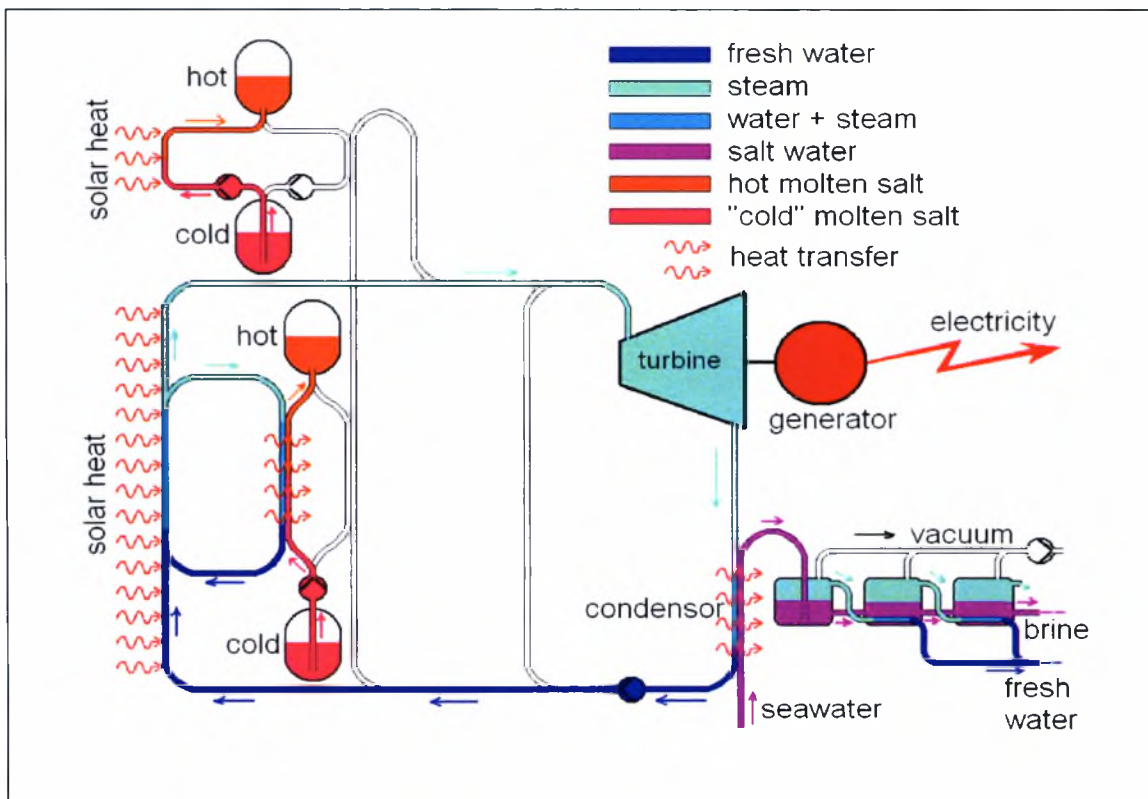




Διπλωματική Εργασία

**ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΝΕΡΟΥ μέσω
ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ και ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ**

υπό
ΗΛΙΑ Α. ΤΑΣΣΗ



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

Βόλος, Νοέμβριος 2008



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 6769/1
Ημερ. Εισ.: 22-12-2008
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2008
ΤΑΣ

© 2008 Ηλίας Α. Τάσσης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής: Δρ. Ανδρίτσος Νικόλαος
(Επιβλέπων) Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής: Δρ. Μποντόζογλου Βασίλης
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής: Δρ. Γραμμένος Θεοφάνης
Διδάσκων (Π.Δ. 407/80), Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Νίκο Ανδρίτσο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Βασίλη Μποντόζογλου και Διδάσκοντα κ. Θεοφάνη Γραμμένο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Ευχαριστώ τους φίλους και συμφοιτητές στο Βόλο για την ηθική τους υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου και τη μεγαλύτερη αδερφή μου για την ολόψυχη αγάπη και την οικονομική τους υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια. Ευχαριστώ τους γονείς μου, επίσης, που ως μηχανικοί σχολίασαν εποικοδομητικά την εργασία μου. Αφιερώνω αυτή την εργασία στον εκλιπόντα παππού *Αλέκο* που με δίδαξε ήθος και φιλομάθεια. Η εργασία αυτή αφιερώνεται, ακόμα, σε όλους τους μηχανικούς και εργάτες του τεχνικού κλάδου που μοχθούν καθημερινά κάτω από δύσκολες συνθήκες.

Ηλίας Α. Τάσσης

Βόλος, Νοέμβριος 2008

ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΝΕΡΟΥ μέσω ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ και ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

ΗΛΙΑΣ Α. ΤΑΣΣΗΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2008

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Ανδρίτσος Νικόλαος, Αναπληρωτής Καθηγητής
Πειραματικών Φαινομένων Μεταφοράς

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται τεχνικές αφαλάτωσης νερού μέσω ηλιακής και γεωθερμικής ενέργειας και συνάγονται ορισμένα συμπεράσματα από την ανάλυση κόστους της εκάστοτε επένδυσης. Εισαγωγικά καταδεικνύεται το παγκόσμιο πρόβλημα της ανεπάρκειας νερού. Αυτό σχετίζεται περισσότερο με το φαινόμενο της ερημοποίησης σε διάφορα μέρη του πλανήτη, εξ αιτίας, κατά κύριο λόγο, της αλόγιστης εκμετάλλευσης νερού για γεωργικούς ή βιομηχανικούς σκοπούς. Επίσης, σημαντική είναι η επίδραση του φαινομένου της παγκόσμιας θέρμανσης (φαινόμενο του «θερμοκηπίου») και της παγκόσμιας πληθυσμιακής αύξησης. Μία από τις προτεινόμενες τεχνολογικές λύσεις είναι η αφαλάτωση, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως από τις πετρελαιοπαραγωγούς χώρες της αραβικής χερσονήσου ήδη από τη δεκαετία του 1950. Η συμβατική αφαλάτωση, όμως, επιβαρύνει την ατμόσφαιρα με αέριους ρύπους και σωματιδιακή ύλη και χαρακτηρίζεται από ένταση κεφαλαίου. Η πρώτη αρνητική συνέπεια μπορεί να αποφευχθεί, αν αξιοποιηθούν άμεσοι ηλιακοί αποστακτήρες ή αν συνδυαστούν οι υπάρχουσες θερμικές διεργασίες αφαλάτωσης με ηλιακούς συσσωρευτές και ηλιακές λίμνες. Ιδιαίτερα ελκυστική ιδέα για την Ελλάδα αποτελεί η αξιοποίηση του γεωθερμικού της δυναμικού για θερμική αφαλάτωση, ωστόσο αυτό το πολλά υποσχόμενο εγχείρημα βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο. Σημαντικό μειονέκτημα για την τεχνολογική αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας είναι η περιοδικότητά της, πράγμα που δε συμβαίνει με τη γεωθερμική ενέργεια, η οποία έχει αδιάκοπη ροή. Τέλος, προκειμένου να ξεπεραστεί το υψηλό οικονομικό κόστος που χαρακτηρίζει τη θερμική ηλιακή αφαλάτωση, προτείνεται η χρήση υβριδικών συστημάτων συμπαραγωγής. Έτσι, θα συνδυάζονται θερμικοί ηλιακοί συσσωρευτές και ορυκτό καύσιμο με σκοπό τη συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας διεργασίας και κατ' επέκταση την παραγωγή αφαλατωμένου νερού. Η γεωθερμική αφαλάτωση προτείνεται να αξιοποιείται μάλλον σε περιοχές, όπου υπάρχουν κατάλληλοι γεωθερμικοί ταμιευτήρες και διαπιστώνεται ότι οι άλλες εναλλακτικές μέθοδοι για παραγωγή νερού είναι ασύμφορες.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ :

ΚΕΦ. 1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Το παγκόσμιο πρόβλημα της ανεπάρκειας του νερού	1
1.2	Η ανεπάρκεια του νερού στην Ελλάδα	4
1.3	Ιστορική ανασκόπηση των μεθόδων συμβατικής αφαλάτωσης	6
1.4	Υφιστάμενες μέθοδοι συμβατικής αφαλάτωσης	8
1.4.1	Θερμικές διεργασίες	9
1.4.2	Διεργασίες μεμβρανών	12
1.4.3	Άλλες παράμετροι για τη συμβατική αφαλάτωση	14
1.5	Εισαγωγή στην αφαλάτωση μέσω ΑΠΕ	20
ΚΕΦ. 2	ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕΣΩ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	23
2.1	Εισαγωγή	23
2.2	Ιστορικά στοιχεία - Διάκριση των τεχνικών ηλιακής αφαλάτωσης	24
2.3	Τεχνικές άμεσης ηλιακής αφαλάτωσης	25
2.3.1	Αποστακτήρες απλού φαινομένου	26
2.3.2	Αποστακτήρες πολλαπλού φαινομένου	30
2.3.3	Ηλιακή αφαλάτωση ύγρανσης-αφύγρανσης	33
2.4	Τεχνικές έμμεσης ηλιακής αφαλάτωσης	36
2.4.1	Τεχνικά χαρακτηριστικά θερμικών ηλιακών συστημάτων στην αφαλάτωση	39
2.4.2	Ηλιακή αφαλάτωση με MSF	42
2.4.3	Ηλιακή αφαλάτωση με MED	46
2.4.4	Το πρόγραμμα AQUASOL στη Plataforma Solar de Almeria	47
2.4.5	Παραδείγματα ανάλυσης κόστους για έμμεση ηλιακή αφαλάτωση	52
2.5	Συνδυασμός MSF/MED με ηλιακούς αποστακτήρες	56
2.6	Νέες τάσεις στο συνδυασμό ηλιακής αφαλάτωσης και ηλεκτροπαραγωγής	26
2.7	Συμπεράσματα και προτάσεις	62
ΚΕΦ. 3	ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕΣΩ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	63
3.1	Εισαγωγή	63
3.2	Το γεωθερμικό δυναμικό της Ελλάδας	66
3.3	Η Ελληνική εμπειρία στη γεωθερμική αφαλάτωση	68
3.3.2	Γεωθερμική αφαλάτωση νερού στην Κίμωλο	69
3.3.2	Γεωθερμική αφαλάτωση νερού στη Μήλο	74
3.3.3	Γεωθερμική αφαλάτωση νερού στη Νίσυρο	79
3.4	Προτάσεις γεωθερμικής αφαλάτωσης από το εξωτερικό	81
3.5	Συμπεράσματα και προτάσεις	84
ΚΕΦ. 4	ΑΛΛΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΤΗΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕΣΩ ΑΠΕ	85
4.1	Έλεγχος περιβαλλοντικών επιπτώσεων	85
4.2	Διάβρωση μεταλλικών επιφανειών κατά την ηλιακή αφαλάτωση	88
4.3	Πολιτικές σχετικά με τις ΑΠΕ και την ΕΞΕ	89
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	91

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1.1: Ο καταμερισμός των παγκόσμιων υδάτινων πόρων	1
Σχήμα 1.4.1: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου MSF	10
Σχήμα 1.4.2: Μονάδα MED με οριζόντιους αυλούς	11
Σχήμα 1.4.3: Μονάδα MED τύπου «πίπτουσας στιβάδας» σε πλάκες	11
Σχήμα 1.4.4: Σχηματικό διάγραμμα μιας μονάδας συμπίεσης ατμού	12
Σχήμα 1.4.5: Σχηματική αναπαράσταση μεμβρανών τύπου hollow fiber	13
Σχήμα 1.4.6: Σχηματική αναπαράσταση μεμβρανών τύπου spiral wound	14
Σχήμα 1.4.7: Μερίδιο συμμετοχής της κάθε μεθόδου αφαλάτωσης στην παγκόσμια αγορά	15
Σχήμα 1.5.1: Συνδυασμοί μεταξύ Α.Π.Ε. και τεχνολογιών αφαλάτωσης αγορά	22
Σχήμα 2.3.1: Συνοπτική κατηγοριοποίηση των ηλιακών αποστακτήρων άμεσης ηλιακής αφαλάτωσης	25
Σχήμα 2.3.2: Σχηματική αναπαράσταση του κοινού ηλιακού αποστακτήρα	26
Σχήμα 2.3.3: Σχηματική αναπαράσταση του ηλιακού αποστακτήρα με πρόσθετη ψύξη	28
Σχήμα 2.3.4: Σχηματική αναπαράσταση του ηλιακού αποστακτήρα ενσωματωμένου σε θερμοκήπιο	29
Σχήμα 2.3.5: Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας του υγραντήρα πολλαπλού φαινομένου	31
Σχήμα 2.3.6: Ενεργειακή κατανάλωση για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας και θερμοκρασία τροφοδοσίας στους 40°C	31
Σχήμα 2.3.7: Σχηματική αναπαράσταση του ηλιακού αποστακτήρα με προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας	32
Σχήμα 2.3.8: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης της ηλιακής αφαλάτωσης με ύγρανση-αφύγρανση των Dai και Zhang	33
Σχήμα 2.3.9: Σχηματική αναπαράσταση του ηλιακού αερο-θερμαντήρα με πολυβάθμια ύγρανση	34

Σχήμα 2.3.10: Ψυχομετρικό διάγραμμα της πολυβάθμιας θέρμανσης και ύγρανσης	35
Σχήμα 2.4.1: Διάγραμμα παραβολικού συλλέκτη τύπου σκάφης	37
Σχήμα 2.4.2: Διάγραμμα παραβολικού συλλέκτη – πιάτου	37
Σχήμα 2.4.3: Ηλιακός συλλέκτης με σωλήνες κενού	37
Σχήμα 2.4.4: Σχηματικό διάγραμμα ηλιακής λίμνης με άλατα	38
Σχήμα 2.4.5: Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης	41
Σχήμα 2.4.6: Διάγραμμα χαρακτηριστικής καμπύλης συντελεστή απόδοσης ηλιακού συλλέκτη συναρτήσει του λόγου $T_{collector} - T_{amb}/E_g$	42
Σχήμα 2.4.7: Γραφική απεικόνιση της συμπεριφοράς του βαθμού απόδοσης GOR συναρτήσει των διαφορών θερμοκρασίας των βαθμίδων και του θερμοκρασιακού εύρους λειτουργίας	44
Σχήμα 2.4.8: Διάγραμμα ροής της προτεινόμενης διεργασίας αφαλάτωσης με το σχήμα SP/MSF για GOR= 10 και SZT= 90 °C στην Τρίπολη της Λιβύης	45
Σχήμα 2.4.9: Σχηματικό διάγραμμα της παραγωγικής διαδικασίας της μονάδας αφαλάτωσης του AQUASOL Project στην Plataforma Solar de Almeria	48
Σχήμα 2.4.10: Ενεργειακό ισοζύγιο της αντλίας θερμότητας DEAHP	50
Σχήμα 2.4.11: Διάφορες όψεις από τον ηλιακό ξηραντήρα του AQUASOL	51
Σχήμα 2.4.12: Συνολικό κόστος εξοπλισμού ηλιακών συλλεκτών σε ένα υβριδικό σύστημα (50% ορυκτό καύσιμο-50% ηλιακή ενέργεια) συναρτήσει του κόστους ενεργειακής κατανάλωσης ορυκτού καυσίμου, για να επιτευχθεί το ίδιο κόστος αφαλάτωσης με μία συμβατική μονάδα MED	52
Σχήμα 2.4.13: Καθαρή παρούσα αξία (LC) αφαλατωμένου νερού για μονάδα MED με ηλιακούς συλλέκτες που παράγουν ατμό είτε από αλμόλοιπο (case1) είτε από γλυκό νερό (case 2)	54
Σχήμα 2.4.14: Κόστος αφαλατωμένου νερού μέσω τριών ειδών διεργασιών συναρτήσει της δυναμικότητας της μονάδας	55
Σχήμα 2.5.1: Συνδεσμολογία τροφοδοσίας ηλιακού αποστακτήρα με αλμόλοιπο από διεργασία MSF	56

Σχήμα 2.5.2: Σύνδεση ενός ηλιακού αποστακτήρα με θάλαμο συμπύκνωσης από μονάδα MSF ή MED	57
Σχήμα 2.6.1: Συνδυασμός θερμικών ηλιακών συστημάτων για (α) παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος και για (β) ΣΗΘΥΑ με βοηθητικό ορυκτό καύσιμο και αποθηκευτική μονάδα	58
Σχήμα 2.6.2: Παράθεση διαφόρων τύπων δεδομένων από ένα σύστημα GIS για τις ενεργειακές δυνατότητες του Μαρόκο, όπου φαίνονται οι χάρτες: έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, ιδιοκτησίας γης, χρήσης γης, τεχνικών υποδομών και φυσικών κινδύνων	60
Σχήμα 2.6.3: Το προτεινόμενο ενεργειακό δίκτυο μεταξύ Β. Αφρικής και Ευρώπης που εκτιμάται ότι θα αξιοποιήσει στο μέγιστο τις ενεργειακές δυνατότητες των χωρών με ΑΠΕ	61
Σχήμα 3.1.1: Τα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών στα οποία συναντώνται τα περισσότερα γεωθερμικά συστήματα	64
Σχήμα 3.2.1: Τα γεωθερμικά πεδία στην Ελλάδα	67
Σχήμα 3.3.1: Σχηματική παράσταση της διεργασίας αφαλάτωσης με τη μέθοδο της απόσταξης πολλαπλού φαινομένου (MED) στην Κίμωλο	72
Σχήμα 3.3.2: Συνοπτική παρουσίαση των καθεστώτων ροής στους κατακόρυφους αγωγούς εξάτμισης	73
Σχήμα 3.3.3: Πρόχειρο σχηματικό διάγραμμα της γεωθερμικής μονάδας αφαλάτωσης στη Μήλο	75
Σχήμα 3.3.4: Πρόχειρο σχηματικό διάγραμμα της ηλεκτροπαραγωγικής μονάδας στη Μήλο	76
Σχήμα 3.4.1: Σχηματικό διάγραμμα της πρότυπης διάταξης AECP στην Τυνησία	83
Σχήμα 4.3.1: Η συμμετοχή των ΑΠΕ στην παγκόσμια παραγωγή πρωτογενούς ενέργεια κατά το 2001	8

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1.2: Τυπικές συγκεντρώσεις διαλυμένων στερεών (TDS) σε διάφορα είδη νερού	3
Πίνακας 1.1.3: Τυπικές συγκεντρώσεις αλάτων για διάφορες θάλασσες του κόσμου	3
Πίνακας 1.4.1: Συγκριτική ανάλυση πλεονεκτημάτων-μειονεκτημάτων των Θερμικών Διεργασιών και Διεργασιών Μεμβρανών αντίστοιχα	16
Πίνακας 1.4.2: Δυνατότητες εμπορικών εφαρμογών των πιο διαδεδομένων μεθόδων αφαλάτωσης	17
Πίνακας 1.4.3: Σύγκριση κόστους των μεθόδων συμβατικής αφαλάτωσης (α΄)	18
Πίνακας 1.4.4: Σύγκριση κόστους των μεθόδων συμβατικής αφαλάτωσης (β΄)	19
Πίνακας 1.4.5: Σύγκριση κόστους αφαλάτωσης θαλασσινού νερού για συμβατικές μονάδες στη Μεσόγειο	19
Πίνακας 2.4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά της προτεινόμενης ηλιακής λίμνης και μονάδας MSF για την περιοχή της Τρίπολης στη Λιβύη	45
Πίνακας 2.4.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά της αποστακτικής μονάδας PSA MED	49
Πίνακας 2.4.3: Καθαρή παρούσα αξία (LC) ηλιακών συλλεκτών σε μια μονάδα αφαλάτωσης MED με ηλιακή εγκατάσταση παραγωγής ατμού από θαλασσινό νερό	53
Πίνακας 3.3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά της γεωθερμικής αντλίας στη θέση Prassa-1 στην Κίμωλο	74
Πίνακας 3.3.2: Συνοπτική παρουσίαση των κύριων χαρακτηριστικών της συνδυασμένης γεωθερμικής μονάδας αφαλάτωσης-ηλεκτροπαραγωγής που προτάθηκε για τη Μήλο	78
Πίνακας 3.3.3: Κοστολόγηση του προγράμματος MIDES στη Μήλο	78
Πίνακας 3.3.4: Εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς, ανάγκες σε νερό και κόστος γεωθερμικής αφαλάτωσης νερού στη Νίσυρο	79
Πίνακας 3.3.5: Ενδεικτική κοστολόγηση της γεωθερμικής μονάδας αφαλάτωσης MED στη Νίσυρο	80

Κατάλογος Εικόνων

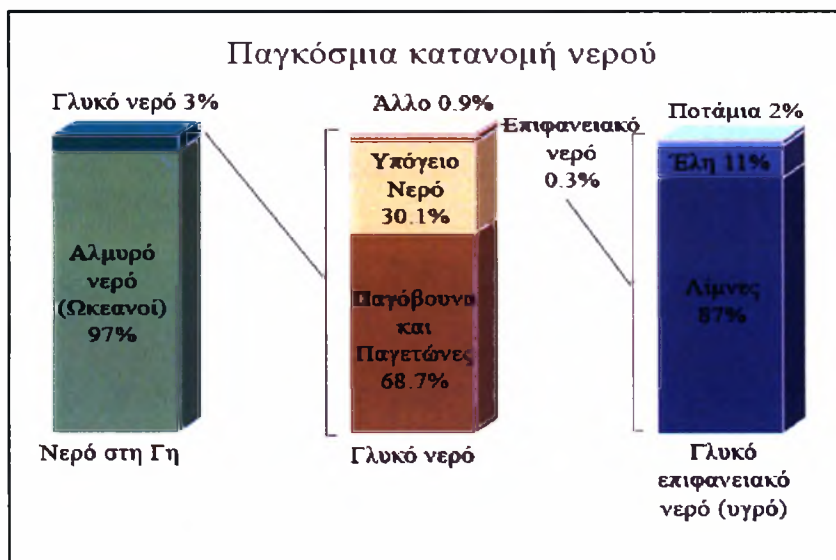
Εικόνα 1.2.1: Απεικόνιση της κατανομής των υδάτινων αποθεμάτων στην Ελλάδα	4
Εικόνα 1.2.2: Απεικόνιση των παράκτιων περιοχών όπου έχει παρατηρηθεί διεύδυση θαλασσινού νερού στους υδροφόρους ορίζοντες	5
Εικόνα 1.3.1: Οι πρώτοι ναυτικοί παρήγαγαν φρέσκο νερό με απόσταξη του θαλασσινού νερού	6
Εικόνα 1.3.2: Η πρώτη μονάδα αφαλάτωσης στη Σ. Αραβία βρίσκεται στην Τζέντα και αποτελεί σήμερα πολιτιστικό μνημείο	7
Εικόνα 1.4.1: Εγκαταστάσεις συμβατικής αφαλάτωσης στις μεσογειακές χώρες	17
Εικόνα 2.3.1: Ηλιακός αποστακτήρας στην Αϊτή	28
Εικόνα 2.4.1: Μονάδα MED με ηλιακούς συλλέκτες τύπου evacuated-tube collectors στα Η.Α.Ε.	46
Εικόνα 2.4.2: Αριστερά η μονάδα PSA MED κατακόρυφης διάταξης και δεξιά η δέσμη με τους οριζόντιους αυλούς που αντικατέστησαν την πρώτη βαθμίδα (effect)	49
Εικόνα 2.4.3: Η εγκατάσταση με τους ηλιακούς συλλέκτες επιφάνειας 500 m ²	50
Εικόνα 3.3.1: Η μικρή μονάδα MED τριών βαθμίδων της Alfa Laval στην Κίμωλο	69
Εικόνα 4.1.1: Νεαρά φύκια Posidonia Oceanica	86
Εικόνα 4.1.2: Εκροή άλμης σε μονάδα αφαλάτωσης στην Ισπανία	87

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Το Παγκόσμιο Πρόβλημα της Ανεπάρκειας του Νερού

Το πολυτιμότερο στοιχείο στη Γη είναι το νερό, χωρίς το οποίο δε θα μπορούσε να αναπτυχθεί η ζωή πριν από 3,5 εκατομμύρια χρόνια, όπως εκτιμάται. Η σπουδαιότητα του είχε επισημανθεί ήδη από την αρχαιότητα με πρωτεργάτες τους Έλληνες φιλοσόφους. Ο ένας από τους επτά σοφούς της εποχής, ο Θαλής ο Μιλήσιος (640-546 π.Χ.), έγραφε: «Η απέραντη θάλασσα που περικυκλώνει τη γη είναι η πρωταρχική μήτρα της ζωής και του νερού». Ενώ ο φιλόσοφος και φυσιοδίφης, Αριστοτέλης (384-322 π.Χ.), ήταν ο πρώτος που περιέγραψε τον κύκλο του νερού στο βιβλίο του περί μετεωρολογίας και έδινε μάλιστα συμβουλές για τη διαδικασία της αφαλάτωσης του νερού [Belessiotis, 2000].

Η ποσότητα του νερού που καλύπτει τη Γη είναι $1,4 \times 10^9 \text{ km}^3$ και βρίσκεται κατά κύριο λόγο στους ωκεανούς. Από αυτή την ποσότητα, περίπου το 3% είναι γλυκό νερό κατάλληλο για τον άνθρωπο (περίπου $35\,000\,000 \text{ km}^3$). Ωστόσο, το διαθέσιμο πόσιμο νερό είναι ακόμα λιγότερο, αν αναλογιστεί κανείς ότι το μεγαλύτερο μέρος από το παραπάνω ποσοστό είναι παγόβουνα και παγετώνες (Βλ. Σχήμα 1.1.1). Επίσης, εκτιμάται ότι μόνο το 1,2% από το συνολικό νερό στη Γη βρίσκεται επί του στερεού εδάφους, στη βλάστηση και ως υγρασία στην ατμόσφαιρα. Όπως ακριβώς συμβαίνει με τα ορυκτά καύσιμα, έτσι και το νερό που βρίσκεται υπογείως είναι προϊόν μιας αργής συσσωρευτικής φυσικής διεργασίας. Άρα το νερό γενικά δε θεωρείται ανανεώσιμος πόρος. Μόνο το νερό που συμμετέχει στον υδρολογικό κύκλο - μέσω των υδατοπτώσεων και της φυσικής διαπνοής και εξάτμισης - λογίζεται ως ανανεώσιμο [Miller, 2003].



Σχήμα 1.1.1: Ο καταμερισμός των παγκόσμιων υδάτινων πόρων. [πηγή: USGS]

Στο Σχήμα 1.1.1 φαίνεται ότι το μη-ανανεώσιμο νερό (non-renewable) ή αλλιώς *υπόγειο νερό* καταλαμβάνει το 30,1% του γλυκού νερού. Το ανανεώσιμο (renewable) καταλαμβάνει το 0,3% του γλυκού νερού και είναι το *επιφανειακό νερό*, δηλαδή οι λίμνες, τα ποτάμια και τα έλη. Το κρίσιμο ζήτημα είναι η διανομή του ετήσιου ανανεώσιμου νερού. Η διανομή αυτή είναι άνιση τόσο γεωγραφικά όσο και ετησίως. Αν συνυπολογίσουμε επιπλέον κάποιες κοινωνικο-οικονομικούς παραμέτρους, καθώς και τις επικείμενες κλιματολογικές αλλαγές, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι πολλές μη ευνοούμενες περιοχές του πλανήτη αντιμετωπίζουν ή θα αντιμετωπίσουν στο προσεχές μέλλον σοβαρό πρόβλημα έλλειψης νερού (Βλ. και Πίνακα 1.1.1).

Οι φράσεις όπως, «το νερό θα είναι πολυτιμότερο από τον χρυσό» ή «το νερό θα είναι το πετρέλαιο του 21^{ου} αιώνα» δεν είναι πλέον σχήματα λόγου και αν δεν ληφθούν δραστικά μέτρα, θα επιβεβαιωθούν ίσως συντομότερα από ότι προέβλεπαν οι ερευνητές. Σήμερα, το πρόβλημα της έλλειψης του νερού σχετίζεται περισσότερο με το φαινόμενο της *ερημοποίησης* σε διάφορα μέρη του πλανήτη, εξ αιτίας, κατά κύριο λόγο, της αλόγιστης εκμετάλλευσης του νερού για γεωργικούς ή βιομηχανικούς σκοπούς και της αλόγιστης αλλαγής χρήσεων γης. Το 1992 η Παγκόσμια Διάσκεψη Κορυφής του Περιβάλλοντος όρισε την ερημοποίηση ως την «υποβάθμιση της γης, στις ξηρές, ημίξηρες και ύφυγρες περιοχές, η οποία προκύπτει ως αποτέλεσμα πολλών παραγόντων στους οποίους περιλαμβάνονται οι κλιματικές διακυμάνσεις και οι ανθρώπινες δραστηριότητες». Επίσης, σημαντική είναι η επίδραση του φαινομένου της παγκόσμιας θέρμανσης (φαινόμενο του «θερμοκηπίου») και της παγκόσμιας πληθυσμιακής αύξησης.

Τα στοιχεία που παραθέτει ο ερευνητής J. E. Miller από το Εθνικό Εργαστήριο της Sandia στην Albuquerque (Η.Π.Α.), δίνουν μια πρώτη εικόνα : «Η έλλειψη νερού επιδρά σε 88 αναπτυσσόμενες χώρες που αποτελούν αθροιστικά το μισό πληθυσμό της γης. Το 80-90% των ασθενειών που παρουσιάζονται σε αυτές τις χώρες και το 30 % των θανάτων, οφείλονται στην κακή ποιότητα του νερού». Επίσης, σύμφωνα με εκτιμήσεις του Ενεργειακού Προγράμματος των Ηνωμένων Εθνών (UNEP) το έτος 2025 τα δύο τρίτα του παγκόσμιου πληθυσμού δε θα έχουν πρόσβαση σε επαρκείς ποσότητες καθαρού νερού. Γενικά, το μεγαλύτερο πρόβλημα αντιμετωπίζουν οι χώρες τις Μέσης Ανατολής και της Κεντρικής και Βόρειας Αφρικής.

Η Μ. Ανατολή και η Β. Αφρικής συγκεντρώνουν το 6,3% παγκόσμιου πληθυσμού, αλλά κατέχουν μόνο το 1,4% του συνολικών διαθέσιμων υδάτινων πόρων. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι η Αίγυπτος εξαρτάται από τις πλημμύρες του ποταμού Νείλου και το φράγμα του Ασουάν (Aswan) στο νότο, με αποτέλεσμα οποιαδήποτε μελλοντική παρακώλυση της ροής του ποταμού από την Αιθιοπία να είναι καταστροφική. Η Ιορδανία, καθώς και το πρωτοποριακό σε τεχνολογίες άρδευσης Ισραήλ αντιμετωπίζουν προβλήματα υφαλμύρωσης κατά μήκος της ακτογραμμής τους λόγω υπερεκμετάλλευσης των υπόγειων υδάτων. Επίσης, πολιτικές προστριβές δημιουργήθηκαν το 1990 από την απόφαση της Τουρκίας να κατασκευάσει το φράγμα Ataturk στον ποταμό Ευφράτη, ο οποίος, μαζί με τον Τίγρη, είναι η μοναδική πηγή ανανεώσιμου νερού για τη Συρία και το Ιράκ. Εκτός από αυτές τις περιοχές πρόβλημα έλλειψης γλυκού νερού αντιμετωπίζουν και άλλες περιοχές του πλανήτη, όπως η Β. Κίνα, η Ινδία ή το Μεξικό.

Ένα άλλο θέμα που απασχολεί τους μηχανικούς, είναι το ποσοστό των διαλυμένων στερεών που υπάρχουν στο νερό. Παρακάτω, στον Πίνακα 1.1.2 φαίνονται κάποιες

τυπικές Συγκεντρώσεις Διαλυμένων Στερεών (TDS) σε διάφορα είδη νερού. Οι προδιαγραφές για το νερό βάσει του δείκτη TDS είναι: για το πόσιμο <1000 mg/L, για άρδευση <1200 mg/L και για τη βιομηχανία 0,01-35000 mg/L.

<i>Είδος Νερού</i>	<i>TDS [mg/ L]</i>	<i>Σχόλια</i>
Γλυκό νερό (fresh water)	< 1 000	αρκετά αραιό, κατάλληλο για πόση
Υφάλμυρο νερό (brackish water)	1 000-10 000	αλμυρά νερά, μη πόσιμα
Θαλασσινό νερό (saline water)	~ 35 000 (10 000-50 000)	-
Αλμόλουπα (brines)	> 50 000	περισσότερο αλμυρά νερά από τη θάλασσα.
Γεωθερμικό νερό (geothermal waters)	500 - 10 000	-
Βιομηχανικά απόβλητα (industrial effluents)	500 - 5 000	-
Αστικά απόβλητα (Municipal wastewaters)	500 - 5 000	-

Πίνακας 1.1.2: Τυπικές συγκεντρώσεις διαλυμένων στερεών (TDS) σε διάφορα είδη νερού. [πηγή: Ανδρίτσος, 2004]

Στον Πίνακα 1.1.3 φαίνονται ενδεικτικά κάποιες τυπικές συγκεντρώσεις αλάτων για διάφορες θάλασσες του κόσμου.

<i>Προέλευση Νερού</i>	<i>Συγκέντρωση αλάτος (κατά προσέγγιση) [g/L]</i>
<i>Βόρεια Θάλασσα (κοντά στις εκβολές των ποταμών)</i>	21
<i>Κόλπος του Μεξικού (και παράκτιες ζώνες)</i>	23 - 33
<i>Ατλαντικός Ωκεανός</i>	35
<i>Ειρηνικός Ωκεανός</i>	38
<i>Περσικός Κόλπος</i>	45
<i>Νεκρά Θάλασσα</i>	~ 300

Πίνακας 1.1.3: Τυπικές συγκεντρώσεις αλάτων για διάφορες θάλασσες του κόσμου. [πηγή: Cooley et al., 2006]

1.2 Η Ανεπάρκεια του Νερού στην Ελλάδα

Η Ελλάδα θεωρείται μία πλούσια χώρα ως προς τα υδάτινα αποθέματα που αντιστοιχούν ανά κάτοικο. Ωστόσο, η παραπάνω θέση είναι μια απλουστευτική προσέγγιση, αφού όπως δείχνουν τα πιο πρόσφατα στοιχεία υπάρχει αντίφαση μεταξύ των αποθεμάτων και της ζήτησης σε αρκετές περιοχές της ηπειρωτικής και νησιωτικής Ελλάδας.

Χωρίς αμφιβολία η πιο προβληματική περιοχή ως προς τη διάθεση γλυκού νερού είναι τα νησιά του Αιγαίου: κυρίως οι Κυκλάδες και τα μικρά νησιά των Δωδεκανήσων (Βλ. Εικόνα 1.2.1). Η γεωλογική διαμόρφωση αυτών των νησιών σε συνδυασμό με τις μειωμένες υδατοπτώσεις, δεν επιτρέπουν τη δημιουργία υπόγειων φυσικών δεξαμενών. Η κατάσταση εκεί οξύνεται ακόμα περισσότερο λόγω της γεωγραφικής απομόνωσης (ακριβή η μεταφορά του νερού) και των αυξημένων επισκεπτών κατά τη διάρκεια της τουριστικής περιόδου.

Άλλες περιοχές που αντιμετωπίζουν παρόμοιο πρόβλημα είναι η Θεσσαλία και η Ανατολική Στερεά Ελλάδα (Βλ. Εικόνα 1.2.1), λόγω των αυξημένων αναγκών σε νερό για άρδευση των γεωργικών καλλιεργειών [Steforoulou et al., 2008].



Εικόνα 1.2.1: Απεικόνιση της κατανομής των υδάτινων αποθεμάτων στην Ελλάδα. Η πιο σκούρα σκίαση υποδηλώνει έλλειμμα, ενώ η ανοιχτόχρωμη σκίαση υποδηλώνει πλεόνασμα.

Για την ηπειρωτική Ελλάδα τα πιο σοβαρά προβλήματα ως προς την ποιότητα του γλυκού νερού είναι η μόλυνση από τα φυτοφάρμακα (νιτρικά άλατα), λόγω της εντατικοποίησης των καλλιεργειών και η διείσδυση του θαλασσινού νερού στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες (Βλ. Εικόνα 1.2.2). Επιπλέον, υπάρχουν σοβαρές ενδείξεις, ότι η χρήση λιπασμάτων ευθύνεται για το φαινόμενο του *ευτροφισμού* στις λίμνες.



Εικόνα 1.2.2: Απεικόνιση των παράκτιων περιοχών όπου έχει παρατηρηθεί διείσδυση θαλασσινού νερού στους υδροφόρους ορίζοντες.

Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης, ειδικά, εντοπίζεται σε άνυδρες παράκτιες περιοχές με έντονη γεωργική και τουριστική δραστηριότητα, όπως είναι κυρίως τα νησιά του Αιγαίου και οι ανατολικές ακτές της ηπειρωτικής χώρας (αλλά και στη δυτική Ελλάδα, λόγω κάποιων υδρολογικών ιδιοτεροτήτων). Το πρόβλημα οφείλεται κυρίως στην εντατική άντληση των υπόγειων υδάτινων αποθεμάτων.

Όπως αναφέρεται στη συλλογική μελέτη των Stefanouliou κ.α. (2008) από το Γεωπονικού Πανεπιστήμιου Αθηνών για τα αυτόνομα συστήματα αφαλάτωσης, η υφαλμύρωση πρωτίστως αντιμετωπίζεται με την ορθολογική άντληση των υπόγειων αποθεμάτων νερού, καθώς και με την επανάχρηση των αστικών λυμάτων και του αφαλατωμένου ύδατος. Η *εκ νέου πλήρωση των υπόγειων φυσικών δεξαμενών* με το επεξεργασμένο νερό των αστικών λυμάτων, είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία με προοπτικές, που στην Ελλάδα βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο. Τέλος, σημειώνεται ότι η αφαλάτωση του υφάλμυρου νερού που προέρχεται από υπόγειες πηγές που έχουν υποστεί υφαλμύρωση, πρέπει να αποφεύγεται, γιατί απλά εντείνεται η εισχώρηση του θαλασσινού νερού.

1.3 Ιστορική Ανασκόπηση των Μεθόδων Συμβατικής Αφαλάτωσης

Η βασική ιδέα της διεργασίας της αφαλάτωσης, η απόσταξη, ήταν γνωστή από τους αρχαίους χρόνους. Ο Αλέξανδρος της Αφροδισίας (200 μ.Χ.) αναφέρει, ότι ήδη από τον 4^ο αιώνα π.Χ. οι ναυτικοί στα μακρινά ταξίδια χρησιμοποιούσαν την απλή απόσταξη για να καλύψουν τις καθημερινές τους ανάγκες σε νερό. Συγκεκριμένα αναφέρεται ότι έκαναν χρήση ορειχάλκινων (μπρούτζινων) δοχείων για να βράσουν το θαλασσινό νερό και δέσμευαν τους υδρατμούς που παράγονταν με σπόγγους [Kalogirou, 2005]. Ωστόσο, στη στεριά η τεχνική αυτή χρησιμοποιούνταν περισσότερο για την ανάκτηση του αλατιού, που για αιώνες θεωρούνταν πολύτιμο αγαθό. Κατά το Μεσαίωνα ειδικευμένοι τεχνίτες ή μοναχοί χρησιμοποιούσαν περίτεχνους βραστήρες για να παραλάβουν συμπύκνωμα αρώματος, αλκοόλης ή για να παράγουν πόσιμο νερό. Συχνά εκμεταλλεύονταν την ηλιακή ακτινοβολία ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας [Belessiotis, 2000].



*Εικόνα 1.3.1: Οι πρώτοι ναυτικοί παράγαγαν φρέσκο νερό με απόσταξη του θαλασσινού νερού.
[πηγή: Kalogirou S. A., 2005]*

Όταν η αύξηση του πληθυσμού άρχισε να προβάλλει απειλητικά στα σύγχρονα έθνη-κράτη, τότε έγιναν οι πρώτες προσπάθειες για παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων πόσιμου νερού σε απομακρυσμένα μέρη και ειδικά στα πλοία.. Η πρώτη καταγεγραμμένη εφαρμογή αφαλάτωσης στα χρόνια της Αναγέννησης πραγματοποιήθηκε από Ιάπωνες ναυτικούς στις αρχές του 16^{ου} αιώνα μ.Χ., οι οποίοι χρησιμοποιούσαν πήλινα δοχεία για να βράζουν το θαλασσινό νερό και σωλήνες από μπαμπού για να συλλέγουν το απόσταγμα. Η τεχνική αυτή επιβιώνει μέχρι τις μέρες μας στα παραδοσιακά ιαπωνικά εστιατόρια, όπου χρησιμοποιούνται τα Rapbiki - παρόμοια σκεύη με αυτά των παλιών θαλασσοπόρων.

Η συσκευή αφαλάτωσης που κατοχυρώθηκε για πρώτη φορά ως ευρεσιτεχνία σχεδιάστηκε στη Μ. Βρετανία το 1852. Η πρώτη μεγάλη εγκατάσταση στη στεριά κατασκευάστηκε στο νησί Curacao, στις ολλανδικές Αντίλλες (Antilles), η οποία λειτούργησε μέχρι το 1928. Έχει ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η τοπική μύρα ακόμα παρασκευάζεται με βάση το αφαλατωμένο νερό [Cooley et al., 2006]. Το 1908 οι κυρίαρχοι της Σ. Αραβίας, οι Οθωμανοί Τούρκοι, εγκατέστησαν στην πόλη Jeddah την πρώτη μονάδα αφαλάτωσης στην ευρύτερη περιοχή (Βλ. Εικόνα 1.3.1).



Εικόνα 1.3.2: Η πρώτη μονάδα αφαλάτωσης στη Σ. Αραβία (ονομάζεται Al Kindasah) βρίσκεται στην Τζέντα και αποτελεί σήμερα πολιτιστικό μνημείο.

Κατά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, οι εντατικές προσπάθειες για την κάλυψη των αναγκών των στρατευμάτων σε νερό έδωσαν μεγάλη ώθηση στη τεχνολογία αφαλάτωσης. Αυτή συνέχισε να αναπτύσσεται με γοργούς ρυθμούς σε Η.Π.Α. και Ε.Σ.Σ.Δ. στη μεταπολεμική περίοδο, όταν αναπτύχθηκε η έρευνα υψηλού επιπέδου. Έτσι, το 1952 το Κογκρέσο των Η.Π.Α. αποφασίζει τη σύσταση ειδικής υπηρεσίας Αλμυρού Ύδατος (Office of Saline Water) και ψηφίζεται ειδικός νόμος [Cooley, et al., 2006]. Τη δεκαετία του 1950 εγκαινιάστηκαν οι πρώτες εμπορικές μονάδες που λειτουργούσαν με τη θερμική μέθοδο. Στα τέλη του 1960 οι εμπορικές μονάδες της εποχής ήταν δυνατό, να παράγουν 8 000 m³/ημέρα αφαλατωμένο νερό μέσω θερμικών μεθόδων. Στα 1970 έγινε μεγάλη διείσδυση των διεργασιών με μεμβράνες (ED, RO). Ειδικά η μέθοδος της ηλεκτρο-διαπίδωσης ήταν πρωτοποριακή, γιατί μπορούσε να επεξεργάζεται υφάλμυρο νερό με μειωμένες τιμές λειτουργικού κόστους (κυρίως στις Η.Π.Α.). Αυτό την έκανε οικονομικά προσιτή στις δημοτικές επιχειρήσεις των πόλεων και οικισμών που είχαν πρόβλημα πόσιμου νερού.

1.4 Υφιστάμενες Μέθοδοι Συμβατικής Αφαλάτωσης

Σ' αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να δοθεί ένας γενικός ορισμός της έννοιας της αφαλάτωσης. Οι διεργασίες αφαλάτωσης αποτελούν την ολική ή η μερική απομάκρυνση των διαλυμένων αλάτων από υφάλμυρα ή θαλασσινά νερά, από γεωθερμικά νερά και από βιομηχανικά-αστικά απόβλητα με στόχο να καταστήσουν τα νερά αυτά κατάλληλα για χρήση από τον άνθρωπο και τα ζώα, για άρδευση, για ποικίλες βιομηχανικές ή άλλες χρήσεις.

Το αφαλατωμένο νερό αντιπροσωπεύει περίπου το 1/1000 του γλυκού νερού που χρησιμοποιείται παγκοσμίως. Υπάρχουν μονάδες αφαλάτωσης μικρές, για ένα σπίτι ή ένα μικρό ξενοδοχείο, και μεγάλες, ικανές να ικανοποιήσουν τις ανάγκες μιας πόλης ή μιας μεγάλης βιομηχανίας.

Οι συνήθεις μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα υπάγονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το είδος της διεργασίας και είναι συνοπτικά οι εξής:

- **Θερμικές Διεργασίες** (δίνουν νερό με TDS: ~10 ppm)

- α. Πολυβάθμια Εκτονωτική Απόσταξη (Multi-stage Flash Distillation, MFD ή MSF)
- β. Απόσταξη Πολλαπλού Φαινομένου (Multiple Effect Distillation, MED)
- γ. Θερμική/ Μηχανική Συμπίεση Ατμού (Mechanical/ Thermal Vapor Compression, MVC/TVC)
- δ. Τήξη – Κρυστάλλωση (Freezing desalination, FR)
- ε. Διεργασία αφαλάτωσης με ένυδρες ενώσεις CH₄ (Gas Hydrate processes, GH)

- **Διεργασίες Μεμβρανών** (δίνουν νερό με TDS: 100-500 ppm)

- α. Αντίστροφη Ώσμωση (Reverse Osmosis, RO)
- β. Ηλεκτρο-διαπίδυση (Electro-Dialysis, ED) και Αντιστρέψιμη Ηλεκτρο-διαπίδυση (Reversible Electro-Dialysis, RED)
- γ. Νανο-διήθηση (Nano-filtration, NF)

- **Άλλες διεργασίες**

- α. Απόσταξη σε μεμβράνη (Membrane Distillation, MD)
- β. Ιοντοεναλλαγή (Ion-exchange, IX)

Η μέθοδος MD συνδυάζει τις τεχνικές μεμβρανών και τη θερμική απόσταξη, είναι απλή και λειτουργεί με μικρό θερμοκρασιακό εύρος, γι' αυτό είχε χρησιμοποιηθεί πειραματικά σε μονάδες ηλιακής αφαλάτωσης. Η μέθοδος εμφανίστηκε πρώτη φορά τη δεκαετία του 1980 χωρίς κάποια εμπορική επιτυχία.

Η μέθοδος της ιοντοεναλλαγής (IX) είναι ακατάλληλη για θαλασσινό νερό. Βασίζεται στη διάσπαση των χημικών δεσμών των μορίων και χρησιμοποιείται για την παραγωγή εξαιρετικής ποιότητας νερού για βιομηχανική χρήση ή για την ανάκτηση άλατος [“Cardno”, 2005].

Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά οι βασικότερες μέθοδοι συμβατικής αφαλάτωσης με θερμικές διεργασίες και διεργασίες μεμβρανών.

1.4.1 Θερμικές Διεργασίες

Οι θερμικές διεργασίες βασίζονται στην αλλαγή φάσης του νερού, μέσω της μείωσης της πίεσης και του αντίστοιχου σημείου ζέσης (διεργασία «εν κενώ»). Αυτό γίνεται για τρεις σημαντικούς λόγους: (i) τη δυνατότητα επίτευξης πολλαπλών βρασμών, (ii) τον έλεγχο των επικαθίσεων και ως εκ τούτου (iii) την εξοικονόμηση ενέργειας.

Το νερό σε συνθήκες υποπίεσης βράζει σε μικρότερη θερμοκρασία από την αντίστοιχη για ατμοσφαιρική πίεση. Για να είναι συνεχής ο βρασμός, απαιτείται επιπλέον ενέργεια, η οποία εν προκειμένω δίνεται μέσω της περαιτέρω μείωση της πίεσης. Ο ατμός που είχε παραχθεί στο προηγούμενο στάδιο, τώρα εκτονώνεται (flashing) σε ακόμα μικρότερη πίεση και θερμοκρασία παράγοντας επιπλέον ατμό. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται σε μια σειρά δοχείων εκτόνωσης, που το καθένα λειτουργεί σε μικρότερη θερμοκρασία και πίεση από το προηγούμενο. Τα δοχεία αυτά αντιστοιχούν σε βαθμίδες (stages) ή «φαινόμενα» (effects).

Ο Bugos O.K. αναφέρει ότι το μεγαλύτερο πρόβλημα επικαθίσεων στις συσκευές θερμικών διεργασιών αφαλάτωσης προκαλείται από τα ανθρακικά και θειικά άλατα του θαλασσινού νερού, όπως το CaSO_4 το οποίο στερεοποιείται περίπου στους 115°C . Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται είτε με τον έλεγχο της συγκέντρωσης TDS του θαλασσινού νερού και της μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας είτε με την προσθήκη ειδικών χημικών ουσιών.

Παρακάτω παρουσιάζονται σύντομα οι αρχές λειτουργίας και κάποια άλλα στοιχεία για τα κυριότερα συστήματα αφαλάτωσης μέσω θερμικών διεργασιών.

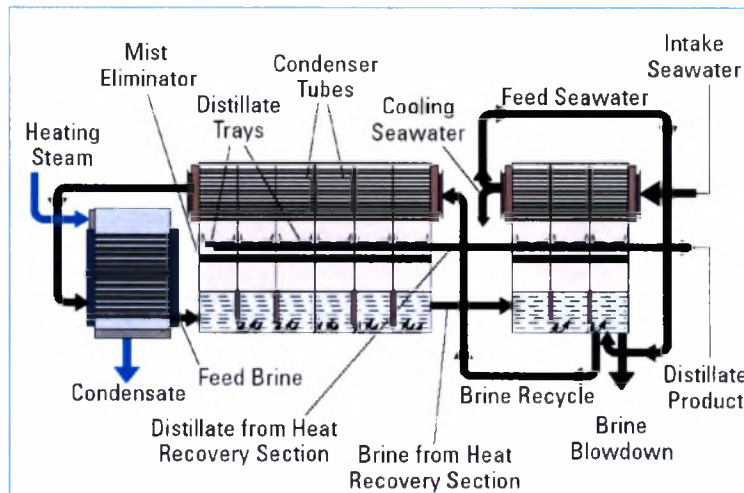
□ Πολυβάθμια Εκτονωτική Εξάτμιση (MFD ή MSF)

Είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος θερμικής αφαλάτωσης ήδη από τη δεκαετία του 1950. Το κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι η εξάτμιση γίνεται στη μάζα του νερού σε συνθήκες υποπίεσης. Το νερό έχει προηγουμένως θερμανθεί σε κατάλληλη θερμοκρασία σε ξεχωριστό δοχείο (brine heater). Γίνεται επίσης ανάκτηση θερμότητας σε διάφορες βαθμίδες - στάδια (4 έως 40).

Οι μονάδες που κατασκευάζονται είναι δυναμικότητας $4\ 000 - 57\ 000\ \text{m}^3/\text{ημέρα}$ και δίνουν συνήθως νερό με TDS περίπου 50 ppm. Ο Semiat (2000) αναφέρει ότι ο λόγος απόδοσής τους (τόνοι παραγόμενου νερού προς έναν τόνο ατμού τροφοδοσίας) είναι το πολύ 10. Το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του συστήματος είναι: $90-110^\circ\text{C}$.

Η λειτουργία στη μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας αυξάνει την απόδοση, αλλά και τον κίνδυνο δημιουργίας επικαθίσεων και διάβρωσης των μεταλλικών επιφανειών.

Οι χώρες του περσικού κόλπου, όπως η Σ. Αραβία, τα Η.Α.Ε., το Κουβέιτ, το Ομάν, έχουν επενδύσει αρκετά στη μέθοδο αυτή, γιατί είναι ζωτικής σημασίας για αυτές. Παρακάτω φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα για την MSF.



Σχήμα 1.4.1: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου MSF. [Πηγή: Ettouney et al., 2002]

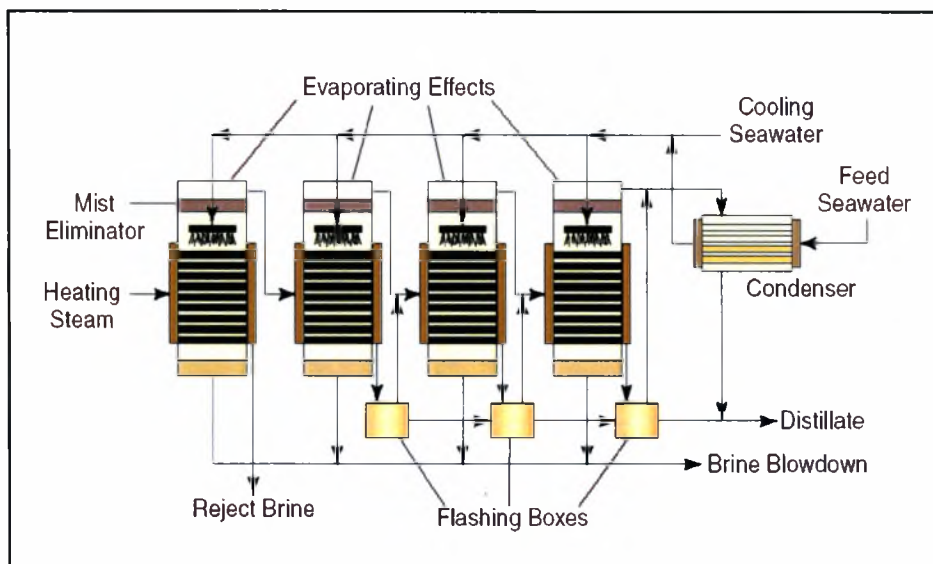
□ Απόσταξη Πολλαπλού Φαινομένου (MED)

Υπάρχουν πολλές τεχνικές για την εφαρμογή αυτής της ανερχόμενης μεθόδου. Στη κλασική μέθοδο η εξάτμιση γίνεται μέσω οριζόντιων αυλών, όπου το νερό τροφοδοτείται με καταιονισμό (ψεκασμός εκνεφώματος) σε συνθήκες υποπίεσης. Η ανάκτηση θερμότητας γίνεται σε διάφορα «φαινόμενα» (effects), όπως έχει επικρατήσει να λέγονται (βλ. Σχήμα 1.4.2). Στα νέα καινοτόμα συστήματα η εξάτμιση πραγματοποιείται μέσω λεπτής πίπτουσας στιβάδας νερού εντός κατακόρυφων αυλών ή πλακών. Σε κάποια από αυτά η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας είναι $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, γεγονός που μειώνει σημαντικά τον κίνδυνο σχηματισμού αλάτων (βλ. Σχήμα 1.4.3).

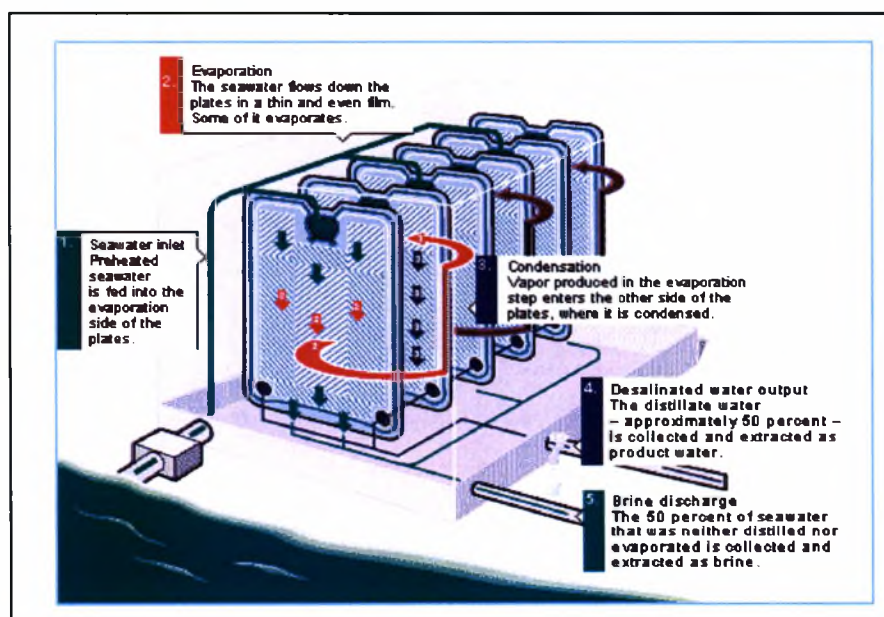
Σε αντίθεση με τη μέθοδο MSF, όπου το νερό παράγεται από τη μετατροπή της αισθητής θερμότητας σε λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, η παρούσα μέθοδος λειτουργεί με τη χρήση λανθάνουσας θερμότητας η οποία παράγει επιπλέον λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης σε κάθε «φαινόμενο» [Semiat, 2000]. Υπενθυμίζουμε ότι η λανθάνουσα θερμότητα ενυπάρχει στον υδρατμό.

Η θερμική απόδοση αυτών των συστημάτων εξαρτάται από το πλήθος των «φαινομένων», το οποίο σε μια τυπική διάταξη είναι από 8 έως 16. Η συνήθης δυναμικότητά τους είναι 2 000 με 20 000 $\text{m}^3/\text{ημέρα}$. Ο λόγος απόδοσής τους, σε αντίθεση με τον αντίστοιχο των MSF, μπορεί να υπερβεί το 15. Οι περισσότερες

εφαρμογές αυτής της μεθόδου συναντώνται σήμερα στην Ινδία, στην Καραϊβική, στα Κανάρια Νησιά (Ισπανία) και στα Η.Α.Ε. .



Σχήμα 1.4.2: Μονάδα MED με οριζόντιους αυλούς. [Πηγή: Ettouney et al., 2002]

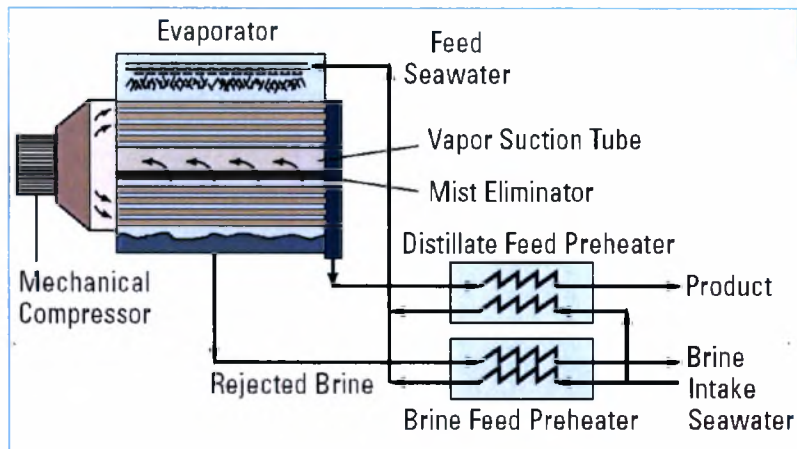


Σχήμα 1.4.3: Μονάδα MED τύπου «πίπτουσας στιβάδας» σε πλάκες. [Πηγή: Alfa Laval, 2004]

□ Συμπύεση Ατμού (VC)

Η μηχανική συμπύεση συνήθως χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με κάποια άλλη μέθοδο (συνήθως με τη MED), αλλά για μικρής ή μέσης κλίμακας μονάδες μπορεί να εφαρμοστεί από μόνη της. Η μέθοδος επαναχρησιμοποιεί τη θερμότητα της συμπύκνωσης, αλλά σε αντίθεση με την MSF και τη MED, η πίεση του ατμού

αυξάνει με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμότητας συμπύκνωσης. Η μέθοδος χρησιμοποιεί για αυτό είτε *μηχανική ενέργεια* (steam compressor, MVC) είτε *θερμική ενέργεια* (steam ejector, TVC) για να συμπιέσει τον παραγόμενο ατμό σε μεγαλύτερη θερμοκρασία. Στη μηχανική συμπίεση ατμού (MVC) χρησιμοποιείται είτε ηλεκτροκινητήρας είτε κινητήρας diesel. Η δυναμικότητα αυτών των συστημάτων είναι από λίγα λίτρα έως 3000 m³/ημέρα με ενεργειακή κατανάλωση από 7 έως 12 kWh/m³ και θεωρούνται τα πλέον αποδοτικά.



Σχήμα 1.4.4: Σχηματικό διάγραμμα μιας μονάδας συμπίεσης ατμού, VC.

1.4.2 Διεργασίες Μεμβρανών

Η βασική αρχή των διεργασιών αυτών είναι η χρήση μιας ημιπερατής μεμβράνης που μπορεί να διαχωρίζει επιλεκτικά το αλάτι από το νερό. Στη μεν ηλεκτρο-διαπίδυση η μεμβράνη επιτρέπει το επιλεκτικό πέρασμα μόνο των αλάτων, στη δε αντίστροφη ώσμωση επιτρέπεται το πέρασμα μόνο του γλυκού νερού.

□ Ηλεκτρο-διαπίδυση (ED) και Αντιστρέψιμη Ηλεκτρο-διαπίδυση (RED)

Αναφέρουμε πρώτη τη μέθοδο ED, γιατί ιστορικά είναι η πρώτη διεργασία μεμβρανών που εφαρμόστηκε (στις αρχές του 1960) για αφαλάτωση υφάλμυρου νερού και παραγωγή πόσιμου νερού. Η φυσικο-χημική αρχή που διέπει τη μέθοδο σχετίζεται με τα διαλυμένα άλατα που υπάρχουν στο νερό: είτε αρνητικά είτε θετικά φορτισμένα. Είναι τα ανιόντα και κατιόντα αντίστοιχα. Τα ιόντα αυτά μπορούν να έλκονται από αντίθετα φορτισμένα ηλεκτρόδια, τα οποία είναι συνδεδεμένα με ηλεκτρική πηγή συνεχούς ρεύματος (AC power source).

Ο ρόλος των μεμβρανών είναι να επιτρέπουν το επιλεκτικό πέρασμα είτε των ανιόντων (π.χ.: Cl⁻, CO₃⁻) είτε των κατιόντων (π.χ.: Na⁺, Ca⁺⁺). Οι μεμβράνες τοποθετούνται εναλλάξ (μία επιλεκτική για ανιόντα και μία για κατιόντα) και σε σειρά, δημιουργώντας μεταξύ τους περάσματα και κελιά (cells). Μερικές εκατοντάδες κελιά δημιουργούν μια ομάδα κελιών (stack). Το υφάλμυρο νερό

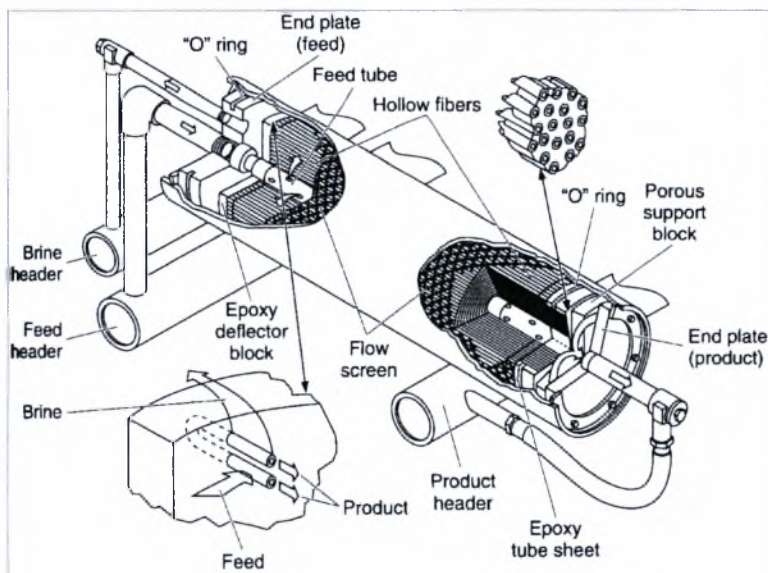
τροφοδοσίας περνάει ταυτόχρονα από όλα τα κελιά και διαχωρίζεται σε γλυκό νερό και αλμόλοιπα.

Η Αντιστρέψιμη Ηλεκτρο-διαπίδυση λειτουργεί ακριβώς με τον ίδιο τρόπο, με τη μόνη διαφορά ότι μπορεί να αντιστρέφεται η πολικότητα των ηλεκτροδίων και άρα το κανάλι (ή το κελί) που πριν διατρέχονταν από νερό τροφοδοσίας, τώρα θα διατρέχεται από το προϊόν της αφαλάτωσης. Έτσι επιτυγχάνεται εύκολα ο καθαρισμός της διάταξης από τα αλμόλοιπα και τις επικαθίσεις [Buros O.K.].

□ Αντίστροφη Ώσμωση (RO)

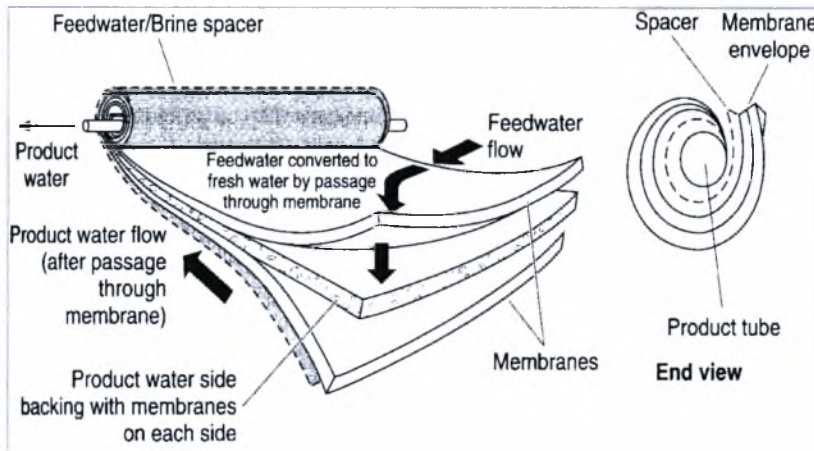
Ώσμωση είναι η φυσική (ή και βιολογική) διεργασία κατά την οποία διαλύματα διαφορετικής πυκνότητας διαχωρίζονται από μια ημιπερατή μεμβράνη και το καθαρό νερό διεισδύει μέσω της μεμβράνης από το αραιό προς το πυκνό διάλυμα. Εάν στην πλευρά του πυκνότερου διαλύματος εφαρμοστεί μια πίεση (μεγαλύτερη από την οσμωτική) τότε το νερό διαπερνά την μεμβράνη και μεταφέρεται από το πυκνότερο προς το αραιότερο διάλυμα. Έτσι, ενώ στην ED, όπου ωθούσα δύναμη είναι η διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού (voltage), στην *αντίστροφη ώσμωση* ωθούσα δύναμη είναι η πίεση εκείνη η οποία υπερβαίνει την αντίστοιχη οσμωτική του διαλύματος και εξαναγκάζει τη διέλευση καθαρού νερού διαμέσου της ημιπερατής μεμβράνης. Κατά το πέρασμα αυτό αφήνει στην άλλη πλευρά της μεμβράνης τα ιόντα όλων των αλάτων που είναι διαλυτά στο νερό.

Μία εγκατάσταση RO αποτελείται από τα εξής στάδια-διατάξεις: (i) την προεργασία, (ii) την αντλία υψηλής πίεσης, (iii) τη διάταξη μεμβρανών και (iv) τη μετεπεξεργασία. Η προ-επεξεργασία είναι μια βασική διεργασία στη RO, καθώς με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται ο σχηματισμός επικαθίσεων (fouling) από κolloειδή σωματίδια, διαλυμένα άλατα (CaCO_3 , CaSO_4 , BaSO_4 , SiO_2 κ.ά.) και μικροοργανισμούς. Η αντλία υψηλής πίεσης παρέχει την απαραίτητη πίεση στο νερό, για να διαπεράσει τη διάταξη των μεμβρανών. Το εύρος των πιέσεων είναι 15-25 bar για υφάλμυρο νερό και 54-80 bar για θαλασσινό νερό.



Σχήμα 1.4.5: Σχηματική αναπαράσταση μεμβρανών τύπου hollow fiber.

Υπάρχουν διάφορες διατάξεις μεμβρανών με κυριότερες αυτές του τύπου *ινών-αυλών* (hollow fiber), *σπείρας* (spiral wound) και *πλακών*. Η δε σύνθεση των μεμβρανών είναι από πολυαμίδια, πολυσουλφόνες κ.ά.. Στα Σχήματα 1.4.5 και 1.4.6 αναπαριστώνται οι προαναφερθέντες τύποι μεμβρανών.



Σχήμα 1.4.6: Σχηματική αναπαράσταση μεμβρανών τύπου *spiral wound*.

Η διεργασία της μετεπεξεργασίας πραγματοποιείται σε τελικό στάδιο, για να σταθεροποιηθεί το νερό και να προετοιμαστεί για διάθεση. Συνήθως σταθεροποιείται το pH και απομακρύνονται αέρια, όπως το υδρόθειο.

Σήμερα η μεγαλύτερη εγκατάσταση RO στον κόσμο – δυναμικότητας 270 000 m³/ημέρα - βρίσκεται στη Yuma των Η.Π.Α., η οποία χρησιμοποιείται για να μειώσει την αλατότητα του ποταμού Colorado.

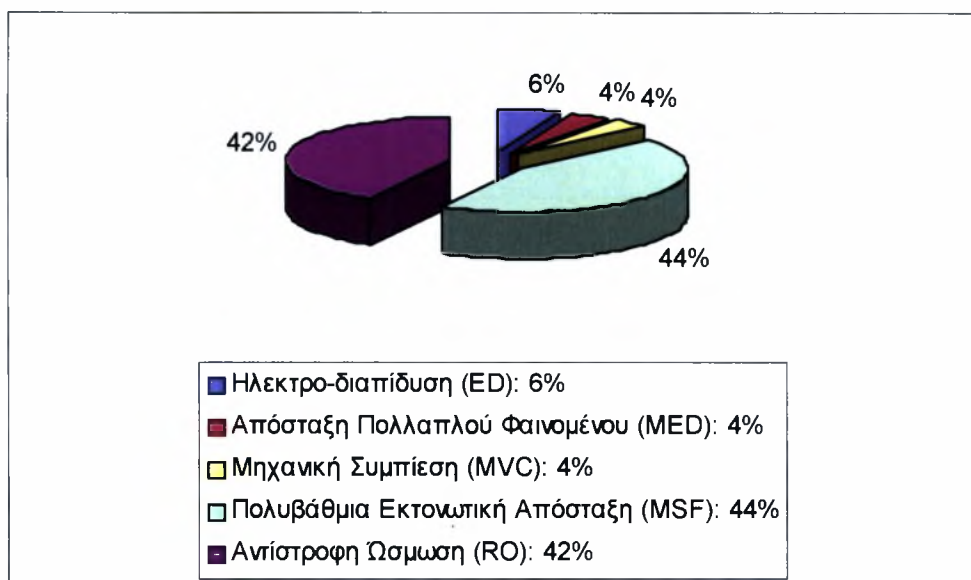
□ Νανο-διήθηση (NF)

Η νανο-διήθηση στην ουσία χρησιμοποιείται για την επεξεργασία βιομηχανικού νερού υψηλής σκληρότητας και συγκαταλέγεται στις μεθόδους αφαλάτωσης υπό όρους (ανάλογα με τον τρόπο ορισμού της διεργασίας της αφαλάτωσης). Χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση δισθενών ιόντων, όπως του ασβεστίου (Ca⁺⁺) και του μαγνησίου (Mg⁺⁺).

1.4.3 Άλλες Παράμετροι για τη Συμβατική Αφαλάτωση

Σήμερα στον κόσμο, σε περισσότερες από 120 χώρες, υπάρχουν περίπου 13 000 μονάδες αφαλάτωσης, με μέση παγκόσμια παραγωγή 25 000 000 m³/ημέρα. Σχεδόν η μισή από την παραπάνω ποσότητα παράγεται από αφαλάτωση θαλασσινού νερού στη Μ. Ανατολή και Β. Αφρική, με πρωτοπόρα τη Σ. Αραβία (25% της παγκόσμιας παραγωγής) που χρησιμοποιεί όμως τις ενεργοβόρες και ρυπογόνες θερμικές μεθόδους. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι (Βλ Σχήμα 1.4.1) είναι η Πολυβάθμια

Εκτονωτική Εξάτμιση (ή Απόσταξη) (MSF) και η Αντίστροφη Ώσμωση (RO) με συνολικό μερίδιο περίπου 86% επί της παγκόσμιας αγοράς [Buros O.K.].



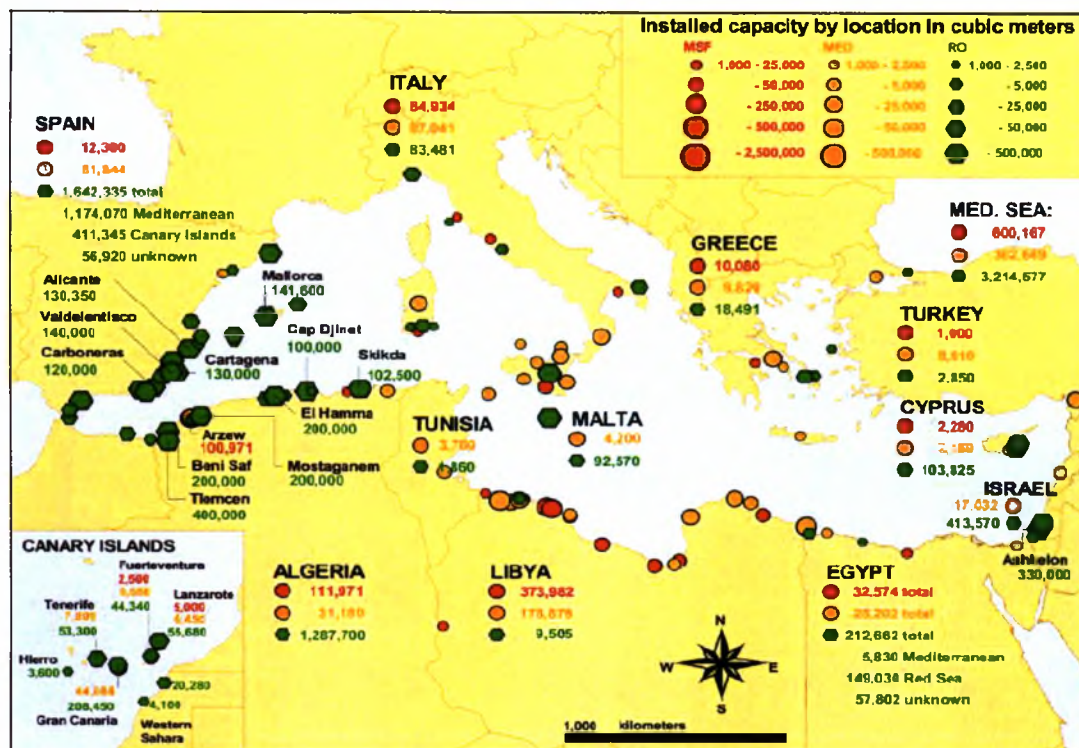
Σχήμα 1.4.7: Μερίδιο συμμετοχής της κάθε μεθόδου αφαλάτωσης στην παγκόσμια αγορά. [πηγή: Buros O.K.]

Στον Πίνακα 1.4.1 γίνεται μία συγκεντρωτική παρουσίαση των μειονεκτημάτων και πλεονεκτημάτων σε τεχνικό (και οικονομο-τεχνικό) επίπεδο των Θερμικών Μεθόδων και των Διεργασιών με Μεμβράνες αντίστοιχα. Στην Εικόνα 1.4.1 φαίνεται η εγκαταστημένη δυναμικότητα των εργοστασίων συμβατικής αφαλάτωσης στη «λεκάνη» της Μεσογείου.

Συμπερασματικά μπορεί να ειπωθεί ότι δεν υπάρχει «βέλτιστη» τεχνολογία αφαλάτωσης. Μία ενδεικτική κατηγοριοποίηση ως προς τις δυνατότητες εμπορικών εφαρμογών των διαφόρων μεθόδων αφαλάτωσης είναι αυτή του Πίνακα 1.4.2. Απ' την άλλη για να είναι αποδοτική μία μονάδα αφαλάτωσης γενικά, θα πρέπει να λειτουργεί 24 ώρες την ημέρα, 365 ημέρες το χρόνο. Ειδικά για τις θερμικές διεργασίες είναι προτιμότερο, τόσο από οικονομο-τεχνική άποψη όσο και περιβαλλοντικά, να λειτουργούν σε συνδυασμό με μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή/ και θερμότητας (π.χ.: σύνδεση με μονάδες *συμπαγωγής ηλεκτρισμού-ατμού* υψηλής απόδοσης). Γενικά η ανάγκη για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη είναι κοινός τόπος [Ανδρίτσος, 2004].

	Θερμικές Διεργασίες	Διεργασίες Μεμβρανών
Πλεονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> - Οι θερμικές μονάδες παράγουν υψηλής ποιότητας αφαλατωμένο νερό (~10 ppm) - Δε χρειάζονται τόσο συχνό καθαρισμό όσο οι μονάδες μεμβρανών - Δε χρειάζονται τόσο αυστηρή παρακολούθηση όσο οι μονάδες μεμβρανών - Απαιτούν περιορισμένο προσωπικό 	<ul style="list-style-type: none"> - Οι μονάδες που χρησιμοποιούν διεργασίες μεμβρανών έχουν μικρές ενεργειακές απαιτήσεις - Το πάγιο κεφάλαιο που απαιτείται είναι μικρότερο από το αντίστοιχο στις θερμικές μονάδες - Ο λόγος ανάκτησης είναι μεγαλύτερος σε σχέση με αυτόν στις θερμικές μονάδες - Μειωμένος χώρος για δεδομένη ποσότητα παραγωγής αφαλατωμένου ύδατος - Η λειτουργία πραγματοποιείται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, πράγμα που μειώνει τα φαινόμενα επικαθίσεων και διάβρωσης
Μειονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> - Επιρρεπείς στη διάβρωση (αποφυγή μέσω κατάλληλων υλικών) - Μεγάλος χώρος για δεδομένη ποσότητα παραγωγής αφαλατωμένου ύδατος - Υψηλό πάγιο κόστος (κεφάλαιο) - Μεγάλες ποσότητες ενέργειας σε σχέση με τις μονάδες μεμβρανών - Η θερμοκρασία του παραγόμενου νερού είναι υψηλή και άρα πρέπει να ψυχθεί για να χρησιμοποιηθεί ως πόσιμο 	<ul style="list-style-type: none"> - Δεν εξουδετερώνουν παθογόνους μικροοργανισμούς, όπως οι θερμικές μονάδες (γι' αυτό γίνεται επεξεργασία πριν ή μετά τη διεργασία αφαλάτωσης) - Οι μεμβράνες πολυαμίδης καταστρέφονται από το χλώριο του νερού - Συχνός καθαρισμός των μονάδων - Αυστηρή παρακολούθηση της διαδικασίας

Πίνακας 1.4.1: Συγκριτική ανάλυση πλεονεκτημάτων-μειονεκτημάτων των Θερμικών Διεργασιών και Διεργασιών Μεμβρανών αντίστοιχα
[πηγή: "Cardno" - Livingstone Shire Council, 2005]



Εικόνα 1.4.1: Εγκαταστάσεις συμβατικής αφαλάτωσης στις μεσογειακές χώρες.

	ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ			ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ	
	MSF	MED	VC	RO	RED
Συνολικά Διαλυμένα Στερεά, TDS [mg/L]					
500 -- 1 000	όχι	όχι	όχι	NAI	NAI
1 000 -- 3 000	όχι	όχι	όχι	NAI	NAI
3 000 -- 8 000	όχι	όχι	όχι	NAI	NAI
8 000 -- 50 000	NAI	NAI	NAI	NAI	όχι
Δυναμικότητα Εγκατάστασης [ML/ημέρα]					
0,1 -- 2	όχι	όχι	NAI	NAI	NAI
2 -- 4	όχι	όχι	NAI	NAI	NAI
4 -- 40	όχι	όχι	δυσνητικά εφαρμόσιμο	NAI	NAI
40 και άνω	NAI	NAI	όχι	NAI	NAI
Συνδυασμός με μονάδες Παραγωγής Ηλεκτρισμού	NAI	NAI	NAI	δυσνητικά εφαρμόσιμο	δυσνητικά εφαρμόσιμο

Πίνακας 1.4.2: Δυνατότητες εμπορικών εφαρμογών των πιο διαδεδομένων μεθόδων αφαλάτωσης. [πηγή: “Cardno” - Livingstone Shire Council, 2005]

□ Ανάλυση κόστους των μεθόδων συμβατικής αφαλάτωσης

Για το κόστος αφαλάτωσης πρέπει να σημειωθεί, ότι εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους. Μερικές από αυτές είναι:

- η σκληρότητα και γενικότερα η ποιότητα του νερού (το κόστος αφαλάτωσης θαλασσινού νερού είναι 3-5 φορές μεγαλύτερο από το κόστος αφαλάτωσης του υφάλμυρου νερού)
- η δυναμικότητα της μονάδας (το κόστος του νερού είναι αντιστρόφως ανάλογο της δυναμικότητας)
- η διαθεσιμότητα εξειδικευμένου προσωπικού
- το ενεργειακό κόστος, το οποίο αντιπροσωπεύει περίπου το 30-50% του τελικού κόστους (η διαθεσιμότητα φθηνής πηγής ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή ατμού/ θερμού νερού – από Α.Π.Ε., πυρηνικούς σταθμούς, μονάδες συμπαραγωγής ατμού/ ηλεκτρισμού κτλ – έχει σοβαρό οικονομικό αντίκτυπο στη μονάδα)
- το χρόνος ζωής της μονάδας .

Το ολικό κόστος του προϊόντος της αφαλάτωσης περιλαμβάνει εκτός από το κόστος επένδυσης (ή πάγιο κόστος), το λειτουργικό (ή μεταβλητό) κόστος, καθώς και το κόστος συντήρησης (Βλ. Πίνακες 1.4.3, 1.4.4). Γενικά, πάντως, το κόστος μειώνεται σταθερά, με τις πιο πρόσφατες τιμές να διαμορφώνονται ως εξής: 0,6 – 1,0 Euro/m³ για θαλασσινό νερό και 0,2 – 0,4 Euro/m³ για υφάλμυρο. Τέλος, σύμφωνα με τον Wade (2001) οι τιμές για θαλασσινό νερό διαμορφώνονται όπως φαίνονται στον Πίνακα 1.4.5. Η διερεύνηση που πραγματοποίησε μεταξύ των θερμικών μεθόδων και της RO διεργασίας, αναφέρονταν σε τέσσερις εγκαταστάσεις αφαλάτωσης, που λειτουργούν στην περιοχή της Μεσογείου, με δυναμικότητα 31,82 m³ γλυκού νερού/ ημέρα και κόστος καυσίμου 1,7 Euro/GJ.

Process	Investment Euro/m ³ day	Energy Euro/m ³	Consumable Euro/m ³	Labour Euro/m ³	Maintenance Euro/m ³	Total O & M cost Euro/m ³
MSF	1000-2000	0.6-1.8	0.03-0.09	0.03-0.2	0.02-0.06	0.68-2.15
MED	900-1800	0.38-1.12	0.02-0.15	0.03-0.2	0.02-0.06	0.45-1.53
VC	900-2500	0.56-2.4	0.02-0.15	0.03-0.2	0.02-0.08	0.63-2.83
SWRO	800-1600	0.32-1.28	0.09-0.25	0.03-0.2	0.02-0.05	0.46-1.78
BWRO	200-500	0.04-0.4	0.05-0.13	0.03-0.2	0.004-0.02	0.12-0.75
ED	266-328	0.06-0.4	0.05-0.13	0.03-0.2	0.006-0.009	0.15-0.74

Πίνακας 1.4.3: Σύγκριση κόστους των μεθόδων συμβατικής αφαλάτωση (α').

	MSF	MED-TVC	MVC	RO ^a
Installation costs(€/m ³ /day)	1080-1690	780-1080	1020-1500	660 - 1200
Heat consumption ^b (MJ/m ³)	194-291	145-194	0	0
Power consumption (kWh/m ³)	3.5-4.0	1.5-2.0	9-1	3-4.5
Operation & Maintenance (€/m ³)	0.05-0.07	0.04-0.07	0.05-0.08	0.05-0.10
Spare parts & chemicals (€/m ³)	0.02-0.04	0.02-0.03	0.02-0.04	0.02-0.05
Membranes replacement (€/m ³)	0	0	0	0.01-0.04

^a Plant capacity between 10.000-100.000 m³/day
^b GOR(MSF)=8-12. GOR(MED-TVC)=12-16

Πίνακας 1.4.4: Σύγκριση κόστους των μεθόδων συμβατικής αφαλάτωσης (β').
 [Πηγή: Blanco et al.]

MSF	1.18 €/m ³
MED	1.08 €/m ³
RO	0.93 €/m ³
RO + brine booster	0.85 €/m ³

Πίνακας 1.4.5: Σύγκριση κόστους αφαλάτωσης
 θαλασσινού νερού για συμβατικές μονάδες
 στη Μεσόγειο. [Πηγή: Blanco et al.]

1.5 Εισαγωγή στην Αφαλάτωση μέσω Α.Π.Ε.

Το πρόβλημα της επάρκειας και ποιότητας γλυκού νερού είναι αρκετά έντονο σε πολλές περιοχές του κόσμου, αλλά και της Ελλάδας, όπως σχολιάστηκε και τεκμηριώθηκε στις προηγούμενες παραγράφους. Το πρόβλημα γίνεται εντονότερο κατά τη θερινή περίοδο, ενώ συχνά πρόβλημα επάρκειας και ποιότητας νερού αντιμετωπίζουν οι βιομηχανικές μονάδες. Η τεχνική της αφαλάτωσης αποτελεί τη μόνη ίσως «λύση» στο πρόβλημα αυτό, μαζί με την ορθολογική χρήση και την επανάχρηση του νερού.

Ειδικά η αφαλάτωση με χρήση *Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ)* είναι μια ελκυστική ιδέα για τις άνυδρες και απομονωμένες περιοχές, όταν υπάρχουν οι κατάλληλες προϋποθέσεις για την εκμετάλλευση μορφών ενέργειας, όπως η ηλιακή ή η αιολική. Έχει παρατηρηθεί ότι σε άνυδρες περιοχές πράγματι υπάρχει πληθώρα ΑΠΕ - στη μία ή στην άλλη μορφή - και ως εκ τούτου ο συνδυασμός των τελευταίων με την αφαλάτωση φαίνεται να είναι μια σχετικά οικονομική λύση, χωρίς ταυτόχρονα να διαταράσσεται το τοπικό οικοσύστημα.

Μία μονάδα αφαλάτωσης μέσω Α.Π.Ε. μπορεί να είναι διασυνδεδεμένη με το τοπικό δίκτυο ηλεκτρισμού ή να είναι αυτόνομη. Λόγω της διαλείπουσας ή περιοδικής παροχής της ανανεώσιμης πηγής ενέργειας (π.χ.: στοχαστική συμπεριφορά του ανέμου, περιοδικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας κ.α.) οι αυτόνομες μονάδες είναι συνήθως εφοδιασμένες με ένα βοηθητικό αποθηκευτικό σύστημα ενέργειας. Σε άλλες περιπτώσεις βέβαια γίνεται αποθήκευση του ίδιου του αφαλατωμένου νερού, γιατί είναι πιο πρακτικό και οικονομικό.

Οι παραπάνω όμως λύσεις, συνήθως, δεν είναι δυνατό να εφαρμοστούν στις μονάδες αφαλάτωσης με Α.Π.Ε. για διάφορους λόγους. Σύμφωνα με τον Loupasis (2002) ένας πολύ σημαντικός λόγος είναι ότι τα συστήματα αφαλάτωσης είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν χωρίς διακοπές, με αποτέλεσμα η μη συνεχόμενη λειτουργία να προκαλεί αστοχίες στο σύστημα. Κατά συνέπεια, η εφαρμογή *υβριδικών* ή *ολοκληρωμένων* συστημάτων για την αντιμετώπιση του πιο πάνω προβλήματος είναι μια συνήθης πρακτική. Τα *υβριδικά συστήματα* υποβοηθούνται από συμβατικές πηγές ενέργειας (π.χ.: κινητήρας diesel) και περιλαμβάνουν αποθηκευτικά μέσα, όπως ηλεκτροχημικούς συσσωρευτές (batteries), σφονδύλους (flywheels), δεξαμενές νερού ή άλλου ρευστού κ.α.. Στα *ολοκληρωμένα συστήματα* εφαρμόζονται αυτοματισμοί και ρυθμίσεις που ελέγχουν την παρεχόμενη ενέργεια από την ανανεώσιμη πηγή (π.χ.: έλεγχος της γωνίας κλίσης των πτερυγίων μιας ανεμογεννήτριας, μετακίνηση των ηλιακών συλλεκτών σύμφωνα με τη φαινόμενη τροχιά του ήλιο κ.α.).

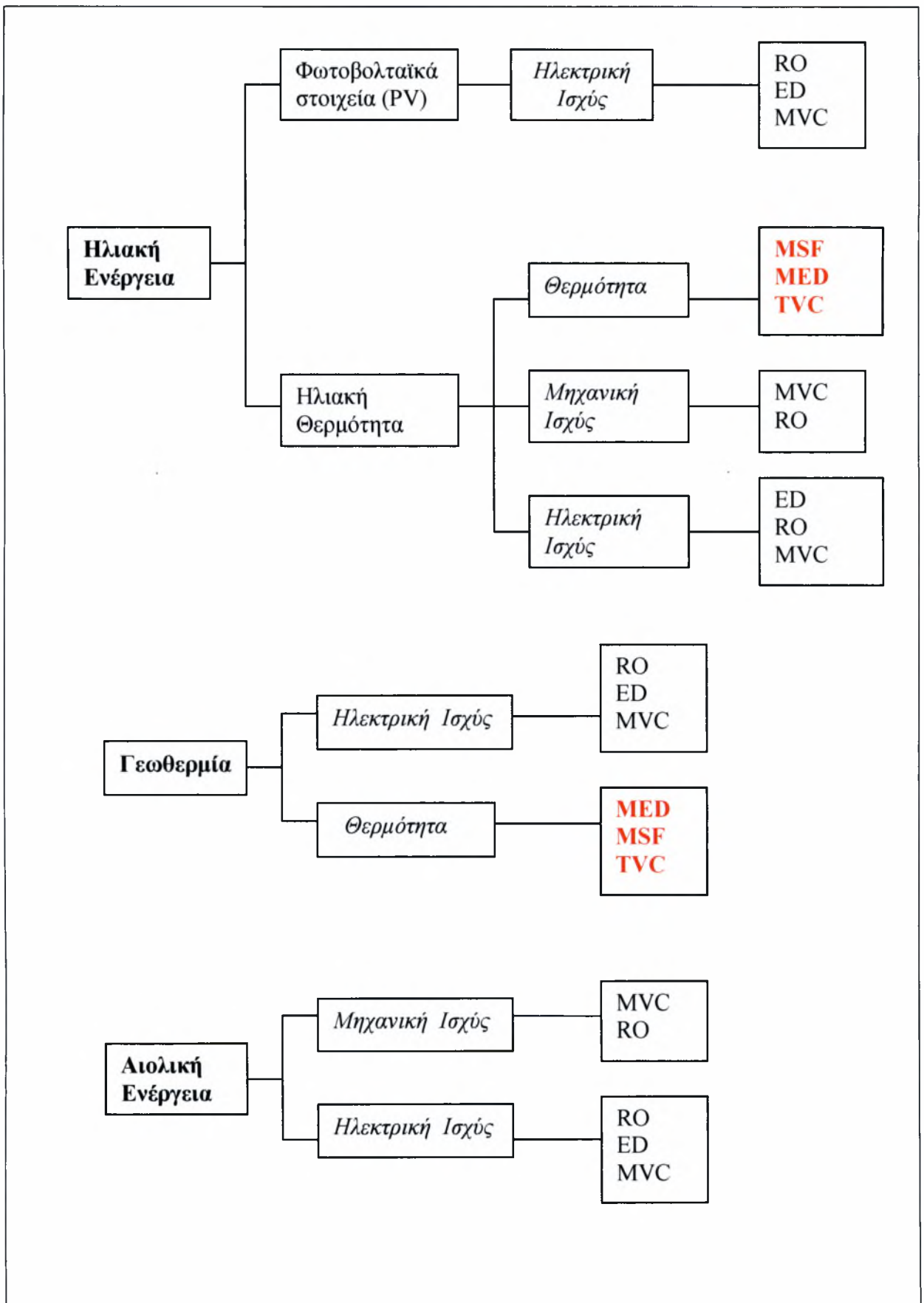
Άρα, η σωστή εκμετάλλευση της παρεχόμενης ενέργειας και η εξισορρόπηση της παροχής της - χωρίς να υπάρχει ούτε έλλειμμα ούτε πλεόνασμα - με το ελάχιστο οικονομικό αντίκτυπο, είναι μία τεχνική πρόκληση και πεδίο έρευνας για τους μηχανικούς.

Στα Κεφάλαια 2. και 3. θα παρουσιαστούν οι δυνατότητες συνδυασμού της ηλιακής και γεωθερμικής ενέργειας με συστήματα θερμικών διεργασιών αφαλάτωσης. Όμως για λόγους πληρότητας θα αναφερθούν παρακάτω όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί μεταξύ

Α.Π.Ε. και τεχνολογιών αφαλάτωσης, καθώς και οι δυνατότητες μετατροπής της ενέργειας (Βλ. επόμενη σελ., Σχήμα 1.5.1). Συνοπτικά μπορεί να ειπωθεί ότι, σε πρώτο επίπεδο η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμική ενέργεια και η βιομάζα μπορούν να προσφέρουν θερμότητα και ηλεκτρισμό, ενώ η αιολική ενέργεια μπορεί να προσφέρει ηλεκτρική και μηχανική ενέργεια.

Ακόμα θα πρέπει να έχουμε υπόψη μας ότι οι τεχνολογίες Α.Π.Ε. και αφαλάτωσης είναι *τεχνολογίες έντασης κεφαλαίου* και ως εκ τούτου υπάρχουν κάποια κριτήρια (ή περιορισμοί) για την επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού. Σύμφωνα με τον Ανδρίτσο (2004) είναι τα εξής:

- είδος διαθέσιμης Α.Π.Ε. (συνεχής ή διαλείπουσα παραγωγή ενέργειας)
- ποσότητα και ποιότητα του νερού τροφοδοσίας
- επιθυμητή ποιότητα του αφαλατωμένου νερού
- μέγεθος της μονάδας
- συνθήκες λειτουργίας της μονάδας
- διαθεσιμότητα έμπειρου προσωπικού για λειτουργία/ συντήρηση
- θεώρηση υβριδικών συστημάτων.



Σχήμα 1.5.1: Συνδυασμοί μεταξύ Α.Π.Ε. και τεχνολογιών αφαλάτωσης. Με χρώμα σημειώνονται οι θερμικές μέθοδοι που θα εξεταστούν. [πηγή: Loupasis, 2002]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.

ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕΣΩ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 Εισαγωγή

Ηλιακή ενέργεια καλείται η ενέργεια που μεταφέρεται στη γη από τον ήλιο. Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια της γης, έχει υπολογιστεί ότι είναι μειωμένη κατά 60% περίπου, αλλά δεν παύει να είναι μια τεράστια ποσότητα ενέργειας. Η επιφάνεια της γης δέχεται άμεση και έμμεση ακτινοβολία (από σύννεφα, σκόνη κτλ), η οποία για την Ευρώπη αντιπροσωπεύει το 40% περίπου της συνολικής ακτινοβολίας. Τα κυριότερα προβλήματα για την αξιοποίηση γενικά της ηλιακής ενέργειας αφορούν στη *χρονική διακύμανση* της ακτινοβολίας (κατά τη διάρκεια της ημέρας και του έτους), κάτι που κάνει απαραίτητη προϋπόθεση την ύπαρξη αξιόπιστων και αποδοτικών μεθόδων αποθήκευσης της ενέργειας αυτής, και στη *μικρή ενεργειακή της πυκνότητα* που κάνει αναγκαία τη δέσμευση μεγάλων επιφανειών.

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στο διάστημα καλείται *Ηλιακή Σταθερά* και ισούται με $1370 \pm 6 \text{ W/m}^2$. Η ακτινοβολία αυτή απαρτίζεται από: 8% υπέρυθρη ακτινοβολία (χαμηλή ενέργεια), 47% στο ορατό φάσμα και 45% στο υπεριώδες (υψηλή ενέργεια). Η κατανομή των ακτινοβολιών διαφορετικού μήκους κύματος που εκπέμπει ο ήλιος καθορίζεται από τη θερμοκρασία του. Το μήκος κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας κυμαίνεται από $2 \times 10^{-7} \text{ m}$ μέχρι $4 \times 10^{-6} \text{ m}$. Όσο μικρότερο το μήκος κύματος τόσο μεγαλύτερη η συχνότητα και η ενέργεια (σε eV).

Η Ελλάδα είναι σχετικά ευνοημένη σε σχέση με την ηλιακή ενέργεια, η οποία μπορεί να υποκαταστήσει ένα σημαντικό ποσοστό των αναγκών της σε ενέργεια. Η μέση ετήσια ενέργεια που παρέχεται από τον ήλιο στην Ελλάδα (ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας) υπερβαίνει σε ορισμένα μέρη και τα 1650 kWh/m^2 , όπως σε κάποια τμήματα της Ν. Κρήτης, των Κυκλάδων και των ΝΑ Δωδεκανήσων. Η ένταση (και το φάσμα) της ηλιακής ακτινοβολίας κυμαίνεται σημαντικά και εξαρτάται από την *εποχή* (π.χ. για την Ελλάδα το καλοκαίρι η μέση τιμή είναι 7 kWh/m^2 ανά ημέρα και μόλις 2 kWh/m^2 ανά ημέρα το χειμώνα), τη *γεωγραφική θέση* και το *υψόμετρο* (αυξάνει $\sim 7 \text{ W/m}^2$ ανά 100 m).

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε θερμότητα (και ακολούθως σε χρήσιμο έργο) με τη βοήθεια διάφορων τύπων συλλεκτών. Η παραγόμενη θερμότητα μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή αφαλατωμένου νερού με τη χρήση ηλιακών αποστακτών ή ηλιακών συλλεκτών.

2.2 Ιστορικά Στοιχεία - Διάκριση των Τεχνικών Ηλιακής Αφαλάτωσης

Όπως επισημάνθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, οι περιοχές στη Γη με το μεγαλύτερο πρόβλημα σε υδατικά αποθέματα βρίσκονται στη Β. Αφρική και τμήματα της Ν. Ασίας μεταξύ των παραλλήλων $15^{\circ} - 35^{\circ}$ N. Αυτή η γεωγραφική ζώνη δέχεται ηλιακή ακτινοβολία με τη μεγαλύτερη ένταση παγκοσμίως. Οδηγούμαστε, συνεπώς, στο λογικό συμπέρασμα ότι η χρήση της ηλιακής ενέργειας στην αφαλάτωση του νερού είναι η πιο αξιόπιστη λύση αναφορικά με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η περαιτέρω ανάπτυξη της σχετικής τεχνογνωσίας είναι ζωτικής σημασίας για αρκετές χώρες.

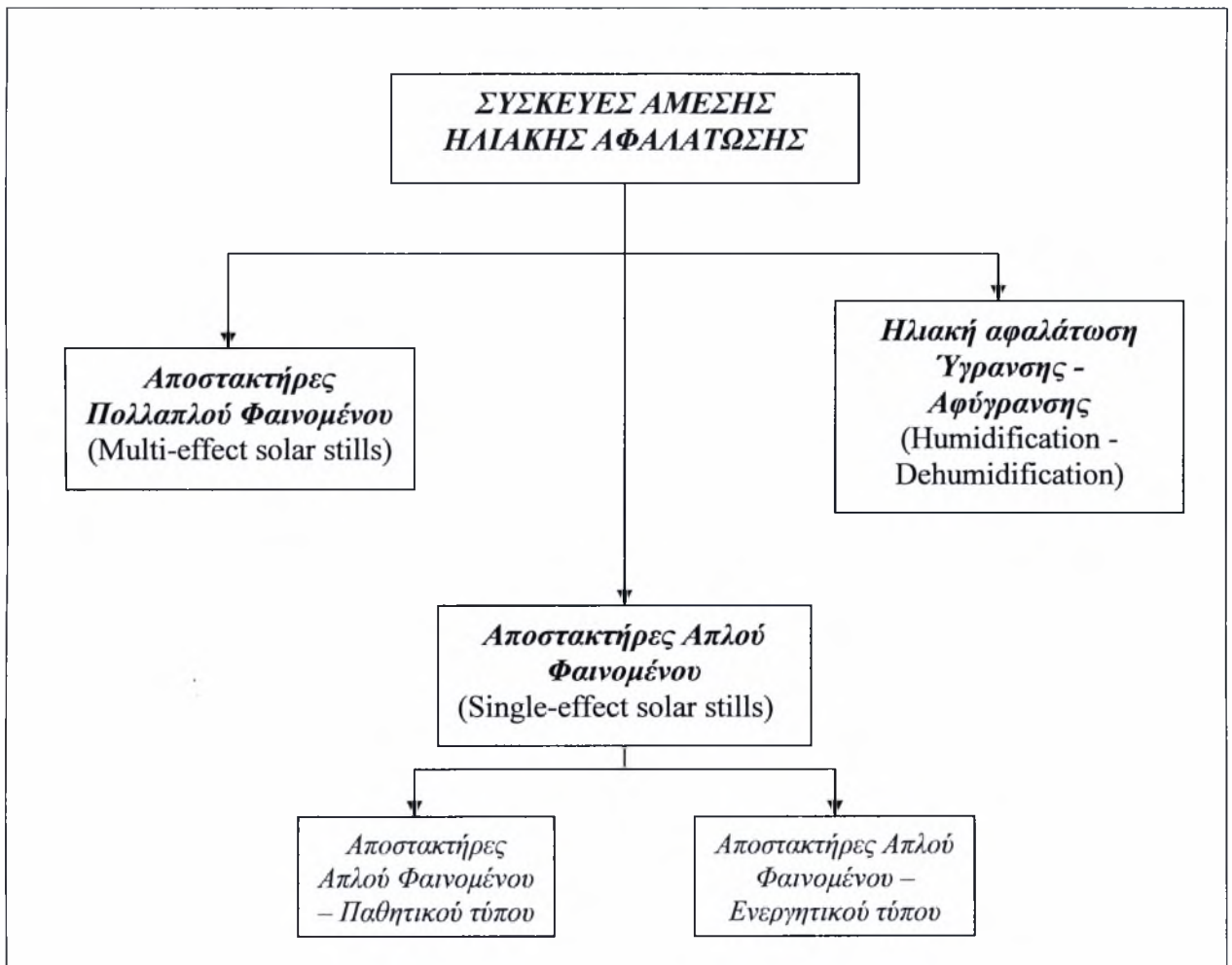
Η ιδέα της απόσταξης μέσω του ήλιου ήταν γνωστή στον άνθρωπο από τους αρχαίους χρόνους. Οι πρώτοι σχετικοί αποστακτήρες ήταν απλά γυάλινα δοχεία που περιείχαν το προς απόσταξη νερό ή κάποιο άλλο υγρό και εκτίθονταν απ' ευθείας στην ηλιακή ακτινοβολία. Η μεγαλύτερη εγκατάσταση ηλιακής αφαλάτωσης που υπήρξε πριν τη δεκαετία του 1960 βρίσκονταν στη Χιλή στην περιοχή του Las Salinas. Αυτή εγκαινιάστηκε το 1874 και λειτούργησε για πάνω από 40 χρόνια παράγοντας γλυκό νερό από τα υφάλμυρα νερά της περιοχής. Έτσι καλύπτονταν σε ικανοποιητικό βαθμό οι ανάγκες για πόσιμο νερό των εργατών που δούλευαν στα ορυχεία ασημιού και νιτρικού καλίου [Belessiotis, 2000].

Μετά τη δεκαετία του 1960 υπήρξε αύξηση του ενδιαφέροντος για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αλλά μόνο μετά την «πετρελαϊκή κρίση του 1973-74» υπήρξε πραγματική «στροφή» προς τέτοιου είδους εναλλακτικές. Σήμερα, ωστόσο, ακόμα και τα συστήματα που συνδυάζουν συμβατικές τεχνικές με χρήση ηλιακής ενέργειας είναι πολύ λίγα, χωρίς εμπορική χρήση και προορίζονται για την κάλυψη μικρών αναγκών σε νερό. Είναι γεγονός ότι η ηλιακή ενέργεια προορίζεται πρωτίστως για ηλεκτροπαραγωγή και συμμετέχει μόνο κατά 0,02% στην παγκόσμια αγορά αφαλάτωσης!

Οι τεχνικές ηλιακής αφαλάτωσης διακρίνονται βασικά σε αυτές που χρησιμοποιούν άμεσα την ηλιακή ακτινοβολία (Ηλιακοί Αποστακτήρες Άμεσης Ηλιακής Αφαλάτωσης) και σε αυτές που προσλαμβάνουν την ηλιακή ενέργεια για έμμεση χρήση (Συσκευές Έμμεσης Ηλιακής Αφαλάτωσης), όταν, δηλαδή, υπάρχουν ήδη εγκατεστημένες μονάδες συμβατικής αφαλάτωσης. Οι Ηλιακοί Αποστακτήρες Άμεσης Ηλιακής Αφαλάτωσης μπορούν να χωριστούν σε 3 μεγάλες κατηγορίες: τους Αποστακτήρες Απλού Φαινομένου, τους Αποστακτήρες Πολλαπλού Φαινομένου και τις διατάξεις Ύγρανσης-Αφύγρανσης. Τεχνικές έμμεσης ηλιακής αφαλάτωσης απαντώνται σε εγκαταστάσεις με ηλιακά θερμικά συστήματα για την παραγωγή θερμότητας ή ηλεκτρισμού. Τα θερμικά ηλιακά συστήματα είναι επί της ουσίας ηλιακοί συλλέκτες διαφόρων τύπων και συνδέονται με μονάδες συμβατικής αφαλάτωσης: MSF, MED ή TVC. Στις επόμενες παραγράφους αναλύεται διεξοδικά η κάθε περίπτωση με ταυτόχρονη παράθεση στοιχείων ανάλυσης κόστους. Παρουσιάζονται, επίσης, εμπορικές ή πειραματικές εφαρμογές, καθώς και κάποιες θεωρητικές μελέτες.

2.3 Τεχνικές Άμεσης Ηλιακής Αφαλάτωσης

Οι μέθοδοι της άμεσης ηλιακής αφαλάτωσης είναι κατάλληλες για παραγωγή μέχρι 200 m³/ημέρα γλυκού νερού [Fath, 1998]. Οι συσκευές που διέπονται από την αρχή της άμεσης ηλιακής αφαλάτωσης, μπορούν να χωριστούν, εν γένει, σε δύο μεγάλες κατηγορίες συν άλλη μία ανερχόμενη: (i) τους **Αποστακτήρες Απλού Φαινομένου** (Single-effect solar stills), (ii) τους **Αποστακτήρες Πολλαπλού Φαινομένου** (Multi-effect solar stills) και (iii) τις διατάξεις **Υγρανσης-Αφύγρανσης** (Humidification-Dehumidification). Οι Αποστακτήρες Απλού Φαινομένου αποτελούνται από ένα μόνο στρώμα διαφανούς γυαλιού και χαρακτηρίζονται για την απλότητα τους. Διακρίνονται επίσης στους *Αποστακτήρες Απλού Φαινομένου – Παθητικού Τύπου* και στους *Αποστακτήρες Απλού Φαινομένου – Ενεργητικού Τύπου*. Οι Αποστακτήρες Πολλαπλού Φαινομένου, απ' την άλλη, είναι σχεδιασμένοι, έτσι ώστε να μπορούν να ανακυκλώνουν μέρος της λανθάνουσας θερμότητας της εξάτμισης και να προθερμαίνουν το νερό τροφοδοσίας. Οι διατάξεις Υγρανσης-Αφύγρανσης χρησιμοποιούν τον αέρα ως εργαζόμενο μέσο για να επιτευχθούν οι παραπάνω φυσικές διεργασίες.



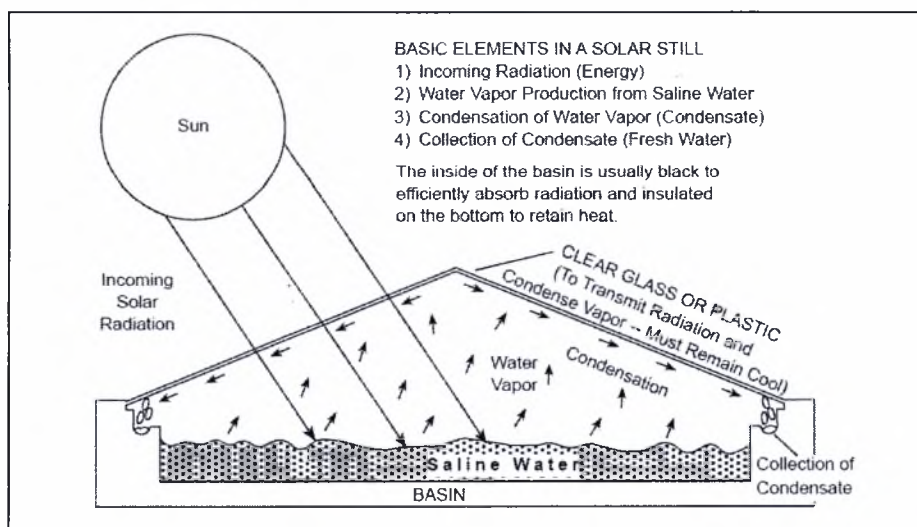
Σχήμα 2.3.1: Συνοπτική κατηγοριοποίηση των ηλιακών αποστακτήρων άμεσης ηλιακής αφαλάτωσης.

2.3.1 Αποστακτήρες Απλού Φαινομένου

Όπως σημειώθηκε πιο πάνω, οι Αποστακτήρες Απλού Φαινομένου αποτελούνται από ένα μόνο στρώμα διαφανούς γυαλιού. Αυτό έχει σαν αρνητικό επακόλουθο, μια μεγάλη ποσότητα από τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης να διαφεύγει από την επιφάνεια του υαλοπίνακα μέσω του φυσικού μηχανισμού της συναγωγής. Σήμερα οι πιο εξελιγμένες εκδοχές αυτών των διατάξεων έχουν απόδοση 30-40 % και ρυθμό παραγωγής της τάξης των 6 li την ημέρα ανά m^2 επιφάνειας συλλέκτη [Mink, 1998]. Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε, επίσης, η διάκριση μεταξύ παθητικού και ενεργητικού τύπου αποστακτήρων απλού φαινομένου. Αυτή η διάκριση απορρέει από τα πρόσφατα αποτελέσματα στην έρευνα πάνω στην ηλιακή αφαλάτωση. Οι παθητικές συσκευές αξιοποιούν μόνο τη θερμότητα που παράγεται στον αποστακτήρα, ενώ τα ενεργητικά συστήματα χρησιμοποιούν επιπλέον κάποιες εξωτερικές πηγές ισχύος, όπως ηλιακούς συλλέκτες, ηλιακούς θερμαντήρες ή θερμότητα από βιομηχανικές μονάδες [Fath, 1998]. Παρακάτω περιγράφεται ο πιο χαρακτηριστικός αποστακτήρας απλού φαινομένου - παθητικού τύπου, καθώς και κάποιες παραλλαγές αυτού.

□ Κοινός ηλιακός αποστακτήρας (παθητικού τύπου)

Η πλέον συνηθισμένη συσκευή που λειτουργεί με τη μέθοδο της απόσταξης απλού φαινομένου είναι ο κοινός ηλιακός αποστακτήρας (*solar still*). Όπως όλες οι συσκευές αυτού του τύπου, λειτουργεί σε χαμηλή θερμοκρασία και πίεση, οπότε η παραγωγική του ικανότητα σε νερό είναι περιορισμένη. Η αρχή λειτουργίας του είναι απλή: οι ηλιακές ακτίνες διαπερνούν τη διαφανή οροφή της διάταξης, η οποία είναι συνήθως κατασκευασμένη από γυαλί. Το αλατούχο νερό θερμαίνεται ως το σημείο ζέσης (βρασμού) και οι υδρατμοί που παράγονται αναμειγνύονται με τον εγκλωβισμένο αέρα. Έπειτα, ένα μέρος των υδρατμών συμπυκνώνεται στην υπό κλίση γυάλινη οροφή και ρέει βαρυτικά προς τα κάτω, όπου συλλέγεται ως αποσταγμένο νερό. (Βλ. Σχήμα 2.3.2).



Σχήμα 2.3.2: Σχηματική αναπαράσταση του κοινού ηλιακού αποστακτήρα.
[πηγή: USAID, 1980]

Οι ηλιακοί αποστακτήρες μπορούν, επίσης, να φέρουν *μία κεκλιμένη επιφάνεια* ή *δύο* (όπως σε μία απλή στέγη σπιτιού). Γενικά, αν συγκριθούν οι δύο μορφές της ηλιακής οροφής, προκύπτει ότι η διάταξη με τη διπλή κεκλιμένη επιφάνεια μπορεί να απορροφήσει μεγαλύτερη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας απ' ό,τι η αντίστοιχη με τη μονή επιφάνεια. Όμως, η μονή κεκλιμένη επιφάνεια έχει και κάποια πλεονεκτήματα: οι απώλειες θερμότητας μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας είναι λιγότερες, ενώ η σκιασμένη επιφάνεια αποτελεί έναν επιπλέον χώρο συμπύκνωσης των υδρατμών. Στο παρελθόν είχαν δημοσιευθεί μελέτες που συνέκλιναν στο συμπέρασμα, ότι η μονή κεκλιμένη επιφάνεια σε έναν ηλιακό αποστακτήρα είναι η πλέον αποδοτική σε ψυχρά κλίματα, ενώ η διπλή επιφάνεια είναι αποδοτικότερη στις θερμότερες περιοχές του πλανήτη [Tiwari et al., 1986].

Στη συνέχεια θα σχολιάσουμε έναν εμπειρικό κανόνα ο οποίος αναφέρει, ότι για την παραγωγή 4 lt γλυκού νερού/ ημέρα απαιτείται 1 m² επιφάνειας ηλιακού συσσωρευτή. Τούτο πρακτικά σημαίνει, ότι για μια εγκατάσταση δυναμικότητας 4 000 m³/ημέρα απαιτείται μία επιφάνεια 1.000.000 m² ή αλλιώς 1 000 στρεμμάτων! Προφανώς ένα τέτοιο εγχείρημα θα ήταν ουτοπικό, ειδικά σε αστικές περιοχές, όπου οι ελεύθεροι χώροι είναι δυσεύρετοι και η αγορά της γης είναι ακριβή [Buros O. K.].

Η κατασκευή ενός συστήματος με αποστακτήρες δεν είναι αμελητέου κόστους, όπως και η επιπλέον ενέργεια που απαιτείται για τους κυκλοφορητές. Οι τελευταίοι απαιτούν κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για να κινήσουν το νερό από και προς τις δεξαμενές της εγκατάστασης. Απαιτείται ακόμα τακτική παρακολούθηση και συντήρηση των μονάδων ηλιακής αφαλάτωσης, για να αποφευχθούν οι επικαθίσεις των αλάτων στις δεξαμενές και τυχόν διαρροή ατμού από τη γυάλινη οροφή.

Η εγκαταστάσεις που έχουν κατασκευαστεί με επιμέλεια και συντηρούνται τακτικά, αναφέρεται ότι μπορούν να είναι ενεργές για πάνω από 20 έτη. Ουσιαστικά τέτοιου είδους συστήματα είναι ελκυστικά σε περιοχές με αναπτυσσόμενη οικονομία με βάση την αγροτική παραγωγή, όπου η αξία της γης βρίσκεται σε χαμηλές τιμές και οι εργαζόμενοι έχουν ίδιον όφελος από την παραγωγή πόσιμου νερού. Στο παρελθόν είχαν εφαρμοσθεί με επιτυχία κοινοί ηλιακοί αποστακτήρες σε μικρής κλίμακας μονάδες για την εξυπηρέτηση των αναγκών μιας οικογένειας ή ενός μικρού οικισμού. Μία τέτοια περίπτωση εντοπίζεται σε επαρχιακό οικισμό της Αϊτή (Haiti) στην Καραϊβική Θάλασσα (βλ. Εικόνα 2.3.1), όπου εγκαινιάστηκε μονάδα άμεσης ηλιακής αφαλάτωσης το 1967 με έκταση 300 m² και καταγράφηκε ως ενεργή το 1998 [Buros O. K.].

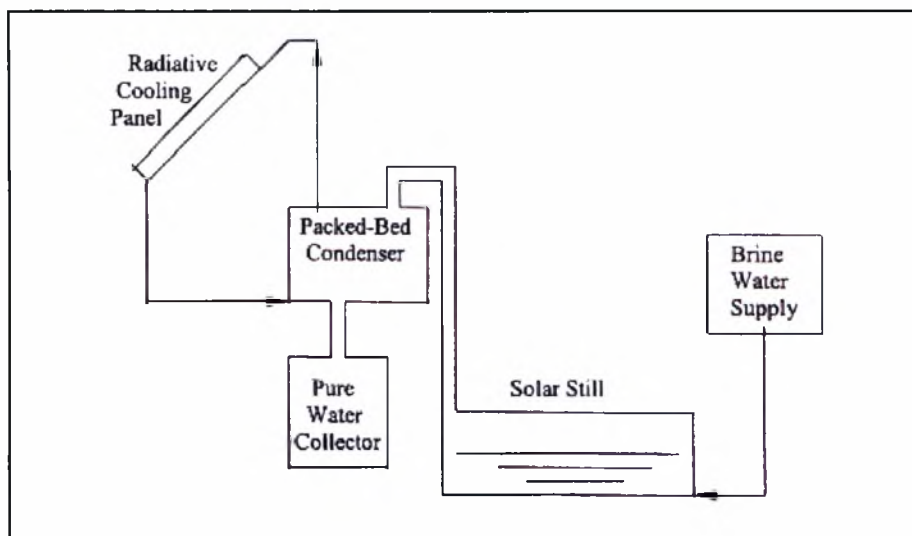
Ανακεφαλιώνοντας είδαμε ότι τα βασικά ελαττώματα του κοινού ηλιακού αποστακτήρα είναι η χαμηλή θερμική απόδοση και η χαμηλή παραγωγικότητα σε γλυκό νερό. Αποδείχθηκε, επίσης, ότι τα ελαττώματα αυτά οφείλονται σε τρία βασικά τεχνικά εμπόδια, που είναι: (i) η απαίτηση για μεγάλη έκταση ηλιακών συσσωρευτών, (ii) το υψηλό πάγιο κόστος και (iii) η ευαισθησία στις δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Ωστόσο, οι ερευνητές Fath και Ghazy σε σχετική δημοσίευση το 2002 στο επιστημονικό περιοδικό *Desalination*, προτείνουν κάποιες τεχνικές βελτιστοποιήσεις. Μία από αυτές είναι η επαναχρησιμοποίηση της λανθάνουσας θερμότητας που περιέχει ο υγρός ατμός. Ένα άλλο μέτρο, αναφέρουν, είναι ο διαχωρισμός του ηλιακού συλλέκτη από το δοχείο με το θαλασσινό νερό, έτσι ώστε τα προβλήματα διάβρωσης να μειωθούν και κατ' επέκταση οι απώλειες της απόδοσης.



Εικόνα 2.3.1: Ηλιακός αποστακτήρας στην Αϊτή. [πηγή: Brace Research Institute]

□ Ηλιακός αποστακτήρας με πρόσθετη ψύξη (ενεργητικού τύπου)

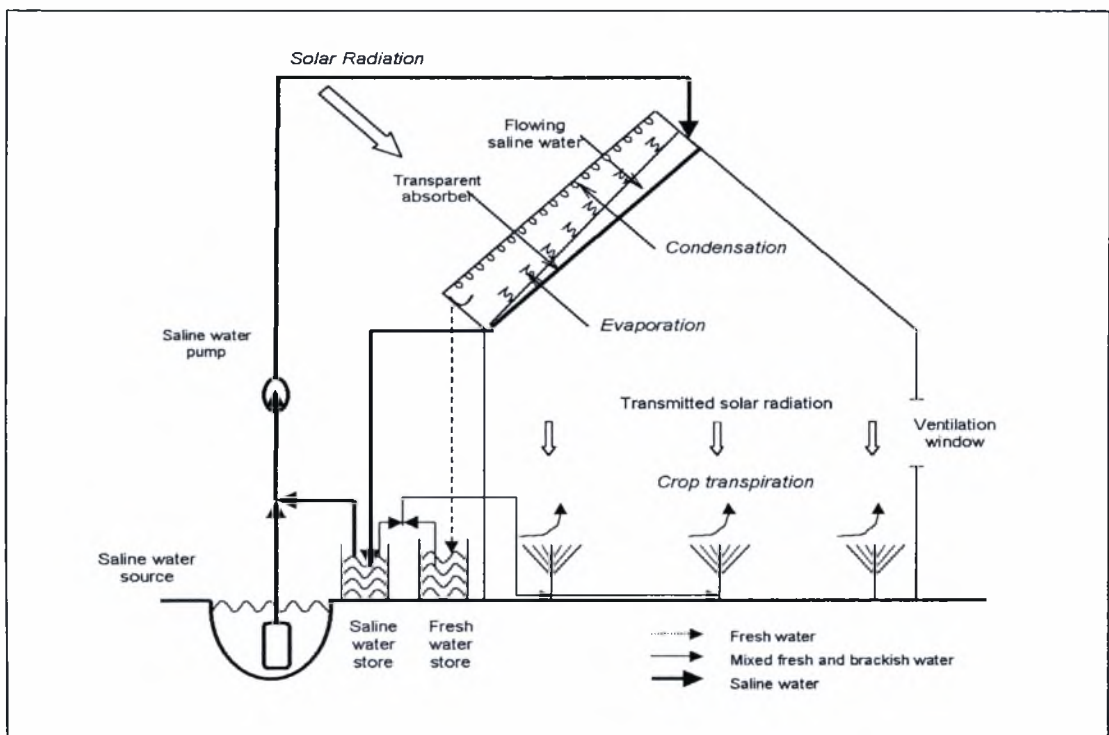
Ο εν λόγω αποστακτήρας (still with additional cooling) είναι προφανώς ενεργητικού τύπου, γιατί χρησιμοποιεί ένα πρόσθετο μέσο ισχύος, στην προκειμένη περίπτωση μία πηγή ψυκτικής ισχύος. Είναι γνωστό, ότι η κινούσα δύναμη για την παραγωγή υδρατμού στον κλειστό χώρο του ηλιακού αποστακτήρα είναι η θερμοκρασιακή διαφορά. Άρα, ο ρυθμός παραγωγής υδρατμού μπορεί να αυξηθεί είτε με την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας είτε με τη μείωση της θερμοκρασίας στην ψυχρή επιφάνεια συμπύκνωσης. Εδώ προσδίδεται επιπλέον ψυκτικό φορτίο που προέρχεται από μία κλειστού τύπου κλίση συμπύκνωσης και είναι συνδεδεμένη με ένα ψυκτικό πάνελ. Οι δύο αυτές διατάξεις διαρρέονται από νερό ψύξης, το οποίο λειτουργεί ως θερμικό ρευστό. Αυτό αποβάλλει τη θερμότητά του κατά τις νυχτερινές ώρες μέσω του ψυκτικού ακτινοβόλου πάνελ (radiative cooling panel). Η παραπάνω καινοτομία είναι αποτέλεσμα της ερευνητικής δουλειάς του Haddad και των συνεργατών του (2000).



Σχήμα 2.3.3: Σχηματική αναπαράσταση του ηλιακού αποστακτήρα με πρόσθετη ψύξη. Οι υδρατμοί οδηγούνται μέσω του αγωγού από τον αποστακτήρα στο συμπυκνωτή λόγω άνωσης και διαφοράς πίεσης. [πηγή: Haddad et al., 2000]

□ Ηλιακός αποστακτήρας ενσωματωμένος σε θερμοκήπιο (παθητικού τύπου)

Τέτοιου είδους θερμοκήπια (stills integrated with greenhouses) αποτελούν μία ενδιαφέρουσα πρόταση για μικρής κλίμακας καλλιέργειες, σε περιοχές όπου υπάρχει διαθέσιμο μόνο θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό. Ο βασικός σχεδιασμός είναι σχετικά απλός. Στη νότια κεκλιμένη επιφάνεια της οροφής του θερμοκηπίου ενσωματώνεται ηλιακός αποστακτήρας. Εκεί διοχετεύεται μέσω αντλίας το νερό τροφοδοσίας (θαλασσινό ή υφάλμυρο) και πραγματοποιείται η εξάτμιση. Το προϊόν του αφαλατωμένου νερού διοχετεύεται σε ειδική δεξαμενή, ενώ το πλεόνασμα του νερού τροφοδοσίας σε ξεχωριστό αποθηκευτικό χώρο. Ένα μέρος του νερού τροφοδοσίας οδηγείται με ανακυκλοφορία ξανά προς εξάτμιση, ενώ ένα άλλο αναμιγνύεται με το φρέσκο νερό. Η διεργασία γίνεται τόσο κατά την ημέρα όσο και κατά τη νύχτα και η περίσσεια θερμότητας οδηγείται στο νερό τροφοδοσίας (Βλ. Σχήμα 2.3.4).



Σχήμα 2.3.4: Σχηματική αναπαράσταση του ηλιακού αποστακτήρα ενσωματωμένου σε θερμοκήπιο. [πηγή: Chaibi & Jilar, 2003]

Από κατασκευαστικής άποψης πρέπει να ειπωθεί ότι, η πάνω επιφάνεια του αποστακτήρα είναι ένα κοινό γυαλί, ενώ η κάτω επιφάνεια αποτελείται από υλικό που απορροφά ένα μεγάλο μέρος του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, αλλά εκπέμπει στο εσωτερικό του θερμοκηπίου μόνο ένα συγκεκριμένο μέρος (ακτινοβολία με μήκη κύματος 380-710 nm - κατάλληλα για τη φωτοσύνθεση των πράσινων φυτών). Έτσι, επιτυγχάνεται υψηλή θερμοκρασία στο εσωτερικό του αποστακτήρα και μειωμένη στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Αυτό με τη σειρά του έχει ως πλεονέκτημα τις μειωμένες ποσότητες νερού άρδευσης και τις μικρότερες απαιτήσεις για εξαερισμό στο χώρο του θερμοκηπίου.

Η ανάπτυξη και μελέτη του παραπάνω συστήματος έγιναν από την ερευνητική ομάδα Chaibi και Jilar (2003). Διαπιστώθηκε ότι η κάλυψη κατά 50% της επιφάνειας οροφής του θερμοκηπίου με διατάξεις ηλιακού αποστακτήρα προσφέρει επαρκή ποσότητα νερού άρδευσης για μια καλλιέργεια με χαμηλό φύλλωμα. Απ' την άλλη όμως, η σοδειά μειώνεται περίπου κατά 25%. Επίσης, η οικονομική σύγκριση του αποστακτήρα των Chaibi και Jilar, του συστήματος αφαλάτωσης απλού φαινομένου με θερμικούς σωλήνες, καθώς και του ηλιακού αποστακτήρα-εξατμιστήρα πολλαπλού φαινομένου (SMEC) έδειξε, ότι το τελευταίο ήταν αποδοτικότερο από τα άλλα δύο κατά 35% και 50% αντίστοιχα.

□ Αποστακτήρας τύπου wick still (παθητικού τύπου)

Το 1981 η ομάδα του Tanaka στο Συνέδριο Ηλιακής Ενέργειας στο Brighton της Αγγλίας πρότεινε τον αποστακτήρα τύπου wick still. Το νερό τροφοδοσίας ρέει μέσα σε ένα πορώδες «μαξιλαράκι» που μπορεί να απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία. Το πλεονέκτημα είναι, κατά πρώτο, ότι η διάταξη μπορεί να ρυθμιστεί στη βέλτιστη γωνία κλίσης απορρόφησης της ακτινοβολίας. Κατά δεύτερο, η μικρή ποσότητα νερού που υπάρχει κάθε φορά στον αποστακτήρα θερμαίνεται ταχύτερα σε υψηλότερη θερμοκρασία. Η ερευνητική ομάδα απέδειξε ότι η διάταξη έχει αυξημένη παραγωγικότητα νερού κατά 20-50% σε σχέση με τους απλούς ηλιακούς αποστακτήρες.

2.3.2 Αποστακτήρες Πολλαπλού Φαινομένου

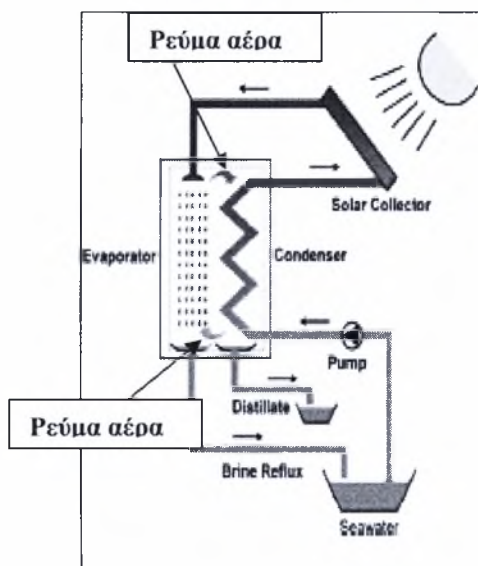
Οι Αποστακτήρες Πολλαπλού Φαινομένου φέρουν διπλό στρώμα γυαλιού και είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να μπορούν να ανακυκλώνουν μέρος της λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης και να προθερμαίνουν είτε το νερό τροφοδοσίας είτε το αλμυρό νερό που βρίσκεται στον αποστακτήρα. Επίσης, οι αυλοί προσαγωγής του νερού τροφοδοσίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ψυχρές επιφάνειες συμπύκνωσης του υγρού ατμού. Οι διατάξεις αυτές χαρακτηρίζονται από δυναμικότητα 20 lt την ημέρα και ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας συλλέκτη. Η σαφώς αυξημένη παραγωγικότητα σε σχέση με την αντίστοιχη των διατάξεων απλού φαινομένου (υπενθυμίζουμε ότι είναι μόλις 6 lt/ημέρα - m²) πρέπει να ιδωθεί με σκεπτικισμό, καθώς θα χρειαστεί να συνυπολογιστεί το επιπλέον κόστος λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος.

□ Υγραντήρας Πολλαπλού Φαινομένου - Μέθοδος GOR

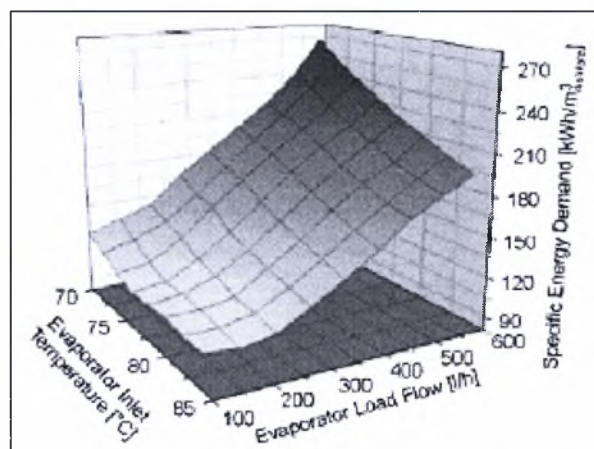
Με αφορμή τη μόλυνση υπόγειων υδάτων από αρσενικό στη Δ. Βεγγάλη (Ινδία) και στο Μπανγκλαντές (Bangladesh) στήθηκαν δύο πειραματικά προγράμματα αφαλάτωσης (συνεργασία του Πολυτεχνείου του Μονάχου με τεχνικές εταιρείες). Το ένα από αυτά, ο Υγραντήρας Πολλαπλού Φαινομένου (Multi-effect Humidification), εφαρμόστηκε πιλοτικά το 1992 στη Fuerteventura στα Κανάρια Νησιά (Ισπανία) και το 1997 στο Sfax της Τυνησίας.

Οι κατασκευαστές της συσκευής αναφέρουν ότι η θερμότητα μπορεί να προσφερθεί όχι μόνο από τον ήλιο, αλλά από οποιαδήποτε πηγή ενέργειας χαμηλής ενθαλπίας (αιολική ενέργεια ή θερμότητα που διαφεύγει από βιομηχανικές δραστηριότητες). Η βασική μονάδα, όπου λαμβάνουν χώρα οι διεργασίες της εξάτμισης, συμπύκνωσης και ύγρανσης (του αέρα), είναι ένας θερμικά μονωμένος θάλαμος και περιλαμβάνει τις αντίστοιχες διατάξεις εξάτμισης, συμπύκνωσης και ύγρανσης. Το νερό που πρόκειται να εξατμιστεί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.5, ρέει πάνω σε ένα συνθετικό ύφασμα πολυπροπυλενίου (PP). Με αντίθετη φορά από αυτή του νερού, κινείται ρεύμα αέρα το οποίο συνακόλουθα μετατρέπεται σε κορεσμένο αέρα. Η μερική εξάτμιση που συμβαίνει τότε, ψύχει το αλμόλοιπο μέχρι τους 45°C. Ο κορεσμένος αέρας, στη συνέχεια, οδηγείται μέσω φυσικής συναγωγής στο συμπυκνωτή (αγωγός τροφοδοσίας θαλασσινού νερού ή άλμης), ο οποίος δίνει το αφαλατωμένο προϊόν του γλυκού νερού και ταυτόχρονα προθερμαίνει το νερό τροφοδοσίας στους 75°C.

Το κόστος παραγωγής του αποσταγμένου νερού εκτιμάται σε 20 \$/m³ για τις εξής συνθήκες λειτουργίας: παροχή ατμού 600 lt/h και θερμοκρασία εξάτμιστῆρα 85°C.



Σχήμα 2.3.5: Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας του υγραντήρα πολλαπλού φαινομένου.
[πηγή: Spinnler et al.]

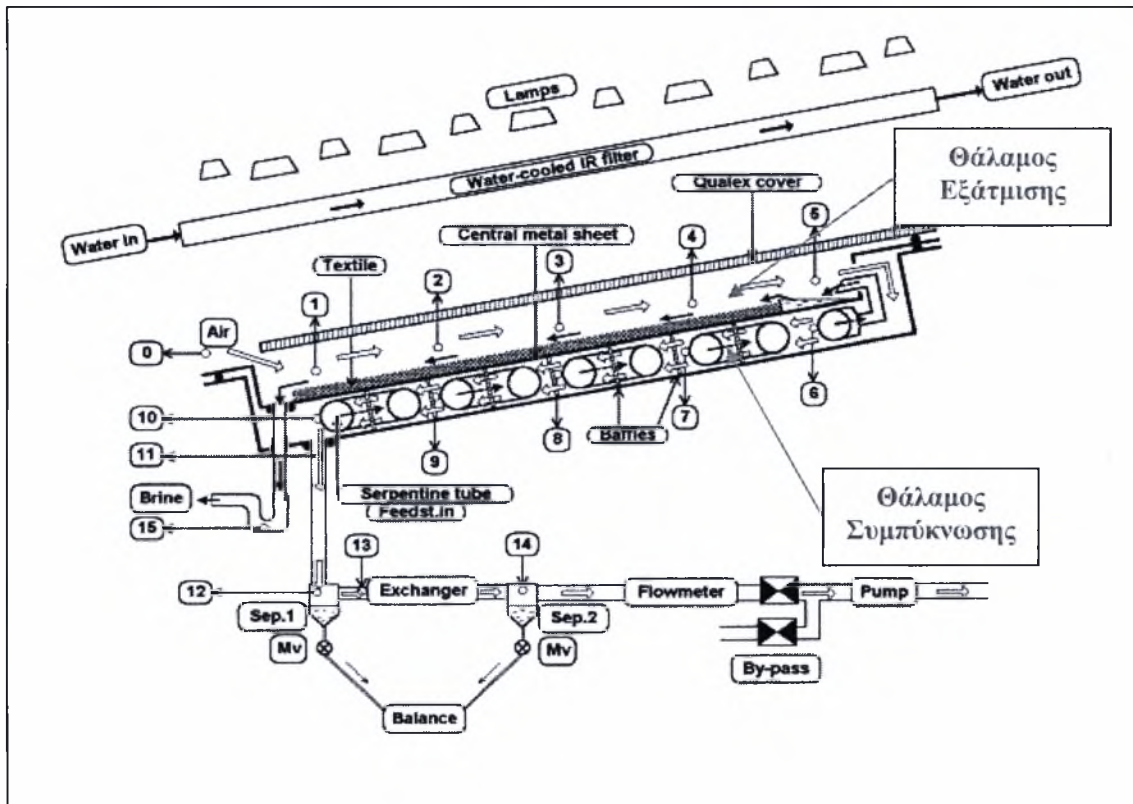


Σχήμα 2.3.6: Ενεργειακή κατανάλωση για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας και θερμοκρασία τροφοδοσίας στους 40°C.
[πηγή: Spinnler et al.]

□ Ηλιακός αποστακτήρας με προθέρμανση

Στη διεθνή βιβλιογραφία εντοπίζεται υπό τον όρο «solar still with preheating of feed water» και είναι αποτέλεσμα της ερευνητικής δουλειάς της ομάδας Mink (1998). Η κατασκευή, γενικά, χωρίζεται στο θάλαμο εξάτμισης και στο θάλαμο συμπύκνωσης, ενώ ο αποστακτήρας αποτελείται από διπλή υάλωση. Εισάγεται ακόμα ένα ρεύμα αέρα που διατρέχει τους θαλάμους εξάτμισης και συμπύκνωσης. Μία μεταλλική πλάκα χωρίζει τους δύο θαλάμους, ενώ ένα διάκενο υπάρχει στο άνω τμήμα του αποστακτήρα. Το νερό τροφοδοσίας οδηγείται από το θάλαμο συμπύκνωσης διαμέσου αυλών (serpentine tube) στην επιφάνεια εξάτμισης. Ο θάλαμος

συμπύκνωσης λειτουργεί προφανώς ως εναλλάκτης θερμότητας αέρα-νερού με σταυρωτή ροή. Η επιφάνεια εξάτμισης είναι μία κατωφέρεια επενδυμένη με μαύρο πορώδες ύφασμα και απορροφά με ομαλό τρόπο το νερό, καθώς κυλάει πάνω του. Ο ρόλος του ρεύματος αέρα είναι να απορροφά τους υδρατμούς του θαλάμου εξάτμισης και κατόπιν να τους εισαγάγει στον συμπυκνωτήρα. Εκεί πλέον, στην επιφάνεια των αυλών (serpentine tube), υγροποιείται το φρέσκο νερό και ταυτόχρονα προθερμαίνεται το νερό τροφοδοσίας (Βλ. Σχήμα 2.3.7). Η ημερήσια παραγόμενη ποσότητα γλυκού νερού είναι περίπου 1 kg/m^2 .



Σχήμα 2.3.7: Σχηματική αναπαράσταση του ηλιακού αποστακτήρα με προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας. [πηγή: Mink et al., 1998]

□ Ηλιακοί αποστακτήρες διάχυσης

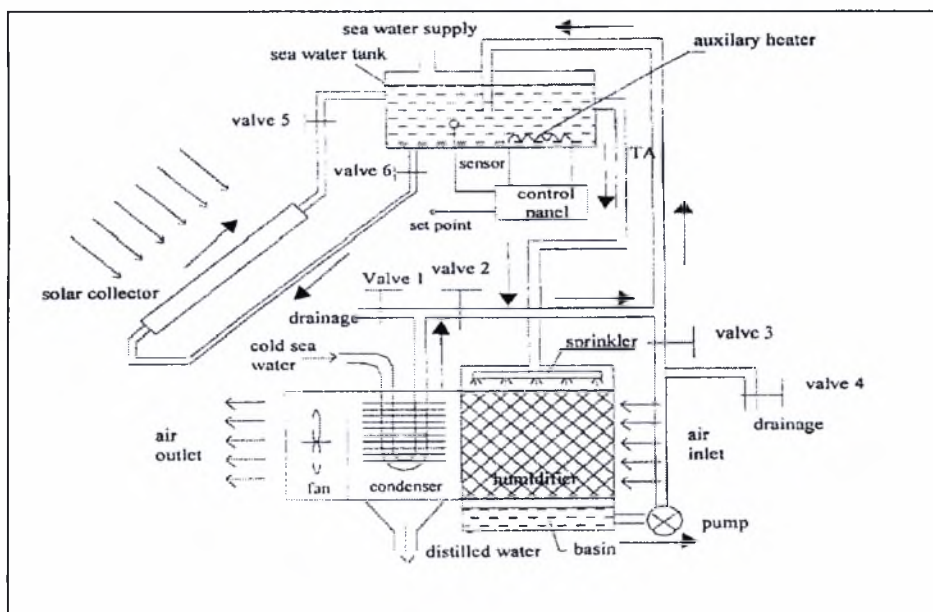
Η πιο πρόσφατη διάταξη αυτού του τύπου (diffusion still) προτάθηκε από τους Geater και Rheinlaender (2001). Πρόκειται για ένα σχήμα ηλιακής αφαλάτωσης με κύριο χαρακτηριστικό τους 4 θαλάμους (“effects”), όπου συμβαίνει η διεργασία της εξάτμισης. Η θεωρητική ποσότητα του παραγόμενου προϊόντος είναι $8,7 \text{ kg/m}^2\text{-h}$ με ενεργειακή κατανάλωση 2 kW/m^2 .

2.3.3 Ηλιακή Αφαλάτωση Ύγρανσης-Αφύγρανσης

Έχει επισημανθεί, ότι η ιδέα της ενσωμάτωσης του εξαμιστήρα και του συμπυκνωτή-συλλέκτη του γλυκού νερού στην άμεση ηλιακή αφαλάτωση είναι μία πρακτική λύση, ωστόσο έτσι δημιουργούνται άλλα προβλήματα: διάβρωση των μεταλλικών επιφανειών και επικαθίσεις αλάτων. Αυτά τα φαινόμενα έρχεται να αντιμετωπίσει η ανερχόμενη μέθοδος της Ύγρανσης-Αφύγρανσης, όπου χρησιμοποιείται ο αέρας ως εργαζόμενο μέσο και η λειτουργία γίνεται σε ατμοσφαιρική πίεση. Στα συστήματα αυτά εντοπίζονται συνήθως δύο εναλλάκτες θερμότητας: ένας εξαμιστήρας και ένας συμπυκνωτής. Οι κατασκευές αυτές είναι ελαφριές, αλλά ακριβές γενικά. Η δυναμικότητα των συσκευών αυτών είναι περιορισμένη και χρειάζεται να διανύσουμε ακόμα αρκετό «δρόμο», για να γίνουν ανταγωνιστικές.

□ Ηλιακή αφαλάτωση ύγρανσης-αφύγρανσης με χρήση αέρα

Η πειραματική διάταξη που φαίνεται στο Σχήμα 2.3.8, γνωστή στη διεθνή βιβλιογραφία ως «desalination with humidification-dehumidification using an open-air cycle», έχει προταθεί από τους Dai και Zhang (2000). Λειτουργεί με θέρμανση του θαλασσινού νερού σε ηλιακό συλλέκτη (solar collector), που κατόπιν ψεκάζεται στην επιφάνεια ύγρανσης (επιφάνεια με κυψελοειδή διάταξη). Ο ξηρός αέρας περνάει διαμέσου του υγραντήρα (humidifier), όπου μετατρέπεται σε θερμό και υγρό αέρα. Έπειτα ψύχεται, καθώς οδηγείται στο θάλαμο συμπύκνωσης (condenser), όπου βρίσκονται οι σωλήνες με το νερό τροφοδοσίας. Το προϊόν που προκύπτει από την παραπάνω διεργασία είναι το φρέσκο νερό (distilled water) και συλλέγεται σε ξεχωριστή δεξαμενή. Για να αυξηθεί ο συντελεστής απόδοσης, το θαλασσινό νερό που δε δεσμεύτηκε από το ρεύμα του ξηρού αέρα, οδηγείται στη δεξαμενή του νερού τροφοδοσίας, δηλαδή υπάρχει ένας βρόχος ανατροφοδότησης.

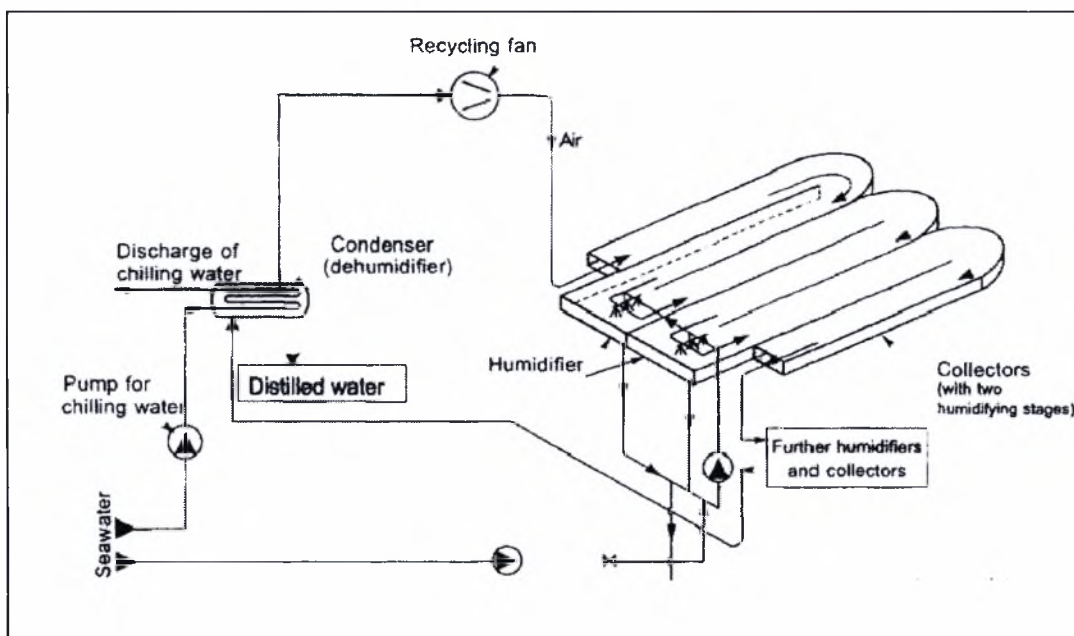


Σχήμα 2.3.8: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης της ηλιακής αφαλάτωσης με ύγρανση-αφύγρανση των Dai και Zhang. [πηγή: Dai, Zhang., 2000]

Κατά τη διάρκεια της έρευνας για το καινοτόμο αυτό σύστημα, τα πειραματικά δεδομένα έδειξαν ημερήσια παραγωγή γλυκού νερού 6 kg/m^2 , όταν η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας είναι 700 W/m^2 και ο χρόνος λειτουργίας 8 ώρες. Καταγράφηκε μία θερμική απόδοση του συστήματος κατά 85%.

□ Ηλιακός αερο-θερμαντήρας με πολυβάθμια ύγρανση

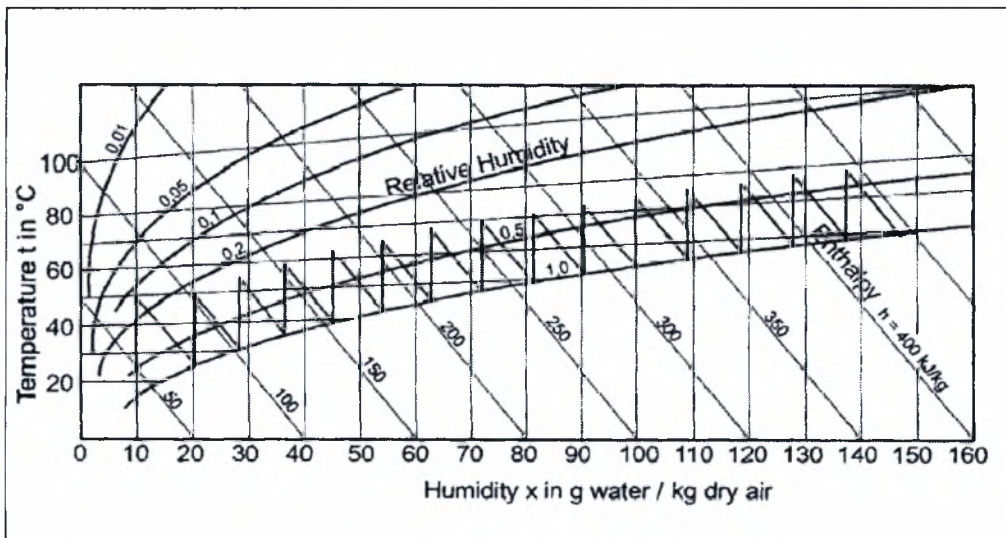
Στους συνηθισμένους ηλιακούς αποστακτήρες εμφανίζεται σχετικά μικρή διαφορά μάζας υδρατμού πριν και μετά τον συμπυκνωτή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μειωμένη παραγωγή νερού και ο μόνος τρόπος αύξησής του επιτυγχάνεται είτε με τη διεύρυνση της θερμοκρασιακής διαφοράς (όπως συμβαίνει στον ηλιακό αποστακτήρα με πρόσθετη ψύξη επί παραδείγματι) είτε με την αύξηση της ογκομετρικής παροχής του ατμού. Τότε όμως αυξάνεται κατά πολύ και το κόστος επένδυσης. Τη λύση αυτού του προβλήματος έρχεται να δώσει η ενδιαφέρουσα τεχνική πρόταση του Chafik που δημοσιεύτηκε το 2002 (solar air-heating with stepwise humidification). Στη διάταξη πραγματοποιείται μία πολυβάθμια θέρμανση και ύγρανση του αέρα μέσα σε έναν απλό ηλιακό συλλέκτη. Τούτη η τεχνική οδηγεί σε αύξηση του περιεχόμενου ατμού στον αέρα και σε μικρή απαίτηση για παροχή ατμού.



Σχήμα 2.3.9: Σχηματική αναπαράσταση του ηλιακού αερο-θερμαντήρα με πολυβάθμια ύγρανση. [πηγή: Chafik., 2002]

Πιο αναλυτικά, η διεργασία είναι ως εξής: αέρας με αρχική θερμοκρασία και απόλυτη υγρασία, έστω $T_0 = 25^\circ\text{C}$ και $w_0 = 10 \text{ [g υδρατμού/kg ξηρού αέρα]}$ αντίστοιχα, εισάγεται στον ηλιακό συλλέκτη. Στο πρώτο επίπεδο ο αέρας θερμαίνεται απλά στους $T_1 = 50^\circ\text{C}$ και μετά υφίσταται ισηθαλπική ύγρανση με καταιονισμό θαλασσινού νερού μέχρι να κορεστεί (υπενθυμίζουμε ότι εννοούμε κορεσμό όταν υπάρχει 100% σχετική υγρασία). Σ' αυτό το σημείο η θερμοκρασία του αέρα (ξηρού βολβού) είναι ίδια με τη θερμοκρασία υγρού βολβού και είναι περίπου $T_{WB,1} = 23^\circ\text{C}$. Στο δεύτερο επίπεδο ο αέρας θερμαίνεται εκ νέου στους $T_2 = 50^\circ\text{C}$ και υγραίνεται, ομοίως με πριν,

ισενθαλπικά σε σημείο κορεσμού με απόλυτη υγρασία $w_2 = 28$ [g υδρατμού/kg ξηρού αέρα]. Η θερμοκρασία υγρού βολβού τώρα είναι $T_{WB,2} = 31^\circ\text{C}$. Στο τρίτο επίπεδο ο αέρας θερμαίνεται στους $T_3 = 56^\circ\text{C}$ και μετά την ύγρανση αποκτάει απόλυτη υγρασία $w_3 = 36$ [g υδρατμού/kg ξηρού αέρα] και θερμοκρασία υγρού βολβού $T_{WB,3} = 35^\circ\text{C}$. Η διεργασία επαναλαμβάνεται με τον ίδιο τρόπο μέχρι να φτάσουμε στο 15^ο επίπεδο (βαθμό) ύγρανσης, όπως απεικονίζεται και στο σχετικό ψυχομετρικό διάγραμμα που παραθέτουμε (Βλ. Σχήμα 2.3.10). Στο τέλος ο αέρας έχει απόλυτη υγρασία $w_{15} = 148$ [g υδρατμού/ kg ξηρού αέρα] και θερμοκρασία (υγρού ή ξηρού βολβού) $T_{WB,15} = 60^\circ\text{C}$. Έτσι, το υγρασιακό περιεχόμενο του αέρα στο 15^ο επίπεδο είναι το ίδιο με την απόλυτη υγρασία που θα είχε ο αέρας, αν υγραίνονταν και θερμαίνονταν απ' ευθείας στους 450°C !



Σχήμα 2.3.10: Ψυχομετρικό διάγραμμα της πολυβάθμιας θέρμανσης και ύγρανσης.
[πηγή: Chafik., 2002]

Όταν ο αέρας εξέλθει από τον ηλιακό υγραντήρα στο 15^ο στάδιο, τότε ψύχεται στους 25°C και είναι δυνατό να εξαχθούν 128 g φρέσκου νερού από 1 kg ξηρού αέρα. Στο πιλοτικό σύστημα, που λειτουργεί στο Bochum της Γερμανίας, παράγεται 1 m^3 γλυκού νερού την ημέρα.

2.4 Τεχνικές Έμμεσης Ηλιακής Αφαλάτωσης

Τεχνικές έμμεσης ηλιακής αφαλάτωσης χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις με ηλιακούς συλλέκτες ή φωτοβολταϊκά στοιχεία, για την παραγωγή θερμότητας ή ηλεκτρισμού. Αυτές οι συστοιχίες είναι συνδεδεμένες με μονάδες συμβατικής αφαλάτωσης, όπως είναι οι μονάδες θερμικών διεργασιών (MSF, MED, TVC) ή οι μονάδες αντίστροφης ώσμωσης και ηλεκτροδιαπίδωσης (RO, ED).

Στην παρούσα παράγραφο θα γίνει ανάλυση των εγκαταστάσεων εκείνων που χρησιμοποιούν μόνο θερμικές μεθόδους αφαλάτωσης μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτές αποτελούνται από ένα σύστημα ηλιακών συγκεντρωτικών ή μη συλλεκτών, το οποίο διαπερνάται από κάποιο θερμαινόμενο ρευστό ικανό να ανταλλάξει θερμότητα με το νερό τροφοδοσίας. Το ρευστό πρέπει να θερμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες, ώστε μέσω κατάλληλων θερμικών εναλλακτών το θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό να μπορεί να προσεγγίζει ένα θερμοκρασιακό εύρος 70°C με 120°C. Εκτός από τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες χρησιμοποιούνται και άλλα μέσα, τα οποία είναι χωρίς συστήματα εστίασης της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως οι ηλιακές λίμνες.

□ Ηλιακοί συλλέκτες και ηλιακές λίμνες για παραγωγή θερμότητας

Η εγκατάσταση μπορεί να αποτελείται από τα παρακάτω είδη ηλιακών συλλεκτών:

- επίπεδοι μη-συγκεντρωτικοί συλλέκτες
- συλλέκτες με σωλήνες κενού
- παραβολικοί συγκεντρωτικοί συλλέκτες .

Οι *Επίπεδοι Συλλέκτες* (flat plate collectors) (Βλ. Σχήμα 2.4.5) αποτελούνται από ένα μονωμένο μεταλλικό κουτί, το οποίο φέρει μεταλλικούς ή πλαστικούς αυλούς. Μέσα στους αυλούς ρέει το θερμικό ρευστό (νερό ή συνθετικό έλαιο) που απορροφάει την ηλιακή ακτινοβολία. Οι σωλήνες αυτοί εδράζονται σε μαύρο απορροφητικό υλικό, ενώ ως κάλυμμα έχουν μια γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια για να μειώνονται οι θερμικές απώλειες. Οι συλλέκτες αυτού του τύπου δεν είναι οι πλέον αποδοτικοί στην ηλιακή αφαλάτωση (αναπτύσσουν χαμηλή θερμοκρασία) και συνήθως χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με παραβολικούς συλλέκτες. Το κόστος τους κυμαίνεται από 80\$ μέχρι 250\$/m².

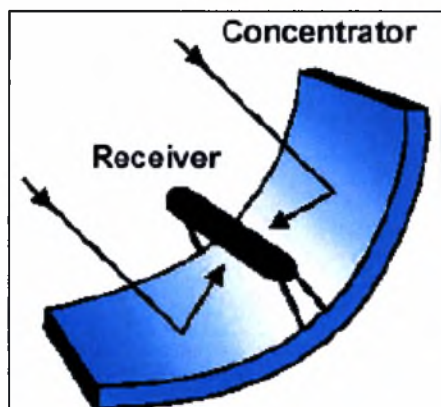
Οι *Συλλέκτες με Σωλήνες Κενού* (evacuated tube collectors) (Βλ. Σχήμα 2.4.3), μέσω της σχετικής τεχνολογίας, εμποδίζουν τη διαφυγή θερμότητας. Οι σωλήνες κενού συνήθως εδράζονται πάνω σε επίπεδες ή παραβολικές επιφάνειες. Είναι πιο δαπανηροί από τους επίπεδους συλλέκτες (300 \$/m² μέχρι 550 \$/m²), αλλά καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο και αναπτύσσουν θερμοκρασίες πάνω από 200°C.

Οι *Παραβολικοί Συλλέκτες* που χρησιμοποιούνται, γενικά, στα ηλιακά θερμικά συστήματα είναι τρία: (i) ο *Παραβολικός Συλλέκτης τύπου «Σκάφης»* (Parabolic Trough), (ii) ο *Παραβολικός Συλλέκτης τύπου «Πιάτου»* (Parabolic Dish) και (iii) οι *Κεντρικοί Πύργοι Ισχύος* (Power Towers). Έχει ενδιαφέρον να σημειωθεί η αναγκαιότητα του παραβολικού σχήματος στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες. Αυτή

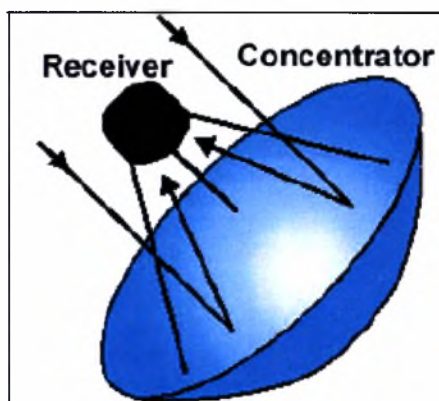
απορρέει από τη μαθηματική σχέση της καμπύλης που σχηματίζει ο συλλέκτης: $y = Ax^2 + Bx + C$, και έχει ένα εστιακό σημείο στο οποίο ανακλάται (εστιάζεται) η ακτινοβολία.

Για τους Παραβολικούς Συλλέκτες Τύπου «Σκάφης» πρέπει να σημειωθεί, ότι αποτελεί το απλούστερο σύστημα συγκέντρωσης της ακτινοβολίας, όπου η συγκέντρωση γίνεται κατά μήκος μιας γραμμής – στενής λωρίδας (Βλ. Σχήμα 2.4.1). Αποτελεί δε ένα παραβολικό σύστημα ως προς μια διάσταση. Τοποθετείται συνήθως με το διαμήκη άξονά του στη γραμμή Ανατολή-Δύση και απαιτείται οδηγούμενο σύστημα. Επιτυγχάνονται λόγοι συγκέντρωσης περίπου 50 ή αύξηση της θερμοκρασίας του νερού από 200°C μέχρι 400°C. Η σκάφη μπορεί να τοποθετηθεί και κατακόρυφα.

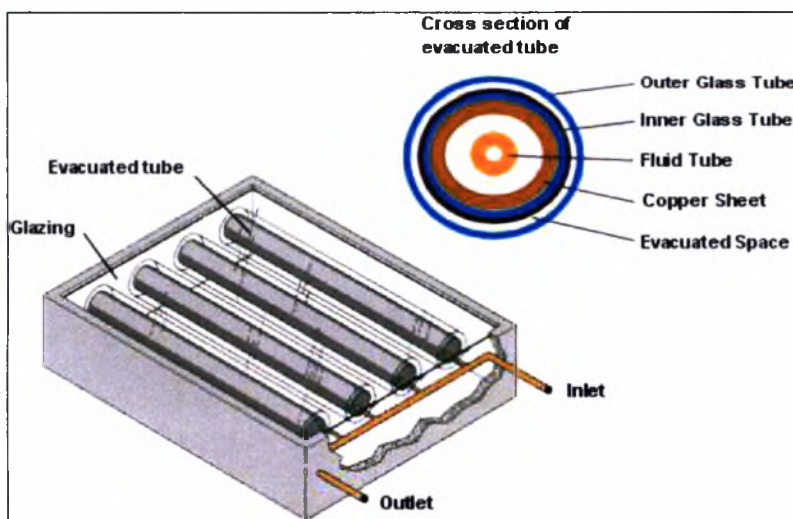
Στους Συλλέκτες Παραβολικού «Πιάτου» ο δέκτης βρίσκεται στο εστιακό σημείο του πιάτου (Βλ. Σχήμα 2.4.2). Το υγρό στο δέκτη θερμαίνεται μέχρι και 750°C και παράγει ηλεκτρισμό με μια μικρή μηχανή Stirling ή Brayton που είναι τοποθετημένη στο εστιακό σημείο. Απαιτείται και εδώ οδηγούμενο σύστημα. Επιτυγχάνονται λόγοι συγκέντρωσης μέχρι 1000 με αύξηση της θερμοκρασίας του νερού μέχρι 1000°C.



Σχήμα 2.4.1: Διάγραμμα παραβολικού συλλέκτη τύπου σκάφης. Εστίαση σε γραμμή



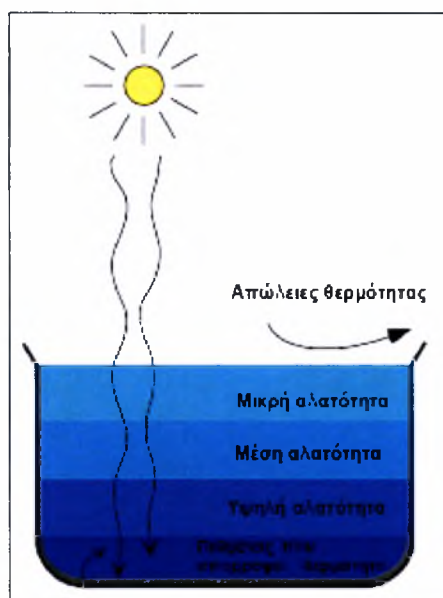
Σχήμα 2.4.2: Διάγραμμα παραβολικού συλλέκτη – πιάτου. Εστίαση σε σημείο.



Σχήμα 2.4.3: Ηλιακός συλλέκτης με σωλήνες κενού.

Όταν απαιτούνται μεγάλες ποσότητες θερμού νερού για μια διεργασία αφαλάτωσης υπάρχουν και άλλα σχήματα αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως είναι οι Ηλιακές Λίμνες (solar ponds), όπου δεν υπάρχει σύστημα εστίασης. Οι ηλιακές λίμνες διακρίνονται: σε λίμνες με άλατα (salt gradient solar ponds - SGSP) και σε λίμνες με μεμβράνες.

Σε μία συνηθισμένη λίμνη το θερμό νερό βρίσκεται στην επιφάνεια και το ψυχρό στον πυθμένα ως πιο βαρύ. Ταυτόχρονα λαμβάνει χώρα και κυκλοφορία των ρευμάτων νερού, λόγω ανταλλαγής θερμότητας και μάζας με τον ατμοσφαιρικό αέρα μέσω συναγωγής. Αντίθετα οι ηλιακές λίμνες κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να υπάρχει έντονη διαστρωμάτωση του νερού, λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης του άλατος (NaCl, MgCl₂ κ.ά.). Η θερμότητα από την ηλιακή ακτινοβολία παγιδεύεται στα κατώτερα και πυκνότερα στρώματα της λίμνης (Βλ. Σχήμα 2.4.4). Η θερμοκρασία στα κατώτερα στρώματα μπορεί να φτάσει τους 93°C. Συνήθως ο πυθμένας της λίμνης καλύπτεται από μέλαν απορροφητικό υλικό για μεγιστοποίηση της απορρόφησης της ακτινοβολίας και για μείωση της πιθανότητας ρύπανσης του εδάφους. Η θερμότητα των κατωτέρων στρωμάτων απομακρύνεται με εναλλάκτη για παραγωγή θερμού νερού ή ηλεκτρισμού μέσω του οργανικού κύκλου Rankine (Organic Rankine Cycle - ORC), με συνολική απόδοση όμως μικρότερη από 2%. Οι λίμνες με μεμβράνες είναι παρόμοιου τύπου με τις λίμνες με άλατα, αλλά τα στρώματα διαχωρίζονται με λεπτές διαφανείς μεμβράνες.



Σχήμα 2.4.4: Σχηματικό διάγραμμα ηλιακής λίμνης με άλατα.

Κάποιες χώρες, όπως η Λιβύη για παράδειγμα, αξιοποιούν με αυτόν τον τόπο την ηλιακή ενέργεια για αφαλάτωση. Επιτυχημένο παράδειγμα ηλιακής λίμνης βρίσκεται και στην Ιταλία, στην τοποθεσία Margherita di Savoia στην Απουλία (Apulia). Η λίμνη έχει επιφάνεια 25000 m² και 5m βάθος. Αυτή παρέχει θερμότητα σε αποστακτήρα τύπου TVC δυναμικότητας 10 m³ νερού/ημέρα, ενώ μπορεί να λειτουργεί και ως μονάδα MED των 3 επιπέδων.

Τέλος, να σημειωθεί ότι στις τεχνικές έμμεσης ηλιακής αφαλάτωσης οι παραβολικοί συλλέκτες τύπου «σκάφης» και οι ηλιακές λίμνες αποτελούν τα πιο διαδεδομένα σχήματα παραγωγής θερμότητας.

2.4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά θερμικών ηλιακών συστημάτων στην αφαλάτωση

Όπως αναφέρει ο Loupasis (2002), υπάρχουν μια σειρά από σημαντικές τεχνικές παράμετροι στις μεθόδους έμμεσης ηλιακής αφαλάτωσης που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Είναι:

- ο **συντελεστής θερμικής απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη, η (collector efficiency)**: ο πιο σημαντικός συντελεστής για συλλέκτες όλων των τύπων - είναι το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε ωφέλιμη θερμότητα (Βλ. επόμενη σελίδα)
- το **ποσοστό της χρησιμοποιούμενης ηλιακής ακτινοβολίας**: όταν συμμετέχουν και άλλες μορφές ενέργειας στο σύστημα)
- ο **λόγος απόδοσης του αποστακτήρα (Gain Output Ratio, GOR or Performance Ratio, PR)**: δηλαδή τόνοι παραγόμενου νερού προς έναν τόνο ατμού τροφοδοσίας ή αλλιώς kg αποσταγμένου νερού ανά 2300 kJ θερμικής ενέργειας τροφοδοσίας (βλ. και παράγραφο 1.4.1 για MSF και MED)
- η **κατανάλωση βοηθητικής ηλεκτρικής ενέργειας**.

Αναφορικά με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος θερμικής ηλιακής αφαλάτωσης είναι προφανές ότι η μεγάλη ενεργειακή κατανάλωση προκύπτει λόγω της απαιτούμενης ενθαλπίας αλλαγής φάσης του νερού, όπως συμβαίνει άλλωστε σε όλες τις συσκευές θερμικών διεργασιών. Επιπλέον απαιτείται και μία υποβοηθητική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας για την κίνηση των αντλιών, η οποία μπορεί να προσφερθεί με φωτοβολταϊκά στοιχεία. Ακόμα, σημαντικές διατάξεις σε ένα σύστημα αφαλάτωσης αποτελούν οι αποθηκευτικές μονάδες που διατηρούν το νερό τροφοδοσίας στην κατάλληλη θερμοκρασία τις νυχτερινές ώρες ή κατά τη διάρκεια μιας συννεφιασμένης μέρας.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο για τους εξατμιστήρες τύπου MSF η λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες (άνω των 120°C) αυξάνει τον λόγο απόδοσης, αλλά και τον κίνδυνο δημιουργίας επικαθίσεων αλάτων και διάβρωσης των μεταλλικών επιφανειών. Από την άλλη, οι σύγχρονες συσκευές τύπου MED μπορούν να λειτουργούν σε θερμοκρασίες κοντά στους 70°C, οπότε οι παραπάνω κίνδυνοι κατά ένα μεγάλο ποσοστό εξαλείφονται.

Ο έλεγχος αυτών των διεργασιών απαιτεί ακρίβεια και ειδικά όσο αφορά στην εξισορρόπηση της εκτόνωσης (flash) στη μέθοδο MSF. Οι παραπάνω διεργασίες φαίνεται ότι είναι ασταθείς σε μικρής κλίμακας συστήματα. Γι' αυτό οι ειδικές συσκευές απόσταξης σχεδιάζονται για να παράγουν ποσότητες αφαλατωμένου νερού της τάξης των χιλιάδων κυβικών την ημέρα. Συμπερασματικά θα μπορούσε να λεχθεί,

ότι οι θερμικές μέθοδοι ηλιακής αφαλάτωσης δεν αποτελούν κάποια εξεζητημένη τεχνολογία. Υπάρχουν πολλοί διαθέσιμοι εξατμιστήρες-αποστακτήρες καθώς και ηλιακοί συλλέκτες υψηλής τεχνολογίας. Άρα το πρόβλημα δεν εντοπίζεται στην εξεύρεση των παραπάνω, αλλά στον κατάλληλο συνδυασμό τους. Οι μεγάλες απαιτήσεις σε παρεχόμενη ενέργεια και η αναγκαιότητα για την αποθήκευσή της αποτελούν τις κύριες αιτίες, που δε συναντώνται σήμερα πολλά δείγματα τέτοιας τεχνολογίας.

□ Συντελεστής θερμικής απόδοσης – Αντανάκλαση – Θερμοχωρητικότητα ηλιακού συλλέκτη

Μπορούμε να αναλύσουμε παραπέρα το συντελεστή θερμικής απόδοσης ενός ηλιακού συλλέκτη. Ο μαθηματικός τύπος του εν λόγω συντελεστή είναι ο λόγος της αποδιδόμενης θερμικής ενέργειας προς την καταναλισκόμενη ηλιακή ενέργεια (ακτινοβολία) και είναι αδιάστατος αριθμός [Peuser et al., 2002]. Είναι:

$$\eta = \eta_o - \frac{a_1(\theta_m - \theta_L)}{E_e} - \frac{a_2(\theta_m - \theta_L)^2}{E_e}, \quad \text{όπου: } \eta_o = \alpha \cdot \tau \cdot F'$$

Παρακάτω θα δώσουμε την ερμηνεία των συμβολισμών που εμφανίζονται στη σχέση και αφορούν έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη (Βλ. Σχήμα 2.4.5). Είναι:

$\eta_o = \alpha \cdot \tau \cdot F'$ = συντελεστής απόδοσης μηδενικών απωλειών ή οπτικός συντελεστής (για γωνία πρόσπτωσης $\Phi = 0^\circ$ και για μηδενική θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του απορροφητή και του περιβάλλοντος)

α = συντελεστής απορρόφησης του απορροφητή (absorber) (συνήθης τιμή: 0,90-0,96)

τ = συντελεστής εκπομπής του καλύμματος (cover) (συνήθης τιμή: 0,88-0,91)

F = συντελεστής απόδοσης του απορροφητή (συνήθης τιμή: 0,92-0,97)

a_1 = γραμμικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας [σε $W/m^2 \cdot K$]
(συνήθης τιμή: 1,2-4)

a_2 = τετραγωνικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας [σε $W/m^2 \cdot K^2$]
(συνήθης τιμή: 0,005-0,015)

θ_e = θερμοκρασία προσαγωγής του θερμικού ρευστού στον ηλιακό συλλέκτη [σε $^\circ C$]

θ_a = θερμοκρασία εξαγωγής του θερμικού ρευστού από τον ηλιακό συλλέκτη [σε $^\circ C$]

θ_m (ή $T_{\text{collector}}$) = $(\theta_e + \theta_a)/2$ = μέση τιμή της θερμοκρασίας του θερμικού ρευστού στον ηλιακό συλλέκτη [σε $^\circ C$]

θ_L (ή T_{amb}) = θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα [σε $^\circ C$]

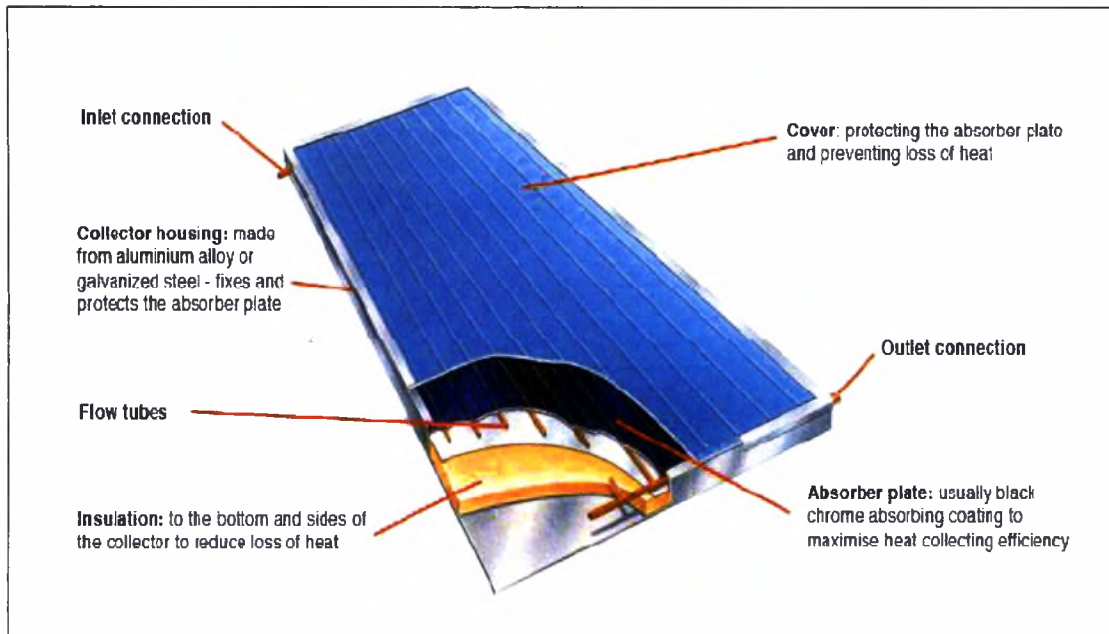
E_e = ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας [σε W/m^2].

Άλλοι συντελεστές:

$a_{\text{eff}} = a_1 + a_2 \cdot \Delta\theta$ = ενεργός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

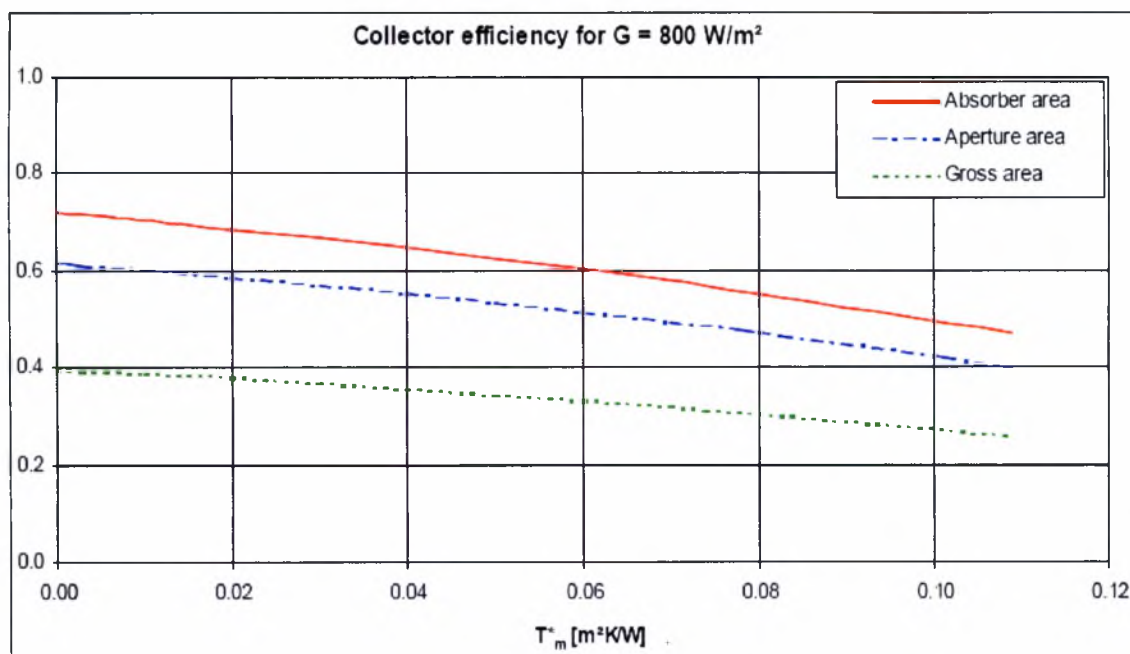
c = θερμοχωρητικότητα ηλιακού συλλέκτη [σε $\text{kJ/m}^2 \cdot \text{K}$]

$K(\Phi)$ = διόρθωση γωνίας πρόσπτωσης [αδιάστατο].



Σχήμα 2.4.5: Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης.

Η σύγκριση των διαφόρων τύπων συλλεκτών είναι γενικά προβληματική και όχι πάντα αξιόπιστη, γιατί υπάρχει μεγάλο εύρος τυποποιήσεων είτε σε εθνικό είτε σε διεθνές επίπεδο. Ωστόσο, υπάρχουν κάποιες γενικές τεχνικές που εφαρμόζονται, όπως είναι η χάραξη χαρακτηριστικών καμπυλών του συντελεστή θερμικής απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας, έχοντας εκ των προτέρων υπολογίσει τα η_0 , a_1 και a_2 από τα πειραματικά δεδομένα. Σε θεωρητικό επίπεδο οι εκθέσεις ελέγχου (*test reports*) πραγματοποιούνται με τη χάραξη καμπυλών που απεικονίζουν τη συμπεριφορά του συντελεστή (η) συναρτήσει του λόγου της θερμοκρασιακής διαφοράς προς την ηλιακή ένταση ($(T_{\text{collector}} - T_{\text{amb}})/E_g$, σε $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$). Ένα τυπικό παράδειγμα ελέγχου ηλιακού συλλέκτη απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4.6. Γενικά, ο συντελεστής απόδοσης είναι ανάλογος της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και αντιστρόφως ανάλογος της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του συλλέκτη και του περιβάλλοντος.



Σχήμα 2.4.6: Διάγραμμα χαρακτηριστικής καμπύλης συντελεστή απόδοσης ηλιακού συλλέκτη συναρτήσει του λόγου $T_{collector} - T_{amb}/E_g$ (εδώ το E_g συμβολίζεται ως G με τιμή $G=800 W/m^2$)
[Πηγή: Solartecnik Prufung Forschung]

Ο συντελεστής εκπομπής του καλύμματος, τ (transmission factor of the cover), εξαρτάται από τις ιδιότητες της γυάλινης επιφάνειας του συλλέκτη. Γενικά, όταν η γωνία πρόσπτωσης μιας ακτίνας στην επιφάνεια του συλλέκτη είναι $\Phi = 90^\circ$, τότε μόνο μια απειροελάχιστη ποσότητα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ανακλάται. Ενώ όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι περίπου $\Phi = 180^\circ$, τότε σχεδόν όλη η ακτινοβολία ανακλάται και η επιφάνεια του καλύμματος λειτουργεί ως καθρέπτης. Τέλος, η *θερμοχωρητικότητα του ηλιακού συλλέκτη*, c (thermal capacity of the collector), αποτελεί μέτρο της θερμοκρασιακής του αδράνειας, δηλαδή συμβολίζει την απόκρισή του στις αλλαγές της θερμοκρασίας. Οι μικρές τιμές του c είναι επιθυμητές στις χώρες της Κεντρικής Ευρώπης, όπου παρατηρούνται συχνές μεταβολές του καιρού.

2.4.2 Ηλιακή Αφαλάτωση με MSF

Είδαμε στις εισαγωγικές παραγράφους, ότι η μέθοδος της Πολυβάθμιας Εκτονωτικής Απόσταξης ή Εξάτμισης είναι η πιο διαδεδομένη και είχε εισαχθεί ήδη από τη δεκαετία του 1950. Σήμερα, παράγονται συνολικά στον κόσμο 10 εκατομμύρια τόνοι αφαλατωμένου νερού κάθε μέρα με τη συμβατική μέθοδο MSF. Τον τελευταίο καιρό έχουν εφαρμοστεί πολλές μονάδες αφαλάτωσης που συνδυάζουν την ηλιακή ενέργεια με τη μέθοδο MSF. Ο D. Block, ερευνητής του FSEC (Florida Solar Energy Center), απέδειξε ότι *ηλιακή αφαλάτωση με MSF μπορεί να δώσει 6 με 60 l/m^2 -ημέρα γλυκό νερό*, σε αντιδιαστολή με τους κοινούς ηλιακούς αποστακτήρες που δίνουν 3 με 4 l/m^2 -ημέρα γλυκό νερό.

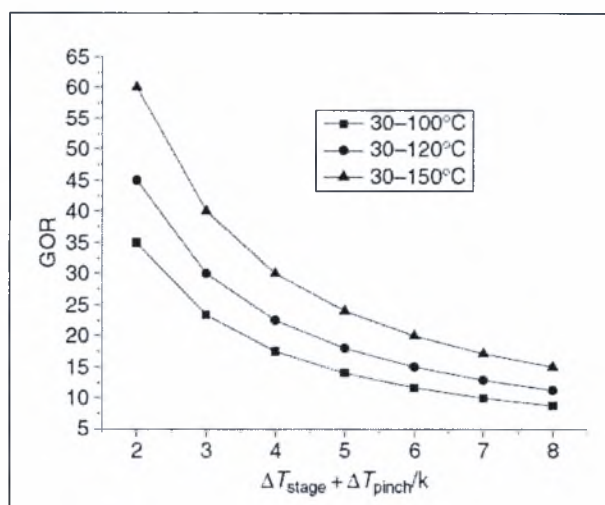
Η βελτιστοποίηση της χρήσης των παραβολικών συλλεκτών τύπου «σκάφης», ως πηγή θερμού νερού ή ατμού, έχει διερευνηθεί κυρίως στις Η.Π.Α.. Έχει δείχτει, ότι οι εν λόγω συλλέκτες βρίσκουν εμπορική χρήση σε μικρής κλίμακας μονάδες αφαλάτωσης. Μία τυπική μονάδα αυτού του τύπου αποτελείται από συλλέκτες που προσφέρουν ατμό σε αποστακτήρες MSF τριών βαθμίδων, ενεργειακής κατανάλωσης 48 kW και δυναμικότητας 450 lt/ημέρα γλυκού νερού. Οι συλλέκτες συνολικής επιφάνειας περίπου 45 m² στοιχίζουν σε τρέχουσα τιμή περίπου 10 000 \$ και προσφέρουν νερό με κόστος 7,9 \$/m³ [Qiblawey & Banat, 2008].

Μία άλλη ενδιαφέρουσα περίπτωση υβριδικής τεχνολογίας βρίσκεται στο El Paso των Η.Π.Α.. Συντονιστής του έργου ήταν το Πανεπιστήμιο του Τέξας (University of Texas). Το σύστημα απαρτίζεται από μία ηλιακή λίμνη (solar pond) έκτασης 3355 m² και μία μονάδα συμπαραγωγής ατμού - ηλεκτρισμού μέσω του κύκλου Rankine. Με αυτόν τον τρόπο λειτουργεί ένας MSF αποστακτήρας 24 βαθμίδων και δυναμικότητας 19 m³ φρέσκου νερού/ ημέρα.

Από το 1980 λειτουργεί στο S. Luis de la Paz του Μεξικού εγκατάσταση με επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες 194 m² και αντίστοιχους παραβολικούς 160 m². Αυτοί προσφέρουν θερμότητα σε μια μονάδα MSF δυναμικότητας 10 m³ νερού/ ημέρα και 10 αποστακτικών βαθμίδων.

Η ομάδα του Szacsnyay ερεύνησε τη λειτουργικότητα και παραγωγική ικανότητα του συστήματος «Autoflash» (μονάδα MSF με ηλιακή λίμνη) που κατασκεύασε η εταιρεία Atlantis. Εφαρμόστηκε υπολογιστική προσομοίωση και έγινε εξαγωγή πειραματικών δεδομένων από μια υπομονάδα που λειτούργησε για 9 χρόνια στην Ελβετία. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι θα μπορούσε να μειωθεί το κόστος του αφαλατωμένου νερού από 5,48 \$/m³ για μονάδα δυναμικότητας 15 m³/ημέρα σε 2,39 \$/m³ για μονάδα δυναμικότητας 300 m³/ημέρα [Qiblawey & Banat, 2008].

Στην εργασία των Hou κ.α. (2008) παρουσιάζεται η προσπάθεια βελτιστοποίησης της μεθόδου MSF με ηλιακούς συλλέκτες. Χρησιμοποιείται μια γραφική-υπολογιστική μέθοδος (pinch technology) στην οποία ενσωματώνονται τεχνικοί και οικονομικοί δείκτες απόδοσης του συστήματος. Η τεχνική του *pinch point* βασίζεται σε δεδομένα θερμοδυναμικής, όπου λαμβάνονται υπόψη τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας για κάθε βαθμίδα εξάτμισης. Αφού έγινε μια εκτενής ανάλυση των παραπάνω δεδομένων με υπολογιστικό κώδικα και γραφικές παραστάσεις, προσδιορίζεται η ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια, καθώς και αυτή που ανακτάται ή αποβάλλεται, και εκτιμάται ο βαθμός απόδοσης του αποστακτήρα (GOR), όπως φαίνεται στο ενδεικτικό Σχήμα 2.4.7. Μελετήθηκαν τρεις περιπτώσεις: στην πρώτη, το αποσταγμένο νερό δεν εισαγόταν σε κάθε βαθμίδα, στη δεύτερη το αποσταγμένο νερό εισαγόταν σε κάθε βαθμίδα και τέλος, στην τρίτη περίπτωση, το νερό επανεισάγονταν κάθε 5 βαθμίδες. Για θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας από 30 μέχρι 100°C προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα: στην πρώτη περίπτωση υπολογίστηκε βαθμός GOR περίπου 17,5, ενώ στη δεύτερη και τρίτη βαθμίδα λήφθηκε βαθμός GOR περίπου 9. Τα συμπεράσματα της έρευνας έδειξαν ότι για να ενισχυθεί ο βαθμός GOR απαιτείται μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας, να μην επανεισάγεται το αποσταγμένο νερό σε κάθε βαθμίδα και να διατηρείται μία κοινή διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ θερμού και ψυχρού νερού σε κάθε βαθμίδα (μεταβλητές ΔT_{stage} και ΔT_{pinch}).



Σχήμα 2.4.7: Γραφική απεικόνιση της συμπεριφοράς του βαθμού απόδοσης GOR συναρτήσει των διαφορών θερμοκρασίας. [Πηγή: Hou et al., 2008]

□ Θερμικές διεργασίες αφαλάτωσης μέσω ηλιακών λιμνών

Όπως επισημάνθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, εκτεταμένη εφαρμογή των ηλιακών λιμνών για θερμική αφαλάτωση λαμβάνει χώρα στη Λιβύη, ενώ ένα επιτυχημένο παράδειγμα ηλιακής λίμνης βρίσκεται, επίσης, στην Ιταλία, στην τοποθεσία Margherita di Savoia στην Απουλία. Η διερεύνηση των δυνατοτήτων αυτής της τεχνικής έχει γίνει στο παρελθόν από τους Tabor (1975), Pleimat και Howe (1982, 1989), Guy και Ho (1981) και Posnansky (1987). Επιπλέον, στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι στο παρελθόν επιτυχημένη εφαρμογή πραγματοποιήθηκε στο Eip Booker του Ισραήλ.

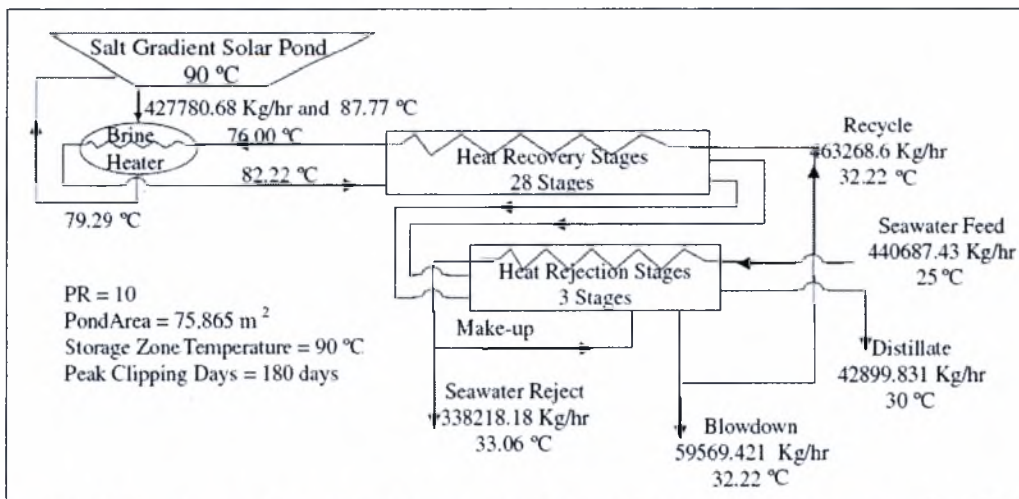
Ο Agha (2008) μελέτησε τις ενεργειακές δυνατότητες μιας ηλιακής λίμνης με άλατα (SGSP) για θερμική αφαλάτωση μέσω MSF στην Τρίπολη της Λιβύης και πραγματοποίησε εκτενή οικονομική ανάλυση. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος που μελετήθηκε φαίνονται στον Πίνακα 2.4.1. Αποδείχθηκε ότι η αφαλάτωση θα μπορεί να πραγματοποιηθεί με *μόνη ενεργειακή πηγή την ηλιακή λίμνη*.

Για τις ανάγκες της μελέτης δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα προσομοίωσης H/Y της θερμικής συμπεριφοράς του συστήματος (υπό μεταβατικές συνθήκες λειτουργίας) και των οικονομοτεχνικών του χαρακτηριστικών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι απαιτείται μεγάλη επιφάνεια γης για να καλύψει τη λίμνη (περίπου 73 με 185 m² ανά 1 m³ αποσταγμένου νερού/ ημέρα) και ότι το εμβαδόν θα ποικίλει ανάλογα με τη θερμοκρασία του στρώματος ενεργειακής αποθήκευσης της λίμνης (κατώτατο στρώμα συναγωγής - LCZ), το λόγο απόδοσης του αποστακτήρα (GOR) και τις ημέρες ενεργειακού πλεονάσματος (pick clipping days). Αποδείχθηκε ότι θα υπάρχουν περίπου 166 μέρες ενεργειακού πλεονάσματος ετησίως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και ότι η θερμότητα που θα παράγεται θα πρέπει αναγκαστικά να αποβάλλεται στο περιβάλλον. Αυτό οδηγεί σε μείωση της ωφέλιμης ενέργειας και αυξάνει το κόστος της θερμικής ενέργειας. Επίσης, η θερμοκρασία του στρώματος ενεργειακής αποθήκευσης της λίμνης (storage zone temperature- SZT) επιδρά στο κόστος του αφαλατωμένου νερού. Η SZT εξαρτάται από το λόγο απόδοσης: για GOR= 6 η βέλτιστη θερμοκρασία είναι 70°C, ενώ για GOR>6 απαιτείται θερμοκρασία >70°C. Επίσης, δεδομένου ότι η σκληρότητα του αφαλατωμένου νερού

Παράμετροι για την ηλιακή λίμνη με άλατα (SGSP)	Παράμετροι για τη μονάδα αφαλάτωσης MSF
Πάχος ανώτατου στρώματος συναγωγής=0,2 m	Παραγωγική ικανότητα= 1000 m ³ αποσταγμένου νερού/ημέρα
Πάχος μεσαίου στρώματος= 1,3 m	Θερμοκρασία θαλασσινού νερού τροφοδοσίας= 35 °C
Πάχος κατώτατου στρώματος συναγωγής= 1,0 m	Θερμοκρασία νερού ψύξης= 30 °C
Ανακλασιμότητα πυθμένα λίμνης= 0	Μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση στερεών στη συσκευή= 70000 ppm
Αλατότητα κατώτατου στρώματος συναγωγής= 22%	Μέγιστη συγκέντρωση στερεών θαλασσινού νερού= 35000 ppm
Αλατότητα ανώτατου στρώματος συναγωγής= 3,5%	Συντελεστής απόδοσης συμπυκνωτή= 0,8
-	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του προθερμαντήρα= 2 kW/m ² .°C
-	Συντελεστής απόδοσης προθερμαντήρα= 0,75
-	Επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας ανά βαθμίδα εξατμιστήρα= 40 m ²

Πίνακας 2.4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά της προτεινόμενης ηλιακής λίμνης και μονάδας MSF για την περιοχή της Τρίπολης στη Λιβύη. [Πηγή: Agha, 2008]

θα είναι πολύ χαμηλή (25 ppm), προτείνεται η ανάμειξή του με υφάλμυρο νερό χαμηλής αλατότητας (1000-1500 ppm), ώστε να μειωθεί το κόστος του νερού (0,81-3,52 \$/m³). Το συνολικό κόστος του νερού, βέβαια, εξαρτάται και από το κόστος του χρήματος, το οποίο αναμένεται να μειωθεί με κρατικές επιχορηγήσεις, φορολογικές ελαφρύνσεις ή στήριξη από διεθνή χρηματοδοτικά προγράμματα. Τέλος, για να είναι ανταγωνιστικό το σχήμα αφαλάτωσης SP/MSF χρειάζεται να λειτουργεί με SZT= 90°C, λόγω απόδοσης, GOR= 9 και προεξοφλητικό επιτόκιο 6%, συγκρινόμενο με την πιο αποδοτική μονάδα αφαλάτωσης (μονάδα συμπαραγωγής ατμού και αποσταγμένου νερού μέσω ορυκτού καυσίμου) με το κόστος καυσίμου να είναι 209,26 \$/τόνο.



Σχήμα 2.4.8: Διάγραμμα ροής της προτεινόμενης διεργασίας αφαλάτωσης με το σχήμα SP/MSF για GOR= 10 και SZT= 90°C στην Τρίπολη της Λιβύης. [Πηγή: Agha., 2008]

2.4.3 Ηλιακή Αφαλάτωση με MED

Η μέθοδος της Απόσταξης Πολλαπλού Φαινομένου είναι μία πολλά υποσχόμενη τεχνική στη συμβατική αφαλάτωση. Η προσαρμογή της μεθόδου με την ηλιακή ενέργεια αποδεικνύεται τον τελευταίο καιρό αρκετά επιτυχημένη και μάλλον οικονομικά εφαρμόσιμη.

Όπως διαβάζουμε σε εκθέσεις του Buross O. K. ή του Qiblawey H. M. και άλλων, αξιόλογο παράδειγμα τέτοιας τεχνολογίας ήταν η μονάδα Απόσταξης Πολλαπλού Φαινομένου (MED) στο Άμπου Ντάμπι (Abu Dhabi) των Η.Α.Ε., που λειτούργησε για πρώτη φορά το 1985. Ο βρασμός του νερού επιτυγχάνονταν με αποστακτικές MED 18 επιπέδων (ή «φαινομένων») όπου λάμβαναν θερμότητα από συλλέκτες με σωλήνες κενού επιφάνειας 1862 m^2 . Οι ηλιακοί συλλέκτες λειτουργούσαν με εργαζόμενο μέσο το νερό. Υπήρχε συσσωρευτής θερμότητας με χωρητικότητα 300 m^3 . Η ειδική κατανάλωση ενέργειας ήταν $43,8 \text{ kcal/kg}$ και ο λόγος απόδοσης του βραστήρα 12,4. Η μονάδα μπορούσε να πραγματοποιεί αφαλάτωση νερού με συνολικά διαλυμένα άλατα της τάξης των 55000 ppm . Η δυναμικότητα του εργοστασίου ήταν $80 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$, ενώ η δυναμικότητα σχεδιασμού (δηλαδή, η μέγιστη παραγωγική του ικανότητα) ήταν $120 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$.

Οι El-Nashar και Samad (1998), μετά από 13 χρόνια παρακολούθησης της παραπάνω παραγωγικής διαδικασίας, εξέδωσαν τα αποτελέσματα των ερευνών τους. Παρατήρησαν ότι το κύριο πρόβλημα του συνολικού συστήματος ήταν η συντήρηση των αντλιών. Ενώ η απομάκρυνση του αλμόλοιπου ήταν μία απόλυτα αναγκαία προϋπόθεση για τη βέλτιστη ροή της παραγωγής.



Εικόνα 2.4.1: Μονάδα MED με ηλιακούς συλλέκτες τύπου evacuated-tube collectors στα Η.Α.Ε.. [Πηγή: Buross O.K.]

Μία μονάδα MED 3 βαθμίδων που είχε ως πηγή θερμότητας ηλιακούς συλλέκτες και λειτουργούσε με ηλεκτρισμό από φωτοβολταϊκά στοιχεία έγινε αντικείμενο πειραματικής έρευνας στο Πανεπιστήμιο Al Azhar στη Γάζα της Παλαιστίνης. Ο μέσος ρυθμός παραγωγής γλυκού νερού ήταν $6 \text{ με } 13 \text{ lt/m}^2\text{-ημέρα}$ [Qiblawey & Banat, 2008].

Ο Thomas (1997), από την άλλη, εκφράζει κάποιον προβληματισμό σχετικά με την έμμεση ηλιακή αφαλάτωση. Αναφέρει τις δυσκολίες που αντιμετώπισαν οι πειραματικές διατάξεις στο Κουβέιτ λόγω της απρόβλεπτης συμπεριφοράς της

ηλιακής ακτινοβολίας. Γενικά, συμπεραίνει ότι ο συνδυασμός της ηλιακής ενέργειας και των μεθόδων MED και MSF δεν προσφέρει ακόμα αξιόπιστα αποτελέσματα.

Τέλος, στην τεχνική έκθεση της ομάδας Fiorenza (2003) γίνεται μία εκτίμηση κόστους του αφαλατωμένου ύδατος από μονάδες MED με ηλιακούς συλλέκτες. Επιβεβαιώνεται η άποψη ότι όταν αυξάνεται η δυναμικότητα ενός εργοστασίου το κόστος αφαλάτωσης μειώνεται, όχι όμως θεαματικά. Ως παράδειγμα δείχνουμε την περίπτωση μιας μονάδας 500 m³/ημέρα με κόστος 3,2 \$/m³ και μιας άλλης με 5 000 m³/ημέρα και κόστος 2 \$/m³.

Στην επόμενη παράγραφο θα γίνει αποκλειστική αναφορά στο ευρωπαϊκό πρόγραμμα AQUASOL, γιατί παρουσιάζει κάποια ιδιαίτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τα άλλα πειράματα ηλιακής θερμικής αφαλάτωσης με αποστακτήρα MED.

2.4.4 Το Πρόγραμμα AQUASOL στη Plataforma Solar de Almeria

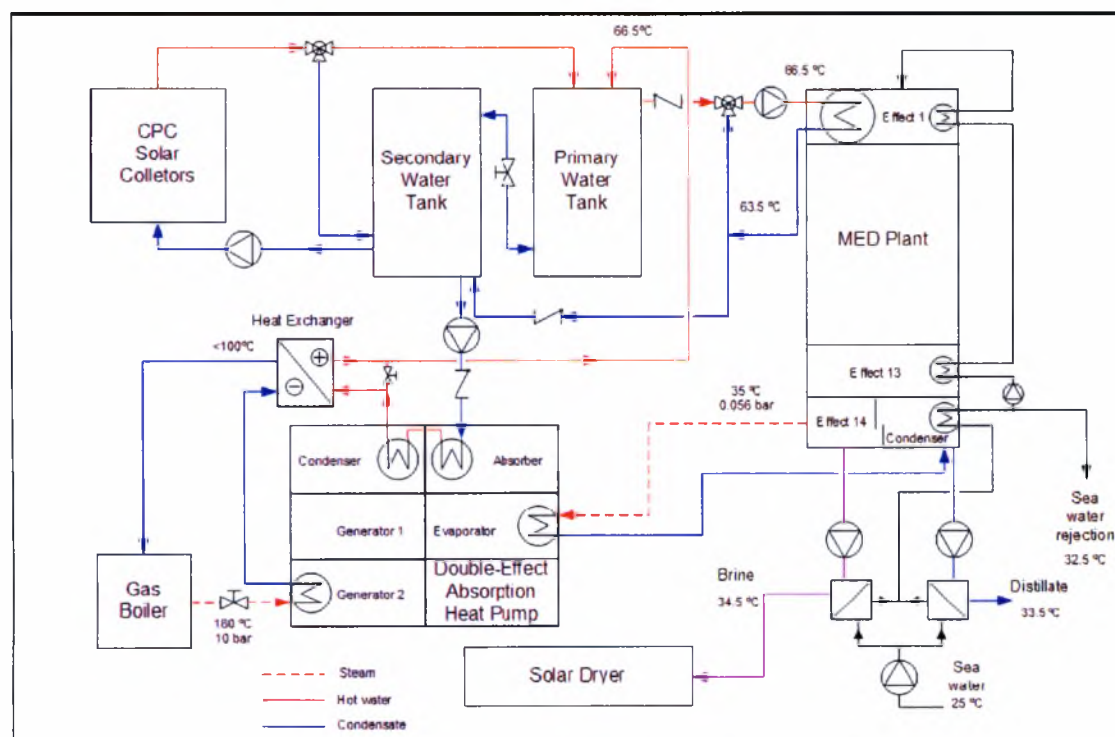
Από το 2002 έως το 2006 πραγματοποιήθηκε με πολλές προσδοκίες στις εγκαταστάσεις της Plataforma Solar de Almeria στην Ισπανία το πρόγραμμα AQUASOL. Συμμετείχαν φορείς από την Ισπανία, την Πορτογαλία, τη Γαλλία και την Ελλάδα (Ε. Μ. Πολυτεχνείο, Hellenic Saltworks S.A.). Ο πλήρης τίτλος του προγράμματος, όπως εγκρίθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (European Commission), ήταν: «Enhanced Zero Discharge Seawater Desalination using Hybrid Solar Technology». Οι καινοτομίες του πειράματος ήταν: (i) η ενσωμάτωση ενός νέου στατικού ηλιακού συλλέκτη, CPC (Compound Parabolic Concentrator) στην παραγωγή θερμότητας χαμηλής ενθαλπίας (60°C με 90°C), (ii) η ανάπτυξη μιας νέας αντλίας θερμότητας βασισμένης στην απορρόφηση διπλού φαινομένου (Double-effect Absorption Heat Pump) και (iii) η μείωση των αποβλήτων σε μηδενικό επίπεδο μέσω της ανάκτησης του άλατος από τα αλμόλουπα. Ωστόσο, το πιο σημαντικό επίτευγμα, ήταν ο σχεδόν διπλασιασμός του συνολικού θερμικού συντελεστή του συστήματος. Το τελευταίο γεγονός μπορεί να καταστήσει τον συγκεκριμένο τροποποιημένο αποστακτήρα MED πραγματικά ανταγωνιστικό μεταξύ των άλλων τεχνολογιών αφαλάτωσης [Alarcon-Padilla et al., 2008]. Κατά τη τετραετή διάρκεια του πειράματος δεν παρουσιάστηκαν ιδιαίτερα προβλήματα και συνακόλουθα τα αποτελέσματα ήταν αξιόπιστα. Κλείνοντας την εισαγωγή, να σημειωθεί ότι, η περιοχή της Almeria είναι γνωστή για τη μεγαλύτερη έκταση και συγκέντρωση καλλιεργειών θερμοκηπίου στην Ευρώπη. Αυτό σημαίνει ότι η αξιοποίηση των ανερχόμενων σχημάτων αφαλάτωσης, μπορεί να δώσει ακόμη μεγαλύτερη ώθηση στην τοπική γεωργική οικονομία αλλά και στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου.

□ Περιγραφή της παραγωγικής διαδικασίας

Η τελική εγκατάσταση της AQUASOL περιελάμβανε: (i) μια μονάδα MED 14 κελιών με κατακόρυφη διάταξη, (ii) μία εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών συνολικής επιφάνειας 500 m², (iii) ένα θερμοαποθηκευτικό σύστημα νερού συνολικής χωρητικότητας 24 m³, (iv) μία νεοεισαχθείσα αντλία θερμότητας που λειτουργούσε με βάση την απορρόφηση διπλού φαινομένου (εργαζόμενο μέσο: LiBr – H₂O), (v)

έναν υποβοηθητικό λέβητα αερίου (smoke-tube gas boiler) για να εξασφαλίζει την 24ωρη λειτουργία του συστήματος και (ν) έναν εξελιγμένο ηλιακό ξηραντήρα της απόβλητης άλμης (για να ελαχιστοποιηθεί ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος).

Στο Σχήμα 2.4.9, απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της παραγωγικής διαδικασίας. Το σύστημα μπορούσε να λειτουργεί μόνο με ηλιακή ενέργεια (solar-only mode) ή μόνο με ορυκτό καύσιμο προπανίου (fossil-only mode). Ωστόσο, υπήρχε και η δυνατότητα υβριδικής λειτουργίας (hybrid mode) με αέριο προπανίου και ηλιακή ενέργεια. Το νερό ως εργαζόμενο μέσο του συστήματος θερμαίνονταν καθώς κυκλοφορούσε μέσα στους ηλιακούς συλλέκτες. Κατά συνέπεια, η ηλιακή ενέργεια μετατρέπονταν σε θερμική υπό μορφή αισθητής θερμότητας του νερού και αποθηκεύονταν στις δύο δεξαμενές. Από εδώ μεταφέρονταν στην αποστακτική μονάδα (solar-only mode). Όταν δεν υπήρχε ηλιακή ενέργεια, ξεκινούσε η λειτουργία του λέβητα αερίου για να τροφοδοτήσει την αντλία θερμότητας. Η τελευταία τροφοδοτούνταν επιπλέον από την τελευταία βαθμίδα (14^η) του αποστακτήρα MED με θερμό ατμό χαμηλής ενθαλπίας (θερμοκρασίας 35°C και πίεσης 0,056 bar). Με τα δύο αυτά ρεύματα εσόδου, η αντλία θερμότητας μπορούσε να «ανεβάσει» τη θερμοκρασία του νερού εξόδου της 1^{ης} βαθμίδας του αποστακτήρα από τους 63,3 °C στους 66,5 °C και να το επανεισαγάγει στην αποστακτική μονάδα (fossil-only mode). Στην υβριδική λειτουργία συνδυάζονταν οι δύο παραπάνω περιπτώσεις.



Σχήμα 2.4.9: Σχηματικό διάγραμμα της παραγωγικής διαδικασίας της μονάδας αφαλάτωσης του AQUASOL Project στην Plataforma Solar de Almeria. [Πηγή: Blanco & Alarcon]

Αποστακτική μονάδα PSA MED: Η αποστακτική μονάδα (κατασκευής 1987) είχε κατακόρυφη διάταξη με την πρώτη βαθμίδα να βρίσκεται στην κορυφή. Η πρώτη βαθμίδα, που στον αρχικό σχεδιασμό λειτουργούσε με κορεσμένο ατμό σε υποπίεση (70°C, 0,31 bar), αντικαταστάθηκε, για τις ανάγκες του πειράματος, με μία νέα

βαθμίδα που λειτουργούσε πλέον με θερμό νερό απευθείας από τις δεξαμενές αποθήκευσης. Η νέα βαθμίδα ήταν ένας εναλλάκτης θερμότητας με οριζόντιους αυλούς, στους οποίους ψεκάζονταν το νερό τροφοδοσίας (Βλ. Εικόνα 2.4.2).

Ηλιακοί συλλέκτες: Υπήρχαν 252 στατικοί συλλέκτες (τύπου CPC Ao Sol 1.12x) σε ομάδες των 9 και συνολικής επιφάνειας 500 m² (Βλ. Εικόνα 2.4.3). Ήταν τοποθετημένοι υπό κλίση 35° με προσανατολισμό «ανατολή-δύση» (για μεγιστοποίηση της ενεργειακής απορρόφησης).

Θερμοαποθηκευτικό σύστημα: Είχε συνολική χωρητικότητα 24 m³ και αποτελούνταν από δύο δεξαμενές με νερό. Αυτό επέτρεπε στον λέβητα αερίου και στην αντλία θερμότητας να ανακτούν την ονομαστική τους ισχύ σε περίπτωση ανεπάρκειας της ηλιακής ακτινοβολίας. Το υλικό των δεξαμενών ήταν ανθρακοχάλυβας για προστασία από τη διάβρωση του θερμού νερού.



Εικόνα 2.4.2: Αριστερά η μονάδα PSA MED κατακόρυφης διάταξης και δεξιά η δέσμη με τους οριζόντιους αυλούς που αντικατέστησαν την πρώτη βαθμίδα (effect).
[Πηγή: Blanco & Alarcon]

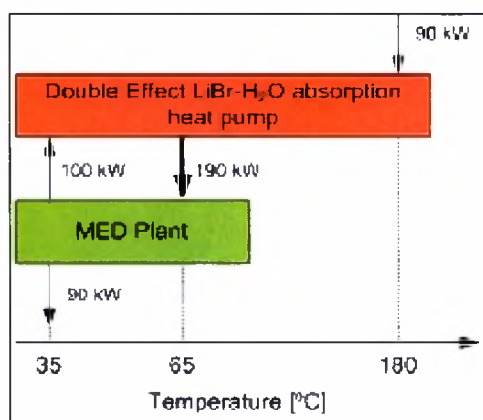
Feedwater flow	8 m ³ /h
Brine reject	5 m ³ /h
Distillate production	3 m ³ /h
Seawater flow at condenser:	
at 10°C:	8 m ³ /h
at 25°C:	20 m ³ /h
Output salinity	5 ppm TDS
Number of cells	14
Heat source energy consumption	190 kW
Performance Ratio	≈9
Vacuum system	Hydroejectors (seawater at 3 bar)
Top brine temperature	70°C
Condenser temperature	35°C

Πίνακας 2.4.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά της αποστακτικής μονάδας PSA MED.
[Πηγή: Blanco & Alarcon]



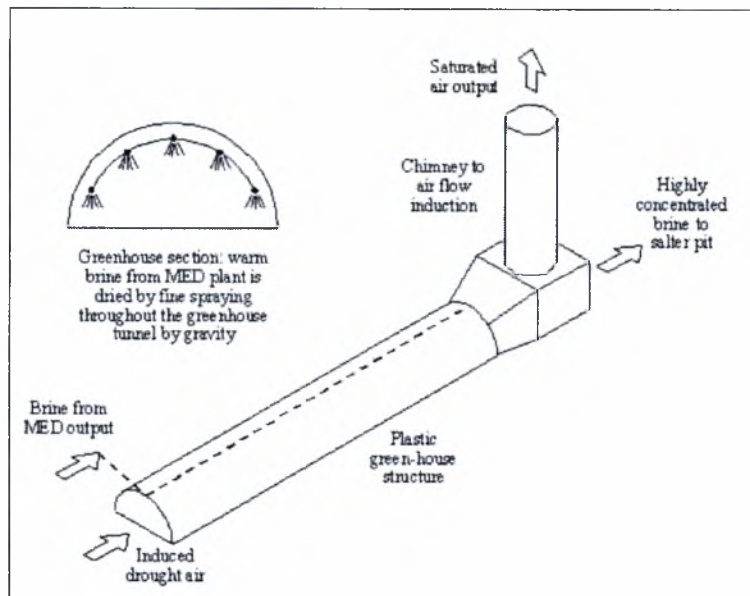
Εικόνα 2.4.3: Η εγκατάσταση με τους ηλιακούς συλλέκτες επιφάνειας 500 m².
[Πηγή: Blanco & Alarcon]

Αντλία θερμότητας: Η καινοτόμα αντλία θερμότητας τύπου DEAHP (Double Effect Absorption Heat Pump) παρέχει 190 kW θερμικής ενέργειας στους 65°C στη μονάδα MED που κατένεμε, με τη σειρά της, την ποσότητα αυτή στις 14 αποστακτικές βαθμίδες. Η διεργασία της αφαλάτωσης χρησιμοποιούσε, όμως, μόνο τα 90 kW, ενώ τα υπόλοιπα 100 kW ανακτώνταν από την αντλία σε θερμοκρασία 35°C. Έτσι, η μονάδα MED αντί να συμπυκνώνει το θερμό ατμό των 35°C (σε πίεση 0,056 bar) που παράγονταν στη 14^η βαθμίδα με το νερό τροφοδοσίας, το οδηγούσε με ανατροφοδότηση πίσω στην αντλία (Βλ. Σχήματα 2.4.9, 2.4.10).



Σχήμα 2.4.10: Ενεργειακό ισοζύγιο της αντλίας θερμότητας DEAHP.
[Πηγή: Blanco & Alarcon]

Ηλιακός ξηραντήρας αλμόλοιπου: Στόχος ήταν να δημιουργηθούν οι κατάλληλες συνθήκες, ώστε το αλμόλοιπο να φτάσει σε σημείο κορεσμού ως προς τη συγκέντρωση άλατος CaCO₃ (16°Be, Κλίμακα Baume). Υπήρχαν 4 αγωγοί (τύπου φυσούνας) διαστάσεων 4m x 17m, στους οποίους κυκλοφορούσε ο ατμός του αλμόλοιπου. Κάθε αγωγός αποτελούνταν από πλαστικό κάλυμμα. Στην αρχή υπήρχε ένα τμήμα προθέρμανσης και στο τέλος μία ηλιακή καμινάδα για προσαγωγή του ατμοσφαιρικού αέρα στον αγωγό. Υπολογιστικά προγράμματα προέβλεψαν έναν υπερδιπλασιασμό στον συντελεστή απόδοσης (~ 2,5) σε σχέση με την παραδοσιακή μέθοδο (ξηράνση του αλμόλοιπου σε ανοιχτή λίμνη).



Σχήμα 2.4.11: Διάφορες όψεις από τον ηλιακό ξηραντήρα του AQUASOL. [Πηγή: Blanco et al.]

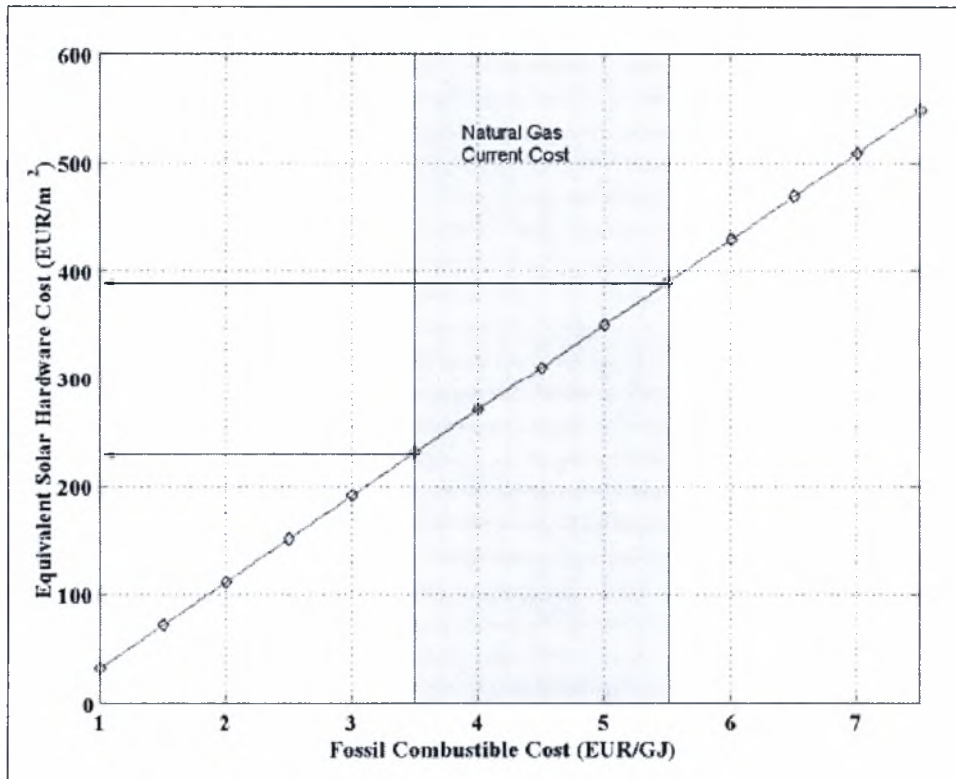
□ Εξαγωγή αποτελεσμάτων και ανάλυση κόστους

Η θερμική απόδοση των ηλιακών συλλεκτών εκτιμήθηκε σε 48% (δηλαδή, η παρεχόμενη θερμική ισχύς δια της συνολικής που απορροφάται από την ηλιακή ακτινοβολία), ενώ η αντίστοιχη θεωρητική εκτιμήθηκε ότι ήταν 54%. Ο ονομαστικός λόγος απόδοσης του αποστακτήρα ήταν πάνω από 9, ενώ η αντλία DEAHP (με συντελεστή απόδοσης COP= 1,15 για 30% φορτίο και COP= 1,22 για 100% φορτίο) κατάφερε να αυξήσει κατά 100% το συνολικό συντελεστή θερμικής απόδοσης.

Το παραπάνω γεγονός, όπως επισημάνθηκε και στην αρχή της παραγράφου, είναι ιδιαίτερα σημαντικό και μπορεί να καταστήσει την εξεταζόμενη μέθοδο εμπορικά ανταγωνιστική. Ωστόσο, αυτό δεν μπορεί να θεωρηθεί ως δεδομένο. Σήμερα, η ηλιακή ενέργεια δεν μπορεί να ανταγωνιστεί -τουλάχιστον ακόμα- με ίσους όρους τα ορυκτά καύσιμα. Για να γίνει κάτι τέτοιο, ειδικά στην προκειμένη υβριδική περίπτωση, είναι απαραίτητο να μειωθεί η επίδραση του κόστους εξοπλισμού των ηλιακών συλλεκτών στην τελική τιμή του νερού αφαλάτωσης. Ο El-Nashar υπολόγισε ότι μία μικρή μονάδα MED που λειτουργεί με 100% ηλιακή θερμότητα μπορεί δώσει απόσταγμα νερού με κόστος κοντά στο αντίστοιχο της συμβατικής MED, μόνο αν το συνολικό κόστος του ηλιακού συλλέκτη είναι 227 Euro/m² (δεδομένου ότι το ενεργειακό κόστος του ορυκτού καυσίμου είναι 11 Euro/GJ).

Στο Σχήμα 2.4.12 απεικονίζεται μία συνάρτηση κόστους, με την οποία μπορούμε να υπολογίσουμε το ισοδύναμο κόστος επιφάνειας ηλιακού συλλέκτη ανά m² για ένα υβριδικό σύστημα, με δεδομένο την τιμή του ορυκτού καυσίμου ανά GJ. Ο μακροπρόθεσμος (στρατηγικός) στόχος του προγράμματος AQUASOL είναι να προσεγγίσει τις τιμές της συνάρτησης. Δηλαδή, αν το συνολικό κόστος των ηλιακών συλλεκτών (υποθέτοντας μεγάλη ηλιακή εγκατάσταση) σε μία υβριδική μονάδα (50% ηλιακή ενέργεια - 50% φυσικό αέριο) κυμαίνονταν μεταξύ 230-390 Euro/m², τότε πραγματικά θα επιτυγάνονταν παραγωγή πόσιμου νερού με τιμές κόστους όπως σε

μία συμβατική μονάδα MED [Blanco et al.]. Τέλος, οι Tzen και Moris (2003) εκτίμησαν ότι το κόστος του αφαλατωμένου νερού στην Plataforma Solar de Almeria είναι $3,5 \text{ US\$/m}^3$.



Σχήμα 2.4.12: Συνολικό κόστος εξοπλισμού ηλιακών συλλεκτών σε ένα υβριδικό σύστημα (50% ορυκτό καύσιμο-50% ηλιακή ενέργεια) συναρτήσει του κόστους ενεργειακής κατανάλωσης ορυκτού καυσίμου, για να επιτευχθεί το ίδιο κόστος αφαλάτωσης με μία συμβατική μονάδα MED. [Πηγή: Blanco et al.]

2.4.5 Παραδείγματα ανάλυσης κόστους για έμμεση ηλιακή αφαλάτωση

Παρακάτω θα περιγραφούν εν συντομία μερικά παραδείγματα ανάλυσης κόστους σχετικά με επενδύσεις σε εγκαταστάσεις έμμεσης ηλιακής αφαλάτωσης. Οι Garcia-Rodriguez και Gomez-Camacho (1999) στηριζόμενοι σε ερευνητικά αποτελέσματα προγενέστερων μελετών εξέδωσαν κάποια στοιχεία προκαταρκτικής οικονομοτεχνικής μελέτης για τέτοιου είδους συστήματα. Η ανάλυση ευστάθειας κόστους αφορούσε τους εξής συνδυασμούς υβριδικών συστημάτων: (i) συνδεδεμένοι με μονάδα MED ηλιακοί παραβολικοί συλλέκτες τύπου «σκάφης» (PTC) που παράγουν ατμού χρήσης (direct steam generation-DSG) (μέσω θαλασσινού νερού, μέσω γλυκού νερού ή μέσω αλμόλοιπου) και (ii) συνδεδεμένοι με μονάδα MSF ηλιακοί παραβολικοί συλλέκτες που είτε θερμαίνουν αλμόλοιπο είτε παράγουν ατμό από αλμόλοιπο. Όλες οι μονάδες υποτέθηκε ότι λειτουργούν με ισχύ από ηλιακή ενέργεια και ορυκτό καύσιμο σε αναλογία 50%-50%.

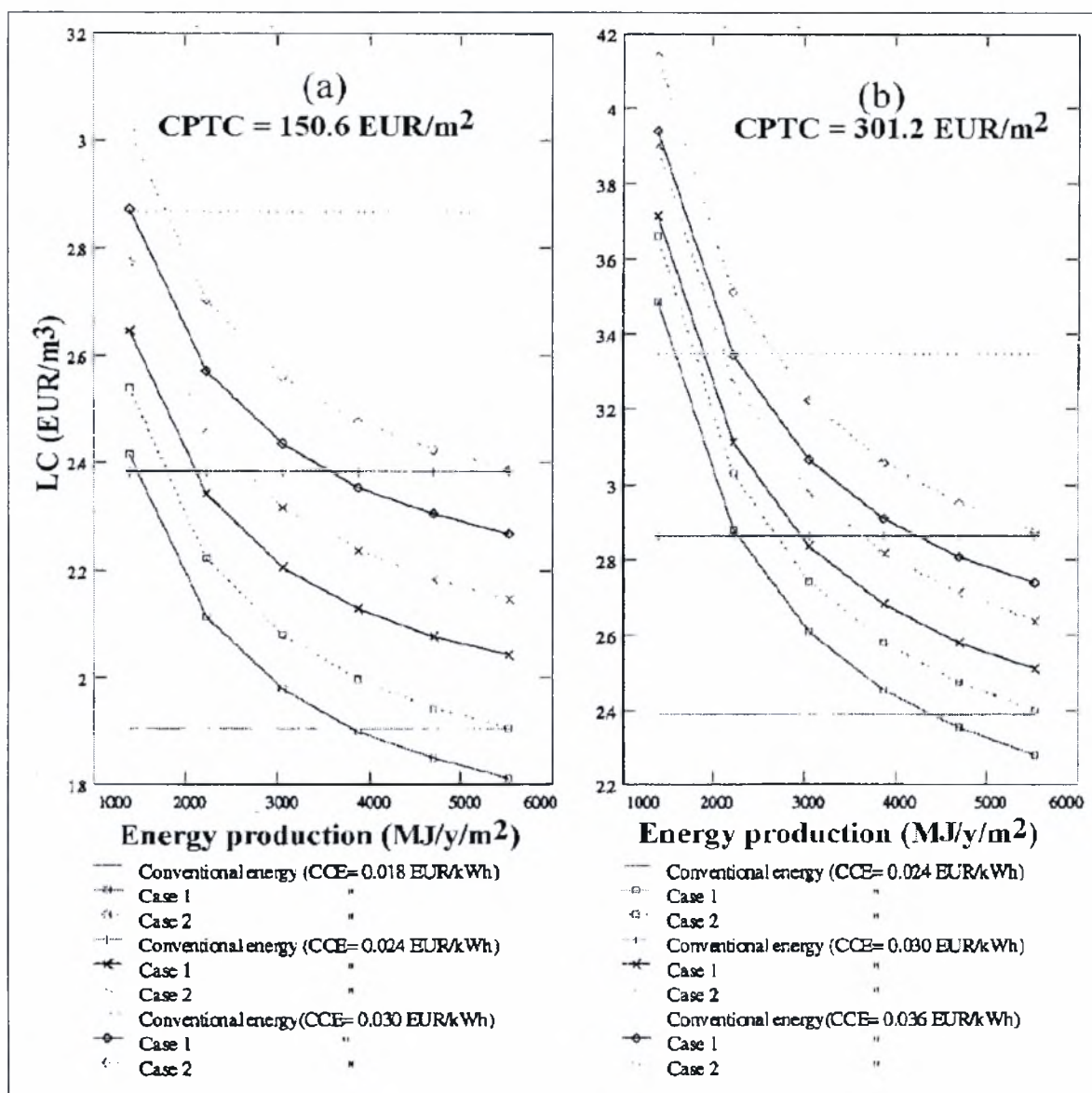
Οι παράμετροι που λήφθηκαν υπόψη για να υπολογιστεί το κόστος παραγωγής ή αλλιώς η καθαρή παρούσα αξία (levelized cost – LC / present value) του αφαλατωμένου νερού ήταν τα εξής: (i) επιτόκιο δανεισμού, 3%, (ii) πληθωρισμός, 2%, (iii) κύκλος ζωής, 20 έτη, (iv) χρήση συστήματος απόσταξης κατά 95%, (v) ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης (O&M), 9 Euro/m² ηλιακού συλλέκτη, (vi) μηδενικό κόστος χρήσης γης, (vii) συντελεστής απόδοσης αποστακτήρα για τις μονάδες MED και MSF, GOR= 10.

Στη συνέχεια ορίζεται η μονάδα αφαλάτωσης MED με δυναμικότητα 2400 m³/ημέρα αποσταγμένου νερού (υποβοηθούμενη κατά 50% από ηλιακούς συλλέκτες παροχής ισχύος 2,76 GJ/έτος·m² συλλέκτη). Προκύπτουν τα στοιχεία που φαίνονται στον Πίνακα 2.4.3. Ο πίνακας απεικονίζει την τιμή που πρέπει να έχουν οι ηλιακοί συλλέκτες στην παραπάνω μονάδα αφαλάτωσης συναρτήσει του κόστους της θερμικής ενέργειας, ώστε το κόστος του αποσταγμένου νερού να προκύπτει το ίδιο με το αντίστοιχο από μια 100% συμβατική μονάδα αφαλάτωσης.

Κόστος συμβατικής ενέργειας, C_{CE} [Euro/kW]	Κόστος παραβολικού συλλέκτη τύπου «σκάφης», C_{PTC} [Euro/m²]
0,018	121
0,024	200
0,030	286

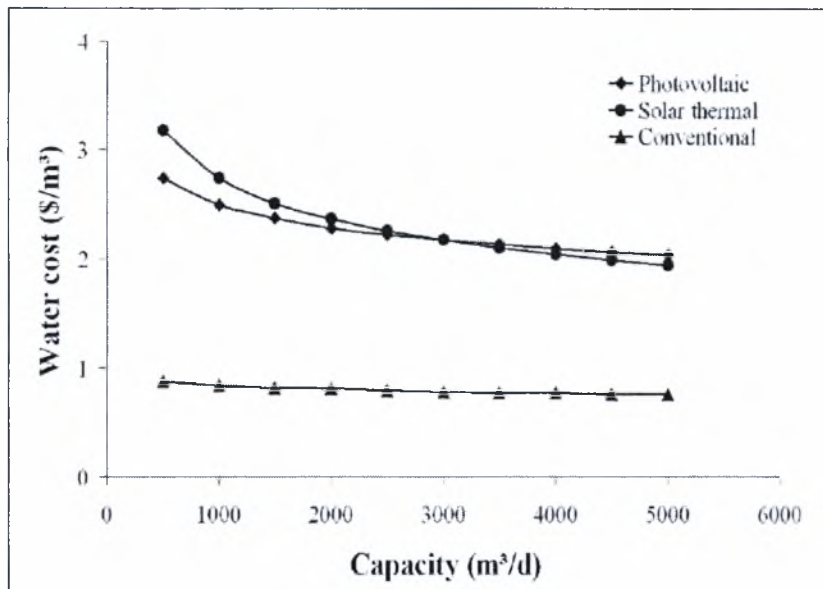
Πίνακας 2.4.3: Καθαρή παρούσα αξία (LC) ηλιακών συλλεκτών σε μια μονάδα αφαλάτωσης MED με ηλιακή εγκατάσταση παραγωγής ατμού από θαλασσινό νερό, ώστε το κόστος του αποσταγμένου νερού να προκύπτει το ίδιο με το αντίστοιχο από μια συμβατική μονάδα αφαλάτωσης. [Πηγή: Garcia-Rodriguez & Gomez-Camacho, 1999]

Είναι, επίσης, προφανές ότι το κόστος του αφαλατωμένου νερού στα εναλλακτικά συστήματα εξαρτάται από τη διακύμανση της ηλιοφάνειας μέσα στο έτος και κατ'επέκταση από την παραγόμενη θερμική ενέργεια. Για αυτό το λόγο εξετάστηκε η περίπτωση μονάδας MED με ηλιακούς συλλέκτες που παράγουν ατμό είτε από αλμόλοιπο (case1) είτε από γλυκό νερό (case 2) για δύο τιμές κόστους συλλέκτη κάθε φορά, όπως φαίνεται στα διαγράμματα του Σχήματος 2.4.13. Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες συμβατικής ενέργειας είναι ευθείες, αφού δεν επηρεάζονται από τις καιρικές συνθήκες. Ακόμα, φαίνεται ότι αν διπλασιαστεί το κόστος του ηλιακού συλλέκτη από 150,6 Euro/m² σε 301,2 Euro/m² η θερμική ενέργεια που καταναλώνεται σχεδόν διπλασιάζεται για να επιτευχθεί το ίδιο κόστος αποσταγμένου νερού με μία συμβατική μονάδα αφαλάτωσης.



Σχήμα 2.4.13: Καθαρή παρούσα αξία (LC) αφαλατωμένου νερού για μονάδα MED με ηλιακούς συλλέκτες που παράγουν ατμό είτε από αλμόλοιπο (case1) είτε από γλυκό νερό (case 2). [Πηγή: Garcia-Rodriguez & Gomez-Camacho, 1999]

Επιπλέον, παραθέτουμε για λόγους πληρότητας τα πρόσφατα αποτελέσματα της οικονομοτεχνικής μελέτης της ομάδας Fiorenza (2007), όπου εξάγεται το κόστος παραγωγής του αφαλατωμένου νερού με τρεις διαφορετικούς τρόπους: διεργασία RO με φωτοβολταϊκά συστήματα (PV), διεργασία MED με ηλιακά θερμικά συστήματα (ST) και με συμβατική διεργασία αφαλάτωσης. Συμπεραίνεται ότι το κόστος του αποσταγμένου νερού είναι της τάξης των 2 \$/m³ για μονάδα δυναμικότητας 4000 m³/ημέρα είτε μέσω PV/RO είτε μέσω ST/MED (Βλ. Σχήμα 2.4.14).



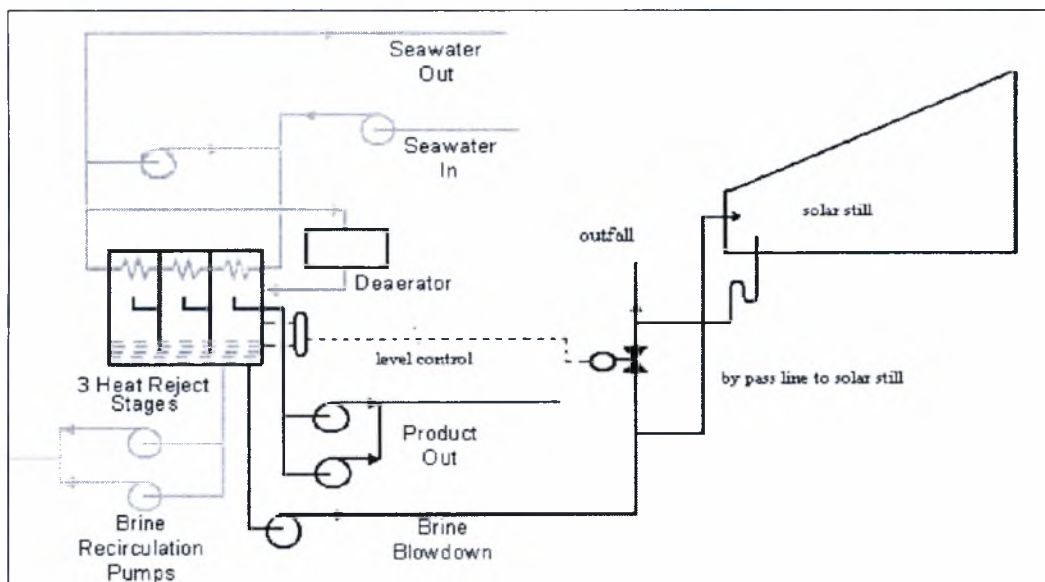
Σχήμα 2.4.14: Κόστος αφαλατωμένου νερού μέσω τριών ειδών διεργασιών συναρτήσει της δυναμικότητας της μονάδας. [Πηγή: Fiorenza et al., 2007]

2.5 Συνδυασμός MSF/MED με ηλιακούς αποστακτήρες

Στο μεσοπρόθεσμο μέλλον η διάθεση του αλμολούπου στο περιβάλλον προβλέπεται να είναι ένας βασικός παράγοντας που θα αυξήσει το λειτουργικό και πάγιο κόστος των μονάδων αφαλάτωσης. Καθώς τα νομοθετικά πλαίσια σχετικά με περιβαλλοντικά ζητήματα γίνονται όλο και πιο αυστηρά (Βλ. και Κεφάλαιο 4.), η διάθεση και η διαχείριση της απόβλητης θερμικής ενέργειας από το αλμολούπο και το θαλασσινό νερό ψύξης αναδεικνύονται σε σημαντικές σχεδιαστικές παράμετροι. Η ανάλυση των αποστακτήρων άμεσης ηλιακής αφαλάτωσης έδειξε ότι η μόνη πηγή θερμότητας για αυτά τα συστήματα είναι η απευθείας ηλιακή ακτινοβολία, εκτός ίσως από τους ηλιακούς αποστακτήρες απλού/πολλαπλού φαινομένου που χρησιμοποιούν κάποιες επιπλέον πηγές ισχύος (π.χ.: διαφεύγουσα θερμότητα από βιομηχανίες). Ο συνδυασμός, ωστόσο, των συμβατικών μονάδων αφαλάτωσης τύπου MSF/MED με τους κοινούς ηλιακούς αποστακτήρες αποτελεί μία ανώτερη ποιοτικά βαθμίδα σε σχέση με τις άλλες παρεμφερείς τεχνικές εφαρμογές, γιατί: (i) ελαχιστοποιούνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη διάθεση της απόβλητης άλμης, (ii) αυξάνει η απόδοση των ηλιακών αποστακτήρων, (iii) μπορεί να επιτευχθεί επιπλέον συμπύκνωση του αλμολούπου και να ανακτηθεί το περιεχόμενο αλάτι. Οι Cipollina κ.α. (2005) έχουν προτείνει μια σειρά από τεχνικές και συνδεσμολογίες που επιτρέπουν την αξιοποίηση της διαφυγούσας θερμότητας όπως την περιγράψαμε.

□ Τροφοδοσία ηλιακών αποστακτήρων με αλμολούπο από διεργασία MSF

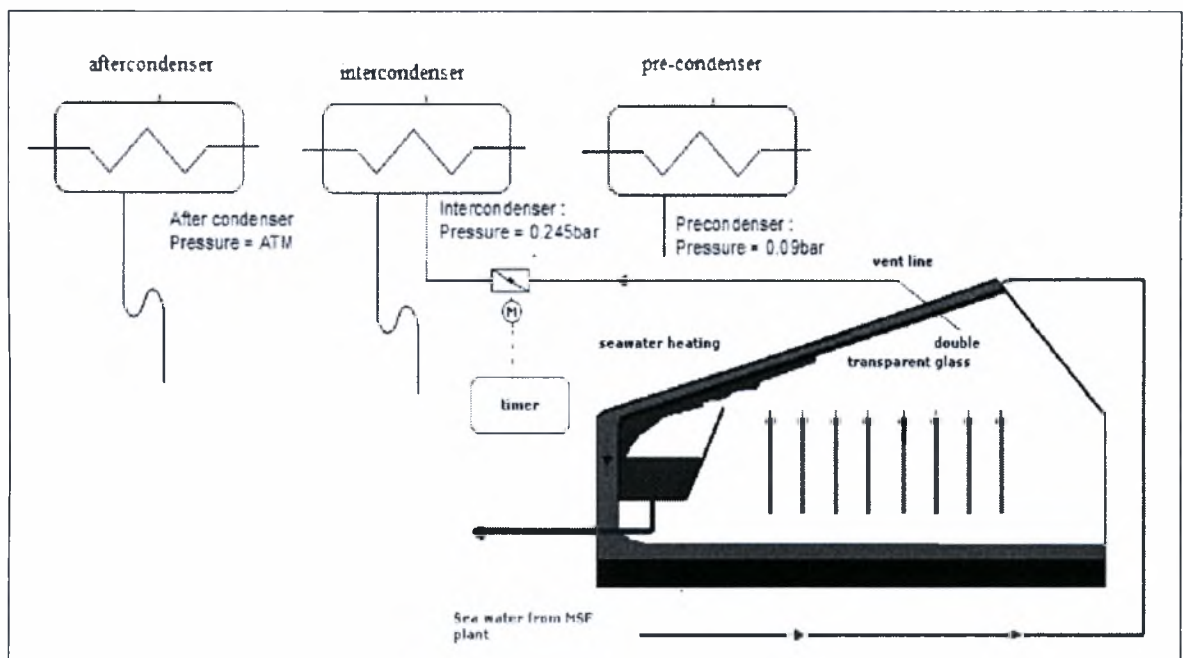
Ο συνδυασμός των συσκευών MSF με τους κοινούς ηλιακούς αποστακτήρες είναι προβληματικός, γιατί τα ρεύματα τροφοδοσίας και εξαγωγής για τα δύο συστήματα απέχουν μερικές τάξεις μεγέθους. Αυτή η δυσκολία, ωστόσο, αντιμετωπίζεται με τη χρήση ενός ρεύματος παράκαμψης (by-pass stream), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5.1.



Σχήμα 2.5.1: Συνδεσμολογία τροφοδοσίας ηλιακού αποστακτήρα με αλμολούπο από διεργασία MSF. [Πηγή: Cipollina et al., 2005]

Η τεχνική αυτή επιτρέπει την αξιοποίηση του παραπροϊόντος που παράγεται από τη συσκευή MSF με τα εξής εμφανή πλεονεκτήματα: (i) δεν απαιτείται υποβοηθητική άντληση, (ii) το αλμόλοιπο από τη συσκευή MSF έχει ήδη 1,5 με 2 φορές μεγαλύτερη συγκέντρωση άλατος και 10-20°C υψηλότερη θερμοκρασία από το θαλασσινό νερό, (iii) η θερμοκρασία του αλμολοίπου μέσα στον ηλιακό αποστακτήρα είναι της τάξης των 70-80 °C, (iv) μπορεί να παραχθεί μεγαλύτερη ποσότητα αφαλατωμένου νερού από το αλμόλοιπο, λόγω της μικρότερης ειδικής θερμότητας από την αντίστοιχη του θαλασσινού νερού (ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση, c_p), (v) εξαλείφονται σε μεγάλο βαθμό τα φαινόμενα επικαθίσεων, διάβρωσης και βιολογικών επικαθίσεων λόγω της χημικής επεξεργασίας, της εξαέρωσης και των πολλαπλών βρασμών που έχουν προηγηθεί στη μονάδα MSF.

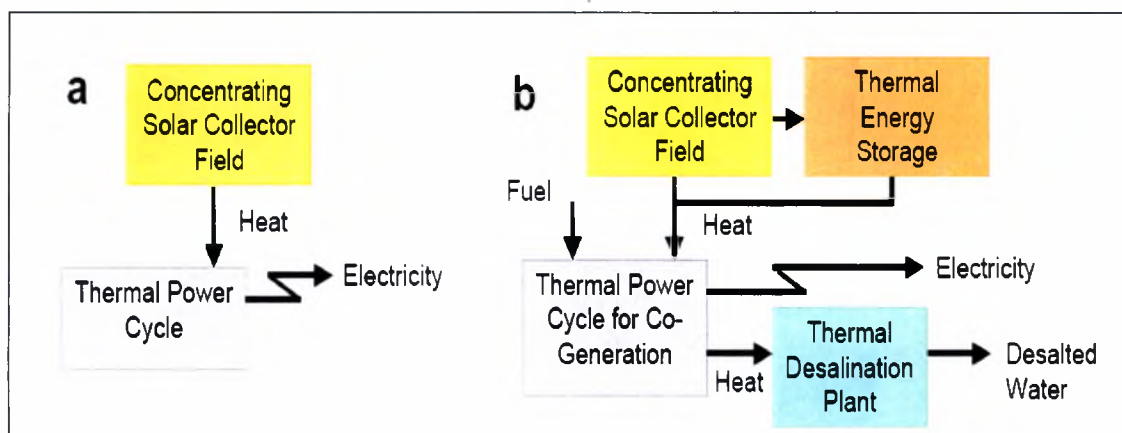
Μία άλλη πιθανή συνδεσμολογία που προτείνεται για ηλιακό αποστακτήρα πολλαπλού φαινομένου (διπλή υάλωση της οροφής) και συσκευή MSF/MED είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 2.5.2. Όπως αναφέρουν οι Cipollina κ.α. (2005) υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης του ηλιακού αποστακτήρα με έναν από τους θαλάμους συμπύκνωσης (σε υποπίεση) της μονάδας MED ή MSF. Αυτό γίνεται σε περιπτώσεις όπου υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση μη συμπυκνώσιμων αερίων μέσα στον ηλιακό αποστακτήρα. Η εκτόνωση τότε πραγματοποιείται από ένα κατάλληλο ρεύμα εξόδου που λειτουργεί είτε με χρονοδιακόπτη (timer) είτε με μια αυτόματη βάννα ελέγχου παροχής (automatic control valve). Έτσι επιτυγχάνεται εκ νέου βρασμός (flashing) του υδρατμού μεταξύ 65°C (σε πίεση 0,2 bar) και 80°C (σε πίεση 0,4 bar) και διατηρούνται οι συνθήκες υποπίεσης στον ηλιακό αποστακτήρα.



Σχήμα 2.5.2: Σύνδεση ενός ηλιακού αποστακτήρα με θάλαμο συμπύκνωσης από μονάδα MSF ή MED. [Πηγή: Cipollina et al., 2005]

2.6 Νέες τάσεις στο συνδυασμό ηλιακής αφαλάτωσης και ηλεκτροπαραγωγής

Τα θερμικά ηλιακά συστήματα μπορούν να αξιοποιηθούν ταυτόχρονα για αφαλάτωση και ηλεκτροπαραγωγή. Πρόκειται για τη *Συμπααραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης (ΣΗΘΥΑ)*, όπου υπάρχει, επιπλέον, η δυνατότητα συνδυασμού με εφεδρική μονάδα ισχύος με ορυκτό καύσιμο. Σε αυτές τις περιπτώσεις η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται με απόδοση πάνω από 85%. Εκτός από την ηλεκτροπαραγωγή και την αφαλάτωση, τα συστήματα αυτά βρίσκουν εφαρμογή σε ποικίλες βιομηχανικές δραστηριότητες, καθώς και στη δημιουργία ψύξης. Η βασική μονάδα σε τέτοιες εγκαταστάσεις είναι ένα σύστημα συμπααραγωγής με αεριοστρόβιλο (steam turbine) για θερμική αφαλάτωση και παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6.1.



Σχήμα 2.6.1: Συνδυασμός θερμικών ηλιακών συστημάτων για (α) παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος και για (β) ΣΗΘΥΑ με βοηθητικό ορυκτό καύσιμο και αποθηκευτική μονάδα.
[Πηγή: Trieb et al., 2002]

Η γερμανική επιστημονική ομάδα των Trieb κ.α. (2002) παρουσίασαν στο Sinai της Αιγύπτου (στο συνέδριο για την Ηλιακή Ενέργεια και Αφαλάτωση στην Περιοχή της Μεσογείου - EUROMED), κάποιες ενδιαφέρουσες όσο και προωθημένες ιδέες, όπως θα φανεί παρακάτω, σχετικά με τις υπάρχουσες και μελλοντικές δυνατότητες πάνω στο υπό συζήτηση θέμα. Οι προτάσεις που συζητήθηκαν, αφορούσαν τη δυνατότητα συνδυασμού θερμικής ηλιακής αφαλάτωσης με συμπααραγωγή ηλεκτρισμού, την ολοκληρωμένη αξιοποίηση δεδομένων από δορυφορικά συστήματα πληροφοριών, καθώς και τη δυνατότητα μιας διακρατικής ενεργειακής συμφωνίας ανάμεσα στις χώρες της Β. Αφρικής και της Ευρώπης.

Θερμική ηλιακή αφαλάτωση και ηλεκτροπαραγωγή

Τα επιχειρήματα της ομάδας Trieb πάνω στη συμπααραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού απορρέουν από το ακόλουθο παράδειγμα. Υποθέτοντας μονάδα

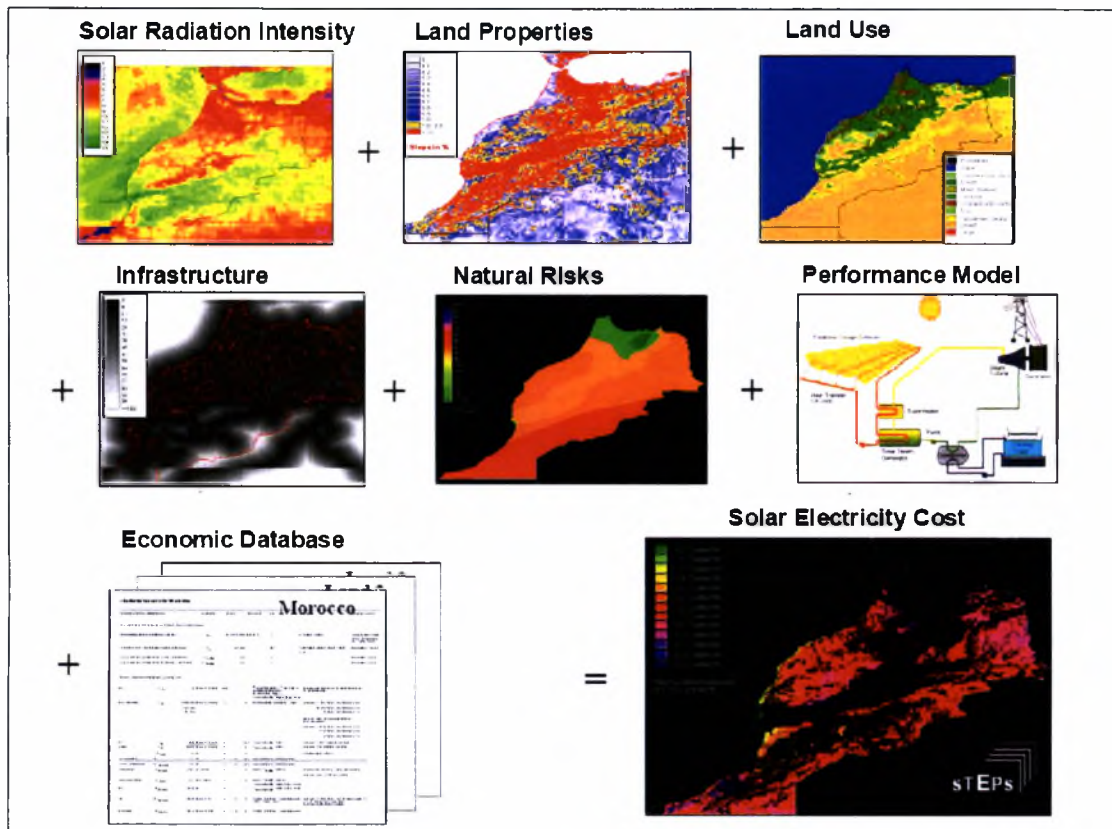
ΣΗΘΥΑ με εφεδρική μονάδα ορυκτού καυσίμου των 200 MW και 7500 hr ετήσια περίοδο λειτουργίας (στο μέγιστο φορτίο) υπό οικονομικές και κλιματολογικές συνθήκες τύπου Dubai, μπορεί να παραχθεί ηλεκτρική ισχύς περίπου $1,5 \times 10^9$ kWh/έτος και αφαλατωμένο νερό της τάξης των 60×10^6 m³/έτος. Το κόστος παραγωγής θα ανέρχεται σε 0,043 Euro/kWh και 1,30 Euro/m³ αντίστοιχα (οι οικονομικές παράμετροι που λήφθηκαν υπόψη για την παραπάνω ανάλυση είναι τα εξής: επιτόκιο 10%, κόστος ορυκτού καυσίμου 7,5 Euro/MWh για το Dubai το 2000 και κύκλο ζωής 25 έτη). Οι ποσότητες που υπολογίστηκαν είναι ικανές να καλύψουν τις ανάγκες 50 000 ατόμων για νερό και τις αντίστοιχες 250 000 ατόμων για ηλεκτρισμό. Με τα δεδομένα του 2002 μια τέτοια εγκατάσταση, χωρίς όμως θερμική αποθηκευτική μονάδα και με συνεισφορά της ηλιακής ενέργειας κατά 25%, θα κόστιζε 800.000.000 Euro. Για το έτος 2012 περίπου, η ίδια βιομηχανική εγκατάσταση με χρήση θερμικής αποθηκευτικής μονάδας και συνεισφορά ηλιακής ενέργειας κατά 80% θα κοστίζει περίπου 1.000.000.000 Euro, ενώ οι τιμές κόστους παραγωγής εκτιμώνται ελαφρώς μειωμένες.

□ Εκτίμηση ενεργειακών πηγών μέσω δορυφορικών συστημάτων

Τα βασικά εμπόδια που εμφανίζονται στην προώθηση των θερμικών ηλιακών συστημάτων είναι η αβεβαιότητα που επικρατεί ως προς την επάρκεια της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια δεδομένη περιοχή, καθώς και η χρηματική απόδοση της μελλοντικής επένδυσης. Αυτά τα ζητήματα θα μπορούσαν να επιλυθούν εν μέρει, όπως ισχυρίζεται η ομάδα Trieb, μέσω μιας εκτενούς και συστηματικής ανάλυσης των κλιματολογικών και οικονομικών συνθηκών για την επιθυμητή περιοχή. Σήμερα, η συλλογή ζωτικών πληροφοριών από υψηλής ανάλυσης δορυφορικά συστήματα είναι απόλυτα εφικτή, παρόλο που η εκτίμηση της άμεσης ακτινοβολίας (direct normal irradiation - DNI) στην περίπτωση των συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών είναι σχετική. Τα δορυφορικά συστήματα πληροφοριών παρέχουν στους επίγειους χειριστές δεδομένα σχετικά με τη νέφωση, τους υδρατμούς (σχετική και απόλυτη υγρασία), το όζον, τα διάφορα συστατικά από στερεά και υγρή σωματιδιακή ύλη ή αέριο CS (αερολύματα, aerosols) κ.α.. Άλλα δεδομένα που είναι απαραίτητα, σχετίζονται με την τρέχουσα χρήση της γης ή τη μελλοντική αλλαγή στη χρήση της, ώστε να μπορούν να εγκατασταθούν οι μεγάλες εκτάσεις των ηλιακών συλλεκτών. Εδώ απαιτούνται τοπογραφικές μελέτες που θα καταδεικνύουν το ιδιοκτησιακό καθεστώς (προστατευόμενο δάσος, εθνικός δρυμός, πάρκο κλπ) και το ανάγλυφο της επιφάνειας. Οι υπάρχουσες υποδομές και ο κίνδυνος από φυσικές καταστροφές κρίνονται, επιπλέον, ως σημαντικές πληροφορίες.

Ο συνδυασμός όλων των παραπάνω δεδομένων γίνεται με τη χρήση *Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών* (Geographic Information System-GIS). Το GIS μπορούμε να το ορίσουμε συνοπτικά ως ένα σύνολο εργαλείων συλλογής, αποθήκευσης, ανάκτησης, ανάλυσης και εμφάνισης χωρικών δεδομένων. Μια τέτοια ανάλυση πραγματοποιήθηκε από τους Broesamle κ.α. (2001) για την περιοχή του Μαρόκο και την παραθέτει η ομάδα Trieb. Με χάρτες όπως στο Σχήμα 2.6.2 μπορούμε να αποφανθούμε ως προς την καταλληλότητα της τοποθεσίας που επιλέχθηκε για εγκατάσταση θερμικών ηλιακών συστημάτων. Το τελικό αποτέλεσμα καταλληλότητας για την προκειμένη περίπτωση εξάχθηκε με βάση την υπόθεση εγκατεστημένης μονάδας 200 MW, παραβολικών ηλιακών συλλεκτών τύπου σκάφης,

χωρίς αποθηκευτική ενεργειακή μονάδα, χωρίς back-up ορυκτό καύσιμο και χωρίς σύστημα συμπαραγωγής.

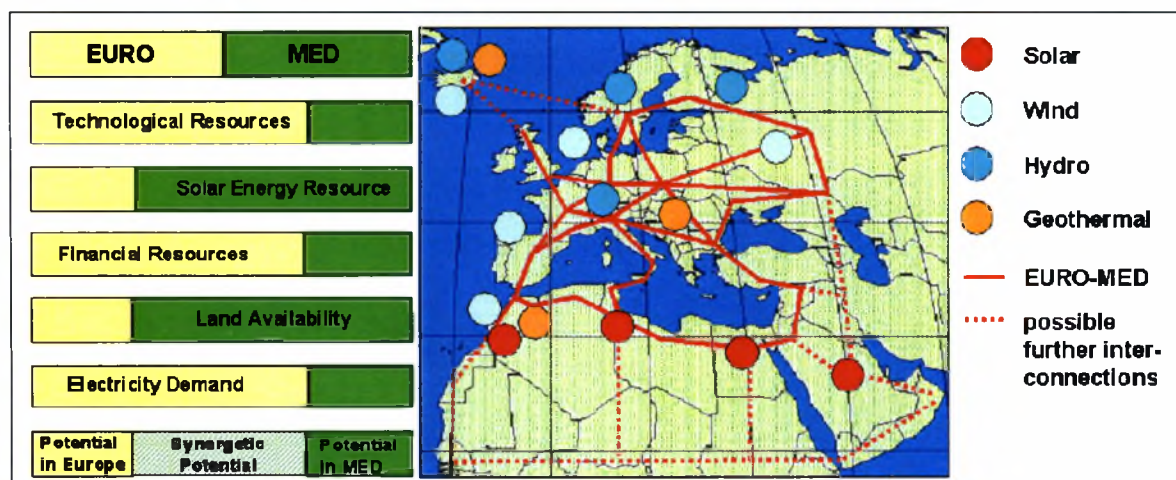


Σχήμα 2.6.2: Παράθεση διαφόρων τύπων δεδομένων από ένα σύστημα GIS για τις ενεργειακές δυνατότητες του Μαρόκο, όπου φαίνονται οι χάρτες: έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, ιδιοκτησίας γης, χρήσης γης, τεχνικών υποδομών και φυσικών κινδύνων. Επίσης, ο χρήστης πληροφορείται για το κόστος ηλεκτροπαραγωγής από ηλιακή ενέργεια. Οι μαύρες περιοχές εξαιρέθηκαν για ποικίλους λόγους. Η ανάλυση των χαρτών είναι 1 km x 1 km.
[Πηγή: Trieb et al., 2002]

□ Δυνατότητες διακρατικών ενεργειακών συμφωνιών

Οι χώρες της Β. Αφρικής χαρακτηρίζονται από υψηλή ηλιοφάνεια και αχανείς εκτάσεις έρημης γης, αλλά οι τεχνικές υποδομές και οι οικονομικές τους δυνατότητες είναι περιορισμένες, καθώς και η ζήτηση για ηλεκτρική ισχύ. Το ακριβώς αντίθετο ισχύει για την Ευρώπη, όπου υπάρχει υψηλή ζήτηση σε ενέργεια, ενώ οι ανανεώσιμες πηγές εντοπίζονται μόνο σε συγκεκριμένα μέρη. Η πρόταση της δημιουργίας ενός ενεργειακού δικτύου μεταξύ των δύο ηπείρων φαίνεται ελκυστική ιδέα (Βλ. Σχήμα 2.6.3), καθώς εκτιμάται ότι τα οφέλη θα είναι πολλαπλά: στην Ευρώπη θα μειωθεί το κόστος ηλεκτρικής ισχύος, ενώ στη Β. Αφρική θα μπορούν να καλυφθούν οι ανάγκες σε νερό και θα υπάρξει σχετική οικονομική ανάκαμψη. Το κόστος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για αποστάσεις πάνω από 3500 km είναι της τάξης των 0,02 Euro/kWh, που σημαίνει ότι η μεταφορά της ηλιακής ενέργειας από τη Β. Αφρική ως την Κ. Ευρώπη θα κοστίζει 0,06 Euro/kWh, αν τελικά προκριθεί το προτεινόμενο

σχήμα της συνδυασμένης αφαλάτωσης νερού με ηλεκτροπαραγωγή [Trieb, 2002]. Το δίκτυο αυτό θα μπορεί να παρέχει αποσταγμένο νερό και ηλεκτρισμό για την επιβαρημένη ζώνη της Μεσογείου, ενώ το πλεόνασμα ηλεκτρικής ισχύος να εξάγεται στο βορρά.



Σχήμα 2.6.3: Το προτεινόμενο ενεργειακό δίκτυο μεταξύ Β. Αφρικής και Ευρώπης που εκτιμάται ότι θα αξιοποιήσει στο μέγιστο τις ενεργειακές δυνατότητες των χωρών με ΑΠΕ. [Πηγή: Trieb et al., 2002]

2.7 Συμπεράσματα και Προτάσεις

Οι περιβαλλοντικές προκλήσεις του 21^{ου} αιώνα είναι πολλές, όχι μόνο για τις «αναπτυγμένες» χώρες του πλανήτη αλλά και για τα κράτη με «αναδυόμενες» οικονομίες. Η κλιματική αλλαγή, η απειλητική επέκταση των ερήμων και η ανεπάρκεια πόσιμου νερού, η μείωση των αποθεμάτων (reserves) ορυκτών καυσίμων και η ανισοκατανομή τόσο των αποθεμάτων όσο και ευρύτερα των ενεργειακών πόρων (resources) αποτελούν μερικά κρίσιμα ενεργειακά-περιβαλλοντικά ζητήματα. Η αξιοποίηση της «καθαρής» ενέργειας και η πρόσβαση όλων των ανθρώπων σε φρέσκο νερό κρίνεται ως πρωταρχικός στόχος της αειφόρου ανάπτυξης. Η ενεργειακά αποδοτική και οικονομικά συμφέρουσα αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας στις θερμικές διεργασίες αφαλάτωσης είναι ένας τρόπος που οδηγεί στον παραπάνω στόχο. Η ηλιακή ενέργεια, ως «καθαρή» ενέργεια, μπορεί να συμβάλλει αρκετά στην επίτευξη των στόχων που σχετίζονται με τη μείωση των εκπομπών των «αερίων του θερμοκηπίου». Τα συστήματα αυτά με έναν κύκλο ζωής περίπου 25 χρόνια εκπέμπουν πρωτογενείς αέριους ρύπους της τάξης των 0,010-0,015 kg/kWh, μια τιμή που κρίνεται πολύ χαμηλή σε σχέση με την αντίστοιχη των λιγνιτικών θερμικών συστημάτων (0,900 kg/kWh) ή και αυτών που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο (0,500 kg/kWh) [Grieb et al., 2002].

Στις προηγούμενες παραγράφους φάνηκε ότι η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας στα απλοϊκά σχήματα ηλιακής αφαλάτωσης (ηλιακοί αποστακτήρες) απαντάται σε αρκετά προγενέστερες περιόδους, φτάνοντας μέχρι το 19^ο αιώνα. Επίσης, δείχθηκε ότι έχουν γίνει πολλές έρευνες στο παρελθόν για την αξιοποίηση ηλιακών συλλεκτών και ηλιακών λιμνών στην αφαλάτωση με συσκευές MSF και MED. Όλα αυτά, όμως, δεν αναιρούν το γεγονός ότι η εμπορικές εφαρμογές παραμένουν πολύ λίγες ανά τον κόσμο. Οι ηλιακοί αποστακτήρες, καθώς και τα συστήματα που συνδυάζουν συμβατικές τεχνικές με χρήση ηλιακής ενέργειας, προορίζονται κυρίως για κάλυψη μικρών αναγκών σε νερό. Είναι γεγονός ότι τα θερμικά ηλιακά συστήματα προορίζονται πρωτίστως για ηλεκτροπαραγωγή και θερμό νερό χρήσης και συμμετέχουν μόνο κατά 0,02% στην παγκόσμια αγορά αφαλάτωσης. Η βιβλιογραφική έρευνα έδειξε ότι, αυτή τη στιγμή στον κόσμο, λειτουργούν περίπου 100 μονάδες εναλλακτικής αφαλάτωσης με χρήση ηλιακής και αιολικής ενέργειας σε πάνω από 25 χώρες και προορίζονται κυρίως για επίδειξη και πειραματική μελέτη. Οι Fiorenza κ.α. (2007) αναφέρουν ότι κατά μέσο όρο η ποσότητα αποσταγμένου νερού που παράγουν αυτές οι μονάδες είναι 20 m³/ημέρα.

Μέσα σε αυτό το δυσμενές πλαίσιο και κρίνοντας ότι τα ορυκτά καύσιμα δεν πρόκειται ακόμα να αποσυρθούν από την ενεργειακή «σκακιέρα», που έχουν στήσει πολυεθνικοί επιχειρηματικοί «κολοσσοί» και αναπτυγμένα κράτη, προτείνεται μια ομαλότερη μετάβαση στην εναλλακτική ενεργειακή οικονομία. Προτείνεται η χρήση υβριδικών συστημάτων που θα χρησιμοποιούν θερμικούς ηλιακούς συσσωρευτές και ορυκτό καύσιμο με σκοπό τη *συνπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας διεργασίας και κατ' επέκταση την παραγωγή αφαλατωμένου νερού*. Οι περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν στο Υποκεφάλαιο 2.4.3 (για το πρόγραμμα AQUASOL στη Plataforma Solar de Almeria) και στο Κεφάλαιο 2.6 είναι ενδεικτικές της παραπάνω «φιλοσοφίας».

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.

ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕΣΩ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 Εισαγωγή

Η *γεωθερμική ενέργεια* προέρχεται από το εσωτερικό της γης και μας φανερώνεται είτε μέσω ηφαιστειακών εκροών είτε μέσω ρηγμάτων του υπεδάφους, από τα οποία αναβλύζουν ατμοί και θερμό νερό. Η προέλευση της θερμότητας της γης (όταν δεν οφείλεται σε μαγματική διείδυση) είναι ένα «ανοιχτό» επιστημονικό πρόβλημα. Υπάρχουν διάφορες θεωρίες που αναφέρονται στους μηχανισμούς που συμμετέχουν στην παραγωγή της. Επικρατέστερη θεωρείται αυτή που αναφέρεται στη διάσπαση των ραδιενεργών ισοτόπων του ουρανίου (U), του θορίου (Th), του καλίου (K) και άλλων στοιχείων. Η μάζα της γης είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με την επιφάνειά της και καλύπτεται από υλικά χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας, με αποτέλεσμα η θερμότητά της να συγκρατείται στο εσωτερικό της. Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας με το βάθος από την επιφάνεια της γης είναι γνωστός με το όνομα *γεωθερμική βαθμίδα*. Η γεωθερμική βαθμίδα κυμαίνεται από 5 μέχρι 70°C/km, με μέση τιμή τους 30°C/km. Σε πολύ μεγάλα βάθη, η θερμοκρασία δεν είναι με ακρίβεια γνωστή.

□ Το γεωθερμικό σύστημα

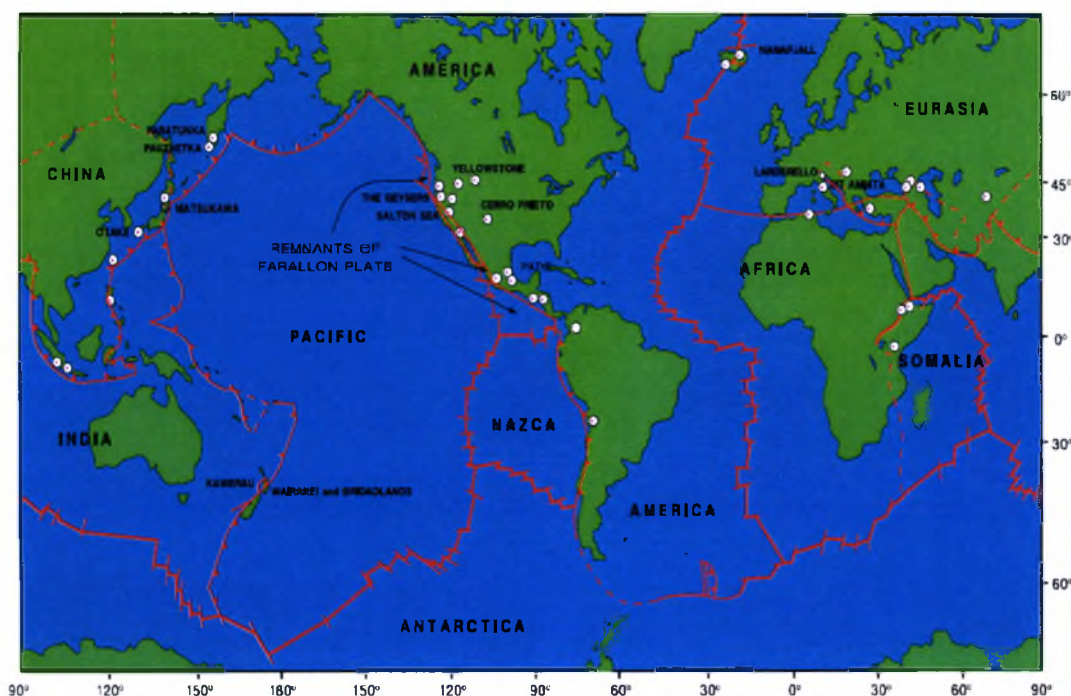
Μία περιοχή με θεωρητικά γεωθερμικό ενδιαφέρον είναι η περιοχή που διαθέτει γεωθερμική βαθμίδα ίση ή μεγαλύτερη από τη μέση τιμή και καλείται *γεωθερμικό σύστημα*. Αποτελείται δε από τρία κύρια συστατικά: μία *πηγή θερμότητας*, έναν *ταμιευτήρα* και το *ρευστό*, το οποίο είναι ο φορέας της θερμότητας. Η πηγή θερμότητας μπορεί να είναι είτε μια μαγματική διείδυση (με θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 600°C), η οποία έφθασε σε σχετικά μικρά βάθη (5-10 km) είτε η κανονική αύξηση της θερμοκρασίας με το βάθος (π.χ.: κρυσταλλικός γρανίτης). Ο ταμιευτήρας είναι ουσιαστικά ένα σύστημα θερμών διαπερατών πετρωμάτων από τα οποία τα κυκλοφορούντα ρευστά μεταφέρουν θερμότητα. Το γεωθερμικό ρευστό είναι νερό μετεωρικής προέλευσης τις περισσότερες φορές, σε υγρή ή σε αέρια φάση, κάτι που εξαρτάται από την πίεση και τη θερμοκρασία. Περιέχει σημαντικές ποσότητες συνήθως διαλυμένων στερεών ουσιών και αερίων, όπως CO₂ και H₂S.

Γενικά, μια ροή θερμότητας υψηλότερη από τον μέσο όρο εκδηλώνει ορισμένες επιφανειακές ενδείξεις όπως: θερμό νερό και ατμός που σχηματίζουν *θερμοπίδακες* (*geysers*), *ατμίδες* ή αλλιώς *φουμαρόλες* (*fumarole*), *διάφορες θερμές πηγές* ή ακόμα *τεχνητές γεωτρήσεις ατμού*. Ανάλογα με τη θερμοκρασία των ρευστών που ανέρχονται στην επιφάνεια, η γεωθερμική ενέργεια χαρακτηρίζεται ως: *χαμηλής ενθαλπίας* (25-100°C), *μέσης ενθαλπίας* (100-150°C) και *υψηλής ενθαλπίας* (>150°C).

□ Οι συνθήκες που ευνοούν τη δημιουργία γεωθερμικών πεδίων

Ένα φυσικό γεωθερμικό πεδίο ή περιοχή (geothermal area ή field) είναι συνδυασμός θερμών πετρωμάτων και ύπαρξης νερού που κυκλοφορεί μέσα σε αυτά. Παρακάτω αναλύονται οι δύο αυτές ικανές και αναγκαίες συνθήκες.

Η συγκεντρωμένη στο εσωτερικό της γης θερμότητα μεταφέρεται κοντά στην επιφάνειά της μέσω γεωλογικών φαινομένων, δημιουργώντας, έτσι, υπέρθερμες περιοχές με γεωθερμική βαθμίδα μεγαλύτερη από $70^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Το σημαντικότερο από αυτά τα γεωλογικά φαινόμενα είναι αυτό των *λιθοσφαιρικών πλακών*. Το εξωτερικό κέλυφος της γης, η *λιθόσφαιρα*, δεν είναι ενιαίο αλλά αποτελείται από πολλά κομμάτια, τις *λιθοσφαιρικές πλάκες* (Βλ. Σχήμα 3.1.1). Οι πλάκες αυτές βρίσκονται σε μια διαρκή κίνηση που πραγματοποιείται με πολύ μικρή ταχύτητα (μερικά μόλις εκατοστά το χρόνο). Ανάλογα με τη σχετική κίνηση των πλακών, παρατηρούνται τρία διαφορετικά φαινόμενα στα όριά τους: η απόκλιση πλακών, η σύγκλιση πλακών ή η παράλληλη ολίσθηση των δύο πλακών. Τα σημαντικότερα γεωθερμικά πεδία εντοπίζονται σ' αυτά τα όρια, τις λεγόμενες *ζώνες σεισμικών εστιών*.



Σχήμα 3.1.1: Τα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών στα οποία συναντώνται τα περισσότερα γεωθερμικά συστήματα.

Περιοχές με μικρότερο γεωθερμικό ενδιαφέρον, δηλαδή με *γεωθερμική βαθμίδα λίγο υψηλότερη από τη μέση ($30^{\circ}\text{C}/\text{km}$)*, μπορεί να βρεθούν και εκτός των εν λόγω ζωνών. Έτσι, ενώ οι σημαντικές θερμικές ανωμαλίες εντοπίζονται στις ζώνες σεισμικών εστιών, περιοχές με ελαφρά αυξημένη γεωθερμική βαθμίδα *απαντώνται σε όλη τη γη*. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε κάποιον από τους ακόλουθους παράγοντες:

(i) Τοπικά υψηλή θερμική ροή από το μανδύα και τη βάση του φλοιού προς την επιφάνεια, σε μεγάλες περιοχές.

(ii) *Αυξημένες συγκεντρώσεις των ραδιενεργών στοιχείων (U, Th, K) σε ορισμένες περιοχές στο φλοιό της γης, που συντελούν στην παραγωγή θερμότητας και κατά συνέπεια στην αύξηση της γεωθερμικής βαθμίδας. Πετρώματα με αυξημένες αυτές τις συγκεντρώσεις είναι τα γρανιτικά με 5-10 ppm σε ουράνιο και 80 ppm σε θόριο.*

(iii) *Φαινόμενα συναγωγής που προκαλούνται από κυκλοφορία νερού διαμέσου πορωδών σχηματισμών ή μέσα από συστήματα ρηγμάτων.*

(iv) *Σε μια περιοχή με δεδομένη θερμική ροή στη βάση του φλοιού και απουσία άλλης θερμής πηγής μέσα στο φλοιό, η γεωθερμική βαθμίδα ποικίλλει ανάλογα με τη θερμική αγωγιμότητα των πετρωμάτων που αποτελούν το φλοιό. Τα αργιλικά πετρώματα έχουν τη χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα, ενώ τα κρυσταλλικά χαρακτηρίζονται από υψηλή θερμική αγωγιμότητα (περίπου 6 φορές αυτή των αργίλων).*

Η παραγωγικότητα μιας θερμικής περιοχής προσδιορίζεται και συχνά καθορίζεται από την υδρολογία των γεωλογικών σχηματισμών. Το γεωθερμικό ρευστό έχει μετεωρική προέλευση, δηλαδή προέρχεται από τις κατακρημνίσεις ή προέρχεται από τη θάλασσα. Το νερό από τις βροχές και τα χιόνια εισχωρεί στο έδαφος και σιγά-σιγά προχωρεί στο εσωτερικό της γης φτάνοντας σε βάθη μέχρι και 5 km. Στην πορεία του θερμαίνεται λόγω της υψηλής θερμικής ροής και στη συνέχεια βρίσκει διόδους μέσα από ρήγματα και ρωγμές και επιστρέφει στην επιφάνεια. Από αναλύσεις βασισμένες σε ραδιοϊσότοπα βρέθηκε ότι ο κύκλος του νερού σε ένα γεωθερμικό σύστημα διαρκεί περίπου 500 χρόνια

□ **Τρόποι εκμετάλλευσης της γεωθερμίας και η αξιοποίησή της για αφαλάτωση**

Η γεωθερμική ενέργεια είναι μια σχετικά ήπια, εναλλακτική μορφή ενέργειας, η οποία με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα μπορεί να καλύψει σημαντικό μέρος των αναγκών μας σε ενέργεια. Οι χρήσεις και οι εφαρμογές της ποικίλλουν και περιλαμβάνουν, πρωτίστως, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και, δευτερευόντως, διάφορες άμεσες χρήσεις. Τέτοιες είναι οι αγροτικές διεργασίες (π.χ. ξήρανση σιτηρών), η θέρμανση οικιών, η δημιουργία ψύξης, η ανάκτηση διαλυμένων στερεών ή αερίων κ.α.. Η περιοχή των θερμοκρασιών των θερμών νερών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκτείνεται από τους 20°C (για θέρμανση χώρων με τη χρήση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας) μέχρι τους 280°C (για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος).

Η αφαλάτωση μέσω της γεωθερμικής ενέργειας μπορεί να γίνει με ρευστά χαμηλής ή μέσης ενθαλπίας (70-100°C). Μπορεί δε να χρησιμοποιηθεί άμεσα με τις ήδη υπάρχουσες θερμικές τεχνολογίες αφαλάτωσης (π.χ. σύγχρονες τεχνολογίες MED). Η γεωθερμική ενέργεια υψηλής θερμοκρασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρισμού και, επομένως, για αφαλάτωση με διεργασίες μεμβρανών. Οι τεχνικές αυτές μπορούν να εφαρμοστούν, προφανώς, σε μέρη όπου παρατηρείται έλλειψη νερού και υπάρχει γεωθερμία (π.χ.: νησιά Αιγαίου, Nevada, Ν. Καλιφόρνια). Τα πλεονεκτήματά της, απ' την άλλη, είναι η συνεχής παραγωγή ενέργειας (και επομένως νερού), τα αξιόπιστα συστήματα, η πρόβλεψη της παραγωγής νερού.

3.2 Το Γεωθερμικό Δυναμικό της Ελλάδας

Για τη χώρα μας, μπορεί να λεχθεί, ότι είναι ιδιαίτερα ευνοημένη γεωθερμικά και τα τελευταία 30 χρόνια έχει γίνει, κυρίως από το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.), συστηματική βασική έρευνα για τον εντοπισμό και χαρακτηρισμό των γεωθερμικών πεδίων. *Η Ελλάδα μαζί με την Ιταλία (και την Πορτογαλία στις Αζόρες Νήσους) είναι οι μόνες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης στις οποίες υπάρχουν πεδία υψηλής ενθαλπίας (επομένως ικανά για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος).* Η χώρα μας διαθέτει πληθώρα περιοχών, κυρίως στην Κεντρική και Βόρεια Ελλάδα, με θερμοκρασίες ταμιευτήρων που ξεπερνούν τους 90°C. Διαθέτει σημαντικές πηγές και των τριών κατηγοριών (υψηλής, μέσης και χαμηλής ενθαλπίας) σε οικονομικά βάθη (100-1500 m). Σε μερικές περιπτώσεις τα βάθη των γεωθερμικών ταμιευτήρων είναι πολύ μικρά, κάνοντας ιδιαίτερα ελκυστική, από οικονομική άποψη, τη γεωθερμική εκμετάλλευση.

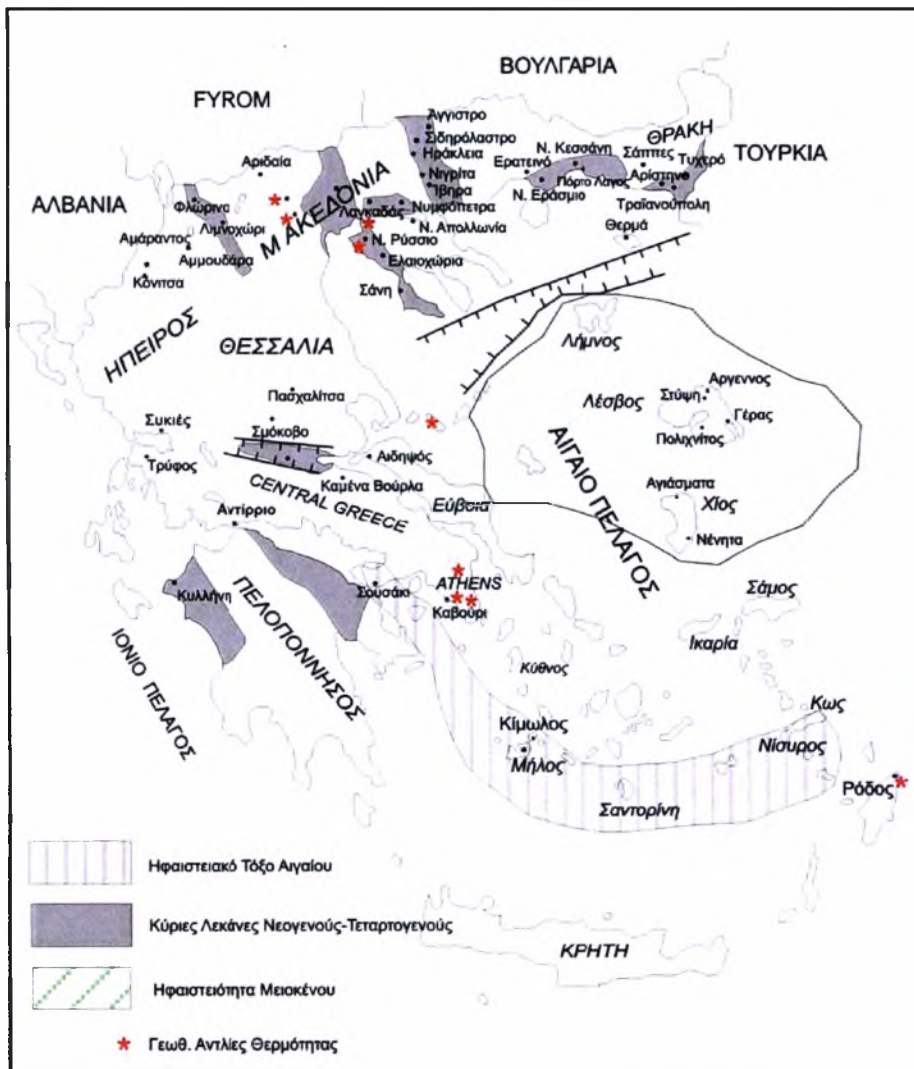
Στη *Μήλο* και *Νίσυρο* έχουν ανακαλυφθεί σπουδαία γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας (δηλ. με θερμοκρασίες ρευστών μεγαλύτερες από 150°C) και έχουν γίνει γεωτρήσεις παραγωγής (5 και 2 αντίστοιχα). Οι γεωτρήσεις αυτές θα μπορούσαν να στηρίξουν μονάδες ηλεκτροπαραγωγής 20 και 5 MWe, ενώ το πιθανό συνολικό δυναμικό υπολογίζεται να είναι της τάξης των 200 και 50 MWe, αντίστοιχα. Στη *Μήλο* μετρήθηκαν θερμοκρασίες μέχρι 325°C σε βάθος 1000 m και στη *Νίσυρο* 350°C σε βάθος 1500 m. Εκτός από τα πεδία της *Μήλου* και της *Νισύρου*, ικανοποιητικά στοιχεία για πιθανά πεδία υψηλής ή μέσης ενθαλπίας προέκυψαν στην *Κίμωλο*, *Σαντορίνη*, *Κω*, *Λέσβο* και *Σουσάκι Κορινθίας*.

Η αυξημένη ροή θερμότητας, λόγω της έντονης τεκτονικής και μαγματικής δραστηριότητας, δημιούργησε εκτεταμένες θερμικές ανωμαλίες, με μέγιστες τιμές γεωθερμικής βαθμίδας που πολλές φορές ξεπερνούν τους 100°C/km. Σε κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες η ενέργεια αυτή θερμαίνει υπόγειους ταμιευτήρες ρευστών σε θερμοκρασίες μέχρι 100°C. Τα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας είναι διάσπαρτα στη νησιωτική και ηπειρωτική Ελλάδα (βλ. Σχήμα 3.1.2). Η συμβολή τους στο ενεργειακό ισοζύγιο μπορεί να γίνει σημαντική, καθόσον αποτελούν ενεργειακό πόρο φιλικό προς το περιβάλλον, κοινωνικά αποδεκτό και παρουσιάζουν σημαντικό οικονομικό και αναπτυξιακό ενδιαφέρον.

Μόνο από υπάρχουσες γεωτρήσεις σε γεωθερμικά πεδία των πεδινών εκτάσεων της Α. Μακεδονίας και Θράκης είναι δυνατόν να αντληθούν 2500 m³/h θερμών ρευστών, με θερμοκρασίες μεταξύ 35 και 92°C. Στην πεδινή περιοχή του *Δέλτα Νέστου* έχουν εντοπισθεί δύο πολύ σημαντικά γεωθερμικά πεδία: στην περιοχή *Ερατεινό-Χρυσούπολη Καβάλας* και στην περιοχή *Ν. Εράσμιο-Μάγγανα Ξάνθης*. Στη *Ν. Κεσσάνη* και στο *Πόρτο Λάγος Ξάνθης*, σε μεγάλης έκτασης γεωθερμικά πεδία παράγονται νερά μέχρι 82°C. Σε διάφορες περιοχές του *Νομού Ροδόπης* (Σάπρες, Μέση, Σιδηροχώρι, Νότιας Κομοτηνής κ.ά.) υπάρχουν πολύ ενθαρρυντικά στοιχεία για τον εντοπισμό γεωθερμικών πεδίων. Στη *λεκάνη των λιμνών Βόλβης και Λαγκαδά* (Νομός Θεσσαλονίκης) έχουν εντοπιστεί τρία πολύ «ρηχά» πεδία με θερμοκρασίες μέχρι 56°C. Στην περιοχή *Ελαιχωρίων - Ν. Τρίγλιας Χαλκιδικής* υπάρχουν ήδη πολλές «ρηχές» γεωτρήσεις παραγωγής με ρευστά μέχρι 42°C. Το δυναμικό τους ξεπερνά τα 1000 m³/h. Στη *Ν. Θεσσαλία* εντοπίστηκαν ενδιαφέρουσες συνθήκες

ταμιευτήρων (65°C στα 700 m). Η κοιλάδα του Σπερχειού και η απέναντι Εύβοια διαθέτουν ένα πολύ μεγάλο γεωθερμικό δυναμικό, με θερμοκρασίες μέχρι 80°C . Η Δ. Ελλάδα έχει λιγότερο ευνοϊκές συνθήκες (μικρότερες θερμοκρασίες) αλλά δε λείπει το ενδιαφέρον σε συγκεκριμένες περιοχές. Ήδη στην πεδινή περιοχή Άρτας, για παράδειγμα, βρέθηκαν ρευστά μέχρι 60°C στα 250 m βάθους.

Τέλος στην ευρύτερη λεκάνη του Στρυμόνα, την περισσότερο αξιοποιημένη γεωθερμικά περιοχή στην Ελλάδα, έχουν εντοπισθεί τα πολύ σημαντικά πεδία *Θερμών-Νιγρίτας*, *Λιθότοπου-Ηράκλειας*, *Θερμοπηγής-Σιδηροκάστρου* και *Αγκίστρου*. Πολλές γεωτρήσεις παράγουν νερά μέχρι 75°C , συνήθως αρτεσιανά (τεχνητές πηγές) και πολύ καλής ποιότητας και παροχής. Μεγάλα και μικρότερα γεωθερμικά θερμοκήπια λειτουργούν στη *Νιγρίτα* και το *Σιδηρόκαστρο*. Αρκετές πιθανότητες ανεύρεσης νέων πεδίων στην ίδια λεκάνη υπάρχουν και στα Ίβηρα-Χουμνικό, στη Σκούταρη, στην Κερκίνη και σε άλλες περιοχές της λεκάνης.



Σχήμα 3.2.1: Τα γεωθερμικά πεδία στην Ελλάδα.

3.3 Η Ελληνική Εμπειρία στη Γεωθερμική Αφαλάτωση

Γενικά, τα προγράμματα που έχουν διερευνήσει τεχνικά τη δυνατότητα συνδυασμού γεωθερμικής ενέργειας και αφαλάτωσης νερού είναι περιορισμένα. Αυτό άλλωστε διαπιστώνεται και από φορείς, όπως το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο για τη Γεωθερμική Ενέργεια (European Geothermal Energy Council-EGEC). Απ' την άλλη, το Ι.Γ.Μ.Ε, το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Κ.Α.Π.Ε.) ή πανεπιστημιακές ομάδες, όπως από το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ.), έχουν συμβάλει στην προσπάθεια αξιοποίησης του γεωθερμικού δυναμικού στην Ελλάδα και έχουν προχωρήσει σε μια σειρά τεχνικών και υπολογιστικών μελετών.

Γενικά μπορεί να ειπωθεί ότι σε κάποιες περιπτώσεις το εγχείρημα για εναλλακτικές λύσεις αφαλάτωσης με ΑΠΕ έχει πετύχει (αφαλάτωση με διεργασία RO στη Μήλο). Αλλού τα καινοτόμα προγράμματα αειφόρου ανάπτυξης είναι ακόμα σε εξέλιξη. Αυτή τη στιγμή στην Ελλάδα η γεωθερμική αφαλάτωση δε βρίσκει ακόμα εμπορική εφαρμογή, παρόλο που υπήρχαν πολλές προσδοκίες. Μία μικρή μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού ή γεωθερμικού νερού (η πρώτη παρόμοια μονάδα στον κόσμο) αποπερατώθηκε το 2000 στην Κίμωλο, ενώ αντίστοιχο πρόγραμμα εφαρμόστηκε πιλοτικά στη Μήλο και τερματίστηκε πρόσφατα. Στην Κίμωλο χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της Εξάτμισης Πολλαπλού Φαινομένου (MED) υπό συνθήκες μερικού κενού σε κατακόρυφους αγωγούς. Η μονάδα, που κατασκευάστηκε κατά την περίοδο 1998-99, χρησιμοποιούσε γεωθερμικό νερό χαμηλής ενθαλπίας (61°C) για τη θέρμανση του νερού τροφοδοσίας. Κατά τη δοκιμαστική περίοδο λειτουργίας της μονάδας παράγονταν 3,2 m³/h αφαλατωμένου νερού άριστης ποιότητας με τη χρήση 50 m³/h γεωθερμικού νερού. Από την άλλη, στη Μήλο το πρόγραμμα γεωθερμικής αφαλάτωσης ξεκίνησε με την προοπτική ότι θα προσφέρει αυτάρκεια στο νησί ως προς το νερό, αλλά δεν υλοποιήθηκε μέχρι τώρα, παρά το γεγονός της ανόρυξης όλων των παραγωγικών γεωτρήσεων και των γεωτρήσεων επανεισαγωγής. Η δυναμικότητα σχεδιασμού της μονάδας σχεδιάζονταν να είναι 75 m³ αποσταγμένου νερού/ hr με χρήση 550 m³/h γεωθερμικού νερού υψηλής σκληρότητας. Αυτή τη στιγμή στη Μήλο λειτουργεί μονάδα αφαλάτωσης με διεργασίες μεμβρανών (RO) που καλύπτει μερικώς τις ανάγκες σε νερό του νησιού.

Στις επόμενες παραγράφους θα αναλυθούν ξεχωριστά οι περιπτώσεις γεωθερμικής αφαλάτωσης στην Κίμωλο, στη Μήλο και στη Νίσυρο, με μεγαλύτερη έμφαση στην περίπτωση της Κιμώλου.

3.3.1 Γεωθερμική Αφαλάτωση Νερού στην Κίμωλο

Η Κίμωλος αντιμετωπίζει οξύ πρόβλημα ανεπάρκειας νερού, αλλά ταυτόχρονα διαθέτει σπουδαία γεωθερμικά πεδία όλων των ενεργειακών διαβαθμίσεων. Η προβληματική κατάσταση ως προς το νερό διαμορφώνεται ως εξής: οι μεγάλες ποσότητες μεταφέρονται με δεξαμενόπλοια από το λιμάνι του Πειραιά με κόστος πάνω από 5,28 Euro/m³, ενώ ένα μέρος νερού συλλέγεται από τις βροχοπτώσεις (οι ετήσιες βροχοπτώσεις που καταμετρούνται είναι λιγότερο από 450 mm). Τόσο το κίνητρο όσο και οι κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες ήταν υπαρκτές στο νησί.

Όπως διαβάζουμε στα πρακτικά του “International Summer School on Direct Application of Geothermal Energy” [Karytsas et al.], η μικρή πειραματική μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού (ή γεωθερμικού), που κατασκευάστηκε την περίοδο 1998-1999 στην Κίμωλο, είναι η πρώτη παρόμοια μονάδα σε παγκόσμια κλίμακα. Χρηματοδοτήθηκε από το πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης THERMIE EU-DGXVII με αριθμό GE-438-94-HE. Το γεωθερμικό νερό του πειράματος προέρχονταν από γεώτρηση βάθους 188 m και παρέχεται με 80 m³/h σε θερμοκρασία 61-62°C. Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος ήταν η απόσταξη εν κενώ μέσω συσκευής MED 2 βαθμίδων ή αλλιώς «φαινομένων» (D-TU-2-1200 της Alfa Laval Desalt), η οποία, για τη δοσμένη διεργασία, δίνει αφαλατωμένο νερό σκληρότητας 10 ppm. Η συγκεκριμένη τεχνική κρίθηκε λιγότερο ενεργοβόρα, πιο αποτελεσματική και συνακόλουθα πιο οικονομική σε σχέση με την τεχνική MSF. Η τελευταία θα χρειαζόνταν περισσότερα στάδια για να δώσει το ίδιο αποτέλεσμα. Το ολικό προϊόν της απόσταξης μέσω της τεχνικής MED ήταν περίπου 80 m³ αποσταγμένου νερού/ημέρα. Ενώ, το παραπροϊόν της αφαλάτωσης, η άλμη, αποβάλλονταν στη θάλασσα με ρυθμό 46 m³/h σε θερμοκρασία 32°C. Το κόστος διάθεσης του αφαλατωμένου νερού υπολογίστηκε σε 1,6 Euro/m³ (συμπεριλαμβανομένου μόνο του λειτουργικού κόστους) και κρίθηκε ικανοποιητικό για μια μονάδα αυτού του μεγέθους. Σε μονάδα μεγαλύτερου μεγέθους το κόστος αναμενόταν να είναι αισθητά πιο χαμηλό.



Εικόνα 3.3.1: Η μικρή μονάδα MED τριών βαθμίδων της Alfa Laval στην Κίμωλο.

Ένας από τους στόχους του προγράμματος ήταν η διασφάλιση της μέγιστης ενεργειακής απόδοσης και του ελάχιστου οικονομικού αντίκτυπου διαμέσου της Απόσταξης Πολλαπλού Φαινομένου (MED). Επίσης, κρίθηκε ότι η ολική απόδοση του συστήματος θα αυξηθεί μέσω: της νέας αντλίας θερμότητας με απορρόφηση, τη δυνατότητα χρήσης και συμβατικών πηγών ενέργειας (ορυκτό καύσιμο), τη συμπαράγωγή ατμού-ηλεκτρισμού και την ανάκτηση του απόβλητου άλατος. Αν τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά, παρόμοιες μονάδες θα μπορούσαν να κατασκευαστούν και σε άλλα μέρη των ακτών της Μεσογείου ή ευρύτερα. Πάντως, τα πρώτα δεδομένα έδειξαν ότι *γίνονται εξοικονόμηση ενέργειας κατά 500 ΤΟΕ/έτος* [1 ΤΟΕ (Τόνος Ισοδύναμου Πετρελαίου) ισοδυναμεί με 42 GJ περίπου ή 8.000.000 kcal/h].

□ Γεωλογικά και γεωθερμικά χαρακτηριστικά

Η Κίμωλος ανήκει στο Νησιωτικό Ηφαιστειακό Σύμπλεγμα της Μήλου, το οποίο με τη σειρά του είναι μέρος του ενεργού Ηφαιστειακού Τόξου του Αιγαίου (Βλ. και Σχήμα 3.1.2). Όλες οι γεωλογικές, γεωφυσικές και γεωυδρολογικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν, συνηγορούσαν στην ύπαρξη σημαντικού ταμιευτήρα στο βόρειο τμήμα του νησιού (στην περιοχή των Πράσπων), σε βάθος από 100 έως 300 m. Αυτός βρίσκεται μεταξύ ηφαιστειογενών πετρωμάτων και τεκτονικών ρηγμάτων μεγάλου βάθους. Γι' αυτό το λόγο, σε απόσταση μόλις 2 km από την περιοχή των Πράσπων βρίσκονται μεγάλα και άριστης ποιότητας κοιτάσματα *μπεντονίτη*. Το ρευστό του ταμιευτήρα εκτιμήθηκε ότι είναι θαλασσινό νερό και άρα είναι ανανεώσιμο. Το θαλασσινό νερό φαίνεται ότι διεισδύει στα πορώδη ηφαιστειογενή πετρώματα και κατόπιν ανερχόμενο θερμαίνεται στην επιφάνεια της γης. Επίσης, στο ΝΑ τμήμα του νησιού εντοπίστηκαν σε βάθος μεγαλύτερο από 800 m, ταμιευτήρες με θερμοκρασίες πάνω από 100°C.

Στην περιοχή των Πράσπων έγιναν 2 παραγωγικές γεωτρήσεις που ονομάστηκαν Prassa-1 και Prassa-2. Η γεώτρηση Prassa-1 έχει βάθος 188 m, ονομαστική παροχή 80 m³/h και δίνει γεωθερμικό ρευστό με μέγιστη θερμοκρασία 61,5°C. Οι αντίστοιχες τιμές για τη δεύτερη γεώτρηση (Prassa-2) είναι 238 m, 30 m³/h και 49,2°C. Οι χημικές αναλύσεις που πραγματοποίησε το Ι.Γ.Μ.Ε., έδειξαν ότι υπάρχει μεγάλη ομοιότητα στο ρευστό που αναβλύζει από τις γεωτρήσεις Prassa-1, Prassa-2 και CRES-2 (γεώτρηση του Κ.Α.Π.Ε.) και του θαλασσινού νερού (με μόνη διαφορά τις υψηλότερες τιμές σε CO₂, Ca και SO₄ στο γεωθερμικό ρευστό). Τα δεδομένα αυτά επιβεβαιώνουν την άποψη που διατυπώθηκε από τον Φυτίκα (1995), ότι το γεωθερμικό ρευστό των ταμιευτήρων είναι εγκλωβισμένο θαλασσινό νερό με διαλυμένα ανθρακικά άλατα λόγω των ηφαιστειογενών πετρωμάτων. Στη συνέχεια, επιλέχθηκε η Prassa-1 ως παραγωγική γεώτρηση, λόγω της κατάλληλης θερμοκρασίας και χημικής σύστασης του ρευστού, καθώς και των κατάλληλων υδραυλικών χαρακτηριστικών της. Ενώ η Prassa-2 απορρίφθηκε, γιατί δεν ήταν αποδεκτές οι τιμές της θερμοκρασίας και της υδραυλικής αγωγιμότητας (ως *υδραυλική αγωγιμότητα*, *K*, ορίζεται η ικανότητα του νερού να ρέει διαμέσου του εδάφους ή άλλων πορώδων πετρωμάτων και απορρέει μαθηματικά από τον Νόμο του Darcy). Επίσης, απορρίφθηκε η άποψη να χρησιμοποιηθεί η Prassa-2 ως αγωγός επανεισαγωγής.

□ Δεδομένα σχεδιασμού της μονάδας αφαλάτωσης

Ο σχεδιασμός και η διαστασιολόγηση της Γεωθερμικής Μονάδας Αφαλάτωσης στηρίχθηκε στα εξής δεδομένα:

- Θερμοκρασία γεωθερμικού ρευστού
- Χημική σύσταση γεωθερμικού ρευστού
- Ογκομετρική παροχή του ρευστού και υδραυλικά χαρακτηριστικά του αγωγού
- Ζήτηση νερού στο νησί
- Τεχνολογική και οικονομική δυνατότητα
- Δυνατότητα αύξησης της παραγωγικής ικανότητας της μονάδας.

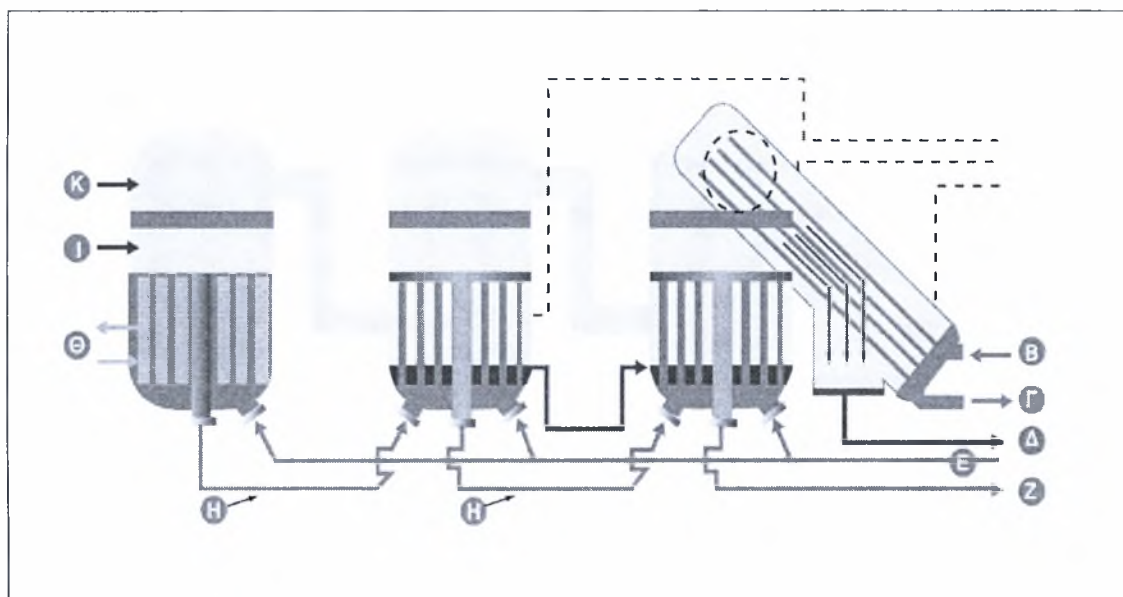
Το θερμοκρασιακό εύρος του ρευστού της Prassa-1 ήταν μικρό (από 58 έως 62°C), γεγονός που οδήγησε στο σχεδιασμό 2 βαθμίδων, σε αντιδιαστολή με τον αρχικά προβλεπόμενο αποστακτήρα πολλαπλού φαινομένου 3 βαθμίδων. Στο σχεδιασμό λήφθηκε, επιπλέον, υπόψη η αυξημένη περιεκτικότητα σε Ca και SO₄ στο γεωθερμικό ρευστό, ενώ πλεονέκτημα θεωρήθηκε η ανυπαρξία του διαβρωτικού αερίου H₂S. Η μελλοντική επέκταση της μονάδας ήταν, επίσης, σημαντικός παράγοντας που οδήγησε στην επιλογή της συσκευής D-TU-2-1200. Λήφθηκε υπόψη ο κοινά αποδεκτός κανόνας στη γεωθερμική αφαλάτωση, που αναφέρει, ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού κατά 1°C, οδηγεί σε αύξηση της παραγωγής αποσταγμένου νερού κατά 3-4%. Γι' αυτό το λόγο έγινε πρόβλεψη ώστε να διανοιχτεί και τρίτος αγωγός, δίπλα στη γεώτρηση Prassa-1 (εκτιμήθηκε ότι θα προσφέρει ρευστό με ογκομετρική παροχή της τάξης των 100 m³/h σε θερμοκρασία 68°C). Έτσι, θα ήταν δυνατό να παράγονται 5 m³ γλυκού νερού/h παραπάνω. Εάν, ακόμα, μπορούσε να αυξηθεί η θερμοκρασία του εργαζόμενου γεωθερμικού ρευστού πάνω από 70°C, υπήρχε η δυνατότητα αύξησης των βαθμίδων αφαλάτωσης σε 3.

Τέλος, αναφέρεται ότι οι μόνιμοι κάτοικοι του νησιού τη χειμερινή περίοδο είναι 800 με ημερήσιες ανάγκες νερού 40-50 m³. Ενώ τη θερινή (τουριστική) περίοδο οι κάτοικοι διπλασιάζονται στους 1600 με ημερήσιες ανάγκες νερού 100-120 m³. Οι συνολικές ετήσιες ανάγκες σε νερό για οικιακή και υγειονομική χρήση εκτιμώνται σε 22000 m³. Το κόστος παραγωγής του νερού εκτιμήθηκε σε 1,03 Euro/m³ (με επιδότηση 50%) για παραγωγή 90 m³ φρέσκου νερού/ ημέρα, ενώ αν η επιδότηση έφτανε το 80%, τότε το κόστος παραγωγής θα έπεφτε στο 0,94 Euro/m³.

□ Η διεργασία της αφαλάτωσης

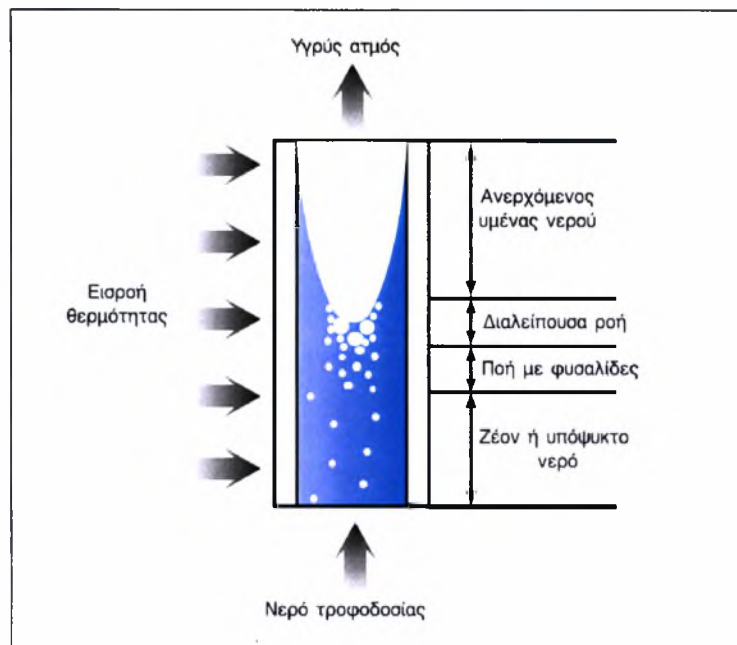
Η προτεινόμενη μονάδα *MED-Κάθετων Αυλών* (Βλ. Σχήμα 3.3.1), λειτουργεί με βάση την απόσταξη πολλαπλού φαινομένου, η οποία πραγματοποιείται μέσω μιας λεπτής πίπτουσας στιβάδας (thin film) του νερού τροφοδοσίας που ρέει εντός των κατακόρυφων αγωγών. Η συσκευή προκαλεί εξάτμιση του νερού σε θερμοκρασία μικρότερη από 70°C, αφού επικρατούν συνθήκες υποπίεσης (λειτουργία σχεδόν εν κενώ). Το πλεονέκτημα της παραπάνω τεχνικής είναι, ότι η εσωτερική επιφάνεια των σωλήνων είναι πάντα καλυμμένη από την προαναφερθείσα στιβάδα νερού (Βλ Σχήμα 3.3.2), και έτσι αποτρέπεται η διάβρωση (δεν υπάρχουν στεγνά σημεία). Σημειώνεται ότι σε άλλα συστήματα η εισαγωγή του θαλασσινού μπορεί να γίνει με καταιονισμό.

Λόγω της χαμηλότερης πίεσης από την ατμοσφαιρική που επικρατεί μέσα στο δοχείο, (επιτυγχάνεται με τη βοήθεια «τζιφαριού») μέρος του θαλασσινού νερού εξατμίζεται. Ο ατμός που παράγεται στο πρώτο δοχείο, διαχωρίζεται από τα πιο βαριά σταγονίδια του θαλασσινού νερού μέσω μιας ατμοπαγίδας (mist eliminator) και εισάγεται κατόπιν στο δεύτερο δοχείο μέσω ενός κεντρικού αγωγού στο δεύτερο δοχείο εξάτμισης, όπου επικρατεί ακόμη μικρότερη πίεση. Δηλαδή, ο εναπομένειν ατμός χρησιμοποιείται ως εργαζόμενο μέσο για τον εναλλάκτη θερμότητας στο δεύτερο δοχείο-φαινόμενο. Τα πιο βαριά σταγονίδια του θαλασσινού νερού επανεισάγονται στο πρώτο δοχείο μαζί με το νερό τροφοδοσίας. Στο δεύτερο δοχείο το αλμυρό νερό θερμαίνεται με τον ατμό από το πρώτο δοχείο, με σύγχρονη συμπίκνωση μέρους του ατμού. Ο ατμός από το δεύτερο δοχείο θερμαίνει το αλμυρό νερό στο τρίτο, ο ατμός από το τρίτο δοχείο το νερό στο τέταρτο κ.ο.κ. Το ρευστό από το κάθε δοχείο οδηγείται στον πυθμένα του συμπυκνωτή, στον οποίο συμπυκνώνεται με τη βοήθεια ψυχρού θαλασσινού νερού ο ατμός από το δοχείο n, και όλο μαζί το συμπύκνωμα (αφαλατωμένο νερό) οδηγείται στη δεξαμενή αποθήκευσης. Η παραπάνω διεργασία επαναλαμβάνεται για όσες n βαθμίδες υπάρχουν σε μία συσκευή MED (μια τυπική διάταξη MED περιλαμβάνει από 8 έως 16 στάδια).



Σχήμα 3.3.1: Σχηματική παράσταση της διεργασίας αφαλάτωσης με τη μέθοδο της απόσταξης πολλαπλού φαινομένου (MED) στην Κίμωλο. Β και Γ: είσοδος και έξοδος του θαλασσινού νερού ψύξης. Δ: προϊόν απόσταξης. Ε: τροφοδοσία θαλασσινού ή γεωθερμικού νερού. Ζ: έξοδος αλμολοίπου. Η: ανάκτηση θερμότητας από το αλμολοίπο. Ι: ξηρός ατμός.

Σύμφωνα με τη δανέζικη κατασκευάστρια εταιρία της συσκευής (Alfa Laval) υπήρχε επιπλέον η δυνατότητα αφαλάτωσης και του ίδιου του γεωθερμικού νερού αντί του θαλασσινού. Έτσι, θα επιτυγχάνονταν μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση και θα εξασφαλιζόνταν μειωμένη κεφαλαιουχική επένδυση και μικρότερες τιμές λειτουργικού κόστους (δε θα χρειάζονταν εναλλάκτες θερμότητας, προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας κ.α.).



Σχήμα 3.3.2: Συνοπτική παρουσίαση των καθεστώτων ροής στους κατακόρυφους αγωγούς εξάτμισης.

□ Ο μηχανολογικός εξοπλισμός της εγκατάστασης

Στο μηχανοστάσιο, της περιοχής των Πράσων στην Κίμωλο, βρίσκονται εγκαταστημένα: η μονάδα αφαλάτωσης MED, η γεωθερμική πηγή και η μονάδα αυτόματου ελέγχου και ηλεκτρολογικών στοιχείων. Οι διαστάσεις του χώρου είναι: 8,15m x 5,00m x 4,20m. Σε ξεχωριστό χώρο βρίσκεται η αντλία του θαλασσινού νερού που προορίζεται για την ψύξη και συνεπώς την παραγωγή αποστάγματος φρέσκου νερού.

Το γεωθερμικό νερό, όπως προαναφέρθηκε, μπορούσε να παίζει *διττό ρόλο*: λειτουργώντας ως θερμικό μέσο στον εναλλάκτη θερμότητας της αποστακτικής μονάδας και ταυτόχρονα ως νερό τροφοδοσίας προς αφαλάτωση. Το γεωθερμικό νερό, αρχικά, αφού αποβάλλει ένα μέρος του θερμικού του περιεχομένου (από 61°C στους 53°C), χωρίζεται σε δύο ρεύματα: το ένα ρεύμα γίνεται νερό τροφοδοσίας στους 53°C με ογκομετρική παροχή 50 m³/h, ενώ το άλλο είτε επανεισάγεται είτε αποβάλλεται στη θάλασσα μαζί με τα αλμόλοιπα. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλίας του γεωθερμικού νερού που τοποθετήθηκε στη γεώτρηση Prassa-1 φαίνονται στον Πίνακα 3.3.1.

Σε ειδική θέση κοντά στη γεώτρηση Prassa-1, τοποθετήθηκε το *σύστημα ψύξης της μονάδας μέσω θαλασσινού νερού*. Αυτό περιελάμβανε: αντλία θαλασσινού νερού, φίλτρο θαλασσινού νερού και αγωγό που οδηγούσε το νερό ως την αποστακτική μονάδα. Κατόπιν το θαλασσινό νερό επανεισάγονταν στη θάλασσα μαζί με το εναπομείναν γεωθερμικό νερό της διεργασίας. Η αποβολή του γεωθερμικού νερού στη θάλασσα ήταν περιβαλλοντικά αποδεκτή (ίδια χημική σύσταση και θερμοκρασία περίπου). Οι αγωγοί μεταφοράς αυτών των ρευστών ήταν κατασκευασμένοι από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE).

Τύπος αντλίας	8 KHM
Πλήθος βαθμίδων	20
Απαιτούμενη ονομαστική ισχύς	60 HP
Ονομαστικό μανομετρικό ύψος	90 m
Παροχή – Περιστροφική ταχύτητα	100 m³/h – 1450 rpm
Συντελεστής απόδοσης της αντλίας	78-79%
Διάμετρος αγωγού εξαγωγής του νερού	5 in
Υλικό περωτής	ορείχαλκος αντιδιαβρωτικής προστασίας έναντι του θαλασσινού νερού
Υλικό άξονα	ανοξειδωτος χάλυβας
Inverter	45 kW ABB

Πίνακας 3.3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά της γεωθερμικής αντλίας στη θέση Prassa-1 στην Κίμωλο.

3.3.2 Γεωθερμική Αφαλάτωση Νερού στη Μήλο

□ Οι αρχικές γεωλογικές μελέτες στο νησί

Το νησί της Μήλου βρίσκεται σχεδόν στο μέσον του Ηφαιστειακού Τόξου του Αιγαίου (Βλ. και Σχήμα 3.1.2) και χαρακτηρίζεται από αφθονία γεωθερμικών πηγών υψηλής θερμοκρασίας. Στο παρελθόν το Ι.Γ.Μ.Ε. είχε πραγματοποιήσει επιλεκτικές διατρήσεις του εδάφους, προκειμένου να αποσαφηνιστούν κάποια γεωλογικά χαρακτηριστικά του. Έγιναν εκτιμήσεις θερμοκρασιών σε αβαθή σημεία, καθώς και μετρήσεις της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης Schlumberger (μονάδα μέτρησης σε Ω.m) σε επιφανειακά πετρώματα.

Τα αποτελέσματα έδειξαν, ότι το ανατολικό τμήμα του νησιού (και ειδικά η πεδιάδα της Ζεφύριας) είναι η περιοχή με τις υψηλότερες θερμοκρασιακές βαθμίδες και τις χαμηλότερες ειδικές αντιστάσεις. Συνακόλουθα, κρίθηκε ως η τοποθεσία με τη μεγαλύτερη πιθανότητα για την ύπαρξη πεδίου υψηλής ενθαλπίας. Μεταγενέστερες διερευνητικές γεωτρήσεις που έγιναν από τη Δ.Ε.Η., επιβεβαίωσαν τις ενδείξεις για την ύπαρξη γεωθερμικών ρευστών θερμοκρασίας 300-323°C σε βάθος 800-1400 m στην πεδιάδα της Ζεφύριας. Η εξέταση των δεδομένων από τη γεωχημική έρευνα που χρηματοδότησε η Δ.Ε.Η., απέδειξε ότι πράγματι το ανατολικό κομμάτι του νησιού είναι πρόσφορο για εκμετάλλευση αβαθών γεωθερμικών πηγών χαμηλής ενθαλπίας (<100°C).

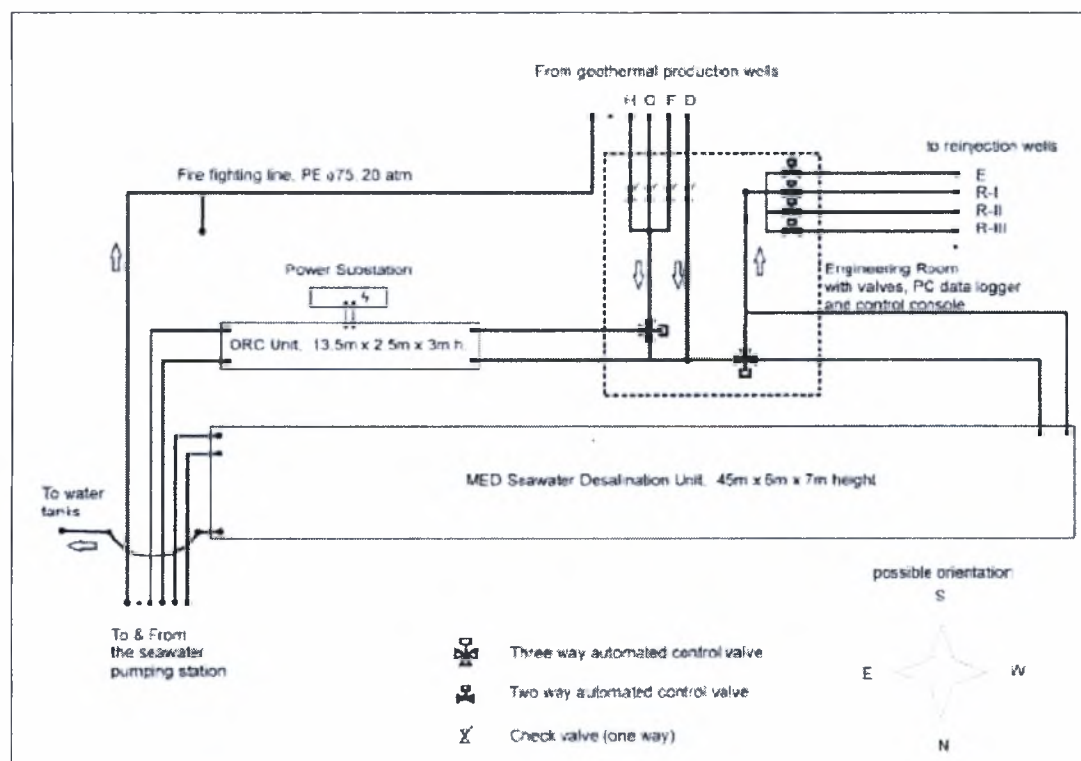
Το Κ.Α.Π.Ε. έχοντας αξιολογήσει τα δεδομένα για την ποιότητα και ποσότητα των σχετικών πηγών είτε με κλασικές μεθόδους είτε μέσω υπολογιστικών εξομοιώσεων, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το γεωθερμικό ρευστό του συστήματος της Μήλου προσομοιάζει με θερμό θαλασσινό νερό με συγκέντρωση άλατος 80 000 ppm. Ο σχεδιασμός, η επίβλεψη και ο έλεγχος ποιότητας των τελικών γεωτρήσεων έγινε από το Α.Π.Θ.. Οι ερευνητές είχαν, επιπλέον, στη διάθεση τους βάση δεδομένων τύπου GIS (Geographical Information System), όπου υπήρχαν διαθέσιμες πληροφορίες και

δορυφορικές εικόνες σχετικά με τη γεωλογική διαμόρφωση και το γεωθερμικό δυναμικό του νησιού.

□ Η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας – Πρόγραμμα MIDES

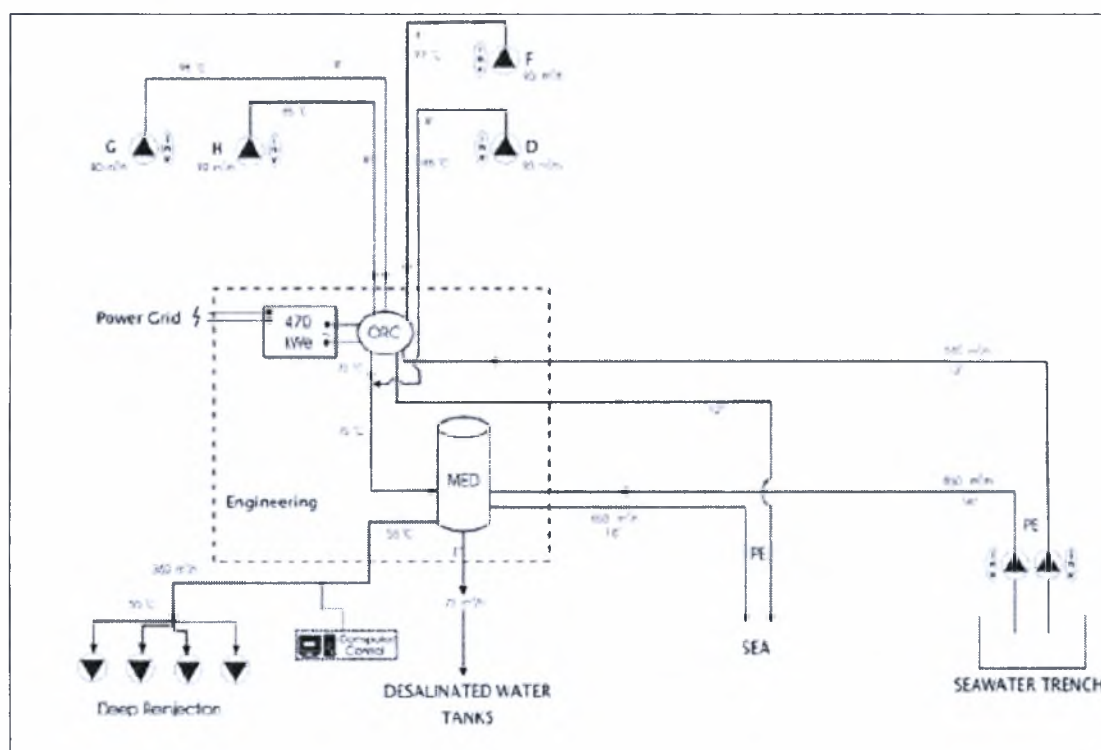
Όπως διαβάζουμε σε δημοσίευση της EGEC, κύριος στόχος του προγράμματος MIDES στη Μήλο ήταν ο σχεδιασμός και η λειτουργία μια μονάδας αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με μοναδική ενεργειακή πηγή τις τοπικές γεωθερμικές εστίες χαμηλής ενθαλπίας, ώστε να παράγεται αποσταγμένο νερό με ρυθμό 75-80 m³/h. Επίσης, στο σχεδιασμό προβλέπονταν η δυνατότητα κατασκευής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής (με οργανικό κύκλο Rankine-ORC) συνολικής ισχύος 470 KWe. Υπήρχε η προσδοκία το σύστημα να είναι αυτόνομο σε θερμική ενέργεια και δυναμικά αυτόνομο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η τοπική κοινωνία θα επωφελούνταν από την καινοτόμα μονάδα αφαλάτωσης, αφού μετά την επιτυχή υλοποίηση του έργου, το νησί της Μήλου θα μπορούσε να είναι αυτόαρκες ως προς τις ετήσιες ανάγκες του σε νερό (οι μόνιμοι κάτοικοι είναι 5000). Το κόστος του αποσταγμένου νερού, που αναμένονταν να είναι 1,5 Euro/m³ (ή 1,7 Euro/m³ σύμφωνα με άλλες εκτιμήσεις), θεωρείται αρκετά χαμηλό, αφού ανταγωνίζεται ακόμα και τις αντίστοιχες τιμές των συμβατικών μεθόδων αφαλάτωσης. Η γεωθερμική ενέργεια χαμηλής ενθαλπίας είναι μια ήπια, εναλλακτική μορφή ενέργειας που δε ρυπαίνει ούτε διαταράσσει το τοπικό οικοσύστημα και σαν τέτοια είναι κοινωνικά αποδεκτή σε ακόμα μεγαλύτερο βαθμό. Η συνδυασμένη μονάδα αφαλάτωσης και ηλεκτροπαραγωγής χρησιμοποιούσε γεωθερμικό νερό από τη θέση Βουνάλια. Ένα πρόχειρο διάγραμμα ροής της παραγωγικής διαδικασίας φαίνεται στα Σχήματα 3.3.3 και 3.3.4.



Σχήμα 3.3.3: Πρόχειρο σχηματικό διάγραμμα της γεωθερμικής μονάδας αφαλάτωσης στη Μήλο.

Στα διαγράμματα φαίνονται οι γεωτρήσεις προσαγωγής του γεωθερμικού νερού (G, H, F, D), καθώς και οι γεωτρήσεις επιστροφής για τη μονάδα αφαλάτωσης (E, R I, R II, R III). Οι γεωτρήσεις G, H, F, D και E χαρακτηρίζονταν από υψηλές τιμές ογκομετρικής παροχής, χαμηλή στάθμη του νερού, υψηλή διαπερατότητα των πετρωμάτων και ήταν αβαθείς. Οι θερμοκρασίες των νερών ήταν 55°C για τη γεώτρηση E και 99°C για τη γεώτρηση G. Γενικά, όλες οι γεωτρήσεις που υπήρχαν ήταν σχετικά αβαθείς (70-185 m) και η στάθμη του νερού ήταν (περίπου για όλες) στο επίπεδο της θάλασσας. Η γεώτρηση E ήταν η μόνη εξαίρεση, όπου το γεωθερμικό ρευστό προσέγγιζε το σημείο εξάτμισης (με αποτέλεσμα τα επιφανειακά στρώματα του ρευστού να είναι ατμός και έτσι η στάθμη του ήταν δυσδιάκριτη).



Σχήμα 3.3.4: Πρόχειρο σχηματικό διάγραμμα της ηλεκτροπαραγωγικής μονάδας στη Μήλο.

□ Η πρόταση για το τελικό σχήμα της γεωθερμικής εκμετάλλευσης

Σύμφωνα με την πρόταση της τεχνικής μελέτης του Κ.Α.Π.Ε. οι μονάδες της αφαλάτωσης και της ηλεκτροπαραγωγής θα αποτελούνταν από τα εξής τμήματα:

- **Γεωτρήσεις προσαγωγής γεωθερμικού νερού:** θα χρησιμοποιούνταν οι πλησιέστερες στη θάλασσα, γιατί είχαν μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση. Οι γεωτρήσεις F, D, G και H αναμένονταν να παράγουν 300 m³/h γεωθερμικού νερού θερμοκρασίας 55-99°C. Οι γεωτρήσεις A και C δεν επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν, λόγω της μειωμένης ενεργειακής τους απόδοσης, της μεγάλης απόστασής τους από τη θάλασσα και της χαμηλής τους στάθμης. Αυτά θα αύξαναν το κόστος επένδυσης, καθώς και το λειτουργικό κόστος (κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για την άντληση και μεταφορά του γεωθερμικού ρευστού).

- *Υπόγειες γεωθερμικές αντλίες και μετασχηματιστές ηλεκτρικού ρεύματος (inverters) που θα βρίσκονταν στα φρεάτια.*
- *Δίκτυο υπόγειων σωληνώσεων:* θα μετέφερε το γεωθερμικό ρευστό στην Κύρια Μονάδα. Οι αγωγοί που θα έφταναν τη μέγιστη πίεση λειτουργίας τα 10 bar, θα ήταν είτε από χάλυβα είτε από συνθετικό υλικό ενισχυμένο με υαλονήματα (fiberglass).
- *Ηλεκτρικό κύκλωμα και σύστημα μετάδοσης ηλεκτρονικών δεδομένων από την Κύρια Μονάδα στα φρεάτια.*
- *Μία μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του οργανικού κύκλου Rankine (ORC Unit):* θα μετέτρεπε το 7% της παρεχόμενης γεωθερμικής ενέργειας σε ηλεκτρισμό ισχύος 470 kWe.
- *Συνδυασμός αποστακτικής συσκευής και θερμικού συμπιεστή, δηλαδή MED και TVC, για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού με δυναμικότητα 75-80 m³/h γλυκού νερού.*
- *Ένας βασικός θερμικός εναλλάκτης:* θα προορίζονταν για να απάγει την παρεχόμενη γεωθερμική ενέργεια, καθώς εξέρχεται από τη μονάδα ORC και θα τη μετέφερε στις συσκευές αφαλάτωσης.
- *Γεωτρήσεις επιστροφής του γεωθερμικού νερού:* αυτές θα ήταν η RE I, η RE II και η E (λόγω χαμηλής θερμοκρασίας, 55°C), οι οποίες βρίσκονται στο περιθώριο των άλλων γεωτρήσεων, κοντά στη θάλασσα και σε χαμηλότερη στάθμη.
- *Δίκτυο υπόγειων σωληνώσεων που θα μετέφερε το γεωθερμικό ρευστό από το βασικό θερμικό εναλλάκτη στα φρεάτια επιστροφής:* αγωγοί που θα έφταναν τη μέγιστη πίεση λειτουργίας τα 10 bar (χωρίς επιπλέον άντληση) και θα ήταν είτε από χάλυβα είτε από συνθετικό υλικό ενισχυμένο με υαλονήματα (fiberglass).
- *Δίκτυο υπόγειων σωληνώσεων που θα μετέφερε το θαλασσινό νερό για ψύξη στη μονάδα MED-TVC (1000 m³/h) και στη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής (200-575 m³/h).* Οι αγωγοί θα ήταν από PE (πολυαιθυλένιο) και θα μετέφεραν το θαλασσινό νερό από μία τάφρο κοντά στη θάλασσα, όπου θα βρίσκονταν και η αντλητική εγκατάσταση.
- *Υπόγεια σωλήνωση από PE που θα μετέφερε το αφαλατωμένο νερό στις αποθηκευτικές δεξαμενές στα περίχωρα του Αδάμαντα.*
- *Διασυνδεδεμένη υπομονάδα ηλεκτρικής ισχύος που θα παρείχε ηλεκτρισμό 500 kWe στο δίκτυο της Δ.Ε.Η..*

Στους επόμενους πίνακες γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των κύριων χαρακτηριστικών της συνδυασμένης γεωθερμικής μονάδας, καθώς και μια ενδεικτική κοστολόγηση του προγράμματος MIDES.

Πλήθος γεωτρήσεων	10 γεωτρήσεις (βάθους 70-185 m)
Συνολική παροχή γεωθερμικού νερού	550 m³/h
Θερμοκρασιακό εύρος του εξερχόμενου γεωθερμικού νερού	55 – 100 °C
Συνολικά διαλυμένα στερεά του γεωθερμικού νερού, TDS (σκληρότητα)	20 000 – 50 000 ppm
Μονάδα αφαλάτωσης	Αποστακτήρας Πολλαπλού Φαινομένου (MED) σε συνδυασμό με Θερμικό Συμπιεστή Ατμού (TVC)
Δυναμικότητα σχεδιασμού μονάδας αφαλάτωσης (μέγιστη παροχή αφαλατωμένου νερού)	75 m³/h
Ισχύς διασυνδεδεμένης μονάδας ηλεκτροπαραγωγής (δυναμικότητα σχεδιασμού)	600 kWe

Πίνακας 3.3.2: Συνοπτική παρουσίαση των κύριων χαρακτηριστικών της συνδυασμένης γεωθερμικής μονάδας αφαλάτωσης-ηλεκτροπαραγωγής που προτάθηκε για τη Μήλο. [Πηγή: EGEC]

Επένδυση κεφαλαίου ή πάγιο κόστος (συμπεριλαμβανομένου του κόστους εργασιών)	5,375 εκατ. Euro
Απόδοση κεφαλαίου (Return on Equity)	19 %
Συγχρηματοδότηση από την Ε.Ε.	1,5 εκατ. Euro (35% επί του κόστους σχεδιασμού και κατασκευής)
Κεφάλαιο δανεισμού	2,5 εκατ. Euro
Χρόνος απόσβεσης κεφαλαίου	9 έτη (δυσμενέστερη περίπτωση)
Κόστος παραγωγής θερμικής ενέργειας (συμπεριλαμβανομένης της απόσβεσης κεφαλαίου)	0,0071 Euro/kWh_{th}
Κόστος παραγωγής αφαλατωμένου νερού	1,02 Euro/m³
Συνολικό κόστος αφαλατωμένου νερού (με ετήσιο κέρδος 25%)	1,7 Euro/m³

Πίνακας 3.3.3: Κοστολόγηση του προγράμματος MIDES στη Μήλο. [Πηγή: GSDP GmbH]

3.3.3 Γεωθερμική Αφαλάτωση Νερού στη Νίσυρο

Σύμφωνα με τις δημοσιεύσεις της EGEC, στη Νίσυρο έχουν ανακαλυφθεί σπουδαία γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας (δηλ. με θερμοκρασίες ρευστών μεγαλύτερες από 150°C) και έχουν γίνει 2 παραγωγικές γεωτρήσεις. Έχει εντοπιστεί οικονομικά εκμεταλλεύσιμο γεωθερμικό δυναμικό ισχύος πάνω από 500 MWth. Οι πιο υψηλές θερμοκρασίες εντοπίστηκαν σε βάθος 1500 m και ήταν 350°C. Έτσι, οι γεωτρήσεις που αναφέρθηκαν πιο πάνω, θα μπορούσαν να στηρίξουν μονάδα ηλεκτροπαραγωγής 5 MWe (από τα 50 MWe του συνολικού δυναμικού). Αυτή τη στιγμή λειτουργεί εφεδρική θερμική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής 770 kWe με συμβατικά μέσα, ενώ το νησί είναι διασυνδεδεμένο με το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ισχύος της Κω.

Πρακτικές εξοικονόμησης ενέργειας είναι σχεδόν απίθανο να εφαρμοστούν, αφού η εφεδρική θερμική μονάδα δεν ενδείκνυται για αξιοποίηση της διαφυγούσας θερμότητας. Στα πλαίσια της αιεφορίας, μόνο μια γεωθερμική μονάδα αφαλάτωσης θα ήταν οικονομικά εφικτή και περιβαλλοντικά φιλική. Έχει ενδιαφέρον να παρατεθούν κάποια στοιχεία σχετικά με το νησί (Πίνακας 3.4.3), καθώς και τα ενδεικτικά στοιχεία κοστολόγησης της προτεινόμενης μονάδας MED για αφαλάτωση (Πίνακας 3.4.4).

<i>Μόνιμοι κάτοικοι ν. Νισύρου</i>	913
<i>Εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς</i>	770 kW
<i>Ετήσια ποσότητα νερού που μεταφέρεται στο νησί</i>	80 108 m³
<i>Water Needs Index-WNI (δείκτης υδατικών αναγκών)</i>	87,7
<i>Ολικό κόστος αφαλατωμένου νερού από την προτεινόμενη γεωθερμική μονάδα MED</i>	1,74 Euro/m³
<i>Πάγιο κόστος προτεινόμενης μονάδας MED (δυναμικότητα: 300 m³/ημέρα - παροχή γεωθερμικού ρευστού: 100 m³/h στους 75°C)</i>	620 000,00 Euro

Πίνακας 3.3.4: Εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς, ανάγκες σε νερό και κόστος γεωθερμικής αφαλάτωσης νερού στη Νίσυρο. [πηγή: EGEC]

Μπορούμε να παρατηρήσουμε, ότι η εκτίμηση του κόστους πώλησης του αφαλατωμένου νερού είναι 1,74 Euro/m³, δηλαδή, έχει σχεδόν ίδια τιμή με τη περίπτωση της Μήλου. Στην τιμή περιλαμβάνεται, όπως και σε κάθε περίπτωση κοστολόγησης, κυρίως το κόστος παραγωγής του αποσταγμένου νερού, ένα ποσοστό κερδοφορίας για την επιχείρηση, το κόστος διανομής και αποθήκευσης του νερού, καθώς και το κόστος για την προστασίας του περιβάλλοντος (π.χ.: διάθεση της άλμης). Τέλος, για τη δοσμένη περίπτωση, υποτέθηκε ένας συντελεστής φορτίου 90%, δηλαδή, όταν οι ετήσιες ανάγκες σε νερό είναι 98 550 m³.

ΠΑΓΙΟ ΚΟΣΤΟΣ: 620 000 Euro	
Κόστος μονάδας MED (δυναμικότητα: 300 m ³ /ημέρα) + Σύστημα εισαγωγής θαλασσινού νερού	500 000 Euro
Γεωθερμική γεώτρηση παραγωγής	60 000 Euro
Λοιπά πάγια έξοδα	60 000 Euro
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΕΤΗΣΙΟ (ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ) ΚΟΣΤΟΣ: 171 950 Euro/yr	
Κόστος συντήρησης ανά έτος	16 200 Euro/yr
Άλλα λειτουργικά έξοδα ανά έτος	88 800 Euro/yr
Ετήσια δόση δανείου (εξόφληση ομολογιακού δανείου με ετήσιο επιτόκιο 5%, περίοδος 12 έτη)	71 950 Euro/yr

Πίνακας 3.3.5: Ενδεικτική κοστολόγηση της γεωθερμικής μονάδας αφαλάτωσης MED στη Νίσυρο. [πηγή: EGEC]

3.4 Προτάσεις Γεωθερμικής Αφαλάτωσης από το Εξωτερικό

Η παλαιότερη τεχνική έκθεση σχετικά με την αφαλάτωση μέσω γεωθερμικής ενέργειας δημοσιεύθηκε το 1976, όπως διαπιστώνουν οι Bourouni και Chaibi (2005). Στο εν λόγω δημοσίευμα των Awerbuch κ.α. (1976) φαίνεται ότι η υπηρεσία ανάπτυξης του υπουργείου Εσωτερικών των Η.Π.Α., πραγματοποιούσε ενδιαφέρουσες έρευνες πάνω σε μια πιλοτική μονάδα γεωθερμικής αφαλάτωσης στο Holtville της California ήδη από το 1972. Οι Boegli κ.α. (1977) αναφέρουν ότι η ίδια υπηρεσία διερευνούσε τη δυνατότητα εκμετάλλευσης γεωθερμικών ρευστών στην περιοχή East Mesa Test Site, μέσω της θερμικής μεθόδου MSF και της Ηλεκτροδιαπίδσης σε υψηλές θερμοκρασίες (high-temperature ED). Εξετάστηκαν διάφοροι αγωγοί για εξάτμιση του προς απόσταξη ρευστού, καθώς και διάφορα είδη μεμβρανών για τις αντίστοιχες διεργασίες. Το 1982, με αφορμή τις υψηλές πιθανότητες ανακάλυψης γεωθερμικού ταμιευτήρα χαμηλής ενθαλπίας στο Ισραήλ, ο Ophir εξέδωσε δημοσίευμα στο τεχνικό περιοδικό Desalination. Ο Ophir (1982) διερεύνησε οικονομο-τεχνικά τη δυνατότητα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού και την παραγωγή βοηθητικής ηλεκτρικής ισχύος. Μάλιστα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το κόστος του αποσταγμένου νερού, θα είναι στην εκπληκτικά χαμηλή τιμή (ακόμα και για εκείνη την εποχή) του 0,5 \$/τόνο. Τέλος, το 1994 η εταιρία Caldor-Marseilles κατοχύρωσε ως ευρεσιτεχνία μια μικρή μονάδα παραγωγής αποσταγμένου νερού με γεωθερμία (δυναμικότητας μερικών m³ την ημέρα).

Η έρευνα πάνω στη γεωθερμική αφαλάτωση διεθνώς είναι περιορισμένη όπως φάνηκε πιο πριν. Ωστόσο, για παραγωγή μικρών ποσοτήτων αφαλατωμένου νερού (λιγότερο από 10 m³/ημέρα) εμφανίζεται κάποιο ενδιαφέρον. Σε μερικές χώρες με περιορισμένα υδατικά αποθέματα, είναι ευχάριστο το γεγονός ότι έχουν εντοπιστεί εκμεταλλεύσιμα γεωθερμικά πεδία. Αυτά θα μπορούσαν αξιοποιηθούν για αφαλάτωση θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού, ακόμα και του ίδιου του γεωθερμικού ρευστού. Σε όλες τις χώρες της Β. Αφρικής και ιδιαίτερα σε αυτές των νότιων παράλιων της Μεσογείου το πρόβλημα της έλλειψης νερού είναι ιδιαίτερα έντονο και έχει πολλές προεκτάσεις. Αυτές σχετίζονται με τη δυσκολία στην καλλιέργεια της γης και την υποβάθμιση, γενικότερα, της ποιότητας ζωής των κατοίκων, με αποτέλεσμα να ελλοχεύουν οι κίνδυνοι της πολιτικής αστάθειας και των πολεμικών συρράξεων [Bourouni & Chaibi, 2005]. Σύμφωνα με την Population Action International, οι εκτιμήσεις για τα εν λόγω κράτη για το έτος 2025 αναφέρουν ότι η ετήσια ποσότητα ανανεώσιμου νερού που αντιστοιχεί ανά κάτοικο είναι λιγότερο από 500 m³.

Στην επόμενη παράγραφο θα περιγραφεί η περίπτωση της γεωθερμικής αφαλάτωσης στην Τυνησία, η οποία βρίσκεται, επίσης, σε δυσμενή κατάσταση ως προς τα υδατικά αποθέματα. Η ετήσια ολική ποσότητα νερού που αντιστοιχεί στη χώρα είναι 4545 Mm³ και διανέμεται ανισομερώς. Έτσι, στο ΝΔ τμήμα, που είναι έντονα εξαρτώμενο από τη γεωργική παραγωγή, αντιστοιχούν λιγότερο από το 23% των ετήσιων υδατικών αποθεμάτων. Επιπλέον, το πρόβλημα της υφαλμύρωσης και ερημοποίησης που αντιμετωπίζουν πολλές περιοχές της χώρας δεν είναι αμελητέο. Είναι φανερό ότι η αφαλάτωση νερού στην Τυνησία προβάλλει ως επιτακτική ανάγκη. Στα πλαίσια της αειφορίας και της ανάγκης για προστασία του φυσικού περιβάλλοντος, κρίθηκε από

ομάδες ερευνητών ότι μπορεί να γίνει αφαλάτωση μέσω των υπαρχόντων γεωθερμικών πεδίων ή της ηλιακής ενέργειας.

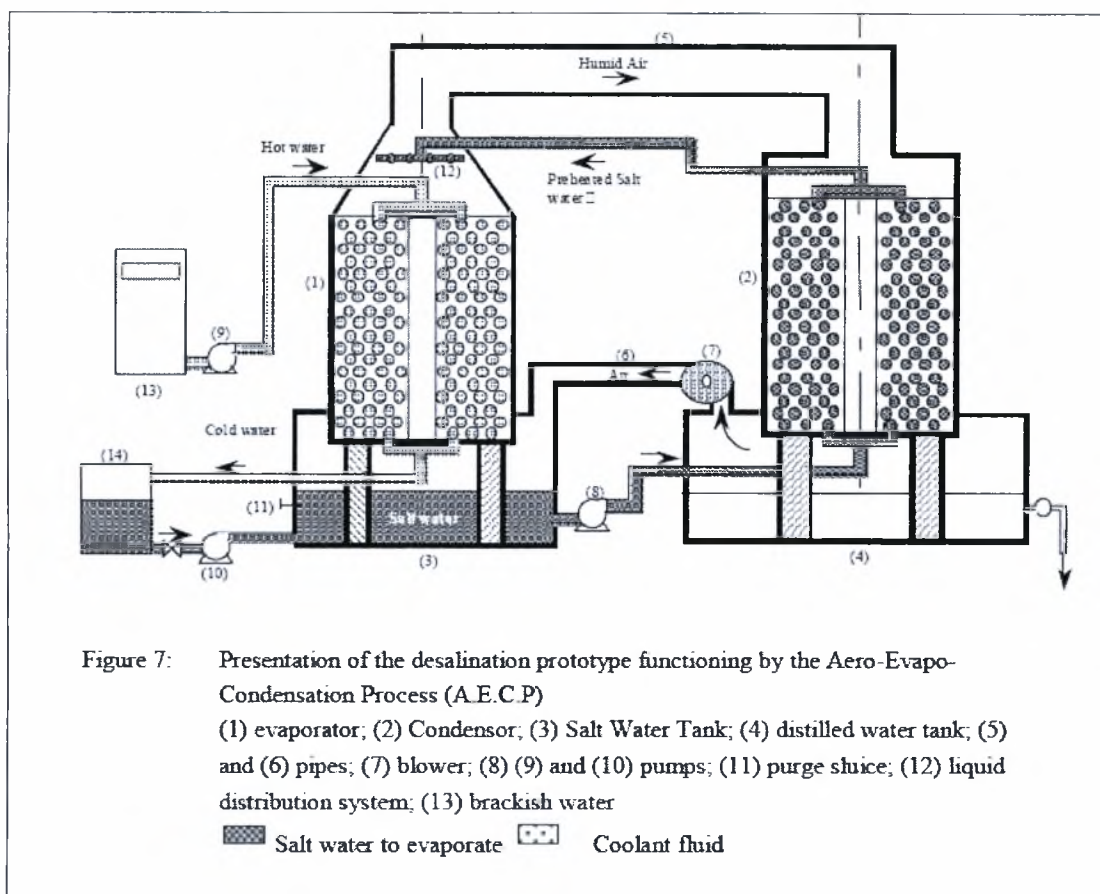
□ Γεωθερμική αφαλάτωση υφάλμυρου νερού στη Ν. Τυνησία

Στην Τυνησία υπάρχει πληθώρα γεωθερμικών ταμιευτήρων διασκορπισμένων σε όλη την ενδοχώρα, αλλά και στα νότια παράλια όπου είναι οξύτερο το πρόβλημα της έλλειψης νερού. Οι περισσότεροι ταμιευτήρες που έχουν εντοπιστεί είναι χαμηλής ενθαλπίας και είναι της τάξης των 70-90°C. Αυτό, όμως, δεν αναιρεί το γεγονός ότι μπορούν να αξιοποιηθούν σε θερμικές διεργασίες αφαλάτωσης (MED, Εκτονωτική απόσταξη μιας βαθμίδας-SF, MSF, TVC) και να εξοικονομηθεί ενέργεια στην προθέρμανση. Ακόμα, πρέπει να υπογραμμιστεί, ότι η Τυνησία είναι μια χώρα που παραδοσιακά εκμεταλλεύεται το υφάλμυρο γεωθερμικό νερό για την άρδευση των οάσεων (77,3%) ή των θερμοκηπίων (18,5%). Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται πύργοι ψύξης που μειώνουν τη θερμοκρασία και τη σκληρότητα του γεωθερμικού νερού, αλλά μ' αυτό τον τρόπο διαφεύγει μεγάλη ποσότητα θερμικής ενέργειας. Αυτή η θερμότητα θα μπορούσε να αξιοποιηθεί στις διεργασίες μεμβρανών (RO), όπου η παραγόμενη ποσότητα αποσταγμένου νερού αυξάνει με τη θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας (2-3% ανά 1 °C). Με τις μεμβράνες πολυπροπυλενίου τύπου TM (Polypropylene Tubular Membranes) έχει εκτιμηθεί ότι θα αυξηθεί η παραγωγικότητα κατά 20-30% για τις δοσμένες θερμοκρασιακές τιμές του υφάλμυρου γεωθερμικού νερού. Επίσης, η ανερχόμενη μέθοδος της Απόσταξης σε Μεμβράνη (MD) μπορεί να αξιοποιήσει επαρκώς τη γεωθερμία χαμηλής ενθαλπίας. [Bourouni & Chaïbi, 2005].

Οι Bourouni κ.α. (1999) από το Πανεπιστήμιο της Προβηγκίας (Universite de Provence) εξέτασαν τη δυνατότητα συνδυασμού της γεωθερμικής ενέργειας με μια νέα τεχνική που βασίζεται εμμέσως στις θερμικές διεργασίες. Μελέτησαν σε πειραματικό επίπεδο δύο μικρές μονάδες αφαλάτωσης μέσω γεωθερμίας χαμηλής ενθαλπίας (60-90°C). Το κόστος του αποσταγμένου νερού ήταν μόλις 1,2 US\$/m³, αλλά η παραγόμενη ποσότητα ήταν μικρή, περίπου 3 m³/ημέρα και ήταν μια ικανή ποσότητα για να καλύψει τις ανάγκες ενός μικρού χωριού. Η πρότυπη μονάδα ήταν εγκαταστημένη στη Ν. Τυνησία, ενώ άλλη μία υπήρχε στη Γαλλία.

Οι κλασικές θερμικές μέθοδοι απαιτούν μεγάλες ποσότητες θερμικής ενέργειας, όταν δεν πραγματοποιούνται σε χαμηλή πίεση. Υπάρχουν, βέβαια, άλλες τεχνικές που στηρίζονται στην ύγρανση-αφύγρανση (ή αλλιώς εξάτμιση-συμπύκνωση) του αέρα είναι ικανές να αποδώσουν σε υψηλό βαθμό, αν συνδυαστούν με γεωθερμική ενέργεια χαμηλής θερμοκρασίας ή ακόμα και με ηλιακή ενέργεια. Η προτεινόμενη διεργασία των Bourouni κ.α. (1999), γνωστή ως «Aero-Evapo-Condensation Process (AECP)», σχεδιάστηκε με γνώμονα το χαμηλό λειτουργικό κόστος, τις μειωμένες απαιτήσεις για συντήρηση, την απλή λειτουργία και την υψηλή αξιοπιστία.

Στο Σχήμα 3.4.1 φαίνεται η πρωτότυπη μονάδα AECP. Τα κύρια μέρη της διάταξης είναι οι δύο εναλλάκτες θερμότητας: ο εξατμιστήρας (1) και ο συμπυκνωτήρας (2). Αυτοί είναι εναλλάκτες αυλών-κελύφους (ορθογωνικής διατομής), έχουν ύψος 2 m και φέρουν συνολικά 865 m αυλούς. Επίσης, όπως φαίνεται στο σχηματικό διάγραμμα, υπάρχει μια δεξαμενή αλμυρού νερού (3) και άλλη μία για την αποθήκευση του αποσταγμένου νερού (4). Οι δύο εναλλάκτες θερμότητας είναι συνδεδεμένοι με δύο σωλήνες (5), (6) στους οποίους κυκλοφορεί ο υγρός αέρας.



Σχήμα 3.4.1: Σχηματικό διάγραμμα της πρότυπης διάταξης AECP στην Τυνησία. [Πηγή: Bourouni & Chaibi, 2005]

Το υγρό τροφοδοσίας είναι το υφάλμυρο γεωθερμικό νερό σε θερμοκρασία 65°C . Θα περιγράψουμε σύντομα τον κύκλο του υγρού νερού και αέρα μέσα στη διάταξη, ξεκινώντας από το σύστημα διανομής που βρίσκεται στην κορυφή του εξατμιστήρα (1). Το σύστημα διανομής (12) έχει διάμετρο 25 mm και επιτρέπει στο προθερμασμένο νερό να κυλάει πάνω στους αυλούς του εναλλάκτη θερμότητας, όπου και εξατμίζεται (σημειώνουμε ότι όλη η διεργασία πραγματοποιείται σε ατμοσφαιρική πίεση). Ο ατμός που παράγεται μεταφέρεται με το ρεύμα αέρα, που κυκλοφορεί σε αντιστροφή, από τον εξατμιστήρα στο συμπυκνωτή. Κατόπιν ο υγρός αέρας συμπυκνώνεται στην επιφάνεια των αυλών του συμπυκνωτήρα (2) και στη συνέχεια συλλέγεται ως αφαλατωμένο νερό στην αντίστοιχη δεξαμενή (4).

Στην επιφάνεια των αυλών τόσο του εξατμιστήρα όσο και του συμπυκνωτήρα σχηματίζεται ένας λεπτός υμένας (thin film). Αυτός μπορούσε να ελέγχεται οπτικά, καθώς η μπροστινή επιφάνεια του εναλλάκτη ήταν καλυμμένη με διαφανές υλικό (plexiglass). Γενικά, μπορούσε να μελετηθεί το καθεστώς της ροής του αέρα (αριθμός Reynolds, $Re_{in,g}$), το είδος της ροής είτε του ψυχρού λεπτού υμένα συμπυκνώματος (Re_{ef}) είτε του θερμού λεπτού υμένα (Re_{hi}), καθώς και ο ρυθμός εξάτμισης της μάζας του νερού, m_{ev} . Στα πειραματικά αποτελέσματα της Τυνησίας φάνηκε, σε γενικές γραμμές, ότι υπήρχε αύξηση του ρυθμού εξάτμισης του νερού, m_{ev} , όταν αυξάνονταν η ροή του ψυχρού υμένα, Re_{ef} .

3.5 Συμπεράσματα και Προτάσεις

Η εντατική χρήση των συμβατικών τεχνικών τα τελευταία 50 χρόνια εδραιώσε το σχήμα της αφαλάτωσης με ορυκτά καύσιμα. Η κλασική αφαλάτωση διαμορφώθηκε στις συνειδήσεις του τεχνικού κόσμου ως μονόδρομος παρά το αξιοπρόσεκτο κόστος, αφού πρόκειται για τεχνολογίες έντασης κεφαλαίου και ενέργειας. Η κατάσταση αυτή διαμορφώθηκε γιατί, κατά πρώτο, τα ορυκτά καύσιμα ήταν φθηνά (με μόνη εξαίρεση την περίοδο της πετρελαϊκής κρίσης το 1973-74) και γιατί σε μια σειρά χώρες της Μεσογείου και της Μ. Ανατολής το κόστος αφαλάτωσης είναι πιο χαμηλό σε σχέση με άλλες εναλλακτικές λύσεις για πόσιμο νερό.

Από τη δεκαετία του 1990 το «κλίμα» έχει αντιστραφεί ελαφρώς. Η λύση της γεωθερμικής αφαλάτωσης είναι, πλέον, ελκυστική ιδέα σε περιοχές με αξιοποιήσιμα γεωθερμικά πεδία ($<7,5$ Euro/GJ ή $<2,2$ Euro/m³) και έντονο πρόβλημα υδατικών αποθεμάτων. Προβάλλει ως ανταγωνιστική σε σχέση με άλλες ΑΠΕ, γιατί έχει κάποια πλεονεκτήματα. Η εκμεταλλεύσιμη γεωθερμία είναι άφθονη και με αδιάκοπη ροή, και έτσι εξασφαλίζεται η σταθερότητα του συστήματος, καθώς και η πρόβλεψη της παραγωγής αφαλατωμένου νερού. Η υφιστάμενη τεχνολογία εκμετάλλευσης των γεωθερμικών ρευστών χαμηλής και μέσης ενθαλπίας είναι ώριμη. Το ίδιο ισχύει για την τεχνολογία των θερμικών διεργασιών με συσκευές MED που λειτουργούν ακόμα και στους 70°C. Πράγματι, οι συσκευές τύπου MED έχουν χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις και τιμές λειτουργικού κόστους, αξιοποιώντας άριστα τη γεωθερμική ενέργεια χαμηλής ενθαλπίας. Επιπλέον, η γεωθερμική αφαλάτωση είναι φιλική προς το περιβάλλον, γιατί δεν εκπέμπονται «αέρια του θερμοκηπίου» ή ρυπογόνα σωματιδιακή ύλη. Η γεωθερμική αφαλάτωση μπορεί να συμβάλλει στους τοπικούς δείκτες ανάπτυξης, να προσφέρει νέες θέσεις εργασίας και να διασώσει το διαφυγόν ξένο συνάλλαγμα, αφού δε θα απαιτείται αγορά πετρελαίου ή φυσικού αερίου.

Ωστόσο, υπάρχει ακόμα σκεπτικισμός. Η συμμετοχή της γεωθερμικής ενέργειας στην αφαλάτωση είναι ακόμα περιορισμένη. Παρά τη δυναμική των ανερχόμενων μεθόδων, η γεωθερμική αφαλάτωση δεν έχει ακόμα εδραιωθεί σε εμπορικό επίπεδο, γιατί δεν μπορεί να ανταγωνιστεί πλήρως τις συμβατικές θερμικές μεθόδους. Το ίδιο ισχύει όταν γίνει σύγκριση με τις διεργασίες μεμβρανών (που είναι ακόμα πιο οικονομικές), ειδικά όταν συνδυαστούν με συμπαραγωγή ατμού-ηλεκτρισμού. Σε επίπεδο γεωθερμικής αφαλάτωσης, ωστόσο, αναμένεται η άμεση αξιοποίηση της γεωθερμίας με θερμικές μεθόδους να είναι πιο οικονομική από τις RO μεθόδους.

Οι πειραματικές μονάδες γεωθερμικής αφαλάτωσης στην Ελλάδα, χρησιμοποιούσαν γεωθερμία χαμηλής και μέσης ενθαλπίας για παραγωγή πόσιμου νερού και βρίσκονταν σε απομονωμένα νησιά του Αιγαίου με περιορισμένους ή ανύπαρκτους υδατικούς πόρους. Ωστόσο, οι σημαντικές γεωθερμικές πηγές τους θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν με οικονομικό και βιώσιμο τρόπο. Γι' αυτό προτείνεται η γεωθερμική αφαλάτωση με θερμικές μεθόδους να αξιοποιείται μάλλον σε απομονωμένους και μικρούς οικισμούς (παρά σε μεγάλες πόλεις), όπου υπάρχουν κατάλληλοι γεωθερμικοί ταμιευτήρες και διαπιστώνεται ότι οι άλλες εναλλακτικές λύσεις είναι ασύμφορες (π.χ.: μεταφορά νερού).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.

ΑΛΛΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΤΗΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ

ΜΕΣΩ Α.Π.Ε.

4.1 Έλεγχος Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων

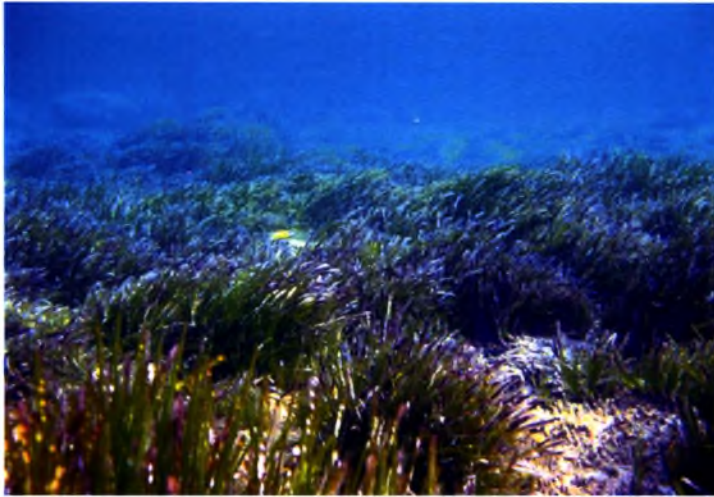
Είναι προφανές ότι οι εγκαταστάσεις αφαλάτωσης που λειτουργούν με τη βοήθεια κάποιας ανανεώσιμης πηγής ενέργειας χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές πρωτογενών αέριων ρύπων (NO_x, SO₂, CO₂, οργανικές πτητικές ενώσεις, σωματιδιακή ύλη). Πράγματι, σε μία θερμική ηλιακή ή γεωθερμική μονάδα αφαλάτωσης, η συνεισφορά των αναγκαίων μηχανολογικών διατάξεων, όπως είναι οι αντλίες, οι κυκλοφορητές κ.α., στην κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος και στην εκπομπή αέριων ρύπων είναι σχεδόν αμελητέα. Ωστόσο, σύμφωνα με τους Κεenanάκη κ.α. (2008), πέρα από την αέρια ρύπανση υπάρχουν μια σειρά άλλες περιβαλλοντικές παράμετροι, όπως είναι η επίδραση στη γη και στο θαλάσσιο περιβάλλον που πρέπει να διερευνηθούν. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που θα εξεταστούν συνοπτικά είναι: το ζήτημα της τροφοδοσία του θαλασσινού νερού, η διάθεση των αλμολοίπων στο θαλάσσιο περιβάλλον, η χημική ρύπανση του θαλασσινού νερού, η υποβάθμιση της χρήσης γης (ή η αισθητική ρύπανση) και οι επιδράσεις στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα.

□ Στοιχεία μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε μονάδες αφαλάτωσης

Είδαμε ότι η τροφοδοσία των μονάδων αφαλάτωσης μπορεί να γίνει από διάφορες πηγές νερού με υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα. Μία από αυτές είναι το θαλασσινό νερό, το οποίο δεν μπορεί να λογίζεται απλώς ως νερό. Αυτό αποτελεί μέρος του φυσικού μας περιβάλλοντος και περιέχει ολόκληρο οικοσύστημα από πλαγκτόν, ασπόνδυλους οργανισμούς και ψάρια. Η τροφοδοσία του προς απόσταξη νερού μπορεί να γίνει τόσο με ανοιχτά συστήματα όσο και με «θαλάσσια πηγάδια». Τα ανοιχτά συστήματα είναι κατάλληλα για μονάδες αφαλάτωσης μεγάλης δυναμικότητας, αλλά υπάρχουν κάποιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως είναι η αύξηση της θνησιμότητας των μικρών οργανισμών (πλαγκτόν, αυγά, μικρά ψάρια), λόγω συμπαρασυρμού στην εισροή της μονάδας και η αύξηση της θνησιμότητας των μεγάλων θαλάσσιων ειδών (ενήλικα ψάρια, ασπόνδυλα, πουλιά), λόγω πρόσκρουσης στον αγωγό εισροής. Τα «θαλάσσια πηγάδια» προκαλούν λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σχέση με τα ανοιχτά συστήματα τροφοδοσίας (διήθηση μέσω άμμου), αλλά προτιμώνται για μονάδες αφαλάτωσης μικρής δυναμικότητας λόγω των μικρών παροχών τους.

Η διάθεση του παραπροϊόντος της άλμης είναι ένα μείζον περιβαλλοντικό ζήτημα, γιατί μπορεί να επηρεάσει ορισμένα είδη θαλάσσιας βλάστησης που είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στην αλατότητα (π.χ.: φύκια *Posidonia Oceanica*, *Cymodocea Nodosa*,

Caulerpa Prolifera). Τέτοιου είδους φύκια σχηματίζουν λιβάδια σε ρηχά νερά κοντά στην ακτή, δίνουν τροφή και στέγη σε χιλιάδες διαφορετικά θαλάσσια είδη και επιπλέον συγκρατούν το έδαφος. Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι άλλος ένας παράγοντας που πρέπει να ελέγχεται. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι οι θερμικές μέθοδοι αυξάνουν τη θερμοκρασία του νερού κατά 10-15°C. Γενικά, αν δε χρησιμοποιηθούν τεχνικές ανάκτησης του άλατος, πρέπει να πραγματοποιείται ανάμιξη-αραιώση της άλμης πριν τη διάθεση της στο περιβάλλον, μελέτη βυθομέτρησης και μελέτη του ανάγλυφου του βυθού.



Εικόνα 4.1.1: Νεαρά φύκια *Posidonia Oceanica*. [Πηγή: Κεανάκης κ.α., 2008]

Η χημική ρύπανση του θαλάσσιου περιβάλλοντος πραγματοποιείται στα θερμικά συστήματα εξάτμισης από τα προϊόντα διάβρωσης των κραμάτων Cu-Ni (π.χ.: Cu, Ni, Cr, Zn), από την προσθήκη αντιδιαβρωτικών και απολυμαντικών μέσων, από την προσθήκη οξέων, κροκιδωτικών (για συσσωμάτωση και απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών) και αντιδραστηρίων κατά του αφρισμού. Το πολυφωσφορικό οξύ (polyphosphate), το πολυακρυλικό οξύ ή το πολυμηλεϊνικό οξύ, αποτελούν θρεπτικά συστατικά για άνθη και φύκια και μπορούν να προκαλέσουν τοπικό ευτροφισμό. Η αποβολή όξινου θαλασσινού νερού στη θάλασσα επιδρά αρνητικά στους οργανισμούς και απαιτείται μεγάλος χρόνος αφομοίωσης από το περιβάλλον. Είναι γεγονός ότι απαιτούνται $25 \times 10^3 \text{ m}^3$ για την εξουδετέρωση $5 \times 10^3 \text{ m}^3$ όξινης εκροής. Για αυτό το λόγο χρειάζεται ρύθμιση του pH σε χαμηλότερα επίπεδα (το pH θαλασσινού νερού είναι 8,3-8,5). Τα αντιδραστήρια κατά του αφρισμού μπορεί είναι αλκυλιωμένες πολυγλυκόλες, λιπαρά οξέα, ή εστέρες λιπαρών οξέων. Γενικά, η χημική ρύπανση αποτρέπεται, επίσης, με ανάμιξη-αραιώση της άλμης.

Η υποβάθμιση της χρήσης γης και οι επιδράσεις στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα δεν είναι αμελητέας σημασίας. Η τοποθέτηση μονάδων αφαλάτωσης γίνεται, σχεδόν πάντα, σε παραθαλάσσιες περιοχές. Ωστόσο, πρέπει να προσεχθεί η χωροθέτηση τους, ώστε να είναι μακριά από αρχαιολογικούς χώρους, τουριστικά θέρετρα και άλλους δημόσιους χώρους. Επιπλέον, επειδή συχνά οι σωληνώσεις τροφοδοσίας θαλασσινού νερού και αποβολής άλμης βρίσκονται πάνω από τον υδροφόρο, υπάρχει κίνδυνος εισροής θαλασσινού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα λόγω διαρροής. Πρέπει να

δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη στεγάνωση των σωληνώσεων. Τέλος, εκτιμάται ότι για μια μονάδα παραγωγικότητας 5000-10000 m³/ημέρα απαιτείται μία έκταση 10000 m².

Συμπερασματικά πρέπει να ειπωθεί, ότι η ένταξη της περιβαλλοντικών μελέτης (Προκαταρκτική Περιβαλλοντική Εκτίμηση, ΠΠΕ και Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων, ΜΠΕ) στη γενικότερη μελέτη σχεδιασμού είναι αναπόφευκτη. Αυτό εξάλλου απορρέει και από την κείμενη νομοθεσία: Ν.3010/2002 και εναρμόνιση του Ν.1650/1986 με τις κοινοτικές Οδηγίες 97/11 ΕΕ και 96/61 ΕΕ. Γενικότερα, πριν καταφύγουμε στην ύστατη λύση της αφαλάτωσης, προτείνεται, στα πλαίσια του περιορισμού της αλόγιστης χρήσης του νερού, να ακολουθούνται πρακτικές όπως: επαναχρησιμοποίηση των αστικών λυμάτων, βελτίωση της απόδοσης των τεχνολογιών άρδευσης και εκλογικευμένη χρήση του νερού στις βιομηχανικές δραστηριότητες. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, προτείνεται η περιβαλλοντική μελέτη να είναι αρμοδιότητα των δημόσιων υπηρεσιών και όχι του εκάστοτε επενδυτή, για να διασφαλίζεται η αντικειμενική κρίση και να αποτρέπονται τυχόν αυθαιρεσίες.



Εικόνα 4.1.2: Εκροή άλμης σε μονάδα αφαλάτωσης στην Ισπανία.
[Πηγή: Κεανάκης κ.α., 2008]

4.2 Διάβρωση μεταλλικών επιφανειών κατά την ηλιακή αφαλάτωση

Η επαφή του θαλασσινού νερού με τις μεταλλικές επιφάνειες είτε των ηλιακών αποστακτήρων είτε των θερμικών εναλλακτών δημιουργεί προβλήματα διάβρωσης (corrosion), πέρα από το σύνηθες πρόβλημα των επικαθίσεων των αλάτων. Γενικά, η διάβρωση ταξινομείται είτε *ως προς τη μορφή της καταστροφής* είτε *ως προς το μηχανισμό καταστροφής του μετάλλου* (χημική διάβρωση που δε συνοδεύεται από εναλλαγή ηλεκτρικών φορτίων ή ηλεκτροχημική όπου μεταφέρονται ηλεκτρικά φορτία). Η διάβρωση του μετάλλου που έρχεται σε επαφή με νερό υψηλής περιεκτικότητας σε άλατα (θαλασσινό, υφάλμυρο, αλμόλοιο κ.α.) ανήκει στην κατηγορία της ηλεκτροχημικής διάβρωσης και μπορεί να δώσει διάφορες μορφές [Χασιώτης, 2005].

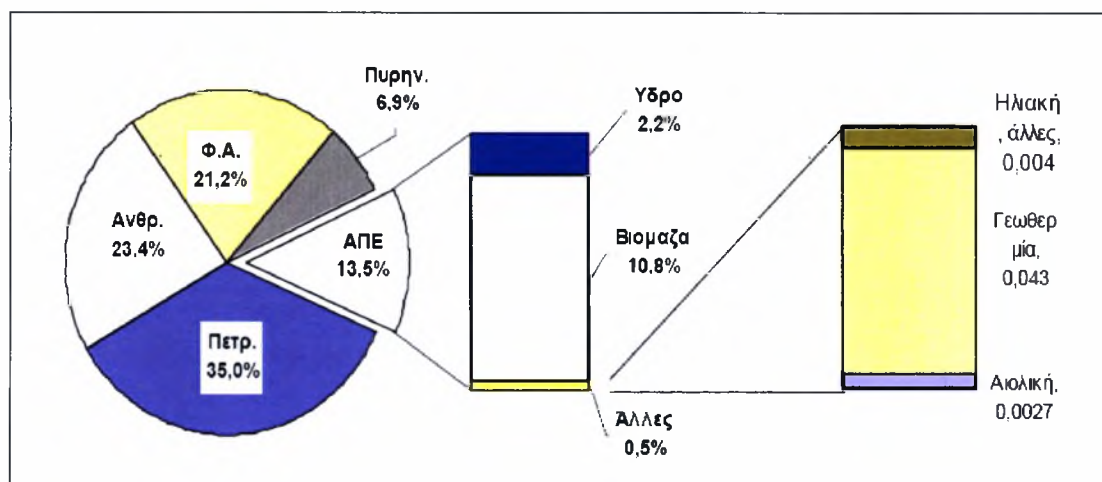
Το Εθνικό Κέντρο Επιστημονικών Ερευνών «Δημόκριτος» εξέδωσε το 2007 ένα μικρό οδηγό για την επιλογή υλικών στα συστήματα θερμικής ηλιακής αφαλάτωσης. Σύμφωνα με το σχετικό οδηγό, οι πιο συνηθισμένοι μορφολογικοί τύποι διάβρωσης που σχετίζονται με τη θερμική ηλιακή αφαλάτωση είναι: *η συνήθης επιφανειακή διάβρωση* (usual surface corrosion in stagnation conditions), *η τρηματική διάβρωση* (pitting corrosion) και *η γαλβανική διάβρωση* (galvanic corrosion). Τη μεγαλύτερη αντιδιαβρωτική προστασία στη συνήθη επιφανειακή διάβρωση προσφέρουν ο ορείχαλκος (μπρούντζος), ο χαλκός, τα κράματα Cu-Ni, και κυρίως οι ανοξείδωτοι χάλυβες. Η τρηματική διάβρωση εμφανίζεται σε έντονα χημικο-διαβρωτικά περιβάλλοντα όπου εμφανίζονται χαμηλές ταχύτητες ρευστών. Οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες εμφανίζουν ευαισθησία στην τρηματική διάβρωση σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση. Η τρηματική διάβρωση εμφανίζεται σε διεπιφάνειες μετάλλων (κοχλίες, ήλους, σημεία συγκολλήσεων κ.α.). Η γαλβανική διάβρωση, απ' την άλλη, εμφανίζεται σε περιπτώσεις όπου έχουμε επαφή δύο διαφορετικών μετάλλων με παρουσία ηλεκτρολύτη. Η διάβρωση αυτή ενισχύεται περισσότερο όσο αυξάνει η απόσταση των δύο μετάλλων. Έχει ιδιαίτερη σημασία η επιλογή των υλικών κατά την κατασκευή των διατάξεων ηλιακής αφαλάτωσης, ώστε να μην αναπτύσσεται μεταξύ τους υψηλό ηλεκτροχημικό δυναμικό κατά την επαφή τους με το οξυγονωμένο αλμυρό νερό.

Τέλος, ο οδηγός προτείνει κάποια μεταλλικά υλικά ή πλαστικά που μπορούν να αντεπεξέλθουν στις δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας της θερμικής αφαλάτωσης. Είναι:

- το κράμα Ni-Cu 90/10, για την κατασκευή των θερμικών εναλλακτών εξάτμισης και συμπύκνωσης
- ανοξείδωτος χάλυβας AISI 316 Ti, για την κατασκευή των τοιχωμάτων
- ορείχαλκος, για τις υδραυλικές συνδέσεις και τους αγωγούς
- συνθετικό ελαστομερές EPDM (Ethylene Propylene Diene M-class rubber), για φλάντζες στεγανότητας
- συνθετικό ύφασμα Πολυπροπυλενίου (PP), για επιφάνειες εξάτμισης.

4.3 Πολιτικές σχετικά με τις ΑΠΕ και την ΕΞΕ

Μια σειρά από νομοθετήματα της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) δεσμεύουν τα κράτη-μέλη στην υιοθέτηση πολιτικών που αναδεικνύουν τη χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.), καθώς και την πρακτική της Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΕΞ.Ε.). Πριν όμως αναφερθούμε στις διατάξεις των νόμων, έχει ενδιαφέρον να παρουσιαστούν κάποια στοιχεία για τις ΑΠΕ στην παγκόσμια αγορά ενέργειας. Το διάγραμμα τύπου «πίτας» του Σχήματος 4.3.1 παρουσιάζει την κατανομή των διαφόρων πηγών στην συνολική παγκόσμια πρωτογενή παραγωγή ενέργειας κατά το 2001, με περαιτέρω εξειδίκευση στις ΑΠΕ.



Σχήμα 4.3.1: Η συμμετοχή των ΑΠΕ στην παγκόσμια παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας κατά το 2001. Στις άλλες ΑΠΕ περιλαμβάνονται μεταξύ των άλλων η ηλιακή και η παλιμοροϊκή ενέργεια.

Σχετικά με τους τομείς κατανάλωσης της ενέργειας από τις ΑΠΕ, η περισσότερη ενέργεια, 58%, καταναλώνεται σε οικιακές και εμπορικές χρήσεις (θέρμανση, μαγείρεμα κτλ.), ενώ η παραγωγή ηλεκτρισμού κατέχει το 21% της παραγωγής. Οι ΑΠΕ συνεισφέρουν σήμερα κατά 18,4% στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, πίσω από τον γαιάνθρακα (39%), αλλά μπροστά από την πυρηνική ενέργεια (17%), το φυσικό αέριο (18%) και το πετρέλαιο 8%

Όπως προαναφέρθηκε, υπάρχουν μια σειρά περιβαλλοντικές δεσμεύσεις σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Συγκεκριμένα για την ηλεκτροπαραγωγή από ανανεώσιμες πηγές προϋπάρχει η Οδηγία 2001/77/ΕΚ, ενώ η εξοικονόμηση ενέργειας καλύπτεται από έναν αριθμό οδηγιών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, όπως είναι η οδηγία για τη «συμπαράγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας» ή η οδηγία για τη βελτίωση της «Ενεργειακής Απόδοσης κατά την τελική χρήση και τις Ενεργειακές Υπηρεσίες». Στις 10 Ιανουαρίου του 2007 εγκρίνεται το νομοθετικό Πακέτο για την Ενέργεια και την Κλιματική Αλλαγή (Energy and Climate Change Package). Σύμφωνα με αυτό προκύπτουν υποχρεώσεις για τα κράτη-μέλη σε θέματα ΑΠΕ, ΕΞΕ και Συμπαράγωγης Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ), ενώ ταυτόχρονα γίνεται συσχέτιση της διείσδυσης των τεχνολογιών αυτών στα ενεργειακά συστήματα με τη συγκράτηση των εκπομπών των αέριων ρύπων. Οι τρεις ευρωπαϊκοί στόχοι που

πρέπει να υλοποιηθούν μέχρι το 2020 (γνωστοί ως «τα τρία 20») είναι: (i) 20% συγκράτηση των αέριων ρύπων σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, (ii) 20% διείσδυση των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση και (iii) 20% εξοικονόμηση ενέργειας στην πρωτογενή ενέργεια.

Η Ελλάδα σύμφωνα με την οδηγία 2001/77/ΕΚ καλείται να αυξήσει το ποσοστό των ΑΠΕ στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στο επίπεδο του 20,1% μέχρι το 2010, συμπεριλαμβανομένης της συμμετοχής των μεγάλων υδροηλεκτρικών (Υ/Η) εργοστασίων. Ενώ σύμφωνα με το Πακέτο για την Ενέργεια και την Κλιματική Αλλαγή ο στόχος για την Ελλάδα ως προς τη διείσδυση των ΑΠΕ μέχρι το 2020 είναι 18%.

■ Σχολιασμός και προτάσεις για την Ελλάδα

Η χρήση των ΑΠΕ αν δε συνοδεύεται από έγκυρες μελέτες, σεβασμό στο περιβάλλον και ένα κεντρικό σχεδιασμό ανατρέπει ολόκληρη τη «φιλοσοφία» τους. Το ζήτημα της αλλαγής χρήσης της γης είναι κομβικό. Γι αυτό το λόγο η εγκατάσταση μονάδων ΑΠΕ (αιολικά πάρκα, Φ/Β ή θερμικά ηλιακά συστήματα κ.α.) πρέπει να αποκλείεται σε ολόκληρες τις περιοχές των Εθνικών Δρυμών (και όχι μόνο σε πυρήνες τους), περιοχές απόλυτης προστασίας της φύσης, «αισθητικά δάση», περιοχές «Natura 2000», σε περιοχές με τουριστικές μονάδες, αμμόδεις παραλίες κ.α.. Επίσης, ειδική μέριμνα πρέπει να δοθεί, όχι μόνο στις κύριες εγκαταστάσεις, αλλά και στα συνοδευτικά έργα, τα οποία μπορεί να διαταράξουν το τοπικό οικοσύστημα κατά τη διάνοιξη δρόμων ή τη μετακίνηση μεγάλων πυλώνων μεταφοράς ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, προτείνεται η περιβαλλοντική μελέτη να είναι αρμοδιότητα των δημόσιων υπηρεσιών και όχι του εκάστοτε επενδυτή, για να διασφαλίζεται η αντικειμενική κρίση και να αποτρέπονται τυχόν αυθαιρεσίες. Κεντρικός στόχος πρέπει να είναι μια αλλαγή του μοντέλου ανάπτυξης και της γενικότερης ενεργειακής συμπεριφοράς: εξοικονόμηση ενέργειας, συμπαραγωγή ατμού-ηλεκτρισμού υψηλής απόδοσης. Για την εξοικονόμηση των υδατικών πόρων προτείνεται επαναχρησιμοποίηση των αστικών λυμάτων, βελτίωση της απόδοσης των τεχνολογιών άρδευσης και εκλογικευμένη χρήση του νερού στις βιομηχανικές δραστηριότητες πριν φτάσουμε στη λύση της αφαλάτωσης, έστω και με ανανεώσιμες πηγές. Στα πλαίσια αυτά, αντιλαμβανόμαστε την προώθηση στόχων για τον εκσυγχρονισμό των μονάδων παραγωγής ενέργειας από λιγνίτη και πετρέλαιο με τη χρήση αυστηρών προδιαγραφών αντιρρυπαντικής τεχνολογίας, καθώς και τον αποκλεισμό του λιθάνθρακα από την παραγωγή ενέργειας. Η ουσιαστική προστασία των δασών ως φορέων δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα είναι ακόμα ένα πολύ σημαντικό μέτρο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Agha K.R., “The thermal characteristics and economic analysis of solar pond coupled low temperature multi stage desalination plant”, Renewable Energy Research Branch, Renewable Energy and Water Desalination Research Center, Tripoli, Libyan Arab Jamahiriya, 2008

Alarcón-Padilla D.-C., Blanco-Gálveza J., García-Rodríguez L., Gernjaka W., Malato-Rodríguez S., “First experimental results of a new hybrid solar/gas multi-effect distillation system: the AQUASOL project”, *Desalination*, Vol. 220, pp. 619-625, 2008

Belessiotis V. & Delyannis E., “The history of renewable energies for water desalination”, National Center for Scientific Research "Demokritos", *Desalination*, Vol. 128, pp. 157-158, 2000

Blanco J. & Alarcón D., “Improving the efficiency of high capacity solar thermal seawater desalination systems: the AQUASOL Project”, CIEMAT-Plataforma Solar de Almería, Ctra. de Senés s/n, E-04200 Tabernas, Almería, Spain

Blanco J., Alarcon D., Zarza E., Malato S., Leon J., “Advanced Solar Desalination: A Feasible Technology to the Mediterranean Area”, CIEMAT-PSA, Tabernas (Almería), Spain

Bourouni K. & Chaibi M.T., “Applications of Geothermal Energy for Brackish Desalination in the South of Tunisia”, *Proceedings World Geothermal Congress*, Antalya, Turkey, 2005

Bourouni K., Deronzier J.-C., Tadrist L., “Experimentation and modelling of an innovative geothermal desalination unit”, *Desalination*, Vol.125, pp. 147-153, 1999

Buros et al., “The USAID Desalination Manual”, Produced by CH2M HILL International for the U.S. Agency for International Development, 1980.

Buros O.K., “The ABCs of Desalting”, Second Edition, Sponsored by Saline Water Conversion Corporation (SWCC), Published by the International Desalination Association, Topsfield, Massachusetts

CARDNO, Livingstone Shire Council, Sources Study – Commercial in Confidence, 2979-15\ Report January 31, pp. 36-57, 2005.

Cooley H., Gleick P. H., Wolff G., “Desalination, with a grain of salt: A California Perspective”, Published by Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security, Oakland, CA, 11 p., 2006

Chafik E., "A new seawater desalination process using solar energy", *Desalination*, Vol.153, pp. 25-37, 2002

Chaibi M.T. & Jilar T., "System performance and design of roof-integrated desalination in greenhouses", *Proceedings at ISES Solar World Congress, Gothenburg, 2003*

Chaibi M.T. & Jilar T., "Economy prospects for roof-integrated desalination in greenhouses", *Proceedings at ISES Solar World Congress, Gothenburg, 2003*

Dai Y. J., Zhang H.F., "Experimental investigation of a solar desalination unit with humidification and dehumidification", *Desalination*, Vol. 130, pp. 169-175, 2000

"Demokritos" - National Center for Scientific Research, Solar and other Energy Systems Laboratory, "Materials for solar thermal desalination", NEGST-WP4.7

EGEC, K4RES-H, Key Issue 5: "Innovative applications - Geothermal utilizations for seawater desalination". Published by European Geothermal Energy Council

Fath H.E.S., "Solar distillation: a promising alternative for water provision with free energy, simple technology and clean environment", *Desalination*, Vol. 116, pp. 45-46, 1998

Fiorenza G., Sharma V.K., Braccio G., "Techno-economic Evaluation of a Solar Powered Water Desalination Plant", *Solar Desalination for the 21st Century*, pp. 33-41, Springer, 2007

Garcia-Rodriguez L. & Gomez-Camacho C., "Preliminary design and cost analysis of a solar distillation system", *Desalination*, Vol. 126, pp. 109-114, 1999

Haddad O.M. et al., "Enhanced solar still performance using a radiative cooling system", *Renewable Energy*, Vol. 21, pp. 459-469, 2000

Hou S., Zhang Z., Huang Z., Xie A., "Performance optimization of solar multi-stage flash desalination process using Pinch technology", *Desalination*, Vol. 220, pp. 524-530, 2008

Karytsas C., Alexandrou V. & Boukis I., Centre for Renewable Energy Sources (CRES), "The Kimolos Geothermal Desalination Project", *International Summer School on Direct Application of Geothermal Energy*

Kalogirou S.A., "Seawater desalination using renewable energy sources", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 31, pp. 242-281, 2005

Loupasis S., "Technical analysis of existing RES desalination schemes", *Renewable Energy Driven Desalination Systems – REDDES*, Contract Number 4.1030/Z/01-081/2001, May 2002

Miller J.E., "Review of Water Resources and Desalination Technologies", *Sandia National Academy*, Albuquerque, 7 p., 2003

Mink G., et al., “Design parameters, performance testing and analysis of double-glazed, air-blown solar still with thermal energy recycle”, *Solar Energy*, Vol. 64, pp.265-277, 1998

Ophir A., “Desalination Plant using Low Grade Thermal Heat”, *Desalination*, Vol. 40, pp. 125-132, 1982

Peuser F.A., Remmers K.-H., Schnauss M., “Solar Thermal Systems – Successful Planning and Construction”, Published by Solarpraxis AG (Germany) in association with James & James Ltd (UK), Berlin, 2002

Qiblawey H.M. & Banat F., “Solar thermal desalination technologies”, *Desalination*, Vol. 220, pp. 633-644, 2008

Semiat R., “Desalination: Present and Future”, *International Water Resources Association, Water International*, Vol. 25, Number 1, pp. 54–65, 2000.

Spinnler M., Blumenberg J., Moik W., Müller-Holst H., Krispler H.-U., “Small scale systems for solar-thermal desalination of sea and brackish water”, *Technical University of Munich, Moik Industrial Components, Division 4: Solar Thermal and Biomass, ZAE Bayern, CASE GmbH*

Stefopoulou A., Soulis K., Papapetrou M., Kyritsis S., Epp C., “Institutional and policy framework analysis in relation to the application of autonomous desalination systems – Greece”, *Desalination*, Vol. 220, pp. 455-467, 2008

Thomas K., *Overview of Village Scale, Renewable Energy Powered Desalination*, NREL/TP-440-22083, UC Category: 1210 DE 97000240, 1997.

Tiwari G. N. et al., ”Comparison of various designs of solar stills”, *Desalination*, Vol. 60, pp. 191-202, 1986

Trieb F., Nitsch J., Kronshage S., Schillings C., Brischke L.A., Knies G., “Combined Solar Power and Desalination Plants for the Mediterranean Region – Sustainable Energy Supply using Large Scale Solar Thermal Power Plants”, *Solar Power and Desalination for the Mediterranean Region, EUROMED 2002, Sinai, Egypt, May 4-7, 2002*

Ελληνική βιβλιογραφία

Ανδρίτσος Ν., «Αφαλάτωση Νερού και Α.Π.Ε.», *Renewable Energy Forum – Η αγορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας*, Μήλος, 2004

Ανδρίτσος Ν., «Τεχνολογία Βιομηχανικής Αντιρρύπανσης», *Διδακτικές Σημειώσεις Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας - Πανεπιστημίου Θεσσαλίας*, σελ.(Αφαλάτωση): 35-45, Βόλος, 2007

Ανδρίτσος Ν., «Ενέργεια και Περιβάλλον», Διδακτικές Σημειώσεις Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας - Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος, 2007

Κενανάκης Γ., Κατσαράκης Ν., Σαββάκης Κ., «Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις από τη Λειτουργία Μονάδων Αφαλάτωσης Θαλασσινού Νερού», Ημερίδα Γ.Δ./Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ιεράπετρα, 2008

Χασιώτης Ν.Δ., «Διάβρωση μετάλλων και κραμάτων», Παραδόσεις Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας - Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος, 2005

Ηλεκτρονικές Διευθύνσεις

Physics4u, [http:// www.physics4u.gr/energy/geotherme.html](http://www.physics4u.gr/energy/geotherme.html) [06-07-2008]

UNEPb (United Nations Energy Programme),
<http://www.unep.org/geo2000/english/0046.htm> [06-09-2003]

USGS, “Ο υδρολογικός κύκλος”, <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclegreek.html>
[12-06-2007]

Population Action Internatinal, <http://www.populationaction.org/Publications/Reports>
[07-11-2008]

<http://american.edu/ted/ataturk.htm> [24-11-2008]



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000091669