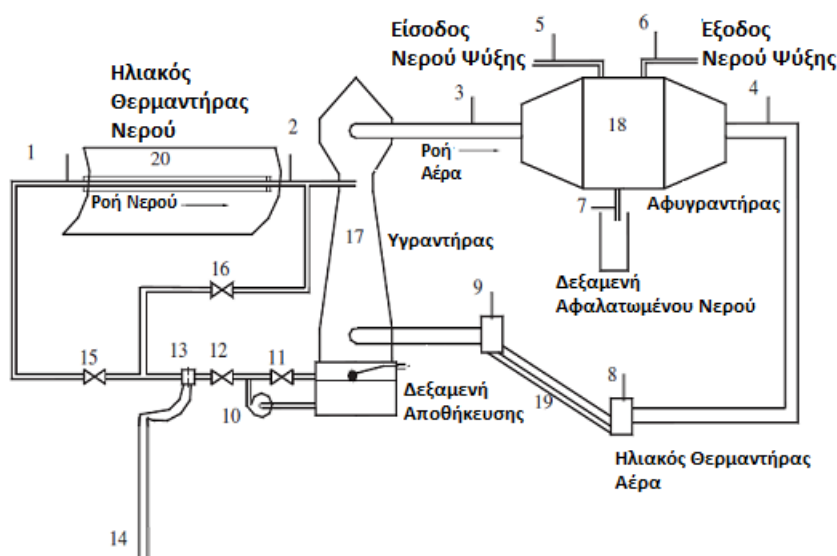
### 3.2.9 Ηλιακή Ύγρανση-Αφύγρανση (Solar Humidification–Dehumidification)

Άλλη μια διεργασία αφαλάτωσης που δεν παρουσίασε ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην συμβατική της μορφή και δεν μελετήθηκε στο **Κεφάλαιο 2**, είναι αυτή της ύγρανσης-αφύγρανσης (HD). Ωστόσο, ο συνδυασμός της με ηλιακή ενέργεια την καθιστά μια ιδιαίτερα ελκυστική ως προς μελέτη έμμεση μέθοδο αφαλάτωσης.

Το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Τα κύρια εξαρτήματά του είναι ο υγραντήρας (πύργος ψύξης, 17), ο αφυγραντήρας (εναλλάκτης νερού ψύξης, 18), θερμαντήρας αέρα (επίπεδος ηλιακός συλλέκτης, 19), θερμαντήρας νερού (συγκεντρωτικός συλλέκτης, 20). Το σύστημα αποτελείται από δυο βρόγχους, ο ένας για την θέρμανση του νερού και ο άλλος για την θέρμανση του αέρα, με μια σύνδεση με τον πύργο ψύξης που πραγματοποιεί την ύγρανση. Στον βρόγχο του νερού, το νερό αντλείται από την δεξαμενή αποθήκευσης μέσω μιας αντλίας (10) και διαχωρίζεται σε δυο κύρια ρεύματα, στο ρεύμα του δοκιμαστικού τομέα (12) και στο ρεύμα παράκαμψης (11). Το νερό ρέει, κατά την διάρκεια της ημέρας, μέσω της γραμμής του ηλιακού θερμαντήρα νερού κλείνοντας την βαλβίδα ελέγχου (16) και ανοίγοντας την βαλβίδα ελέγχου (15). Αντίστοιχα, κατά την διάρκεια της νύχτας, ρέει κατευθείαν μέσω του υγραντήρα κλείνοντας την βαλβίδα ελέγχου (15) και ανοίγοντας την βαλβίδα ελέγχου (16). Η θερμή άλμη καταιονίζεται από την κορυφή του υγραντήρα (17). Το νερό πέφτει στην δεξαμενή αποθήκευσης που βρίσκεται στον πυθμένα του υγραντήρα, από όπου χρησιμοποιείται για την επανακυκλοφορία του. [24] Με την επανακυκλοφορία του θερμού νερού μειώνονται οι θερμικές απώλειες. [25] Στον βρόγχο του αέρα, ο αέρας αντλείται από τον πυθμένα του

υγραντήρα χρησιμοποιώντας έναν αξονικό ανεμιστήρα, ο οποίος εγκαθίσταται στην οροφή του υγραντήρα. [24] Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και από το σχήμα, τα κανάλια στον βρόγχο αυτό είναι ευθείας κατεύθυνσης ώστε να εξασφαλίζεται καλή αλληλεπίδραση στην εξάτμιση και στην συμπύκνωση, αλλά και να περιορίζονται οι μεγάλες απώλειες πίεσης. [25] Ο αέρας ρέει δια μέσου του υγραντήρα μεταφέροντας το εξατμισμένο νερό στον αφυγραντήρα, όπου αυτός ψύχεται και αφυγραίνεται. Χρησιμοποιώντας έναν αξονικό ανεμιστήρα που είναι τοποθετημένος στο εξωτερικό του αφυγραντήρα, ο αέρας τροφοδοτείται πίσω στον υγραντήρα αφού έχει θερμανθεί από τον ηλιακό θερμαντήρα αέρος (19). [24]

Πιο αναλυτικά, ο ηλιακός θερμαντήρας νερού, δηλαδή ο ηλιακός συγκεντρωτικός συλλέκτης, αποτελείται από ένα κατοπτρικό πλαίσιο παραβολικού σχήματος και χρησιμοποιείται για την θέρμανση της άλμης. Ο ηλιακός θερμαντήρας αέρα, δηλαδή ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης, δεν διαθέτει σωλήνες, αποτελείται από ένα γυάλινο περίβλημα και χρησιμοποιείται για την θέρμανση του αέρα. Ο υγραντήρας, είναι ένας πύργος ψύξης με τεχνητούς ανεμιστήρες ο οποίος λειτουργεί σαν μια στήλη ύγρανσης με άμεση επαφή υγρού και αέρα. Διαθέτει ακροφύσια στο επάνω μέρος του τα οποία ψεκάζουν το ζεστό νερό. Ακόμα, έχει μια μεγάλη επιφάνεια συναγωγής για μεγαλύτερη διεπαφή μεταξύ του υγρού και του αέρα. Τέλος, ο αφυγραντήρας είναι στην ουσία ένας εναλλάκτης θερμότητας νερού ψύξης και αποτελείται από μια εκτεταμένη επιφάνεια πολλαπλής ροής πηνίου ψύξης. Το συμπυκνωμένο πόσιμο νερό παράγει σταγονίδια μέσω μιας συνδεσμολογίας σωλήνων στην δεξαμενή συλλογής συμπυκνώματος. Το νερό ψύξης ρέει εντός των σωλήνων εκτεταμένης επιφάνειας. Τέλος, στο σύστημα υπάρχει και μια συσκευή μέτρησης (13) η οποία ρυθμίζει, μέσω ενός βαθμονομημένου τετραχλωράνθρακα, την ροή του νερού στο σύστημα. [24]



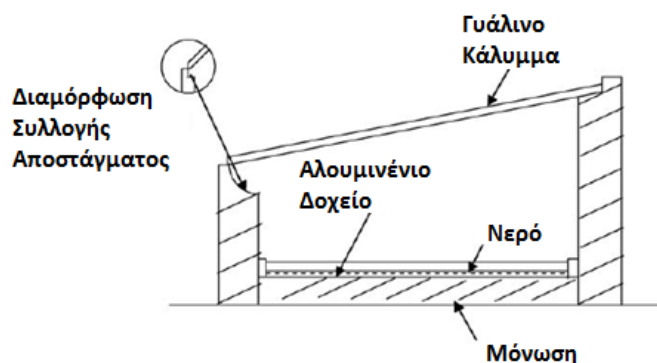
Εικόνα 135: Σχηματικό Διάγραμμα Συστήματος Ηλιακής Ύγρανσης-Αφύγρανσης(HD). [24]



### 3.2.10 Ηλιακός Αποστακτήρας (Solar Still)

Η αφαλάτωση με ηλιακό αποστακτήρα (Solar Still) αποτελεί την μοναδική μέθοδο παραγωγής πόσιμου νερού που εντάσσεται στην κατηγορία άμεσης εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας. Το προς επεξεργασία νερό εισέρχεται μέσα στην δεξαμενή, όπου εξατμίζεται από την ηλιακή ακτινοβολία που περνάει μέσα από ένα τζάμι ή καθαρό πλαστικό. Οι υδρατμοί από πόσιμο νερό, συμπυκνώνονται στην κορυφή του αποστακτήρα και κυλούν στα τοιχώματα από όπου μπορούν να συλλεχθούν και να απομακρυνθούν. [28] Ένα σχηματικό διάγραμμα ενός ηλιακού αποστακτήρα απλού τύπου παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα. Αποτελείται από ένα μονωμένο μαύρο βαμμένο αλουμινένιο δοχείο, όπου περιέχεται το προς απόσταξη νερό σε μικρό βάθος. Ένα επικλινές κάλυμμα από γυαλί, το οποίο στηρίζεται στο αντίστοιχο πλαίσιο, καλύπτει το δοχείο και σφραγίζεται αεροστεγώς για την ελαχιστοποίηση της διαρροής υδρατμών. [29]

Μια διαμόρφωση συλλογής αποστάγματος δημιουργείται στο κάτω μέρος του γυάλινου καλύμματος και καταλήγει σε έναν καλά μονωμένο πλαστικό σωλήνα μεταφοράς του. Το αλουμινένιο δοχείο που περιέχει το νερό τοποθετείται σε μια μονωμένη βάση, ενώ το ξύλινο πλαίσιο περικλείει το σύστημα. [30] Γενικά, η μέγιστη αποδοτικότητα ενός ηλιακού αποστακτήρα κυμαίνεται στο 50% έχοντας πλήρη μόνωση. Λιγότερη μόνωση μπορεί να προκαλέσει μείωση της τάξης του 14,5% στην απόδοση του συστήματος. Την απόδοση, επίσης, επηρεάζει και η ταχύτητα του ανέμου. Μικρή αύξησή της μπορεί να μειώσει την αποδοτικότητα του συστήματος. [29]



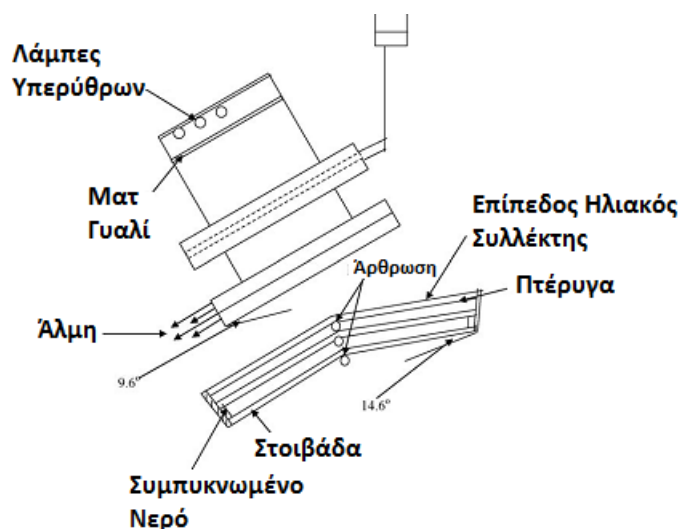
Εικόνα 136: Σχηματικό Διάγραμμα Απλού Ηλιακού Αποστακτήρα (Solar Still). [29]

Τα συστήματα απόσταξης μπορούν να διακριθούν σε δυο κατηγορίες, στα ενεργητικά και στα παθητικά. Στην περίπτωση των ενεργητικών ηλιακών αποστακτήρων, μια επιπλέον θερμική ενέργεια από εξωτερικό εξοπλισμό παρέχεται στο δοχείο του παθητικού ηλιακού αποστακτήρα για γρηγορότερη εξάτμιση. Ο εξωτερικός αυτός εξοπλισμός μπορεί να είναι ένας συλλέκτης ή ένα συγκεντρωτικό πλαίσιο, η απορριπτόμενη θερμική ενέργεια ενός χημικού ή

βιομηχανικού έργου ή ένα συμβατικό boiler. Αν κανένας εξωτερικός εξοπλισμός δεν χρησιμοποιείται τότε το σύστημα του ηλιακού αποστακτήρα είναι γνωστό ως παθητικό. [33] Ως αποτέλεσμα του μεγάλου ενδιαφέροντος που επιδεικνύεται στον τομέα της απόσταξης, υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλιακών αποστακτήρων. Μερικοί από αυτούς είναι ενός ή πολλών βαθμίδων αποστακτήρες, ηλιακοί συγκεντρωτικοί αποστακτήρες, αποστακτήρες πολλαπλής εξάτμισης και αποστακτήρες γυάλινου καλύμματος δημιουργίας στοιβάδας νερού. Παρότι υπάρχουν τόσο διαφορετικοί τύποι μόνο οι ηλιακοί αποστακτήρες μιας βαθμίδας λεκανοειδούς τύπου είναι οικονομικά αποδεκτοί και μπορούν να καλύψουν αρκετά αποτελεσματικά την ανάγκη για νερό μιας μικρής κοινότητας. Ακόμα και για αυτό τον τύπο όμως υπάρχουν μικρές διαφοροποιήσεις για τις διάφορες διαρρυθμίσεις του. Παρακάτω αναλύονται οι διάφοροι τύποι ηλιακών αποστακτήρων. [29]

### 3.2.10.a Ηλιακός Αποστακτήρας Τύπου Οροφής (Roof Type Solar Still)

Αυτός ο τύπος αποστακτήρα είναι αρκετά απλός στην κατασκευή του. Αποτελείται από λυγισμένες πλάκες διαπερατές από τη θερμότητα και διαθέτουν στο κέντρο ένα κανάλι για την ροή του υγρού, το οποίο βρίσκεται κάτω από την πτυχή της κάμψης. Το υφάλμυρο νερό αντλείται από την κύρια δεξαμενή και εισέρχεται στο σύστημα μέσω του κεντρικού σωλήνα. Η άνω πλάκα του αποστακτήρα θερμαίνεται από τις υπέρυθρες ακτινοβολίες ανάμεσα στα δυο φύλλα του ματ γυαλιού ώστε να επιτυγχάνεται ομοιόμορφο αποτέλεσμα ακτινοβόλησης. Ένα μέρος της άλμης εξατμίζεται από την επιφάνεια του πορώδες φύλλου λαμβάνοντας την θερμότητα από την άνω πλάκα και συμπυκνώνεται κάτω από την αντίθετη επιφάνεια. Το συμπυκνωμένο πόσιμο νερό συλλέγεται σε ορθογώνιους σωλήνες και από τις δύο πλευρές του αποστακτήρα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. [29]

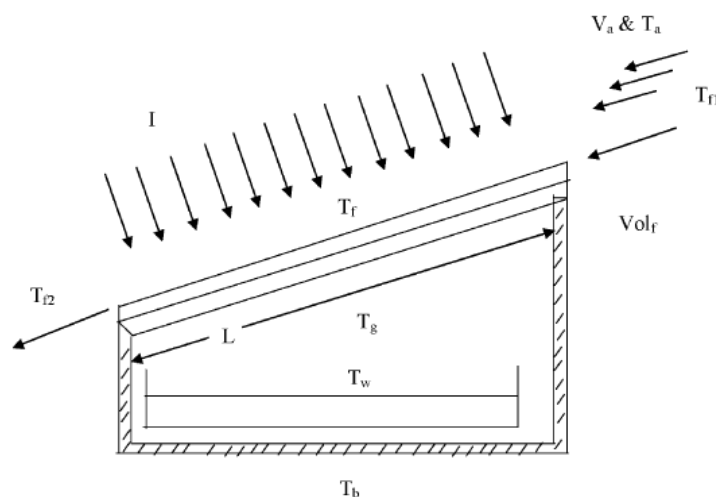


Εικόνα 136: Ηλιακός Αποστακτήρας Τύπου Οροφής (Roof Type Solar Still). [29]

### 3.2.10.b Ηλιακός Αποστακτήρας Στοιβάδας Νερού στην Εξωτερική Γυάλινη Επιφάνειά Του (Water Film Cooling Over Glass Cover Of the Still)

Αυτός ο τύπος αποστακτήρα δεν είναι μόνο απλός στην κατασκευή του, αλλά αποτελεί και μια φθηνή και εύκολη μέθοδο παραγωγής πόσιμου νερού. Αποτελείται από ένα δοχείο, ένα γυάλινο κάλυμμα και μια στοιβάδα ψύξης. Η συνεχής παροχή της στοιβάδας νερού τροφοδοτεί το γυάλινο κάλυμμα με σκοπό την μείωση της θερμοκρασίας του. Για αυτό τον τύπο αποστακτήρα έχουν προταθεί πολλές βελτιώσεις με σκοπό την αύξηση της απόδοσης του συστήματος, όπως η χρήση επιβαλλόμενης συναγωγής, χρωστικών ουσιών καθώς και εξωτερικών πυκνωτών. Ωστόσο, ο πιο εύκολος τρόπος αύξησης της απόδοσής του είναι η χρήση μέρους του νερού ψύξης υπό την μορφή προθερμασμένου νερού του αποστακτήρα. [29]

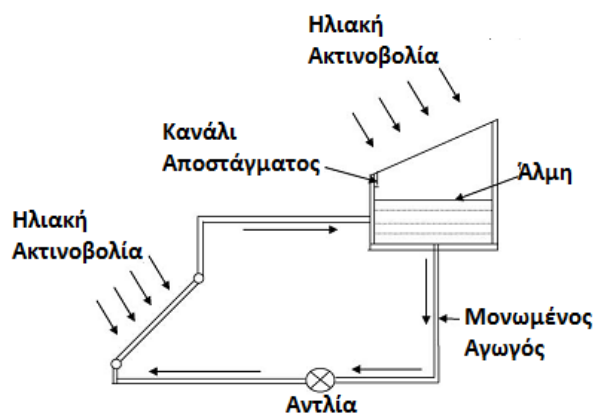
Η στοιβάδα ψύξης επίσης εκτελεί την σημαντική λειτουργία του αυτοκαθαρισμού του γυάλινου καλύμματος. Η παρουσία σκόνης και άλλων ακαθαρσιών στο γυάλινο κάλυμμα, μειώνει την απόδοση του αποστακτήρα. Ο συνεχής καθαρισμός του γυάλινου καλύμματος διατηρεί την αποδοτικότητα του συστήματος σε υψηλά επίπεδα. Η ορθή χρήση των παραμέτρων της στοιβάδας ψύξης μπορεί να αυξήσει τη απόδοση έως 20%.  
[29]



**Εικόνα 137:** Σχηματικό Διάγραμμα Ηλιακού Αποστακτήρα Στοιβάδας Νερού (Water film cooling over glass cover of the still). [29]

### 3.2.10.c Παθητικοί Ενεργητικοί Ηλιακοί Αποστακτήρες (Passive Active Solar Stills)

Ένας ενεργητικός τύπος ηλιακού αποστακτήρα αποτελείται από ένα γυάλινο κάλυμμα, ένα δοχείο, έναν ανακλαστήρα και μια αντλία. Το υφάλμυρο νερό κυκλοφορεί στον ανακλαστήρα επίπεδης πλάκας, όπου η ηλιακή ακτινοβολία πέφτει συνεχώς. Ως αποτέλεσμα το υφάλμυρο νερό θερμαίνεται και εν συνεχεία τροφοδοτεί τον αποστακτήρα. Εξαιτίας της ηλιακής ακτινοβολίας, το νερό εξατμίζεται και συλλέγεται στο γυάλινο κάλυμμα από όπου ρέει κατά μήκος του καναλιού αποστάγματος. Έχει διαπιστωθεί ότι, οι παθητικοί ηλιακοί αποστακτήρες μπορεί να είναι οικονομικά αποδοτικοί όσον αφορά στην παροχή πόσιμου νερού. Από την άλλη πλευρά, οι ενεργητικοί ηλιακοί αποστακτήρες μπορεί να είναι οικονομικά ενδιαφέροντες από εμπορικής άποψης. Η σχηματική απεικόνιση ενός τέτοιου συστήματος παρουσιάζεται παρακάτω. [29]



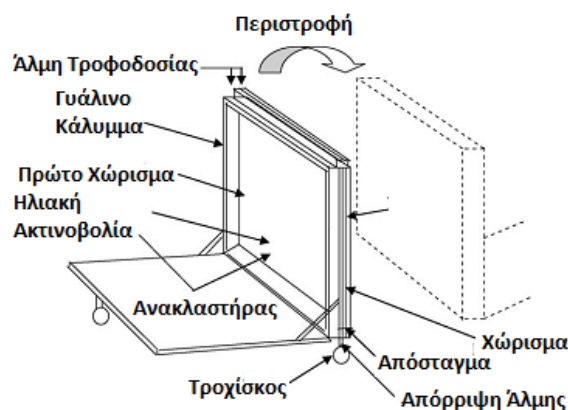
**Εικόνα 138:** Ενεργητικός Ηλιακός Αποστακτήρας με Επίπεδο Ηλιακό Συλλέκτη (Passive Active Solar Still). [29]

### 3.2.10.d Ηλιακός Αποστακτήρας Πολλαπλής Διάχυσης (Multi-Effect Diffusion Type Solar Still)

Οι ηλιακοί αποστακτήρες πολλαπλής διάχυσης (Multi-Effect Diffusion Type) εμφανίζουν μεγάλες δυνατότητες εξαιτίας της υψηλής τους αποδοτικότητας αλλά και της απλότητάς τους. Αποτελούνται από έναν ανακλαστήρα τύπου επίπεδης πλάκας, τροχίσκους για χειροκίνητη παρακολούθηση του αζιμούθιου, έναν αποστακτήρα κάθετου τύπου πολλαπλών βαθμίδων διάχυσης, ο οποίος διαθέτει γυάλινο κάλυμμα και έναν αριθμό παράλληλων και κάθετων χωρισμάτων με στενά διάκενα να περιλαμβάνονται μεταξύ τους. Το υφάλμυρο νερό τροφοδοτείται συνεχώς στις βαθμίδες. Η γωνία του ανακλαστήρα επίπεδης πλάκας και του αζιμούθιου του αποστακτήρα μπορούν να ρυθμιστούν χειροκίνητα, ώστε να απορροφηθεί η ηλιακή ακτινοβολία στο πρώτο χώρισμα αποδοτικά ανάλογα με την τοποθεσία και την εποχή. Τόσο η απευθείας ηλιακή

ακτινοβολία, όσο και αυτή που προέρχεται από διάχυση και ανάκλαση από τον επίπεδο ανακλαστήρα, μεταδίδονται μέσω του γυάλινου καλύμματος και απορροφώνται από την μπροστά επιφάνεια των χωρισμάτων για να προκαλέσουν εξάτμιση της άλμης. Ένα σχήμα του συστήματος αυτού παρουσιάζεται παρακάτω. [29]

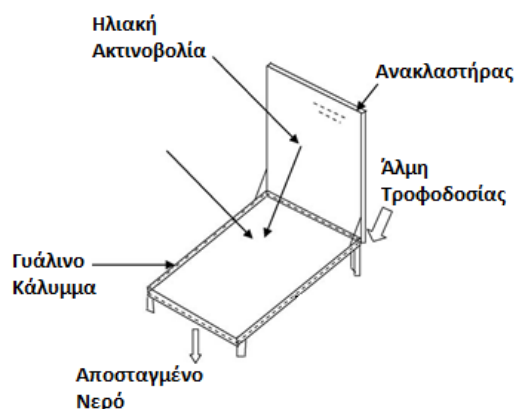
Ο υδρατμός διαχέεται μέσα από ένα υγρό στρώμα αέρα μεταξύ των χωρισμάτων και συμπυκνώνεται στην μπροστά επιφάνεια του επόμενου χωρίσματος. Η λανθάνουσα θερμότητα της συμπύκνωσης ανακτάται για να προκαλέσει περαιτέρω εξάτμιση στην κορεσμένη άλμη της βαθμίδας του δεύτερου χωρίσματος. Με τον τρόπο αυτό οι διεργασίες της εξάτμισης και της συμπύκνωσης επαναλαμβάνονται σε όλα τα χωρίσματα του τύπου αποστακτήρα διάχυσης για την αύξηση της παραγωγικότητας του αποστάγματος. [29]



**Εικόνα 139:** Σχηματικό Διάγραμμα Ηλιακού Αποστακτήρα Πολλαπλής Διάχυσης (Multi-Effect Diffusion Type). [29]

### 3.2.10.e Ηλιακός Αποστακτήρας με Κλίση (Tilted Wick Solar Still)

Αυτού του τύπου οι αποστακτήρες είναι πολύ απλοί στην κατασκευή τους. Το σύστημα αποτελείται από ένα γυάλινο κάλυμμα, μια πτέρυγα εξάτμισης και ένας κάθετος ανακλαστήρας τύπου επίπεδης πλάκας από υλικά υψηλής ανακλαστικής ιδιότητας, όπως ο καθρέφτης. Η άλμη τροφοδοτεί την πτέρυγα συνεχώς. Η απευθείας και η διαχυμένη ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία από τον εξωτερικό ανακλαστήρα διέρχονται μέσα από το γυάλινο κάλυμμα και απορροφώνται από την πτέρυγα. [29]

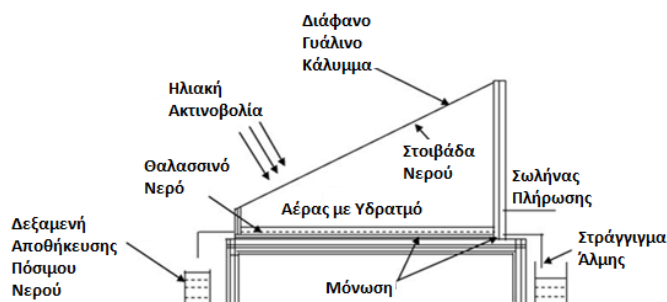


**Εικόνα 140:** Αποστακτήρας με Κλίση και Εξωτερικό Επίπεδο Ηλιακό Συλλέκτη. (Tilted Wicked Solar Still) [29]

### 3.2.10.f Ηλιακός Αποστακτήρας με Σωλήνες για Αφαλάτωση Θαλασσινού Νερού (Solar Still with Tubes for Seawater Desalination)

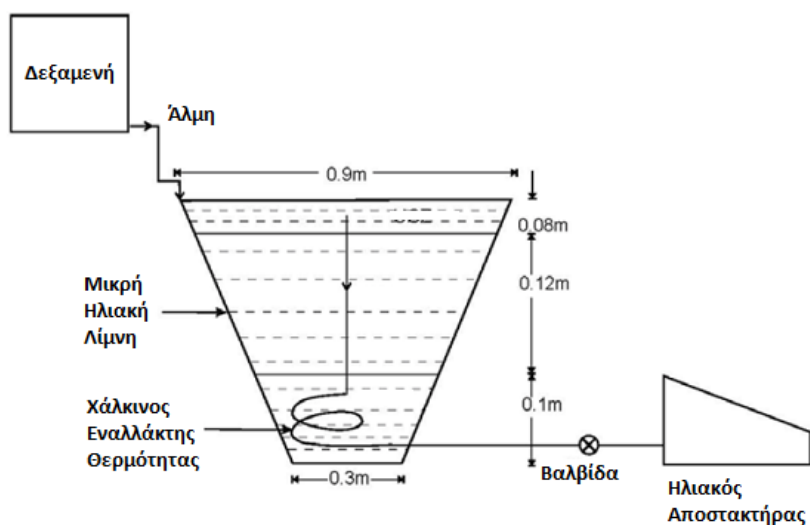
Ο τύπος αυτός αποστακτήρα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την χρήση σε παράκτιες περιοχές. Το σύστημα αποτελείται από ένα δίσκο βαμμένο μαύρο, ο οποίος είναι καλυμμένος με ένα κεκλιμένο διάφανο γυάλινο πλαίσιο που είναι γεμάτο με θαλασσινό νερό. Με την βοήθεια της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας απελευθερώνει υδρατμό, ο οποίος φτάνει στην οροφή του γυαλιού από όπου ανακτάται για χρήση. Τα δυο σημαντικά χαρακτηριστικά αυτού του τύπου αποστακτήρα είναι η τεχνολογική του απλότητα και η εκμετάλλευση μιας δωρεάν πηγής θερμότητας, όπως ο ήλιος. [31]

Ωστόσο, η ολική απόδοση του συστήματος είναι πολύ χαμηλή και διάφορες προσπάθειες έγιναν για την αύξησή της. Χρησιμοποιώντας σωλήνες κατάλληλων υλικών, ο κύριος σκοπός είναι η αύξηση της αποδοτικότητας. Οι σωλήνες του εξατμιστήρα, είναι βαμμένοι μαύροι στο κάτω μισό τους, βρίσκονται μέσα σε ένα μονωμένο δίσκο, ενώ οι σωλήνες του συμπυκνωτή εναποτίθενται σε ένα δίκτυο στήριξης που βρίσκεται από κάτω. [29]



**Εικόνα 141:** Σχηματικό Διάγραμμα Ηλιακού Αποστακτήρα Αφαλάτωσης Θαλασσινού Νερού. [29]

Οι ηλιακοί αποστακτήρες αποτελούν μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο παραγωγής πόσιμου νερού κυρίως για μικρή παραγωγή σε αγροτικές περιοχές. Για την αύξηση της παραγωγικότητας ενός τέτοιου συστήματος χρησιμοποιούνται οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι οποίοι θερμαίνουν την άλμη πριν την είσοδό της στον αποστακτήρα. Μια εναλλακτική επιλογή αντί των ηλιακών συλλεκτών είναι η χρήση της ηλιακής λίμνης με κλίμακα αλατότητας. Η ηλιακή λίμνη είναι υπεύθυνη για την θέρμανση της άλμη πριν αυτή εισέλθει στον ηλιακό αποστακτήρα. Προκειμένου να διατηρηθεί η ισορροπία μεταξύ των ζωνών αλατότητας της άλμης μια δεξαμενή τροφοδοτεί την ηλιακή λίμνη με την απαιτούμενη ποσότητα νερού. Το σχηματικό διάγραμμα του ενεργητικού αυτού συστήματος παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα. [32]



**Εικόνα 142:** Ενεργητικός Ηλιακός Αποστακτήρας με Ηλιακή Λίμνη. [32]

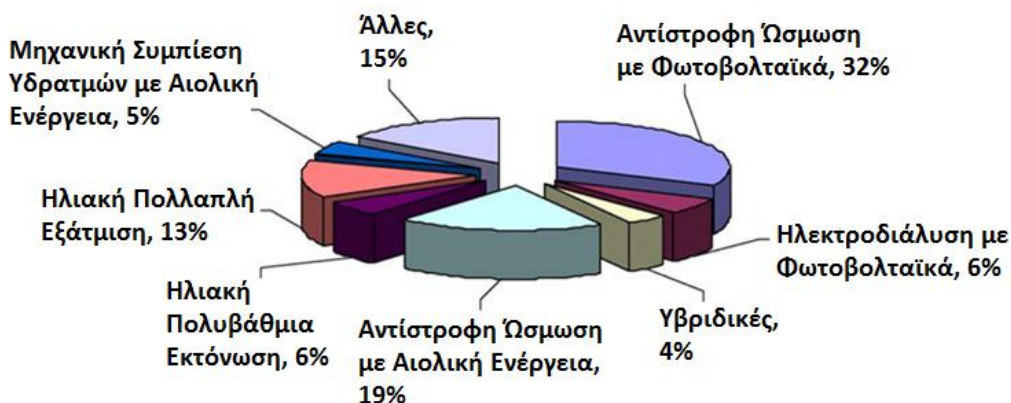
Όπως αναφέραμε και στην αρχή της παραγράφου ως ενεργητικά αναφέρονται τα συστήματα που κάνουν χρήση επιπλέον θερμικής ενέργειας από κάποιο εξωτερικό εξοπλισμό. Αυτός ο εξοπλισμός μπορεί να είναι κάποιος συλλέκτης ή ηλιακή λίμνη, όπως είδαμε και παραπάνω, ή ακόμα και η απορριπτόμενη θερμική ενέργεια από κάποια άλλη διεργασία. Με βάση αυτήν την επιλογή αναφέρεται και το σύστημα ηλιακής αντίστροφης ώσμωσης με χρήση φωτοβολταϊκών σε συνδυασμό με ηλιακό αποστακτήρα. Η μονάδα της ηλιακής αντίστροφης ώσμωσης λειτουργεί όπως ακριβώς αναφέρθηκε στην αρχή αυτού του κεφαλαίου, μόνο που στην περίπτωση αυτή η απορριπτόμενη άλμη χρησιμοποιείται ως τροφοδοσία για την μονάδα του ηλιακού αποστακτήρα. Για μεγαλύτερη αύξηση της αποδοτικότητας αυτού του συστήματος, της τάξεως 10-15%, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ηλιακή λίμνη για την επιπλέον θέρμανση της άλμης. Στην περίπτωση αυτή, η απορριπτόμενη άλμη από την μονάδα της ηλιακής αντίστροφης ώσμωσης, θερμοκρασίας 30°C, προθερμαίνεται έως και την θερμοκρασία των 75°C περνώντας μέσα από την ηλιακή λίμνη και έπειτα τροφοδοτεί τον ηλιακό αποστακτήρα. [34]





### 3.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Είναι αδιαμφισβήτητο γεγονός ότι τα τελευταία 20 χρόνια αποτέλεσαν την επανάσταση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε πολλούς και διάφορους τομείς. Ο τομέας της αφαλάτωσης είναι ένας από αυτούς αφού προσέφερε εύφορο έδαφος όχι μόνο για το φιλικό προς το περιβάλλον χαρακτήρα του, αλλά και για τη ζωτική σημασία του σε κάποιες περιοχές. Υπάρχουν πολλά είδη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας τα οποία μελετήθηκαν ως προς τον συνδυασμό τους με διάφορες διεργασίες αφαλάτωσης. Το δυναμικό της αγοράς τέτοιων συστημάτων αναγνωρίστηκε με βάση την τρέχουσα και μελλοντική τάση οικονομικής ανάπτυξης της κάθε περιοχής, όπως επίσης των περιβαλλοντικών και κοινωνικοοικονομικών της παραγόντων. Εφόσον, λοιπόν, υπάρχουν τόσα διαφορετικά κριτήρια επιρροής που αφορούν τον συνδυασμό των μεθόδων αφαλάτωσης με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι λογικό ότι μπορούμε να βρούμε ένα μεγάλο εύρος επιλογής τέτοιων εγκαταστάσεων. Στο παρακάτω **Διάγραμμα** παρουσιάζονται τα πιο δημοφιλή από τα συστήματα αυτό καθώς και το αντίστοιχο ποσοστό τους στην αγορά της αφαλάτωσης. [38]



**Εικόνα 144:** Ποσοστό Μερισίματος των Κυριότερων Διεργασιών σε Συνδυασμό με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στην Αγορά Αφαλάτωσης. [38]

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν την ιδανική επιλογή παροχής ενέργειας σε αυτόνομα συστήματα αφαλάτωσης, ιδιαίτερα για άγονες και παράκτιες περιοχές όπου η συμβατική παροχή ενέργειας είναι ελλιπής. Αυτάρκεια και τοπική υποστήριξη είναι δύο από τις ιδιότητες που μπορούν να καλύψουν τα καινοτομικά αυτά συστήματα. Κυρίως οι κλιματικοί λόγοι είναι αυτοί που οδηγούν τα συστήματα αφαλάτωσης με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, και πιο συγκεκριμένα με την ηλιακή ενέργεια, σε μια αξιοσημείωτη συμφωνία στην βάση του χρόνου μεταξύ της παροχής ενέργειας και της ζήτησης νερού. Η λειτουργία και η συντήρηση αυτών των συνδυασμένων συστημάτων για τις άγονες περιοχές είναι τις περισσότερες φορές πιο εύκολη σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα. [38]

Γενικότερα, η διεργασία της αφαλάτωσης απαιτεί μεγάλα ποσά ενέργειας. Έτσι, ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος που προέρχεται από την κατανάλωση στερεών καυσίμων από αυτή την διεργασία είναι σημαντικός. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συνολική παγκόσμια δυναμικότητα του αφαλατωμένου νερού είναι περίπου  $23 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ . Η μείωση του κόστους των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας υπήρξε σημαντική κατά την πάροδο των τελευταίων δεκαετιών. Έτσι, οι μελλοντικές μειώσεις σε συνδυασμό με την αύξηση στις τιμές των στερεών καυσίμων θα μπορούσαν να καταστήσουν δυνατή την ανταγωνιστικότητα των συστημάτων αφαλάτωσης με χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. [38]

Παρά τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα που για την χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε μονάδες αφαλάτωσης, το τρέχων ποσοστό των εγκαταστάσεων τους είναι πολύ μικρό και μόλις που αγγίζει το 0,02% της ολικής αφαλατωτικής δυναμικότητας. Οι λόγοι για αυτό συνδέονται με διάφορους, συχνά συσχετιζόμενους παράγοντες, όπως [38]:

- Η διαθεσιμότητα, όπου η γεωγραφική κατανομή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν συμβαδίζει πάντα με την ένταση του ρεύματος νερού σε τοπικό επίπεδο.
- Τα κόστη, όπου το αρχικό κεφάλαιο κόστους εγκατάστασης και τα διάφορα εξαρτήματα του συστήματος είναι ακόμα αρκετά ακριβά. Παρά το γεγονός ότι οι τιμές συνεχώς πέφτουν πολλά από αυτά είναι απαγορευτικά για εμπορευματοποίηση.
- Οι τεχνολογίες, που επιβάλλουν τον συνδυασμό της μετατροπής ενέργειας και των συστημάτων αφαλάτωσης. Μια πραγματική πρόκληση για αυτές τις τεχνολογίες θα ήταν ο βέλτιστος τεχνολογικός σχεδιασμός του συνδυασμένου συστήματος, ο οποίος θα αυξήσει την αποτελεσματικότητα και τον όγκο παραγωγής ενώ παράλληλα θα μειώσει το κόστος μιας τέτοιας μονάδας.
- Η βιωσιμότητα, όπου στις περισσότερες περιπτώσεις, η ωριμότητα των σχετικών τεχνολογιών δεν συναντά το χαμηλό επίπεδο των υποδομών, που συνήθως αντιπροσωπεύει τις περιοχές με έλλειψη αποθεμάτων πόσιμου νερού. Η εμπειρία έδειξε ότι πολλά από τα συστήματα που εγκαταστάθηκαν σε άγονες περιοχές απέτυχαν λόγω της έλλειψης επαρκούς τεχνικής υποστήριξης.

Παρότι θεωρητικά υπάρχουν πολλοί συνδυασμοί μονάδων αφαλάτωσης με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, πρακτικά δεν είναι όλοι τους εφικτοί. Για να εξασφαλιστεί η αποδοτικότητα ενός τέτοιου συστήματος πρέπει ο τεχνολογικός συνδυασμός του να μελετηθεί συναρτήσει των τοπικών παραμέτρων που συνιστούν τις περιβαλλοντικές συνθήκες, της τοπογραφίας της περιοχής, την δυναμικότητα και το είδος της ενέργειας που είναι διαθέσιμη σε χαμηλό κόστος, την διαθεσιμότητα των τοπικών υποδομών (συμπεριλαμβανομένου του ηλεκτρικού δικτύου), το μέγεθος του έργου και την συγκέντρωση αλατότητας του νερού τροφοδοσίας. [38]

Συνοψίζοντας, οι παράγοντες που μελετώνται για την εγκατάσταση και τον συνδυασμό του συστήματος με την κατάλληλη πηγή ανανεώσιμης ενέργειας είναι οι εξής [38]:

- Η ποσότητα του γλυκού νερού που απαιτείται σε συγκεκριμένες εφαρμογές σε συνδυασμό με το φάσμα της εφαρμογής των διάφορων διεργασιών αφαλάτωσης.
- Η αποτελεσματικότητα της διεργασίας σε σχέση με την ενεργειακή της κατανάλωση.
- Η καταλληλότητα της διεργασίας για συνδυασμό με την ηλιακή ενέργεια.
- Οι απαιτήσεις επεξεργασίας του θαλασσινού νερού.
- Το κόστος κεφαλαίου του εξοπλισμού και των υλικών εισαγωγής.
- Η έκταση γης που απαιτείται, ή που θα μπορούσε να διατεθεί, για την εγκατάσταση του εξοπλισμού.
- Κριτήρια ανθεκτικότητας και απλούστευση της λειτουργίας.
- Χαμηλή συντήρηση, συμπαγές μέγεθος και εύκολη μεταφορά στην περιοχή.
- Αποδοχή και υποστήριξη από την τοπική κοινότητα με ελάχιστη μεταβολή στον κοινωνικό περίγυρο.
- Οργάνωση στο τοπικό επίπεδο με σχετικά μικρή εκπαίδευση.

Διεργασίες	Πρόσβαση και Διαδικασία Οικοδόμησης (m <sup>2</sup> )	Βοηθητικός Εξοπλισμός* (m <sup>2</sup> )	Συνολική Έκταση (m <sup>2</sup> )
Αντίστροφη Ώσμωση (RO)			
Θαλασσινό Νερό	1.800	7.800	9.600
Υφάλμυρο Νερό	1.200	6.800	8.000
Ηλεκτροδιάλυση (ED)			
Ηλεκτροδιάλυση (ED)	1.500	6.800	8.300
Θερμικές Διεργασίες			
Πολυβάθμια Εκτόνωση (MSF)	4.800	7.800	12.600
Πολλαπλή Εξάτμιση (MED)	6.000	7.800	13.800

\*Περιλαμβάνει την έκταση αποθήκευσης του παραγόμενου νερού σε 1 μέρα παραγωγικής δυνατότητας, το σύστημα διανομής με αντλίες και τον ηλεκτρικό υποσταθμό.

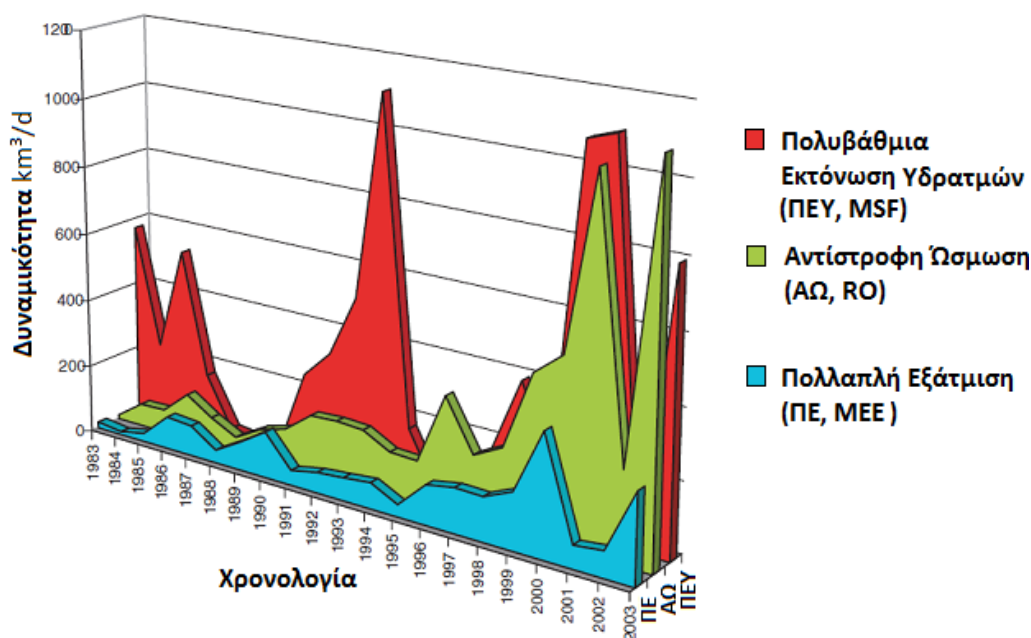
**Πίνακας 4:** Απαιτούμενη Έκταση Εγκατάστασης για Μονάδες Παραγωγικότητας 19.000m<sup>3</sup>/d και Μεγαλύτερες. [39]

Ο παραπάνω **Πίνακας** αφορά την έκταση που απαιτούν μόνο οι συμβατικές μονάδες αφαλάτωσης. Στην περίπτωση συνδυασμού του με ηλιακή ενέργεια θα πρέπει να υπολογίσουμε επιπλέον την έκταση που θα καταλάβουν οι διατάξεις των ηλιακών συλλεκτών ή οι συστοιχίες των φωτοβολταϊκών.

### 3.3.1 Σύγκριση των Συμβατικών Μεθόδων

Στο **Κεφάλαιο 2** της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε η κατανομή και η ανάπτυξη όλων των υπάρχουσών συμβατικών διεργασιών παραγωγής γλυκού νερού. Επίσης, μελετήθηκε η απόδοσή τους σε συνδυασμό με διάφορους παραμέτρους λειτουργίας τους. Με βάση όλα αυτά τα τεχνολογικά στοιχεία και με τον συνδυασμό μιας μικρής οικονομικής μελέτης των συστημάτων αυτών αλλά και την τάση της αγοράς αφαλάτωσης θα διεξαχθεί παρακάτω σύγκριση των συμβατικών μεθόδων.

Αδιαμφισβήτητα, οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι αφαλάτωσης θαλασσινού νερού είναι οι θερμικές μέθοδοι, εφόσον άρχισαν να χρησιμοποιούνται εδώ και 60 χρόνια. [45] Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος της πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) αποτελεί πρώτη επιλογή καθώς το μερίδιό της στην παγκόσμια αγορά αφαλάτωσης ανέρχεται στο 60%, και στην Κεντρική Ασία αγγίζει το 80%. Η αιτία αυτής της μεγάλης κατοχής είναι η αξιοπιστία που παρέχουν τα συστήματα αυτά λόγω της ώριμης τεχνολογίας τους. Ωστόσο, οι ραγδαίες βελτιωτικές εξελίξεις των τελευταίων ετών στη ζωή των μεμβρανών έκαναν την αντίστροφη ώσμωση (RO) την πιο κοινή μέθοδο αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού, με αποτέλεσμα να αποτελεί πια έναν σοβαρό ανταγωνιστή των θερμικών μεθόδων αφαλάτωσης θαλασσινού νερού. Τρίτη σε σειρά προτίμησης φαίνεται να έρχεται η πολλαπλή εξάτμιση υδρατμού (ΜΕΕ), η οποία διαθέτει και αυτή σε ικανοποιητικό βαθμό μερικά από τα πλεονεκτήματα των θερμικών μεθόδων αφαλάτωσης. [40]



**Εικόνα 145:** Εγκαταστημένη Ισχύς Αφαλάτωσης των Τεχνολογιών Συναρτήσεως των Χρόνων. [40]

Πιο αναλυτικά, οι λόγοι που βοήθησαν την πολυβάθμια εκτόνωση να επιβιώσει έναντι της ανερχόμενης αντίστροφης ώσμωσης είναι κυρίως οι παρακάτω [40]:

- *Η υψηλή αξιοπιστία του εγκαταστημένου συστήματος.* Κατά τα χρόνια λειτουργίας τους τα συστήματα πολυβάθμιας εκτόνωσης έδειξαν υψηλή αξιοπιστία αλλά και πιθανή διάρκεια ζωής πολύ μεγαλύτερη από την προβλεπόμενη που υπολογίστηκε κατά την διάρκεια κατασκευής τους. Στο σημείο αυτό πρέπει να υπενθυμιστεί ότι πριν από 30 χρόνια, που ήταν η περίοδος της πρώτης έκρηξης της αφαλάτωσης θαλασσινού νερού, η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής των συστημάτων αφαλάτωσης ανερχόταν στα 15 χρόνια. Ωστόσο, τα περισσότερα από αυτά τα συστήματα λειτουργού ακόμα και σήμερα, ενώ αυτά που έχουν υποστεί ανακατασκευές ή βελτιώσεις προβλέπεται ότι θα λειτουργούν για ακόμα 10 χρόνια.
- *Εύκολη λειτουργία.* Η λειτουργία των συστημάτων πολυβάθμιας εκτόνωσης είναι πολύ εύκολη και έχουν σχεδόν τα ίδια χαρακτηριστικά με την μονάδα παραγωγής ενέργειας που είναι πάντα συνδεδεμένα. Αυτό σημαίνει ότι η εύρεση του προσωπικού συντήρησης και λειτουργίας είναι αρκετά εύκολη και δεν αποτελεί πρόβλημα στον ιδιοκτήτη.
- *Πολύ αργή υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος κατά την διάρκεια των ετών.* Είναι παγκόσμια αναγνωρισμένο το γεγονός ότι ένα σύστημα πολυβάθμιας εκτόνωσης με σωστή λειτουργία και συντήρηση, δεν παρουσιάζει καμία υποβάθμιση της απόδοσής του όσον αφορά την παραγωγή νερού και την ενεργειακή κατανάλωση.

Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά που μόλις αναφέρθηκαν συντέλεσαν στο να αποτελεί η πολυβάθμια εκτόνωση (MSF) την πρώτη επιλογή έναντι στην αντίστροφη ώσμωση (RO) για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού, κυρίως για περιοχές που έχουν ανάγκη όχι μόνο τα αποθέματα νερού αλλά και την συμπαραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. [40] Από την άλλη πλευρά, η πολλαπλή εξάτμιση που αποτελεί και αυτή μια από τις πρώτες θερμικές διεργασίες αφαλάτωσης, παρουσιάζει κάποια από τα παραπάνω χαρακτηριστικά σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό. Ωστόσο διαθέτει και ένα μεγάλο μειονέκτημα στο οποίο οφείλεται και το έδαφος που έχασε στις αρχές του 1960 από την πολυβάθμια εκτόνωση. Αυτό είναι η δημιουργία ιζημάτων που παρουσιάστηκε εντόνως στα πρώιμα σχέδια των πρώτων μονάδων. Στα σημερινά συστήματα αυτό το φαινόμενο όπως και το πρόβλημα του χαμηλού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας έχει αντιμετωπιστεί, όμως παράλληλα έχει μεγαλώσει και η απόσταση μεταξύ των δυο θερμικών αυτών διεργασιών, αφού η πορεία της πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) μέσα στις τελευταίες δεκαετίες χαρακτηρίζεται πιο εύστοχα ως ραγδαία εξελικτική παρά επαναστατική. [41]

	Πολυβάθμια Εκτόνωση (MSF)	Πολλαπλή Εξάτμιση (MEE)	Πολλαπλή Εξάτμιση με Θερμική Συμπύεση Υδρατμού (MEE-TVC)	Μηχανική Συμπύεση Υδρατμού (MVC)	Αντίστροφη Ώσμωση (RO)
Θερμοκρασία Λειτουργίας (°C)	<120	<70	<70	<70/1/	<45
Μορφή Κύριας Ενέργειας	Ατμός (θέρμανση)	Ατμός (θέρμανση)	Ατμός (θέρμανση)	Μηχανική (ηλεκτρική) ενέργεια	Μηχανική (ηλεκτρική) ενέργεια
Θερμική Ενεργειακή Κατανάλωση (kWh/m <sup>3</sup> )/3/	12	6/4/	21/4/	Δεν εφαρμόζεται	Δεν εφαρμόζεται
Ηλεκτρική Ενεργειακή Κατανάλωση (kWh/m <sup>3</sup> )	3,5	1,5	1,5	8-14	4-7/2/
Τυπική Συγκέντρωση Άλατος Νερού Τροφοδοσίας (ppm TDS)	30.000-100.000	30.000-100.000	30.000-100.000	30.000-50.000	1.000-45.000
Ποιότητα Προϊόντος Νερού(ppm TDS)	<10	<10	<10	<10	<500
Τρέχουσα Τυπική Δυναμικότητα Συστήματος(m <sup>3</sup> /d)	5.000-70.000	500-12.000	100-25.000	10-2.500	1-10.000

/1/ Σε εξαιρετικές περιπτώσεις με προσθήκη οξέως: 100°C.

/2/Με νερό τροφοδοσίας θαλασσινό νερό, αλλιώς η κατανάλωση είναι μικρότερη.

/3/Εκφρασμένο σαν την ηλεκτρική ενέργεια που ο παραγόμενος ατμός σε έναν συμπιεστή δεν μπορεί να παράγει εξαιτίας της εξαγωγής από την διεργασία.

/4/Για ίδιους βαθμούς απόδοσης και επιλεγμένες πιέσεις ατμού, το κόστος επένδυσης των συστημάτων πολλαπλής εξάτμισης είναι σημαντικά υψηλότερο από αυτό των συστημάτων πολυβάθμιας εκτόνωσης και το κόστος επένδυσης των συστημάτων πολλαπλής εξάτμισης με θερμική συμπύεση υδρατμού είναι χαμηλότερο από αυτό των συστημάτων πολυβάθμιας εκτόνωσης.

#### Πίνακας 6: Βασικά Δεδομένα Διεργασιών. [48]

Τα συστήματα αντίστροφης ώσμωσης (RO) άρχισαν να εμφανίζονται στην αγορά αφαλάτωσης το 1973 και έκαναν από την αρχή την παρουσία τους αρκετά αισθητή. Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα τις μεθόδου που την βοήθησε στην γρήγορη ανέλιξή της είναι η πολύ καλή αναλογία που έχει μεταξύ του κόστους των συστημάτων και της αποδοτικότητάς τους. Επίσης το χαμηλό κόστος κεφαλαίου, η εύκολη κατασκευή, λειτουργία, συντήρησή τους, η μικρή προαπαιτούμενη έκταση εγκατάστασης καθώς και τα λιγότερα προβλήματα διάβρωσης σε σχέση με την προκάτοχο μέθοδο πολυβάθμιας εκτόνωσης έκανε τα συστήματα αντίστροφης ώσμωσης να αποτελέσουν γρήγορα την πρώτη επιλογή για παραγωγή γλυκού νερού. [43]

Ωστόσο, όμως, η μέθοδος αυτή δεν παύει να έχει και αρκετά μειονεκτήματα. Εξαιτίας της μεγάλης ευαισθησίας των μεμβρανών είναι αβέβαιος ο χρόνος ζωής τους και απαιτείται ουσιαστική προεπεξεργασία του νερού τροφοδοσίας. Η ποιότητα του παραγόμενου γλυκού νερού είναι χαμηλότερη σε σχέση με το αντίστοιχο των συστημάτων πολυβάθμιας εκτόνωσης. Παρατηρείται, επίσης, υποβιβασμός του ρεύματος του παραγόμενου νερού λόγω του φαινομένου ερπυσμού αλλά και συμπίεσης που λαμβάνει χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες ή πιέσεις. Τέλος, ο εξοπλισμός αυτών των συστημάτων αποτελείται από πολύ μικρά εξαρτήματα, όπως αντλίες, φίλτρα, μεμβράνες, με το κάθε ένα από αυτά να αποτελεί πιθανή αιτία διαρροής. [43]

Η παραγωγή γλυκού νερού σε μεγάλα συστήματα αφαλάτωσης περιλαμβάνει σημαντικά ποσά ενεργειακής κατανάλωσης, ανάλογα με τον τύπο και την δυναμικότητα του συστήματος. Έτσι, ένα σύστημα πολυβάθμιας εκτόνωσης απαιτεί περίπου 240-300 kJ/kg προϊόντος θερμικής ενέργειας, υπό την μορφή ατμού, για να θερμάνει το ρεύμα ανακυκλοφορίας στον θερμοαντλία άλμης, καθώς και 10-12 kJ/kg προϊόντος μηχανικής (ή ηλεκτρικής) ενέργειας, για να οδηγήσει την τροφοδοσία, την ανακυκλοφορία, τις αντλίες απόρριψης άλμης και άλλα βοηθητικά. [43]

Ένας σύγχρονος σχεδιασμός 6 εκατομμυρίων γαλονιών την ημέρα (1 εκατομμύριο γαλόνια= 4500 τόνους), με τροφοδοσία 50.000 ppm και υψηλότερη θερμοκρασία της άλμης 110°C, καταναλώνει περίπου 75 MW θερμικής ενέργειας και περίπου 3 MWe μόνο για την ανακυκλοφορία της άλμης ενώ για τις άλλες αντλίες και τα βοηθητικά εξαρτήματα χρειάζεται περίπου 1,2 MWe (ένα μέσο 2,5-4 kWh/ton προϊόντος υπολογίζεται στον σχεδιασμό). Ένα σύστημα εξάτμισης της ίδιας δυναμικότητας και 12 βαθμίδων, θα καταναλώνει σχεδόν την ίδια θερμική ενέργεια και περίπου 60% της μηχανικής ενέργειας άντλησης του ίδιου συστήματος πολυβάθμιας εκτόνωσης. [43]

Ένα σύστημα αντίστροφης ώσμωσης (RO) θαλασσινού νερού θα καταναλώνει μηχανική ή ηλεκτρική ενέργεια για να οδηγήσει την αντλία υψηλής πίεσης που τροφοδοτεί την μεμβράνη, εκτός των άλλων βοηθητικών αντλιών. Η ενεργειακή κατανάλωση των αντλιών υψηλής πίεσης της αντίστροφης ώσμωσης θαλασσινού νερού με ανάκτηση ύδατος 25%, συνθήκες λειτουργίας 69bar και 60% αποδοτικότητα άντλησης, υπολογίζεται 12,7 kWh/m (χωρίς την ανάκτηση). [44] Έτσι ένα σύστημα μεγάλης δυναμικότητας, 6 εκατομμυρίων γαλονιών την ημέρα, αφαλάτωσης θαλασσινού νερού 50.000 ppm θα καταναλώνει το ελάχιστο 14,29 MWe (περίπου 45,7 kJ/kg προϊόντος) μόνο για τις αντλίες υψηλής πίεσης. Οι ενεργειακές καταναλώσεις ευνοούν καθαρά την αντίστροφη ώσμωση έναντι της πολυβάθμιας εκτόνωσης (45,7 kJ/kg μηχανικής δουλειάς για τα συστήματα αντίστροφης ώσμωσης έναντι 240 kJ/kg θερμικής ενέργειας και 2 ή 8 kJ/kg μηχανικής ενέργειας για τα συστήματα πολυβάθμιας εκτόνωσης και πολλαπλής εξάτμισης, αντίστοιχα. [43]

Όταν το σύστημα αντίστροφης ώσμωσης (RO) έχει σαν νερό τροφοδοσίας του υφάλμυρο νερό, δηλαδή πολύ μικρότερης συγκέντρωσης άλατος (ppm), τότε οι μετρήσεις που αφορούν το σύστημα είναι ακόμα πιο ευνοϊκές. Στην περίπτωση αυτή δεν απαιτείται τόσο μεγάλη ενεργειακή κατανάλωση, εφόσον οι πιέσεις στον σύστημα αυτό είναι κατά πολύ μικρότερες και η ανάκτηση θερμότητας πολύ μεγαλύτερη. Ακόμα, η χαμηλή αλατότητα του νερού δεν απαιτεί την μεγάλη προεργασία του και δεν καταπονεί τόσο τις μεμβράνες, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η διάρκεια ζωής τους. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά του συστήματος αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης (RO) υφάλμυρου νερού παρουσιάζονται στον παρακάτω **Πίνακα** συγκριτικά με τα χαρακτηριστικά του αντίστοιχου συστήματος αφαλάτωσης θαλασσινού νερού.

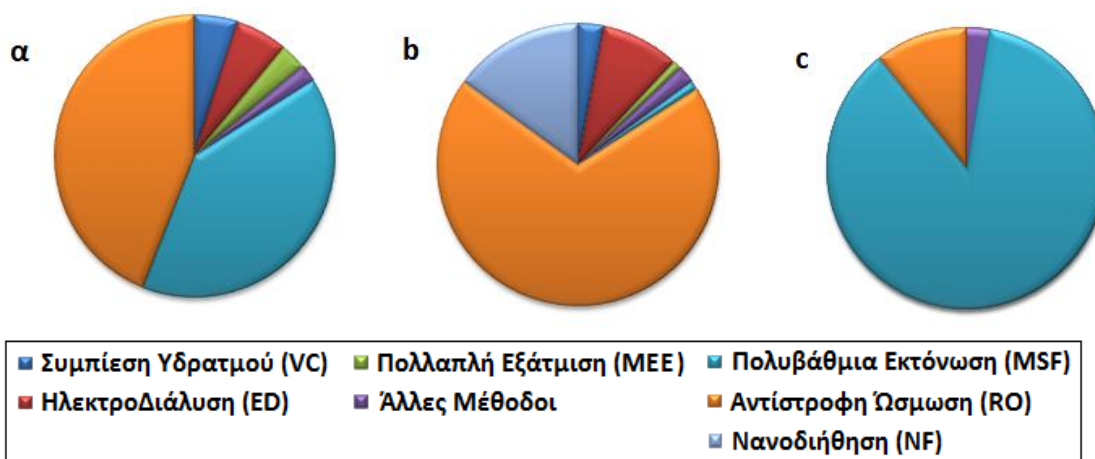
Παράμετρος	Αντίστροφη Ώσμωση (RO) Θαλασσινού Νερού	Αντίστροφη Ώσμωση (RO) Υφάλμυρου Νερού
Ροή Διηθήματος (L/m <sup>2</sup> -h)	12-15 (ανοικτού κυκλώματος πρόσληψη) 15-17 (πηγάδι)	12-45 (υπογείων υδάτων)
Υδροστατική Πίεση (kPa)	5500-8000	600-3000
Αντικατάσταση Μεμβράνης	20% ανά χρόνο Κάθε 2-5 χρόνια	5% ανά χρόνο Κάθε 5-7 χρόνια
Ανάκτηση (%)	35-45	75-90
Ph	5,5-7	5,5-7
Απόρριψη Άλατος (%)	99,4-99,7	95-99

**Πίνακας 7:** Σύγκριση Τυπικών Τιμών Παραμέτρων για Αντίστροφη Ώσμωση Θαλασσινού και Υφάλμυρου Νερού. [45]

Χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση συγκρινόμενη με τις υπόλοιπες μεθόδους αφαλάτωσης εμφανίζεται να έχει η μηχανική συμπίεση υδρατμού. Το ποσό της ενέργειας που προστίθεται σε ένα τέτοιο σύστημα υπό τη μορφή έργου, είναι μικρό, αλλά ακόμα ακριβό (τυπική τιμή είναι 50 kJ/kg αποστάγματος) συγκρίνοντάς την με την πολλαπλή εξάτμιση και την πολυβάθμια εκτόνωση. Ως αποτέλεσμα τα συστήματα μηχανικής συμπίεσης υδρατμού είναι ευαίσθητα στις θερμικές απώλειες από ακτινοβολία ή από τα απορριπτόμενα ρεύματα. Βοηθητική θερμότητα συνήθως παρέχεται στο σύστημα για την διατήρηση της ομαλής λειτουργίας του. Ενδεικτικά, για μια μονάδα 100 m<sup>3</sup>/d και νερό τροφοδοσίας με συγκέντρωση άλατος 42.000 ppm, χρειάζονται 55 kW για τον συμπιεστή, 2 kW για την αντλία της άλμης, 2 kW για κάθε αντλία τροφοδοσίας, προϊόντος, κυκλοφορίας και κενού και 0,075 kW για την χημική αντλία. Δηλαδή, συνολικά απαιτείται έργο 16.578 kWh/m. Ακόμα, η ελάχιστη απαιτούμενη βοηθητική θερμότητα ενός τέτοιου συστήματος για μια θερμοκρασία θαλασσινού νερού των 30°C, είναι 24kW όταν χρησιμοποιείται η ηλεκτρική ενέργεια για να παρέχει την επιπλέον θερμότητα. Αυτή η ενέργεια μπορεί να εξοικονομηθεί αν είναι διαθέσιμη μια φθηνή πηγή θερμικής ενέργειας, όπως μια γεννήτρια πετρελαίου. [46]



Ένα από τα αρνητικά του συστήματος μηχανικής συμπίεσης υδρατμού (MVC) είναι η παρουσία των φαινομένων διάβρωσης, όπως και ιζηματοποίησης. Για τον λόγο αυτό τα υλικά κατασκευής αυτών των συστημάτων είναι ακριβά και επιλέγονται πάντα με ιδιαίτερη προσοχή. Τέλος, ένα ακόμα αρνητικό για αυτό την μονάδα που αξίζει να αναφερθεί είναι η περαιτέρω επεξεργασία του παραγόμενου νερού. Σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους αφαλάτωσης, το παραγόμενο νερό από την μέθοδο μηχανικής συμπίεσης(MVC) είναι χαμηλής ποιότητας και ακατάλληλο για πόση και ως αποτέλεσμα η επεξεργασία του να είναι υποχρεωτική. [46]



**Εικόνα 146:** Κατανομή της Παραγωγικής Ικανότητας Αφαλάτωσης Ανάλογα με την Μέθοδο που Χρησιμοποιείται (α)Παγκοσμίως, (b)στα Ηνωμένα Έθνη, (c)στη Μέση Ανατολή (συμπεριλαμβάνονται η Σαουδική Αραβία, Κουβέιτ, Κατάρ, Μπαχρέιν και Ομάν.) [45]

Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό μιας μονάδας αφαλάτωσης είναι να έχει καλή αναλογία μεταξύ του κόστους της και της αποδοτικότητάς της. Το κόστος της μονάδας προϊόντος επηρεάζεται από μερικούς σχεδιαστικούς και λειτουργικούς παράγοντες στους οποίους περιλαμβάνονται οι παρακάτω [1]:

- **Αλατότητα και ποιότητα του νερού τροφοδοσίας.** Μικρότερη συγκέντρωση άλατος επιτρέπει υψηλότερο βαθμό μετατροπής. Ως αποτέλεσμα, το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει με χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση και δόση χημικών συστατικών.
- **Δυναμικότητα του συστήματος.** Μεγαλύτερης δυναμικότητας συστήματα μειώνουν το κόστος κεφαλαίου ανά μονάδα προϊόντος. Αν και η αύξηση της δυναμικότητας του συστήματος περιλαμβάνει υψηλότερο κεφάλαιο.
- **Συνθήκες τοποθεσίας.** Η εγκατάσταση νέων μονάδων σαν προσθήκη σε υφιστάμενες τοποθεσίες, θα εξαλείψει το κόστος που σχετίζεται με εγκαταστάσεις για την πρόσληψη νερού τροφοδοσίας, διαχείριση της άλμης και προεπεξεργασίας του νερού τροφοδοσίας.
- **Καταρτισμένο ανθρώπινο δυναμικό.** Η διαθεσιμότητα καταρτισμένων λειτουργών, μηχανικών και διαχειριστών μπορεί να οδηγήσει σε

υψηλότερη διαθεσιμότητα του συστήματος, δυναμικότητα παραγωγής και χρόνου συντήρησης άρα επαναφορά λειτουργίας του συστήματος.

- *Ενεργειακό κόστος.* Η διαθεσιμότητα ανέξοδων πηγών για χαμηλό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανση με ατμό έχει σημαντικό αντίκτυπο στο κόστος του προϊόντος ανά μονάδα.
- *Διάρκεια ζωής του έργου και απόσβεση.* Αύξηση της διάρκειας ζωής του έργου μειώνει το κόστος κεφαλαίου του προϊόντος.

Οι υπολογισμοί του κόστους της μονάδας προϊόντος εξαρτώνται από την δυναμικότητα της διεργασίας, τα χαρακτηριστικά της περιοχής και τις σχεδιαστικές ιδιότητες. Η δυναμικότητα του συστήματος καθορίζει τα μεγέθη για τον εξοπλισμό διαφόρων διεργασιών, μονάδων άντλησης αλλά και της επιφάνειας των μεμβρανών. Τα χαρακτηριστικά στοιχεία της περιοχής έχουν μια δυνατή επίδραση τόσο στον τύπο επεξεργασίας που θα εφαρμοστεί πριν και μετά την διεργασία αφαλάτωσης όσο και στον βαθμό κατανάλωσης των χημικών ουσιών. Επίσης, οι σχεδιαστικές ιδιότητες της διεργασίας επηρεάζουν την κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας, του ατμού θέρμανσης και των χημικών. [1]

Το κόστος παραγωγής ενός συστήματος αφαλάτωσης χωρίζεται στο άμεσο και έμμεσο κόστος καθώς και στο ετήσιο κόστος λειτουργίας. Τα στοιχεία που καθορίζουν την κάθε κατηγορία περιγράφονται στα ακόλουθα σημεία, ενώ παρουσιάζονται σχηματικά στην **Εικόνα 146**. [1]:

#### ➔ Άμεσο Κόστος

Το άμεσο κόστος κεφαλαίου καλύπτει το κόστος αγοράς διάφορων τύπων εξοπλισμού, βοηθητικού εξοπλισμού, όπως ακόμα και το κόστος της έκτασης, της κατασκευής και της οικοδόμησης. Παρακάτω δίνονται συνοπτικές περιγραφές για ενδεικτικά κόστη διαφόρων ενεργειών και αντικειμένων.

- *Κόστος Έκτασης.* Αυτό το κόστος μπορεί να ποικίλλει από μηδέν επιβαρύνσεις έως και ένα συνολικό ποσό το οποίο εξαρτάται από τις ιδιότητες της περιοχής. Τα κρατικά συστήματα αφαλάτωσης κανονικά έχουν μηδενική χρέωση. Επίσης, έργα τα οποία γίνονται σε συνεργασία με κυβερνητικούς ή κοινοτικούς παράγοντες μπορούν να επιτύχουν αρκετά μειωμένες ή ακόμα και μηδενικές επιβαρύνσεις όσον αφορά το κόστος της εκμεταλλεύσιμης έκτασης.
- *Παροχή από Πηγάδι.* Πρόσφατες εκτιμήσεις δείχνουν 650\$/m βάθους για την κατασκευή. Η μέση δυναμικότητα ενός πηγαδιού εκτιμάται σε 500 m<sup>3</sup>/d.
- *Εξοπλισμός Διεργασίας.* Αυτό είναι ένα από τα πλέον στοιχεία κόστους και εξαρτάται από τον τύπο της διεργασίας και την δυναμικότητα. Το κόστος του εξοπλισμού της διεργασίας μπορεί να είναι λιγότερο από \$1000 και ένα ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεί μια μονάδα αντίστροφης ώσμωσης εργαστηριακής κλίμακας που λειτουργεί με νερό χαμηλής περιεκτικότητας αλατιού για μικρή οικιακή παραγωγή.

Από τη άλλη πλευρά, το κόστος ενός εξοπλισμού αντίστροφης ώσμωσης παραγωγής 100.000 m<sup>3</sup>/d είναι περίπου \$50×10<sup>6</sup>. Το κόστος εξοπλισμού της πολυβάθμιας εκτόνωσης και της πολλαπλής εξάτμισης είναι μεγαλύτερο από αυτό των διεργασιών αντίστροφης ώσμωσης και σύμφωνα με πρόσφατες ενδείξεις φτάνει τα \$40×10<sup>6</sup> για σύστημα δυναμικότητας 27.000 m<sup>3</sup>/d. Τα αντικείμενα τα οποία περιλαμβάνονται σε αυτή την κατηγορία είναι:

- ✓ Ο εξοπλισμός της διεργασίας
- ✓ Τα όργανα ελέγχου
- ✓ Ηλεκτρικά καλώδια
- ✓ Αντλίες
- ✓ Συστήματα καθαρισμού της διεργασίας
- ✓ Συστήματα επεξεργασίας πριν και μετά την διεργασία
- ✓ Γραμμή δικτύου πρόσληψης θαλασσινού νερού και απόρριψης της άλμης
- ✓ Σύστημα χλωρίωσης
- *Βοηθητικός Εξοπλισμός.* Σε αυτόν περιλαμβάνονται:
  - ✓ Ανοιχτός κύκλος πρόσληψης ή πηγάδι
  - ✓ Σωληνώσεις μεταφοράς
  - ✓ Δεξαμενές αποθήκευσης
  - ✓ Γεννήτριες και μετατροπείς
  - ✓ Αντλίες
  - ✓ Σωληνώσεις και βαλβίδες
- *Κόστος Οικοδόμησης.* Το κόστος οικοδόμησης κυμαίνεται μέσα σε ένα μεγάλο εύρος τιμών από \$100/m<sup>2</sup> έως \$1000/m<sup>2</sup>. Το εύρος αυτό διαμορφώνεται από τις ιδιότητες της περιοχής και τον τύπο οικοδόμησης. Στην οικοδόμηση περιλαμβάνονται τα παρακάτω:
  - ✓ Δωμάτιο ελέγχου
  - ✓ Εργαστήριο
  - ✓ Γραφεία
  - ✓ Συνεργείο
- *Κόστος Μεμβρανών.* Το κόστος αυτό εξαρτάται από την δυναμικότητα του συστήματος και κυμαίνεται από \$500 έως \$1000 ανά μονάδα, και έχουν βαθμούς παραγωγής που κυμαίνεται από 50 έως 100 m<sup>3</sup>/d.

#### ➔ Έμμεσο Κόστος

Όλα τα κόστη των αντικειμένων που περιλαμβάνονται σε αυτή την κατηγορία είναι εκφρασμένα ως ποσοστά επί τοις εκατό του συνολικού άμεσου κόστους κεφαλαίου. Στα έμμεσα κόστη κεφαλαίου περιλαμβάνονται τα παρακάτω:

- *Ναύλα και Ασφάλιση.* Αυτό το κόστος είναι ίσο με το 5% του ολικού άμεσου κόστους.
- *Γενικά Έξοδα Κατασκευής.* Αυτό το κόστος είναι ίσο με το 15% του άμεσου κόστους υλικών και εργασίας και μετά προσαρμόζεται στο

μέγεθος, δηλαδή το ολικό κόστος κεφαλαίου, του συστήματος. Σε αυτό περιλαμβάνονται τα ακόλουθα:

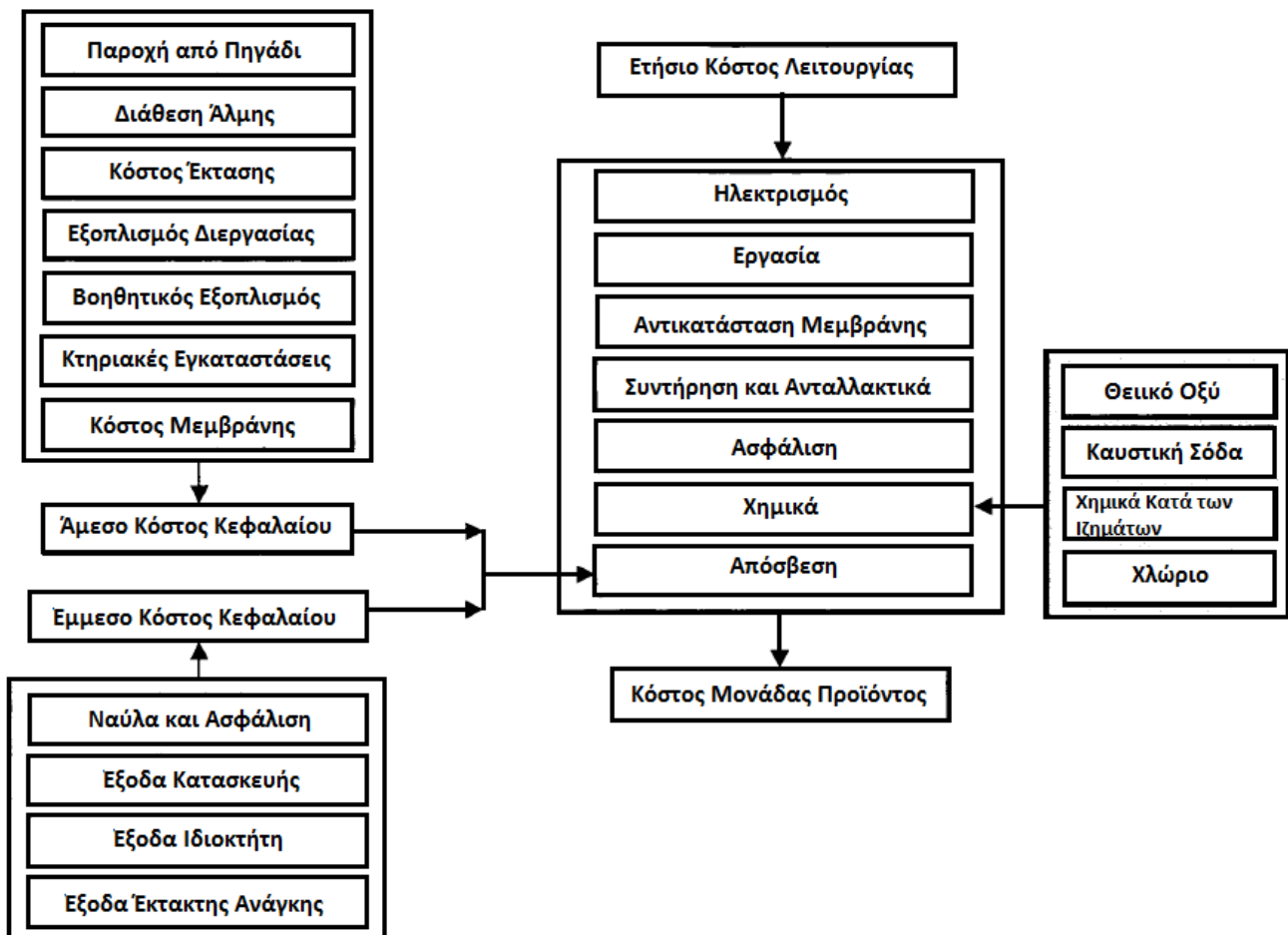
- ✓ Πρόσθετες παροχές
  - ✓ Φόρτος εργασίας
  - ✓ Επιβλέπων τομέα
  - ✓ Προσωρινές εγκαταστάσεις
  - ✓ Κατασκευαστικός εξοπλισμός
  - ✓ Μικρά εργαλεία
  - ✓ Κέρδη αναδόχου κατασκευαστή
- *Έξοδα Ιδιοκτήτη.* Ανέρχονται στο 10% του άμεσου κόστους υλικών και εργασίας και μετά προσαρμόζονται στο μέγεθος, δηλαδή το ολικό κόστος κεφαλαίου, του συστήματος. Σε αυτά περιλαμβάνονται τα μηχανικά και τα νομικά έξοδα.
  - *Έξοδα Έκτακτης Ανάγκης.* Καταλαμβάνουν το 10% του ολικού άμεσου κόστους.

#### ➔ Κόστος Λειτουργίας

Το κόστος λειτουργίας καλύπτει όλες τις δαπάνες που πραγματοποιούνται μετά την ανάθεση των συστημάτων και κατά την διάρκεια της πραγματικής τους λειτουργίας. Σε αυτά περιλαμβάνονται η εργασία, η ενέργεια, τα χημικά, τα ανταλλακτικά μέρη και διάφορα άλλα που προκύπτουν στην πορεία. Ακολουθεί σύντομη ανάλυση των όσων ανήκουν σε αυτή την κατηγορία:

- *Ηλεκτρισμός.* Το κόστος αυτό κυμαίνεται σε ένα εύρος του 0,04-0,09 kWh. Το ανώτατο όριο είναι χαρακτηριστικό για τις Ευρωπαϊκές χώρες ενώ το κατώτατο μπορούμε να το βρούμε στις χώρες του Κόλπου και στα Ηνωμένα Έθνη.
- *Εργασία.* Το κόστος αυτό είναι χαρακτηριστικό της περιοχής και εξαρτάται κατά πόσο το έργο είναι κρατικό ή ιδιωτικό. Επιπλέον, οι πρόσφατες τάσεις όσον αφορά την λειτουργία των έργων έχουν ως στόχο για τις αναθέτουσες λειτουργίες και τα έξοδα συντήρησης. Αυτό μειώνει το ανθρώπινο δυναμικό πλήρης απασχόλησης, στο οποίο μπορεί να περιλαμβάνεται ο διευθυντής των εγκαταστάσεων καθώς και μια μικρή ομάδα έμπειρων μηχανικών και τεχνικών.
- *Αντικατάσταση Μembrάνης.* Αυτή κυμαίνεται στο 5-20% ανά χρόνο. Το κατώτατο όριο εφαρμόζεται για υφάλμυρο νερό χαμηλής περιεκτικότητας άλατος που υποστηρίζεται από την σωστή λειτουργία του συστήματος και την προκατεργασία του, ενώ το ανώτατο αντιπροσωπεύει θαλασσινό νερό υψηλής αλατότητας, παρόμοιο με της περιοχής του Κόλπου, σε συνδυασμό με σύστημα χαμηλής λειτουργίας με αναποτελεσματικό σύστημα προεπεξεργασίας ύδατος.
- *Συντήρηση και Ανταλλακτικά.* Αυτό το κόστος μπορεί να αντιστοιχηθεί σε μια τιμή χαμηλότερη από το 2% του συνολικού κόστους κεφαλαίου που χρησιμοποιείται ως ετήσιο ποσοστό.
- *Ασφάλιση.* Αυτή ανέρχεται στο 0,5% του ετήσιου κόστους κεφαλαίου.

- **Απόσβεση και Πάγια Τέλη.** Το μέγεθος αυτό αναφέρεται στην ετήσια πληρωμή που καλύπτει το συνολικό ποσό του έμμεσου και άμεσου κόστους. Η εμπειρία στον τομέα αφαλάτωσης έδειξε ότι η απόσβεση 30 χρόνων είναι επαρκής. Όσον αφορά το επιτόκιο, η μέση τιμή του είναι 5%, ωστόσο μια σειρά από 3-8% θα πρέπει να εξετάζεται στην οικονομική ανάλυση.
- **Χημικά.** Στα χημικά που χρησιμοποιούνται για την προεργασία και τον καθαρισμό του νερού τροφοδοσίας περιλαμβάνονται τον θειικό οξύ, η καυστική σόδα, το χλώριο και χημικά ενάντια της ιζηματοποίησης. Τα κόστη αυτών μπορεί να επηρεάζονται από την διαθεσιμότητα κοντινών κατασκευαστών αλλά και τις τιμές της παγκόσμια αγοράς. Επίσης, η χημική επεξεργασία διαφέρει για τις θερμικές διεργασίες και τις διεργασίες μεμβρανών, όπου για τις τελευταίες το ειδικό κόστος είναι μεγαλύτερο. Ακόμα, η επεξεργασία εξαρτάται από την υψηλότερη θερμοκρασία της άλμης και την συγκέντρωση άλατος του νερού τροφοδοσίας.

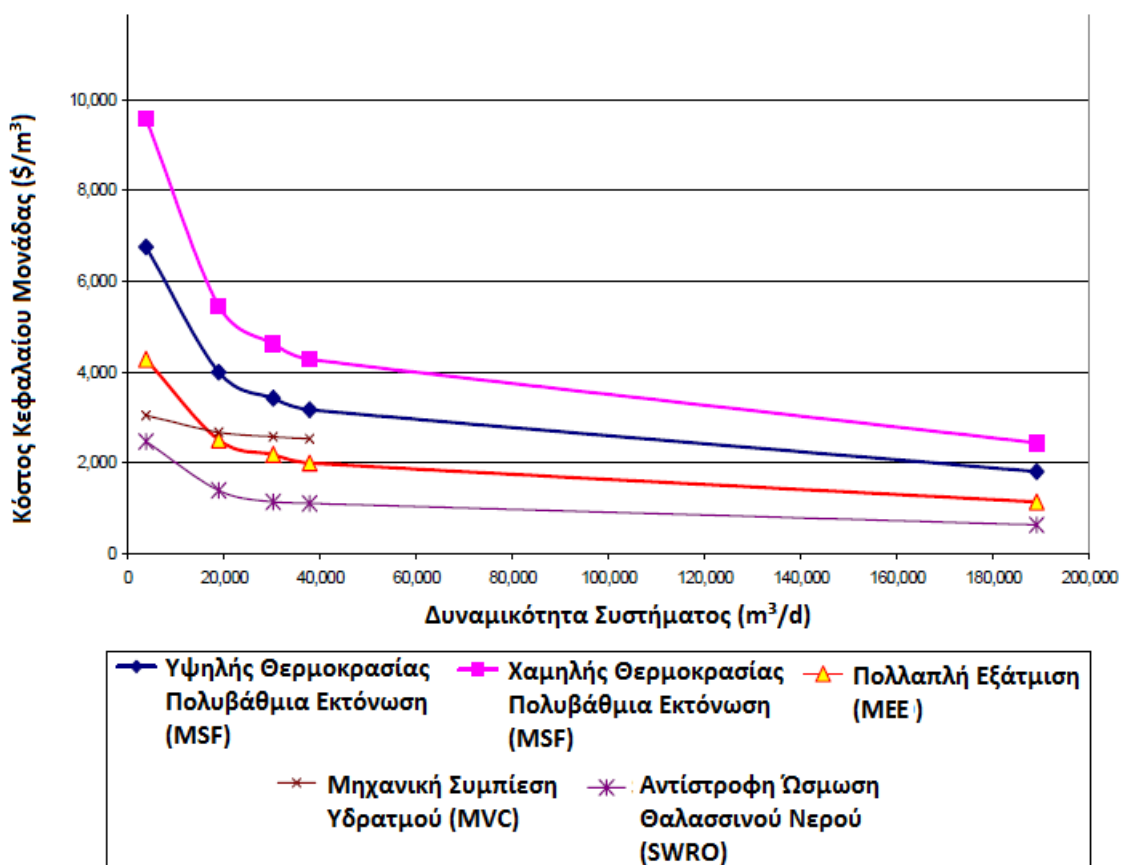


Εικόνα 147: Στοιχεία Κόστους Διεργασιών Αφαλάτωσης. [1]

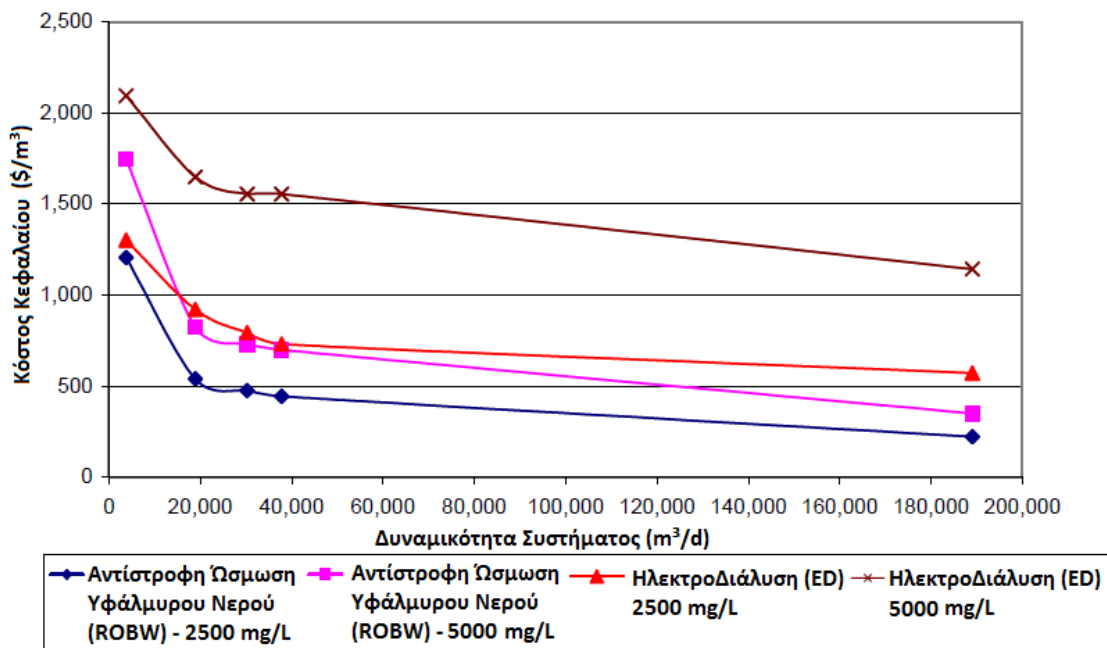
Διεργασία	Κόστος Εγκατάστασης (\$/εκτάριο)	Κόστος Λειτουργίας
Πολυβάθμια Εκτόνωση (MSF)	\$1.495.000	\$5.301,20
Πολλαπλή Εξάτμιση (MEE)	\$1.011.000	\$5.306,54
Αντίστροφη Ώσμωση (RO)	\$640.700	\$3.173,78

**Πίνακας 8:** Μέσο Ενδεικτικό Κόστος Εγκατάστασης και Λειτουργίας Διαφόρων Διεργασιών Αφαλάτωσης που Προέκυψε Έπειτα από Μελέτη Συστημάτων Διαφόρων Δυναμικοτήτων για τις Χρονολογίες 1990-2006. [47]

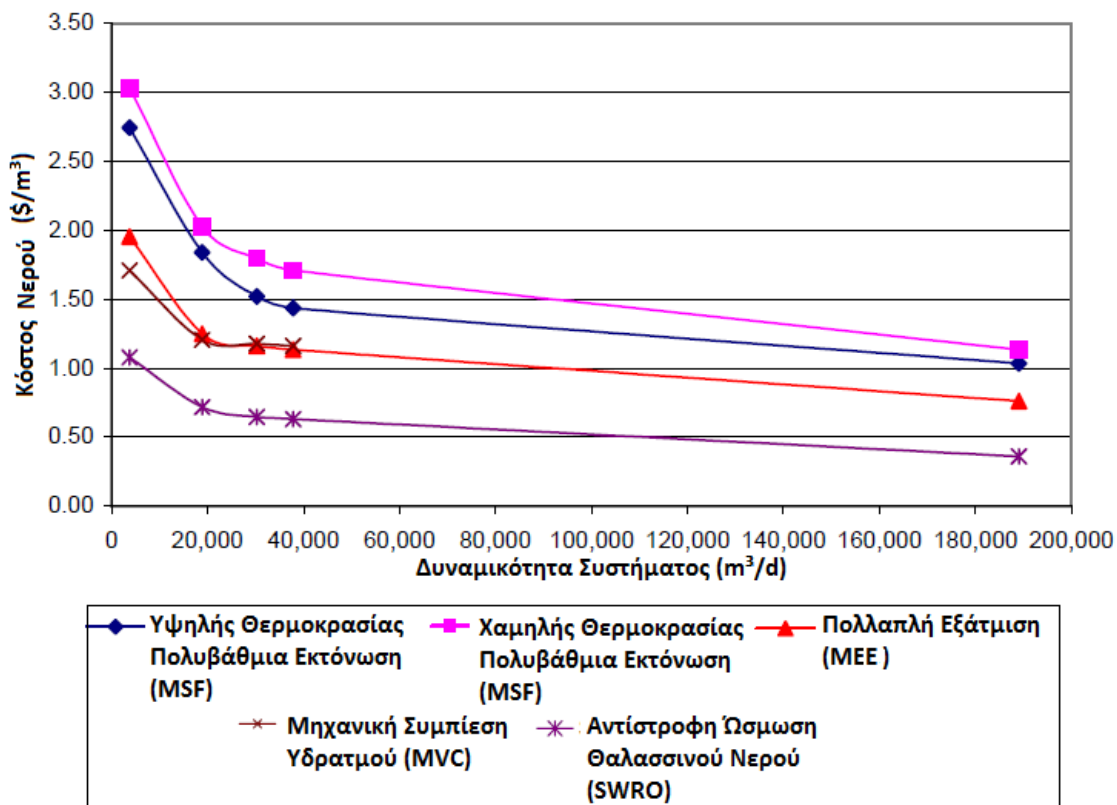
Ένα ενδεικτικό κόστος κεφαλαίου ανά μονάδα για την αφαλάτωση θαλασσινού και υφάλμυρου νερού παρουσιάζεται στα διαγράμματα των **Εικόνων 148** και **149** αντίστοιχα. Ακόμα το ενδεικτικό κόστος του νερού για κάθε διεργασία αφαλάτωσης παρουσιάζεται στην **Εικόνα 150** για θαλασσινό νερό τροφοδοσίας και στην **Εικόνα 151** για υφάλμυρο νερό τροφοδοσίας. [49]



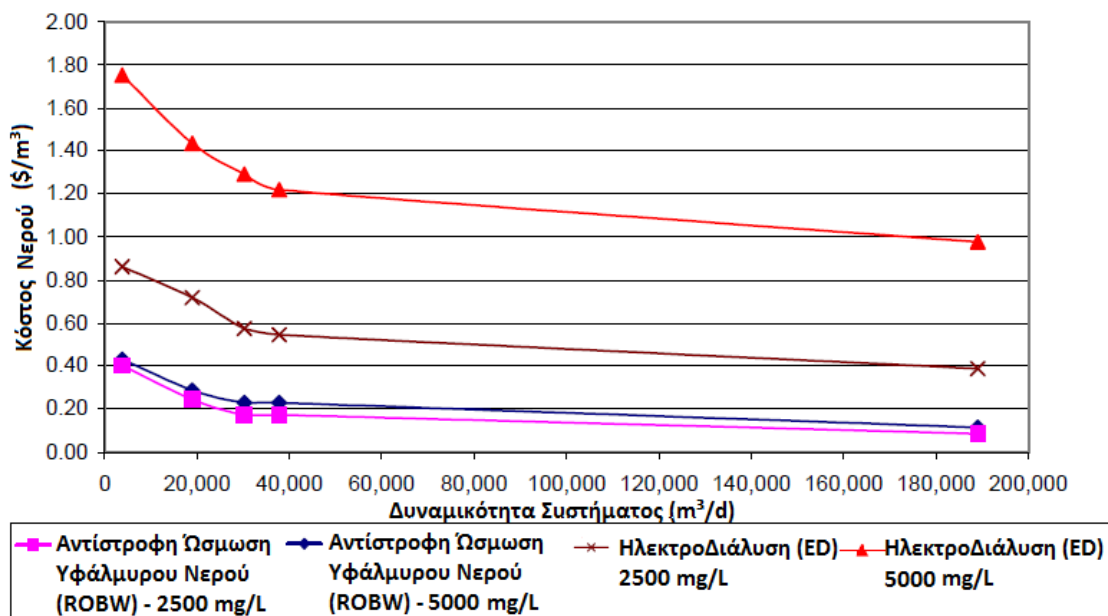
**Εικόνα 148:** Κόστος Κεφαλαίου Ανά Μονάδα Αφαλάτωσης Θαλασσινού Νερού. [49]



Εικόνα 149: Κόστος Κεφαλαίου Αφαλάτωσης Υφάλμυρου Νερού. [49]



Εικόνα 150: Κόστος Νερού Αφαλάτωσης Θαλασσινού Νερού Τροφοδοσίας. [49]



Εικόνα 151: Κόστος Νερού Αφαλάτωσης Υφάλμυρου Νερού Τροφοδοσίας. [49]

Γενικότερα, η ανάλυση όλων των οικονομικών δεδομένων που παρατέθηκαν παραπάνω απέδειξε ότι η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης (RO) τόσο θαλασσινού όσο και υφάλμυρου νερού τροφοδοσίας έχει την καλύτερη αναλογία μεταξύ κόστους και απόδοσης. Όσον αφορά τις θερμικές διεργασίες, αυτή της μηχανικής συμπίεσης υδρατμού (MVC) είναι η πιο οικονομική όσον αφορά μικρότερα συστήματα, ενώ αυτή της πολλαπλής εξάτμισης (MEE) είναι η πιο οικονομική για μεγαλύτερης δυναμικότητας συστήματα. Για την επεξεργασία αποθεμάτων υφάλμυρου νερού ως νερό τροφοδοσίας με περιεκτικότητα άλατος 2.500-5.000 mg/L, η αντίστροφη ώσμωση είναι η πιο συμφέρουσα από όλες. [49]

### 3.3.2 Σύγκριση των Συμβατικών Μεθόδων με τις Ηλιακές Μεθόδους

Η ανάγκη παραγωγής νερού συνήθως παρουσιάζεται σε άγονες και απομονωμένες περιοχές όπου δεν υπάρχει δίκτυο ηλεκτρισμού. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την συνεχή αύξηση των τιμών των στερεών καυσίμων έστρεψε το ενδιαφέρον της αγοράς προς την χρήση της ηλιακής ενέργειας σε μονάδες αφαλάτωσης.

Το πρώτο σύστημα αφαλάτωσης με χρήση της ηλιακής ενέργειας εγκαταστάθηκε το 1872 στην Χιλή και παρήγαγε περίπου 14,8 m<sup>3</sup>/d. [50] Σήμερα, αν και 138 χρόνια μετά, παρ' όλες τις τεχνολογικές εξελίξεις τα συστήματα αφαλάτωσης με χρήση ηλιακής ενέργειας δεν έχουν κατορθώσει να γίνουν εμπορικά βιώσιμα.



Στην παράγραφο αυτή θα πραγματοποιηθεί σύγκριση των συμβατικών μεθόδων, του **Κεφαλαίου 2**, με τις ηλιακές μεθόδους, όπως αναπτύχθηκαν στο **Κεφάλαιο 3**. Προκειμένου η σύγκριση να γίνει με δίκαια κριτήρια θα θεωρήσουμε ότι η περιοχή εγκατάστασης είναι μια άγονη και απομακρυσμένη περιοχή, χωρίς ηλεκτρικό δίκτυο και με ασύμφορη την μεταφορά καυσίμων.

Σε αυτή την κατηγορία, αντίθετα με την σύγκριση της προηγούμενης παραγράφου, οι ηλιακές θερμικές διεργασίες μπορούν να ανταγωνιστούν την ηλιακή αντίστροφη ώσμωση για την αφαλάτωση τόσο υφάλμυρου όσο και θαλασσινού νερού, καθώς η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να μετατραπεί εύκολα σε θερμική ενέργεια, ενώ η μετατροπή της σε ηλεκτρισμό είναι ακριβή.

#### ➤ Ηλιακή Αντίστροφη Ώσμωση (Solar Reverse Osmosis)

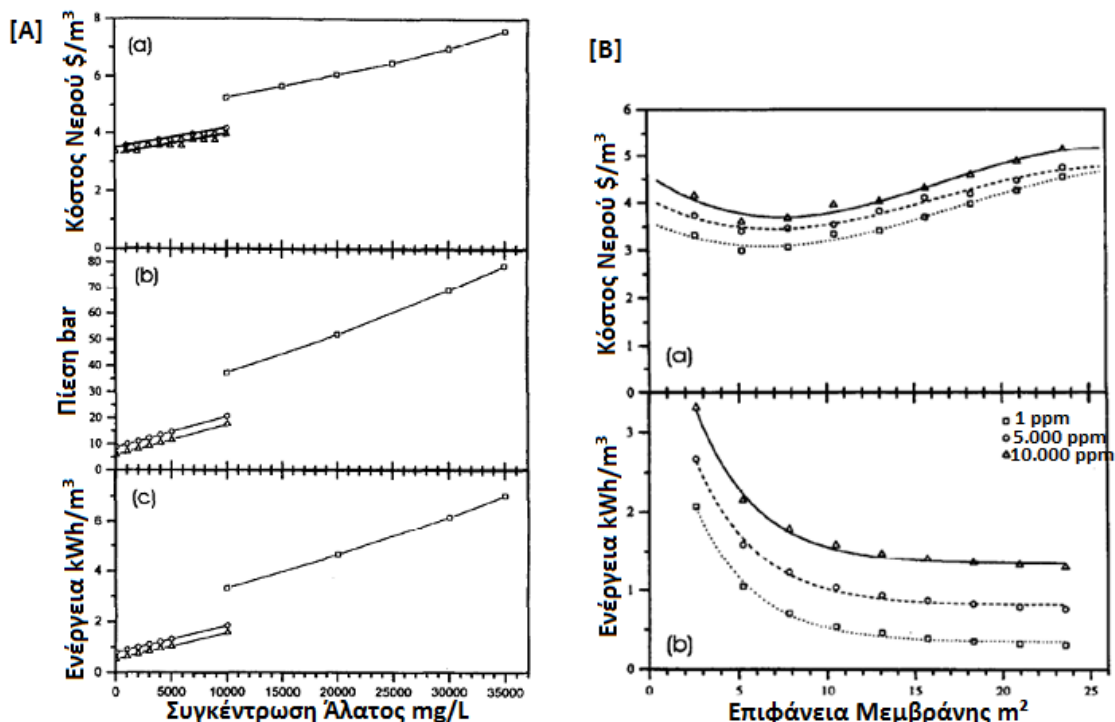
Για την μελέτη της αντίστροφης ηλιακής ώσμωσης (SRO) θεωρήσαμε μια μονάδα μικρής δυναμικότητας με ροή προϊόντος  $0,3 \text{ m}^3/\text{h}$ , ώστε οι θερμικές απώλειες στις σωληνώσεις και στα εξαρτήματα να είναι αμελητέες. Εφόσον το πιο γνωστό αλατούχο διάλυμα είναι το χλωριούχο νάτριο, χρησιμοποιείται ως αναφορά. Ως υφάλμυρο νερό θεωρούμε διάλυμα χλωριούχου νατρίου με συγκέντρωση  $3000 \text{ mg/L}$ . Ακόμα, ο μέσος όρος ζωής των μεμβρανών λαμβάνεται ίσος με 3 χρόνια ενώ ο μέσος όρος ζωής των φωτοβολταϊκών πλαισίων 20 χρόνια. Τέλος, η τιμή για κάθε εγκατεστημένο Watt ηλιακής ενέργειας λαμβάνεται ίση με \$8. Έτσι, τα διαγράμματα της **Εικόνας 152[A]** παρουσιάζουν την απαιτούμενη ενέργεια κατανάλωσης, την εξωτερική πίεση και το κόστος αφαλάτωσης συναρτήσει της συγκέντρωσης άλατος του νερού τροφοδοσίας, η οποία κυμαίνεται από 0-35.000ppm, με την τελευταία να αντιστοιχεί σε θαλασσινό νερό.

Τα διαγράμματα παρουσιάζονται για τους τρεις διαφορετικούς τύπους μεμβρανών. Η μεμβράνη χαμηλής πίεσης χρησιμοποιείται για νερό τροφοδοσίας με συγκέντρωση άλατος μικρότερη των  $10.000 \text{ mg/L}$ , η μεμβράνη υψηλής πίεσης για μεγαλύτερες συγκεντρώσεις από  $10.000 \text{ mg/L}$  και η μεμβράνη θαλασσινού νερού για συγκεντρώσεις που φτάνουν τα  $35.000 \text{ mg/L}$ . [53] Το όριο συγκέντρωσης άλατος στο πόσιμο νερό σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας είναι μικρότερο του  $500 \text{ mg/L}$ . [54]

Γενικά, μια σχεδόν γραμμική αύξηση παράλληλα με την αύξηση της συγκέντρωσης παρατηρείται για όλες τις ποσότητες εκτός από μερικά διάσπαρτα δεδομένα. Αρκετά μεγάλη αύξηση εντοπίζεται στο κόστος της αφαλάτωσης για συγκεντρώσεις μεγαλύτερες των  $10.000 \text{ mg/L}$ . Αξίζει να σημειωθεί, ότι στην περίπτωση που το προϊόν θέλουμε να είναι καθαρό νερό απαιτείται ένα επιπλέον 20% ενέργειας για την διήθηση. [53]

Στο διάγραμμα της **Εικόνας 152[B]** εμφανίζεται η επιρροή του μεγέθους της μεμβράνης ή της επιφάνειας εισαγωγής διηθήματος σαν συνάρτηση της

ενεργειακής κατανάλωσης και του κόστους αφαλάτωσης για τις διάφορες συγκεντρώσεις. Όπως μπορούμε να δούμε η ενεργειακή κατανάλωση μεταβάλλεται αντίστροφα της συγκέντρωσης άλατος του νερού τροφοδοσίας και στα τρία είδη μεμβρανών. [53]



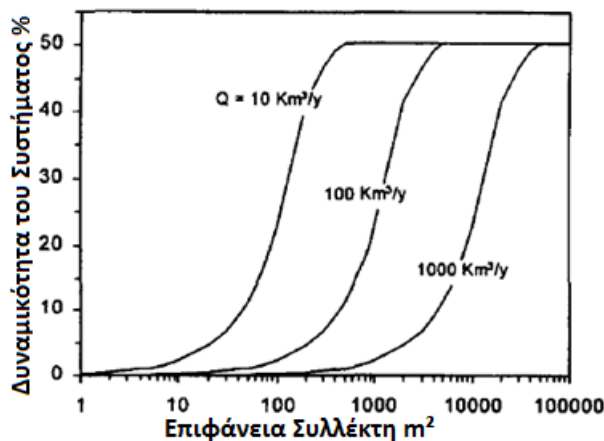
**Εικόνα 152:** Μεταβολή της Ενέργειας, της Πίεσης και του Κόστους του Νερού Συναρτήσεως της Συγκέντρωσης Άλατος της Τροφοδοσίας και της Επιφάνειας της Μεμβράνης. ▲ Μεμβράνη Χαμηλής Πίεσης, ○ Μεμβράνη Υψηλής Απόρριψης, □ Μεμβράνη Θαλασσινού Νερού. [53]

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου αντίστροφης ώσμωσης είναι το γεγονός ότι το παραγόμενο νερό είναι αρκετά καλής ποιότητας. Κρίσιμης σημασίας είναι η επιλογή των εξαρτημάτων του συστήματος, ώστε αυτά να έχουν την χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση, ενώ ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην επιλογή τύπου αντλίας υψηλής πίεσης. Η απόδοσή της καθορίζει λίγο ως πολύ και την αποδοτικότητα του συστήματος. Οι αντλίες του εμπορίου είναι συνήθως αποδοτικότητας 65%, ενώ ενδεικτικά μια αντλία με 100% απόδοση θα οδηγούσε σε ενεργειακή αποταμίευση της τάξεως του 50%. [53]

Όπως είδαμε και στο **Κεφάλαιο 3**, ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος συνδυασμός ηλιακού συστήματος αντίστροφης ώσμωσης είναι με φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Σε γενικές γραμμές, το κύριο κόστος εγκατάστασης ενός τέτοιου συστήματος καθορίζεται από το κόστος των φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Το μέγεθός του εξαρτάται τόσο από την δυναμικότητα παραγωγής της μονάδας όσο και από την αλατότητα του νερού τροφοδοσίας, με δυσμενέστερη περίπτωση την χρήση θαλασσινού νερού. Για τον λόγο αυτό, τέτοια συστήματα ηλιακής αντίστροφης

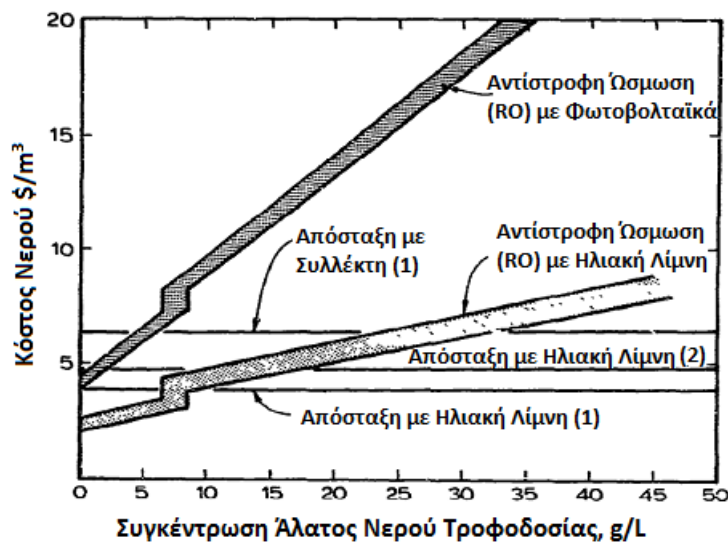
ώσμωσης εμφανίζονται πιο αποδοτικά για τροφοδοσία υφάλμυρου νερού χαμηλής αλατότητας. Έτσι, δεν επιτυγχάνεται μόνο μείωση του απαιτούμενου μεγέθους των φωτοβολταϊκών, και άρα εμμέσως του κόστους, αλλά και μείωση της απαιτούμενης ενέργειας για την διεξαγωγή της διεργασίας. [53]

Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές των ενεργειακών απαιτήσεων των φωτοβολταϊκών στοιχείων για ένα σύστημα δυναμικότητας  $100\text{km}^3/\text{y}$ . [55]



**Εικόνα 153:** Κάλυψη σαν Συνάρτηση της Επιφάνειας του Συλλέκτη και της Δυναμικότητας του Συστήματος. [55]

Οι υπόλοιποι συνδυασμοί της αντίστροφης ώσμωσης (RO), δηλαδή με ηλιακά θερμικά συστήματα, παράγουν νερό με χαμηλότερο κόστος ανά μονάδα σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά. Ένα ενδεικτικό διάγραμμα που συγκρίνει το κόστος του παραγόμενου νερού από συμβατικό σύστημα αντίστροφης ώσμωσης και σύστημα αντίστροφης ώσμωσης συνδυασμένο με φωτοβολταϊκά ή ηλιακή λίμνη, παρουσιάζεται παρακάτω. [56]

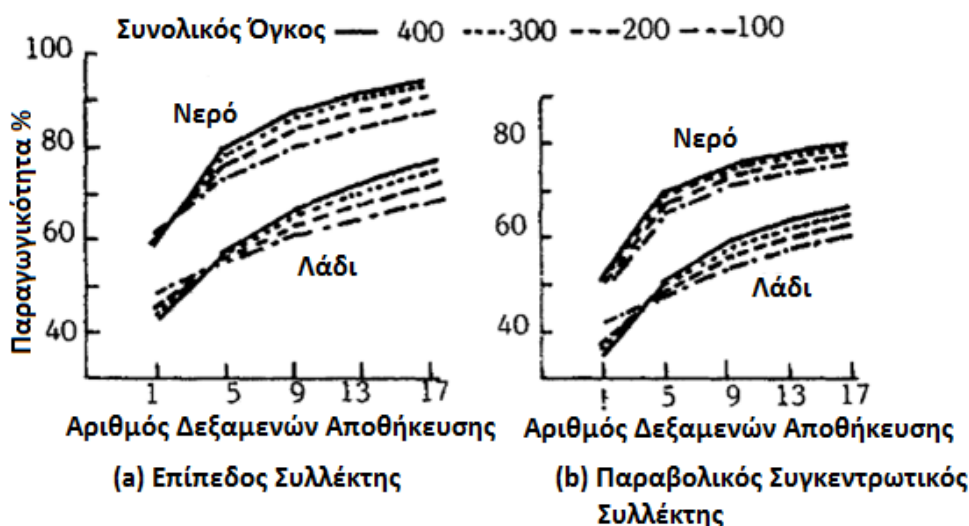


**Εικόνα 154:** Κόστος Νερού σαν Συνάρτηση της Αλατότητας με Παροχή Ηλεκτρισμού: (1) από Πετρέλαιο, (2) από Ηλιακή Λίμνη. [56]

Από τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι η ηλιακή αντίστροφη ώσμωση(SRO), με χρήση κυρίως φωτοβολταϊκών στοιχείων, για συστήματα μικρής δυναμικότητας μπορεί να είναι τεχνικά και οικονομικά ελκυστική υπό ορισμένες συνθήκες. Ειδικότερα, για την ηλιακή αντίστροφη ώσμωση (SRO) υφάλμυρου νερού με συγκέντρωση μικρότερη των 5.000 mg/L, η τιμή ανά κυβικό μέτρο είναι περίπου 20% μικρότερη από αυτή που ήδη χρεώνεται για το πόσιμο νερό της αντίστοιχης συμβατικής μεθόδου. Σε περιπτώσεις όμως που υπάρχει ηλεκτρικό δίκτυο στην περιοχή η μέθοδος της ηλιακής αντίστροφης ώσμωσης (SRO) είναι ασύμφορη και μη αποδοτική, όπως μπορούμε να δούμε και από το αντίστοιχο διάγραμμα κόστους σε σύγκριση με αυτό της συμβατικής διεργασίας αντίστροφης ώσμωσης. Μια καλή ιδέα είναι σε τέτοιες περιπτώσεις το σύστημα ηλιακής αντίστροφης ώσμωσης να χρησιμοποιηθεί ως εφεδρικό. [53]

➤ Ηλιακή Πολυβάθμια Εκτόνωση (Solar MultiStage Flash Desalination)

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του ηλιακού συστήματος πολυβάθμιας εκτόνωσης (SMSF) είναι το σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Ο ρόλος της μονάδας αποθήκευσης εμφανίζεται αρκετά σημαντικός καθώς φαίνεται να ελέγχει και κατά κάποιο τρόπο να καθορίζει την συμπεριφορά του συστήματος αφαλάτωσης. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται μια ενδεικτική μεταβολή της αποδοτικότητας του συστήματος συναρτήσει του αριθμού των δεξαμενών, του υγρού που χρησιμοποιείται ως μέσο θέρμανσης και του τύπου συλλεκτών. [57]



Εικόνα 155: Επίδραση του Αριθμού των Δεξαμενών Αποθήκευσης στην Παραγωγικότητα (%) του Συστήματος. [57]

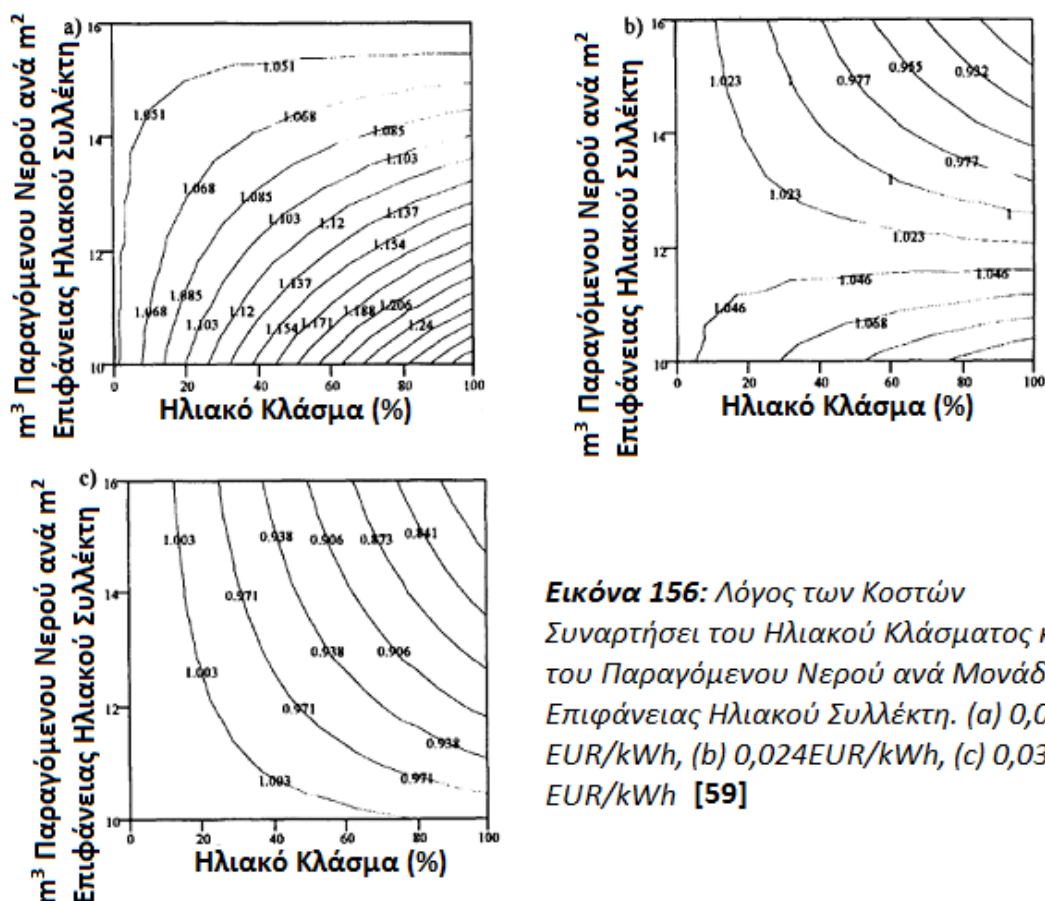
Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο παραπάνω διάγραμμα αφορούν σύστημα 30 σταδίων, παραγωγικότητας 100 m<sup>3</sup>/ημέρα, με θερμοκρασία και αλατότητα νερού τροφοδοσίας 20 °C και 40.000 ppm αντίστοιχα, ενώ θερμοκρασία εξόδου άλμης και αποστάγματος 25°C εξίσου. [57]

Όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε και για τους δύο τύπους συλλεκτών, η αποδοτικότητα του συστήματος αυξάνει με την αύξηση του αριθμού των δεξαμενών αποθήκευσης. Εντούτοις, ο ρυθμός της αύξησης αυτής μειώνεται για την αύξηση του αριθμού των δεξαμενών. Έτσι, ο βέλτιστος αριθμός θα εξαρτηθεί από τα οικονομικά στοιχεία της προσθήκης επιπλέον δεξαμενής. Το διάγραμμα μας δείχνει επίσης, ότι τα συστήματα που λειτουργούν με νερό, όπως οι συλλέκτες υγρού, έχουν μια καλύτερη παραγωγικότητα σε σχέση με αυτά που χρησιμοποιούν ως μέσο θέρμανσης κάποιο λάδι. Αυτό οφείλεται κυρίως στις υψηλές θερμικές απώλειες εξαιτίας των σχετικά υψηλών επιπέδων θερμοκρασίας που χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις χρήσης θερμικού λαδιού. Επίσης, το διάγραμμα δείχνει ότι η παραγωγικότητα του συστήματος αυξάνει καθώς η συνολική αύξηση του όγκου αποθήκευσης αυξάνει με φθίνον ρυθμό. Τέλος, αποδεικνύεται ότι οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες έχουν καλύτερη αποδοτικότητα σε σχέση με του παραβολικούς συγκεντρωτικούς συλλέκτες. [57]

Σύμφωνα με την οδηγία από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Ενέργειας για την σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών, θα χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο του μέσου κόστους για την σύγκριση της ηλιακής πολυβάθμιας εκτόνωσης (SMSF) με τα αντίστοιχα συμβατικά της συστήματα. [58] Έτσι, υπολογίζεται το μέσο κόστος προϊόντος τόσο για την ηλιακή όσο και για την συμβατική μέθοδο πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF), ώστε να βρεθούν οι συνθήκες υπό τις οποίες η ηλιακή μέθοδος μπορεί να ανταγωνιστεί την αντίστοιχη συμβατική της. Ένας ακόμη όρος που πρέπει να εισάγουμε για την καλύτερη κατανόηση της σύγκρισης είναι το ηλιακό κλάσμα. Η παράμετρος αυτή αντιπροσωπεύει το μέσο ετήσιο ποσοστό της ημέρας κατά την οποία το σύστημα αφαλάτωσης καταναλώνει ηλιακή ενέργεια. [59]

Οι μετρήσεις των διαγραμμάτων που ακολουθούν προέρχονται από το ηλιακό κέντρο έρευνας PSA (Plataforma Solar de Almeria), το οποίο βρίσκεται στη νοτιοανατολική Ισπανία. Τα αποτελέσματα θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύουν μια πρακτική περίπτωση. Η τιμή του κανονικού ηλιακού κλάσματος είναι 50% και η ποσότητα του γλυκού νερού που μπορεί να παραχθεί ανά  $m^2$  ηλιακού συλλέκτη, απόδοσης 10, είναι περίπου  $12 m^3$ . Θεωρούμε βαθμό απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη, στην περίπτωση αυτή παραβολικού τύπου συλλέκτες, τον ίδιο με τον αντίστοιχο του συμβατικού συστήματος για σχεδόν ίδιες θερμοκρασίες. [59]

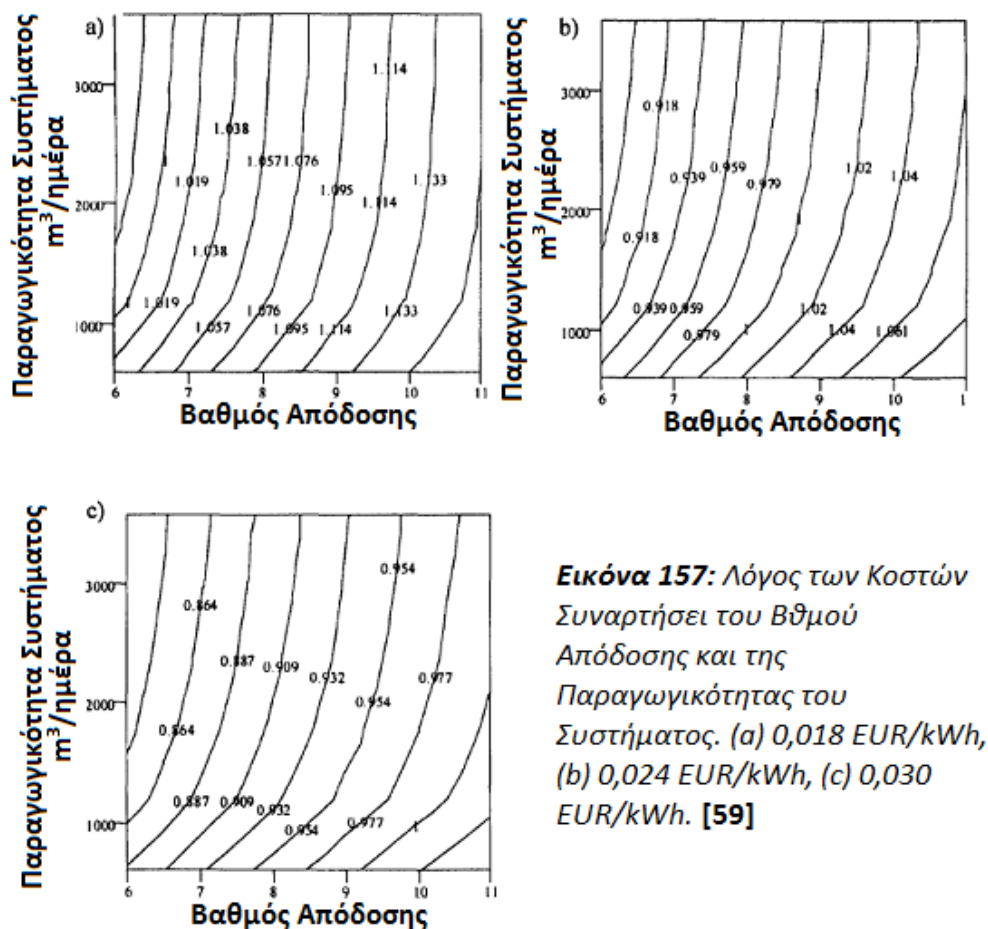
Στα παρακάτω διαγράμματα, παρουσιάζεται το μέσο κόστος προϊόντος ενός συστήματος πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) που λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια αλλά και χρήση καυσίμων διαιρεμένο με το μέσο κόστος προϊόντος ενός συμβατικού συστήματος πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF). Ειδικότερα, στα διαγράμματα της **Εικόνας 156** ο λόγος αυτός παρουσιάζεται συναρτήσει του ηλιακού κλάσματος και της ποσότητας του φρέσκου νερού που παράγεται ανά  $m^2$  ηλιακού συλλέκτη για σύστημα παραγωγικότητας  $2.400 m^3/ημέρα$ , βαθμού απόδοσης 10 και διάφορα κόσθη συμβατικής θερμικής ενέργειας. [59]



**Εικόνα 156:** Λόγος των Κοστών Συναρτήσεως του Ηλιακού Κλάσματος και του Παραγόμενου Νερού ανά Μονάδα Επιφάνειας Ηλιακού Συλλέκτη. (a) 0,018 EUR/kWh, (b) 0,024EUR/kWh, (c) 0,030 EUR/kWh [59]

Όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε από την παρατήρηση των τριών αυτών διαγραμμάτων για μια σταθερή τιμή ηλιακού κλάσματος ο λόγος των κοστών μειώνεται καθώς αυξάνεται η παραγωγή νερού ανά m<sup>2</sup> ηλιακού συλλέκτη. Αντίστοιχα, για μια σταθερή παραγωγή νερού ανά m<sup>2</sup> ηλιακού συλλέκτη ο λόγος αυτός μειώνεται καθώς αυξάνεται η τιμή του ηλιακού κλάσματος. Μείωση της τιμής του λόγου συνεπάγεται ότι το κόστος παραγωγής προϊόντος σε συμβατικό σύστημα είναι μεγαλύτερο από το κόστος παραγωγής προϊόντος σε ηλιακό σύστημα. Αυτή είναι άλλωστε και η αιτία που για μεγαλύτερες τιμές της θερμικής ενέργειας συμβατικού συστήματος, όπως παρατηρούμε στο διάγραμμα (c) για την τιμή 0,030 EUR/kWh, παρουσιάζονται όλο και μικρότερες τιμές του λόγου των κοστών.

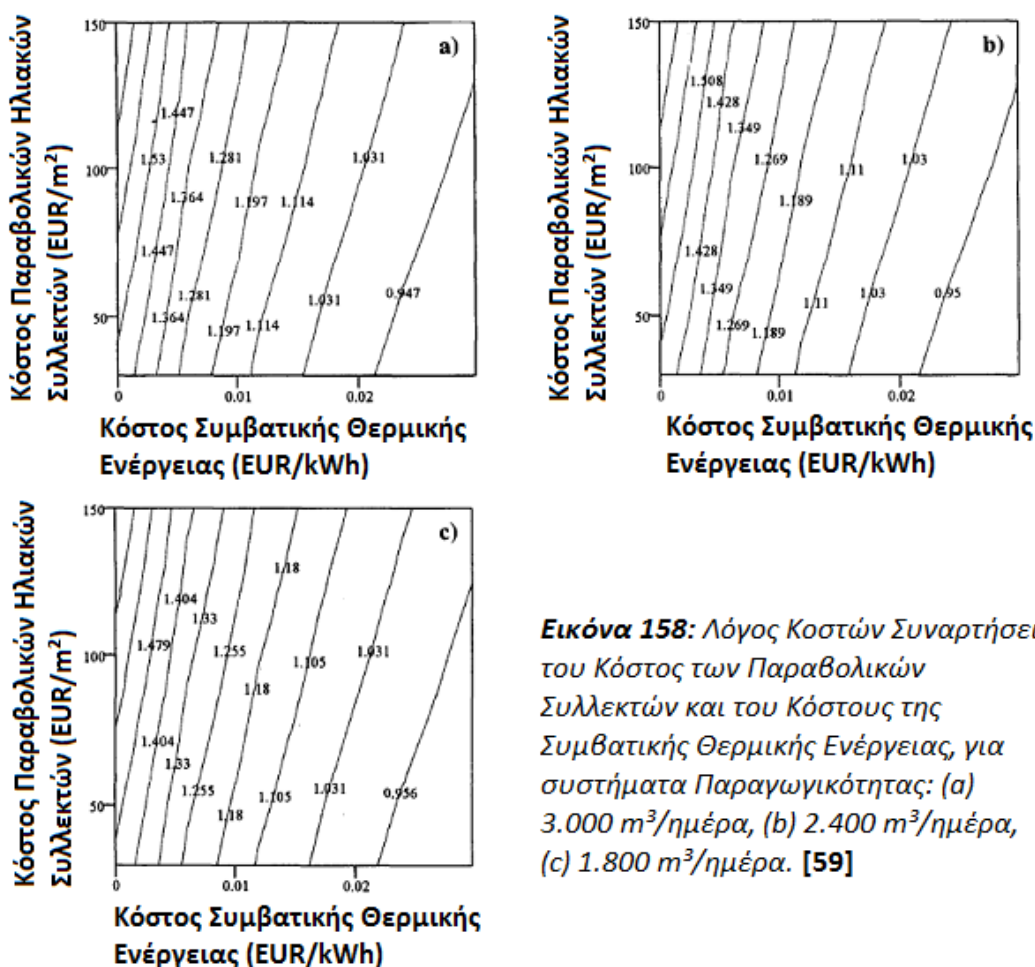
Αντίστοιχα, στο διάγραμμα της **Εικόνας 157**, ο λόγος παρουσιάζεται σαν συνάρτηση του βαθμού απόδοσης και της δυναμικότητας του συστήματος για διάφορες τιμές της συμβατικής θερμικής ενέργειας. [59]



**Εικόνα 157:** Λόγος των Κοστών Συναρτήσεσι του Βθμού Απόδοσης και της Παραγωγικότητος του Συστήματος. (a) 0,018 EUR/kWh, (b) 0,024 EUR/kWh, (c) 0,030 EUR/kWh. [59]

Γεγονός που παρατηρείται και στα τρία διαγράμματα είναι ότι για έναν συγκεκριμένο βαθμό απόδοσης ο λόγος που έχουν τα δυο κόστη μειώνεται με την αύξηση της παραγωγής του συστήματος. Για μεγάλη αύξηση σε μικρές παραγωγικότητες, ο λόγος εμφανίζει μεγάλη μείωση. Όσο συνεχίζεται, όμως, η αύξηση αυτή η τιμή του λόγου τείνει να μειώνεται με όλο και μικρότερο ρυθμό παρουσιάζοντας τάσεις εξισορρόπησης. Τέλος, και σε αυτή την περίπτωση όπως και στα διαγράμματα της προηγούμενης εικόνας, όσο αυξάνεται η τιμή της συμβατικής θερμικής ενέργειας τόσο μειώνεται η τιμή του λόγου, άρα τόσο πιο συμφέρουσα και ανταγωνιστική γίνεται η λύση της ηλιακής ενέργειας.

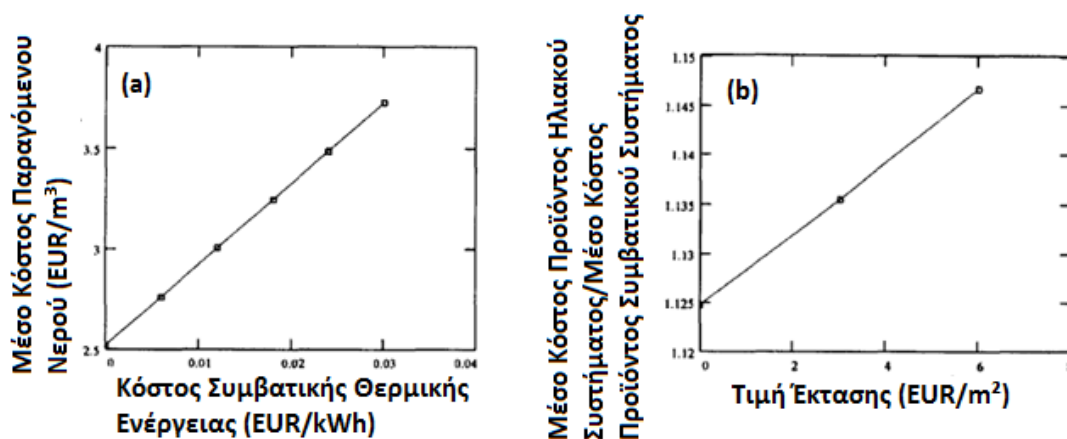
Η επιρροή της τεχνολογικής εξέλιξης των παραβολικών συλλεκτών στο κόστος του παραγόμενου γλυκού νερού, όπως και της μελλοντικής εξέλιξης στο αντίστοιχο κόστος των συμβατικών μονάδων εκτιμάται στα διαγράμματα της **Εικόνας 158**. Σε αυτά μπορούμε να δούμε την επίδραση και των δυο αυτών παραγόντων πάνω στον λόγο των δυο κοστών. [59]



Η μελέτη έγινε για συστήματα με διαφορετική δυναμικότητα παραγωγής και όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε η επιρροή των δυο αυτών παραγόντων είναι σχεδόν αμελητέα για τιμές παραγωγικότητας μεταξύ 1.800-3.000 m<sup>3</sup>/ ημέρα. [59] Τα διαγράμματα αυτά επιβεβαιώνουν και σχηματικά πια δυο από τα σημαντικότερα στοιχεία που έχουν ήδη προαναφερθεί όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της ηλιακής αφαλάτωσης. Αρχικά, το κύριο κόστος της παραγωγής νερού στις ηλιακές μεθόδους προέρχεται από το κόστος των ηλιακών συλλεκτών. Όπως μπορούμε να δούμε και γραφικά η εξάρτηση αυτή είναι σχεδόν γραμμική. Δεύτερον, επαληθεύεται και εδώ η διαπίστωση που έγινε στις δυο παραπάνω περιπτώσεις, ότι όσο πιο ακριβή γίνεται η θερμική ενέργεια των συμβατικών συστημάτων τόσο πιο συμφέρουσα θα παρουσιάζεται η εναλλακτική χρήση της ηλιακής ενέργειας.

Τέλος, ακολουθούν δυο ακόμη διαγράμματα που αφορούν την εξάρτηση του κόστους των δυο διεργασιών. Το διάγραμμα της **Εικόνας 159 (α)** δείχνει την επίδραση του κόστους της συμβατικής ενέργειας στο μέσο κόστος παραγωγής νερού σε συμβατικές μονάδες, ενώ το διάγραμμα της **Εικόνας 159 (β)** παρουσιάζει την επίδραση της τιμής της έκτασης στο μέσο κόστος παραγωγής νερού σε μια ηλιακή μονάδα πολυβάθμιας εκτόνωσης. Και τα δυο διαγράμματα αφορούν συστήματα παραγωγικότητας 2.400 m<sup>3</sup>/ημέρα και βαθμού απόδοσης 10. [59]





**Εικόνα 159:** (α) Επίδραση Κόστους Συμβατικής Θερμικής Ενέργειας στο Μέσο Κόστος Παραγωγής Νερού, (β) Επίδραση της Τιμής της Έκτασης στον Λόγο μέσου Κόστους Προϊόντος σε Ηλιακά και Συμβατικά Συστήματα. [59]

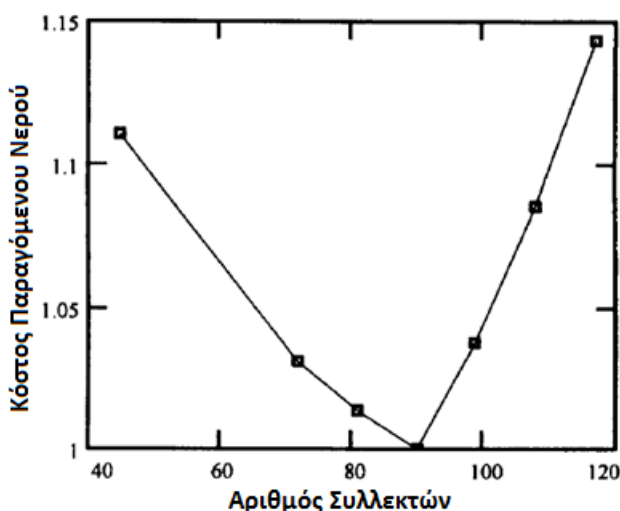
Συνοψίζοντας, από την ανάλυση που έγινε για το παραπάνω ηλιακό σύστημα πολυβάθμιας εκτόνωσης (SMSF), συμπεράναμε ότι η χρήση της ηλιακής ενέργειας μπορεί να ανταγωνιστεί την χρήση συμβατικών συστημάτων πολυβάθμιας (MSF) εκτόνωσης για ορισμένες κλιματολογικές συνθήκες. Επιπλέον, η μελλοντική μείωση του κόστους στην αγορά των ηλιακών συλλεκτών με την παράλληλη αύξηση τις τιμές των συμβατικών μορφών ενέργειας θα είναι αξιοσημείωτη και θα γύρει την πλάστιγγα προς την χρήση της ηλιακής ενέργειας. [59]

➤ Ηλιακή Πολλαπλή Εξάτμιση (Solar Multiple Effect Evaporation)

Τα συστήματα πολλαπλή εξάτμισης (MEE), όπως είδαμε και στις αρχές του **Κεφαλαίου 3**, μπορούν να λειτουργήσουν με τρεις διαφορετικές διαρρυθμίσεις. Έχουμε, λοιπόν, τα συμβατικά, τα αυτόνομα ηλιακά και τα υβριδικά συστήματα που κάνουν χρήση τόσο της ηλιακής όσο και της ηλεκτρικής ενέργειας. Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας στις μονάδες πολλαπλής εξάτμισης πραγματοποιείται με την χρήση της ηλιακής λίμνης και των ηλιακών θερμικών συστημάτων.

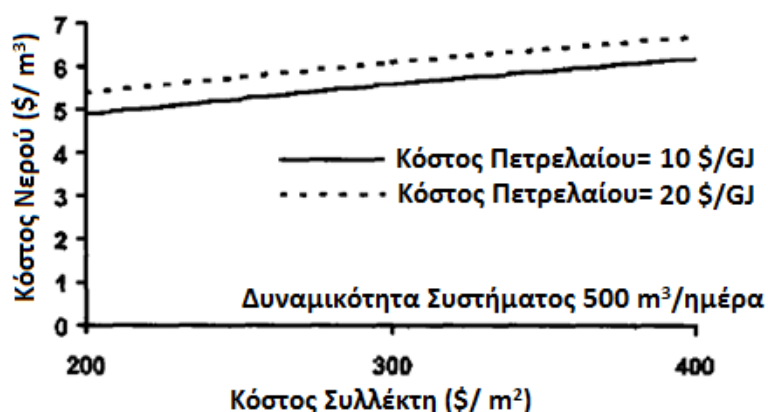
Ο συνδυασμός των μονάδων πολλαπλής εξάτμισης (MEE) με τις ηλιακές λίμνες είναι από τους πιο αποδοτικούς αλλά και παράλληλα οικονομικούς συνδυασμούς, όχι μόνο σε σύγκριση με τις υπόλοιπες ηλιακές μεθόδους αλλά ακόμα και με πολλές συμβατικές. Ενδεικτικά, ένα σύστημα πολυβάθμιας εκτόνωσης σε συνδυασμό με ηλιακή λίμνη, για θερμοκρασίες 80-90°C απαιτεί 2,5-4 kWh/m<sup>3</sup> για την διεργασία της άντλησης και δίνει αναλογία αποσταγμένου προϊόντος προς τροφοδοσία ατμού μόνο 6:1. Από την άλλη πλευρά, ένα σύστημα πολλαπλής εξάτμισης σχεδιάζονται για αναλογία αποσταγμένου προϊόντος ανά ποσότητα τροφοδοσίας ατμού 16:1 ενώ απαιτούν μόλις 1,5-2 kWh/m<sup>3</sup> για την άντληση. Επίσης, ο συνδυασμός αυτός εμφανίζεται να είναι πιο οικονομικός ακόμα και σε σχέση με την συμβατική μέθοδο αντίστροφης ώσμωσης θαλασσινού νερού. [60]

Για τον συνδυασμό του συστήματος πολλαπλής εξάτμισης (ΜΕΕ) με ηλιακό θερμικό συλλέκτη θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο περιορισμός ότι η ηλιακή συστοιχία συλλεκτών που θα συνδεθεί στο σύστημα πρέπει να είναι η μεγαλύτερη που επιτρέπει την ολική κατανάλωση ενέργειας που αποδίδεται από το ηλιακό πεδίο. Για ηλιακά πεδία μεγαλύτερα από αυτό, το κόστος του παραγόμενου νερού αυξάνει εξαιτίας της ελλιπής κατανάλωσης της ηλιακής ενέργειας που είναι διαθέσιμη στο σύστημα. Αυτό συμβαίνει κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες κατά τους οποίους το σύστημα αδυνατεί να κάνει χρήση όλης της παραγόμενης διαθέσιμης ενέργειας από την 24ωρη λειτουργία του. Μολαταύτα, για αριθμό ηλιακών συλλεκτών μικρότερου του ιδανικού, ο μέσος όρος των ημερήσιων ωρών λειτουργίας του συστήματος είναι χαμηλότερος από το ανώτατο όριο. Έτσι, η παραγωγή του νερού είναι μικρότερη από την ανώτατη που μπορεί να επιτευχθεί. Αυτό παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα. [61]



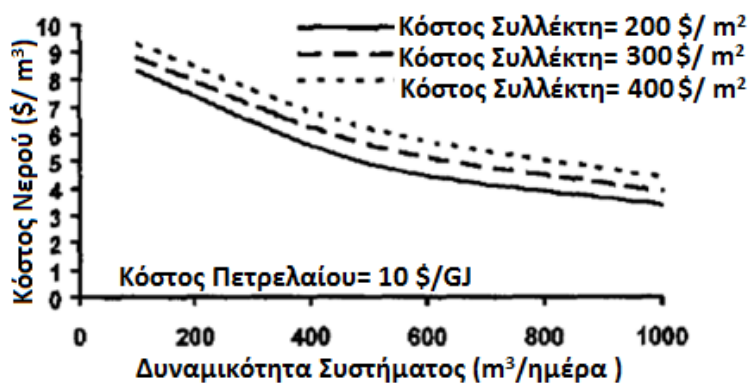
**Εικόνα 160:** Επίδραση του Αριθμού Ηλιακών Συλλεκτών Στο Κόστος του Παραγόμενου Νερού. [61]

Για τα υβριδικά αυτά συστήματα, που κάνουν χρήση και ηλιακής και ηλεκτρικής ενέργειας, το ιδανικό κόστος του παραγόμενου νερού εξαρτάται κυρίως από το κόστος του συλλέκτη και το κόστος του καυσίμου. Η επίδραση του κόστους του συλλέκτη στο κόστος της μονάδας του παραγόμενου νερού παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα, για εξατμιστήρα παραγωγικότητας  $500 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$  και κόστος πετρελαίου  $10 \text{ \$/GJ}$  και  $20 \text{ \$/GJ}$ . Όπως μπορούμε να δούμε, το κόστος του νερού αυξάνει γραμμικά με το κόστος του συλλέκτη. Για την χαμηλότερη τιμή ηλιακού συλλέκτη, αυτή των  $200 \text{ \$/m}^2$ , το κόστος του νερού κυμαίνεται από  $5\text{-}5,5 \text{ \$/m}^3$ , ενώ για την υψηλότερη τιμή αυτή των  $400 \text{ \$/m}^2$ , η τιμή του νερού κυμαίνεται στα  $6,2\text{-}6,7 \text{ \$/m}^3$ . [62]



**Εικόνα 161:** Επίδραση του Κόστους Του Συλλέκτη στο Βέλτιστο Κόστος του Νερού για δυο Τιμές Πετρελαίου για το Υβριδικό Σύστημα Πολλαπλής Εξάτμισης. [62]

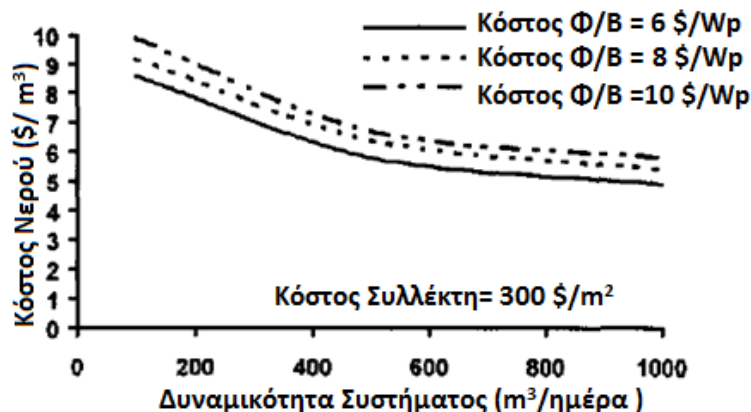
Η επίδραση της παραγωγικότητας του συστήματος και του κόστους του συλλέκτη στο κόστος του παραγόμενου νερού, για το ίδιο υβριδικό σύστημα με τιμή πετρελαίου 10\$/Wp, παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα. Η πτώση του κόστους του νερού με την δυναμικότητα του συστήματος αποτελεί την άμεση επιρροή της οικονομικής κλίμακας των υβριδικών συστημάτων πολλαπλής εξάτμισης. Συστήματα δυναμικότητας 100 m<sup>3</sup>/ημέρα έχουν κόστος νερού που κυμαίνεται μεταξύ 8,3-9,3 \$/ m<sup>3</sup>, ενώ για συστήματα μεγαλύτερης δυναμικότητας, όπως 1000 m<sup>3</sup>/ημέρα, το κόστος πέφτει στα 3,4-4,4 \$/ m<sup>3</sup>. Αυτή την συμπεριφορά μπορούμε να την διαπιστώσουμε και στο παρακάτω διάγραμμα. [62]



**Εικόνα 162:** Επίδραση της Δυναμικότητας του Συστήματος και του Κόστους του Συλλέκτη στην Τιμή του Παραγόμενου Νερού για Υβριδικά Συστήματα. [62]

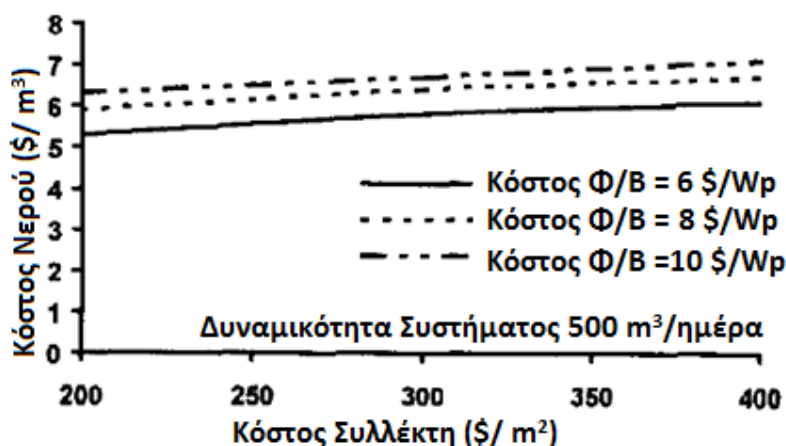
Όσον αφορά τα αυτόνομα ηλιακά συστήματα, αυτά δεν κάνουν χρήση μόνο ηλιακών θερμικών συλλεκτών αλλά και φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Έτσι, στο διάγραμμα της **Εικόνας 163** μπορούμε να δούμε την επίδραση του κόστους της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών στο κόστος του παραγόμενου νερού για την αυτόνομη διαρρύθμιση. Συγκρίνοντας το διάγραμμα αυτό με το παραπάνω διάγραμμα κόστους της **Εικόνας 162**, παρατηρούμε ότι είναι κοντά το ένα με το άλλο για συστήματα χαμηλής δυναμικότητας. Για δυναμικότητες που ανήκουν στο

ανώτατο άκρο του εύρους, βλέπουμε ότι το κόστος του νερού του αυτόνομου συστήματος είναι μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό του υβριδικού συστήματος. [62]



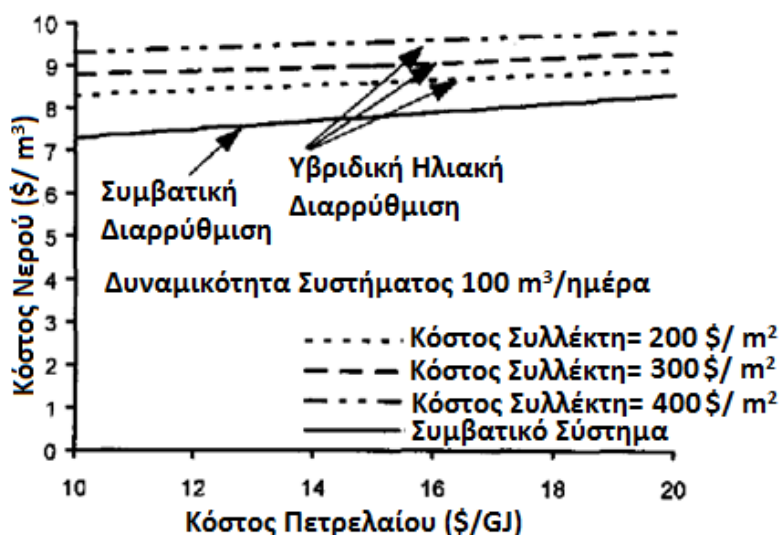
**Εικόνα 163:** Επίδραση της Δυναμικότητας του Συστήματος και του Κόστους των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων στην Τιμή του Παραγόμενου Νερού για Αυτόνομα Ηλιακά Συστήματα. [62]

Επιπλέον, στο διάγραμμα της **Εικόνας 164** παρουσιάζεται η επίδραση του κόστους των ηλιακών συλλεκτών και των φωτοβολταϊκών στοιχείων στο κόστος παραγωγής νερού στα αυτόνομα αυτά συστήματα. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, το κόστος του παραγόμενου νερού είναι ευαίσθητο τόσο στο κόστος των ηλιακών συλλεκτών όσο και των φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Ενδεικτικά, μια αύξηση της τιμή των φωτοβολταϊκών από 6 \$/Wp σε 10 \$/Wp μπορεί να προκαλέσει αύξηση της τάξης του 15 % στο κόστος νερού, ενώ αντίστοιχα διπλασιασμός της τιμής των ηλιακών συλλεκτών μπορεί να αυξήσει το κόστος νερού έως και 19%. [62]



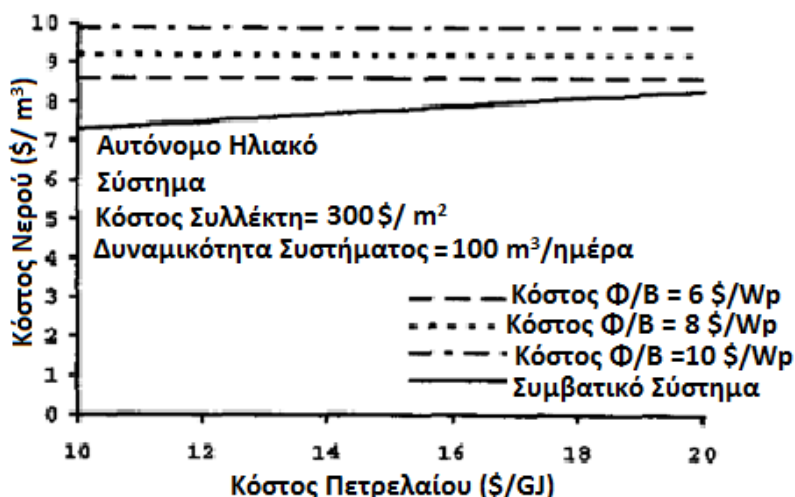
**Εικόνα 164:** Επίδραση της Τιμής των Φωτοβολταϊκών Συστοιχιών στο Κόστος του Παραγόμενου Νερού. [62]

Εν συνεχεία, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ του συμβατικού και του υβριδικού συστήματος πολλαπλής εξάτμισης. Στο παρακάτω διάγραμμα αποτυπώνεται το κόστος του νερού σε ένα υβριδικό και ένα συμβατικό σύστημα σαν συνάρτηση του κόστους του συλλέκτη και της τιμής του πετρελαίου. Όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε το συμβατικό σύστημα παράγει νερό σε χαμηλότερο κόστος σε σχέση με το υβριδικό ηλιακό σύστημα, αλλά η διαφορά του κόστους μειώνεται για μικρότερο κόστος συλλέκτη και υψηλότερες τιμές καυσίμου. [62]



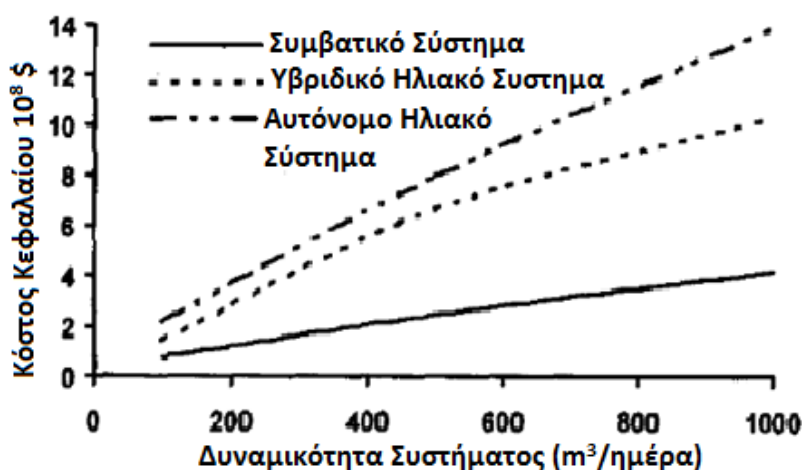
**Εικόνα 165:** Επίδραση του Κόστους του Συλλέκτη στην Τιμή του Παραγόμενου Νερού και Σύγκριση μεταξύ Συμβατικού και Υβριδικού Ηλιακού Συστήματος. [62]

Αντίστοιχα, πραγματοποιείται η σύγκριση του κόστους του νερού μεταξύ ενός συμβατικού και ενός αυτόνομου ηλιακού συστήματος πολλαπλής εξάτμισης, για σύστημα δυναμικότητας 100 m<sup>3</sup>/ημέρα. Σε αυτό το διάγραμμα, **Εικόνα 166**, το κόστος του πετρελαίου παρίσταται έως τετμημένη και το κόστος του νερού έως τεταγμένη. Προφανώς, το κόστος του νερού ενός συμβατικού συστήματος είναι ανεξάρτητο του κόστους του ηλιακού συλλέκτη και έτσι επηρεάζεται μόνο από την τιμή του πετρελαίου. Από την άλλη πλευρά, το κόστος του νερού για το αυτόνομο ηλιακό σύστημα κυμαίνεται από 8,6-9,9 \$/ m<sup>3</sup> και εξαρτάται από την τιμή των φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Το κόστος του νερού για συμβατικά συστήματα κυμαίνεται από 7,3-8,3 \$/ m<sup>3</sup> ανάλογα με το επικρατές κόστος καυσίμων. Μπορεί να θεωρηθεί ότι οι δυο καμπύλες πλησιάζουν αρκετά κοντά η μια την άλλη για αρκετά υψηλή τιμή καυσίμων και τιμή φωτοβολταϊκών ίση με 6 \$/Wp. [62]



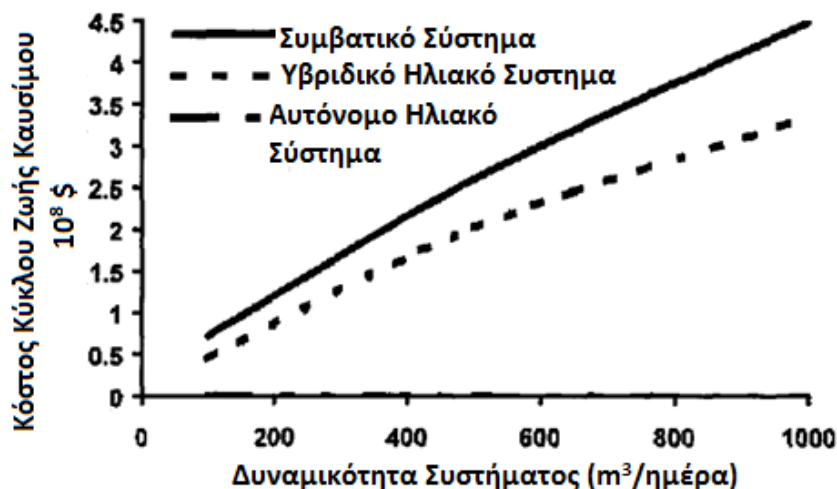
Εικόνα 166: Σύγκριση του Κόστους Νερού Μεταξύ ενός Αυτόνομου Ηλιακού και ενός Συμβατικού Συστήματος. [62]

Τέλος, πραγματοποιείται σύγκριση κόστους κεφαλαίου και για τις τρεις διαρρυθμίσεις του συστήματος πολλαπλής εξάτμισης. Όπως είναι εύκολο διαπιστώσουμε από το παρακάτω διάγραμμα, οι δυο ηλιακές διαρρυθμίσεις είναι εμφανώς πιο ακριβές σε σχέση με το συμβατικό σύστημα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με βάση τις υπάρχουσες οικονομικές συνθήκες, το κόστος κεφαλαίου των ηλιακών πεδίων συλλογής είναι σημαντικό υψηλότερο σε σύγκριση με το κόστος μια γεννήτριας ατμού της ίδιας θερμικής δυναμικότητας. Συνεπώς το κόστος των φωτοβολταϊκών συστοιχιών είναι πολύ πιο υψηλό από αυτό της γεννήτριας πετρελαίου που χρησιμοποιείται στα συμβατικά συστήματα και έχει την ίδια θερμική έξοδο. [62]



Εικόνα 167: Σύγκριση Του Κόστους Κεφαλαίου Μεταξύ των Τριών Διαρρυθμίσεων. (Αποδοχές: Κόστος Συλλέκτη = 300 \$/m<sup>2</sup>, Κόστος Πετρελαίου = 10 \$/GJ, Κόστος Φωτοβολταϊκών = 6 \$/GJ). [62]

Το κόστος του κύκλου ζωής του καυσίμου για την συμβατική και την υβριδική διαρρύθμιση παρουσιάζεται παρακάτω. Προφανώς, το αυτόνομο ηλιακό σύστημα έχει μηδενική κατανάλωση καυσίμου. [62]



**Εικόνα 168:** Κόστος Κύκλου Ζωής Καυσίμου για Κάθε Διαρρύθμιση. (Αποδοχές: Κόστος Πετρελαίου= 20 \$/GJ, Υποτιθέμενη Κλιμάκωση Κόστους Καυσίμου= 3%, Επιτόκιο= 8%, Διάρκεια Κύκλου Ζωής= 8 χρόνια). [62]

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα των παραπάνω διαγραμμάτων αφορούν σύστημα πολλαπλής εξάτμισης απευθείας ροής αποστάγματος (MEE-OT) και μικρής παραγωγικής δυναμικότητας. Η μελέτη αφορούσε συστήματα σε απομακρυσμένες και άγονες περιοχές χωρίς πρόσβαση σε ηλεκτρικό δίκτυο και υψηλές τιμές καυσίμων. Όπως διαπιστώθηκε, στην παρούσα κατάσταση η ηλιακή ενέργεια δεν μπορεί να ανταγωνιστεί ευνοϊκά τις ορυκτές πηγές ενέργειας, ιδίως υπό τις παρούσες διεθνείς τιμές του αργού πετρελαίου. Ωστόσο, σε πολλές απομακρυσμένες ηλιόλουστες περιοχές ανά τον κόσμο όπου το πραγματικό κόστος των ορυκτών πηγών ενέργειας μπορεί να είναι πολύ υψηλό, η χρήση της ηλιακής ενέργειας μπορεί να είναι μια ελκυστική εναλλακτική λύση. [62]

Οι σημαντικοί παράγοντες του κόστους τόσο για τα ηλιακά όσο και τα συμβατικά συστήματα, είναι το κόστος των ηλιακών συλλεκτών σε \$/m<sup>2</sup> όσο και το κόστος του πετρελαίου σε \$/GJ. Η ηλιακή ενέργεια γίνεται όλο και πιο ανταγωνιστική καθώς το τοπικό κόστος παραγωγής καυσίμου αυξάνει και παράλληλα μειώνεται το κόστος των ηλιακών συλλεκτών. Το κόστος του παραγόμενου νερού από ένα υβριδικό σύστημα φαίνεται να προσεγγίζει το κόστος του νερού από ένα συμβατικό σύστημα, όταν η τιμή του συλλέκτη πέφτει στα 200\$/m<sup>2</sup> και του πετρελαίου φτάνει τα 50\$/GJ. [62]

Από την άλλη πλευρά, τα οικονομικά ενός αυτόνομου ηλιακού συστήματος με 100% χρήση της ηλιακής ενέργειας φαίνονται να βελτιώνονται προς όφελος της ηλιακής ενέργειας. Σε πολλές περιπτώσεις, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, η τιμή του παραγόμενου νερού έφτασε την αντίστοιχη των συμβατικών συστημάτων, ενώ για υψηλές τιμές πετρελαίου η τιμή αυτή ήταν αρκετά μικρότερη σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα. [62]

➤ Ηλιακή Θερμική Συμπύεση Υδρατμού (Solar Thermal Vapor Compression)

Στην περίπτωση αυτής της ηλιακής μεθόδου μελετήσαμε μια πολύ συγκεκριμένη εφαρμογή, την ηλιακή βαρομετρική αφαλάτωση. Γενικά, όσον αφορά στις μεθόδους ηλιακής συμπύεσης υδρατμού, η θερμική διεργασία φάνηκε να είναι η λιγότερο εφαρμόσιμη καθώς είχε τις λιγότερες βιβλιογραφικές αναφορές.

Το σύστημα της ηλιακής θερμικής βαρομετρικής αφαλάτωσης δεν είναι αυτόνομο ηλιακό. Απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια για την άντληση όλων των υγρών που λαμβάνουν χώρα στην διεργασία, όπως το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας, το παραγόμενο απόσταγμα, την απορριπτόμενη άλμη και για όλη την λειτουργία τους συστήματος απαέρωσης, των γενικών υπηρεσιών και όλων των ηλεκτρονικών συστημάτων ελέγχου του συστήματος. Συνεπώς, η ενεργειακή αποδοτικότητα μιας τέτοιας τεχνολογίας βασίζεται σε δυο παραμέτρους. Πρώτον, στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από το πεδίο των ηλιακών συλλεκτών και δεύτερον την ηλιακή ενέργεια που απαιτείται (kWh) για την παραγωγή 1 m<sup>3</sup> αφαλατωμένου νερού. [17]

Η συντήρηση, ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός τέτοιου συστήματος παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην επίτευξη συλλογής ενός μεγάλου ποσού θερμότητας. Οι ηλεκτρικές ενεργειακές απαιτήσεις ενός τέτοιου συστήματος είναι σχετικά μικρές εξαιτίας των λειτουργικών πλεονεκτημάτων που παρέχονται από την υπόγεια διαρρύθμιση. [17]

Ο βαθμός απόδοσης, ο οποίος ορίζεται ως ο ρυθμός ροής του παραγόμενου νερού ως προς τον ρυθμό απόδοσης του θερμού υδρατμού, είναι μια σημαντική παράμετρος ιδίως για τα θερμικά ηλιακά συστήματα. Μια ενδεικτική τιμή του βαθμού απόδοσης των συστημάτων ηλιακής βαρομετρικής αφαλάτωσης μιας και δυο βαθμίδων είναι  $(1,000/0,333)= 3,0$  και  $(1,000/2,000)= 5,0$ , αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι αρκετά υποσχόμενες αρκεί να σκεφτούμε τις πολύ χαμηλότερες που έχουν τα συμβατικά μη ηλιακά συστήματα. [17]

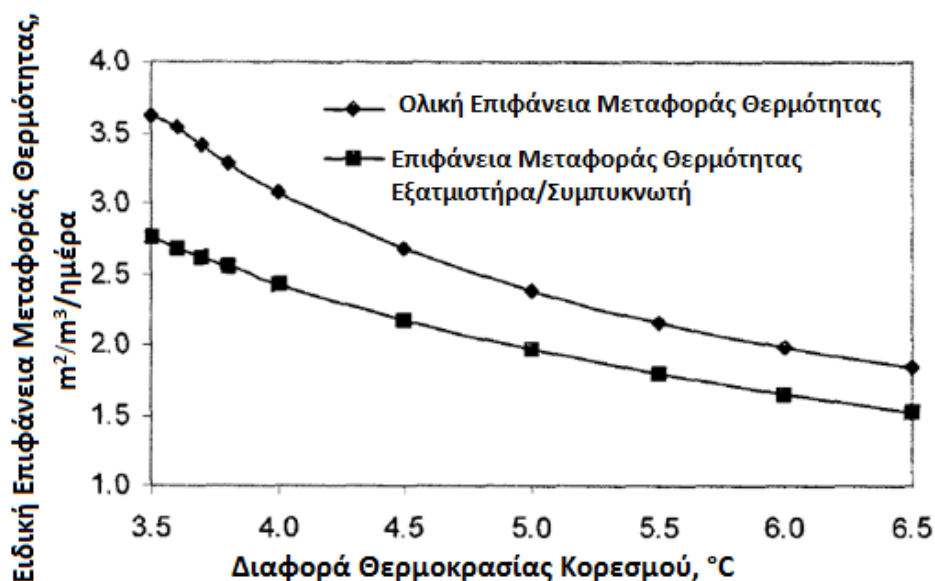
Χωρίς την λειτουργία ενός πρωτοτύπου είναι δύσκολο να δοθούν λειτουργικά στοιχεία της εγκατάστασης. Ένα ήδη εν λειτουργία σύστημα βρίσκεται στο Abu Dhabi. Διαθέτει 18 βαθμίδες και είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί μέρα και νύχτα και να παράγει 120 m<sup>3</sup>/ημέρα. Η πραγματική του παραγωγικότητα δείχνει μεγάλη μεταβολή καθώς η μέση ετήσια παραγωγή αποστάγματος ανέρχεται μόλις στα 80 m<sup>3</sup>/ημέρα. Η τεχνολογία αυτή φαίνεται να έχει απλό σχεδιασμό και μεγάλη ενεργειακή αποδοτικότητα, η οποία εξαρτάται και από τον αριθμό των βαθμίδων που περιλαμβάνει το σύστημα. [17]



➤ Ηλιακή Μηχανική Συμπύεση Υδρατμού (Solar Mechanical Vapor Compression)

Τα ηλιακά συστήματα μηχανικής συμπύεσης υδρατμού (SMVC) είναι συνήθως υβριδικά, κάνουν χρήση δηλαδή τόσο χρήση ηλιακής και ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία παράγεται από κάποια γεννήτρια. Η κατασκευή ενός εξ ολοκλήρου αυτόνομου ηλιακού συστήματος αυτού του τύπου θα ήταν αδύνατη, καθώς ο αριθμός των απαιτούμενων μπαταριών για την υποστήριξη του συστήματος θα ήταν πολύ μεγάλος και άρα το κόστος της εγκατάστασης ασύμφορο. [18]

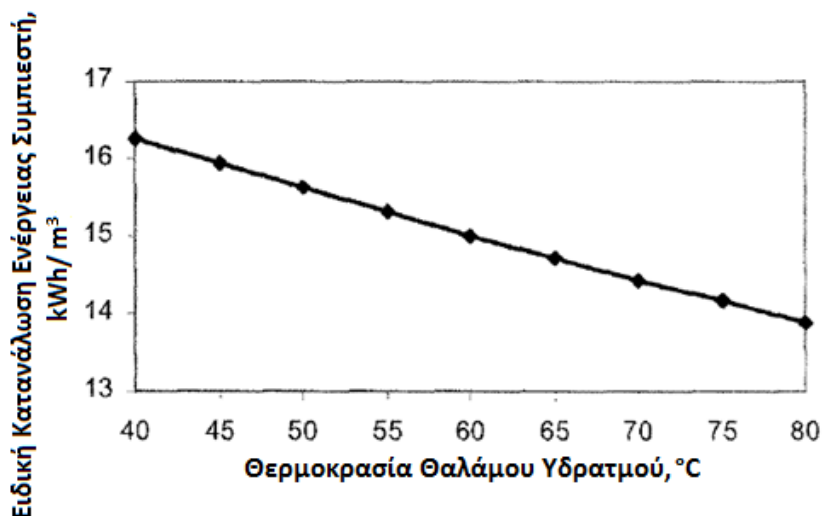
Μια πολύ σημαντική παράμετρος που επηρεάζει τον σχεδιασμό, την κατασκευή αλλά και το κόστος των συστημάτων αυτών είναι η διαφορά της θερμοκρασίας κορεσμού κατά μήκος των σωλήνων του εξατμιστήρα/ συμπυκνωτή. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασιακή αυτή διαφορά, τόσο μικρότερη γίνεται και η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Ωστόσο, για χαμηλότερες τιμές της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας παρουσιάζεται μεγαλύτερη ευαισθησία σε μικρές αλλαγές της θερμοκρασιακής πτώσης κατά μήκος των σωλήνων. Αυτή η συμπεριφορά παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα και αφορά σύστημα παραγωγικότητας 120 m<sup>3</sup>/ημέρα, με συγκέντρωση αλατότητας νερού τροφοδοσίας 45.000ppm, θερμοκρασίας 17°C και βαθμός συμπύεσης 1,22. Ενδεικτικά, λοιπόν, από την παρατήρηση του διαγράμματος βλέπουμε ότι για μια θερμοκρασιακή πτώση 3°C παρατηρείται μείωση της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας έως και 49%. Συνεπώς, για μικρότερη επένδυση στον εξατμιστήρα, στους εναλλάκτες θερμότητας και στον συμπυκνωτή είναι καλύτερο να σχεδιάζουμε τον εξατμιστήρα για μεγαλύτερες θερμοκρασιακές πτώσεις κατά μήκος των σωλήνων του. Με άλλα λόγια, υψηλότεροι βαθμοί συμπύεσης θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μικρότερα έξοδα για τον εξατμιστήρα και τις επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας. [18]



Εικόνα 169: Μεταβολή της Επιφάνειας Μεταφοράς Θερμότητας Συναρτήσεως της Θερμοκρασιακής Διαφοράς. [18]

Στην πραγματικότητα, το πλεονέκτημα αυτό θα αντισταθμισθεί από την αύξηση στο τρέχων κόστος όπου θα απαιτηθεί μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας και ίσως μεγαλύτερος συμπιεστής. Επίσης, το επιπλέον κόστος δεν θα περιοριστεί μόνο σε αυτά αλλά θα χρειαστεί και μεγαλύτερη επιφάνεια φωτοβολταϊκών πεδίων. Χρήσιμο είναι να σημειωθεί ότι το κόστος των φωτοβολταϊκών ανέρχεται στα 6-6,5 EUR/W. Στην πράξη, η θερμοκρασιακή διαφορά παίρνει τιμές μεταξύ 2-5°C και η ειδική κατανάλωση ενέργειας ανέρχεται στα 10-11 kWh/m<sup>3</sup>, για σταθερή θερμοκρασιακή διαφορά 3 °C. [18]

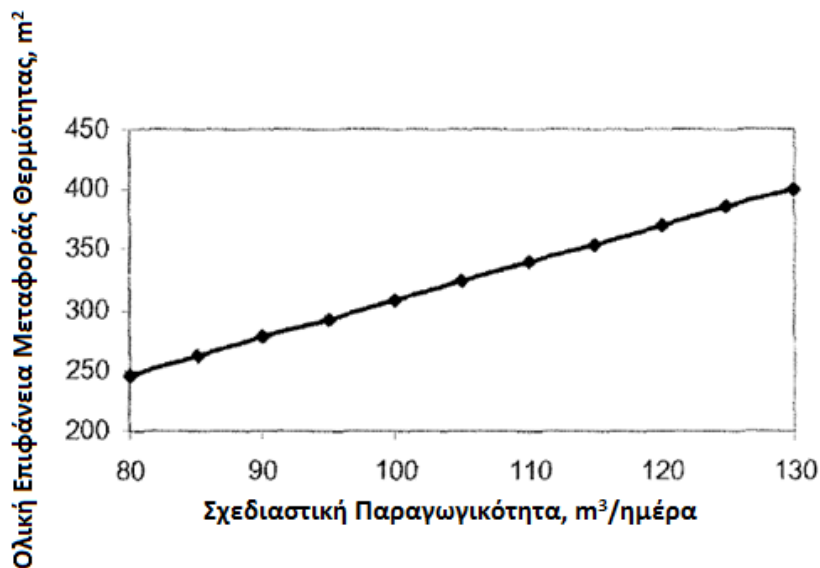
Μικρότερη επιρροή έχει η θερμοκρασιακή διαφορά στον θάλαμο του υδρατμού. Παρακάτω παρουσιάζεται διάγραμμα με την ειδική ενεργειακή κατανάλωση συναρτήσει της θερμοκρασίας στον θάλαμο του υδρατμού. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, αυτή μειώνεται συνεχώς με την αύξηση της θερμοκρασίας. Και σε αυτή την περίπτωση, μπορεί η αύξηση της θερμοκρασίας του θαλάμου υδρατμού να είναι μεγαλύτερη και άρα να γίνεται μείωση της απαιτούμενης ενεργειακής κατανάλωσης και του κόστους του συμπιεστή και της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας, ωστόσο πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη το τρέχων κόστος. Για έναν συμπιεστή, λοιπόν, που λειτουργεί για υψηλότερες θερμοκρασίες υδρατμού, τα φαινόμενα διάβρωσης και ιζηματοποίησης θα είναι μεγαλύτερα συνεπώς και τα έξοδα συντήρησης και επεξεργασίας θα ισοσταθμίσουν το παραπάνω πλεονέκτημα. [18]



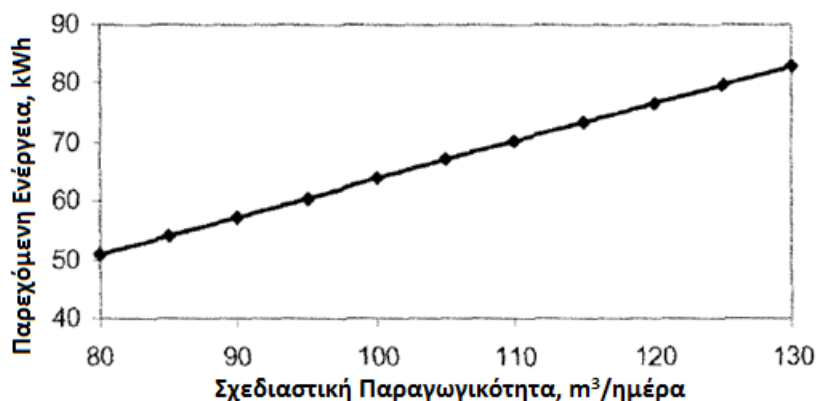
**Εικόνα 170:** Μεταβολή της Ειδικής Κατανάλωσης Ενέργειας του Συμπιεστή Συναρτήσει της Θερμοκρασίας Θαλάμου Υδρατμών. [18]

Γενικότερα, η συμπεριφορά τόσο της συνολικής επιφάνειας μεταφοράς ενέργειας όσο και της ενεργειακής κατανάλωσης του συμπιεστή συναρτήσει της ολικής δυναμικότητας του συστήματος παρουσιάζεται στα δυο παρακάτω διαγράμματα. Τα αποτελέσματα της μελέτης τους αποδεικνύουν ότι είναι προτιμότερη η κατασκευή συστημάτων μεγαλύτερης δυναμικότητας από την κατασκευή πολλών μικρότερων εγκαταστάσεων, καθώς για ένα συγκεκριμένο εύρος παραγωγικότητας όπως στην περίπτωση αυτή, τόσο η κατασκευή όσο ο έλεγχος

και η εργασία δεν αυξάνονται σημαντικά με την αύξηση της δυναμικότητας του συστήματος. [18]



**Εικόνα 171:** Η Ολική Επιφάνεια Μεταφοράς Θερμότητας Σαν Συνάρτηση της Παραγωγικότητας του Συστήματος. [18]



**Εικόνα 172:** Η Παρεχόμενη Ενέργεια Σαν Συνάρτηση της Παραγωγικότητας του Συστήματος. [18]

Τέλος, εξαιτίας του τρέχοντος χαμηλού ποσοστού μετατροπής της ενέργειας που διαθέτουν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, το κόστος της παραγόμενης μονάδας νερού είναι υψηλότερο σε σχέση με της αντίστοιχης συμβατικής εγκατάστασης. Τα πλεονεκτήματα όμως της ηλιακής αυτής μεθόδου πρέπει να αναγνωριστούν συναρτήσει της περιβαλλοντολογικής συμπεριφοράς της, καθώς και της εφαρμογής της σε άγονες και απομακρυσμένες περιοχές με έλλειψη ηλεκτρικού δικτύου. [18]

➤ Ηλιακή Συμπύεση Υδρατμού με Απορρόφηση (Solar Absorption Vapor Compression)

Τα συστήματα αυτού του τύπου, όπως είδαμε και σε παραπάνω παράγραφο, μπορεί να είναι είτε αυτόνομα ηλιακά, είτε υβριδικά. Τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν είναι αρκετά ελκυστικά, καθώς διαθέτουν υψηλό βαθμό απόδοσης, δεν χρειάζονται προεπεξεργασία, η εξαγωγή του νερού γίνεται σε χαμηλές θερμοκρασίες και φαινόμενα όπως διάβρωση και ιζηματοποίηση εκδηλώνονται σε ελάχιστο βαθμό. Ακόμα, είναι ενδιαφέροντα και για τον φιλικό ως προς το περιβάλλον χαρακτήρα τους, καθώς το υγρό μέσο μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιούν είναι το νερό. [19]

Για τις δυο διαρρυθμίσεις πραγματοποιήθηκε θερμοδυναμική μελέτη με λειτουργία του ζεύγους  $H_2O/LiBr$ . Αρχικά, μελετήθηκε η απόδοση του αυτόνομου ηλιακού συστήματος με χρήση επίπεδου ηλιακού συλλέκτη. Ο θερμικός συντελεστής απόδοσης βρέθηκε ίσος με 1,04 και οι θερμικές έξοδοι του απορροφητήρα και του συμπιεστή ίσες με 650 και 597kW, αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά, η απόδοση του υβριδικού συστήματος βρέθηκε ίση με 7,9 για θερμοκρασίες εξατμιστήρα και απορροφητή 40°C και 60 °C αντίστοιχα. [19] Τα αποτελέσματα αυτά είναι ενδεικτικά λόγω της περιορισμένης βιβλιογραφίας.

➤ Ηλιακή Συμπύεση Υδρατμού με Προσρόφηση (Solar Adsorption Vapor Compression)

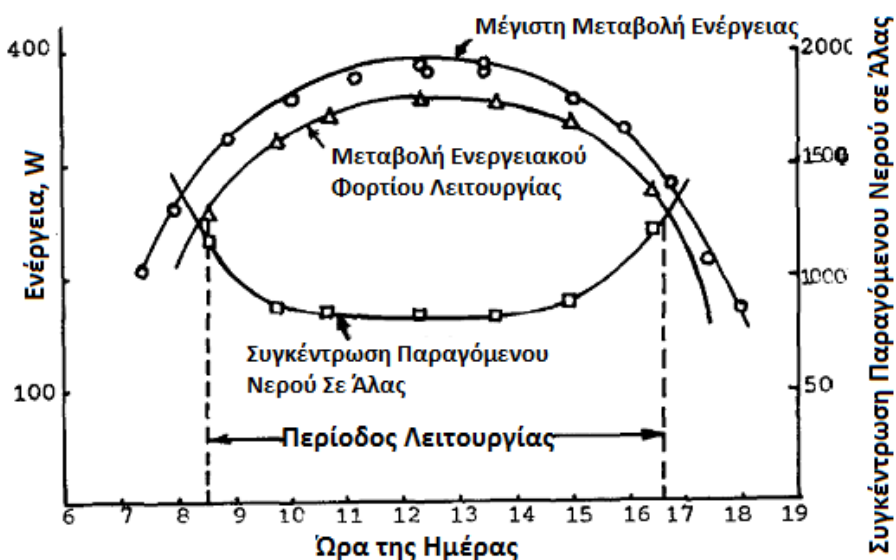
Τα συστήματα συμπύεσης υδρατμού με προσρόφηση (SAdVC) είναι ιδανικά για να κάνουν χρήση ηλιακής ενέργειας. Η λειτουργία τους για θερμοκρασίες μικρότερες των 80°C τους επιτρέπει να εκμεταλλεύονται την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ ακόμα τους δίνει το πλεονέκτημα της ελάχιστης εμφάνισης του φαινομένου διάβρωσης και ιζηματοποίησης. [71]

Η εμπορική τους διάθεση, ωστόσο, δεν είναι ακόμα βιώσιμη και για τον λόγο αυτό οι εφαρμογές τους στον τομέα της αφαλάτωσης είναι περιορισμένες. Οι αντλίες προσρόφησης, ωστόσο, χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με άλλες εφαρμογές που έχουν να κάνουν με ψύξη και θέρμανση χώρων.

➤ Ηλιακή Ηλεκτροδιάλυση (Solar ElectroDialysis)

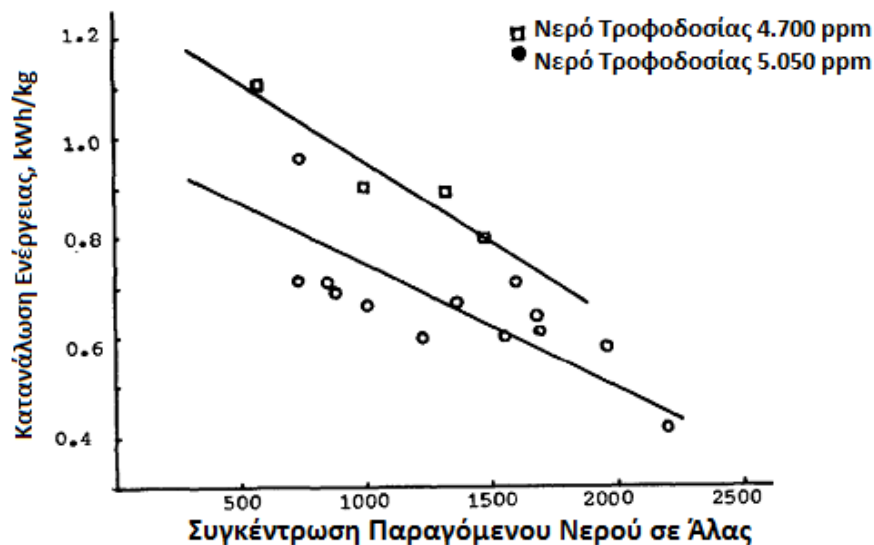
Η ηλεκτροδιάλυση (ED) είναι μια διεργασία αφαλάτωσης υφάλμυρου αλλά και θαλασσινού νερού, η οποία είναι διαθέσιμη για εμπορική χρήση τα τελευταία τριάντα χρόνια. Χρησιμοποιεί κυρίως για μικρής ή μεσαίας κλίμακας παραγωγικότητες της τάξεως των 500 έως 1.000.000 γαλονιών ανά ημέρα. Το κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου αυτής, που αποτελεί και μεγάλο πλεονέκτημα για τον συνδυασμό της με φωτοβολταϊκές συστοιχίες, είναι ότι κάνει χρήση συνεχούς ρεύματος. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι μπορεί να εκμεταλλευτεί εύκολα την ηλιακή ενέργεια, καθώς μπορεί να συνδυαστεί άμεσα με φωτοβολταϊκό πεδίο, σε αντίθεση με όλες τις άλλες μεθόδους που απαιτούν μετατροπέα συνεχούς σε εναλλασσόμενη τάση αλλά και μονάδα αποθήκευσης ενέργειας. Έτσι, το ηλιακό σύστημα ηλεκτροδιάλυσης (SED) θα λειτουργεί μόνο

για τις ώρες που υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία. Για μια μέση λειτουργία 8 ωρών την ημέρα, η διακύμανση της μέγιστης ενέργειας που παράγεται από το ηλιακό πεδίο και άρα χρησιμοποιείται από την μονάδα ηλεκτροδιάλυσης παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα. Τα αποτελέσματα αφορούν μονάδα αφαλάτωσης που βρίσκεται τοποθετημένη σε άγονη και απομακρυσμένη περιοχή της ερήμου Thar, με συγκέντρωση αλατότητας του νερού τροφοδοσίας περίπου 5000ppm και δυναμικότητα παραγωγής 1000L την ημέρα. [63]



**Εικόνα 173:** Διακύμανση Ενεργειακού Φορτίου Λειτουργίας και Συγκέντρωσης Παραγόμενου Νερού σε Άλας Κατά την Διάρκεια της Ημέρας. [63]

Η ηλιακή ηλεκτροδιάλυση (SED) φαίνεται να είναι μια αρκετά ελκυστική επιλογή για την παραγωγή νερού σε άγονες και απομακρυσμένες περιοχές, εφόσον υπό ορισμένες συνθήκες είναι ανταγωνιστική όχι μόνο με τις συμβατικές μεθόδους αφαλάτωσης αλλά και με τις ηλιακές, όπως η ηλιακή αντίστροφη ώσμωση θαλασσινού νερού. [64] Γενικά, η ηλιακή ηλεκτροδιάλυση (SED) εμφανίστηκε αρκετά συμφέρουσα, όσον αφορά την ενεργειακή της κατανάλωση, για αφαλάτωση υφάλμυρου νερού μέσης περιεκτικότητας άλατος και διαλυμάτων χλωριούχου νατρίου χαμηλής περιεκτικότητας σε άλας. [65] Από την άλλη πλευρά, η κατανάλωση ενέργειας είναι υψηλότερη για υφάλμυρο νερό τροφοδοσίας χαμηλής περιεκτικότητας άλατος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το νερό χαμηλής περιεκτικότητας σε άλας εμφανίζει μεγαλύτερη αντίσταση κατά την ροή του. Το φαινόμενο αυτό μπορούμε εύκολα να το διαπιστώσουμε από το παρακάτω διάγραμμα όπου συγκρίνονται δυο συγκεντρώσεις με μικρή απόκλιση. [63]



**Εικόνα 174:** Η Κατανάλωση Ενέργειας Συναρτήσεται της Συγκέντρωσης του Παραγόμενου Νερού Σε Άλας για Διάφορες Συγκεντρώσεις Νερού Τροφοδοσίας Σε Άλας. [63]

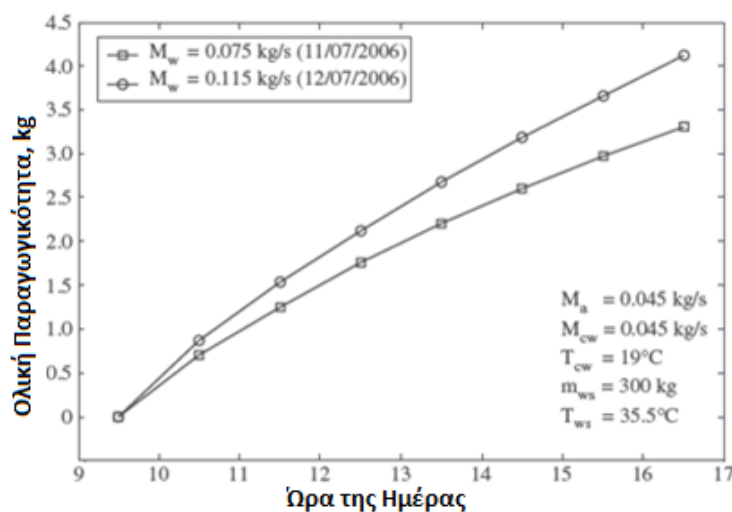
Τέλος, η ποιότητα του παραγόμενου νερού είναι αρκετά ικανοποιητική, ενώ εμφανίζει βελτίωση για νερό τροφοδοσίας μικρού ρυθμού ροής. Ενδεικτικά, το ποσοστό αφαίρεσης άλατος ανέρχεται σε 95% για υφάλμυρο νερό ενώ για διαλύματα χλωριούχου νατρίου με πολύ μικρό ρυθμό ροής μπορεί να αγγίξει ακόμα και το 99%. Η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας είναι ένας επιπλέον παράγοντας που ενισχύει το ποσοστό αφαίρεσης άλατος κατά την διεργασία. [65]

Σύμφωνα με μια παγκόσμια έρευνα που πραγματοποιήθηκε το 2008 από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας της Ελλάδος (ΚΑΠΕ) και πιο συγκεκριμένα υπό την επίβλεψη της κ. Τζεν Ευτυχίας [66], βρέθηκε ότι ο αριθμός συστημάτων ηλεκτροδιάλυσης (ED) με φωτοβολταϊκά στοιχεία μικρής δυναμικότητας, έως 50 m<sup>3</sup>/ημέρα, ανέρχεται μόλις στις 6 εγκαταστάσεις με τις περισσότερες να έχουν εκθεσιακή κυρίως χρήση. Συνεπώς, η βιβλιογραφία της μεθόδους αυτής είναι αρκετά περιορισμένη όσον αφορά τα πρακτικά οικονομικά της στοιχεία. Για τον λόγο αυτό θα αναφερθούν ενδεικτικά μερικές τιμές κατανάλωσης ενέργειας, μέσου κόστους παραγόμενου νερού και μέσου ηλεκτρικού κόστους. Για σύστημα, λοιπόν, παραγωγικότητας 50 m<sup>3</sup>/ημέρα, με νερό τροφοδοσίας αλατότητας 3.500 ppm έχει ολική απαίτηση ενέργειας για την διεργασία της ηλεκτροδιάλυσης (ED) και της άντλησης 2,32 kWh, ειδική κατανάλωση ενέργειας 1 kWh/ m<sup>3</sup>, ενώ το μέσο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας και παραγόμενου νερού ανέρχεται αντίστοιχα στα 0,64 EUR/kWh και 3,86 EUR/ m<sup>3</sup>. [64]

➤ Ηλιακή Ύγρανση- Αφύγρανση (Solar Humidification-Dehumidification)

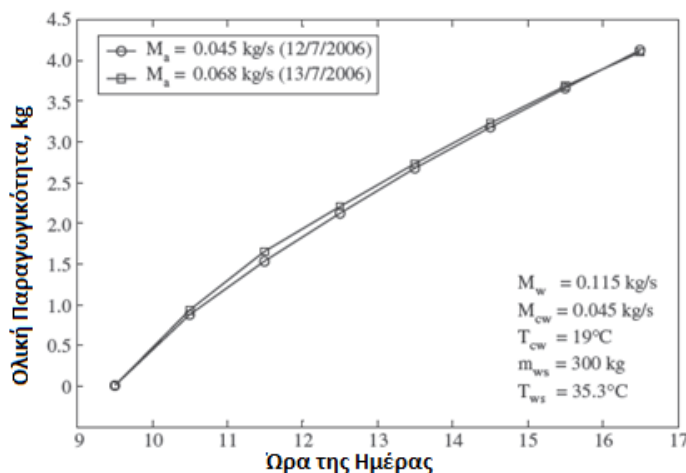
Η ηλιακή ύγρανση-αφύγρανση (SHD) αποτελεί μια πολύ καλή επιλογή για την παραγωγή νερού σε απομακρυσμένες περιοχές. Το γεγονός ότι η διεργασία αφαλάτωσης λαμβάνει χώρα σε χαμηλές θερμοκρασίες, την καθιστά ιδανική μέθοδο για τον συνδυασμό της με ηλιακά συστήματα, τα οποία μπορούν να παρέχουν το συνολικό ποσό των απαιτήσεων της σε ενέργεια. [67]

Τα συστήματα αυτού του τύπου δεν είναι ευρέως εμπορευματοποιημένα, για τον λόγο αυτό η βιβλιογραφία τους είναι αρκετά περιορισμένη. Η ανάλυση που θα ακολουθήσει αφορά ένα πειραματικό σύστημα με ηλιακό συλλέκτη κενού θέρμανσης του αέρα, στην περιοχή της Ανκάρας, στην Τουρκία. Γενικότερα, αποδείχτηκε ότι οι παράμετροι που επηρεάζουν ένα τέτοιο σύστημα είναι ο ρυθμός ροής του νερού, ο ρυθμός ροής του αέρα, η θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται η διεργασία καθώς και ο ρυθμός ροής του νερού ψύξης. Πιο αναλυτικά, όπως παρατηρούμε και στο παρακάτω διάγραμμα, η αύξηση του ρυθμού ροής του νερού τροφοδοσίας προκαλεί ταυτόχρονα αύξηση της παραγωγικότητας του συστήματος. Παράλληλα, ο ρυθμός εισόδου και εξόδου του αέρα στην διεργασία μειώνεται και ως αποτέλεσμα αυξάνεται η υγρασία του. Έτσι ουσιαστικά, η αύξηση της παραγωγικότητας του συστήματος οφείλεται στην αυξημένη επιφάνεια αλληλεπίδρασης μεταξύ του αέρα της διεργασίας και του νερού τροφοδοσίας. [68]



**Εικόνα 175:** Η Μεταβολή της Ολικής Παραγωγής του Συστήματος κατά την Διάρκεια της Ημέρας Συναρτήσεως του Ρυθμού Ροής Τροφοδοσίας. [68]

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται και η επιρροή του ρυθμού ροής του αέρα στην διεργασία. Ενώ η αύξηση του ρυθμού ροής του αέρα θα έπρεπε να προκαλέσει αύξηση της παραγωγικότητας του συστήματος, αυτή βλέπουμε ότι παραμένει σταθερή. Πράγματι, η παραγωγικότητα του συστήματος θα έπρεπε να αυξανόταν με την αύξηση της ροής του αέρα όσο όμως αυτή μετέφερε μεγαλύτερη ποσότητα υδρατμού στον υγραντήρα σε σχέση με προηγουμένως. [68]



**Εικόνα 176:** Η Μεταβολή της Ολικής Παραγωγής του Συστήματος κατά την Διάρκεια της Ημέρας Συναρτήσει του Ρυθμού Ροής Αέρα. [68]

Όσον αφορά την οικονομική ανάλυση των ηλιακών συστημάτων ύγρανσης αφύγρανσης (SHD) για πολύ μεγάλες μονάδες παραγωγικότητας, 1.000.000 γαλονιών την ημέρα, το κόστος της μονάδας παραγόμενου προϊόντος βρέθηκε ότι μπορεί να φτάσει τα 0,14-0,17 \$/m<sup>3</sup>, ενώ το κόστος κεφαλαίου της εγκατάστασης ανέρχεται στα 353 \$/m<sup>3</sup>d. [69] Ωστόσο, αυτές οι τιμές είναι ενδεικτικές και αποτέλεσμα επιστημονικής μελέτης. Η ηλιακή αυτή μέθοδος δεν είναι ακόμη τελειοποιημένη και βρίσκεται στην διαδικασία βελτίωσής της και για τον λόγο αυτό δεν μπορούν να δοθούν ακόμα οικονομικά δεδομένα ακριβείας. Με βάση τα παραπάνω, η ηλιακή αυτή μέθοδος δεν είναι ιδιαίτερα ελκυστική. Στο μέλλον και με πολλές τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της ηλιακής αφαλάτωσης ίσως να γίνει πιο ανταγωνιστική.

#### ➔ Ηλιακοί Αποστακτήρες (Solar Stills)

Η αφαλάτωση αυτού του τύπου είναι η μοναδική άμεση μέθοδος εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι ηλιακοί αποστακτήρες (Solar stills) χρησιμοποιούνται για μικρή παραγωγή νερού και σε περιοχές με μικρό κόστος γης. Γενικότερα, οι παράμετροι που επηρεάζουν την παραγωγικότητα ενός ηλιακού αποστακτήρα είναι οι εξής: Αρχικά, μεγάλη επίδραση φαίνεται να έχει η επιφάνεια συμπύκνωσης. Αύξηση της παραμέτρου αυτής έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγικότητας. Μεγάλη προσοχή πρέπει επίσης να επιδεικνύεται και στο υλικό κατασκευής της επιφάνειας αυτής. Μια ακόμα παράμετρος που επηρεάζει την απόδοση αυτών των συστημάτων είναι η θερμοκρασία της λεκάνης-δεξαμενής και του καλύμματος. Η υψηλή θερμοκρασία του καλύμματος έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της παραγωγικότητας του συστήματος. Τέλος, σημαντική επίδραση έχει η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ακολουθεί Πίνακας σύγκρισης ιδιοτήτων των διαφόρων τύπων ηλιακών αποστακτήρων. [42]



## Συστήματα Αφαλάτωσης με Χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

### Επιβλέπων Καθηγητής: Κορωνάκη Ειρήνη

Τύποι Ηλιακών Αποστακτήρων	Ιδιότητες	Αποτελέσματα	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Απλός Ηλιακός Αποστακτήρας	Ένταση της Μόνωσης. Παραγωγικότητα Σταθερής Κατάστασης Απόδοσης.	Τα Αποτελέσματα που Προκύπτουν Σε Σύστημα Χωρίς Μόνωση Είναι πιο Ρεαλιστικά, Αύξηση των Ενεργειακών Απωλειών με την Παρουσία του Ανέμου.	Εύκολη Εγκατάσταση και Λειτουργία. Απλή Κατασκευή. Χαμηλό Κόστος Κεφαλαίου	Χαμηλή Αποτελεσματικότητα. Χαμηλή Παραγωγή Νερού. Χρήση σε μικρές περιοχές.
Ηλιακός Αποστακτήρας Τύπου Οροφής	Θερμοκρασία Φωτοηλεκτρικών Κυττάρων. Ένταση Ηλιακής Παραγωγικότητας	Ο Λόγος Νερού προς Ενέργεια σε Τέτοιο Σύστημα είναι Το Κλειδί της Ιδανικής Λειτουργίας. Κύριος Στόχος Η Αύξηση Παραγωγής.	Φορητός. Εύκολη η μεταφορά του. Χρησιμοποιείται σε Καραβάνια Μελέτης Πόρων ή Στρατιωτικές Βάσεις. Εργαστηριακής Χρήσης.	Χαμηλή Απόδοση. Χρήση για Μικρούς Στόχους.
Ηλιακός Αποστακτήρας Στιβάδας Νερού Στην Εξωτερική Γυάλινη Επιφάνειά Του	Παραγωγικότητα Σταθερής Κατάστασης Απόδοσης. Θερμοκρασία Δωματίου. Ταχύτητα Ανέμου. Βαθμός Υγρασίας.	Για έναν Συμβατικό Αποστακτήρα η Αποδοτικότητα Αυξάνει για Χαμηλό $N_a$ και Μετά Μειώνει. Υψηλή Τιμή του $h_{fc}$ έχει ως Αποτέλεσμα Ενεργειακές Απώλειες.	Πιο Αποτελεσματικός από τον Απλό Ηλιακό Αποστακτήρα. Υψηλότερη Παραγωγικότητα του Νερού .	Πολύ Ευαίσθητο Λόγω της Θερμοκρασίας του Γυαλιού.
Παθητικός Ενεργητικός Ηλιακός Αποστακτήρας	Ετήσια Απόδοση. Βάθος Νερού. Κλίση Επίπεδου Ηλιακού Συλλέκτη.	Η απόδοσή του Συναρτήσει της Ωριαίας Απόδοσης για Διάφορα Βάθη Νερού.	Οι Παθητικοί Αποστακτήρες Είναι πιο Οικονομικοί στην Παραγωγή Ποσίου Νερού.	Υψηλό Κόστος Κεφαλαίου. Όσο Αυξάνεται το Βάθος Μειώνεται η Αποτελεσματικότητα.
Ηλιακός Αποστακτήρας Πολλαπλής Διάχυσης	Ηλιακή Ακτινοβολία Και Απορρόφηση. Ημερήσια και Συνολική Παραγωγή Αποστάγματος. Μέγεθος της Διάχυσης Μεταξύ των Χωρισμάτων.	Η μέση Ημερήσια Παραγωγή είναι το 1/5 της Κλίμακας. Η παραγωγή είναι Μέγιστη στο Δεύτερο Χώρισμα ενώ Μετά Μειώνει Μέχρι το Τελευταίο.	Ιδανικό για Μικρές Παραγωγές. Πιο Αποτελεσματικό Όταν το Κενό είναι Μικρό. Χρήση από τον Στρατό. Φιλικό προς τον Χρήστη.	Το Κενό Διάχυσης Μεταξύ των Χωρισμάτων Είναι το Βασικό Πρόβλημα. Το Κενό Αέρα Μεταξύ του Γυάλινου Καλύμματος Πρέπει να Είναι το Βέλτιστο.
Ηλιακός Αποστακτήρας Με Κλίση	Ρυθμός Παραγωγής Αποστάγματος. Απορροφημένη Ηλιακή Ακτινοβολία Στην Πτέρυγα. Ημερήσια Ποσότητα Αποστάγματος. Κλίση Αποστακτήρα.	Ο Ρυθμός Παραγωγής Αποστάγματος και η Ποσότητα της Απορροφημένης Ακτινοβολίας Είναι Μεγαλύτερα για Αποστακτήρες με Ανακλαστήρα τις Ωρες 8 π.μ.-4 μ.μ.	Σε Σύγκριση με τον Απλό Ηλιακό Αποστακτήρα έχει Αύξηση της Ημερήσιας Παράγωγης Κατά 9%. Η Παραγωγή του Νερού είναι Μεγάλη και Χρησιμοποιείται για Οικονομικούς Λόγους.	Η Πτέρυγα Αποτελεί το Κυρίως Πρόβλημα. Απαιτεί Συνεχή Ροή Νερού. Η Μόλυνση των Σωλήνων στην Πτέρυγα Συμβαίνει Πάντα.
Ηλιακός Αποστακτήρας Με Σωλήνες Για Αφαλάτωση Θαλασσινού Νερού	Ημερήσια Ενεργειακή Αποδοτικότητα Αποστακτήρα. Λανθάνουσα Θερμότητα Της Εξάτμισης.	Βελτιωμένη Παραγωγικότητα Γλυκού Νερού σε Σχέση με τα Συμβατικά Συστήματα, όπου η Εξάτμιση του Θαλασσινού Νερού και η Συμπύκνωση του Υδρατμού Συμβαίνουν σε Έναν Περιορισμένο Χώρο.	Χρησιμοποιείται σε Παράκτιες Περιοχές. Ευκολία στη Κατασκευή. Χρήση Ινώδους Υλικού. Υψηλότερη Αποδοτικότητα σε Σχέση με τον Απλό Ηλιακό Αποστακτήρα.	Υψηλό Κόστος Κεφαλαίου. Ευαίσθητη Συσκευή. Λόγω του Ινώδους Υλικού το Κόστος Αυξάνεται.

**Πίνακας 4:** Σύγκριση Διαφόρων Ειδών Ηλιακών Αποστακτήρων. [29]

## Παράρτημα Α : Αναφορά των Παγκοσμίως Μεγαλύτερων Μονάδων Αφαλάτωσης

Τα μεγαλύτερα συστήματα αφαλάτωσης βρίσκονται στην περιοχή της Σαουδικής Αραβίας και στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα. Το νεώτερο αλλά και μεγαλύτερο παγκοσμίως σύστημα αφαλάτωσης ονομάζεται Shuaiba III, βρίσκεται στην Σαουδική Αραβία και παράγει συνολικά 880.000 m<sup>3</sup>/ ημέρα. Στην δεύτερη και τρίτη θέση της παγκόσμια κατάταξης, εγκατεστημένα πάλι στην περιοχή της Σαουδικής Αραβίας, έρχονται το Ras Al-Zour και το Al Jobail II Ex με παραγωγικότητες 800.000 m<sup>3</sup>/ ημέρα και 730.000 m<sup>3</sup>/ ημέρα, αντίστοιχα. [72]

Την τέταρτη θέση κατέχει ένα από τα γνωστότερα συστήματα αφαλάτωσης το Jebel Ali. Είναι ένα σύστημα πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF), το οποίο βρίσκεται εγκατεστημένο στην περιοχή των Ηνωμένων Αραβικών Εμιράτων και σήμερα μπορεί και παράγει πάνω από 300.000 m<sup>3</sup>/ ημέρα. Ο λόγος που βρίσκεται σε αυτή την θέση της παγκόσμιας κατάταξης είναι γιατί η δυναμικότητά του το έτος 2011 πρόκειται να διπλασιαστεί και άρα να ξεπεράσει τα 600.000 m<sup>3</sup>/ ημέρα. [72]

Όλα τα παραπάνω συστήματα έχουν διττό χαρακτήρα, γεγονός που σημαίνει ότι παράλληλα με την παραγωγή γλυκού νερού μπορούν και τροφοδοτούν τις άγονες αυτές περιοχές με ηλεκτρικό ρεύμα. Ενδεικτικά, το τελευταίο από τα συστήματα που αναφέρθηκε έχει παραγωγή ηλεκτρισμού 2.000 MW. [73]

Στα Ηνωμένα Έθνη το μεγαλύτερο σύστημα αφαλάτωσης, το οποίο ξεκίνησε να λειτουργεί το 2006 και έχει παραγωγικότητα 189.250 m<sup>3</sup>/ ημέρα, ονομάζεται CA San Diego. Ωστόσο, ένα από τα πιο γνωστά εγκαταστημένα συστήματα αφαλάτωσης στα Ηνωμένα Έθνη είναι το FL Tampa Bay. Ξεκίνησε να λειτουργεί το 2003 με δυνατότητα παραγωγής νερού να φτάνει τα 94.625 m<sup>3</sup>/ ημέρα. [72]



Εικόνα 177: Σύστημα Αφαλάτωσης Shuaiba III στην Σαουδική Αραβία.[74]

## Παράρτημα Β : Πλωτές Μονάδες Αφαλάτωσης

Η πρώτη πλωτή μονάδα αφαλάτωσης κατασκευάστηκε από Έλληνες ερευνητές, τον Νικηφόρο Νικητάκο και τον Θεόδωρο Λίλα, καθηγητές του Πανεπιστημίου Αιγαίου, και τον ηλεκτρολόγο-μηχανικό Νάσο Βατίστα. Η σύλληψη της πρωτότυπης ιδέας πραγματοποιήθηκε το 2002, ωστόσο, η υλοποίησή της παρουσιάστηκε αρκετά δύσκολη. [75]

Η πιλοτική μονάδα κατασκευάστηκε στα Ναυπηγεία της Ελευσίνας και της δόθηκε το μυθολογικό όνομα «Υδριάδα». Το καλοκαίρι του 2007 ρυμουλκήθηκε και αγκυροβόλησε έξω από το λιμάνι της Ηρακλείας, όπου βρίσκεται μέχρι σήμερα. [75] Καλύπτει τις ενεργειακές της ανάγκες με φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο, αξιοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας-κατά κύριο λόγο αιολική και, επικουρικά, ηλιακή ενέργεια. Για τον λόγο αυτό διαθέτει ανεμογεννήτρια και φωτοβολείται στοιχεία. [76] Έχει δυνατότητα παραγωγής 70 κυβικών μέτρων νερού ημερησίως, ικανής να καλύψει τις ανάγκες 250 ατόμων. [75]

Το κύριο πλεονέκτημα της μονάδας είναι η πλήρως αυτόνομη λειτουργία της. Επίσης, το σύστημα είναι τηλε-παρακολουθούμενο, γεγονός που δεν απαιτεί την ύπαρξη ανθρώπων πάνω στην μονάδα, όπως επίσης και εξειδικευμένου προσωπικού στα μικρά νησιά. [76]

Η Επιτροπή του διαγωνισμού των Βραβείων RegioStars 2008 που αφορούν την επιβράβευση των πιο καινοτόμων περιφερειακών σχεδίων της Ευρώπης απένειμε Ειδική Μνεία στο έργο «Πλωτή, αυτόνομη και φιλική για το περιβάλλον μονάδα αφαλάτωσης, Νότιο Αιγαίο, Ελλάδα», καθιστώντας την πρωτότυπη αυτή εφεύρεση σε πολλά υποσχόμενη τεχνολογία του μέλλοντος. [76]



**Εικόνα 178:** Πλωτή Μονάδα Αφαλάτωσης στην Ηρακλεία. [75]

## Βιβλιογραφία

- [1] Hisham T. El-Dessouky , Hisham M. Ettouney, *Fundamentals Of Salt Water Desalination*, Elsevier 2002.
- [2] [http://el.wikipedia.org/wiki/Κύκλος\\_του\\_νερού](http://el.wikipedia.org/wiki/Κύκλος_του_νερού)
- [3] Kalogirou Soteris A., *Solar Thermal Collectors and Applications*, Science Direct-Elsevier Journal.
- [4] Hamed O.A., Eisa E.I. and Abdalla W.E., Overview of solar desalination, *Desalination* Vol. 93, pp. 563-579, Elsevier Journal 1993.
- [5] Kalogirou Soteris, Survey of solar desalination systems and system selection, *Energy* Vol. 22, No. 1, pp. 69-81, Elsevier Journal 1997.
- [6] Al-Karaghoulia Ali, Renne David, Kazmerski Lawrence L., Technical and economic assessment of photovoltaic-driven desalination systems, *Renewable Energy* Vol. 35, pp. 323–328, Elsevier Journal 2010.
- [7] Hawaj O.Al.mand Darwish M.A., Performance characteristics of a multi effect solar pond desalting system in an arid environment, *Desalination* Vol. 96, pp. 3-10, Elsevier Journal 1994.
- [8] El-Nashar Ali M., The economic feasibility of small solar MED seawater desalination plants for remote arid areas, *Desalination* Vol. 134, pp. 173-186, Elsevier Journal 2001.
- [9] Blanco Julián, Zarza Eduardo, Alarcón Diego, Malato Sixto, León Javier, *Advanced Multi-Effect Solar Desalination Technology: The PSA Experience*, Elsevier Journal.
- [10] <http://www.env-edu.gr/Chapters.aspx?id=101>
- [11] <http://www.energypoint.gr/>
- [12] <http://www.rise.org.au/info/Tech/lowtemp/ponds.html>
- [13] Safi M.J., Performance of a flash desalination unit intended to be coupled to a solar pond, *Renewable Energy* Vol.14, pp. 339-343, Elsevier Journal 1998.
- [14] Borsani Roberto and Rebagliati Silvio, Fundamentals and costing of MSF desalination plants and comparison with other technologies, *Desalination* Vol. 182, pp. 29–37, Elsevier Journal 2005.
- [15] Moustafa S.M.A., Jarrar D.I. and El-Mansy H.I., Performance Of a Self-Regulating Solar Multistage Flash
- [41] Hamed Osman A., Evolutionary developments of thermal desalination plants in the arab gulf region, Research & Development Center, SWCC.
- [42] Tayeb Aghareed M., Performance Study Of Some Designs Of Solar Stills, *Energy Convers. Mgmt*, Vol. 33, No. 9, pp. 889-898, 1992
- [43] Darwish M.A., Critical Comparison between Energy Consumption in Large Capacity Reverse Osmosis (RO) and Multistage Flash (MSF) Seawater Desalting Plants, *Desalination* Vol. 6 , pp. 143-161, Elsevier Journal 1987.
- [44] Belfort. G. editor, *Synthetic Membrane Processes*, Academic Press, 1984.
- [45] Greenlee Lauren F., Lawler Desmond F., Freeman Benny D., Marrot Benoit, Philippe Moulin Philippe, Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges, *water research* Vol. 43 ,pp. 2317 – 2348, Elsevier Journal 2009.
- [46] Darwish M.A., Jawad M. Abdel, and Aly G.S., Comparison Between Small Capacity Mechanical Vapor Compression (MVC) and Reverse Osmosis (RO) Desalting Plants, *Desalination* Vol. 78 ,pp. 313-326, Elsevier Journal 1990.
- [47] Professor Newcomb Ronald A., *Cost Comparison of the Major Desalination Options World Wide Assets LLC*, 2007.
- [48] Wangnick K. IDA Inventory, 2004, Selection of Desalination Technologies, Tzen Eftihia, <http://www.cres.gr/kape/publications/xrisima.htm>
- [49] Bureau of Reclamation, Water Treatment Engineering and Research Group, *Desalting Handbook for Planners*, 3<sup>rd</sup> Edition, July 2003, Selection of Desalination Technologies, Tzen Eftihia, <http://www.cres.gr/kape/publications/xrisima.htm>
- [50] Al-Mutaz I.S. and Al-Ahmed M.I., Evaluation of solar powered desalination processes, *Desalination* Vol. 73, pp. 181-190, Elsevier Journal 1989.
- [51] Bowman T.E., El-Nashar A.M., Thrasher B.H., Husseiny A.A. and Unione A.J., Design

- Desalination System, Solar Energy Vol. 35, N.4, pp. 333-340, Elsevier Journal 1985.
- [16] Manjarrez R. and Galvan Mexico M., Solar multistage flash evaporation (SMSF) as a solar energy application on desalination processes description of one demonstration project, Desalination Vol. 31, pp. 545-554, Elsevier Journal 1979.
- [17] Reali Mario, Solar barometric distillation for seawater desalting, Part III: Analyses of one-stage and two-stage solar vapour thermo-compression distillation technologies, Desalination Vol. 207, pp. 304-323, Elsevier Journal 2007.
- [18] Helal A.M., Al-Malek S.A., Design of a solar-assisted mechanical vapor compression (MVC) desalination unit for remote areas in the UAE, Desalination Vol. 197, pp. 273-300, Elsevier Journal 2006.
- [19] Riffat S. B., Solar absorption system for water desalination, Renewable Energy, Vol. 6, No. 2, pp. 101-106, 1995, Elsevier Science Ltd.
- [20] Zejli D., Benchrifa R., Bennouna A., Bouhelal O.K., A solar adsorption desalination device: first simulation results, Desalination Vol. 168, pp. 127-135, Elsevier Journal 2004.
- [21] Adiga M.R., Adhikary S.K., Narayanan P.K., Harkare W.P., Gomkale S.D., Govindan K.P., Performance analysis of photovoltaic electro dialysis desalination plant at Tanote in the Thar desert, Desalination Vol. 67, pp. 59-66, Elsevier Journal 1987.
- [22] Kuroda O., Takahashi S., Kubota S., Kikuchi K., Eguchi Y., Ikenaga Y., et al, An electro dialysis seawater desalination system powered by photovoltaic cells, Desalination Vol. 67, pp. 161-169, Elsevier Journal 1987.
- [23] Lichtwardt M., Remmers H., Water treatment using solar powered electro dialysis reversal. In: Proceedings of the mediterranean conference on renewable energy sources for water production, 1996, Elsevier Journal.
- [24] Nafey A.S., Fath H.E.S., El-Helaby S.O., Soliman A., Solar desalination using humidification-dehumidification processes. Part II: An experimental investigation, Energy Conversion and Management Vol. 45, pp. 1263-1277, Elsevier Journal 2004.
- of a small sola powered desalination system, Desalination, Vol. 13, pp. 71-81, Elsevier Journal 1981.
- [52] Manolakos D., Papadakis G., Mohamed E.S., Kyritsis S. and Bouzianas K., Design of an autonomous low-temperature solar Rankine cycle system for reverse osmosis desalination. Desalination, Vol. 183, pp. 73-80, Elsevier Journal 2005.
- [53] Laborde H.M., Frang K.B., Nef H., Lima A.M.N., Optimization strategy for a small-scale reverse osmosis water desalination system based on solar energy, Desalination Vol. 133, pp. 1-12, Elsevier Journal 2001.
- [54] World Health Organization, Guidelines for Drinking Water Quality, Vol. 1, Recommendations, Geneva, 1984.
- [55] Voros N.G., Kiranoudis C.T., Maroulis Z.B., Solar energy exploitation for reverse osmosis desalination plants, Desalination Vol. 115, pp. 83-101, Elsevier Journal 1998.
- [56] Gerofi J.P. and Fenton G.G., Comparison of solar RO and solar thermal desalination systems, Desalination Vol. 39, pp. 95-107, Elsevier Journal 1981
- [57] Hanafi Abdalla, Design and Performance of solar MSF desalination systems, Desalination Vol. 82, pp. 175-185, Elsevier Journal 1991.
- [58] International Energy Agency, Guidelines for the economic analysis of renewable energy technology applications. Based on findings of the International Energy Workshop on the Economics of Renewable Energy Technologies, Chateau Montebello, Quebec, Canada, 1991.
- [59] Garcia-Rodriguez Lourdes, Gomez-Camacho Carlos, Conditions for economical benefits of the use of solar energy in multi-stage flash distillation, Desalination Vol. 125, pp. 133-138, Elsevier Journal 1999.
- [60] Hoffman Daniel, The application of solar energy for large-scale seawater desalination, Desalination, Vol. 89, pp. 115-184, Elsevier Journal 1992.
- [61] Garcia-Rodriguez L., Gomez-Camacho C., Thermo-economic analysis of a solar multi-effect distillation plant installed at the Plataforma Solar de Almeria (Spain), Desalination Vol. 122, pp. 205-214, Elsevier Journal 1999.

- [25] Dai Y.J., Zhang H.F., Experimental investigation of a solar desalination unit with humidification and dehumidification, *Desalination* Vol. 130, pp. 169-175, Elsevier Journal 2000.
- [26] Posnansky M., Technical and economical aspects of solar desalination with particular emphasis on solar pond powered distillation plants, *Desalination*, pp. 81-95, Elsevier Science Publishers B.V.
- [27] Mittelman Gur, Kribus Abraham, Mouchtar Ornit, Dayan Abraham, Water desalination with concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) systems, *Solar Energy* Vol. 83, pp. 1322–1334, Elsevier Journal 2009.
- [28] Vinoth K.K., Kasturi Bai R., Performance study on solar still with enhanced condensation, *Desalination* Vol. 230(1–3), pp. 51–61, Elsevier Journal 2008.
- [29] Aayush Kaushal, Varun, Solar stills: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 14, pp. 446–453, Elsevier Journal 2010.
- [30] Maalej A.Y., Solar still performance, *Desalination* Vol. 82, pp. 197–205, Elsevier Journal 1991.
- [31] Kunze H., A new approach to solar desalination for small and medium size use in remote areas, *Desalination* Vol. 139, pp. 35–41, Elsevier Journal 2001.
- [32] Velmurugana V., Sritharb K., Solar stills integrated with a mini solar pond — analytical simulation and experimental validation, *Desalination* Vol. 216, pp. 232–241, Elsevier Journal 2007.
- [33] Kalogirou Soteris A., Seawater desalination using renewable energy sources, *Progress in Energy and Combustion Science* Vol. 31, pp. 242–281, Elsevier Journal 2005.
- [34] Hasnain Syed M., Alajlan Saleh A., Coupling of PV-powered RO brackish water desalination plant with solar stills, *Desalination* Vol. 116, pp. 57-64, Elsevier Journal 1998.
- [35] Banat F., Jumah R., Garaibeh M., Exploitation of solar energy collected by solar stills for desalination by membrane distillation, *Renewable Energy* Vol. 25, pp. 293–305, Elsevier Journal 2002.
- [62] El-Nashar Ali M., The economic feasibility of small solar MED seawater desalination plants for remote arid areas, *Desalination* Vol. 134, pp. 173-186, Elsevier Journal 2001.
- [63] Adiga Mahabala R., Adhikary S.K., Narayanan P.K., Harkare W.P., Comkale S.D. and Govindan K.P., Performance analysis of photovoltaic electro dialysis desalination plant at Tanote in Thar desert, *Desalination*, Vol. 67, pp. 59-66, Elsevier Journal 1987.
- [64] Rheinländer Jürgen and Geyer Dieter, Photovoltaic Reverse Osmosis and Electrodialysis, Chapter 8: Application of Solar Photovoltaic Energy Production to RO and ED Desalination Processes.
- [65] AlMadani H.M.N., Water desalination by solar powered electro dialysis process, *Renewable Energy* Vol. 28, pp. 1915–1924, Elsevier Journal 2003.
- [66] Tzen E., Theofiloyianakos D., Kologios Z., Autonomous reverse osmosis units driven by RE sources – experiences and lessons learned. *Desalination* Vol. 221, pp. 29–36, Elsevier Journal 2008.
- [67] Zamen M., Amidpour M., Soufari S.M., Cost optimization of a solar humidification–dehumidification desalination unit using mathematical programming, *Desalination* Vol. 239, pp. 92–99, Elsevier Journal 2009.
- [68] Yamali Cemil, Solmus Ismail, A solar desalination system using humidification–dehumidification process: experimental study and comparison with the theoretical results, *Desalination* Vol. 220, pp. 538–551, Elsevier Journal 2008.
- [69] Parekh S., Farid M.M., Selman J.R. and Al-Hallaj S., Solar desalination with humidification–dehumidification technique — a comprehensive technical review, *Desalination*, Vol. 160, pp. 167–186, Elsevier Journal 2003.
- [70] Agha K.R., The thermal characteristics and economic analysis of a solar pond coupled low temperature multi stage desalination plant, *Solar Energy* Vol. 83, pp. 501–510, Elsevier Journal 2009.
- [71] Chun W.G., Chen K., Ng K.C., Operation of solar and waste-heat powered adsorption desalination, <http://www.slideshare.net/iskandaruz/operation-of-solar-and-wasteheat-powered-adsorption-desalination>

- [36] <http://maps.grida.no/go/graphic/trends-and-forecasts-in-water-use-by-sector>, Shiklomanov Igor A., State Hydrological Institute (SHI, S. Petersburg) and United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation (UNESCO, Paris 1999).
- [37] <http://maps.grida.no/go/graphic/access-to-safe-drinking-water>
- [38] Eltawil Mohamed A., Zhengming Zhao, Yuan Liqiang, A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 13, pp. 2245–2262, Elsevier Journal 2009.
- [39] Bureau of reclamation, 2003, Selection of Desalination Technologies, Tzen Eftihia, <http://www.cres.gr/kape/publications/xrisima.htm>
- [40] Borsani Roberto, Rebagliati Silvio, Fundamentals and costing of MSF desalination plants and comparison with other technologies, Desalination Vol. 182, pp. 29–37, Elsevier Journal 2005.
- [72] Wangnick/GWI. 2005. 2004 worldwide desalting plants inventory. Global Water Intelligence, Oxford, England.
- [73] <http://www.arabianbusiness.com/825>
- [74] [http://www.lastdaysrevelations.com/our\\_earth\\_environment.htm](http://www.lastdaysrevelations.com/our_earth_environment.htm)
- [75] <http://www.tanea.gr/default.asp?pid=2&artid=4512693&ct=3>
- [76] <http://www.hellaskps.gr/bestpractices/proj.asp?pid=77>