



Βελτιστοποίηση συστήματος αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης με τη χρήση
κυλινδροπαραβολικών ηλιακών συλλεκτών

Μεταπτυχιακή διατριβή



Αριάδνη Βασιλομιχελάκη

Επιβλέπων: Καθηγητής Κωνσταντίνος Καλαϊτζάκης

Χανιά 2012

Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή αποτελεί το επιστέγασμα των μεταπτυχιακών σπουδών μου στο τμήμα των Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανιών Η/Υ. Θα ήθελα να ευχαριστήσω από τα βάθη της καρδιάς μου τον επιβλέποντα μου, Καθηγητή κ. Καλαϊτζάκη Κωνσταντίνο, για την στήριξη και την εξαιρετική συνεργασία σε όλη μου αυτή την προσπάθεια. Η επιστημονική και ηθική του υποστήριξη ήταν για μένα κάτι παραπάνω από πολύτιμη.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον κ. Μπακιρτζόγλου Βάγιο τόσο για την επιστημονική του βοήθεια όσο και για την εξαιρετική συνεργασία του καθώς και την μεγάλη του ηθική συμπαράσταση.

Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω την Επίκουρη Καθηγήτρια κα. Κολοκοτσά Διονυσία καθώς επίσης και τους Καθηγητές μέλη της τριμελούς επιτροπής, κκ. Κουτρούλη Ευτύχιο και Σταυρακάκη Γεώργιο για τις παρατηρήσεις τους.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου καθώς και στους φίλους μου για την αμέριστη συμπαράσταση τους και την υπομονή τους στην επιμονή μου να έχω μια ιδιαίτερη *τάση στα ρεύματα*.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	12
1.1 Ενέργεια από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	12
1.2 Το πρόβλημα της λειψυδρίας	14
1.2.1 Το πρόβλημα της λειψυδρίας στην Ελλάδα	17
1.3 Μέθοδοι αντιμετώπισης της λειψυδρίας	19
2. Ηλιακά θερμικά συστήματα	20
2.1 Η ηλιακή πηγή	21
2.2 Τα κυριότερα ηλιακά θερμικά συστήματα συλλεκτών	22
2.3 Θερμομηχανικά συστήματα Μετατροπής- Κύκλα ισχύος	27
2.6.1 Κύκλο Rankine	27
2.6.2 Κύκλο Stirling	28
2.6.3 Κύκλο Brayton	29
3. Ο Κυλινδροπαραβολικός ηλιακός συλλέκτης	29
3.1 Περιγραφή του Κυλινδροπαραβολικού ηλιακού συλλέκτη	29
3.2 Εφαρμογές Κυλινδροπαραβολικού ηλιακού συλλέκτη	31
3.3 Θερμική απόδοση κυλινδροπαραβολικού ηλιακού συλλέκτη	33
4. Αφαλάτωση	37
4.1 Η αφαλάτωση –ορισμός	37
4.2 Η αφαλάτωση – Ιστορική αναδρομή	38
4.3 Μέθοδοι αφαλάτωσης	40
4.3.1 Μέθοδοι αφαλάτωσης με βάση την απόσταξη	42
4.3.1.1 Απόσταξη πολλαπλής φάσης - Multi stage flash (MSF)	42
4.3.1.2 Εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης Multiple effect evaporator (MED/MEE)	43
4.3.1.3 Συμπύκνωση ατμού (Vapor compression evaporation, VC)	44
4.3.2 Μέθοδοι αφαλάτωσης με διεργασίες μεμβράνης	45
4.3.2.1 Ηλεκτρόλυση (Electro dialysis reversal, EDR)	45
4.3.2.2 Αντίστροφη όσμωση	46
4.3.2.3 Νανόφιλτρα (Nanofiltration, NF)	48
4.4 Άλλες μέθοδοι αφαλάτωσης	48
4.4.1 Πάγωμα (freezing)	48
4.4.2 Γεωθερμική αφαλάτωση (Geothermal desalination)	49
4.4.3 Ηλιακή απόσταξη (Solar Stills)	49
4.5 Αντίστροφη όσμωση – γενικά στοιχεία	54
4.5.1 Περιγραφή της διεργασίας αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση	56

4.5.2	Ανάκτηση ενέργειας μέσω απόρριψης της άλμης	63
4.5.3	Τελική κατεργασία του αφαλατωμένου νερού	65
5.	Θερμοδυναμική των εγκαταστάσεων ισχύος	68
5.1	Τα βασικά θερμοδυναμικά αξιώματα.....	68
5.2	Θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης	69
5.3	Θερμοδυναμικές ιδιότητες- Εσωτερική ενέργεια, ενθαλπία, εντροπία.....	70
5.4	Θερμοδυναμικές ιδιότητες του ατμού.....	72
5.5	Ανάλυση κύκλου Rankine	75
5.6	Μαθηματική μοντελοποίηση των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του νερού και ατμού	79
5.6.1	Περιοχή υπέρθερμου ατμού	80
5.6.2	Περιοχή κορεσμένου νερού	81
6.	Προβλήματα βελτιστοποίησης.....	83
6.1	Θεωρητικές έννοιες.....	83
6.2	Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μη γραμμικού προγραμματισμού	84
6.2.1	Penalty functions	85
6.2.2	Interior-Point Methods.....	85
6.2.3	Successive Quadratic Programming (SQP)	85
6.2.4	Κύριες ή αποδεκτές μέθοδοι (primal or feasible methods).....	86
6.3	Η γλώσσα προγραμματισμού – GAMS.....	86
6.4	Ο Conopt solver	88
7.	Ανάπτυξη του μοντέλου	90
7.1	Περιγραφή του μοντέλου.....	90
7.2	Κλιματολογικά δεδομένα	103
7.3	Μαθηματική μοντελοποίηση της μονάδας.....	92
8.	Σχεδιασμός - Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	103
8.1	Συμπεράσματα	112
8.2	Μελλοντικές προεκτάσεις	113

Περίληψη

Στην παρούσα μελέτη έγινε η ανάλυση μιας μονάδας αντίστροφης όσμωσης (RO), αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας και συγκεκριμένα με τη χρήση των ηλιακών κυλινδροπαραβολικών συλλεκτών. Είναι ένα υβριδικό σύστημα που χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια και την χρήση ενός λέβητα συμβατικού καυσίμου όπου κινεί έναν ατμοστρόβιλο μέσω ενός κύκλου ατμού Rankine έτσι ώστε να παράσχει την απαιτούμενη ισχύ στον άξονα του για να οδηγήσει την αντλία υψηλής πίεσης της μονάδας αντίστροφης όσμωσης (RO). Το σχεδιαστικό πρόβλημα αφορούσε τον καθορισμό των βέλτιστων χαρακτηριστικών της μονάδας όσον αφορά τα στοιχεία των απαιτούμενων μεμβρανών και το μέγεθος της απαιτούμενης διάστασης του πεδίου των ηλιακών κυλινδροπαραβολικών συλλεκτών για διαφορετικά επίπεδα ισχύος και διάφορα επιθυμητά όρια παραγωγής αφαλατωμένου νερού, με βασικό περιορισμό την ελαχιστοποίηση του κόστους όλης μονάδας.

Η διάρθρωση της διατριβής ξεκινάει με το πρώτο κεφάλαιο όπου αναφέρονται γενικά στοιχεία για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς και για το παγκόσμιο πρόβλημα της λειψυδρίας και γίνεται αναφορά στους τρόπους αντιμετώπισης της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα ηλιακά θερμικά συστήματα και στα χρησιμοποιούμενα θερμοδυναμικά κύκλα ισχύος.

Στην συνέχεια στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται εκτεταμένη αναφορά στον κυλινδροπαραβολικό συλλέκτη στις εφαρμογές του καθώς και στην μαθηματική του μοντελοποίηση. Το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει γενικές περιγραφές των κυριότερων συστημάτων αφαλάτωσης και αναλύεται εκτενώς η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης όπου και χρησιμοποιείται.

Το κεφάλαιο πέντε περιλαμβάνει την ανάλυση των βασικών θερμοδυναμικών αξιωματών καθώς και την ανάλυση των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του ατμού και του νερού καθώς και τη μαθηματική μοντελοποίηση τους. Τέλος στο κεφάλαιο αυτό δίδεται και η μαθηματική ανάλυση κύκλου Rankine. Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα προβλήματα βελτιστοποίησης και στους αλγόριθμους επίλυσης τους καθώς και στην χρησιμοποιούμενη στην συγκεκριμένη διατριβή γλώσσα GAMS.

Στο έβδομο κεφάλαιο συμπεριλαμβάνονται η μαθηματική ανάπτυξη του προτεινόμενου μοντέλου όπου στο όγδοο κεφάλαιο έχουμε το σχεδιασμό και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καθώς και τα συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα. Η

καινοτομία της προτεινόμενης διατριβής έγκειται στο γεγονός ότι συνδυάζει ένα λεπτομερές μαθηματικό μοντέλο ηλιακού κυλινδροπαραβολικού ηλιακού συλλέκτη, μιας αναλυτικής μαθηματικής περιγραφής του κύκλου Rankine για όλες τις φάσεις του νερού με ένα λεπτομερές μαθηματικό μοντέλο αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης που καλύπτει τόσο μικρές όσο και μεγάλες εφαρμογές.

Συμβολισμοί

A^*	Συντελεστής διαπερατότητας καθαρού νερού [m/s/bar]
A_{CD}	Εμβαδόν συμπτυκνωτή [m ²]
A_{ref}	Κατοπτρική επιφάνεια αναφοράς ($W \cdot L$) [m ²]
B	Άλμη ογκομετρική παροχή [m ³ /s]
B^*	Συντελεστής διαπερατότητας της διαλυμένης ουσίας [m/s]
B^{MIN}	Ελάχιστη παροχή άλμης ανά μονάδα μεμβράνης [m ³ /s]
C_B	Συγκέντρωση άλμης [ppm]
C_{CP}	Κόστος κεφαλαίου [\$]
C_D	Συγκέντρωση διηθήματος (προϊόντος) [ppm]
C_F	Συγκέντρωση νερού τροφοδοσίας [ppm]
C_{FL}	Κόστος καυσίμου [\$/kg]
C_L	Συγκέντρωση στην διεπαφή μεμβράνης- διαλύματος [ppm]
C_M	Κόστος της μονάδας μεμβρανών [\$/ μονάδα]
C_{OP}	Κόστος λειτουργίας [\$/h]
C_r	Συντελεστής συγκέντρωσης [αδιάστατο μέγεθος]
C_T	Συνολικό κόστος [\$/y]
D	Παροχή προϊόντος (αφαλατωμένου νερού) [m ³ /s]
D^*	Επιθυμητή παροχή προϊόντος (αφαλατωμένου νερού) [m ³ /s]
$D_{\alpha,ext}$	Διάμετρος εξωτερικού τοιχώματος απορροφητή [m]
$D_{c,int}$	Εσωτερική διάμετρος καλλύματος, [m]

e	Ποσοστό του κόστους κεφαλαίου σε ετήσιο ρυθμό
E_{BT}	Ετήσια παραγωγή του λέβητα [Wh]
F	Παροχή νερού τροφοδοσίας [m^3/s]
F_{acc}	Μορφολογικός παράγοντας επιφανειών απορροφητή- καλύμματος [αδιάστατο μέγεθος]
F_{MAX}	Παροχή νερού τροφοδοσία [m^3/s]
g	Διορθωτικός συντελεστής μεμβράνης
h	Ειδική ενθαλπία [J/kg]
h_{rad}	Συντελεστής μεταφοράς ακτινοβολίας [$W/m^2 K$]
I_b	Απευθείας ηλιακή ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνεια [W/m^2]
j	Αριθμός της ημέρας
J_P	Ροή διηθήματος [m/s]
k^*	Ολικός συντελεστής μεταφοράς μάζας [m/s]
$K\psi\tau\alpha(\theta)$	Συντελεστής διόρθωσης των $(\gamma\tau\alpha)\eta$ [αδιάστατο μέγεθος]
L	Μήκος του αποδέκτη [m]
N	Αριθμός μεμβρανών
n_{th}	Θερμική απόδοση κυλινδροπαραβολικών συλλεκτών, Θερμική απόδοση κύκλου Rankine[αδιάστατο μέγεθος]
n_{opt}	Οπτική απόδοση κυλινδροπαραβολικών συλλεκτών [αδιάστατο μέγεθος]
n_Y	Αριθμός ημερολογιακών ημερών του έτους (365)
P	Πίεση λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης [bar]
P_B	Ισχύς του λέβητα [W]
P_P	Ισχύς της αντλίας υψηλής πίεσης [W]

P_{RP}	Ισχύς που απαιτείται για την λειτουργία της αντίστροφης όσμωσης [W]
P_S	Πίεση υπέρθερμου ατμού [bar]
$P_{S,max}$	Μέγιστη πίεση υπέρθερμου ατμού [bar]
P_{ST}	Ισχύς του ατμοστροβίλου [W]
P_T	Ισχύς που ανακτάται από τον υδροστρόβιλο [W]
Q_B	Θερμική ι ισχύς που παρέχεται από το λέβητα [W]
Q_C	Ισχύς που μεταφέρεται από το ηλιακό πεδίο (συλλέκτες) στο νερό [W]
Q_{CD}	Θερμική ισχύς του συμπυκνωτή [W]
Q_{CT}	Ετήσιο ποσό ενέργειας που παρέχεται από τους συλλέκτες [Wh]
q_u	Ωφέλιμη ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας,- ωφέλιμη ροή θερμότητας στον απορροφητή [W/m^2]
r	Κατοπτρική ανακλαστικότητα [αδιάστατο μέγεθος]
s	Ειδική εντροπία [J/kgK]
S_a	Απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία [W/m^2]
S_m	Αποτελεσματικό εμβαδό μεμβράνης [m^2]
t	Χρόνος [h]
T	Θερμοκρασία του ρευστού [K]
T_a	Θερμοκρασία απορροφητή [K]
T_C	Θερμοκρασία καλύμματος [$^{\circ}C$]
T_{C1}	Θερμοκρασία εισόδου ψυκτικού νερού συμπυκνωτή [$^{\circ}C$]
T_{C2}	Θερμοκρασία εξόδου ψυκτικού νερού συμπυκνωτή [$^{\circ}C$]
t_D	Ώρες της ημέρας [24h/d]
t_{idle}	Χρόνος αδράνειας της μονάδας αφαλάτωσης [h]

t_M	Διάρκεια ζωής μεμβράνης [y]
t_{OP}	Χρόνος λειτουργίας της μονάδας [h/y]
$T_{s,max}$	Μέγιστη θερμοκρασία του ατμού [°C]
t_Y	Ώρες ημερολογιακού έτους [h/y] (8760)
t_o	Ωρα της ημέρας [h]
U	Ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για τον συμπυκνωτή [W/m ² K]
u	Ειδικός όγκος [m ³ /kg]
W	Πλάτος συλλέκτη [m]
X	Ποιότητα ατμού
Y	Συντελεστής μετατροπής της μονάδας αφαλάτωσης
z	Ετήσια κατανάλωση καυσίμου [kg/y]

Ελληνικά σύμβολα

α_B, β_B	Συντελεστές κόστους κεφαλαίου για τον λέβητα
α_C, β_C	Συντελεστές κόστους κεφαλαίου για τον κυλινδροπαραβολικό συλλέκτη
α_{CP}, β_{CP}	Συντελεστές κόστους κεφαλαίου για την αντλία- κυκλοφορητή
α_H, β_H	Συντελεστές κόστους κεφαλαίου για τον συμπυκνωτή
α_P, β_P	Συντελεστές κόστους κεφαλαίου για την αντλία υψηλής πίεσης
α_T, β_T	Συντελεστές κόστους κεφαλαίου για τον υδροστρόβιλο
α_{ST}, β_{ST}	Συντελεστές κόστους κεφαλαίου για τον αμοστρόβιλο
α_n	Απορροφητικότητα απορροφητή για μηδενική γωνία πρόσπτωσης [α- διάστατο μέγεθος]
ΔP	Υδραυλική διαφορά πίεσης κατά μήκος μιας μεμβράνης [bar]

ΔH_F	Θερμογόνος δύναμη των καυσίμων [Wh/kg]
ε	Συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας, [αδιάστατο μέγεθος]
ε^*	Συντελεστής οσμωτικής πίεση [bar/ ppm]
η_B	Απόδοση λέβητα [αδιάστατο μέγεθος]
η_P	Απόδοση αντλίας [αδιάστατο μέγεθος]
η_{ST}	Απόδοση ατμοστρόβιλου [αδιάστατο μέγεθος]
η_T	Απόδοση υδροστρόβιλου [αδιάστατο μέγεθος]
θ	Γωνία πρόσπτωσης [rad]
σ	Σταθερά Stefan-Boltzmann [$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$]
T_n	Διαπερατότητα καλύμματος για μηδενική γωνία πρόσπτωσης [αδιάστατο μέγεθος]
ψ_n	Συντελεστής παρεμπόδισης ακτινών για μηδενική γωνία πρόσπτωσης [αδιάστατο μέγεθος]

Δείκτες

α	Απορροφητής κυλινδροπαραβολικού συλλέκτη
c	Κάλυμμα κυλινδροπαραβολικού συλλέκτη
S	Υπέρθερμος ατμός που εισέρχεται στον ατμοστρόβιλο

1. Εισαγωγή

1.1 Ενέργεια από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Στις πόλεις καθημερινά καλύπτουμε τις ενεργειακές μας ανάγκες, σχεδόν αποκλειστικά, από τις συμβατικές πηγές ενέργειας, δηλαδή το πετρέλαιο, τη βενζίνη και τον άνθρακα. Ο ηλεκτρισμός που χρησιμοποιούμε προέρχεται από τις πηγές αυτές οι οποίες, παρόλη τη σπουδαία συνεισφορά τους στο σύγχρονο πολιτισμό, ρυπαίνουν ανεπανόρθωτα το περιβάλλον και εξαντλούνται με γοργούς ρυθμούς. Αντιθέτως, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αναπληρώνονται μέσω των φυσικών κύκλων και θεωρούνται πρακτικά ανεξάντλητες. Ο ήλιος, ο άνεμος, η γεωθερμία, τα ποτάμια, οι οργανικές ύλες, όπως το ξύλο και ακόμη τα απορρίμματα οικιακής και γεωργικής προέλευσης, είναι πηγές ενέργειας, που η προσφορά τους δεν εξαντλείται ποτέ. Εξάλλου, η αξιοποίησή τους για την παραγωγή ενέργειας δεν επιβαρύνει το περιβάλλον. Η Ελλάδα διαθέτει αξιόλογο δυναμικό ΑΠΕ, οι οποίες μπορούν να προσφέρουν μια πραγματική εναλλακτική λύση για την κάλυψη μέρους των ενεργειακών μας αναγκών, συνεισφέροντας στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικά καύσιμα, στην ελάττωση του φαινομένου του Θερμοκηπίου, στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και στην ανάπτυξη αποκεντρωμένων περιοχών. Η Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από ΑΠΕ στην Ελλάδα (σύμφωνα με τον Ν. 2773/1999) είναι η Ηλεκτρική Ενέργεια η προερχόμενη από:

- Την εκμετάλλευση Αιολικής ή Ηλιακής Ενέργειας ή βιομάζας ή Βιοαερίου.
- Την εκμετάλλευση Γεωθερμικής Ενέργειας, εφόσον το δικαίωμα εκμετάλλευσης του σχετικού Γεωθερμικού Δυναμικού έχει παραχωρηθεί στον ενδιαφερόμενο, σύμφωνα με τις ισχύουσες κάθε φορά διατάξεις.
- Την εκμετάλλευση της Ενέργειας από την Θάλασσα.
- Την εκμετάλλευση Υδάτινου Δυναμικού με Μικρούς Υδροηλεκτρικούς Σταθμούς μέχρι 10MW.
- Συνδυασμό των ανωτέρω.
- Τη Συμπαγωγή, με χρήση των Πηγών Ενέργειας, των (1) και (2) και συνδυασμό τους.

Η χώρα μας παρόλο που διαθέτει αξιόλογο δυναμικό ΑΠΕ εντούτοις τα ποσοστά διείσδυσης στο τελικό ενεργειακό μείγμα είναι χαμηλά. Σύμφωνα μετά στοιχεία της ΔΕΗ

η διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα υπολογίζεται στο 8.6 τοις εκατό. Παρόλα αυτά έχουμε μια συνεχή αύξηση του ποσοστού αυτού ως αποτέλεσμα τόσο της ελκυστικής επένδυσης πάνω σε αυτές που προωθεί η Πολιτεία λόγω των προσπαθειών για την μείωση των ρυπογόνων συμβατικών ηλεκτροπαραγωγών και τη δέσμευση της χώρα για συμμετοχή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην τελική κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 20 τοις εκατό έως το 2020 που απορρέει από την Οδηγία 2009/28/ΕΚ, και η οποία περιλαμβάνει εκτιμήσεις για την εξέλιξη του ενεργειακού τομέα και τη διείσδυση των τεχνολογιών των ΑΠΕ έως το 2020. Οι εκτιμήσεις αυτές εξειδικεύονται στη συμμετοχή των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στους Πίνακες 1 και 2 παρουσιάζονται στοιχεία του ΔΕΣΜΗΕ για το διασυνδεδεμένο σύστημα και της ΔΕΗ για το υπόλοιπο μη διασυνδεδεμένο και αφορούν την παραγωγή από ΑΠΕ για το μήνα Ιανουάριο του 2012.

Πίνακας. 1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μονάδων ΑΠΕ διασυνδεδεμένου συστήματος

Μήνας	Αιολικά		Υδροηλεκτρικά		Βιοαέριο- Βιομάζα		Σύνολο	
	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)
Ιανουάριος	305773	1363.84	49672	205.33	17125	44.53	372.570	1613.70

ΔΕΣΜΗΕ/ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2012

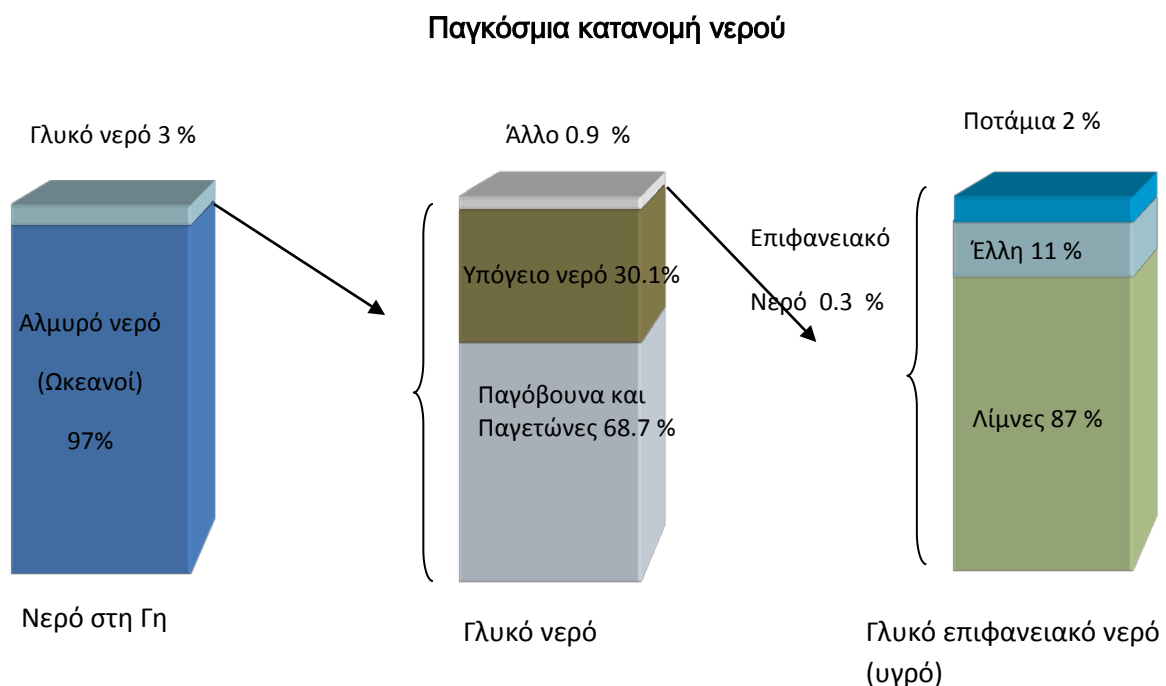
Πίνακας. 2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μονάδων ΑΠΕ μη διασυνδεδεμένων νησιών

Μήνας	Αιολικά		Υδροηλεκτρικά		Φωτοβολταϊκά		Σύνολο	
	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)
Ιανουάριος	60998.04	277.02	82.20	0.30	6650.03	84.37	67760.27	362.09

ΔΕΗ/ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΝΗΣΙΩΝ/ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2012

1.2 Το πρόβλημα της λειψυδρίας

Το νερό αποτελεί αδιαμφισβήτητα πηγή ζωής και ένα από τα πιο σημαντικά αγαθά για ολόκληρο το πλανήτη. Όσο πολύτιμο, όμως, παρουσιάζεται το νερό, τόσο δύσκολη φαίνεται πλέον πως είναι και η πρόσβαση των ανθρώπων σε αυτό, τουλάχιστον στην πόσιμη μορφή του. Κι αυτό διότι, από τα παγκόσμια αποθέματα νερού, υπολογίζεται ότι το 97 τοις εκατό περίπου αποτελεί νερό των ωκεανών, το οποίο όμως εξαιτίας της αλατότητας του είναι ακατάλληλο για ανθρώπινη χρήση. Το υπόλοιπο 3 τοις εκατό είναι φρέσκο νερό που θεωρείται κατάλληλο για χρήση από τους ανθρώπους. Μια κατανομή των υδάτινων πόρων παγκοσμίως παρουσιάζεται στην Εικόνα 1. Όπως φαίνεται το μεγαλύτερο μέρος του φρέσκου νερού περίπου σε ποσοστό 68.7 τοις εκατό βρίσκεται σε παγόβουνα και παγετώνες, ενώ ένα 30.1 τοις εκατό αποτελούν υπόγεια νερά. Μόλις το 0.9 του συνολικού φρέσκου νερού παγκοσμίως είναι γλυκό επιφανειακό νερό που βρίσκεται σε λίμνες ποτάμια και έλη.



Εικόνα .1 Παγκόσμια κατανομή υδάτινων πόρων

Πίνακας. 3 Προδιαγραφές για το πόσιμο νερό του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας W.H.O.)			
Συστατικά		Περιεκτικότητα σε mg/l	
Υλικά διαλυμένα άλατα	TDS	Ανώτατο δεκτό	Ανώτατο επιτρεπτό
Χλωριούχα	CL	500	1500
Θειικά	SO ₄ ²⁺	200	600
Ασβέστιο	Ca ²⁺	200	400
Μαγνήσιο	Mg ²⁺	75	100
Φθοριούχα	F ⁻	30	150
Νιτρικά	NO ₃ ⁻	0.7	1.7
Χαλκός	Cu ²⁺	<50	100
Σίδηρος	Fe ³⁺	0.10	1.0
Χλωριούχο νάτριο	Nacl	250	-
Υδρογόνο σε μονάδες	pH	7.0 έως 8.5	6.5 έως 9.2

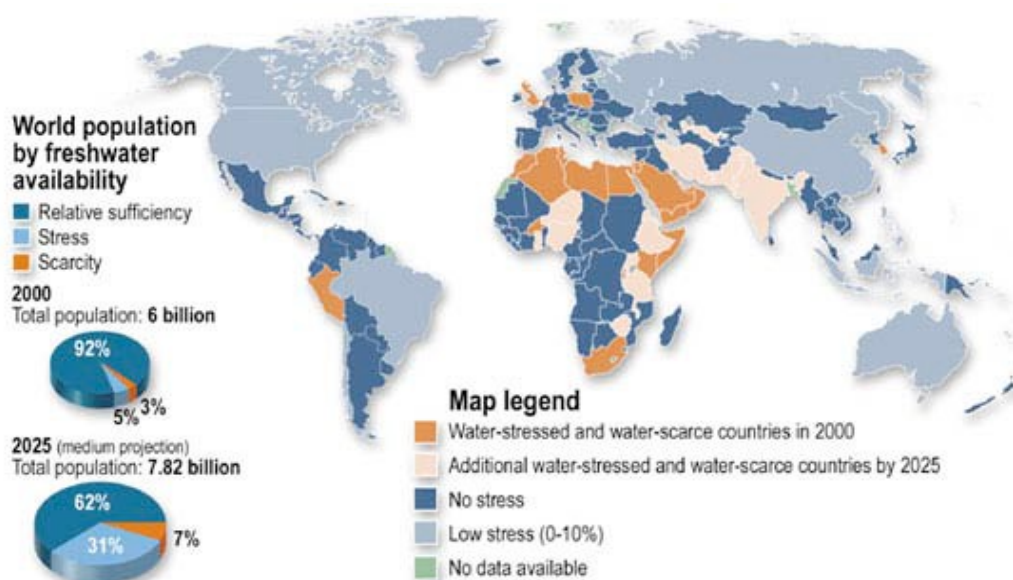
Στην σημερινή εποχή, οι συνθήκες για την ανθρωπότητα είναι τελείως διαφορετικές σε σχέση με το παρελθόν. Τα στοιχεία από τις μετρήσεις των αποθεμάτων φρέσκου νερού παγκοσμίως αποδεικνύουν ότι τα τελευταία μειώνονται με αυξανόμενο ρυθμό. Και ο κίνδυνος πια δεν είναι μακροπρόθεσμος αλλά υπαρκτός και πλέον μια πραγματικότητα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η περιοχή του Μεξικού όπου αντιμετωπίζει οξύτατο πρόβλημα έλλειψης πόσιμου νερού, αφού η κατανάλωση του γίνεται με ρυθμούς κατά πολύ μεγαλύτερους από την αποκατάσταση του υδροφόρου στρώματος. Στην περιοχή της Μεσοποταμίας που υδροδοτείται κυρίως από τους ποταμούς Τίγρη και Ευφράτη, η απόφαση της Τουρκίας να κατασκευάσει φράγματα λόγω λειψυδρίας, προκάλεσε την έντονη αντίδραση της Συρίας και του Ιράκ που είναι και η μοναδική πηγή φρέσκου νερού τους. Άλλο ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ξηρή και άνυδρη βόρεια Κίνα όπου περίπου 300 πόλεις αντιμετωπίζουν πρόβλημα λειψυδρίας λόγω της μείωσης των βροχοπτώσεων και της υπερκατανάλωσης στις αγροτικές καλλιέργειες .

Τα αίτια έλλειψης του φρέσκου νερού, όπως είναι εύκολα αντιληπτό, είναι σχεδόν αποκλειστικά ανθρωπογενή:

- Η ραγδαία πληθυσμιακή αύξηση, όπου υπολογίζεται έως το 2050 ο πληθυσμός του πλανήτη θα φτάσει τα 9 δις. Η αύξηση αυτή, πέρα από την αυτονόητη αύξηση στη ζήτηση νερού για οικιακή χρήση, θα επιφέρει και μια εξίσου σημαντική αύξηση στην κατανάλωση νερού για γεωργική και βιομηχανική χρήση.
- Η αστυφιλία, όπου το ποσοστό του πληθυσμού που κατοικεί σε πόλεις έχει αυξηθεί από 14 τοις εκατό το 1900, στο 29 τοις εκατό το 1950 και προβλέπεται να φτάσει στο 60 τοις εκατό το 2030. Το φαινόμενο αυτό επηρεάζει τα αποθέματα νερού μέσω: της εκτροπής τεραστίων όγκων επιφανειακών υδάτων αλλά και της υπερεκμετάλλευσης των υδροφόρων στρωμάτων.
- Η ρύπανση και η μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα και των επιφανειακών υδάτων, από τα μη επεξεργασμένα λύματα των πόλεων, από τα βιομηχανικά απόβλητα αλλά και από την αλόγιστη χρήση φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων.
- Η αλόγιστη χρήση των αποθεμάτων φρέσκου νερού, στην κτηνοτροφία, στη γεωργία και το εμπόριο, όπου συχνά το μεγαλύτερο ποσοστό νερού χρησιμοποιείται μη αποδοτικά. Εδώ επίσης θα πρέπει να προστεθεί και η περίπτωση των υδροηλεκτρικών εργοστασίων παραγωγής ενέργειας, όπου για την κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών, τα φράγματα των εργοστασίων εμποδίζουν την πρόσβαση στο νερό των γύρω περιοχών.
- Το φαινόμενο του θερμοκηπίου, όπου η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας στις ορεινές περιοχές αλλάζει την αναλογία χιονοπτώσεων και βροχοπτώσεων και η αλλαγή αυτή έχει ως αποτέλεσμα περισσότερες πλημμύρες και μεγαλύτερη απορροή κατά τη διάρκεια της περιόδου βροχών, ενώ λιγότερο νερό παραμένει αποθηκευμένο με τη μορφή χιονιού και πάγου για χρήση σε περίοδο ξηρασίας.

Η έλλειψη πόσιμου νερού αφού έχει άμεση σχέση με την απολύμανση και με την υγιεινή οδηγεί σε αύξηση ασθενειών και θανάτων. Αναπτύσσονται διαμάχες για τον έλεγχο των υδάτινων αποθεμάτων. Σημαντική επίσης επίπτωση από την έλλειψη νερού έχουμε στην χλωρίδα και την πανίδα και γενικά στο οικοσύστημα, τα οποία

αντιμετωπίζουν σημαντικές μεταβολές στην παραγωγικότητα με αποτέλεσμα την μείωση και αλλοίωση της βιοποικιλότητας. Τα φαινόμενα μετανάστευση, φτώχειας θα εντείνονται εξαιτίας της εξάντλησης των αποθεμάτων του φρέσκου νερού σε παγκόσμιο επίπεδο.



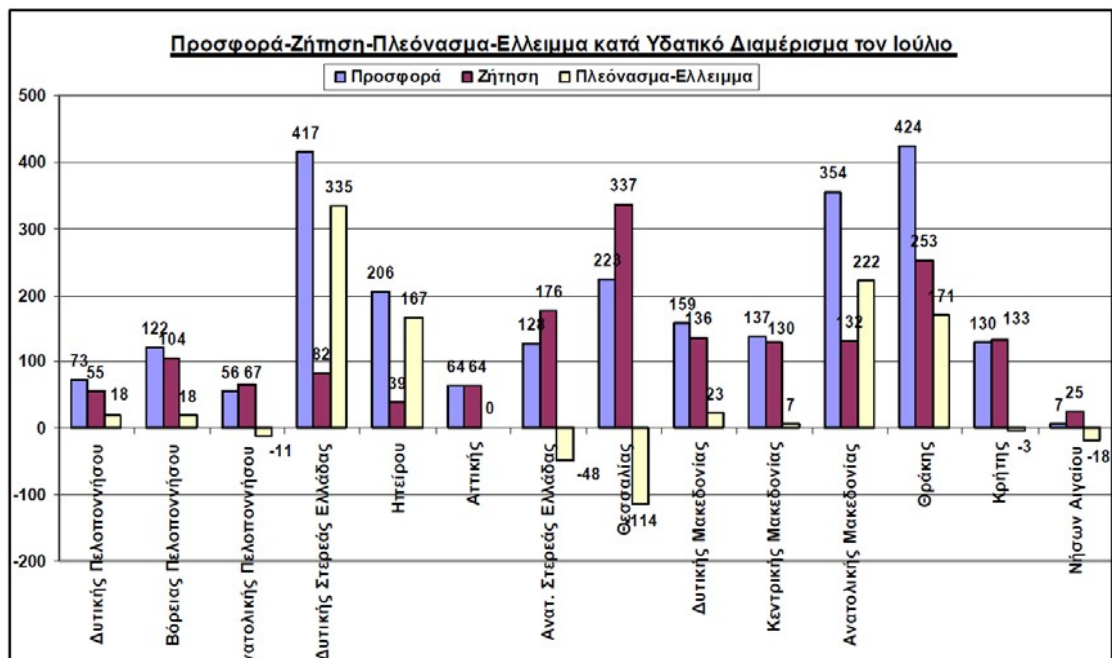
Εικόνα .2 Κατανομή πληθυσμού βάση διαθεσιμότητας σε φρέσκο νερό¹⁾

1.2.1 Το πρόβλημα της λειψυδρίας στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, παρά την αφθονία ανανεώσιμων υδατικών πόρων (782m^3 πόσιμου νερού ανά κάτοικο ετησίως έναντι 548m^3 της Γαλλίας, 460m^3 της Γερμανίας, 284m^3 της Ιρλανδίας και 50m^3 της Μάλτας) εμφανίζονται σημαντικά προβλήματα, λόγω της γεωγραφικής ανισοκατανομής του υδατικού δυναμικού (συγκέντρωση στα δυτικά και βόρεια της χώρας, λειψυδρία στα νησιά) και της ανορθολογικής διαχείρισής του.

Το 83.8 τοις εκατό των συνολικών υδατικών πόρων χρησιμοποιείται στη χώρα μας για άρδευση (έναντι του 24 τοις εκατό ως μέσο όρο στην Ε.Ε.), ενώ το ποσοστό αυτό είναι πολύ υψηλότερο στις περιοχές που αντιμετωπίζουν προβλήματα εξάντλησης/υποβάθμισης των υπογείων υδάτων (Θεσσαλία, Ανατολική Πελοπόννησος, Ανατολική Στερεά).

Αρκετά υδατικά διαμερίσματα της χώρας είναι ελλειμματικά κατά τους θερινούς μήνες, λόγω των αυξημένων αναγκών του γεωργικού και του τουριστικού τομέα. Το πρόβλημα εντοπίζεται κυρίως στα νησιά του Αιγαίου και τη Θεσσαλία.



Γράφημα.1 Προσφορά/Ζήτηση και Πλεόνασμα/Ελλειμμα κατά υδατικό διαμέρισμα τον μήνα Ιούλιο^[2]

Η υπερβολική χρήση για άρδευση, άριστης ποιότητας πόσιμου νερού προερχόμενου από γεωτρήσεις, αποτελεί κατασπατάληση πολύτιμων και δύσκολα ανανεώσιμων πόρων.

Η ανεξέλεγκτη αυτή πρακτική έχει σαν συνέπεια την μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και κυρίως την υφαλμύρωση τεράστιων παραθαλάσσιων εκτάσεων σε επίπεδα επικίνδυνα όχι μόνο για πόση, αλλά και για γεωργική χρήση. Εκτιμάται ότι υφαλμύρωση υπερβαίνει τα 2.000.000 στρέμματα γεωργικής γης, με οξυμμένα προβλήματα σε πολλές παράκτιες περιοχές του Αιγαίου.



Εικόνα .3 Ζώνες υπαλμύρωσης στην Ελλάδα

Εκτός από την υπαλμύρωση, σημαντικά προβλήματα δημιουργεί και η ρύπανση των υπόγειων υδάτων με νιτρικά, αλλά και ο ευτροφισμός των επιφανειακών υδάτων.

1.3 Μέθοδοι αντιμετώπισης της λειψυδρίας

Για την διατήρηση των αποθεμάτων νερού σε τοπική και παγκόσμια κλίμακα είναι απαραίτητο να εφαρμοσθούν σύγχρονες στρατηγικές διαχείρισης, που περιλαμβάνουν:

- ◆ Καθαρισμό και επαναχρησιμοποίηση αστικών λυμάτων
- ◆ Βελτίωση της απόδοσης των τεχνολογιών άρδευσης
- ◆ Εξοικονόμηση νερού στις βιομηχανικές εφαρμογές
- ◆ Περιορισμό της σπατάλης σε οικιακό επίπεδο
- ◆ Μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κ.α.

Παράλληλα όμως με τις προσπάθειες στο πλαίσιο της διατήρησης των αποθεμάτων, είναι πολύ σημαντικό να επικεντρωθεί το ενδιαφέρον και σε ένα άλλο επίπεδο, αυτό της ενίσχυσης των αποθεμάτων φρέσκου νερού. Μια τεχνολογικά, αλλά και οικονομικά, εφικτή και βιώσιμη λύση στο πλαίσιο αυτό, αποτελεί η *αφαλάτωση* θαλασσινού (αλλά και υφάλμυρου) νερού.

2. Ηλιακά θερμικά συστήματα

Τα ηλιακά θερμικά συλλέγουν την ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία τη μετατρέπουν σε θερμότητα, και στη συνέχεια χρησιμοποιούν ένα κύκλο μηχανής για την παραγωγή κάποιου έργου ή ηλεκτρισμού. Η πλειοψηφία της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται σε όλο τον κόσμο προέρχεται από θερμικά συστήματα οδηγούμενα από τον κύκλο του ατμού. Η θερμότητα για τα συστήματα αυτά προέρχεται κατά το μεγαλύτερο μέρος από την καύση άνθρακα, πετρελαίου ή φυσικού αερίου ή και από πυρηνική σχάση. Η έννοια της υποκατάστασης με ηλιακή ακτινοβολία των προηγούμενων πηγών για την ισοδύναμη παραγωγή της απαιτούμενης θερμικής ισχύος, οδηγεί στην δημιουργία των ηλιακών θερμικών ηλεκτροπαραγωγών. Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής εκφράζει εμπειρικά το γεγονός ότι η δυνητική απόδοση μετατροπής της θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια αυξάνει με τη θερμοκρασία της διαθέσιμης θερμικής εισόδου. Για ηλιακά συστήματα, αυτό φυσικά οδηγεί στην εξέταση των μεθόδων για τη συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας για την επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών. Μικρής κλίμακας θερμικά ηλιακά συστήματα ηλεκτροπαραγωγής έχουν αναδειχτεί ήδη από τη δεκαετία του 1860, κυρίως στη Γαλλία και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Ένα μεγαλύτερα παραδείγματα των ηλιακών θερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής είναι τα 80MW ηλιακών κυλινδροπαραβολικών συλλεκτών που ήδη λειτουργούν στη νότια Καλιφόρνια από τα τέλη του 1980. Αυτές οι εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής λειτουργούν σε ανταγωνιστική βάση, χάρη φορολογικών κινήτρων, τις αναπτυξιακές πολιτικές πάνω στην πράσινη ενέργεια καθώς και στο γεγονός ότι μπορούν να λειτουργήσουν και σαν σταθμοί βάσης με τη χρήση κάποιου συμβατικού καυσίμου όπως φυσικό αέριο, LPG κ.α.

2.1 Η ηλιακή πηγή

Ο ήλιος είναι περίπου 1.4 εκατομμύρια χιλιόμετρα σε διάμετρο και περίπου 150 εκατομμύρια χιλιόμετρα από τη γη. Είναι κοντά στους 5500°C η επιφάνειά του και εκπέμπει ακτινοβολία με ρυθμό $3.8 \times 10^{23} \text{kW}$. Αυτή η ενέργεια προέρχεται από πυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης κοντά στον πυρήνα του, οι οποίες εκτιμάται ότι θα συνεχιστούν για πολλά δισεκατομμύρια χρόνια. Το μεγαλύτερο μέρος (70 τοις εκατό) της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης είναι εντός του ορατού φάσματος, με μέγιστη ένταση κατά περίπου 500 nm. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια της γης είναι συνήθως μεταξύ 900 και 1000 Wm^{-2} σε μια ηλιόλουστη ημέρα το μεσημέρι. Μόνο ένα μικρό ποσοστό (4.5×10^{-8} τοις εκατό) της συνολικής ενέργειας που ακτινοβολείται από τον ήλιο φθάνει την εξωτερική επιφάνεια της ατμόσφαιρας της γης, αλλά αυτό εξακολουθεί να είναι ίσο με περίπου $1.6 \times 10^{14} \text{kW}$. Έτσι λοιπόν με αυτή τη προοπτική, μια συνολική ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως περίπου $1.5 \times 10^{13} \text{kWh}$ θα μπορούσε να παραχθεί με ένα υποθετικό ηλιακό θερμικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που καλύπτει μια έκταση περίπου 30.000 km^2 , η οποία είναι περίπου ίση με το μέγεθος του Βελγίου ή της Ταϊβάν, για παράδειγμα. Η ολική ή global ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στην επιφάνεια της γης αποτελείται από την απευθείας- direct και τη διάχυτη-diffuse. Η direct ακτινοβολία μπορεί να συγκεντρωθεί με κάτοπτρα ή φακούς που κατευθύνονται απευθείας προς τον ήλιο. Η diffuse ακτινοβολία είναι το κλάσμα που έχει διασκορπιστεί από τους υδρατμούς, τα σωματίδια, ή τα μόρια στην ατμόσφαιρα. Δεν μπορεί εύκολα να συγκεντρωθεί και είναι περίπου το 15 τοις εκατό ή και περισσότερο του συνόλου ακτινοβολίας, ανάλογα με την καθαρότητα του ουρανού.

Ωστόσο, υπάρχουν προκλήσεις που συνδέονται με τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας:

* Η ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στην επιφάνεια της γης είναι διάχυτη (1000Wm^{-2} κατ' ανώτατο όριο) σε σύγκριση με άλλες πηγές ενέργειας, όπως τα ορυκτά καύσιμα (MW/m^2)

* Ο ήλιος λάμπει κατά διαστήματα σε ένα ημερήσιο κύκλο, ο οποίος με τη σειρά του ακολουθεί μια εποχική διακύμανση και εξαρτάται επίσης σε μεγάλο βαθμό από τις τοπικές καιρικές συνθήκες

* Η θέση (αζιμούθιο και υψόμετρο) του ήλιου στον ουρανό και ως εκ τούτου, η γωνία

πρόσπτωσης της άμεσης ακτινοβολίας διαφέρουν συνεχώς

* Η ηλιακή ακτινοβολία δεν μπορεί να αποθηκευτεί άμεσα, αλλά πρέπει αμέσως να μετατρέπεται σε θερμότητα, ηλεκτρισμό, ή χημική ενέργεια.

2.2 Τα κυριότερα ηλιακά θερμικά συστήματα συλλεκτών

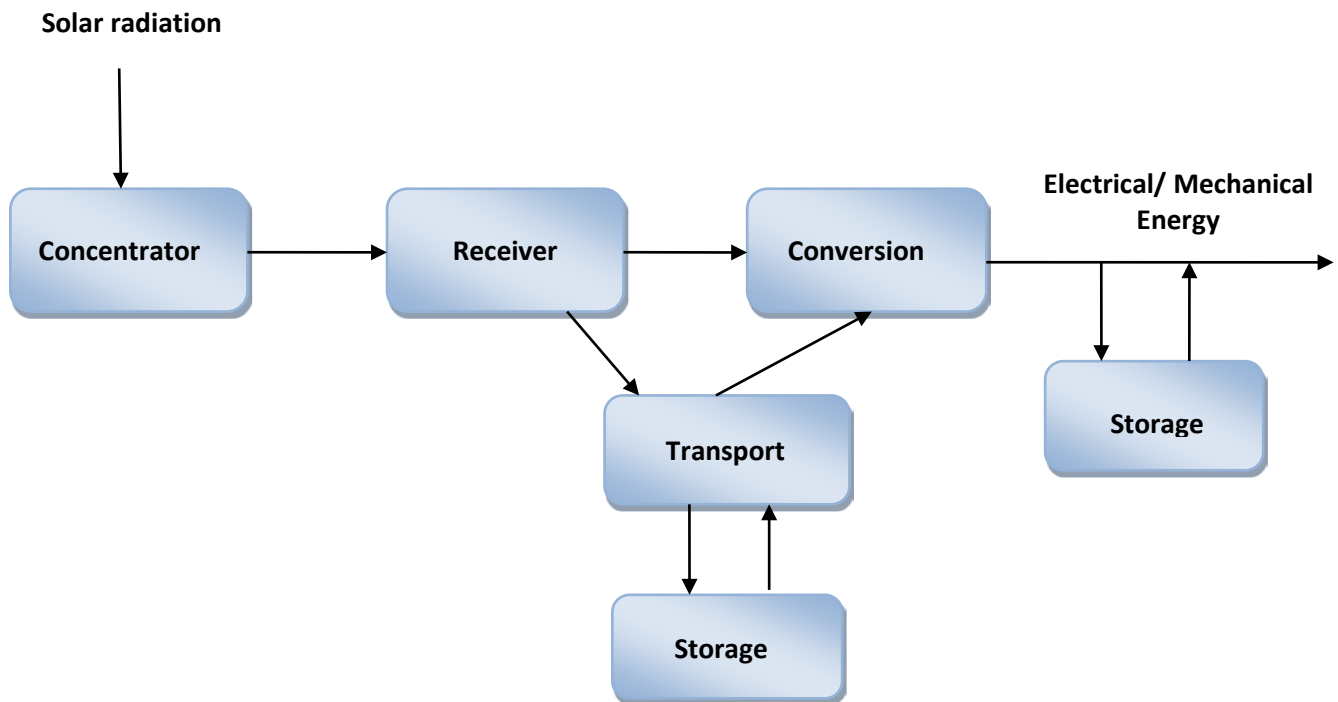
Διάφορες τεχνολογίες για τη συλλογή ηλιακής ακτινοβολίας και εν συνεχεία μετατροπή τους σε θερμική έχουν επινοηθεί. Στο απλούστερο επίπεδο, μια επίπεδη μεταλλική πλάκα, βαμμένη με μαύρο χρώμα τοποθετείται στον ήλιο, θα ζεσταθεί και θα φτάσει σε θερμοκρασία, όταν το ποσό της θερμότητας που ακτινοβολεί και χάνει στον αέρα ισορροπεί ακριβώς την ποσότητα της ενέργειας που λαμβάνει από τον ήλιο. Αυτή η θερμοκρασία εμφανίζεται σε περίπου 80°C για μια απλή επίπεδη πλάκα ηλιακού συλλέκτη.

Η θερμική απόδοση του ηλιακού συλλέκτη μπορεί να ορίζεται ως εξής:

Θερμική απόδοση του ηλιακού συλλέκτη = Ενέργεια μετατρέπεται / Ηλιακή ενέργεια που συλλέχθηκε

Η έξυπνη χρήση των υλικών επίστρωσης βοηθά στη μείωση των απωλειών από ακτινοβολία. Τέτοιες επιστρώσεις απορροφούν όσο το δυνατόν περισσότερο ποσά από τα υψηλής ενέργειας (υπεριώδης και ορατή) ηλιακά μήκη κύματος, ενώ εκπέμπουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη θερμική ακτινοβολία (υπέρυθρη). Οι διάφοροι συνδυασμοί αυτών των μέτρων χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό των συστημάτων για την παραγωγή ζεστού νερού που χρησιμοποιούνται σε όλο τον κόσμο για οικιακές και βιομηχανικές εφαρμογές. Οι ηλιακοί συλλέκτες αυτού του είδους θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

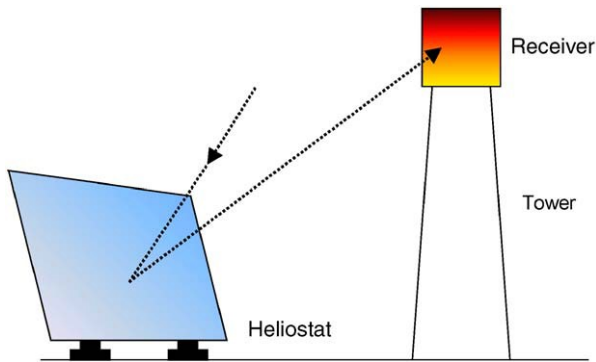
Ωστόσο, είναι συγκριτικά χαμηλές οι θερμοκρασίες που μπορούν να επιτευχθούν και οι αποδόσεις μετατροπής. Περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας κατά την οποία μεγαλύτερο ποσό ενέργειας μπορεί να ανακτηθεί απαιτεί κάποια μέθοδο της οπτικής συγκέντρωσης της ακτινοβολίας, έτσι ώστε το μέγεθος της επιφάνειας απορρόφησης και ως εκ τούτου θερμικών απωλειών να μειωθεί. Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται τα επιμέρους στοιχεία που απαρτίζουν ένα θερμικό σύστημα ηλιακής συγκέντρωσης.



Εικόνα .4 Σχηματική αναπαράσταση των επιμέρους στοιχείων που απαρτίζουν ένα θερμικό σύστημα ηλιακής συγκέντρωσης.

Η απλούστερη προσέγγιση θερμικού συστήματος ηλιακής συγκέντρωσης είναι να χρησιμοποιηθεί μια σειρά από επίπεδα κάτοπτρα, που ονομάζονται ηλιοστάτες, που προσαρμόζονται συνεχώς στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια απορρόφησης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5. Οι μεγάλες μονάδες που ονομάζονται "Κεντρικά συστήματα αποδέκτη" ή "Πύργοι ηλεκτρικής ενέργειας".

Η έννοια αυτή μπορεί επίσης να προσαρμοστεί σε γραμμικούς απορροφητές και μακριές λωρίδες επίπεδων καθρεφτών για να δημιουργήσει ένα "γραμμικό Fresnel" συγκεντρωτή.



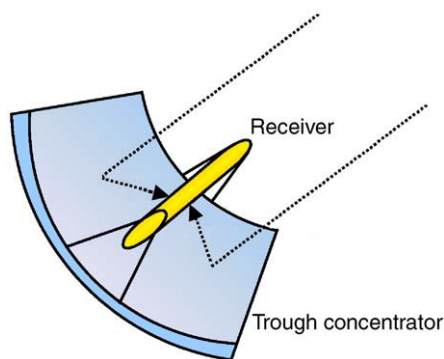
Εικόνα .5 Η κεντρική ιδέα του αποδέκτη. Ένα πεδίο από επίπεδα κάτοπτρα - ηλιοστάτες κινούνται ανεξάρτητα το ένα με το άλλο για να συγκεντρώσουν τη δέσμη της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε έναν ενιαίο κεντρικό αποδέκτη.

Οι μαθηματικές ιδιότητες της παραβολής μπορούν να αξιοποιηθούν για την εστίαση της ηλιακής ενέργειας.

Η εξίσωση για μια παραβολή στο x-y επίπεδο είναι:

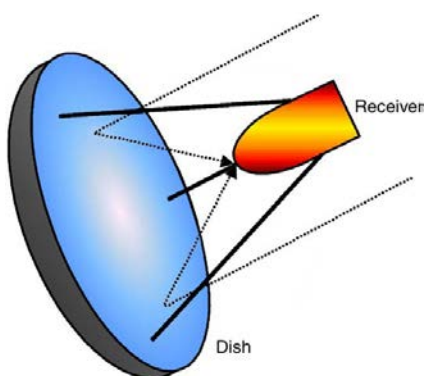
$$y = x^2 / 4f \quad (2.1)$$

Ακτίνες φωτός παράλληλα προς τον άξονα y ενός ειδώλου παραβολής αντανακλώνται και συγκεντρώνονται στο σημείο εστίασης σε f απόσταση από την κορυφή. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 6, η ιδιότητα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια γραμμική διάταξη τον κυλινδροπαραβολικό ηλιακό συλλέκτη, όπου ένα κάτοπτρο με παραβολική διατομή θα συγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία σε μια γραμμή εστίασης όντας στραμμένο προς τον ήλιο. Οι μεγαλύτερες ηλιακές θερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής μέχρι στιγμής που έχουν κατασκευαστεί χρησιμοποιούν αυτή την τεχνολογία.



Εικόνα .6 Ο κυλινδροπαραβολικός ηλιακός συλλέκτης εστιάζει την ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε ένα γραμμικό αποδέκτη.

Εναλλακτικά, ένα πιάτο καθρέφτης με παραβολική διατομή (παραβολοειδές) συγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα σημείο εστίασης Εικόνα 7. Και τα δύο προηγούμενα συστήματα δηλαδή ο κυλινδροπαραβολικός ηλιακός συλλέκτης και το παραβολικό πιάτο απαιτούν συνεχή προσαρμογή της θέσης τους (ή τουλάχιστον συχνή αναπροσαρμογή) για να διατηρηθεί η εστίαση καθώς ο ήλιος κινείται στον ουρανό.



Εικόνα .7 Ένα παραβολικό πιάτο εστιάζει την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα σημείο εστίασης ενός αποδέκτη.

Κάθε μία από τις παραπάνω προσεγγίσεις έχει ένα χαρακτηριστικό δείκτη της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας που συλλέγεται ο οποίος καλείται "concentration ratio"- βαθμός συγκέντρωσης. Ο Πίνακας 4 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των προαναφερθεισών ηλιακών θερμικών συστημάτων και παραθέτει χαρακτηριστικούς βαθμούς συγκέντρωσης, θερμοκρασίες λειτουργίας.

Ο περιορισμός της απόδοσης προκύπτει από τον δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής.

Η μέγιστη απόδοση για τη μεταφορά θερμότητας από μια σταθερή πηγή υψηλής θερμοκρασίας T_{hot} σε μια χαμηλή T_{cold} δίνεται από τον τύπο:

Μέγιστη απόδοση μετατροπής = $1 - T_{cold} / T_{hot}$

Αυτό είναι το όριο Carnot. Στα θερμικά ηλιακά συστήματα ηλεκτροπαραγωγής επιτυγχάνεται συνήθως περίπου το ένα τρίτο ή λιγότερο από το ιδανικό αυτό ανώτατο όριο. Αν και υψηλότεροι βαθμοί συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας μπορούν να δώσουν μεγαλύτερη απόδοση, μπορεί να οδηγήσει εντούτοις σε δυνητικά υψηλότερη πολυπλοκότητα του συστήματος και κόστος.

Η απόλυτη πρόκληση με τα ηλιακά θερμικά συστήματα ενέργειας είναι να παράγουν το επιθυμητό αποτέλεσμα όσο πιο οικονομικά γίνεται. Αυτό σημαίνει πάντοτε μια απόλυτη σύνδεση μεταξύ της απόδοσης του συστήματος και της επένδυσης σχεδιασμού.

Πίνακας.4 Τυπικό εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας και βαθμού συγκέντρωσης των διαφόρων τεχνολογιών ηλιακών θερμικών συλλεκτών^[23]

Solar collector technology	Typical operating temperature °C	Concentration ratio	Tracking	Maximum conversion efficiency (Carnot)
Flat- plate collector	30-100	1	-	21 %
Evacuated-tube collector	90-160	1	-	38%
Solar pond	70-90	1	-	19 %
Solar chimney	20-80	1	-	17 %
Linear Fresnel reflector technology	260-400	8-80	One-axis	56 %
Parabolic through collectors	260-400	8-80	One axis	56%
Heliostat field + central receiver	500-800	600-1000	Two axes	73 %
Paraboloidal dish concentrators	500-1200	800-8000	Two axes	80%

2.3 Θερμομηχανικά συστήματα Μετατροπής- Κύκλα ισχύος

Υπάρχουν τρία κύρια θερμομηχανικά συστήματα– κύκλα μετατροπής που εφαρμόζονται σε ηλιακές θερμικές τεχνολογίες παραγωγής κυρίως ηλεκτρικής ενέργειας. Πρόκειται για κύκλο Rankine, Stirling κινητήρα, και το κύκλο Brayton.

2.6.1 Κύκλο Rankine

Το κύκλο ατμού Rankine είναι υπεύθυνο για την πλειοψηφία της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο. Η τεχνολογία είναι εύκολα εφαρμόσιμη για τα ηλιακά

θερμικά συστήματα. Το νερό συμπιέζεται πρώτα από μια αντλία τροφοδοσίας νερού και στη συνέχεια υπερθερμαίνεται (έως περίπου 500°C) προτού εκτονωθεί μέσω ενός στροβίλου, που μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Ο χαμηλής πίεσης ατμός στη συνέχεια συμπυκνώνεται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας και ανατροφοδοτείται με την αντλία τροφοδοσίας νερού για να επαναχρησιμοποιηθεί. Ο κύκλος ατμού Rankine ήταν, και εξακολουθεί να είναι, κυρίαρχος στην τεχνολογία των κυλινδροπαραβολικών ηλιακών συλλεκτών, στο παραβολικό πιάτο και στους ηλιακούς πύργους. Οι οργανικοί κύκλοι Rankine είναι πανομοιότυποι με ατμό απλά χρησιμοποιούν οργανικά υγρά. Οργανικά υγρά όπως το τολουένιο έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία αλλαγής φάσης υγρού-αερίου από νερό / ατμό και ως εκ τούτου λειτουργούν με χαμηλότερη θερμοκρασία συνήθως μεταξύ 80 και 280°C.

2.6.2 Κύκλο Stirling

Το θερμοδυναμικό κύκλο Stirling αποτελείται διαδοχικά από τέσσερις αντιστρεπτές μεταβολές: i) Ισόθερμη εκτόνωση, ii) Ισόχωρη ψύξη, iii) Ισόθερμη συμπίεση και iv) Ισόχωρη θέρμανση. Η θεωρητική απόδοση του κύκλου τον οποίο ακολουθούν οι κινητήρες Stirling είναι ίση με την θεωρητική απόδοση του κύκλου Carnot εφόσον χρησιμοποιηθούν θερμές δεξαμενές μεγάλης θερμοχωρητικότητας της ίδιας υψηλής θερμοκρασίας T_1 και ψυχρές δεξαμενές μεγάλης θερμοχωρητικότητας της ίδιας χαμηλής θερμοκρασίας T_2 ($T_1 > T_2$). Ανάλογα του τρόπου μετάδοσης της κίνησης οι θερμικές μηχανές Stirling μπορεί να είναι με στρόφαλο (Crank Stirling Engine, CSE), ή ελευθέρων εμβόλων (Free Piston Stirling Engine, FPSE. Με τον κατάλληλο καυστήρα είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν ενδεικτικά τα παρακάτω καύσιμα για ένα τέτοιο κύκλο. Από τα ρευστά: Βενζίνη, Πετρέλαιο, Κηροζίνη, Λάδι λίπανσης, Ελαιόλαδο, Σπορέλαιο, Ηλιέλαιο, Βιοέλαιο, Αιθανόλη, Μεθανόλη, Προπάνιο, Βουτάνιο, Υγραέριο, Φυσικό αέριο, Φωταέριο, Γαϊαέριο, Βιοαέριο, υδρογόνο και ήλιο. Από τα Στερεά: Όλες οι μορφές κάρβουνου, Βιομάζα (ξύλα, πριονίδι, φύλλα κλπ). Τα παραβολικά πιάτα/ Stirling συστήματα επιτυγχάνουν πολύ υψηλά ποσοστά απόδοσης. Σε ηλιακές εφαρμογές, συνήθως οι μηχανές Stirling χρησιμοποιούν υδρογόνο και ήλιο ως εργαζόμενο ρευστό.

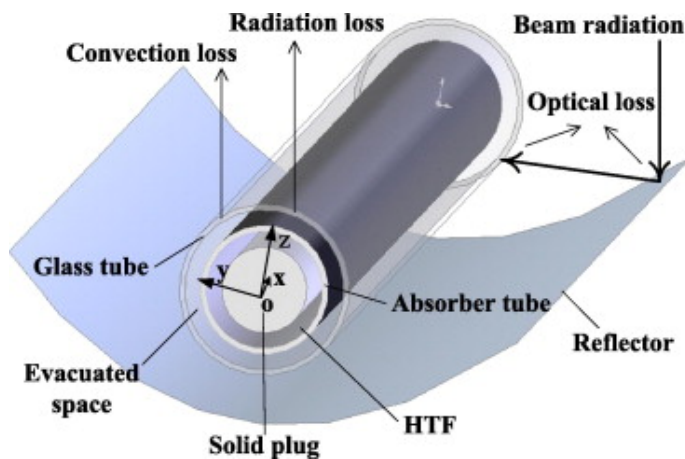
2.6.3 Κύκλο Brayton

Ο κύκλος Brayton είναι η βάση του συμβατικού αεριοστροβίλου. Ο κύκλος περιλαμβάνει αδιαβατική συμπίεση του αερίου από ένα στρόβιλο συμπιεστή, σταθερή σε πίεση προσθήκη θερμότητας, και αδιαβατική εκτόνωση του αερίου σε μια τουρμπίνα (συνήθως τοποθετούνται στον ίδιο άξονα με τον συμπιεστή), ακολουθούμενη από μια σταθερή σε πίεση ψύξη. Σε συστήματα με συμβατικό καύσιμο, η προσθήκη θερμότητας πραγματοποιείται στον θάλαμο καύσης και όπου τα παραγόμενα καυσαέρια στην συνέχεια εκτονώνονται, με ή χωρίς ανάκτηση θερμότητας. Για ηλιακές εφαρμογές, η ανάκτηση θερμότητας είναι οικονομικά συμφέρουσα για αύξηση της αποδοτικότητας καθώς και η χρήση συμβατικών αερίων καυσίμων για εφεδρεία συνιστάται για αδιάλειπτη λειτουργία, ανεξάρτητα από την ώρα και της καιρικές συνθήκες της ημέρας.

3. Ο Κυλινδροπαραβολικός ηλιακός συλλέκτης

3.1 Περιγραφή του Κυλινδροπαραβολικού ηλιακού συλλέκτη

Οι κυλινδροπαραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες (Parabolic Trough Collectors - PTC) αποτελούνται από παραβολικά κάτοπτρα υψηλής ανακλαστικότητας, τα οποία παρακολουθούν τον ήλιο γύρω από ενιαίο περιστροφικό άξονα, και συγκεντρώνουν σε την ηλιακή του ενέργεια σε έναν κυλινδρικό εναλλάκτη θερμότητας (αποδέκτη- receiver), ο οποίος είναι τοποθετημένος κατά μήκος του εστιακού σημείου. Εντός του αποδέκτη κυκλοφορεί το θερμικό ρευστό (Heat Transfer Fluid - HTF), στο οποίο καταλήγει η ηλιακή ενέργεια (Εικόνα 8). Ο αποδέκτης (receiver ή αλλιώς Heat Collection Element – HCE) αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα της υψηλής θερμικής απόδοσης των κυλινδροπαραβολικών συλλεκτών. Αποτελείται από ένα χαλύβδινο κυλινδρικό σωλήνα υψηλής απορροφητικότητας (απορροφητής – absorber), ο οποίος περικλείεται από κυλινδρικό γυάλινο κάλυμμα (cover ή glass envelope) υψηλής διαπερατότητας με ειδικό αντι-ανακλαστικό επίχρισμα, ανάμεσα στους οποίους δημιουργείται «κενό αέρος» (vacuum). Το κενό αέρος όχι μόνο λειτουργεί ως μονωτής, έτσι ώστε να διατηρείται η υψηλή απόδοση των κυλινδροπαραβολικών συλλεκτών ακόμη και για μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ του αποδέκτη και του περιβάλλοντος, αλλά περιορίζει στο ελάχιστο δυνατό την οξειδωση του χαλύβδινου απορροφητή.



Εικόνα .8 Ο Κυλινδροπαραβολικός ηλιακός συλλέκτης

Η πρώτη ιστορικά αναφορά στην τεχνολογία των κυλινδροπαραβολικών συλλεκτών ήταν το 1870, όταν ο μηχανικός, ο John Ericsson, Σουηδός μετανάστης στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, σχεδίασε και κατασκεύασε έναν συλλέκτη, επιφάνειας κατόπτρων 3.25m^2 , για την οδήγηση μίας μηχανής ισχύος 373 W . Η παραγωγή ατμού γινόταν κατευθείαν στο εσωτερικό του σωλήνα του συλλέκτη (αυτό που σήμερα ονομάζεται Απευθείας Παραγωγή Ατμού ή στην Αγγλική ορολογία Direct Steam Generation - DSG). Κατά την πάροδο του αιώνα έγιναν αρκετές προσπάθειες αλλαγών και βελτίωσης των κυλινδροπαραβολικών συλλεκτών. Ωστόσο, η πετρελαϊκή κρίση τη δεκαετία του 70, προσέλκυσε την διεθνή προσοχή στις ανανεώσιμες εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Τότε χρηματοδοτήθηκε και η ανάπτυξη αρκετών συστημάτων κυλινδροπαραβολικών συλλεκτών. Έτσι, το χρηματοδοτούμενο από την Κυβέρνηση των Ηνωμένων Πολιτειών, Sandia National Laboratories, σε συνεργασία με την εταιρία Honeywell International Inc. και την εταιρία Westinghouse, σχεδίασαν τρία πρωτότυπα συλλεκτών τα οποία τα οποία ολοκληρώθηκαν και δοκιμάστηκαν ποιοτικά, το έτος 1975. Οι συγκεκριμένοι συλλέκτες σχεδιάστηκαν σε θερμοκρασία λειτουργίας κάτω των 250°C , είχαν μήκος 3.66 m , πλάτος 2.13 m και γωνία ανοίγματος 90° . Επίσης, διέθεταν απορροφητή διαμέτρου 4 cm , κατασκευασμένο από ανθρακούχο ασάλι, με επίστρωση μαύρου χαλκού, περικλειόμενο από γυάλινο κάλυμμα, και κενό αέρος 1 cm ανάμεσα στον απορροφητή και το κάλυμμα. Το 1979, είναι χρονιά ορόσημο για την τεχνολογία των κυλινδροπαραβολικών συλλεκτών, καθώς ιδρύεται η αμερικανό-ισραηλινή εταιρία

Luz International, η οποία ανέπτυξε τρεις γενιές συλλεκτών (LS-1, LS-2 και LS-3), οι οποίοι εγκαταστάθηκαν σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο (Solar Electric Generation Systems - SEGS).

3.2 Εφαρμογές Κυλινδροπαραβολικού ηλιακού συλλέκτη

Η παγκόσμια συνολική τελική κατανάλωση ενέργειας και εκπομπών CO₂ παγκοσμίως έχουν διπλασιαστεί τα τελευταία 35 χρόνια. Ο περιορισμένος εφοδιασμός των ορυκτών πόρων των υδρογονανθράκων και των αρνητικών επιπτώσεων τους σε εκπομπές CO₂ στο παγκόσμιο περιβάλλον υπαγορεύουν αυξημένη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα CSP (κεντρικά ηλιακά συστήματα) είναι από τις πιο αποδοτικές τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ηλεκτρικής ενέργειας και μπορούν να συμβάλουν σημαντικά προς τη διεθνή δέσμευση για τη μείωση της αύξησης του επιπέδου των αερίων του που συμβάλλουν στην αλλαγή του κλίματος. Επιπλέον, πολλές χώρες διερευνούν διάφορες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για να μειώσουν την εξάρτησή τους από τις ξένες εισαγωγές για την κάλυψη στις ενεργειακές απαιτήσεις τους. Καθώς η ηλιακή ενέργεια είναι η πιο άφθονη προσφέρει πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες πηγές ενέργειας.

Μια βασική εφαρμογή του Κυλινδροπαραβολικού ηλιακού συλλέκτη είναι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (SEGS) όπου το θερμικό λάδι που ρέει στους συλλέκτες θερμαίνεται μετά με τη σειρά του μέσω ενός εναλλάκτη θερμαίνει νερό ή κάποιο οργανικό υγρό το οποίο μέσω ενός κύκλου ισχύος παράγει ηλεκτρισμό. Επίσης μέσα στους αποδέκτες μπορεί να ρέει απευθείας νερό και να θερμαίνεται απευθείας και εν συνεχεία να χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Μία από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές των συλλεκτών αυτών είναι παραγωγή ζεστού νερού. Παραδείγματα εφαρμογών με υψηλή κατανάλωση ζεστού νερού είναι μια μεγάλη πισίνα νερού και η θέρμανση χώρων για μεγάλα κτίρια, όπως βιομηχανικά κτίρια, εργοστάσια, νοσοκομεία, εκπαιδευτικά κέντρα, αθλητικές εγκαταστάσεις, φυλακές, αεροδρόμια, σταθμούς λεωφορείων και τρένων, κ.λπ.

Η ενεργειακή ζήτηση που συνδέεται με τα κλιματιστικά στις περισσότερες βιομηχανικές χώρες έχει αυξηθεί σημαντικά κατά τα τελευταία χρόνια, προκαλώντας τις αιχμές της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και προκαλούν διαταραχές στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής. Οι κύριοι λόγοι για αυτή την

αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας είναι τα ολοένα και αυξημένα θερμικά φορτία, το βελτιωμένο βιοτικό επίπεδο και οι απαιτήσεις άνεσης. Τα ηλιακά θερμικά συστήματα, εκτός από τα τυπικά πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι πολύ κατάλληλα για κλιματισμό και απαιτήσεις ψύξης, επειδή η ηλιακή ακτινοβολία η ανάγκη ψυκτικών απαιτήσεων συμπίπτουν συνήθως εποχιακά και γεωγραφικά. Εγκαταστάσεις PTC κλιματισμού και ψύξης μπορούν επίσης να συνδυαστούν εύκολα με τη θέρμανση χώρου και την παραγωγή ζεστού νερού.

Άλλη εφαρμογή τους είναι η άντληση νερού άρδευσης, όπου η θερμική ενέργεια που παράγεται από το ηλιακό πεδίο μπορεί να μετατραπεί σε μηχανική ενέργεια για την οδήγηση μιας αντλίας νερού. Αυτή η εφαρμογή έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε απομονωμένες περιοχές και στις αγροτικές περιοχές, όπου το δίκτυο είναι μακριά και η μεταφορά των καυσίμων είναι οικονομικά ασύμφορη. Επιπλέον, η εφαρμογή αυτή έχει δύο βασικά πλεονεκτήματα: ηλιακή ενέργεια είναι άφθονη στις περισσότερες άγονες περιοχές, όπου η γεωργία εξαρτάται από την άρδευση, και μερικές χαμηλές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας είναι συνήθως αποδεκτές, χωρίς να υπάρχει η ανάγκη ενός ενδιάμεσου συστήματος αποθήκευσης.

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για την αφαλάτωση του νερού, είτε άμεσα, με την παραγωγή αποσταγμάτων στο εσωτερικό του ηλιακού συλλέκτη, ή έμμεσα, συνδέοντας το ηλιακό σύστημα σε μια συμβατική μονάδα αφαλάτωσης. Οι Κυλινδροπαραβολικοί συλλέκτες μπορούν να συνδεθούν τόσο σε θερμική όσο και ηλεκτρική μονάδα αφαλάτωσης (μετατροπή της θερμικής σε ηλεκτρική ενδιάμεσα). Το PTC για ηλιακή αφαλάτωση έχει μελετηθεί σε διάφορους τύπους της αφαλάτωσης, όπως η αντίστροφη όσμωση (RO), τις πολλαπλές σταδίων απόσταξης (MED)] και Multi-Flash.

Μια ακόμη εφαρμογή των PTC είναι στην ηλιακή χημεία. Η εκτεταμένη παρουσία των επικίνδυνων οργανικών χημικών ενώσεις, κυρίως στο νερό, αλλά και στον αέρα, έχει ως οδηγήσει σε ενδιαφέρον για την εξεύρεση εναλλακτικών λύσεων φιλικών προς το περιβάλλον για την θεραπεία και / ή την απομάκρυνση αυτών των ενώσεων. Κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών, η υπεριώδης ακτινοβολία ηλιακού φάσματος έχει χρησιμοποιηθεί για την καταπολέμηση αυτών των ενώσεων. Αυτές οι διαδικασίες έχουν αποδειχθεί επιτυχείς και παρουσιάζουν τεράστιες δυνατότητες για την εμπορική εφαρμογή τους. Η συμπυκνωμένη ηλιακή ενέργεια που συλλέγεται από τους PTC αυξάνει τη διαδικασία αποτοξίνωσης, εξαιτίας των υψηλής ενέργειας φωτονίων τα

οποία κατευθύνονται απευθείας ροή του νερού ή αέρα. Στο PTC, ένας διάφανος σωλήνας (συνήθως γυαλί) τοποθετείται στο επίκεντρο γραμμή του ανακλαστήρα αντί του σωλήνα απορρόφησης μετάλλων, όπως δηλαδή ένας φωτο-αντιδραστήρας.

3.3 Θερμική απόδοση κυλινδροπαραβολικού ηλιακού συλλέκτη

Η συνολική απόδοση του κυλινδροπαραβολικού συλλέκτη, εξαρτάται από την οπτική απόδοση, βάση της οποίας υπολογίζεται η απορροφούμενη από τον απορροφητή ακτινοβολία (S_a), αλλά και από την θερμική απόδοση, καθώς η ωφέλιμη ενέργεια προκύπτει από την διαφορά των θερμικών απωλειών του απορροφητή από την απορροφούμενη ακτινοβολία. Στην Εικόνα 9 απεικονίζεται η διατομή του αποδέκτη του κυλινδροπαραβολικού συλλέκτη, καθώς και οι απώλειες του απορροφητή, λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας με το κάλυμμα. Η απώλεια ύλης (κενό) στο χώρο μεταξύ του καλύμματος και του απορροφητή, έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια θερμότητας μονάχα από ακτινοβολία (η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία δεν απαιτεί την ύπαρξη υλικού μέσου, σε αντίθεση με την αγωγή και τη συναγωγή). Έτσι, η ωφέλιμη ροή θερμότητας στον απορροφητή ισούται με:

$$\dot{q}_u = C_r S_a - h_{rad,a-c} (T_a - T_c) \quad (3.1)$$

όπου C_r , είναι ο συντελεστής συγκέντρωσης, S_a , η απορροφούμενη ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας του απορροφητή, $h_{rad,a-c}$, ο συντελεστής ακτινοβολίας μεταξύ του απορροφητή και του καλύμματος, T_a η θερμοκρασία του απορροφητή και T_c , η θερμοκρασία του καλύμματος. Ο συντελεστής συναγωγής προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$h_{rad,a-c} = \frac{\sigma(T_a^2 + T_c^2) + (T_a + T_c)}{\frac{1 - \epsilon_a}{\epsilon_a} + \frac{1}{F_{ac}} + \frac{(1 - \epsilon_c) D_{a,ext}}{\epsilon_c D_{c,int}}} \quad (3.2)$$

όπου F_{ac} είναι ο μορφολογικός παράγοντας των επιφανειών του απορροφητή και του καλύμματος. Ο μορφολογικός παράγοντας προσδιορίζει την επίδραση της γεωμετρίας στο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία, και ορίζεται ως το κλάσμα της

ακτινοβόλου ενέργειας που φεύγει από μία επιφάνεια και προσκρούει κατευθείαν σε μία δεύτερη επιφάνεια, υπό την προϋπόθεση ότι και οι δυο επιφάνειες εκπέμπουν διάχυτα την ακτινοβολία. Ο όρος «κατευθείαν» σημαίνει ότι κανένα ποσοστό της ακτινοβολίας δεν μεταφέρεται με ανάκλαση ή επαν-ακτινοβολία από άλλες επιφάνειες. Στην περίπτωση της γεωμετρίας των επιφανειών απορροφητή-καλύμματος, ο μορφολογικός παράγοντας ισούται με: $F_{ac} = 1$.

Η απόδοση ενός κυλινδροπαραβολικού συλλέκτη εξαρτάται από την οπτική του απόδοση (δηλαδή την ποσοτικοποίηση της ικανότητάς των υλικών του να αξιοποιήσουν μεγάλο μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας η οποία τελικά θα καταλήξει στον απορροφητή), καθώς και από την θερμική του απόδοση (δηλαδή την ποσοτικοποίηση της ικανότητάς του να ελαχιστοποιεί τις θερμικές απώλειες λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας των υλικών του σε σχέση με το περιβάλλον).

Βέβαια, η επιλογή των υλικών με τις κατάλληλες οπτικές ιδιότητες κάθε υποσυστήματος ενός κυλινδροπαραβολικού συλλέκτη, προκύπτει από τον τρόπο λειτουργίας αυτού. Συνοπτικά, ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο παραβολικό κάτοπτρο, ανακλάται και συγκεντρώνεται στο κάλυμμα του κυλινδρικού σωλήνα υποδοχής (αποδέκτης), ο οποίος είναι τοποθετημένος κατά μήκος της εστίας της παραβολής του κατόπτρου. Το ποσοστό της ακτινοβολίας αυτής που διαπερνά το κάλυμμα, καταλήγει στον απορροφητή, όπου και απορροφάται ένα μέρος αυτού. Συνεπώς, για να είναι ένας κυλινδροπαραβολικός συλλέκτης αποδοτικός ως προς την οπτική του σχεδίαση, θα πρέπει το παραβολικό κάτοπτρο του συλλέκτη να επιλεγεί έτσι ώστε να παρουσιάζει υψηλή ανακλαστικότητα, το περίβλημα του σωλήνα υποδοχής να παρουσιάζει υψηλή διαπερατότητα και χαμηλή εκπεψιμότητα, και ο απορροφητής να χαρακτηρίζεται από υψηλή απορροφητικότητα. Οπότε, η απορροφούμενη από τον απορροφητή ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να περιγραφεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$S_a = I_b r(\psi\tau\alpha)_n K_{\psi\tau\alpha}(\theta) \quad (3.3)$$

Πίνακας.5 Περιγραφή των μεγεθών της Εξίσωσης 3.3

S_a	Απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας	W/m ²
I_b	Απευθείας ηλιακή ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας	W/m ²
r	Κατοπτρική ανακλαστικότητα κατόπτρου	βαθμωτό μέγεθος
ψ_n	Συντελεστής παρεμπόδισης ακτίνων για μηδενική γωνία πρόσπτωσης	βαθμωτό μέγεθος
τ_n	Διαπερατότητα καλύμματος για μηδενική γωνία πρόσπτωσης	βαθμωτό μέγεθος
α_n	Απορροφητικότητα απορροφητή για μηδενική γωνία πρόσπτωσης	βαθμωτό μέγεθος
$K_{\psi\tau\alpha}(\theta)$	Συντελεστής διόρθωσης των $(\gamma\tau\alpha)_n$	βαθμωτό μέγεθος

Με την χρήση της παραπάνω εξίσωσης υπολογίζεται η απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία ανά μονάδα μη σκιαζόμενης επιφάνειας (S_a), ως συνάρτηση της απευθείας προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας (I_b) και των οπτικών ιδιοτήτων των υλικών. Συνεπώς, η οπτική απόδοση του κυλινδροπαραβολικού συλλέκτη, ορίζεται ως το ποσοστό της απορροφούμενης από τον απορροφητή ακτινοβολίας, προς την απευθείας συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας (I_b), η οποία προσπίπτει στο κάτοπτρο, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εξίσωση.

$$n_{opt} = \frac{S_a}{I_b} \quad (3.4)$$

Στους κυλινδροπαραβολικούς συλλέκτες, συγκεντρώνεται μονάχα η απευθείας συνιστώσα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, ενώ η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας δεν αξιοποιείται. Για τον ίδιο λόγο λαμβάνεται υπόψη μονάχα η κατοπτρική ανακλαστικότητα του παραβολικού κατόπτρου (r). Επίσης, ο συντελεστής παρεμπόδισης ακτίνων (ψ_n), ο οποίος ορίζει το ποσοστό της I_b που προσπίπτει και στον απορροφητή, η διαπερατότητα του καλύμματος (τ_n), καθώς και η απορροφητικότητα του απορροφητή α_n εξαρτώνται από την γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Συνεπώς, ο δείκτης n συμβολίζει ότι οι συγκεκριμένες οπτικές ιδιότητες (ψ, τ, α) εκτιμούνται με βάση την παραδοχή ότι η απευθείας ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει κάθετα (normal) στην επιφάνεια του κατόπτρου. Η παραδοχή αυτή

διορθώνεται με τη χρήση του συντελεστή διόρθωσης ($K_{\psi\tau\alpha}(\theta)$), ο οποίος μοντελοποιεί την αλλαγή των οπτικών ιδιοτήτων του γινομένου ($\psi\tau\alpha$)_n με χρήση της `πραγματικής γωνίας πρόσπτωσης.

Συντελεστής συγκέντρωσης

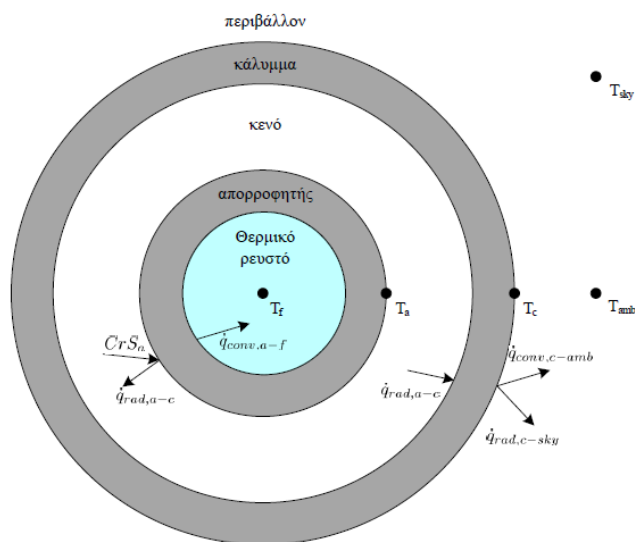
Η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας επιτυγχάνεται με ανάκλαση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του κατόπτρου (aperture area - A_{ref}), σε μικρότερη επιφάνεια αποδέκτη (receiver area - A_r). Έτσι, ο βαθμός συγκέντρωσης (Concentration ratio - C_r), ορίζεται ως:

$$C_r = \frac{A_{ref}}{A_r} \quad (3.5)$$

όπου A_{ref} η κατοπτρική επιφάνεια αναφοράς, που ισούται με το γινόμενο του μήκους του κατόπτρου (L) επί το άνοιγμα του κατόπτρου (W). Με την συγκέντρωση της ακτινοβολίας, επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση από τους συμβατικούς επίπεδους συλλέκτες, ακόμη και για μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι θερμικές απώλειες είναι ανάλογες της επιφάνειας του αποδέκτη.

Η θερμική απόδοση (η_{th}) του κυλινδροπαραβολικού συλλέκτη ορίζεται ως ο λόγος της ωφέλιμης ακτινοβολίας προς την προσπίπτουσα στο κάτοπτρο ακτινοβολία, και περιγράφεται μαθηματικά από την Εξίσωση 3.6.

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_u}{A_{ref} I_b} \quad (3.6)$$



Εικόνα .9 Τομή σωλήνα υποδοχής^[26].

4. Αφαλάτωση

4.1 Η αφαλάτωση –ορισμός

Η αφαλάτωση είναι μια φυσική διεργασία αποχωρισμού αλάτων και νερού από υδατικά διαλύματα και χρησιμοποιείται σε μεγάλη κλίμακα, ως καθαρά βιομηχανική μέθοδος, για την παραγωγή καθαρού νερού για κάθε χρήση. Είναι μια διεργασία η οποία εφαρμόζεται με διάφορες μεθόδους που είτε απομακρύνουν τα άλατα από το νερό είτε το νερό από τα άλατα. Επειδή είναι βιομηχανικό προϊόν, το κόστος του αφαλατωμένου νερού είναι πάντοτε κατά πολύ μεγαλύτερο από το κόστος του φυσικού νερού το οποίο μεταφέρεται από μια πηγή σε σχετικά μέτρια χιλιομετρική απόσταση. Επομένως, η αφαλάτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια μέθοδος ανάκτησης πόσιμου νερού από θαλασσινό νερό, υφάλμυρα ποτάμια και λίμνες. Βρίσκει κυρίως εφαρμογή σε περιοχές δίπλα στην θάλασσα, αλλά φτωχές σε πόσιμο νερό, όπου η επιλογή της μεταφοράς νερού είναι οικονομικά και τεχνικά ασύμφορη.

4.2 Η αφαλάτωση – Ιστορική αναδρομή

Το νερό ως πηγή ζωής έχει απασχολήσει στο παρελθόν, ήδη από τους αρχαίους χρόνους πρωτοπόρους ερευνητές και κυρίως φιλοσόφους πάνω στην φύση και τις ιδιότητες του νερού αλλά και τη δυνατότητα παραγωγής γλυκού και πόσιμου νερού από αλμυρά ύδατα. Από τα αρχαία χρόνια γύρω στον 4ο αιώνα π.χ. οι Έλληνες ναυτικοί εξάτμιζαν το θαλασσίνο νερό και την ίδια περίοδο ο Αριστοτέλης μελετά την δυνατότητα αφαλάτωσης αλμυρού νερού. Κατά τον Μεσαίωνα, ο Giovanni Battista della Porta, στο πολύτιμο βιβλίο του 'Magiae Naturalis' περιγράφει διάφορους τρόπους αφαλάτωσης και μια μέθοδο παραγωγής πόσιμου νερού από την υγρασία της ατμόσφαιρας. Από άλλες περιγραφές του για την αφαλάτωση, μεγαλύτερης σημασίας είναι εκείνη που αναφέρεται στην χρησιμοποίηση της ηλιακής ενέργειας, ως πηγή θερμότητας για την παραγωγή πόσιμου νερού από θαλασσινά υφάλμυρα νερά.

Το 1675 κατατίθεται το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μια συσκευή απόσταξης θαλασσινού νερού για την παραγωγή πόσιμου νερού και αργότερα το 1683 ένα δεύτερο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας επίσης για την απόσταξη θαλασσινού νερού. Εγκαταστάθηκαν τρεις αποστακτήρες, οι πρώτοι σε έδαφος, οι δύο σε νησιά της Μάγχης και ένας στην ηπειρωτική Αγγλία για να αποδειχθεί η καλή λειτουργία της νέας εφεύρεσης.

Η πρώτη αναφορά για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού με πλήρη περιγραφή των επιτευγμάτων της εποχής του και ιδιαίτερα για την παραγωγή γλυκού νερού από θάλασσα σε ποντοπόρα πλοία, δόθηκε από τον Γάλλο ναύαρχο, A.F.D Deslanes το 1724. Αργότερα το 1739 ο Stephan Hales εξέδωσε ένα βιβλίο, το οποίο περιείχε λεπτομερή περιγραφή όλων των προβλημάτων σχετικά με την αφαλάτωση.

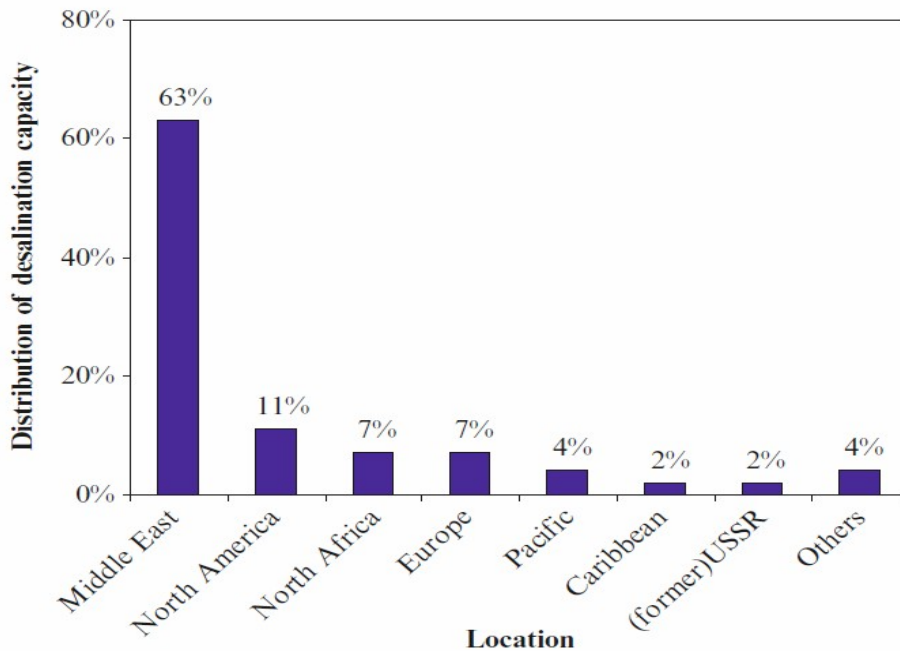
Το 1870 στις ΗΠΑ κατατίθεται το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για αφαλάτωση με ηλιακή ενέργεια. Το δίπλωμα αυτό περιγράφει με λεπτομέρεια όλα όσα ακόμη και σήμερα εφαρμόζονται στη συμβατική αφαλάτωση με ηλιακή ενέργεια. Δύο χρόνια αργότερα ο Σουηδός μηχανικός Carlos Wilson σχεδίασε και κατασκεύασε την πρώτη μεγάλη εγκατάσταση αφαλάτωσης με ηλιακή ενέργεια παροχής 22.5 m³/d . Οι αποστακτήρες εγκαταστάθηκαν στο Chacabuco της Χιλής λειτούργησε από το 1874 και για 40 συνεχή χρόνια.

Το ενδιαφέρον για την αφαλάτωση αναζωπυρώθηκε στην Καλιφόρνια κατά το 1930, όταν η περιοχή πλήγηκε από μια πολύ μεγάλη ξηρασία. Η οικονομική κρίση όμως εκείνης της περιόδου δεν επέτρεψε στην περαιτέρω έρευνα του θέματος.

Μετά το τέλος του δεύτερου παγκοσμίου πολέμου άρχισε να εκδηλώνεται τεράστιο ενδιαφέρον για την αφαλάτωση το οποίο προήλθε από την ραγδαία αύξηση της ζήτησης τόσο σε αστικές αλλά και σε αγροτικές περιοχές. Η αύξηση επίσης της βιομηχανίας συντέλεσε στην ολοένα και αυξανόμενη απαίτηση για την εξεύρεση νέων πηγών νερού και την προώθηση της αφαλάτωσης σε αλμυρά η και υφάλμυρα νερά. Έτσι με πρωτοπόρο τις ΗΠΑ στην έρευνα με κυβερνητικές και ιδιωτικές πρωτοβουλίες έγιναν σημαντικά επιτεύγματα στο τομέα της αφαλάτωσης. Το 1960 ξεκίνησαν στο πανεπιστήμιο UCLA της Καλιφόρνια τα πρώτα πειράματα στην αντίστροφη όσμωση, με την κατασκευή των πρώτων μεμβρανών από τους ερευνητές, Sydney Loeb και Shrinivasa Sourirajan. Το 1965 κατασκευάστηκε η πρώτη πειραματική μονάδα αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού με την μέθοδο της Αντίστροφης Όσμωσης.

Κατά την δεκαετία του 1970 ξεκίνησε η λειτουργία μεγάλων βιομηχανικών μονάδων αφαλάτωσης στη Ρωσία, ΗΠΑ, Μεξικό, και κυρίως στη Σαουδική Αραβία, το Κουβέιτ, το Ισραήλ κλπ.

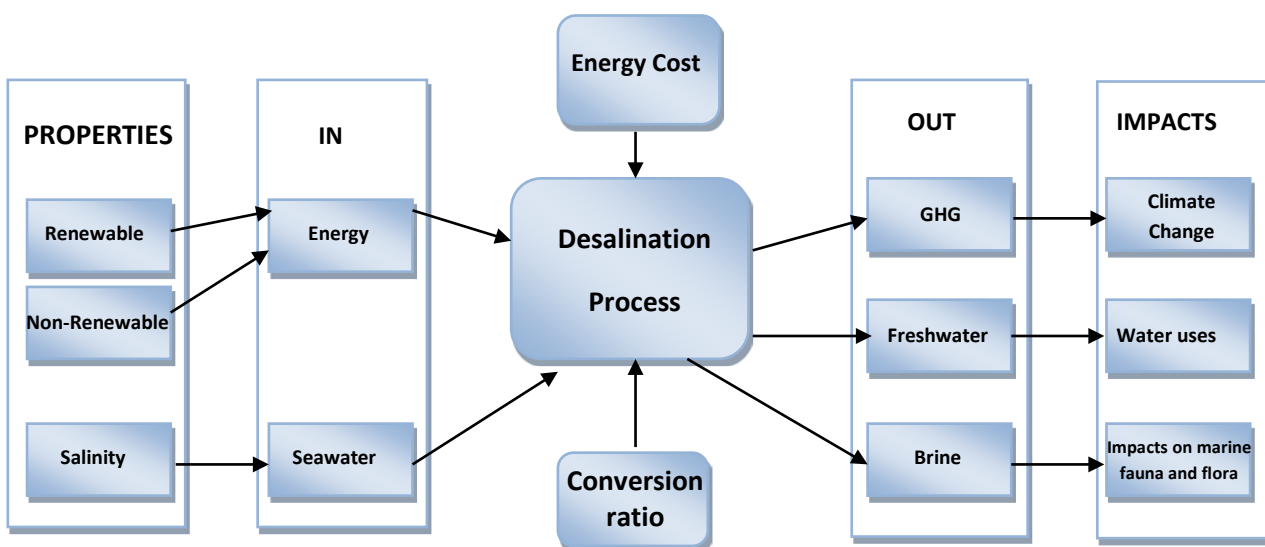
Στη σημερινή εποχή, λειτουργούν περίπου 14.500 μονάδες αφαλάτωσης παγκοσμίως. Το 11 τοις εκατό αυτών των μονάδων εγκαταστάθηκαν τα τελευταία χρόνια (πριν το 2000). Το 63 τοις εκατό αυτών βρίσκονται στην Μέση Ανατολή και το 11 τοις εκατό στις βόρειες ΗΠΑ. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι είναι η πολυβάθμια εκτόνωση (multiple stage flashing, MSF) και η αντίστροφη όσμωση (reverse osmosis, RO), η οποία παράγει και το 53 τοις εκατό του παγκόσμιου προϊόντος.



Γράφημα.2 Γεωγραφική κατανομή μονάδων αφαλάτωσης παγκοσμίως^[3]

4.3 Μέθοδοι αφαλάτωσης

Για μια μονάδα αφαλάτωσης το σχηματικό διάγραμμα όλων των πιθανών εισόδων και εξόδων, παρουσιάζεται παρακάτω. Σαν εισοδοι της μονάδας είναι η ενέργεια (ανανεώσιμη ή και συμβατικές) και το αλμυρό ή υφάλμυρο νερό και έξοδοι η άλμη (Brine), το φρέσκο νερό (Fresh Water) καθώς και αέρια θερμοκηπίου (GHG).



Εικόνα .10 Σχηματικό διάγραμμα πιθανών εισόδων και παραμέτρων ενός συστήματος αφαλάτωσης

Οι μέθοδοι αφαλάτωσης μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

Πίνακας.6 Μέθοδοι αφαλάτωσης (Desalination methods):
Απόσταξη (Distillation)
Multi stage flash (MSF)
Multiple effect evaporator (MED/MEE)
Συμπύκνωση ατμού (Vapor compression evaporation, VC)
Εξαέρωση /Συμπύκνωση (evaporation / condensation)
Μέθοδοι με μεμβράνες (Membrane processes)
Ηλεκτρόλυση (Electro dialysis reversal, EDR)
Αντίστροφη όσμωση (Reverse osmosis, RO)
Νανόφιλτρα (Nanofiltration, NF)
Ευθεία όσμωση (Forward osmosis, FO)
Διύλιση με μεμβράνες (Membrane distillation, MD)
Άλλες μέθοδοι
Πάγωμα (freezing)
Γεωθερμική αφαλάτωση (Geothermal desalination)
Κρυσταλλοποίηση με υδρικό αιθάνιο (Methane hydrate crystallization)
Υψηλής ποιότητας ανακύκλωση νερού (High grade water recycling)
Ηλιακή απόσταξη (Solar Stills)

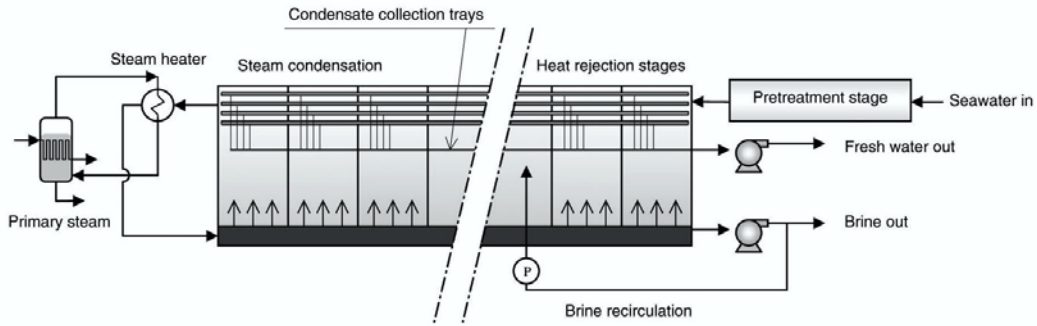
Οι δύο πιο σημαντικές κατηγορίες αφαλάτωσης αφορούν την απόσταξη (Distillation) οι Μέθοδοι με μεμβράνες (Membrane processes). Στην απόσταξη το νερό αλλάζει τουλάχιστον δύο φορές φάση καθώς περνάει από την υγρή στην αέρια φάση και αντίστροφα, μέχρις ότου να συμπυκνωθεί και πάλι σε υγρή μορφή. Στις διεργασίες που χρησιμοποιούν μεμβράνες διαχωρίζεται το νερό από τα άλατα και τις προσμίξεις. Στην συνέχεια αναφέρονται επιγραμματικά οι πιο σημαντικές από τις προαναφερθείσες μεθόδους αφαλάτωσης .

4.3.1 Μέθοδοι αφαλάτωσης με βάση την απόσταξη

4.3.1.1 Απόσταξη πολλαπλής φάσης - Multi stage flash (MSF)

Η απόσταξη πολλαπλής φάσης είναι μια μέθοδος αφαλάτωσης που αποστάζει θαλασσινό νερό ατμοποιώντας αστραπιαία ένα μέρος του σε πολλές βαθμίδες, οι οποίες θα μπορούσαν να θεωρηθούν αναγεννητικοί εναλλάκτες θερμότητας. Αρχικά, το θαλασσινό νερό θερμαίνεται σε ένα δοχείο που ονομάζεται βραστήρας άλμης. Αυτό επιτυγχάνεται συμπυκνώνοντας ατμό σε μια σειρά σωλήνων που μεταφέρουν θαλασσινό νερό διαμέσου του βραστήρα άλμης. Στη συνέχεια, το θερμό νερό μεταφέρεται σε ένα άλλο δοχείο, το οποίο ονομάζεται βαθμίδα, στο οποίο η περιβάλλουσα πίεση είναι χαμηλότερη από τον βραστήρα άλμης. Αυτή η απότομη μετάβαση του θερμού νερού σε χαμηλότερη πίεση προκαλεί τον ταχύτατο βρασμό του και την απότομη μετατροπή του σε ατμό. Κατά κανόνα, μόνο ένα μικρό ποσοστό του νερού μετατρέπεται σε ατμό, οπότε το υπόλοιπο νερό περνάει από μια σειρά πρόσθετων βαθμίδων, κάθε μια εκ των οποίων έχει χαμηλότερη περιβάλλουσα πίεση από την προηγούμενη. Ο ατμός που παράγεται συμπυκνώνεται σε κατάλληλους σωλήνες που υπάρχουν σε κάθε βαθμίδα. Επειδή το κρύο θαλασσινό νερό, εισερχόμενο στην διαδικασία, ρέει κοντά στο αποσταγμένο νερό, με αντίθετη φορά, σχετικά μικρό ποσοστό θερμότητας χάνεται στο περιβάλλον. Το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας προσλαμβάνεται από το θαλασσινό νερό και με αυτό τον τρόπο η ενέργεια ανακυκλώνεται και αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης της διάταξης.

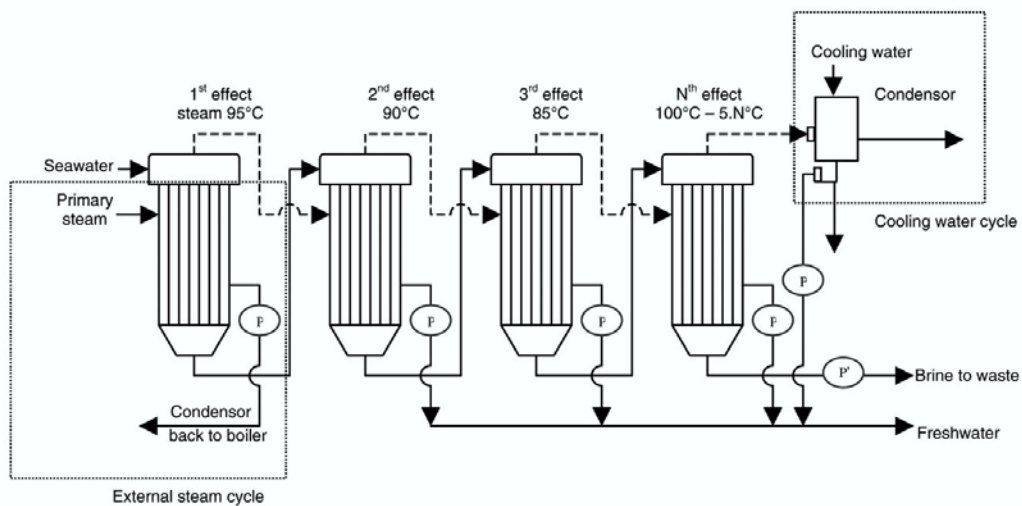
Ένας τρόπος για την θέρμανση του θαλασσινού νερού κατά την διαδικασία της MSF είναι με την χρήση συμπαραγωγής. Η αποβαλλόμενη ενέργεια από ένα εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας χρησιμοποιείται για να παράσχει την απαιτούμενη θερμότητα που χρειάζεται η διαδικασία της αφαλάτωσης, ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνεται και η ψύξη του εργοστασίου παραγωγής ενέργειας χωρίς αυτή η θερμότητα να αποβάλλεται στο περιβάλλον με ζημιολόγο, πιθανώς, τρόπο. Επίσης, κάτι τέτοιο βελτιώνει τα οικονομικά δεδομένα της εγκατάστασης καθώς το κόστος για την ενέργεια είναι το πιο σημαντικό από όλα και η συμπαραγωγή μειώνει την απαιτούμενη ενέργεια κατά 50%-66%.



Εικόνα .11 Αρχή λειτουργίας της MSF^[8]

4.3.1.2 Εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης Multiple effect evaporator (MED/MEE)

Στη μέθοδο της εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης το νερό βράζει σε μια ακολουθία δοχείων, κάθε ένα εκ των οποίων κρατιέται σε χαμηλότερη πίεση από το προηγούμενο. Επειδή το σημείο βρασμού του νερού μειώνεται όσο μειώνεται και η πίεση, ο ατμός που έχει προέλθει από τον βρασμό σε κάθε δοχείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την θέρμανση του επόμενου. Μόνο για την θέρμανση του πρώτου δοχείου απαιτείται εξωτερική πηγή θερμότητας. Παρόλο που θεωρητικά τέτοιες διατάξεις μπορούν να έχουν αυθαίρετα μεγάλο αριθμό βαθμίδων, στην πράξη, η τοποθέτηση πάνω από 4 βαθμίδων δεν προσφέρει κάτι επιπλέον.



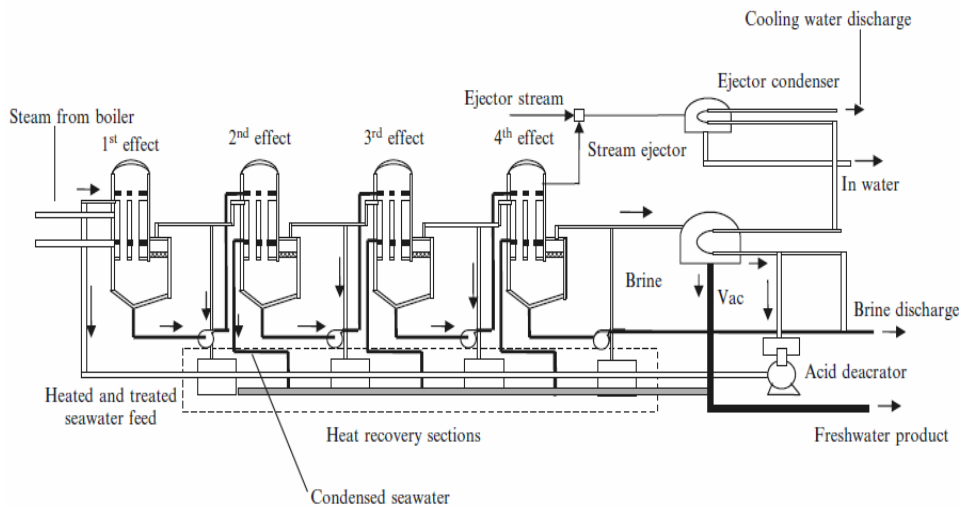
Εικόνα .12 Αρχή λειτουργίας της MED^[8]

4.3.1.3 Συμπύκνωση ατμού (Vapor compression evaporation, VC)

Η μέθοδος της συμπίεσης του ατμού αναφέρεται στη διαδικασία απόσταξης κατά την οποία ο ατμός που εξατμίζεται από το θαλασσινό ή το υφάλμυρο νερό λαμβάνεται από μια διάταξη θερμότητας που το συμπιέζει. Καθώς η συμπίεση του ατμού αυξάνει τόσο την πίεση όσο και τη θερμοκρασία του, είναι εφικτό να χρησιμοποιήσουμε την αποβαλλομένη θερμότητα που προκύπτει από τη συμπίεση για να δημιουργήσουμε επιπλέον ατμό.

Η συμπίεση του ατμού που περιγράφεται παραπάνω μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι με την χρήση ενός συστήματος εκβολής που λειτουργεί με ατμό σε μανομετρική πίεση από εξωτερική πηγή, ώστε να τον ανακυκλώνει κατά την διαδικασία της αφαλάτωσης. Ο δεύτερος τρόπος είναι με την συμπίεση του ατμού μέσω μιας μηχανικής διάταξης, η οποία, τις περισσότερες φορές, λειτουργεί με ηλεκτρισμό. Αυτή η διαδικασία έχει ονομαστεί μηχανική συμπίεση ατμού.

Υπάρχουν δυο εκδοχές της μηχανικής συμπίεσης ατμού. Η μια είναι η συμπίεση ατμού η οποία λαμβάνει χώρα σε μανομετρικές πιέσεις, και η άλλη είναι η συμπίεση ατμού υπό κενό, η οποία πραγματοποιείται σε πολύ χαμηλές ατμοσφαιρικές πιέσεις. Η συμπίεση τροφοδοτείται μηχανικά από διατάξεις που λειτουργούν ως μηχανικές τουρμπίνες. Όπως παράγεται ο ατμός μεταφέρεται, σε ένα συμπυκνωτή όπου εναλλάσσεται θερμότητα και ο ατμός μετατρέπεται και πάλι σε νερό. Το πόσιμο νερό που προκύπτει μεταφέρεται στις δεξαμενές αποθήκευσης, ενώ η θερμότητα χρησιμοποιείται και πάλι σε προηγούμενα στάδια της διαδικασίας. Η διαδικασία της συμπίεσης ατμού υπό κενό είναι η πιο αποδοτική διαδικασία απόσταξης όσο αφορά στην κατανάλωση ενέργειας και τους ρυθμούς παραγωγής πόσιμου νερού. Επίσης, είναι ιδιαίτερα αξιόπιστη και εύκολη στη διαχείριση και στη λειτουργία και πολύ ανθεκτική, οπότε μπορεί να λειτουργήσει ακόμα και υπό αντίξοες συνθήκες.

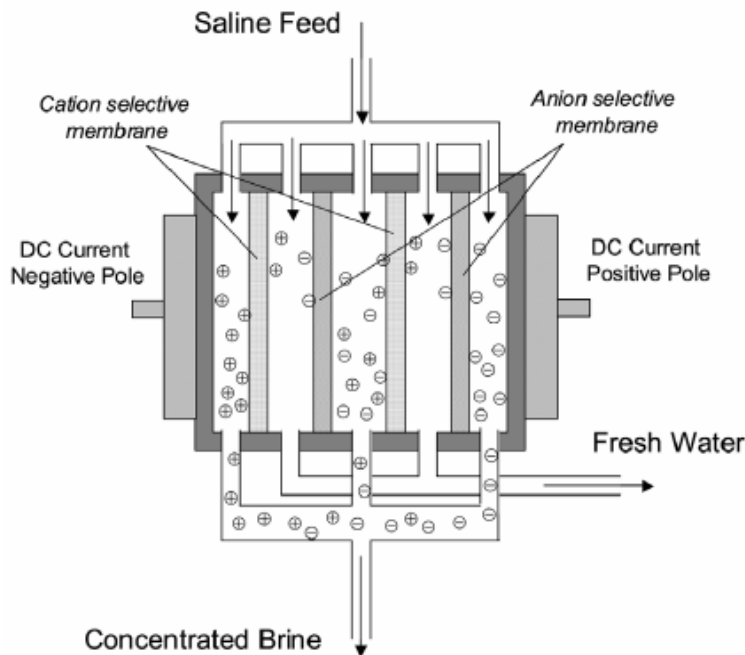


Εικόνα .13 Σχηματική αναπαράσταση μονάδας VC 4 βαθμίδων^[8]

4.3.2 Μέθοδοι αφαλάτωσης με διεργασίες μεμβράνης

4.3.2.1 Ηλεκτρόλυση (Electro dialysis reversal, EDR)

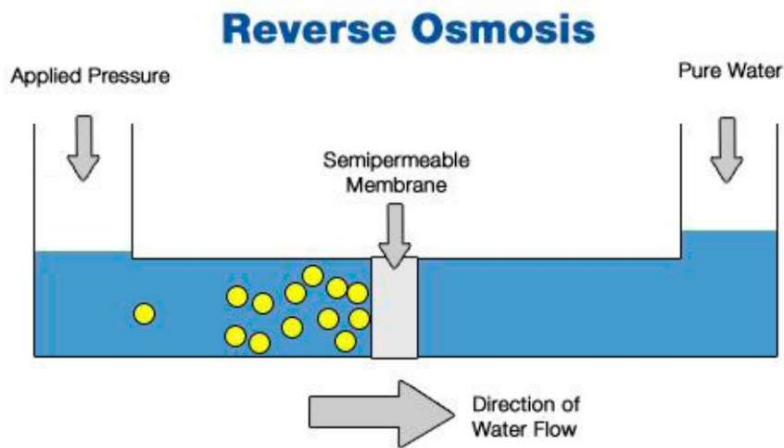
Η αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση είναι μια μέθοδος που εκμεταλλεύεται την οσμωτική ενέργεια, η οποία είναι η ενέργεια που ανακτάται εξαιτίας της διαφοράς στην συγκέντρωση αλατιού μεταξύ του θαλασσινού νερού και του πόσιμου νερού. Για την πραγματοποίηση της μεθόδου ένα διάλυμα που περιέχει άλατα καθώς και μια ποσότητα φρέσκου νερού διοχετεύονται σε μια δέσμη από εναλλασσόμενες μεμβράνες ανόδου και καθόδου. Η διαφορά χημικού δυναμικού μεταξύ του αλατούχου και του πόσιμου νερού δημιουργεί μια διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού μεταξύ κάθε μεμβράνης, ενώ η συνολική τάση που δημιουργείται είναι το άθροισμα όλων των επιμέρους τάσεων που δημιουργούνται. Η μέθοδος αυτή επηρεάζεται μόνο από τη συγκέντρωση των ιόντων και όχι από το ηλεκτρικό πεδίο, γι' αυτό χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην κατάλληλη επιλογή μεμβρανών.



Εικόνα .14 Σχηματική αναπαράσταση διεργασίας ηλεκτροδιάλυσης

4.3.2.2 Αντίστροφη όσμωση

Η διαδικασία της αντίστροφης όσμωσης είναι από τις πιο σημαντικές και πιο ελπιδοφόρες. Η αντίστροφη όσμωση είναι μια διαδικασία διαχωρισμού η οποία χρησιμοποιεί πίεση για να ωθήσει ένα διάλυμα μέσω μιας μεμβράνης η οποία κρατάει τη διαλυμένη ουσία στην μια της πλευρά και επιτρέπει στον καθαρό ,πλέον, διαλύτη να περάσει από την άλλη πλευρά. Με άλλα λόγια, είναι μια διαδικασία που εξαναγκάζει το διαλύτη που βρίσκεται σε μια περιοχή υψηλής συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας να περάσει, μέσα από μια μεμβράνη, σε μια περιοχή όπου η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας είναι πολύ πιο χαμηλή, ασκώντας μια πίεση η οποία είναι πιο μεγάλη από την οσμωτική πίεση. Αυτή είναι η αντίστροφη διαδικασία από την ορθή όσμωση, η οποία είναι η φυσική κίνηση του διαλύτη, μέσω μιας μεμβράνης, από μια περιοχή με χαμηλή συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας σε μια περιοχή με υψηλή συγκέντρωση αυτής, όταν δεν ασκείται καμία εξωτερική πίεση.



Εικόνα .15 Σχηματική αναπαράσταση της αντίστροφης όσμωσης

Η μεμβράνη είναι ημιδιαπερατή και είναι έτσι σχεδιασμένη ώστε να επιτρέπει τη διέλευση του διαλύτη αλλά όχι της διαλυμένης ουσίας και των όποιων προσμίξεων. Οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται για την αντίστροφη όσμωση έχουν πυκνό πλέγμα στο πολυμερές περίβλημα, τους όπου και γίνεται κυρίως ο διαχωρισμός.

Για να γίνει ο διαχωρισμός πρέπει να ασκηθεί υψηλή πίεση στη μεριά της υψηλής συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας, η οποία είναι της τάξης των 2-17bar για υφάλμυρο νερό και 40-70bar για θαλασσινό νερό, το οποίο έχει οσμωτική πίεση 24bar, η οποία και πρέπει να υπερκεραστεί. Στη διαδικασία της αντίστροφης όσμωσης, οι δυνάμεις που επηρεάζουν την κίνηση του νερού είναι δύο. Η πρώτη είναι η δύναμη λόγω της οσμωτικής πίεσης που αναγκάζει το διαλύτη να κινηθεί από την περιοχή με χαμηλή συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στην περιοχή με την υψηλή συγκέντρωση αυτής. Η δεύτερη είναι αντίθετη στην πρώτη, προκαλεί αντίθετη κίνηση του νερού και οφείλεται στην πίεση που επιβάλλεται εξωτερικά. Ο σκοπός είναι να υπερσχύσει η δεύτερη δύναμη, ώστε να προκύψει διαλύτης, δηλαδή νερό, απαλλαγμένος από τη διαλυμένη ουσία, δηλαδή άλατα και προσμίξεις, και να επιτευχθεί η διαδικασία της αφαλάτωσης. Αυτός είναι άλλωστε και ο λόγος για τον οποίο η πίεση που επιβάλλεται εξωτερικά πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την οσμωτική πίεση του διαλύματος.

Ένα από τα πλεονεκτήματα της αντίστροφης όσμωσης, το οποίο είναι πολύ σημαντικό για την επιλογή της για την αφαλάτωση, είναι ότι είναι από τις λιγότερο ενεργοβόρες μεθόδους, γεγονός το οποίο κάνει το κόστος παραγωγής του νερού ακόμα πιο χαμηλό.

4.3.2.3 Νανόφιλτρα (Nanofiltration, NF)

Μια άλλη διεργασία μεμβράνης για την παραγωγή πόσιμου νερού από αλμυρό ή υφάλμυρο νερό είναι η διεργασία του νανοφιλτραρίσματος. Είναι μια σχετικά καινούργια μέθοδος η οποία και εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου υπάρχει νερό με μικρό ποσοστό διαλυμένων ουσιών, όπως σε επιφανειακά ύδατα ή σε κινούμενο υπόγειο νερό. Αυτό επιτυγχάνεται με την αφαίρεση των φυσικών και των συνθετικών οργανικών στοιχείων που έχουν μολύνει το νερό. Αυτή η μέθοδος συχνά εφαρμόζεται σε συνδυασμό με την αντίστροφη όσμωση. Σε πειράματα όμως που έγιναν, αποδείχθηκε ότι η αφαλάτωση που γινόταν με αυτό τον τρόπο αφαιρούσε μεν τις διαλυμένες ουσίες που έπρεπε, ώστε να μειωθεί η συγκέντρωση των αλάτων και να γίνει το νερό πόσιμο, όμως, ταυτόχρονα, χανόταν και πλήθος θρεπτικών συστατικών, όπως ασβέστιο και ιόντα μαγνησίου, με αποτέλεσμα η συγκέντρωσή τους να έπεφτε κάτω από τα επιτρεπτά όρια που θέτει ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας. Έτσι έπρεπε στη συνέχεια να προστεθούν ξανά όλα τα θρεπτικά στοιχεία του νερού που χάθηκαν. Παρόλα αυτά, το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν έχει ιδιαίτερες οικονομικές απαιτήσεις οπότε καθίσταται συμφέρουσα για αναπτυσσόμενες χώρες που έχουν αυξημένες ανάγκες για φθινό νερό σε μεγάλες ποσότητες. Βέβαια, υπάρχουν ενδοιασμοί για το κατά πόσο θα μπορέσουν αυτές οι χώρες να παράγουν και να διαχειριστούν την απαιτούμενη τεχνολογία.

4.4 Άλλες μέθοδοι αφαλάτωσης

4.4.1 Πάγωμα (freezing)

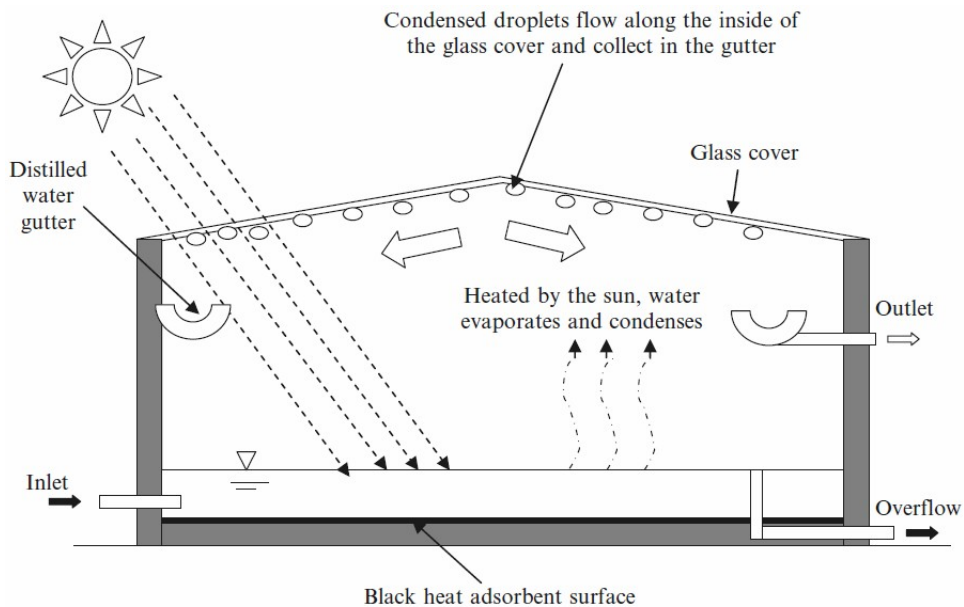
Η αφαλάτωση μπορεί να επιτευχθεί και με τη μέθοδο της στερεοποίησης ή αλλιώς του παγώματος (freezing) των διαφόρων μιγμάτων νερού. Αυτή η μέθοδος έχει αρκετά μειονεκτήματα και τεχνικά προβλήματα τα οποία έχουν εμποδίσει, ως τώρα, την περαιτέρω ανάπτυξη της.

4.4.2 Γεωθερμική αφαλάτωση (Geothermal desalination)

Μια πρωτοπόρα και υπό διερεύνηση μέθοδος αφαλάτωσης είναι η γεωθερμική αφαλάτωση (Geothermal desalination). Αυτή εκμεταλλεύεται τη θερμότητα που προέρχεται από τη γη για την παραγωγή ποσίου νερού. Τα διαβεβαιωμένα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι είναι πιο εύκολη στη χρήση και στη διαχείριση από την αντίστροφη όσμωση και ότι η ενέργεια που προέρχεται από την γεωθερμική θερμότητα είναι από τις πιο φιλικές προς το περιβάλλον μορφές ενέργειας. Οι σχετικές έρευνες είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο αλλά έχουν δείξει ότι με νερό θερμοκρασίας περίπου 100 βαθμών Κελσίου και μια πηγή ψύξης, η μελετώμενη διαδικασία εξάτμισης και συμπύκνωσης μπορεί να λειτουργήσει αρκούντως ικανοποιητικά.

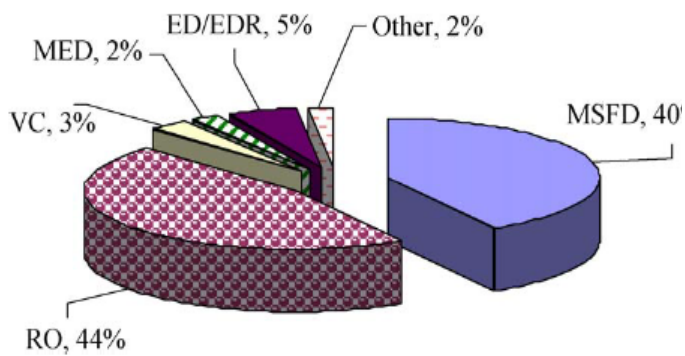
4.4.3 Ηλιακή απόσταξη (Solar Stills)

Η μέθοδος που χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια στην αφαλάτωση, βασίζεται στη αρχή του θερμοκηπίου. Οι εγκαταστάσεις αυτές έχουν ελάχιστο ή μηδενικό κόστος λειτουργίας εφόσον δεν χρησιμοποιούν κανενός είδους καύσιμο, και ως εκ τούτου δεν ρυπαίνουν καθόλου το περιβάλλον: οι ακτίνες του ήλιου διέρχονται μέσα από μια διαφανή οροφή και θερμαίνουν το αλμυρό νερό που βρίσκεται στον πυθμένα. Αυτό εξατμίζεται και ανεβαίνει στην οροφή που είναι κεκλιμένη, οπότε συμπυκνώνεται πάλι και συλλέγεται ως προϊόν από κατάλληλη διάταξη. Η μέγιστη θερμοκρασία ενός τέτοιου θερμοκηπίου φτάνει περίπου τους 45 – 55 °C το καλοκαίρι.



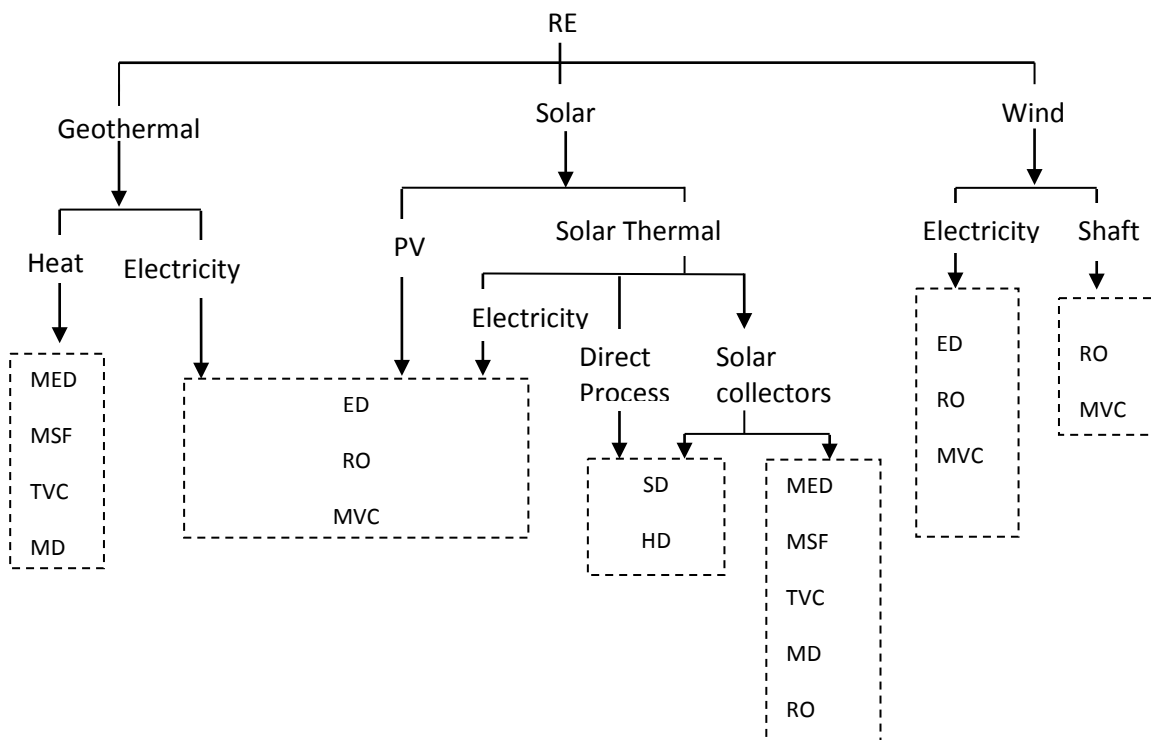
Εικόνα. 16 Σχηματική αναπαράσταση μονάδας ηλιακής απόσταξης^[3]

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται επιμερισμός σε ποσοστά σε παγκόσμια κλίμακα μεθόδων αφαλάτωσης



Γράφημα. 3 Παγκόσμια κατανομή των μεθόδων αφαλάτωσης^[4]

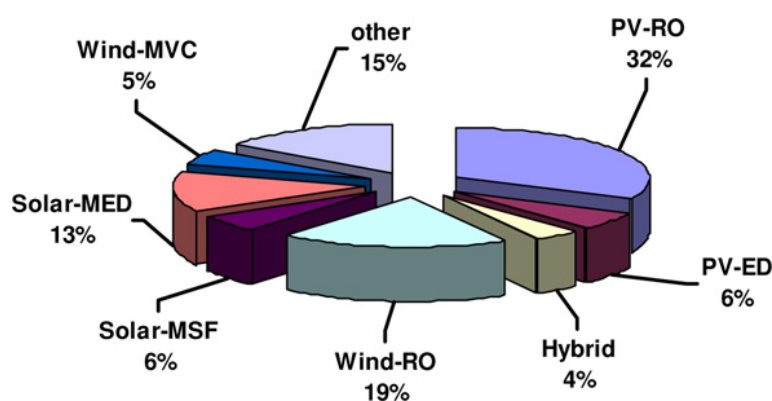
Αφαλάτωση με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας



Εικόνα.17 Συνδυασμοί ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με μεθόδους αφαλάτωσης^[4]

Η επιλογή του κατάλληλου τρόπου αφαλάτωσης με χρήση των ΑΠΕ εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Αυτές περιλαμβάνουν, το μέγεθος της εγκατάστασης, την αλατότητα του νερού, την απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο, τις τεχνικές υποδομές και το δυναμικό της ανανεώσιμης πηγής ενέργειας. Ωστόσο, η εφαρμογή τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό στην τοπική διαθεσιμότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη ποιότητα του νερό προς αφαλάτωση. Εκτός αυτού, ορισμένοι συνδυασμοί είναι πιο κατάλληλοι για μεγάλες σε μέγεθος εγκαταστάσεις, ενώ κάποιοι άλλοι πιο κατάλληλοι για εφαρμογές μικρής κλίμακας. Ο πιο δημοφιλής συνδυασμός των τεχνολογιών είναι η ΜΕΒ με τους ηλιακούς συλλέκτες και αντίστροφης ώσμωσης με φωτοβολταϊκά. Τα φωτοβολταϊκά είναι ιδιαίτερα καλά για μικρές εφαρμογές σε ηλιόλουστες περιοχές. Για μεγάλες μονάδες, η αιολική ενέργεια μπορεί να είναι κάτι πιο ελκυστικό, δεδομένου ότι δεν απαιτεί για την εκμετάλλευση της μεγάλες εκτάσεις. Μέθοδοι με χρήση αιολικού δυναμικού χρησιμοποιούνται συχνά σε νησιά, όπου υπάρχει ένα καλό αιολικό δυναμικό και συχνά πολύ περιορισμένες εκτάσεις για

εκμετάλλευση. Μέθοδοι με απόσταξη, απαιτούν μεγάλες μονάδες λόγω της σχετικά υψηλών απωλειών θερμότητας που έχουν οι μικρές μονάδες. Σημαντικός επίσης παράγοντας τα κόστος παραγωγής του αφαλατωμένου νερού. Λαμβάνοντας υπόψη τους στόχους προστασίας του κλίματος και ισχυρές περιβαλλοντικές ανησυχίες, το μέλλον της αφαλάτωση νερού σε όλο τον κόσμο θα πρέπει να είναι πλήρως συνυφασμένο με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και δυνητικά αυτά τα συστήματα αφαλάτωσης να έχουν οικονομικό κόστος. Στο Γράφημα 4 παρουσιάζεται η κατανομή παγκοσμίως των διαφόρων μεθόδων αφαλάτωσης και των συνδυασμών τους με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.



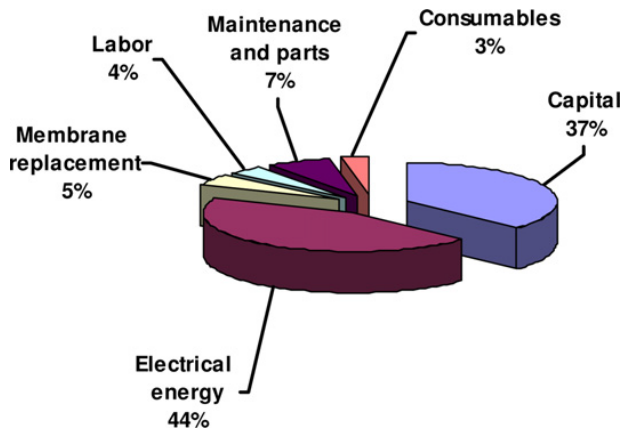
Γράφημα. 4 Κατανομή παγκοσμίως των διαφόρων μεθόδων αφαλάτωσης και των συνδυασμών τους με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας^{9]}

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά κόστη για κάθε μέθοδο αφαλάτωσης.

Πίνακας.7 Μέθοδοι αφαλάτωσης και κόστος παραγόμενου νερού (ανά m ³) ^[5]		
Desalination method	Size of plant (m ³ /day)	Cost (per m ³)
MED	< 100	2€- 8€
	12,000-55,000	0.76€-1.56€
	>91,000	0.42€-0.81€
MSF	23 ,000-528,000	0.42€-1.40€
VC	1000-1200	1.61€-2.13€

Ειδικότερα για τη μέθοδο της αντίστροφης όσμωσης με την οποία και θα ασχοληθούμε το κόστος σε ευρώ ανά κυβικό μέτρο παραγόμενου νερού φαίνεται στον Πίνακα 8 . Στο Γράφημα 5 παρουσιάζεται ο επιμερισμός του κόστους μιας τέτοιας μονάδας.

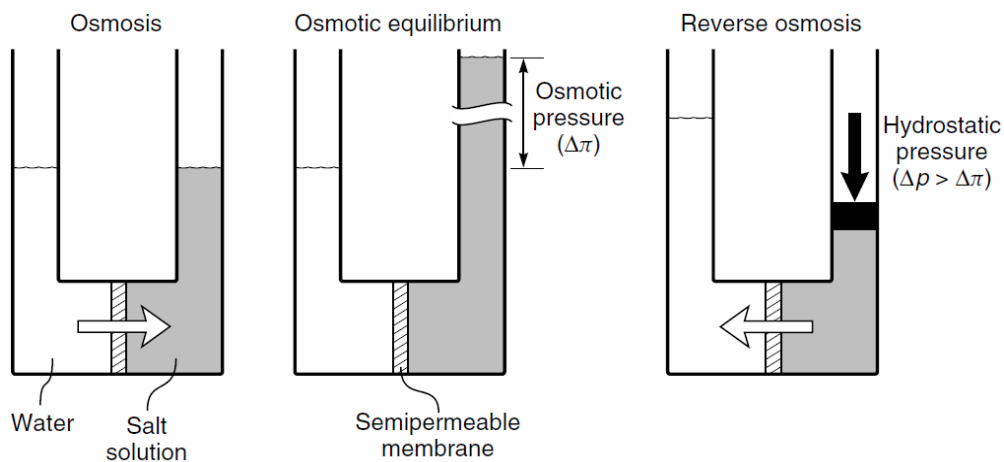
Πίνακας.8 RO μέθοδος και κόστος παραγόμενου νερού (ανά m ³) ^[5]		
Type of feed water	Size of plant (m ³ /day)	Cost (per m ³)
Brackish	< 20	4.50€- 10.32€
	20-1200	0.62€-1.06€
	40,000-46,000	0.21€-0.431€
Seawater	<100	1.20€-15.00€
	250-1000	1.00€-3.14€
	1000-4800	0.56€-1.38€
	15,000-60,000	0.38€-1.30€
	100,000-320,000	0.36€-1.30€



Γράφημα. 5 Η κατανομή του κόστους μιας μονάδας RO^[9]

4.5 Αντίστροφη όσμωση – γενικά στοιχεία

Η διεργασία της αντίστροφης όσμωσης είναι συνέπεια της εφαρμογής μιας εξωτερικής πίεσης, μεγαλύτερης της οσμωτικής, σε ένα πυκνό διάλυμα το οποίο διαχωρίζεται από ένα αραιότερο διάλυμα με μία ημιπερατή μεμβράνη.



Εικόνα . 18 Σχηματική απεικόνιση της αντίστροφης όσμωσης^[10]

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, παρατηρείται διάχυση νερού από τον θάλαμο μικρότερης συγκέντρωσης στο θάλαμο μεγαλύτερης συγκέντρωσης, μέσω της μεμβράνης, λόγω της διαφοράς χημικού δυναμικού στις δύο πλευρές της. Η κινητικότητα των μορίων του νερού στη διεπιφάνεια νερού – μεμβράνης είναι μεγαλύτερη από αυτή των αλάτων, με αποτέλεσμα τα άλατα να απορρίπτονται από

την μεμβράνη και να παραμένουν στο θάλαμο με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση. Το καθαρό νερό που διαχέεται μέσα από την μεμβράνη ελαττώνει την πίεση και αυξάνει την συγκέντρωση των αλάτων του καθαρού νερού, ενώ συγχρόνως αραιώνει το πυκνότερο διάλυμα (αλμυρό νερό) και αυξάνει την πίεση στο αντίστοιχο θάλαμο. Η αύξηση αυτή εμφανίζεται ως υδροστατική διαφορά της στάθμης των δύο διαλυμάτων. Η αύξηση αυτή της υδροστατικής πίεσης έχει ως συνέπεια την βαθμιαία ελάττωση της ροής του νερού. Σε κάποιο σημείο της διεργασίας, η αύξηση της υδροστατικής πίεσης αντισταθμίζει τη ροή και αποκαθίσταται μια κινητική ισορροπία, όπου το νερό ρέει και προς τις δύο κατευθύνσεις με τον ίδιο ρυθμό. Στο σημείο ισορροπίας, η υδροστατική διαφορά πίεσης ονομάζεται οσμωτική πίεση ($\Delta\P$) και το φαινόμενο συνολικά καλείται όσμωση.

Εάν εφαρμοστεί μια εξωτερική πίεση (ΔP) στην επιφάνεια του αλμυρού νερού, μεγαλύτερη της οσμωτικής, το φαινόμενο της όσμωσης αντιστρέφεται και τα μόρια του νερού διαχέονται από το θάλαμο υψηλής συγκέντρωσης προς το θάλαμο χαμηλής συγκέντρωσης. Η ταχύτητα ροής του νερού είναι ανάλογη με την κινούσα δύναμη της αντιστροφής, δηλαδή τη διαφορά $\Delta P - \Delta\P$.

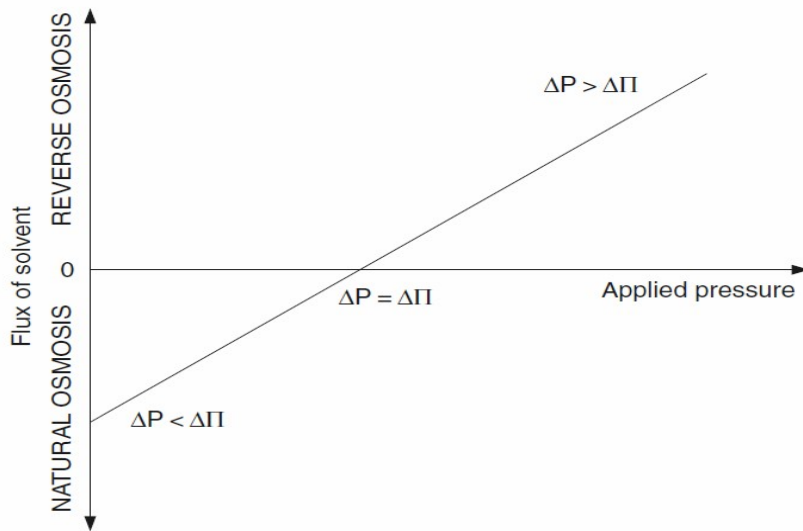
Για παράδειγμα, θαλασσινό νερό αλμυρότητας 35.000 ppm έχει οσμωτική πίεση 27.5 bar, ενώ στα 43.000 ppm η πίεση ανέρχεται στα 33.3 bar, σε θερμοκρασία 25 °C.

Η αριθμητική τιμή της οσμωτικής πίεσης είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης του νερού σε άλατα και της θερμοκρασίας του, και είναι ανεξάρτητη από τη μεμβράνη.

Περιγράφεται μαθηματικά από την παρακάτω εξίσωση, που καθιέρωσε ο Van't Hoff:

$$\Pi = RT \sum_i v_i c_i$$

- R = παγκόσμια σταθερά αερίων (8.3144 J/ mol · K)
- T = θερμοκρασία σε Kelvin
- v_i = συντελεστής Van't Hoff του i ιόντος
- c_i = συγκέντρωση του i ιόντος



Σχήμα.1 Ροή ενός διαλύτη δια μέσω ημιπερατής μεμβράνης ως συνάρτηση της ασκούμενης πίεσης^[6]

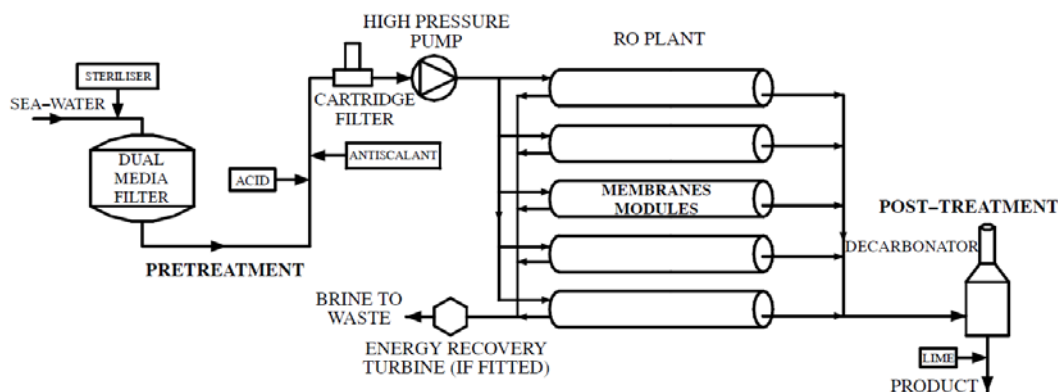
4.5.1 Περιγραφή της διεργασίας αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση

Η αφαλάτωση με αντίστροφη όσμωση, όπως έχει αναφερθεί, μπορεί να εφαρμοστεί είτε σε θαλασσινό, είτε σε υφάλμυρο νερό με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η περίπτωση του θαλασσινού νερού ως πρώτη ύλη, αποτελεί εξαιρετικής σημασίας περίπτωση, διότι όπως είναι γνωστό, τα μεγαλύτερο μέρος των υδατικών αποθεμάτων του πλανήτη βρίσκεται σε μορφή αλμυρού νερού στις θάλασσες. Η αξιοποίηση αυτού λοιπόν, του δυναμικού αποτελεί άμεσο στόχο για να λυθούν τα προβλήματα λειψυδρίας, σε περιοχές που βρέχονται από θάλασσα και δεν έχουν πρόσβαση σε γλυκό νερό ή είναι ασύμφορη η μεταφορά του εκεί.

Οι μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με αντίστροφη όσμωση ακολουθούν μια πορεία λειτουργίας, η οποία μπορεί να χωριστεί σύμφωνα με τη σειρά των σταδίων που την αποτελούν. Συνοπτικά λοιπόν έχουμε:

- Τροφοδοσία θαλασσινού νερού
- Προκατεργασία νερού τροφοδότησης
- Συμπίεση προκατεργασμένου νερού τροφοδότησης σε αντλία υψηλής πίεσης
- Αφαλάτωση του νερού σε μονάδα αντίστροφης όσμωσης

- Ανάκτηση ενέργειας μέσω απόρριψης της άλμης
- Τελική κατεργασία του αφαλατωμένου νερού
- Απόρριψη του υπολείμματος (άλμης)



Εικόνα .19 Σχηματική απεικόνιση διάταξης μονάδας αφαλάτωσης RO⁷¹

Τροφοδοσία θαλασσινού νερού

Οι εγκαταστάσεις άντλησης του θαλασσινού νερού αποτελούν το πρώτο βασικό σημείο της εγκατάστασης, διότι πρέπει να εξασφαλίζεται η συνεχής και επαρκής τροφοδοσία θαλασσινού νερού στη μονάδα. Υπάρχουν δύο διαμορφώσεις στις εγκαταστάσεις τροφοδοσίας:

- Η επιφανειακή άντληση
- Η υπόγεια άντληση από πηγάδι (φρέαρ)

Η επιλογή γίνεται ανάλογα με τη δυναμικότητα της μονάδας και τη θέση της ως προς τη θάλασσα.

Προκατεργασία νερού τροφοδότησης

Το θαλασσινό νερό που χρησιμοποιείται στην αφαλάτωση, περιέχει πλήθος συστατικών, που πρέπει να απομακρυνθούν πλήρως ή να μειωθεί δραστικά ο αριθμός τους, ώστε να καταστεί δυνατή η διεργασία της αντίστροφης όσμωσης.

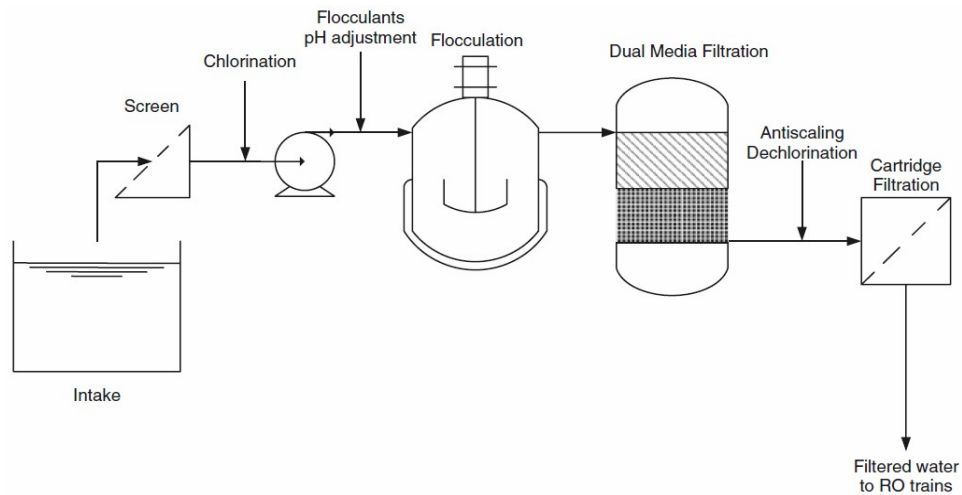
Πέραν των αλάτων, περιέχονται διάφορα αιωρούμενα συστατικά, κολλοειδείς ουσίες και μικροοργανισμοί, όπου η παρουσία τους ρυπαίνει και αποσθρώνει τις μεμβράνες, ελαττώνοντας έτσι την απόδοση της εγκατάστασης και το χρόνο ζωής των μεμβρανών.

Ειδικότερα παρουσιάζονται προβλήματα όπως:

- Επιθέματα (scaling) στην επιφάνεια των μεμβρανών από υπέρβαση του ορίου διαλυτότητας ή λόγω σχηματισμού αδιάλυτων αλάτων εξαιτίας τοπικών αντιδράσεων.
- Επικάθιση στην επιφάνεια της μεμβράνης κολλοειδών συστατικών
- Προσρόφηση από τις πολυμερείς ομάδες της μεμβράνης, διαφόρων μακρομορίων που περιέχονται στο νερό και σχηματισμός λεπτού στρώματος ζελατινοειδούς μορφής
- Απόφραξη των καναλιών κυκλοφορίας της άλμης, από τα λεπτά αιωρούμενα σωματίδια.

Συνεπώς, είναι απαραίτητο το στάδιο της προκατεργασίας του νερού τροφοδότησης, ώστε να αποφευχθούν τα προαναφερθέντα προβλήματα. Μια συνήθης αντιμετώπιση του προβλήματος περιέχει τα παρακάτω στάδια:

- Διαχωρισμός σωματιδίων μεγάλου μεγέθους (> 10mm) με στατικά κόσκινα/σχάρες (screens)
- Προσθήκη χλωρίου (chlorination), κροκιδωτικών μέσων (flocculation agents), και οξέως για τη ρύθμιση του pH (acid addition)
- Πήξη/κροκίδωση (coagulation/flocculation)
- Φιλτράρισμα μέσω φίλτρων άμμου και φίλτρων διπλού μέσου άμμου - ανθρακίτη (slow sand filters/dual media sand – anthracite filters)
- Αποχλωρίωση / καθαρισμός επικαθίσεων (dechlorination/antiscalants)
- Φιλτράρισμα σωματιδίων μεγέθους 5-10 μm μέσω φίλτρων τύπου cartridge (cartridge filters)



Εικόνα .20 Διάγραμμα ροής προκατεργασίας θαλασσινού νερού^[6]

Μεταφορά προκατεργασμένου νερού μέσω αντλιών υψηλής πίεσης

Μετά την ολοκλήρωση της προκατεργασίας, το νερό τροφοδότησης περνά από τις αντλίες υψηλής πίεσης, όπου αυξάνεται η πίεσή του στο βαθμό που απαιτείται από τη διεργασία. Η πίεση μετά το στάδιο αυτό κυμαίνεται συνήθως στα 55 – 85 bar, όμως η τιμή αυτή καθορίζεται από την περιεκτικότητα σε άλατα του νερό τροφοδότησης και τη διαμόρφωση της μονάδας αφαλάτωσης.

Αφαλάτωση του νερού σε μονάδα αντίστροφης όσμωσης

Τα στοιχεία μεμβρανών (modules) αποτελούν την καρδιά της μονάδας αφαλάτωσης, διότι εκεί επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός νερού και αλάτων. Τα βασικά δομικά στοιχεία ενός στοιχείου μεμβρανών είναι:

- Οι μεμβράνες διαχωρισμού
- Το δοχείο πίεσης (pressure vessel) με τον βοηθητικό εξοπλισμό

Ο σχεδιασμός των στοιχείων είναι κατάλληλος, ώστε το υψηλής πίεσης προκατεργασμένο νερό τροφοδοσίας να μεταφέρεται στην επιφάνεια της μεμβράνης, όπου εκεί γίνεται ο διαχωρισμός, και στη συνέχεια να συλλέγεται το αφαλατωμένο

νερό (permeate) ξεχωριστά από το απορριπτόμενο ρεύμα της άλμης (retentate/concentrate).

Το σημαντικότερο μέρος ενός στοιχείου, όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, αποτελούν οι μεμβράνες διαχωρισμού. Υπάρχει μια σχετικά μεγάλη ποικιλία σε είδη μεμβρανών σήμερα, όμως οι κυριότερες μεμβράνες που χρησιμοποιούνται στην αντίστροφη όσμωση περιορίζονται σε 2-3 κατηγορίες.

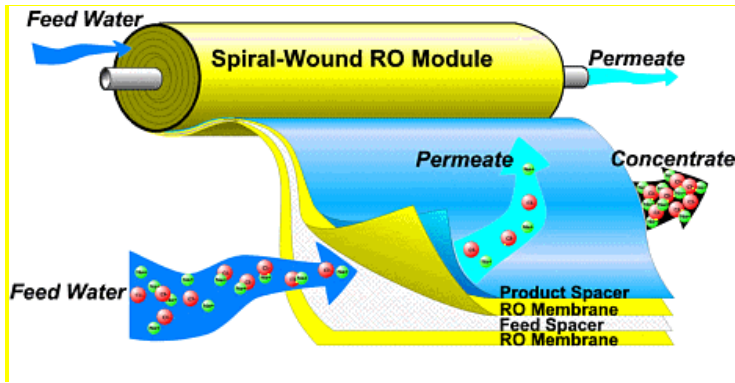
Μεμβράνες διαχωρισμού

Οι μεμβράνες διαχωρισμού αποτελούν ουσιαστικά μια λεπτή πολυμερική διεπιφάνεια επαφής, που καθορίζει τη διέλευση των χημικών ειδών με τα οποία βρίσκεται σε επαφή. Μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως προς μορφολογία τους σε:

- Πυκνής δομής
- Πορώδους δομής, με δύο υποκατηγορίες:
 - Συμμετρικές
 - Ασύμμετρες (ανισοτροπικές)
- Σύνθετες λεπτού υμενίου

Στην περίπτωση της αντίστροφης όσμωσης οι μεμβράνες, που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι κυρίως 3 τύπων:

- Μεμβράνες οξεικής κυτταρίνης (cellulose acetate membranes – CA)
- Μεμβράνες αρωματικών πολυαμιδίων (aromatic polyamide membranes - PA)
- Σύνθετες μεμβράνες λεπτού υμενίου (thin film composite membranes –TFC)



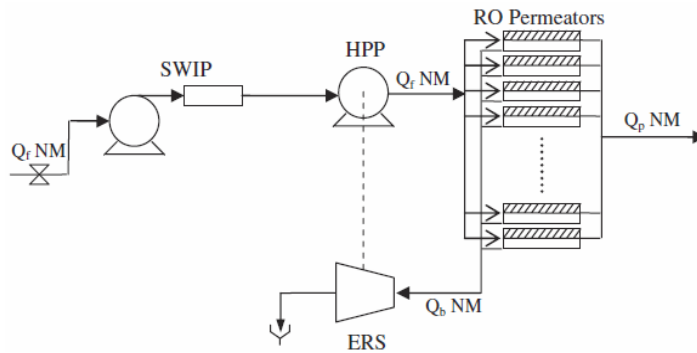
Εικόνα .21 Η λειτουργία μιας RO μεμβράνης

Διαμόρφωση μονάδας αφαλάτωσης

Τα στοιχεία μεμβράνης, εκτός της περίπτωσης των στοιχείων με δίσκους και πλαίσια, τοποθετούνται παράλληλα, σε σειρά ή σε συνδυασμό, ώστε να δημιουργηθεί μια διαμόρφωση κατάλληλη για τη αποτελεσματικότητα της διεργασίας. Η διαμόρφωση επιλέγεται ανάλογα με τις συνθήκες του νερού τροφοδοσίας και κυρίως ανάλογα με τις απαιτήσεις για το αφαλατωμένο νερό σε άλατα, βόριο, χλώριο κλπ. Οι πιο συνήθεις διαμορφώσεις που συναντώνται στην πράξη είναι:

Διαμόρφωση μονού σταδίου

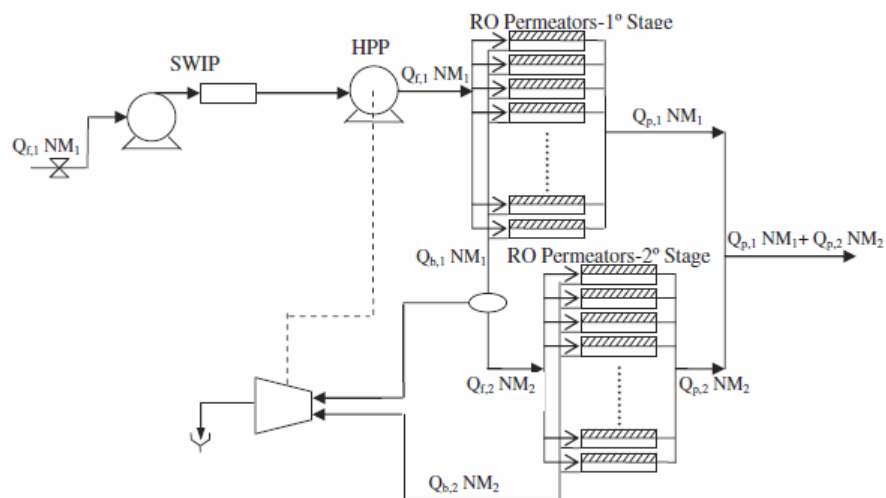
Στην περίπτωση αυτή τα στοιχεία (modules) τοποθετούνται παράλληλα με κοινή είσοδο και έξοδο. Υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα ανακυκλοφορίας της άλμης για μεγαλύτερη ανάκτηση. Είναι πολύ δημοφιλής διαμόρφωση, καθώς χρησιμοποιείται από πολλές μικρές και μεσαίες μονάδες παγκοσμίως. Η ανάκτηση που επιτυγχάνουν (αφαλατωμένο νερό /συνολική τροφοδοσία) κυμαίνεται μεταξύ 15 – 40 τοις εκατό. Η μέγιστη δυνατή ποιότητα νερού που παράγουν είναι ως 200ppm άλατα (TDS), 100ppm χλώριο και 0.5ppm βόριο, που είναι μέσα στα αποδεκτά όρια για χρήση από τον άνθρωπο.



Εικόνα .22 Διαμόρφωση μονού σταδίου⁽¹⁾

Διαμόρφωση πολλαπλών σταδίων

Στην περίπτωση αυτή τα στοιχεία (modules) τοποθετούνται σε σειρά ανά στάδια. Δηλαδή, η είσοδος του επόμενου σταδίου είναι είτε το αφαλατωμένο νερό του προηγούμενου, είτε η απορριπτόμενη άλμη. Συνήθως, χρησιμοποιούνται δύο στάδια και σε λίγες περιπτώσεις τρία και περισσότερα. Η διαμόρφωση αυτή επιλέγεται όταν υπάρχει ανάγκη για νερό υψηλής καθαρότητας ή μεγάλη ανάκτηση προϊόντος. Λόγω της ύπαρξης περισσότερων του ενός σταδίων, η ανάκτηση που επιτυγχάνεται κυμαίνεται μεταξύ 60 – 85 τοις εκατό, ανάλογα με τον αριθμό των σταδίων. Το μειονέκτημα αυτών των διαμορφώσεων είναι το υψηλότερο κόστος και η μεγάλη πολυπλοκότητα των εγκαταστάσεων σε σχέση με την περίπτωση μονού σταδίου.



Εικόνα .23 Διαμόρφωση δύο σταδίων⁽¹⁾

4.5.2 Ανάκτηση ενέργειας μέσω απόρριψης της άλμης

Η αφαλάτωση θαλασσινού νερού αποτελεί μια διεργασία υψηλής έντασης ενέργειας. Η κατανάλωση ενέργειας από την αντλία υψηλής πίεσης για τη μεταφορά του προκατεργασμένου νερού, συνεισφέρει σχεδόν κατά 80 τοις εκατό στο συνολικό ποσό ενέργειας που απαιτείται, και εν τέλει στο ενεργειακό κόστος της μονάδας. Συνεπώς, είναι φανερό η ανάγκη για λήψη μέτρων ενεργειακής εξοικονόμησης.

Οι μεθοδολογίες εξοικονόμησης ενέργειας στρέφονται κυρίως στην ανάκτηση ενέργειας από το απορριπτόμενο ρεύμα της άλμης. Στην περίπτωση αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με μέσο όρο μετατροπής 15-40 τοις εκατό, η πίεση λειτουργίας κυμαίνεται συνήθως στα 55 – 70bar, οπότε και η πίεση της εξερχόμενης άλμης κυμαίνεται μεταξύ

50 – 65bar. Το δυναμικό αυτό, λοιπόν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειώσει τις ενεργειακές ανάγκες της εγκατάστασης, κυρίως μέσω υποβοήθησης της αντλίας υψηλής πίεσης.

Τα συστήματα ανάκτησης ενέργεια (Energy Recovery Systems –ERS) κατηγοριοποιούνται, ως προς την διάταξη εξοικονόμησης που χρησιμοποιείται, σε :

Συστήματα ανάκτησης υδραυλικής ενέργειας (hydraulic energy recovery systems)

- Υδροστρόβιλοι Pelton (Pelton wheel turbines)
- Φυγοκεντρικές αντλίες αντίστροφης λειτουργίας (reverse running centrifugal pumps)

Συστήματα άμεσης ανάκτησης ενέργειας / ισοβαρή συστήματα ανάκτησης (direct energy recovery systems / isobaric systems)

- Εναλλάκτες πίεσης (έργου) (pressure/work exchangers)

Υδροστρόβιλοι Pelton (Pelton wheel turbines)

Οι υδροστρόβιλοι Pelton αποτελούν ένα δοκιμασμένο σύστημα ανάκτησης ενέργειας, με πάνω από 30 χρόνια επιτυχούς εφαρμογής. Η λειτουργία του βασίζεται στον τροχό

Pelton (Pelton wheel), όπου οδηγείται το ρεύμα της άλμης και κινεί τον άξονα που είναι προσαρμοσμένος στη διάταξη. Ο άξονας αυτός είναι άμεσα συνδεδεμένος με τον κινητήρα της αντλίας υψηλής πίεσης, ώστε να μειώνει το φορτίο της αντλίας και να εξοικονομεί ενέργεια.

Το βασικό μειονέκτημα της διάταξης αυτής είναι οι διπλές απώλειες που υπάρχουν κατά τη μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική (περιστροφική) και εκ νέου σε υδραυλική. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η απόδοση της διάταξης να κυμαίνεται γύρω στο 80 τοις εκατό.

Φυγοκεντρικές αντλίες αντίστροφης λειτουργίας (reverse running centrifugal pumps)

Οι φυγοκεντρικές αντλίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως στρόβιλοι ανάκτησης υδραυλικής ενέργειας (hydraulic energy recovery turbines), εάν αντιστραφεί η ροή εισόδου και η περιστροφή της φτερωτής. Λειτουργούν κατά τον ίδιο τρόπο με τους υδροστρόβιλους Pelton, μεταφέρουν δηλαδή μέσω άξονα στην αντλία υψηλής πίεσης την ενέργεια που ανακτούν. Αποτελούν δημοφιλή συστήματα με ευρεία χρήση σε παλιότερες μονάδες αφαλάτωσης.

Παρουσιάζουν το ίδιο μειονέκτημα με τους υδροστρόβιλους Pelton, δηλαδή τη μειωμένη απόδοση λόγω διπλής μετατροπής της ενέργειας. Η απόδοση της διάταξης κυμαίνεται γύρω στο 75 - 80 τοις εκατό για τις σύγχρονες εφαρμογές

Εναλλάκτες πίεσης (έργου) (pressure/work exchangers)

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990 άρχισε να χρησιμοποιείται ένα νέο σύστημα για ανάκτηση ενέργειας σε μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού αντίστροφης όσμωσης. Το σύστημα αυτό ονομάζεται εναλλάκτης πίεσης και λειτουργεί ως αντλία θετικής εκτοπίσεως. Η σημαντική του διαφορά από τα προηγούμενα συστήματα είναι ότι δεν είναι συνδεδεμένο με την αντλία υψηλής πίεσης, αλλά λειτουργεί παράλληλα με αυτή. Έτσι, επιτυγχάνει βαθμό απόδοσης κοντά στο 95 τοις εκατό.

Η διάταξη αποτελείται από ένα πλαστικό δοχείο πίεσης, στο οποίο βρίσκεται ένα κεραμικός σωλήνας και μέσα του, ένας κεραμικός ρότορας, ο οποίος περιστρέφεται πάνω σε ένα λεπτό υμένιο νερού. Με την είσοδο στη διάταξη της άλμης υψηλής πίεσης, ο ρότορας περιστρέφεται και εκτοπίζει το θαλασσινό νερό υπό υψηλή πίεση

και απορρίπτει την άλμη σε χαμηλότερη πίεση. Το θαλασσινό νερό υψηλής πίεσης διοχετεύεται σε μια βοηθητική αντλία, η οποία το μεταφέρει στην εγκατάσταση.

Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή ανάκτηση ενέργειας, και επίσης μειώνεται η απαιτούμενη δυναμικότητα της αντλίας υψηλής πίεσης. Τα μειονεκτήματα που έχουν αυτές οι διατάξεις είναι το υψηλό αρχικό κόστος και την αύξηση κατά 1 – 2 τοις εκατό της αλμυρότητας του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας, λόγω ανάμειξής του με το ρεύμα της άλμης.

4.5.3 Τελική κατεργασία του αφαλατωμένου νερού

Η ποιότητα του αφαλατωμένου νερού που εξέρχεται από τις μεμβράνες εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα του νερού τροφοδότησης και την διάταξη της μονάδας. Μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού μονού σταδίου επεξεργασίας (single stage seawater desalination units) επιτυγχάνουν τη μείωση των αλάτων υπό την έννοια των ολικών διαλυμένων στερεών (total dissolved solids – TDS) στα όρια των 500 ppm, αλλά και τη μείωση της συγκέντρωσης βορίου στο 1ppm.

Η τιμή αυτή της συγκέντρωσης βορίου στο διάλυμα είναι αποδεκτή σύμφωνα με τις οδηγίες της Ε.Ε. για την ποιότητα του νερού. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας δίνει ως όριο το 0.5 ppm, ειδικά για περιπτώσεις χρήσης του νερού σε καλλιέργειες ευαίσθητων φυτών σε βόριο. Συνεπώς, αν και γενικά η ποιότητα του εξερχόμενου αφαλατωμένου νερού ως προς βόριο είναι αποδεκτή, μπορεί να πραγματοποιηθεί περαιτέρω μείωση του βορίου μέσω:

- αύξησης των σταδίων επεξεργασίας του θαλασσινού νερού
- επεξεργασίας του αφαλατωμένου νερού από:
 - Μεμβράνες ηλεκτροδιάλυσης
 - Ρητίνες ιοντοεναλλαγής

Πέρα από βόριο, το αφαλατωμένο νερό παρουσιάζει συνήθως και άλλο ένα πρόβλημα: την έλλειψη μεταλλικών στοιχείων (Ca, Mg). Και στην περίπτωση αυτή το αποτέλεσμα είναι αποδεκτό για χρήση από τους ανθρώπους και τα ζώα, όμως δημιουργούνται δευτερεύοντα προβλήματα, όπως η διάβρωση των σωληνώσεων

μεταφοράς του αφαλατωμένου νερού εξαιτίας της χαμηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο.

Κρίνεται συνεπώς αναγκαία η χημική σταθεροποίηση του αφαλατωμένου νερού με άλατα ασβεστίου, ώστε να αποφεύγεται το φαινόμενο του 'κόκκινου νερού', όπου εμφανίζονται προϊόντα διάβρωσης των σωληνώσεων στο νερό και το χρωματίζουν. Σε ορισμένες περιπτώσεις πραγματοποιείται και εμπλουτισμός του νερού με μαγνήσιο, κυρίως για γεωργική χρήση σε ειδικές καλλιέργειες.

Απόρριψη του υπολείμματος (άλμης)

Το τελικό στάδιο της διεργασίας αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση αποτελεί η απόρριψη του υπολείμματος, δηλαδή της άλμης. Το στάδιο αυτό, αν και εκ πρώτης όψεως φαίνεται απλό, παρουσιάζει δύο σημαντικά προβλήματα που έχουν να κάνουν με το χώρο απόρριψης:

- Την πολύ υψηλή συγκέντρωση σε άλατα, και κατ' επέκταση οσμωτική πίεση, της άλμης
- Την παρουσία στο ρεύμα απόρριψης χημικών που χρησιμοποιήθηκαν σε προηγούμενα στάδια για τον καθαρισμό του νερού και των μεμβρανών.

Η συγκέντρωση της άλμης σε άλατα μπορεί να είναι από 50 – 100 τοις εκατό μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του θαλασσινού νερού τροφοδότησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υψηλή οσμωτική πίεση του διαλύματος (περίπου 50 bar), τιμή πολύ μεγαλύτερη αυτής του θαλασσινού νερού. Συνεπώς, η απόρριψη ενός τέτοιου ρεύματος κατευθείαν στη θάλασσα μπορεί να βλάψει τα τοπικά οικοσυστήματα, διότι τα είδη που τα αποτελούν είναι προσαρμοσμένα στις συνήθεις συνθήκες ωσμωτικής πίεσης.

Το πρόβλημα αυτό λύνεται κυρίως μέσω:

- Αραίωσης της άλμης με θαλασσινό νερό και απόρριψη του μίγματος αυτού, στην περίπτωση ύπαρξης απορριπτόμενου ρεύματος θαλασσινού νερού από άλλη διεργασία (πχ. εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας δίπλα σε μονάδα

αφαλάτωσης). Έτσι, το τελικό απορριπτόμενο μίγμα έχει συγκέντρωση σε άλατα μεγαλύτερη κατά 10 – 15 τοις εκατό σε σχέση με το θαλασσινό νερό, που είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια.

- Απευθείας εκτόξευσης του υπολείμματος στην επιφάνεια της θάλασσας με χρήση κατάλληλης διάταξης. Όταν δεν είναι δυνατή η αραίωση της άλμης, τότε μια λύση είναι η απ' ευθείας απόρριψή της στη θάλασσα. Όμως, η απόρριψη αυτή δεν πρέπει να γίνεται στον πυθμένα, καθώς η κίνηση των υδάτων εκεί είναι πολύ αργή και δεν γίνεται σωστή ανάμειξη, με αποτέλεσμα την δημιουργία περιοχών με υψηλή συγκέντρωση σε άλατα. Η λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η επιφανειακή απόρριψη της άλμης μέσω εκτόξευσης, όπου επιτυγχάνεται καλύτερη ανάμειξη και ομογενοποίηση.
- Διοχέτευσης της άλμης σε αλυκές (salt evaporation ponds), με σκοπό την ανάκτηση των αλάτων μέσω εξάτμισης του νερού, είτε σε ηλιακές λίμνες (solar ponds), με σκοπό την παραγωγή ενέργειας.

Η παρουσία στο ρεύμα απόρριψης, χημικών που χρησιμοποιήθηκαν σε προηγούμενα στάδια για τον καθαρισμό του νερού και των μεμβρανών, αποτελεί το δεύτερο σημαντικό παράγοντα που πρέπει να αντιμετωπιστεί για την ασφαλή απόρριψη της άλμης στη θάλασσα. Τα χημικά που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι υψηλής καθαρότητας και με χαμηλό περιεχόμενο σε φώσφορο. Επίσης, πρέπει τα χρησιμοποιημένα χημικά καθαρισμού των μεμβρανών να αδρανοποιούνται πριν απορριφθούν, ώστε να ελαχιστοποιείται η επιβάρυνση των θαλάσσιων οικοσυστημάτων.

5. Θερμοδυναμική των εγκαταστάσεων ισχύος

5.1 Τα βασικά θερμοδυναμικά αξιώματα

Όλα τα θερμοδυναμικά κύκλα ικανοποιούν το πρώτο και το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα.

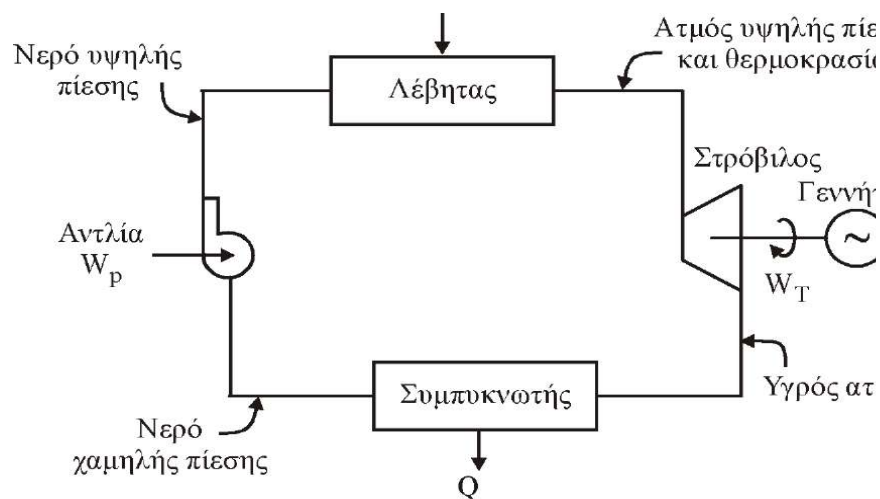
Το *πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα* είναι η γνωστή αρχή διατήρησης της ενέργειας και όπως είναι γνωστό διέπει κάθε μετατροπή ενέργειας.

Η ικανοποίηση όμως του πρώτου θερμοδυναμικού αξιώματος δεν εξασφαλίζει την δυνατότητα πραγματοποίησης μιας διαδικασίας, καθώς ο νόμος αυτός δεν θέτει κανένα περιορισμό στην κατεύθυνση της διαδικασίας. Η αδυναμία αυτή του πρώτου αξιώματος να καθορίσει αν μια διαδικασία θα πραγματοποιηθεί ή όχι, θεραπεύεται από το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα.

Σύμφωνα με το *δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα*, είναι αδύνατο μια μηχανή που λειτουργεί σε κύκλο να λαμβάνει θερμότητα από μια πηγή θερμότητας και να παράγει ισοδύναμη ποσότητα έργου. Θα υπάρχει επομένως κάποια απώλεια θερμότητας - άρα καμιά θερμική μηχανή δεν είναι δυνατόν να έχει βαθμό απόδοσης 100 τοις εκατό - ανεξάρτητα από τον τρόπο μετατροπής της θερμικής ενέργειας. Μια θερμική μηχανή λοιπόν χρειάζεται και δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας εκτός από την πηγή θερμότητας για να λειτουργεί σε πλήρη κύκλο. Το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα συχνά χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του μέγιστου δυνατού βαθμού απόδοσης ενός συστήματος.

Μια εγκατάσταση παραγωγής ισχύος με ατμό, η οποία απεικονίζεται πολύ απλοϊκά στο Σχήμα 2 είναι το καλύτερο παράδειγμα μιας θερμικής μηχανής. Η μηχανή αυτή είναι μηχανή εξωτερικής καύσης. Η καύση λαμβάνει χώρα έξω από τη μηχανή και η θερμική ενέργεια που απελευθερώνεται μεταφέρεται στο ρευστό εργασίας (ατμό) σαν θερμότητα (Η θερμότητα βέβαια μπορεί να προέρχεται και από τη σχάση σε πυρηνικό αντιδραστήρα ή από ηλιακούς συλλέκτες). Ο στρόβιλος μετατρέπει μέρος της εσωτερικής ενέργειας του ρευστού εργασίας σε μηχανική ενέργεια. Το υπόλοιπο αποβάλλεται σαν θερμότητα στον συμπυκνωτή (δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας). Η αντλία

είναι απαραίτητη για την κυκλοφορία του ρευστού εργασίας στο σύστημα. Το καθαρό μηχανικό έργο που παράγεται είναι το έργο του στρόβιλου μείον το έργο της αντλίας.



Σχήμα.2 Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα ΑΗΣ

5.2 Θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης

Επειδή η θερμική μηχανή δεν μπορεί να μετατρέψει όλη την θερμότητα που παραλαμβάνει σε ωφέλιμο έργο, ο θερμοδυναμικός (ή θερμικός) βαθμός απόδοσης ορίζεται σαν το ποσοστό της εισερχόμενης ενέργειας (θερμότητα) που μπορεί να μετατραπεί σε μηχανική ενέργεια:

$$n_{th} = \frac{\text{καθαρό έργο που παράγεται}}{\text{συνολική θερμότητα που εισέρχεται}} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \quad (5.1)$$

Όταν το έργο της αντλίας είναι αμελητέο, τότε η 5.1 γράφεται:

$$n_{th} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \quad (5.2)$$

Η εκτίμηση του συνολικού βαθμού απόδοσης σύγχρονων μεγάλων εγκαταστάσεων είναι μια αρκετά δύσκολη υπόθεση.

5.3 Θερμοδυναμικές ιδιότητες- Εσωτερική ενέργεια, ενθαλπία, εντροπία

Εσωτερική ενέργεια ενός συστήματος ονομάζεται το σύνολο των ενεργειών κάθε μορφής που έχουν τα όρια (ή άτομα) της ύλης του συστήματος». Η ολική εσωτερική ενέργεια παριστάνεται με το σύμβολο U , ενώ η ειδική εσωτερική ενέργεια ϵ το σύμβολο u . Οι κύριες μορφές εσωτερικής ενέργειας ενός συστήματος είναι η θερμική, η χημική και η πυρηνική ενέργεια. Βέβαια, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, λόγω απουσίας χημικής και πυρηνικής ενέργειας, η εσωτερική ενέργεια ισούται με την θερμική ενέργεια του συστήματος.

Σε πολλές θερμοδυναμικές αναλύσεις, εμφανίζεται το άθροισμα της εσωτερικής ενέργειας U και του γινομένου της πίεσης p και του όγκου V . Επειδή η εμφάνιση του αθροίσματος $(U + pV)$ είναι συχνή, ιδιαίτερα στις διεργασίες ροής ρευστών, δόθηκε σε αυτόν τον συνδυασμό το όνομα ενθαλπία. Η ενθαλπία παριστάνεται στην βιβλιογραφία με το σύμβολο H , ενώ η ειδική ενθαλπία (δηλαδή η ενθαλπία ανά μονάδα μάζας) συμβολίζεται με το σύμβολο h .

Ο ορισμός της εντροπίας προκύπτει από την *ανισότητα του Clausius*. Σύμφωνα με αυτή το κυκλικό ολοκλήρωμα της ποσότητας $\delta Q/T$ είναι πάντοτε μικρότερο ή ίσο από το μηδέν. Είναι δηλαδή:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (5.3)$$

Στην 5.3 Q είναι η θερμότητα που μεταφέρεται δια των ορίων του συστήματος και T η απόλυτη θερμοκρασία. Η ισότητα ισχύει για αντιστρεπτές διαδικασίες και η ανισότητα για μη αντιστρεπτές. Σε μια αντιστρεπτή διαδικασία λοιπόν θα ισχύει:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} |_{rev} = 0 \quad (5.4)$$

Η *εντροπία* ορίζεται από τη σχέση:

$$dS = \frac{\delta Q}{T} |_{rev} \text{ (kJ/K)} \quad (5.5)$$

Η μεταβολή της εντροπίας ενός συστήματος κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας προκύπτει από την ολοκλήρωση της 5.5 μεταξύ της αρχικής και της τελικής κατάστασης:

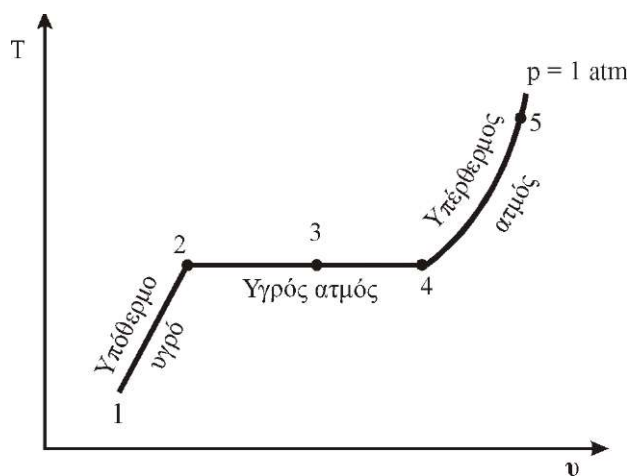
$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} |_{rev} \quad (5.6)$$

Η εντροπία, όπως και η εσωτερική ενέργεια και η ενθαλπία, είναι θερμοδυναμική ιδιότητα του συστήματος.

Η εσωτερική ενέργεια U , η ενθαλπία H και η εντροπία S είναι *εκτατικές ιδιότητες* ενός συστήματος αφού είναι ανάλογες με το μέγεθος του συστήματος. Τα ειδικά τους μεγέθη, δηλαδή η ειδική εσωτερική ενέργεια u , η ειδική ενθαλπία h και η ειδική εντροπία s , τα οποία ως γνωστόν ορίζονται ως η ανά μονάδα μάζας εσωτερική ενέργεια, ενθαλπία και εντροπία αντίστοιχα, είναι *εντατικές ιδιότητες* του συστήματος. Για ρευστό μιας φάσης, τα u , h και s καθορίζονται όταν είναι δεδομένες η πίεση και η θερμοκρασία. Επειδή δε είναι ανεξάρτητα από την οδό που ακολουθήθηκε προκειμένου να φθάσει ένα σύστημα σε μια κατάσταση, είναι θερμοδυναμικές ιδιότητες. Σε μια αντιστρεπτή αδιαβατική διαδικασία η εντροπία του ρευστού εργασίας παραμένει σταθερή αφού το ολοκλήρωμα $\int \delta Q/T$ είναι μηδέν. Όλες η πραγματικές διαδικασίες είναι μη αντιστρεπτές λόγω τριβών, απωλειών θερμότητας κλπ. Επειδή όμως σε πολλές αδιαβατικές διαδικασίες αυτές είναι μικρές, η υπόθεση της σταθερής εντροπίας είναι μια καλή προσέγγιση.

5.4 Θερμοδυναμικές ιδιότητες του ατμού

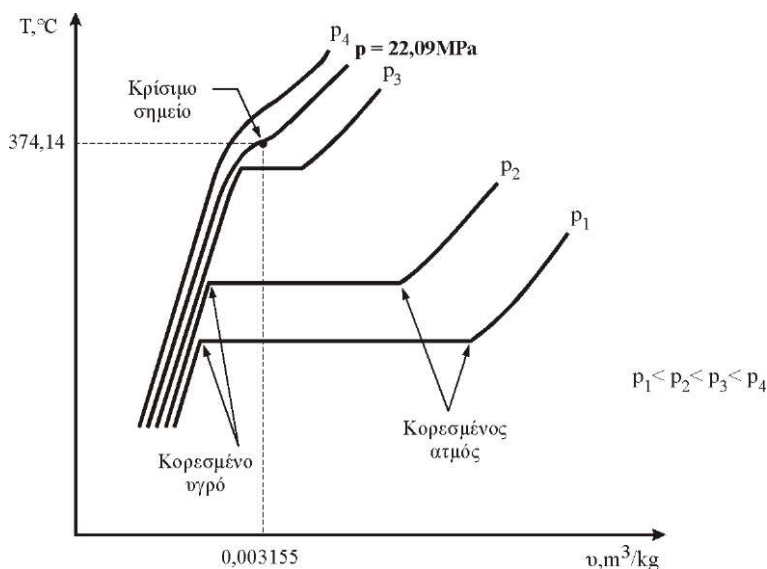
Η διαδικασία αλλαγής φάσης του νερού υπό σταθερή πίεση απεικονίζεται σε διάγραμμα $T - u$ στην Σχήμα 3



Σχήμα.3 Διάγραμμα $T - u$ θέρμανσης νερού υπό σταθερή πίεση

Για δεδομένη πίεση, η θερμοκρασία στην οποία σε απλή ύλη αρχίζει ο βρασμός, ονομάζεται *θερμοκρασία κορεσμού* T_{sat} . Αντίστροφα, για δεδομένη θερμοκρασία, η πίεση στην οποία σε απλή ύλη αρχίζει ο βρασμός, ονομάζεται *πίεση κορεσμού* P_{sat} . Για το νερό η θερμοκρασία κορεσμού είναι 100°C για κανονική ατμοσφαιρική πίεση. Η θερμοκρασία κορεσμού λοιπόν είναι συνάρτηση της πίεσης και αυξάνεται όταν αυξάνεται η πίεση.

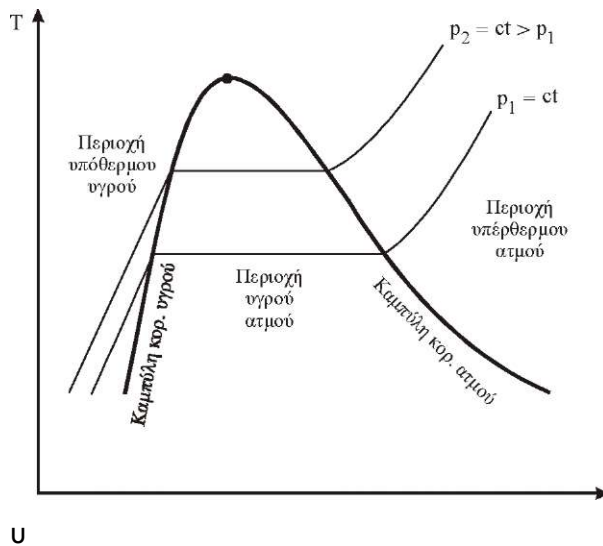
Έστω τώρα ότι η διαδικασία αλλαγής φάσης του νερού που περιγράφηκε προηγούμενα για πίεση 1atm και της οποίας το διάγραμμα $T - v$ απεικονίσθηκε στο Σχήμα 3, επαναλαμβάνεται για διαφορετικές πιέσεις. Οι αντίστοιχες μεταβολές απεικονίζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 4.



Σχήμα.4 Διάγραμμα $T - v$ αλλαγής φάσης νερού για διάφορες πιέσεις.

Αν ενώσουμε τα σημεία που αντιστοιχούν στις καταστάσεις του κορεσμένου υγρού του Σχήματος 4, τότε σχηματίζεται η *καμπύλη του κορεσμένου υγρού*, ενώ αντίστοιχα τα σημεία που αντιστοιχούν στις καταστάσεις του κορεσμένου ατμού σχηματίζουν την *καμπύλη του κορεσμένου ατμού*. Οι καμπύλες αυτές ενώνονται στο *κρίσιμο σημείο*. Η περιοχή αριστερά της καμπύλης του κορεσμένου υγρού είναι η περιοχή του *υπόθερμου υγρού*, ενώ δεξιά της καμπύλης του κορεσμένου ατμού, η περιοχή του *υπέρθερμου ατμού*. Η

περιοχή μεταξύ των καμπυλών κορεσμένου νερού και κορεσμένου ατμού είναι η περιοχή του υγρού ατμού



Σχήμα.5 Διάγραμμα $T - u$ απλής ύλης.

Το κρίσιμο σημείο για το νερό είναι σε πίεση 22.09Μρα (221.19bar και 374.14°C. Για πιέσεις μεγαλύτερες της κρίσιμης, δεν έχει έννοια η αναφορά σε συνθήκες κορεσμού ή υπερθέρμανσης. Τότε δεν υπάρχει σαφώς καθορισμένο σημείο βρασμού και η μετάβαση από την υγρή στην αέρια κατάσταση είναι συνεχής. Η ενθαλπία εξάτμισης γίνεται μηδέν και κάθε προσθήκη θερμότητας προκαλεί συνεχή αύξηση της θερμοκρασίας.

Όταν έχουμε μίγμα υγρού ατμού (περιοχή 2 - 3, Σχήμα 3), οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του μίγματος προκύπτουν από τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του κορεσμένου υγρού και του κορεσμένου ατμού, συναρτήσει του μεγέθους της ποιότητας του μίγματος. Η ποιότητα x του μίγματος ορίζεται από τη σχέση:

$$\text{Ποιότητα } x = \frac{\text{μάζα ατμού}}{\text{μάζα μίγματος}} \quad (5.7)$$

Οι εντατικές θερμοδυναμικές ιδιότητες του μίγματος προκύπτουν από τις σχέσεις

$$h_m = xh_g + (1 - x)h_f \quad (5.8)$$

$$s_m = xs_g + (1 - x)s_f \quad (5.9)$$

$$u_m = xu_g + (1 - x)u_f \quad (5.10)$$

$$v_m = xv_g + (1 - x)v_f \quad (5.11)$$

όπου οι δείκτες f, g, m υποδηλώνουν την υγρή φάση, την αέρια φάση και το μίγμα αντίστοιχα.

5.5 Ανάλυση κύκλου Rankine

Η παραγωγή ισχύος πραγματοποιείται από συστήματα που λειτουργούν σε ένα θερμοδυναμικό κύκλο¹, το οποίο ονομάζεται *κύκλο ισχύος*. Ο όρος κύκλο ισχύος δηλαδή αντιστοιχεί σε μια επαναλαμβανόμενη κυκλική διαδικασία κατά την οποία έχουμε συνεχή παραγωγή ισχύος.

Τα κύκλα διαιρούνται σε *κύκλα αερίου* και *κύκλα ατμού*, ανάλογα με τη φάση του ρευστού εργασίας. Στα κύκλα αερίου, το ρευστό εργασίας είναι σε αέρια φάση σε ολόκληρο το κύκλο, ενώ στα κύκλα ατμού είναι σε αέρια φάση σε ένα τμήμα και σε υγρή σε άλλο τμήμα του κύκλου. Στην ανάλυση που ακολουθεί, σαν ρευστό εργασίας στα κύκλα ατμού θα θεωρείται ο υδρατμός, αφού είναι το πιο διαδεδομένο ρευστό εργασίας στα κύκλα αυτά.

Τα κύκλα μπορούν επίσης να διαιρεθούν σε ανοικτά και κλειστά κύκλα. Στα *κλειστά κύκλα*, το ρευστό εργασίας στο τέλος του κύκλου επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση και επανακυκλοφορεί στο σύστημα, ενώ στα *ανοικτά* ανανεώνεται στο τέλος του κύκλου. Το κατά πόσο ένα κύκλο ισχύος μπορεί να εφαρμοσθεί είναι συνάρτηση του κόστους και του βαθμού απόδοσης του. Δεν μπορούν βέβαια και δεν πρέπει να αγνοηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Έτσι και για περιβαλλοντικούς λόγους ο βαθμός απόδοσης είναι ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο, αφού υψηλός βαθμός απόδοσης σημαίνει λιγότερη κατανάλωση καυσίμου και άρα μικρότερη ρύπανση.

¹ Τα θερμοδυναμικά κύκλα χωρίζονται σε *κύκλα ισχύος* και *κύκλα ψύξης*.

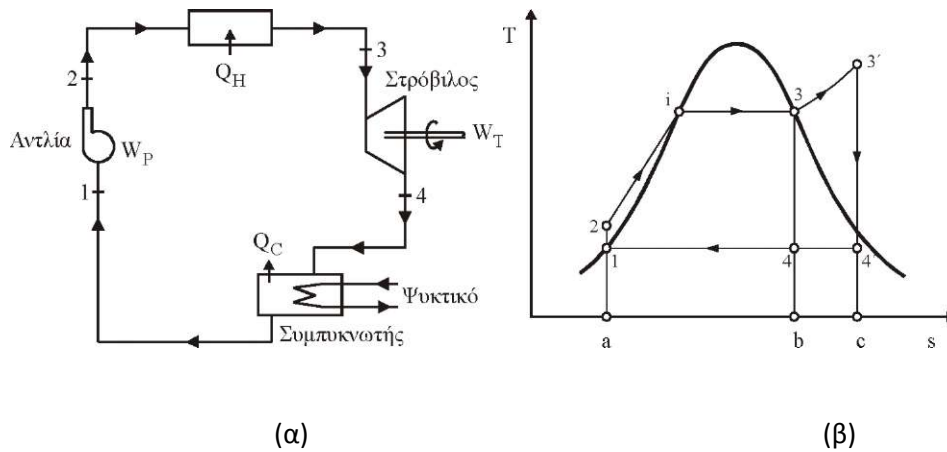
Κύκλο Rankine

Το κύκλο που προκύπτει απεικονίζεται στο Σχήμα 6, και είναι το ιδανικό κύκλο που αντιπροσωπεύει καλύτερα από οποιοδήποτε άλλο μια απλή εγκατάσταση ισχύος με ατμό.

Το ιδανικό κύκλο Rankine (χωρίς υπερθέρμανση) αποτελείται από τις παρακάτω τέσσερις διαδικασίες:

1. Αντιστρεπτή αδιαβατική (ισεντροπική) συμπίεση σε μια αντλία, 1-2.
2. Μεταφορά θερμότητας, υπό σταθερή πίεση, στον λέβητα, 2-i-3
3. Αντιστρεπτή αδιαβατική (ισεντροπική) εκτόνωση στον στρόβιλο, 3-4
4. Αποβολή θερμότητας στον συμπυκνωτή, υπό σταθερή πίεση, 4-1.

Αν έχουμε υπερθέρμανση του ατμού, το διάγραμμα του κύκλου είναι το 1-2-3-3'-4'. Το νερό εισέρχεται στην αντλία (σημείο 1) σαν κορεσμένο υγρό και συμπιέζεται ισεντροπικά μέχρι την πίεση λειτουργίας του λέβητα. Στην είσοδο του λέβητα το νερό είναι υπόθερμο. Η μεταβολή στον λέβητα παριστάνεται από την ισοβαρή καμπύλη 2- i-3 (ή 2-i-3-3' αν έχουμε υπερθέρμανση). Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, αρχικά ανυψώνεται η θερμοκρασία του νερού υπό σταθερή πίεση μέχρι να αποκτήσει την θερμοκρασία κορεσμού που αντιστοιχεί στην πίεση λειτουργίας του λέβητα (σημείο i). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται στον οικονομητήρα και η θερμότητα που απαιτείται για τη αυτή λαμβάνεται από καυσαέρια υψηλής θερμοκρασίας. Στην συνέχεια έχουμε βρασμό (ή και υπερθέρμανση) και στην έξοδο του λέβητα έχουμε κορεσμένο ατμό (σημείο 3) ή υπέρθερμο ατμό (σημείο 3'). Ο ατμός, κορεσμένος ή υπέρθερμος, μπαίνει στον στρόβιλο όπου εκτονώνεται ισεντροπικά και παράγει έργο περιστρέφοντας τον άξονα του αμοστροβίλου που είναι συνδεδεμένος με μια γεννήτρια. Κατά την διάρκεια της εκτόνωσης, η πίεση και η θερμοκρασία του ατμού πέφτουν (σημείο 4 ή 4'). Στην συνέχεια ο ατμός, συνήθως μίγμα υγρού ατμού υψηλής ποιότητας, εισέρχεται στον συμπυκνωτή όπου και συμπυκνώνεται, υπό σταθερή πίεση, αποβάλλοντας θερμότητα. Ο ατμός βγαίνει από τον συμπυκνωτή σαν κορεσμένο υγρό και εισέρχεται στην αντλία, για να κλείσει έτσι το κύκλο.



Σχήμα.6 (α) Μηχανικά στοιχεία απλού κύκλου Rankine (β) Διάγραμμα T-s για απλό ιδανικό κύκλο Rankine

Η μορφή του διαγράμματος T-s ενός ρευστού εργασίας καθορίζει αν το ρευστό μπορεί να χρησιμοποιηθεί με το κύκλο Rankine. Το επιθυμητό είναι να έχουμε ένα ρευστό με υψηλή κρίσιμη θερμοκρασία και στενή καμπύλη κορεσμού έτσι ώστε το κύκλο Rankine να προσεγγίζει όσο το δυνατό περισσότερο το κύκλο Carnot. Τα απαιτούμενα όρια της πίεσης πρέπει επίσης να είναι λογικά. Σημαντικοί φυσικά παράγοντες είναι το κόστος και η διαθεσιμότητα του ρευστού. Η συνολική ποσότητα του ρευστού που κυκλοφορεί στο κύκλο εξαρτάται από την ενθαλπία εξάτμισης, αφού αυτή καθορίζει την ενέργεια που μπορεί να δοθεί στο υγρό στην υψηλή θερμοκρασία. Αν όλοι αυτοί οι παράγοντες ληφθούν υπ' όψη, το νερό αποδεικνύεται καλή εκλογή για το κύκλο Rankine. Είναι υγρό εύκολα διαθέσιμο σε χαμηλό κόστος, έχει πολύ υψηλή ενθαλπία εξάτμισης (2100kJ/kg), αρκετά υψηλή κρίσιμη θερμοκρασία (374°C) και δεν είναι τοξικό. Τα προβλήματα διάβρωσης που προκαλεί είναι σημαντικά, μπορούν όμως να ελεγχθούν.

Ενεργειακή ανάλυση ιδανικού κύκλου Rankine

Όπως προκύπτει από την περιγραφή της διαδικασίας υλοποίησης του κύκλου Rankine και γίνεται φανερό από το διάγραμμα T-s του Σχήμα 6β, στο κύκλο Rankine η μεταφορά θερμότητας προς το ρευστό εργασίας δεν γίνεται σε σταθερή θερμοκρασία, όπως στο κύκλο Carnot. Η μέση θερμοκρασία T_1 στην οποία γίνεται η μεταφορά θερμότητας προς το ρευστό εργασίας, όπως επίσης και η μέση θερμοκρασία T_2 στην οποία το ρευστό αποβάλλει θερμότητα έχουν άμεση επίδραση στο βαθμό απόδοσης του κύκλου

Rankine. Αύξηση της T_1 ή μείωση της T_2 σημαίνει αύξηση του βαθμού απόδοσης του συστήματος.

Η θερμότητα που μεταφέρεται και το έργο που παράγεται συσχετίζονται με τις περιοχές του διαγράμματος T-s. Είναι γνωστό ότι το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη που αντιστοιχεί σε μια αντιστρεπτή διαδικασία σε ένα διάγραμμα T-s, αντιστοιχεί στη θερμότητα που μεταφέρεται κατά την εκτέλεση της διαδικασίας. Έτσι το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη 2-i-3 (ή 2-i-3-3') του Σχήματος 6β αντιστοιχεί στην θερμότητα που μεταφέρεται στο νερό από τον λέβητα, ενώ το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη 4-1 (ή 4'-4-1) αντιστοιχεί στην θερμότητα που αποβάλλεται στον συμπυκνωτή. Η διαφορά μεταξύ των δύο εμβαδών, δηλαδή το εμβαδόν της περιοχής που περικλείεται από το κύκλο, αντιστοιχεί στο καθαρό έργο που παράγεται από το κύκλο. Ο θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου Rankine (χωρίς υπερθέρμανση), θα είναι (Σχήμα 6β).

$$\eta_{th} = \frac{\text{καθαρό έργο που παράγεται}}{\text{συνολική θερμότητα που εισέρχεται}} = \frac{\text{εμβαδόν } 1-2-3-i-4-1}{\text{εμβαδόν } a-2-i-3-b-a} \quad (5.12)$$

Το κύκλο Rankine, έχει μικρότερο θερμοδυναμικό βαθμό απόδοσης από ένα κύκλο Carnot που λειτουργεί μεταξύ των ιδίων μεγίστων και ελαχίστων θερμοκρασιών. Ένας βασικός λόγος για τον οποίο αυτό συμβαίνει είναι η πρακτική αναγκαιότητα το μίγμα του υγρού ατμού να συμπυκνωθεί σε υγρό πριν μπει στην αντλία. Αυτό μειώνει την μέση θερμοκρασία του κύκλου και άρα και τον θερμοδυναμικό βαθμό απόδοσης. Η συμπίεση που γίνεται μόνο σε μια φάση, την υγρή, είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του κύκλου Rankine, αφού αποφεύγονται οι δυσκολίες κατασκευής μιας συσκευής που θα διαχειρίζεται ένα μίγμα υγρού και ατμού.

Ο θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου Rankine προκύπτει από την εφαρμογή των ενεργειακών ισοζυγίων σε όγκο ελέγχου στις αντίστοιχες συσκευές του κύκλου. Στα ισοζύγια αυτά, οι μεταβολές της κινητικής και δυναμικής ενέργειας του ατμού αγνοούνται επειδή συνήθως είναι μικρές συγκρινόμενες με τους όρους του έργου και της μεταφοράς θερμότητας. Έτσι λοιπόν και με δεδομένο ότι στον λέβητα και στον συμπυκνωτή δεν έχουμε έργο, ενώ στην αντλία και τον στρόβιλο έχουμε ισεντροπική διαδικασία, θα είναι:

$$\text{Στρόβιλος: } W_t = m(h_3 - h_4) \quad (5.13)$$

$$\text{Αντλία: } W_p = m(h_2 - h_1) \quad (5.14)$$

$$\text{Λέβητας: } Q_H = m(h_3 - h_2) \quad (5.15)$$

$$\text{Συμπυκνωτής: } Q_c = m(h_4 - h_1) \quad (5.16)$$

Το καθαρό έργο που παράγεται από το κύκλο είναι η διαφορά μεταξύ του έργου του στροβίλου και του έργου της αντλίας:

$$W = W_t - W_p = m(h_3 - h_4) - m(h_2 - h_1) = m[(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)] \quad (5.17)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι ο θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου θα είναι:

$$n_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} = \frac{m[(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)]}{m(h_3 - h_2)} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \quad (5.18)$$

Όταν το έργο της αντλίας είναι πολύ μικρό σε σχέση με το έργο του στροβίλου, τότε:

$$n_{th} \approx \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_2} \quad \text{Για } W_p \ll W_t \quad (5.19)$$

5.6 Μαθηματική μοντελοποίηση των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του νερού και ατμού

Η μοντελοποίηση των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του νερού και του ατμού σε οποιοσδήποτε συνθήκες αποτελεί ουσιώδη προϋπόθεση για την αναλυτική πρόβλεψη της απόδοσης των κύκλων ατμού Rankine. Μέθοδοι και εξισώσεις έχουν παρουσιαστεί σε πολλές δημοσιεύσεις όπου για να διευκολυνθεί ο υπολογισμός, χρησιμοποιούν υψηλής ταχύτητας υπολογιστές. Παρακάτω αναλύονται μαθηματικοί υπολογισμοί για τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του νερού και του ατμού.

5.6.1 Περιοχή υπέρθερμου ατμού

Ο ειδικός όγκος, ειδική ενθαλπία και εντροπία διατυπώθηκαν σύμφωνα με τον Schnacke^[12] για την περιοχή του υπέρθερμου ατμού (Σχήμα 7) στις παρακάτω εξισώσεις σε SI μονάδες.

$$u = 1.000035 * 10^{-3} \left(\frac{461539.43T}{P} + B \right) \quad (5.20)$$

$$h = F + 101.31358 \left\{ F_0 \frac{P}{101325} + \frac{B_0}{2} \left(\frac{P}{101325T} \right)^2 [-B_6 + B_0(B_2 - B_3 + B_0 B_7 \left[\frac{P}{101325T} \right]^2)] \right\} \quad (5.21)$$

$$s = 1472.2626 \ln T - 461.4874 \ln P + 0.7557174T + 3830.4065 - \frac{47845.076}{T} - 101.31344\beta \quad (5.22)$$

Όπου

$$B = B_0 \left\{ 1 + \frac{B_0 P}{101325T^2} [B_2 - B_3 + \left(\frac{B_0 P}{101325T} \right)^2 (B_4 - B_5)] \right\} \quad (5.23)$$

$$B_0 = 1.89 - B_1 \quad (5.24)$$

$$B_1 = \frac{2641.62}{T} 10^{80870/T^2} \quad (5.25)$$

$$B_2 = 82.546 \quad (5.26)$$

$$B_3 = 162460/T \quad (5.27)$$

$$B_4 = 0.21828T \quad (5.28)$$

$$B_5 = 126970T \quad (5.29)$$

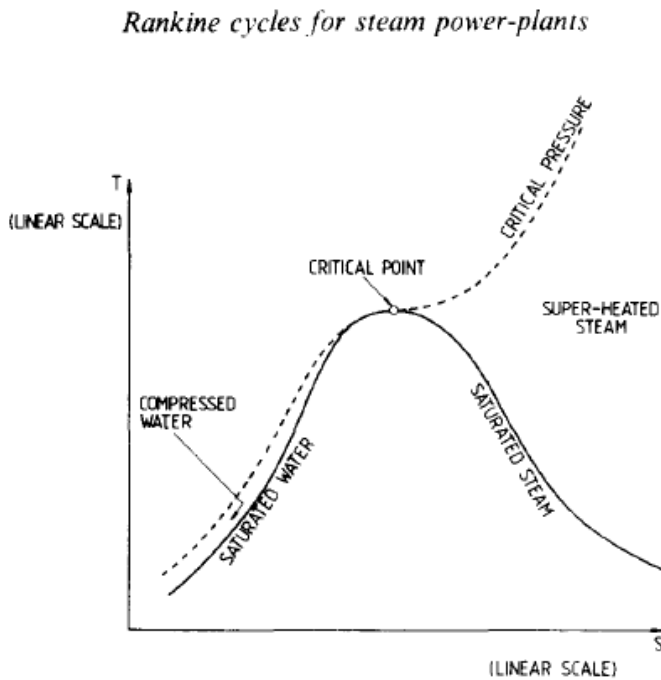
$$B_6 = B_0 B_3 - 2F_0(B_2 - B_3) \quad (5.30)$$

$$B_7 = 2F_0(B_4 - B_5) - B_0 B_5 \quad (5.31)$$

$$F_o = 1.89 - B1\left(\frac{372420}{T^2} + 2\right) \quad (5.32)$$

$$F = 1804036.3 + 1472.265T + 0.37789824T^2 + 47845.137\ln T \quad (5.33)$$

$$\beta = \frac{1}{T} \left\{ (B_o - F_o) \frac{P}{101325} + \frac{B_o}{2} \left(\frac{P}{101325} \right)^2 \left(B_6 + \frac{1}{2} \left(\frac{B_o P}{101325 T} \right)^2 [B_o(B_4 - B_5) - 2B_7] \right) \right\} \quad (5.34)$$



Σχήμα.7 Διάγραμμα Θερμοκρασίας- Εντροπίας του νερού για διάφορες φάσης του

Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστούν ο ειδικός όγκος, ειδική ενθαλπία και εντροπία του υπέρθερμου ατμού έχοντας γνωστές την πίεση και τη θερμοκρασία.

5.6.2 Περιοχή κορεσμένου νερού

Στην περιοχή του κορεσμένου νερού (Σχήμα 7) ο ειδικός ο όγκος του υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση

$$u = 3.104304 * 10^{-3} V [1 - 0.344\Gamma] \quad (5.35)$$

Όπου

$$V = 0.33593 - 5.2453267 * 10^{-4}T + 3.6263003 * 10^{-6}T^2 - 7.4667901 * 10^{-9}T^3 + 6.346708 * 10^{-12}T^4 \quad (5.36)$$

Για $T \leq 518 \text{ K}$

$$V = 1 + 0.5645828 \left(1 - \frac{T}{647.3}\right)^2 \ln \left(1 - \frac{T}{647.3}\right) - 0.50879 \left(1 - \frac{T}{647.3}\right) - 0.91534 \left(1 - \frac{T}{647.3}\right)^2 \quad (5.37)$$

Για $518 \text{ K} < T < 647.3 \text{ K}$

Και

$$\Gamma = 0.29607 - 1.3973428 * 10^{-4}T - 1.1556161 * 10^{-7}T^2 \quad (5.38)$$

Για $T < 647.3 \text{ K}$

Κάτω από το κανονικό σημείο βρασμού η ειδική ενθαλπία του κορεσμένου νερού μπορεί να εκτιμηθεί με επαρκή βαθμό ακρίβειας από την παρακάτω σχέση

$$h_1 = 4186.8(T - 273.15) \quad (5.39)$$

6. Προβλήματα βελτιστοποίησης

6.1 Θεωρητικές έννοιες

Βελτιστοποίηση (optimization) ονομάζεται η επιλογή της κατάλληλης βέλτιστης λύσης ενός προβλήματος, η οποία και κρίνεται ως ιδανικότερη, βάση ορισμένων κριτηρίων. Στην περίπτωση που αναφέρεται στο μοντέλο ενός συστήματος (*βελτιστοποίηση συστημάτων*), το πρόβλημα επικεντρώνεται συνήθως στην εύρεση τιμών των παραμέτρων του μοντέλου, για τις οποίες ικανοποιούνται οι περιορισμοί που έχουν τεθεί (*constrained optimization*). Παρόλα αυτά, είναι δυνατόν σε ορισμένες περιπτώσεις να αναζητείται ακρότατη τιμή (ελάχιστο ή μέγιστο) μιας αντικειμενικής συνάρτησης, χωρίς την ύπαρξη περιορισμών (*unconstrained optimization*). Σε κάποιες περιπτώσεις, απαιτείται να ικανοποιούνται περισσότερα του ενός κριτήρια – αντικειμενικές συναρτήσεις (*multi-objective optimization*), απ' όπου επιλέγονται μεταξύ ικανών λύσεων οι προτιμότερες, από τον αποφασίζων. Τα μοντέλα βελτιστοποίησης, ευρέως γνωστά ως μοντέλα μαθηματικού προγραμματισμού. Τα μοντέλα βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται κυρίως για την βέλτιστη κατανομή πόρων μεταξύ εναλλακτικών δραστηριοτήτων, κάτω από συνθήκες βεβαιότητας. Δηλαδή, τα μοντέλα βελτιστοποίησης επικεντρώνονται στον εντοπισμό του βέλτιστου προγράμματος, με το οποίο κατανέμονται κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο οι περιορισμένοι διαθέσιμοι πόροι ή μέσα μιας οικονομικής μονάδας στις ανταγωνιστικές δραστηριότητές της, ώστε να ικανοποιούνται οι προκαθορισμένοι στόχοι της.

Το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα αυτών των αποφάσεων μπορεί να αφορά τη μεγιστοποίηση του συνολικού κέρδους από πωλήσεις, την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής, την ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον, κ.λ.π.

Ένα μοντέλο **βελτιστοποίησης** αποτελείται από μια αντικειμενική συνάρτηση και από ένα σύνολο περιορισμών. Η αντικειμενική συνάρτηση εκφράζει το στόχο που επιχειρείται να μεγιστοποιηθεί ή να ελαχιστοποιηθεί και είναι μια σχέση μεταξύ μιας ή περισσότερων μεταβλητών που ονομάζονται μεταβλητές απόφασης. Οι περιορισμοί (δυναμικότητας, διαθεσιμότητας πόρων, τεχνολογίας, κ.λπ.) εκφράζουν τους περιορισμούς του περιβάλλοντος στο οποίο αναπτύσσεται η δραστηριότητα. Κάθε συνδυασμός τιμών που μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές απόφασης ονομάζεται λύση του προβλήματος. Όταν οι

τιμές αυτές ικανοποιούν τους περιορισμούς του προβλήματος, η λύση ονομάζεται εφικτή λύση.

Ανάλογα με τη μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών, ο μαθηματικός προγραμματισμός διακρίνεται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Γραμμικός προγραμματισμός, όπου τόσο η αντικειμενική συνάρτηση όσο και οι περιορισμοί είναι γραμμικές σχέσεις.
- Ακέραιος προγραμματισμός, όπου οι μεταβλητές απόφασης μπορούν να πάρουν μόνο ακέραιες τιμές ή αναπαριστούν αποφάσεις «λογικής» και όχι φυσικά μεγέθη.
- Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός αφορά τα προβλήματα στα οποία ο περιορισμός ακεραιότητας δεν ισχύει για όλες τις μεταβλητές, αλλά για μερικές από αυτές
- Μη γραμμικός προγραμματισμός, όπου κάποιες από τις συναρτήσεις του προβλήματος (αντικειμενική συνάρτηση, περιορισμοί) είναι μη-γραμμικές.

Παραδοσιακά, τα προβλήματα βελτιστοποίησης παρουσιάζονται με τη μορφή αλγεβρικών μοντέλων, όπου η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί διατυπώνονται ως αλγεβρικές εξισώσεις και ανισώσεις μεταξύ των μεταβλητών απόφασης.

6.2 Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μη γραμμικού προγραμματισμού

Για τη λύση των προβλημάτων ο μαθηματικός προγραμματισμός χρησιμοποιεί ένα μαθηματικό μοντέλο από μεταβλητές απόφασης, μια αντικειμενική συνάρτηση και ένα σύνολο περιορισμών. Η εξεύρεση της λύσης των προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού γίνεται μέσω αλγόριθμων βελτιστοποίησης (*optimization algorithms*). Οι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με τον τρόπο που προσεγγίζουν σε δύο κατηγορίες τους νετερμινιστικούς αλγόριθμους που έχουν ως χαρακτηριστικό την χρήση εφαρμογών του απειροστικού λογισμού (κλίση συνάρτησης, μητρώα παραγώγων κλπ.), για την εύρεση λύσης, την οποία προσεγγίζουν πάντα με προκαθορισμένο τρόπο και τους στοχαστικούς αλγόριθμους, που αναπαράγουν και χρησιμοποιούν τυχαίες μεταβλητές/περιορισμούς ή και τυχαίες κατευθύνσεις έρευνας. Έτσι, προσεγγίζουν τη λύση με διαφορετικό πάντα τρόπο,

όμως μπορούν προσδιορίζουν την περιοχή της λύσης σε πολύ καλό βαθμό, ανάλογα με την περίπτωση.

Οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης του πολυδιάστατου μη γραμμικού προγραμματισμού μπορούν να χωρισθούν στις εξής κατηγορίες, ως προς τον τρόπο προσέγγισης της λύσης:

6.2.1 Penalty functions

Η μέθοδος **Penalty functions** κάνει χρήση συναρτήσεων ποινής μετατρέπει ένα πρόβλημα περιορισμών σε πρόβλημα ή μια ακολουθία προβλημάτων χωρίς περιορισμούς. Αυτό γίνεται με την τοποθέτηση των περιορισμών στην αντικειμενική συνάρτηση σε παραμέτρους ποινές κατά τρόπο που να τιμωρεί κάθε παραβίαση των περιορισμών.

6.2.2 Interior-Point Methods

Οι μέθοδοι **Interior-Point** είναι παρόμοιες με την **Penalty functions** και μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθούν συναρτήσεις για να μετατρέψουν ένα πρόβλημα με περιορισμούς σε ένα πρόβλημα χωρίς περιορισμούς. Αυτές συναρτήσεις λειτουργούν σαν εμπόδιο αποτρέποντας την επανάληψη να φύγει από την εφικτή περιοχή. Εάν η βέλτιστη λύση εμφανίζεται στο όριο του εφικτού χώρου, η διαδικασία κινείται από το εσωτερικό προς το όριο του τομέα, από το οποίο προκύπτει η ονομασία μέθοδοι εσωτερικού σημείου.

6.2.3 Successive Quadratic Programming (SQP)

Η SQP μέθοδος, επίσης γνωστή ως διαδοχική, ή αναδρομική, τετραγωνική προγραμματισμού, χρησιμοποιούν τη μέθοδο του Νεύτωνα (ή quasi-Newton, μέθοδο) για να λύσει άμεσα τις συνθήκες βέλτιστου Karush-Kuhn-Tucker (KKT)- προϋποθέσεις για το αρχικό πρόβλημα. Ως αποτέλεσμα, το συνοδευτικό υποπρόβλημα καταλήγει να είναι η ελαχιστοποίηση μιας τετραγωνικής σε προσέγγιση Lagrangian συνάρτησης με μια γραμμική προσέγγιση για τους περιορισμούς. Ως εκ τούτου, αυτός ο τύπος της διαδικασίας είναι επίσης γνωστή ως Lagrangian, ή Newton-Lagrange, προσέγγιση. Από

τη φύση της, αυτή η μέθοδος παράγει τόσο αρχέγονες και διπλές (πολλαπλασιαστικής Lagrange) λύσεις.

6.2.4 Κύριες ή αποδεκτές μέθοδοι (primal or feasible methods)

Οι μέθοδοι που κινούνται συνεχώς εντός της αποδεκτής περιοχής (feasible region) του χώρου σχεδιασμού. Αν το αρχικό σημείο είναι εκτός αποδεκτής περιοχής, τότε με κατάλληλες τεχνικές η διαδικασία αναζήτησης βέλτιστης λύσης μεταφέρεται εντός του χώρου αποδεκτών σχεδιασμών, όπου και παραμένει μέχρι να εντοπιστεί κάποιο ακρότατο.

Σε αυτές της μεθόδους συμπεριλαμβάνονται η μέθοδος των αποδεκτών κατευθύνσεων (feasible directions), η μέθοδος της προβολής του διανύσματος των παραγώγων (gradient projection), η μέθοδος των ενεργών συνόλων (active sets) και η μέθοδος της γενικευμένης μειωμένης κλίσης (generalized reduced gradient - GRG).

6.3 Η γλώσσα προγραμματισμού – GAMS

Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιούμε είναι η GAMS 22.8 (General Algebraic Modeling System). Πρόκειται για ένα υψηλού επιπέδου σύστημα που έχει δημιουργηθεί για την αντιμετώπιση προβλημάτων βελτιστοποίησης και για την ανάλυση γραμμικών και μη γραμμικών προβλημάτων συνεχών, ακεραίων και μικτών αριθμών. Η γλώσσα αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για μεγάλα και πολυσύνθετα προβλήματα, ενώ επιτρέπει στο χρήστη να επικεντρωθεί στο πρόβλημα του μοντέλου, με το να καθιστά την οργάνωσή του απλή. Η GAMS δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να αντιμετωπίσει μεγάλα και σύνθετα προβλήματα που απαιτούν πολλές τροποποιήσεις και δοκιμές προκειμένου να δημιουργηθεί ένα τελικό μοντέλο. Επιτρέπει σαφείς δηλώσεις αλγεβρικών σχέσεων με απλό τρόπο, τη χρήση μακρύτερων μεταβλητών, εξισώσεων και ονομάτων δεικτών καθώς επίσης και σχόλια, ορισμούς δεδομένων κ.λπ.

Η GAMS παρέχει ένα περιβάλλον όπου ο χρήστης μπορεί να αναπτύξει ένα μοντέλο ξεκινώντας με ένα μικρό σύνολο στοιχείων και να το επεκτείνει σε ένα πολύ ευρύτερο πλαίσιο, ελέγχοντας την ορθότητα του. Επίσης, ο χρήστης μπορεί γρήγορα και εύκολα

να τροποποιήσει το πρόβλημα, να αλλάξει τη διατύπωση του και να αφαιρέσει ή να προσθέσει επιπλέον μεταβλητές.

Επίσης παρέχει τη δυνατότητα επικοινωνίας των αρχείων της με φύλλα επεξεργασίας του MS Excel, τα οποία χρησιμοποιούνται για εισαγωγή και εξαγωγή δεδομένων γεγονός που διευκολύνει τον έλεγχο και την τροποποίηση του κώδικα ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις.

Η GAMS αφού έχει δημιουργηθεί το μοντέλο από τον χρήστη, τότε καλείται ο κατάλληλος solver για την επίλυση του προβλήματος. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε ο solver CONOPT είναι ένα πρόγραμμα επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης. Ο Conopt βασίζεται στην εφαρμογή του αλγορίθμου γενικευμένης μειωμένης κλίσης – GRG για έρευνα σε εφικτές κατευθύνσεις λύσεων.

Η γενική διαμόρφωση ενός προγράμματος στη γλώσσα **GAMS** είναι:

Inputs

- **Sets**
 - ◆ Declaration
 - ◆ Assignment of members

- **Data (Parameters, Tables, Scalars)**
 - ◆ Declaration
 - ◆ Assignment of values

- **Variables**
 - ◆ Declaration
 - ◆ Assignment of type

- **Assignment of bounds and/or initial values**

- **Equations**
 - ◆ Declaration
 - ◆ Definition

- **Model and Solve statements**

Outputs

- **Echo Print**
- **Symbol Reference Maps**
- **Equation Listings**
- **Status Reports**
- **Results**

6.4 Ο Conopt solver

Ο Conopt solver της GAMS είναι ένας GRG βασιζόμενος αλγόριθμος και ειδικά σχεδιασμένος για μεγάλα μη γραμμικά προβλήματα που ακολουθούν την παρακάτω μορφή:

$$\min \text{ ή } \max f(x)$$

$$\text{με περιορισμό } g(x) = b$$

και

$$x.lo \leq x \leq x.up$$

Όπου x είναι το διάνυσμα των προς βελτιστοποίηση παραμέτρων, l_0 και u_0 είναι το κάτω και πάνω όριο τους b είναι ένα διάνυσμα f, g είναι διαφορίσιμες μη γραμμικές συναρτήσεις που ορίζουν το μοντέλο.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στη GAMS / CONOPT βασίζεται στον αλγόριθμο GRG προτάθηκε πρώτα από τους Abadie και Carpentier (1969). Λεπτομέρειες για τον αλγόριθμο μπορεί να βρεθούν από Drud (1985 και 1992). Εδώ θα δίνεται μια σύντομη περιγραφή από τα σημαντικότερα βήματα σε ένα γενικό αλγόριθμο GRG.

Τα βασικά βήματα του αλγορίθμου γενικευμένης μειωμένης κλίσης είναι:

1. Αρχικοποίηση και εύρεση μιας εφικτής λύσης
2. Υπολογισμός της Ιακωβιανής μήτρας J (Jacobian) των περιορισμών
3. Επιλογή συνόλου από n βασικές μεταβλητές, x_b , τέτοιο ώστε ο πίνακας B (υποπίνακας στηλών βασικών μεταβλητών του J) να είναι αντιστρέψιμος.
4. Παραγοντοποίηση (factorization ή decomposition) του πίνακα B . Οι εναπομείναντες μεταβλητές, x_n , λέγονται μη βασικές
5. Επίλυση της $B^T u = \frac{df}{dx_b}$ για τους πολλαπλασιαστές u
6. Υπολογισμός της μειωμένης κλίσης (reduced gradient), $r = \frac{df}{dx}$, ορισμού $r=0$ για τις βασικές μεταβλητές
7. Εάν η προβολή της τιμής του r στα όρια είναι μικρή, τότε stop. Το τρέχον σημείο είναι κοντά στο βέλτιστο
8. Επιλογή συνόλου υπερβασικών μεταβλητών (superbasic variables), x_s , ως υποσύνολο των μη βασικών μεταβλητών, και εύρεση κατεύθυνσης έρευνας, d_s , για τις υπερβασικές μεταβλητές βασισμένη στην r_s ή/και από πληροφορίες από παραγώγους δεύτερης τάξης
9. Εκτέλεση έρευνας γραμμής κατά μήκος της κατεύθυνσης d . Για κάθε βήμα, η τιμή του x_s μεταβάλλεται στην κατεύθυνση d_s και η τιμή του x_b προσαρμόζεται ανάλογα, ώστε να ικανοποιεί τη σχέση $g(x_b, x_s) = b$ μέσω μιας quasi-Newton διαδικασίας (Taylor approximations), που χρησιμοποιεί το παραγοντοποιημένο πίνακα B του βήματος 4
10. Επιστροφή στο βήμα 2

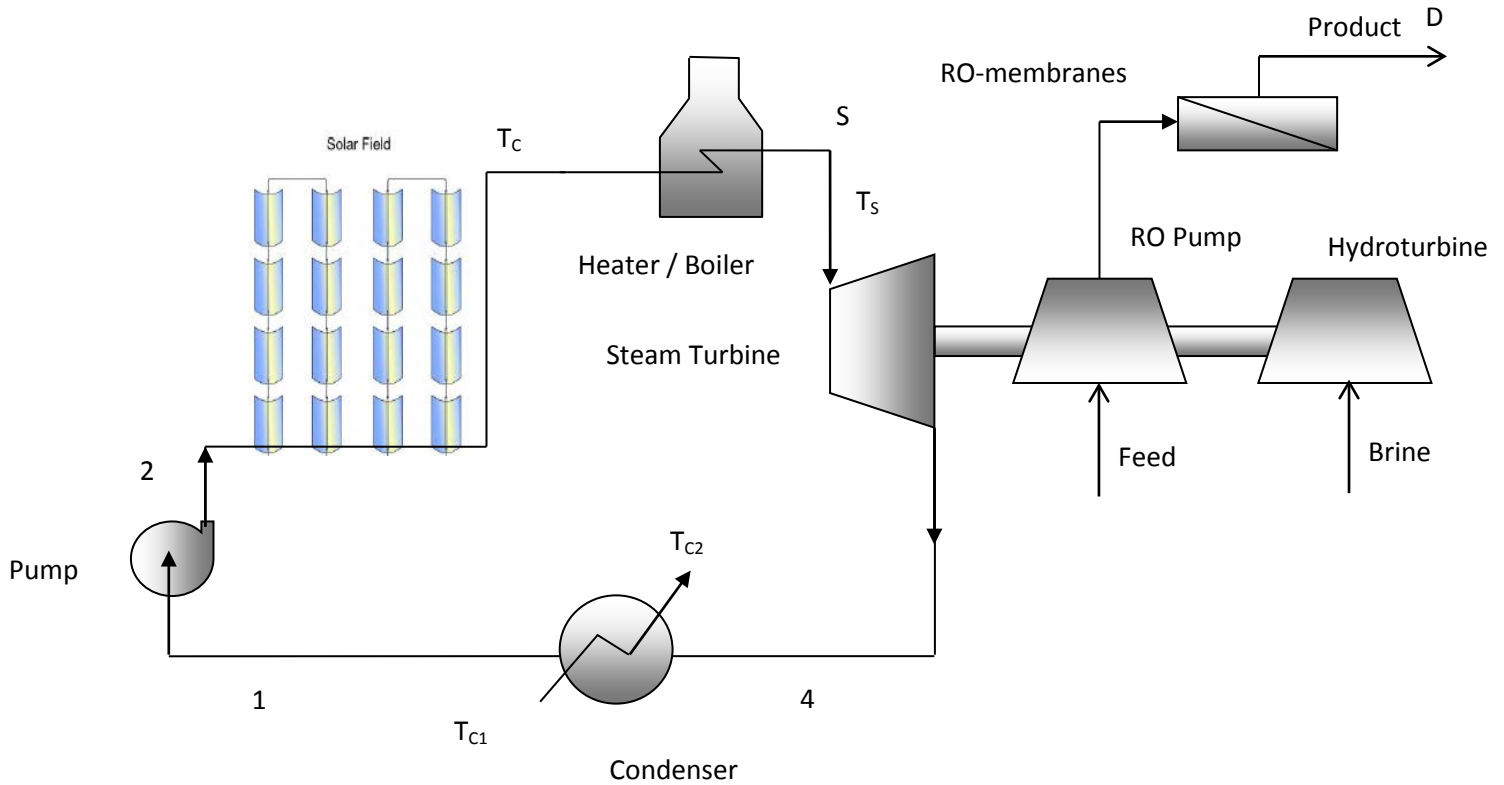
7. Ανάπτυξη του μοντέλου

7.1 Περιγραφή του μοντέλου

Στην παρούσα μελέτη έγινε η ανάλυση και μαθηματική μοντελοποίηση μιας μονάδας αντίστροφης όσμωσης (RO), αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας και συγκεκριμένα με τη χρήση των ηλιακών κυλινδροπαραβολικών συλλεκτών. Είναι ένα υβριδικό σύστημα που χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια και την χρήση ενός λέβητα συμβατικού καυσίμου όπου κινεί έναν ατμοστρόβιλο μέσω ενός κύκλου ατμού Rankine έτσι ώστε να παράσχει την απαιτούμενη ισχύ στον άξονα του για να οδηγήσει την αντλία υψηλής πίεσης της μονάδας αντίστροφης όσμωσης (RO). Το σχεδιαστικό πρόβλημα αφορούσε τον καθορισμό των βέλτιστων χαρακτηριστικών της μονάδας όσον αφορά τα στοιχεία των απαιτούμενων μεμβρανών και το μέγεθος της απαιτούμενης διάστασης του πεδίου των ηλιακών κυλινδροπαραβολικών συλλεκτών για διαφορετικά επίπεδα ισχύος και διάφορα επιθυμητά όρια παραγωγής αφαλατωμένου νερού, βασικό περιορισμό την ελαχιστοποίηση του κόστους όλης μονάδας. Το πρόβλημα σχεδιασμού λαμβάνει υπόψη του κλιματολογικά χαρακτηριστικά έτσι ώστε με τη χρήση μεθόδων μη γραμμικού προγραμματισμού να γίνει εξεύρεση της βέλτιστης λύσης για το μέγεθος τόσο του ηλιακού πεδίου του κύκλου ισχύος και της μονάδας αντίστροφης όσμωσης ελαχιστοποιώντας την αντικειμενική συνάρτηση του συνολικού ετήσιου κόστους της μονάδας.

Η μονάδα αφαλάτωσης RO με τη βοήθεια ηλιακών κυλινδροπαραβολικών συλλεκτών αποτελείται κυρίως από το τμήμα μεμβρανών διαχωρισμού (διάφορες μεμβράνες συνδέονται μεταξύ τους), το οποίο τροφοδοτείται μέσω μιας υψηλής πίεσεως παλινδρομική αντλία (πιέζει τη ροή τροφοδοσίας μέχρι τα επιθυμητά επίπεδα πίεσης), και η οποία έχει συνδεθεί με ένα υδροστρόβιλο, για την ανάκτηση ενέργειας από τη ροή της άλμης που εκτοπίζεται από το προς αφαλάτωση νερό. Το διήθημα δηλαδή το αφαλατωμένο νερό αφήνοντας τις μεμβράνες αποτελεί το καθαρό προϊόν της μονάδας. Το υβριδικό σύστημα των ηλιακών κυλινδροπαραβολικών συλλεκτών και του λέβητα συμβατικού καυσίμου παρέχει την απαιτούμενη ισχύ στην αντλία υψηλής πίεσης της μονάδας αφαλάτωσης η οποία είναι κατάλληλα διασυνδεδεμένη στον ατμοστρόβιλο και κινείται μέσω των στροφών του. Η θερμότητα παρέχεται είτε από

ηλιακούς συλλέκτες και / ή το λέβητα, όπου το νερό (υγρό εργασίας του Rankine κύκλου) εξατμίζεται και στη συνέχεια υπερθερμαίνεται μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ του λαδιού που ρέει στον κυλινδροπαραβολικό συλλέκτη και του νερού. Ο υπέρθερμος ατμός εισέρχεται σε μια τουρμπίνα, όπου η ενέργεια εκτονώνεται μέσω των ακροφυσίων της τουρμπίνας ο άξονας της οποίας οδηγεί την RO αντλία υψηλής πίεσης. Το ρευστό που εξέρχεται από τον ατμοστρόβιλο είναι ατμός, αλλά σε χαμηλή πίεση και σχετικά χαμηλή θερμοκρασία. Στην συνέχεια περνώντας από τον συμπυκνωτή επιστρέφει στην υγρή κατάσταση όπου λανθάνουσα θερμότητα του εξάγεται. Αφού περάσει μέσα από το συμπυκνωτή, το υγρό διοχετεύεται σε υψηλή πίεση να διαπεράσει το υβριδικό σύστημα και ο κύκλος επαναλαμβάνεται. Στο υβριδικό σύστημα οι ηλιακοί κυλινδροπαραβολικών συλλέκτες και ο λέβητας συμβατικού καυσίμου λειτουργούν παράλληλα, έτσι ώστε ο λέβητας να παρέχει την ενδεχομένως πρόσθετη ενέργεια για την παραγωγή ατμού υψηλής πίεσης. Η προτεινόμενη μέθοδος παρουσιάζεται στην Εικόνα 24 .



Εικόνα.24 Το σύστημα αφαλάτωσης RO με τη χρήση ηλιακών κυλινδροπαραβολικών συλλεκτών

7.3 Μαθηματική μοντελοποίηση της μονάδας

Η θερμότητα που απορροφάται από τον απορροφητή στον κυλινδροπαραβολικό ηλιακό συλλέκτη είναι συνάρτηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του συλλέκτη, της θερμοκρασίας του ρευστού λειτουργίας και της θερμοκρασίας αέρα. Δίνεται από τις σχέσεις του κεφαλαίου 3 όπου και τις επαναλαμβάνουμε:

$$q_u = C_r S_\alpha - h_{rad,a-c}(T_a - T_c) \quad (7.1)$$

$$S_\alpha = I_b r(\psi\tau\alpha)_n K_{\psi\tau\alpha}(\theta) \quad (7.2)$$

$$h_{rad,a-c} = \frac{\sigma(T_a^2 + T_c^2) + (T_a + T_c)}{\frac{1-\varepsilon_a}{\varepsilon_a} + \frac{1}{F_{ac}} + \frac{(1-\varepsilon_c)D_{a,ext}}{\varepsilon_c D_{c,int}}} \quad (7.3)$$

$$C_r = \frac{A_{ref}}{A_r} \quad (7.4)$$

Το ηλιακό σύστημα αφαλάτωσης που παρουσιάζεται στην Εικόνα 24 ουσιαστικά αποτελείται από ένα κύκλο ατμού που μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε μηχανική στον άξονα του ατμοστρόβιλου ανάμεσα σε δύο ακραίες θερμοκρασίες για την κυκλοφορία του ατμού.

Ο ατμός που εισέρχεται στο στρόβιλο είναι υπέρθερμος σε θερμοκρασία T_s , ενώ η κατάσταση του ατμού που εξέρχεται από το στρόβιλο είναι συνήθως μίγμα υγρού ατμού υψηλής ποιότητας, εισέρχεται στον συμπυκνωτή όπου και συμπυκνώνεται, υπό σταθερή πίεση, αποβάλλοντας θερμότητα. Ο ατμός βγαίνει από τον συμπυκνωτή σαν κορεσμένο υγρό και εισέρχεται στην αντλία, για να κλείσει έτσι το κύκλο. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, ξεκινώντας από ανατολή του ηλίου, η θερμότητα που απορροφάται από το συλλέκτη ανεβάζει τη θερμοκρασία του λαδιού ρευστού και στην συνέχεια η θερμότητα αυτή απορροφάται μέσω ενός εναλλάκτη όπου εξατμίζει το κορεσμένο νερό εισόδου και η θερμοκρασία του ατμού ποικίλει κατά τη διάρκεια της ημέρας και κυμαίνονται από T μέχρι T_s , ανάλογα με το αν η αντίστοιχη ηλιακή ακτινοβολία είναι επαρκής για την επίτευξη της συγκεκριμένης θερμοκρασίας- στόχος. Προφανώς, όταν αυτό δεν είναι εφικτό για μερικές ημέρες του έτους, η απαιτούμενη πρόσθετη ενέργεια παρέχεται από το λέβητα (ένα γεγονός που είναι αναπόφευκτο, ειδικά κατά τη διάρκεια της νύχτας).

Το τμήμα των μεμβρανών διαχωρισμού αποτελείται από N παράλληλες μεμβράνες (modules) όπου σχηματίζουν μια διαμόρφωση μονού σταδίου RO. Η πίεση του νερού τροφοδοσίας είναι ομοιόμορφα κατανομημένη σε όλες τις μεμβράνες της RO και διαχωρίζει στη συνέχεια το καθαρό νερό (αφαλατωμένο) και το συμπυκνωμένο ρεύμα της άλμης.

Η συνολική μάζα ισορροπία μάζας για αυτό το μονό στάδιο του συστήματος δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$F = B + D \quad (7.5)$$

Το ισοζύγιο μάζας αλατότητας για το ενιαίο-μονό στάδιο δίνεται από τη σχέση:

$$Fc_f = Bc_b + Dc_D \quad (7.6)$$

Το συνολικό ποσοστό διείσδυσης του νερού και η ροή διηθήματος δίνεται από το ακόλουθη σχέση^[24]:

$$Jp = NA^*S_m[P - \varepsilon^*(c_L - c_D)]g \quad (7.7)$$

Για τη μεταφορά της μάζας της άλμης η ροή των αλάτων υποτίθεται ότι είναι ανάλογη με τη διαφορά συγκέντρωσης σε όλη την μεμβράνη^[24] έτσι μπορούμε να γράψουμε

$$Jp = NB^* \frac{c_L - c_D}{c_D} \quad (7.8)$$

Με την εφαρμογή του μοντέλου stagnant film, η ροή του διηθήματος μπορεί να είναι μοντελοποιηθεί από την ακόλουθη σχέση:

$$Jp = Nk^* \ln \frac{c_L - c_D}{c_B - c_D} \quad (7.9)$$

Ο συντελεστής μετατροπής της μονάδας αφαλάτωσης μιας RO εγκατάστασης ορίζεται ως εξής:

$$Y = \frac{D}{F} \quad (7.10)$$

Οι εξισώσεις 7.5 έως 7.10 αποτελούν το μαθηματικό μοντέλο των μεμβρανών. Το σύστημα των μη γραμμικών εξισώσεων που εμπλέκονται θα πρέπει να πρέπει να επιλυθούν ταυτόχρονα, λόγω της παρουσίας από μεταβλητές επανάληψης.

Επιπλέον, ορισμένοι λειτουργικοί περιορισμοί σχετικά με τη λειτουργική όρια των μεμβρανών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

Ειδικότερα, ένα μέγιστο παροχής τροφοδοσίας ανά μεμβράνη οριοθετείται έτσι ώστε η πτώση πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης να είναι σε ένα ελάχιστο επίπεδο:

$$F \leq NF^{MAX} \quad (7.11)$$

Επιπλέον, μια ελάχιστη παροχή άλμης ανά μεμβράνη :

$$B \geq NB^{MIN} \quad (7.12)$$

Επιπλέον περιορισμοί σχεδιασμού περιλαμβάνουν τον περιορισμό στην δυναμικότητα παραγωγής (production capacity) καθώς και τον περιορισμό της ποιότητας για την παραγωγή αφαλατωμένου νερού και αυτοί οι δύο περιορισμοί διατυπώνονται με τις παρακάτω δύο εξισώσεις :

$$D \geq D^* \quad (7.13)$$

$$c_D \leq c_D^* \quad (7.14)$$

Η συμπίεση της προς αφαλάτωση τροφοδοτούμενης ροής στην RO επιτυγχάνεται μέσω μιας παλινδρομικής αντλίας υψηλής πίεσης. Η ισχύς που απαιτείται για τη συμπίεση αυτή υπολογίζεται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_p = \frac{F\Delta P}{n_p} \quad (7.15)$$

Η ισχύς που ανακτάται από τον υδροστρόβιλο υπολογίζεται ως εξής:

$$P_T = B\Delta P n_T \quad (7.16)$$

Οι συνολικές απαιτήσεις ισχύος που παρέχεται μέσω του άξονα από την τουρμπίνα ατμού δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση ως η διαφορά μεταξύ της ισχύος που απαιτείται από την αντλία από αυτή που ανακτάται από τον υδροστρόβιλο:

$$P_{RP} = P_p - P_T = \frac{P_{ST}}{n_{ST}} \quad (7.17)$$

Η πραγματική ισχύς του αμοστροβίλου υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$P_{ST} = \dot{m}(h_5 - h_4) \quad (7.18)$$

Υποθέτοντας μηδενικές απώλειες στον εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ του θερμού λαδιού και νερού^[20] και εφαρμόζοντας την ισορροπία ενθαλπίας γύρω από δύο πλευρές του κύκλου ατμού καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι

$$P_{ST} + Q_{CD} = Q_B + Q_C \quad (7.19)$$

και

$$Q_B + Q_C = \dot{m}(h_5 - h_1) \quad (7.20)$$

$$Q_{CD} = \dot{m}(h_4 - h_1) \quad (7.21)$$

Η απαιτούμενη επιφάνεια για τον συμπυκνωτή υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q_{CD} = UA_{CD} \left[\frac{(T_3 - T_{C1}) - (T_1 - T_{C2})}{\ln(T_3 - T_{C1}) / (T_1 - T_{C2})} \right] \quad (7.22)$$

Ενώ η ισχύς που απαιτείται στην αντλία κυκλοφορητή προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$P_{CP} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (7.23)$$

Το συνολικό ετήσιο ποσό της ενέργειας που παρέχεται από τους συλλέκτες δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Q_{CT} = \sum_{j=1}^{365} \int_0^{t_0} Q_C \quad (7.24)$$

Ως αποτέλεσμα, ετήσια ενέργεια του λέβητα και η αντίστοιχη κατανάλωση καυσίμου μπορεί να υπολογιστεί αναλόγως:

$$E_{BT} = \frac{\sum_{j=1}^{365} \int_0^{td} (Q_B - Q_C) dt - Q_{CT}}{n_B} \quad (7.25)$$

$$z = \frac{E_{BT}}{\Delta H_f} \quad (7.26)$$

Όσον αφορά το λέβητα, λαμβάνοντας υπόψη την αντικειμενική συνάρτηση του κόστους, η ισχύς που απαιτείται από τον λέβητα υπολογίζεται ως η μέγιστη:

$$P_B = \max[Q_{Bj}/j = 1, \dots, 365] \quad (7.27)$$

Το κόστος κεφαλαίου της μονάδας (capital cost) δίνεται από το ακόλουθη εξίσωση:

$$C_{CP} = a_c(A_C)^{\beta_c} + a_{ST}(P_{ST})^{\beta_{ST}} + a_{CP}(P_{CP})^{\beta_{CP}} + a_B(P_B)^{\beta_B} + a_H(A_{CD})^{\beta_H} + a_P(P_P)^{\beta_P} + a_T(P_T)^{\beta_T} + \frac{NC_M}{et_M} \quad (7.28)$$

Σε αυτή την έκφραση, το κόστος κεφαλαίου της μονάδας αποτελείται από οκτώ βασικά συστατικά. Ο πρώτος όρος της εξίσωσης 7.28 αντιπροσωπεύει το κόστος κεφαλαίου των συλλεκτών, ο δεύτερος το αντίστοιχο κόστος κεφαλαίου του ατμοστροβίλου, ο τρίτος της αντλίας-κυκλοφορητή, ο τέταρτος του ατμολέβητα, ο πέμπτος του συμπυκνωτή, ο έκτος της παλινδρομικής αντλίας της RO, ο έβδομος του υδροστροβίλου και ο τελευταίος το κόστος αγοράς του ολόκληρη σειράς από ενότητες μεμβρανών, όπου η μέγιστη διάρκεια ζωής της κάθε μεμβράνης λήφθηκε υπόψη.

Το κόστος λειτουργίας της μονάδας υπολογίζεται από η ακόλουθη εξίσωση:

$$C_{OP} = zC_{FL} \quad (7.29)$$

Σε αυτή την έκφραση, το κόστος λειτουργίας της μονάδας είναι συνάρτηση της συνολικής κατανάλωσης καυσίμων. Έχει υποτεθεί ότι το κόστος του νερού ψύξης που χρησιμοποιείται είναι μηδέν, δεδομένου ότι θαλασσινό νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σκοπό αυτό. Ο χρόνος λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$t_{OP} = n_{\gamma} t_D - t_{idle} \quad (7.30)$$

όπου υποτίθεται ότι η μονάδα μπορεί να αναστείλει τη λειτουργία της για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (t_{idle}).

Το συνολικό ετήσιο κόστος της μονάδας δίνεται από η ακόλουθη εξίσωση:

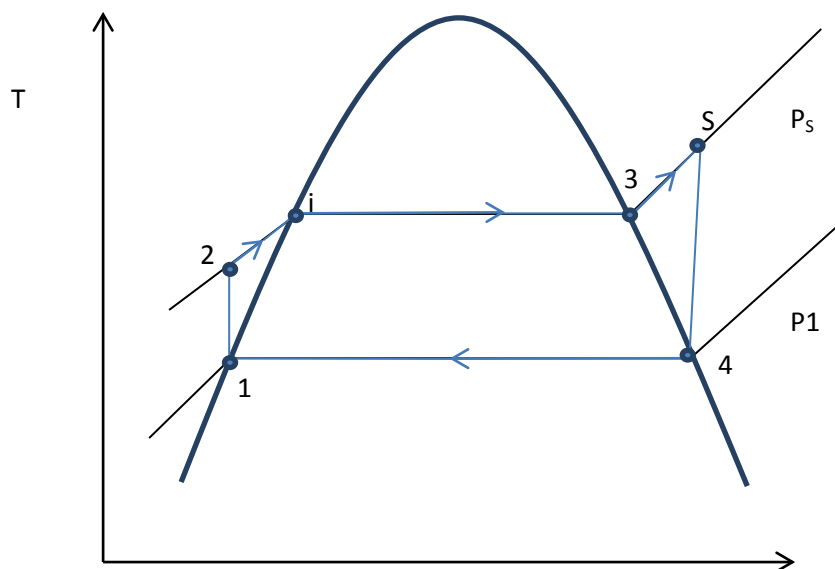
$$C_T = e C_{CP} + t_{OP} C_{OP} \quad (7.31)$$

Ο στόχος του σχεδιασμού της μονάδα αφαλάτωσης με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού ετήσιου κόστος σε σχέση με μια ορισμένη ποιότητα των προϊόντων και τους περιορισμούς ζήτησης- ποσότητας και ποιότητας παραγόμενου νερού. Λαμβάνοντας υπόψη τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά της τοποθεσίας, το είδος των ηλιακών συλλεκτών, το είδος των μεμβρανών, την επιθυμητή παραγωγική ικανότητα της μονάδας, υπάρχουν επτά μεταβλητές σχεδιασμού που πρέπει να υπολογιστούν μέσω της ελαχιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης κόστους: η πίεση και θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου του ατμού, η πίεση λειτουργίας της RO μονάδας, η παροχή-ροή του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας, η αναλογία μετατροπής Y της μεμβράνης, η συνολική επιφάνεια των ηλιακών συλλεκτών, ο χρόνος αδράνειας της μονάδας. Για τον ατμό η πίεση και θερμοκρασία περιορίζονται από τεχνικούς περιορισμούς:

$$P_s \leq P_{s,max} \quad (7.32)$$

$$T_s \leq T_{s,max} \quad (7.33)$$

Η ειδική ενθαλπία και εντροπία του νερού στις διάφορες φάσεις του μπορεί να υπολογιστεί από τις ακόλουθες εξισώσεις, υποθέτοντας ένα ιδανικό κύκλο Rankine για τη λειτουργία του νερού. Τα στάδια του κύκλου Rankine είναι αριθμημένα στο Σχήμα 10. Όπου αναλυτικά έχουμε και παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα τα επιμέρους στάδια του εργαζόμενου ρευστού του νερού δηλαδή.



Σχήμα. 10 Το κύκλο Rankine της μονάδας- Διάγραμμα θερμικής εντροπίας

- Αντιστρεπτή αδιαβατική (ισεντροπική) συμπίεση σε μια αντλία-κυκλοφορητή, 1-2
- Μεταφορά θερμότητας, υπό σταθερή πίεση, από το ηλιακό πεδίο και τον λέβητα, 2-i-3-S
- Αντιστρεπτή αδιαβατική (ισεντροπική) εκτόνωση στον ατμοστρόβιλο, S-4
- Αποβολή θερμότητας στον συμπυκνωτή, υπό σταθερή πίεση, 4-1

Στο σημείο 1 έχουμε συμπυκνωμένο κορεσμένο νερό που εξέρχεται από το συμπυκνωτή . Οπότε η ενθαλπία του υπολογίζεται από τον τύπο:

$$h_1 = 4186.8(T_1 - 273.15) \tag{7.34}$$

και ο ειδικός του όγκος:

$$u_1 = 3.104304 * 10^{-3}V[1 - 0.344\Gamma] \tag{7.35}$$

Όπου

$$V = 0.33593 - 5.2453267 * 10^{-4}T_1 + 3.6263003 * 10^{-6}T_1^2 - 7.4667901 * 10^{-9}T_1^3 + 6.346708 * 10^{-12}T_1^4 \quad (7.36)$$

Για $T \leq 518 K$

Και

$$\Gamma = 0.29607 - 1.3973428 * 10^{-4}T_1 - 1.1556161 * 10^{-7}T_1^2 \quad (7.37)$$

Για $T < 647.3 K$

Στο σημείο S έχουμε υπέρθερμο ατμό σε πίεση $P=P_S$ και θερμοκρασία $T=T_S$.

Επομένως η ενθαλπία του υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$h_S = F + 101.31358 \left\{ F_0 \frac{P_S}{101325} + \frac{B_0}{2} \left(\frac{P_S}{101325T} \right)^2 [-B_6 + B_0(B_2 - B_3 + B_0 B_7 \left[\frac{P_S}{101325T_S} \right]^2)] \right\} \quad (7.38)$$

Όπου

$$B = B_0 \left\{ 1 + \frac{B_0 P_S}{101325 T_S^2} [B_2 - B_3 + \left(\frac{B_0 P_S}{101325 T_S} \right)^2 (B_4 - B_5)] \right\} \quad (7.39)$$

$$B_0 = 1.89 - B_1 \quad (7.40)$$

$$B_1 = \frac{2641.62}{T_S} 10^{80870/T_S^2} \quad (7.41)$$

$$B_2 = 82.546 \quad (7.42)$$

$$B_3 = 162460/T_S \quad (7.43)$$

$$B4 = 0.21828T_s \quad (7.44)$$

$$B5 = 126970T_s \quad (7.45)$$

$$B6 = BoB3 - 2Fo(B2 - B3) \quad (7.46)$$

$$B7 = 2Fo(B4 - B5) - BoB5 \quad (7.47)$$

$$Fo = 1.89 - B1\left(\frac{372420}{T_s^2} + 2\right) \quad (7.48)$$

$$F = 1804036.3 + 1472.265T_s + 0.37789824T_s^2 + 47845.137\ln T_s \quad (7.49)$$

Και η εντροπία του από τη σχέση:

$$s_s = 1472.2626\ln T_s - 461.4874\ln P_s + 0.7557174T_s + 3830.4065 - \frac{47845.076}{T_s} - 101.31344\beta \quad (7.50)$$

$$\text{Και} \quad \beta = \frac{1}{T_s} \left\{ (Bo - Fo) \frac{P_s}{101325} + \frac{Bo}{2} \left(\frac{P_s}{101325} \right)^2 \left(B6 + \frac{1}{2} \left(\frac{BoP_s}{101325T_s} \right)^2 [Bo(B4 - B5) - 2B7] \right) \right\} \quad (7.51)$$

Η ενθαλπία στην είσοδο του ηλιακού πεδίου (σημείο 2) υπολογίζεται ως εξής: σε μία διαδικασία (συμπύεση του υγρού νερού από την αντλία στην προκειμένη περίπτωση) η ανά μονάδα μάζας μεταφορά θερμότητας είναι:

$$dQ = du + pdu$$

Το διαφορικό της ενθαλπίας είναι:

$$dh = du + p du + u dp$$

Αν η διαδικασία είναι αδιαβατική, τότε $dQ = 0$

Οπότε:

$$da\delta = u dp$$

Ολοκληρώνοντας την παραπάνω σχέση, θα έχουμε

$$(h_1 - h_2)_{a\delta} = \int_{P_1}^{P_2} u dp \quad (7.52)$$

Αν θεωρήσουμε το υγρό ασυμπιέστο, τότε

$$(h_1 - h_2)_{a\delta} = u_1(P_2 - P_1) \quad (7.53)$$

Και έτσι υπολογίζεται η h_2 καθώς γνωρίζουμε τον ειδικό όγκο u_1 και την h_1 στην θερμοκρασία επιστροφής του κορεσμένου νερού στο συμπυκνωτή.

Επίσης επειδή έχουμε ισεντροπική εκτόνωση του ατμού θα ισχύει:

$$s_4 = s_5 \quad (7.54)$$

Και η ποιότητα ατμού X_4 κατά την έξοδό του από την τουρμπίνα όπου είναι ένα μίγμα υγρού και ατμού υπολογίζεται:

$$X_4 = \frac{s_4 - s_f}{s_{fg}} \quad (7.55)$$

Και η ενθαλπία

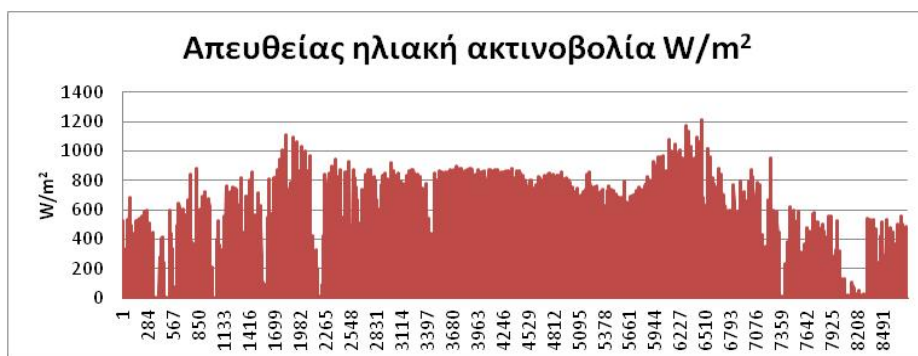
$$h_4 = h_f + X_4 h_{fg} \quad (7.56)$$

Όπου ο υπολογισμός των μεγεθών με δείκτες f και fg αναφέρονται σε υγρό κορεσμένο νερό και κορεσμένο ατμό αντίστοιχα και λαμβάνονται από τους Πίνακες κορεσμένου νερού στην πίεση συμπύκνωσης (Παράρτημα).

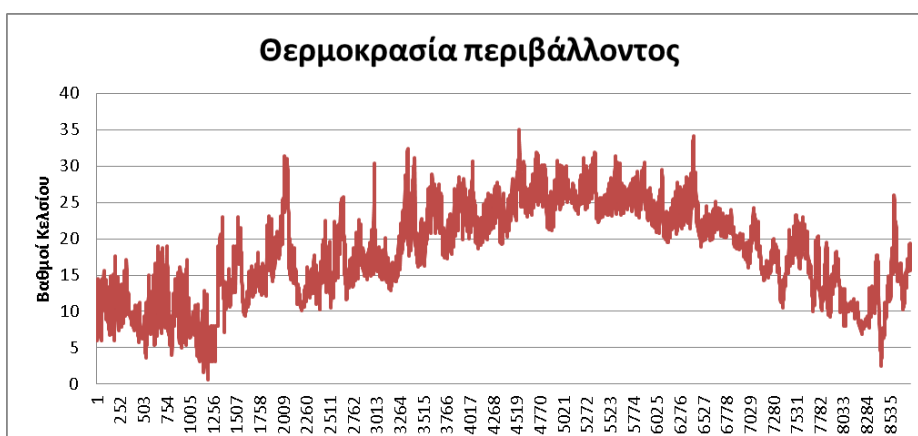
7.2 Κλιματολογικά δεδομένα

Σε γενικές γραμμές, ο σχεδιασμός των συστημάτων μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε άλλες μορφές εξαρτάται από τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Για το σχεδιασμό του παραπάνω συστήματος πάρθηκαν υπόψη τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά και μετρήσεις στην περιοχή του Πολυτεχνείου Κρήτης από το Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΕΗΚΑΠΕ) του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Συγκεκριμένα για την ηλιακή ακτινοβολία η απευθείας ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο [W/m^2] κάθε ώρα της ημέρας για ένα χρόνο για το έτος 2003 δίνεται στο Σχήμα 8. Ενώ αντίστοιχα η θερμοκρασία περιβάλλοντος στο Σχήμα 9.



Σχήμα.8 Απευθείας ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο [W/m^2] κάθε ώρα της ημέρας για ένα χρόνο για το έτος 2003



Σχήμα.9 Θερμοκρασία περιβάλλοντος ($^{\circ}C$) για κάθε ώρα της ημέρας για ένα χρόνο για το έτος 2003

8. Σχεδιασμός - Αποτελέσματα προσομοίωσης

Για τον σχεδιασμό του συστήματος αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης με τη χρήση κυλινδροπαραβολικών ηλιακών συλλεκτών αν δίνεται η ζητούμενη παραγωγή ασφαλωμένου νερού σε ετήσια βάση με τα προκαθορισμένα χαρακτηριστικά του καθώς και οι κλιματολογικά χαρακτηριστικά της υπό μελέτη περιοχής σε ετήσια αλλά και ωριαία βάση μπορούν να υπολογιστούν ως βέλτιστες λύσεις με τη ελαχιστοποίηση του κόστους όλου του συστήματος- (αντικειμενική συνάρτηση κόστους) το κατάλληλο μέγεθος του εξοπλισμού (αριθμός μεμβρανών για την αφαλάτωση, μέγεθος της αντλίας υψηλής πίεσης καθώς και της υδροστροβίλου όπως επίσης και του ατμοστροβίλου και του λέβητα που πρέπει να εγκατασταθούν). Επίσης δύναται να υπολογιστούν οι βέλτιστες οικονομικά συνθήκες λειτουργίας όσον αφορά την πίεση λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης ο συντελεστής μετατροπής και ενδεχόμενος χρόνος αδράνειας αναμονής της μονάδας.

Για την ανάλυση της προσομοίωσης του μοντέλου εκτός από την ανάλυση συγκεκριμένου εξοπλισμού, τα χαρακτηριστικά του νερού τροφοδοσίας (προς αφαλάτωση νερού) πρέπει να ληφθούν υπόψη. Το νερό τροφοδοσίας χαρακτηρίζεται γενικά από την αλατότητα του (συνήθως εκφράζεται ως συγκέντρωση των ολικών διαλυμένων στερεών). Στην παρούσα εργασία η περίπτωση της αφαλάτωσης θαλασσινού νερού υποτίθεται, και για το σκοπό αυτό η DuPont B-10 διαπερατή μεμβράνη έχει επιλεγεί, η οποία είναι κατάλληλη για την επεξεργασία θαλασσινού νερού (35.000ppm). Τα χαρακτηριστικά διαπερατότητας και οι γεωμετρικές ιδιότητες αυτών των μεμβρανών αυτών δίνονται στον Πίνακα 10 και οι τεχνικές προδιαγραφές κυλινδροπαραβολικού συλλέκτη πειραμάτων υπό σταθερές συνθήκες στον Πίνακα 9. Τα αριθμητικά στοιχεία που αφορούν κεφαλαιακό και λειτουργικό κόστος των συνιστωσών όλων των υποσυστημάτων που ελήφθησαν υπόψη επίσης παρατίθενται στον Πίνακα 10. Τα επίπεδα θερμοκρασίας του κυκλοφορούντος ατμού στο ηλιακό σύστημα είναι 450° C (μέγιστη επιτρεπόμενη) για το τμήμα υψηλής πίεσης (μέγιστη πίεση 45bar) και 100°C για το τμήμα χαμηλής πίεσης. Η θερμοκρασία και πίεση του ατμού που εισέρχεται στο στρόβιλο ατμού, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι μεταβλητές σχεδιασμού. Κατά τη διάρκεια όλων των μελετών βελτιστοποίησης,

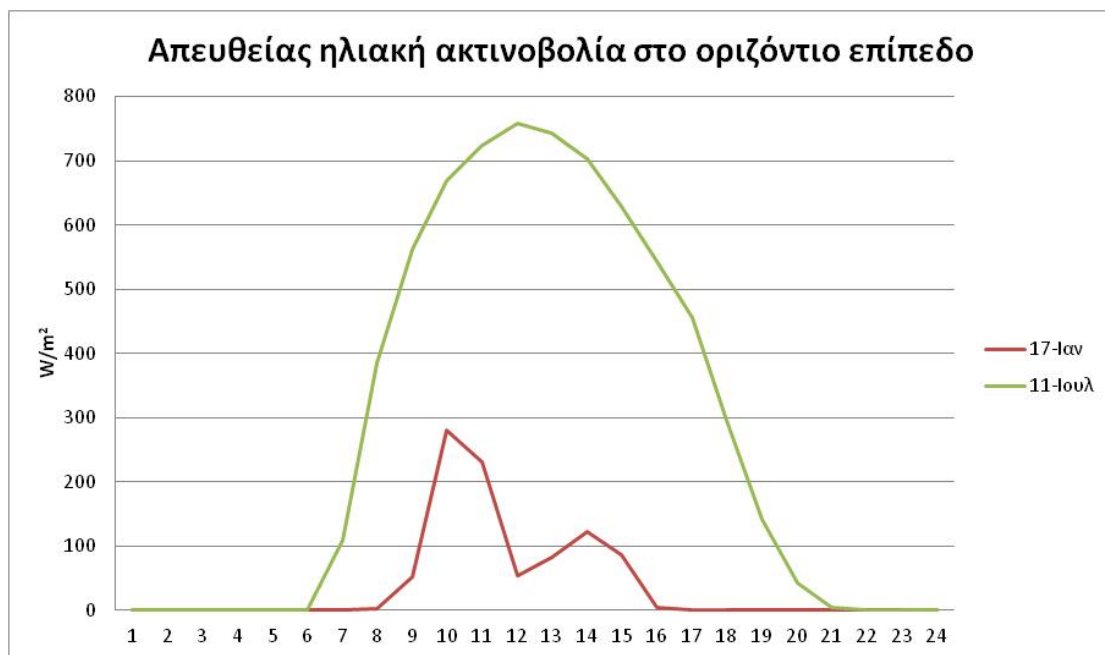
θεωρείται κατ' ανώτατο όριο επιτρεπόμενων τιμών 450°C και 45bar για το τμήμα του υπέρθερμου ατμού. Η πίεση λειτουργίας του συμπυκνωτή P₁ είναι 1bar και η θερμοκρασία που βγαίνει από το συμπυκνωτή το νερό είναι 100°C.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης για τον προσδιορισμό των βέλτιστων δομών κόστους, για όλες τις περιπτώσεις οικονομικών μεγεθών που περιγράφονται προηγουμένως, έγινε με τεχνικές μη-γραμμικού προγραμματισμού (NLP) και τη βοήθεια της γλώσσας προγραμματισμού GAMS και τον solver Conopt. Σκοπός ήταν να βρεθεί η βέλτιστη λύση για το σύστημα έχοντας ως δεδομένα την ζητούμενη παραγωγή καθώς και τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Στην προσομοίωση ο χρόνος αναμονής της μονάδας θεωρήθηκε μηδενικός δηλαδή λειτουργεί όλη τη διάρκεια του έτους.

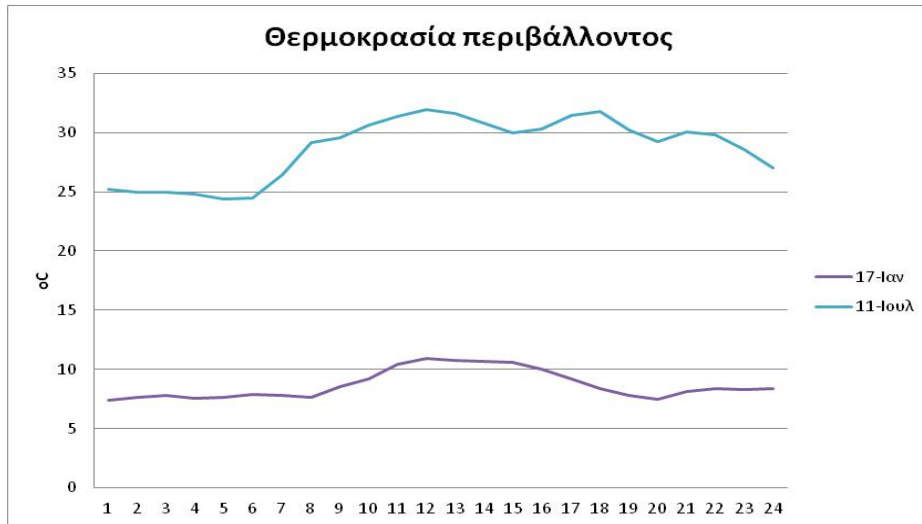
Πίνακας.9 Τεχνικές προδιαγραφές κυλινδροπαραβολικού συλλέκτη πειραμάτων υπό σταθερές συνθήκες.	
Μήκος αποδέκτη (L)	7.8 m
Άνοιγμα αποδέκτη (W)	5 m
Εστιακή απόσταση	1.84 m
Εσωτερική διάμετρος απορροφητή (D _{a,int})	0.066 m
Εξωτερική διάμετρος απορροφητή (D _{a,ext})	0.070 m
Θερμική αγωγιμότητα απορροφητή (k _a)	54 W/(mK)
Εσωτερική διάμετρος καλύμματος (D _{c,int})	0.109 m
Εξωτερική διάμετρος καλύμματος (D _{c,ext})	0.115 m
Βαθμός συγκέντρωσης (C _r)	22.42
Απορροφητικότητα απορροφητή (α _a)	0.905
Εκπεψιμότητα απορροφητή (ε _a)	0.1378
Διαπερατότητα καλύμματος (τ _c)	0.95
Απορροφητικότητα καλύμματος (α _c)	0.02
Εκπεψιμότητα καλύμματος (ε _c)	0.86
Ανακλαστικότητα κατόπτρου (r)	0.93
Συντελεστής παρεμπόδισης ακτίνων (ψ)	0.92
Πολική γωνία κλίσης (Φ)	0°
Συντελεστής διόρθωσης οπτικών ιδιοτήτων (K _{opt})	1
Οπτική απόδοση (η _{opt})	0.736

Πίνακας.10 Δεδομένα σχεδιασμού και κόστους	
A^* (m/s/bar)	3.0×10^{-8}
B^* (m/s)	4.0×10^{-9}
k^* (m/s)	1
ΔP (bar)	60
g	0.91
S_m (m ²)	152
F_{max} (cm ³ /s)	480
B_{min} (cm ³ /s)	300
α_{ST} (\$/kW)	4750
β_{ST}	0.75
A_P (\$/kW)	800
β_P	0.8
α_T (\$/kW)	3500
β_T	0.47
α_{CP} (\$/kW)	1500
β_{CP}	0.8
α_C (\$/m ²)	150
β_C	0.95
α_H (\$/m ²)	150
β_H	0.8
t_M (y)	5
c_z (\$/kg)	0.5
c_M (\$/module)	7500
η_{ST}	0.85
η_P	0.7
η_T	0.7
η_B	0.85
T_{c1} (°C)	25
T_{c2} (°C)	45
$T_{s,max}$ (°C)	450
$P_{s,max}$ (bar)	45
t_{op} (h/y)	8760
e	0.1
c^*_D (ppm)	500

Για την προσομοίωση δύο ακραίες καταστάσεις παρουσιάζονται παρακάτω όσον αφορά τις κλιματολογικές συνθήκες, μια κρύα μέρα του χειμώνα (17 Ιανουαρίου) και μια ζεστή μέρα το καλοκαίρι (11 Ιουλίου). Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται η απευθείας ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο [W/m^2] και η θερμοκρασία περιβάλλοντος για την ημέρα του χειμώνα και του καλοκαιριού.

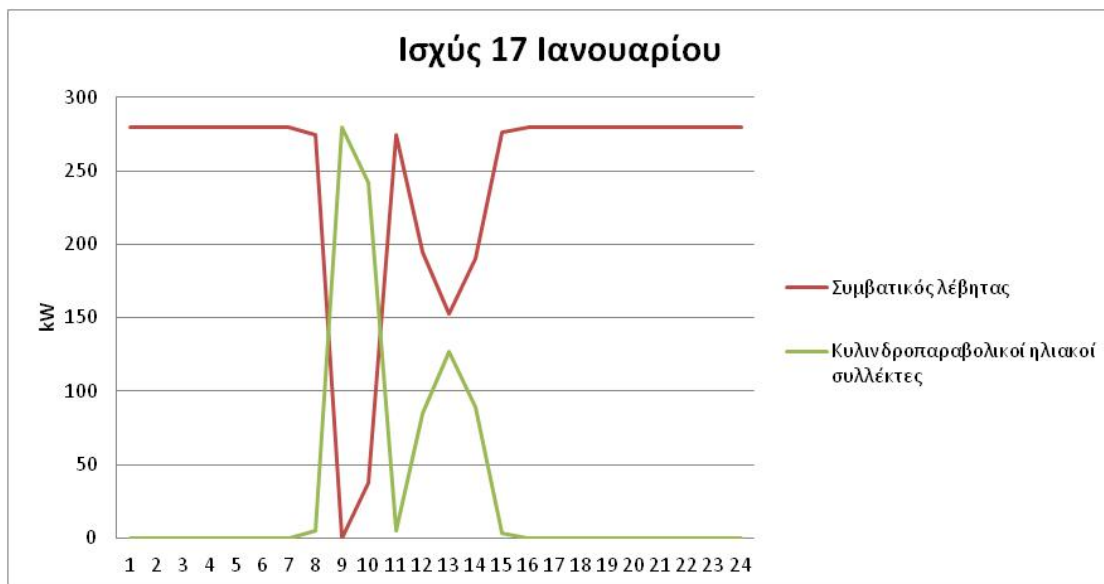


Σχήμα. 10 Απευθείας ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο [W/m^2] για κάθε ώρα μια κρύα μέρα του χειμώνα (17 Ιανουαρίου) και μια ζεστή μέρα το καλοκαίρι (11 Ιουλίου).

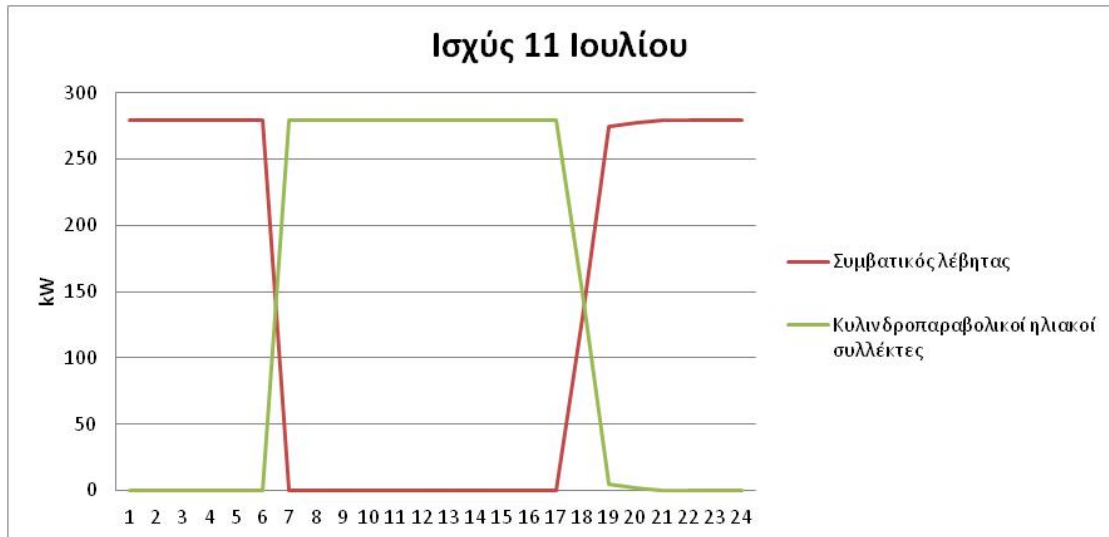


Σχήμα. 11 Θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C) για κάθε ώρα μια κρύα μέρα του χειμώνα (17 Ιανουαρίου) και μια ζεστή μέρα το καλοκαίρι (11 Ιουλίου).

Η προσομοίωση έγινε για παραγωγή 100 K_m³/y. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται η διακύμανση της ισχύος για κάθε ώρα για το συμβατικό λέβητα και για το ηλιακό πεδίο των κυλινδροπαραβολικών ηλιακών συλλεκτών για της 17 Ιανουαρίου και για τις 11 Ιουλίου.



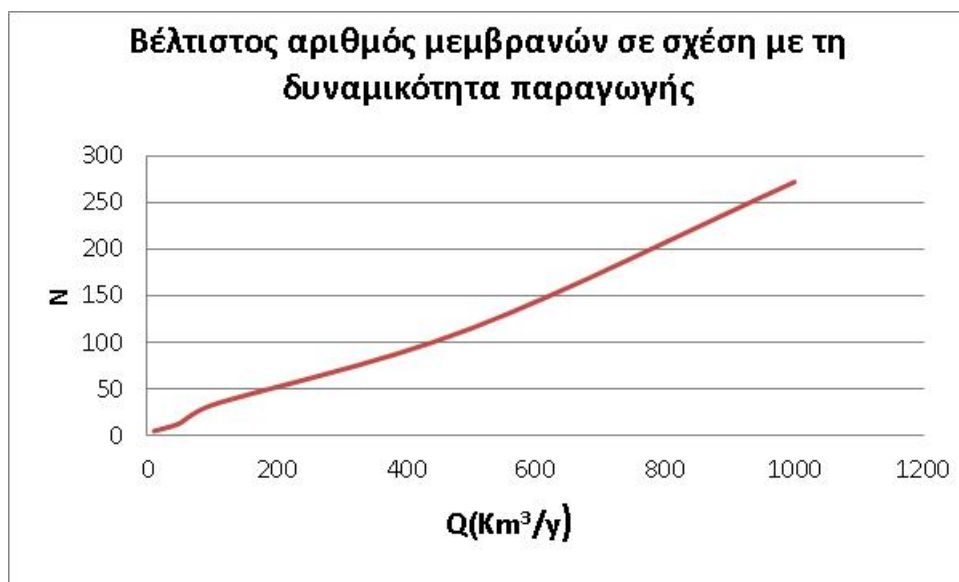
Σχήμα. 12 Διακύμανση ισχύος για το συμβατικό λέβητα και για το ηλιακό πεδίο των κυλινδροπαραβολικών ηλιακών συλλεκτών για της 17 Ιανουαρίου



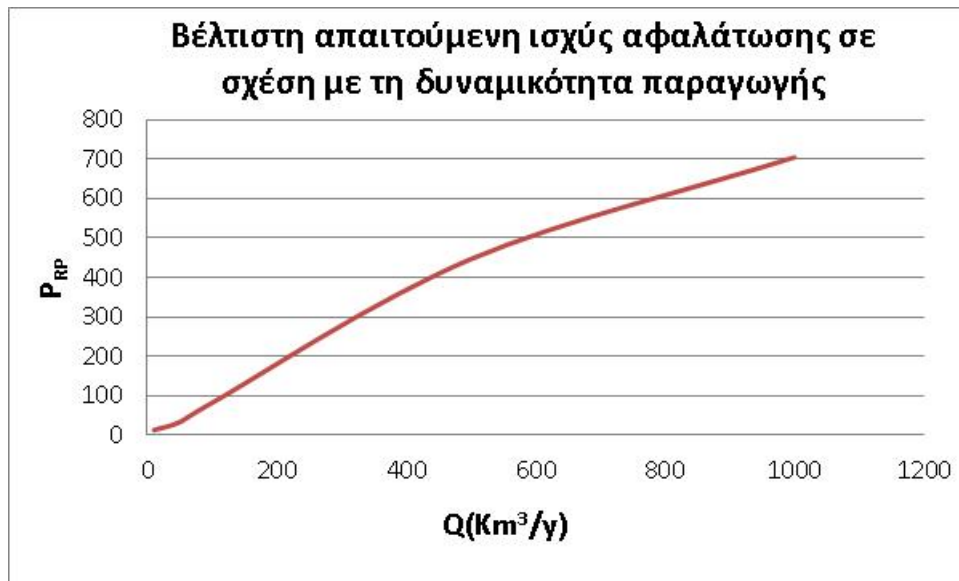
Σχήμα. 13 Διακύμανση ισχύος για το συμβατικό λέβητα και για το ηλιακό πεδίο των κυλινδροπαραβολικών ηλιακών συλλεκτών για της 11 Ιουλίου

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδωσαν ως βέλτιστη λύση τα 1500m² συλλεκτών, 33 παράλληλες μεμβράνες, 1.3m² συμπυκνωτή για το κύκλο Rankine. Η απαιτούμενη ισχύς για το σύστημα αφαλάτωσης είναι 82.38kW και η μέγιστη ισχύς που απαιτείται από το συμβατικό λέβητα 279.53kW και ο συντελεστή μετατροπής του συστήματος αφαλάτωσης είναι 20.10 τοις εκατό. Το συνολικό κόστος της μονάδας υπολογίζεται σε $C_T = 2.02710^5 \text{€}/\text{y}$. Στην περίπτωση της ημέρας του χειμώνα, η μέγιστη ισχύς που παρέχεται από τους συλλέκτες δεν μπορούσε να ικανοποιήσει τη ζήτηση του συστήματος αφαλάτωσης. Στην περίπτωση αυτή, η θερμοκρασία του κυκλοφορούντος ατμού αφήνοντας τους ηλιακούς συλλέκτες αποκτά μία μέγιστη τιμή κατά τη διάρκεια της ημέρας κάτω από 400°C. Κατά τη διάρκεια αυτής της ημέρας, ο λέβητας εργάστηκε συνεχώς ώστε να παρέχει το πρόσθετο φορτίο που απαιτείται. Την ημέρα του καλοκαιριού, η ισχύς που τροφοδοτείται από την ηλιακή υποσύστημα ήταν επαρκής για να αυξηθεί η θερμοκρασία του ατμού στο απαιτούμενο επίπεδο (450°C). Στην περίπτωση αυτή, όχι μόνο ήταν ο λέβητας δεν λειτουργεί κατά τη διάρκεια μιας ορισμένης περιόδου της ημέρας, αλλά επίσης και η πρόσθετη διαθέσιμη ενέργεια απορρίφθηκε, επειδή δεν υπάρχει αποθήκευση.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται ο βέλτιστος αριθμός μεμβρανών, η βέλτιστη απαιτούμενη ισχύς αφαλάτωσης σε σχέση με τη δυναμικότητα παραγωγής Km^3/y , καθώς και τα βέλιστα απαιτούμενα τετραγωνικά των ηλιακών συλλεκτών για τη κάλυψη της επιθυμητής παραγωγής αφαλατωμένου νερού. Στις προσομοιώσεις που έγιναν για την εύρεση των παρακάτω αποτελεσμάτων η πίεση στην αντλία αφαλάτωσης διατηρήθηκε σταθερή και ίση με $\Delta P = 60\text{bar}$ και ο χρόνος αναμονής της μονάδας θεωρήθηκε μηδενικός δηλαδή λειτουργεί όλη τη διάρκεια του έτους. Όπως παρατηρούμε από τα παρακάτω διαγράμματα η σχέση μεταξύ του βέλτιστου αριθμού των μεμβρανών με τη δυναμικότητα παραγωγής είναι σχεδόν γραμμική καθώς και για την απαιτούμενη ισχύ αφαλάτωσης και για τα απαιτούμενα τετραγωνικά των συλλεκτών σε σχέση με τη δυναμικότητα παραγωγής.



Σχήμα. 14 Βέλτιστος αριθμός μεμβρανών σε σχέση με τη δυναμικότητα παραγωγής



Σχήμα. 15 Βέλτιστη απαιτούμενη ισχύς αφαλάτωσης σε σχέση με τη δυναμικότητα παραγωγής



Σχήμα. 16 Βέλτιστα απαιτούμενα τετραγωνικά συλλεκτών σε σχέση με τη δυναμικότητα παραγωγής

8.1 Συμπεράσματα

Με τη μοντελοποίηση της μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης σε συνδυασμό με χρήση κυλινδροπαραβολικών ηλιακών συλλεκτών που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, υπάρχει η δυνατότητα σωστής διαστασιολόγησης του ηλιακού πεδίου, της μονάδας αφαλάτωσης, καθώς και του κύκλου Rankine με τα επιμέρους στοιχεία του με βασικό κριτήριο την ελαχιστοποίηση του κόστους ολόκληρης της εγκατάστασης. Η καινοτομία της προτεινόμενης διατριβής έγκειται στο γεγονός ότι συνδυάζει ένα λεπτομερές μαθηματικό μοντέλο ηλιακού κυλινδροπαραβολικού ηλιακού συλλέκτη, μιας αναλυτικής μαθηματικής περιγραφής του κύκλου Rankine για όλες τις φάσεις του νερού με ένα λεπτομερές μαθηματικό μοντέλο αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης που καλύπτει τόσο μικρές όσο και μεγάλες εφαρμογές.

Παράλληλα βασικοί περιορισμοί που αφορούν τις τεχνικές προδιαγραφές τόσο για τη μονάδα αφαλάτωσης όσο και για το κύκλο Rankine πάρθηκαν υπόψη στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης.

Βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μοντελοποίησης επίσης είναι ότι ο σταθμός αυτός μπορεί εξαιτίας της υβριδικής του μορφής να λειτουργήσει σε εικοσιτετράωρη βάση. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα τη μοντελοποίησης μονάδων που αφορούν όλα τα εύρη εφαρμογών, από μικρές εφαρμογές σε δυναμικότητα παραγωγής έως και μεγάλες ποσότητες αφαλατωμένου νερού. Οι ιδιότητες του κύκλου Rankine στις περιοχές του υπέρθερμου καθώς και του κορεσμένου νερού μοντελοποιούνται μαθηματικά πλήρως. Έτσι για κάθε πίεση και θερμοκρασία οι εντατικές του ιδιότητες όπως ειδική ενθαλπία, εντροπία και ειδικός όγκος μπορούν να υπολογιστούν μέσα από αλγεβρικές σχέσεις. Στη μαθηματική μοντελοποίηση της μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης με τη χρήση κυλινδροπαραβολικών ηλιακών συλλεκτών περιλαμβάνονται επίσης οι εξισώσεις μοντελοποίησης του κυλινδροπαραβολικού ηλιακού συλλέκτη^[26], δηλαδή ένα αναλυτικό μοντέλο προσομοίωσης.

8.2 Μελλοντικές προεκτάσεις

Το μοντέλο αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης με τη χρήση κυλινδροπαραβολικών συλλεκτών που αναπτύχθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια μπορεί να εμπλουτιστεί με περισσότερες εφαρμογές. Παράλληλα στο σύστημα θα μπορούσε στον άξονα περιστροφής του αμοστροβίλου να συνδεθεί και μια ηλεκτρική γεννήτρια και έτσι εκτός από την παραγωγή αφαλατωμένου νερού να πετυχαίνεται και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Το πλεονέκτημα ενός τέτοιου μοντέλου έγκειται στο γεγονός ότι, επειδή παράλληλα με τους συλλέκτες, όταν δεν καλύπτεται το φορτίο, μπορεί να λειτουργήσει και λέβητας συμβατικού καυσίμου, υπάρχει η δυνατότητα για το εν λόγω σύστημα να λειτουργήσει ως σταθμός βάσης ηλεκτρικής ενέργειας και να παράγει αδιάλειπτα την απαιτούμενη ισχύ φορτίου καθώς και αφαλατωμένο νερό.

Επιπροσθέτως, όπως αναφέρθηκε στην ανάλυση του μοντέλου, κάποιες μέρες με υψηλής τιμής ηλιοφάνεια παρατηρείται υπερκάλυψη της απαιτούμενης ισχύος στην μονάδα αφαλάτωσης από τους ηλιακούς κυλινδροπαραβολικούς συλλέκτες, οπότε η πλεονάζουσα ισχύς αποβάλλεται στο περιβάλλον χωρίς καμία αξιοποίηση. Μια αποθήκευση αυτής της αποβαλλόμενης ισχύος θα μπορούσε να εξοικονομήσει ακόμα περισσότερο από το κόστος για τη λειτουργία του συστήματος, ελαχιστοποιώντας τη χρήση του λέβητα συμβατικού καυσίμου, λειτουργώντας έτσι και πιο φιλικά στο περιβάλλον με τη χρήση μόνο της ανανεώσιμης πηγής του ηλίου. Έτσι στις περιπτώσεις όπου έχουμε μη επαρκή κάλυψη της απαιτούμενης ισχύς από τους συλλέκτες λόγω καιρικών φαινομένων ή και κατά τη διάρκεια της νύχτας, το σύστημα αποθήκευσης, για όσο χρονικό διάστημα αυτό θα είναι δυνατό, θα παρέχει την απαιτούμενη πρόσθετη ισχύ περιορίζοντας τη χρήση του λέβητα.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] <http://www.ec.gc.ca>
- [2] Κλαδική Μελέτη Αφαλάτωσης Νερού – Μονάδα οικονομικής ανάλυσης αγορών Τράπεζας Πειραιώς
- [3] Wang L., Chen J., Hung J., Shammass N., Membrane and desalination technologies, Handbook of environmental engineering, Volume 13, Humana Press (Springer), 2011
- [4] Mohamed A. Eltawil , Zhao Zhengming, Liqiang Yuan, A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems, 2009
- [5] Ioannis C. Karagiannis, Petros G. Soldatos, Water desalination cost literature: review and assessment, 2008
- [6] Cipollina A., Micale G., Rizzuti L., Seawater desalination - conventional and renewable energy processes, Green energy and technology volumes, Springer, 2009
- [7] Soteris A. Kalogirou Seawater desalination using renewable energy sources, 2005
- [8] Bart Van der Bruggen, Desalination by distillation and by reverse osmosis – trends towards the future, Membrane Technology , February 2003
- [9] A.M.K. El-Ghonemy, Water desalination systems powered by renewable energy sources: Review, 2012
- [10] Baker R., Membrane technology and applications, 2nd edition, Wiley, 2004
- [11] Marcovecchio M., Aguirre P., Scenna N., Global optimal design of RO networks for SW desalination: modeling and algorithm, Desalination, Elsevier, 2005
- [12] O. Badr, S. D. Probert & P. O'Callaghan, Rankine Cycles for Steam Power-plants, 1990

- [13] Β.Χατζηαθανασίου Μετάδοση Θερμότητας, Πανεπιστημικές σημειώσεις Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης ,Θεσσαλονίκη, 2005
- [14] Β.Χατζηαθανασίου , Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, Πανεπιστημικές σημειώσεις Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης ,Θεσσαλονίκη, 2005
- [15] Dufie,Beckman ,Solar Engineering Of Thermal Processes , (Wiley,1980)
- [16] A. Fernandez-Garcia , E. Zarza, L. Valenzuela, M. Perez Parabolic-trough solar collectors and their applications, 2010
- [17] N.G. Voros, C.T. Kiranoudis, Z.B. Maroulis, Solar energy exploitation for reverse osmosis desalination plants, 1998
- [18] N.G. Voros, C.T. Kiranoudis, Z.B. Maroulis, Wind energy exploitation for reverse osmosis desalination plants, 1997
- [19] Mark Wilfl, Craig Bartels, Optimization of seawater RO systems design,2005
- [20] Narendra Singh, S.C. Kaushik, R.D. Misra, Exergetic analysis of a solar thermal power system, 2000
- [21] Voros N.G., Maroulis Z.B., Marinos Kouris D., Short-cut structural design of reverse osmosis desalination plants, Journal of Membrane Science 127, pp. 47 – 68, Elsevier, 1997
- [22] www.gams.com
- [23] Andreas Luzzi , Keith Lovegrove, Solar Thermal Power Generation,Australian National University Canberra, Australia
- [24] F.Evangelista, Industrial Engineering Chemistry Process Design and Development, 24 (1985) 211.
- [26]Μπακιρτζόγλου Βάγιος, Μοντελοποίηση Κυλινδροπαραβολικών Συλλεκτών, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2012

Παράρτημα----

Saturated water (H2O)--Pressure table										
			Spec. Volume		Internal energy		Enthalpy		Entropy	
	kPa	deg-C	m ³ /kg		kJ/kg		kJ/kg		kJ/kg*K	
	Press.	Sat.	Sat.	Sat.	Sat.	Sat.	Sat.	Sat.	Sat.	Sat.
		temp.	liquid	vapor	liquid	vapor	liquid	vapor	liquid	vapor
	p kPa	Tsat@p	v _f	v _g	u _f	u _g	h _f	h _g	s _f	s _g
	0.6113	0.01	0.001000	206.14	0	2375.3	0.00	2501.4	0.0000	9.1562
	1.0	6.98	0.001000	129.21	29.3	2385.0	29.30	2514.2	0.1059	8.9756
	1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2393.3	54.71	2525.3	0.1957	8.8279
	2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2399.5	73.48	2533.5	0.2607	8.7237
	2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2404.4	88.49	2540.0	0.3120	8.6432
	3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2408.5	101.05	2545.5	0.3545	8.5776
	4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2415.2	121.46	2554.4	0.4226	8.4746
	5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2420.5	137.82	2561.5	0.4764	8.3951
	7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2430.5	168.79	2574.8	0.5764	8.2515
	10	45.81	0.001010	14.67	191.82	2437.9	191.83	2584.7	0.6493	8.1502
	15	53.97	0.001014	10.02	225.92	2448.7	225.94	2599.1	0.7549	8.0085
	20	60.06	0.001017	7.649	251.38	2456.7	251.40	2609.7	0.8320	7.9085
	25	64.97	0.001020	6.204	271.9	2463.1	271.93	2618.2	0.8931	7.8314
	30	69.10	0.001022	5.229	289.2	2468.4	289.23	2625.3	0.9439	7.7686
	40	75.87	0.001027	3.993	317.53	2477.0	317.58	2636.8	1.0259	7.67
	50	81.33	0.001030	3.240	340.44	2483.9	340.49	2645.9	1.0910	7.5939
	75	91.78	0.001037	2.217	384.31	2496.7	384.39	2663.0	1.2130	7.4564
	p MPa	Tsat@p	v _f	v _g	u _f	u _g	h _f	h _g	s _f	s _g
	0.1	99.63	0.001043	1.694	417.36	2506.1	417.46	2675.5	1.3026	7.3594
	0.125	105.99	0.001048	1.3749	444.19	2513.5	444.32	2685.4	1.374	7.2844
	0.150	111.37	0.001053	1.1593	466.94	2519.7	467.11	2693.6	1.4336	7.2233
	0.175	116.06	0.001057	1.0036	486.8	2524.9	486.99	2700.6	1.4849	7.1717
	0.200	120.23	0.001061	0.8857	504.49	2529.5	504.7	2706.7	1.5301	7.1271
	0.225	124	0.001064	0.7933	520.47	2533.6	520.72	2712.1	1.5706	7.0878
	0.250	127.44	0.001067	0.7187	535.1	2537.2	535.37	2716.9	1.6072	7.0527
	0.275	130.6	0.00107	0.6573	548.59	2540.5	548.89	2721.3	1.6408	7.0209
	0.300	133.55	0.001073	0.6058	561.15	2543.6	561.47	2725.3	1.6718	6.9919
	0.325	136.3	0.001076	0.562	572.9	2546.4	573.25	2729	1.7006	6.9652
	0.350	138.88	0.001079	0.5243	583.95	2548.9	584.33	2732.4	1.7275	6.9405
	0.375	141.32	0.001081	0.4914	594.4	2551.3	594.81	2735.6	1.7528	6.9175
	0.40	143.63	0.001084	0.4625	604.31	2553.6	604.74	2738.6	1.7766	6.8959
	0.45	147.93	0.001088	0.414	622.77	2557.6	623.25	2743.9	1.8207	6.8565
	0.50	151.86	0.001093	0.3749	639.68	2561.2	640.23	2748.7	1.8607	6.8213
	0.55	155.48	0.001097	0.3427	655.32	2564.5	665.93	2753	1.8973	6.7893
	0.60	158.85	0.001101	0.3157	669.9	2567.4	670.56	2756.8	1.9312	6.76
	0.65	162.01	0.001104	0.2927	683.56	2570.1	684.28	2760.3	1.9627	6.7331

0.70	164.97	0.001108	0.2729	696.44	2572.5	697.22	2763.5	1.9922	6.708
0.75	167.78	0.001112	0.2556	708.64	2574.7	709.47	2766.4	2.02	6.6847
0.80	170.43	0.001115	0.2404	720.22	2576.8	721.11	2769.1	2.0462	6.6628
0.85	172.96	0.001118	0.227	731.27	2578.7	732.22	2771.6	2.071	6.6421
0.90	175.38	0.001121	0.215	741.83	2580.5	742.83	2773.9	2.0946	6.6226
0.95	177.69	0.001124	0.2042	751.95	2582.1	753.02	2776.1	2.1172	6.6041
1.00	179.91	0.001127	0.19444	761.68	2583.6	762.81	2778.1	2.1387	6.5865
1.10	184.09	0.001133	0.17753	780.09	2586.4	781.34	2871.7	2.1792	6.5536
1.20	187.99	0.001139	0.16333	797.29	2588.8	798.65	2784.8	2.2166	6.5233
1.30	191.64	0.001144	0.15125	813.44	2591.0	814.93	2787.6	2.2515	6.4953
1.40	195.07	0.001149	0.14084	828.70	2592.8	830.30	2790.0	2.2842	6.4693
1.50	198.32	0.001154	0.13177	843.16	2594.5	844.89	2792.2	2.3150	6.4448
1.75	205.76	0.001166	0.11349	876.46	2597.8	878.50	2796.4	2.3851	6.3896
2.00	212.42	0.001177	0.09963	906.44	2600.3	908.79	2799.5	2.4474	6.3409
2.25	218.45	0.001187	0.08875	933.83	2602.0	936.49	2801.7	2.5035	6.2972
2.50	223.99	0.001197	0.07998	959.11	2603.1	962.11	2803.1	2.5547	6.2575
3.00	233.90	0.001217	0.06668	1004.78	2604.1	1008.42	2804.2	2.6457	6.1869
3.50	242.60	0.001235	0.05707	1045.43	2603.7	1049.75	2803.4	2.7253	6.1253
4	250.40	0.001252	0.04978	1082.31	2602.3	1087.31	2801.4	2.7964	6.0701
5	263.99	0.001286	0.03944	1147.81	2597.1	1154.23	2794.3	2.9202	5.9734
6	275.64	0.001319	0.03244	1205.44	2589.7	1213.35	2784.3	3.0267	5.8892
7	285.88	0.001351	0.02737	1257.55	2580.5	1267.00	2772.1	3.1211	5.8133
8	295.06	0.001384	0.02352	1305.57	2569.8	1316.64	2758.0	3.2068	5.7432
9	303.40	0.001418	0.02048	1350.51	2557.8	1363.26	2742.1	3.2858	5.6722
10	311.06	0.001452	0.018026	1393.04	2544.4	1407.56	2724.7	3.3596	5.6141
11	318.15	0.001489	0.015987	1433.7	2529.8	1450.1	2705.6	3.4295	5.5527
12	324.75	0.001527	0.014263	1473.0	2513.7	1491.3	2684.9	3.4962	5.4924
13	330.93	0.001567	0.012780	1511.1	2496.1	1531.5	2662.2	3.5606	5.4323
14	336.75	0.001611	0.011485	1548.6	2476.8	1571.1	2637.6	3.6232	5.3717
15	342.24	0.001658	0.010337	1585.6	2455.5	1610.5	2610.5	3.6848	5.3098
16	347.44	0.001711	0.009306	1622.7	2431.7	1650.1	2580.6	3.7461	5.2455
17	352.37	0.001770	0.008364	1660.2	2405.0	1690.3	2547.2	3.8079	5.1777
18	357.06	0.001840	0.007489	1698.9	2374.3	1732.0	2509.1	3.8715	5.1044
19	361.54	0.001924	0.006657	1739.9	2338.1	1776.5	2464.5	3.9388	5.0228
20	365.81	0.002036	0.005834	1785.6	2293.0	1826.3	2409.7	4.0139	4.9269
21	369.89	0.002207	0.004952	1842.1	2230.6	1888.4	2334.6	4.1075	4.8013
22	373.80	0.002742	0.003568	1961.9	2087.1	2022.2	2165.6	4.3110	4.5327
22.09	374.14	0.003155	0.003155	2029.6	2029.6	2099.3	2099.3	4.4298	4.4298
p MPa	Tsat@p	v _f	v _g	u _f	u _g	h _f	h _g	s _f	s _g
Source: Adapted from J. H. Keenan, F. G. Keyes, P.G. Hill, and J.G. Moore, Steam Tables, Wiley, New York, 1969.									