

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

"Ανάλυση συστημάτων ηλιακής αφαλάτωσης και εφαρμογή ηλιακού αποστακτήρα στην περιοχή της Αθήνας"

Προπτυχιακή φοιτήτρια: Μαργέλου Σταυρούλα

Επιβλέπων καθηγητής: Κ.Α.Αντωνόπουλος

Αθήνα, 2013

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον κ. Αντωνόπουλο για την πολύτιμη βοήθεια του καθώς και την οικογένειά μου για την στήριξη και την κατανόηση καθ΄όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

Περίληψη

Η έλλειψη πόσιμου νερού οδηγεί στην συνεχώς διευρυνόμενη έρευνα νέων τεχνολογιών στα συστήματα αφαλάτωσης. Η εξάντληση των ορυκτών καυσίμων καθιστά αναγκαία την εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με πρωταρχική την ηλιακή για τους σκοπούς της αφαλάτωσης, αφού αυτή είναι ανεξάντλητη και δωρεάν. Η παρούσα εργασία μελετά και αναλύει τις υπάρχουσες τεχνολογίες ηλιακής αφαλάτωσης. Η ηλιακή αφαλάτωση γίνεται άμεσα ή έμμεσα. Άμεση ηλιακή αφαλάτωση έχουμε όταν η συλλογή της θερμικής ενέργειας από τον ήλιο και η απόσταξη γίνονται στο ίδιο σύστημα. Τέτοια συστήματα είναι οι ηλιακοί αποστακτήρες οι οποίοι χωρίζονται σε παθητικούς και ενεργητικούς με τη διαφορά ότι στους ενεργητικούς υπάρχει μια επιπλέον συνεισφορά θερμικής ενέργειας από οποιαδήποτε πηγή (ηλιακός συλλέκτης, βιομηχανία κλπ.). Έμμεση ηλιακή αφαλάτωση ονομάζεται ο συνδυασμός των συμβατικών εγκαταστάσεων αφαλάτωσης με συστήματα συλλογής ηλιακής ενέργειας (ηλιακός συλλέκτης, ηλιακή λίμνη κλπ.). Τέλος η εργασία μελετά την εφαρμογή ηλιακού αποστακτήρα μικρής καθώς και μεγάλης λεκάνης στην περιοχή της Αθήνας. Γίνεται ο υπολογισμός της παροχής αποσταγμένου νερού καθώς και του βαθμού απόδοσης των αποστακτήρων.

Abstract

The lack of drinking water leads to the ever-expanding research on new technologies in desalination systems. The depletion of fossil fuels necessitates the exploitation of renewable energy sources, primarily solar energy for the purpose of desalination, as this is inexhaustible and cost free. This paper examines and analyzes the existing solar desalination technologies. Solar desalination is done directly or indirectly. Direct solar desalination occurs when the collection of thermal energy from the sun and the distillation process exist in the same system. Such system is the solar still which is classified either as passive or active. In an active solar still there is an additional supply of thermal energy from any heat source (solar collector, industry etc.). Indirect solar desalination is the combination of conventional desalination plants with solar energy collection systems (solar collector, solar pond etc.). This study investigates the application of both small and large basin solar stills in the area of Athens, Greece. Finally, it presents the results of the production of distilled water and the efficiency of the solar still as these are calculated.

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή στην ηλιακή αφαλάτωση	. 12
2. de	Άμεση ηλιακή αφαλάτωση – Παθητικοί ηλιακοί αποστακτήρες (Direct solar esalination - Passive solar stills)	. 16
	2.1 Ηλιακοί αποστακτήσες με λεκάνη (Basin-type solar stills)	. 16
	2.1.1 Ηλιακοί αποστακτήρες μονής επίδοασης (Single Effect solar stills)	17
	2.1.1 Harve anotaktipe point encourant (single encourant)	י ד י חור
	slope solar stills)	.17
	2.1.2 Ηλιακοί αποστακτήρες πολλαπλής επίδρασης (Multi-effect solar stills)	. 18
	2.1.2.1 Ηλιακός αποστακτήρας διπλής λεκάνης (Double-basin solar still)	. 19
	2.1.2.2 Ηλιακός αποστακτήρας τριπλής λεκάνης (Triple-basin solar still)	. 19
	2.2 Ηλιακοί Αποστακτήρες τύπου φυτιλιού (Wick solar stills)	. 19
	2.2.1 Ηλιακός αποστακτήρας τύπου φυτιλιού μονής επίδρασης (Wick-type solar still))
	[14]	. 20
	2.2.2 Σύστημα ηλιακού αποστακτήρα λεκάνης- τύπου φυτιλιού (Wick-basin type still)
	[14]	. 21
	2.2.3 Ηλιακοί αποστακτήρες τύπου φυτιλιού πολλαπλής επίδρασης (Multi-wick type solar still) [8]	.21
	2.3 Ηλιακοί αποστακτήρες διάχυσης (Diffusion solar stills) [8]	. 22
	2.3.1 Ηλιακός αποστακτήρας διάχυσης μονής επίδρασης (Diffusion type solar still)	. 22
	2.3.2 Ηλιακός αποστακτήρας διάχυσης πολλαπλής επίδρασης (Multi-effect diffusion type solar still)	. 23
	2.4 Ειδικοί σχεδιασμοί ηλιακών αποστακτήρων	.23
	2.4.1 Ηλιακός αποστακτήρας με κοίλο κάτοπτρο (Inverted absorber solar still IASS)	.23
	2.4.2 Σωληνοειδής ηλιακός αποστακτήρας - Tubular solar still [19]	. 24
	2.4.3 Σφαιοικός ηλιακός αποστακτήρας - Spherical solar still [19]	. 25
	2.4.4 Βριματικός Ηλιακός Αποστακτήρας - Stepped solar still [17]	.25
3	Παράγοντες που επορεάζουν την απόδοση των ηλιακών αποστακτήρων [20]	.27
	3.1 Επιδράσεις των ατμοσφαιρικών μεταβλητών	.27
	3.1.1 Ηλιακή ακτινοβολία	27
	3.1.2 Θεομοκοασία περιβάλλοντος	27
		,
	2.2 Embodrasic Systematic	. 27 70
	3.2 Εποραθείς Ζμεθιαθμου	.20 20
	2.2.2 Διαρορή ατμού	۰20 ۵۵
		. 29
	3.2.3 Διαρροή συμπυκνωματων	. 29

3.2.4 Μόνωση της λεκάνης	29
3.2.5 Σχέδια καλυμμάτων	29
3.2.6 Κατασκευαστικά υλικά	
4. Άμεση ηλιακή αφαλάτωση - Ενεργητικοί ηλιακοί αποστακτήρες (Direct solar desalination – Active solar stills) [21]	31
4.1 Ενεργητική ηλιακή απόσταξη υψηλής θερμοκρασίας	
4.1.1 Ηλιακός αποστακτήρας συνδεδεμένος με επίπεδο ηλιακό συλλέκτη (Sol	ar still
coupled with flat plate collector)	31
4.1.2 Ενεργητικός ηλικιακός αποστακτήρας διπλής επίδρασης (Double effect a	active
solar still)	35
4.1.3 Αναγεννητικός ηλιακός αποστακτήρας (Regenerative solar still)	
4.1.4 Ηλιακός αποστακτήρας συνδεδεμένος με παράλληλο επίπεδο ηλιακό σι	υλλέκτη
(Solar still integrated with a parallel flat-plate solar collector)	38
4.1.5 Κάθετος ηλιακός αποστακτήρας συνδεδεμένος με επίπεδο ηλιακό συλλ	έκτη
(Vertical solar still coupled with flat plate solar collector)	39
4.1.6 Ηλιακός αποστακτήρας σε συνδυασμό με παραβολικό συλλέκτη (Solar s	;till
coupled with parabolic concentrator)	41
4.1.7 Αποστακτήρας διπλής επίδρασης με παραβολικό συλλέκτη (Double effe	ct still
coupled with parabolic concentrator)	43
4.1.8 Αναγεννητικός αποστακτήρας με παραβολικό συλλέκτη (Regenerative s	olar still
coupled with parabolic concentrator)	45
4.1.9 Ηλιακός αποστακτήρας με συλλέκτη τύπου σωλήνα κενού (Solar still con	upled with
evacuated tube collector ETC)	46
4.1.10 Κάθετος ηλιακός αποστακτήρας διάχυσης πολλαπλής επίδρασης συνδ	εδεμένος
με συλλέκτη σωλήνων κενού - Vertical Multiple Effect Diffusion type (VMED) s	still
coupled with heat pipe solar collector	48
4.1.11 Ηλιακός αποστακτήρας σε συνδυασμό με ηλιακή λίμνη (Solar still coup	led with
solar pond)	50
4.1.12 Ηλιακός αποστακτήρας με υβριδικό φωτοβολταϊκό – θερμικό σύστημο	ι (Solar
still coupled with hybrid PV/T system)	52
4.1.13 Πολυβάθμια ενεργητική απόσταξη (Multistage active solar distillation s	system) 54
4.1.14 Ενεργητική απόσταξη πολλαπλής επίδρασης (Multi effect active solar c	listillation
system)	56
4.1.15 Υβριδικό σύστημα ηλιακής απόσταξης (Hybrid solar distillation system)	57
4.2 Ενεργητικός ηλιακός αποστακτήρας με προθερμασμένο νερό (Pre-heatec	l water
active solar still)	59
4.3 Νυκτερινός ενεργητικός ηλιακός αποστακτήρας (Nocturnal active solar st	ill) 60
5. Έμμεση ηλιακή αφαλάτωση [22]	62

5.1	Σύστημα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση υποβοηθούμενο ηλιακό (Solar
Ass	sisted Multi-stage flash distillation MSF)62
5.1	.1 Σύστημα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση υποβοηθούμενο από ηλιακή
λίμ	νη (Solar pond driven MSF)63
5.1	.2 Σύστημα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση υποβοηθούμενο από ηλιακό
συλ	\λέκτη (Solar collector driven MSF)64
5.2	Συστήματα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εξάτμιση υποβοηθούμενα ηλιακά (Solar
ass	isted multiple effect distillation MED)67
5.2	.1 Σύστημα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εξάτμιση υποβοηθούμενα από ηλιακή
λίμ	νη (Solar pond assisted MED)68
5.2	.2 Σύστημα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εξάτμιση υποβοηθούμενο από ηλιακό
συλ	λλέκτη (Solar collector assisted MED)68
5.3	Συστήματα αφαλάτωσης με αντλίες θερμότητας (Solar assisted heat pump (HP)
des	salination)
5.4	Συστήματα αντίστροφης όσμωσης υποβοηθούμενα ηλιακά (Solar assisted reverse
osn	nosis RO)71
5.4	.1 Συστήματα αντίστροφης όσμωσης με τη βοήθεια φωτοβολταικών (PV assisted RO
sys ⁻	tem)72
5.5	Ηλιακά βοηθούμενη ηλεκτροδιάλυση (Solar assisted electrodialysis)73
5.6	Παθητική αφαλάτωση εν κενώ υποβοηθούμενη ηλιακά (Solar assisted passive
vac	cuum desalination PVD)74
5.7	Υγρανση - αφύγρανση ηλιακά βοηθούμενη (Solar assisted humidification-
deł	numidification HDH)75
5.8	Απόσταξη με μεμβράνη ηλιακά υποβοηθούμενη (Solar assisted membrane
dist	tillation MD)77
6. Ефо	αρμογή ηλιακού αποστακτήρα στην περιοχή της Αθήνας
6.1	. Εφαρμογή ηλιακού αποστακτήρα μικρής λεκάνης στην περιοχή της Αθήνας79
6.1	.1 Υπολογισμός της μέσης άμεσης ακτινοβολίας (Gb) και μέσης διάχυτης
ακτ	τινοβολίας (Gd) οριζοντίου επιπέδου79
6.1	.2 Υπολογισμός της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου (GT)93
6.1	.3 Υπολογισμός της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (Τα)
6.1	.4 Υπολογισμός των θερμοκρασιών νερού της λεκάνης (Tw) και εσωτερικής
επι	φάνειας του καλύμματος (Tg)103
6.1	.5 Υπολογισμός της παραγωγής αποσταγμένου νερού [32]108
6.1	.6 Υπολογισμός του βαθμού απόδοσης του αποστακτήρα [33]117
6.2	Εφαρμογή ηλιακού αποστακτήρα μεγάλης λεκάνης στην περιοχή της Αθήνας 125
Βιβλιογρ	οαφία128

Πίνακας 1: Υλικά μερών του αποστακτήρα
Πίνακας 2: Εφαρμογή του ηλιακού αποστακτήρα σε συνδυασμό με επίπεδο ηλιακό
συλλέκτη
Πίνακας 3: Εφαρμογή του ενεργητικού ηλιακού αποστακτήρα διπλής επίδρασης
Πίνακας 4: Εφαρμογή του αναγεννητικού ενεργητικού ηλιακού αποστακτήρα
Πίνακας 5: Εφαρμογή του ηλιακού αποστακτήρα με παράλληλο επίπεδο ηλιακό συλλέκτη39
Πίνακας 6: Εφαρμογή κάθετου ηλιακού συλλέκτη με επίπεδο ηλιακό συλλέκτη
Πίνακας 7: Εφαρμογή ηλιακού αποστακτήρα με παραβολικό συλλέκτη
Πίνακας 8: Εφαρμογή του ηλιακού αποστακτήρα διπλής επίδρασης με παραβολικό
συλλέκτη
Πίνακας 9: Εφαρμογή του αναγεννητικού αποστακτήρα με παραβολικό συλλέκτη
Πίνακας 10: Εφαρμογή του ηλιακού αποστακτήρα με συλλέκτη τύπου σωλήνα κενού48
Πίνακας 11: Εφαρμογή του κάθετου αποστακτήρα διάχυσης με συλλέκτη σωλήνων κενού 50
Πίνακας 12: Εφαρμογή του ηλιακού αποστακτήρα με ηλιακή λίμνη
Πίνακας 13: Εφαρμογή του ηλιακού αποστακτήρα με υβριδικό φωτοβολταϊκό – θερμικό
σύστημα
Πίνακας 15: Εφαρμογή της ενεργητικής απόσταξης πολλαπλής επίδρασης
Πίνακας 16: Εφαρμογή του υβριδικού συστήματος απόσταξης
Πίνακας 17: Εφαρμογή του ενεργητικού αποστακτήρα με προθερμασμένο νερό
Πίνακας 18: Εφαρμογή του νυκτερινού ηλιακού αποστακτήρα
Πίνακας 19: Συστήματα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση υποβοηθούμενα από
ηλιακή λίμνη
Πίνακας 20: Ηλιακοί συλλέκτες και τα χαρακτηριστικά τους
Πίνακας 21: Συστήματα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση υποβοηθούμενα από
ηλιακό συλλέκτη
Πίνακας 22: Συστήματα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εξάτμιση υποβοηθούμενα από ηλιακή
λίμνη
Πίνακας 23: Συστήματα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εξάτμιση υποβοηθούμενα από ηλιακό
συλλέκτη
Πίνακας 24: Συστήματα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης με τη βοήθεια φωτοβολταϊκών
Πίνακας 25: Συντελεστές των εξισώσεων ηλιακής ακτινοβολίας [τ2]
Πίνακας 26: Μέση άμεση ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου (Gb)(kW/m2)
συναρτήσει των ωρών της 21ης ημέρας κάθε μήνα80
Πίνακας 27: Μέση διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου (Gd)(kW/m2)
συναρτήσει των ωρών της 21ης ημέρας κάθε μήνα80
Πίνακας 28: Ολική ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου (GT) (kW/m2) συναρτήσει των
ωρών της 21ης ημέρας κάθε μήνα94
Πίνακας 29: Συντελεστές της εξίσωσης θερμοκρασίας περιβάλλοντος [τ3]
Πίνακας 30: Θερμοκρασία περιβάλλοντος (Τα)(οC) συναρτήσει των ωρών της 21ης ημέρας
κάθε μήνα
Πίνακας 31: Χαρακτηριστικά του αποστακτήρα μικρής λεκάνης

Πίνακας 32: Θερμοκρασία του νερού της λεκάνης TW(oC) συναρτήσει των ωρών της 21ης				
ημέρας κάθε μήνα)6			
Πίνακας 33: Θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος Tg(oC) συναρτήσει	L			
των ωρών της 21ης ημέρας κάθε μήνα10)7			
Πίνακας 34: Παροχή αποσταγμένου νερού ṁ(gr/m2h) του αποστακτήρα μικρής λεκάνης				
συναρτήσει των ωρών της 21ης ημέρας κάθε μήνα10)9			
Πίνακας 35: Βαθμός απόδοσης ni(%) του ηλιακού αποστακτήρα μικρής λεκάνης συναρτήσει				
των ωρών της 21ης ημέρας κάθε μήνα11	L7			
Πίνακας 36: Ηλιακοί αποστακτήρες μεγάλης λεκάνης [τ7]12	25			
Πίνακας 37: Ημερήσια παραγωγή αποσταγμένου νερού ανά τετραγωνικό μέτρο των				
αποστακτήρων ṁ (lt/m2day) συναρτήσει της 21ης ημέρας κάθε μήνα12	26			
Πίνακας 38: Ημερήσια παραγωγή αποσταγμένου νερού κάθε αποστακτήρα ṁ (m3/day)				
συναρτήσει της 21ης ημέρας κάθε μήνα12	26			

Εικόνα 1: Παγκόσμια δυναμικότητα αφαλάτωσης14
Εικόνα 2: Διεργασίες αφαλάτωσης15
Εικόνα 3: Εγκατεστημένη δυναμικότητα αφαλάτωσης15
Εικόνα 4: Ηλιακός αποστακτήρας με κάλυμμα μονής κλίσης [11]18
Εικόνα 5: Ηλιακός αποστακτήρας με κάλυμμα διπλής κλίσης (τύπου πυραμίδας) [12] 18
Εικόνα 6: Ηλιακός αποστακτήρας διπλής λεκάνης [12]19
Εικόνα 7: Τομή του ηλιακού αποστακτήρα τύπου φυτιλιού (1) γαλβανισμένος χαλύβδινος
δίσκος, (2) γυάλινο κάλυμμα, (3) βάσης στήριξης, (4) πολυστερίνη, (5) ύφασμα άνθρακα, (6)
κανάλι αλουμινίου, (7) λαστιχένια τσιμούχα, (8) χάλυβας, (9) φελιζόλ, (10) υδρορροή [15]
20
Εικόνα 8: Σύστημα ηλιακών αποστακτήρων λεκάνης και τύπου φυτιλιού
Εικόνα 9: Ηλιακός αποστακτήρας τύπου φυτιλιού πολλαπλής επίδρασης22
Εικόνα 10: Ηλιακός αποστακτήρας διάχυσης23
Εικόνα 11: Ηλιακός αποστακτήρας με κοίλο κάτοπτρο24
Εικόνα 12: Σωληνοειδής ηλιακός αποστακτήρας25
Εικόνα 13: Σφαιρικός ηλιακός αποστακτήρας25
Εικόνα 14: Βηματικός ηλιακός αποστακτήρας26
Εικόνα 15: Ηλιακός αποστακτήρας συνδεδεμένος με επίπεδο συλλέκτη υπό εξαναγκασμένη
κυκλοφορία32
Εικόνα 16: (α) Ηλιακός αποστακτήρας συνδεδεμένος με επίπεδο συλλέκτη υπό φυσική
κυκλοφορία, (β) εναλλάκτης θερμότητας32
Εικόνα 17: Ηλιακός αποστακτήρας διπλής επίδρασης συνδεδεμένος με επίπεδο ηλιακό
συλλέκτη35
Εικόνα 18: Εγκάρσια τομή ενός αναγεννητικού ηλιακού συστήματος απόσταξης
Εικόνα 19: Ηλιακός αποστακτήρας συνδεδεμένος με παράλληλο επίπεδο συλλέκτη
Εικόνα 20: Κάθετος ηλιακός αποστακτήρας πολλαπλής επίδρασης συνδεδεμένος με
επίπεδο ηλιακό συλλέκτη40

Εικονά 21: Ηλιακός αποστακτήρας με παραβολικό συλλεκτή: (1) παραβολικός συλλεκτής,
(2) σωλήνας νερού, (3) βαλβίδες, (4) ηλιακός αποστακτήρας, (5) εναλλάκτης θερμότητας,
(6) αντλία42
Εικόνα 22: Αφαλάτωση με παραβολικό συλλέκτη42
Εικόνα 23: Ηλιακός αποστακτήρας διπλής επίδρασης συνδεδεμένος με παραβολικό
συλλέκτη44
Εικόνα 24: Ο συλλέκτης τύπου σωλήνα κενού των Owens-IllinoisO συλλέκτης τύπου
σωλήνα κενού των Owens-Illinois47
Εικόνα 25: Συνολική ημερήσια απόδοση των ενεργητικών ηλιακών αποστακτήρων47
Εικόνα 26: Κάθετος ηλιακός αποστακτήρας διάχυσης πολλαπλής επίδρασης με ηλιακό
συλλέκτη σωλήνων κενού
Εικόνα 27: Ηλιακή λίμνη σε συνδυασμό με βηματικό και απλό ηλιακό αποστακτήρα51
Εικόνα 28: Ηλιακός αποστακτήρας σε συνδυασμό με υβριδικά φωτοβολταϊκά — θερμικά
συστήματα53
Εικόνα 29: Πολυβάθμιος ηλιακός αποστακτήρας συνδεδεμένος με ηλιακό συλλέκτη και
αντλία κενού ηλιακά οδηγούμενη55
Εικόνα 30: Ενεργητική απόσταξη πολλαπλής επίδρασης57
Εικόνα 31: Υβριδικό σύστημα ηλιακής απόσταξης58
Εικόνα 32: Ηλιακός αποστακτήρας με ροή νερού πάνω από το γυάλινο κάλυμμα και μέσα
στη λεκάνη60
Εικόνα 33: Σύστημα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση υποβοηθούμενο ηλιακά62
Εικόνα 34: Η ηλιακή λίμνη και οι δείκτες αλμυρότητας των στρωμάτων της
Εικόνα 35: Σύστημα αφαλάτωσης με τη μέθοδο πολυβάθμιας εξάτμισης υποβοηθούμενο
ηλιακά67
Εικόνα 36: Τύποι αντλιών θερμότητας που χρησιμοποιούνται στην αφαλάτωση: (α) θερμική
συμπίεση ατμού, (β) μηχανική συμπίεση ατμού, (γ) αντλία θερμότητας προσρόφησης, (δ)
αντλία θερμότητας απορρόφησης70
Εικόνα 37: Πιθανές διατάξεις συστημάτων αφαλάτωσης με αντλίες θερμότητας71
Εικόνα 38: Η διαδικασία της αντίστροφης όσμωσης72
Εικόνα 39: Ηλεκτροδιάλυση με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας
Εικόνα 40: Σύστημα παθητικής αφαλάτωσης εν κενώ
Εικόνα 41: Κύκλος κλειστού αέρα, ανοιχτού νερού76
Εικόνα 42: Κύκλος κλειστού αέρα, ανοιχτού νερού πολλαπλής επίδρασης
Εικόνα 43: Απόσταξη με μεμβράνη ηλιακά υποβοηθούμενη
Εικόνα 44: Προτεινόμενος αποστακτήρας μονής κλίσης [32]103

Διάγραμμα 1	
Διάγραμμα 2	
Διάγραμμα 3	
Διάγραμμα 4	
Διάγραμμα 5	
Διάγραμμα 6	83
Διάγραμμα 7	84
Διάγραμμα 8	84
Διάγραμμα 9	85
Διάγραμμα 10	85
Διάγραμμα 11	86
Διάγραμμα 12	86
Διάγραμμα 13	87
Διάγραμμα 14	87
Διάγραμμα 15	
Διάγραμμα 16	
Διάγραμμα 17	
Διάγραμμα 18	
Διάγραμμα 19	90
Διάγραμμα 20	90
Διάγραμμα 21	
Διάγραμμα 22	91
Διάγραμμα 23	92
Διάγραμμα 24	92
Διάγραμμα 25	95
Διάγραμμα 26	95
Διάγραμμα 27	
Διάγραμμα 28	96
Διάγραμμα 29	97
Διάγραμμα 30	97
Διάγραμμα 31	
Διάγραμμα 32	
Διάγραμμα 33	
Διάγραμμα 34	
Διάγραμμα 35	
Διάγραμμα 36	
Διάγραμμα 37	
Διάγραμμα 38	
Διάγραμμα 39	
Διάγραμμα 40	
Διάγραμμα 41	
Διάγραμμα 42	
Διάγραμμα 43	
Διάγραμμα 44	
Διάγραμμα 45	114

Διάγραμμα 46	
Διάγραμμα 47	
Διάγραμμα 48	
Διάγραμμα 49	
Διάγραμμα 51	
Διάγραμμα 52	
Διάγραμμα 53	
Διάγραμμα 54	
Διάγραμμα 55	
Διάγραμμα 56	
Διάγραμμα 57	
Διάγραμμα 58	
Διάγραμμα 59	
Διάγραμμα 60	
Διάγραμμα 61	
Διάγραμμα 62	
Διάγραμμα 63	
Διάγραμμα 64	
Διάγραμμα 65	

1. Εισαγωγή στην ηλιακή αφαλάτωση

Το νερό καλύπτει τα τρία τέταρτα της επιφάνειας της γης και αποτελεί έναν από τους πιο άφθονους πόρους της. Περίπου το 97% του νερού της γης είναι αλμυρό νερό και βρίσκεται στους ωκεανούς, ενώ το 3% (περίπου 36 εκατομμύρια km³) είναι φρέσκο νερό που περιέχεται στους πόλους (σε μορφή πάγου), στο νερό του εδάφους, σε λίμνες και ποτάμια, και ικανοποιεί τις ανάγκες των περισσοτέρων ανθρώπων και ζώων του πλανήτη. Σχεδόν το 70% από αυτό το μικροσκοπικό 3% του γλυκού νερού βρίσκεται υπό μορφή πάγου σε παγετώνες, σε περιοχές σκεπασμένες με χιόνι. Το 30% του συνόλου των γλυκών υδάτων είναι υπόγειο, το μεγαλύτερο μέρος του σε υδροφορείς που βρίσκονται σε μεγάλα δυσπρόσβατα βάθη. Λίμνες και ποτάμια μαζί περιέχουν λίγο πάνω από το 0,25% του συνόλου των γλυκών υδάτων. [1]

Η έλλειψη πόσιμου νερού αποτελεί ένα μεγάλο πρόβλημα στις άνυδρες περιοχές του κόσμου όπου το γλυκό νερό είναι πολύ σπάνιο και ακριβό. Το καθαρό πόσιμο νερό είναι ένα από τα πιο σημαντικά διεθνή ζητήματα υγείας σήμερα. Οι περιοχές με τις πιο σοβαρές ελλείψεις σε νερό είναι ζεστές άγονες χώρες στη Μέση Ανατολή και τη Βόρεια Αφρική. Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από την αύξηση στην αλατότητα του νερού του εδάφους και τις σπάνιες βροχοπτώσεις. Η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού σε συνδυασμό με την αύξηση των βιομηχανικών και γεωργικών δραστηριοτήτων σε όλο τον κόσμο, συμβάλλει στην εξάντληση και ρύπανση των υδάτινων πόρων.

Η αφαλάτωση είναι μια από τις πρώτες μορφές επεξεργασίας του νερού, και εξακολουθεί να είναι μια δημοφιλής λύση σε όλο τον κόσμο σήμερα. Στη φύση, η ηλιακή αφαλάτωση παράγει βροχή, όταν η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από τη θάλασσα και προκαλεί την εξάτμιση του νερού. Το νερό που εξατμίζεται ανυψώνεται από την επιφάνεια και μετακινείται από τον άνεμο. Μόλις αυτός ο ατμός κρυώσει στο σημείο δρόσου, συμπυκνώνεται και επιστρέφει υπό μορφή βροχής. Αυτή η βασική διαδικασία είναι υπεύθυνη για τον υδρολογικό κύκλο. Αυτή η ίδια αρχή χρησιμοποιείται σε όλα τα συστήματα τεχνητής απόσταξης με τη χρήση εναλλακτικών πηγών θέρμανσης και ψύξης.

Η αφαλάτωση χρησιμοποιεί μεγάλη ποσότητα ενέργειας για να απομακρύνει ένα τμήμα καθαρού νερού από μια πηγή αλμυρού νερού. Στη διεργασία εισρέει θαλασσινό νερό (τροφοδοτικό νερό) και εκρέει ένα μέρος καθαρού νερού και ένα άλλο, το απόβλητο που έχει υψηλή συγκέντρωση άλατος. Έχει εκτιμηθεί από τον Καλογήρου ότι η παραγωγή 1.000 m³ ανά ημέρα γλυκού νερού απαιτεί 10.000 τόνους πετρελαίου ετησίως. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, δεδομένου ότι αποτελεί μια επαναλαμβανόμενη δαπάνη ενέργειας, την οποία λίγες άνυδρες περιοχές του κόσμου μπορούν να αντέξουν οικονομικά. Οι μεγάλες εμπορικές μονάδες αφαλάτωσης που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα βρίσκονται σε χώρες πλούσιες σε υδρογονάνθρακες και συμπληρώνουν τις παραδοσιακές πηγές υδροδότησης. Οι κάτοικοι πολλών άλλων περιοχών του κόσμου δεν έχουν ούτε τα χρήματα ούτε τους πετρελαϊκούς πόρους για να μπορέσουν να αναπτυχθούν με ένα παρόμοιο τρόπο. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας εκτιμά ότι πάνω από ένα δισεκατομμύριο άνθρωποι δεν έχουν πρόσβαση σε καθαρό πόσιμο νερό και η συντριπτική πλειοψηφία αυτών ζουν σε αγροτικές περιοχές, όπου η χαμηλή πυκνότητα πληθυσμού και οι

απομακρυσμένες περιοχές καθιστούν πολύ δύσκολη την εγκατάσταση παραδοσιακών λύσεων παροχής καθαρού νερού.

Τα προβλήματα σχετικά με τη χρήση των ορυκτών καυσίμων, εν μέρει, θα μπορούσαν να επιλυθούν εξετάζοντας την ενδεχόμενη αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως την ηλιακή, την αιολική, ή τη γεωθερμική ενέργεια και τη βιομάζα. Συμβαίνει συχνά γεωγραφικές περιοχές όπου απαιτείται νερό να είναι καλά προικισμένες με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Πρέπει, ωστόσο, να σημειωθεί ότι, παρά τις προαναφερθείσες ευνοϊκές συνθήκες, η συνεισφορά της ανανεώσιμης ενέργειας για την κάλυψη της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας, αν και αυξήθηκε, εξακολουθεί να είναι ακόμα οριακή. Εκτός από την υδροηλεκτρική ενέργεια, οι υπόλοιποι κύριοι πόροι μαζί (ηλιακοί, αιολικοί, γεωθερμικοί) καλύπτουν λίγο περισσότερο από το 1% της παραγωγής ενέργειας σε όλο τον κόσμο. Λόγω της διάχυτης φύσης της ηλιακής ενέργειας, τα κύρια προβλήματα με τη χρήση της σε μεγάλες μονάδες αφαλάτωσης είναι το σχετικά χαμηλό ποσοστό της παραγωγικότητας, η χαμηλή θερμική απόδοση και η μεγάλη έκταση γης που απαιτείται. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι ηλιακές μονάδες αφαλάτωσης χαρακτηρίζονται από τη δωρεάν ενέργεια και το ασήμαντο κόστος λειτουργίας, η τεχνολογία αυτή είναι, κατάλληλη για μικρής κλίμακας παραγωγή, ιδίως στις απομακρυσμένες άγονες περιοχές και τα νησιά, όπου η παροχή των συμβατικών πηγών ενέργειας είναι ελάχιστες. Εκτός από τις οικονομικές επιπτώσεις, υπάρχουν και περιβαλλοντικές ανησυχίες σε σχέση με την καύση των ορυκτών καυσίμων. Η σύζευξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με τις διαδικασίες αφαλάτωσης θεωρείται ότι προσφέρει μια βιώσιμη πορεία για την αύξηση της προμήθειας του πόσιμου νερού.

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί άμεσα ή έμμεσα να αξιοποιηθεί για την αφαλάτωση. Τα συστήματα συλλογής που χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για την παραγωγή αποστάγματος απευθείας στο ηλιακό συλλέκτη ονομάζονται συστήματα άμεσης συλλογής, ενώ τα συστήματα που συνδυάζουν τα συστήματα συλλογής ηλιακής ενέργειας με τα συμβατικά συστήματα αφαλάτωσης ονομάζονται έμμεσα συστήματα. Στα έμμεσα συστήματα, η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται είτε για την παραγωγή της θερμότητας που απαιτείται για την αφαλάτωση ή/και για να την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για τις συμβατικές εγκαταστάσεις αφαλάτωσης. [2]

Τα άμεσα συστήματα συλλογής ή ηλιακά συστήματα απόσταξης περιλαμβάνουν τους ηλιακούς αποστακτήρες, οι οποίοι κατατάσσονται σε δύο ομάδες: τους παθητικούς και τους ενεργητικούς. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα απόσταξης είναι συμβατικά ηλιακά συστήματα που χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια ως τη μόνη πηγή θερμικής ενέργειας. Στην ενεργητικούς ηλιακούς αποστακτήρες, παρέχεται επιπλέον θερμική ενέργεια για ταχύτερη εξάτμιση. Αυτή η επιπλέον θερμική ενέργεια μπορεί να ληφθεί από έναν ηλιακό συλλέκτη, ή οποιαδήποτε διαθέσιμη απόβλητη θερμική ενέργεια από οποιαδήποτε βιομηχανική εγκατάσταση. [3]

Η τεχνολογία αφαλάτωσης θαλασσινού νερού έχει εφαρμοστεί σε πολλές άνυδρες περιοχές του κόσμου, όπως στη Μέση Ανατολή, τη Μεσόγειο και την Καραϊβική. Η **Εικόνα 1** δείχνει τη θέση των υπαρχουσών εγκαταστάσεων αφαλάτωσης σε όλο τον κόσμο. Η συντριπτική πλειονότητα των εγκαταστάσεων υψηλής παραγωγικής ικανότητας βρίσκεται στη Μέση Ανατολή. Η αφαλάτωση θαλασσινού νερού στην περιοχή του Περσικού Κόλπου αντιπροσωπεύει το 65% της παγκόσμιας παραγωγής αφαλατωμένου νερού. Η Σαουδική Αραβία, τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, οι ΗΠΑ, η Ισπανία και η Κίνα έχουν την υψηλότερη ικανότητα αφαλάτωσης, αλλά η Ινδία και το Ισραήλ έχουν δει μια σημαντική αύξηση από το 2002, όταν κατασκευάστηκαν μεγάλης χωρητικότητας εγκαταστάσεις. [4]

Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Αφαλάτωσης, τον Ιούνιο του 2011, λειτουργούσαν 15.988 μονάδες αφαλάτωσης σε όλο τον κόσμο, με παραγωγή 66,5 εκατομμύρια κυβικά μέτρα την ημέρα. Η αφαλάτωση εφαρμόζεται σε 150 χώρες και 300 εκατομμύρια άνθρωποι σε όλο τον κόσμο, βασίζονται στο αφαλατωμένο νερό για μερικές από τις καθημερινές τους ανάγκες. [5]



Εικόνα 1: Παγκόσμια δυναμικότητα αφαλάτωσης

Η πλειονότητα των συστημάτων αφαλάτωσης νερού μπορεί να διαιρεθεί σε δύο τύπους: θερμικών διεργασιών αλλαγής φάσης και διεργασιών μεμβράνης, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2**, που περιλαμβάνουν έναν αριθμό διαφορετικών διαδικασιών. Επιπλέον, υπάρχουν και άλλες εναλλακτικές τεχνολογίες, όπως της κατάψυξης και της ανταλλαγής ιόντων, αλλά δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως. Όλες λειτουργούν είτε από συμβατικές είτε από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την παραγωγή πόσιμου νερού.



Εικόνα 2: Διεργασίες αφαλάτωσης

Μεταξύ όλων των διαδικασιών αφαλάτωσης, τα συστήματα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εξάτμιση (MSF), με πολυβάθμια εκτόνωση (MED), αντίστροφης όσμωσης (RO) και ηλεκτροδιάλυσης (ED) αντιπροσωπεύουν περίπου το 95% της συνολικής δυναμικότητος αφαλάτωσης (**Εικόνα 3**). [6]



Εικόνα 3: Εγκατεστημένη δυναμικότητα αφαλάτωσης

Άμεση ηλιακή αφαλάτωση – Παθητικοί ηλιακοί αποστακτήρες (Direct solar desalination - Passive solar stills)

Η μέθοδος της άμεσης ηλιακής αφαλάτωσης είναι κυρίως κατάλληλη για μικρά συστήματα παραγωγής, όπως είναι οι ηλιακοί αποστακτήρες, σε περιοχές όπου η ζήτηση νερού είναι μικρότερη από 200 m³/day. Αυτό το χαμηλό ποσοστό παραγωγής εξηγείται από τη χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας και την χαμηλή πίεση του ατμού. Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει από πολλούς ερευνητές με σκοπό την παραγωγή γλυκού νερού με την βοήθεια της ηλιακής ενέργειας. Ο απλός ηλιακός αποστακτήρας τύπου λεκάνης είναι η παλαιότερη μέθοδος και έχουν μελετηθεί πολλές βελτιώσεις στο σχεδιασμό του για την αύξηση της αποδοτικότητάς του.

Ένας ηλιακός αποστακτήρας είναι μια απλή συσκευή η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετατροπή αλμυρού ή υφάλμυρου νερού σε πόσιμο. Οι ηλιακοί αποστακτήρες βασίζονται ακριβώς στις ίδιες διαδικασίες που στη φύση προκαλούν βροχοπτώσεις, δηλαδή την εξάτμιση και τη συμπύκνωση. Η λειτουργία του είναι πολύ απλή. Ένα διαφανές κάλυμμα σκεπάζει ένα δοχείο με αλμυρό νερό και στο εσωτερικό του παγιδεύεται η ηλιακή ενέργεια. Το νερό θερμαίνεται, εξατμίζεται, συμπυκνώνεται στην εσωτερική επιφάνεια του κεκλιμένου διαφανούς καλύμματος και τελικά συλλέγεται ως καθαρό νερό. Αυτό το αποσταγμένο νερό είναι γενικά πόσιμο. Η ποιότητα του αποστάγματος είναι πολύ υψηλή, διότι όλα τα άλατα, τα ανόργανα και οργανικά συστατικά και τα μικρόβια παραμένουν στη λεκάνη. Υπό λογικές συνθήκες ηλιακού φωτός, η θερμοκρασία του νερού θα αυξηθεί αρκετά για να σκοτώσει όλα τα παθογόνα βακτήρια που θα αναπτυχθούν στον πυθμένα της δεξαμενής γι'αυτό και θα πρέπει να ξεπλένεται όσο συχνά είναι απαραίτητο.

Προκειμένου να εξατμιστεί 1kg νερού σε μία θερμοκρασία 30[°]C περίπου, απαιτούνται 2,4x10⁶J. Υποθέτοντας μία ηλιοφάνεια 250W/m², κατά μέσο όρο κατά τη διάρκεια του 24 ώρου, αυτή η ενέργεια θα μπορούσε να εξατμίσει το μέγιστο 9 L/m²/day. Στην πράξη, θα υπάρξουν απώλειες θερμότητας και η μέση ημερήσια απόδοση που θα ανέμενε κανείς από έναν ηλιακό αποστακτήρα είναι 4-5 L/m²/day. Οι σύγχρονοι ηλιακοί αποστακτήρες μονής επίδρασης έχουν απόδοση της τάξης του 30-40%. [7]

2.1 Ηλιακοί αποστακτήρες με λεκάνη (Basin-type solar stills)

Στον ηλιακό αποστακτήρα με λεκάνη το ακατέργαστο νερό εισέρχεται σε μία καλά μονωμένη στεγανή λεκάνη που καλύπτεται με διαφανές πλαστικό/γυάλινο κάλυμμα. Όταν το κάλυμμα εκτίθεται στον ήλιο, η ενέργεια δια ακτινοβολίας μεταδίδεται στη λεκάνη μέσω του διαφανούς καλύμματος, και απορροφάται από την απορροφητική πλάκα της λεκάνης, μετατρέπεται σε θερμότητα και μεταφέρεται στο νερό. Το νερό θερμαίνεται, μεταφέρει θερμότητα στον αέρα στο εσωτερικό του αποστακτήρα και ο αέρας γίνεται ακόρεστος. Το νερό εξατμίζεται και κάνει τον αέρα μέσα στον αποστακτήρα κορεσμένο. Λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας του νερού και της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος δημιουργείται το φαινόμενο της συναγωγής και τα μόρια του αέρα υπόκεινται σε κυκλική κίνηση στο εσωτερικό του αποστακτήρα. Όταν η υψηλή θερμοκρασία του αέρα αγγίζει το κάλυμμα, το νερό που περιέχεται στον αέρα συμπυκνώνεται στην εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος. Αυτό το συμπυκνωμένο νερό στη συνέχεια συλλέγεται από τα κανάλια απόσταξης. [8]

2.1.1 Ηλιακοί αποστακτήρες μονής επίδρασης (Single Effect solar stills)

2.1.1.1 Ηλιακοί αποστακτήρες με κάλυμμα μονής και διπλής κλίσης (Single and Double slope solar stills)

Οι Fath κ.α. συνέκριναν και μελέτησαν τις διαφορές μεταξύ ηλιακών αποστακτήρων με καλύμματα μονής κλίσης (Εικόνα 4) και διπλής κλίσης (Εικόνα 5). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι:

- i. Η ηλιακή ενέργεια που λαμβάνει ο ηλιακός αποστακτήρας με κάλυμμα μονής κλίσης ήταν 8% υψηλότερη από εκείνη που λαμβάνει ο αποστακτήρας με κάλυμμα διπλής κλίσης το χειμώνα, ενώ ήταν 5% χαμηλότερη το καλοκαίρι.
- λόγω της μεγαλύτερης απώλειας ακτινοβολίας από την επιφάνεια του καλύμματος
 διπλής κλίσης η ημερήσια απόδοση του αποστακτήρα μονής κλίσης ήταν 30%
 υψηλότερη το χειμώνα και 3% υψηλότερη το καλοκαίρι.
- iii. Η ετήσια μέση ημερήσια παραγωγικότητα είναι παραπλήσια και για τους δύο τύπους των ηλιακών αποστακτήρων.
- iv. Η μέση ετήσια απόδοση είναι 30% και 33% για τον ηλιακό αποστακτήρα με κάλυμμα διπλής και μονής κλίσης, αντίστοιχα. [9]

Οι Eze κ.α. κατέληξαν επίσης στο συμπέρασμα ότι η μέση απόδοση των αποστακτήρων με κάλυμμα μονής κλίσης είναι υψηλότερη από αυτόν με διπλή κλίση. Αν και οι δύο τύποι αποστακτήρων έχουν ίσες επιφάνειες λεκάνης ο τύπος διπλής κλίσης έχει μεγαλύτερη επιφάνεια γυαλιού που δημιουργεί μεγαλύτερη απώλεια θερμότητας. Οι Duffie & Beckman πρότειναν, ότι ο καλύτερος προσανατολισμός για τον ηλιακό αποστακτήρα με κάλυμμα μονής κλίσης που βρίσκεται στο βόρειο ημισφαίριο είναι ο νότος. Το κάλυμμα πρέπει να έχει κλίση κατά μήκος της κατεύθυνσης βορρά-νότου κατά μια γωνία από την οριζόντια στο τοπικό γεωγραφικό πλάτος συν 15⁰. [10]



Εικόνα 4: Ηλιακός αποστακτήρας με κάλυμμα μονής κλίσης [11]



Εικόνα 5: Ηλιακός αποστακτήρας με κάλυμμα διπλής κλίσης (τύπου πυραμίδας) [12]

2.1.2 Ηλιακοί αποστακτήρες πολλαπλής επίδρασης (Multi-effect solar stills)

Στους αποστακτήρες με λεκάνη, με τον όρο πολλαπλή επίδραση εννοείται το αποτέλεσμα της προσθήκης παραπάνω λεκανών στον αποστακτήρα. Οι ηλιακοί αποστακτήρες πολλαπλής επίδρασης έχουν δύο ή περισσότερες λεκάνες που βρίσκονται η μία πάνω στην άλλη. Η επιφάνεια συμπύκνωσης της κάτω λεκάνης είναι ο πυθμένας της άνω λεκάνης. Η θερμότητα που εκπέμπεται από τον ατμό συμπύκνωσης παρέχει την ενέργεια για την εξάτμιση του τροφοδοτικού νερού της επάνω λεκάνης. Οι ηλιακοί αποστακτήρες πολλαπλής επίδρασης είναι πιο παραγωγικοί από τους ηλιακούς αποστακτήρες μονής επίδρασης, λόγω της επαναχρησιμοποίησης της λανθάνουσας θερμότητας συμπύκνωσης. Η αύξηση της αποδοτικότητας, όμως, πρέπει να σταθμιστεί σε σχέση με το κόστος κατασκευής και λειτουργίας. Η αποδοτικότητα είναι συνεπώς μεγαλύτερη από ό, τι σε ένα η πολυπλοκότητα είναι αντίστοιχα μεγαλύτερα. [7]

2.1.2.1 Ηλιακός αποστακτήρας διπλής λεκάνης (Double-basin solar still)

Ο Sodha κ.α. παρουσίασαν μια ανάλυση των ηλιακών αποστακτήρων διπλής λεκάνης (Εικόνα 6) κατά την οποία εξετάστηκαν οι επιδόσεις του για τα διάφορα συστήματα και κλιματικές συνθήκες. Το αποτέλεσμα δείχνει ότι οι ηλιακοί αποστακτήρες διπλής λεκάνης αποδίδουν 36% περισσότερο από τους ηλιακούς αποστακτήρες μονής λεκάνης.[8]



Εικόνα 6: Ηλιακός αποστακτήρας διπλής λεκάνης [12]

2.1.2.2 Ηλιακός αποστακτήρας τριπλής λεκάνης (Triple-basin solar still)

Ο ηλιακός αποστακτήρας τριπλής λεκάνης έχει μελετηθεί πειραματικά από τον El-Sebaii. Το όλο σύστημα συμπεριφέρεται ως τρεις ηλιακοί αποστακτήρες μονής λεκάνης τοποθετημένοι ο ένας πάνω στο άλλο. Το νερό στη μεσαία και την άνω λεκάνη κάνει χρήση της λανθάνουσας θερμότητας από τη συμπύκνωση, που εκλύεται στις εσωτερικές επιφάνειες των γυάλινων καλυμμάτων της κατώτερης και μεσαίας λεκάνης αντιστοίχως. Κατά συνέπεια, η εξάτμιση λαμβάνει χώρα και στις τρεις λεκάνες (τρείς επιδράσεις). Η συνολική παραγωγικότητα του συστήματος είναι το άθροισμα των παραγωγικοτήτων των επιμέρους λεκανών. [13]

Η παραγωγικότητα γενικά αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των επιδράσεων στον αποστακτήρα. Ο Al Mahdi έκανε μια ανάλυση για να προβλέψει την επίδραση του αριθμού των λεκανών στην καθημερινή παραγωγικότητα του αποστακτήρα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, ένας αποστακτήρας διπλής λεκάνης δίνει μεγαλύτερη στιγμιαία παραγωγικότητα. Ωστόσο, οι αποστακτήρες τριπλής και τετραπλής λεκάνης συνεχίζουν να παράγουν σημαντικές ποσότητες αποστάγματος κατά τη διάρκεια της νύχτας, με αποτέλεσμα την υψηλότερη ημερήσια παραγωγικότητα. Αλλά, προσθέτοντας μια λεκάνη επί πλέον αυτών δεν έχει σημαντική επίδραση στην παραγωγικότητα. [8]

2.2 Ηλιακοί Αποστακτήρες τύπου φυτιλιού (Wick solar stills)

Οι ηλιακοί αποστακτήρες τύπου φυτιλιού συμπεριλαμβάνονται στους κεκλιμένους αποστακτήρες. Το τροφοδοτικό νερό ρέει αργά μέσω ενός πορώδους φυτιλιού, που

απορροφά την ακτινοβολία. Υπάρχουν δύο πλεονεκτήματα σε σχέση με τους αποστακτήρες λεκάνης. Πρώτον, το φυτίλι μπορεί να βρίσκεται υπό γωνία έτσι ώστε το νερό να έχει μια καλύτερη γωνία ως προς τον ήλιο (μείωση της αντανάκλασης και μεγαλύτερη επιφάνεια). Δεύτερον, λιγότερο νερό βρίσκεται στον αποστακτήρα κάθε χρονική στιγμή και έτσι θερμαίνεται ταχύτερα και σε μία υψηλότερη θερμοκρασία. Οι Tanaka κ.α. έχουν αποδείξει την ανωτερότητα του ηλιακού αποστακτήρα τύπου φυτιλιού και επιβεβαίωσαν την αύξηση της παραγωγικότητας κατά 20-50%. [8]

2.2.1 Ηλιακός αποστακτήρας τύπου φυτιλιού μονής επίδρασης (Wick-type solar still) [14]

Οι ερευνητές έχουν σχεδιάσει διάφορους ηλιακούς αποστακτήρες τύπου φυτιλιού μονής επίδρασης. Οι ηλιακοί αποστακτήρες τύπου φυτιλιού μονής επίδρασης, με λεκάνη, με φυτίλια από γιούτα και ύφασμα κάρβουνου είναι πολύ απλοί στην κατασκευή. Το σύστημα αποτελείται από μία απλή λεκάνη που περικλείεται από ένα θερμικά μονωμένο ξύλινο κουτί και καλύπτεται από ένα γυαλί. Το φυτίλι από ίνες γιούτας επιπλέει στο νερό της λεκάνης και το ύφασμα από κάρβουνο εισάγεται στην κεκλιμένη λεκάνη. Η γιούτα στη λεκάνη απορροφά νερό και λόγω της τριχοειδούς δράσης, η άνω επιφάνεια του φυτιλιού είναι πάντα υγρή κατά τη διάρκεια της αιχμής των ηλιόλουστων ωρών. Το νερό εξατμίζεται και οι υδρατμοί συμπυκνώνονται σαν καθαρό αποσταγμένο νερό. Η θερμοχωρητικότητα του αποστακτήρα είναι μικρότερη. Το ύφασμα από κάρβουνο που έχει εισαχθεί στην κεκλιμένη λεκάνη ενεργεί ως εξατμιστική επιφάνεια κατά τη διάρκεια των ωρών λειτουργίας του αποστακτήρα και το νερό ρέει σε όλο το φυτίλι, λόγω καλής τριχοειδούς δράσης, που χρησιμεύει ως επιφάνεια λεπτού στρώματος νερού για την εξάτμιση.

Το σχέδιο που προτείνεται από τους Mahdi κ.α. (Εικόνα 7) έχει την δυνατότητα αλλαγής της γωνίας κλίσης του αποστακτήρα για τη μέγιστη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας.



Εικόνα 7: Τομή του ηλιακού αποστακτήρα τύπου φυτιλιού (1) γαλβανισμένος χαλύβδινος δίσκος, (2) γυάλινο κάλυμμα, (3) βάσης στήριξης, (4) πολυστερίνη, (5) ύφασμα άνθρακα, (6) κανάλι αλουμινίου, (7) λαστιχένια τσιμούχα, (8) χάλυβας, (9) φελιζόλ, (10) υδρορροή [15]

2.2.2 Σύστημα ηλιακού αποστακτήρα λεκάνης- τύπου φυτιλιού (Wick-basin type still) [14]

Το σύστημα ηλιακού αποστακτήρα λεκάνης - τύπου φυτιλιού (**Εικόνα 8**) που σχεδιάστηκε από τους Minasian & Al-Karaghouli έχει μεγάλες δυνατότητες, λόγω της υψηλής παραγωγικότητας σε σχέση με τους άλλους τύπους αποστακτήρων λεκάνης και τύπου φυτιλιού. Η κατασκευή του αποστακτήρα είναι απλή. Το πρώτο τμήμα είναι ένας κεκλιμένος ηλιακός αποστακτήρας με φυτίλι, ενώ το δεύτερο τμήμα είναι ένας αποστακτήρας με μια μικρή λεκάνη. Το προθερμασμένο νερό κατά τη διάρκεια λειτουργίας του ηλιακού αποστακτήρα με φυτίλι τροφοδοτεί την λεκάνη του ηλιακού αποστακτήρα με λεκάνη μέσω ενός σωλήνα. Έτσι, τα δύο τμήματα λειτουργούν μαζί ως μία μεμονωμένη μονάδα. [16]. Οι συνολικές ετήσιες ποσότητες αποσταγμένου νερού δείχνουν ότι το σύστημα ηλιακού αποστακτήρα λεκάνης - τύπου φυτιλιού μπορεί να παράγει 85% περισσότερο από ό, τι ο αποστακτήρας τύπου λεκάνης και 43% περισσότερο από ό, τι ο αποστακτήρας τύπου φυτιλιού. [17]



Minasian AN and Al-Karaghouli AA [4]

Εικόνα 8: Σύστημα ηλιακών αποστακτήρων λεκάνης και τύπου φυτιλιού

2.2.3 Ηλιακοί αποστακτήρες τύπου φυτιλιού πολλαπλής επίδρασης (Multi-wick type solar still) [8]

Στους ηλιακούς αποστακτήρες τύπου φυτιλιού πολλαπλής επίδρασης, χρησιμοποιείται ύφασμα από γιούτα σε διαφορετικά μήκη. Ένα άκρο υφάσματος βυθίζεται μέσα στη δεξαμενή νερού, ενώ τα άλλα άκρα απλώνονται πάνω από την απορροφητική λεκάνη, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 9**. Τα κομμάτια από ύφασμα γιούτας είναι μαύρα και τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο ενώ χωρίζονται από φύλλα πολυαιθυλενίου. Εδώ, το υγρό ύφασμα αποτελεί την επιφάνεια του νερού του αποστακτήρα και έτσι σημειώνεται μια υψηλότερη θερμοκρασία λόγω της αμελητέας θερμοχωρητικότητάς του. Αυτό οδηγεί σε ταχεία εξάτμιση του νερού. [17]



Εικόνα 9: Ηλιακός αποστακτήρας τύπου φυτιλιού πολλαπλής επίδρασης

Οι M.S. Sodha κ.α. παρατήρησαν ότι, η συνολική απόδοση των ηλιακών αποστακτήρων πολλαπλών φυτιλιών είναι 4% υψηλότερη από αυτήν του τύπου απλής λεκάνης. Τα αποτελέσματά τους δείχνουν επίσης ότι, το κόστος του αποστακτήρα είναι χαμηλότερο από το ήμισυ του κόστους ενός αποστακτήρα τύπου λεκάνης της ίδιας επιφάνειας και έχει υψηλότερη απόδοση αποστάγματος. Οι G.N. Tiwari & H. P. Garg επιβεβαίωσαν επίσης ότι, οι ηλιακοί αποστακτήρες πολλαπλών φυτιλιών είναι πιο οικονομικοί και αποδοτικοί μεταξύ των υπαρχόντων ηλιακών αποστακτήρων. [19]

2.3 Ηλιακοί αποστακτήρες διάχυσης (Diffusion solar stills) [8]

2.3.1 Ηλιακός αποστακτήρας διάχυσης μονής επίδρασης (Diffusion type solar still)

Στην απλή διαδικασία αφαλάτωσης διάχυσης μία ζεστή και μία ψυχρή επιφάνεια τοποθετούνται παράλληλα σε μικρή απόσταση μεταξύ τους και αέρας γεμίζει το κενό μεταξύ των δύο επιφανειών. Το πάχος διακένου επιλέγεται να είναι μικρό για να καταστείλει τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή μεταξύ των δύο επιφανειών. Η ηλιακή ακτινοβολία μεταδίδεται μέσω του γυάλινου καλύμματος και απορροφάται στην μπροστινή επιφάνεια του διαχωριστικού. Όταν το τροφοδοτικό νερό αφήνεται να ρέει πάνω από την ζεστή επιφάνεια, οι υδρατμοί διαχέονται μέσα στο διάκενο, όπου συμπυκνώνονται στην ψυχρή επιφάνεια. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται αφαλάτωση διάχυσης. Στην εικόνα **Εικόνα 10** απεικονίζεται ένας ηλιακός αποστακτήρας διάχυσης μονής επίδρασης.



Εικόνα 10: Ηλιακός αποστακτήρας διάχυσης

2.3.2 Ηλιακός αποστακτήρας διάχυσης πολλαπλής επίδρασης (Multi-effect diffusion type solar still)

Οι ηλιακοί αποστακτήρες διάχυσης πολλαπλής επίδρασης έχουν μεγάλες δυνατότητες, λόγω της υψηλής παραγωγικότητας και της απλότητάς τους. Η λανθάνουσα θερμότητα από τη συμπύκνωση ανακτάται για να προκαλέσει περαιτέρω εξάτμιση. Με τον τρόπο αυτό η εξάτμιση και η διαδικασία συμπύκνωσης επαναλαμβάνονται σε όλα τα υποσυστήματα του αποστακτήρα διάχυσης με αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγικότητας. Ο Elsayed μελέτησε τις παραμέτρους που επηρεάζουν την απόδοση του ηλιακού αποστακτήρα διάχυσης πολλαπλής επίδρασης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η λειτουργική αποδοτικότητα βελτιώνεται με:

- i. την αύξηση του μεγέθους της ηλιακής ροής ακτινοβολίας
- ii. τη μείωση του πάχους διακένου διάχυσης
- iii. την αύξηση του αριθμού των επιδράσεων
- iv. τη μείωση του ρυθμού τροφοδοσίας για κάθε επίδραση, και/ή με τη χρήση ηλίου αντί του αέρα στο διάκενο.

2.4 Ειδικοί σχεδιασμοί ηλιακών αποστακτήρων

2.4.1 Ηλιακός αποστακτήρας με κοίλο κάτοπτρο (Inverted absorber solar still IASS)

Ένας ηλιακός αποστακτήρας με κοίλο κάτοπτρο (**Εικόνα 11**) είναι ένα συνδυασμένο σύστημα ηλιακού αποστακτήρα με κάλυμμα μονής κλίσης και ένα κυρτό ανακλαστήρα κάτω από τη λεκάνη του. Είναι μια βελτιωμένη σχεδίαση του ηλιακού αποστακτήρα με το πλεονέκτημα της διπλής όψης θέρμανσης της λεκάνης, δηλαδή από την κορυφή και από τον πυθμένα, πράγμα που αυξάνει τη θερμοκρασία της λεκάνης καθώς και του νερού. [18] Η ηλιακή ακτινοβολία, αφού διέλθει μέσω του γυάλινου καλύμματος g1, αντανακλάται στο κοίλο κάτοπτρο του ηλιακού αποστακτήρα. Ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται συνάγεται στη μάζα του νερού ενώ το υπόλοιπο χάνεται στην ατμόσφαιρα μέσω των γυάλινων καλυμμάτων g1 και g2.



Εικόνα 11: Ηλιακός αποστακτήρας με κοίλο κάτοπτρο

Oι G.N. Tiwari & Sangeeta Suneja παρουσίασαν μια ανάλυση ενός ηλιακού αποστακτήρα με κοίλο κάτοπτρο. Τα αποτελέσματά τους δείχνουν ότι, αυτός έχει περίπου τη διπλάσια απόδοση από έναν ηλιακό αποστακτήρα μονής επίδρασης, καθώς επίσης, έχει και υψηλότερη απόδοση από τον ηλιακό αποστακτήρα διπλής επίδρασης. Η συνολική ημερήσια απόδοση του είναι 30% υψηλότερη από ό, τι του ηλιακού αποστακτήρα τριπλής επίδρασης. Οι συγγραφείς βελτιστοποίησαν τον αριθμό των επιδράσεων και βρέθηκε ότι η απόδοση του ηλιακού αποστακτήρα με κοίλο κάτοπτρο αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των λεκανών και φτάνει μια βέλτιστη τιμή, όταν ο αριθμός αυτών είναι επτά. Τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης του ηλιακού αποστακτήρα με κοίλο κάτοστακτήρα με κοίλο κάτοπτρο και διπλή

2.4.2 Σωληνοειδής ηλιακός αποστακτήρας - Tubular solar still [19]

Ο σωληνοειδής ηλιακός αποστακτήρας (**Εικόνα 12**) αποτελείται από ένα ορθογώνιο μεταλλικό μαύρο δίσκο που τοποθετείται στο διαμετρικό επίπεδο ενός κυλινδρικού γυάλινου σωλήνα. Το μήκος και η διάμετρος του γυάλινου σωλήνα είναι ελαφρώς μεγαλύτερα από το μήκος και το πλάτος του δίσκου, αντίστοιχα. Ο δίσκος και ο γυάλινος σωλήνας τοποθετούνται με ελαφρά κλίση από το οριζόντιο επίπεδο, αλλά σε αντίθετες κατευθύνσεις. Το αλμυρό νερό που τροφοδοτείται από το ένα άκρο εν μέρει εξατμίζεται, και το υπόλοιπο αποβάλλεται από το άλλο άκρο του σωλήνα. Το νερό που εξατμίζεται συμπυκνώνεται επί των εσωτερικών τοιχωμάτων του γυάλινου καλύμματος, ρέει προς τα κάτω και αφαιρείται από το κάτω άκρο του γυάλινου σωλήνα. Ο ρυθμός ροής της τροφοδοσίας μπορεί να ελέγχεται μεταβάλλοντας τη θέση της οπής υπερχείλισης της δεξαμενής ελέγχου ροής.

Ο G.N. Tiwari μελέτησε την απόδοση ενός σωληνοειδούς ηλιακού αποστακτήρα και διαπίστωσε ότι η ημερήσια απόδοση του αποστάγματος είναι υψηλότερη από εκείνη του συμβατικού ηλιακού αποστακτήρα.



Εικόνα 12: Σωληνοειδής ηλιακός αποστακτήρας

2.4.3 Σφαιρικός ηλιακός αποστακτήρας - Spherical solar still [19]

Ο σφαιρικός ηλιακός αποστακτήρας (Εικόνα 13) αποτελείται από μια μαυρισμένη μεταλλική πλάκα που τοποθετείται οριζόντια στο κέντρο ενός διαφανούς περιβλήματος, το οποίο είναι σφαιρικού σχήματος και κατασκευάζεται συνήθως από γυαλί. Ο Naresh K. Dhiman παρουσίασε ένα μαθηματικό μοντέλο για την πρόβλεψη της θερμικής απόδοσης ενός σφαιρικού ηλιακού αποστακτήρα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, η απόδοσή του είναι 30% μεγαλύτερη από ό, τι του συμβατικού ηλιακού αποστακτήρα.



Εικόνα 13: Σφαιρικός ηλιακός αποστακτήρας

2.4.4 Βηματικός Ηλιακός Αποστακτήρας - Stepped solar still [17]

Διατηρώντας ελάχιστο βάθος στους ηλιακούς αποστακτήρες σχηματίζονται ξηρά σημεία. Έτσι, η διατήρηση ελαχίστου βάθους στο ηλιακό αποστακτήρα καθίσταται πολύ δύσκολη. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, οι Velmurugan κ.α. σχεδίασαν και κατασκεύασαν ένα βηματικό ηλιακό αποστακτήρα. Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 14**, υπάρχουν 50 αυλάκια συλλογής στον ηλιακό αποστακτήρα. Τα πειράματα διεξήχθησαν με την προσθήκη στον βηματικό ηλιακό αποστακτήρα πτερυγίων (fins) και σφουγγαριών (sponge cubes) για την ενίσχυση της παραγωγικότητάς του.



Εικόνα 14: Βηματικός ηλιακός αποστακτήρας

3. Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των ηλιακών αποστακτήρων [20]

Η απόδοση των ηλιακών αποστακτήρων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τους διάφορους ατμοσφαιρικούς και σχεδιαστικούς παράγοντες, οι οποίοι αναλύονται παρακάτω.

3.1 Επιδράσεις των ατμοσφαιρικών μεταβλητών

3.1.1 Ηλιακή ακτινοβολία

Πειράματα έχουν αποδείξει ότι, τουλάχιστον όσον αφορά στις ατμοσφαιρικές επιδράσεις, η παραγωγικότητα ενός ηλιακού εξακολουθεί να εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Άλλες ατμοσφαιρικές μεταβλητές είναι ήσσονος σημασίας. Ως εκ τούτου, οι ηλιακοί αποστακτήρες είναι συνήθως συμφέροντες μόνο σε περιοχές της γης που έχουν υψηλή μέση κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τους διάφορους μήνες του έτους.

Η κατεύθυνση και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα αποστακτήρα διαφέρει κατά τη διάρκεια κάθε ημέρας. Η εμπειρία και οι υπολογισμοί έχουν δείξει ότι ένας αποστακτήρας για να παράγει περισσότερο το νερό, θα πρέπει να σχεδιαστεί με τρόπο που να επιτυγχάνει υψηλή θερμοκρασία άλμης με ελάχιστη θερμική υστέρηση. Για παράδειγμα, ένα ρηχό στρώμα άλμης θα φτάσει σε υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας από ένα βαθύ στρώμα, κάτω από παρόμοιες συνθήκες.

3.1.2 Θερμοκρασία περιβάλλοντος

Η παραγωγικότητα ενός ηλιακού αποστακτήρα αυξάνει ελαφρώς σε συνάρτηση με τις αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Αυξάνεται κατά μέσο όρο 5% για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά 10°F.

3.1.3 Ταχύτητα του ανέμου

Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα ανέμου πάνω από έναν ηλιακό αποστακτήρα, η θερμότητα απομακρύνεται από το κάλυμμα, με συναγωγή, πολύ γρήγορα. Το γεγονός αυτό μειώνει τη θερμοκρασία του καλύμματος, το οποίο αυξάνει προσωρινά το ποσοστό της συμπύκνωσης στο εσωτερικό του αποστακτήρα. Ωστόσο, καθώς η θερμοκρασία του καλύμματος μειώνεται, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από την άλμη στο κάλυμμα, μέσω της ακτινοβολίας και της συναγωγής, αυξάνει. Η θερμοκρασία της άλμης με τον τρόπο αυτό μειώνεται έως ότου επιτευχθεί μια νέα θερμική ισορροπία σε κάπως χαμηλότερες θερμοκρασίες, σε όλο τον αποστακτήρα. Επειδή ο ρυθμός της εξάτμισης ελαττώνεται εκθετικά με τη θερμοκρασία της άλμης, η καθαρή επίδραση της αύξησης της ταχύτητας του ανέμου έχει σαν αποτέλεσμα μια μικρή μείωση της παραγωγικότητας. Τα δεδομένα που υποβάλλονται από πολλούς ερευνητές δείχνουν ότι η αυξημένη ταχύτητα του ανέμου έχει μόνο μια μικρή αρνητική επίδραση στην παραγωγικότητα, όταν ένας αποστακτήρας είναι καλά σφραγισμένος ώστε να αποφευχθεί η διαρροή ατμού. Ωστόσο, όταν υπάρχουν πλημμελώς σφραγισμένες ενώσεις στο καπάκι του αποστακτήρα, η αυξημένη ταχύτητα του ανέμου μπορεί να μειώσει την παραγωγικότητα σε αισθητό βαθμό, ανάλογα με τους αεροδυναμικούς συντελεστές και το μέγεθος και τη θέση των ρωγμών. Σοβαροί άνεμοι μπορούν επίσης να παρασύρουν υαλοπίνακες ή να σχίσουν τις πλαστικές μεμβράνες: απρόβλεπτα που πρέπει να αποφευχθούν με τον κατάλληλο σχεδιασμό.

3.1.4 Βροχόπτωση

Το κάλυμμα ενός ηλιακού αποστακτήρα μπορεί να αποτελέσει μια εξαιρετική λεκάνη συλλογής τού νερού της βροχής. Αποστακτήρες από γυαλί και διογκωμένο πλαστικό έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για το σκοπό αυτό. Το ακριβές ποσοστό της βροχής που μπορεί να συλλεχθεί ποικίλλει ευρέως ανάλογα με τις συνθήκες τοποθεσίας, και κυρίως το ποσοστό των βροχοπτώσεων. Η εμπειρία από διάφορες έρευνες σε διάφορα μέρη του κόσμου δείχνουν ότι το 70-90% μπορεί να συλλεχθεί, με μια ασφαλή εκτίμηση 80% για τις περιοχές που έχουν μια αρκετά ομοιόμορφη βροχόπτωση άνω των 10 ιντσών περίπου ετησίως. Οι 10 ίντσες βροχοπτώσεως αντιστοιχούν σε 6-24 gal/ft². Η συλλογή των βροχοπτώσεων μπορεί να αυξήσει σημαντικά την παραγωγή ενός ηλιακού αποστακτήρα. Για παράδειγμα, η μέση ετήσια παραγωγή ενός ηλιακού αποστακτήρα - 0-08 gal/ft2/day ισοδυναμεί με περίπου 29 gal/ft2/yr. Ως εκ τούτου, η παραγωγή ενός τυπικού αποστακτήρα είναι ίση με περίπου 46 ίντσες βροχής σε 100% απόδοση συλλογής. Εναλλακτικά, το 80% συλλογής 15 ιντσών βροχοπτώσεων θα αυξήσει τα 29 gal ηλιακά αποσταγμένου νερού κατά περίπου 7,5 γαλόνια ανά έτος, που αντιστοιχεί σε σχεδόν 26 % αύξηση.

3.2 Επιδράσεις Σχεδιασμού

Από τους πολλούς διαφορετικούς τύπους σχεδιασμού ηλιακών αποστακτήρων, μόνο τέσσερις παράμετροι έχουν αισθητές επιπτώσεις στην παραγωγικότητα: το βάθος της άλμης, η διαρροή ατμού, η διαρροή συμπυκνωμάτων και η μόνωση της λεκάνης.

3.2.1 Βάθος άλμης

Έχει αποδειχθεί ότι όσο χαμηλότερη είναι η θερμοχωρητικότητα (στο ρηχό βάθος άλμης) ενός ηλιακού αποστακτήρα, τόσο υψηλότερη είναι η συνολική ημερήσια παραγωγικότητα. Αυτό επιβεβαιώνει την παραδοχή ότι ένας αποστακτήρας θα πρέπει να φτάσει μια υψηλή θερμοκρασία άλμης με ελάχιστη θερμική υστέρηση, για να επωφεληθεί από το γεγονός ότι η ταχύτητα εξάτμισης αυξάνει εκθετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας της άλμης. Στο συνήθη σχεδιασμό χωρίς μόνωση, η μεγάλη θερμοχωρητικότητα ικανότητα του εδάφους κάτω από τον αποστακτήρα μειώνει την επίδραση του ρηχού βάθους άλμης στη συνολική θερμοχωρητικότητα.

Σε αντίθεση με τη θεωρία ή τις προσδοκίες, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, παρά την ευρεία διακύμανση του βάθους της άλμης (2-12 ίντσες) οι διαφορές στην παραγωγικότητα ήταν σχετικά μικρές. Μονάδες με βαθιές λεκάνες έχουν σε ορισμένες περιπτώσεις ξεπεράσει την απόδοση αποστακτήρων ρηχής λεκάνης, πιθανώς λόγω των συνδυασμένων επιπτώσεων των άλλων παραγόντων, όπως της διαρροής του ατμού και συμπυκνωμάτων, τις απώλειες θερμότητας και το κλίμα. Για μια μεγάλη λεκάνη αποστακτήρα, το ελάχιστο πρακτικό βάθος άλμης είναι περίπου 2 ίντσες για λόγους οικονομικούς, χειρισμού υδροδότησης και πρόληψης δημιουργίας ξηρών σημείων στην επένδυση της λεκάνης.

3.2.2 Διαρροή ατμού

Οι ηλιακοί αποστακτήρες θα πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε η διαρροή αέρα και ατμού να διατηρείται σε ένα πρακτικό ελάχιστο. Για την ικανοποίηση της απαίτησης αυτής, απαιτούνται ισχυρά σφραγιστικά που θα αντέξουν στις ακραίες συνθήκες του περιβάλλοντος. Σχεδόν κάθε ηλιακός αποστακτήρας που έχει κατασκευαστεί έχει παρουσιάσει κάποια επιδείνωση στην παραγωγικότητά του, ένα μέρος της οποίας πιστεύεται ότι οφείλεται στη διαρροή ατμού. Έτσι, οι σχεδιαστές οφείλουν να λύσουν ολοσχερώς το πρόβλημα του σφραγίσματος.

Μόνο λίγοι ερευνητές κατάφεραν να μετρήσουν την ποσότητα του διαρρέοντος ατμού σε μεγαλύτερους αποστακτήρες. Πρόσφατες θεωρητικές μελέτες επιτρέπουν τον υπολογισμό της ποσότητας διαρροής ατμού που προκαλείται από την αλληλεπίδραση των παραγόντων σχεδιασμού, εφαρμόζονται όμως μόνο όταν γνωρίζονται το μέγεθος και η θέση των ρωγμών στον ηλιακό αποστακτήρα.

3.2.3 Διαρροή συμπυκνωμάτων

Ακόμη και πολύ μικρές οπές ή ρωγμές στα κανάλια συλλογής συμπυκνώματος μειώνουν σοβαρά την απόδοση του αποστακτήρα. Μόνο εντελώς ανθεκτικά στη διάβρωση κανάλια έχουν βρεθεί ικανοποιητικά. Λεπτά κανάλια από ανοξείδωτο χάλυβα και επιστρώσεις πολυαιθυλενίου έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία, ενώ ο χαλκός, το αλουμίνιο, το σκυρόδεμα, διάφορες άλλες επιστρώσεις και οι πλαστικοί σωλήνες έχουν αποτύχει. Τα αυλάκια πρέπει να είναι αρκετά βαθιά ώστε να αποφευχθεί η διαρροή ή υπερχείλιση, και αρκετά στενά ώστε να ελαχιστοποιηθεί η σκίαση της άλμης. Πιθανώς ο σοβαρότερος λόγος για την σταδιακή μείωση της παραγωγής του αποστακτήρα είναι να είναι η διαρροή συμπυκνωμάτων από τα αυλάκια συλλογής.

3.2.4 Μόνωση της λεκάνης

Το κάτω μέρος και οι πλευρές της λεκάνης ενός ηλιακού αποστακτήρα μπορούν να μονωθούν για την αύξηση της θερμοκρασίας της άλμης και τη μείωση των απωλειών θερμότητας. Το πλεονέκτημα της μόνωσης είναι εμφανώς μεγαλύτερο σε ρηχά βάθη άλμης. Επιπλέον, επειδή οι απώλειες θερμότητας είναι ανάλογες της περιμέτρου, τα οφέλη μόνωσης είναι μεγαλύτερα στους μικρούς αποστακτήρες. Για τους μεγάλους αποστακτήρες με λεκάνες και βάθος άλμης 2 ιντσών, μία μόνωση γυαλιού κάτω από τη λεκάνη θα αυξήσει την παραγωγικότητα κατά 15% σε σχέση με τους αποστακτήρες χωρίς μόνωση.

3.2.5 Σχέδια καλυμμάτων

Για τις μόνιμες εγκαταστάσεις ηλιακού αποστακτήρα, η πρόσφατη εμπειρία και οι οικονομικές μελέτες υποστηρίζουν ότι το γυαλί είναι το καλύτερο υλικό για τα καλύμματα εάν υποστηρίζεται σωστά και σφραγίζεται αποτελεσματικά για την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής του αποστακτήρα. Ένα συμμετρικό, διπλά κεκλιμένο κάλυμμα σε γωνία 10-20 μοιρών είναι το πλέον διαδεδομένο στις μεγάλες εγκαταστάσεις. Μονής αντοχής γυαλί (0.10 ιντσών πάχους) κατά πάσα πιθανότητα θα πρέπει να χρησιμοποιείται σε γωνία κοντά στις 20 μοίρες, ενώ διπλής αντοχής γυαλί (0.125 in πάχους) θα πρέπει να χρησιμοποιείται σε γωνίες κοντά στις 10 μοίρες. Για την ελαχιστοποίηση της σκίασης από τα στηρίγματα, το κάλυμμα πρέπει να τοποθετείται σε τόση απόσταση πάνω από την επιφάνεια άλμης όση χρειάζεται για την τοποθέτηση των καναλιών απόσταξης.

Στην περίπτωση μιας προσωρινής ή ημιμόνιμης εγκατάστασης (μέχρι κατ 'ανώτατο όριο 7 έτη), ή και σε απομονωμένες περιοχές, όπου η μεταφορά του γυαλιού είναι δύσκολη, μπορεί να εξετασθεί η χρήση πλαστικών καλυμμάτων. Τα καλύμματα πρέπει να υποβάλλονται σε αδιαβροχοποίηση ενώ ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην πρόληψη ζημιών από ανέμους. Το πιο ανθεκτικό είδος πλαστικού φιλμ που έχει αναπτυχθεί μέχρι τώρα για τους ηλιακούς αποστακτήρες είναι το διαβρέξιμο πολυβινυλοφθορίδιο ''Tedlar'' 0,004 in. Επί του παρόντος, η τιμή του υπερβαίνει αυτή του γυαλιού και το προσδόκιμο ζωής του είναι 5 έτη.

3.2.6 Κατασκευαστικά υλικά

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1) παρατίθενται διάφορα συστατικά υλικά των ηλιακών αποστακτήρων που έχουν αποδειχθεί ότι έχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα κατά τη χρήση τους σε όλο τον κόσμο. Για κάθε συστατικό, τα υλικά αναφέρονται κατά σειρά προτίμησης από την άποψη της αντοχής. Εάν ένας ηλιακός αποστακτήρας κατασκευάζεται για να τοποθετηθεί στο έδαφος εξακολουθεί να κατασκευαστεί απευθείας στο έδαφος με ένα σκάφος της γραμμής λεκάνη, είναι σκόπιμο να χρησιμοποιούνται την πρώτη φορά εντομοκτόνα για να μειωθεί η πιθανότητα παρακέντησης.

Μέρη	Υλικά		
Λεκάνη	Καουτσούκ βουτυλίου (πάχος 0.015-0.030		
	in.), ασφαλτική μαστίχα (πάχος 0.12-0.25		
	in.), μαύρο πολυαιθυλένιο (πάχος 0.008		
	in.)		
Κάλυμμα	Γυαλί (πάχος 0.10 or 0.12 in.), διαβρέξιμο		
	πολυβινυλοφθορίδιο ''Tedlar'' (0,004 in.)		
Στηρίγματα	Σκυρόδεμα, αλουμίνιο, γαλαβανισμένο		
	μέταλλο, ερυθρόδεντρο		
Κανάλι απόσταξης	Ανοξείδωτος χάλυβας, επίστρωση		
	καουτσούκ βουτυλίου, επίστρωση μαύρου		
	πολυαιθυλένιου		
Σφραγίσματα	Καουτσούκ σιλικόνης, άσφαλτος,		
	καουτσούκ βουτυλίου		
Αντλίες και βαλβίδες	πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), σκυρόδεμα		
	ασφάλτου (για το αλμυρό νερό),		
	ακρυλονιτρίλιο-βουταδιενίου(ABS)		
Δεξαμενή νερού	Σκυρόδεμα, Τοιχοποιία		

Πίνακας 1: Υλικά μερών του αποστακτήρα

4. Άμεση ηλιακή αφαλάτωση - Ενεργητικοί ηλιακοί αποστακτήρες (Direct solar desalination – Active solar stills) [21]

Η ενεργητική ηλιακή απόσταξη ταξινομείται κυρίως ως εξής:

- Απόσταξη υψηλής θερμοκρασίας τροφοδοσία της λεκάνης με ζεστό νερό μέσω ηλιακού συλλέκτη.
- Εφαρμογή προθερμασμένου νερού τροφοδοσία της λεκάνης με απόβλητο ζεστό νερό με σταθερό ρυθμό ροής.
- Νυχτερινή παραγωγή τροφοδοσία της λεκάνης με απόβλητο ζεστό νερό μία φορά την ημέρα.

Η διαφορά θερμοκρασίας του νερού στη λεκάνη και του γυάλινου καλύμματος του δοχείου συμπύκνωσης έχει άμεσο αποτέλεσμα στην απόδοση του αποστακτήρα. Η αυξημένη θερμοκρασία του νερού στη λεκάνη μπορεί να αυξήσει τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των επιφανειών εξάτμισης και συμπύκνωσης. Για να επιτευχθεί καλύτερος ρυθμός εξάτμισης και συμπύκνωσης, η θερμοκρασία του νερού στη λεκάνη θα μπορούσε να αυξηθεί με τροφοδότηση θερμικής ενέργειας από κάποιες εξωτερικές πηγές.

4.1 Ενεργητική ηλιακή απόσταξη υψηλής θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία του νερού του συμβατικού αποστακτήρα αυξάνεται με την παροχή πρόσθετης θερμικής ενέργειας μέσω των ηλιακών συλλεκτών. Η θερμοκρασία αυξάνεται από τους 20-50°C στους 70-80°C και έτσι επιτυγχάνεται καλύτερη εξάτμιση.

4.1.1 Ηλιακός αποστακτήρας συνδεδεμένος με επίπεδο ηλιακό συλλέκτη (Solar still coupled with flat plate collector)

Ο ηλιακός αποστακτήρας συνδεδεμένος με επίπεδο ηλιακό συλλέκτη αποτελεί μέθοδο ενεργητικής απόσταξης υψηλής θερμοκρασίας που πραγματοποιείται είτε υπό εξαναγκασμένη κυκλοφορία (Εικόνα 15) είτε υπό φυσική κυκλοφορία (Εικόνα 16). Για την εξαναγκασμένη κυκλοφορία χρησιμοποιείται μια αντλία για την παροχή του νερού ενώ στη φυσική κυκλοφορία το νερό ρέει λόγω της διαφοράς πίεσης μεταξύ της λεκάνης και της πηγής τροφοδοσίας του ζεστού νερού. Ο επίπεδος συλλέκτης δίνει μια πρόσθετη θερμική ενέργεια στο νερό της λεκάνης του ηλιακού αποστακτήρα.

Οι Rai & Tiwari μελέτησαν πρώτοι την απόδοση του ηλιακού αποστακτήρα συνδεδεμένου με επίπεδο ηλιακό συλλέκτη και συμπέραναν ότι η μέση ημερήσια παραγωγή αποσταγμένου νερού ήταν 24% υψηλότερη σε σύγκριση με τον απλό παθητικό αποστακτήρα. Επίσης συμπέραναν, ότι η καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται από τον ηλιακό αποστακτήρα συνδεδεμένο με επίπεδο συλλέκτη υπό εξαναγκασμένη κυκλοφορία με την προσθήκη μαύρου υφάσματος γιούτας στη λεκάνη και μικρής ποσότητας μαύρης χρωστικής ουσίας στο νερό. Ο Yadav μελέτησε την απόδοση ηλιακού αποστακτήρα συνδεδεμένο με επίπεδο συλλέκτη υπό εξαναγκασμένη κυκλοφορίας. Ο μελετητής διαπίστωσε ότι ο αποστακτήρας με την εξαναγκασμένη κυκλοφορίας ωτο την απόδοει 5-10% περισσότερο από ότι με τη φυσική κυκλοφορία ενώ παρατηρήθηκε 30-35% αύξηση στην απόδοση σε σχέση με τον απλό παθητικό παθητικό ηλιακό αποστακτήρα.



Εικόνα 15: Ηλιακός αποστακτήρας συνδεδεμένος με επίπεδο συλλέκτη υπό εξαναγκασμένη κυκλοφορία



Εικόνα 16: (α) Ηλιακός αποστακτήρας συνδεδεμένος με επίπεδο συλλέκτη υπό φυσική κυκλοφορία, (β) εναλλάκτης θερμότητας

Οι Sanjeev, Kumar & Tiwari παρατήρησαν ότι η θερμοκρασία του νερού και η θερμική απόδοση μειώνονται με την αύξηση του όγκου του νερού της λεκάνης. Η απόδοση αυξήθηκε με την αύξηση του αριθμού των συλλεκτών και διαπιστώθηκε ότι ο βέλτιστος αριθμός τους είναι 8 καθώς πέραν αυτού η αύξηση της απόδοσης θα είναι μικρότερη από τις θερμικές απώλειες. Οι Sanjeev Kumar κ.α. συμπέραναν ότι για τις κλιματικές συνθήκες του Νέου Δελχί η μέγιστη ετήσια απόδοση επιτυγχάνεται με την βέλτιστη κλίση ενός επίπεδου συλλέκτη στις 20° και ενός αποστακτήρα με γυάλινο κάλυμμα στις 15°.

Οι Tiwari κ.α. συμπέραναν ότι οι συντελεστές εσωτερικής μεταφοράς θερμότητας πρέπει να καθορίζονται με βάση την εσωτερική θερμοκρασία του καλύμματος για τον θερμικό προσδιορισμό τόσο των ενεργητικών όσο και των παθητικών αποστακτήρων. Οι συντελεστές εξαρτώνται κυρίως από το σχήμα και το υλικό του καλύμματος καθώς και από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του νερού και της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος. Με αριθμητικούς υπολογισμούς διαπίστωσαν ότι η μέγιστη ετήσια απόδοση επιτυγχάνεται όταν η κλίση του γυάλινου καλύμματος του δοχείου συμπύκνωσης είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος της θέσης του αποστακτήρα.

Οι Tiris κ.α. έκαναν πειράματα με δύο συλλέκτες και διαπίστωσαν ότι η απόδοση του αποστακτήρα αυξήθηκε κατά 100% σε σχέση με τον απλό αποστακτήρα. Η μέγιστη απόδοση ανήλθε σε 5.18 l/m² ημερησίως σε σχέση με του απλού που ήταν 2.575 l/m² ημερησίως με μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία 24.343 MJ/m².

Οι Dwidevi και Tiwari μελέτησαν συγκεκριμένα τους ενεργητικούς ηλιακούς αποστακτήρες συνδεδεμένους με επίπεδους συλλέκτες με κάλυμμα διπλής κλίσης υπό φυσική κυκλοφορία και διαπίστωσαν ότι αυτοί έχουν 51% υψηλότερη απόδοση σε σύγκριση με τους παθητικούς ηλιακούς αποστακτήρες.

Πίνακας 2: Εφαρμογή του ηλιακού αποστακτήρα σε συνδυασμό με επίπεδο ηλιακό συλλέκτη

Τύπος ενεργητικού Αποστακτήρα	Συγγραφείς και τόπος πειράματος	Προδιαγραφές	Πειραματικά αποτελέσματα	Παρατηρήσεις
Ηλιακός αποστακτήρας συνδεδεμένος με επίπεδο ηλιακό συλλέκτη (Εξαναγκασμένη κυκλοφορία)	Rai κ.α.	Ηλιακός αποστακτήρας μονής λεκάνης	50% περισσότερο από τη φυσική κυκλοφορία	Απαιτείται αντλία για τη κυκλοφορία του νερού
	Νέο Δελχί, Ινδία	Επιφάνεια = 1m × 1m	120% περισσότερο από τον απλό ηλιακό αποστακτήρα μονής λεκάνης	Να ληφθεί υπ'όψιν η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της αντλίας
		Υλικό =Πλαστικό ενισχυμένο με ίνες (FRP)	Μέγιστο απόσταγμα 6,75 kg/m²	Δυσκολία χειρισμού της διαδικασίας
		Γωνία συλλέκτη= 45°	Για λόγους οικονομίας η αντλία να χρησιμοποιείται το πρωί και το βράδυ	
		Ροή = 1.15 kg/min		
Ηλιακός αποστακτήρας συνδεδεμένος με επίπεδο ηλιακό συλλέκτη (Φυσική κυκλοφορία)	Badran & Al-Tahaineh	Ηλιακός αποστακτήρας μονής λεκάνης	36% περισσότερο από τον απλό ηλιακό αποστακτήρα	Η απόδοση είναι μικρότερη σε σχέση με την εξαναγκασμένη κυκλοφορία
	Αμμάν, Ιορδανία	Επιφάνεια = 1 m × 1 m	Μέγιστο απόσταγμα 3.5 l/m²	Εύκολος χειρισμός.
		Γωνία συλλέκτη = 35°	Βέλτιστη γωνία 10° για το χειμώνα στην Ιορδανία	Για κάλυμμα διπλής κλίσης έχει μικρότερη απόδοση από τον απλό αποστακτήρα.
		Μονωτικό υλικό: Πετροβάμβακας 6 cm		

4.1.2 Ενεργητικός ηλικιακός αποστακτήρας διπλής επίδρασης (Double effect active solar still)

Η προσθήκη μια δεύτερης λεκάνης στον αποστακτήρα αυξάνει την συνολική απόδοση του συστήματος. Το νερό που θερμαίνεται μέσω του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη τροφοδοτεί την κατώτερη λεκάνη του αποστακτήρα αλλά και ρέει πάνω από το ενδιάμεσο γυάλινο κάλυμμα. (Εικόνα 17)

Οι Tiwari & Lawrence παρατήρησαν από την πειραματική μελέτη ότι, υπάρχει μια αύξηση της απόδοσης κατά 20% και 30% για ένα παθητικό και έναν ενεργητικό ηλιακό αποστακτήρα, αντίστοιχα, όταν η θερμοκρασία εισόδου του νερού είναι ίση με θερμοκρασία περιβάλλοντος. Εάν η θερμοκρασία εισόδου αυξάνεται, η έξοδος από την άνω λεκάνη αυξάνεται, αλλά η έξοδος από το κατώτερο τμήμα της λεκάνης μειώνεται αισθητά λόγω της χαμηλότερης διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του νερού και του γυάλινου καλύμματος της κατώτερης λεκάνης.

Οι Sanjay Kumar & Tiwari μελέτησαν τον ηλιακό αποστακτήρα διπλής επίδρασης με και χωρίς τη ροή νερού πάνω από το ενδιάμεσο γυάλινο κάλυμμα. Η μελέτη δείχνει ότι, ένας ενεργητικός ηλιακός αποστακτήρας με διάταξη ροής νερού πάνω από το γυάλινο κάλυμμα δίνει τη μέγιστη απόδοση αποστάγματος.



Εικόνα 17: Ηλιακός αποστακτήρας διπλής επίδρασης συνδεδεμένος με επίπεδο ηλιακό συλλέκτη

Πίνακας 3: Εφαρμογή του ενεργητικού ηλιακού αποστακτήρα διπλής επίδρασης

Τύπος ενεργητικού αποστακτήρα	Συγγραφείς και τόπος πειράματος	Προδιαγραφές	Πειραματικά αποτελέσματα	Παρατηρήσεις
Ενεργητικός αποστακτήρας διπλής επίδρασης	Sanjay Kumar & Tiwari	Ηλιακός αποστακτήρας διπλής λεκάνης	Κατά μέσο όρο 7.5 l/day αποσταγμένου νερού για την ενεργητική απόσταξη με ροή νερού	Δύσκολη λειτουργία και συντήρηση
	Νέο Δελχί, Ινδία	Επιφάνεια = 1m × 1m	Κατά μέσο όρο 3.9 l/day αποσταγμένου νερού για την ενεργητική απόσταξη και 2.2 l/day για την παθητική απόσταξη χωρίς ροή νερού	Η διπλή επίδραση δεν αυξάνει σημαντικά την ημερήσια απόδοση λόγω των δυσκολιών στη διατήρηση χαμηλού και ομοιόμορφου ρυθμού ροής
		Γωνία αποστακτήρα= 15°		
		Μήκος συλλέκτη= 1 m		
		Γωνία συλλέκτη = 45°		
		Poή= 40 ml/min		
		Απόσταση των γυάλινων καλυμμάτων= 20 cm		
		Αντλία = 0.2ΗΡ		

4.1.3 Αναγεννητικός ηλιακός αποστακτήρας (Regenerative solar still)

Το υψηλότερο ποσοστό εξάτμισης επιτυγχάνεται, όταν ο ενεργητικός ηλιακός αποστακτήρας λειτουργεί σε υψηλή θερμοκρασία μέσω της παροχής θερμότητας προς τη λεκάνη. Όμως, η αύξηση του ρυθμού εξάτμισης αυξάνει τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του καλύμματος και επομένως μειώνεται η διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών του νερού και του καλύμματος και κατ'επέκταση η απόδοση του αποστακτήρα. Για να διατηρείται χαμηλή η θερμοκρασία του καλύμματος, έχει μελετηθεί από πολλούς επιστήμονες η περίπτωση να ρέει κρύο νερό πάνω από την εξωτερική του επιφάνεια. Ο ρόλος του ρέοντος νερού είναι να διατηρεί τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του νερού της λεκάνης και του εσωτερικού του καλύμματος όσο το δυνατόν μεγαλύτερη. Η θερμότητα
μεταφέρεται από το κάλυμμα στο ρέον νερό και αυτό θερμαίνεται. Αν η θερμοκρασία του γίνει μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του νερού στη λεκάνη τότε τροφοδοτείται και στη λεκάνη για υψηλότερη απόδοση. Ένα τέτοιο σύστημα απόσταξης ονομάζεται αναγεννητικός ηλιακός αποστακτήρας. (Εικόνα 18)



Εικόνα 18: Εγκάρσια τομή ενός αναγεννητικού ηλιακού συστήματος απόσταξης

Οι Tiwari & Sinha βασιζόμενοι σε πειραματική μελέτη πάνω στον ενεργητικό αναγεννητικό ηλιακό αποστακτήρα παρατήρησαν ότι οι παθητικά ηλιακοί αναγεννητικοί αποστακτήρες έχουν καλύτερη θερμική απόδοση από τον ενεργητικό αναγεννητικό ηλιακό αποστακτήρα και η θερμική απόδοση αυξάνει με την αύξηση της ροής του νερού.

Οι Singh & Tiwari μελέτησαν τη θερμική συμπεριφορά ενός αναγεννητικού ενεργητικού συστήματος ηλιακής απόσταξης υπό φυσική κυκλοφορία. Οι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι:

- Υπάρχει σημαντική βελτίωση στη συνολική απόδοση που οφείλεται στην ροή του νερού πάνω από το γυάλινο κάλυμμα.
- Το ζεστό νερό που προκύπτει λόγω του αναγεννητικού αποτελέσματος δεν ενισχύει την απόδοση.
- iii. Οι παθητικοί ηλιακοί αναγεννητικοί ηλιακοί αποστακτήρες έχουν καλύτερη θερμική απόδοση από τους ενεργητικούς αναγεννητικούς αποστακτήρες για οποιοδήποτε βάθος νερού, αφού οι ενεργητικοί αποστακτήρες λειτουργούν σε υψηλότερη θερμοκρασία.

Oι Yousef, H. Zurigat κ.α. απέδειξαν ότι, το πάχος του ρέοντος νερού πάνω από πρώτο γυάλινο κάλυμμα και ο ρυθμός ροής της μάζας του νερού που εισάγεται στη λεκάνη έχουν οριακή επίδραση στην παραγωγικότητα του αναγεννητικού ηλιακού αποστακτήρα.

Τύπος ενεργητικού	Συγγραφείς και τόπος	Προδιαγραφές	Πειραματικά αποτελέσματα	Παρατηρήσεις
αποστακτήρα	πειράματος			
Ενεργητικός αναγεννητικός ηλιακός αποστακτήρας	Tiwari and Sinha	Ηλιακός αναγεννητικός αποστακτήρας μονής λεκάνης	Μέγιστη απόδοση 1, 0.7, 0.3, & 0.02 kg/m ² h στις 13.00 για τους ενεργητικό αναγεννητικό, ενεργητικό μη αναγεννητικό, παθητικό αναγεννητικό και παθητικό μη αναγεννητικό, αντίστοιχα.	Μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες
	Νέο Δελχί, Ινδία	Επιφάνεια αποστακτήρα= 1m ²	Η θερμική απόδοση των ενεργητικών είναι μικρότερη από των παθητικών	Υψηλό αρχικό κόστος
		Επιφάνεια συλλέκτη= 2m ²		Πολύπλοκος σχεδιασμός και λειτουργία
		Ροή= 0.20 kg/s		Εξειδικευμένο τεχνικό προσωπικό.
		Πάχος μόνωσης= 0.004 m		Μερικές υπολογίσιμες απώλειες στον εναλλάκτη
		χρηση εναλλακτη		

Πίνακας 4: Εφαρμογή του αναγεννητικού ενεργητικού ηλιακού αποστακτήρα

4.1.4 Ηλιακός αποστακτήρας συνδεδεμένος με παράλληλο επίπεδο ηλιακό συλλέκτη (Solar still integrated with a parallel flat-plate solar collector)

Οι Yadav & Prasad μελέτησαν πειραματικά τον ηλιακό αποστακτήρα συνδεδεμένο με παράλληλο επίπεδο συλλέκτη (**Εικόνα 19**). Η κυκλοφορία του νερού μεταξύ του συλλέκτη και του αποστακτήρα μπορεί να γίνει είτε μέσω μιας αντλίας (εξαναγκασμένη κυκλοφορία) ή με την τοποθέτηση του συλλέκτη πάνω από μια δομή στήριξης σε τέτοιο ύψος ώστε να επιτρέπει τη φυσική κυκλοφορία του νερού. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, παρατηρείται

μια σημαντική αύξηση στην παραγωγή αποστάγματος. Το σύστημα αυτό μπορεί να προτιμάται ως αποδοτικότερο σε σύγκριση με τον επίπεδο συλλέκτη.



Εικόνα 19: Ηλιακός αποστακτήρας συνδεδεμένος με παράλληλο επίπεδο συλλέκτη

Τύπος ενεργητικού αποστακτήρα	Συγγραφείς και τόπος πειράματος	Προδιαγραφές	Πειραματικά αποτελέσματα	Παρατηρήσεις
Ηλιακός αποστακτήρας συνδεδεμένος με παράλληλο επίπεδο ηλιακό συλλέκτη	Yadav and Prasad	Ηλιακός αποστακτήρας μονής λεκάνης	Μέγιστη παραγωγή 0.250 kg/m ² h στις 13.00 σε σχέση με 0.150 kg/m ² h για τον απλό συλλέκτη	Απλούστερος σχεδιασμός σε σχέση τον επίπεδο συλλέκτη
	Νέο Δελχί, Ινδία	Επιφάνεια = 1m × 1m	Μέγιστη θερμοκρασία νερού 68 °C	Χαμηλότερο κόστος σε σχέση τον επίπεδο συλλέκτη
		Μήκος συλλέκτη= 1 m		Χαμηλή απόδοση σε σχέση με τον επίπεδο συλλέκτη
		Μονωτικό υλικό: Πετροβάμβακας 0,05m		

Πίνακας 5: Εφαρμογή του ηλιακού αποστακτ	ήρα με παράλληλο ε π	ιίπεδο ηλιακό συλλέκτη
--	-----------------------------	------------------------

4.1.5 Κάθετος ηλιακός αποστακτήρας συνδεδεμένος με επίπεδο ηλιακό συλλέκτη (Vertical solar still coupled with flat plate solar collector)

Οι Kiatsiriroat κ.α. ανέλυσαν τον κάθετο αποστακτήρα πολλαπλής επίδρασης συνδεδεμένο με επίπεδο ηλιακό συλλέκτη (Εικόνα 20). Η μονάδα απόσταξης αποτελείται από 'n' παράλληλες πλάκες εξάτμισης. Η πρώτη πλάκα είναι μονωμένη στην μπροστινή της πλευρά και η τελευταία πλάκα εκτίθεται στο περιβάλλον.



Εικόνα 20: Κάθετος ηλιακός αποστακτήρας πολλαπλής επίδρασης συνδεδεμένος με επίπεδο ηλιακό συλλέκτη

Κάθε πλάκα καλύπτεται με βρεγμένο ύφασμα από τη μία πλευρά. Ένα κομμάτι υφάσματος που βρίσκεται στην επάνω επιφάνεια κάθε πλάκας βρέχεται από το δοχείο με το τροφοδοτικό νερό. Έτσι, το τροφοδοτικό θαλασσινό νερό εισέρχεται στην κάθε πλάκα εξάτμισης μέσω της τριχοειδούς δράσης. Η περίσσεια νερού μετακινείται προς την κάτω επιφάνεια της πλάκας και οδηγείται εκτός του αποστακτήρα. Η τελευταία πλάκα ψύχεται από τον αέρα. Οι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι, δεν υπάρχει σημαντική αύξηση στην παραγωγή αποσταγμένου νερού όταν ο αριθμός των πλακών είναι πάνω από 5, ενώ, σε σύγκριση με τον απλό αποστακτήρα παρατηρείται αύξηση της παραγωγής κατά 34% και 16% όταν ο αριθμός των πλακών είναι 1 και 6, αντίστοιχα. Πίνακας 6: Εφαρμογή κάθετου ηλιακού συλλέκτη με επίπεδο ηλιακό συλλέκτη

Τύπος ενεργητικού αποστακτήρα	Συγγραφείς και τόπος πειράματος	Προδιαγραφές	Πειραματικά αποτελέσματα	Παρατηρήσεις
Κάθετος ηλιακός αποστακτήρας συνδεδεμένος με επίπεδο συλλέκτη	Kiatsiriroat κ.α.	Κάθετος αποστακτήρας	Ο βέλτιστος αριθμός πλακών εξάτμισης είναι 5 και η ροή του νερού 50 kg/h.	Έχουν πραγματοποιηθεί ελάχιστες έρευνες
	Μπανγκόγκ, Ταυλάνδη	Επιφάνεια = 1.52m × 0.9m	Μέση ημερήσια παραγωγή αποσταγμένου νερού 5 kg/m ² με 5 πλάκες εξάτμισης	Αρχικό και λειτουργικό κόστος υψηλό
		Επιφάνεια συλλέκτη= 1.4 m ²		Απαιτείται αντλία.
		Γωνία συλλέκτη= 15°		
		Διάμετρος χάλκινου σωλήνα= 0.00925 m		
		Μήκος χάλκινου σωλήνα =14,4m		

4.1.6 Ηλιακός αποστακτήρας σε συνδυασμό με παραβολικό συλλέκτη (Solar still coupled with parabolic concentrator)

Ο παραβολικός συλλέκτης συγκεντρώνει την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε μεγάλη επιφάνεια και την εστιάζει σε ένα μικρό απορροφητήρα. Η απόδοση του συλλέκτη επηρεάζεται πολύ από την προσθήκη μηχανισμού παρακολούθησης του ήλιου. Ο μηχανισμός παρακολούθησης επιτρέπει τη μετακίνηση των συλλεκτών προκειμένου να είναι στραμμένοι πάντα κάθετα προς τις ακτίνες του ήλιου καθ'όλη την διάρκεια της ημέρας. Αυτοί οι τύποι των ηλιακών συλλεκτών φθάνουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες σε σύγκριση με τους επίπεδους συλλέκτες λόγω μειωμένων απωλειών θερμότητας.

Οι Singh κ.α. συνέκριναν τον ηλιακό αποστακτήρα συνδεδεμένο με παραβολικό συλλέκτη υπό φυσική κυκλοφορία με αυτόν με επίπεδο ηλιακό συλλέκτη. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, η απόδοση του συστήματος με τον παραβολικό συλλέκτη είναι υψηλότερη, καθώς ο συντελεστής της μεταφοράς θερμότητας από εξάτμιση είναι υψηλότερος.

Οι Zeinab & Ashraf διεξήγαγαν πειραματική και θεωρητική μελέτη του ηλιακού αποστακτήρα συνδεδεμένου με ηλιακό παραβολικό συλλέκτη και εναλλάκτη θερμότητας (Εικόνα 21). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, με την παρέλευση χρόνου, όλες οι

θερμοκρασίες αυξάνουν και αρχίζουν να ελαττώνονται μετά από τις 4:00 μ.μ., ενώ είναι πάντα υψηλότερες από αυτές ενός συμβατικού συστήματος. Η απόδοση της συγκεκριμένης διάταξης είναι 18% μεγαλύτερη από τον απλό συμβατικό αποστακτήρα.



Εικόνα 21: Ηλιακός αποστακτήρας με παραβολικό συλλέκτη: (1) παραβολικός συλλέκτης, (2) σωλήνας νερού, (3) βαλβίδες, (4) ηλιακός αποστακτήρας, (5) εναλλάκτης θερμότητας, (6) αντλία

Οι Bechir Chaouchi κ.α. σχεδίασαν και κατασκεύασαν μια μικρή ηλιακή μονάδα αφαλάτωσης με παραβολικό συλλέκτη (**Εικόνα 22**). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μέγιστη απόδοση αντιστοιχεί στη μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία που σημειώνεται γύρω στις 2 μ.μ. Εκείνη την ώρα, ο λέβητας είναι σχεδόν στην οριζόντια θέση, μεγιστοποιώντας την επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Εκτιμήθηκε ότι το μέσο σφάλμα της θεωρητικής μελέτης για την παραγωγή του αποσταγμένου νερού ήταν περίπου 42%. Αυτό οφείλεται στις ατέλειες της παραβολοειδούς γεωμετρίας, το μηχανισμό παρακολούθησης του ήλιου και ιδιαίτερα στη μεταβολή τις κλίσης του συστήματος κατά τη διάρκεια της ημέρας που δεν καθιστά πάντα δυνατό να διατηρείται η επιφάνεια του απορροφητή καλυμμένη με θαλασσινό νερό.



Εικόνα 22: Αφαλάτωση με παραβολικό συλλέκτη

Πίνακας 7: Εφαρμογή ηλιακού αποστακτήρα με παραβολικό συλλέκτη

Τύπος ενεργητικού αποστακτήρα	Συγγραφείς και τόπος πειράματος	Προδιαγραφές	Πειραματικά αποτελέσματα	Παρατηρήσεις
Ηλιακός αποστακτήρας σε συνδυασμό με παραβολικό συλλέκτη	Zeinab S.Abdel- Rehim κ.α.	Ηλιακός αποστακτήρας μονής λεκάνης	Η παραγωγή του προτεινόμενου αποστακτήρα ήταν 2.75 l/day και του συμβατικού 2 l/day	Οικονομικότερο σύστημα από τον απλό αποστακτήρα
	Γκίζα, Αίγυπτος	Επιφάνεια αποστακτήρα = 1 m ²	Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης 35% επιτεύχθηκε στις 15.00	Σ'αυτήν τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν αντλία και μοτέρ
		Επιφάνεια συλλέκτη= 80 cm μήκος και 0.04 cm πάχος		
		Μήκος χάλκινου σωλήνα= 2 m		

4.1.7 Αποστακτήρας διπλής επίδρασης με παραβολικό συλλέκτη (Double effect still coupled with parabolic concentrator)

Οι Bhagwan Prasad και Tiwari παρουσίασαν την ανάλυση ενός ηλιακού αποστακτήρα διπλής επίδρασης συνδεδεμένου με παραβολικό συλλέκτη υπό εξαναγκασμένη κυκλοφορία. (Εικόνα 23). Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι :

- Η θερμοκρασία του νερού της κάτω λεκάνης είναι αυξημένη σε σύγκριση με την θερμοκρασία του νερού στον αποστακτήρα μονής επίδρασης, εξαιτίας των μειωμένων θερμικών απωλειών προς τα πάνω.
- Η ωριαία παραγωγή από την κάτω λεκάνη είναι μειωμένη λόγω της μειωμένης διαφοράς μεταξύ της θερμοκρασίας του νερού και του γυάλινου καλύμματος.
 Ωστόσο, η συνολική παραγωγή αυξάνεται λόγω της αξιοποίησης της λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης από την επάνω λεκάνη.
- iii. Η ωριαία απόδοση της κάτω λεκάνης αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας ροής λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας του κατώτερου γυάλινου καλύμματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμοκρασία του κάτω καλύμματος μειώνεται λόγω της ταχείας απομάκρυνσης της λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης.

iv. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από εξάτμιση είναι μια ισχυρή συνάρτηση του εύρους θερμοκρασίας λειτουργίας. Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας από συναγωγή και ακτινοβολία δε διαφέρουν σημαντικά.



Εικόνα 23: Ηλιακός αποστακτήρας διπλής επίδρασης συνδεδεμένος με παραβολικό συλλέκτη

Πίνακας 8: Εφαρμογή του ηλιακού αποστακτήρα διπλής επίδρασης με παραβολικό συλλέκτη

Τύπος	Συγγραφείς	Προδιαγραφές	Πειραματικά	Παρατηρήσεις
ενεργητικού αποστακτήρα	και τόπος πειράματος		αποτελέσματα	
Αποστακτήρας διπλής επίδρασης με παραβολικό συλλέκτη	Bhagwan Prasad & Tiwari	Ηλιακός αποστακτήρας μονής λεκάνης	Μέγιστη ημερήσια απόδοση 14.684 kg/day	Μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με τον επίπεδο συλλέκτη λόγω συγκέντρωσης μεγαλύτερης ηλιακής ακτινοβολίας
	Νέο Δελχί, Ινδία	Επιφάνεια = 1 m × 1 m	Η ωριαία απόδοση ελαττώνεται σε σχέση με τη ροή λόγω της απώλειας ζεστού νερού από την πάνω λεκάνη	Μεγαλύτερη συντήρηση
		Επιφάνεια συλλέκτη = 1 m × 1 m	Ο μηχανισμός παρακολούθησης μπορεί να προσαρμοστεί χειροκίνητα για την πρόσληψη μεγίστης ακτινοβολίας	Πολύ ευαίσθητος χειρισμός λειτουργίας
		Μήκος συλλέκτη = 1 m		Η διατήρηση της θερμοκρασίας του γυάλινου καλύμματος είναι σημαντική
		Εξαναγκασμένη κυκλοφορία		
		Ροή = 0.0027 kg/s		

4.1.8 Αναγεννητικός αποστακτήρας με παραβολικό συλλέκτη (Regenerative solar still coupled with parabolic concentrator)

Οι Sanjay Kumar & Sinha μελέτησαν τον αναγεννητικό ηλιακό αποστακτήρα συνδεδεμένο με στατικό παραβολικό συλλέκτη και συμπέραναν ότι έχει υψηλότερη θερμική απόδοση σε όλα τα βάθη του νερού σε σχέση με τον αναγεννητικό αποστακτήρα συνδεδεμένο με επίπεδο ηλιακό συλλέκτη.

Πίνακας 9: Εφαρμογή του αναγεννητικού αποστακτήρα με παραβολικό συλλέκτη

Τύπος ενεργητικού αποστακτήρα	Συγγραφείς και τόπος πειράματος	Προδιαγραφές	Πειραματικά αποτελέσματα	Παρατηρήσεις
Αναγεννητικός αποστακτήρας με παραβολικό συλλέκτη	Sanjay Kumar & Sinha	Αποστακτήρας με κάλυμμα διπλής κλίσης	Απόδοση 8.2 l/m ² day, σε σχέση με 7.7 l/m ² day του επίπεδου συλλέκτη και 4.1 l/m ² day του παθητικού αποστακτήρα	Μεγαλύτερη απόδοση λόγω της αναγεννητικότητας
	Νέο Δελχί, Ινδία	Επιφάνεια αποστακτήρα= 1 m²	Υψηλότερη συνολική θερμική αποδοτικότητα σε σχέση με τον αναγεννητικό αποστακτήρα με επίπεδο συλλέκτη	Πιο πολύπλοκος στη σταθερή ροή νερού
		Πάχος μόνωσης = 0.004 m		Απαιτείται αντλία για τη κυκλοφορία του νερού
		Επιφάνεια συλλέκτη = 0.086 m ²		Δεν είναι κατάλληλος για ορεινές περιοχές
		Ροή = 0.05 kg/s		Υψηλότερη επένδυση σε σχέση με άλλους αποστακτήρες
		Ταχύτητα αέρα= 5 m/s		

4.1.9 Ηλιακός αποστακτήρας με συλλέκτη τύπου σωλήνα κενού (Solar still coupled with evacuated tube collector ETC)

Ο ηλιακός συλλέκτης τύπου σωλήνα κενού έχει υψηλότερη απόδοση από τον επίπεδο συλλέκτη. Αυτό συμβαίνει διότι στο συλλέκτη τύπου σωλήνα κενού, εξαιτίας του κυλινδρικού του σχήματος, οι ακτίνες του ήλιου είναι κάθετες προς την επιφάνεια του γυαλιού για το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας σε σύγκριση με τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη που είναι κάθετες μόνο το μεσημέρι και επομένως ένα ποσοστό του ηλιακού φωτός που προσκρούει στην επιφάνεια του συλλέκτη είναι πάντα πιθανό να αντανακλάται. Επίσης, εξαιτίας του κενού μέσα στους σωλήνες μειώνονται δραστικά και οι θερμικές απώλειες. Ο συλλέκτης τύπου σωλήνα κενού όπως παρουσιάστηκε από τους Owens-Illinois (OI) απεικονίζεται στην Εικόνα 24.



Εικόνα 24: Ο συλλέκτης τύπου σωλήνα κενού των Owens-IllinoisO συλλέκτης τύπου σωλήνα κενού των Owens-Illinois

Οι Tiwari κ.α. ανέπτυξαν θερμικά μοντέλα για όλους τους συνδυασμούς ηλιακών αποστακτήρων και ηλιακών συλλεκτών. Η ημερήσια απόδοση του παθητικού ηλιακού αποστακτήρα, και του παθητικού ηλιακού αποστακτήρα συνδεδεμένου με επίπεδο ηλιακό συλλέκτη, παραβολικό συλλέκτη, συλλέκτη τύπου κενού, και συλλέκτη σωλήνων κενού απεικονίζεται στην **Εικόνα 25**. Οι συγγραφείς επεσήμαναν ότι οι μέγιστες τιμές του ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (*h*_{tw}) για τους ενεργητικούς ηλιακούς αποστακτήρες με τη σειρά που αναφέρθηκαν είναι 43, 86, 67 και 76 W/m²°C, αντίστοιχα, ενώ η συνολική θερμική αποδοτικότητα είναι 13,14, 17,57, 17,22 και 18,26%, αντίστοιχα.



Εικόνα 25: Συνολική ημερήσια απόδοση των ενεργητικών ηλιακών αποστακτήρων

Πίνακας 10: Εφαρμογή του ηλιακού αποστακτήρα με συλλέκτη τύπου σωλήνα κενού

Τύπος	Συγγραφείς	Προδιαγραφές	Πειραματικά	Παρατηρήσεις
αποστακτήρα	πειοάματος		αποτελεοματά	
Ηλιακός αποστακτήρας με συλλέκτη τύπου σωλήνα κενού	Tiwari κ.α.	Ηλιακός αποστακτήρας μονής λεκάνης	Η συνολική ημερήσια παραγωγή 4 kg/m ² day έγινε με θεωρητική ανάλυση	Το κόστος τους έχει μειωθεί και είναι χαμηλότερο από τους επίπεδους συλλέκτες
	Νέο Δελχί, Ινδία	Επιφάνεια αποστακτήρα= 1 m ²	Η συνολική θερμική απόδοση είναι 17.22%, που είναι υψηλότερη αυτής του επίπεδου συλλέκτη	Η καλύτερη επιλογή για ταυτόχρονη παραγωγή αποσταγμένου νερού και ζεστού νερού
		Μάζα νερού στη δεξαμενή= 50 kg		
		Επιφάνεια= 2 m ²		
		Poή= 0.035 kg/s		

4.1.10 Κάθετος ηλιακός αποστακτήρας διάχυσης πολλαπλής επίδρασης συνδεδεμένος με συλλέκτη σωλήνων κενού - Vertical Multiple Effect Diffusion type (VMED) still coupled with heat pipe solar collector

Το σύστημα που προτάθηκε από τους Hiroshi & Yasuhito αποτελείται από έναν κάθετο ηλιακό αποστακτήρα διάχυσης πολλαπλής επίδρασης και έναν ηλιακό συλλέκτη με σωλήνες κενού (**Εικόνα 26**). Ο ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από το γυάλινο κάλυμμα και την πλάκα απορρόφησης. Χάλκινοι σωλήνες θερμότητας (σωλήνες κενού) συνδέονται με την κάτω επιφάνεια της πλάκας του συλλέκτη.

Ο αποστακτήρας αποτελείται από κατακόρυφα και παράλληλα χωρίσματα με στενά διάκενα αέρα μεταξύ τους που, με εξαίρεση τα εξωτερικά, βρίσκονται σε επαφή με φυτίλια εμποτισμένα με αλμυρό νερό. Τα φυτίλια τροφοδοτούνται συνεχώς με αλμυρό νερό. Η πλάκα χαλκού είναι μπροστά από το πρώτο χώρισμα με ένα στενό διάκενο. Στο διάκενο αυτό γίνεται η συμπύκνωση του εργαζόμενου μέσου. Ο χώρος συμπύκνωσης μπροστά από το πρώτο χώρισμα και οι χάλκινοι σωλήνες που είναι συνδεδεμένοι με την κάτω επιφάνεια της πλάκας του συλλέκτη συνδέονται με δύο συνδετικούς σωλήνες, έτσι ώστε να σχηματίζεται ένα κλειστό κύκλωμα μεταξύ του ηλιακού συλλέκτη και του αποστακτήρα. Το εργαζόμενο μέσο του κυκλώματος είναι αιθανόλη. Η μπροστινή επιφάνεια του αποστακτήρα και η κάτω επιφάνεια της πλάκας του συλλέκτη είναι μονωμένες. Η ηλιακή ακτινοβολία διαχέεται μέσα από το γυάλινο κάλυμμα και απορροφάται από την πλάκα του συλλέκτη και έτσι, η αιθανόλη που βρίσκεται μέσα στους χάλκινους σωλήνες που είναι συνδεδεμένοι στην κάτω επιφάνεια της πλάκας του συλλέκτη, θερμαίνεται και εξατμίζεται. Οι ατμοί αιθανόλης οδηγούνται μέσω του άνω συνδετικού σωλήνα μπροστά από το πρώτο χώρισμα και συμπυκνώνονται στην μπροστινή επιφάνεια του πρώτου χωρίσματος. Το συμπύκνωμα αιθανόλης επιστρέφει στους χάλκινους σωλήνες μέσω του κάτω συνδετικού σωλήνα με την βαρύτητα. Η λανθάνουσα θερμότητα που απελευθερώνεται από τη συμπύκνωση της αιθανόλης στο πρώτο χώρισμα εισέρχεται στον αποστακτήρα και ανακυκλώνεται για να αυξήσει την παραγωγή του αποστάγματος. Οι συγγραφείς διαπίστωσαν από τις πειραματικές μελέτες ότι:

- Ο ηλιακός συλλέκτης και ο αποστακτήρας μπορούν να διπλωθούν ή να διαχωριστούν κατά τη μεταφορά, με αποτέλεσμα το χαμηλότερο κόστος της διάταξης
- ii. Για τον προτεινόμενο αποστακτήρα με 10 χωρίσματα με 5mm ή 3mm διάκενο προβλέπεται ημερήσια παραγωγή 19,2 ή 21,8 kg/m², αντίστοιχα, σε μια ηλιόλουστη ημέρα με ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία 24.4 MJ/m².
- iii. Η παραγωγικότητα του προτεινόμενου αποστακτήρα είναι κατά 13% μεγαλύτερη από εκείνη του κάθετου αποστακτήρα συνδεδεμένου με επίπεδο ηλιακό συλλέκτη.
- iv. Η παραγωγικότητα αυξάνεται με τη μείωση του πάχους των διακένων μεταξύ των χωρισμάτων διάχυσης, και η αύξηση είναι σημαντική όταν το πάχος είναι μικρότερο από αρκετά χιλιοστά.



Εικόνα 26: Κάθετος ηλιακός αποστακτήρας διάχυσης πολλαπλής επίδρασης με ηλιακό συλλέκτη σωλήνων κενού

Πίνακας 11: Εφαρμογή του κάθετου αποστακτήρα διάχυσης με συλλέκτη σωλήνων κενού

Τύπος ενεργητικού	Συγγραφείς και τόπος	Προδιαγραφές	Πειραματικά αποτελέσματα	Παρατηρήσεις
αποστακτήρα	πειράματος			
Κάθετος	Hiroshi	Κάθετος ηλιακός	Ο ρυθμός	Σχετικά
ηλιακός	Tanaka к.α	αποστακτήρας διάχυσης	παραγωγής	μεγαλύτερη
αποστακτήρας			αποστάγματος	απόδοση σε
συνδεδεμένος			είναι	σχέση με
με συλλέκτη			0.1 g/m ² s	άλλους
σωλήνων			μετά από	ηλιακούς
κενού			300 min από	συλλέκτες
			την ημέρα	
			έναρξης	
	Φουκουόκα,	Επιφάνεια	Η μέγιστη	Υψηλότερο
	Ιαπωνία	Συλλέκτη= 280 mm × 570 mm	θερμοκρασία	αρχικό κόστος
			κατά τη	
			δοκιμή	
			ανήλθε στους	
			70 °C	
		Γωνία συλλέκτη = 26°	Συνολική	Η καλύτερη
			απόδοση	επιλογή για
			αποστακτήρα	μεγαλύτερη
			πολλαπλής	παραγωγή
			επίδρασης	
			περίπου 93%.	
		Μονωτικό υλικό:		
		Υαλοβάμβακας		
		Πάχος μόνωσης = 10 mm		
		Πάχος διακένου		
		αέρα= 24 mm		

4.1.11 Ηλιακός αποστακτήρας σε συνδυασμό με ηλιακή λίμνη (Solar still coupled with solar pond)

Οι Velmurgan & Srithar ανέλυσαν θεωρητικά και πειραματικά τον ηλιακό αποστακτήρα συνδεδεμένο με μια ηλιακή λίμνη καθώς και την προσθήκη σφουγγαριού μέσα στον αποστακτήρα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, κατά μέσο όρο η αύξηση της παραγωγικότητας του ηλιακού αποστακτήρα είναι 27,6% όταν είναι σε συνδυασμό με μια ηλιακή λίμνη και 57,8% όταν είναι σε συνδυασμό με μια ηλιακή λίμνη και έχει προστεθεί σφουγγάρι.

Οι Velmurugan κ.α. μελέτησαν την τροφοδότηση ηλιακών αποστακτήρων με αλμυρό νερό από μια ηλιακή λίμνη. Εξέτασαν χωριστά δύο περιπτώσεις αποστακτήρων, ενός βηματικού αποστακτήρα και ενός αποστακτήρα μονής λεκάνης με πτερύγια (**Εικόνα 27**). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, η παραγωγικότητα αυξάνεται κατά 100% στον αποστακτήρα με πτερύγια και 78% στον βηματικό αποστακτήρα όταν προστίθενται σφουγγάρι και χαλίκι. Η προσθήκη χαλικιών βελτιώνει την παραγωγικότητα ειδικά κατά τη διάρκεια της νύχτας.



Εικόνα 27: Ηλιακή λίμνη σε συνδυασμό με βηματικό και απλό ηλιακό αποστακτήρα

Τύπος ενεργητικού αποστακτήρα	Συγγραφείς και τόπος πειράματος	Προδιαγραφές	Πειραματικά αποτελέσματα	Παρατηρήσεις
Ηλιακός αποστακτήρας σε συνδυασμό με ηλιακή λίμνη	Velmurugan κ.α.	Βηματικός ηλιακός αποστακτήρας	Μέγιστη παραγωγή 80% με αποστακτήρα μονής λεκάνης σε συνδυασμό με μικρή ηλιακή λίμνη με χρήση πτερυγίων και σφουγγαριών.	Περίοδος απόσβεσης 367 ημέρες.
	Μαντουράι, Ινδία	Επιφάνεια = 1 m × 1 m	Τα χαλίκια αποθηκεύουν μεγαλύτερη θερμική ενέργεια και την αποδεσμεύουν μετά τη δύση του ηλίου.	Περίπλοκη κατασκευή
		Γωνία συλλέκτη = 9°55΄		Καλύτερη επιλογή για βιομηχανικές εφαρμογές
		Υλικό μόνωσης= πριονίδι		

Πίνακας 12: Εφαρμογή του ηλιακού αποστακτήρα με ηλιακή λίμνη

4.1.12 Ηλιακός αποστακτήρας με υβριδικό φωτοβολταϊκό – θερμικό σύστημα (Solar still coupled with hybrid PV/T system)

Το πρόβλημα που ανακύπτει με τις κανονικές κυψέλες φωτοβολταϊκών είναι ότι, το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από μια ηλιακή κυψέλη δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η περίσσεια ενέργειας που δεν απορροφάται αυξάνει τη θερμοκρασία της κυψέλης και κατ'επέκταση μειώνει την αποδοτικότητα. Η φυσική ή εξαναγκασμένη κυκλοφορία ενός ψυκτικού μέσου μειώνει τη θερμοκρασία της κυψέλης. Μια εναλλακτική λύση είναι η χρήση φωτοβολταϊκών - θερμικών συστημάτων, που συνίστανται από φωτοβολταϊκά πλαίσια σε συνδυασμό με μονάδες απαγωγής θερμότητας. Ως εκ τούτου, αυτά τα συστήματα, εκτός από την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, αποδίδουν και θερμική μέσω του κυκλοφορόντος ρευστού που απάγει τη θερμότητα των φωτοβολταϊκών κυψελών.

Οι Shiv Kumar & Arvind Tiwari διεξήγαγαν πειραματική μελέτη πάνω στους ενεργητικούς αποστακτήρες με υβριδικά φωτοβολταϊκά – θερμικά συστήματα (Εικόνα 28) και

διαπίστωσαν ότι, η απόδοση αυξήθηκε κατά 3,5 φορές από το παθητικό ηλιακό αποστακτήρα.



Εικόνα 28: Ηλιακός αποστακτήρας σε συνδυασμό με υβριδικά φωτοβολταϊκά – θερμικά συστήματα

Πίνακας 13: Εφαρμογή του ηλιακού αποστακτήρα με υβριδικό φωτοβολταϊκό – θερμικό σύστημα

Τύπος ενεργητικού αποστακτήρα	Συγγραφείς και τόπος πειράματος	Προδιαγραφές	Πειραματικά αποτελέσματα	Παρατηρήσεις
Ηλιακός αποστακτήρας με υβριδικό φωτοβολταϊκό – θερμικό σύστημα	Shiv Kumar & Tiwari	Ηλιακός αποστακτήρας μονής λεκάνης	Μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με τον παθητικό ηλιακό αποστακτήρα	Υψηλή επένδυση (φωτοβολταϊκές κυψέλες)
	Νέο Δελχί, Ινδία.	Επιφάνεια = 1 m × 1 m	Οι μέσες τιμές των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας από εξάτμιση είναι 3-5 φορές μεγαλύτερες από αυτές του παθητικού ηλιακού αποστακτήρα	Η απόσβεση των παθητικών και των ηλιακών αποστακτήρων με υβριδικό φωτοβολταϊκό – θερμικό σύστημα είναι 1.1–6.2 έτη και 3.3–23.9 έτη αντιστοίχως
		Γωνία συλλέκτη = 30° Υλικό αποστακτήρα= πλαστικό ενισχυμένο με γυαλί (GRP)		
		Επιφάνεια συλλέκτη: 2 m ² Επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου: 0.55 × 1.20 m ²		

4.1.13 Πολυβάθμια ενεργητική απόσταξη (Multistage active solar distillation system)

Οι Ahmed κ.α. σχεδίασαν, κατασκεύασαν και εξέτασαν τον πολυβάθμιο ηλιακό αποστακτήρα που αποτελείται από τρείς λεκάνες/τρείς βαθμίδες (**Εικόνα 29**) που τοποθετούνται η μία πάνω στην άλλη και είναι προσεκτικά σφραγισμένες μεταξύ τους για να αποφεύγεται η διαρροή ατμού στα σημεία επαφής τους. Ένα παχύ στρώμα μόνωσης χρησιμοποιείται επίσης για τη μείωση των απωλειών θερμότητας του αποστακτήρα προς το περιβάλλον. Ένας ηλιακός συλλέκτης χρησιμοποιείται για να παρέχει θερμότητα στο σύστημα μέσω της κατώτερης λεκάνης. Χρησιμοποιείται μια αντλία κενού ηλιακά οδηγούμενη για την εκκένωση των μη συμπυκνώσιμων αερίων από τις λεκάνες. Ένα σύνολο βαλβίδων χρησιμοποιείται με αλμυρό νερό από τη δεξαμενή που βρίσκεται στην κορυφή της

ανώτερης λεκάνης. Η πίεση μέσα σε κάθε μία από τις λεκάνες διατηρείται χαμηλότερα από το προηγούμενη. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, η μέγιστη ημερήσια παραγωγή της κατώτερης λεκάνης είναι 6 kg/m2, της ενδιάμεσης 4.3 kg/m2 και της ανώτερης 2 kg/m2 σε μια πίεση κενού 0,5 bar. Πράγματι, η συνολική παραγωγικότητα του ηλιακού αποστακτήρα επηρεάζεται πολύ από την μεταβολή της εσωτερικής πίεσης. Η παραγωγικότητα μειώνεται καθώς η πίεση αυξάνεται λόγω των χαμηλότερων ρυθμών εξάτμισης στις υψηλότερες τιμές πίεσης.



Εικόνα 29: Πολυβάθμιος ηλιακός αποστακτήρας συνδεδεμένος με ηλιακό συλλέκτη και αντλία κενού ηλιακά οδηγούμενη

Τύπος ενεργητικού αποστακτήρα	Συγγραφείς και τόπος πειράματος	Προδιαγραφές	Πειραματικά αποτελέσματα	Παρατηρήσεις
Πολυβάθμια ηλιακή απόσταξη	Ahmed κ.α.	Πολυβάθμιος ηλιακός αποστακτήρα	Η μέγιστη παραγωγή ανήλθε σε 14.2 kg/m ² /day σε πίεση κενού 0.5 bar.	Μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με άλλους τύπους
	Κουαλαλουμπούρ, Μαλαισία	Αριθμός σταδίων 3	Η συνολική ημερήσια απόδοση είναι περίπου τριπλάσια από τους ηλιακούς αποστακτήρες τύπου λεκάνης	
		Μονωτικό υλικό: Πετροβάμβακας & φύλλα αλουμινίου Χρησιμοποιείται αντλία για την κυκλοφορία		

Πίνακας 14: Εφαρμογή της ενεργητικής πολυβάθμιας απόσταξης

4.1.14 Ενεργητική απόσταξη πολλαπλής επίδρασης (Multi effect active solar distillation system)

Η ενεργητική ηλιακή απόσταξη πολλαπλής επίδρασης λειτουργεί με βάση τον κύκλο πολλαπλής συμπύκνωσης - εξάτμισης. Αποτελεί μια αποτελεσματική μέθοδο για την παραγωγή αφαλατωμένου νερού σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία, μέχρι και 70 °C. O Adel Abdel Dayem ανέλυσε πειραματικά και αριθμητικά την απόδοση ενός τέτοιου συστήματος. Η βασική μονάδα απόσταξης αποτελείται από υγραντήρες αέρα (εξατμιστές) και αφυγραντήρες (συμπυκνωτές) (**Εικόνα 30**). Δεν υπάρχει διαχωριστικό μεταξύ των δύο περιβλημάτων. Το θαλασσινό νερό διέρχεται μέσω της θερμής δεξαμενής αποθήκευσης-2, όπου θερμαίνεται. Μετά, περνάει από τους εξατμιστές, όπου οι υδρατμοί και η θερμότητα παραλαμβάνονται από ένα αντίθετο ρεύμα αέρα και έτσι η θερμοκρασία του αλμυρού νερού μειώνεται. Ο αέρας θερμαίνεται και υγραίνεται ταυτόχρονα, διότι η υγρασία του κορεσμένου αέρα μειώνεται στην πλευρά του συμπυκνωτή. Από την άλλη πλευρά, ο εξατμιστής αποτελείται από δύο οριζόντιους σωλήνες με μικρές οπές που βρίσκονται στην κάτω πλευρά του σωλήνα. Οι οπές λειτουργούν ως εγχυτήρες που εγχύνουν το ζεστό θαλασσινό νερό για την αύξηση του ρυθμού εξάτμισης.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το σύστημα μπορεί να λειτουργεί συνεχώς και ότι η παραγωγικότητα του αποσταγμένου νερού είναι υψηλή για μια μέση θερμοκρασία του

συλλέκτη 50 ° C και η εκτιμώμενη βέλτιστη επιφάνεια του συλλέκτη είναι 6 m² και όχι αυτή που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο σύστημα, δηλαδή, 3,1 m².



Εικόνα 30: Ενεργητική απόσταξη πολλαπλής επίδρασης

Τύπος ενεργητικού αποστακτήρα	Συγγραφείς και τόπος πειράματος	Προδιαγραφές	Πειραματικά αποτελέσματα	Παρατηρήσεις
Ηλιακή απόσταξη πολλαπλής επίδρασης	Adel M. Abdel Dayem	Ηλιακός αποστακτήρας πολλαπλής επίδρασης	Απόσταγμα με δύο μονάδες συμπυκνωτών 1 l in 60 min & 24 l/day	Εφαρμογή σε μικρές μονάδες (ξενοδοχεία, ορεινές περιοχές, μικρή βιομηχανία κ.λ.π.)
	Ματταρία, Αίγυπτος	Επιφάνεια συλλέκτη = 1.55 m ²	Βασίζεται στην ύγρανση- αφύγρανση	Υψηλό κόστος επένδυσης και λειτουργίας.
		Χωρητικότητα δεξαμενής = 200 Ι		Απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό

Πίνακας 15: Εφαρμογή	της ενεργητικής	απόσταξης πο	λλαπλής επίδρασης
intranas 10. Equipporti	ull creptilicuily	41001451510	and any cheopaons

4.1.15 Υβριδικό σύστημα ηλιακής απόσταξης (Hybrid solar distillation system)

Οι Voropoulos κ.α. πραγματοποίησαν πειραματική μελέτη ενός υβριδικού ηλιακού συστήματος αφαλάτωσης και θέρμανσης του νερού. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, η παραγωγή ενός συμβατικού ηλιακού αποστακτήρα μπορεί να αυξηθεί σημαντικά, εάν ο αποστακτήρας συνδεθεί με ηλιακούς συλλέκτες και μια δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού (Εικόνα 31). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι:

 Η παραγωγικότητα του προτεινόμενου συστήματος είναι περίπου διπλάσια από εκείνη του απλού αποστακτήρα.

- ii. Σημειώνεται σημαντική αύξηση στην παραγωγή αποσταγμένου νερού όχι μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας, αλλά κυρίως κατά τη νυχτερινή λειτουργία του συστήματος, φθάνοντας τριπλάσια απόδοση σε σχέση με τον απλό ηλιακό αποστακτήρα.
- iii. Η συνεχής θέρμανση του νερού της λεκάνης από τη δεξαμενή νερού έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής σε όλες τις περιόδους λειτουργίας ως αποτέλεσμα της σημαντικά υψηλότερης διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του νερού και του καλύμματος, κυρίως τη νύχτα.



Εικόνα 31: Υβριδικό σύστημα ηλιακής απόσταξης

Τύπος ενεργητικού	Συγγραφείς και τόπος	Προδιαγραφές	Παρατηρήσεις
αποστακτήρα	πειράματος		
Υβριδικό σύστημα ηλιακής απόσταξης	Voropoulos κ.α.	Αποστακτήρας με κάλυμμα διπλής κλίσης	Παράγει ταυτόχρονα αποσταγμένο και ζεστό νερό
	Αγ. Παρασκευή Αττικής, Ελλάδα	Επιφάνεια συλλέκτη = 5 m × 2.5 m	Απλός σχεδιασμός και λειτουργία
		Επιφάνεια ανοίγματος συλλέκτη= 43 m ²	Εύκολα αποδεκτός από τους τελικούς καταναλωτές
		Χωρητικότητα δεξαμενής= 3750 Ι	Πιο κατάλληλος για οικιακή χρήση
		Βάθος νερού = 5 cm	

Πίνακας 16: Εφαρμογή του υβριδικού συστήματος απόσταξης

4.2 Ενεργητικός ηλιακός αποστακτήρας με προθερμασμένο νερό (Pre-heated water active solar still)

Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιείται προθερμασμένο νερό για την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού της λεκάνης. Το ζεστό αυτό νερό που προέρχεται ως απόβλητο από διάφορες πηγές, όπως χαρτοβιομηχανίες, βιομηχανίες χημικών, θερμικών σταθμών ενέργειας και τις βιομηχανίες επεξεργασίας τροφίμων μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια ηλιακή μονάδα απόσταξης για την αύξηση της παραγωγικότητάς της. Το ζεστό νερό διοχετεύεται απευθείας στην λεκάνη ή μέσω εναλλακτών θερμότητας. Ο Proctor πρότεινε πρώτος την τεχνική να χρησιμοποιείται η θερμότητα του απόβλητου ζεστού νερού σε ένα ηλιακό αποστακτήρα και προέβλεψε ότι η παραγωγικότητα του αυξάνεται 3,2 φορές σε σύγκριση με τον κοινό αποστακτήρα.

Οι Sodha κ.α. παρουσίασαν τα πειραματικά αποτελέσματα σχετικά με την αξιοποίηση του αποβλήτου ζεστού νερού στην απόσταξη. Στα πειράματα, μελετήθηκαν δύο περιπτώσεις:

- **1.** Τροφοδοσία του ηλιακού αποστακτήρα με απόβλητο ζεστό νερό προερχόμενο από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς με σταθερή ροή.
- **2.** Τροφοδοσία με απόβλητο ζεστό νερό προερχόμενο από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς μία φορά την ημέρα.

Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι, ο αποστακτήρας που τροφοδοτείται με ζεστό νερό σε σταθερή ροή δίνει υψηλότερη απόδοση σε σύγκριση με ένα αποστακτήρα που τροφοδοτείται με ζεστό νερό μόνο μια φορά τη ημέρα.

Οι Tiwari κ.α. μελέτησαν την περίπτωση όπου απόβλητο νερό εισάγεται στη λεκάνη αλλά και ρέει πάνω από το γυάλινο κάλυμμα του αποστακτήρα. (Εικόνα 32). Με βάση την πειραματική μελέτη, οι συγγραφείς σημείωσαν τα ακόλουθα:

- i. Η θερμοκρασία του νερού που ρέει πάνω από το γυάλινο κάλυμμα παραμένει πάντα ίδια με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και η θερμοκρασία του γυάλινου καλύμματος είναι ελαφρώς υψηλότερη από αυτή.
- ii. Η παραγωγικότητα του αποστακτήρα αυξάνεται με την αύξηση του ρυθμού εισροής νερού όταν η θερμοκρασία εισροής του νερού είναι μεγαλύτερη από τη μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος και μειώνεται όταν η θερμοκρασία εισροής νερού είναι μικρότερη.



Εικόνα 32: Ηλιακός αποστακτήρας με ροή νερού πάνω από το γυάλινο κάλυμμα και μέσα στη λεκάνη

Τύπος ενεργητικού αποστακτήρα	Συγγραφείς και τόπος πειράματος	Προδιαγραφές	Πειραματικά αποτελέσματα	Παρατηρήσεις
Ενεργητικός ηλιακός αποστακτήρας με προθερμασμένο νερό	Tiwari et al.	Ηλιακός αποστακτήρας μονής λεκάνης	Επιτυγχάνεται απόδοση 0.5 kg/m ² h για ροή νερού 0.00585 kg/s.	Απλός σχεδιασμός και λειτουργία
	Νέο Δελχί, Ινδία	Επιφάνεια αποστακτήρα = 1 m × 1 m	Η απόδοση αυξάνεται αναλογικά με τη θερμοκρασία του εισερχόμενου νερού	Κυρίως για περιοχές που διαθέτουν απόβλητο ζεστό νερό.
		Πάχος μόνωσης= 0.05 m		Υψηλότερη απόδοση από τον απλό αποστακτήρα

Πίνακας 17: Εφαρμογή του ενεργητικού αποστακτήρα με προθερμασμένο νερό

4.3 Νυκτερινός ενεργητικός ηλιακός αποστακτήρας (Nocturnal active solar still)

Με τον όρο νυκτερινή παραγωγή εννοούμε τη λειτουργία του ηλιακού αποστακτήρα τις ώρες που δεν έχει ηλιοφάνεια. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε μέσω της ηλιακής ενέργειας που έχει αποθηκευτεί κατά τη διάρκεια της ημέρας και χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της νύχτας είτε με την παροχή θερμότητας από ζεστό απόβλητο που διατίθεται από διάφορες πηγές.

Οι Madhuri & Tiwari διεξήγαγαν πειράματα πάνω σε ηλιακούς αποστακτήρες με ασυνεχή/διακοπτόμενη ροή του απόβλητου ζεστού νερού μέσα στη λεκάνη τις ώρες που δεν έχει ηλιοφάνεια. Οι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι, η αύξηση της απόδοσης είναι ανάλογη της αύξησης της θερμοκρασίας εισόδου νερού όταν έχουμε ροή νερού προς τη λεκάνη και παραμένει η ίδια όταν η ροή διακόπτεται. Με τη ροή απόβλητου ζεστού νερού κατά τη διάρκεια των ωρών που δεν έχει ηλιοφάνεια, σημειώνεται υψηλότερη απόδοση από ό, τι εκείνη της συνεχούς ροής ζεστού νερού καθ'όλη τη διάρκεια της ημέρας ή και της καθόλου ροής.

Νυχτερινές αποδόσεις αποστακτήρων λεκάνης μελετήθηκαν πειραματικά για 0,178m και 0,76m βάθος νερού από τον Onyegegbu. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, κατά μέσο όρο, η νυχτερινή απόσταξη αντιπροσώπευε το 78% της συνολικής ημερήσιας παραγωγής για τον αποστακτήρα με βάθος νερού 0,178m και το 50% της συνολικής ημερήσιας παραγωγής για τον αποστακτήρα με 0.076m.

Τύπος ενεργητικού αποστακτήρα	Συγγραφείς και τόπος πειράματος	Προδιαγραφές	Πειραματικά αποτελέσματα	Παρατηρήσεις
Νυκτερινός ενεργητικός ηλιακός αποστακτήρας	Tiwari κ.α.	Σωληνοειδής ηλιακός αποστακτήρας	Η ημερήσια παραγωγή εξαρτάται σημαντικά από την αρχική θερμοκρασία της άλμης	Η ημερήσια παραγωγή αποστάγματος στον σωληνοειδή ηλιακό αποστακτήρα είναι μεγαλύτερη αυτής του συμβατικού αποστακτήρα κάτω από ίδιες συνθήκες
	Νέο Δελχί, Ινδία	Επιφάνεια αποστακτήρα = 0.1 m × 1.1 m × 0.0127 m	Με τη ροή απόβλητου ζεστού νερού κατά τις εκτός ηλιοφάνειας ώρες επιτυγχάνεται μεγαλύτερη παραγωγή από αυτήν της συνεχούς ροής ή της καθόλου ροής	Κυρίως για περιοχές που διαθέτουν απόβλητο ζεστό νερό.

5. Έμμεση ηλιακή αφαλάτωση [22]

5.1 Σύστημα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση υποβοηθούμενο ηλιακό (Solar Assisted Multi-stage flash distillation MSF)

Τα συστήματα αφαλάτωσης με τη μέθοδο της πολυβάθμιας εκτόνωσης είναι τα δεύτερα πιο εγκατεστημένα συστήματα μετά τα συστήματα αντίστροφης όσμωσης. Τα συστήματα αυτά καταναλώνουν θερμική ενέργεια που απαιτείται για την απόσταξη του νερού, αλλά και ηλεκτρική που απαιτείται για την λειτουργία των αντλιών. Τα συστήματα αυτά μπορούν να συνδεθούν με μια ηλιακή θερμική πηγή και με το ηλεκτρικό δίκτυο ταυτόχρονα, ή μπορεί να συνδεθούν με ένα ηλιακό θερμικό σύστημα που μέσω μιας θερμικής μηχανής να προσφέρει θερμική και ηλεκτρική ενέργεια συγχρόνως (**Εικόνα 33**). Μια ηλιακή λίμνη είναι ιδιαίτερα εφαρμόσιμη όταν τοποθετείται στη θέση του ηλιακού θερμικού συστήματος, καθώς η άλμη που περισσεύει από την απόσταξη μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί από την ίδια την λίμνη.



Εικόνα 33: Σύστημα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση υποβοηθούμενο ηλιακά

Ένα σύστημα απόσταξης με πολυβάθμια εκτόνωση αποτελείται από μια σειρά θαλάμων που βρίσκονται υπό κενό και ονομάζονται στάδια. Το κάθε στάδιο βρίσκεται σε χαμηλότερη πίεση και θερμοκρασία από το προηγούμενο με αποτέλεσμα το νερό να βράζει σε ολοένα και χαμηλότερη θερμοκρασία. Απαιτείται πρόσθετη εξωτερική θερμότητα για την προθέρμανση του αλμυρού νερού πάνω από την θερμοκρασία κορεσμού. Το προθερμασμένο αλμυρό νερό περνά από το ένα στάδιο στο επόμενο όπου ένα μικρό ποσοστό του ατμοποιείται ενώ το περισσευούμενο νερό που είναι πλούσιο σε άλμη προχωρά στο επόμενο στάδιο για περαιτέρω ατμοποίηση. Ο ατμός μετά συμπυκνώνεται και συλλέγεται ως φρέσκο νερό αφού αφαιρεθεί η λανθάνουσα θερμότητα της συμπύκνωσης που χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του νερού σε κάθε στάδιο. [23]

5.1.1 Σύστημα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση υποβοηθούμενο από ηλιακή λίμνη (Solar pond driven MSF)

Η ηλιακή λίμνη (**Εικόνα 34**) είναι μια μεγάλη δεξαμενή με αλμυρό νερό και αποτελείται από τρία στρώματα με διαφορετικές συγκεντρώσεις άλατος το καθένα. Το χαμηλό στρώμα που ονομάζεται κατώτερο θερμικό στρώμα και έχει υψηλή συγκέντρωση άλατος, το μεσαίο στρώμα που ονομάζεται υδάτινο στρώμα φραγής έχει μια μέση συγκέντρωση άλατος και το ανώτερο στρώμα που ονομάζεται υδάτινο στρώμα φραγής έχει μια μέση συγκέντρωση άλατος και όυγκέντρωση άλατος το καθένα. Το χαμηλό στρώμα που οτρώμα που ονομάζεται υδάτινο στρώμα φραγής έχει μια μέση συγκέντρωση άλατος και το ανώτερο στρώμα που ονομάζεται υδάτινο στρώμα φραγής έχει μια μέση συγκέντρωση άλατος και το ανώτερο στρώμα που ονομάζεται υδάτινο στρώμα φραγής έχει μια μέση συγκέντρωση άλατος και το ανώτερο στρώμα που ονομάζεται υδάτινο στρώμα επιφανείας και έχει χαμηλή συγκέντρωση άλατος [24]. Παρουσιάζεται δηλαδή μια βαθμιαία αυξανόμενη συγκέντρωση άλατος από την επιφάνεια προς τον πυθμένα της λίμνης και κυριότερα από το μεσαίο προς το κατώτερο στρώμα. Καθώς οι ηλιακές ακτίνες ασκούνται στη λίμνη, παγιδεύεται η θερμική ενέργεια στο πυθμένα εξαιτίας της υψηλής συγκέντρωσης άλατος. Το πολύ αλμυρό νερό που θερμαίνεται από τον ήλιο δεν μπορεί να ανέβει στα ψηλότερα στρώματα λόγω της υψηλής πυκνότητας του. Επιπλέον, το μεσαίο στρώμα έχει τέτοιο δείκτη αλμυρότητας που ουσιαστικά δρα ως μονωτής και δεν επιτρέπει την συναγωγή και τις θερμικές απώλειες προς το ανώτερο στρώμα λόγω της θερμότητας που αποθηκεύεται σε αυτό ονομάζεται και στρώμα αποθήκευσης.



Εικόνα 34: Η ηλιακή λίμνη και οι δείκτες αλμυρότητας των στρωμάτων της

Οι ηλιακές λίμνες παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες ηλιακές τεχνικές αφαλάτωσης. Αυτά είναι, το χαμηλό κόστος ανά επιφάνεια συλλέκτη, η έμφυτη ιδιότητα αποθήκευσης θερμότητας καθώς και η αξιοποίηση της άλμης που είναι απόβλητο προϊόν διαφόρων θερμικών διεργασιών. Επιπροσθέτως, η επιφάνεια της ηλιακής λίμνης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ψυκτικό νερό λόγω της χαμηλής του θερμοκρασίας κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Όμως, οι ηλιακές λίμνες απαιτούν ζεστό κλίμα, μεγάλες εκτάσεις γης και μπορεί να δημιουργήσουν μόλυνση του εδάφους από τη διαρροή άλμης. Απαιτείται καλή συντήρηση, διατήρηση του αλμυρού νερού στο σωστό ph καθώς και εκτενής μελέτη του παράγοντα ανέμου πριν την κατασκευή της ηλιακής λίμνης.

Έργο/Πείραμα	Τοποθεσία	Μέγεθος	Παραγωγή	Υψηλή	Αριθμός
		Λίμνης	αποσταγμένου	θερμοκρασία	Σταδίων
		(m²)	νερού	Άλμης	
			(m³/day)	(⁰ C)	
Έργο	Βόρεια	2.500	15	<95	12-14
	Αφρική	36.000	300		
Πείραμα	Κατάρ	1.500	20	55-80	22
Έργο	Τρίπολη <i>,</i>	70.000	1.570	<90	31
	Λιβύη				
Έργο	El Paso, US	3.000	1,6-9	57-77	24

Πίνακας 19: Συστήματα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση υποβοηθούμενα από ηλιακή λίμνη

5.1.2 Σύστημα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση υποβοηθούμενο από ηλιακό συλλέκτη (Solar collector driven MSF)

Μια τέτοια εφαρμογή αποτελείται από ένα ηλιακό συλλέκτη συνδεδεμένο με ένα συμβατικό σύστημα αφαλάτωσης για να προσδώσει θερμική ενέργεια. Οι ηλιακοί συλλέκτες μπορούν να ταξινομηθούν ως συγκεντρωτικοί και μη συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες. Ο Πίνακας 20 δείχνει διάφορους ηλιακούς συλλέκτες και τις θερμοκρασίες λειτουργίας τους. Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες μπορεί να είναι σχήματος σκάφης, πιάτου ή πύργοι κεντρικής απορρόφησης. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των συγκεντρωτικών συλλεκτών σε σχέση με άλλες ανανεώσιμες τεχνολογίες είναι ότι μπορούν να λειτουργούν συμπαραγωγικά με μεγάλες εγκαταστάσεις αποθήκευσης θερμότητας ή με υβριδικά μοντέλα με συμβατικά καύσιμα ή βιοκαύσιμα προκειμένου να αντισταθμίζουν τις διακυμάνσεις στην ηλιακή ακτινοβολία και να παράγουν και μετά τις ώρες ηλιοφάνειας.

Εντοπισμός του	Τύπος Συλλέκτη	Απορροφητής	Λόγος	Θερμοκρασία
ήλιου			Συγκέντρωσης-	λειτουργίας
			Concentration	(°C)
		- / - 2	ratio	
Στατικοί	Επίπεδος (Flat	Επίπεδος	1	30-80
(Stationary)	plate FPC)			
	Σωλήνας κενού	Επίπεδος	1	50-200
	(Evacuated			
	TUBGETC)	5) 5 / .	4.5	60.240
	Συνθετος	Σωληνοειδης	1-5	60-240
	παραβολικός			
	(Compound			
			F 1F	<u> </u>
(Single axis)	20νθειος	Σωληνοειοης	5-15	60-300
(Single axis)	Παραρολικός			
	(Compound			
			10.40	CO 250
	Γραμμικός	Σωληνοειόης	10-40	60-250
	ανακλαστης			
	Fresher (Linger Freend			
		ζωλημοριδής	15 45	60.200
	Παραρολικός	Ζωληνοειόης	15-45	00-300
	σκάφος			
	(Parabolic			
	Πουβητης	Σωληγοειδής	10-50	60-300
	κυλινορικός	Ζωληνθεισης	10-30	00-300
	σκάφης			
	(Cylindrical			
	trough CTC)			
Διπλού άξονα	Παραβολικοί	Σημειακός	100-1000	100-500
(Double axis)	Λίσκοι	Ζημειακός	100 1000	100 500
	(Parabolic dish			
	PDC)			
	Ηλιοστάτες	Σημειακός	100-1500	150-2000
	(Heliostat field)		100 1000	100 2000

Πίνακας 20: Ηλιακοί συλλέκτες και τα χαρακτηριστικά τους

Έργο/Πείραμα	Τοποθεσία	Παραγωγή απεσταγμένου νερού	Τύπος Συλλέκτη	Μέγεθος Συλλέκτη (m ²)	Μέγιστη θερμοκρασία Άλμης	Αριθμός Σταδίων
		(m³/day)			(⁰ C)	
Έργο	ΡSA, Ισπανία	1200-3000	Παραβολικός σχήματος σκάφης	41880	<105	24
Πείραμα	Tianjin, Κίνα	0,3	Επίπεδος	Δ.Α.	78	1
Πείραμα	Γάζα	0,145	Επίπεδος	5,1		3
Έργο	Βεγγάζη, Λιβύη	8,3	Επίπεδος	1	80	
		13,2	Σύνθετος παραβολικός	1	122	
Πείραμα	Tamilnadu, Ινδία	0,0085	Επίπεδος	2		1
Πείραμα	Σουέζ, Αίγυπτος	0,0025-0,0165	Επίπεδος	2,39	40-67	1

Πίνακας 21: Συστήματα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση υποβοηθούμενα από ηλιακό
συλλέκτη

Γενικώς, τα συστήματα αυτά απαιτούν καλό έλεγχο της θερμοκρασίας και της πίεσης μέσα στους θαλάμους, ενώ χρειάζεται επίσης ένας μεταβατικός χρόνος μέχρι να λειτουργήσει ομαλά το σύστημα. Δεδομένου ότι η ηλιακή θερμική πηγή δεν είναι συνεχής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα επαρκές θερμικό αποθηκευτικό σύστημα, π.χ. μια δεξαμενή αποθήκευσης για θερμική φόρτιση. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν το θαλασσινό νερό ως ψυκτικό νερό, που σημαίνει ότι εκμεταλλεύονται την αισθητή θερμότητα του αλμυρού νερού για την ανακτήση της λανθάνουσας θερμότητας του αποσταγμένου νερού. Έτσι, απαιτούν μεγάλες ποσότητες αλμυρού νερού για ανακύκλωση μέσα στο σύστημα και επομένως έχουν μεγαλύτερη απαίτηση ηλεκτρικής ενέργειας από τα συστήματα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εξάτμιση (MED). Μια τυπική εγκατάσταση μπορεί να περιλαμβάνει από 4 έως 40 στάδια. Τα περισσότερα συστήματα παράγουν από 4.000 έως 30.000 m³/day και συνήθως λειτουργούν με υψηλότερη θερμοκρασία τροφοδοσίας (μετά το προθερμαντήρα αλμυρού νερού) τους 90-120°C. Η συγκεκριμένη μέθοδος αφαλάτωσης χρησιμοποιείται σε πολλά έργα συμπαραγωγής ενέργειας καθώς μπορεί να χρησιμοποιεί χαμηλής ποιότητας ατμός ως θερμική πηγή που απορρίπτεται από άλλες εγκαταστάσεις. Μερικοί αναλυτές θεωρούν ότι τα συστήματα με πολυβάθμια εκτόνωση έχουν μικρότερη θερμική επάρκεια από τα συστήματα με πολυβάθμια εξάτμιση ενώ άλλοι δεν βλέπουν καμιά θερμοδυναμική διαφορά ανάμεσα στα συστήματα εκτός από τις θερμικές απώλειες που είναι μεγαλύτερες στα πρώτα εξαιτίας της μεγαλύτερης θερμοκρασίας στην οποία λειτουργούν.

5.2 Συστήματα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εξάτμιση υποβοηθούμενα ηλιακά (Solar assisted multiple effect distillation MED)

Η μέθοδος της πολυβάθμιας εξάτμισης είναι παρεμφερής της πολυβάθμιας εκτόνωσης που προαναφέρθηκε καθώς απαιτεί συγχρόνως ηλιακή και μηχανική ενέργεια. Η **Εικόνα 35** δείχνει ένα σύστημα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εξάτμιση παράλληλης τροφοδοσίας υποβοηθούμενο ηλιακά. Το νερό περνά από μία διαδοχή δοχείων που βρίσκονται σε διαδοχικώς μικρότερες πιέσεις και ονομάζονται βαθμίδες/στάδια. Η εξωτερική θερμότητα προσδίδεται στη πρώτη βαθμίδα και ο παραγόμενος ατμός της προηγούμενης βαθμίδας προσδίδει τη λανθάνουσα θερμότητα της συμπύκνωσης στην επόμενη.

Σε αντίθεση με τα συστήματα πολυβάθμιας εκτόνωσης που ανακτούν τη λανθάνουσα θερμότητα του ατμού με την αισθητή θερμότητα από το αλμυρό νερό (το τροφοδοτικό νερό), τα συστήματα πολυβάθμιας εξάτμισης επαναχρησιμοποιούν τη λανθάνουσα θερμότητα του νερού. Η συγκεκριμένη θερμοχωρητικότητα του νερού είναι 4kj/kgk ενώ η λανθάνουσα θερμότητα της ατμοποίησης είναι προσεγγιστικά 2300 kj/kg, έτσι τα συστήματα αυτά έχουν συνήθως 2-14 βαθμίδες ενώ τα συστήματα με πολυβάθμια εκτόνωση έχουν πάνω από 20. Τα συστήματα με πολυβάθμια εξάτμιση λειτουργούν με σχετικά χαμηλή θερμοκρασία άλμης, χαμηλότερη των 75°C για να μειώσουν τις διαβρώσεις και την εναπόθεση αλάτων ενώ μπορούν να συνδυαστούν και με αντλίες θερμότητας για μεγαλύτερη αποδοτικότητα.



Εικόνα 35: Σύστημα αφαλάτωσης με τη μέθοδο πολυβάθμιας εξάτμισης υποβοηθούμενο ηλιακά

5.2.1 Σύστημα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εξάτμιση υποβοηθούμενα από ηλιακή λίμνη (Solar pond assisted MED)

Τα συστήματα με πολυβάθμια εξάτμιση υποβοηθούμενα από ηλιακή λίμνη μοιάζουν με αυτά με πολυβάθμια εκτόνωση. Παρ'όλα αυτά, τα συγκεκριμένα συστήματα απαιτούν χαμηλότερες θερμοκρασίες και καθιστούν τη λειτουργία της ηλιακής λίμνης πιο εύκολη. Οι Hawaj & Darwish, κατέληξαν με μαθηματικά μοντέλα στο συμπέρασμα ότι ενδιάμεσες θερμοκρασίες ατμού 80-90⁰C είναι πιο αποδοτικές, γιατί ο ατμός υψηλότερης θερμοκρασίας μειώνει την ηλιακή απορροφητικότητα/ενίσχυση. Οι Garman & Muntasser βρήκαν ότι τα βέλτιστα πάχη για τα τρία στρώματα της λίμνης είναι 0.3m, 1.1m και 4m αντίστοιχα, για χαμηλές θερμοκρασίας λειτουργίας. Στον **Πίνακα 22** καταγράφονται κάποια τέτοια συστήματα.

Έργο/Πείραμα	Τοποθεσία	Μέγεθος	Παραγωγή	Υψηλή	Αριθμός
		Λίμνης	αποσταγμένου	θερμοκρασία	Σταδίων
		(m²)	νερού	Άλμης	
			(m³/day)	(⁰ C)	
Έργο	Αθήνα,	30.000	500	<75	14
	Ελλάδα				
Πείραμα	Πανεπιστήμιο	625	30	<65	4
	Ανκόνα,				
	Ιταλία				
Πείραμα	Bundoora,	720	0,9-2,3	<85	3
Έργο	Αυστραλία	11.800	50-130		12
		58.900	260-650		12

Πίνακας 22: Συστήματα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εξάτμιση υποβοηθούμενα από ηλιακή λίμνη

5.2.2 Σύστημα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εξάτμιση υποβοηθούμενο από ηλιακό συλλέκτη (Solar collector assisted MED)

Τέτοια συστήματα έχουν μελετηθεί κατ' εξακολούθηση και μερικές από τις εφαρμογές τους παρατίθενται στον Πίνακα 23. Ο συνδυασμός αυτών των συστημάτων με αντλίες θερμότητας τα καθιστά πιο αποδοτικά. Η αξιοπιστία των συστημάτων αυτών έχει αποδειχθεί μετά από πολύχρονα πειράματα. Δύο μεγάλα πειράματα μακράς διαρκείας είναι οι εγκατάστασεις ηλιακής αφαλάτωσης του Abu Dhabi (Abu Dhabi Solar desalination Plant) και της Ισπανίας (Solar Thermal Desalination (STD) Project at the Platform a Solar de Almeria).

Η εγκατάσταση ηλιακής αφαλάτωσης στο Abu Dhabi, που λειτούργησε από το 1984 έως το 2002, χρησιμοποίησε συλλέκτες κενού για την οδήγηση των συστημάτων αφαλάτωσης πολυβάθμιας εξάτμισης. Οι ερευνητές ανέπτυξαν ένα πρόγραμμα προσομοίωσης που ονομάζεται "SOLDES" προκειμένου να προβλέψουν την απόδοση της συγκεκριμένης εγκατάστασης, να βελτιστοποιήσουν τις παραμέτρους λειτουργίας και να μεγιστοποιήσουν την παραγωγή απεσταγμένου νερού για κάθε μήνα του έτους. Η συντήρηση της εγκατάστασης κρίθηκε απαραίτητη αφού διαπιστώθηκε π.χ. ότι η κατακάθιση σκόνης μπορεί να μειώσει την παραγωγή νερού έως και 40%.

Η εγκατάσταση ηλιακής θερμικής αφαλάτωσης στην Ισπανία, χρησιμοποίησε το σύστημα πολυβάθμιας εξάτμισης με 14 στάδια και απόδοση 3 m³/h. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις. Στη πρώτη φάση μελετήθηκε η αξιοπιστία και η τεχνική επάρκεια της εγκατάστασης αφαλάτωσης σε σύνδεση με παραβολικό συλλέκτη σχήματος σκάφης (PTC). Στη δεύτερη φάση προστέθηκε και μια αντλία θερμότητας απορρόφησης για την βελτίωση της απόδοσης του συστήματος.

Έργο/Πείραμα	Τοποθεσία	Συλλέκτης	Παραγωγή	Αριθμός
			αποσταγμένου	Σταδίων
			νερού	
			(m^3/dav)	
Έριο	Bichmond		0.151	7 1 2
Εργυ		Επίπεδος	0,131	7-12
	καλιφορνία			
Έργο	Eilat, Ισραήλ	Παραβολικός	10.000	16
		σχήματος		
		σκάφης		
Έργο	Zikim, Ισραήλ	Παραβολικός	100.000	16
	, , , ,	σχήματος		
		σκάφης		
/E a a	Néme	οκαφης	1 000	
Εργο	Νοτια	Σωληνάς κένου	1.000	
	Μεσόγειος			
Έργο	Abu Dhabi,	Σωλήνας κενού-	100	10-30
	Ηνωμένα	Ф/В		
	Δοαβικά	+/-		
	Αραρικά Ειμοάτα			
- /	Εμιρατά		100	10
Πείραμα	Abu Dhabi,	Σωλήνας κενού	120	18
	Ηνωμένα			
	Αραβικά			
	Εμιράτα UAE			
Πείραμα	Σίδνευ,	Επίπεδος	100	Δ.Α.
	Αυστραλία			

Πίνακας 23: Συστήματα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εξάτμιση υποβοηθούμενα από ηλιακό συλλέκτη

5.3 Συστήματα αφαλάτωσης με αντλίες θερμότητας (Solar assisted heat pump (HP) desalination)

Οι αντλίες θερμότητας γενικά χρησιμοποιούνται σε μικρές ή και μεσαίες εγκαταστάσεις και συνήθως συνδυάζονται με άλλες θερμικές διεργασίες. Υπάρχουν 4 βασικοί τύποι εγκαταστάσεων αντλιών θερμότητας που εφαρμόζονται στις διαδικασίες αφαλάτωσης. Αυτές περιλαμβάνουν τη θερμική συμπίεση ατμού (thermal vapor compressor TVC) (Εικόνα **36α**), τη μηχανική συμπίεση ατμού (mechanical vapor compressor MVC) (Εικόνα **36β**), την αντλία θερμότητας απορρόφησης (absorption heat pump ABHP) (Εικόνα **36**β).



Εικόνα 36: Τύποι αντλιών θερμότητας που χρησιμοποιούνται στην αφαλάτωση: (α) θερμική συμπίεση ατμού, (β) μηχανική συμπίεση ατμού, (γ) αντλία θερμότητας προσρόφησης, (δ) αντλία θερμότητας απορρόφησης

Η λειτουργία της αντλίας θερμότητας είναι να ανακτά τον χαμηλής θερμοκρασίας ατμό από κάποια σημεία των θερμικών συστημάτων αφαλάτωσης (πολυβάθμιας εξάτμισης ή εκτόνωσης) και να τον μετατρέπει σε ατμό υψηλότερης θερμοκρασίας.

Η μέθοδος της θερμικής συμπίεσης ατμού μπορεί να συνδυαστεί με τα συστήματα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση ή εξάτμιση σε διαφορετικά μεγέθη εμπορικών εγκαταστάσεων. Ο ατμός που εξάγεται στο τελευταίο στάδιο της πολυβάθμιας εξάτμισης οδηγείται στον θερμικό συμπιεστή και μετά εισάγεται πάλι στο πρώτο στάδιο.

Η μέθοδος της μηχανικής συμπίεσης ατμού έχει ευρέως μελετηθεί και χρησιμοποιηθεί, λόγω της απλότητας της και της σχετικώς χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Στα συστήματα αυτά δεν απαιτείται συμπυκνωτής επειδή το σύνολο του ατμού που σχηματίζεται στο τελευταίο στάδιο κατευθύνεται προς το μηχανικό συμπιεστή ατμού, όπου συμπιέζεται στην επιθυμητή θερμοκρασία και πίεση με σκοπό την ανάκτηση θερμότητας της απορριφθείσας άλμης και του αποστάγματος.

Η αντλία θερμότητας απορρόφησης χρησιμοποιεί ως μέσο απορρόφησης βρωμιούχο λίθιο (LiBr-water). Η αντλία θερμότητας προσρόφησης χρησιμοποεί ως μέσο προσρόφησης με ζεόλιθο (zeolite–water) για να ανακτήσει τον ατμό από το τελευταίο στάδιο και τον μετατρέπει σε ατμό υψηλής θερμοκρασίας. Οι δύο αυτές αντλίες θερμότητας ενώ έχουν μεγάλες δυνατότητες, δεν έχουν αναπτυχθεί ακόμα εμπορικά. Οι διαφορές μεταξύ των συστημάτων που βασίζονται σε αντλίες θερμότητας (Εικόνα 37) είναι ότι:

- Η μηχανική συμπίεση ατμού απαιτεί ηλεκτρική ενέργεια, ενώ μπορεί να λειτουργήσει και ως αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης
- Η θερμική συμπίεση ατμού χρησιμοποιεί ατμό σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση (> 200 kPa)
- Οι αντίες θερμότητας απορρόφησης/προσρόφησης χρησιμοποιούν είτε υψηλότερη θερμοκρασία ατμού ή άλλες πηγές θερμότητας κατά τους κύκλους απορρόφησης / προσρόφησης.

Η μηχανική συμπίεση ατμού απαιτεί μηχανική ενέργεια, ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται ένα φωτοβολταϊκό σύστημα (PV) ή μια θερμική μηχανή. Τα υπόλοιπα συστήματα χρησιμοποιούν ατμό οπότε είναι συνδεδεμένα μεταξύ της ηλιακής και της θερμικής μονάδας αφαλάτωσης.



Εικόνα 37: Πιθανές διατάξεις συστημάτων αφαλάτωσης με αντλίες θερμότητας

5.4 Συστήματα αντίστροφης όσμωσης υποβοηθούμενα ηλιακά (Solar assisted reverse osmosis RO)

Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 38**, η αντίστροφη όσμωση, η οποία είναι η περισσότερο χρησιμοποιουμένη διαδικασία αφαλάτωσης σε διεθνές επίπεδο, απαιτεί μόνο ηλεκτρική ενέργεια από φωτοβολταϊκά (PV) ή μηχανική ενέργεια από έναν ηλιακό συλλέκτη ή μια ηλιακή λίμνη μέσω μιας θερμικής μηχανής. Η διαδικασία της αντίστροφης όσμωσης απαιτεί εκτεταμένη προεπεξεργασία του νερού, αλλά είναι ενεργειακά αποδοτικότερη σε σύγκριση με τις θερμικές διεργασίες αλλαγής φάσης, και μέρος της μηχανικής ενέργειας που καταναλώνεται μπορεί να ανακτηθεί από την απορριφθείσα άλμη με μια κατάλληλη συσκευή ανάκτησης ενέργειας, όπως ένας εναλλάκτης πίεσης. Η όσμωση είναι ένα φυσικό φαινόμενο κατά το οποίο το νερό περνά μέσα από μια μεμβράνη από την πλευρά της χαμηλότερης συγκέντρωσης άλατος στην πλευρά της υψηλότερης συγκέντρωσης άλατος στην πλευρά της υψηλότερη από ό, τι η φυσική οσμωτική. Η πίεση (2500 kPa), αλλά να διατηρείται κάτω από την πίεση ανοχής μεμβράνης, τυπικά μεταξύ 6000 kPa και 8000 kPa, εξαναγκάζοντας καθαρά μόρια νερού μέσω των

πόρων της μεμβράνης προς την πλευρά του φρέσκου νερού. Το γλυκό νερό συλλέγεται ενώ η άλμη απορρίπτεται. Τα περισσότερο μελετημένα συστήματα αντίστροφης όσμωσης είναι τα οδηγούμενα από φωτοβολταϊκά.



Εικόνα 38: Η διαδικασία της αντίστροφης όσμωσης

5.4.1 Συστήματα αντίστροφης όσμωσης με τη βοήθεια φωτοβολταικών (PV assisted RO system)

Το σύστημα αντίστροφης όσμωσης με τη βοήθεια φωτοβολταικών είναι πολύ δημοφιλές στις εγκαταστάσεις αφαλάτωσης καθώς και τα δύο συστήματα είναι εφαρμόσιμα και εύκολα επεκτάσιμα. Σημαντικές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί για το αν η αντίστροφη όσμωση πρέπει να συνδυαστεί με: (i) μια συσκευή ανάκτησης ενέργειας (ii) μια μπαταρία (iii) μια άλλη πηγή ενέργειας, όπως η αιολική ενέργεια ή το πετρέλαιο, σε ένα υβριδικό σύστημα (iv) μια άλλη μέθοδο αφαλάτωσης του νερού. Σε γενικές γραμμές, ο συνδυασμός αντίστροφης όσμωσης και φωτοβολταϊκών λειτουργεί σαν δύο ανεξάρτητες μονάδες. Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν ακόμη πολλά περιθώρια για τη βελτίωση του συνδυασμού των δύο τεχνολογιών, οι τεχνικές βελτιώσεις δεν αποτελούν εμπόδιο σε σχέση με τις παραμέτρους κριτηρίων οικονομίας και αξιοπιστίας. Ο **Πίνακας 24** παραθέτει μερικά επιλεγμένα υβριδικά συστήματα αντίστροφης όσμωσης - φωτοβολταϊκών αφαλάτωσης θαλασσινού νερού που έχουν αναπτυχθεί μετά το 2000.
Τοποθεσία	Έτος	Πρόσθετη ενέργεια	Παραγωγή αποσταγμένου	Μπαταρία	Σύστημα ανάκτησης	Ισχύς Φ/Β
			νερού (m ³ /dou)		ενέργειας	(KW)
			(m /day)			
Abu Dhabi,	2008	Ντίζελ	20	Όχι	Ναι	11,25
Ηνωμένα						
Αραβικά						
Εμιράτα						
Πανεπιστήμιο	2008	Όχι	0,35	Ναι	Ναι	0,85
Αθηνών,						
Ελλάδα	2004	Αιολική	12	Ναι	Ναι	30,22
CRES,	2004	Αιολική	3,12	Όχι	Όχι	4
Λαύριο,						
Ελλάδα						
ITC-DESSOL,	2003	Όχι	10	Όχι	Όχι	4,8
Gran Canaria,						
Ισπανία						
GECOL at	2005	Αιολική	300	Όχι	Ναι	50
RasEjder,		και				
Λιβύη		δικτύου				

Πίνακας 24: Συστήματα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης με τη βοήθεια φωτοβολταϊκών

5.5 Ηλιακά βοηθούμενη ηλεκτροδιάλυση (Solar assisted electrodialysis)

Η ηλεκτροδιάλυση χρησιμοποιεί μόνο ηλεκτρική ενέργεια και είναι μια τεχνική που βασίζεται στη κίνηση και στο διαχωρισμό των ιόντων από μια σειρά επιλεκτικών μεμβρανών υπό την επίδραση ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. (Εικόνα 38) Σε μια συνήθη διάταξη ηλεκτροδιάλυσης οι μεμβράνες ανταλλαγής ανιόντων και κατιόντων τοποθετούνται διαδοχικά μεταξύ της καθόδου και της ανόδου. Η εφαρμογή μιας κατάλληλης διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, έχει ως αποτέλεσμα τα κατιόντα να μετακινούνται προς την κάθοδο και τα ανιόντα αντίστοιχα προς την άνοδο. Στην πορεία τους αυτή όμως τα κατιόντα διαπερνούν τις μεμβράνες ανταλλαγής κατιόντων και παρακρατούνται από τις μεμβράνες ανταλλαγής ανιόντων. Σε μια αντίστοιχη διεργασία αντίθετης φοράς υπόκεινται ταυτόχρονα και τα ανιόντα τα οποία διαπερνούν τις μεμβράνες ανταλλαγής ανιόντων, που διαθέτουν σταθεροποιημένες θετικές χημικές ομάδες και παρακρατούνται από τις μεμβράνες ανταλλαγής κατιόντων. Αυτή η κίνηση όλων των ιόντων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσής τους σε συγκεκριμένες περιοχές της διάταξης και αντίστοιχη ταυτόχρονη μείωση της σε άλλες. [25]

Η ηλεκτροδιάλυση είναι διαφορετική από τις άλλες μεθόδους αφαλάτωσης καθώς εδώ, τα διαλυμένα άλατα μετακινούνται μακριά από τα θαλασσινό τροφοδοτικό νερό και όχι το αντίθετο. Δεν είναι οικονομικά ανταγωνιστική για εφαρμογές θαλασσινού νερού, λόγω της μεγάλης ποσοτήτας άλμης, το υψηλό κόστος των ηλεκτροδίων, τις ακριβές μεμβράνες ανταλλαγής ιόντων και τη σχετικά σύντομη διάρκεια ζωής των μεμβρανών όταν λειτουργούν σε ένα υψηλής πυκνότητας ηλεκτρικό πεδίο και, κατά συνέπεια, οι περισσότεροι από τους ερευνητές χρησιμοποιούν την διαδικασία ηλεκτροδιάλυσης με τη βοήθεια φωτοβολταϊκών μόνο για υφάλμυρο νερό. Για ένα πείραμα μικρής κλίμακας 10m³/d το θαλασσινό νερό θα πρέπει να ανακυκλοφορεί πολλές φορές πριν από την επίτευξη της επιθυμητής ποιότητας νερού. Μέχρι στιγμής, έχουν διεξαχθεί μόνο λίγες μελέτες για αφαλάτωση θαλασσινού νερού με ηλεκτροδιάλυση και ηλιακή υποβοήθηση.



Εικόνα 39: Ηλεκτροδιάλυση με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας

5.6 Παθητική αφαλάτωση εν κενώ υποβοηθούμενη ηλιακά (Solar assisted passive vacuum desalination PVD)

Η καινοτόμα ιδέα της παθητικής αφαλάτωσης (Εικόνα 40) αρχικά υιοθετήθηκε από τον Goswami για εγκαταστάσεις αφαλάτωσης μικρής κλίμακας. Το σύστημα αποτελείται από έναν εξατμιστή που είναι συνδεδεμένος με ένα συμπυκνωτή. Ο ατμός που δημιουργείται στον εξατμιστή οδηγείται στο συμπυκνωτή όπου συμπυκνώνεται και συλλέγεται ως καθαρό νερό. Η θερμική ενέργεια παρέχεται από έναν ηλιακό συλλέκτη, ο οποίος επειδή λειτουργεί σε ένα χαμηλό εύρος θερμοκρασιών είναι αρκετά αποδοτικός. Το σύστημα βασίζεται στις φυσικές δυνάμεις της βαρύτητας και της ατμοσφαιρικής πίεσης προκειμένου να δημιουργήσει συνθήκες κενού κάτω από τις οποίες το νερό εξατμίζεται πολύ πιο γρήγορα σε πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες, καταναλώνοντας πολύ λιγότερη ενέργεια απ'ότι με τις συμβατικές τεχνικές. Στόχος της μεθόδου αυτής είναι να δημιουργηθούν συνθήκες κενού χωρίς να παρέχεται στο σύστημα επιπρόσθετη ενέργεια, όπως για παράδειγμα από μία αντλία κενού. Η ατμοσφαιρική πίεση είναι ισοδύναμη με την υδροστατική πίεση μιας στήλης ύδατος σε ύψος 10 μέτρων. Έτσι, αν η δεξαμενή του συστήματος τροφοδοτηθεί με θαλασσινό νερό σε ύψος άνω των 10 μέτρων από το έδαφος και στη συνέχεια το νερό αφεθεί να πέσει υπό την επίδραση της βαρύτητας δημιουργείται κενό στο επάνω μέρος της δεξαμενής. [24]

Η παθητική αφαλάτωση εν κενώ είναι μια απλοποιημένη μέθοδος σε σύγκριση με την αντίστροφη όσμωση αφού απαιτεί λιγότερη επεξεργασία του νερού. Είναι κατάλληλη για

χώρους όπως τα πλοία, όπου απαιτούνται ισχυρά συστήματα αφαλάτωσης υπό την προυπόθεση ότι το ύψος του καταστρώματος είναι μεγαλύτερο των 10 μέτρων από το επίπεδο της θάλασσας. [22]



Εικόνα 40: Σύστημα παθητικής αφαλάτωσης εν κενώ

5.7 Υγρανση - αφύγρανση ηλιακά βοηθούμενη (Solar assisted humidificationdehumidification HDH)

Ο προκάτοχος των συστημάτων αφαλάτωσης με ύγρανση – αφύγρανση είναι ο απλός ηλιακός αποστακτήρας. Επομένως, μπορούμε να πούμε ότι η μέθοδος της ύγρανσης – αφύγρανσης αποτελεί μια βελτίωση του μηχανισμού απόσταξης του ηλιακού αποστακτήρα. Το βασικό μειονέκτημα του ηλιακού αποστακτήρα είναι ότι όλες οι διεργασίες (η απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας, η εξάτμιση, η συμπύκωση και η ανάκτηση θερμότητας) γίνονται μέσα σε ένα κοινό χώρο, το εσωτερικό του αποστακτήρα. Το χαρακτηριστικό της μεθόδου ύγρανσης- αφύγρανσης είναι ο επιμερισμός των διεργασιών σε διαφορετικά υποσυστήματα, με στόχο την ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών και την αύξηση της απόδοσης του συστήματος. Για παράδειγμα, στο σύστημα ύγρανσης – αφύγρανσης η ανάκτηση της λανθάνουσας θερμότητας της συμπύκνωσης γίνεται σε ένα ξεχωριστό εναλλάκτη θερμότητας - τον αφυγραντήρα, όπου το τροφοδοτικό θαλασσινό νερό προθερμαίνεται. Το σύστημα αποτελείται από τρία υποσυστήματα:

- (1) Το θερμαντήρα νερού, όπου παρέχεται θερμική ενέργεια από έναν ηλιακό συλλέκτη
- (2) Τον υγραντήρα ή εξατμιστή
- (3) Τον αφυγραντήρα ή συμπυκνωτή [26]

Η μέθοδος ύγρανσης – αφύγρανσης μπορεί να χωριστεί σε δύο μεγάλες ομάδες: κύκλου κλειστού αέρα, ανοικτού νερού (closed air, open water CAOW cycle) και κύκλου κλειστού νερού, ανοικτού αέρα (closed-water open-air CWOA cycle). [22]. Ένα τυπικό σύστημα κύκλου κλειστού αέρα, ανοιχτού νερού (CAOW) απεικονίζεται στην **Εικόνα 41**. Στον

υγραντήρα εισάγεται ζεστό νερό και ζεσταίνει το ρεύμα αέρα. Ο υγρός ζεστός αέρας στη συνέχεια εισάγεται στον αφυγραντήρα και συμπυκνώνεται αφού έρχεται σε επαφή με το κρύο τροφοδοτικό θαλασσινό νερό. Αντίστοιχα το θαλασσιμό νερό προθερμαίνεται και προχωρά για περαιτέρω θέρμανση στον ηλιακό συλλέκτη. Ο κρύος ξηρός αέρας από τον αφυγραντήρα οδηγείται πάλι στον υγραντήρα όπου μετατρέπεται σε υγρό θερμό αέρα και όλη η διαδικασία επαναλαμβάνεται. [27]



Εικόνα 41: Κύκλος κλειστού αέρα, ανοιχτού νερού

Από όλα τα συστήματα το σύστημα ύγρανσης - αφύγρανσης κύκλου κλειστού αέρα, ανοικτού νερού πολλαπλής επίδρασης (multi-effect CAOW water-heated system) (**Εικόνα 42**), θεωρείται ως το πλέον ενεργειακά αποδοτικό, ενώ είναι και το μόνο που έχει εμπορευματοποιηθεί [22]. Ο άερας εξάγεται από διάφορα σημεία του υγραντήρα και εισάγεται στα αντίστοιχα σημεία στον αφυγραντήρα. Έτσι διατηρείται μια μικρή και σχετικά σταθερή διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη ανάκτηση θερμότητας από τον αφυγραντήρα. [27]



Εικόνα 42: Κύκλος κλειστού αέρα, ανοιχτού νερού πολλαπλής επίδρασης

5.8 Απόσταξη με μεμβράνη ηλιακά υποβοηθούμενη (Solar assisted membrane distillation MD)

Η αφαλάτωση με μεμβράνη απόσταξης (**Εικόνα 43**) απαιτεί θερμική και μηχανική ενέργεια, επομένως όπως και τα συστήματα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση ή εξάτμιση, μπορεί να αντλήσει θερμική ενέργεια από έναν ηλιακό συλλέκτη ή μια ηλιακή λίμνη και ηλεκτρική ενέργεια από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ή το δίκτυο. Η αφαλάτωση με μεμβράνη απόσταξης είναι μια διαδικασία διαχωρισμού κατά την οποία χρησιμοποιείται μία υδρόφοβη, μικρο-πορώδης μεμβράνη η οποία αποτρέπει την δίοδο του θαλασσινού νερού και επιτρέπει μόνο τη μεταφορά ατμού. Η μεμβράνη απόσταξης λειτουργεί με θερμική ενέργεια. Η κινητήρια δύναμη είναι η διαφορά της μερικής πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης.



Εικόνα 43: Απόσταξη με μεμβράνη ηλιακά υποβοηθούμενη

Γενικά, η ηλιακά υποβοηθούμενη απόσταξη με μεμβράνη είναι ακόμη στη φάση της ανάπτυξης. Εκθέσεις σχετικά με νέες μεθόδους, διάφορες αξιολογήσεις και μοντελοποιήσεις πειραμάτων συνεχίζουν να εμφανίζονται στη βιβλιογραφία. Η αφαλάτωση με μεβράνη σε σύγκριση με τα συστήματα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση ή εξάτμιση έχει το μειονέκτημα της πρόσθετης αντίστασης της μεμβράνης στη μεταφορά της μάζας. Ωστόσο, λόγω του χαμηλότερου κόστους των υλικών που χρησιμοποιεί, το μειονέκτημα αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί με τη χρήση μεγαλύτερου χώρου για τη μεταφορά θερμότητας και μάζας. Επιπλέον, χρησιμοποιεί μεμβράνες που είναι μεγάλης αντοχής και φθηνές, πράγμα που σημαίνει ότι θα μπορούσε να μειώσει τη χρήση χημικών και το κόστος επεξεργασίας του θαλασσινού νερού που απαιτείται στην αντίστροφη όσμωση.

6. Εφαρμογή ηλιακού αποστακτήρα στην περιοχή της Αθήνας

6.1. Εφαρμογή ηλιακού αποστακτήρα μικρής λεκάνης στην περιοχή της Αθήνας

Στο παρών κεφάλαιο υπολογίζεται η παραγωγή αποσταγμένου νερού καθώς και ο βαθμός απόδοσης του απλού, μονά κεκλιμένου αποστακτήρα για την περιοχή της Αθήνας κάθε 21^η ημέρα του μήνα.

Αρχικά υπολογίζεται η ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου καθώς και η μέση ημερήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος.

6.1.1 Υπολογισμός της μέσης άμεσης ακτινοβολίας (Gb) και μέσης διάχυτης ακτινοβολίας (Gd) οριζοντίου επιπέδου

Η μέση άμεση ακτινοβολία και η μέση διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου υπολογίζονται από τους τύπους: [28]

$$G_b = M_t + A_t \sin\left(\frac{360}{365}D - P_t\right)$$
(6.1)

$$G_{d} = m_{t} + a_{t} \sin\left(\frac{360}{365}D - p_{t}\right)$$
(6.2)

Όπου:

- D η ημέρα του έτους (1-365)
- M_t, A_t, P_t, m_t, a_t, p_t συντελεστές που δίνονται (Πίνακας 25) για κάθε ώρα από τις 07:00 μέχρι τις 18:00 για την περιοχή της Αθήνας

Time	M_{t}	A_{t}	P_t	m_t	a_t	p_t
(n)	(kW/m²)	(kW/m²)	(dg)	(kW/m²)	(kW/m²)	(dg)
07.00	0,007	0,046	86,18	0,048	0,111	81,23
08.00	0,057	0,068	87,31	0,134	0,127	82,45
09.00	0,119	0,104	87,94	0,208	0,133	83,94
10.00	0,191	0,129	88,31	0,261	0,129	85,6
11.00	0,258	0,153	89,35	0,283	0,117	86,05
12.00	0,319	-0,181	-88,88	0,271	0,095	82,71
13.00	0,342	-0,194	-89,18	0,243	0,081	81,95
14.00	0,325	0,183	87,21	0,21	0,083	87,23
15.00	0,269	0,166	86,22	0,176	0,087	89,53
16.00	0,183	0,147	82,1	0,141	-0,085	-88,19
17.00	0,078	0,131	79,85	0,104	-0,079	-88,97
18.00	-0,025	0,114	77,36	0,051	0,091	86,79

Πίνακας 25: Συντελεστές των εξισώσεων ηλιακής ακτινοβολίας [29]

Προκύπτουν οι παρακάτω τιμές της μέσης άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και μέσης διάχυτης ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου για κάθε 21^η μέρα κάθε μήνα.

G _b (kW/m ²)												
Time	21/1	21/2	21/3	21/4	21/5	21/6	21/7	21/8	21/9	21/10	21/11	21/12
(h)	(D:21)	(D:52)	(D:80)	(D:111)	(D:141)	(D:172)	(D:202)	(D:233)	(D:264)	(D:294)	(D:325)	(D:355)
7	0	0	0,001174	0,025195	0,043683	0,052701	0,049327	0,034279	0,011646	0	0	0
8	0	0,017009	0,047059	0,08266	0,110408	0,124392	0,120083	0,098397	0,0652	0,030799	0,002523	0
9	0,023107	0,056916	0,102666	0,157183	0,19997	0,221912	0,215901	0,183217	0,132676	0,079986	0,036372	0,015963
10	0,071736	0,113326	0,169918	0,237585	0,290909	0,318527	0,311494	0,271308	0,208789	0,143381	0,089018	0,06331
11	0,115512	0,163673	0,23026	0,310654	0,37472	0,40881	0,40188	0,355406	0,281846	0,204112	0,138765	0,106974
12	0,148479	0,203062	0,280701	0,376011	0,4534	0,496381	0,491031	0,438488	0,352719	0,260513	0,181514	0,141315
13	0,159575	0,218516	0,301944	0,404069	0,486732	0,532321	0,526068	0,469306	0,377142	0,278351	0,193981	0,151362
14	0,157181	0,217636	0,298564	0,39435	0,468927	0,506407	0,494647	0,436154	0,346752	0,254195	0,178203	0,143393
15	0,117937	0,173947	0,247862	0,334553	0,401309	0,433908	0,421789	0,367535	0,28588	0,202137	0,134147	0,103935
16	0,053952	0,107703	0,174805	0,250603	0,306241	0,329865	0,313823	0,261532	0,187403	0,114276	0,057732	0,036086
17	0	0,015367	0,075837	0,142765	0,190545	0,208999	0,192148	0,143583	0,07678	0,012257	0	0
18	0	0	0	0,035612	0,075382	0,088909	0,071811	0,027731	0	0	0	0

Πίνακας 26: Μέση άμεση ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου (Gb)(kW/m2) συναρτήσει των ωρών της 21ης ημέρας κάθε μήνα

Πίνακας 27: Μέση διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου (Gd)(kW/m2) συναρτήσει των ωρών της 21ης ημέρας κάθε μήνα

	G _d (kW/m ²)												
Time	21/1	21/2	21/3	21/4	21/5	21/6	21/7	21/8	21/9	21/10	21/11	21/12	
(h)	(D:21)	(D:52)	(D:80)	(D:111)	(D:141)	(D:172)	(D:202)	(D:233)	(D:264)	(D:294)	(D:325)	(D:355)	
7	0	0	0,043495	0,100538	0,141967	0,158957	0,146005	0,105868	0,04964	0	0	0	
8	0,02214	0,068282	0,126145	0,191715	0,240048	0,260848	0,247376	0,202502	0,138579	0,075313	0,026183	0,007103	
9	0,089257	0,136241	0,196325	0,265341	0,317118	0,340626	0,32825	0,282626	0,21625	0,149629	0,096955	0,075293	
10	0,144193	0,188282	0,245959	0,313221	0,364655	0,389304	0,379181	0,336445	0,272728	0,207766	0,155397	0,132586	
11	0,176672	0,21629	0,268446	0,329521	0,376463	0,399269	0,390553	0,35217	0,294552	0,235556	0,187751	0,166623	
12	0,187122	0,221472	0,264694	0,313788	0,350089	0,365864	0,356002	0,322604	0,274856	0,227483	0,190578	0,176096	
13	0,171994	0,201692	0,238696	0,280439	0,311023	0,323934	0,314989	0,286093	0,245214	0,204945	0,173864	0,162041	
14	0,133874	0,161281	0,197981	0,241427	0,275261	0,292274	0,286955	0,260437	0,219894	0,177913	0,143437	0,127635	
15	0,094878	0,122148	0,159958	0,205684	0,242193	0,261708	0,257906	0,231598	0,189829	0,145614	0,108371	0,090166	
16	0,060584	0,085772	0,122015	0,1668	0,203426	0,224091	0,2221	0,197878	0,157839	0,114504	0,077105	0,057758	
17	0,029616	0,053492	0,087405	0,129001	0,162744	0,181445	0,179047	0,156059	0,118595	0,078355	0,043912	0,026423	
18	0	0	0,038515	0,086102	0,12298	0,141293	0,135108	0,105742	0,061154	0,015177	0	0	

Ακολουθούν τα διαγράμματα της άμεσης $G_b(KW/m^2)$ και διάχυτης $G_d(KW/m^2)$ ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου συναρτήσει των ωρών της 21^{n_s} ημέρας κάθε μήνα. (Διαγράμματα 1-24)



Διάγραμμα 1



Διάγραμμα 2



Διάγραμμα 3



Διάγραμμα 4



Διάγραμμα 5



Διάγραμμα 6



Διάγραμμα 7



Διάγραμμα 8



Διάγραμμα 9



Διάγραμμα 10



Διάγραμμα 11



Διάγραμμα 12



Διάγραμμα 13



Διάγραμμα 14



Διάγραμμα 15



Διάγραμμα 16



Διάγραμμα 17



Διάγραμμα 18



Διάγραμμα 19



Διάγραμμα 20



Διάγραμμα 21



Διάγραμμα 22



Διάγραμμα 23



Διάγραμμα 24

6.1.2 Υπολογισμός της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου (GT)

Η ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου υπολογίζεται από τη σχέση: [28]

$$G_T = G_b R_b + G_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + \left(G_b + G_d\right) \rho \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right)$$
(6.3)

Όπου:

- G_b, G_d οι μέσες στιγμιαίες άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου που υπολογίστηκαν παραπάνω
- ρ η ανακλαστικότητα του εδάφους, όπου για συνηθισμένο έδαφος λαμβάνεται ίση με 0,2
- β κλίση του αποστακτήρα, λαμβάνεται ίση με το γεωγραφικό πλάτος φ της Αθήνας
 για βέλτιστη λειτουργία όλο το χρόνο
- R_b είναι ο λόγος της αμέσου ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεσο οριζοντίου επιπέδου. Για προσανατολισμό του συλλέκτη προς το νότο υπολογίζεται από τον τύπο:

$$R_{b} = \frac{\sin\delta\sin(\varphi - \beta) + \cos\delta\cos(\varphi - \beta)\cos\omega}{\sin\delta\sin\varphi + \cos\delta\cos\varphi\cos\omega}$$
(6.4)

Όπου:

δ η ηλιακή απόκλιση και υπολογίζεται από τον τύπο:

•
$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360(284+n)}{365}\right)$$
 (6.5)

όπου η η ημέρα του έτους.

ω η ωριαία γωνία και υπολογίζεται από τον τύπο:
 ω=0,25*(min από ηλιακό μεσημέρι)
 (6.6)
 όπου ηλιακό μεσημέρι θεωρείται 12 το μεσημέρι.

Προκύπτουν οι παρακάτω τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου για κάθε 21^η μέρα κάθε μήνα.

G _t (kW/m ²)												
Time (h)	21/1 (D:21)	21/2 (D:52)	21/3 (D:80)	21/4 (D:111)	21/5 (D:141)	21/6 (D:172)	21/7 (D:202)	21/8 (D:233)	21/9 (D:264)	21/10 (D:294)	21/11 (D:325)	21/12 (D:355)
7	0	0	0,041359	0,112313	0,157187	0,17558	0,164147	0,124349	0,060615	0	0	0
8	0,020265	0,094122	0,17682	0,256679	0,311131	0,335483	0,325273	0,281657	0,21139	0,12745	0,031673	0,006502
9	0,131429	0,218362	0,313129	0,408815	0,475078	0,506843	0,499072	0,45158	0,369706	0,270363	0,167899	0,108104
10	0,269413	0,349807	0,445649	0,546134	0,617299	0,65358	0,649451	0,603512	0,519749	0,417064	0,314154	0,25455
11	0,372378	0,448715	0,544348	0,646292	0,719209	0,758112	0,757787	0,715823	0,634121	0,531174	0,426667	0,363695
12	0,438281	0,511817	0,606263	0,706394	0,77721	0,815804	0,818768	0,783087	0,707708	0,608265	0,502988	0,435179
13	0,448455	0,519371	0,610086	0,705008	0,771292	0,807784	0,812323	0,781439	0,712206	0,617931	0,515349	0,447131
14	0,42366	0,488441	0,568687	0,651599	0,708969	0,740088	0,742824	0,713518	0,649871	0,565093	0,475444	0,418493
15	0,340662	0,398037	0,468537	0,541461	0,592571	0,620947	0,624088	0,598914	0,543863	0,470416	0,391126	0,337669
16	0,216639	0,278735	0,33959	0,398842	0,439741	0,461603	0,461607	0,437081	0,387477	0,321914	0,246903	0,19538
17	0,027108	0,09784	0,179898	0,23304	0,267782	0,285375	0,282715	0,257801	0,20862	0,113713	0,040194	0,024186
18	0	0	0,035254	0,079566	0,114164	0,131212	0,125189	0,097376	0,055976	0,013892	0	0

Πίνακας 28: Ολική ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου (GT) (kW/m2) συναρτήσει των ωρών της 21ης ημέρας κάθε μήνα

Ακολουθούν τα διαγράμματα της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου $G_t(kW/m^2)$ συναρτήσει των ωρών της 21^{n_c} ημέρας κάθε μήνα. (Διαγράμματα 25-36)



Διάγραμμα 25



Διάγραμμα 26



Διάγραμμα 27



Διάγραμμα 28



Διάγραμμα 29



Διάγραμμα 30



Διάγραμμα 31



Διάγραμμα 32



Διάγραμμα 33



Διάγραμμα 34



Διάγραμμα 35



Διάγραμμα 36

6.1.3 Υπολογισμός της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (Τα)

Η θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος υπολογίζεται από την σχέση: [30]

$$To(H) = M + \sum_{i=1}^{3} C_i \cos\left[i\frac{360}{24}(H-0,5)\right] + \sum_{i=1}^{3} S_i \sin\left[i\frac{360}{24}(H-0,5)\right]$$
(6.7)

Όπου:

- **i.** Η η ώρα της ημέρας (1-24)
- ii. Μ, C_i, S_i συντελεστές που δίνονται στο παρακάτω πίνακα για κάθε 21^η ημέρα κάθε μήνα

Ημέρα	М	C ₁	C ₂	C ₃	S ₁	S ₂	S ₃
21 Ιαν	9,384	-1,673	0,711	0,0085	-1,723	0,524	-0,241
21							
Φεβ	10,984	-2,15	0,785	-0,107	-1,75	0,578	-0,0724
21							
Μαρ	11,955	-1,898	0,651	-0,0097	-1,084	0,255	-0,0093
21							
Απρ	15,072	-2,668	0,727	0,269	-1,763	0,243	0,212
21							
Μια	20,724	-2,796	0,759	0,0926	-1,344	0,119	0,308
21							
Ιουν	26,192	-3,393	0,115	0,156	-2,196	-0,139	0,157
21							
Ιουλ	28,08	-3,359	0,811	0,272	-2,077	0,134	0,14
21							
Αυγ	27,88	-3,113	0,884	0,067	-1,978	0,486	0,361
21 Σεπ	23,236	-3,31	1,035	-0,0495	-1,696	0,477	0,221
21							
Οκτ	18,144	-2,63	1,085	-0,144	-1,427	0,604	0,138
21							
Νοε	11,968	-1,3	0,616	-0,252	-0,317	0,629	-0,049
21							
Δεκ	9,264	-1,11	0,521	-0,152	-0,881	0,333	0,008

Πίνακας 29: Συντελεστές της εξίσωσης θερμοκρασίας περιβάλλοντος [30]

Προκύπτουν οι παρακάτω τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Πίνακας 30: Θερμοκρασία περιβάλλοντος (Τα)(οC) συναρτήσει των ωρών της 21ης ημέρας κάθε μήνα.

	21 Ιαν	21 Φεβ	21Μαρ	21 Απρ	21 Μια	21 Iouv	21 Ιουλ	21 Αυγ	21 Σεπ	21 Οκτ	21 Noɛ	21 Δεκ
1	8,238437	9,405261	10,61404	13,29148	18,74385	22,8207	25,60155	25,71516	20,89498	16,47437	11,14398	8,500569
2	7,832861	9,183914	10,41498	12,91712	18,56734	22,40468	25,0835	25,57491	20,78331	16,4348	11,38429	8,454442
3	7,472082	8,948494	10,19924	12,39789	18,24812	22,14416	24,51532	25,21228	20,52929	16,23562	11,56183	8,369116
4	7,220639	8,713076	10,0228	11,92831	17,90645	22,1362	24,10919	24,73257	20,19865	15,89929	11,58732	8,21963
5	7,104071	8,524632	9,959688	11,75031	17,75636	22,4809	24,09209	24,3798	19,96901	15,55928	11,4384	8.029716
6	7,12562	8,467522	10,08202	12,0377	18,00422	23,22011	24,60021	24,42534	20,06096	15,42183	11,19352	7,879369
7	7,297624	8,647695	10,43808	12,81428	18,74339	24,29721	25,61591	25,0377	20,64024	15,68553	11,01442	7,880428
8	7,659188	9,155045	11,03381	13,9457	19,89913	25,56262	26,97604	26,19887	21,73633	16,45193	11,0782	8,12748
9	8,260971	10,01643	11,82311	15,20426	21,25186	26,82403	28,44257	27,70763	23,21569	17,66846	11,48933	8,646915
10	9,120857	11,16141	12,71076	16,36767	22,52553	27,91578	29,79438	29,2641	24,82191	19,13161	12,21654	9,370718
11	10,17661	12,42107	13,56883	17,2974	23,49451	28,75131	30,89244	30,5884	26,2627	20,55043	13,08971	10,15086
12	11,26886	13,56699	14,26349	17,959	24,05531	29,33235	31,69012	31,51253	27,30289	21,64279	13,86178	10,81006
13	12,17435	14,37844	14,68559	18,38276	24,23203	29,71351	32,19454	32,00416	27,8234	22,22235	14,30763	11,2063
14	12,68169	14,71166	14,7763	18,59867	24,12234	29,94538	32,41293	32,12256	27,82698	22,24181	14,31241	11,2813
15	12,67625	14,54246	14,54036	18,59187	23,82266	30,03084	32,32335	31,94419	27,39996	21,78086	13,90817	11,07188
16	12,19161	13,96519	14,04284	18,30881	23,37855	29,91975	31,88988	31,50872	26,65909	20,99391	13,24495	10,68199
17	11,39947	13,15063	13,39028	17,70921	22,78655	29,54389	31,11049	30,81735	25,71386	20,04849	12,51598	10,23241
18	10,54008	12,28317	12,70234	16,82763	22,03911	28,86978	30,06242	29,87847	24,65849	19,08276	11,87805	9,81451
19	9,825587	11,50461	12,08229	15,79947	21,17673	27,93658	28,908	28,76297	23,58538	18,19375	11,40596	9,468704
20	9,362258	10,88538	11,59492	14,82651	20,30719	26,85532	27,84753	27,62365	22,59738	17,44746	11,0971	9,192781
21	9,126698	10,42861	11,25728	14,09397	19,57336	25,76897	27,03876	26,65589	21,79906	16,89106	10,91267	8,968089
22	9.002893	10.09633	11.0436	13.68322	19.08547	24,79627	26.52656	26.01462	21,26436	16.55119	10.82319	8,783665
23	8,85585	9,839668	10,9012	13,53108	18,85859	23,9919	26,22498	25,73446	20,99844	16,4178	10,82791	8,643015
24	8,601441	9,61832	10,77214	13,46367	18,79737	23,34576	25,96724	25,70366	20,92166	16,42861	10,93865	8,552059

6.1.4 Υπολογισμός των θερμοκρασιών νερού της λεκάνης (Tw) και εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος (Tg)

Η απόδοση του ηλιακού αποστακτήρα εξαρτάται από τις τιμές των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας από εξάτμιση και συναγωγή. Για τον προσδιορισμό των συντελεστών αυτών χρειάζονται πειραματικές τιμές των θερμοκρασιών του νερού της λεκάνης και της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος. Στη συγκεκριμένη εργασία, λόγω έλλειψης πειραματικών δεδομένων οι θερμοκρασίες αυτές προσδιορίστηκαν προσεγγιστικά βάσει εξισώσεων που χρησιμοποιούνται για τη θεωρητική μελέτη της παραγωγής αποσταγμένου νερού. Οι συντελεστές θερμότητας, όπως και κάποια κατασκευαστικά δεδομένα του αποστακτήρα πάρθηκαν από τα αποτελέσματα του πειράματος που έγινε στην περιοχή Bijar της Ινδίας, από τους Yadav & Prasad το 1988 [31]. Το πείραμα αυτό αφορούσε στον ηλιακό αποστακτήρα με κάλυμμα μονής κλίσης (**Εικόνα 44**)



Εικόνα 44: Προτεινόμενος αποστακτήρας μονής κλίσης [32]

A _b	Εμβαδόν λεκάνης (m²). Λαμβάνεται ίσο με 1m²
h1	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από ακτινοβολία, συναγωγή και εξάτμιση, από το νερό στο κάλυμμα (W/m ^{2o} c). Υπολογίστηκε 22,52 (W/m ^{2 o} c)
h ₂	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από ακτινοβολία και συναγωγή, από το κάλυμμα στο περιβάλλον (W/m ^{2o} c). Υπολογίστηκε 50,00 (W/m ^{2 o} c).
h ₃	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από συναγωγή, από τη λεκάνη στο περιβάλλον (W/m²°c). Υπολογίστηκε 135,05 (W/m²°c).
h ₄	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από συναγωγή και ακτινοβολία, από την κάτω επιφάνεια του αποστακτήρα στο περιβάλλον (W/m ^{2°} c). Υπολογίστηκε 6,27 W/m ^{2°} c).
H _s	Ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου (W/m²). Έχει υπολογιστεί στο προηγούμενο υποκεφάλαιο για την περιοχή της Αθήνας.
m _w	Μάζα νερού στη λεκάνη (kg). Λαμβάνεται ίσο με 20 kg. Θεωρούμε ότι το νερό αυτό τροφοδοτείται στη λεκάνη μια φορά τη μέρα.
a _p	Απορροφητικότητα της λεκάνης. Λαμβάνεται ίση με 0,5.
Τ _α	Θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C). Έχει υπολογιστεί σε προηγούμενο υποκεφάλαιο για την περιοχή την περιοχή της Αθήνας.
T _g	Θερμοκρασία του νερού στη λεκάνη (°C). Αποτελεί ζητούμενο.
T _w	Θερμοκρασία του γυάλινου καλύμματος (°C). Αποτελεί ζητούμενο.
K _i	Θερμική αγωγιμότητα της μόνωσης (W/m² °C). Λαμβάνεται ίση με 0,04 (W/m² °C)
Li	Πάχος μόνωσης (m). Λαμβάνεται ίσο με 0,005 m
h _b	Ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, από την κάτω επιφάνεια του αποστακτήρα στο περιβάλλον (W/m ²⁰ c). Αποτελεί ζητούμενο.

Πίνακας 31: Χαρακτηριστικά του αποστακτήρα μικρής λεκάνης

Για την εφαρμογή των εξισώσεων πρέπει επίσης να αναφερθούν κάποιες παραδοχές που επιτρέπουν την ορθότητά τους. Αυτές είναι:

- Η κλίση του καλύμματος είναι τόσο μικρή που η επιφάνεια της λεκάνης και η επιφάνειας του καλύμματος θεωρούνται παράλληλες.
- Δεν υπάρχει διαρροή αέρα και ατμού προς το περιβάλλον.
- Ο αποστακτήρας είναι μονωμένος από τις πλαϊνές πλευρές και από κάτω.
- Οι θερμοχωρητικότητες του γυαλιού και της λεκάνης θεωρούνται αμελητέες σε σχέση με τη θερμοχωρητικότητα του νερού μέσα στη λεκάνη.
- Το εμβαδόν του γυάλινου καλύμματος, της μάζας νερού και της λεκάνης είναι ίδιο.

Έτσι υπολογίζεται αρχικά, ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από την κάτω επιφάνεια του αποστακτήρα προς το περιβάλλον με βάση τη σχέση:

$$h_b = \left(\frac{L_i}{K_i} + \frac{1}{h_4}\right)^{-1}$$
(6.8)

Κατόπιν, υπολογίζεται η θερμοκρασία του νερού της λεκάνης σύμφωνα με τη σχέση:

$$T_{w} = T_{wo} \exp(-at) + \frac{\overline{f(t)}}{a} [1 - \exp(-at)]$$
(6.9)

Όπου:

- Τ_{wo} η θερμοκρασία του νερού για t=0 η οποία λαμβάνεται ίση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.
- f(t) συνάρτηση που δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$f(t) = MH_s + NT_a \tag{6.10}$$

Οι συντελεστές Μ και Ν της συνάρτησης υπολογίζονται ως εξής:

$$M = \frac{h_3 a_p}{m_w \left(h_3 + h_b\right)} \tag{6.11}$$

•
$$N = \frac{1}{m_w} \left(\frac{h_3 h_b}{h_3 + h_b} + \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2} \right)$$
 (6.12)

- f(t) ο μέσος όρος των τιμών της συνάρτησης f(t) για τη διάρκεια λειτουργίας του αποστακτήρα.
- α που υπολογίζεται ως:

$$a = \frac{1}{m_w} \left(\frac{h_1(h_1 + h_2) - h_1^2}{h_1 + h_2} + \frac{h_3(h_3 + h_b) - h_3^2}{h_3 + h_b} \right)$$
(6.13)

Ύστερα από υπολογισμούς προκύπτουν οι παρακάτω θερμοκρασίες του νερού της λεκάνης για κάθε 21^η μέρα κάθε μήνα.

T _w (°C)	21-Ιαν	21-Φεβ	21-Μαρ	21-Απρ	21-Μαϊ	21-louv	21-Ιουλ	21-Αυγ	21-Σεπ	21-Окт	21-Noɛ	21-Δεκ
01.00	8,238436829	9,405261	10,61404	13,29148	18,74385	22,8207	25,60155	25,71516	20,89498	16,47437	11,14398	8,500569
02.00	7,832860705	9,183914	10,41498	12,91712	18,56734	22,40468	25,0835	25,57491	20,78331	16,4348	11,38429	8,454442
03.00	7,472081617	8,948494	10,19924	12,39789	18,24812	22,14416	24,51532	25,21228	20,52929	16,23562	11,56183	8,369116
04.00	7,220639433	8,713076	10,0228	11,92831	17,90645	22,1362	24,10919	24,73257	20,19865	15,89929	11,58732	8,21963
05.00	7,104070946	8,524632	9,959688	11,75031	17,75636	22,4809	24,09209	24,3798	19,96901	15,55928	11,4384	8,029716
06.00	7,12562026	8,467522	10,08202	12,0377	18,00422	23,22011	24,60021	24,42534	20,06096	15,42183	11,19352	7,879369
07.00	7,297624158	8,647695	11,58199	15,92063	23,09084	29,15336	30,15587	28,47693	22,31671	15,68553	11,01442	7,880428
08.00	8,219682781	11,75825	15,92426	21,04489	28,50436	34,84137	35,97239	33,98889	27,58294	19,97693	11,95421	8,307313
09.00	11,89601653	16,05587	20,48359	26,51122	34,39149	40,84221	42,24584	40,19737	33,44097	25,14613	16,13306	11,63683
10.00	16,57224183	20,83633	25,03645	31,47256	39,5987	45,99242	47,7568	45,95594	39,19706	30,6667	20,90537	16,41102
11.00	20,47577856	24,83158	28,62433	35,17245	43,38629	49,71907	51,85122	50,38652	43,80113	35,24157	24,8904	20,20989
12.00	23,39079122	27,72277	31,03143	37,49635	45,55127	51,89575	54,33551	53,17104	46,87658	38,4661	27,77335	22,84617
13.00	24,57766643	28,74313	31,55926	37,88179	45,5643	52,05508	54,66165	53,61709	47,52149	39,31299	28,56108	23,57298
14.00	24,39921344	28,22089	30,50496	36,62049	43,73091	50,41462	52,95785	51,85695	45,80104	37,87107	27,46218	22,85591
15.00	22,09824204	25,55131	27,4991	33,56753	40,21192	47,2049	49,58431	48,50888	42,44205	34,79155	24,72588	20,41108
16.00	18,18337066	21,67441	23,43517	29,33992	35,54085	42,68671	44,65695	43,59745	37,37589	29,89736	20,07376	16,08579
17.00	12,14922477	15,85666	18,36588	24,15459	30,19283	37,43675	38,92977	37,94756	31,48385	23,19356	13,62766	10,90135
18.00	10,54007557	12,28317	13,67739	19,02825	25,19663	32,49883	33,52487	32,57169	26,20667	19,46698	11,87805	9,81451
19.00	9,825586958	11,50461	12,08229	15,79947	21,17673	27,93658	28,908	28,76297	23,58538	18,19375	11,40596	9,468704
20.00	9,362258494	10,88538	11,59492	14,82651	20,30719	26,85532	27,84753	27,62365	22,59738	17,44746	11,0971	9,192781
21.00	9,126698192	10,42861	11,25728	14,09397	19,57336	25,76897	27,03876	26,65589	21,79906	16,89106	10,91267	8,968089
22.00	9,00289317	10,09633	11,0436	13,68322	19,08547	24,79627	26,52656	26,01462	21,26436	16,55119	10,82319	8,783665
23.00	8,855849841	9,839668	10,9012	13,53108	18,85859	23,9919	26,22498	25,73446	20,99844	16,4178	10,82791	8,643015
24.00	8,601441142	9,61832	10,77214	13,46367	18,79737	23,34576	25,96724	25,70366	20,92166	16,42861	10,93865	8,552059

Πίνακας 32: Θερμοκρασία του νερού της λεκάνης TW(oC) συναρτήσει των ωρών της 21ης ημέρας κάθε μήνα.

Η θερμοκρασία του εσωτερικού καλύμματος του αποστακτήρα υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$T_g = \left(\frac{h_1}{h_1 + h_2}\right) T_w + \left(\frac{h_2}{h_1 + h_2}\right) T_a$$
(6.14)

Προκύπτον οι παρακάτω τιμές θερμοκρασίας του καλύμματος.

Πίνακας 33: Θερμοκρασία	ι της εσωτερική	ς επιφά	νειας του	καλύμμα	τος Tg(oC)	συναρτή	ισει των
	ωρών της 2	21ης ημέ	ρας κάθε	μήνα.			

T _g (°C)	21-lαv	21-Φεβ	21-Μαρ	21-Απρ	21-Μαϊ	21-louv	21-Ιουλ	21-Αυγ	21-Σεπ	21-Окт	21-Noɛ	21-Δεκ
01.00	8,238436829	9,405261	10,61404	13,29148	18,74385	22,8207	25,60155	25,71516	20,89498	16,47437	11,14398	8,500569
02.00	7,832860705	9,183914	10,41498	12,91712	18,56734	22,40468	25,0835	25,57491	20,78331	16,4348	11,38429	8,454442
03.00	7,472081617	8,948494	10,19924	12,39789	18,24812	22,14416	24,51532	25,21228	20,52929	16,23562	11,56183	8,369116
04.00	7,220639433	8,713076	10,0228	11,92831	17,90645	22,1362	24,10919	24,73257	20,19865	15,89929	11,58732	8,21963
05.00	7,104070946	8,524632	9,959688	11,75031	17,75636	22,4809	24,09209	24,3798	19,96901	15,55928	11,4384	8,029716
06.00	7,12562026	8,467522	10,08202	12,0377	18,00422	23,22011	24,60021	24,42534	20,06096	15,42183	11,19352	7,879369
07.00	7,297624158	8,647695	10,93152	14,15426	20,61874	26,39199	27,5743	26,52127	21,36342	15,68553	11,01442	7,880428
08.00	7.900966987	10.27798	13.14339	17.00806	23.61115	29.56517	30.85677	29.55923	24.25837	17.9725	11.45608	8.205054
09.00	9,829010732	12,62164	15,55896	20,08172	26,91987	32,87102	34,39685	33,0953	27,62654	20,89408	13,49248	9,936666
10.00	12,33514097	15,33485	18,02766	22,88343	29,89034	35,71345	37,54278	36,46441	31,02288	24,10747	15,96462	12,40768
11.00	14,61933356	17,77456	20,06328	25,00811	32,07517	37,79611	39,93338	39,12866	33,8282	26,88771	18,18014	14,49
12.00	16,49786658	19,67333	21,49663	26,38677	33,32796	39,06546	41,4586	40,8553	35,74634	28,89982	19,86278	16,00205
13.00	17.52473641	20.5749	21.96434	26.794	33.43407	39.35093	41.88612	41.32727	36.32051	29.59469	20.4561	16.54088
14.00	17.7362483	20.5391	21.56113	26.3727	32.58084	38.77514	41.27534	40.63533	35.5804	28.98376	19.98479	16.27421
15.00	16.74058898	19.29132	20.13034	25.05188	30.89245	37.43917	39.76916	39.08966	33.88863	27.39325	18.57458	15.1005
16.00	14,77625976	17,2907	18,09439	23,06727	28,62497	35,427	37,39717	36,7234	31,28197	24,83457	16,19068	13,01301
17.00	11,72289033	14,31792	15,53659	20,48954	25,98138	32,94861	34,48347	33,89309	28,20284	21,40517	12,99552	10,52097
18.00	10.54007557	12.28317	13.12294	17.77691	23.40116	30.43523	31.556	31.04024	25.32632	19.2485	11.87805	9.81451
19.00	9.825586958	11.50461	12.08229	15.79947	21.17673	27.93658	28.908	28.76297	23.58538	18.19375	11.40596	9.468704
20.00	9.362258494	10.88538	11.59492	14.82651	20.30719	26.85532	27.84753	27.62365	22.59738	17.44746	11.0971	9.192781
21.00	9,126698192	10,42861	11,25728	14,09397	19,57336	25,76897	27,03876	26,65589	21,79906	16,89106	10,91267	8,968089
22.00	9.00289317	10.09633	11.0436	13.68322	19.08547	24.79627	26.52656	26.01462	21.26436	16.55119	10.82319	8.783665
23.00	8.855849841	9.839668	10.9012	13.53108	18.85859	23.9919	26.22498	25.73446	20.99844	16.4178	10.82791	8.643015
24.00	8,601441142	9,61832	10,77214	13,46367	18,79737	23,34576	25,96724	25,70366	20,92166	16,42861	10,93865	8,552059

6.1.5 Υπολογισμός της παραγωγής αποσταγμένου νερού [32]

Πολλοί ερευνητές έχουν αναπτύξει διάφορα μοντέλα που προσδιορίζουν την παραγωγή αποσταγμένου νερού από τους ηλιακούς αποστακτήρες. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το μοντέλο του Dunkle που είναι το παλαιότερο και πιο διαδεδομένο ακόμα και σήμερα. Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε κάποιες παραδοχές. Αυτές είναι:

- Δεν εξαρτάται από διαστάσεις κοιλότητας.
- Είναι κατάλληλο για ένα εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας μεταξύ 55-70°c. Ο Dunkle προτείνει την εξής ημι-εμπειρική σχέση για τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από εξάτμιση:

$$h_{ev} = 0,016273h_c \frac{P_w - P_g}{T_w - T_g}$$
(6.15)

Στη περίπτωση που μελετάμε επειδή οι θερμοκρασίες δεν κυμαίνονται στο εύρος αυτό χρησιμοποιήθηκε το βελτιωμένο μοντέλο του Malik που προτείνει για θερμοκρασίες κάτω των 50°C την εξής τροποποιημένη σχέση:

$$h_{ev} = 0,013h_c \frac{P_w - P_g}{T_w - T_g}$$
(6.16)

- Η κλίση του αποστακτήρα να είναι μικρή (έως 10°) έτσι ώστε οι επιφάνειες συμπύκνωσης και εξάτμισης να θεωρούνται σχεδόν παράλληλες.
- Η κύρια διαφορά θερμοκρασιών μεταξύ του νερού και του καλύμματος να είναι 11°C.

Επομένως, σύμφωνα με το μοντέλο του Dunkle η ωριαία παροχή καθαρού νερού υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$\dot{m}_{hourly}(kg/m^2) = \frac{\dot{Q}_{ev}}{h_{fg}} 3600$$
 (6.17)

Όπου:

• h_{f_g} η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης (J/kgK). Για το νερό δίνεται 2260 (KJ/KgK)

•
$$Q_{ev}$$
 η πυκνότητα μεταφοράς θερμότητας από εξάτμιση (W/m²) :
 $\dot{Q}_{ev} = h_{ev} \left(T_w - T_g \right)$ (6.18)

Όπου:

• h_{ev} O συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από εξάτμιση (W/m²K):

$$h_{ev} = 0,013h_c \frac{P_w - P_g}{T_w - T_g}$$
(6.19)
• h_c ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από συναγωγή μεταξύ νερού και καλύμματος (W/m²K):

$$h_c = 0.88 \left(\Delta T' \right)^{1/3}$$
(6.20)

•
$$\Delta T' = \left(\left(T_w - T_g \right) - \frac{\left(P_w - P_g \right) \left(T_w + 273 \right)}{268,9x10^3 - P_w} \right)$$
 (6.21)

• P_w η μερική πίεση κορεσμού για τις θερμοκρασίες του νερού (Pa):

$$P_{w} = \exp\left(25,317 - \frac{5144}{T_{w} + 273}\right)$$
(6.22)

• P_{g} η μερική πίεση κορεσμού για τις θερμοκρασίες του καλύμματος (Pa):

$$P_{g} = \exp\left(25,317 - \frac{5144}{T_{g} + 273}\right)$$
(6.23)

Προκύπτουν οι παρακάτω τιμές της παροχής αποσταγμένου νερού.

ṁ(gr/m²h)	21-Ιαν	21-Φεβ	21-Μαρ	21-Απρ	21-Μαϊ	21-louv	21-Ιουλ	21-Αυγ	21-Σεπ	21-Οκτ	21-Νοε	21-Δεκ
06.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
07.00	0	0	0,929196	4,380281	10,0552	16,08328	15,58686	10,0002	2,818096	0	0	0
08.00	0,29733	2,743625	7,799244	16,54581	31,50154	48,3857	49,48178	37,42962	18,64943	6,477162	0,668229	0,066071
09.00	4,244548	10,22387	20,40503	39,08551	71,10111	107,4069	113,4901	90,96276	50,44916	22,12453	7,395465	3,256056
10.00	13,62879	23,75475	39,83094	71,23519	125,5234	186,0423	202,2139	170,1236	101,4456	50,12396	20,97595	12,60061
11.00	25,06219	39,69467	60,83463	104,5083	180,3358	263,911	293,9308	256,8397	160,8097	84,43963	37,5747	24,0128
12.00	35,66853	54,04763	78,08326	130,0468	218,8716	318,286	361,384	325,2745	212,1508	116,3921	53,1426	34,32068
13.00	39,11527	58,08966	80,89284	132,4403	217,2712	317,5839	364,357	331,9397	220,7624	123,8003	57,01575	36,87005
14.00	36,27014	52,67338	70,7282	113,8522	180,7919	266,5227	304,3257	275,7457	183,0848	103,9739	49,00911	32,8213
15.00	24.70333	35.94105	48.2938	78.9327	123.8935	187.1463	212.4302	192.1719	126.3923	71.80835	33.64655	22.24052
16.00	11,42875	18,95105	26,50982	44,28889	69,11481	106,1375	117,4552	104,399	65,63163	35,38239	14,94097	8,919335
17.00	0,550343	3,65432	9,157534	17,45686	28,74882	45,5866	48,7129	41,33312	22,61897	6,689511	1,00764	0,440118
18.00	0	0	0.850308	3.345861	7.503199	13.27563	13.19599	9.078858	3.140727	0.344337	0	0
19.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 34: Παροχή αποσταγμένου νερού ṁ(gr/m2h) του αποστακτήρα μικρής λεκάνης συναρτήσει των ωρών της 21ης ημέρας κάθε μήνα.

Ακολουθούν τα διαγράμματα της παροχής αποσταγμένου νερού ṁ(gr/m²h) συναρτήσει των ωρών της 21^{ης} ημέρας κάθε μήνα (**Διαγράμματα 37-48**)



Διάγραμμα 37



Διάγραμμα 38



Διάγραμμα 39



Διάγραμμα 40



Διάγραμμα 41



Διάγραμμα 42



Διάγραμμα 43



Διάγραμμα 44



Διάγραμμα 45



Διάγραμμα 46



Διάγραμμα 47



Διάγραμμα 48

Ακολουθεί το διάγραμμα της συνολικής ημερήσιας παραγωγής αποσταγμένου νερού m(kg/m²day). (**Διάγραμμα 6.49**)



Διάγραμμα 49

Αν θεωρήσουμε ότι όλες οι μέρες του μήνα είναι ίδιες προκύπτει το διάγραμμα της μηνιαίας παραγωγής αποσταγμένου νερού ṁ(κg/m²mon) (**Διάγραμμα 6.50**)



Διάγραμμα 50

6.1.6 Υπολογισμός του βαθμού απόδοσης του αποστακτήρα [33]

Ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$n_i = \frac{\dot{Q}_{ev}}{G(t)} \tag{6.22}$$

Προκύπτουν οι παρακάτω τιμές του βαθμού απόδοσης

Πίνακας 35: Βαθμός απόδοσης ni(%) του ηλιακού αποστακτήρα μικρής λεκάνης συναρτήσει των ωρών της 21ης ημέρας κάθε μήνα.

					1							
n _i (%)	21-Ιαν	21-Φεβ	21-Μαρ	21-Απρ	21-Μαϊ	21-louv	21-Ιουλ	21-Αυγ	21-Σεπ	21-Οκτ	21-Νοε	21-Δεκ
06.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
07.00	0	0	1,404151	2,437536	3,998112	5,725065	5,93479	5,026279	2,90575	0	0	0
08.00	0,916990624	1,821856	2,756779	4,028821	6,328022	9,014177	9,507749	8,305687	5,513917	3,176323	1,318613	0,635101
09.00	2,018460392	2,926292	4,072807	5,975424	9,353877	13,24461	14,21263	12,58951	8,528593	5,114536	2,752942	1,882486
10.00	3,161687252	4,244256	5,586091	8,152211	12,70893	17,79069	19,46008	17,61809	12,19886	7,511433	4,173104	3,093846
11.00	4,206446337	5,528934	6,984804	10,10653	15,67137	21,75725	24,24251	22,42523	15,84967	9,935492	5,504105	4,12653
12.00	5,086418908	6,599964	8,049651	11,50621	17,60074	24,38437	27,58595	25,96091	18,73573	11,95943	6,603366	4,929107
13.00	5,451389698	6,990386	8,287036	11,74102	17,60612	24,57217	28,03358	26,54876	19,37312	12,52167	6,914703	5,153703
14.00	5,350718002	6,739987	7,773192	10,92047	15,93792	22,50769	25,60547	24,1537	17,6078	11,49965	6,442542	4,901714
15.00	4,532224572	5,643484	6,442097	9,111076	13,06736	18,83679	21,27405	20,0542	14,52484	9,540545	5,376554	4,116555
16.00	3,297182046	4,249336	4,879013	6,940236	9,823226	14,37077	15,90301	14,92843	10,58637	6,869535	3,782095	2,853198
	· ·											
17.00	1,268859532	2,334379	3,181504	4,681838	6,709931	9,983923	10,76901	10,02061	6,776356	3,676737	1,56684	1,137314
18.00	0	0	1,507474	2,628218	4,107698	6,323551	6,588057	5,827181	3,50677	1,5492	0	0
19.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ακολουθούν τα διαγράμματα του βαθμού απόδοσης n_i(%) του αποστακτήρα συναρτήσει των ωρών της 21^{ης} ημέρας κάθε μήνα. (**Διαγράμματα 51-63**)



Διάγραμμα 50



Διάγραμμα 51



Διάγραμμα 52



Διάγραμμα 53



Διάγραμμα 54



Διάγραμμα 55



Διάγραμμα 56



Διάγραμμα 57



Διάγραμμα 58



Διάγραμμα 59



Διάγραμμα 60



Διάγραμμα 61

Αν Θεωρήσουμε ότι όλες οι μέρες του μήνα είναι ίδιες προκύπτει ο μέσος μηνιαίος βαθμός απόδοσης. (**Διάγραμμα 6.61**)



Διάγραμμα 62

Αξίζει να σημειωθεί πως τα αποτελέσματα που προέκυψαν βασίζονται στο μοντέλο του Dunkle που όπως προαναφέρθηκε υπόκειται σε κάποιους περιορισμούς. Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες βελτίωσης του συγκεκριμένου μοντέλου ή και ανάπτυξης νέων μοντέλων από πολλούς επιστήμονες με στόχο τον πιο ακριβή και σωστό υπολογισμό της παροχής αποσταγμένου νερού και του βαθμού απόδοσης του ηλιακού αποστακτήρα.

6.2 Εφαρμογή ηλιακού αποστακτήρα μεγάλης λεκάνης στην περιοχή της Αθήνας

Οι συγγραφείς Eibling, Talbert & Lof [20] κατάφεραν να απεικονίσουν σε διάγραμμα 12 καμπύλες που αντιστοιχούν σε 12 διαφορετικούς ηλιακούς συλλέκτες μεγάλης λεκάνης, με βάση τις οποίες προσδιορίζεται η ημερήσια παραγωγή των αποστακτήρων συναρτήσει της ημερήσιας ακτινοβολίας της εκάστοτε περιοχής. Έτσι, με δεδομένες τις τιμές της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας, θα υπολογιστεί η παραγωγικότητα που θα είχε ο κάθε αποστακτήρας αν βρισκόταν στην περιοχή της Αθήνας. Οι υπολογισμοί έγιναν για 4 αποστακτήρες, της περιοχής Muresk της Αυστραλίας (καμπύλη 10), της περιοχής Daytona Beach των Η.Π.Α. (καμπύλη 12), της περιοχής Las Marinas της Ισπανίας (καμπύλη 4) και της περιοχής της Σύμης της Ελλάδας (καμπύλη 2). Τα χαρακτηριστικά των αποστακτήρων καταγράφονται στον **Πίνακα 36**.

Χώρα	Τοποθεσία	Έτος κατασκευής	Μέγεθος λεκάνης (m²)	Παραγωγή αποσταγμένου νερού (m ³ /day)	
Αυστραλία	Muresk	1966	371,61	0,83	
Χιλή	Las Salinas	1872	4.459,35	14,76	
Ελλάδα	Σύμη	1964	2.686,76	7,57	
	Αίγινα	1965	1.490,16	4,24	
	Πάτμος	1967	8.639,98	26,12	
	Κίμωλος	1968	2.508,38	7,57	
	Νίσυρος	1969	2.043,87	6,06	
Ινδία	Bhavnagar	1965	377,19	0,91	
Ισπανία	Las Marinas	1966	868,64	2,57	
Н.П.А.	Daytona Beach	1959	216,46	0,61	

Πίνακας 36: Ηλιακοί αποστακτήρες μεγάλης λεκάνης [τ7]

Οι υπολογισμοί έγιναν για την 21^η ημέρα κάθε μήνα. Οι τιμές που προκύπτουν δείχνουν πόσο θα παρήγαγε ο καθένας από τους επιλεγμένους ηλιακούς αποστακτήρες στην περιοχή της Αθήνας.

mˈ (lt/m²day)	Σύμη,	Las Marinas,	Muresk,	Daytona Beach,	
	Ελλάδα	Ισπανία	Αυστραλία	Н.П.А.	
21-Ιαν	1,263121	0,814917	0,778245	0,806768	
21-Φεβ	1,650206	1,303867	1,059392	1,059392	
21-Μαρ	2,322513	2,037292	1,568715	1,548342	
21-Απρ	2,9337	2,526242	2,037292	1,711325	
21-Μια	3,667125	3,218921	2,436601	2,322513	
21-louv	3,789363	3,42265	2,505869	2,363258	
21-Ιουλ	3,707871	3,381904	2,44475	2,330662	
21-Αυγ	3,341158	3,096683	2,404004	2,281767	
21-Σεπ	2,811463	2,404004	1,752071	1,629833	
21-Οκτ	2,159529	1,874308	1,548342	1,426104	
21-Νοε	1,548342	1,140883	0,855663	0,896408	
21-Δεκ	1,548342	0,774171	0,733425	0,774171	

Πίνακας 37: Ημερήσια παραγωγή αποσταγμένου νερού ανά τετραγωνικό μέτρο των αποστακτήρων ṁ (lt/m2day) συναρτήσει της 21ης ημέρας κάθε μήνα.

Πίνακας 38: Ημερήσια παραγωγή αποσταγμένου νερού κάθε αποστακτήρα ṁ (m3/day) συναρτήσει της 21ης ημέρας κάθε μήνα.

ṁ (m³/day)	Σύμη,	Las Marinas,	Muresk,	Daytona Beach,	
	Ελλάδα	Ισπανία	Αυστραλία	Н.П.А.	
	(2.686,76 m ²)	(868,64 m²)	(371,61 m ²)	(216,46 m ²)	
21-Ιαν	3,393703	0,000815	0,289204	0,174633	
21-Φεβ	4,433708	0,001304	0,393681	0,229316	
21-Μαρ	6,240034	0,002037	0,58295	0,335154	
21-Απρ	7,882148	0,002526	0,757078	0,370433	
21-Μια	9,852685	0,003219	0,905465	0,502731	
21-louv	10,18111	0,003423	0,931206	0,511551	
21-Ιουλ	9,962159	0,003382	0,908494	0,504495	
21-Αυγ	8,976891	0,003097	0,893352	0,493911	
21-Σεπ	7,553725	0,002404	0,651087	0,352794	
21-Οκτ	5,802137	0,001874	0,575379	0,308695	
21-Noɛ	4,160022	0,001141	0,317973	0,194037	
21-Δεκ	3,06528	0,000774	0,272548	0,167577	

Ακολουθούν τα συγκεντρωτικά διαγράμματα της ημερήσιας παραγωγής αποσταγμένου νερού ανά τετραγωνικό μέτρο των αποστακτήρων ṁ (lt/m²day) (**Διάγραμμα 64**) και της ημερήσιας παραγωγής αποσταγμένου νερού κάθε αποστακτήρα ṁ (m³/day). (**Διάγραμμα 65**)



Διάγραμμα 63



Διάγραμμα 64

Βιβλιογραφία

[1] Soteris A. Kalogirou

Seawater desalination using renewable energy sources

Progress in Energy and Combustion Science, Volume 31, Issue 3, 2005, Pages 242–281

[2] Hazim Mohameed Qiblawey, Fawzi Banat

Solar thermal desalination technologies

Desalination, Volume 220, Issues 1–3, 1 March 2008, Pages 633–644

[3] Lucio Rizzuti, Hisham M. Ettouney, Andrea Cipollina

Solar Desalination for the 21st Century:

A Review of Modern Technologies and Researches on Desalination Coupled to Renewable EnergiesBusiness & Economics, Springer, Jan 23, 2007, p.211

[4] Mahmoud Shatat, Mark Worall, Saffa Riffat

Opportunities for solar water desalination worldwide: Review

Sustainable Cities and Society, Available online 30 March 2013

[5] http://www.idadesal.org

[6] Chennan Li, Yogi Goswami, Elias Stefanakos

Solar assisted sea water desalination: A review

Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 19, March 2013, Pages 136–163

[7] Hazim Mohameed Qiblawey, Fawzi Banat

Solar thermal desalination technologies

Desalination, Volume 220, Issues 1–3, 1 March 2008, Pages 633–644

[8] T. Rajaseenivasan, K. Kalidasa Murugavel, T. Elango, R. Samuel Hansen

A review of different methods to enhance the productivity of the multi-effect solar still

Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 17, January 2013, Pages 248–259

[9] H.E.S. Fath, M. El-Samanoudy, K. Fahmy, A. Hassabou

Thermal-economic analysis and comparison between pyramid-shaped and single-slope solar still configurations

Desalination, Volume 159, Issue 1, 15 September 2003, Pages 69-79

[10] Eze J.I., Ojike O

Comparative evaluation of rectangular and pyramid-shaped solar stills using saline water

International Journal of the Physical Sciences, Volume 7(31), pp. 5202-5208, 16 August 2012

[11] A.A. El-Sebai

The effect of wind speed on passive solar still performance based on inner/outer surface temperatures of the glass cover

Energy, Volume 36, Issue 8, August 2011, Pages 4943-4949

[12] T. Arunkumar, K. Vinothkumar, Amimul Ahsan, R. Jayaprakash, Sanjay Kumar

Experimental Study on Various Solar Still Designs

ISRN Renewable Energy, Volume 2012 (2012), Article ID 569381, 10 pages

[13] Sanjay K. Sharma, Rashmi Sanghi

Wastewater Reuse and Management

Springer, 2013 - TECHNOLOGY & ENGINEERING, p.340

[14] V. Manikandan, K. Shanmugasundaram, S. Shanmugan, B. Janarthanan, J. Chandrasekaran,

Wick type solar stills: A review

Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 20, April 2013, Pages 322–335

[15] J.T. Mahdi , B.E. Smith, A.O. Sharif

An experimental wick-type solar still system: Design and construction

Desalination, Volume 267, Issues 2–3, 15 February 2011, Pages 233–238

[16] A.N. Minasian, A.A. Al-Karaghouli

An improved solar still: The wick-basin type

Energy Conversion and Management, Volume 36, Issue 3, March 1995, Pages 213–217

[17] V. Velmurugan, K. Sritha

Performance analysis of solar stills based on various factors affecting the productivity—A review

Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15, Issue 2, February 2011, Pages 1294–1304

[18] Rahul Dev, Sabah A. Abdul-Wahab, G.N. Tiwari

Performance study of the inverted absorber solar still with water depth and total dissolved solid

Applied Energy, Volume 88, Issue 1, January 2011, Pages 252–264

[19] T.V. Arjunan, H.Ş. Aybar, N. Nedunchezhian

Status of solar desalination in India

Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 13, Issue 9, December 2009, Pages 2408–2418

[20] J.A. Eibling, S.G. Talbert, G.O.G. Löf

Solar stills for community use—digest of technology

Solar Energy, Volume 13, Issue 2, May 1971, Pages 263–276

[21] K. Sampathkumar, T.V. Arjunan, P. Pitchandi, P. SenthilkumarActive solar distillation—A detailed review

Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, Issue 6, August 2010, Pages 1503– 1526

[22] Chennan Li, Yogi Goswami, Elias Stefanakos

Solar assisted sea water desalination: A review

Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 19, March 2013, Pages 136–163

[23] http://www.sidem-desalination.com/en/Process/MSF/

[24] ''Μέθοδοι αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας, Εφαρμογή στην περιοχή της Αθήνας'', Πασίρογλου Μαρία, Ε.Μ.Π. , Τομέας Θερμότητας, 2008.

[25] http://www.technicalreview.gr/index.php?option=com_content&task=view&

[26] S. Al-Kharabsheh, D. Yogi Goswami

Analysis of an innovative water desalination system using low-grade solar heat

Desalination, Volume 156, Issues 1–3, 1 August 2003, Pages 323–332

[27] G. Prakash Naraya, Mostafa H. Sharqawy, Edward K. Summers, John H. Lienhard, Syed M. Zubair, M.A. Antar

The potential of solar-driven humidification–dehumidification desalination for small-scale decentralized water production

Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, Issue 4, May 2010, Pages 1187–1201

[28] Κ. Α. Αντωνόπουλος

Θερμικά- Ηλιακά Συστήματα

pp.9-28, 2008

[29] D.A. Kouremenos, K.A. Antonopoulos, S.Doulgerakis

Direct and diffuse solar radiation correlations for tilted surfaces in Athens, Greece

Solar energy, Volume 38, No 3, pp.203-217, 1987

[30] Κ. Α. Αντωνόπουλος

Κλιματισμός

pp.69-71, 2008

[31] Y.P. Yadav, Y.N. Prasad

Parametric investigations on a basin type solar still

Energy Convers. Mgmt, Volume 31, No.1, pp.7-16, 1991

[32] N. Rahbar, J.A. Esfahan

Productivity estimation of a single-slope solar still: Theoretical and numerical analysis

Energy, Volume 49, 1 January 2013, Pages 289–297

[33] G.N. Tiwari, H.N. Singh, Rajesh Tripathi

Present status of solar distillation

Solar Energy, Volume 75, Issue 5, November 2003, Pages 367-373