



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΜΟΝΑΔΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΓΡΟΥ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΜΟΝΑΔΕΣ
ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΤΗΝ
ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΛΑΤΟΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΞΕΥΓΕΝΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ

ΜΑΡΙΑ ΛΟΪΖΙΔΟΥ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΜΟΝΑΔΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΓΡΟΥ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΜΟΝΑΔΕΣ
ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΤΗΝ
ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΛΑΤΟΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΞΕΥΓΕΝΟΣ

Συμβουλευτική Επιτροπή: Μαρία Λοϊζίδου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. (Επιβλέπουσα)
Μαγδαληνή Κροκίδα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.
Χρήστος Τζιβανίδης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 15^η Απριλίου 2016

.....
Μ. Λοϊζίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Μ. Κροκίδα,
Αν. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Χρήστος Τζιβανίδης,
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Α. Χαραλάμπους
Καθηγητρια Ε.Μ.Π.

.....
Κ. Κόλλια,
Καθηγητρια Ε.Μ.Π.

.....
Ε. Παυλάτου,
Αν. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Henri Spanjers,
As. Professor, TU Delft

Αθήνα, Απρίλιος 2016

.....
Δημήτριος Α. Ξεύγενο

Διδάκτωρ Χημικών Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Δημήτριος Α. Ξεύγενο, 2016.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

«Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανωτάτη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέως (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202)»

Πρόλογος – Ευχαριστίες

Η διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στη Μονάδα Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας ([UEST](#)), της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιο Πολυτεχνείου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέδραμαν στην εκπόνηση αυτής της διατριβής.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ την επιβλέπουσα καθηγήτρια της διδακτορικής διατριβής, την κα Μαρία Λοϊζίδου για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου, αναθέτοντας το θέμα αυτής της διατριβής, καθώς επίσης και τον ρόλο του κύριου ερευνητή κατά την υλοποίηση του έργου SOL-BRINE ([LIFE09 ENV/GR/000299](#)). Θέλω να την ευχαριστήσω επίσης για την αγαστή συνεργασία, την πολύτιμη καθοδήγηση και την έμπνευση που υπήρξε στην ακαδημαϊκή μου καριέρα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, την αναπληρώτρια καθηγήτρια, κα Μαγδαληνή Κροκίδα, για τη συνδρομή της στο προκαταρκτικό σχεδιασμό του συστήματος μέσω της ανάπτυξης του λογισμικού προσομοίωσης της διεργασίας και τον επίκουρο καθηγητή, κ. Χρήστο Τζιβανίδη για την συνδρομή του στην προσομοίωση του ηλιακού συστήματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της επταμελούς επιτροπής, για τις πολύτιμες συμβουλές και προτάσεις τους για τη βελτίωση της διατριβής. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια, κα Αικατερίνη Χαραλάμπους, για την πολύτιμη καθοδήγηση, ειδικά στη διατύπωση των προτάσεων αξιοποίησης της άλμης. Θέλω να ευχαριστήσω επίσης θερμά τον αναπληρωτή καθηγητή του TU Delft, κ. Henri Spanjers, για τη συμμετοχή του στην επταμελή επιτροπή της διατριβής και για την αποδοχή μου ως guest researcher στο Πανεπιστήμιο TU Delft κατά τα τελευταία στάδια εκπόνησης της διατριβής.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω τα άτομα που εκπόνησαν υπό την επίβλεψή μου τη διπλωματική τους εργασία, την Κατερίνα Παπάζογλου (Επιβλέπων Καθηγητής: Χρήστος Τζιβανίδης), η οποία ανέπτυξε λογισμικό προσομοίωσης του πρότυπου ηλιακού συλλέκτη που χρησιμοποιήθηκε, τη Δέσποινα Μπακογιάννη (Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Αικατερίνη Χαραλάμπους), η οποία συνέδραμε σημαντικά στη διατύπωση των προτάσεων αξιοποίησης της άλμης στην Ελλάδα με χρήση λογισμικού GIS και την Ελένη Πανοπούλου (Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Αικατερίνη

Χαραλάμπους) για την εκτέλεση μέρους από τις εργαστηριακές αναλύσεις της διατριβής.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω όλους τους συνεργάτες που με βοήθησαν σε διαφορετικά τμήματα της διατριβής αυτής. Ονομαστικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Μηχανολόγο Μηχανικό, Κώστα Δημόπουλο για τη βοήθεια του στα κατασκευαστικά σχέδια του εξαμιστήρα και τον Παναγιώτη Μιχαηλίδη για την ανάπτυξη του λογισμικού προσομοίωσης της διεργασίας.

Η διδακτορική διατριβή αφιερώνεται στη γυναίκα μου, Μαρία Μόρτου, η οποία αποτέλεσε το στήριγμα μου κατά τη διάρκεια υλοποίησης της και στο γιο μας, Ανδρέα Ξεύγενο.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Διαθεσιμότητα νερού	2
1.1.1	Πηγές νερού	3
1.1.2	Χρήσεις νερού	3
1.2	Πρόβλημα λειψυδρίας.....	7
1.3	Η περίπτωση της Ελλάδας	9
1.3.1	Διαθεσιμότητα νερού.....	9
1.3.2	Κατανάλωση νερού	9
1.3.3	Υδατικό ισοζύγιο	10
1.3.4	Η περίπτωση της Τήνου.....	14
1.3.4.1	Ζήτηση νερού στην Τήνο	15
1.3.4.2	Προσφορά νερού στην Τήνο	15
1.3.5	Προτάσεις – Λύσεις και Συζήτηση.....	16
1.4	Η αφαλάτωση ως λύση στο πρόβλημα της λειψυδρίας	19
2	Αφαλάτωση	23
2.1	Εισαγωγή.....	24
2.2	Γενικές Έννοιες και Ορισμοί.....	27
2.2.1	Αλατότητα.....	27
2.2.2	Εκφράσεις περιεκτικότητας και συγκέντρωσης.....	30
2.2.3	Αγωγιμότητα	31
2.2.4	Ολικά Διαλυμένα Στερεά.....	31
2.2.5	Σκληρότητα & αλκαλικότητα	31

2.2.6 Διαλυτότητα & Γινόμενο διαλυτότητας	32
2.2.7 Δείκτης κορεσμού (Saturation Index).....	34
2.2.8 Ειδικό βάρος (Specific gravity).....	35
2.2.9 Βαθμοί Baumé.....	35
2.3 Ταξινόμηση μεθόδων αφαλάτωσης.....	36
2.3.1 Μέγεθος εγκατάστασης	36
2.3.2 Τεχνικές αφαλάτωσης.....	37
2.3.3 Κατηγορίες νερού.....	46
2.3.4 Σύγκριση τεχνικών αφαλάτωσης.....	49
2.4 Χρήσεις αφαλατωμένου νερού.....	50
2.5 Χαρακτηριστικά της άλμης.....	52
2.5.1 Ταξινόμηση άλμης.....	52
2.5.2 Πηγές άλμης	52
2.5.2.1 Άλμη από μονάδες αφαλάτωσης	52
2.5.2.2 Η άλμη ως παραπροϊόν της βιομηχανίας	55
2.6 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	59
2.7 Μονάδα αντίστροφης όσμωσης, Άγιος Φωκάς, Τήνος	64
3 Τεχνικές και συστήματα διαχείρισης της άλμης.....	71
3.1 Διάθεση σε επιφανειακά ύδατα	73
3.2 Διάθεση σε δίκτυο αποχέτευσης	75
3.3 Έγχυση άλμης σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς.....	76
3.4 Λίμνες Εξάτμισης.....	81
3.5 Άρδευση	85

3.6	Τεχνική Μηδενικών Υγρών Αποβλήτων	86
3.7	Τεχνικές διαχωρισμού και ανάκτησης αλάτων	97
3.8	Συζήτηση & Συμπεράσματα	106
3.8.1	Συζήτηση.....	106
3.8.2	Συμπεράσματα.....	107
4	Σχεδιασμός πιλοτικού συστήματος επεξεργασίας της άλμης	109
4.1	Αρχικός σχεδιασμός.....	110
4.1.1	Αρχικό διάγραμμα ροής.....	112
4.1.2	Αφαλάτωση με μεμβράνες.....	119
4.1.2.1	Αντίστροφη Όσμωση	120
4.1.2.2	Ηλεκτροδιάλυση	130
4.1.2.3	Ιοντοεναλλαγή	143
4.1.3	Θερμική Αφαλάτωση.....	145
4.1.3.1	Απόσταξη με πολλαπλές βαθμίδες	146
4.1.3.2	Απόσταξη με εκτόνωση	151
4.1.3.3	Επανασυμπίεση ατμών.....	157
4.1.3.4	Συμπυκνωτής άλμης	159
4.1.3.5	Ευτηκτική κρυστάλλωση	161
4.1.4	Αφαλάτωση με χρήση ΑΠΕ	163
4.1.5	Αφαλάτωση με ηλιακή ενέργεια	168
4.1.5.1	Γενικά.....	168
4.1.5.2	Τεχνολογίες συλλογής ηλιακής ενέργειας.....	169
4.1.5.3	Μελέτες περιπτώσεων εφαρμογής αφαλάτωσης με ηλιακή ενέργεια	174
4.1.6	Οικονομικά στοιχεία.....	180
4.1.7	Συμπεράσματα – Συζήτηση	183
4.1.8	Τελικό διάγραμμα ροής	189
4.2	Προκαταρκτικός σχεδιασμός	193

4.2.1	Θερμοφυσικές ιδιότητες	195
4.2.2	Εξατμιστήρας	197
4.2.2.1	Περιγραφή διεργασίας	197
4.2.2.2	Μαθηματική μοντελοποίηση.....	197
4.2.2.3	Παράμετροι σχεδιασμού	200
4.2.3	Κρυσταλλωτήρας.....	201
4.2.3.1	Περιγραφή διεργασίας	201
4.2.3.2	Μαθηματική μοντελοποίηση.....	201
4.2.3.3	Παράμετροι σχεδιασμού	205
4.2.4	Ξηραντήρας.....	206
4.2.4.1	Περιγραφή διεργασίας	206
4.2.4.2	Μαθηματική μοντελοποίηση.....	206
4.2.4.3	Παράμετροι σχεδιασμού	208
4.2.5	Μηχανικός συμπίεστής	209
4.2.6	Εναλλάκτες θερμότητας.....	211
4.2.6.1	Προθερμαντήρας	211
4.2.6.2	Εναλλάκτης θερμότητας ξηραντήρα.....	212
4.2.7	Ενεργειακό τμήμα συστήματος.....	215
4.2.7.1	Ηλιακό δυναμικό	215
4.2.7.2	Παραβολικά κάτοπτρα	218
4.2.7.3	Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες	228
4.2.7.4	Φωτοβολταϊκό σύστημα.....	229
4.2.8	Ανάλυση ευαισθησίας και τεχνικές προδιαγραφές του συστήματος επεξεργασίας της άλμης	232
4.2.8.1	Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας	232
4.2.8.2	Τεχνικές προδιαγραφές του συστήματος	238
4.3	Λεπτομερής σχεδιασμός	260
5	Κατασκευή, λειτουργία και βελτιστοποίηση πιλοτικής μονάδας επεξεργασίας της άλμης	275
5.1	Κατασκευή και εγκατάσταση πιλοτικής μονάδας	275
5.1.1	Επιλογή υλικού.....	275

5.1.2 Εγκατάσταση.....	278
5.1.2.1 Σημείο εγκατάστασης	278
5.1.2.2 Έργα πολιτικού μηχανικού.....	280
5.1.2.3 Εγκατάσταση συστήματος επεξεργασίας της άλμης	281
5.1.3 Σύστημα ελέγχου εξατμιστήρα	288
5.1.3.1 Έλεγχος – Λειτουργία	288
5.1.3.2 Φιλοσοφία ελέγχου και λειτουργίας της μονάδας	290
5.1.3.3 Περιγραφή ελέγχου λειτουργίας.....	291
5.1.4 Κόστος συστήματος.....	300
5.2 Εργαστηριακές αναλύσεις.....	301
5.2.1 Πειραματικό Πρωτόκολλο	301
5.2.1.1 Πρωτόκολλο δειγματοληψιών	301
5.2.1.2 Πρωτόκολλο μετρήσεων	307
5.2.2 Μέθοδοι μετρήσεων	309
5.2.2.1 Υγρά δείγματα	309
5.2.2.2 Στερεά δείγματα.....	334
5.2.3 Ανάλυση και Επεξεργασία Πειραματικών Αποτελεσμάτων	337
5.2.3.1 Γενικά.....	337
5.2.3.2 Υγρά δείγματα	340
5.2.3.3 Στερεά δείγματα.....	359
5.3 Βελτιστοποίηση πιλοτικής μονάδας	381
5.3.1 Βελτιστοποίηση ξηραντήρα	381
5.3.2 Σχεδίαση και εγκατάσταση υποδομής στέγασης.....	384
5.3.3 Ανακυκλοφορία της άλμης	388
5.3.4 Ηλιακό σύστημα.....	389
5.3.5 Εγκατάσταση ηλεκτρικών θερμαντήρων.....	391
5.4 Προτάσεις ανάπτυξης σε πλήρη κλίμακα	392
5.4.1 Εξοπλισμός επεξεργασίας άλμης	392
5.4.1.1 Εξατμιστήρας	392

5.4.1.2	Κρυσταλλωτήρας.....	393
5.4.2	Ξηραντήρας.....	393
5.4.3	Σύστημα ενεργειακής τροφοδοσίας.....	395
5.4.3.1	Σενάριο 1: Ηλιακή ενέργεια (στατικοί ηλιακοί συλλέκτες κενού)	395
5.4.3.2	Σενάριο 2: Ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας από βιομηχανία	400
5.4.3.3	Concentrating Solar Power (CSP)	404
6	Αξιοποίηση υγρού υπολείμματος	411
6.1	Εκτίμηση οικονομικής αξίας της άλμης	413
6.1.1	Παραγωγή αλάτων από την εξάτμιση του θαλασσινού νερού.....	414
6.1.2	Ποσοτικοποίηση παραγόμενων αλάτων κατά την εξάτμιση 1 m ³ άλμης	417
6.1.3	Αγορά αλάτων	424
6.1.3.1	Χλωριούχο νάτριο.....	424
6.1.3.2	Χλωριούχο μαγνήσιο, MgCl ₂	428
6.1.3.3	Θεικό μαγνήσιο, MgSO ₄	428
6.1.3.4	Θεικό ασβέστιο, CaSO ₄	428
6.1.3.5	Ανθρακικό ασβέστιο, CaCO ₃	429
6.1.4	Οικονομική αξία άλμης.....	431
6.2	Εκτίμηση κόστους επεξεργασίας.....	434
6.2.1	CAPEX και OPEX.....	435
6.2.2	Μοναδιαίο κόστος επεξεργασίας.....	438
6.3	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	439
6.4	Δυνατότητες εφαρμογής συστήματος στον Ελληνικό χώρο.....	441
6.4.1	Ελληνική αγορά αφαλάτωσης.....	442
6.4.1.1	Δημοτικές μονάδες αφαλάτωσης.....	446
6.4.1.2	Βιομηχανία	451
6.4.1.3	Ηλεκτροπαραγωγή	456
6.4.1.4	Τουριστικός τομέας	458

6.4.2	Αγορά άλατος.....	461
6.4.3	Παραγωγή άλατος (αλυκές).....	461
6.4.4	Κατανάλωση άλατος.....	464
6.5	Συζήτηση/συμπεράσματα	472
6.5.1	Αγορά νερού.....	472
6.5.2	Αγορά αλάτων	473
6.5.3	Αξιολόγηση/Συμπεράσματα.....	475
7	Συμπεράσματα – Προτάσεις	481
7.1	Συμπεράσματα.....	481
7.2	Προτάσεις για μελλοντικές ερευνητικές δραστηριότητες	484
8	Βιβλιογραφία	489
9	Παραρτήματα	512
9.1	Ζώνες υφαλμύρωσης, Ελλάδα.....	512
9.2	Εμπορικά συστήματα Zero Liquid Discharge.....	513
9.3	Ηλιακά δεδομένα, Άγιος Φωκάς, Τήνος.....	515
9.4	Ανάλυση ευαισθησίας.....	532
9.5	Λίστα με τους κατασκευαστές	540
9.6	Βιογραφικό σημείωμα του ερευνητή.....	552

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1-1: Προσφορά και ζήτηση νερού, ανά υδατικό διαμέρισμα της Ελλάδας (2003)	10
Πίνακας 1-2: Γενικά υδρολογικά δεδομένα (μέσες ετήσιες τιμές) για τα νησιά του Αιγαίου Πελάγους.....	14
Πίνακας 1-3: Εγκατεστημένη δυναμικότητα αφαλάτωσης σε επιλεγμένες χώρες της Μεσογείου (2011).....	21
Πίνακας 2-1: Ταξινόμηση μεθόδων αφαλάτωσης	38
Πίνακας 2-2: Τα κυριότερα συστατικά του θαλάσσιου νερού	48
Πίνακας 2-3: Σύγκριση τεχνολογιών αφαλάτωσης θαλασσινού νερού	49
Πίνακας 2-4: Σύγκριση τεχνολογιών αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού	49
Πίνακας 2-5: Χημική σύσταση άλμης σύμφωνα με τη βιβλιογραφία	53
Πίνακας 2-6: Απόρριψη χλωρίου στην Ευρώπη (2004).....	55
Πίνακας 2-7: Απόρριψη χλωρίου στην Ευρώπη, ανά χώρα (2004).....	56
Πίνακας 2-8: Συγκεντρωτικός πίνακας περιβαλλοντικών επιπτώσεων μονάδων αφαλάτωσης	63
Πίνακας 2-9: Χημική σύσταση νερού τροφοδοσίας, παραγόμενου νερού και άλμης, μονάδα αφαλάτωσης Τήνου	68
Πίνακας 3-1: Διαγράμματα ροής συστημάτων ZLD που εφαρμόζονται σήμερα.....	86
Πίνακας 3-2: Τροφοδοσία συμπυκνωτή άλμης	101
Πίνακας 3-3: Άλατα που ανακτώνται κατά την επεξεργασία στραγγίσματος ανθρακωρυχείου, Debiensko, Πολωνία.....	103
Πίνακας 3-4: Ποσότητα και τιμή πώλησης νερού ανά ποιότητα, εφαρμογή ανθρακωρυχείου, Debiensko.....	104
Πίνακας 3-5: Συγκριτική αξιολόγηση τεχνικών διαχείρισης άλμης	106
Πίνακας 4-1: Οσμωτική πίεση για διάφορες τιμές αλατότητας.....	121
Πίνακας 4-2: Ισοζύγιο μάζας, εφαρμογή συστήματος ZDD, Πανεπιστήμιο Νότιας Καρολίνας	138

Πίνακας 4-3: Οικονομική ανάλυση συστήματος ZDD	140
Πίνακας 4-4: Δέκα μεγαλύτερες εγκαταστάσεις MED σε παγκόσμιο επίπεδο	150
Πίνακας 4-5: Δέκα μεγαλύτερες εγκαταστάσεις MSF σε παγκόσμιο επίπεδο	156
Πίνακας 4-6: Τύποι ηλιακών συλλεκτών	170
Πίνακας 4-7: Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	173
Πίνακας 4-8: Πιθανοί συνδυασμοί τεχνολογιών συλλογής ηλιακής ενέργειας με τεχνικές αφαλάτωσης.....	174
Πίνακας 4-9: Σύνοψη τεχνικών χαρακτηριστικών για τις μελέτες περιπτώσεων PV-RO.....	179
Πίνακας 4-10: Βασικά τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά ανά τεχνική αφαλάτωσης	180
Πίνακας 4-11: Οικονομικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των πιο κοινών τεχνολογιών ηλιακής αφαλάτωσης.....	182
Πίνακας 4-12: Αύξων αριθμός n ημέρας του έτους, μέση ημέρα μήνα, αριθμός n της μέσης ημέρας κάθε μήνα, ηλιακή απόκλιση δ μέση ημέρας	222
Πίνακας 4-13: Απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος	229
Πίνακας 4-14: Λίστα με τις τελικές τιμές των μεταβλητών προσομοίωση του εξατμιστήρα.....	235
Πίνακας 4-15: Λίστα με τις τελικές τιμές των μεταβλητών προσομοίωση του κρυσταλλωτήρα	236
Πίνακας 4-16: Λίστα με τις τελικές τιμές των μεταβλητών προσομοίωση του ξηραντήρα	237
Πίνακας 5-1: Λίστα οργάνων συστήματος κενού, αυτοματισμός εξατμιστήρα	291
Πίνακας 5-2: Λίστα εξοπλισμού συστήματος κενού, αυτοματισμός εξατμιστήρα	291
Πίνακας 5-3: Λίστα οργάνων τροφοδοσίας εισόδου εξατμιστήρα	291
Πίνακας 5-4: Λίστα εξοπλισμού τροφοδοσίας εισόδου εξατμιστήρα.....	292
Πίνακας 5-5: Λίστα οργάνων, διατήρηση πίεσης εξατμιστήρα.....	292
Πίνακας 5-6: Λίστα εξοπλισμού, διατήρηση πίεσης εξατμιστήρα	292
Πίνακας 5-7: Λίστα οργάνων, έλεγχος στάθμης στις βαθμίδες εξάτμισης	293

Πίνακας 6-4: Σειρά σχηματισμού ενώσεων έπειτα από πλήρη εξάτμιση θαλασσινού νερού.....	420
Πίνακας 6-5: Συγκέντρωση αλάτων στο θαλασσινό νερό.....	423
Πίνακας 6-6: Ενδεικτικό μέγεθος αγοράς, τεχνικές προδιαγραφές και τιμή αγοράς χλωριούχου νατρίου (Ολλανδία).....	426
Πίνακας 6-7: Προδιαγραφές ανθρακικού ασβεστίου ανά χρήση	429
Πίνακας 6-8: Συγκεντρωτικός πίνακας τιμών πώλησης των αλάτων	431
Πίνακας 6-9: Υπολογισμός οικονομικής αξίας 1 m ³ άλμης.....	432
Πίνακας 6-10: Ανάλυση κόστος εξοπλισμού, συστήματος επεξεργασίας της άλμης δυναμικότητας 100m ³ /ημέρα.....	436
Πίνακας 6-11: Ανάλυση κόστους ηλιακού πεδίου, Σενάριο 1	436
Πίνακας 6-12: Λειτουργικά κόστη συστήματος επεξεργασίας άλμης, Σενάριο 1.....	437
Πίνακας 6-13: Ανάλυση κόστους συστήματος ενεργειακής τροφοδοσίας, Σενάριο 2.....	437
Πίνακας 6-14: Λειτουργικά κόστη για το σύστημα επεξεργασίας της άλμης (Σενάριο 2)	438
Πίνακας 6-15: Μονάδες αφαλάτωσης εγκατεστημένες σε Δήμους (2013).....	447
Πίνακας 6-16: Μονάδες αφαλάτωσης για βιομηχανική χρήση στην Ελλάδα.	452
Πίνακας 6-17: Μονάδες αφαλάτωσης εγκατεστημένες σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής.....	457
Πίνακας 6-18: Δυναμικότητα παραγωγής αλατιού ανά σύστημα στην Ελλάδα	464
Πίνακας 6-19: Κατανάλωση άλατος στη βιομηχανία παραγωγής χλωρίνης & καυστικού νατρίου, Ελλάδα (2012).....	464
Πίνακας 6-20: Συγκεντρωτικός πίνακας με τη συνεισφορά των επιχειρήσεων ενός τομέα σε μία περιοχή προς το σύνολο των επιχειρήσεων του ιδίου τομέα στην Ελλάδα.....	475
Πίνακας 6-21: Κριτήρια και συντελεστές βαρύτητας για αξιολόγηση περιοχών στην Ελλάδα αναφορικά με την εφαρμογή της τεχνολογίας σε πλήρη κλίμακα.....	478

Πίνακας 6-22: Αποτελέσματα αξιολόγησης περιοχών ανά κριτήριο.....	478
Πίνακας 6-23: Τελική αξιολόγηση περιοχών για εφαρμογή του συστήματος σε πλήρη κλίμακα στην Ελλάδα	479
Πίνακας 7-1: Συγκέντρωση μετάλλων στο θαλασσινό νερό, ποσότητα μετάλλων στον ωκεανό και ετήσια κατανάλωση	485
Πίνακας 9-1: Ηλιακά δεδομένα (Ιανουάριος - Ιούνιος) για ένα τυπικό μετεωρολογικό έτος, Άγιος Φωκάς	515
Πίνακας 9-2: Ηλιακά δεδομένα (Ιούλιος - Δεκέμβριος) για ένα τυπικό μετεωρολογικό έτος, Άγιος Φωκάς	520
Πίνακας 9-3: Απορροφώμενη ηλιακή ακτινοβολία από σύστημα ανίχνευσης μονού άξονα, Ιανουάριος.....	527
Πίνακας 9-4: Υπολογισμός τελικών τιμών μεταβλητών περιγραφής της διεργασίας του εξατμιστήρα	532
Πίνακας 9-5: Υπολογισμός τελικών τιμών μεταβλητών περιγραφής της διεργασίας του κρυσταλλωτήρα	535
Πίνακας 9-6: Υπολογισμός τελικών τιμών μεταβλητών περιγραφής της διεργασίας του ξηραντήρα	537
Πίνακας 9-7: Λίστα προμηθευτών/κατασκευαστών	540
Πίνακας 9-8: Ιδιότητες διαλύματος χλωριούχου νατρίου για διάφορες συγκεντρώσεις διαλυμένης ουσίας.....	551

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 3-1: Κόστος επένδυσης για έγχυση άλμης σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς, ανάλογα με το βάθος γεώτρησης.....	79
Εικόνα 4-1: Διατάξεις μονάδων Πολυβάθμιας Εξατμίσης.....	148
Εικόνα 4-2: Στατικοί συλλέκτες	171
Εικόνα 4-3: Συγκεντρωτικοί συλλέκτες	172
Εικόνα 4-4: Άποψη του λογισμικού προσομοίωσης της διεργασίας του πρότυπου συστήματος επεξεργασίας της άλμης	234
Εικόνα 5-1: Υλικά κατασκευής (αυλοί και φύλλα Super Duplex)	276
Εικόνα 5-2: Φωτογραφίες από την κατασκευή του εξατμιστήρα	277
Εικόνα 5-3: Απόψεις του οικοπέδου υφιστάμενης μονάδας αφαλάτωσης, στην περιοχή του Αγίου Φωκά, στην Τήνο.....	278
Εικόνα 5-4: Τοποθεσία πιλοτικού συστήματος επεξεργασίας της άλμης	279
Εικόνα 5-5: Εργασίες προετοιμασίας της περιοχής εγκατάστασης του πιλοτικού συστήματος	280
Εικόνα 5-6: Τελική άποψη πλατφόρμας σκυροδέματος	280
Εικόνα 5-7: Τελική άποψη συστήματος.....	281
Εικόνα 5-8: Ηλιακό σύστημα	283
Εικόνα 5-9: Εγκατάσταση ξηραντήρα.....	284
Εικόνα 5-10: Μεταφορά εξατμιστήρα από το μηχανουργείο στην Τήνο	285
Εικόνα 5-11: Φωτογραφίες από τον εγκατεστημένο εξατμιστήρα	286
Εικόνα 5-12: Φωτογραφίες από τον κρυσταλλωτήρα.....	287
Εικόνα 5-13: Γυάλινος περιέκτης	302
Εικόνα 5-14: Πιπέττα, οξίνιση συλλεγμένων δειγμάτων	302
Εικόνα 5-15: Ισόθερμος σάκος για την τακτική και ασφαλή μεταφορά των δειγμάτων	302
Εικόνα 5-16: Φωτογραφίες από τα στάδια δειγματοληψίας, σύμφωνα με το καταρτισμένο πρωτόκολλο δειγματοληψίας.....	305

Εικόνα 5-17: Φορητό όργανο WTW και ηλεκτρόδιο μέτρησης pH.....	311
Εικόνα 5-18: Επιτόπου μέτρηση pH, εκροή μονάδας αφαλάτωσης Τήνου	311
Εικόνα 5-19: Πειραματική διαδικασία ογκομέτρησης με τη βοήθεια δείκτη (ηλιανθίνη)	330
Εικόνα 5-20: X-Ray Siemens D5000 Diffractometer (αριστερά) και FEI- QUANTA 200 SEM συζευγμένο με αναλυτή EDS (δεξιά).....	336
Εικόνα 5-21: Αποτέλεσμα μέτρησης pH.....	340
Εικόνα 5-22: Χρωματική διαφοροποίηση δείγματος άλμης με ηλιανθίνη σε εύρος pH: 3.44 - 4.44.....	349
Εικόνα 5-23: SEM εικόνα 2 ^{ου} δείγματος στερεού αλάτος: μεγέθυνση x50 (αριστερά) και x200 (δεξιά)	369
Εικόνα 5-24: Μέσο μέγεθος κρυστάλλου χλωριούχου νατρίου (αριστερά), (β) Φάσμα EDS ιδίου δείγματος (δεξιά)	370
Εικόνα 5-25: SEM εικόνα 3 ^{ου} δείγματος στερεού αλάτος: μεγέθυνση x1600 (επάνω) και φάσμα EDS (κάτω).....	372
Εικόνα 5-26: SEM εικόνα 4 ^{ου} δείγματος στερεού αλάτος: μεγέθυνση x800 (αριστερά) και φάσμα EDS (δεξιά)	374
Εικόνα 5-27: Αρχικό σχέδιο του ξηραντήρα	381
Εικόνα 5-28: Τοποθέτηση πλαισίων στο ξηραντήρα	383
Εικόνα 5-29: Αρχική άποψη του εγκατεστημένου πιλοτικού συστήματος.....	384
Εικόνα 5-30: Εγκατάσταση υποδομής στέγασης πιλοτικού συστήματος	385
Εικόνα 5-31: Άποψη συστήματος κατά την επίσκεψη ομάδων για εκπαιδευτικούς, επιστημονικούς και άλλους σκοπούς	385
Εικόνα 5-32: Απόψεις από την εγκατεστημένη υποδομή στέγασης του πιλοτικού	386
Εικόνα 5-33: Εγκατάσταση συστήματος ανακυκλοφορίας.....	388
Εικόνα 5-34: Άποψη ηλιακού συστήματος	389
Εικόνα 5-35: Διόρθωση κλίσης μεταλλικής βάσης ηλιακού πεδίου.....	390

Εικόνα 5-36: Εγκατάσταση ηλιακού θερμαντήρα, κλάδος ανακυκλοφορίας (πάνω) και κλάδος τροφοδοσίας της άλμης (κάτω)	391
--	-----

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1-1: Άντληση και χρήση νερού ανά τομέα, Βέλγιο (2012)	6
Διάγραμμα 1-2: Βαθμολόγηση πιθανότητας και μεγέθους επιπτώσεων από την πραγματοποίηση κινδύνων παγκοσμίως,	8
Διάγραμμα 1-3: Χρήσεις νερού ανά υδατικό διαμέρισμα, Ελλάδα (2010)	11
Διάγραμμα 2-1: Διφασικό διάγραμμα διαλύματος χλωριούχου νατρίου	34
Διάγραμμα 2-2: Εγκατεστημένη δυναμικότητα σε παγκόσμιο επίπεδο – Ανάλυση ανά μέγεθος μονάδων	36
Διάγραμμα 2-3: Εγκατεστημένη δυναμικότητα ανά μέθοδο αφαλάτωσης, παγκοσμίως, στη Μεσόγειο Θάλασσα, τις Ηνωμένες Πολιτείες, τα Εμιράτα και την Αυστραλία (2015)	41
Διάγραμμα 2-4: Εγκατεστημένη δυναμικότητα αφαλάτωσης – Ανάλυση ανά τελικό χρήστη	50
Διάγραμμα 2-5: Εγκατεστημένη δυναμικότητα παγκοσμίως στη βιομηχανία – Ανάλυση ανά βιομηχανικό χρήστη (2015)	51
Διάγραμμα 3-1: Καταγεγραμμένες τεχνικές διαχείρισης της άλμης σε δείγμα 234 δημοτικών μονάδων αφαλάτωσης στις ΗΠΑ	72
Διάγραμμα 3-2: Συγκριτική οικονομική αξιολόγηση των διαγραμμάτων ροής ZLD για επεξεργασία άλμης (10 MGD @ 8,000 mg/l TDS)	94
Διάγραμμα 3-3: Εμπορικά εγκατεστημένα συστήματα ελαχιστοποίησης της άλμης, παγκοσμίως – Ανάλυση ανά εταιρεία προμήθειας συστήματος (2000 – 2015)	95
Διάγραμμα 3-4: Εμπορικά εγκατεστημένα συστήματα ελαχιστοποίησης της άλμης, παγκοσμίως – Ανάλυση ανά βιομηχανικό τελικό χρήστη (2000 – 2015)	96
Διάγραμμα 4-1: Ανηγμένο λειτουργικό κόστος εμπορικών μεθόδων αφαλάτωσης διαλυμένων στερεών, 2013-2020	181
Διάγραμμα 4-2: Συνολική δαπάνη παγκοσμίως σε τεχνολογίες απομάκρυνσης	181
Διάγραμμα 4-3: Υγρασία αλατιού και χρόνος ξήρανσης, σύγκριση πειραματικών δεδομένων και προβλέψεων	208

Διάγραμμα 4-4: Ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου, G, για μία τυπική μέρα του μήνα Ιουνίου και του Δεκεμβρίου	216
Διάγραμμα 4-5: Ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου (G) και επιπέδου ανίχνευσης του ήλιου σε 2 άξονες, για τυπική ημέρα του μήνα Ιουνίου, περιοχή Άγιος Φωκάς.....	217
Διάγραμμα 4-6: Μέγιστος ρυθμός flash για την αποφυγή από την επιφάνεια του νερού	224
Διάγραμμα 4-7: Διάγραμμα ροής υπολογισμών για τη διαστασιολόγηση του εξατμιστήρα.....	233
Διάγραμμα 4-8: Ωφέλιμη θερμότητα που προσδίδεται στο νερό κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας των θερινών μηνών	267
Διάγραμμα 5-1: Θερμοκρασιακό προφίλ του διαλύματος άλμης στην πρώτη (μπλε γραμμή) και δεύτερη (κόκκινη γραμμή) βαθμίδα του εξατμιστήρα.....	299
Διάγραμμα 5-2: Συγκέντρωση χλωριόντων και νατρίου, δείγματα άλμης και θαλασσινού νερού.....	341
Διάγραμμα 5-3: Συγκέντρωση χλωριόντων και νατρίου, δείγμα συμπυκνωμένης άλμης (έξοδος εξατμιστήρα)	342
Διάγραμμα 5-4: Συγκέντρωση χλωριόντων και νατρίου και αντίστοιχα όρια σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία για το πόσιμο νερό (δείγμα παραγόμενου νερού)	342
Διάγραμμα 5-5: Συγκέντρωση καλίου και ασβεστίου, δείγμα θαλασσινού νερού.....	344
Διάγραμμα 5-6: Συγκέντρωση καλίου και ασβεστίου, δείγματα άλμης	345
Διάγραμμα 5-7: Συγκέντρωση καλίου και ασβεστίου, δείγμα συμπυκνωμένης άλμης.....	345
Διάγραμμα 5-8: Συγκέντρωση μαγνησίου, δείγμα θαλασσινού νερού	347
Διάγραμμα 5-9: Συγκέντρωση μαγνησίου, δείγμα συμπυκνωμένης άλμης	347
Διάγραμμα 5-10: Συγκέντρωση μαγνησίου, δείγμα άλμης	348
Διάγραμμα 5-11: Αλκαλικότητα, δείγματα θαλασσινού νερού και άλμης	349
Διάγραμμα 5-12: Συγκέντρωση SO_4^{2-} , δείγμα θαλασσινού νερού	350

Διάγραμμα 5-13: Συγκέντρωση SO_4^{2-} , δείγμα άλμης	350
Διάγραμμα 5-14: Συγκέντρωση SO_4^{2-} , δείγμα συμπυκνωμένης άλμης	350
Διάγραμμα 5-15: Συγκέντρωση SO_4^{2-} , δείγμα παραγόμενου νερού.....	350
Διάγραμμα 5-16: Συγκέντρωση νιτρικών, δείγμα παραγόμενου νερού.....	352
Διάγραμμα 5-17: Ολικά διαλυμένα στερεά, δείγμα θαλασσινού νερού	353
Διάγραμμα 5-18: Ολικά διαλυμένα στερεά, δείγμα συμπυκνωμένης άλμης	353
Διάγραμμα 5-19: Ολικά διαλυμένα στερεά, δείγμα άλμης	353
Διάγραμμα 5-20: Ολικά διαλυμένα στερεά, δείγμα παραγόμενου νερού	354
Διάγραμμα 5-21: Συγκέντρωση βαρέων μετάλλων, δείγματα παραγόμενου νερού από εξατμιστήρα – σύγκριση με όρια πόσιμου νερού.....	356
Διάγραμμα 5-22: Διάγραμμα XRD από το υπόλειμμα κρυστάλλωσης (ιλύς) του συστήματος επεξεργασίας της άλμης	363
Διάγραμμα 5-23: Διάγραμμα XRD από το υπόλειμμα κρυστάλλωσης (ιλύς) του συστήματος επεξεργασίας της άλμης (2 ^ο δείγμα)	364
Διάγραμμα 5-24: Διάγραμμα XRD από το υπόλειμμα κρυστάλλωσης (ιλύς) του συστήματος επεξεργασίας της άλμης (3 ^ο δείγμα)	365
Διάγραμμα 5-25: Κατά μάζα σύσταση δειγμάτων στερεού άλατος ανά στοιχείο.....	367
Διάγραμμα 5-26: Κατά μάζα σύσταση 1 ^{ου} δείγματος στερεού άλατος.....	368
Διάγραμμα 5-27: Φάσμα EDX, Δείγμα 1	368
Διάγραμμα 5-28: Κατά μάζα σύσταση 2 ^{ου} δείγματος στερεού άλατος.....	369
Διάγραμμα 5-29: Κατά μάζα σύσταση 3ου δείγματος στερεού άλατος	371
Διάγραμμα 5-30: Κατά μάζα σύσταση 4ου δείγματος στερεού άλατος	373
Διάγραμμα 5-31: Κατά μάζα σύσταση 5 ^{ου} δείγματος στερεού άλατος.....	375
Διάγραμμα 5-32: Φάσμα EDS και SEM εικόνα στερεού δείγματος άλατος (x400 μεγέθυνση)	376
Διάγραμμα 5-33: Φάσμα EDS και SEM εικόνα έκτου δείγματος άλατος (x400 μεγέθυνση)	378

Διάγραμμα 5-34: Φάσμα EDS και SEM εικόνα έβδομου δείγματος άλατος (x400 μεγέθυνση)	380
Διάγραμμα 5-35: Διάγραμμα ροής μονάδας επεξεργασίας της άλμης πλήρους κλίμακας.....	394
Διάγραμμα 5-36: Κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας και θερμικής απόδοσης ανά μήνα ηλιακού πεδίου, σύστημα AQUASOL	396
Διάγραμμα 5-37: Θερμική απορροφώμενη ισχύς από τους ηλιακούς συλλέκτες, έργο AQUASOL.....	397
Διάγραμμα 5-38: Εκτιμώμενο κόστος καυσίμου συναρτήσει του αντίστοιχου κόστους εξοπλισμού ηλιακού πεδίου (υπόθεση: solar fraction 50%).....	397
Διάγραμμα 5-39: Ανάγκες θερμότητας ανά μήνα του έτους, ωφέλιμη θερμότητα από τον ήλιο και έλλειμα θερμικής ενέργειας για σύστημα πλήρους κλίμακας επεξεργασίας της άλμης	399
Διάγραμμα 5-40: Ενεργειακή αξιοποίηση και απορριπτόμενη θερμότητα στη βιομηχανία μεταποίησης της Αμερικής	401
Διάγραμμα 6-1: Αποτελέσματα θερμοδυναμικής μοντελοποίησης αύξησης του συντελεστή συγκέντρωσης με τη χρήση του λογισμικού PHREEQC.....	416
Διάγραμμα 6-2: Κατανάλωση χλωριούχου νατρίου στην Ευρώπη (2012)	425
Διάγραμμα 6-3: Μέσες τιμές πώλησης NaCl ανά τύπο, 2002-2012, ΗΠΑ.....	427
Διάγραμμα 6-4: Τιμή πώλησης NaCl συναρτήσει της καθαρότητας.....	427
Διάγραμμα 6-5: Στοιχεία για την παραγωγή και τις πωλήσεις ανθρακικού ασβεστίου στην Ελλάδα.....	430
Διάγραμμα 6-6: Ποσοστιαία συνεισφορά αλάτων στην οικονομική αξία 1m ³ άλμης για διάφορες τιμές πώλησης των αλάτων.....	433
Διάγραμμα 6-7: Μοναδιαίο κόστος επεξεργασίας και ανηγμένα καθαρά κέρδη (Σενάριο 1)	439
Διάγραμμα 6-8: Μοναδιαίο κόστος επεξεργασίας και ανηγμένα καθαρά κέρδη (Σενάριο 2)	439

Διάγραμμα 6-9: Μονάδες αφαλάτωσης, ανάλυση ανά τεχνολογία, Ελλάδα (2014).....	442
Διάγραμμα 6-10: Ελληνική αγορά αφαλάτωσης, κατάταξη σύμφωνα με το μέγεθος των μονάδων (πάνω αριστερά), με την τεχνική αφαλάτωσης (πάνω δεξιά), την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας (κάτω αριστερά) και τον τελικό χρήστη μονάδων αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού (κάτω δεξιά).....	443
Διάγραμμα 6-11: Εγκατεστημένη δυναμικότητα ανά τελικό χρήστη, Ελλάδα (2014).....	444
Διάγραμμα 6-12: Ανάλυση ελληνικής αγοράς αφαλάτωσης ανά τελικό χρήστη. Ανάλυση στις μονάδες υφάλμυρου νερού	445
Διάγραμμα 6-13: Ανάλυση μονάδων αφαλάτωσης ανά βιομηχανικό χρήστη, Ελλάδα	454
Διάγραμμα 6-14: Παραγωγή, εισαγωγή, εξαγωγή και κατανάλωση αλατιού στην Ελλάδα (2008-2012).....	463

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1-1: Εκτίμηση διαθεσιμότητας γλυκού και αλμυρού νερού σε παγκόσμιο επίπεδο	2
Σχήμα 1-2: Χρήσεις νερού στην Ανατολική, Δυτική και Νότια Ευρώπη.....	4
Σχήμα 1-3: Υδατικό ισοζύγιο (μονάδα: δισεκ. m ³), EU-27 (2008)	5
Σχήμα 1-4: Χωρική κατανομή του δείκτη ξηρασίας για την περίοδο 1991-2000, βάσει στοιχείων από μετεωρολογικούς σταθμούς.....	14
Σχήμα 1-5: Επαναχρησιμοποίηση νερού και δείκτης πίεσης νερού	19
Σχήμα 1-6: Ανανεώσιμο υδατικό δυναμικό ανά κάτοικο για τα διάφορα υδατικά διαμερίσματα στη Μεσόγειο (1995-2005).....	20
Σχήμα 1-7: Δείκτης λειψυδρίας και ανάπτυξη μονάδων αφαλάτωσης στη Μεσόγειο Θάλασσα	22
Σχήμα 2-1: Εξέλιξη εγκατεστημένης δυναμικότητας, πρόβλεψη μέχρι το 2050	25
Σχήμα 2-2: Χάρτης παγκόσμιας κατανομής της αλατότητας των επιφανειακών νερών των ωκεανών.....	29
Σχήμα 2-3: Καμπύλες διαλυτότητας ενώσεων στο νερό συναρτήσει της θερμοκρασίας	33
Σχήμα 2-4: Ταξινόμηση μεθόδων αφαλάτωσης	40
Σχήμα 2-5: Βιογεωχημικός κύκλος διαφόρων ιόντων	48
Σχήμα 2-6: Διάγραμμα ροής διύλισης αργού πετρελαίου	58
Σχήμα 3-1: Κεφαλαιουχικό κόστος μεθόδων διάθεσης της άλμης συναρτήσει του υδραυλικού φορτίου	72
Σχήμα 3-2: Τυπική σχηματική διάταξη έγχυσης άλμης σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς.....	77
Σχήμα 3-3: Σχηματική διάταξη πιλοτικής εφαρμογής έγχυσης άλμης, Friesland, Ολλανδία.....	80
Σχήμα 3-4: Διάγραμμα ροής ZLD, τύπου 1Α.....	91
Σχήμα 3-5: Διάγραμμα ροής ZLD, τύπου 1.2 (επάνω) και τύπου 2.2 (κάτω).....	92

Σχήμα 3-6: Διάγραμμα ροής, τύπου 3	93
Σχήμα 3-7: Εφαρμογές συστημάτων ZLD από την εταιρεία Veolia, παγκοσμίως.....	93
Σχήμα 3-8: Σχηματική αναπαράσταση εμβολιασμού με κρυστάλλους θειικού ασβεστίου για την αποφυγή καθυστερήσεων στους εναλλάκτες	102
Σχήμα 3-9: Σχηματική αναπαράσταση συμπυκνωτή άλμης.....	102
Σχήμα 3-10: Ισοζύγιο μάζας συστήματος ZLD, ορυχεία Debiensko, Πολωνία.....	104
Σχήμα 3-11: Διάγραμμα ροής συστήματος ZLD, ορυχεία Debiensko, Πολωνία.....	105
Σχήμα 4-1: Επιμέρους φάσεις σχεδιασμού.....	109
Σχήμα 4-2: Οργανόγραμμα φάσης αρχικού σχεδιασμού	111
Σχήμα 4-3: Καμπύλη διαλυτότητας NaCl	114
Σχήμα 4-4: Διάγραμμα ροής του συστήματος επεξεργασίας της παραγόμενης άλμης από μονάδες αφαλάτωσης	118
Σχήμα 4-5: Ουσίες και σωματίδια που κατακρατούνται ανά τεχνική αφαλάτωσης με μεμβράνες	119
Σχήμα 4-6: Φαινόμενο Όσμωσης και Αντίστροφης Όσμωσης.....	121
Σχήμα 4-7: Ασύμμετρες και σύνθετες μεμβράνες RO	123
Σχήμα 4-8: Τύποι διαμορφώσεων στοιχείων μεμβρανών	123
Σχήμα 4-9: Σχηματική αναπαράσταση συστήματος RO.....	127
Σχήμα 4-10: Προ-επεξεργασία, Αντίστροφη Όσμωση και Μετ-επεξεργασία	128
Σχήμα 4-11: Κελί ηλεκτροδιάλυσης	130
Σχήμα 4-12: Διάγραμμα ροής συστήματος Zero Discharge Desalination	135
Σχήμα 4-13: Σχηματική απεικόνιση δράσης ηλεκτροδιάλυσης, ZDD case study.....	136
Σχήμα 4-14: Διάταξη μεμβράνης και μεταφορά ιόντων, μέθοδος ηλεκτροδιάλυσης μετάθεσης.....	141
Σχήμα 4-15: Σχηματική αναπαράσταση διεργασίας ηλεκτροδιάλυσης μετάθεσης, εφαρμογή ZDD, Πανεπιστήμιο της Νότιας Καρολίνα.....	142
Σχήμα 4-16: Σχηματική αναπαράσταση διεργασίας MED.....	147
Σχήμα 4-17: Σχηματική αναπαράσταση μεθόδου MSF	152

Σχήμα 4-18: Σχηματική αναπαράσταση διατάξεων MSF-OT και MSF-BR.....	153
Σχήμα 4-19: Διάταξη Long Tube (επάνω σχήμα) και Cross Tube (κάτω σχήμα).....	154
Σχήμα 4-20: Σχηματική αναπαράσταση μεθόδου MVC	157
Σχήμα 4-21: Σχηματική αναπαράσταση τεχνικής BC.....	160
Σχήμα 4-22: Σχηματική αναπαράσταση κρυσταλλωτήρα εξαναγκασμένης ροής.....	160
Σχήμα 4-23: Επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας – τεχνολογία αφαλάτωσης με ψύξη/ευτηκτική κρυστάλλωση.....	162
Σχήμα 4-24: Συνδυασμός τεχνικών αφαλάτωσης με τεχνικές συλλογής Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ).....	165
Σχήμα 4-25: Ποσοστιαία συμμετοχή των τεχνολογιών RES-D στην παγκόσμια παραγωγή πόσιμου νερού με μονάδες αφαλάτωσης με ΑΠΕ.....	166
Σχήμα 4-26: Επίπεδο τεχνικής ανάπτυξης μεθόδων αφαλάτωσης με ΑΠΕ	167
Σχήμα 4-27: Απόδοση και κόστος των διάφορων φωτοβολταϊκών τεχνολογιών	182
Σχήμα 4-28: Τρόπος σύζευξης μία θερμικής τεχνικής με σταθμό ηλεκτροπαραγωγής (αριστερά) και τυπική μείωση της ισχύος ατμοστροβίλου με την αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης.	187
Σχήμα 4-29: Ωριμότητα και εφαρμογές διαφόρων τεχνολογιών απομάκρυνσης διαλυμένων στερεών.....	188
Σχήμα 4-30: Τελικό διάγραμμα ροής του συστήματος επεξεργασίας της παραγόμενης άλμης από μονάδες αφαλάτωσης.....	191
Σχήμα 4-31: Περιοχή εγκατάσταση πιλοτικής μονάδας επεξεργασίας της άλμης (Άγιος Φωκάς, Τήνος)	215
Σχήμα 4-32: Σχηματική αναπαράσταση και ρεύματα προς και από το δοχείο ατμού.....	223
Σχήμα 4-33: Παράδειγμα βιομηχανικού δοχείου ανάκτησης ατμού	225
Σχήμα 4-34: Δίκτυο θερμορροών για το δέκτη του ηλιακού συστήματος που χρησιμοποιήθηκε στην εφαρμογή	266
Σχήμα 4-35: Τελικό διάγραμμα ροής, φάση λεπτομερή σχεδιασμού	268

Σχήμα 5-1: Κάτοψη οικοπέδου, σύνδεση πιλοτικού με τη μονάδα αφαλάτωσης και κάτοψη πιλοτικού συστήματος.....	282
Σχήμα 5-2: Σχεδιασμός πειραματικών κύκλων	308
Σχήμα 5-3: Διαδικασία μέτρησης pH.....	310
Σχήμα 5-4: Διαδικασία μέτρησης αγωγιμότητας.....	314
Σχήμα 5-5: Διαδικασία μέτρησης Ολικών Διαλυμένων Στερεών διαλύματος.....	318
Σχήμα 5-6: Όρια ανίχνευσης (ng/g=ppb) φασματομετρίας ατομικής απορρόφησης με φλόγα, με φούρνο γραφίτη και επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος και ICP-MS της εταιρείας GBC Scientific. Η ακριβής ποσοτική ανάλυση απαιτεί συγκεντρώσεις 10-100 φορές μεγαλύτερες από το όριο ανίχνευσης.	326
Σχήμα 5-7: (α) Καυστήρας προ-ανάμειξης. (β) Άποψη του άκρου της φλόγας. Η σχισμή του καυστήρα έχει πλάτος περίπου 0.5mm (γ) Κατανομή του μεγέθους των σταγονιδίων που παράγονται από συγκεκριμένο εκνεφωτή	327
Σχήμα 5-8: Κατά μάζα σύσταση θαλασσινού νερού	359
Σχήμα 5-9: Επισκέψεις στην πιλοτική μονάδα στην Τήνο και φάσεις λειτουργίας.....	382
Σχήμα 5-10: Συνδυασμός συστήματος επεξεργασίας της άλμης με μονάδα ηλεκτροπαραγωγής για ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας.....	403
Σχήμα 5-11: Κάθετη ακτινοβολία σε kWh/m ² /χρόνο (2002).....	406
Σχήμα 5-12: Κριτήρια αποκλεισμού υποψήφιων θέσεων CSP στην περιοχή της Μεσογείου και της Βόρειας Αφρικής (MENA region)	408
Σχήμα 5-13: Χάρτης αποκλεισμού υποψήφιων θέσεων CSP, εστίαση στις χώρες της Ισπανίας και της Ιταλίας (με άσπρο επισημαίνονται οι περιοχές όπου είναι εφικτή η εγκατάσταση συστήματος CSP)	409
Σχήμα 6-1: Χημική σύσταση συμπυκνωμένης άλμης, εκροή εξατμιστήρα.....	413
Σχήμα 6-2: Καθίζηση αλάτων κατά την εξάτμιση του θαλασσινού νερού στους 25°C	415

Κατάλογος σχεδίων

Σχέδιο 4-1: Προκαταρκτικός σχεδιασμός εξατμιστήρα, διαστασιολόγηση εναλλακτών θερμότητας	254
Σχέδιο 4-2: Κρυσταλλωτήρας, προκαταρκτικό σχέδιο	255
Σχέδιο 4-3: Ξηραντήρας, προκαταρκτικό σχέδιο.....	256
Σχέδιο 4-4: Ηλιακό πεδίο PTC, προκαταρκτικό σχέδιο.....	257
Σχέδιο 4-5: Φωτοβολταϊκή γεννήτρια, προκαταρκτικό σχέδιο	258
Σχέδιο 4-6: Διάγραμμα ροής και ισοζύγιο ενέργειας, προκαταρκτικός σχεδιασμός	259
Σχέδιο 4-7: Σχεδίαση ηλιακού συστήματος κενού με χρήση AutoCAD	265
Σχέδιο 4-8: Τρισδιάστατη άποψη εξατμιστήρα, τελικό σχέδιο προτεινόμενο στον κατασκευαστή	269
Σχέδιο 4-9: Τελικό σχέδιο εξατμιστήρα, έπειτα από προσθήκες του κατασκευαστή, απεικόνιση δοχείων συλλογής συμπυκνωμένης άλμης και καθαρού (παραγόμενου) νερού.....	271
Σχέδιο 4-10: Πλάνο κατασκευής της πιλοτικής μονάδας επεξεργασίας της άλμης.....	273
Σχέδιο 5-1: Άποψη του συστήματος ελέγχου SCADA του πιλοτικού συστήματος	298
Σχέδιο 5-2: Διάταξη και διαστάσεις υποδομής στέγασης του πιλοτικού συστήματος	387
Σχέδιο 5-3: Σχέδιο λέβητα ανάκτησης θερμότητας από καυσαέρια.....	402

Κατάλογος μελετών περιπτώσεων

Case study 1: Λίμνη εξάτμισης, Eilat, Israel	84
Case study 2: Συμβατικό σύστημα ZLD με εφαρμογή σε ορυχείο, Debiensko, Πολωνία	100

Case study 3: Zero Discharge Desalination, εφαρμογή Ηλεκτροδιάλυσης / Ηλεκτροδιάλυσης Μετάθεσης (EDM), ΗΠΙΑ	134
Case study 4: Τεχνικά, λειτουργικά και οικονομικά χαρακτηριστικά 7 μελετών περίπτωσης αφαλατώσεων με ηλιακή ενέργεια	175

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Είναι κοινά αποδεκτό ότι η αφαλάτωση διαδραματίζει ήδη, και θα διαδραματίσει στο μέλλον ολοένα και σημαντικότερο ρόλο, για το υδατικό ισοζύγιο άνυδρων περιοχών όπως στη Μεσόγειο Θάλασσα. Στην Ελλάδα, παρατηρείται ότι μερικά υδατικά διαμερίσματα παρουσιάζουν ελλειμματικό υδατικό ισοζύγιο. Το πλέον ελλειμματικό ισοζύγιο εντοπίζεται στο υδατικό διαμέρισμα των νήσων Αιγαίου. Στα νησιά αυτά πολλές φορές είναι απαραίτητη η χρήση πολύ δαπανηρών πρακτικών για την κάλυψη των αναγκών σε νερό, όπως με μεταφορά νερού με υδροφόρα πλοία. Για την ασφαλέστερη και οικονομικότερη παραγωγή νερού, σήμερα χρησιμοποιούνται σε πολλά από τα νησιά αυτά μονάδες αφαλάτωσης. Η αφαλάτωση, ως μία διεργασία που απομακρύνει άλατα από το θαλασσινό (ή υφάλμυρο) νερό, αναπόφευκτα παράγει υγρά απόβλητα που είναι σχεδόν διπλάσιας αλατότητας από το θαλασσινό νερό. Το απόβλητο αυτό λέγεται άλμη και μπορεί να προκαλέσει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αν δεν διαχειριστεί με το σωστό τρόπο.

Σήμερα οι τρόποι διαχείρισης αυτού του αποβλήτου περιλαμβάνει τις ακόλουθες πέντε (5) τεχνικές: (α) Διάθεση σε επιφανειακά νερά (*Surface Water Discharge*), (β) Διάθεση σε συστήματα αποχέτευσης (*Sewer Discharge*), (γ) Έγχυση σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς (*Deep Well Injection*), (δ) Λίμνες εξάτμισης (*Evaporation Ponds*), (ε) Άρδευση, αναφέρεται συχνά και ως διάθεση στο έδαφος (*Land Application*). Κάθε τεχνική προκαλεί, σε διαφορετικό βαθμό, περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Στόχος αυτής της διδακτορικής διατριβής είναι ο σχεδιασμός ενός συστήματος, ο οποίος θα είναι σύμφωνος με την αρχή των μηδενικών υγρών αποβλήτων (*Zero Liquid Discharge, ZLD*). Το σύστημα αυτό έχει διττό στόχο: (α) να εξαλείψει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τη διάθεση της άλμης στο περιβάλλον και (β) να εξετάσει τη δυνατότητα αξιοποίησης της άλμης.

Στη διατριβή αυτή, έχοντας αρχικά μελετήσει τα συστήματα ZLD, πραγματοποιείται ο σχεδιασμός ενός καινοτόμου συστήματος επεξεργασίας της άλμης σε τρία στάδια: (α) αρχικός σχεδιασμός, (β) προκαταρκτικός σχεδιασμός και (γ) αναλυτικός σχεδιασμός. Το κάθε στάδιο σχεδιασμού έχει τους δικούς του στόχους και μεθοδολογία, με τον αρχικό σχεδιασμό να στοχεύει στην επιλογή του διαγράμματος ροής, τον προκαταρκτικό σχεδιασμό στην διαστασιολόγηση των επιμέρους συνιστωσών και τον τελικό σχεδιασμό στην ανάπτυξη κατασκευαστικών σχεδίων. Η κλίμακα του συστήματος επεξεργασίας της άλμης που σχεδιάστηκε ήταν πιλοτική (2

m³/ημέρα). Το πιλοτικό σύστημα αποτελείται από τρεις (3) συνιστώσες: (α) τον εξατμιστήρα, (β) τον κρυσταλλωτήρα και (γ) τον ξηραντήρα. Η ενέργεια του συστήματος προσφέρεται από ηλιακή ενέργεια, με τη χρήση ηλιακών συλλεκτών κενού.

Μετά το σχεδιασμό του, ακολούθησε η κατασκευή, εγκατάσταση και η start-up λειτουργία του πιλοτικού συστήματος. Η πιλοτική μονάδα κατασκευάστηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού Ευρωπαϊκού Έργου SOL-BRINE ([LIFE09 ENV/GR/000299](#)). Εγκαταστάθηκε σε μονάδα αφαλάτωσης στην περιοχή του Αγίου Φωκά, στην Τήνο. Η λειτουργία και βελτιστοποίηση του συστήματος διήρκεσε 1 χρόνο. Για τη βελτιστοποίηση του συστήματος, πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές πειραματικών κύκλων, σύμφωνα με το πρωτόκολλο πειραμάτων που εκπονήθηκε. Έτσι, λήφθηκαν τόσο υγρά όσο και στερεά δείγματα από τα διάφορα στάδια επεξεργασίας, καθώς επίσης και από την εκροή και την τροφοδοσία της παρακείμενης μονάδας αφαλάτωσης. Τα δείγματα αυτά μεταφέρθηκαν στην Μονάδα Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας, όπου αναλύθηκαν με τη χρήση κατάλληλου αναλυτικού εξοπλισμού (ICP, ICP-MS, Φωτόμετρο, Αγωγιμόμετρο, XRD, SEM-EDS).

Από τις μετρήσεις και με χρήση επίσης της διεθνούς βιβλιογραφίας εκτιμήθηκε η οικονομική αξία της άλμης που παράγεται από μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού. Η οικονομική αξία αυτή εκτιμήθηκε στη βάση των προϊόντων που ανακτήθηκαν κατά τη λειτουργία του πιλοτικού συστήματος (αποσταγμένο νερό) και στη δυνατότητα ανάκτησης (μελλοντικά) άλατα υψηλής καθαρότητας. Η γνώση της οικονομικής αξίας 1 m³ άλμης ήταν καταλυτικής σημασίας για την εκπόνηση μελέτης σκοπιμότητας ανάπτυξης του συστήματος σε μεγαλύτερη κλίμακα (100 m³/ημέρα). Έτσι, έχοντας διατυπώσει προτάσεις ανάπτυξης του συστήματος σε μεγάλη κλίμακα, εκτιμάται το κόστος επεξεργασίας της άλμης, λαμβάνοντας υπόψη τόσο το κόστος επένδυσης, όσο και το αναμενόμενο κόστος λειτουργίας. Το κόστος αυτό ανήχθηκε ανά m³ άλμης. Συγκρίνοντας το κόστος επεξεργασίας με την οικονομική αξία 1 m³ άλμης, εξάγονται σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τη σκοπιμότητα υλοποίησης ενός συστήματος επεξεργασίας της άλμης σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Τέλος, αποτυπώνεται η αγορά των αλάτων, του νερού και της αφαλάτωσης, με στόχο τον προσδιορισμό κατάλληλων ευκαιριών υλοποίησης μίας πιθανής εμπορικής εφαρμογής στην Ελλάδα.

SUMMARY

Desalination is increasingly playing a crucial role in balancing the water needs of water deficient areas, such as the Mediterranean Sea. In Greece, there are water basins which do not have sufficient water resources to cover local needs, with the islands of the Aegean being the most water scarce. In these islands, it is often required to employ costly water supply practices such as transportation of water with ships from the mainland of Greece (or from neighbouring islands). Today, more and more Greek islands turn to desalination to secure a stable and cost-efficient water supply. However, even though desalination comprises one of the most promising solutions to water shortage, it raises high environmental concerns, especially due to the saline impaired wastewater generated, called brine. This effluent is twice as salty as seawater and causes environmental degradation, if not managed properly.

Today, five (5) practices are applied to manage this effluent: (a) Surface Water Discharge, (b) Sewer Discharge, (c) Deep Well Injection, (d) Evaporation Ponds and (e) Land application. Each of these practices involves different environmental risks and has different impacts. The main objective of this dissertation is to design an innovative system, in line with the Zero Liquid Discharge principle, that will be able to: (a) eliminate the environmental impacts associated with brine; and (b) make value out of desalination brine.

After having reviewed the ZLD systems applied today, the innovative system is designed following a three-step design procedure: (a) conceptual design; (b) preliminary design; and (c) detailed design. The conceptual design aimed at identifying the process flow diagram, determining the process operation units. The preliminary design involved the sizing of the components and the detailed design the development of engineering drawings. The scale of the system was 2m³/day (pilot scale). The pilot brine treatment system comprises three (3) treatment steps: (a) the evaporator; (b) the crystallizer; and (c) the dryer unit. The evaporator comprises a customized Multiple Effect Distillation (MED), forward-feed design to reflect the specific needs for the application. The energy requirements of the system are provided through solar energy.

After the completion of the design stage, the construction, installation and start-up operation of the pilot system followed. The pilot system was developed in the

framework of the EU funded project with the acronym SOL-BRINE ([LIFE09 ENV/GR/000299](#)). The system was installed at the site of an existing desalination plant in the area of Agios Fokas, in Tinos Island, Greece. It was operated for approximately 1 year. With the aim to optimize its performance and assess its results, three series of experiments were conducted, according to the experimental protocol developed. Both liquid and water samples were collected from different stages of the brine treatment process and from the feed and exit streams of the desalination plant. The samples were transported to the Unit of Environmental Science and Technology ([UEST](#)) which belongs to the School of Chemical Engineering of the National Technical University of Athens. The samples were analysed with the use of suitable analytical equipment such as ICP, ICP-MS, photometer, Conductivity meter, XRD, SEM-EDS etc. The quality of the water recovered is close to distillate (TDS ~ 50 ppm), while the salts are recovered mixed, requiring therefore further treatment to recover purified salt products.

From the laboratory results, the seawater desalination brine was then valorised. The value of 1 m³ of brine was determined on the basis of the product recovered with the use of the pilot brine treatment system (mainly distillate water) and also by making coherent assumptions of the potential to recover high purity salts (in the future). The determination of the value of brine was key for performing a feasibility study for the development of the brine treatment system at industrial scale (100 m³/day). Also, after having made suggestions for the development of the system at full-scale, the brine treatment cost was determined. The suggestions for the full-scale implementation involve two different scenarios: (a) hybrid solar powered system; and (b) recovery of waste heat. For both scenarios both CAPEX and OPEX cost parameters were estimated. Then the economic value and the treatment cost of 1 m³ were compared, provided critical insights for investigating the feasibility of developing the brine treatment system at larger scale. The results from the feasibility study suggest an economic value of 5.8€ per seawater desalination brine, while the treatment cost is estimated at 2.7€ per m³ and 3.7€ per m³ for the 1st and 2nd scenario respectively. This suggests that both scenarios seem to be economically viable.

Finally, the water and salt markets are recorded and analysed with the view to determine suitable market opportunities to develop the system at full-scale in Greece.

Συντομογραφίες

AHP	Analytic Hierarchy Process
CA	Cellulose Acetate
CAPEX	Capital Expenditure
CF	Concentration Factor
CRF	Capital Recovery Factor
CSP	Concentrated Solar Power
DAF	Dissolved Air Flotation
ED	Electrodialysis
EDR	Electrodialysis Reversal
EDM	Electrodialysis Metathesis
ETC	Evacuated Tube Collector
GOR	Gain Output Ratio
IDA	International Desalination Association
IX	Ion eXchange
MED	Multiple-Effect Distillation
MENA	Middle-East and North Africa
MF	Micro-filtration
MSF	Multi-Stage Flash distillation
MVC	Mechanical Vapor Compression
NF	Nano-filtration
OPEX	Operating Expenditure
PTC	Parabolic Trough Collector
PV	Photovoltaics
RO	Reverse Osmosis
TBT	Top Brine Temperature
TDS	Total Dissolved Solids

TVC	Thermal Vapor Compression
VC	Vapor Compression
WFI	Water For Injection
UF	Ultra-filtration
ZLD	Zero Liquid Discharge

1 Εισαγωγή

Η διαθεσιμότητα πόσιμου νερού ήδη βρίσκεται υπό πίεση και αναμένεται πως θα οξυνθεί τόσο από το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής όσο και από την αύξηση του πληθυσμού. Η αφαλάτωση αναγνωρίζεται ως μία πολλά υποσχόμενη λύση για την καταπολέμηση αυτής της επερχόμενης πρόκλησης (Ξεύγενο, Μιχαηλίδης, Δημόπουλος, & Λοϊζίδου, 2013). Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το πρόβλημα της λειψυδρίας και ο ρόλος της αφαλάτωσης στην επίλυση αυτού του προβλήματος. Γίνεται αναφορά στο υδατικό ισοζύγιο, παρέχοντας πληροφορίες για τη διαθεσιμότητα και τις χρήσεις νερού τόσο σε επίπεδο Ευρώπης όσο και ιδιαίτερα για την Ελλάδα.

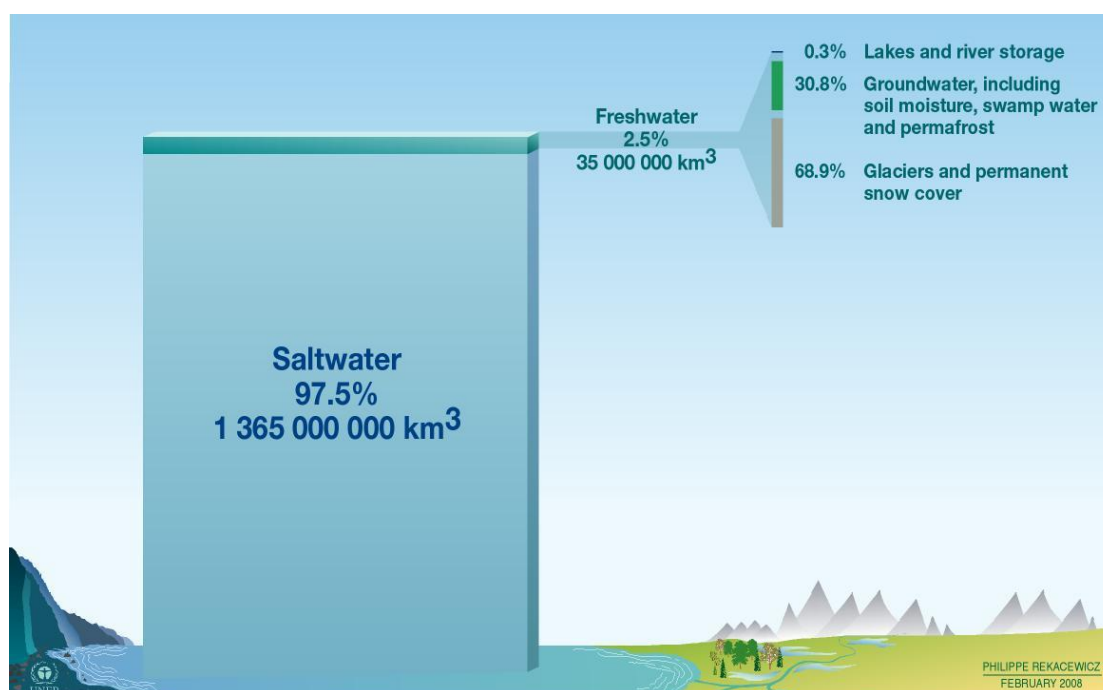
Από την ανάλυση προκύπτει ότι μερικά υδατικά διαμερίσματα της Ελλάδας παρουσιάζουν ελλειμματικό υδατικό ισοζύγιο. Το πλέον ελλειμματικό ισοζύγιο για την περίπτωση της Ελλάδας εντοπίζεται στο υδατικό διαμέρισμα των νήσων Αιγαίου. Έχοντας αναφέρει σύντομα τις αιτίες του φαινομένου αυτού, δίνονται πληροφορίες για τις λύσεις που μπορούν να ακολουθηθούν που περιλαμβάνουν: (α) χρήση υπόγειων υδάτων, (β) κατασκευή φραγμάτων, (γ) επαναχρησιμοποίηση νερού, (δ) μεταφορά νερού με υδροφόρα πλοία και (ε) αφαλάτωση. Από τις επιλογές αυτές, προκύπτει πως η αφαλάτωση διαδραματίζει ιδιαίτερο ρόλο για τα άνυδρα νησιά. Ο ρόλος της αφαλάτωσης γενικεύεται επίσης για την περιοχή της Μεσογείου θάλασσας. Η ανάλυση αυτή, θέτει τα θεμέλια για την κατανόηση της σημασίας της εν λόγω διδακτορικής διατριβής, δεδομένου του κρίσιμου ρόλου που αναμένεται πως θα διαδραματίσει η αφαλάτωση για την επίλυση του προβλήματος της λειψυδρίας. Η διδακτορική αυτή διατριβή αντιμετωπίζει το περιβαλλοντικό πρόβλημα της διαχείρισης της άλμης που παράγεται ως παραπροϊόν από την λειτουργία των μονάδων αφαλάτωσης, όπως αναλύεται σε επόμενα κεφάλαια της Διατριβής.

1.1 Διαθεσιμότητα νερού

Τα συνολικά παγκόσμια αποθέματα νερού εκτιμώνται περίπου σε 1.4 δισ. km^3 (βλ. Σχήμα 1-1), εκ των οποίων:

- το 97.5% είναι αλμυρό και συνεπώς ακατάλληλο για τις περισσότερες ανθρώπινες δραστηριότητες και χρήσεις.
- το 2.5% (35 εκ. km^3 σε ετήσια βάση) αποτελεί το γλυκό νερό και από αυτό το μεγαλύτερο μέρος του είναι πάγοι και παγετώνες.

Τελικά, ποσοστό περίπου 0.65% βρίσκεται σε υγρή κατάσταση, ενώ από την ποσότητα αυτή ένα τμήμα χρησιμοποιείται από το ίδιο το περιβάλλον για την πραγματοποίηση οικολογικών διεργασιών και διαδικασιών. Ένα άλλο σημαντικό τμήμα είναι μη τεχνικώς αξιοποιήσιμο, οδηγώντας σε μία ετήσια διαθέσιμη ποσότητα γλυκού νερού παγκοσμίως ίση μόλις προς 4,200 km^3 (ποσοστό: 0.0003%) (Douglas, 2009).



Πηγή: <http://www.unep.org/dewa/vitalwater/jpg/0101-water-quantity-EN-2.jpg>

Σχήμα 1-1: Εκτίμηση διαθεσιμότητας γλυκού και αλμυρού νερού σε παγκόσμιο επίπεδο

Η διαθεσιμότητα του νερού ποικίλει από χώρα σε χώρα και πολλές φορές από περιοχή σε περιοχή. Το νερό ακολουθεί τον υδρολογικό κύκλο: μετά την εξάτμισή του από το νερό της θάλασσας ή των λιμνών, ποταμών κ.λπ., επιστρέφει μέσω των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων (βροχή, χιόνι) στην γη, ακολουθώντας μία κυκλική

πορεία. Αν και σε αυτή την κυκλική διαδρομή δεν χάνεται ούτε προστίθεται ποσότητα νερού, η κατανομή του νερού γίνεται με μη κανονικό τρόπο, τόσο χωρικά όσο και χρονικά.

Έτσι, παρατηρείται το φαινόμενο της κατανομής του νερού κατά 72% στις χώρες της Ευρώπης (Ισπανία, Γαλλία, Ιταλία, Βοσνία, Κροατία, Σερβία, Σλοβενία, Πρώην Γιουγκοσλαβική Δημοκρατία της Μακεδονίας, Αλβανία και Ελλάδα) ενώ μόλις το 23% στις νοτιο-ανατολικές χώρες της λεκάνης της Μεσογείου Τουρκία, Κύπρος, Λίβανος, Συρία, Αίγυπτος, Λιβύη, Τυνησία, Μαρόκο και Αλγερία) (Παρανυχιανάκης, Κοτσελίδου, Βαρδάκου, & Αγγελάκης, 2009).

1.1.1 Πηγές νερού

Οι πηγές του νερού μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες δύο (2) κατηγορίες (Gikas & Angelakis, *Water resources management in Crete and in the Aegean Islands, with emphasis on the utilization of non-conventional water resources*, 2009):

- **Συμβατικές πηγές:** συγκαταλέγονται η χρήση του επιφανειακού γλυκού νερού (ποτάμια) και του υπόγειου νερού.
- **Μη συμβατικές πηγές:** συγκαταλέγονται η αφαλάτωση του νερού από το θαλασσίνο νερό, η συλλογή των ομβρίων, τα φράγματα καθώς και η επαναχρησιμοποίηση του νερού

Ακριβής ορισμός τόσο των συμβατικών όσο και των μη συμβατικών αυτών πηγών δίνεται στο *"Review of World Water Resources by Country"* (FAO, 2003). Το άθροισμα και των δύο πηγών νερού δίνει τη συνολική διαθεσιμότητα νερού προς χρήση. Η ποσότητα αυτή χρησιμοποιείται για τα υδατικά ισοζύγια. Σε μία ολοκληρωμένη σχεδιασμό διαχείρισης των υδάτων, το υδατικό αυτό ισοζύγιο πρέπει να είναι θετικό και έτσι να ισοσκελίζονται η πηγή με την κατανάλωση του νερού. Ακολούθως παρουσιάζονται οι διαφορετικές χρήσεις του νερού.

1.1.2 Χρήσεις νερού

Ενώ στις αναπτυγμένες χώρες η κατανάλωση νερού παρουσιάζει σταθερή και σημαντική αύξηση με το χρόνο, τα υδάτινα αποθέματα της γης είναι αυστηρώς περιορισμένα. Οι χρήσεις αυτές περιλαμβάνουν τις ακόλουθες:

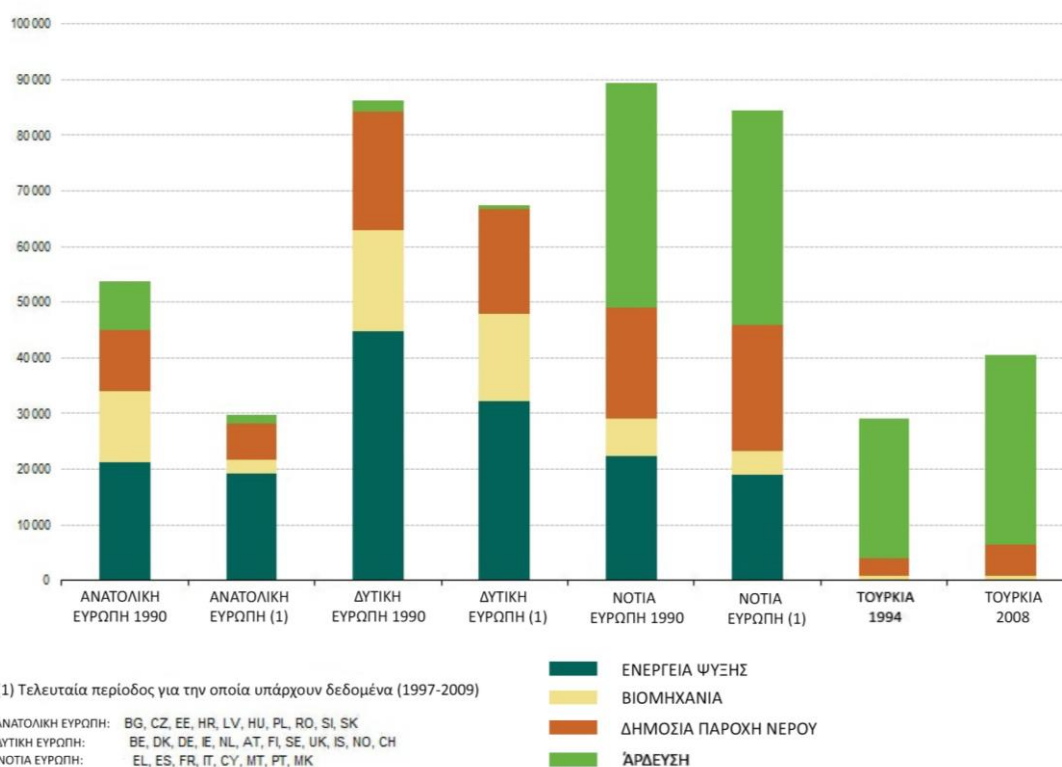
- Άρδευση

- Ύδρευση
- Βιομηχανία
- Λοιπές

Οι χρήσεις αυτές διαφέρουν σημαντικά ανά χώρα:

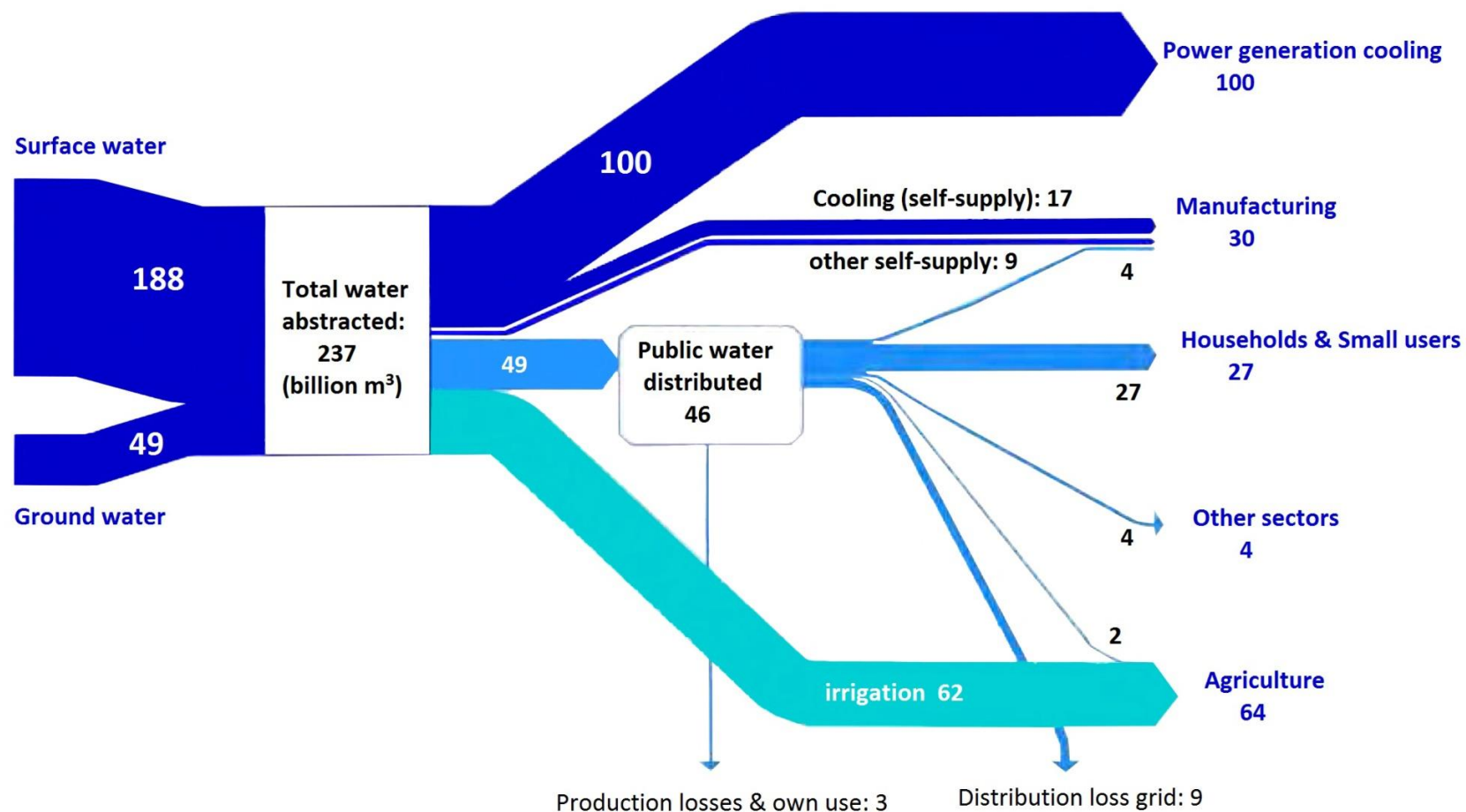
- Στο Σχήμα 1-3 δίνεται το υδατικό ισοζύγιο για το σύνολο της Ευρώπης
- Στο Σχήμα 1-2 δίνονται οι χρήσεις νερού για τη Δυτική, Ανατολική και Νότια Ευρώπη

Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει διαφοροποίηση της έννοιας "άντλησης νερού" ("water abstraction") και "χρήσης νερού" ("water use"). Για την πληρέστερη κατανόηση των εννοιών δίνεται ως παράδειγμα η χρήση και άντληση νερού για την περίπτωση του Βελγίου (Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.).



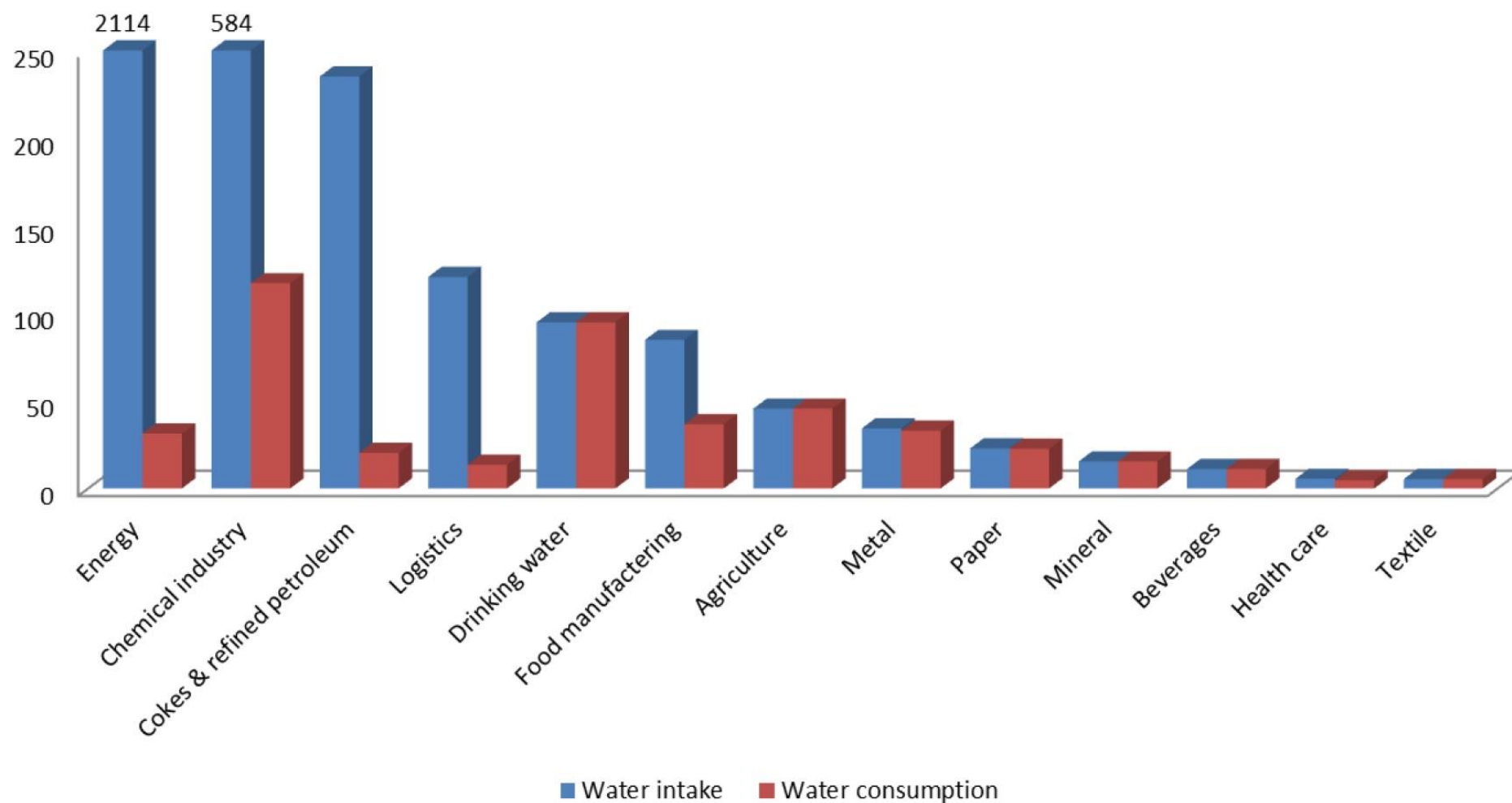
Προσαρμοσμένο από: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agri-environmental_indicator_-_water_abstraction)

Σχήμα 1-2: Χρήσεις νερού στην Ανατολική, Δυτική και Νότια Ευρώπη



Προσαρμοσμένο από: (Biermann, 2014)

Σχήμα 1-3: Υδατικό ισοζύγιο (μονάδα: δισεκ. m³), EU-27 (2008)



Πηγή: (Halet & Stede, 2015)

Διάγραμμα 1-1: Αντληση και χρήση νερού ανά τομέα, Βέλγιο (2012)

1.2 Πρόβλημα λειψυδρίας

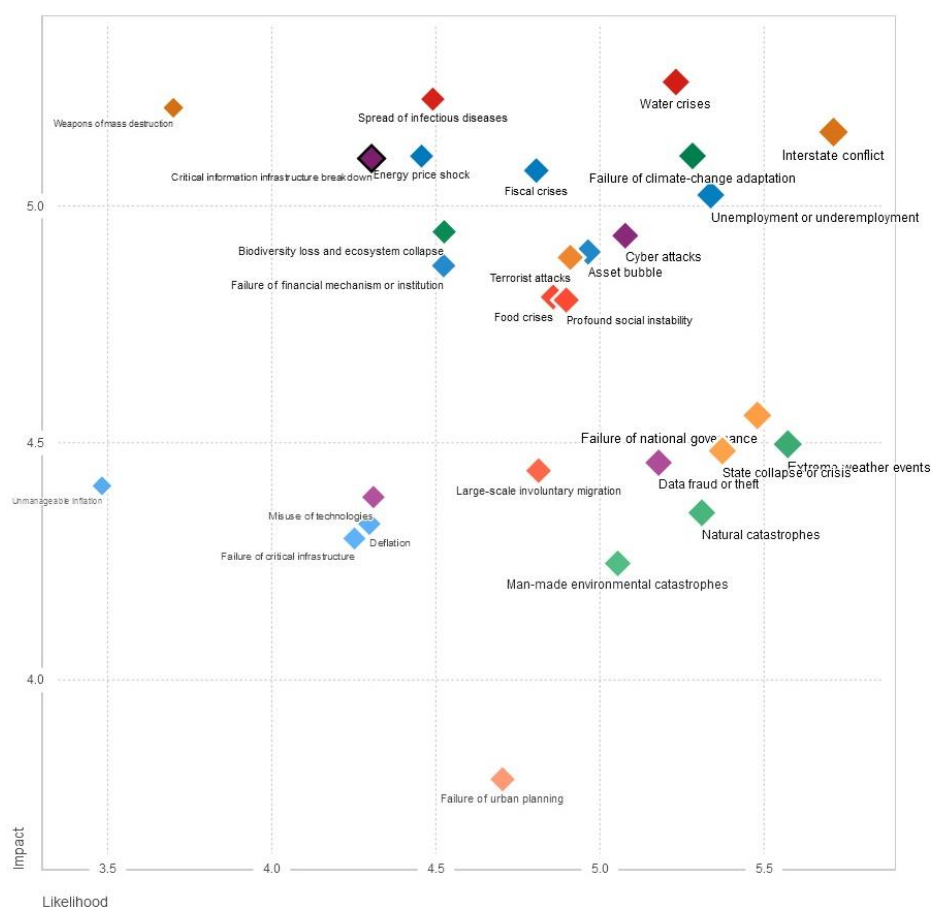
Σύμφωνα με στοιχεία από πρόσφατες μελέτες, η ισορροπία μεταξύ διαθεσιμότητας και ζήτησης βρίσκεται ήδη υπό πίεση και εκτιμάται ότι η κατανάλωση σύντομα θα υπερβεί κατά πολύ τα διαθέσιμα υδάτινα αποθέματα. Διάφορα μοντέλα πρόβλεψης έχουν αναπτυχθεί για την ποσοτικοποίηση του μεγέθους της επικείμενης κρίσης νερού. Χαρακτηριστικά, σύμφωνα με μελέτη του 2009 (FAO, 2009), αναμένεται πως η ετήσια παγκόσμια κατανάλωση θα αυξηθεί από 4,500 km³ (4,500 δισ. m³) στα 6,900 km³ (6,900 δισ. m³) το 2030 (ποσοστό αύξησης: 53.3%), επιφέροντας έτσι έλλειμμα μεταξύ διαθεσιμότητας και ζήτησης ίσο προς 40%. Μία πρόσφατα δημοσιευμένη μελέτη, διερευνά επίσης τις οικονομικές επιπτώσεις από ενδεχόμενο περιορισμένη πρόσβαση σε υδατικά αποθέματα. Για το σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε ο δείκτης "κρίσιμότητας νερού" (water criticality), ο οποίος υποστηρίζεται ότι αντανakλά περισσότερο την οπτική του τελικού χρήστη νερού σε αντίθεση με τα άλλα εργαλεία όπως το LCA και το Water Footprint, τα οποία αποτιμούν τη χρήση νερού ανά παραγόμενο προϊόν ή υπηρεσίας και τελικά αποτιμούν τις επιπτώσεις στο περιβάλλον (Sonderegger, Pfister, & Hellweg, 2015).

Το 2011 και το 2012 μεγάλα τμήματα της Νότιας, Δυτικής ακόμη και της Βόρειας Ευρώπης υπέστησαν περιόδους ξηρασίας. Η ξηρασία του 2011 έχει χαρακτηριστεί ως η χειρότερη ξηρασία εδώ και έναν αιώνα, με το ύψος της βροχόπτωσης να είναι μειωμένο κατά 40% από τις φυσιολογικές τιμές. Στα δύο αυτά έτη, η διαθεσιμότητα του νερού μειώθηκε κατά τους μήνες της άνοιξης, ενώ πολλές χώρες αναγκάστηκαν να εφαρμόσουν μέτρα περιορισμού της χρήσης νερού. Κατά τα τελευταία 30 χρόνια, τα φαινόμενα της ξηρασίας έχουν αυξηθεί δραματικά τόσο σε συχνότητα όσο και στο βαθμό των επιπτώσεων που προκαλούν. Μεταξύ του 1976 και του 2006, ο αριθμός των περιοχών που πλήττονται από ξηρασία έχει αυξηθεί κατά 20%, ενώ η οικονομική ζημία που προκαλείται από τις ξηρασίες εκτιμάται στα 100 δις € (European Commission, 2012).

Το 2007, τουλάχιστον το 11% του πληθυσμού της Ευρώπης και 17% των περιοχών της Ευρώπης αντιμετώπισαν φαινόμενα ξηρασίας, ενώ το φαινόμενο χειροτερεύει. Η ανοδική αυτή τάση εμφάνισης φαινομένων ξηρασίας παραμένει σταθερή, με μελέτες να προβλέπουν ότι οι υδατικές λεκάνες που θα αντιμετωπίζουν λειψυδρία (water stress) θα αυξηθούν κατά 50% (European Commission, 2012).

Σύμφωνα με μελέτη της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (2012), τα κράτη μέλη αποδίδουν ως αίτια των φαινομένων λειψυδρίας, την ξηρασία (μείωση βροχόπτωσης, άνιση κατανομή), ενώ 40% των κρατών μελών αναφέρει επίσης και την υπερεξάντληση των διαθέσιμων πόρων από τους διάφορους καταναλωτές. Το World Economic Forum τοποθέτησε το πρόβλημα του νερού στην κορυφή της λίστας (βλ. Διάγραμμα 1-2) με τα παγκόσμιους κινδύνους που πρέπει να αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα σε παγκόσμιο επίπεδο (World Economic Forum, 2015).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, καθίσταται σαφής η ανάγκη ανάπτυξης μίας συνολικής, ολοκληρωμένης πολιτικής αντιμετώπισης της επερχόμενης κρίσης στη διαθεσιμότητα πόσιμου νερού. Είναι πλέον κοινά αποδεκτό ότι μία τέτοια προσέγγιση πρέπει να είναι σύμφωνη με τις αρχές της αειφορίας και ότι μπορεί να επιτευχθεί μόνο εάν χρησιμοποιηθούν μέτρα παραγωγής νερού με μη συμβατικούς τρόπους (Gikas & Angelakis, 2009). Τα μέτρα αυτά αφορούν κυρίως την αφαλάτωση νερού και έπειτα την επαναχρησιμοποίηση του νερού και τη συλλογή βρόχινου νερού.



Πηγή: (World Economic Forum, 2015)

Διάγραμμα 1-2: Βαθμολόγηση πιθανότητας και μεγέθους επιπτώσεων από την πραγματοποίηση κινδύνων παγκοσμίως,

1.3 Η περίπτωση της Ελλάδας

Η Ελλάδα χωρίζεται σε 14 περιοχές υδατικών λεκανών απορροής (Water River Basins) ή όπως λέγονται διαφορετικά υδατικά διαμερίσματα και χαρακτηρίζεται από: (α) έντονο ανάγλυφο, (β) περιορισμένη ενδοχώρα, (γ) μεγάλο ανάπτυγμα ακτών.

1.3.1 Διαθεσιμότητα νερού

Για το σύνολο της χώρας τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα εκτιμώνται σε 116,330 $\text{hm}^3/\text{έτος}$, ενώ το συνολικό υδατικό δυναμικό εκτιμάται κατά προσέγγιση σε 57,100 $\text{hm}^3/\text{έτος}$, στα οποία περιλαμβάνονται τα νερά που εισρέουν από γειτονικές χώρες (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2007). Παρατηρείται έντονη χωρική και εποχιακή ανισοκατανομή των κατακρημνισμάτων, με τις περισσότερες περιοχές στην ενδοχώρα να έχουν πλούσια αποθέματα νερού και με το νησιωτικό χώρο να είναι σε πολλές περιπτώσεις άνυδρος (Σχήμα 1-4).

1.3.2 Κατανάλωση νερού

Η μέση ετήσια κατανάλωση νερού στην Ελλάδα ανέρχεται στα 8,242.8 εκατομμύρια m^3 (2010) για τις ακόλουθες χρήσεις:

- Άρδευση: 84.2% (~6,939 εκ. $\text{m}^3/\text{χρόνο}$)
- Ύδρευση: 12.7% (~1,046 εκ. $\text{m}^3/\text{χρόνο}$)
- Βιομηχανική χρήση: 1.9% (~158 εκ. $\text{m}^3/\text{χρόνο}$).

Στο ακόλουθο διάγραμμα δίνονται τα επιμέρους ποσοστά ανά υδατικό διαμέρισμα και χρήση. Μεγάλη διαφοροποίηση από τις χρήσεις νερού παρατηρείται στην Αττικής, όπου η ύδρευση αποτελεί το μεγαλύτερο τελικό χρήστη νερού, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα υδατικά διαμερίσματα της Ελλάδας, όπου κυριαρχεί η χρήση νερού για άρδευση.

Αναφορικά με τη βιομηχανική χρήση, το μεγαλύτερο ποσοστό του βιομηχανικού νερού καταναλώνεται στη Κεντρική Μακεδονία (50.6%), ακολουθούμενο από τη Δυτική Μακεδονία (19%) και την Αττική (11.1%). Τα στοιχεία αυτά θα αξιοποιηθούν στη συνέχεια στην Ενότητα 6.4, όπου αξιολογούνται οι δυνατότητες εμπορικής εφαρμογής του συστήματος επεξεργασίας της άλμης, που σχεδιάστηκε στα πλαίσια αυτής της διδακτορικής διατριβής.

1.3.3 Υδατικό ισοζύγιο

Η προσφορά και η ζήτηση νερού δίνεται στον Πίνακα 1-1 ανά υδατικό διαμέρισμα.

Πίνακας 1-1: Προσφορά και ζήτηση νερού, ανά υδατικό διαμέρισμα της Ελλάδας (2003)

Υδατικά διαμερίσματα	Προσφορά hm ³	Ζήτηση hm ³	Παρατηρήσεις
01 Δυτικής Πελοποννήσου	73	55	Πλεον/κό
02 Βόρειας Πελοποννήσου	122	104	Πλεον/κό
03 Ανατολικής Πελοποννήσου	56	67	Ελλειμ/κο
04 Δυτικής Στερεάς Ελλάδας	415	82	Πλεον/κό
05 Ηπείρου	193	33	Πλεον/κό
06 Αττικής	56	54	Οριακά Πλεον/κό ⁽¹⁾
07 Ανατ. Στερεάς Ελλάδας	128	187	Ελλειμ/κο (2)
08 Θεσσαλίας	210	335	Ελλειμ/κο
09 Δυτικής Μακεδονίας	159	136	Πλεον/κό
10 Κεντρικής Μακεδονίας	137	130	Οριακά Πλεον/κό
11 Ανατολικής Μακεδονίας	354	132	Πλεον/κό
12 Θράκης	424	253	Πλεον/κό
13 Κρήτης	130	133	Οριακά Ελλειμ/κό ⁽³⁾
14 Νήσων Αιγαίου	7	25	Ελλειμ/κο
Σύνολο χώρας	2,464	1,726	Πλεον/κό

Πηγή: (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2007)

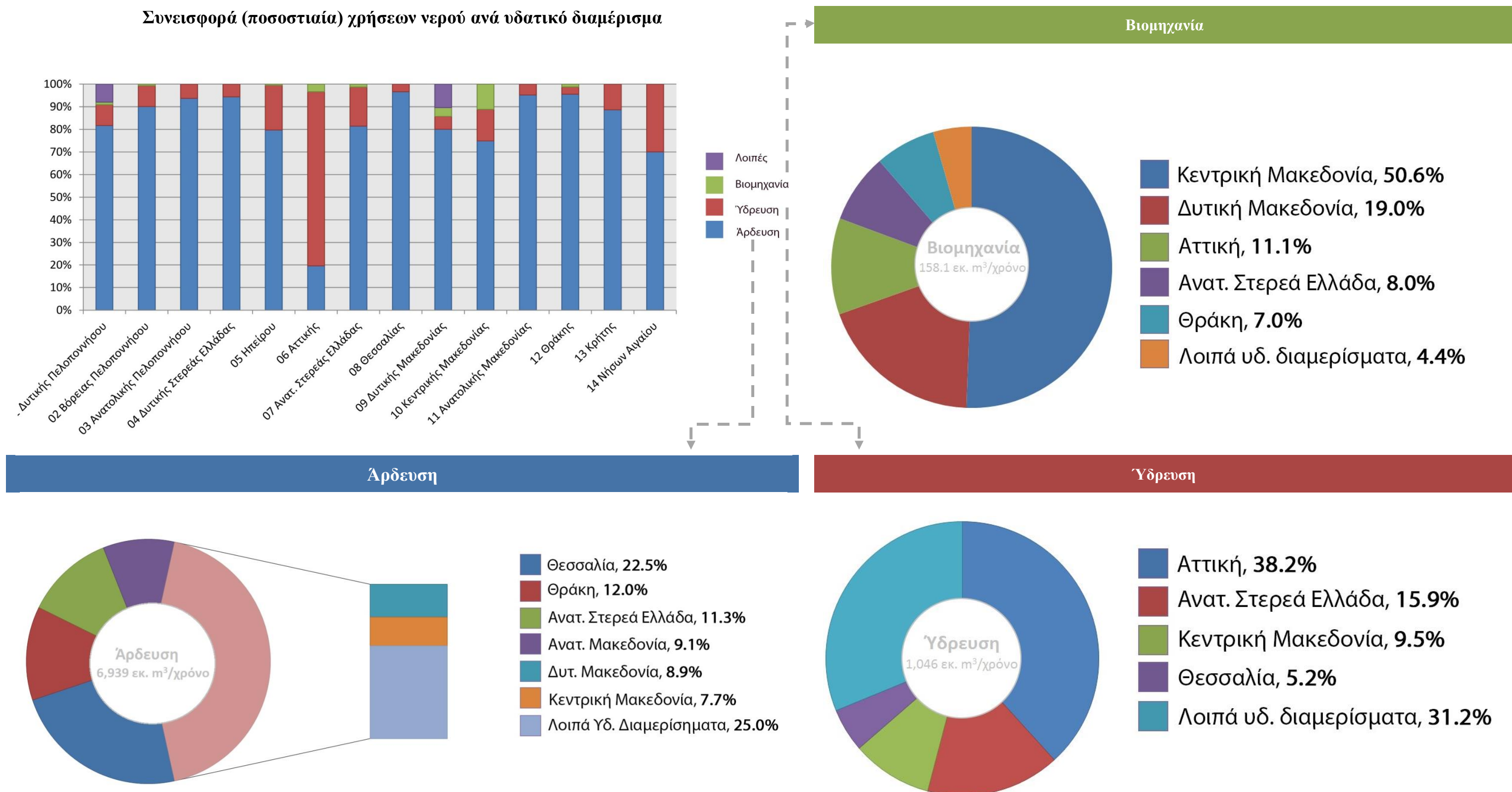
- Σημειώσεις:
- (1) Οι υδατικοί πόροι είναι κατά βάση μεταφερόμενοι από γειτονικά διαμερίσματα
 - (2) Οι αρδευόμενες εκτάσεις κατά ΕΣΥΕ φαίνονται υπερεκτιμημένες και γι' αυτό, το διαμέρισμα, ενώ έχει σήμερα οριακά επαρκείς πόρους, εμφανίζεται ως έντονα ελλειμματικό.
 - (3) Σήμερα, η ζήτηση καλύπτεται πλημμελώς κυρίως από πηγές και γεωτρήσεις.

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα, το υδατικό ισοζύγιο είναι ελλειμματικό για τα ακόλουθες υδατικά διαμερίσματα:

- Ανατολικής Πελοποννήσου (-19.6%)
- Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (-46.1%)
- Θεσσαλίας (-59.5%)
- Κρήτης (-2.3%)
- Νήσων Αιγαίου (-257%)

Διάγραμμα 1-3: Χρήσεις νερού ανά υδατικό διαμέρισμα, Ελλάδα (2010)

Συνεισφορά (ποσοστιαία) χρήσεων νερού ανά υδατικό διαμέρισμα



Page intentionally left blank

Τα νησιά του Αιγαίου παρουσιάζουν το μεγαλύτερο υδατικό έλλειμμα στο ισοζύγιο τους. Αυτό είναι φανερό και από το χάρτη στο Σχήμα 1-4, όπου παρουσιάζεται ο δείκτης ξηρασίας για διάφορες περιοχές της Ελλάδας. Ο αναγνώστης μπορεί να βρει περισσότερες πληροφορίες για τον ορισμό του δείκτη και τη μεθοδολογία υπολογισμού του στο άρθρο των Nastos et al (2013).

Οι λόγοι για το ελλειμματικό αυτό ισοζύγιο είναι οι ακόλουθοι (Δανιλάκης, 2012):

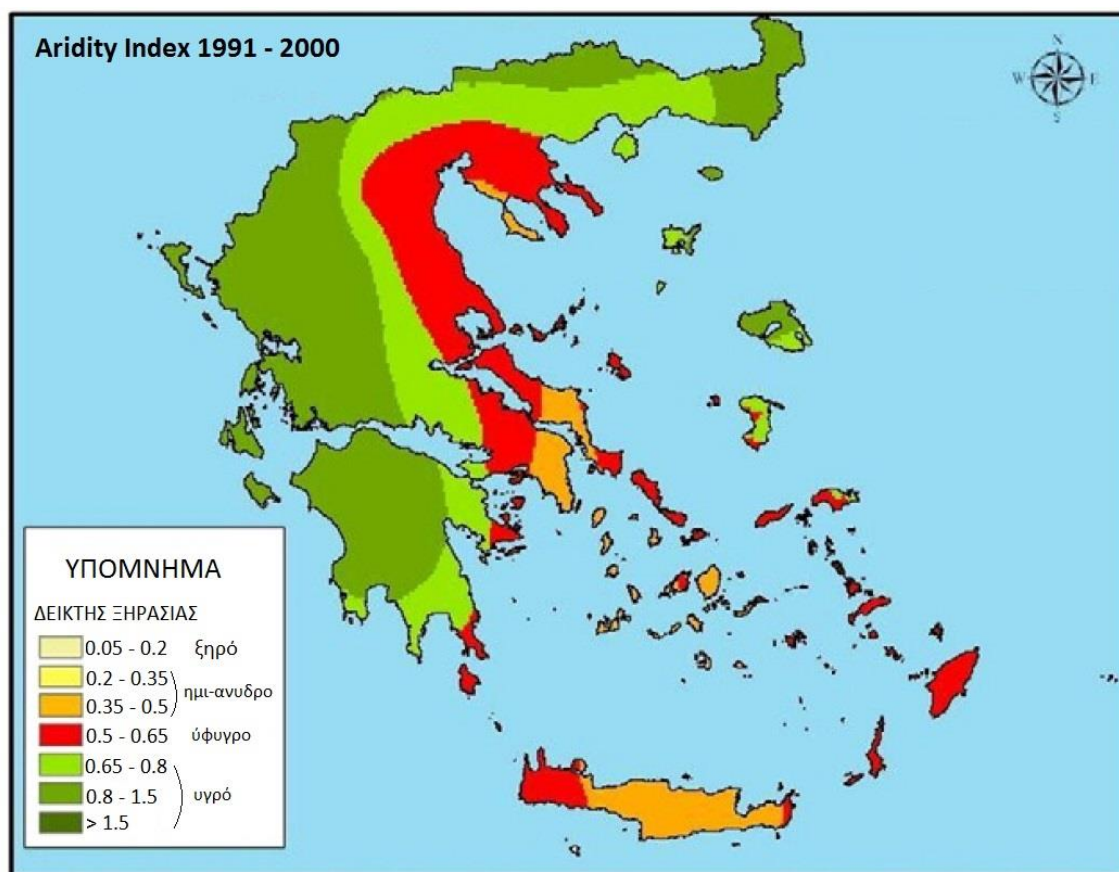
Φυσικοί παράγοντες:

- Μειωμένος εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων λόγω της σχετικά μικρής έκτασης των νησιών σε συνδυασμό με έντονο ανάγλυφο
- Υψηλός ρυθμός εξάτμισης, λόγω υψηλής θερμοκρασίας, ηλιοφάνειας και παρουσία συχνών μετεμιών.
- Φαινόμενα υφαλμύρισης λόγω ολόπλευρης έκθεσης των νησιών στη θάλασσα σε συνδυασμό με τον ορεινό τους χαρακτήρα
- Μικρά ετήσια ύψη βροχής.

Αν και η βροχόπτωση θεωρητικά θα μπορούσε να οδηγήσει σε κάλυψη των τοπικών αναγκών, η διείσδυση του νερού αυτού είναι της τάξης του 15%, η εξατμισοδιαπνοή και η απορροή στη θάλασσα είναι 60% και 26% αντίστοιχα. Τα ποσοστά αυτά εξηγούν τη μεγάλη διαφορά του όγκου βροχής και της τελικής (θεωρητικής) ποσότητας νερού διαθέσιμης προς χρήση (Πίνακας 1-2).

Ανθρώπινοι παράγοντες:

- Μεγάλη τουριστική ανάπτυξη
- Αλόγιστη σπατάληση υπόγειων υδάτων
- Ανεξέλεγκτες (ιδιωτικές) γεωτρήσεις
- Περιορισμένα έργα υποδομής
- Απώλειες στα δίκτυα διανομής νερού. Για την περίπτωση της νησιωτικής Ελλάδας αξίζει να σημειωθεί ότι ποσοστό ίσο με 40-60% του νερού που διανέμεται εκτιμάται ότι χάνεται σε διαρροές είτε δεν καταγράφεται λόγω κακής κατάστασης των μετρητών (Mentis, 2011).



Πηγή: (Nastos, Politi, & Kapsomenakis, 2013)

Σχήμα 1-4: Χωρική κατανομή του δείκτη ξηρασίας για την περίοδο 1991-2000, βάσει στοιχείων από μετεωρολογικούς σταθμούς

Πίνακας 1-2: Γενικά υδρολογικά δεδομένα (μέσες ετήσιες τιμές) για τα νησιά του Αιγαίου Πελάγους

Παράμετρος	Μονάδα	Τιμή
Επιφάνεια	km ²	9103
Ύψος βροχής	mm	585
Όγκος βροχής	hm ³	5,328.6
Εξάτμιση	hm ³	2,816.5
Διείσδυση	hm ³	733.5
Απορροή	hm ³	1778.2
Θεωρητικό δυναμικό (επιφανειακό και υπόγειο)	hm ³	2088.0

Πηγή: (Gikas & Tchobanoglous, 2009)

1.3.4 Η περίπτωση της Τήνου

Οι Κυκλάδες είναι ένα σύμπλεγμα από 19 νησιά στην περιφέρεια του Νοτίου Αιγαίου. Η Τήνος είναι ένα μικρό νησί με έκταση 195 km² στη μέση του

συμπλέγματος και ένας από τους πιο δημοφιλείς τουριστικούς προορισμούς της Ελλάδας. Σύμφωνα με την απογραφή του 2011, ο πληθυσμός της Τήνου είναι 8,636 κάτοικοι, ενώ αν προστεθούν και οι αφίξεις των τουριστών, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες, ο πληθυσμός μπορεί να τετραπλασιαστεί.

Σύμφωνα με τη Γενική Γραμματεία Υδάτων για , ορισμένα νησιά των Κυκλάδων και των Δωδεκανήσων είναι χαρακτηρισμένα ως άνυδρα και δεν μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες τους για νερό, ιδιαίτερα τους θερινούς μήνες. Για το λόγο αυτό, έχει απαιτηθεί η μεταφορά νερού στις Κυκλάδες από την περιφέρεια Αττικής (λιμάνι Λαυρίου) και στα Δωδεκάνησα από τη Ρόδο.

1.3.4.1 Ζήτηση νερού στην Τήνο

Οι συνολικές ανάγκες πόσιμου νερού για το έτος 2012 εκτιμώνται στα 1,749,000 m³, ενώ το νερό για γεωργική χρήση εκτιμάται να είναι περίπου τριπλάσιο. Η βιομηχανική δραστηριότητα στην Τήνο είναι πολύ περιορισμένη.

Οι συνολικές ανάγκες για πόσιμο νερό σε ημερήσια βάση ανέρχονται περίπου στα 6,000 m³ και 4,200 m³ για το καλοκαίρι και το χειμώνα αντίστοιχα. Περισσότερη από τη μισή ποσότητα καταναλώνεται στην πρωτεύουσα (Χώρα) της Τήνου (Xevgenos, Vidalis, Moustakas, Malamis, & Loizidou, 2015).

1.3.4.2 Προσφορά νερού στην Τήνο

Η Τήνος έχει μικρή διαθεσιμότητα νερού και έχουν υπάρξει φορές στο παρελθόν (το 2001 και το 2007) που απαιτήθηκε η μεταφορά νερού με υδροφόρα πλοία. Η διαχείριση του νερού στην Τήνο βασίζεται τόσο σε συμβατικές όσο και σε μη συμβατικές πηγές νερού (Xevgenos, Vidalis, Moustakas, Malamis, & Loizidou, 2015).

Συμβατικές πηγές νερού

- Υπόγεια ύδατα
- Επιφανειακά ύδατα (λίγα και μικρά ποτάμια)

Μη συμβατικές πηγές νερού:

- Φράγματα
- Αφαλάτωση: το 2002 αποφασίστηκε η εγκατάσταση μονάδας αφαλάτωσης για την κάλυψη των αναγκών πόσιμου νερού.

Υδατικό ισοζύγιο "Χώρας" της Τήνου:

- **Γεωτρήσεις:** μία γεώτρηση στην περιοχή Γύρλα με δυναμικότητα 600 m³/ημέρα και τρεις γεωτρήσεις στην γύρω περιοχή με συνολική δυναμικότητα 300 m³/ημέρα
- **Αφαλάτωση:** δύο μονάδες αφαλάτωσης (αντίστροφη όσμωση) με συνολική δυναμικότητα 1,500 m³/ημέρα
- **Επιφανειακό νερό:** τρεις πηγές στο όρος Τσικνιάς με δυναμικότητα 360 m³/ημέρα
- **Φράγμα Βακέτας:** δυναμικότητα 700 m³/ημέρα

Αν αθροιστούν οι συμβατικές πηγές νερού δίνουν περίπου 1,260 m³/ημέρα, όταν η μέση ζήτηση νερού στη Χώρα εκτιμάται περίπου στα 2,800 m³/ημέρα. Έτσι, διαπιστώνεται έλλειμμα περί τα 1,540 m³/ημέρα, το οποίο σήμερα καλύπτεται αποτελεσματικά από μη συμβατικούς τρόπους υδροδότησης, δηλαδή το φράγμα της Βακέτας και την αφαλάτωση. Οι υπόλοιποι 48 οικισμοί καλύπτουν τις ανάγκες του για νερό με χρήση γεωτρήσεων (υπάρχουν καταγεγραμμένες 40 γεωτρήσεις) και με επιφανειακά νερά (Ζαλώνης, 2013).

1.3.5 Προτάσεις – Λύσεις και Συζήτηση

Για την εξισορρόπηση των ελλειμματικών υδατικών ισοζυγίων στα άνυδρα νησιά (αλλά και στις άνυδρες περιοχές γενικότερα) έχουν εφαρμοστεί διάφορες πρακτικές. Η κάθε πρακτική παρουσιάζει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία συζητούνται ακολούθως. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται επίσης στην οικονομική διάσταση και έτσι, όπου αυτό είναι δυνατό, δίνεται και το αντίστοιχο κόστος παραγωγής νερού.

Γεωτρήσεις και υπόγεια ύδατα

Οι υπόγειοι υδατικοί πόροι παρουσιάζουν σημαντική ποσοτική και ποιοτική υποβάθμιση η οποία οφείλεται κατά κανόνα στην υπεράντλησή τους (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2007). Λόγω των ανεξέλεγκτων γεωτρήσεων παρατηρείται υποβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων νερών με κίνδυνο υφαλμύρισης και φυσικά μείωση των αποθεμάτων. Η υπεράντληση των υπόγειων υδροφορέων φτάνει σε μερικές περιπτώσεις μέχρι και το 200% (Δανιλάκης, 2012). Είναι απαραίτητο να γίνουν

υδρογεωλογικές μελέτες για να προσδιοριστεί η στάθμη των νερών των υπόγειων λεκανών και να προωθηθεί μία ισόρροπη άντληση του αποθηκευμένου νερού. Προς την κατεύθυνση αυτή μπορεί να λειτουργήσει και η επαναφόρτιση του υπόγειου υδροφορέα.

Μεταφορά νερού μέσω υδροφόρων

Το 1996 μεταφέρθηκαν στις Κυκλάδες 50,000 m³ νερού, ενώ το 2007 570,000 m³ νερού. Στα Δωδεκάνησα το ίδιο έτος μεταφέρθηκαν ~ 1,000,000 m³ νερού (Gikas & Angelakis, 2009). Το ανηγμένο κόστος μεταφοράς νερού με υδροφόρα πλοία κυμαίνεται από 5 έως 10 ευρώ το κυβικό μέτρο (Karagiannis, 2010). Το 2006 σπαταλήθηκαν περίπου 4εκ. € για τη μεταφορά του νερού στις Κυκλάδες (Δανιλάκης, 2012). Λαμβάνοντας υπόψη ότι το κόστος προμήθειας μίας μονάδας αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση είναι περίπου 1,500€ ανά εγκατεστημένο m³, αυτό συνεπάγεται ότι με τα χρήματα αυτά θα μπορούσε να προμηθευτούν μονάδες αφαλάτωσης με συνολική δυναμικότητα μεγαλύτερη των 2,700 m³.

- Τυπικό κόστος: 5-10 €/m³.

Κατασκευή φραγμάτων

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, προωθήθηκε η πολιτική κατασκευής φραγμάτων και λιμνοδεξαμενών (lagoons). Οι απόψεις ωστόσο δίστανται σχετικά με την αποτελεσματικότητα των φραγμάτων. Ο Δανιλάκης (2012) αναφέρει ότι σε νησιά όπως π.χ. στη Τήνο (Βακέτα), στη Σίφνο (Καμάρες), στην Αμοργό (Κατάπολα), στην Πάρο (Τούρλος), στην Ανάφη (Ρούκουνας), στη Μύκονο (Μαράθι) τα φράγματα προσέφεραν θετικά, ενώ σε άλλες περίπου 10 περιπτώσεις "το κόστος κατασκευής του φράγματος (που για το κάθε ένα απαιτήθηκαν πάνω από 5 εκατομμύρια ευρώ) ήταν δυσανάλογο με τα οφέλη του. Συγκεκριμένα λόγω έλλειψης υδρολογικών δεδομένων, μαζικής και επιπόλαιης παραγωγής μελετών και βιαστικών πολιτικών αποφάσεων, κατασκευάστηκαν φράγματα τα οποία δεν εξυπηρετούσαν το σκοπό τους".

Αφαλάτωση

Η αφαλάτωση αναγνωρίζεται συχνά ως η πλέον δόκιμη λύση για το πρόβλημα υδροδότησης των άνυδρων περιοχών (Δανιλάκης, 2012). Στην Ελλάδα, οι τοπικές Δημοτικές Εταιρείες Ύδρευσης και Αποχέτευσης (ΔΕΥΑ) λειτουργούν περίπου 97 μονάδες αφαλάτωσης με συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα ίση με 71,235 m³/ημέρα (βλ. Ενότητα 6.4.1.1).

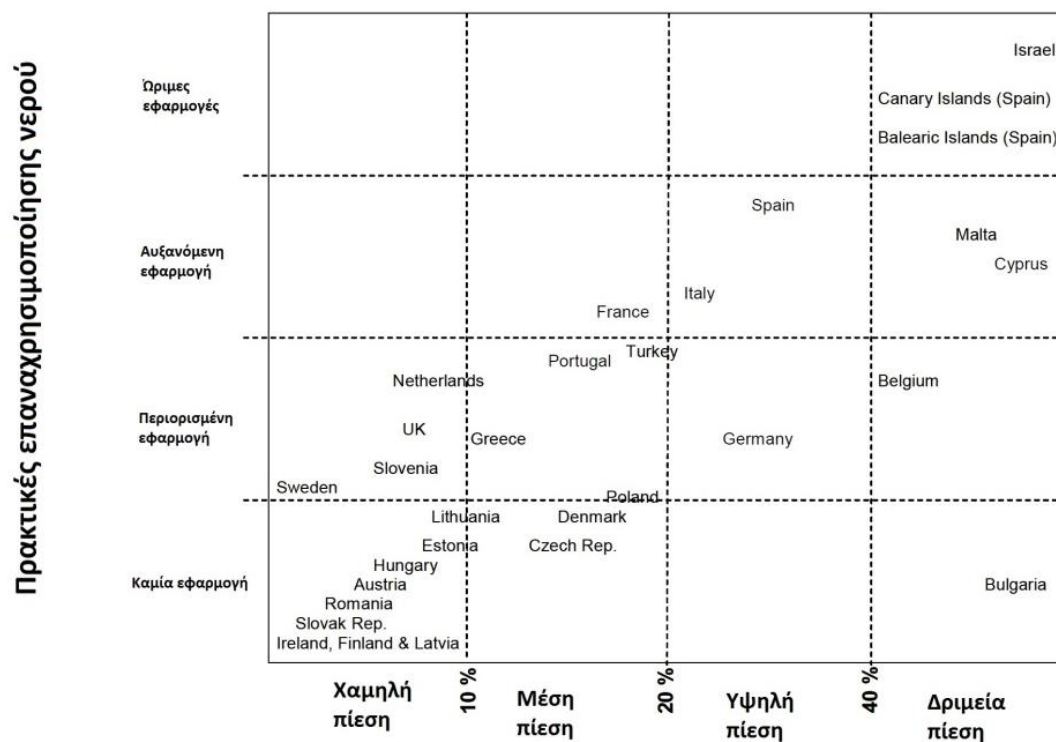
- Τυπικό κόστος: 0.25 – 0.5 €/m³ (υφάλμυρο νερό),

0.50 – 2.0 €/m³ (θαλασσινό νερό)

Επαναχρησιμοποίηση νερού από επεξεργασμένα υγρά βιομηχανικά απόβλητα

Η επαναχρησιμοποίηση του νερού εφαρμόζεται σήμερα για διάφορες χρήσεις όπως άρδευση τοπίου και καλλιιεργειών, και εμπλουτισμό υπόγειων υδροφορέων. Στην Ευρώπη ο συνολικός όγκος του νερού που επαναχρησιμοποιήθηκε το 2007 ανέρχεται στα 964 hm³, το οποίο αντιπροσωπεύει περίπου το 2.4% της συνολικής ποσότητας επεξεργασμένων αποβλήτων στην Ευρώπη (MED WWR WG, 2007). Παρατηρείται συσχέτιση της εφαρμογής των τεχνικών επαναχρησιμοποίησης με την πίεση στους υδάτινους πόρους μίας περιοχής. Έτσι, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 1-5, οι πρακτικές αυτές εφαρμόζονται κυρίως στο Ισραήλ, την Κύπρο, τη Μάλτα και την Ισπανία. Στο Ισραήλ επαναχρησιμοποιείται περίπου το 83% από το σύνολο των επεξεργασμένων αποβλήτων (MED WWR WG, 2007). Στην Ελλάδα η τεχνική αυτή αξιοποιείται σε πολύ μικρό βαθμό. Αν και τα περισσότερα νησιά, διαθέτουν μονάδες επεξεργασίας αστικών λυμάτων, δεν εφαρμόζεται μέχρι σήμερα η αξιοποίηση του επεξεργασμένου νερού. Σύμφωνα με τους Gikas & Angelakis (2009), η αξιοποίηση του νερού αυτού μπορεί να μειώσει τουλάχιστον κατά 5% τις ανάγκες άρδευσης στην Ελλάδα. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η επαναχρησιμοποίηση του νερού δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί από την υφιστάμενη υποδομή του δικτύου για το πόσιμο νερό και ότι απαιτεί την εγκατάσταση χωριστού δικτύου, λόγω διαφορετικής ποιότητας νερού.

- Τυπικό κόστος:
 - 0.15 – 0.35 €/m³ (για μικρές μονάδες επεξεργασίας νερού, 100 – 5,000 m³/ημέρα) (Gikas & Angelakis, 2009)
 - 0.07 – 1.14 €/m³ (European Commission, 2016)



Δείκτης πίεσης νερού
Προσαρμοσμένο από (MED WWR WG, 2007)

Σχήμα 1-5: Επαναχρησιμοποίηση νερού και δείκτης πίεσης νερού

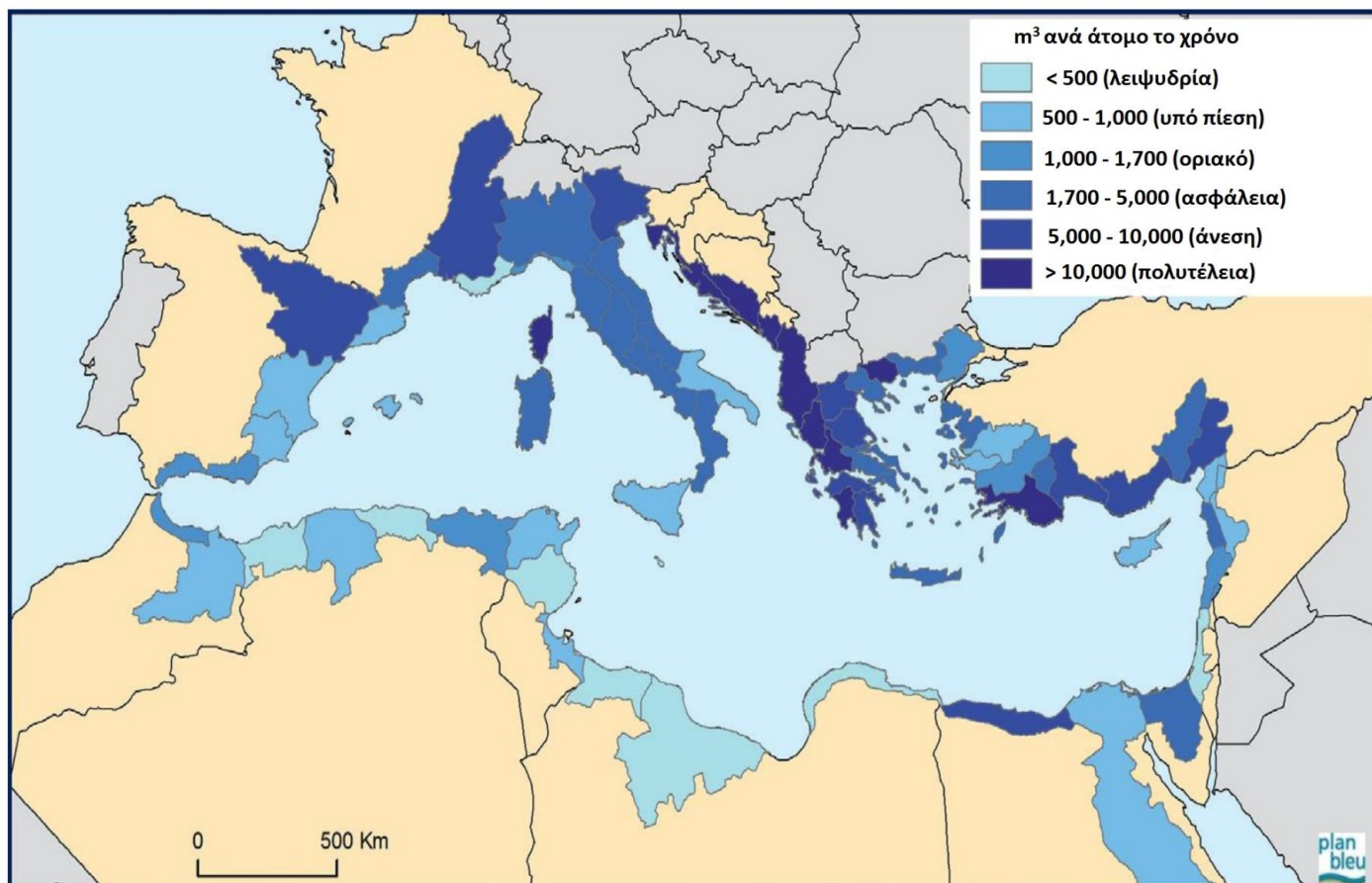
1.4 Η αφαλάτωση ως λύση στο πρόβλημα της λειψυδρίας

Σύμφωνα με το Global Water Intelligence, η δυναμικότητα παραγωγής πόσιμου νερού από μονάδες αφαλάτωσης ανέρχεται το 2008 στα 52 εκ. m³/ημερησίως και αναμένεται να διπλασιαστεί μέχρι το 2016, προσεγγίζοντας τα 107 εκ. m³/ημερησίως.

Οι λόγοι για την αύξηση της χρήσης της τεχνικής της αφαλάτωσης είναι κυρίως η αστικοποίηση, η εξάντληση των υπόγειων υδάτων, οι ολοένα αυξανόμενες ανταγωνιστικές χρήσεις του νερού και η κλιματική αλλαγή (βλ. επίσης Ενότητα 2.1). Σύμφωνα με μελέτης της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, οι επιπτώσεις από την κλιματική αλλαγή στη διαθεσιμότητα νερού θα είναι πιο έντονες στην περιοχή της Μεσογείου (European Commission, 2010).

Η συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα στις χώρες της Μεσογείου θάλασσας είναι 11,650,047 m³/ημέρα, η οποία αντικατοπτρίζει περίπου το 16% της συνολικής παγκόσμιας δυναμικότητας. Όπως φαίνεται και από τον παρακάτω πίνακα, η Ισπανία, η Αλγερία, το Ισραήλ και η Λιβύη έχουν την υψηλότερη εγκατεστημένη δυναμικότητα. Χώρες όπως η Μάλτα και η Κύπρος που δεν βρίσκονται στις

υψηλότερες θέσεις, ωστόσο, αποτελούν χώρες που στηρίζονται σχεδόν εξολοκλήρου στην αφαλάτωση για την προμήθεια πόσιμου νερού.



Πηγή: (Khordagui, 2016)

Σχήμα 1-6: Ανανεώσιμο υδατικό δυναμικό ανά κάτοικο για τα διάφορα υδατικά διαμερίσματα στη Μεσόγειο (1995-2005)

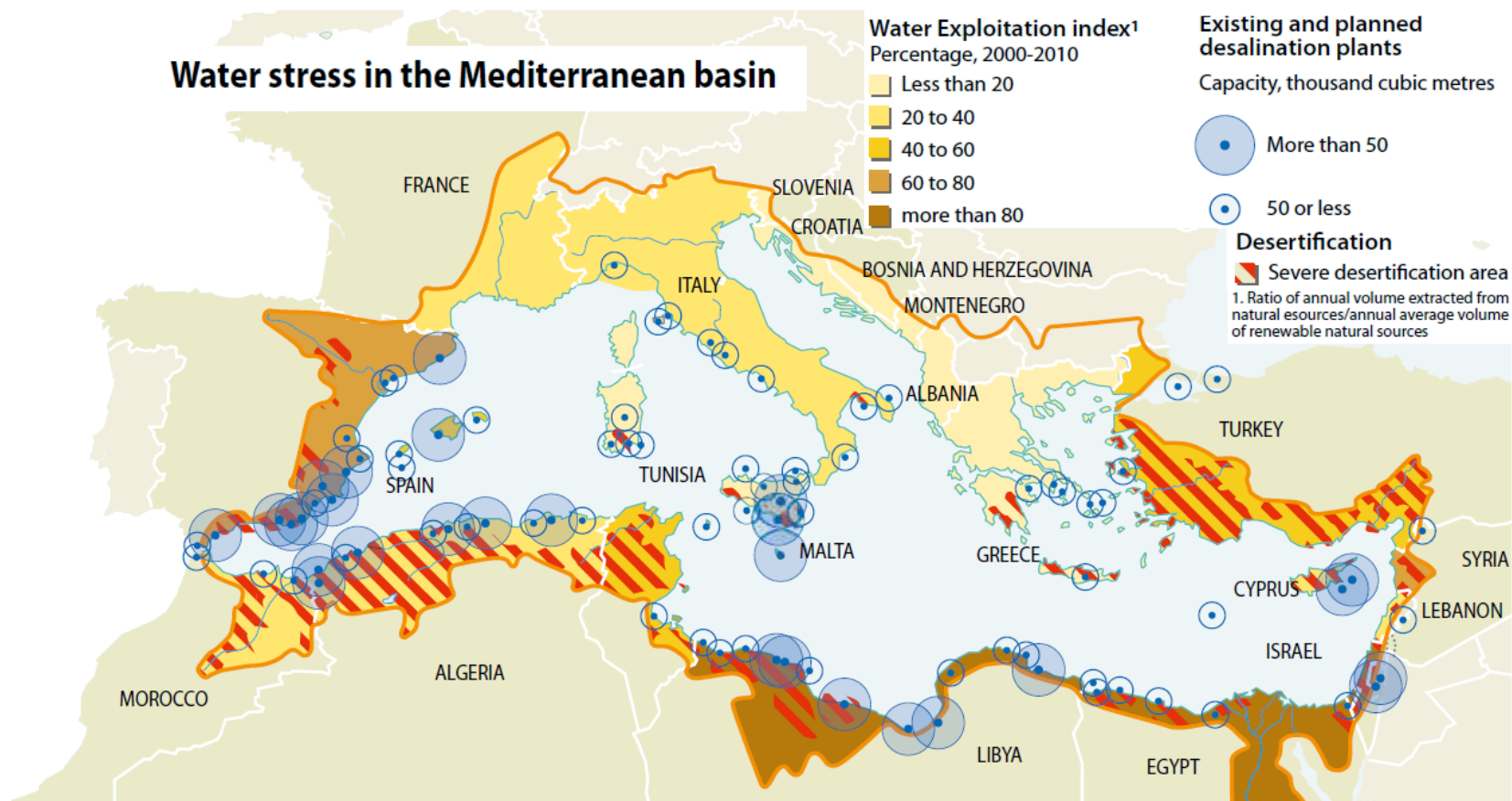
Σημειώνεται ότι η Ευρώπη εξελίσσεται σε μία από τις πιο γρήγορα αναπτυσσόμενες αγορές στον τομέα της αφαλάτωσης. Η Ισπανία παρουσιάζει το μεγαλύτερο πλήθος εφαρμογών αφαλάτωσης στο δυτικό κόσμο, ενώ κατέχει την τέταρτη θέση παγκοσμίως μετά από τη Σαουδική Αραβία, τα Ενωμένα Εμιράτα και το Κουβέιτ (Papapetrou, Wieghaus, & Biercamp, 2010).

Η διείσδυση της τεχνολογίας αφαλάτωσης αναμένεται ότι θα αυξηθεί όχι μόνο στην περιοχή της Μεσογείου και της Ευρώπης, αλλά επίσης και σε παγκόσμιο επίπεδο.

Πίνακας 1-3: Εγκατεστημένη δυναμικότητα αφαλάτωσης σε επιλεγμένες χώρες της Μεσογείου (2011)

α/α	Χώρα	Δυναμικότητα (m ³ /ημέρα)
1	Ισπανία	4,769,582
2	Αλγερία	1,700,046
3	Ισραήλ	1,169,474
4	Λιβύη	809,875
5	Ιταλία	698,891
6	Αίγυπτος	683,277
7	Τουρκία	468,749
8	Μάλτα	251,151
9	Ιορδανία	248,855
10	Γαλλία	233,104
11	Κύπρος	228,853
12	Ελλάδα	149,250
13	Τυνησία	93,276
14	Μαρόκο	85,471
15	Λίβανος	29,125
16	Πορτογαλία	17,087
17	Συρία	13,981
Σύνολο		11,650,047

Πηγή: (Cuenca, 2012) (Xevgenos, Vidalis, Moustakas, Malamis, & Loizidou, 2015)



Προσαρμοσμένο από: (UNEP-MAP, 2012)

Σχήμα 1-7: Δείκτης λειψυδρίας και ανάπτυξη μονάδων αφαλάτωσης στη Μεσόγειο Θάλασσα

2 Αφαλάτωση

Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα (Ιούνιος 2015) δημοσιευμένα στοιχεία του International Desalination Association (IDA), μέχρι σήμερα είναι καταγεγραμμένες 18,426 μονάδες αφαλάτωσης σε περισσότερες από 150 χώρες ανά τον κόσμο. Οι μονάδες αυτές παράγουν 86.8 εκ. m³/ημέρα και εξυπηρετούν τις ανάγκες για νερό για περισσότερα από 300 εκ. άτομα.

Στο κεφάλαιο αυτό δίνονται πληροφορίες σχετικά με τον τομέα της αφαλάτωσης γενικά, καθώς θίγονται και ειδικότερα θέματα όπως ταξινόμηση των εφαρμογών αφαλάτωσης ανάλογα με την εφαρμοζόμενη τεχνική, το μέγεθος των μονάδων και τον τελικό χρήστη. Αυτή η εξέταση των μεθόδων αφαλάτωσης (screening), αποτέλεσε τη βάση για την περαιτέρω ανάλυση που ακολουθήθηκε κατά το σχεδιασμό του πιλοτικού συστήματος επεξεργασίας της άλμης (Ενότητα 4), όπως επίσης και για τη διατύπωση προτάσεων εφαρμογής του σε πλήρη κλίμακα στην Ελλάδα (Ενότητα 6.4). Για τις προτάσεις πλήρους κλίμακας, ήταν ιδιαίτερα σημαντική η εξέταση των τελικών χρηστών της αφαλάτωσης.

Επίσης, παρουσιάζονται οι σχετικοί ορισμοί και οι έννοιες που είναι σημαντικές για την κατανόηση τόσο αυτού του κεφαλαίου, όσο και του συνόλου της διδακτορικής διατριβής. Αναφέρονται οι διαφορετικές ποιότητες νερού ανάλογα με την αλατότητα. Έτσι γίνεται διάκριση μεταξύ πόσιμου νερού, υφάλμυρου νερού, θαλασσινού νερού και άλμης. Αναφορικά με την άλμη, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της (τυπική χημική σύσταση) και οι περιβαλλοντικές της επιπτώσεις (Ενότητα 2.6). Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στις πηγές της άλμης, αναδεικνύοντας μία πτυχή που προέκυψε κατά την εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής. Η άλμη που παράγεται ως παραπροϊόν από τη βιομηχανία είτε λόγω χρήσης μονάδων αφαλάτωσης, είτε λόγω χρήσης αλάτων (χλωριούχου νατρίου) στην παραγωγική διαδικασία. Το εύρημα αυτό χρησιμοποιήθηκε για τη διατύπωση μελλοντικών προτάσεων έρευνας (Ενότητα 7.2).

Τέλος παρουσιάζεται η μονάδα αφαλάτωσης που είναι εγκατεστημένη στην περιοχή του Αγίου Φωκά, στην Τήνο. Στο χώρο της μονάδας αυτής εγκαταστάθηκε η πιλοτική μονάδα επεξεργασίας της άλμης.

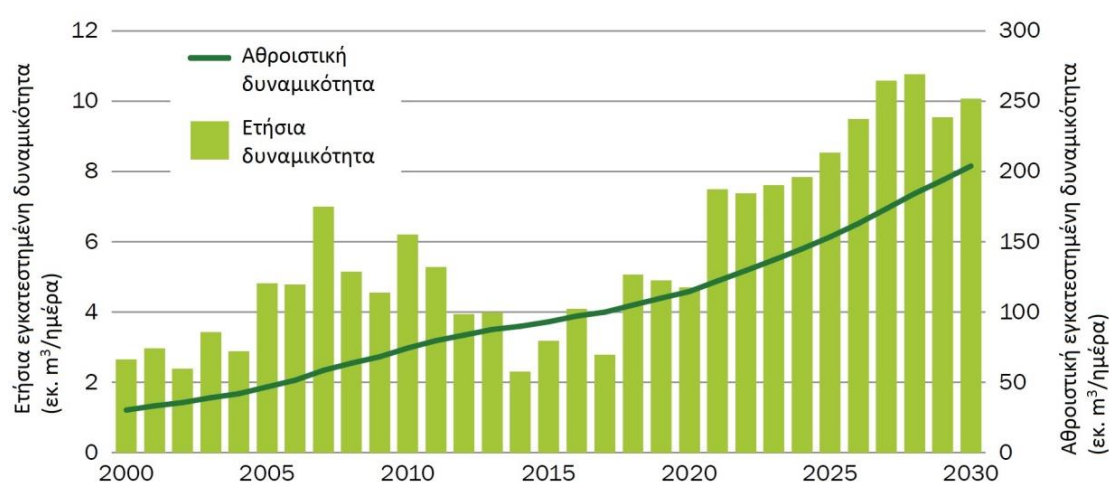
2.1 Εισαγωγή

Η ιστορία της αφαλάτωσης ξεκινά το 320 π.Χ. όταν ο Έλληνας φιλόσοφος Αριστοτέλης γράφει για την απόσταξη του θαλασσινού νερού. Η αφαλάτωση αποτελεί μία μη συμβατική πηγή παραγωγής νερού, η οποία τυγχάνει ολοένα αυξανόμενης αναγνώρισης διεθνώς για τη σημασία της στην εξισορρόπηση ελλειμματικών υδατικών ισοζυγίων. Οι λόγοι για την αυξανόμενη ζήτηση της αφαλάτωσης είναι οι ακόλουθοι (Alvarado-Revilla, et al., 2015):

1. **Αστικοποίηση:** Η συγκέντρωση του πληθυσμού σε αστικά κέντρα προκαλεί πίεση στους υδάτινους πόρους τοπικά. Δεδομένου ότι τα περισσότερα αστικά κέντρα είναι σε παράκτιες τοποθεσίες, η αφαλάτωση του θαλασσινού νερού διαδραματίζει σημαντικό ρόλο.
2. **Ανταγωνιστικές χρήσεις νερού:** Η ζήτηση νερού για γεωργικές χρήσεις αυξάνει με την αύξηση του πληθυσμού και με την οικονομική ανάπτυξη. Η χρήση αυτή πιέζει για την εύρεση νέων τρόπων υδροδότησης για την κάλυψη της ζήτησης.
3. **Κλιματική αλλαγή:** Η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη οδηγεί στην αύξηση της συχνότητας και της έντασης των φαινομένων ξηρασίας. Αυτό κάνει ολοένα και περισσότερο φανερό πως η ανάγκη για αφαλάτωσης δεν περιορίζεται πλέον μόνο στις άνυδρες περιοχές. Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (International Panel on Climate Change) παρατηρεί ότι πολλές άνυδρες περιοχές, όπως η Μεσόγειος Θάλασσα, είναι ιδιαίτερα ευάλωτες στις επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών και θα γνωρίσουν μείωση στη διαθεσιμότητα των υδάτινων πόρων, κάτι που αναμένεται να επιδεινώσει την ήδη οξυμένη πίεση που παρατηρείται στην περιοχή (Xevgenos, Vidalis, Moustakas, Malamis, & Loizidou, 2015).
4. **Εξάντληση υπόγειων υδάτων:** Οδηγεί σταδιακά στην υφαλμύρωση των υπόγειων υδάτων, και στην αυξημένη ζήτηση για αφαλάτωση υφάλμυρου νερού. Στην Ελλάδα παρατηρείται υφαλμύρωση σε περιοχές τόσο στον ηπειρωτικό, όσο και στον νησιωτικό χώρο (Παράρτημα 9.1).

Η συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα έχει υπερδιπλασιαστεί μέσα σε μία δεκαετία (2001-2011). Στο Σχήμα 2-1 παρουσιάζεται η εγκατεστημένη δυναμικότητα τόσο ετησίως όσο και αθροιστικά που έχει λάβει χώρα μέχρι σήμερα. Όπως φαίνεται

από το σχήμα, παρά την γενικότερη τάση αύξησης της εγκατεστημένης δυναμικότητας, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία πτώση, η οποία αποδίδεται από πολλούς μελετητές στην οικονομική κρίση. Σύμφωνα με το Global Water Intelligence (2015), η αθροιστική δυναμικότητα των μονάδων αφαλάτωσης θα φτάσει τα 200 εκ. $\text{m}^3/\text{ημέρα}$ μέχρι το 2030 (Alvarado-Revilla, et al., 2015). Το 2015, η συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα μονάδων αφαλάτωσης ανέρχεται στα 74.7 εκ. $\text{m}^3/\text{ημέρα}$. Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα (Ιούνιος 2015) δημοσιευμένα στοιχεία του International Desalination Association (IDA), μέχρι σήμερα είναι καταγεγραμμένες 18,426 μονάδες αφαλάτωσης σε περισσότερες από 150 χώρες ανά τον κόσμο¹.



Πηγή: (Alvarado-Revilla, et al., 2015)

Σχήμα 2-1: Εξέλιξη εγκατεστημένης δυναμικότητας, πρόβλεψη μέχρι το 2050

Η περιοχή της Μέσης Ανατολής και της Βόρειας Αφρικής (Middle-East and North Africa, *MENA*) κατέχει το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς (46.7%), ακολουθεί η Αμερική (17.6%), η ανατολική Ασία με ποσοστό 17.5%, η Δυτική Ευρώπη (11.2%) κ.λπ. (Alvarado-Revilla, et al., 2015). Σε επίπεδο χώρας, η Σαουδική Αραβία (10.6 εκ. $\text{m}^3/\text{ημέρα}$), τα Ηνωμένα Εμιράτα (8.3 εκ. $\text{m}^3/\text{ημέρα}$) και η Ισπανία (5.4 εκ. $\text{m}^3/\text{ημέρα}$) αποτελούν τους 3 μεγαλύτερους χρήστες της αφαλάτωσης.

Χαρακτηριστικά της αγοράς αφαλάτωσης

Η αγορά της αφαλάτωσης σταδιακά μετατρέπεται σε μία αγορά με υψηλό βαθμό συγκέντρωσης (consolidating market) (Lonsdale J. , 2011). Οι κορυφαίες εταιρείες είναι:

¹ Πηγή: <http://idadesal.org/desalination-101/desalination-by-the-numbers/>

- Veolia (Γαλλία): εγκατεστημένη δυναμικότητα > 5 εκ. m^3 /ημέρα
- GE (ΗΠΑ): εγκατεστημένη δυναμικότητα > 3 εκ. m^3 /ημέρα
- Doosan (Νότια Κορέα): εγκατεστημένη δυναμικότητα > 3 εκ. m^3 /ημέρα
- IDE (Ισραήλ) : εγκατεστημένη δυναμικότητα > 2 εκ. m^3 /ημέρα
- Suez Environment (Γαλλία): εγκατεστημένη δυναμικότητα ~ 2 εκ. m^3 /ημέρα

Οι εταιρείες αυτές αποτελούν ταυτόχρονα προμηθευτές τεχνολογίας, κατασκευαστές των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης και τους τελικούς χρήστες. Έτσι, καθώς οι μεγάλες εταιρείες παρέχουν μία ευρεία κλίμακα υπηρεσιών αφαλάτωσης, από την κατασκευή των εγκαταστάσεων έως και την παροχή του νερού στους τελικούς καταναλωτές, η αγορά της αφαλάτωσης καθετοποιείται γρήγορα (Lonsdale, Peacock, Shembavnekar, Erbilgic, & Kulyk, 2011). Κάποιες από τις εταιρείες (π.χ. Veolia, GE Water, Suez Environnement) της αγοράς έχουν στραφεί τα τελευταία χρόνια προς τις βιομηχανίες προκειμένου να ανταπεξέλθουν από τις δύσκολες συνθήκες των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης των Δήμων. Άλλοι (όπως π.χ. IDE, Abengoa, and Hyflux) εξειδικεύονται στην εφαρμογή σχημάτων BOOT (Build Own Operate and Transfer) προκειμένου να εξασφαλίσουν μεγάλες και σταθερές χρηματοροές (Alvarado-Revilla, et al., 2015).

Ο ετήσιος τζίρος της αγοράς αφαλάτωσης για το 2009 ανέρχεται περίπου στα 2 δις ευρώ για την αφαλάτωση με μεμβράνες και 1.97 δις ευρώ για τη θερμική αφαλάτωση. Όταν στην αγορά αυτή περιλαμβάνονται επίσης τα κόστη του σχεδιασμού, της κατασκευής και της λειτουργίας, ο τζίρος εκτιμάται στα 7.3 δις ευρώ (2008) με προβλέψεις για το 2015 στα 22 δις ευρώ (Lonsdale, Peacock, Shembavnekar, Erbilgic, & Kulyk, 2011).

2.2 Γενικές Έννοιες και Ορισμοί

2.2.1 Αλατότητα

Ορισμός: Το 1909, το Διεθνές Συμβούλιο για την εξερεύνηση της Θάλασσας (International Council for the exploration of the Sea) καθιέρωσε τον πλήρη ορισμό της αλατότητας ως εξής:

"Αλατότητα είναι το συνολικό ποσό σε γραμμάρια των διαλυμένων στερεών ουσιών που περιέχονται σε 1kg θαλασσινού νερού, όταν όλα τα ανθρακικά έχουν μετατραπεί σε οξείδια, τα βρώμιο και το ιώδιο έχουν αντικατασταθεί από χλωριούχα και όλα τα οργανικά έχουν οξειδωθεί πλήρως".

Salinity is defined as the "total amount of solid materials in grams dissolved in one kilogram of sea water when all the carbonate has been converted to oxide, the bromine and iodine replaced by chlorine and all organic matter completely oxidized."

Μονάδα μέτρησης: g/kg.

Η αλατότητα ονομάζεται επίσης στην ελληνική βιβλιογραφία και ως αλμυρότητα. Στη διεθνή βιβλιογραφία γίνεται επίσης αναφορά στις σχετικές έννοιες χλωρινότητα (chlorinity) και χλωριότητα (chlorosity) και έχουν διατυπωθεί διάφορες μαθηματικές σχέσεις που συνδέουν τις έννοιες αυτές (Δεληγιάννη & Μπελεσιώτης, 1995):

- Αλμυρότητα [g/kg] = 1.8147 • χλωρινότητα [g/kg]
- Χλωριότητα [g/m³] = χλωρινότητα [g/kg] • πυκνότητα (@20°C)

Στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι πολλές φορές γίνεται χρήση και της μονάδας psu (practical salinity unit). Ακολούθως, παρατίθεται ο τρόπος υπολογισμού της αλατότητας όπως προτείνεται από τον Αλμπανάκη.

Υπολογισμός αλατότητας

"Οι απαιτήσεις όμως για ακρίβεια μεγάλωναν. Παρατηρήθηκε λοιπόν από τον Cox ότι η σχέση μεταξύ αλατότητας και αγωγιμότητας είναι πλησιέστερα από ότι η σχέση μεταξύ αλατότητας και χλωριότητας. Επιπλέον στην πράξη είναι πιο δύσκολο να γίνονται ακριβείς μετρήσεις χλωριότητας από ότι να μετράται η αγωγιμότητα. Έτσι μετά το 1978, η αρμόδια επιτροπή του O.H.E. για την ωκεανογραφία, καθιέρωσε διεθνώς, ο υπολογισμός της αλατότητας να γίνεται μέσω της μέτρησης της αγωγιμότητας. Ο

υπολογισμός με τη μέθοδο αυτή ονομάζεται πρακτική αλατότητα. Για τον υπολογισμό της, χρησιμοποιείται το παρακάτω πολυώνυμο το οποίο στατιστικά δίνει την καλύτερη συσχέτιση μεταξύ αλατότητας και αγωγιμότητας:

$$S_{psu} = a_0 + a_1 K_{15/2} + a_2 K_{15} + a_3 K_{153/2} + a_4 K_{152} + a_5 K_{155/2}$$

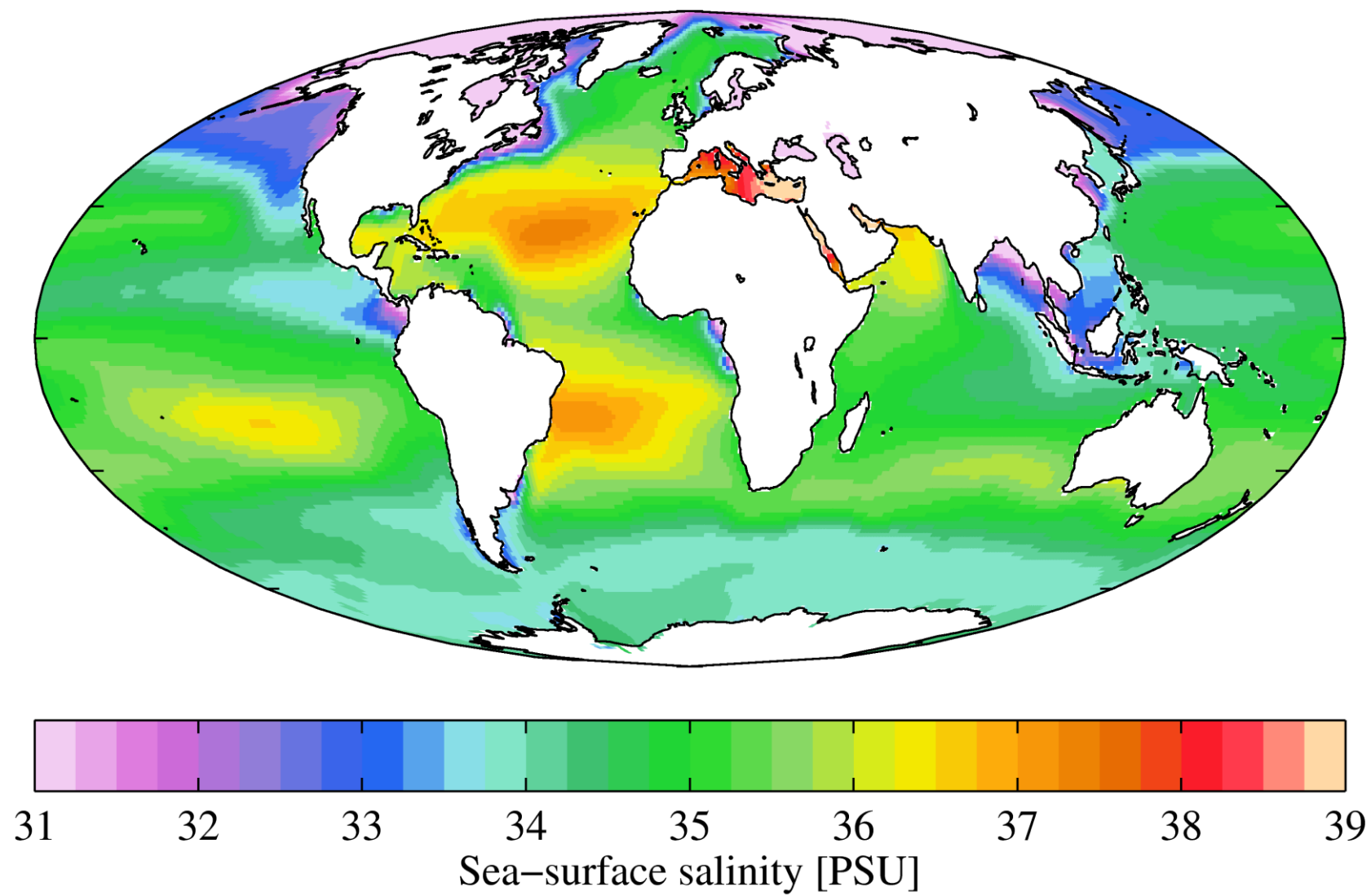
όπου:

- $K_{15} = C(S, 15, 0) / C(KCl, 15, 0)$
- $a_0 = -0.008$
- $a_1 = -0.1692$
- $a_2 = 25.3851$
- $a_3 = 14.0941$
- $a_4 = -7.0261$
- $a_5 = 14.0941$

Το $C(S, 15, 0)$ είναι η αγωγιμότητα δείγματος θαλασσινού νερού στους 15°C και σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης (το δείγμα στην επιφάνεια), και το $C(KCl, 15, 0)$ είναι η αγωγιμότητα πρότυπου διαλύματος KCl στους 15°C το οποίο βρίσκεται επίσης κάτω από ατμοσφαιρική πίεση. Το πρότυπο διάλυμα KCl περιέχει μάζα $32,4356 \text{ g } KCl$ σε διάλυμα μάζας 1 Kg .

Έτσι η πρακτική αλατότητα S , ορίζεται ως συνάρτηση του λόγου K_{15} της ηλεκτρικής αγωγιμότητας δείγματος θαλασσινού νερού θερμοκρασίας 15°C και πίεσης 1 ατμόσφαιρας προς την αγωγιμότητα πρότυπου διαλύματος χλωριούχου καλίου (KCl) συγκέντρωσης $32,4356 \times 10^{-3}$ στην ίδια θερμοκρασία και πίεση.

Ο λόγος K_{15} είναι εξ ορισμού ίσος με τη μονάδα, όταν η πρακτική αλατότητα S είναι ακριβώς $35,000 \text{ psu}$, η οποία είναι περίπου ίση με τη μέση αλατότητα των ωκεανών ($34,73 \text{ psu}$ ή ‰). Η μέθοδος αυτή για συντομία συνήθως αναφέρεται σαν PSS78 (Practical Salinity Scale of 1978) και δίπλα στις τιμές χρησιμοποιείται ο συμβολισμός psu (practical salinity units) αντί για ‰ .



Σχήμα 2-2: Χάρτης παγκόσμιας κατανομής της αλατότητας των επιφανειακών νερών των ωκεανών

2.2.2 Εκφράσεις περιεκτικότητας και συγκέντρωσης

Η συγκέντρωση μπορεί να εκφράζεται να εκφραστεί με τους ακόλουθους τρόπους (Μαμάης, 2008) (Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας).

Συγκέντρωση μάζας: εκφράζει τη μάζα διαλυμένης ουσίας προς τον όγκο του διαλύματος (kg/m^3)

Μοριακότητα (Molarity)²: εκφράζεται ως τα moles διαλυμένης ουσίας προς τον όγκο διαλύματος (M ή mol/l)

Μολαρικότητα (Molality): εκφράζεται ως τα moles διαλυμένης ουσίας προς ένα κιλό διαλύτη (m ή mol/kg)

Κανονικότητα (Normality): εκφράζεται ως το ισοδύναμο της διαλυμένης ουσίας προς τον όγκο του διαλύματος (N ή eq/L). Το ισοδύναμο βάρος μίας ουσίας ορίζεται ως ο λόγος του μοριακού βάρους, ως προς το: (α) το φορτίο του ιόντος, ή (β) τον αριθμό των κατιόντων υδρογόνου (για οξύ) ή τον αριθμό των υδροξυλίωντων (για βάση) ή (γ) τον αριθμό των ηλεκτρονίων που μεταφέρονται (για οξειδοαναγωγική αντίδραση). Το χημικό ισοδύναμο ενός στοιχείου ή μίας ρίζας, ορίζεται ως η ποσότητα που μπορεί να ενωθεί ή να αντικαταστήσει τη μάζα ενός ατόμου υδρογόνου. Το χημικό ισοδύναμο εκφράζεται σε eq/m^3 ή σε meq/l (χιλιοστοϊσοδύναμα ανά λίτρο). Η έκφραση αυτή χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των ενώσεων που εκτιμάται πως σχηματίζονται κατά την εξάτμιση της άλμης, στην Ενότητα 6.1.2.

Μέρη ανά εκατομμύριο (parts per million, ppm): εκφράζει τα μέρη μάζας (ή όγκου) της διαλυμένης ουσίας ανά ένα εκατομμύριο μέρη μάζας (ή όγκου αντίστοιχα) του διαλύματος. Για το νερό, επειδή η πυκνότητά του είναι 1kg/L , συχνά χρησιμοποιείται η αντιστοιχία ότι $1\text{ ppm} = 1\text{ mg/L}$.

Εκατοστιαία σύσταση κατά βάρος (%w/w): εκφράζεται ως η μάζα (σε g) της διαλυμένης ουσίας ανά 100g διαλύματος

Εκατοστιαία σύσταση βάρος κατ'όγκο (%w/v): εκφράζεται ως η μάζα (σε g) της διαλυμένης ουσίας ανά 100mL διαλύματος

² Αναφέρεται στην ελληνική βιβλιογραφία συχνά και ως γραμμομοριακότητα κατ'όγκο ή μοριακή συγκέντρωση

Εκατοστιαία σύσταση κατ'όγκο (%v/v): εκφράζεται ως ο όγκος (σε mL) της διαλυμένης ουσίας ανά 100mL διαλύματος

Οι τρεις τελευταίες εκφράσεις χρησιμοποιούνται κυρίως σε πυκνά διαλύματα και ως εκ τούτου, δεν χρησιμοποιούνται για την περιγραφή διαλυμάτων θαλασσινού νερού και σχετικών εφαρμογών.

2.2.3 Αγωγιμότητα

Στα υδατικά διαλύματα, η αγωγιμότητα αυξάνει όταν αυξάνει η συγκέντρωση των ιόντων του διαλύματος. Η συγκέντρωση των ιόντων είναι ανάλογη της συγκέντρωσης των ολικών διαλυμένων στερεών. Υπάρχει γραμμική σχέση ανάμεσα στην ειδική αγωγιμότητα (k) και τα ολικά διαλυμένα στερεά: $TDS = k \cdot f$, όπου ο συντελεστής f κυμαίνεται από 0.54 έως 0.9 ανάλογα με την προέλευση του νερού και τη θερμοκρασία.

Μονάδα μέτρησης: mS/cm.

Μέτρηση αγωγιμότητας: Η μέθοδος μέτρησης δίνεται στην Ενότητα 5.2.2.1.2.

2.2.4 Ολικά Διαλυμένα Στερεά

Τα Ολικά Διαλυμένα Στερεά (Total Dissolved Solids, TDS) οφείλονται στην παρουσία κυρίως ευδιάλυτων ανόργανων αλάτων όπως των αλκαλίων, τα χλωριούχα, θειικά, νιτρικά, νιτρώδη, αμμωνιακά κ.λπ.

Μονάδα μέτρησης: mg/L δείγματος. Προσεγγιστική μέθοδο αποτελεί η μέτρηση της ειδικής αγωγιμότητας.

Μέτρηση TDS: Η μέθοδος μέτρησης δίνεται στην Ενότητα 5.2.3.2.8.

2.2.5 Σκληρότητα & αλκαλικότητα

Η σκληρότητα του νερού οφείλεται στην παρουσία δισθενών κατιόντων (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} κ.λπ.). Στα φυσικά νερά, οι συγκεντρώσεις των κατιόντων, εκτός από αυτές του ασβεστίου και του μαγνησίου, είναι συνήθως πολύ μικρές και έτσι έχει καθιερωθεί ο ορισμός της σκληρότητας ως το άθροισμα των συγκεντρώσεων του ασβεστίου και μαγνησίου και εκφράζεται σε ισοδύναμη ποσότητα $CaCO_3$, δηλαδή σε mg $CaCO_3$ ανά L νερού, ή σε ppm ισοδύναμης ποσότητας $CaCO_3$. Η σκληρότητα εκφράζεται

επίσης και σε χιλιοστοϊσοδύναμα ανά λίτρο (κανονική συγκέντρωση) (Χαραλάμπους, 2007).

Η αλκαλικότητα του νερού είναι η ικανότητα του νερού να εξουδετερώνει μία ποσότητα οξέος και οφείλεται στην παρουσία υδροξυλίων, ανθρακικών και δισανθρακικών ιόντων. Υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση (Δεληγιάννη & Μπελεσιώτης, 1995):

$$\text{Αλκαλικότητα} = (\text{HCO}_3^-) + (\text{CO}_3^{2-}) + (\text{OH}^-)$$

Οι παρενθέσεις δηλώνουν συγκεντρώσεις των ιόντων σε eq/m³.

Μονάδα μέτρησης: eq/m³ ή σε ppm ισοδύναμου ανθρακικού ασβεστίου.

Μέτρηση αλκαλικότητας: Η μέθοδος μέτρησης δίνεται στην Ενότητα 5.2.2.1.5.

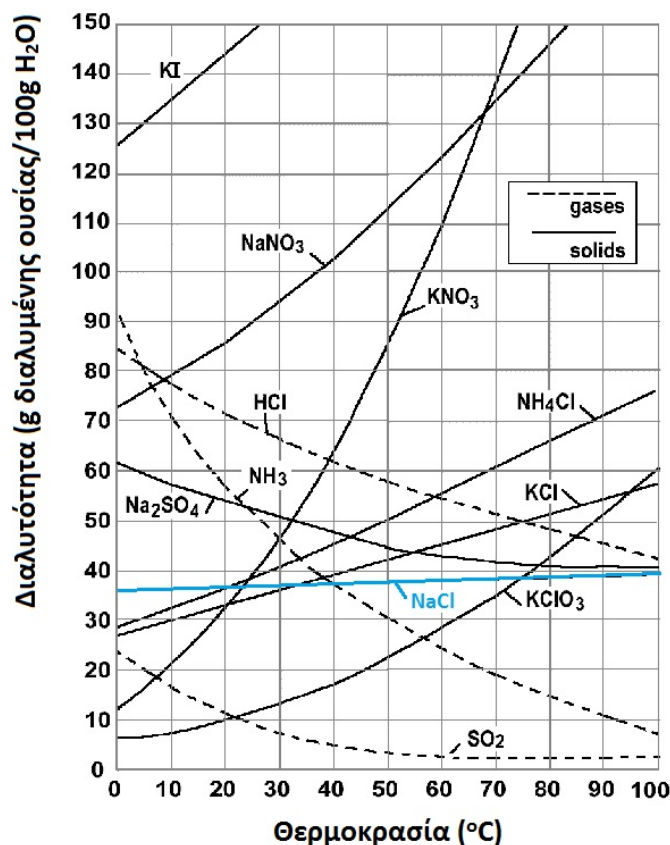
2.2.6 Διαλυτότητα & Γινόμενο διαλυτότητας

Τόσο τα στερεά όσο και τα αέρια έχουν την τάση να διαλύονται στο νερό. Στο ακόλουθο διάγραμμα δίνονται οι καμπύλες διαλυτότητας διαφόρων ενώσεων (στερεά και αέρια) στο νερό συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Παράδειγμα: NaCl

- Διαλυτότητα:
 - 360g NaCl ανά 100g διαλύτη (@25°C), ή
 - 26.47% w/w

Το διάλυμα NaCl αλλάζει σημαντικά τις ιδιότητες του νερού. Το σημείο πήξης είναι στους -21.12°C για συγκέντρωση NaCl 23.31%, ενώ το σημείο βρασμού του κορεσμένου διαλύματος είναι γύρω στους 108.7°C. Κατά την ψύξη, το αλάτι κρυσταλλώνεται στην ένυδρη μορφή του, NaCl·2H₂O. Την πληροφορία αυτή τη λαμβάνουμε από διφασικά διαγράμματα, όπως αυτό που δίνεται ακολούθως για το παράδειγμα διαλύματος χλωριούχου νατρίου.



Σχήμα 2-3: Καμπύλες διαλυτότητας ενώσεων στο νερό συναρτήσει της θερμοκρασίας

Η σταθερά ισορροπίας διεργασιών που αφορούν τη διάλυση ελάχιστα διαλυτών αλάτων σε νερό ονομάζεται «γινόμενο διαλυτότητας», K_{sp} . Το γινόμενο διαλυτότητας (Solubility Product) μίας αντίδρασης δίνεται από τη συγκέντρωση ισορροπίας των ιόντων της αντίδρασης. Όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή του γινομένου διαλυτότητας, τόσο πιο διαλυτό είναι το στερεό αυτό στο νερό. Στη βιβλιογραφία συνήθως δίνεται η τιμή του pK_{sp} , το οποίο δίνεται (σε αντιστοιχία με το pH) από την ακόλουθη εξίσωση:

$$p \cdot K_{sp} = -\log K_{sp}$$

Παράδειγμα: Ασβεστότης (CaCO_3) (Χαραλάμπους, 2007)



Αποτέλεσμα της στοιχειομετρικής αναλογίας της αντίδρασης είναι το γεγονός ότι σχηματίζεται ίσος αριθμός ιόντων ασβεστίου και ανθρακικών ιόντων και οι συγκεντρώσεις των ιόντων αυτών είναι ίσες με τη διαλυτότητα, S , του άλατος.

$$S = \text{διαλυτότητα του } \text{CaCO}_3 = [\text{Ca}^{2+}] = [\text{CO}_3^{2-}]$$

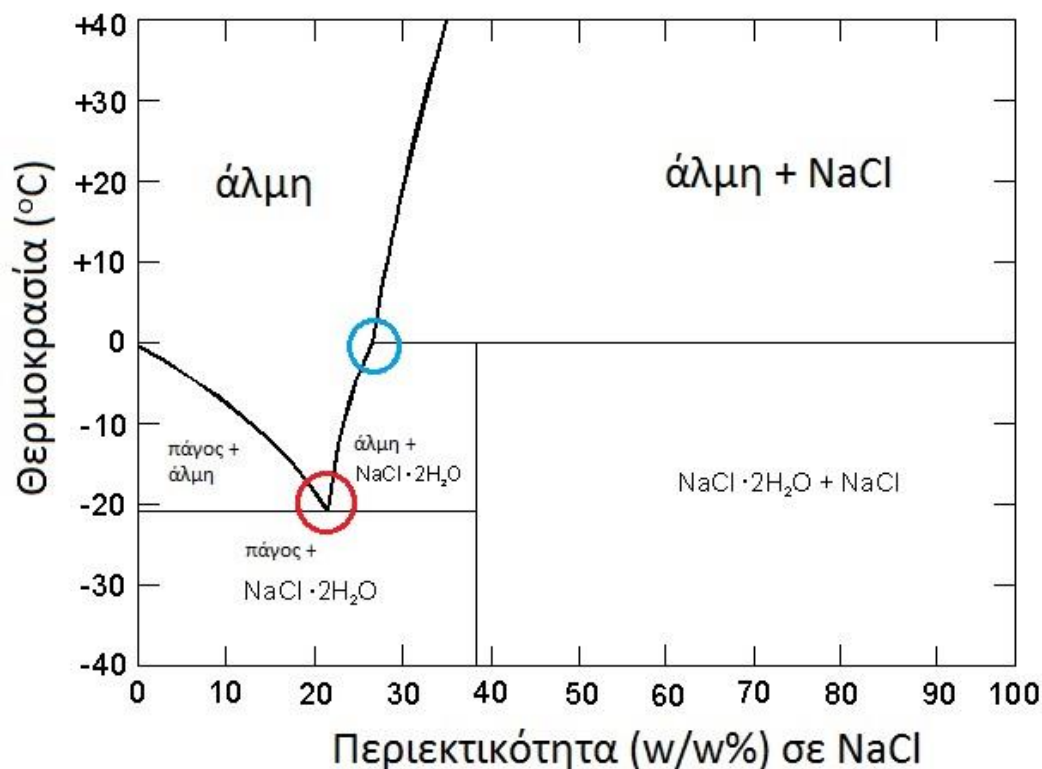
Το γινόμενο διαλυτότητας του ανθρακικού ασβεστίου είναι 4.6×10^{-9} όταν οι συγκεντρώσεις

δίδονται σε moles/L, στους 25°C και δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$K_{sp} = [Ca^{2+}] \cdot [CO_3^{2-}]$$

Αντικαθιστώντας, προκύπτει ότι:

$$S^2 = K_{sp} = 4.6 \times 10^{-9} \rightarrow S = 6.8 \times 10^{-5} M$$



● Περιτηκτικό σημείο 0.1°C

● Ευτηκτικό σημείο -21.2°C

Διάγραμμα 2-1: Διφασικό διάγραμμα διαλύματος χλωριούχου νατρίου

2.2.7 Δείκτης κορεσμού (Saturation Index)

Ο δείκτης κορεσμού (εξίσωση 2-1) συγκρίνει το γινόμενο ενεργότητας των ιόντων (Ion Activity Product, IAP) με το γινόμενο διαλυτότητας (Solubility Product, K_{sp}), δίνοντας έτσι μία εκτίμηση των αλάτων που αναμένεται να καταβυθιστούν για τις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας (θερμοκρασία, pH) και τις συγκεντρώσεις των ιόντων.

$$S.I. = \frac{IAP}{K_{sp}} \quad 2-1$$

Εάν $SI < 0$ το διάλυμα είναι υποκορεσμένο αναφορικά με το υπό εξέταση ορυκτό, και έτσι το άλας παραμένει σε διαλυμένη μορφή στο διάλυμα.

Εάν $SI > 0$ το διάλυμα είναι υπερκορεσμένο αναφορικά με το υπό εξέταση άλας και αυτό καθιζάνει ως κρύσταλλος.

2.2.8 Ειδικό βάρος (Specific gravity)

Το ειδικό βάρος ορίζεται ως ο λόγος του βάρους προς την πυκνότητα του διαλύματος. Η αντιστοίχιση του ειδικού βάρους με άλλες σχετικές παραμέτρους (όπως τους βαθμούς Baumé) δίνεται στον Πίνακα 9-8.

2.2.9 Βαθμοί Baumé

Η κλίμακα Baumé αναπτύχθηκε από το Γάλλο φαρμακοποιό Antoine Baumé το 1768. Η σύνδεση της κλίμακας αυτής με την πυκνότητα, δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

- $\text{Ειδικό βάρος} = \frac{145}{145 - \text{degrees Baumé}}$, για υγρά βαρύτερα από το νερό
- $\text{Ειδικό βάρος} = \frac{140}{130 - \text{degrees Baumé}}$, για υγρά ελαφρύτερα από το νερό

Η μονάδα μέτρησης είναι °Be.

Η εμπειρική κλίμακα Baumé χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα από τους αλκάριους για την παραγωγή αλατιού στις αλκές (Κοροβέσης, 2013). Για την αντιστοιχία τιμών Baumé, ειδικού βάρους και πυκνότητας άλμης και βλέπε επίσης Παράρτημα (Πίνακας 9-8).

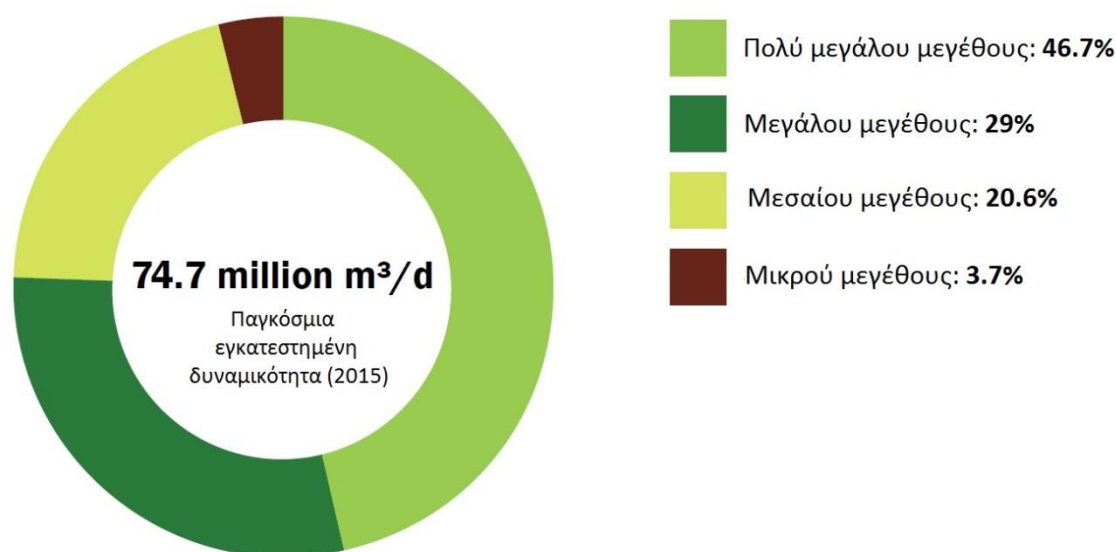
2.3 Ταξινόμηση μεθόδων αφαλάτωσης

2.3.1 Μέγεθος εγκατάστασης

Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που προτείνει το Global Water Intelligence, οι μονάδες αφαλάτωσης μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το μέγεθός τους (δυναμικότητα) ως εξής (Alvarado-Revilla, et al., 2015) (Latteman, 2010):

- Μικρού μεγέθους: $< 1,000 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$
- Μεσαίου μεγέθους: $1,000 - 10,000 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$
- Μεγάλου μεγέθους: $10,000 - 50,000 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$, και
- Πολύ μεγάλου μεγέθους: $> 50,000 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$,

Στο ακόλουθο διάγραμμα αποτυπώνεται η σύνθεση των μονάδων αφαλάτωσης που έχουν εγκατασταθεί παγκοσμίως σύμφωνα με το μέγεθός τους.



Προσαρμοσμένο από: (Alvarado-Revilla, et al., 2015)

Διάγραμμα 2-2: Εγκατεστημένη δυναμικότητα σε παγκόσμιο επίπεδο – Ανάλυση ανά μέγεθος μονάδων

Στην Ελλάδα, πρέπει να σημειωθεί πως παρατηρούνται μόνο μικρού και μεσαίου μεγέθους μονάδες αφαλάτωσης, με τις μεσαίου μεγέθους να αφορούν σχεδόν αποκλειστικά Δημοτικές μονάδες για την παραγωγή πόσιμου νερού (βλ. επίσης Ενότητα 6.4.1). Σε αντίθεση, στα Ενωμένα Εμιράτα, το 78.5% των μονάδων είναι πολύ μεγάλου μεγέθους, με τις μικρές μονάδες να αποτελούν μόλις το 0.6% (Alvarado-Revilla, et al., 2015).

2.3.2 Τεχνικές αφαλάτωσης

Για την αφαλάτωση του νερού, έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές. Οι εμπορικές μέθοδοι αφαλάτωσης είναι οι ακόλουθες:

- ❖ Αντίστροφη Όσμωση (Reverse Osmosis, *RO*)
- ❖ Απόσταξη με εκτόνωση (Multi-stage Flash, *MSF*)
- ❖ Απόσταξη με πολλαπλές βαθμίδες (Multiple Effect Distillation, *MED*)
- ❖ Επανασυμπίεση ατμών (Vapor Compression, *VC*)
- ❖ Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis, *ED*)
- ❖ Ηλεκτροαπιονισμός (Electrodeionisation, *EDI*)
- ❖ Ηλιακή απόσταξη (Solar Distillation, *SD*)
- ❖ Μικροδιήθηση (Microfiltration, *MF*)
- ❖ Νανοδιήθηση (Nanofiltration, *NF*)
- ❖ Υπερδιήθηση (Ultrafiltration, *UF*)

Άλλες μέθοδοι που βρίσκονται σε στάδιο ανάπτυξης ή που εφαρμόζονται λιγότερο είναι οι ακόλουθες:

- ❖ Απόσταξη με μεμβράνες (Membrane Distillation, *MD*)
- ❖ Διεξάτμιση (Pervaporation)
- ❖ Ευθεία Όσμωση (Forward Osmosis, *FO*)
- ❖ Ιοντοεναλλαγή (Ion Exchange, *IX*)

Γενικά, οι τεχνικές αφαλάτωσης που εφαρμόζονται σε εμπορική κλίμακα μπορούν να διακριθούν ανάλογα με το αν απαιτούν αλλαγή φάσης του διαλύτη. Έτσι, διακρίνουμε τις ακόλουθες δύο (2) κατηγορίες (Kalogirou, 2005) (El-Dessouky & Ettouney, 2002):

- ❖ Τεχνικές αλλαγής φάσης ή θερμικές τεχνικές, και
- ❖ Τεχνικές μίας φάσης ή τεχνικές μεμβρανών.

Στο Σχήμα 2-4 δίνονται οι επιμέρους μέθοδοι αφαλάτωσης, ενώ περιγραφή των λειτουργικών, τεχνικών και οικονομικών τους χαρακτηριστικών δίνεται στην Ενότητα 4.1.2 και 4.1.3 για τις μεθόδους μεμβρανών και τις θερμικές μεθόδους αφαλάτωσης αντίστοιχα. Στη βιβλιογραφία, παρατηρούνται και άλλοι τρόποι ταξινόμησης, όπως σύμφωνα με την δύναμη που ωθεί το φαινόμενο του διαχωρισμού των αλάτων από το νερό (ή αντίστροφα του νερού από τα άλατα) και με τη χρήση της ενέργειας. Μία τέτοια ταξινόμηση δίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 2-1: Ταξινόμηση μεθόδων αφαλάτωσης

Διαχωρισμός	Χρήση Ενέργειας	Διεργασία	Μέθοδος αφαλάτωσης
Νερού από το διάλυμα	Θερμική	Εξάτμιση	MSF
			MED
			TVC
			SD
		Κρυστάλλωση	Ψύξη
			Gas Hydrate
		Διήθηση/Εξάτμιση	MD
Αλάτων από το διάλυμα	Μηχανική	Εξάτμιση	MVC
		Διήθηση	RO
	Ηλεκτρική	Επιλεκτική διήθηση	ED
	Χημική	Εναλλαγή ιόντων	IX

Προσαρμοσμένο από (AQUA-CSP, 2007)

Η περιοχή της Μέσης Ανατολής και της Νοτίου Αφρικής έχει εγκατεστημένη δυναμικότητα 24.3 εκ. m³/ημέρα. Παρατηρείται ότι η σύνθεση της εγκατεστημένης δυναμικότητας διαφέρει σημαντικά ανά περιοχή. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 2-3, η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης αποτελεί την κυρίαρχη τεχνική αφαλάτωσης για την Αυστραλία (97.5%), τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (85.4%) και τη Μεσόγειο Θάλασσα (82.4%), ενώ στα Εμιράτα χρησιμοποιείται σημαντικά λιγότερο (19.4%). Το αντίθετο συμβαίνει για τη μέθοδο της πολυβάθμιας εκρηκτικής εκτόνωσης (MSF), η οποία κυριαρχεί στα Εμιράτα (68.2%) και χρησιμοποιείται σημαντικά λιγότερα στη Μεσόγειο Θάλασσα (5.7%). Στις ΗΠΑ και στην Αυστραλία, τα ποσοστά αυτά, σύμφωνα με το Global Water Intelligence, είναι μηδενικά (Alvarado-Revilla, et al., 2015).

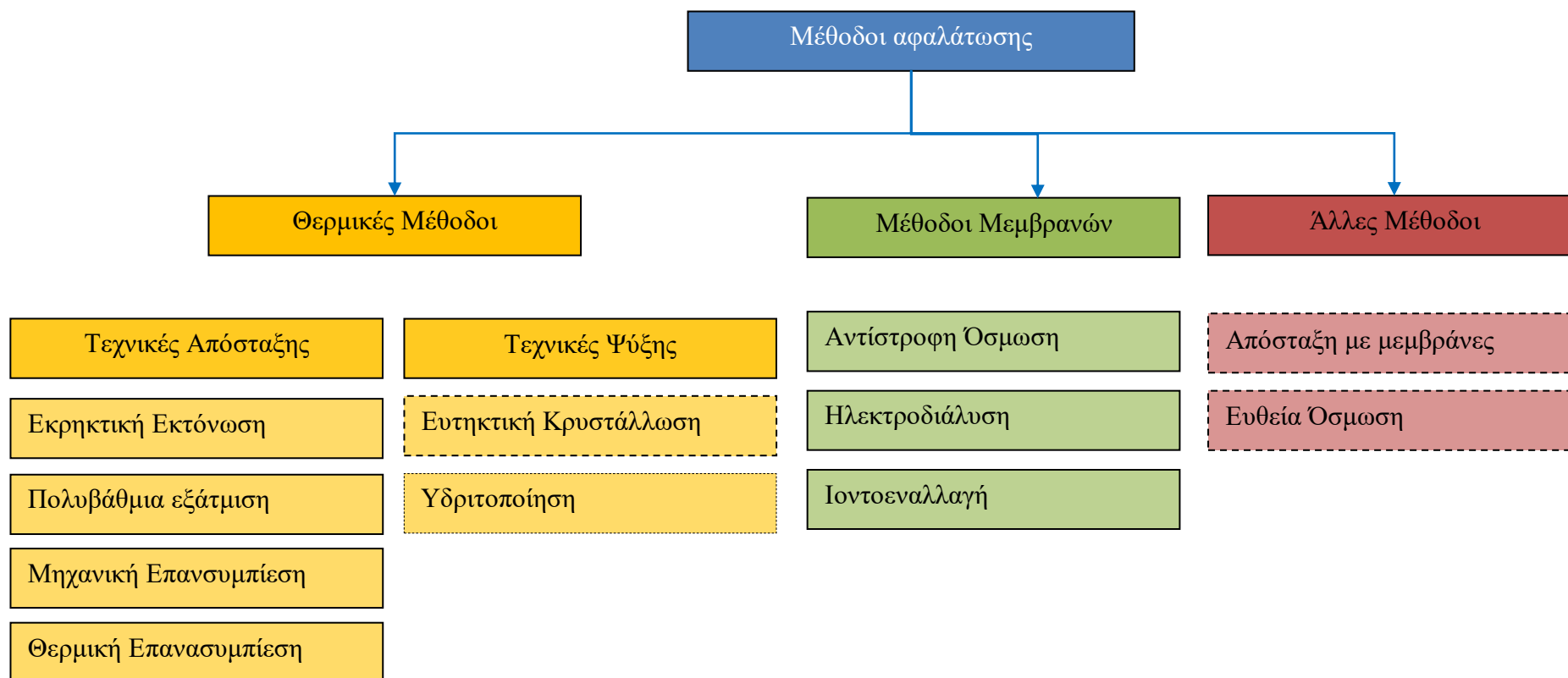
Ανεξάρτητα από τις ιδιαιτερότητες κάθε τεχνικής, όλες απαιτούν μία χημική προεπεξεργασία του νερού τροφοδοσίας. Έτσι, χρησιμοποιούνται χημικά προκειμένου να αποφευχθούν τα ακόλουθα φαινόμενα: (α) επικαθίσεις, (β) αφρισμός, (γ) διάβρωση, (δ) βιολογική ανάπτυξη και (ε) αστοχία (Kalogirou, 2005).

Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι μέθοδοι αφαλάτωσης μεμβρανών κυριαρχούν την αγορά αφαλάτωσης, με τη μέθοδο της RO να έχει ποσοστό 60.0%, η MSF 26.8%, η MED 8.0% και η ED 3.6% (Tree, 2013). Παρατηρείται σταθερά ανοδική ανάπτυξη της αγοράς με σύνθετο ρυθμό ετήσιας ανάπτυξης (Compound Annual Growth Rate, CAGR) ίσο με 10% (περίοδος: 2004-2014). Παρόλ'αυτά, όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 2-3, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την αφαλάτωση του νερού ποικίλει ανάλογα με την περιοχή.

Για παράδειγμα, στις Ηνωμένες Πολιτείες, το 2003 ήταν καταγεγραμμένες 431 Δημοτικές μονάδες αφαλάτωσης με μεμβράνες δυναμικότητας μεγαλύτερη από 25,000 γαλλόνια/ημέρα (~100 m³/ημέρα). Οι μονάδες αυτές περιλαμβάνουν 234 μονάδες αφαλάτωσης (RO, NF και ED/EDR) και 197 μονάδες χαμηλής πίεσης (UF και MF) (Mickley M. , 2004).

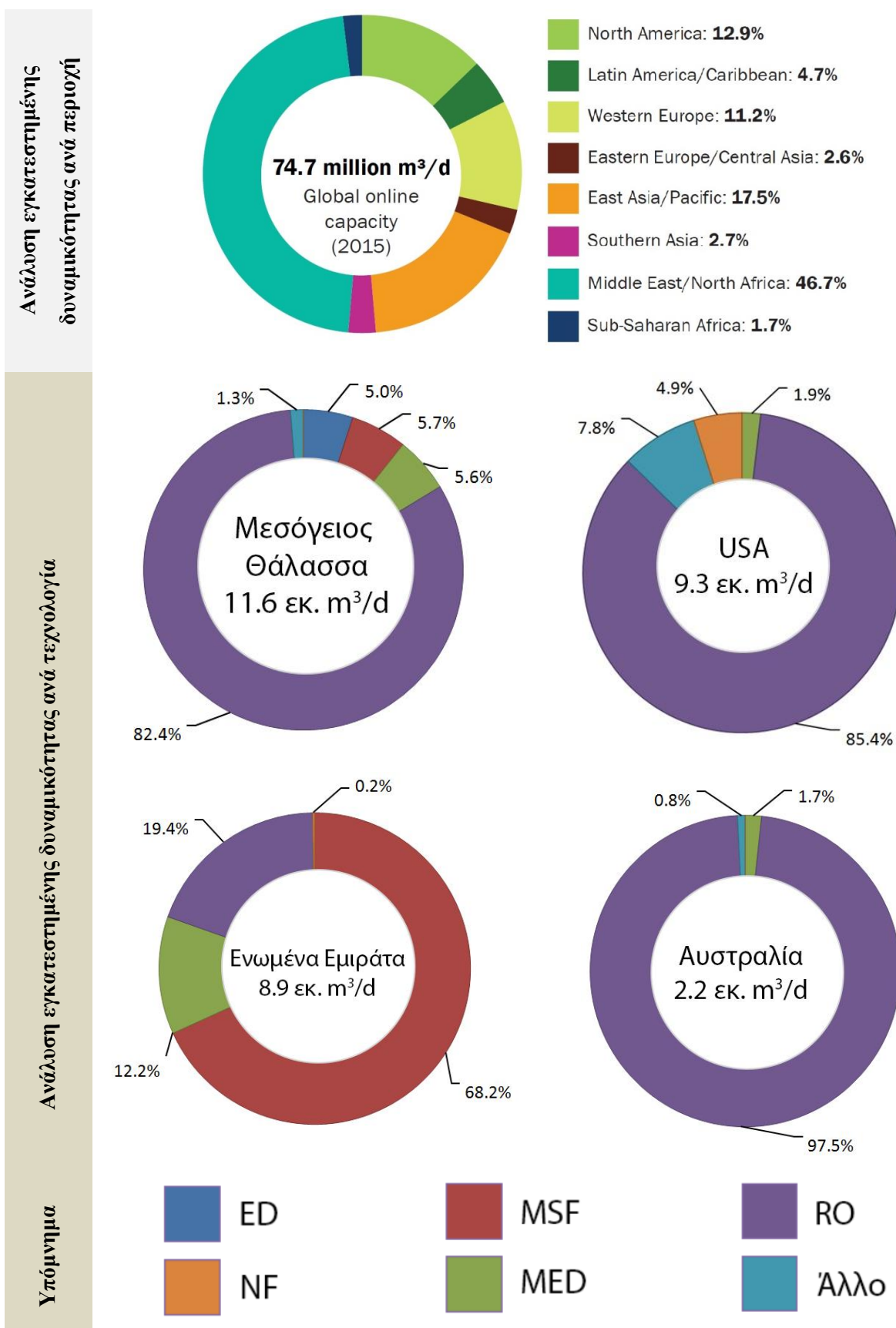
Στην Ενότητα 2.3.4, δίνεται μία συγκριτική αξιολόγηση των εμπορικών τεχνολογιών αφαλάτωσης.

Σχήμα 2-4: Ταξινόμηση μεθόδων αφαλάτωσης



Σημείωση: Τα πλαίσια με διακεκομμένη γραμμή χρησιμοποιούνται για τις μεθόδους που βρίσκονται στο στάδιο της έρευνας ή τις μεθόδους με πολύ λίγες εφαρμογές
 Η ηλεκτροδιάλυση έχει ως παραλλαγές: (α) Την ανάστροφη ηλεκτροδιάλυση, (β) Τον ηλεκτροαπιονισμό και (γ) Την ηλεκτροδιάλυση μετάθεση

Πηγή: (Gude, Nirmalakhandan, & Deng, 2010) (Xevgenos, Moustakas, Malamis, & Loizidou, 2016)



Πηγή: (Alvarado-Revilla, et al., 2015) (Cuenca, 2012) (Xevgenos et al., 2015)

Διάγραμμα 2-3: Εγκατεστημένη δυναμικότητα ανά μέθοδο αφαλάτωσης, παγκοσμίως, στη Μεσόγειο Θάλασσα, τις Ηνωμένες Πολιτείες, τα Εμιράτα και την Αυστραλία (2015)

Box 1. Ιστορία ανάπτυξης θερμικής αφαλάτωσης (UNESCO Centre for Membrane Science and Technology, 2008)

320 π.Χ.	Ο Έλληνας φιλόσοφος Αριστοτέλης γράφει για την απόσταξη θαλασσινού νερού
μ.Χ.	
70	Ο Ρωμαίος Πλίνιος ο Πρεσβύτερος περιγράφει την απόσταξη θαλασσινού νερού με συμπύκνωση χρησιμοποιώντας δορά ζώων
20	Ο Έλληνας Αλέξανδρος Αφροδισίας περιγράφει την απόσταξη θαλασσινού νερού με συμπύκνωση κάνοντας χρήση σπόγγων
975	Οι Πέρσες Muwaffaq και al-Harawi γράφουν ότι η απόσταξη είναι μια κατάλληλη μέθοδος για την μετατροπή του θαλασσινού νερού σε πόσιμο
1565	Ο Γάλλος εξερευνητής Jean De Lery αναφέρει ότι έγινε απόσταξη θαλασσινού νερού επιτυχώς κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού προς την Βραζιλία
1616	Ο Ισπανός Pedro Fernandez de Quiros ανακαλύπτει την Αυστραλία και χρησιμοποιεί επιτυχώς έναν μικρό χάλκινο αποστακτήρα
1675	Ο Walcot καταθέτει πατέντα για την απόσταξη θαλασσινού νερού στην Αγγλία
1683	Ο Fitzgerald καταθέτει πατέντες για την απόσταξη θαλασσινού νερού που προσκρούουν στις πατέντες του Walcot, οδηγώντας τον σε παρατεταμένες διαμάχες
1739	Ο Hales προτείνει τη μείωση της ανάκτησης στο 33% με απλούς αποστακτήρες, ώστε να επιτευχθεί βελτίωση της ποιότητας και προτείνει αερισμό του νερού για βελτίωση της γεύσης
1753	Οι Watson και Appleby αναφέρονται στην προεπεξεργασία του θαλασσινού νερού με φωσφορικό ασβέστιο και οξείδιο του ασβεστίου.
1756	Ο Lucas δημοσιοποιεί ένα άρθρο εκφράζοντας επιφυλακτικότητα σχετικά με πολλά σχέδια απόσταξης και είναι ιδιαίτερα επικριτικό για τη χρήση προσθέτων
1759	Ο Chapman αναφέρεται σε επιτυχή χρήση αποστακτήρα θαλασσινού νερού έκτακτης ανάγκης σε ταξίδι στη Βόρεια Θάλασσα
1761	Ο Lind πειραματίζεται με παραβολικά κάτοπτρα για χρήση σε ηλιακή

Box 1. Ιστορία ανάπτυξης θερμικής αφαλάτωσης (UNESCO Centre for Membrane Science and Technology, 2008)

	απόσταξη
1772	Ο James Cook ξεκινάει επιτυχημένη χρήση αποστακτήρα θαλασσινού νερού ενώ περιπλέει ανά τον κόσμο
1791	Ο Tomas Jefferson εκδίδει τη μελέτη " <i>Report on the Method of Obtaining Fresh Water from Salt</i> "
1793	Ο Ισπανός Phillipe II συναρμολογεί ένα αυτοσχέδιο αποστακτήρα δυναμικότητας 40 βαρέλια φρέσκου νερού/ημέρα ενώ πολεμούσε τους Τούρκους στην Τυνησία
1828	Ο Peclet στοχεύει αλλά τελικά δεν καταφέρει να δημιουργήσει επιτυχώς μια μονάδα πολυβάθμιας εξάτμισης
1840	Η Σουηδική εταιρία Escher Wyss εγκαθιστά μια μονάδα εξάτμισης με επανασυμπίεση ατμών στη Βρετανική Κολομβία στον Καναδά
1843	Ο Rillieux κατοχυρώνει την πατέντα, κατασκευάζει και πουλάει επιτυχώς μονάδες πολυβάθμιας εξάτμισης
1851	Ο Γάλλος Alphonse Normandy κατοχυρώνει πατέντα για σύστημα μονοβάθμιου εξατμιστήρα κατακόρυφων σωλήνων
1862	Εγκαθίστανται 3 αποστακτήρες του Normandy, δυναμικότητας 27m ³ /ημέρα στη Φλόριντα, Fort Pulaski Τζώρτζια και Tortugas
1879	Οι Picard και Weibel περιγράφουν και έπειτα κατοχυρώνουν πρώτοι την πατέντα για ένα σύστημα εξατμιστήρα με επανασυμπίεση ατμών
1881	Εγκαθίσταται αποστακτήρας θαλασσινού νερού στη Μάλτα
1885	Ο Wilson σχεδιάζει και εγκαθιστά ηλιακό αποστακτήρα δυναμικότητας 19m ³ /ημέρα για εφαρμογή σε ορυχείο στο Las Salinas, Chile
1886	Ο Yaryan εισαγάγει την αρχή λειτουργίας εξατμιστήρων κατακόρυφων σωλήνων, ανερχόμενου υμένα
1888	Ο Lillie εισαγάγει την αρχή λειτουργίας εξατμιστήρα οριζόντιου σωλήνα με ψεκασμό και πρόβλεψη για απομάκρυνση των μη συμπυκνώσιμων αερίων
1895	Ο Mirlees-Watson εγκαθιστά δύο εξαβάθμιους αποστακτήρες θαλασσινού

Box 1. Ιστορία ανάπτυξης θερμικής αφαλάτωσης (UNESCO Centre for Membrane Science and Technology, 2008)

	νερού στο Σουδάν
1899	Ο Kestner κατοχυρώνει πατέντα για την τεχνική εξάτμισης με κατακόρυφους σωλήνες, ανερχόμενου και κατερχόμενου υμένα.
1900	Η πατέντα στις Ηνωμένες Πολιτείες του Addison Warehouse εισαγάγει την τεχνική της πολυβάθμιας εκρηκτικής εκτόνωσης (MSF)
1907	Δύο μικρές χερσαίες εγκαταστάσεις θαλασσινού νερού γνωστές ως «The Kindasa» (ο συμπυκνωτής), τοποθετούνται στο Jeddah στη Σαουδική Αραβία.
1908	Ο Prache σχεδιάζει, κατοχυρώνει πατέντα για θερμικούς συμπιεστές, σχεδιασμού του ακροφυσίου και εδραιώνει την εμπορικότητα των TVC.
1910	Ο Frank Normandy εκδίδει ένα βιβλίο 244 σελίδων με τίτλο «Απόσταξη θαλασσινού νερού»
1912	Ο Weir εγκαθιστά εξαβάθμιους εξατμιστήρες στην Ερυθρά Θάλασσα στην Sagafa Bay, στην Αίγυπτο
1928	Ο Άγγλος Aiton εγκαθιστά εξατμιστήρα τύπου TVC στο Curacao
Δεκαετία '30	Ο Weir εγκαθιστά πολλούς πολυβάθμιους εξατμιστήρες στο Curaco και στην Aruba
1934	SS Quin Mary: εξατμιστήρες τριών βαθμίδων από χαλκονικέλιο, χρήση αντικαθαλατωτικού (χλωριούχος σίδηρος)
1940	Η MECO κατασκευάζει εξατμιστήρες με μηχανική επανασυμπίεση, οδηγούμενη από μηχανές Diesel, με εφαρμογή στον Αμερικανικό στρατό
1941	Η MECO εισαγάγει στο εμπόριο αποστακτήρα κενού, οδηγούμενο από μηχανή Diesel με αναλογία παραγωγής νερού προς κατανάλωση καυσίμου 260:1
1946	Η πετρελαιοπαραγωγική εταιρία Kuwait εγκαθιστά τον πρώτο εξατμιστήρα της χώρας χρησιμοποιώντας μια μονάδα από ένα παλιό αντιτορπιλικό του πρώτου παγκοσμίου πολέμου
1954	Η Cleaver Brooks (αργότερα Aqua Chem) παρέχει τέσσερις μονάδες MSF (5 βαθμίδων) με δυναμικότητα 190m ³ /ημέρα

Box 2. Ιστορία ανάπτυξης αφαλάτωσης μεμβρανών (UNESCO Centre for Membrane Science and Technology, 2008)

1748	Ο Abbe Noilett ανακάλυψε το φαινόμενο της όσμωσης σε φυσικές μεμβράνες
1855	Ο Adolph Fick ανέπτυξε την πρώτη συνθετική μεμβράνη από νιτρική κυτταρίνη
1866	Ο Thomas Graham, ένας Βρετανός χημικός χρησιμοποίησε για πρώτη φορά τον όρο διάλυση "dialysis"
1869	Πρώτη εμπορική συνθετική πολυμερική μεμβράνη από την εταιρεία Schoenbein
1907	Ο Bechold εισαγάγει την έννοια της υπερδιήθησης
1927	Η εταιρεία Sartorius λανσάρει στην αγορά πρώτη τις εμπορικές μεμβράνες
1934	Ο G.R. Elder ξεκινά την έρευνα για την ηλεκτροδιάλυση
1950	Ο Gerald Hassler εισαγάγει την έννοια της αφαλάτωσης με μεμβράνες
1958	Οι C.E. Reid και E.J. Breton αποδεικνύουν ότι η οξική κυτταρίνη είναι ένα αποδοτικό υλικό για την αφαλάτωση του νερού
1960	Ο K. Lonsdale αναπτύσσει συνθετικές μεμβράνες λεπτού υμενίου
1963	Ο I. Mahon αναπτύσσει την πρώτη εφαρμογή μεμβρανών κοίλων ινών
1965	Η πρώτη εμπορική εφαρμογή αντίστροφης όσμωσης εγκαθίσταται στην Coaling, της Καλιφόρνια
1977	Ο John Cadotte πατεντάρει τις συνθετικές μεμβράνες λεπτού υμενίου με κρατική επιχορήγηση

2.3.3 Κατηγορίες νερού

Τα φυσικά νερά, ανάλογα με την προέλευση τους, περιέχουν διαφορετικές ποσότητες και είδη διαλυμένων αλάτων. Ένας τρόπος ταξινόμησης των φυσικών νερών είναι ανάλογα με την περιεκτικότητα τους σε ολικά διαλυμένα στερεά (Total Dissolved Solids, TDS) ως ακολούθως (Alvarado-Revilla, et al., 2015) (Fidaleo & Moresi, 2006):

- Πόσιμο νερό (δίκτυο ύδρευσης):	<500 ppm
- Επιφανειακό νερό:	500ppm – 3,000 ppm
- Υφάλμυρο:	1,000 – 5,000ppm
- Έντονα υφάλμυρο:	5,000 -15,000ppm
- Υφάλμυρο νερό υψηλής αλατότητας:	15,000 – 30,000ppm
- Θαλασσινό νερό:	30,000 – 40,000ppm
- Άλμη:	40,000 – 300,000ppm

Για τη μέτρηση των TDS πρέπει να ακολουθούνται μέθοδοι που ακολουθούν διεθνώς αποδεκτά πρότυπα όπως ISO, DIN, MIL, ASTM (βλ. επίσης Ενότητα 5.2.2.1.3). Είναι σημαντικό να τονιστεί πως η μέτρηση των TDS δεν είναι ικανή από μόνη της να χαρακτηριστεί ένα νερό ως πόσιμο ή κατάλληλο για συγκεκριμένη χρήση. Κάθε χρήση απαιτεί συγκεκριμένες προδιαγραφές και παραμέτρους ποιότητας. Επισημαίνεται πως όλες οι μέθοδοι ασφαλώσεις απαιτούν τη χρήση χημικών για την επίτευξη των απαιτούμενων προδιαγραφών του τελικού προϊόντος (νερό με τις αντίστοιχες προδιαγραφές) (Kalogirou, 2005).

Πόσιμο νερό

Το νερό αυτό αναφέρεται συχνά στη βιβλιογραφία και ως νερό του δικτύου ύδρευσης (tap water). Η χρήση για πόσιμο νερό είναι μία από τις χρήσεις που περιγράφεται εκτενώς και στη βιβλιογραφία αλλά και στη νομοθεσία, δεδομένου ότι συνδέεται με την ανθρώπινη υγεία. Σε Ευρωπαϊκό Επίπεδο η κείμενη νομοθεσία είναι η Οδηγία για το Πόσιμο Νερό (Οδηγία 2000/60 EC) και στην Ελλάδα η Υπουργική Απόφαση Α5/288/23-1-1986 (ΦΕΚ892/τ.β./11-7-01).

Επιφανειακό νερό

Στην κατηγορία αυτή εμπίπτει και το ελαφρά υφάλμυρο νερό, το οποίο μπορεί να είναι πόσιμο σύμφωνα με τις σχετικές οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (80/778/15-7-

80 και 98/93/EC/3-11-98) και την σχετική ελληνική νομοθεσία (Υπ. Απ. Α5/288/23-1-1986 και ΦΕΚ892/τ.β./11-7-01), με αγωγιμότητα $< 2.500 \mu\text{S}/\text{cm}$ στους 20°C .

Υφάλμυρο

Μη πόσιμο και συνήθως ακατάλληλο για καλλιέργειες ακόμα και για βιομηχανική χρήση.

Έντονα υφάλμυρο

Απαιτείται αφαλάτωση του νερού αυτού για την μετέπειτα χρήση του.

Θαλασσινό νερό

Το θαλασσινό νερό είναι ένα πολύπλοκο διάλυμα που περιέχει, έστω και σε ίχνη, όλα τα στοιχεία που συναντώνται στη γη (Geertman, 2000). Το διάλυμα μπορεί να περιγράψει ωστόσο ικανοποιητικά, από έξι στοιχεία, καθώς αυτά συνιστούν το 99% όλων των διαλυμένων ουσιών. Τα στοιχεία αυτά είναι το χλώριο (Cl^-), το νάτριο (Na^+), τα θειικά (SO_4^{2-}), το μαγνήσιο (Mg^{2+}), το ασβέστιο (Ca^{2+}) και το κάλιο (K^+). Η περιεκτικότητα των στοιχείων αυτών στο θαλασσινό νερό παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-8.

Στο υπόλοιπο 1%, περιλαμβάνονται τα δισανθρακικά, τα βρωμίδια, το βορικό οξύ, το στρόντιο, το φθόριο και άλλα χημικά στοιχεία. Αναλυτική σύσταση του θαλασσινού νερού δίνεται στον Πίνακα 2-2.

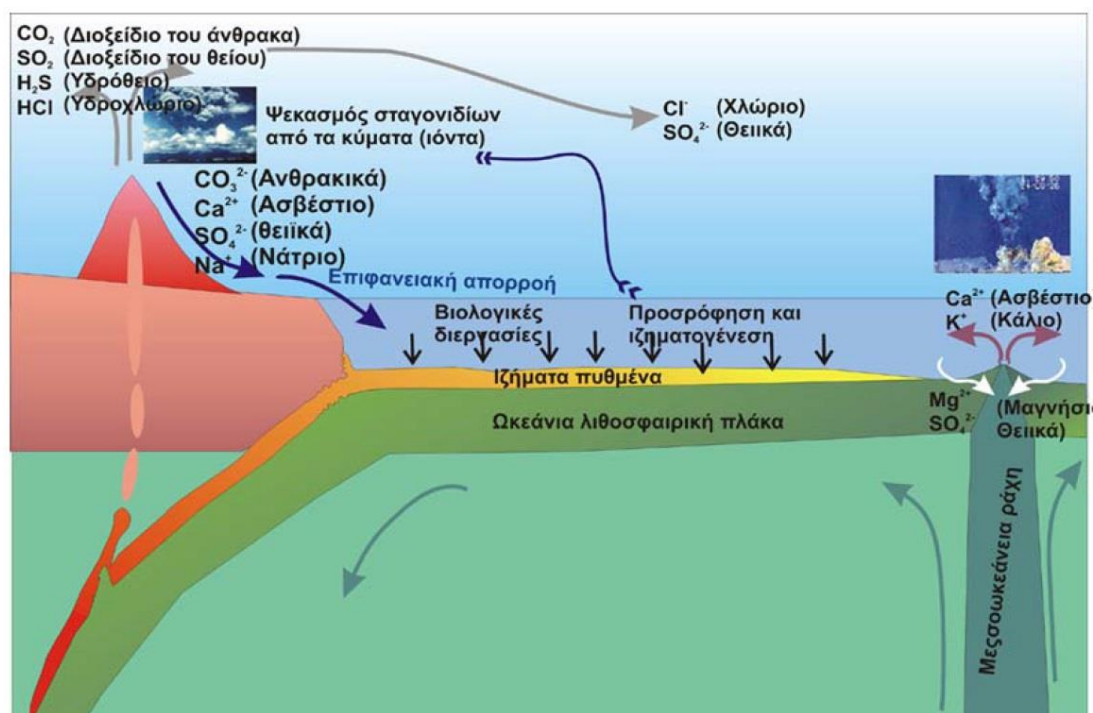
Ο William Dittmar, το 1876, διατύπωσε τον κανόνα των σταθερών αναλογιών, σύμφωνα με τον οποίο η χημική σύσταση του θαλασσινού νερού παραμένει ίδια, ανεξάρτητα από τη συνολική ποσότητα των αλάτων που είναι διαλυμένη στο θαλασσινό νερό. Αυτό οφείλεται κυρίως στην υψηλή παγκόσμια ωκεάνια κυκλοφορία, που προωθεί το φαινόμενο της ανάμειξης, ώστε η ταχύτητα ανάμειξης να υπερβαίνει κατά πολύ την ταχύτητα με την οποία προστίθενται ή απομακρύνονται τοπικά τα κυριότερα στοιχεία από το θαλασσινό νερό.

Τα ιόντα στο θαλασσινό νερό προέρχονται από (Σχήμα 2-5):

- τους ποταμούς: το νερό των ποταμών περιέχει διαλυμένα στοιχεία από τη χημική αποσάθρωση των πετρωμάτων, και
- την ηφαιστειακή δραστηριότητα (υποθαλάσσια και επιφανειακή).

Αναφορικά με το νερό τροφοδοσίας που επεξεργάζονται οι μονάδες αφαλάτωσης (Alvarado-Revilla, et al., 2015):

- 59.2%, επεξεργάζονται θαλασσινό νερό,
- 20.9%, επεξεργάζονται υφάλμυρο νερό,
- 9.5% επεξεργάζονται επιφανειακό νερό,
- 5.7% επεξεργάζονται υγρά απόβλητα, και



Πηγή: (Αλμπανάκης)

Σχήμα 2-5: Βιογεωχημικός κύκλος διαφόρων ιόντων

Πίνακας 2-2: Τα κυριότερα συστατικά του θαλάσσιου νερού

Ανιόν	% σε σχέση με την αλατότητα	Συγκέντρωση σε mg/kg	Κατιόν	% σε σχέση με την αλατότητα	Συγκέντρωση σε mg/kg
Cl ⁻	55	19.352	Na ⁺	30.6	10.758
SO ₄ ²⁻	7.7	2.707	Mg ²⁺	3.7	1.295
HCO ₃ ⁻	0.4	0.143	Ca ²⁺	1.2	0.415
Br ⁻	0.2	0.666	K ⁺	1.1	0.388
F ⁻	0.003	0.001	Sr ²⁺	0.03	0.011
H ₃ BO ₃	0.007	0.027			

Πηγή: (Χαραλάμπους, 2007)

Άλμη

Εξετάζεται χωριστά στην Ενότητα 2.5.

2.3.4 Σύγκριση τεχνικών αφαλάτωσης

Στους ακόλουθους πίνακες παρουσιάζεται συγκριτική αξιολόγηση των πιο διαδεδομένων εμπορικών τεχνολογιών αφαλάτωσης θαλασσινού νερού (Πίνακας 2-3) και υφάλμυρου νερού (Πίνακας 2-4).

Πίνακας 2-3: Σύγκριση τεχνολογιών αφαλάτωσης θαλασσινού νερού

	RO	MSF	MED - TVC	MVC
Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	< 45	< 120	< 70	< 70
Απαιτήσεις προ-επεξεργασίας	Υψηλές	Χαμηλές	Χαμηλές	Πολύ χαμηλές
Ενέργεια	Μηχανική (ηλεκτρική)	Ατμός (θερμική)	Ατμός (θερμική)	Μηχανική (ηλεκτρική)
Κατανάλωση θερμότητας (kJ/kg)	-	250-330	145-390	-
Ηλεκτρική κατανάλωση (kWh/m ³)	2.5 - 7	3 - 5	1.5 – 2.5	8 - 15
Δυναμικότητα μονάδας	< 20,000	< 76,000	< 36,000	< 3,000
Ποιότητα παραγόμενου νερού	200 – 500	< 10	< 10	< 10
Συντελεστής ανάκτησης νερού	35 – 50%	35 – 45%	35 – 45%	23 – 41%
Αξιοπιστία	Μέτρια	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή	Υψηλή

Πηγή: (Drew, 2010) (National Research Council, 2008)

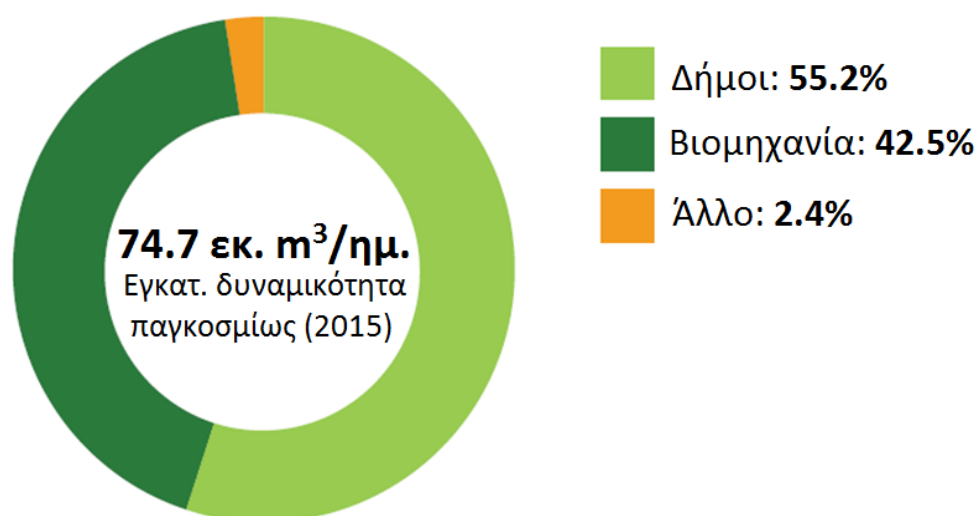
Πίνακας 2-4: Σύγκριση τεχνολογιών αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού

	RO	ED/EDR	NF
Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	< 45	< 43	< 45
Απαιτήσεις προ-επεξεργασίας	Υψηλές	Μέτριες	Υψηλές
Ηλεκτρική κατανάλωση (kWh/m ³)	0.5 – 3	~ 0.5 για 1,000mg/l	< 1
Δυναμικότητα μονάδας	< 20,000	< 12,000	< 20,000
Απομάκρυνση ιόντων (%)	99 – 99.5%	50 – 95%	50 – 98% (δισθενή) 20 – 75% (μονοθενή)
Συντελεστής ανάκτησης νερού	50 – 90%	50 – 90%	50 – 90%

Πηγή: (Drew, 2010) (National Research Council, 2008)

2.4 Χρήσεις αφαλατωμένου νερού

Η αφαλάτωση εφαρμόζεται τόσο για την παραγωγή πόσιμου νερού, όσο και στη βιομηχανία. Σύμφωνα με το Global Water Intelligence (βλ. επίσης Διάγραμμα 3-1), 55.1% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύς παγκοσμίως χρησιμοποιείται για αστική χρήση. Ωστόσο, αυτή η εικόνα αλλάζει έντονα ανά περιοχή. Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, οι Μεσογειακές χώρες χρησιμοποιούν κυρίως τις μονάδες αφαλάτωσης για παραγωγή πόσιμου νερού, ενώ οι χώρες της Κεντρικής και Βόρειας Ευρώπης εφαρμόζουν την αφαλάτωση για βιομηχανικούς σκοπούς.



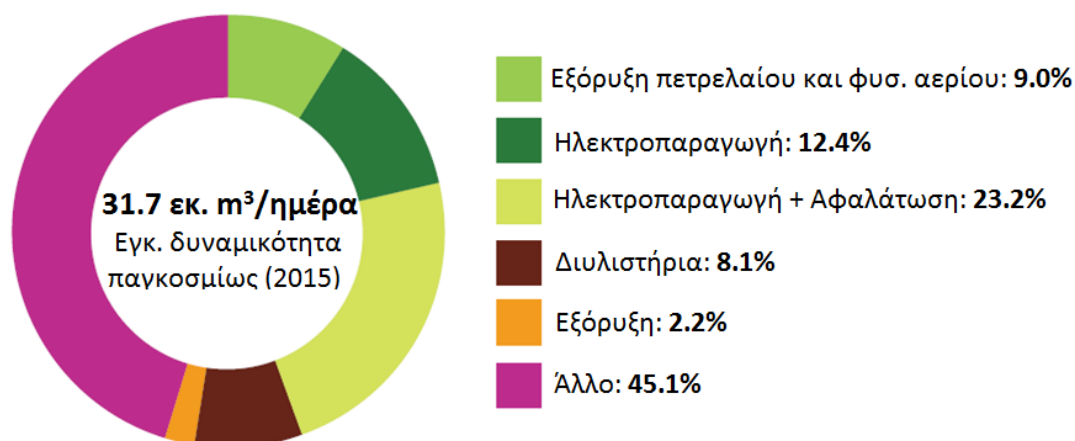
Πηγή: (Alvarado-Revilla, et al., 2015)

Διάγραμμα 2-4: Εγκατεστημένη δυναμικότητα αφαλάτωσης – Ανάλυση ανά τελικό χρήστη

Βιομηχανικές χρήσεις

Πολλές βιομηχανίες όπως π.χ. η βιομηχανία τροφίμων, η χημική βιομηχανία, απαιτούν νερό υψηλών προδιαγραφών για την παραγωγική τους διαδικασία. Για το λόγο αυτό απαιτείται επεξεργασία του νερού τροφοδοσίας. Η επεξεργασία αυτή περιλαμβάνει τεχνικές αποσκλήρυνσης (softening) ή/και τεχνικές απιονισμού. Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν τις ακόλουθες τεχνολογίες: (α) Αντίστροφη Όσμωση, (β) Νανοδιήθηση, (γ) Ιοντοεναλλαγή. Οι τεχνικές αυτές παράγουν ένα υπόλειμμα με υψηλά επίπεδα αλάτων (άλμη).

Συστήματα αφαλατώσεων χρησιμοποιούνται και για την τροφοδοσία λεβήτων. Το νερό στην περίπτωση αυτή πρέπει να είναι πολύ υψηλών προδιαγραφών έτσι ώστε να αποφεύγεται διάβρωση.



Πηγή: (Alvarado-Revilla, et al., 2015)

Σημείωση: Στην κατηγορία άλλο συμπεριλαμβάνονται: (α) Γεωργία, (β) Χημική Βιομηχανία, (γ) Ηλεκτροπαραγωγή, (δ) Ηλεκτροπαραγωγή + Αφαλάτωση, (ε) Βιομηχανία Τροφίμων, (στ) Βιομηχανία Μετάλλων, (ζ) Πετροχημική Βιομηχανία, (η) Διυλιστήρια, (θ) Εξορυκτική βιομηχανία

Διάγραμμα 2-5: Εγκατεστημένη δυναμικότητα παγκοσμίως στη βιομηχανία – Ανάλυση ανά βιομηχανικό χρήστη (2015)

2.5 Χαρακτηριστικά της άλμης

2.5.1 Ταξινόμηση άλμης

Η άλμη μπορεί να ταξινομηθεί ως ακολούθως (WssTP, 2012):

- Παρουσία ενός άλατος: χλωριούχα, θειικά, νιτρώδη, φθοριούχα, αμμονιούχα, φωσφορικά διαλύματα
- Παρουσία περισσότερων αλάτων: χλωριούχο ασβέστιο/χλωριούχο νάτριο, θεικό νάτριο, φωσφορικό νάτριο κ.λπ.
- Παρουσία των ανωτέρω καθώς επίσης και οργανικό ρυπαντικό φορτίο (Χημικώς Απαιτούμενο Οξυγόνο, *BOD*)
- Παρουσία των ανωτέρω καθώς επίσης και βαρέων μετάλλων

Η άλμη μπορεί να περιέχει επίσης καθαλατώσεις, μικρό ρυπαντές (τόσο οργανικούς όσο και ανόργανους, οι οποίοι ενδέχεται να είναι και τοξικοί όπως π.χ. διοξίνες), οργανικές ενώσεις, βαρέα μέταλλα, μη βιοδιασπώμενη οργανική ύλη και αντικαθαλατωτικά.

2.5.2 Πηγές άλμης

Η άλμη ορίζεται ως ένα υδατικό διάλυμα το οποίο βρίσκεται (κοντά) στο σημείο κορεσμού των διαλυμένων αλάτων ($>50\text{g/l}$), κυρίως του χλωριούχου νατρίου. Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει διαχωρισμός της άλμης ως ακολούθως (WssTP, 2012):

- Άλμη από μονάδες αφαλάτωσης
- Άλμη ως παραπροϊόν της βιομηχανίας

Οι δύο αυτές κατηγορίες παρουσιάζουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά. Αναλύονται ακολούθως.

2.5.2.1 Άλμη από μονάδες αφαλάτωσης

Η παραγωγή πόσιμου νερού από υφάλμυρο ή θαλασσινό νερό δεν είναι σύνηθες στη Δυτική και Βόρεια Ευρώπη. Ωστόσο, σε κάποιες χώρες, κυρίως στη Μεσόγειο είναι μία ταχέως αναπτυσσόμενη αγορά. Η κύρια τεχνική που χρησιμοποιείται είναι η Αντίστροφη Όσμωση. Η παραγωγή του νερού κυρίως πραγματοποιείται σε παράκτιες

περιοχές και η άλμη διατίθεται στη θάλασσα. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την απόρριψη αυτή αναλύονται/περιγράφονται στην Ενότητα 2.6.

Η τυπική σύσταση του υπολείμματος που προκύπτει από τις μονάδες παραγωγής πόσιμου νερού δίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 2-5: Χημική σύσταση άλμης σύμφωνα με τη βιβλιογραφία

Παράμετρος	Συγκέντρωση (mg/l)		
	(Macedonio et al., 2013)	(Ibáñez et al., 2013)	(Ahmed et al., 2000)
Ανιόντα			
Cl ⁻	45,500	38,886.5	31,905
SO ₄ ²⁻	6,507	5,315.9	4,800
HCO ₃ ⁻	306	173.4	149.5
CO ₃ ²⁻	-	154.8	-
Κατιόντα			
Na ⁺	25,505	21,921.9	18,293
Mg ²⁺	3,101	2,479.2	2,096
Ca ²⁺	1,000	790.78	631
K ⁺	-	742.9	-
Sr ²⁺	26	-	-

Το υπόλειμμα αυτό αποτελεί πρόκληση ως προς τη διαχείρισή του τόσο λόγω του υδραυλικού του φορτίου, όσο και λόγω πολλές φορές της πολυπλοκότητάς του. Αναφορικά με το υδραυλικό φορτίο, η ποσότητα του υγρού υπολείμματος (άλμη) που παράγεται εξαρτάται κυρίως από δύο παραμέτρους: (α) από τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μονάδας αφαλάτωσης (λόγος ανάκτησης) και (β) από την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας. Συχνά οι δύο αυτές παράμετροι είναι αλληλοσυνδεόμενες. Έτσι, η ποιότητα του νερού τροφοδοσίας επηρεάζει το λόγο ανάκτησης νερού και κατ'έκταση την απόρριψη της άλμης. Πιο συγκεκριμένα, όσο περισσότερο αλμυρό είναι το νερό τροφοδοσίας, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ποσότητα της παραγόμενης άλμης.

Για παράδειγμα, αν για νερό τροφοδοσίας χρησιμοποιείται θαλασσινό νερό, η ποσότητα της παραγόμενης άλμης είναι περίπου διπλάσια της ποσότητας του παραγόμενου νερού. Ενώ, αν για νερό τροφοδοσίας χρησιμοποιείται υφάλμυρο νερό,

η ποσότητα της παραγόμενης άλμης είναι περίπου το 1/8 της ποσότητας του παραγόμενου νερού.

Ακολουθώντας, δίνονται σχετικές έννοιες και ορισμοί για την περίπτωση της άλμης που παράγεται από μονάδες αφαλάτωσης (Tzen E. , 2009c).

Λόγος ανάκτησης

$$R = \frac{\text{Παροχή διηθήματος}}{\text{Παροχή τροφοδοσίας}} \quad (2-2)$$

Αλατότητα άλμης

Υπολογίζεται με την ακόλουθη σχέση

$$TDS_{\text{άλμης}} = TDS_{\text{τροφοδοσία}} \left(\frac{1}{1-R} \right) - \frac{R \cdot TDS_{\text{διήθημα}}}{100 \cdot (1-R)} \quad (2-3)$$

όπου:

Αγνοώντας την περιεκτικότητα σε χλωριόντα του διηθήματος (η οποία είναι λιγότερο από 1%), η παραπάνω σχέση απλοποιείται ως ακολούθως (Voutchkov, 2011):

$$TDS_{\text{άλμης}} = TDS_{\text{τροφοδοσία}} \left(\frac{1}{1-R} \right) \quad (2-4)$$

Λόγος συμπύκνωσης:

Ο λόγος συμπύκνωσης (Concentration Factor, *CF*) ορίζεται ως η αλατότητα της απορριπτόμενης άλμης προς την αλατότητα του ρεύματος τροφοδοσίας και σχετίζεται με το λόγο ανάκτησης με την ακόλουθη σχέση:

$$CF = \frac{1}{1-R} \quad (2-5)$$

Παροχή

Μετατροπή από γαλλόνια σε κυβικά

- 1 US gallon = 3.7854 liters
- 1 US gallons per day = 0.00378541178 m³ per day

2.5.2.2 Η άλμη ως παραπροϊόν της βιομηχανίας

Η σύνθεση και συγκέντρωση των διαφόρων ενώσεων στα υγρά βιομηχανικά απόβλητα διαφέρει ανάλογα με τον τύπο της βιομηχανικής διεργασίας που παράγει τα απόβλητα αυτά. Βασικές βιομηχανικές δραστηριότητες που παράγουν τέτοιου τύπου απόβλητα περιλαμβάνουν τις ακόλουθες δραστηριότητες (WssTP, 2012) (Lefebvre & Moletta, 2006):

- Παραγωγή ενέργειας (κυρίως κατά την επεξεργασία καυσαερίων και την επεξεργασία του νερού ψύξης (Drake, Wise, & Venkatadri, 2011))
- Βιομηχανία τροφίμων
- Κλωστοϋφαντουργία
- Πετροχημική βιομηχανία (κυρίως κατά την εξόρυξη πετρελαίου και κατά την παραγωγή νερού)
- Χημική βιομηχανία (περιλαμβάνει βιοτεχνολογία και τον φαρμακευτικό τομέα)

Η απόρριψη χλωριόντων δίνεται στον ακόλουθο πίνακα ανά βιομηχανική δραστηριότητα, ενώ ανά χώρα δίνεται στον Πίνακα 2-7.

Πίνακας 2-6: Απόρριψη χλωρίου στην Ευρώπη (2004)

α/α	Βιομηχανία	Απόρριψη (τόνοι/χρόνο)
1	Χημική Βιομηχανία	11,542,741
2	Επεξεργασία αποβλήτων	339,020
3	Βιομηχανία Χάλυβα	322,790
4	Ηλεκτροπαραγωγή	213,238
5	Πετροχημική βιομηχανία	200,860
6	Παραγωγή χάρτου	57,910
7	Βιομηχανία τροφίμων	37,200
8	Βυρσοδεψεία, κλωστοϋφαντουργία	2,020
Σύνολο		12,715,779

Πηγή: (WssTP, 2012)

Πίνακας 2-7: Απόρριψη χλωρίου στην Ευρώπη, ανά χώρα (2004)

Χώρα	Απόρριψη	Χώρα	Απόρριψη
Γερμανία	4,108,670	Αυστρία	167,300
Ιταλία	1,432,487	Φιλανδία	145,020
Αγγλία	1,416,460	Σλοβακία	44,790
Πολωνία	1,317,280	Ελλάδα	44,500
Γαλλία	1,290,190	Τσεχία	31,200
Ισπανία	1,177,760	Σουηδία	18,130
Ολλανδία	739,752	Ιρλανδία	2,530
Βέλγιο	476,980	Δανία	2,130
Πορτογαλία	300,600		

Πηγή: (WssTP, 2012)

Τα υγρά βιομηχανικά απόβλητα με υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα παράγονται από μία σειρά βιομηχανικών δραστηριοτήτων. Οι βασικότερες δραστηριότητες περιγράφονται περιεκτικά ακολούθως.

Βιομηχανία τροφίμων

Το χλωριούχο νάτριο χρησιμοποιείται στη βιομηχανία τροφίμων για δύο λειτουργίες: (α) ως συστατικό (πρώτη ύλη), (β) για συντήρηση των τροφίμων. Οι τομείς της βιομηχανίας τροφίμων που απαιτούν τις μεγαλύτερες ποσότητες χλωριούχου νατρίου είναι οι εξής: (α) κονσερβοποίηση κρέατος, (β) αλιπάσωση (πάστωμα) λαχανικών, (γ) γαλακτοβιομηχανία, (δ) επεξεργασία ιχθύος. Η άλμη αφυδατώνει τα βακτηριακά κύτταρα, μειώνει την ενεργότητα του ύδατος και έτσι αναστέλλει τη βακτηριακή ανάπτυξη (Λάζος). Στη βιομηχανία τροφίμων, τα αλατούχα υγρά απόβλητα παράγονται κυρίως λόγω της χρήσης αλατούχων διαλυμάτων ή/και άλατος ως πρώτη ύλη κατά την παραγωγική διαδικασία.

Σε κάποιες χώρες, όπως π.χ. στην Ολλανδία, η νομοθεσία περιορίζει τη χρήση άλατος στην παραγωγική διαδικασία, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις πρέπει να αποφευχθεί τελείως η χρήση του άλατος προκειμένου να συμμορφωθούν οι βιομηχανίες με την κείμενη νομοθεσία. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό σε μερικές περιπτώσεις χρησιμοποιείται η τεχνική της Ορθής Όσμωσης (*Forward Osmosis*), η οποία επίσης οδηγεί στην παραγωγή άλμης (WssTP, 2012).

Βυρσοδεψία

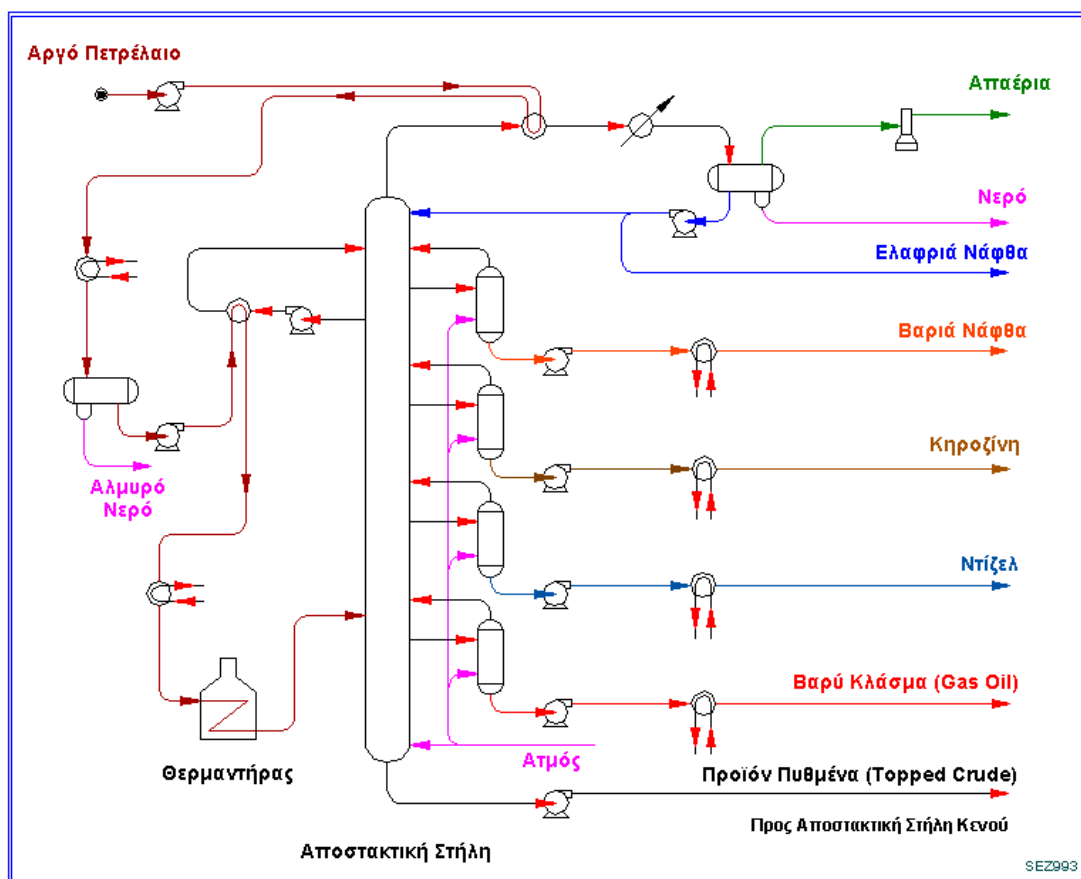
Η διεργασία της βυρσοδεψίας, η οποία μετατρέπει την πρώτη ύλη (ακατέργαστα δέρματα) σε τελικά προϊόντα, είναι μία παραγωγική διαδικασία πολλαπλών σταδίων, πολλά εκ των οποίων απαιτούν την προσθήκη άλατος. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του κλάδου είναι σημαντικές. Η παραγωγική διαδικασία οδηγεί στην παραγωγή αυξημένων ποσοτήτων υγρών αποβλήτων. Ορισμένα από αυτά τα ρεύματα είναι πολύ υψηλής αλατότητας (80 g/l) (Lefebvre & Moletta, 2006).

Πετροχημική βιομηχανία

Το αργό πετρέλαιο αποτελεί ένα περίπλοκο μείγμα αλειφατικών, αλκυλικών και αρωματικών υδρογονανθράκων. Η διύλιση του πετρελαίου απαιτεί τη χρήση απογαλακτωματοποιητών (*demulsifiers*) (Σχήμα 2-6) και το παραγόμενο υγρό απόβλητο (το οποίο αποκαλείται "παραγόμενο νερό") από τη διαδικασία διαχωρισμού (*decantation*) του γαλακτώματος νερού-πετρελαίου, παρουσιάζει εύρος αλατότητας από τιμές επιφανειακού νερού έως και τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτή του θαλασσινού νερού (150 g/L).

Τα απόβλητα που παράγονται τόσο κατά την εξόρυξη του πετρελαίου όσο και κατά τη διύλιση του και κατά την παραγωγή των πετροχημικών προϊόντων. Τα απόβλητα αυτά, πριν την διάθεσή τους στους υδάτινους αποδέκτες, υποβάλλονται σε φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες. Τα υγρά βιομηχανικά απόβλητα από την πετροχημική βιομηχανία είναι κυρίως επιβαρυνμένα με φαινολικές ενώσεις, άλατα και υψηλό COD (Γεωργιοπούλου, 2007).

Το απόβλητο αυτό είναι πολύ απαιτητικό ως προς τη διαχείρισή του καθώς εμφανίζει υψηλό ρυπαντικό φορτίο σε χλωρίοντα, θειικά και COD. Ως εκ τούτου, απαιτεί συνδυασμό διαφορετικών τεχνολογιών επεξεργασίας. Μία πιθανή αντιμετώπιση του υγρού αποβλήτου αυτού είναι εφαρμογή αρχικά κάποιας μεθόδου απομάκρυνσης/καταστροφής του οργανικού ρυπαντικού φορτίου, πριν την τελική επεξεργασία με την καινοτόμο τεχνολογία που μελετάται στα πλαίσια αυτής της διατριβής. Για παράδειγμα, η εφαρμογή αναερόβιου χωνευτήρα ιλύος (βιοαντιδραστήρα μεμβρανών) δύναται να ελαχιστοποιήσει τα επίπεδα COD, καθώς επίσης και να παράξει βιοαέριο το οποίο μπορεί να προσφέρει μέρος ή ακόμα και ολόκληρη την απαιτούμενη ενέργεια για τη λειτουργία του συστήματος εξάτμισης. Για το σκοπό αυτό φυσικά πρέπει να χρησιμοποιηθεί σύστημα καύσης του βιοαερίου ή επίσης σύστημα συμπαραγωγής.



Σχήμα 2-6: Διάγραμμα ροής διύλισης αργού πετρελαίου

Χημική βιομηχανία

Η χημική βιομηχανία είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός βιομηχανικής άλμης. Η άλμη αυτή είναι ιδιαίτερη σύνθετη στη φύση της, διαφέρει αρκετά ανάλογα με τον τομέα της χημικής βιομηχανίας όπως π.χ. φαρμακευτική βιομηχανία, πετροχημική βιομηχανία, ειδικά χημικά και χημικά για καταναλωτές (WssTP, 2012).

Στον τομέα διαχείρισης της άλμης από μονάδες της χημικής βιομηχανίας, θα ήταν παράλειψη να μην αναφερθεί το Ευρωπαϊκό Έργο E4Water (Συμφωνία Επιδότησης: [FP7-NMP-2011.3.4-1](#)).

Μεταλλευτική βιομηχανία

Η όξινη απορροή (AMD: *Acid Mine Drainage*) παρουσιάζει υψηλά επίπεδα θεικών (>10 g/L) στη μορφή μετάλλων. Η μεγαλύτερη δυσκολία με τα απόβλητα αυτά έγκειται στην απαίτηση επεξεργασίας τους μετά το πέρας της διάρκειας ζωής του μεταλλείου (WssTP, 2012).

2.6 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μονάδων αφαλάτωσης εντοπίζονται σε όλα τα στάδια παραγωγής (Latteman, 2010) (Darwish, Hassabou, & Shomar, 2013):

- Τροφοδοσία
- Προ-επεξεργασία
- Αφαλάτωση
- Διάθεση άλμης
- Καθαρισμός μεμβρανών (για συστήματα αντίστροφης όσμωσης)

Τροφοδοσία:

Οι αντλίες αναρρόφησης διοχετεύουν μεγάλους όγκους θαλασσινού νερού. Η πρόσκρουση (impingement) ορίζεται ως η παγίδευση ψαριών στις σχάρες του συστήματος αναρρόφησης, με αποτέλεσμα τον τραυματισμό ή ακόμα και το θάνατό τους. Η συμπαράσυρση (entrainment) αφορά σε μικρότερους οργανισμούς συμπεριλαμβάνοντας το πλακτόν, τα αυγά ψαριών κ.λπ. Ο Cooley (2013) διατυπώνει προτάσεις για μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στο στάδιο της τροφοδοσίας.

Προ-επεξεργασία:

Η άλμη μεταφέρει και διάφορα χημικά (αντικαθαλατωτικά, θειικό οξύ για διόρθωση του pH κ.λπ.), τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως κατά τη προ-επεξεργασία του νερού τροφοδοσίας (Tzen E. , 2009). Τα χημικά αυτά αν και βρίσκονται σε μικρές ποσότητες, μπορούν δυνητικά να επιδράσουν αρνητικά, ιδιαίτερα κατά την απόρριψή τους σε ευαίσθητα οικοσυστήματα.

Διάθεση της άλμης

Αν και η αφαλάτωση είναι μία τεχνική που χρησιμοποιείται εμπορικά εδώ και περίπου έναν αιώνα, υπάρχει έλλειψη δεδομένων, καθώς επίσης και έλλειψη μία μεθοδολογίας ΕΙΑ³ για την αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Lattemann & Hörner, 2008). Η πρώτη μελέτη που αναφέρει την πιθανότητα πρόκλησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την άλμη δημοσιεύτηκε το 1979 (Bleninger &

³ Environmental Impact Assessment

Jirka, 2010). Σε μία πρόσφατη βιβλιογραφική ανασκόπηση, οι Roberts et al (2010) εντόπισαν 62 επιστημονικά άρθρα που αφορούν στην απόρριψη της άλμης σε θαλάσσια οικοσυστήματα και βρήκαν ότι η πλειοψηφία των άρθρων (43.5%) αποτελούν απόψεις και εκτιμήσεις των συγγραφέων με λίγα ποσοτικά στοιχεία. Οι Zhou, Chang, & Fane (2013) επισημαίνουν την ανάγκη αποτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων με χρήση κατάλληλων εργαλείων όπως το LCA. Αν και υπάρχουν διάφορες μελέτες στη διεθνή βιβλιογραφία που εφαρμόζουν τη μεθοδολογία αυτή, οι περισσότερες επικεντρώνονται στις επιπτώσεις που αφορούν στη χρήση ενέργειας ή στην κατασκευαστική φάση των μονάδων αφαλάτωσης (χρήση πρωτογενών υλικών, μεταφορά εξοπλισμού κ.λπ.). Οι Zhou et al. προτείνουν μία νέα μεθοδολογία για την αποτίμηση των επιπτώσεων “aquatic eco-toxic” από την απόρριψη της άλμης.

Για την προσομοίωση της υποβρύχιας εκροής, χρησιμοποιούνται διάφορα λογισμικά με το CORMIX να αποτελεί το πιο διαδεδομένο. Κατόπιν εισαγωγής διαφόρων παραμέτρων (συγκέντρωση άλμης, ταχύτητα, παροχή όγκου κ.λπ.), το εργαλείο αυτό μπορεί να προβλέψει την τροχιά και το σχήμα του πλουμίου της άλμης, τη συγκέντρωση διαφόρων ρυπαντών και την επιτυγχανόμενη αραίωση τόσο για το κοντινό όσο και για το μακρινό πεδίο (Palomar & Losada, 2011).

Για την εκτίμηση των επιπτώσεων της άλμης, είναι σημαντικό να γίνει κατανοητή η αύξηση της αλατότητας που προκύπτει από τη λειτουργία των μονάδων αφαλάτωσης. Αν υποθέσουμε ένα τυπικό συντελεστή ανάκτησης νερού στο εύρος 30% - 50%, τότε ο λόγος συγκέντρωσης προκύπτει ίσος με 1.43 – 2. Αυτό σημαίνει ότι η αλατότητα έχει αυξηθεί κατά 43% ή ακόμα και διπλασιαστεί. Η αύξηση της αλατότητας είναι πολύ σημαντική από βιολογικής πλευράς, δεδομένου ότι επηρεάζει σημαντικά τους οργανισμούς που ζουν στο θαλάσσιο οικοσύστημα. Οι σημαντικές επιπτώσεις παρατηρούνται στους βενθικούς⁴ οργανισμούς, ενώ ασήμαντες ως μηδαμινές είναι οι

⁴ Με τον όρο Βένθος χαρακτηρίζεται το σύνολο των έμβιων οργανισμών, που ζουν και αναπτύσσονται στο βυθό των ωκεανών και των θαλασσών ή και των λιμνών. Έχουν επίσης καθιερωθεί οι όροι *φυτοβένθος* και *ζωοβένθος* για την διάκριση των φυτικών και των ζωικών βενθικών οργανισμών αντίστοιχα. Οι οργανισμοί του Βένθους διακρίνονται στις εξής επιμέρους σύγχρονες κατηγορίες, ανάλογα με το βάθος του βιοτόπου που ζουν:

- Παράλιοι: Βάθος < 40m

επιπτώσεις για τους πελαγικούς (πλαγκτικούς) οργανισμούς (Roberts, Johnston, & Knott, 2010). Οι Riera, Tuya, Ramos, Rodríguez, & Monterroso (2012) μελέτησαν τις επιπτώσεις μονάδας αφαλάτωσης στην περιοχή Las Burras της Ισπανίας και κατέληξαν ότι παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στα χαρακτηριστικά του μακροβένθους αναφορικά με το πλήθος και την ποικιλία. Ωστόσο, επισημαίνουν ότι οι επιπτώσεις αυτές έχουν τοπικό χαρακτήρα.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το μέγεθος των επιπτώσεων εξαρτάται σημαντικά από διάφορες παραμέτρους όπως: (α) ο τύπος του οικοσυστήματος, στο οποίο απορρίπτεται η άλμη, (β) το γενικό υδροδυναμικό πεδίο που χαρακτηρίζει την περιοχή απόρριψης (ύπαρξη ρευμάτων), (γ) το βάθος στο οποίο γίνεται η απόρριψη και (δ) το υδραυλικό φορτίο της απόρριψης (Gacia, Invers, Manzanera, Ballesteros, & Romero, 2007). Ο Münk (2008) επισημαίνει ότι αρκετές μελέτες καταλήγουν ότι έκθεση σε ρεύμα άλμης σταθερά πάνω από 45 g/l επιδρούν αρνητικά στη βενθική κοινότητα και μειώνουν σημαντικά τη βιοποικιλότητα, ενώ οι Ahmad & Baddour (2014) καταλήγουν πως είναι απαραίτητη η ανάπτυξη ρυθμιστικού πλαισίου για την προστασία του περιβάλλοντος από τη διάθεση της άλμης σε επιφανειακά ύδατα. Ωστόσο ορισμένοι υποστηρίζουν ότι με σωστό σχεδιασμό, η διάθεση της άλμης σε επιφανειακά ύδατα αποτελεί μία περιβαλλοντικά ασφαλή πρακτική (Water Reuse Association, 2010).

Σύμφωνα με την διευθύντρια του Μεσογειακού Προγράμματος Δράσης των Ηνωμένων Εθνών (UNEP-MAP), κα Mejias, η απόρριψη της άλμης που παράγεται από μονάδες αφαλάτωσης, αποτελεί μία από τις σημαντικότερες απειλές για τη Μεσόγειο Θάλασσα (Xevgenos, Moustakas, Malamis, & Loizidou, 2016).

Η **Μεσόγειος Θάλασσα**, και γενικά αποδέκτες που έχουν χαρακτηριστικά κλειστού κόλπου (όπως επίσης και ο Αραβικός κόλπος) εγείρουν μεγαλύτερη ανησυχία στην επιστημονική κοινότητα λόγω του κινδύνου καταστροφής σημαντικών οικοτόπων.

-
- Υποπαράλιοι: 40 m < Βάθος < 200 m
 - Βαθύαλοι: 200 m < Βάθος < 400 m
 - Αβυσσαίοι: 400 m < Βάθος < 6,000 m
 - Πλουτώνιοι: Βάθος > 6,000 m

Χαρακτηριστικό παράδειγμα για τη Μεσόγειο Θάλασσα είναι ο **Οικότοπος 1120 «Λιβάδια Ποσειδωνίας»**. Τα λιβάδια αυτά αποτελούν ίσως το σημαντικότερο παράγοντα ζωής για τη θάλασσα της Μεσογείου και ήδη έχει παρατηρηθεί σημαντική απώλεια του οικοτόπου λόγω της απορριπτόμενης άλμης από αφαλατώσεις (π.χ. στη Λεμεσό της Κύπρου) (UNEP-MAP/MEDPOL, 2003). Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι, γενικά, πρέπει να αποφεύγεται η απόρριψη της άλμης σε περιοχές με Ποσειδωνία. Στις περιπτώσεις που αυτό δεν είναι εφικτό, πρέπει να γίνονται συχνές μετρήσεις της αλατότητας και να εξασφαλίζεται ότι η τιμή της αλατότητας δεν θα υπερβαίνει τα 38.5 psu για περισσότερο από το 25% του χρόνου (Latorre, 2005).

Λιβάδια Ποσειδωνίας

Η Ποσειδωνία (*Posidonia oceanica*) είναι ένα θαλάσσιο φυτό με το σπάνιο χαρακτηριστικό να δημιουργεί υποθαλάσσια λιβάδια και αναγνωρίζεται σαν ένα από τα πιο σημαντικά είδη του μεσογειακού παράκτιου περιβάλλοντος. Τα θαλάσσια λιβάδια της Ποσειδωνίας αποτελούν καταφύγιο και περιοχή ανάπτυξης για περισσότερα από 1200 θαλάσσια είδη, είναι ένας φυσικός σύμμαχος ενάντια στις κλιματικές αλλαγές επειδή παράγουν μεγάλες ποσότητες οξυγόνου απορροφώντας διοξείδιο του άνθρακα, προστατεύουν τις ακτές από τη διάβρωση και προσφέρουν ενέργεια στην τροφική αλυσίδα. Για τους παραπάνω λόγους, η Ευρωπαϊκή Οδηγία για τους Οικότοπους (92/43) χαρακτηρίζει την Ποσειδωνία ως οικότοπο προτεραιότητας και επιβάλλει την προστασία της.

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Κοινότητα, η Ποσειδωνία είναι ιδιαίτερα ευάλωτη στην αύξηση της αλατότητας. Συγκεντρώσεις πάνω από 39 psu μπορούν να προκαλέσουν θάνατο στον οικότοπο με αρκετά γρήγορο ρυθμό. Σημειώνουμε πως τα επίπεδα αλατότητας της άλμης βρίσκονται εντός του εύρους 40-80psu (Almela & Duarte, 2008).

Στην περίπτωση της μονάδας αφαλάτωσης στη Δεκέλεια της Κύπρου, μία μελέτη τριών ετών για την αποτύπωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στο θαλάσσιο μακροβένθος έδειξε ότι η υψηλή αλατότητα προκάλεσε σημαντική υποβάθμιση στην κοινότητα *Cystoseira barbata*. Επίσης, κάποιες άλλα είδη εξαφανίστηκαν τελείως στις γειτονικές περιοχές (απόσταση 100m από την εκροή) (UNEP-MAP/MEDPOL, 2003) (Einav).

Πίνακας 2-8: Συγκεντρωτικός πίνακας περιβαλλοντικών επιπτώσεων μονάδων αφαλάτωσης

Παράμετρος	Επίπτωση στο περιβάλλον	Αναγνωρισμένοι κίνδυνοι
Υψηλή αλατότητα	Μείωση βιοποικιλότητας της θάλασσας	Υψηλό ρίσκο για τον οικοτόπο 1120: αγγειόσπερμο «Posidonia Oceanica» και για τα κοράλλια. Και οι δύο οργανισμοί παρουσιάζουν ελάχιστη ανοχή σε μεταβολές της φυσικής αλατότητας.
Θόρυβος	- Υψηλά επίπεδα θορύβου	
Χλωρίνη	- Θανατώνει ψάρια και φυτά - Δυσκολεύει τη φωτοσύνθεση - Επίδραση σε ψάρια	Αντίδραση με οργανικές ενώσεις παράγει προϊόντα τοξικά για τα ψάρια ακόμη και από συγκεντρώσεις 20μg/l. THM: Καρκινογόνος ουσία για τα ζώα
Αντικαθαλατωτικά	Συσσώρευση, χρόνιες παθήσεις, άγνωστες συνέπειες	
Κροκιδωτικά (Coagulants)	Υψηλή τύρβη κατά τη διαδικασία της αντίστροφης πλύσης των φίλτρων Δυσκολεύουν τη φωτοσύνθεση	
Μέταλλα (Fe, Cr, Ni, Mb)	Πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις. Αφορούν κυρίως θερμικές τεχνικές αφαλάτωσης	

2.7 Μονάδα αντίστροφης όσμωσης, Άγιος Φωκάς, Τήνος⁵

Το σύνολο του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού της μονάδας, με την εξαίρεση των αντλιών υδροληψίας και τροφοδοσίας που θα εγκατασταθούν στα πηγάδια και στις δεξαμενές θαλασσινού νερού αντίστοιχα, είναι εγκατεστημένο, συνδεδεμένο υδραυλικά και ηλεκτρικά και έτοιμο για χρήση, μέσα σε δύο κοντέινερ 40'. (12,10 μέτρων) τύπου HIGH CUBE, δηλαδή ύψους 2,70m. Το κάθε κοντέινερ είναι εφοδιασμένο με ανεμιστήρα εξαερισμού για την συνεχή ανανέωση του αέρα και την απαγωγή της θερμότητας.

ΑΝΤΛΙΕΣ ΥΔΡΟΛΗΨΙΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ

Οι αντλίες έχουν εγκατασταθεί σε παράκτιο πηγάδι. Το σύστημα αποτελείται από 3 εμβαπτισμένα φυγοκεντρικά αντλητικά συγκροτήματα, εκ των οποίων τα δυο είναι εφεδρικά.

α. Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας

- Παροχή : 70 m³/h
- Αντίστοιχο μανομετρικό : 16 ΜΥΣ

β. Τεχνικά χαρακτηριστικά κινητήρα

- Ισχύς : 5.5 KW

ΑΝΤΛΙΕΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ

Οι αντλίες έχουν εγκατασταθεί στις δεξαμενές καθίζησης του θαλασσινού νερού. Το σύστημα αποτελείται από 2 εμβαπτισμένα φυγοκεντρικά αντλητικά συγκροτήματα, εκ των οποίων το ένα είναι εφεδρικό.

α. Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας

- Παροχή : 56.6 m³/h
- Αντίστοιχο μανομετρικό : 48.3 ΜΥΣ

β. Τεχνικά χαρακτηριστικά κινητήρα

- Ισχύς : 11 KW

⁵ Τα στοιχεία που παρατίθενται σε αυτή την ενότητα, είναι ευγενική χορηγία της εταιρείας Culligan Hellas AEBE

ΑΝΤΛΙΑ ΕΚΠΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΦΑΛΑΤΩΤΗ

Χρησιμοποιείται για την προώθηση του αφαλατωμένου νερού από το υπερυψωμένο δοχείο συλλογής των 3,000 λίτρων προς τις αντλίες υψηλής πίεσης και τις μεμβράνες σε κάθε σταμάτημα της λειτουργίας για την αποφυγή διαβρώσεων.

α. Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας

- Παροχή : 36 m³/h
- Αντίστοιχο μανομετρικό : 2.8 atm

β. Τεχνικά χαρακτηριστικά κινητήρα

- Ισχύς : 5.5 KW

ΑΝΤΛΙΑ ΧΗΜΙΚΟΥ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ

Χρησιμοποιείται για την προώθηση του εκάστοτε χημικού καθαριστικού διαλύματος από το δοχείο παρασκευής του προς τις μεμβράνες.

α. Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας

- Παροχή : 56 m³/h
- Αντίστοιχο μανομετρικό : 4.6 atm

β. Τεχνικά χαρακτηριστικά κινητήρα

- Τύπος: Ασύγχρονος, βραχυκυκλωμένου δρομέα.
- Ισχύς: : 11 KW

ΑΝΤΛΗΤΙΚΟ ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΜΕ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΟ

Χρησιμοποιείται για την προώθηση του θαλασσινού νερού προς τις μεμβράνες με την κατάλληλη πίεση ώστε να υπερνικάται η οσμωστική πίεση και να παράγεται αφαλατωμένο νερό. Αποτελείται από δύο εν σειρά συνδεδεμένες αντλίες.

α. Τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλίας

- Παροχή : 56.6 m³/h
- Μανομετρικό : 68.09 atm

β. Κινητήρας

- Ισχύς : 90 KW

γ. Υδροστρόβιλος

- Ανακτώμενη ισχύς : 57.1 KW

ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΗ ΑΝΤΛΙΑ ΥΠΟΧΛΩΡΙΩΔΟΥΣ ΝΑΤΡΙΟΥ (ΠΡΟΧΛΩΡΙΩΣΗ)

Χρησιμοποιείται για την έγχυση υποχλωριώδους νατρίου στην δεξαμενή θαλασσινού νερού.

ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΗ ΑΝΤΛΙΑ ΥΠΟΧΛΩΡΙΩΔΟΥΣ ΝΑΤΡΙΟΥ (ΜΕΤΑΧΛΩΡΙΩΣΗ)

Χρησιμοποιείται για την έγχυση υποχλωριώδους νατρίου στην δεξαμενή πόσιμου νερού.

ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΗ ΑΝΤΛΙΑ ΕΓΧΥΣΗΣ ΘΕΙΚΟΥ ΟΞΕΟΣ (ΠΡΟΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ)

Χρησιμοποιείται για την έγχυση θεικού οξέος πριν τα φίλτρα φυσιγγίων.

ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΗ ΑΝΤΛΙΑ ΕΓΧΥΣΗΣ ΘΕΙΚΟΥ ΟΞΕΟΣ (ΜΕΤΑΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ)

Χρησιμοποιείται για την έγχυση θεικού οξέος πριν το φίλτρο ανθρακικού ασβεστίου.

ΦΙΛΤΡΟ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ

α. Τεχνικά χαρακτηριστικά

- Παροχή λειτουργίας : 14.15 m³/h

β. Δοχείο φίλτρου

Το δοχείο του φίλτρου θα είναι κατασκευασμένο από πολυεστέρα ενισχυμένο με ίνες υάλου (FIBER GLASS) με εσωτερική στρώση πολυαιθυλενίου.

ΦΙΛΤΡΑ ΦΥΣΙΓΓΙΩΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Χρησιμοποιούνται δύο παράλληλα φίλτρα για την συγκράτηση σωματιδίων με μέγεθος μεγαλύτερο από 1μ.

- Παροχή : 30 m³/h

ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΟΣΜΩΣΗ

Η συσκευή αποτελείται από :

- α. Την συστοιχία των οσμωτικών μεμβρανών υψηλής απόρριψης αλάτων, κατάλληλων για νερό υψηλής περιεκτικότητας σε άλατα, οι οποίες, είναι τοποθετημένες μέσα σε δοχεία πίεσεως που στηρίζονται σε πλαίσιο από ανοξείδωτο χάλυβα για άριστη αντιδιαβρωτική προστασία και εδράζονται αντικραδασμικά.
- β. Υδραυλικές συνδέσεις υψηλής πίεσης ήτοι σωληνώσεις, συστολές, καμπύλες, ταφ, φλάντζες κλπ.
- γ. Υδραυλικές συνδέσεις από PVC, έως την φλάντζα εξόδου, πλήρεις με εξαρτήματα και ειδικά τεμάχια.

Τεχνικά χαρακτηριστικά

- Παροχή μετά από τρία χρόνια

(Λειτουργία στους 18°C) : 21.7 m³/h

ΜΟΝΑΔΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΩΝ

Περιγραφή της μονάδας

Το σύστημα είναι σχεδιασμένο να ανακυκλοφορεί διάφορα καθαριστικά μέσα, διά μέσου των μεμβρανών, ώστε να καταστεί δυνατή η απομάκρυνση των ακαθαρσιών. Αυτό προλαμβάνει το μόνιμο βούλωμα της μεμβράνης και επομένως την καταστροφή της. Με την προσφερόμενη μονάδα καθαρισμού θα καθαρίζονται ταυτόχρονα όλες οι μεμβράνες της συσκευής αντίστροφης όσμωσης.

ΦΙΛΤΡΟ ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΥ ΑΣΒΕΣΤΙΟΥ

Χρησιμοποιείται για την αύξηση της σκληρότητας, της αλκαλικότητας και την ανύψωση του pH του αφαλατωμένου νερού.

Παροχή : 21.7 m³/ h

ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

Το ξεκίνημα λειτουργίας της εγκατάστασης αφαλάτωσης γίνεται αυτόματα, σύμφωνα με την ζήτηση νερού. Ένας ρυθμιστής στάθμης τοποθετημένος στην δεξαμενή αποθήκευσης πόσιμου νερού του εργοστασίου αφαλάτωσης ελέγχει το ξεκίνημα της γραμμής αφαλάτωσης.

Η διαδικασία των σημάτων αυτοματισμού είναι η ακόλουθη :

- Οι ρυθμιστές στάθμης της δεξαμενής αποθήκευσης πόσιμου νερού δίδουν εντολή να ξεκινήσει η αντλία τροφοδοσίας θαλασσινού νερού, που έχει σειρά να λειτουργήσει.
- Η αντλία τροφοδοσίας θαλασσινού νερού ξεκινά όλες τις τροφοδοτικές αντλίες χημικών διαλυμάτων της μονάδας προκατεργασίας του νερού.
- Μετά από μερικά δευτερόλεπτα, εάν όλα τα σήματα που προέρχονται από τούς ελεγκτές των διαφόρων παραμέτρων για την προστασία της αντλίας υψηλής πίεσεως και των μεμβρανών της αντίστροφης όσμωσης έχουν καλώς

Η αντλία υψηλής πίεσης αρχίζει την λειτουργία της, επιτρέποντας κατά τον ίδιο χρόνο την λειτουργία των συστημάτων της χημικής μετεπεξεργασίας του νερού. Στην περίπτωση που ένας από τούς προαναφερθέντες συναγερμούς δεν επιτρέψει στην αντλία υψηλής πίεσεως να λειτουργήσει, όλο το σύστημα της μονάδας προκατεργασίας του νερού αυτόματα σταματά.

Πίνακας 2-9: Χημική σύσταση νερού τροφοδοσίας, παραγόμενου νερού και άλμης, μονάδα ασφαλάτωσης Τήνου

Παράμετρος	Συγκέντρωση (mg/l)		
	Νερό Τροφοδοσίας	Παραγόμενο Νερό	Άλμη
Cl ⁻	23,922.20	85.64	41,197.47
Na ⁺	13,202.92	51.93	22,733.95
SO ₄ ²⁻	2,726.66	0.98	4,702.06
Mg ²⁺	1,480.00	1.43	2,551.58
Ca ²⁺	560.00	0.53	965.47
K ⁺	415.00	1.89	714.39
HCO ₃ ⁻	180.44	1.06	303.45
CO ₃ ²⁻	5.59	0.00	13.01
Sr ²⁺	8.00	0.01	13.79
BO ₃ ⁻	4.50	0.68	7.27
CO ₂	3.83	4.41	5.98
SiO ₂	3.00	0.02	5.16
NO ₃ ⁻	2.10	0.09	3.56
TDS	42,532.16	147.46	73,246.35
pH	7.40	5.57	7.54

Σημειώνεται ότι σύμφωνα με την άδεια μηχανολογικής εγκατάστασης της μονάδας, πρέπει τα απόβλητα να απορρίπτονται 50 m από την ακτή και να διενεργούνται αναλύσεις τουλάχιστον σε 2 δείγματα το μήνα (Περιφέρεια Νοτίου Αιγαίου, 2013).

3 Τεχνικές και συστήματα διαχείρισης της άλμης

Η διαχείριση της άλμης έχει μελετηθεί τόσο από ερευνητές σε επίπεδο βιβλιογραφικής ανασκόπησης (Pérez-González, Urtiaga, Ibáñez, & Ortiz, 2012) (Morillo, Rosado, El Bakouri, Riaza, & Bernaola, 2014) (Kim, 2011) (Subramani & Jacangelo, 2014), όσο και από οργανισμούς όπως το *WateReuse Foundation* (Jordahl, 2006) (Mickley M. , Survey of high recovery and Zero Liquid Discharge Technologies for water utilities, 2008), το Υπουργείο Εσωτερικών των Η.Π.Α. (Davis, 2006) (Mickley M. C., 2001).

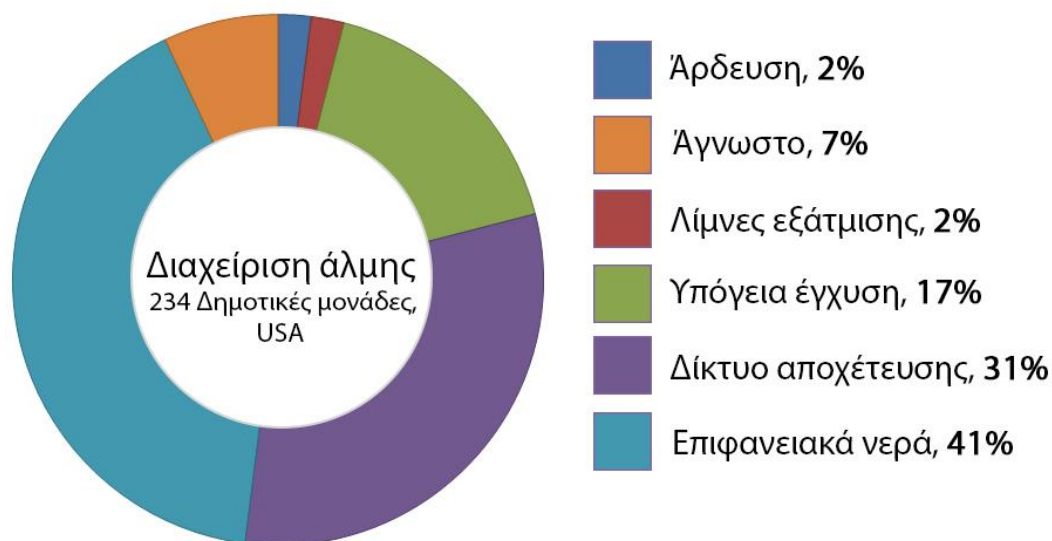
Στόχος αυτής της ενότητας είναι η εξέταση των διαφόρων τεχνικών που εφαρμόζονται σήμερα για τη διαχείριση της άλμης. Οι περισσότερες από αυτές τις τεχνικές διαθέτουν την άλμη ανεπεξέργαστη στο φυσικό περιβάλλον και συνεπώς δεν εφαρμόζεται μία ολιστική προσέγγιση που να επιτρέπει ασφαλή και περιβαλλοντικά φιλική διαχείριση της άλμης αυτής. Σε ιδιαίτερες περιπτώσεις, μπορεί να απαγορεύεται η διάθεση της άλμης. Στις περιπτώσεις αυτές, είναι απαραίτητο να εφαρμοστούν τεχνικές Μηδενικών Υγρών Αποβλήτων (Brandhuber, Cerone, Kwan, Moore, & Vieira, 2008).

Οι τεχνικές διάθεσης της άλμης που παράγονται από τη διαδικασία της αφαλάτωσης σήμερα περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- ❖ Διάθεση σε επιφανειακά νερά (*Surface Water Discharge*)
- ❖ Διάθεση σε συστήματα αποχέτευσης (*Sewer Discharge*)
- ❖ Έγχυση σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς (*Deep Well Injection*)
- ❖ Λίμνες εξάτμισης (*Evaporation Ponds*)
- ❖ Άρδευση, αναφέρεται συχνά και ως διάθεση στο έδαφος (*Land Application*)
- ❖ Συνδυασμένη απόρριψη με άλλα υγρά απόβλητα
- ❖ Μηδενικά Υγρά Απόβλητα (*Zero Liquid Discharge, ZLD*)

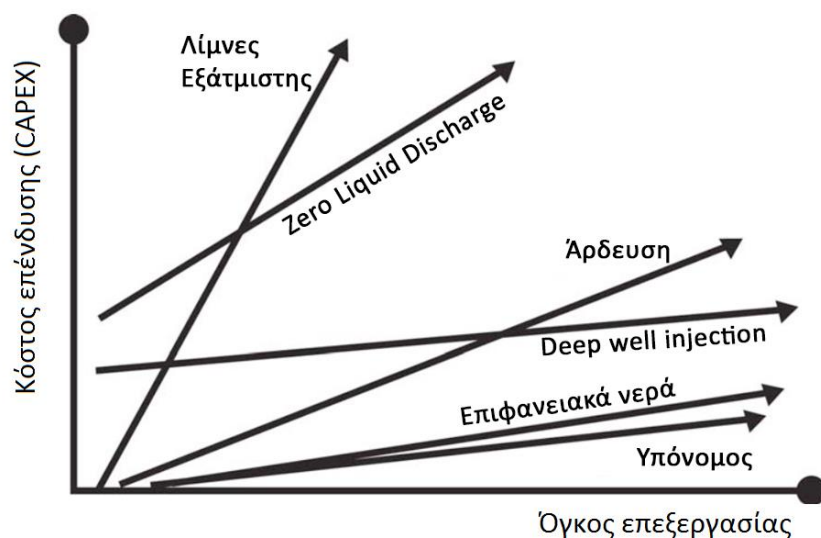
Στο Διάγραμμα 3-1 αποτυπώνονται τα ποσοστά χρήσης των παραπάνω τεχνικών διαχείρισης της άλμης που παράγεται από 234 Δημοτικές μονάδες αφαλάτωσης στις ΗΠΑ. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, οι περισσότερες μονάδες απορρίπτουν την άλμη σε επιφανειακά ύδατα (106 μονάδες), στο δίκτυο αποχέτευσης (63 μονάδες) ή το εγχύουν σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς (31 μονάδες). Πολύ μικρή

εφαρμογή βρίσκουν οι τεχνικές των λιμνών εξάτμισης (10 μονάδες) και της διάθεσης στο έδαφος (19 μονάδες). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι δεν εφαρμόζεται καθόλου η τεχνική ZLD. Αυτό έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, δεδομένου ότι η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε στην περιοχή των ΗΠΑ και ως εκ τούτου είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη εκεί. Όπως αναφέρεται όμως και σε επόμενη ενότητα, η τεχνική ZLD έχει εφαρμοστεί έως σήμερα για την επεξεργασία βιομηχανικής άλμης και όχι για την άλμη που παράγεται από μονάδες αφαλάτωσης.



Πηγή: (National Research Council, 2008)

Διάγραμμα 3-1: Καταγεγραμμένες τεχνικές διαχείρισης της άλμης σε δείγμα 234 δημοτικών μονάδων αφαλάτωσης στις ΗΠΑ



Πηγή: (Mickley M. , 2009) (Rigali, 2010)

Σχήμα 3-1: Κεφαλαιουχικό κόστος μεθόδων διάθεσης της άλμης συναρτήσει του υδραυλικού φορτίου

3.1 Διάθεση σε επιφανειακά ύδατα

Η διάθεση σε επιφανειακά ύδατα είναι η απλούστερη και συνεπώς η πιο συχνά εφαρμόσιμη τεχνικής διάθεσης της άλμης. Η άλμη διατίθεται σε υδάτινο αποδέκτη όπως:

- (α) Ποτάμια,
- (β) Λίμνες και
- (γ) Θάλασσα.

Εφαρμοσιμότητα

Αν και αποτελεί μία απλή μέθοδο, ως προς την εφαρμογή της, σε συγκεκριμένες περιπτώσεις η εφαρμογή της μπορεί να περιοριστεί λόγω περιβαλλοντικών θεμάτων. Σημειώνεται εδώ πως το Μεσογειακό Πρόγραμμα Δράσης των Ενωμένων Εθνών (UNEP-MAP) έχει εκφράσει έντονες ανησυχίες σχετικά με την εφαρμογή αυτής της τεχνικής και συγκεκριμένα έχει διατυπώσει τη θέση πως αποτελεί μία από τις σημαντικότερες απειλές της Μεσογείου Θάλασσας (βλέπε επίσης Ενότητα 2.6).

Για τη διάθεση της άλμης χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες τεχνικές (Jordahl, 2006):

- Άμεση διάθεση σε ωκεανό (direct ocean outfall): η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται κυρίως στη Μέση Ανατολή
- Διάθεση στην ακτή (shore discharge): χρησιμοποιείται κυρίως για μικρές μονάδες αφαλάτωσης, όπως για παράδειγμα στα Ελληνικά νησιά
- Εκροή μονάδας ηλεκτροπαραγωγής (power plant outfall): η άλμη αναμειγνύεται με την εκροή από μονάδα ηλεκτροπαραγωγής, επιτυγχάνοντας αραιώσή της.
- Διάθεση σε ποταμού και κανάλια (discharge to rivers and canals): εφαρμόζεται κυρίως σε μονάδες που είναι εγκατεστημένες στην ενδοχώρα.

Στην Ελλάδα, εξ όσων στοιχείων είναι διαθέσιμα στην παρούσα φάση και από επικοινωνία με Δημοτικές μονάδες αφαλάτωσης προκύπτει ότι η τεχνική της διάθεσης σε επιφανειακά ύδατα (κυρίως στη θάλασσα) εφαρμόζεται σχεδόν κατά αποκλειστικότητα. Ωστόσο, προτείνεται η διεξαγωγή έρευνας για την πλήρη αποτύπωση της κατάστασης για την περίπτωση της χώρας μας.

Κόστος

Τα βασικά κόστη που σχετίζονται με την τεχνική αυτή είναι τα ακόλουθα (Jordahl, 2006):

- Κόστη μελέτης που σχετίζονται για την απόκτηση της απαιτούμενης άδειας
- Κόστη σχεδιασμού και κατασκευής συστήματος απόρριψης της άλμης (σύστημα μεταφοράς άλμης, υποδομή εκροής και συστήματος διάχυσης)
- Κόστη για τη συνεχή παρακολούθηση της ποιότητας της εκροής και για την ανανέωση της άδειας λειτουργίας

3.2 Διάθεση σε δίκτυο αποχέτευσης

Γενικά, η τεχνική αυτή αποτελεί μία φτηνή και εύκολα αδειοδοτήσιμη λύση διάθεσης της άλμης. Ωστόσο, εφαρμόζεται κυρίως για ρεύματα χαμηλής αλατότητας και μικρού υδραυλικού φορτίου.

Εφαρμοσιμότητα

Η εφαρμογή της τεχνικής αυτής περιορίζεται κυρίως από ενδεχόμενα προβλήματα που μπορεί να προκύπτουν στα συστήματα επεξεργασίας των αστικών λυμάτων λόγω της αύξησης της αλατότητας. Τα όρια των Ολικών Διαλυμένων Στερεών μπορεί να κυμαίνονται μεταξύ 3,000 ppm και 7,000 ppm.

Κόστος

Το κεφαλαιουχικό κόστος αποτελείται κυρίως από το κόστος σύνδεσης στο δίκτυο συλλογής.

Το λειτουργικό κόστος αφορά κυρίως στη συνδρομή (fee) που πρέπει να πληρώνεται στο τοπικό σύστημα επεξεργασίας αστικών λυμάτων.

3.3 Έγχυση άλμης σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς

Με την τεχνική έγχυσης άλμης (Deep Well Injection, *DWI*), η άλμη διοχετεύεται σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς. Για την αποφυγή τυχόν επιμόλυνσης, η άλμη συνήθως εγχέεται σε βάθος μεγαλύτερο από τους υπόγειους υδροφορείς.

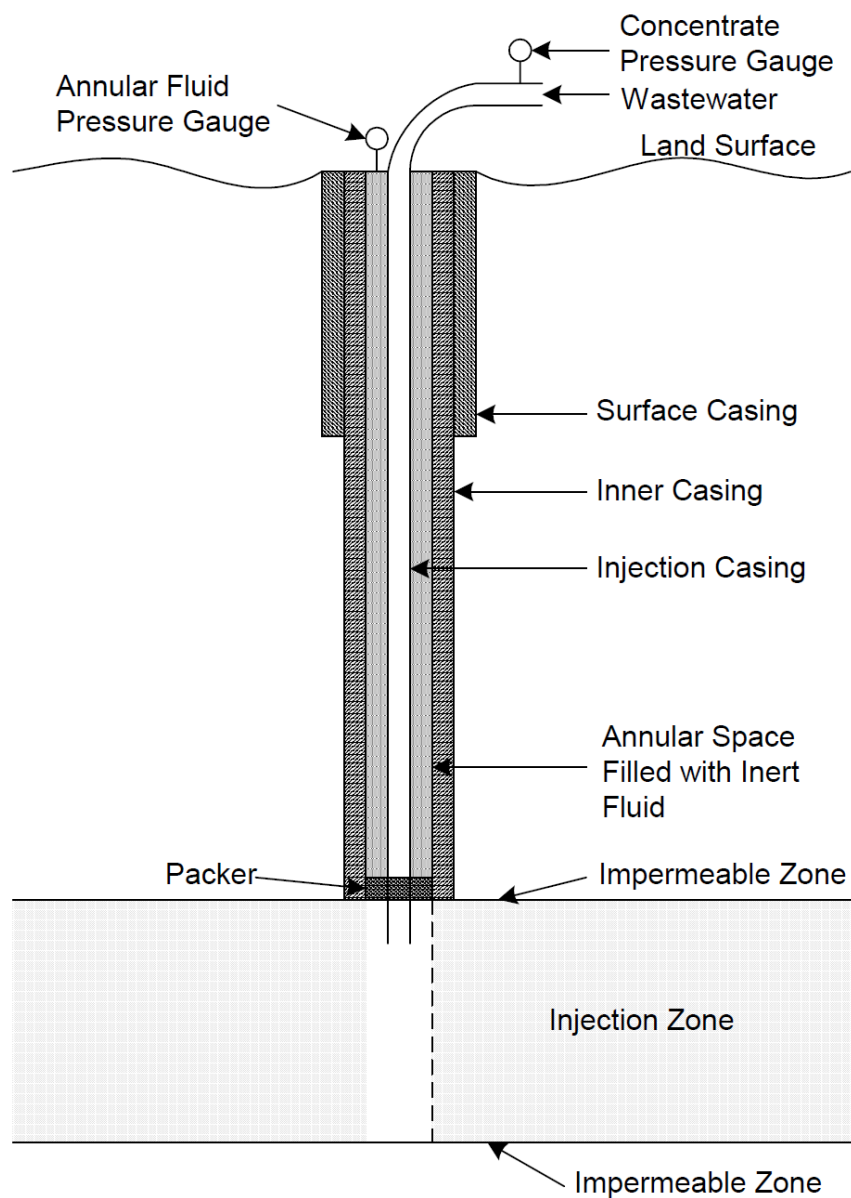
Εφαρμοσιμότητα

Για την εφαρμογή της τεχνικής αυτής, οι ακόλουθες παράμετροι πρέπει να ληφθούν υπόψη: (α) Καταλληλότητα τοποθεσίας, (β) Ταξινόμηση διάταξης έγχυσης (*well classification*), (γ) Συμβατότητα άλμης, (δ) Κοινωνική αποδοχή.

Καταλληλότητα τοποθεσίας: Τα γεωλογικά χαρακτηριστικά των υπόγειων πετρωμάτων πρέπει να είναι τέτοια που να επιτρέπουν την εφαρμογή της τεχνικής *DWI*. Αρχικά, η ζώνη έγχυσης πρέπει να είναι πορώδης και να φέρει τη δυνατότητα απορρόφησης της άλμης που αναμένεται πως θα παραχθεί κατά τη διάρκεια ζωής της μονάδας αφαλάτωσης. Επίσης, θα πρέπει να περικλείεται από αδιαπέρατα πετρώματα, τα οποία θα αποκλείουν την επιμόλυνση γειτονικών υπόγειων υδροφορέων. Άλλα χαρακτηριστικά της περιοχής, με κυριότερη τη σεισμογενή δραστηριότητα ή ενδεχόμενη δυνατότητα εξόρυξης ορυκτών πόρων όπως άνθρακα, πετρέλαιο κ.λπ., μπορεί να αποκλείουν τη δυνατότητα χρήσης της μεθόδου *DWI*. Οι περισσότερες εφαρμογές αυτής της μεθόδου στην Αμερική βρίσκονται στη Φλόριδα (Jordahl, 2006).

Ταξινόμηση διάταξης έγχυσης: Η διάταξη έγχυσης ταξινομείται ανάλογα με το υλικό που εγχύεται υπογείως και με τα φυσικά χαρακτηριστικά του (π.χ. αγωγιμότητα). Η τυπική διάταξη έγχυσης άλμης αποτελείται από ομόκεντρους αγωγούς μεγάλου μήκους, που τοποθετούνται κάθετα σε βάθος εκατοντάδων έως και χιλιάδων μέτρων (βλ. Σχήμα 3-2). Ο εξωτερικός αγωγός πρέπει να φθάνει σε υπόγειο βάθος τέτοιο ώστε να εξασφαλίζεται ότι δεν υπάρχει σε μεγαλύτερο βάθος υπόγειος υδροφορέας με πόσιμο νερό. Ο αγωγός αυτός κατασκευάζεται από τσιμέντο. Απαιτούνται υλικά τα οποία είναι ανθεκτικά στη διάβρωση, καθώς και να εξασφαλίζεται ότι η άλμη είναι χημικά ουδέτερη πριν και μετά την έγχυση της στο υπέδαφος (Rynders, 2011). Ένας δεύτερος ομόκεντρος αγωγός από τσιμέντο εκτείνεται σε μεγαλύτερο βάθος μέχρι τη ζώνη έγχυσης. Από τον αγωγό αυτό μέχρι τον αγωγό έγχυσης της άλμης, μεσολαβεί ένας δακτύλιος, ο οποίος πληρείται με ένα αδρανές ρευστό. Το κάτω μέρος του δακτυλίου, στο σύνορο με τη ζώνη έγχυσης, τοποθετείται ένα πληρωτικό υλικό, το

οποίο αποτρέπει πιθανή διείσδυση της άλμης προς τα πάνω, στο δακτύλιο. Το αδρανές ρευστό διατηρείται σε μεγαλύτερη πίεση από την πίεση έγχυσης της άλμης, έτσι ώστε να αποφευχθεί πιθανή διαρροή. Η παρακολούθηση της πίεσης του αδρανούς ρευστού, άλλωστε, χρησιμοποιείται και ως εργαλείο ανίχνευσης πιθανής διαρροής άλμης.



Πηγή: (Jordahl, 2006)

Σχήμα 3-2: Τυπική σχηματική διάταξη έγχυσης άλμης σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς

Συμβατότητα: Η άλμη θα πρέπει να είναι συμβατή τόσο με τα μηχανικά μέρη της διάταξης έγχυσης όσο και με τους γειτονικούς υδροφορείς και τους γεωλογικούς

σχηματισμούς. Κάποιες από τις χημικές παραμέτρους στις οποίες πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή είναι οι ακόλουθες: (α) Αιωρούμενα στερεά: υψηλές τιμές (τυπικά μεγαλύτερες των 2 ppm) μπορούν να οδηγήσουν σε έμφραξη του αγωγού έγχυσης, (β) Οργανικός άνθρακας: μπορεί να οδηγήσει σε καλλιέργεια βακτηρίων και έτσι σε αστοχία των υλικών, (γ) Υψηλή αγωγιμότητα: ρεύματα άλμης τα οποία περιέχουν συστατικά πάνω από το σημείο κορεσμού (π.χ. πυρίτιο) μπορεί να οδηγήσουν σε δυσλειτουργίες. Οι παράμετροι αυτοί πρέπει να εξετάζονται με προσοχή και σε ορισμένες περιπτώσεις, στις οποίες διαπιστώνεται υψηλή πιθανότητα ασυμβατότητας/δυσλειτουργίας, μπορεί να απαιτείται προεπεξεργασία της άλμης, πριν την έγχυσή της στους υπόγειους σχηματισμούς.

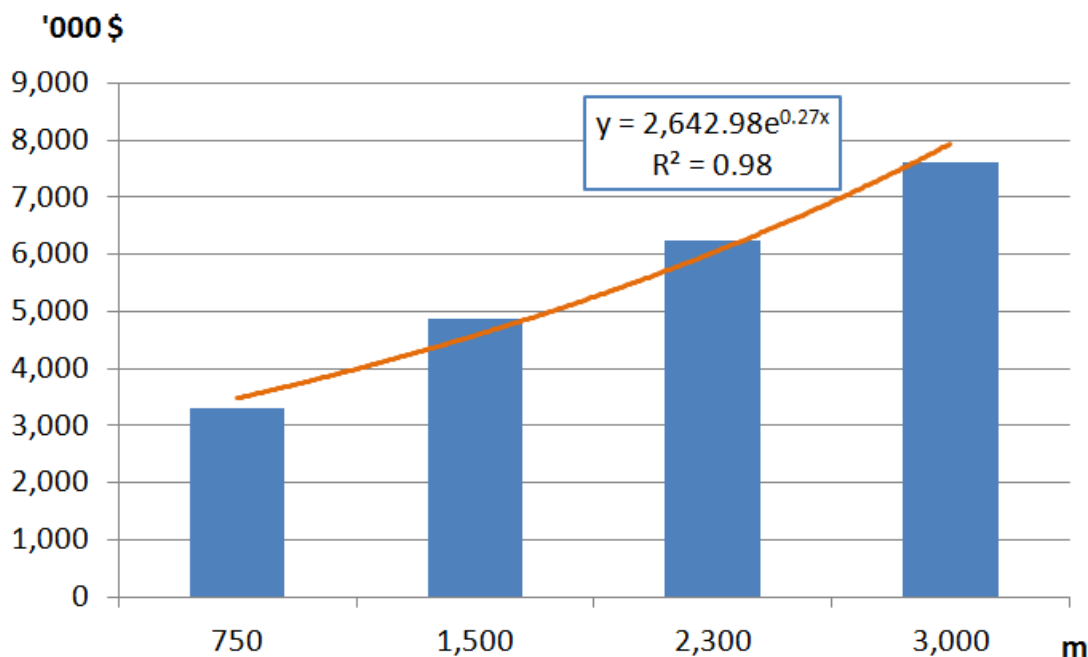
Κοινωνική αποδοχή: Σε πολλές περιπτώσεις περιβαλλοντικές ομάδες ματαιώνουν την εφαρμογή τέτοιων εγχειρημάτων, λόγω ενδεχόμενου υψηλού κινδύνου μόλυνσης του υπεδάφους και των υπόγειων υδροφορέων.

Κόστος Μεθόδου (Rynders, 2011) (Jordahl, 2006)

Το κόστος εξαρτάται από τις ακόλουθες παραμέτρους: (α) Αδειόδοτηση, (β) Τοποθεσία, (γ) Διαπερατότητα γεωλογικών σχηματισμών, (δ) Βάθος ζώνης έγχυσης, (ε) Ανάγκη προεπεξεργασίας, (στ) Ταξινόμηση διάταξης έγχυσης.

Η μέθοδος της έγχυσης άλμης θεωρείται μία από τις ακριβότερες μεθόδους διαχείρισης της άλμης. Το μεγαλύτερο μερίδιο του κεφαλαιουχικού κόστους σχετίζεται με εργατικά (γεώτρηση, εξομάλυνση, θεμελίωση κ.λπ.) και όχι με τα ίδια τα υλικά. Ωστόσο, σημαντική μείωση παρατηρείται με την καθιέρωση οικονομιών κλίμακας.

Η τοποθεσία όπου θα εγκατασταθεί το σύστημα έγχυσης της άλμης επηρεάζει το κόστος επένδυσης, ανάλογα με την απόσταση από το σύστημα αφαλάτωσης. Ανάλογα με την περίπτωση, το σύστημα αφαλάτωσης μπορεί να απέχει σημαντικά από το σημείο έγχυσης, δεδομένου ότι η μονάδα αφαλάτωσης συχνά απαιτείται να είναι κοντά στις παράκτιες περιοχές ή σε κάποια πηγή υφάλμυρου νερού, ενώ τα χαρακτηριστικά των περιοχών αυτών ίσως να μην επιτρέπουν την εγκατάσταση έγχυσης άλμης σε υπόγειους σχηματισμούς.



Σημείωση: Τα δεδομένα για την παραγωγή του διαγράμματος αντλήθηκαν από (Jordahl, 2006)

Εικόνα 3-1: Κόστος επένδυσης για έγχυση άλμης σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς, ανάλογα με το βάθος γεώτρησης

Εφαρμογή έγχυσης άλμης στην Ολλανδία (Wolthek, Raat, Ruijter, Kemperman, & Oosterhof, 2013)

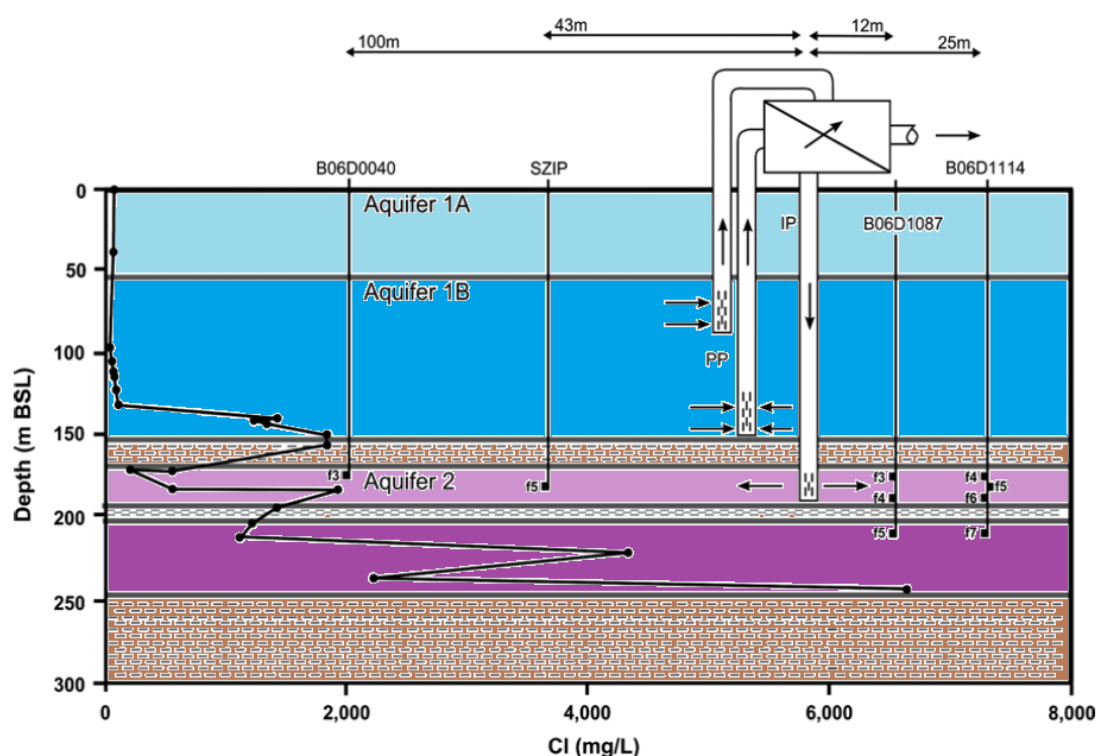
Στην περιοχή Friesland, της Βόρειας Ολλανδίας έχει παρατηρηθεί σημαντικό πρόβλημα υφαλμύρωσης των υπόγειων υδάτων, λόγω παρατεταμένης και εντατικής άντλησης τους. Η εταιρεία Vitens, η οποία είναι η μεγαλύτερη εταιρεία ύδρευσης στην Ολλανδία, ανέπτυξε ένα πιλοτικό σύστημα προκειμένου να προσφέρει μία λύση στο πρόβλημα. Το σύστημα αυτό εγκαταστάθηκε στην περιοχή Noardburgum, τον Οκτώβριο του 2009 και αντλεί το υφάλμυρο νερό και το επεξεργάζεται με την τεχνική της αντίστροφης όσμωσης. Έτσι, παράγεται πόσιμο νερό προς χρήση και μικρή ποσότητα άλμης. Η άλμη διοχετεύεται σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς, σε βάθος 150m, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-3. Κατά τη διάρκεια του πρώτου έτους λειτουργίας του πιλοτικού, περίπου 220,000 κ.μ. άλμης διοχετεύθηκαν σε υπόγειο, περιορισμένο υδροφορέα (Aquifer 2 στο σχήμα), στεγανό από αργιλικά πετρώματα.

Τεχνικά χαρακτηριστικά: Η μονάδα αντίστροφης όσμωσης αποτελείται από 5 δοχεία πίεσης. Στην Ολλανδία δεν επιτρέπεται η διοχέτευση χημικών προϊόντων στο

υπέδαφος. Για το λόγο αυτό, στη διεργασία δεν γίνεται χρήση ανασταλτικών καθίζησης (inhibitors), δεδομένου ότι αυτά θα κατέληγαν στο ρεύμα της άλμης. Αυτό συνεπάγεται μειωμένη δυνατότητα ανάκτησης νερού στην μονάδα αντίστροφης όσμωσης. Το πρώτο χρόνο λειτουργίας, η αντίστροφη όσμωση είχε συντελεστή ανάκτησης 50%, ενώ αργότερα έφτασε μέχρι και 75%.

Αισθητήρες αγωγιμότητας εγκαταστάθηκαν τόσο στο ρεύμα τροφοδοσίας, όσο και στο ρεύμα εξόδου της αφαλάτωσης. Έτσι, υπήρχε διαρκής παρακολούθηση των χαρακτηριστικών των ρευμάτων, με στόχο τη διερεύνηση πιθανής επιμόλυνσης του υδροφορέα καθώς επίσης και για την αξιολόγηση του όλου εγχειρήματος.

Ένα από τα σημαντικότερα συμπεράσματα της εφαρμογής είναι η επίδραση της ταυτόχρονης άντλησης καθαρού και υφάλμυρου νερού από τον υδροφορέα για τη διατήρηση της ποιότητας του σε σταθερά επίπεδα (fresh-keeper concept). Σύμφωνα με την πρακτική αυτή, αντλείται παράλληλα από τον υδροφορέα καθαρό νερό (εδώ στο βάθος 60-80 μέτρα) και υφάλμυρο νερό (εδώ σε βάθος 130-150 μέτρα) σε τέτοια αναλογία, έτσι ώστε να διατηρείται σταθερό το προφίλ αγωγιμότητας του υδροφορέα.



Προσαρμοσμένο από (Wolthek, Raat, Ruijter, Kemperman, & Oosterhof, 2013)

Σχήμα 3-3: Σχηματική διάταξη πιλοτικής εφαρμογής έγχυσης άλμης, Friesland, Ολλανδία

3.4 Λίμνες Εξάτμισης

Οι λίμνες εξάτμισης βασίζονται στη ηλιακή ενέργεια για την εξάτμιση της άλμης. Κατά τη σταδιακή απομάκρυνση του νερού, καθιζάνουν τα άλατα, τα οποία οδηγούνται κατά κανόνα για υγειονομική ταφή (Jordahl, 2006).

Πλεονεκτήματα

- Απλότητα κατασκευής.
- Τα μηχανολογικά εξαρτήματα της εφαρμογής περιορίζονται μόνο στη χρήση αντλιών για την μεταφορά της άλμης στη λίμνη εξάτμισης
- Χαμηλές ανάγκες συντήρησης
- Τυπικά, αποτελεί την πιο φθηνή επιλογή διαχείρισης της άλμης (προϋποθέτοντας μικρά υδραυλικά φορτία, διαθεσιμότητα φτηνής γης και υψηλούς ρυθμούς εξάτμισης)

Μειονεκτήματα

- Μεγάλη έκταση γης για χαμηλό ρυθμό εξάτμισης
- Απαιτήση για ακριβή επένδυση (lining)
- Υψηλό ρίσκο διαρροής και επιμόλυνσης υπόγειων υδροφορέων. Οι Mohamed, Maraqa, & Al Handhaly (2005) εξέτασαν 25 μονάδες αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού στην ενδοχώρα των Εμιράτων του Abu Dhabi και κατέληξαν ότι η διάθεση της άλμης στην έρημο μπορεί να έχει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις τόσο στο νερό τροφοδοσίας (υφάλμυρο) όσο και στους υπόγειους υδροφορείς. Η ίδια μελέτη εξαίρει τη σπουδαιότητα ανάπτυξης συστημάτων ZLD στην περιοχή για την επίλυση του προβλήματος.
- Μειωμένη δυνατότητα αξιοποίησης οικονομίας κλίμακας

Εφαρμοσιμότητα

Η εφαρμογή αυτής της τεχνικής έχει τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

- Μικρά υδραυλικά φορτία
- Κατάλληλες καιρικές συνθήκες (ηλιοφάνεια, ξηρό κλίμα).

Σημειώνεται πως ο ρυθμός εξάτμισης (evaporation rate) που χρησιμοποιείται κατά το σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων είναι μικρότερος, δεδομένου ότι επηρεάζεται σημαντικά από την ύπαρξη αυξημένης συγκέντρωσης αλάτων. Ως γενική οδηγία, προτείνεται να εφαρμόζεται ένας συντελεστής 0.7, έτσι ώστε να υπολογίζεται ο πραγματικός ρυθμός εξάτμισης.

- Διαθεσιμότητα γης

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη διαστασιολόγηση των λιμνών εξάτμισης προτείνεται η δημοσίευση "Use of evaporation ponds for brine disposal in desalination plants" (Ahmed, Hoey, Mahendran, Morris, & Al-Handaly, 2000).

Στην Ελλάδα, τα κλιματικά δεδομένα είναι κατάλληλα για την εφαρμογή αυτής της τεχνικής. Ωστόσο, απαιτείται η χρήση φθηνής γης και μεγάλων εκτάσεων, κάτι το οποίο κατά κανόνα δεν είναι εφαρμόσιμο γενικά στην Ελλάδα και κυρίως στις περιοχές που υπάρχουν μονάδες αφαλάτωσης (κυρίως νησιωτικές περιοχές). Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί πως στη χώρα μας υπάρχει εκτενής γνώση στο πεδίο αυτό, δεδομένου ότι υπάρχει σχετική τεχνογνωσία από την παραγωγή αλατιού μέσω των αλυκών.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μία περίπτωση μελέτης στο *Ισραήλ* (βλέπε επίσης Case study 1), στην οποία η εταιρεία παραγωγής αλατιού συνεργάστηκε με την παρακείμενη μονάδα αφαλάτωσης και αξιοποίησαν την παραγόμενη άλμη για την παραγωγή διαφόρων αλάτων. Πρόκειται για μία πρακτική και όχι εφαρμογή κάποιας τεχνολογίας και αποτελεί στην ουσία παραλλαγή των αλυκών. Οι κοινές αλυκές χρησιμοποιούν το θαλασσινό νερό για την παραγωγή αλατιού. Στην εφαρμογή αυτή χρησιμοποιείται μείγμα θαλασσινού νερού και άλμης από παρακείμενη μονάδα αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού.

Το υβριδικό σύστημα έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Δυναμικότητα μονάδας αφαλάτωσης: 10,000 m³/ημέρα
- Αυξημένη παραγωγή αλατιού σε σύγκριση με τις κοινές πρακτικές που χρησιμοποιούν θαλασσινό νερό

- Παραγωγή αλατιού υψηλών προδιαγραφών και για τις ακόλουθες χρήσεις: (α) επιτραπέζιο αλάτι, (β) βιομηχανικό αλάτι, (γ) αλάτι για πλυντήριο πιάτων, (δ) παραγωγή σαπουνιών, (ε) χημική βιομηχανία
- Περισσότερες πληροφορίες για την ποιότητα του παραγόμενου αλατιού δίνονται στο (SOL-BRINE, 2016).
- Δεν ανακτάται νερό κατά την εξάτμιση
- Εξάλειψη υγρού αποβλήτου

Κόστος τεχνολογίας

Το κόστος αυτής της τεχνικής εξαρτάται σημαντικά από τη συγκεκριμένη εφαρμογή που μελετάται. Οι σημαντικότερες παράμετροι που επηρεάζουν το κόστος είναι οι ακόλουθες: (α) τοπικές κλιματολογικές συνθήκες, (β) υδραυλικό φορτίο και αλατότητα άλμης, (γ) κόστος γης, (δ) κόστος επένδυσης για προστασία έναντι διαρροών κ.λπ. Αναφορικά με το κεφαλαιουχικό κόστος (CAPEX), το μεγαλύτερο μερίδιο αφορά την επένδυση για την προστασία έναντι διαρροής. Λαμβάνοντας υπόψη ότι μπορεί να χρειαστεί διπλή επένδυση, το σύστημα ανίχνευσης τυχόν διαρροών και το σύστημα αποστράγγισης, το συνολικό κόστος μπορεί να φτάνει μέχρι και το 60-70% του CAPEX. Για παράδειγμα, το μοναδιαίο κόστος μπορεί να είναι της τάξης μεγέθους 45,550 \$/acre⁶ (Jordahl, 2006). Αναφορικά με το λειτουργικό κόστος (OPEX), σημαντικό είναι το κόστος για την διάθεση της λάσπης (αλάτων) σε Χώρο Υγειονομικής Ταφής (Χ.Υ.Τ.Α.).

Προκειμένου να μειωθούν τα συνολικά κόστη, οι λίμνες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για άλλους σκοπούς όπως υδατοκαλλιέργειες (καλλιέργεια κατάλληλων ειδών όπως γαρίδες, Tilapia, Red Drum, Cobia, Channel catfish) καθώς επίσης και παραγωγή θερμικής ή/και ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των λεγόμενων ηλιακών λιμνών (solar ponds) (Brandhuber, Cerone, Kwan, Moore, & Vieira, 2008) (Jordahl, 2006).

Σημαντική είναι επίσης η εφαρμογή στο Eilat, όπου έγινε επίδειξη της δυνατότητας ανάκτησης αλάτων υψηλών προδιαγραφών από την άλμη μονάδας αφαλάτωσης.

⁶ 11.26\$/m² (1 acre = 4,046.85 m²)

Case study 1: Λίμνη εξάτμισης, Eilat, Israel

Case study: 1			Εργαστηριακή κλίμακα ☐ NAI ☐ OXI	
Χώρα:	Ισραήλ		Πιλοτική κλίμακα ☐ NAI ☐ OXI	
Πόλη:	Eilat		Εφαρμογή ☒ NAI ☐ OXI	
Τεχνική επεξεργασίας Λίμνη εξάτμισης για ανάκτηση αλάτων (όχι ανάκτηση νερού)		Ποιότητα αλατιού	☒ Επιτραπέζιο αλάτι	☒ Χημική βιομηχανία
			☒ Εκχιονιστικό αλάτι	☐ Άλλη χρήση
		Ποιότητα νερού	☐ Πόσιμο νερό	☐ Ανακύκλωση
			☐ Απιονισμένο νερό	☐ Άλλη χρήση
Έτος 1997 (λειτουργεί ακόμη)		Ιδιοκτησία - Merokot Water (Εταιρεία Ύδρευσης του Ισραήλ) - Israel Salt Company (Ιδιωτική εταιρεία)		
Περιγραφή Η εφαρμογή αυτή θεωρείται ως υβριδική (διπλού σκοπού) καθώς παράγει νερό και αλάτι. Το νερό παράγεται από τη μονάδα αφαλάτωσης, ενώ για την παραγωγή του αλατιού γίνεται χρήση της παραγόμενης άλμης. Η άλμη εξατμίζεται έτσι ώστε να παράγεται αλάτι υψηλής καθαρότητας. Η εφαρμογή αυτή αποτελεί σύμπραξη δημόσιου και ιδιωτικού τομέα, με αντίστοιχα οφέλη και για τους δύο τομείς: (α) έχουν μοιραστεί τόσο τα κεφαλαιουχικά όσο και τα λειτουργικά κόστη. Η μονάδα αφαλάτωσης είναι η μοναδική εγκατάσταση παγκοσμίως η οποία επεξεργάζεται ένα μείγμα θαλασσινού νερού και άλμης από παρακείμενη μονάδα αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού.				
				
Πηγή: (Ravizky & Nadav, 2007)				

3.5 Άρδευση

Γενικά, η χρήση της άλμης για άρδευση μπορεί να αποτελεί μία εφαρμόσιμη πρακτική, κυρίως για μικρότερες μονάδες αφαλάτωσης που βρίσκονται κοντά σε αγροτικές περιοχές με καλλιέργειες που είναι κατάλληλες για νερό υψηλής αλατότητας. Μία προσέγγιση είναι η διάθεση της άλμης σε κανάλι το οποίο προορίζεται για άρδευση. Έτσι, αναμειγνύεται η άλμη με πόσιμο νερό και επιτυγχάνεται αραίωση της.

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η μείωση του όγκου της άλμης μέσω του φαινομένου της εξατμισοδιαπνόης, και η αξιοποίηση της. Για την εφαρμογή της μεθόδου είναι απαραίτητο να εξασφαλίζεται η συλλογή των στραγγισμάτων από το σύστημα άρδευσης, προκειμένου να αποφευχθεί τυχόν επιμόλυνση του υπόγειου υδροφορέα. Τα στραγγίσματα αυτά απαιτούν ειδική επεξεργασία όπως λίμνη εξάτμισης ή χρήση εξατμιστήρα.

Εφαρμοσιμότητα

Η τεχνική αυτή μπορεί να ταξινομηθεί στις ακόλουθες τρεις (3) κατηγορίες:

- Άρδευση τοπίου (landscape irrigation), όπως θάμνους, γρασίδι, δέντρα κ.λπ.
- Άρδευση γεωργικών καλλιεργειών (agricultural irrigation), περιορισμένη εφαρμογή σε αυτή την κατηγορία
- Άρδευση αλοφυτικών ειδών (halophyte irrigation), όπως για παράδειγμα το είδος blue panic (Bushnak, 2012) και το basilicum (Qurie, et al., 2013). Τα αλοφυτικά είναι είδη που αντέχουν υψηλά ποσοστά αλατότητας.

Η βιωσιμότητα της τεχνικής αυτής δεν έχει αποδειχθεί σε μεγάλη κλίμακα. Διάφορες μελέτες έχουν εκπονηθεί για τη διερεύνηση των επιπέδων αλατότητας που αντέχουν διάφορα είδη καλλιεργειών. Οι περισσότερες από αυτές τις μελέτες αφορούν τη χρήση υφάλμυρων νερών και όχι τη χρήση άλμης από μονάδες αφαλάτωσης. Στην περιοχή της Βραζιλίας έχουν πραγματοποιηθεί δοκιμές με τη χρήση άλμης για την άρδευση με τη μέθοδο της υδροπονίας (Sánchez, Nogueira, & Kalid, 2015). Η μελέτη αυτή δείχνει ότι τα μόνα είδη που ήταν κατάλληλα για άρδευση με άλμη είναι τα αλοφυτικά και όχι άλλα εμπορικά είδη καλλιεργειών που δοκιμάστηκαν.

Κόστος

Μία παράμετρος κόστους που πρέπει να ληφθεί υπόψη για την εφαρμογή της τεχνικής αφορά τον εξοπλισμό για την άρδευση (sprinklers, συστήματα drip κ.λπ.).

3.6 Τεχνική Μηδενικών Υγρών Αποβλήτων

Η τεχνική Μηδενικών Υγρών Αποβλήτων (Zero Liquid Discharge, ZLD) αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του '70 στις Ηνωμένες Πολιτείες (Seigworth, Ludlum, & Reahl, 1995). Η παρατήρηση αυξημένης αλατότητας στον ποταμό Colorado λόγω απόρριψης υγρών αποβλήτων από παρακείμενη βιομηχανία ηλεκτροπαραγωγής, δημιούργησε της κατάλληλες συνθήκες ώστε ο νομοθέτης να θεσπίσει σχετική νομοθεσία προστασίας του περιβάλλοντος. Κατά την περίοδο αυτή, καινούριες βιομηχανικές μονάδες που ζητούσαν άδεια απόρριψης των υγρών αποβλήτων από την αρμόδια αρχή, χρειαζόντουσαν περίπου 5 χρόνια μέχρι την τελική έκδοσή της. Αντίθετα, οι μονάδες που εγκαθιστούσαν συστήματα ZLD μπορούσαν να πάρουν αδειοδότηση σε λιγότερο από 12 μήνες (Sajid Hussain, 2014).

Οι πρώτες εφαρμογές της αφορούν στη βιομηχανία ηλεκτροπαραγωγής και της εξόρυξης άνθρακα, ενώ τέτοιες μονάδες συναντώνται κυρίως στην Αμερική. Στη Γερμανία, τα πρώτα συστήματα ZLD εφαρμόστηκαν στη βιομηχανία ηλεκτροπαραγωγής με καύσιμο τον άνθρακα γύρω στο 1980, όταν η νομοθεσία έγινε πιο αυστηρή σχετικά με αυτό τον τύπο υγρών αποβλήτων. Στην Κίνα έχει βρει εφαρμογή σε χημικές βιομηχανίες με πρώτη ύλη τον άνθρακα (coal-to-chemicals plant).

Η τεχνική ZLD αναφέρεται σε οποιαδήποτε διάταξη με τεχνολογίες, η οποία αφαιρεί όλη την ποσότητα του νερού από την άλμη. Ο Mickley (2008) μελέτησε τα συστήματα ZLD και τα κατέταξε σε τέσσερις γενικές κατηγορίες:

Πίνακας 3-1: Διαγράμματα ροής συστημάτων ZLD που εφαρμόζονται σήμερα

Κωδικός	Περιγραφή	Σχήμα
Γενικό διάγραμμα ροής 1: Συμβατικά συστήματα ZLD		
1A	άλμη → προ-επεξεργασία (περιορισμένη) → brine concentrator → λίμνη εξάτμισης	Σχήμα 3-4
1B	άλμη → προ-επεξεργασία (περιορισμένη) → brine concentrator → κρυσταλλωτήρας	Σχήμα 3-5
Γενικό διάγραμμα ροής 2: Ελαχιστοποίηση όγκου άλμης με χρήση RO υψηλής ανάκτησης		
2A	άλμη → προ-επεξεργασία → 2 ^ο στάδιο RO → brine concentrator → λίμνη εξάτμισης	-

Κωδικός	Περιγραφή	Σχήμα
2B	άλμη → προ-επεξεργασία → 2 ^ο στάδιο RO → brine concentrator → κρυσταλλωτήρας	Σχήμα 3-5
Γενικό διάγραμμα ροής 3: Όπως το διάγραμμα ροής 2 χωρίς τη χρήση εξατμιστήρα		
3	άλμη → προ-επεξεργασία → 2 ^ο στάδιο RO → λίμνη εξάτμισης	Σχήμα 3-6
Γενικό διάγραμμα ροής 4: Διαχωρισμός αλάτων (τεχνική Geo-Processors):		
4A	άλμη → απομάκρυνση αλάτων → RO 2 ^{ου} σταδίου → απομάκρυνση αλάτων → brine concentrator → ανάκτηση υπολοιπούμενων αλάτων αναμεμιγμένα	

Πηγή: (Mickley M. , 2008)

Οι τύποι των εξατμιστήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι οι ακόλουθοι:

- Εξατμιστήρας με μηχανική επανασυμπίεση (vapor compression evaporator)
- Εξατμιστήρας κατακορύφων σωλήνων με ροή λεπτού υμένα (vertical tube, falling film brine concentrator)
- Εξατμιστήρας οριζόντιων σωλήνων με ψεκασμό (horizontal tube spray film brine concentrator)
- Κρυσταλλωτήρας εξαναγκασμένης κυκλοφορίας (forced circulation crystallizer)

Οι εξατμιστήρες αυτοί μπορούν να διαθέτουν μία ή περισσότερες βαθμίδες. Ωστόσο, σχεδόν κατ'αποκλειστικότητα χρησιμοποιείται εξατμιστήρας μίας βαθμίδας κατακορύφου άξονα (βλ. επίσης .

Οι εξατμιστήρες αυτοί επιτυγχάνουν λόγο συμπύκνωσης 40:1 χωρίς προβλήματα επικαθίσεων. Για να το πετύχουν αυτό χρησιμοποιούν την τεχνική του εμβολιασμού (seeding).

Άλλες τεχνολογίες που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι οι ακόλουθες:

- **HERO™**: η τεχνική αυτή είναι πνευματική ιδιοκτησία της Aquatec και στην ουσία αποτελεί εφαρμογή αντίστροφης όσμωσης δύο σταδίων με ενδιάμεση

επεξεργασία για την απομάκρυνση δυσδιάλυτων αλάτων ασβεστίου, μαγνησίου και βαρίου (αποσκλήρυνση). Η τεχνική αυτή συχνά χαρακτηρίζεται ως "near ZLD" δεδομένου ότι απαιτεί τη χρήση εξατμιστήρα στη συνέχεια για την εξάλειψη της άλμης. Μία μελέτη που πραγματοποιήθηκε για την εταιρεία ύδρευσης της περιοχής της Νότιας Nevada κατέληξε πως η εφαρμογή της τεχνικής αυτής για την επεξεργασία των υπόγειων νερών της περιοχής είναι μη οικονομική (Jordahl, 2006). Οι Sanciollo et al. (2012) μελέτησαν τη χρήση χημικών για την απομάκρυνση του ασβεστίου και συμπέραναν ότι: (α) η χρήση ανθρακικού ασβεστίου είναι μη οικονομική, ενώ (β) η χρήση φωσφορικού ασβεστίου, το οποίο μπορεί να ανακτηθεί από την άλμη και να ανακυκλωθεί στη διεργασία, είναι αποδοτική. Η διάταξη που χρησιμοποίησαν για τη μελέτη είναι: DAF – UF – RO – ASP – UF (ceramic).

- **OPUS™**: η τεχνική αυτή είναι πνευματική ιδιοκτησία της VEOLIA (U.S. Patent No. 7,815,804 B2). Η αρχή λειτουργίας της τεχνικής έχει σημαντικές ομοιότητες με τη διεργασία HERO.
- **SPARRO**: η τεχνική αυτή αποτελεί μία παραλλαγή της αντίστροφης όσμωσης δύο σταδίων που αναφέρεται παραπάνω. Εδώ, προστίθενται χημικά (όπως θειικό ασβέστιο) με στόχο τη δημιουργία πυρήνων κρυστάλλων, οι οποίοι επανακυκλοφορούν εν αιωρήσει στο διάλυμα (Slurry Precipitation And Recycling Reverse Osmosis, SPARRO). Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν κατάλληλοι τύποι μεμβρανών, όπως οι σωληνωτές μεμβράνες (βλ. επίσης Ενότητα 4.1.2.1, Σχήμα 4-8)
- **HPD**: Αποτελεί την εμπορική ονομασία των συστημάτων ZLD της Veolia. Τα συστήματα ZLD που έχει εγκαταστήσει η Veolia φαίνονται στο Σχήμα 3-7. Η Veolia κατέχει περίπου το 24.9% της αγοράς συστημάτων ZLD (Διάγραμμα 3-3), με την General Electric να έχει το μεγαλύτερο ποσοστό (57.7%). Αυτό οφείλεται κυρίως στην εξαγορά της Αμερικάνικης εταιρείας Resources Conservation Company από την General Electric το 2005. Η τεχνολογία της RCC περιγράφεται αναλυτικά στο Case study 2.
- **DEW VAPORATION**: Η εταιρεία Altela έχει σχεδιάσει και κατασκευάσει το προϊόν AltelaRainSM. Το σύστημα αυτό έχει εφαρμοστεί για την επεξεργασία άλμης που παράγεται κατά την εξόρυξη πετρελαίου (Xu, και συν., 2013).

- **WAIV**: η τεχνική αυτή (Wind Aided Intensified eVaporation) (Gilron, Folkman, Savliev, Waisman, & Kedem, 2003) αποτελεί μία παραλλαγή των λιμνών εξάτμισης, ενώ έχει επιδειχθεί σε πιλοτική κλίμακα (Morillo, Rosado, El Bakouri, Riaza, & Bernaola, 2014). Οι Macedonio et al. (2011) αναφέρουν τη χρήση της τεχνικής αυτής με κρυσταλλωτήρα για την επεξεργασία άλμης από αντίστροφη όσμωση υφάλμυρου νερού. Ο συντελεστής ανάκτησης που επετεύχθη πειραματικά κυμαίνεται μεταξύ 75% και 88.9%, μειώνοντας έτσι σημαντικά τον όγκο της άλμης που απορρίπτεται στο περιβάλλον.
- **VSEPTM**: η τεχνική αυτή αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της εταιρείας New Logic και έχει προωθηθεί στην αγορά υποσχόμενη καλύτερη αντίσταση έναντι αστοχίας των μεμβρανών. Η τεχνολογία βασίζεται στην αύξηση της διατμητικής τάσης στην επιφάνεια των μεμβρανών μέσω δόνησης (Vibratory Shear-Enhanced Process, VSEP). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της συγκέντρωσης (polarization) των αιωρούμενων σωματιδίων και των δυσδιάλυτων αλάτων στην επιφάνεια των μεμβρανών. Οι Subramani, DeCarolis, Pearce & Jacangelo (2012) παρουσιάζουν τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου VSEP για επεξεργασία της άλμης από μονάδα αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού. Από τη μελέτη διαπιστώνεται ότι η μέθοδος αυτή αυξάνει το συντελεστή ανάκτησης σημαντικά, ωστόσο απαιτείται συχνός καθαρισμός με χημικά μέσα για την αποφυγή επικαθίσεων.
- **Eutectic Freeze Crystallization (EFC)**: η τεχνική αυτή έχει πατενταριστεί από το πανεπιστήμιο του TU Delft και γίνεται προσπάθεια εμπορικής της αξιοποίησης από την spin-off εταιρεία (EFC Separations B.V.). Η τεχνική αυτή βασίζεται στην ψύξη του διαλύματος για το διαχωρισμό των αλάτων (βλ. επίσης Ενότητα 4.1.3.5). Η τεχνολογία δεν έχει επιδειχθεί σε βιομηχανική κλίμακα, ενώ ακόμη και σε πιλοτική κλίμακα η αποδοτικότητά της έχει επιδειχθεί για διαλύματα με απλή σύσταση (δύο διαλυμένες ουσίες).

Πλεονεκτήματα

- Μικρές απαιτήσεις αδειοδότησης
- Ανάκτηση νερού και επακόλουθη μείωση υδατικού αποτυπώματος (water footprint),

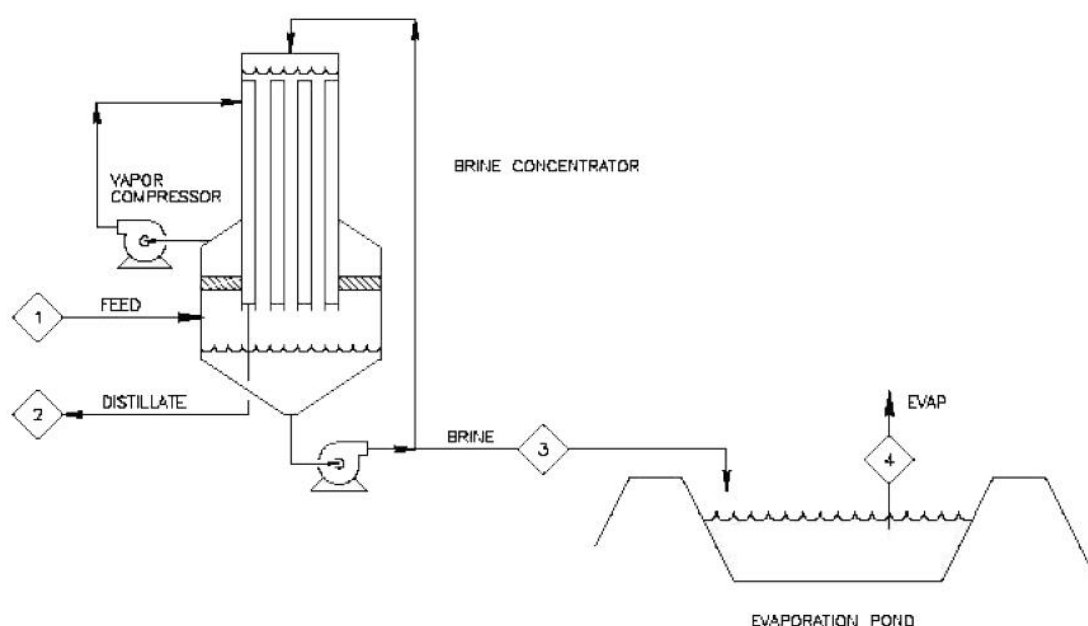
- Ενθάρρυνση πρακτικών παρακολούθησης της κατανάλωσης νερού, με επακόλουθη αποφυγή διαρροών και άσκοπης χρήσης νερού,
- Συμμόρφωση με κανονισμούς και κείμενη νομοθεσία,
- Ανάπτυξη σύμφωνα με τις αρχές της αειφορίας
- Μειωμένη χρήση αποθεμάτων φρέσκου νερού, επιτρέποντας την κατανάλωση από άλλους χρήστες όπως γεωργία και αστική χρήση.

Μειονεκτήματα

- Υψηλή ενεργειακή κατανάλωση. Η ενεργειακή κατανάλωση ενός συμπτυκνωτή άλμης είναι της τάξης 18-26 kWh/m³ και για τους κρυσταλλωτήρες 52-66 kWh/m³ (βλ. επίσης Ενότητα 4.1.3.4). Ο Turek (2004) αναφέρει από εφαρμογή συστήματος ZLD για επεξεργασία στραγγίσματος ανθρακορυχείου στην Πολωνία ότι η κατανάλωση του συμπτυκνωτή άλμης είναι 30.4 kWh/m³ παραγόμενου νερού, ενώ η συνολική κατανάλωση ενέργειας (συμπτυκνωτής άλμης + κρυσταλλωτήρας) είναι 45 kWh/m³ επεξεργαζόμενης άλμης. Σημειώνει ότι σημαντικό πρόβλημα του συστήματος είναι η απαίτηση κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας (δεν υπάρχει δυνατότητα αξιοποίησης θερμικής ενέργειας) και η παραγωγή ενός προβληματικού υπολείμματος.
- Υψηλό κόστος εξοπλισμού.
Σύμφωνα με το Global Water Intelligence, για ένα σύστημα επεξεργασίας νερού αξίας 20 εκ. \$ που επιτυγχάνει ανάκτηση νερού 80%, το κόστος θα διπλασιαστεί προκειμένου να εγκατασταθεί σύστημα ZLD που θα δύναται να επεξεργαστεί (και να ανακτήσει) το υπόλοιπο 20% (Global Water Intelligence, 2009).
- Παραγωγή παραπροϊόντος προβληματικής διαχείρισης.
Το στερεό υπόλειμμα κατά κανόνα οδηγείται για ταφή. Το κόστος για την ταφή κυμαίνεται μεταξύ \$30 και \$60 ανά τόνο.
- Λειτουργία από εξειδικευμένους χειριστές.
Τα συστήματα ZLD έχουν συνήθως μεγάλο μέγεθος και είναι περίπλοκα στη λειτουργία τους. Για παράδειγμα ένα σύστημα με δυναμικότητα 5,000

m³/ημέρα έχει ύψος περίπου 30m και καταλαμβάνει επιφάνεια 10,000 m² (100m x 100m).

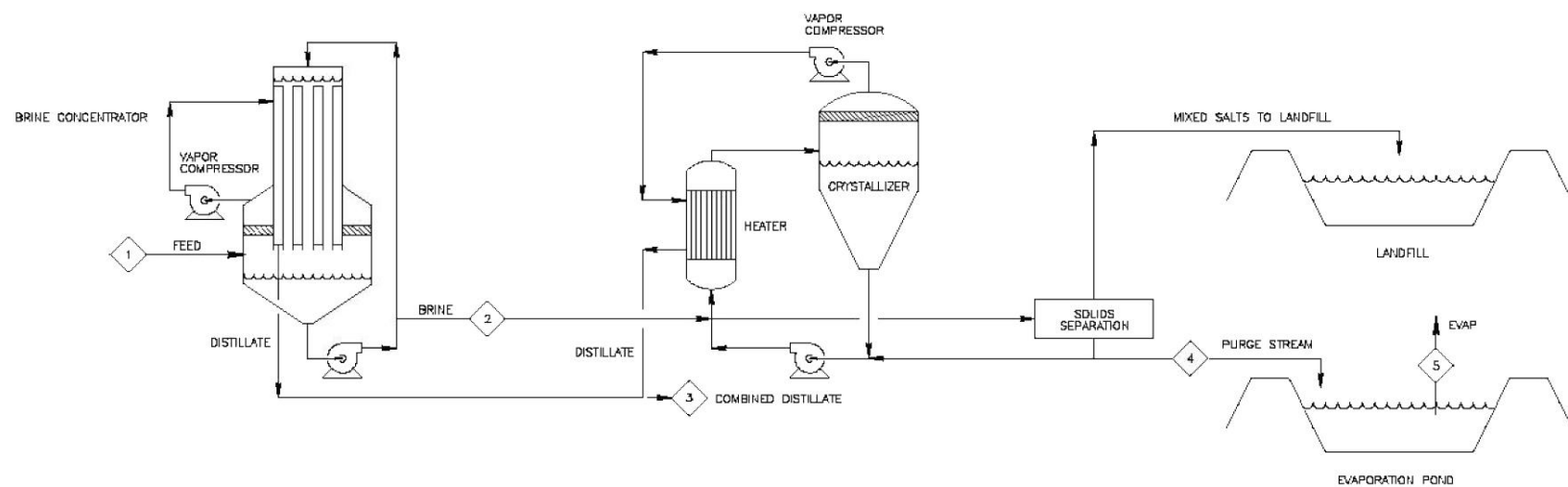
Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι η τεχνική ZLD δεν έχει εφαρμοστεί μέχρι σήμερα σε Δημοτικές μονάδες αφαλάτωσης για παραγωγή πόσιμου νερού. Κάποιοι ερευνητές αποδίδουν το γεγονός αυτό σε οικονομικούς λόγους (Mickley M. , 2008), ενώ κάποιοι άλλοι καταλήγουν ότι τέτοια συστήματα είναι απαραίτητα να εξεταστούν, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις άνυδρων περιοχών, οι οποίες βρίσκονται στην ενδοχώρα (σε σημαντική απόσταση από τη θάλασσα) (Sobhani, Abahusayn, Gabelich, & Rosso, 2012).



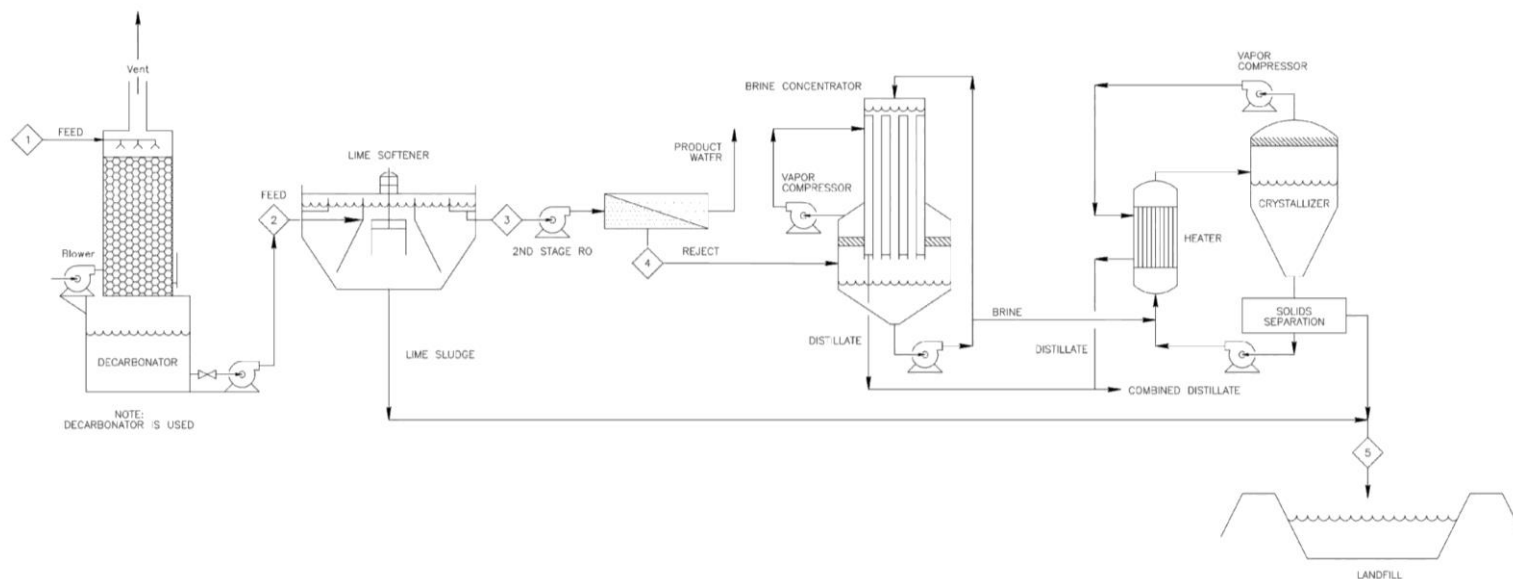
Πηγή: (Mickley M. , Survey of high recovery and Zero Liquid Discharge Technologies for water utilities, 2008)

Σχήμα 3-4: Διάγραμμα ροής ZLD, τύπου 1Α

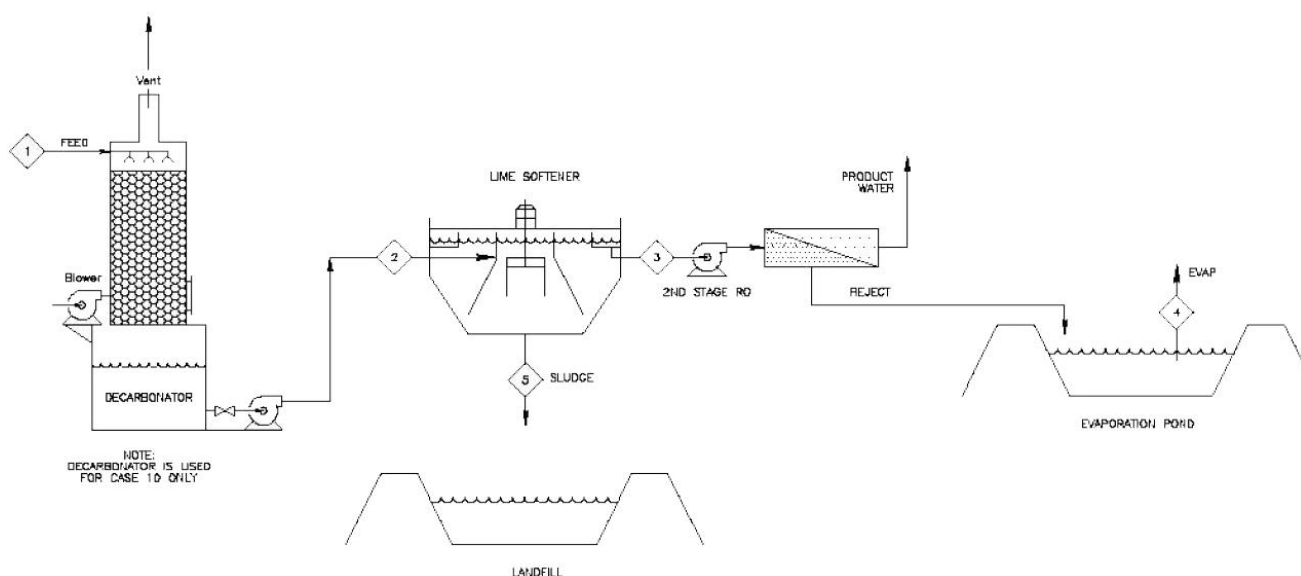
Διάγραμμα ροής τύπου 1B, πηγή: (Mickley M. , Survey of high recovery and Zero Liquid Discharge Technologies for water utilities, 2008)



Διάγραμμα ροής τύπου 2B, πηγή: (Mickley M. , Survey of high recovery and Zero Liquid Discharge Technologies for water utilities, 2008)



Σχήμα 3-5: Διάγραμμα ροής ZLD, τύπου 1.2 (επάνω) και τύπου 2.2 (κάτω)



Πηγή: (Mickley M. , Survey of high recovery and Zero Liquid Discharge Technologies for water utilities, 2008)

Σχήμα 3-6: Διάγραμμα ροής, τύπου 3

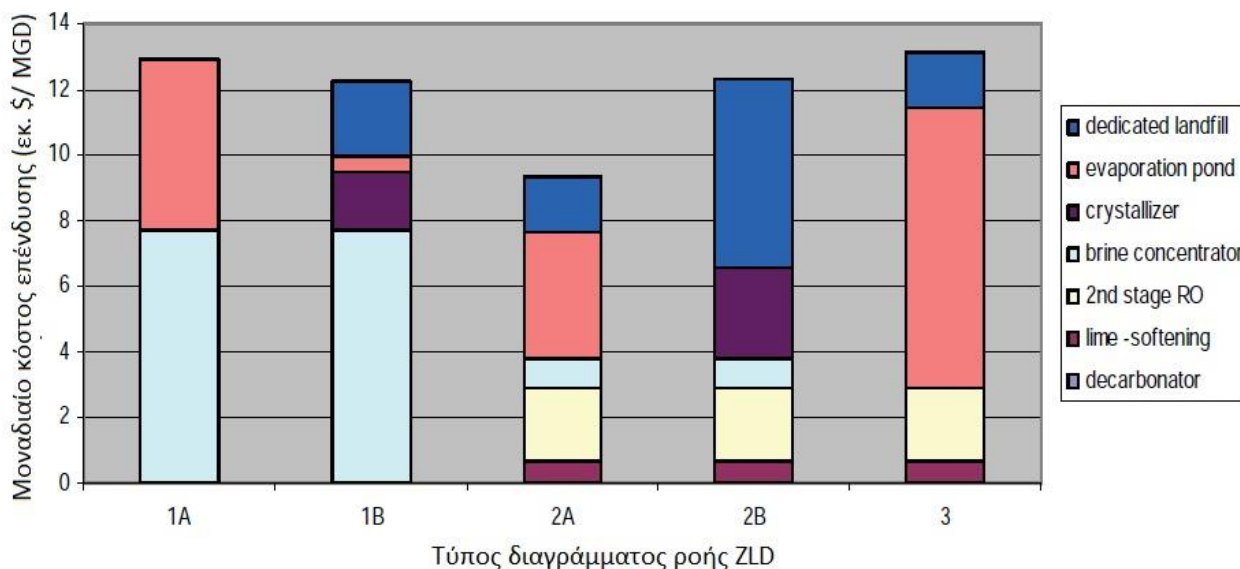


Πηγή: (Veolia Water, 2008)

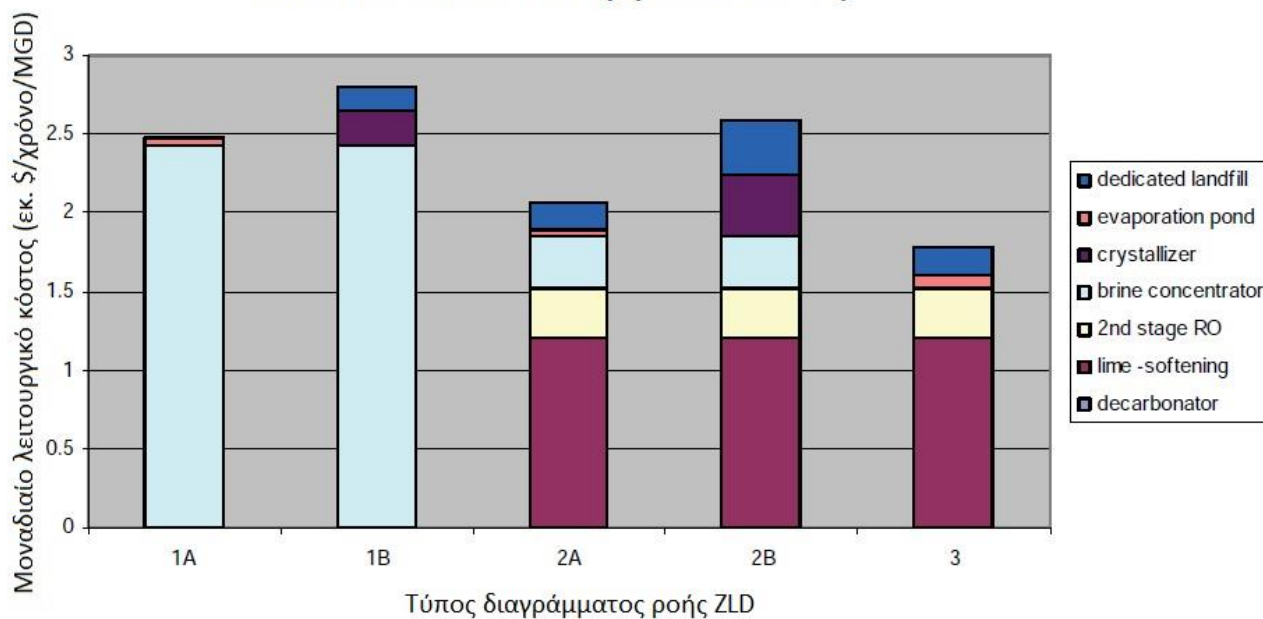
Σχήμα 3-7: Εφαρμογές συστημάτων ZLD από την εταιρεία Veolia, παγκοσμίως

Μοναδιαίο κόστος επένδυσης

(δεν περιλαμβάνονται τα κόστη διαχείρισης και τα απρόβλεπτα)

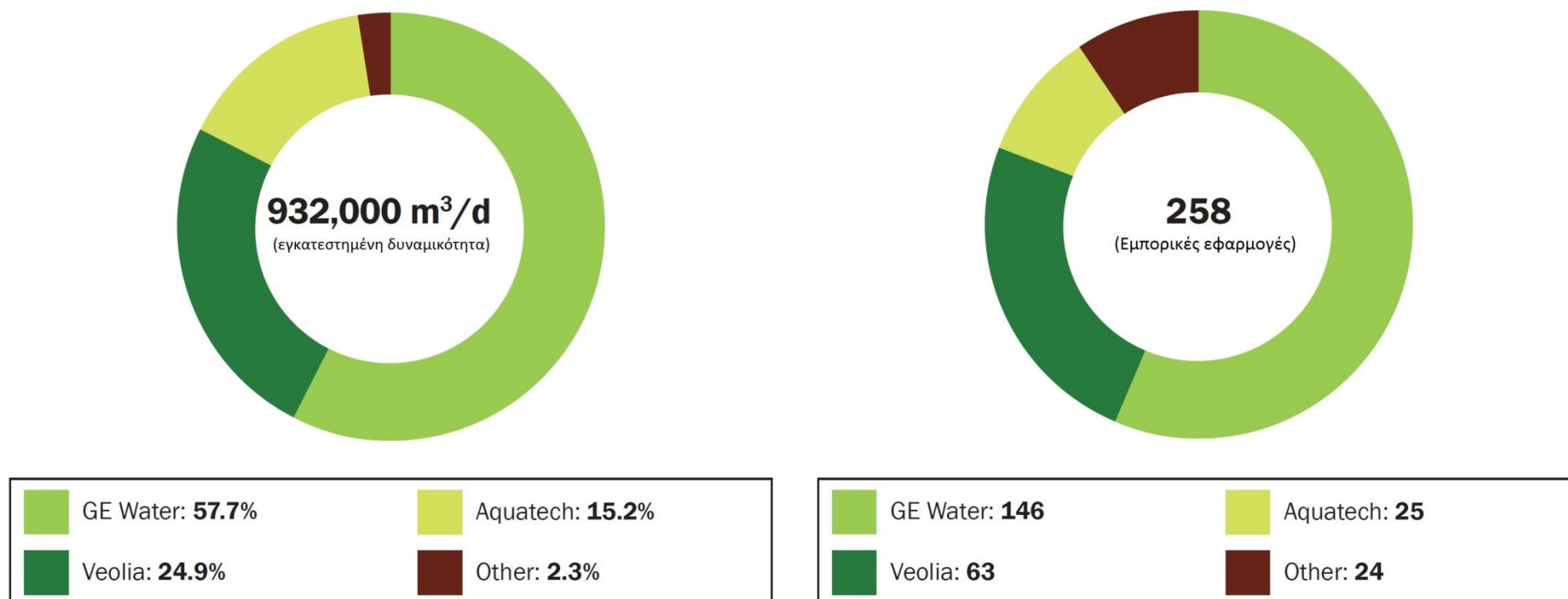


Μοναδιαίο λειτουργικό κόστος



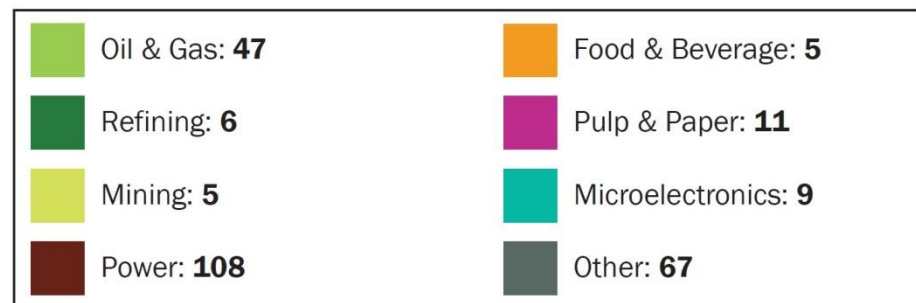
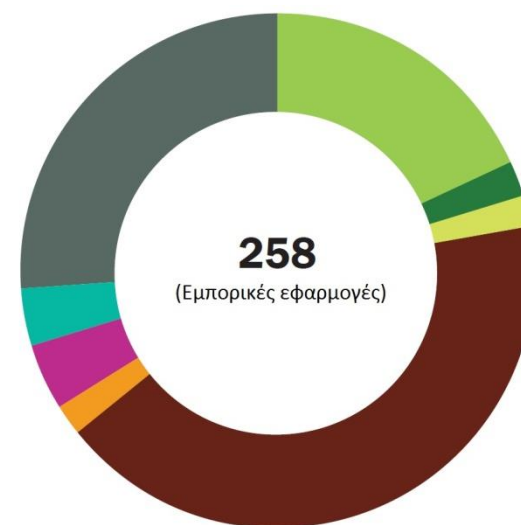
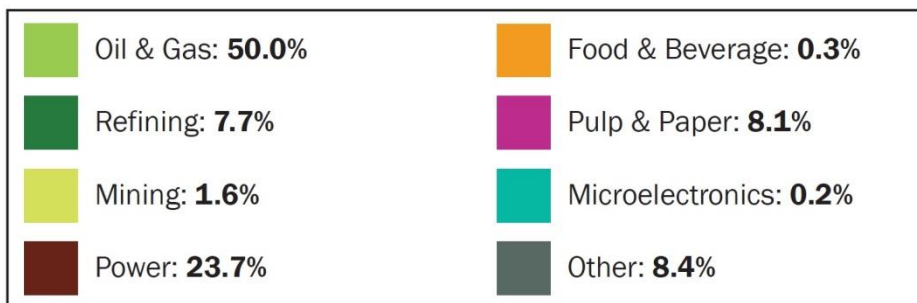
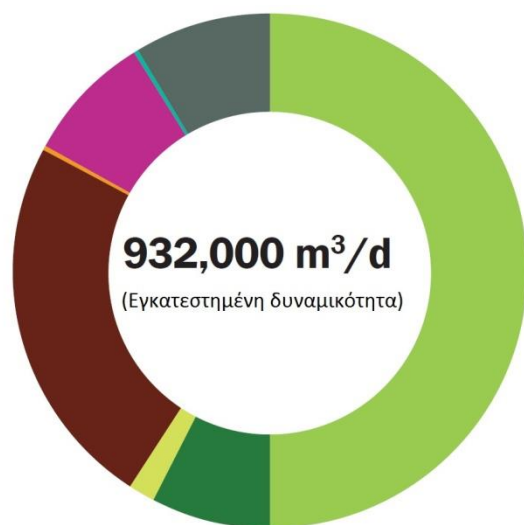
Πηγή: (Mickley M. , Survey of high recovery and Zero Liquid Discharge Technologies for water utilities, 2008)

Διάγραμμα 3-2: Συγκριτική οικονομική αξιολόγηση των διαγραμμάτων ροής ZLD για επεξεργασία άλμης (10 MGD @ 8,000 mg/l TDS)



Πηγή: (Allen, και συν., 2015)

Διάγραμμα 3-3: Εμπορικά εγκατεστημένα συστήματα ελαχιστοποίησης της άλμης, παγκοσμίως – Ανάλυση ανά εταιρεία προμήθειας συστήματος (2000 – 2015)



Πηγή: (Allen, και συν., 2015)

Διάγραμμα 3-4: Εμπορικά εγκατεστημένα συστήματα ελαχιστοποίησης της άλμης, παγκοσμίως – Ανάλυση ανά βιομηχανικό τελικό χρήστη (2000 – 2015)

3.7 Τεχνικές διαχωρισμού και ανάκτησης αλάτων

Σύμφωνα με βιβλιογραφική ανασκόπηση, οι όροι που χρησιμοποιούνται περισσότερο για τον χαρακτηρισμό του διαχωρισμού των αλάτων είναι "κλασματική κρυστάλλωση" και "κλασματική καθίζηση" ("fractional crystallization" και "fractional precipitation" αντίστοιχα στα αγγλικά). Η κλασματική κρυστάλλωση αναφέρεται κυρίως σε μελέτες γεωλογίας όπου το φαινόμενο της κρυστάλλωσης λαμβάνει χώρα με αλλαγή της συγκέντρωσης του διαλύματος μέσω εξάτμισης ή με αλλαγή της θερμοκρασίας. Αντίθετα, η κλασματική καθίζηση συνήθως αναφέρεται στο φαινόμενο καθίζησης με τη χρήση χημικών. Αν και υπάρχει εκτενής βιβλιογραφία για την παραγωγή συγκεκριμένων αλάτων (όπως NaCl, KCl, ραφινάρισμα ζάχαρης κ.λπ.), η βιβλιογραφία για τον διαχωρισμό των αλάτων από την άλμη είναι πολύ περιορισμένη.

Η χρήση της άλμης που παράγεται από μονάδες αφαλάτωσης, ως πρώτη ύλη, για την παραγωγή αλάτος, μελετήθηκε από το Κρατικό Ινστιτούτο Έρευνας της Χημικής Βιομηχανίας της Ιαπωνίας (Government Chemical Industrial Research Institute of Japan) στη δεκαετία του '70 (Reig, et al., 2014). Στην Ιαπωνία εφαρμόζεται η μέθοδος της ηλεκτροδιάλυσης από τη δεκαετία του '70 για την παραγωγή αλατιού από θαλασσινό νερό (Kobuchi, Terada, & Tani, 1983). Οι Tanaka et al. (2003) αναφέρουν ότι η Ηλεκτροδιάλυση μπορεί να εφαρμοστεί για την ανάκτηση NaCl από την άλμη και μάλιστα με εξοικονόμηση ενέργειας κατά 20% συγκριτικά με την ανάκτηση από θαλασσινό νερό (Tanaka, Ehara, Itoi, & Goto, 2003). Άλλες χώρες που χρησιμοποιούν την ηλεκτροδιάλυση για την παραγωγή αλάτος είναι η Κορέα, η Ιαπωνία και η Ταϊβάν.

Η σκοπιμότητα ανάπτυξης συστημάτων αξιοποίησης της άλμης για την παραγωγή στερεών αλάτων έχει διερευνηθεί από το 1987 για την περίπτωση της Σαουδικής Αραβίας. Οι προτάσεις διατυπώνονται σε σχετικές μελέτες (Al-Mutaz, 1987) (Al-mutaz & Wagialla, 1988).

Ο Turek (2003) προτείνει την ακόλουθη διάταξη αποτελούμενη από συνδυασμό υφιστάμενων τεχνολογιών: UF – NF – RO – MSF – κρυστάλλωση. Το βήμα της νανοδιήθησης χρησιμεύει για το διαχωρισμό των ιόντων: τα μονοθενή διαχωρίζονται από τα διθενή. Σε επόμενη δημοσίευσή του (Turek, Dydo, & Klimek, 2008), αναφέρει τους συντελεστές απόρριψης με χρήση νανοδιήθησης: (α) Ca^{2+} :

68.8%, (β) Mg^{2+} : 71.6%, (γ) SO_4^{2-} : 98.0%, (δ) Cl^- : 11.9%. Έτσι, το διήθημα έχει την ακόλουθη χημική σύσταση: (α) Ca^{2+} : 242mg/l, (β) Mg^{2+} : 188 mg/l, (γ) SO_4^{2-} : 64 mg/l, (δ) Cl^- : 32,200 mg/l.

Συγκεκριμένα, έχουν αναφερθεί οι ακόλουθοι συντελεστές απόρριψης (Morillo, Rosado, El Bakouri, Riaza, & Bernaola, 2014): (α) Ca^{2+} : 0.83, (β) Mg^{2+} : 0.87, (γ) SO_4^{2-} : 0.93, (δ) $NaCl$: 0.1. Σύμφωνα με τους παραπάνω συντελεστές απόρριψης, μπορούμε να αναμένουμε ότι το διήθημα της νανοδιήθησης θα είναι εμπλουτισμένο με $NaCl$ και μόλις μικρή (~10%) από την συνολική ποσότητα από τα δισθενή: Ca^{2+} , Mg^{2+} και SO_4^{2-} .

Δύο εταιρείες έχουν αναπτύξει εμπορική τεχνολογία επεξεργασίας της άλμης.

1. **SAL-PROC:** Η τεχνική αυτή είναι πνευματική ιδιοκτησία της Geo-Processors (U.S. Patent No. 2006196836 A1) και βασίζεται στη χρήση χημικών προσθέτων για την ανάκτηση καθαρών προϊόντων. Συνεπώς, σύμφωνα με τον ορισμό που δόθηκε παραπάνω, η τεχνική αυτή αποτελεί μία κλασματική καθίζηση για τον πρώτο διαχωρισμό των αλάτων και στη συνέχεια εφαρμόζει τεχνική εξάτμισης κρυστάλλωσης για την τελική ανάκτηση των προϊόντων. Η εταιρεία Geo-processors ισχυρίζεται πως έχει επιτύχει το διαχωρισμό των αλάτων με δυνατότητα εμπορικής αξιοποίησής τους. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως γενικά ο ισχυρισμός αυτός δεν έχει τεκμηριωθεί επαρκώς μέχρι σήμερα από άλλες πηγές (εκτός από την Geo-Processors), ενώ η τεχνολογία δεν έχει δοκιμαστεί έως τώρα σε βιομηχανική κλίμακα (Morillo, Rosado, El Bakouri, Riaza, & Bernaola, 2014)
2. **ZERO DISCHARGE DESALINATION:** η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε το 2006 από το πανεπιστήμιο της Νότιας Καρολίνα. Τα δικαιώματα της πατέντας (Patent PCT/US2005/032419) εκχωρήθηκαν στη VEOLIA, η οποία αρχικά διατήρησε τα δικαιώματα της πατέντας και έπειτα αποφάσισε να παύσει τη χρήση της πατέντας, λόγω περιορισμένης εφαρμογής της τεχνικής. Η τεχνική αυτή βασίζεται στη τεχνολογία της Ηλεκτροδιάλυσης Μετάθεσης (EDM) και περιγράφεται στην Ενότητα 4 (Case study 3).

Οι τεχνικές αυτές βρίσκονται σε πιλοτικό στάδιο ανάπτυξης και μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν διαθέσιμα αποτελέσματα από εφαρμογή τους σε πλήρη κλίμακα. Αξίζει να

σημειωθεί εδώ ότι σύμφωνα με το Global Water Intelligence, η "επιλεκτική και διαδοχική ανάκτηση των αλάτων" αναγνωρίζεται ως τη σημαντικότερη και δυνητικά επικερδέστερη πρόκληση που καλείται να αντιμετωπίσει η αφαλάτωση σήμερα. Σύμφωνα με τον ίδιο οργανισμό, το μέγεθος της αγοράς αποτιμάται σήμερα στα \$2 δις.

Case study 2: Συμβατικό σύστημα ZLD με εφαρμογή σε ορυχείο, Debiensko, Πολωνία

Case study: 2				Εργαστηριακή κλίμακα		☐ NAI	☐ OXI
Χώρα: Πολωνία				Πιλοτική κλίμακα		☐ NAI	☐ OXI
Πόλη: Katowice				Εφαρμογή		☒ NAI	☐ OXI
Τεχνική επεξεργασίας Zero Liquid Discharge με ανάκτηση αλάτων		Ποιότητα αλατιού		☒ Επιτραπέζιο αλάτι	☒ Χημ. βιομηχανία		
				☒ Εκχιονιστικό αλάτι	☐ Άλλη χρήση		
		Ποιότητα νερού		☐ Πόσιμο νερό	☐ Ανακύκλωση		
				☐ Απιονισμένο νερό	☐ Άλλη χρήση		
Έτος 1993		Ιδιοκτησία NWR CARBONIA S.A. (2008)					
Περιγραφή Τα ορυχεία στην Πολωνία απορρίπτουν μεγάλες ποσότητες υγρών αποβλήτων. Η ποσότητα αυτή εκτιμάται στα 3.6 εκ m ³ /day, με τα Ολικά Διαλυμένα Στερεά να κυμαίνονται μεταξύ 600mg/l και 120,000mg/L (η μεγαλύτερη ποσότητα αφορά σε NaCl). Περίπου 40% από αυτή την ποσότητα διατίθεται ανεπεξέργαστο σε επιφανειακά ύδατα, προκαλώντας περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Το 1993, αποφασίστηκε η εγκατάσταση συστήματος ZLD στα ορυχεία στο Debiensko. Το σύστημα προμηθεύτηκε από την εταιρεία Veolia (HPD). Η εφαρμογή αυτή αποτελεί την πρώτη εφαρμογή ZLD σε ανθρακωρυχεία.							
							
Πηγές: (Ericsson & Hallmans, 1996) (Mortazavi, 2008) (Bostjancic & Ludlum, 2013) (General Electric, 2011)							

Τεχνική εφαρμογής:

Ακολουθώς παρουσιάζονται περισσότερες πληροφορίες για την περίπτωση μελέτης του Debiensko.

Το σύστημα επεξεργασίας της άλμης περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια επεξεργασίας (Σχήμα 3-11):

1. Προ-επεξεργασία
2. Αντίστροφη όσμωση
3. Συμπύκνωση της άλμης
4. Κρυστάλλωση
5. Επεξεργασία τελικού υπολείμματος

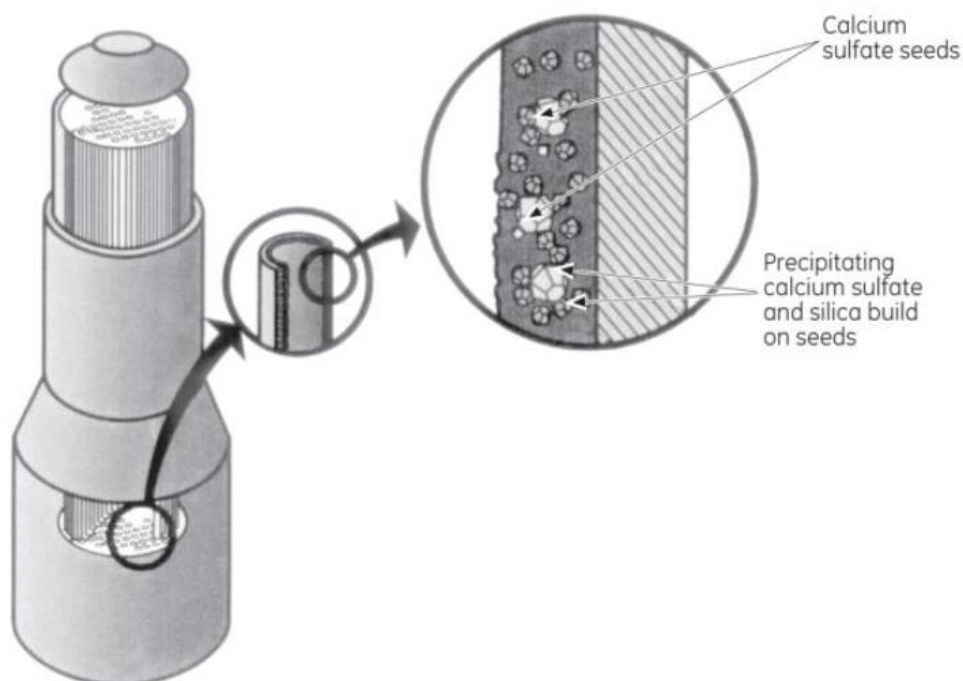
Η ποιότητα του υγρού αποβλήτου που τροφοδοτείται στον εξατμιστήρα παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 3-2: Τροφοδοσία συμπυκνωτή άλμης

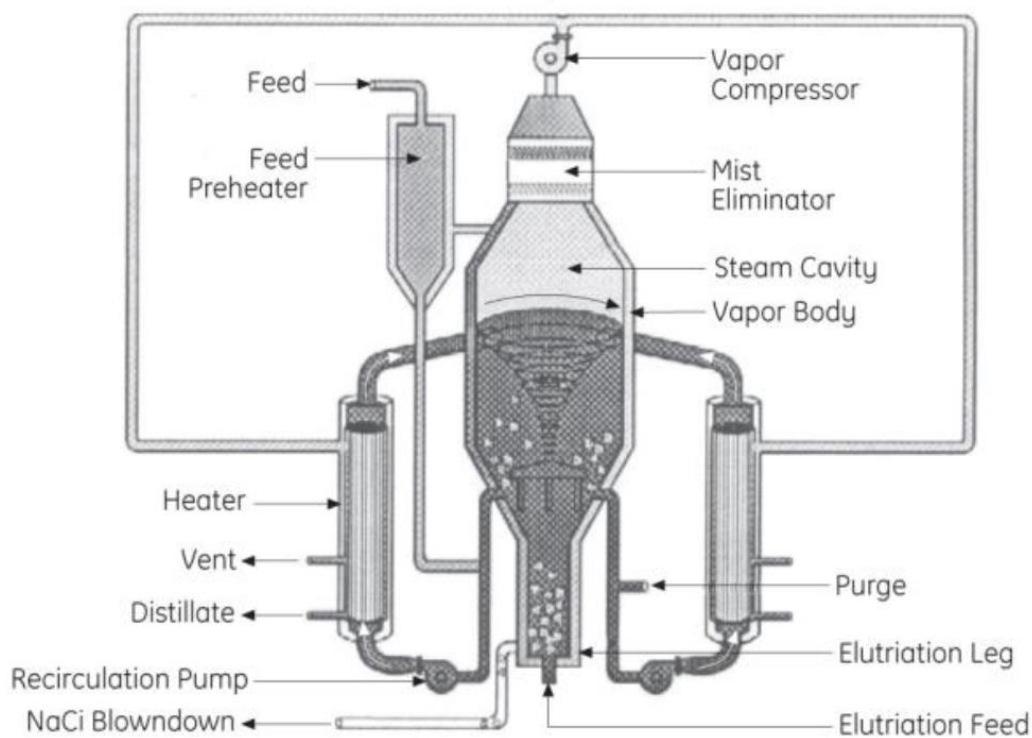
Παράμετρος	Συγκέντρωση (mg/L)
Ca	1,063
Mg	981
Na	26,451
K	382
Sr	36
Fe	0.5
Si	3
Cl	42,698
NH ₄	16
HCO ₃	1,145
SO ₄	3,420
F	5
TDS	76,400
pH	7.3

Δεδομένου ότι η άλμη περιέχει δυσδιάλυτα άλατα, κατά τη εκκίνηση του συστήματος, προστίθενται κρύσταλλοι θεικού ασβεστίου για την αποφυγή

σχηματισμού κρυστάλλων στην επιφάνεια του εναλλάκτη (οι κρύσταλλοι σχηματίζονται και διατηρούνται εν αιωρήσει στο διάλυμα επεξεργασίας), όπως φαίνεται σχηματικά και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3-8: Σχηματική αναπαράσταση εμβολιασμού με κρυστάλλους θειικού ασβεστίου για την αποφυγή καθαλατώσεων στους εναλλάκτες



Σχήμα 3-9: Σχηματική αναπαράσταση συμπυκνωτή άλμης

Τεχνολογία εφαρμογής (Mortazavi, 2008):

- Τόσο ο εξατμιστήρας όσο και ο κρυσταλλωτήρας προμηθεύτηκαν από την εταιρεία Resources Conservation Company (ΗΠΑ), ενώ τα δοχεία κατασκευάστηκαν στη Σουηδία.
- Συνολικό κόστος: : \$60 εκ. USD
- Κόστος προ-επεξεργασίας: περίπου 40% του συνολικού κόστους
- Εκτιμάται πως λαμβάνοντας υπόψη τις πωλήσεις από τα τελικά προϊόντα, η απόσβεση του εξοπλισμού γίνεται σε 10 χρόνια.

Χρήσεις τελικών προϊόντων

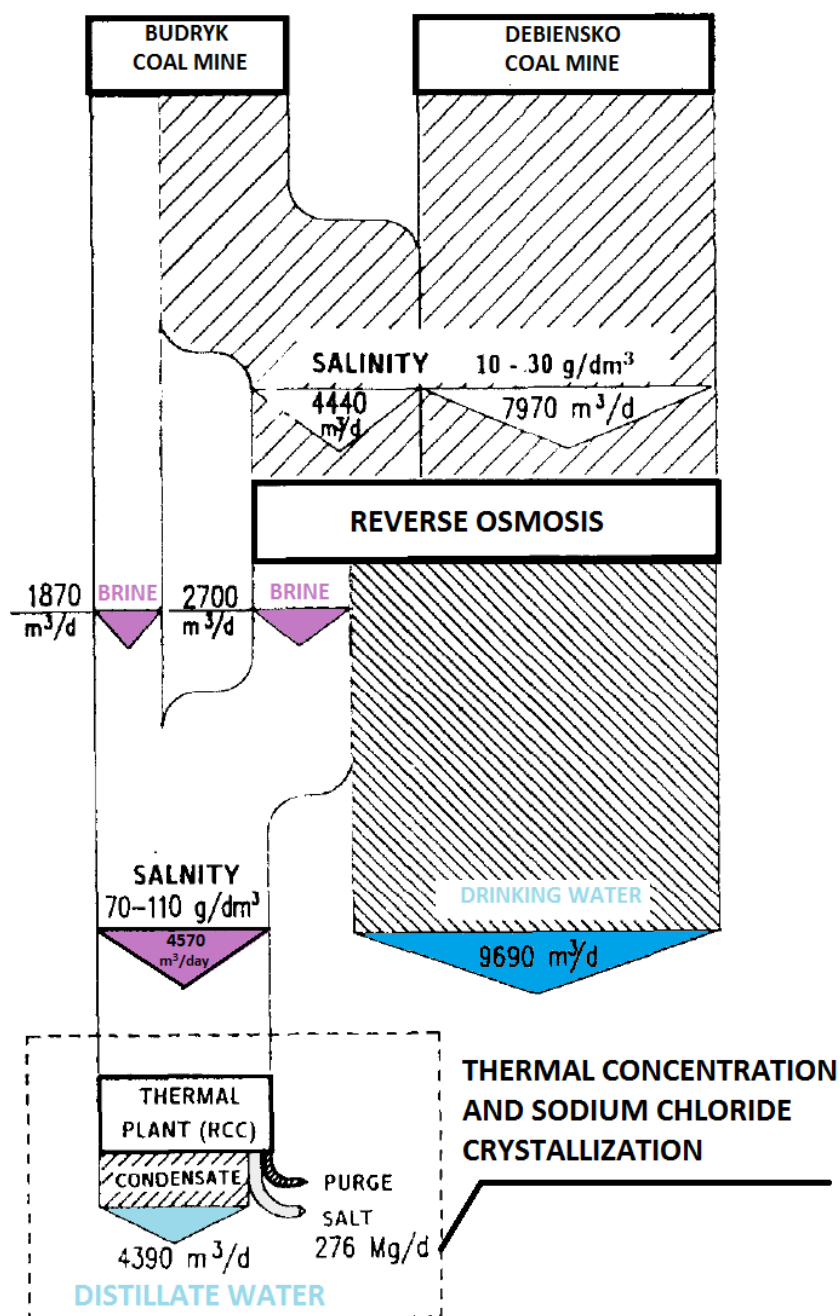
Οι χρήσεις των προϊόντων που ανακτήθηκαν παρουσιάζονται χωριστά για τα άλατα και για το νερό στους ακόλουθους πίνακες (Πίνακας 3-3 και Πίνακας 3-4 αντίστοιχα).

Πίνακας 3-3: Άλατα που ανακτώνται κατά την επεξεργασία στραγγίσματος ανθρακωρυχείου, Debiensko, Πολωνία

Προϊόν	Ημερήσια ποσότητα (μετρικοί τόνοι)	Τιμή (\$/μετρικό τόνο)
Ταμπλέτες για αποσκλήρυνση νερού	150	\$40
Αλάτι (χύδην)	250	\$40
Θεικό ασβέστιο	25	-
Προϊόντα από το υπόλειμμα του κρυσταλλωτήρα		
Αλάτι χαμηλότερης ποιότητας	30	\$15
Ιώδιο στη χημική βιομηχανία	54 kg	\$4,000
Βρώμιο στη χημική βιομηχανία	280 kg	\$300
Carnallite για λίπασμα	12.5	\$90
Μαγνήσιο	13	\$60

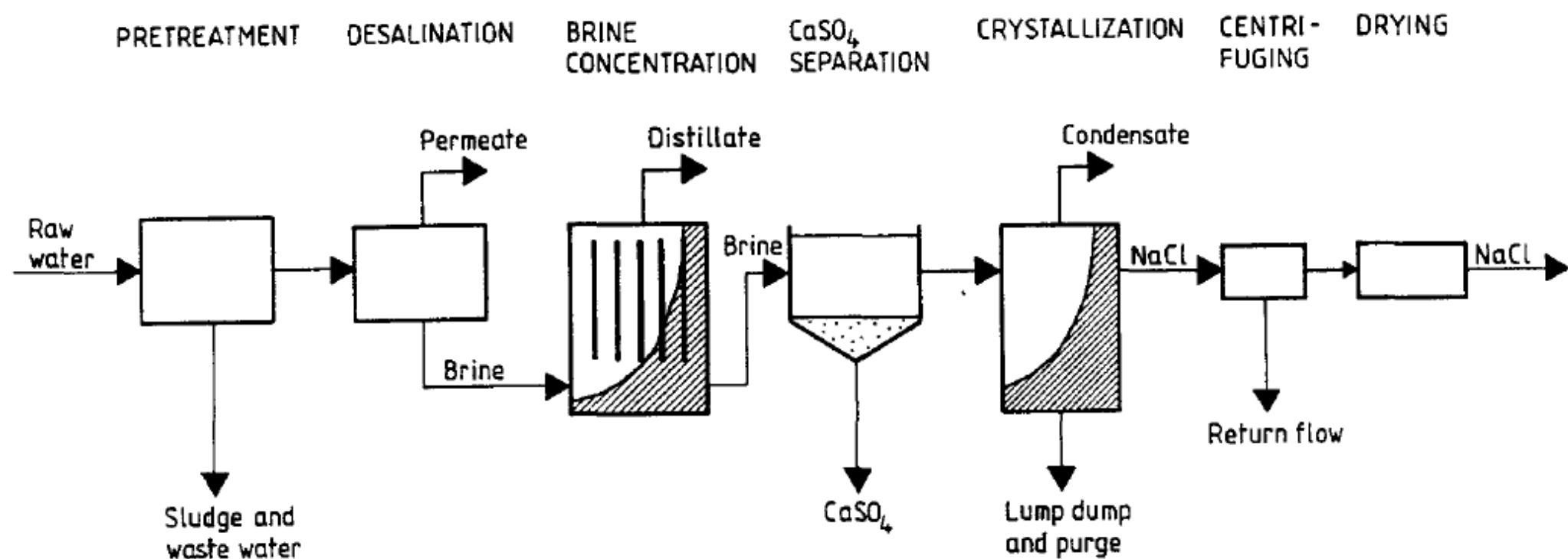
Πίνακας 3-4: Ποσότητα και τιμή πώλησης νερού ανά ποιότητα, εφαρμογή ανθρακωρυχείου, Debiensko

Προϊόν	Ημερήσια ποσότητα (m ³)	Τιμή (\$/m ³)
Πόσιμο νερό	10,500 m ³ /ημέρα	\$0.2
Αφιονισμένο νερό	~ 4,500 m ³ /ημέρα	\$0.8



Πηγή:

Σχήμα 3-10: Ισοζύγιο μάζας συστήματος ZLD, ορυχεία Debiensko, Πολωνία



Πηγή: (Ericsson & Hallmans, 1996)

Σχήμα 3-11: Διάγραμμα ροής συστήματος ZLD, ορυχεία Debiensko, Πολωνία

3.8 Συζήτηση & Συμπεράσματα

3.8.1 Συζήτηση

Η διαχείριση της άλμης που παράγεται από μονάδες αφαλάτωσης, σήμερα πραγματοποιείται συμβατικά με τη χρήση των ακόλουθων πέντε (5) τεχνικών: (1) Διάθεση σε επιφανειακά ύδατα, (2) Διάθεση σε δίκτυο αποχέτευσης, (3) Έγχυση άλμης σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς, (4) Άρδευση και (5) Λίμνες εξάτμισης. Στο κεφάλαιο αυτό μελετώνται επίσης η τεχνική ZLD και η έννοια του συνδυασμού της τεχνικής αυτής με άλλες μεθόδους για πιθανή ανάκτηση αλάτων υψηλής καθαρότητας. Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται τα στοιχεία που συζητήθηκαν στις παραπάνω παραγράφους σχετικά με τις τεχνικές διάθεσης/διαχείρισης της άλμης. Στον πίνακα αυτό εξετάζονται εννέα παράμετροι και επιχειρείται μία βαθμολόγηση των τεχνικών, με γνώμονα τη διεθνή εμπειρία και βιβλιογραφία και στόχο την ανάδειξη των χαρακτηριστικών των τεχνικών.

Πίνακας 3-5: Συγκριτική αξιολόγηση τεχνικών διαχείρισης άλμης

Τεχνική Διαχείρισης Άλμης Παράμετρος Αξιολόγησης	Επιφανειακά Υδατα	Υπόνομος	Υπόγεια έγχυση	Λίμνες Εξάτμισης	Άρδευση	ZLD	Ανάκτηση αλάτων
Επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας							
Ανάκτηση νερού							
Ανάκτηση αλάτων							
Ευκολία αδειοδότησης							
Χαμηλά λειτουργικά κόστη							
Χαμηλό κόστος επένδυσης							
Περιβαλλοντικά φιλική τεχνική							
Καταλληλότητα για μεγάλη δυναμικότητα							
Χαμηλές απαιτήσεις γης							
Υπόμνημα:							
		Πολύ καλό (4)		Καλό (3)			
		Μέτριο (2)		Κακό (1)			

Μία αντίστοιχη αξιολόγηση προτείνουν οι Mackey & Seacord (2006) συγκρίνοντας τις τεχνικές ZLD και λιμνών εξάτμισης λαμβάνοντας υπόψη εννέα παραμέτρους.

Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στις τεχνικές Zero Liquid Discharge. Οι τεχνικές αυτές έχουν μελετηθεί από διάφορους ερευνητές τα τελευταία χρόνια. Κάποιοι από τους ερευνητές, δίνουν έμφαση στην έρευνα τους, στην αξιοποίηση της άλμης (Xu, et al., 2013), όπως για παράδειγμα για την ανάκτηση μετάλλων από την άλμη (Al-mutaz & Wagialla, 1988) (Al-Mutaz, 1987), ενώ κάποιοι άλλοι παρουσιάζουν τα αποτελέσματά από εφαρμογή καινοτόμων προσεγγίσεων, όπως η ευτηκτική κρυστάλλωση (Lewis, 2014). Ο Davis (2006) παρουσιάζει τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της τεχνικής Zero Discharge Desalination, η οποία αποτελεί κατά βάση μία παραλλαγή της τεχνικής της ηλεκτροδιάλυσης (βλ. Case study 3).

Αρκετοί ερευνητές κάνουν επίσης διάκριση μεταξύ των τεχνικών που εφαρμόζονται για μείωση του όγκου της άλμης (brine minimization) και της τεχνικής των μηδενικών υγρών αποβλήτων (Zero Liquid Discharge, ZLD) (Balasubramanian, 2013). Ο Mickley (2008) συμπεριλαμβάνει στη μελέτη του την παράμετρο του κόστους και συγκρίνει την συνδυασμένη εφαρμογή διαφορετικών τεχνικών (κοστολογημένα) για 5 εφαρμογές με διαφορετικό όγκο επεξεργασίας και συγκέντρωση αλάτων. Ένας εναλλακτικός τρόπος διαχείρισης της άλμης προτείνεται από τους Lapidou, Hadjibiros, & Gialis (2009) για την περίπτωση της Ελλάδος, μεταφέροντας την άλμη που παράγεται από νησιωτικές μονάδες αφαλάτωσης στις αλυκές για εξάτμιση και πιθανή εμπορική αξιοποίηση.

3.8.2 Συμπεράσματα

Αν και σήμερα (2015) είναι καταγεγραμμένες 258 εμπορικές εφαρμογές συστημάτων ZLD (Διάγραμμα 3-4), αυτές αφορούν κατ'αποκλειστικότητα εφαρμογές στη βιομηχανία (Allen, και συν., 2015). Το ίδιο αναφέρεται και από μελέτες που αφορούν την περιοχή των Η.Π.Α., η οποία αποτελεί την περιοχή στην οποία αναπτύχθηκαν τα συστήματα αυτά. Ο Mickley (2008) αποτυπώνει περισσότερες από 120 εμπορικές εφαρμογές συστημάτων ZLD (βλ. επίσης Παράρτημα), καμία όμως δεν αφορά σε συστήματα αφαλάτωσης για παραγωγή πόσιμου νερού.

Βασικός στόχος αυτής της διδακτορικής διατριβής είναι η αξιοποίηση της άλμης από μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, στις ακόλουθες ενότητες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από:

- (α) Τον σχεδιασμό του καινοτόμου συστήματος επεξεργασίας της άλμης: το σύστημα σχεδιάστηκε σύμφωνα με την αρχή ZLD, προσαρμόζοντας τον σχεδιασμό στις ιδιαίτερες ανάγκες της εφαρμογής (Ενότητα 4)
- (β) Τη λειτουργία και τη βελτιστοποίηση του συστήματος (Ενότητα 5.2 και 5.3 αντίστοιχα). Στην Ενότητα 5.2 παρουσιάζονται επίσης οι εργαστηριακές αναλύσεις από τα διάφορα ρεύματα, η κατασκευή του συστήματος, το κόστος και οι προτάσεις για ανάπτυξη σε πλήρη κλίμακα. Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούνται για την επόμενη Ενότητα προκειμένου να διατυπωθούν:
- (γ) Οι προτάσεις για την αξιοποίηση της άλμης (Ενότητα 6) με εφαρμογή του συστήματος που σχεδιάστηκε στην Ενότητα 4. Αρχικά εκπονείται μία μελέτη σκοπιμότητας, η οποία στοχεύει στην εκτίμηση (i) της οικονομικής αξίας 1m^3 άλμης από μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού και (ii) του κόστους επεξεργασίας 1m^3 άλμης με τη χρήση του εν λόγω συστήματος επεξεργασίας της άλμης. Η σύγκριση των δύο τιμών προσφέρει τη δυνατότητα εκτίμησης της σκοπιμότητας μίας τέτοιας εφαρμογής. Στο τέλος, αποτυπώνονται η αγορά αφαλάτωσης, η αγορά άλατος και η αγορά απιονισμένου νερού στην Ελλάδα, με στόχο την διατύπωση συγκεκριμένων προτάσεων εφαρμογής.

4 Σχεδιασμός πιλοτικού συστήματος επεξεργασίας της άλμης

Ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη μίας πρότυπης μονάδας, όπως της μονάδας επεξεργασίας της άλμης που εξετάζεται στο πλαίσιο αυτής της διδακτορικής διατριβής, περιλαμβάνει (μεταξύ άλλων) τις ακόλουθες επιμέρους φάσεις:

- Αρχικός⁷ σχεδιασμός (Conceptual Design),
- Προκαταρκτικός σχεδιασμός (Preliminary Design),
- Λεπτομερής σχεδιασμός (Detailed Design).

Στις επιμέρους φάσεις, ο σχεδιαστής πρέπει να εξετάζει διαφορετικές παραμέτρους και να τις απαντά ικανοποιητικά πριν να προχωρήσει στην επόμενη φάση σχεδιασμού (βλ. Σχήμα 4-1).



Σχήμα 4-1: Επιμέρους φάσεις σχεδιασμού

⁷ Αναφέρεται επίσης στην ελληνική βιβλιογραφία και ως αρχέτυπος, αρχετυπικός ή εννοιολογικός σχεδιασμός

4.1 Αρχικός σχεδιασμός

Στόχοι:

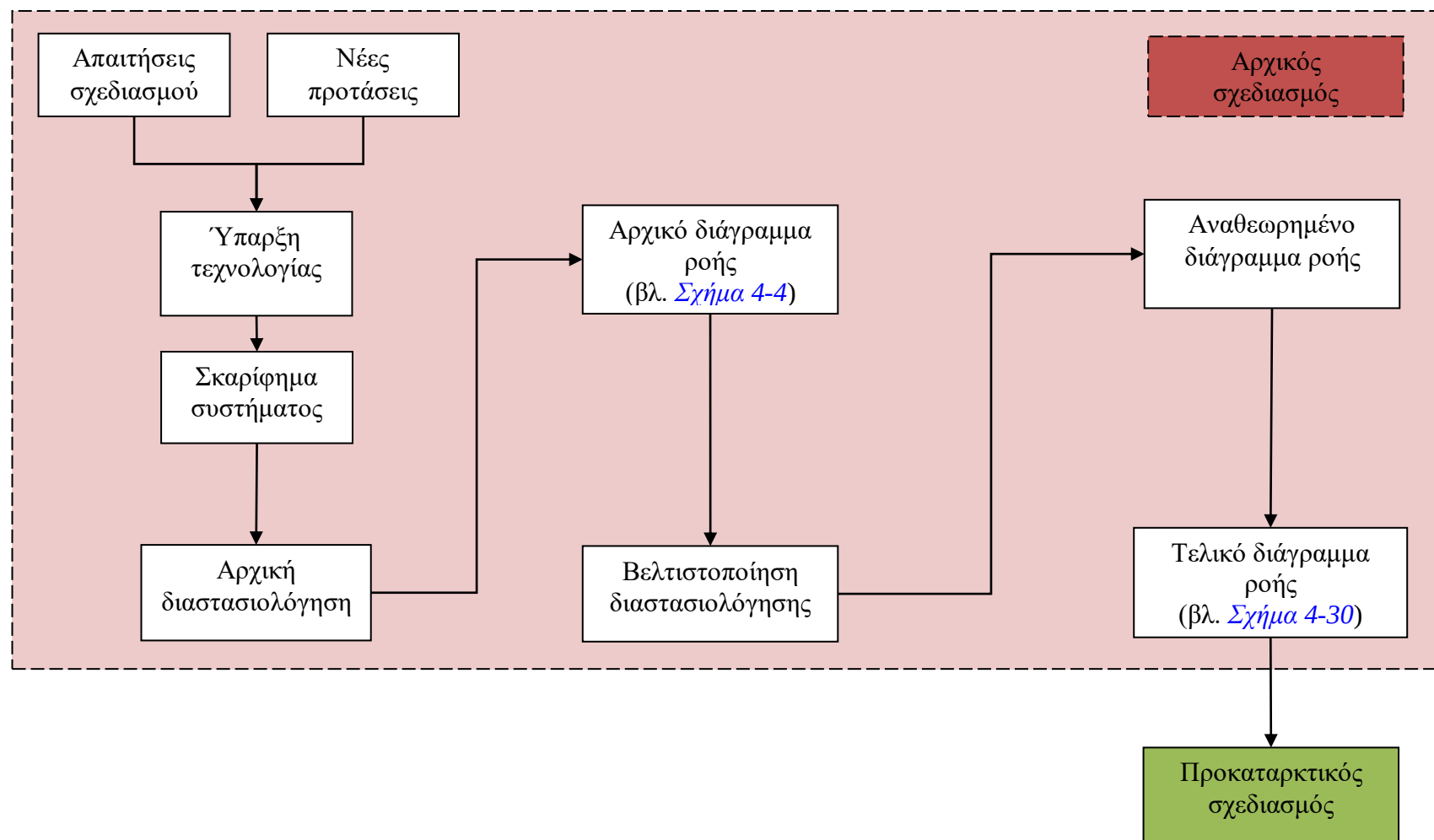
- Καθορισμός των κυρίων συνιστωσών του συστήματος επεξεργασίας της άλμης,
- Περιγραφή των επί μέρους μονάδων, παρέχοντας την αρχή λειτουργίας και βασικά χαρακτηριστικά,
- Ανάπτυξη του απαραίτητου υποβάθρου για τον μετέπειτα σχεδιασμό του συστήματος επεξεργασίας της άλμης.

Μεθοδολογία:

Το οργανόγραμμα της φάσης του αρχικού σχεδιασμού δίνεται στο Σχήμα 4-2. Στα πρώτα στάδια του αρχικού σχεδιασμού, εξετάστηκε το αρχικό διάγραμμα ροής το οποίο είχε προετοιμαστεί και υποβληθεί με την πρόταση SOL-BRINE (LIFE09 ENV/GR/000299) στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Το αρχικό διάγραμμα ροής εξετάζεται στην Ενότητα 4.1.1, παραθέτοντας επίσης τις βασικές αρχές λειτουργίας και τις παραμέτρους σχεδιασμού κάθε συνιστώσας.

Ο σχεδιασμός εστιάζει στις θερμικές τεχνικές. Ωστόσο, από την ανάλυση που παρουσιάζεται στην Ενότητα 3.7, φαίνεται πως οι τεχνικές μεμβρανών μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο, ιδιαίτερα για τους σκοπούς ανάκτησης καθαρών αλάτων. Έτσι, αναλύθηκαν τόσο οι θερμικές τεχνικές (Ενότητα 4.1.3), όσο και οι τεχνικές μεμβρανών (Ενότητα 4.1.2). Σημειώνεται πως γίνεται εκτενέστερη ανάλυση στις μεθόδους που έχουν επικρατήσει στην αγορά όπως είναι η Αντίστροφη Όσμωση, η Πολυβάθμια Εκτόνωση, η Πολυβάθμια Εξάτμιση και η Ηλεκτροδιάλυση. Προκαταρκτικά στοιχεία κόστους δίνονται στην Ενότητα 4.1.6.

Το τελικό διάγραμμα ροής παρουσιάζεται και συζητείται στην Ενότητα 4.1.7. Έχοντας οριστικοποιήσει το διάγραμμα ροής αυτό, ο σχεδιασμός συνεχίζεται σε προκαταρκτικό επίπεδο στην Ενότητα 4.2.



Σχήμα 4-2: Οργανόγραμμα φάσης αρχικού σχεδιασμού

4.1.1 Αρχικό διάγραμμα ροής

Σύμφωνα με το αρχικό διάγραμμα ροής, οι κύριες συνιστώσες του συστήματος επεξεργασίας της άλμης είναι οι ακόλουθες:

- Εξατμιστήρας (*evaporator*),
- Κρυσταλλωτήρας (*crystallizer*),
- Ξηραντήρας (*dryer*),
- Συμπιεστής (*compressor*), και
- Ηλιακό σύστημα.

Τα παραπάνω βασικά μέρη του συστήματος περιγράφονται ακολούθως και αποτυπώνονται στο Σχήμα 4-4.

Εξατμιστήρας

Αρχές λειτουργίας:

- Αποτελεί το πρώτο στάδιο επεξεργασίας της άλμης που παράγεται από την υφιστάμενη μονάδα αφαλάτωσης στην Τήνο.
- Δυναμικότητα: 2,000 λίτρα άλμης/ημέρα.
- Αύξηση της συγκέντρωσης του ρεύματος της άλμης. Η έξοδος του ρεύματος της άλμης πρέπει να έχει συγκέντρωση ολικών διαλυμένων στερεών $\sim 0.27\text{kg}$ άλατος/kg διαλύματος, συγκέντρωση κοντά στο σημείο κορεσμού του NaCl (βλέπε Σχήμα 4-3). Σύμφωνα με τον ορισμό του (βλ. Ενότητα 2.5.2.1), ο λόγος συμπύκνωσης στον εξατμιστήρα είναι ίσος με: $C.F. = \frac{27\%}{7\%} = 3.8$
- Λειτουργία υπό κενό έτσι ώστε να επιτρέπεται η χρήση θερμότητας χαμηλής στάθμης (low grade heat) όπως η ηλιακή ενέργεια
- Διαχωρισμός άλμης, έπειτα από επεξεργασία, σε δύο ρεύματα: (α) ατμός και (β) συμπυκνωμένη άλμη. Ο ατμός συμπυκνώνεται ανακτάται ως απιονισμένο νερό υψηλών προδιαγραφών.
- Ο ατμός της τελευταίας βαθμίδας χρησιμοποιείται ως φορέας πρόσδοσης θερμότητας στον κρυσταλλωτήρα.

Κρυσταλλωτήρας

Διακρίνουμε δύο βασικούς τύπους κρυσταλλωτήρων:

- Θέρμανσης/ εξάτμισης (*evaporative crystallizer*)
- Ψύξης (*cooling crystallizer*)

Η επιλογή του τύπου κρυσταλλωτήρα εξαρτάται από τη καμπύλη διαλυτότητας του άλατος στο συγκεκριμένο διαλύτη. Στην περίπτωση όπου η καμπύλη αυτή, στο πεδίο θερμοκρασιών ψύξης, δεν παρουσιάζει έντονη κλίση επιλέγεται κρυσταλλωτήρας εξάτμισης (*evaporative crystallizer*). Παραδείγματα καμπύλων διαλυτότητας για διαφορετικά υγρά δίνεται στην Ενότητα 2.2.5.

Σημειώνεται ότι το ρεύμα της άλμης μπορεί να προσεγγιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια από υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου. Όπως φαίνεται και από την καμπύλη διαλυτότητας του NaCl (Σχήμα 4-3), η κλίση της καμπύλης είναι σχεδόν οριζόντια για το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας και για το λόγο αυτό ο τύπος του κρυσταλλωτήρα που επιλέγεται είναι ο κρυσταλλωτήρας εξάτμισης.

Αρχές λειτουργίας:

- Τροφοδοσία ενέργειας: παροχή θερμότητας από ατμούς της τελευταίας βαθμίδας του εξατμιστήρα
- Διαχωρισμός στερεού άλατος (μάγμα) από το κορεσμένο διάλυμα
- Απομάκρυνση κρυστάλλων– σχηματισμός κρυσταλλικής στερεής φάσης άλατος
- Συγκέντρωση δ/τος > >συγκέντρωση κορεσμού για T=σταθερή
- Μάγμα (υψηλό ποσοστό υγρασίας)

Παράμετροι σχεδιασμού

- Ρυθμός ανάπτυξης του κρυστάλλου

Η κρυστάλλωση γίνεται σε δύο στάδια: (α) στάδιο σχηματισμού των πρώτων κρυστάλλων (πυρηνογένεση) και (β) ανάπτυξη του κρυστάλλου: στο στάδιο αυτό αποτίθενται στρώματα της ουσίας πάνω στον αρχικό κρύσταλλο. Ο ρυθμός πραγματοποίησης του δεύτερου σταδίου αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τον σχεδιασμό του κρυσταλλωτήρα.

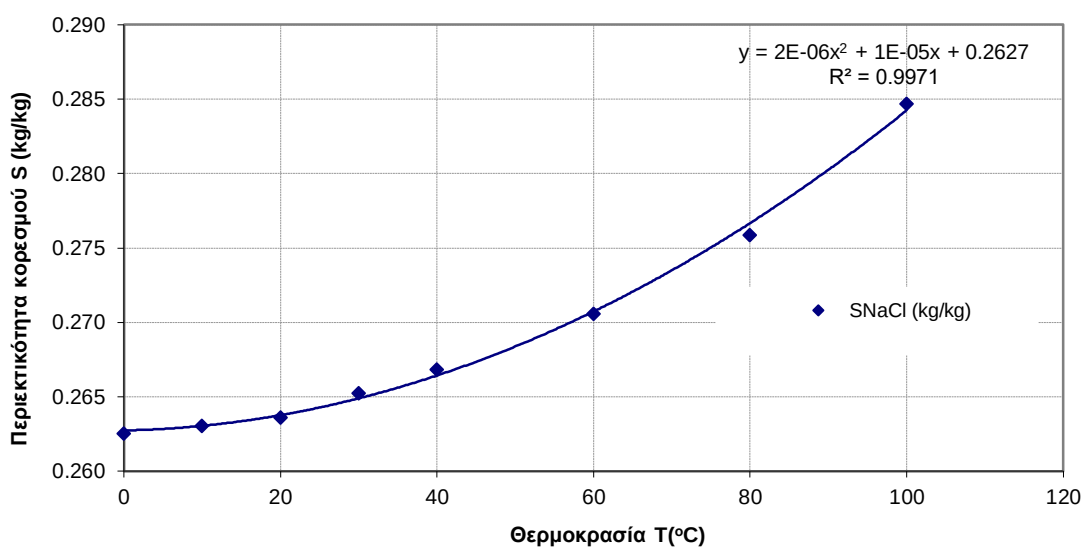
- Χρόνος παραμονής του συμπυκνώματος στον κρυσταλλωτήρα (μέγεθος κρυστάλλων, εξάρτηση από τον όγκο του κρυσταλλωτήρα)

Ξηραντήρας

Το ρεύμα υψηλής συγκέντρωσης σε NaCl (magma) από τον κρυσταλλωτήρα, αναμένεται να έχει υψηλά επίπεδα υγρασίας και γι' αυτό απαιτείται η χρήση μονάδας ξήρανσης.

Χαρακτηριστικά ξηραντήρα:

- Η μονάδα αυτή θα είναι τύπου ξηραντήρα δίσκων (tray dryer) και οι θερμικές ανάγκες λειτουργίας θα καλύπτονται από ρεύμα ζεστού αέρα.
- Ο αέρας αυτός θα θερμαίνεται από κατάλληλη διάταξη θέρμανσης. Στην επόμενη φάση του σχεδιασμού θα διερευνηθεί με τη χρήση του προσομοιωτή, αν θα απαιτηθεί για το λόγο αυτό πεδίο επίπεδων ηλιακών συλλεκτών ή κάλυψη του θερμικού φορτίου με ανάκτηση ενέργειας από τα ήδη υπάρχοντα θερμά ρεύματα (όπως π.χ. τα συμπυκνώματα ατμού από τις μονάδες εξάτμισης και κρυστάλλωσης)



Σχήμα 4-3: Καμπύλη διαλυτότητας NaCl

Συμπιεστής ατμού

Διακρίνονται δύο βασικοί τύποι συμπιεστών ατμού, ανάλογα με το είδος της ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία τους:

- Ο μηχανικός συμπιεστής (Mechanical Vapor Compressor, MVC): απαιτεί ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία του, και
- Ο θερμικός συμπιεστής (Thermal Vapor Compressor, TVC): απαιτεί θερμική ενέργεια για τη λειτουργία του (χρήση ατμού).

Λειτουργία:

- Ο συμπιεστής τροφοδοτείται από το ρεύμα ατμού της μονάδας (εξάτμισης ή κρυστάλλωσης) στην περίπτωση TVC.
- Ο συμπιεστής χρησιμοποιείται προκειμένου να αυξηθεί η πίεση και συνεπακόλουθα η ενθαλπία και η θερμοκρασία του παραγόμενου ατμού. Ο ατμός αυτός, με τα υψηλότερα πλέον θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά, οδηγείται στην είσοδο του εξατμιστήρα. Κατά τον τρόπο αυτό ανακτάται μέρος της ενέργειας του ατμού.

Η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία του μηχανικού συμπιεστή θα προσφέρεται από φωτοβολταϊκό πάνελ, ενώ η απαιτούμενη θερμική ενέργεια για τη λειτουργία του θερμικού συμπιεστή θα προσφέρεται από ατμό του παραβολικού πεδίου.

Ηλιακό σύστημα (Κάλυψη ενεργειακών απαιτήσεων του συστήματος)

Η κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων θα πραγματοποιηθεί με χρήση ΑΠΕ και συγκεκριμένα με ηλιακή ενέργεια. Ειδικότερα:

- Οι θερμικές ανάγκες θα καλυφθούν με τη χρήση πεδίου ηλιακών συλλεκτών,
- Οι ηλεκτρικές ανάγκες θα καλυφθούν με τη χρήση φωτοβολταϊκής γεννήτριας.

Στις ακόλουθες ενότητες παρουσιάζονται οι εμπορικές τεχνικές αφαλάτωσης, με στόχο την επιλογή των συνιστωσών επεξεργασίας και την οριστικοποίηση του διαγράμματος ροής.

Αναφορικά με τις τεχνολογίες, επιλέχθηκαν να μελετηθούν κυρίως οι τεχνολογίες που είναι εμπορικά διαθέσιμες και που σχετίζονται με την επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Επίσης δίνονται κάποια στοιχεία για τις αναδυόμενες τεχνολογίες για λόγους πληρότητας.

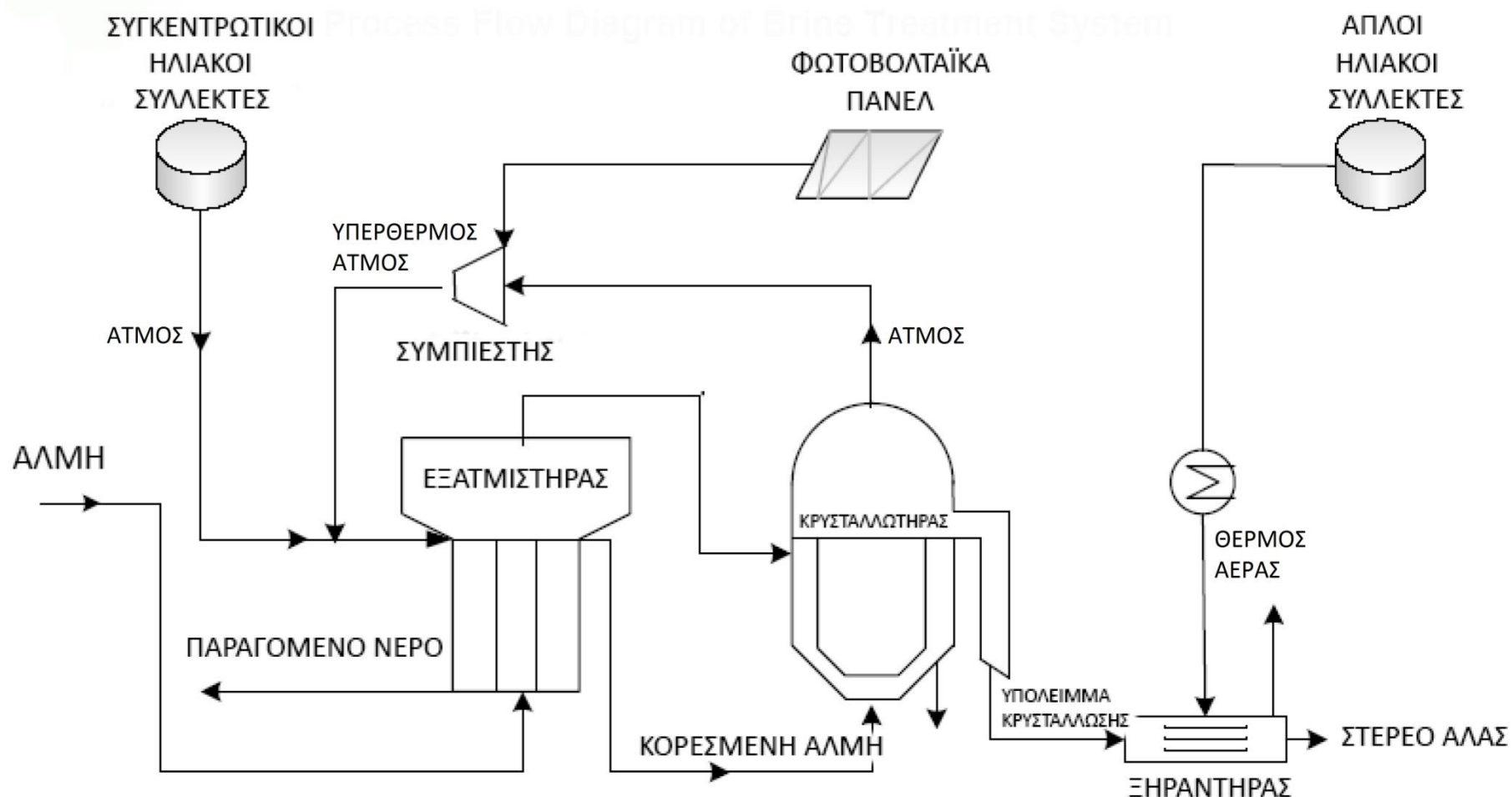
Οι τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνουν τις ακόλουθες:

- **Τεχνολογίες με μεμβράνες:**
 - Αντίστροφη όσμωση
 - Ηλεκτροδιάλυση
 - Ιοντοεναλλαγή
 - Αναδυόμενες τεχνικές μεμβρανών
- **Θερμικές τεχνικές:**
 - Απόσταξη με πολλαπλές βαθμίδες
 - Απόσταξη με εκτόνωση
 - Επανασυμπίεση ατμών
 - Αναδυόμενες τεχνικές
- **Αναδυόμενες τεχνικές:** στην κατηγορία με τις αναδυόμενες τεχνικές περιλαμβάνονται οι ακόλουθες τεχνολογίες:
 - Ευθεία όσμωση (Forward Osmosis, FO)
 - Απόσταξη με μεμβράνες (Membrane Distillation, MD)
 - Αφαλάτωση με ύγρανση – αφύγρανση (Humidification-dehumidification)
 - Τεχνολογική πρόοδος με την αντίστροφη όσμωση
 - Αφαλάτωση με ψύξη (Freeze desalination)
 - Χωρητικός απιονισμός (Capacitive Deionisation, CapDI)/ Χωρητικός απιονισμός με μεμβράνες (Membrane Capacitive Deionisation, MCDI)
 - Άλλες τεχνικές: Dynamic Vapour Recovery (DyVaR), Hittite low-temperature evaporator, Fluidised bed evaporator, Fractional Electrodeionisation (FEDI), Ακτινικός απιονισμός (Radial Deionisation, RDI), Ανάκτηση μετάλλων

Στην κάθε ενότητα δίνονται οι ακόλουθες πληροφορίες:

- **Περιγραφή:** Δίνονται στοιχεία σχετικά με:

- Αρχές λειτουργίας
- Ταξινόμηση
- **Λειτουργικά χαρακτηριστικά:** Δίνονται στοιχεία σχετικά με:
 - Δυναμικότητα
 - Προ-επεξεργασία
 - Ενεργειακές απαιτήσεις
 - Απόδοση διεργασίας
 - Προδιαγραφές παραγόμενου νερού
- **Εφαρμογές:** Δίνονται στοιχεία σχετικά με:
 - Νερό τροφοδοσίας
 - Υλικά
 - Τελικός καταναλωτής
 - Βασικοί Προμηθευτές



Σχήμα 4-4: Διάγραμμα ροής του συστήματος επεξεργασίας της παραγόμενης άλμης από μονάδες αφαλάτωσης

4.1.2 Αφαλάτωση με μεμβράνες

Στην κατηγορία αυτή εμπίπτουν δύο υπο-κατηγορίες τεχνικών:

- Τεχνικές για την απομάκρυνση νερού από το διάλυμα/ υγρό απόβλητο και
- Τεχνικές για την απομάκρυνση αλάτων από το διάλυμα/ υγρό απόβλητο.

Τεχνικές για την απομάκρυνση νερού

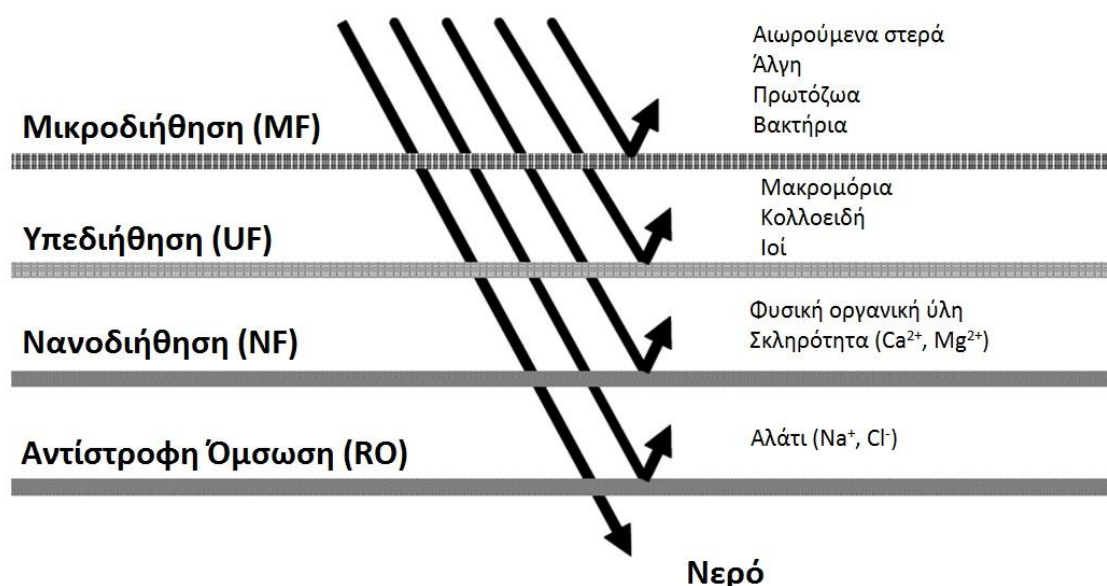
Ανάλογα με το είδος των μεμβρανών, το μέγεθος των πόρων, την ασκούμενη πίεση και το είδος των σωματιδίων που κατακρατούν (βλ. Σχήμα 4-5) έχουμε και τις αντίστοιχες διηθήσεις:

- Μικροδιήθηση (Microfiltration, MF)
- Υπερδιήθηση (Ultrafiltration, UF),
- Νανοδιήθηση (Nanofiltration, NF), και
- Αντίστροφη Όσμωση (Reverse Osmosis, RO), (εξετάζεται στην Ενότητα 4.1.2.1)

Τεχνικές για την απομάκρυνση αλάτων

Στην κατηγορία αυτή εμπίπτουν οι ακόλουθες δύο (2) τεχνικές:

- Ηλεκτροδιάλυση (Ενότητα 4.1.2.2), και
- Ιοντοεναλλαγή (Ενότητα 4.1.2.3).



Προσαρμοσμένο από (National Research Council, 2008)

Σχήμα 4-5: Ουσίες και σωματίδια που κατακρατούνται ανά τεχνική αφαλάτωσης με μεμβράνες

4.1.2.1 Αντίστροφη Όσμωση

Περιγραφή

Ο πρώτος σαφής ορισμός του φαινομένου της όσμωσης (διέλευση διαλύτη διαμέσου ημιπερατής μεμβράνης από διάλυμα χαμηλής σε διάλυμα υψηλής συγκέντρωσης) και του φαινομένου της διάλυσης (διέλευση διαλύτη διαμέσου ημιπερατής μεμβράνης από διάλυμα υψηλής σε διάλυμα χαμηλής συγκέντρωσης) δόθηκε για πρώτη φορά το 1823 από τον Dutrochet (El-Dessouky & Ettouney, 2002).

Ωστόσο, η ιστορία ανάπτυξης της τεχνολογίας της Αντίστροφης Όσμωσης (Reverse Osmosis, RO) άρχισε πολύ αργότερα, όταν ο Reid και ο Breton ανέπτυξαν, το 1959, στο Πανεπιστήμιο της Φλόριντα, την πρώτη μεμβράνη από οξική κυτταρίνη (Cellulose Acetate, CA) (Υπουργείο Γεωργίας Αγροτικής Ανάπτυξης και Περιβάλλοντος Κύπρου, 2007). Τέσσερα χρόνια αργότερα (1963), οι Loieb και Sourirajan, ανέπτυξαν τις πρώτες ασύμμετρες μεμβράνες, με απόρριψη ρεύματος υψηλότερης αλατότητας και παραγωγή νερού. Έκτοτε, ακολούθησε εντατική έρευνα στο πεδίο των μεμβρανών με την εγκατάσταση (6,000 gallons/ημέρα, ή ~23 m³/ημέρα) στην Coalinga της California, το 1965, να αποτελεί την πρώτη εμπορική της εφαρμογή. Η RO έχει χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας από τις θερμικές μεθόδους αφαλάτωσης. Σήμερα η RO αποτελεί την κυρίαρχη μέθοδο αφαλάτωσης, κατέχοντας 73.7% (βλ. Διάγραμμα 2-3) της δυναμικότητας μονάδων αφαλάτωσης που εγκαταστάθηκε (50εκ. m³/ημέρα) μεταξύ 2004-2014 (Alvarado-Revilla, et al., 2015).

Η Αντίστροφη Όσμωση είναι μία διεργασία κατά την οποία ανακτάται καθαρό νερό από ένα αλατούχο διάλυμα, στο οποίο αυξάνεται η πίεση σε τιμές μεγαλύτερης της οσμωτικής πίεσης. Κατ'ουσία, φίλτρα διήθησης κατακρατούν τα ιόντα που εμπεριέχονται στο αλατούχο διάλυμα, επιτρέποντας τη διέλευση μόνο των μορίων του νερού (AQUA-CSP, 2007).

Οσμωτική πίεση: Η οσμωτική πίεση ενός διαλύματος μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά με τη μέτρηση της συγκέντρωσης των διαλυμένων αλάτων ως εξής:

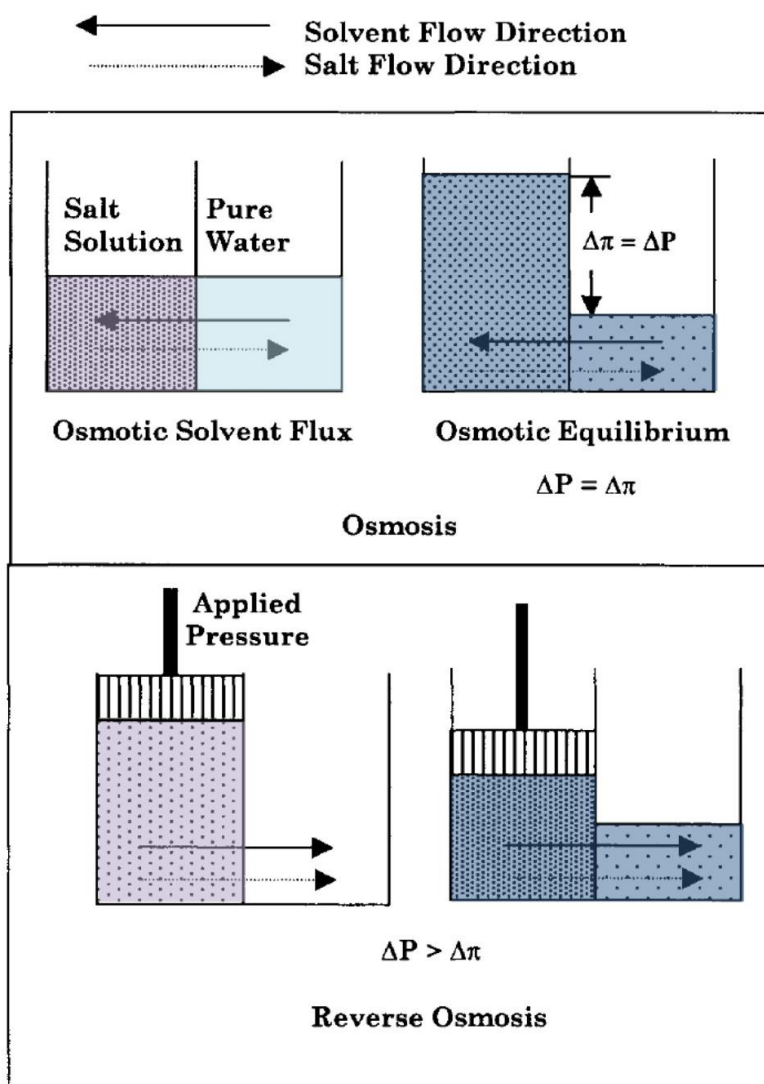
$$\Delta\pi = 1.19 \cdot (T + 273) \cdot \sum m_i$$

$\Delta\pi$: Οσμωτική πίεση

T: θερμοκρασία, °C

$\sum m_i$: άθροισμα των συγκεντρώσεων των διαλυμένων στερεών

Προσεγγιστικά, για την εκτίμηση της οσμωτικής πίεσης, ως προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο κανόνας ότι 1,000 ppm TDS αντιστοιχούν περίπου σε 0.76 bar οσμωτικής πίεσης. Το ακόλουθο σχήμα αναπαριστά τη διεργασία της Αντίστροφης Όσμωσης.



Πηγή: (El-Dessouky & Ettouney, 2002)

Σχήμα 4-6: Φαινόμενο Όσμωσης και Αντίστροφης Όσμωσης

Πίνακας 4-1: Οσμωτική πίεση για διάφορες τιμές αλατότητας

Αλατότητα (mg/l)	Μοριακότητα (mol/l)	$\Delta \pi$ @ T=25°C (atm)
5,000 (υφάλμυρο νερό)	0.086	4
10,000	0.172	8
35,000 (θαλασσινό νερό)	0.603	29
50,000	0.862	42
70,000 (άλμη)	1.207	59

Για την αποτύπωση της δομής του συστήματος RO, πρέπει να προσδιορίζονται οι ακόλουθες παράμετροι:

(α) Αριθμός σταδίων:

- RO ενός σταδίου,
- RO πολλαπλών σταδίων, είναι ιδιαίτερα σύνηθες σύστημα για την αφαλάτωση υφάλμυρου νερού

(β) Αριθμός περάσματος (Ράπτης, 2012) (Tzen E. , 2009c):

- Απλό (ή μονό) πέρασμα (single-pass),
- Διπλό πέρασμα σύστημα αφαλάτωσης, χρησιμοποιείται στις εφαρμογές όπου απαιτείται νερό πολύ υψηλών προδιαγραφών (απιονισμένο) όπως για παράδειγμα στην τροφοδοσία ατμολεβήτων και στη φαρμακοβιομηχανία

(γ) Τύπος μεμβρανών (βλέπε επίσης Σχήμα 4-7) (Υπουργείο Γεωργίας Αγροτικής Ανάπτυξης και Περιβάλλοντος Κύπρου, 2007):

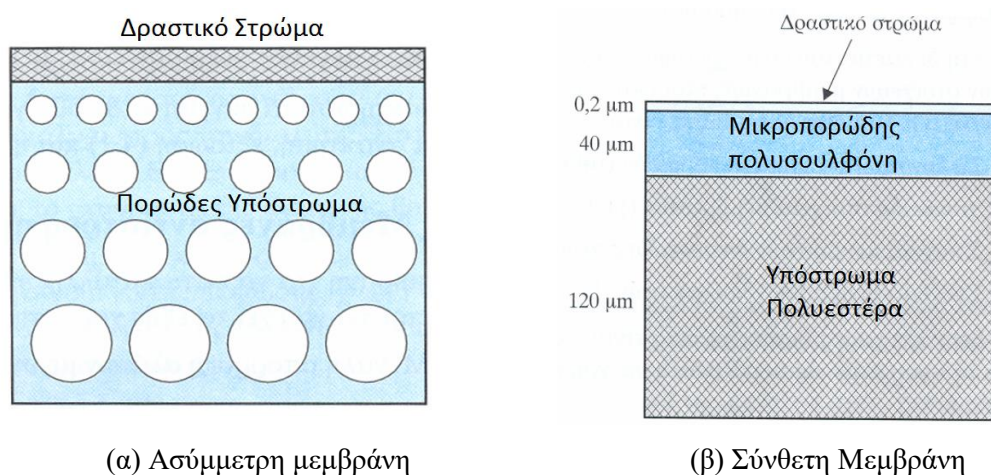
- Ασύμμετρες μεμβράνες (assymetric membranes)⁸.
- Σύνθετες μεμβράνες (composite membranes).

(δ) Διαμορφώσεις των στοιχείων μεμβρανών (βλέπε επίσης Σχήμα 4-8):

- Σωληνοειδή στοιχεία μεμβρανών (tubular module),
- Δισκοειδή στοιχεία μεμβρανών (plate and frame modules)
- Στοιχεία μεμβρανών σπειροειδούς περιέλιξης (spiral wound modules)
- Στοιχεία μεμβρανών κοίλων ινών (hollow fiber modules)

⁸ Οι πρώτες ασύμμετρες μεμβράνες ήταν ασύμμετρες μεμβράνες CA. Σήμερα κατασκευάζονται μεμβράνες απο μείγμα διοξειδίου και τριοξειδίου κυτταρίνης.

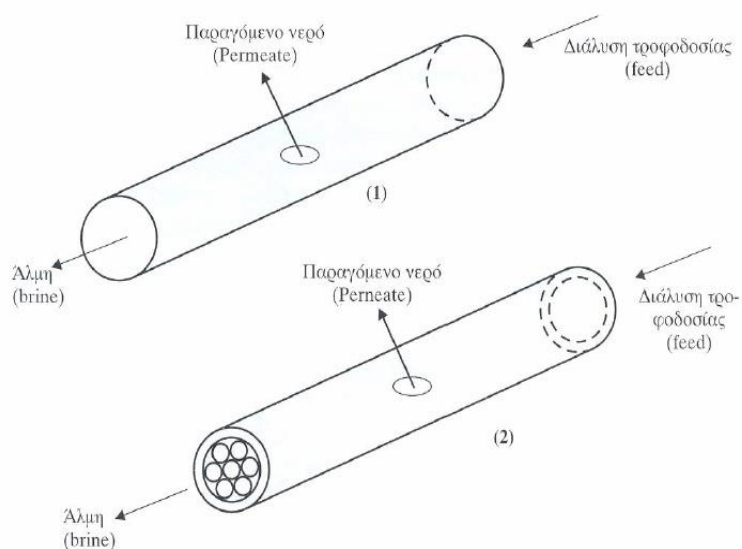
Σχήμα 4-7: Ασύμμετρες και σύνθετες μεμβράνες RO



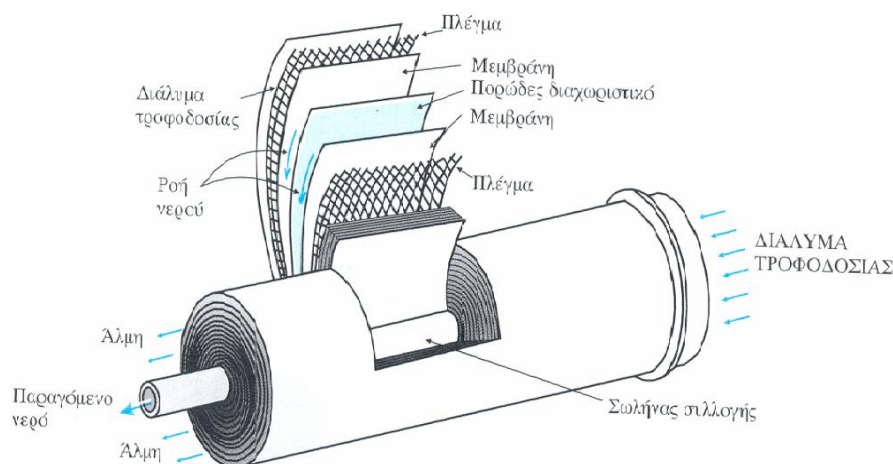
(α) Ασύμμετρη μεμβράνη

(β) Σύνθετη Μεμβράνη

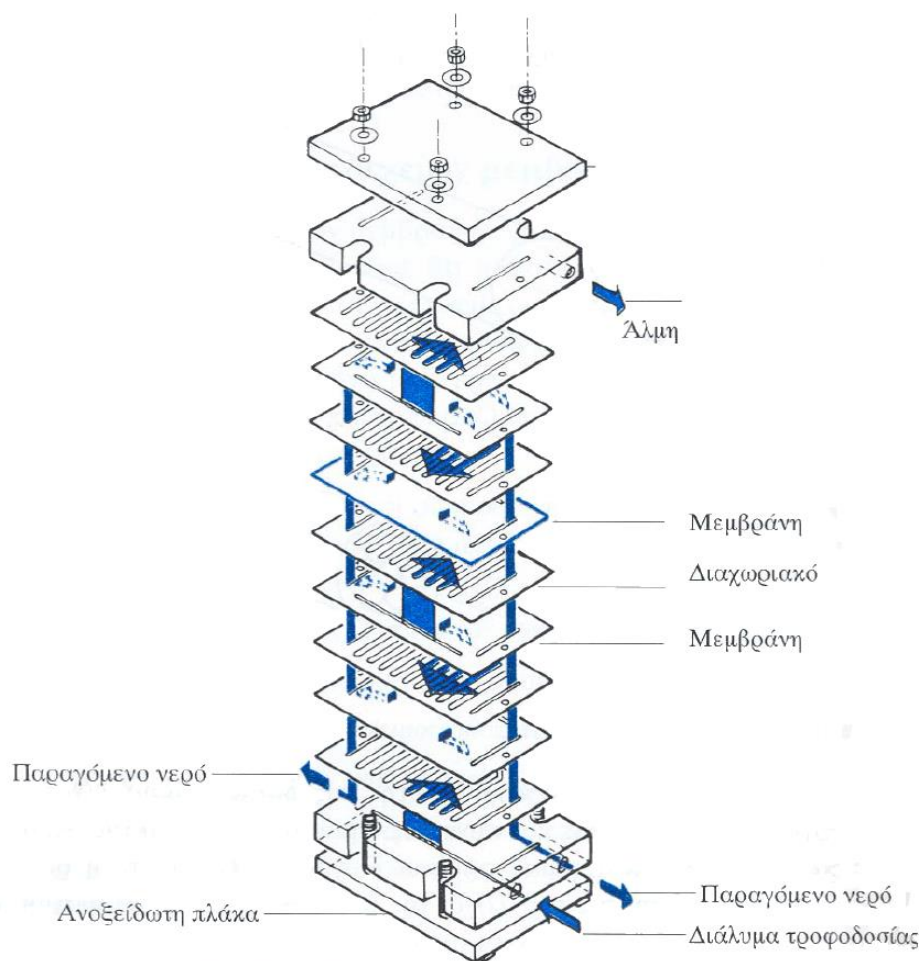
**Σχήμα 4-8: Τύποι διαμορφώσεων στοιχείων μεμβρανών
Σωληνοειδή στοιχεία μεμβρανών**



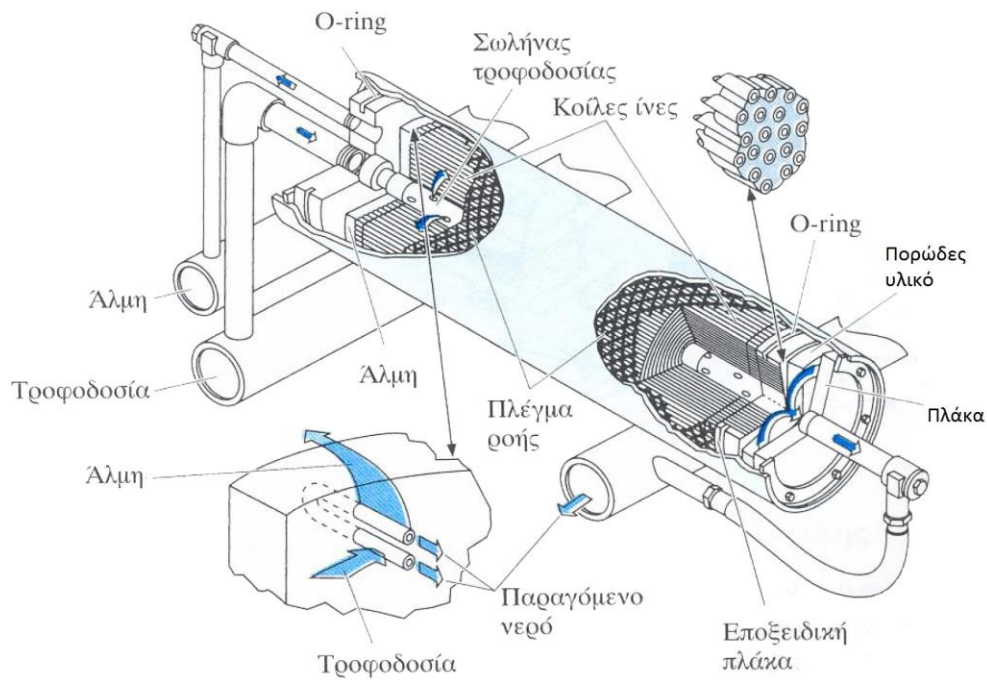
Στοιχεία μεμβρανών σπειροειδούς περιέλιξης



Δισκοειδή στοιχεία Μεμβρανών



Στοιχεία μεμβρανών κοίλων ινών



Πίεση:

- 10-15 bar Υφάλμυρο νερό
- 55-80 bar Θαλασσινό νερό

Προ-επεξεργασία

Η RO είναι μία ώριμη τεχνολογία η οποία χρησιμοποιεί ημι-περατές μεμβράνες και υψηλή πίεση για την απομάκρυνση των αλάτων από αλατούχα νερά. Απαιτεί διάφορα στάδια προ-επεξεργασίας, όπως διήθηση για την απομάκρυνση μεγάλων σωματιδίων και των αιωρούμενων στερεών τα οποία μπορούν να προκαλέσουν φθορά στις πολυμερικές μεμβράνες και χημικά πρόσθετα για την αποφυγή επικαθίσεων ή βιολογικής ανάπτυξης στις μεμβράνες. Ο σχεδιασμός του συστήματος προ-επεξεργασίας είναι μοναδικός για την κάθε εφαρμογή, ανάλογα με τη σύσταση του νερού τροφοδοσίας και τη θερμοκρασία.

Οι μεμβράνες RO είναι ευάλωτες στις αλλαγές του pH, στα οξειδωτικά, στις οργανικές ενώσεις, στα άλατα, στα βακτήρια και στις επικαθίσεις. Για το λόγο αυτό, απαιτείται προ-επεξεργασία του νερού τροφοδοσίας. Πρόσφατα, η μικρο-, υπερ- και νανο-διήθηση προτείνονται σαν εναλλακτικές της χημικής προ-επεξεργασίας με στόχο την αποφυγή επιμόλυνσης του νερού επεξεργασίας με χημικά πρόσθετα (AQUA-CSP, 2007).

Η προ-επεξεργασία του νερού τροφοδοσίας μπορεί να περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα από τα επόμενα στάδια επεξεργασίας (Alvarado-Revilla, et al., 2015):

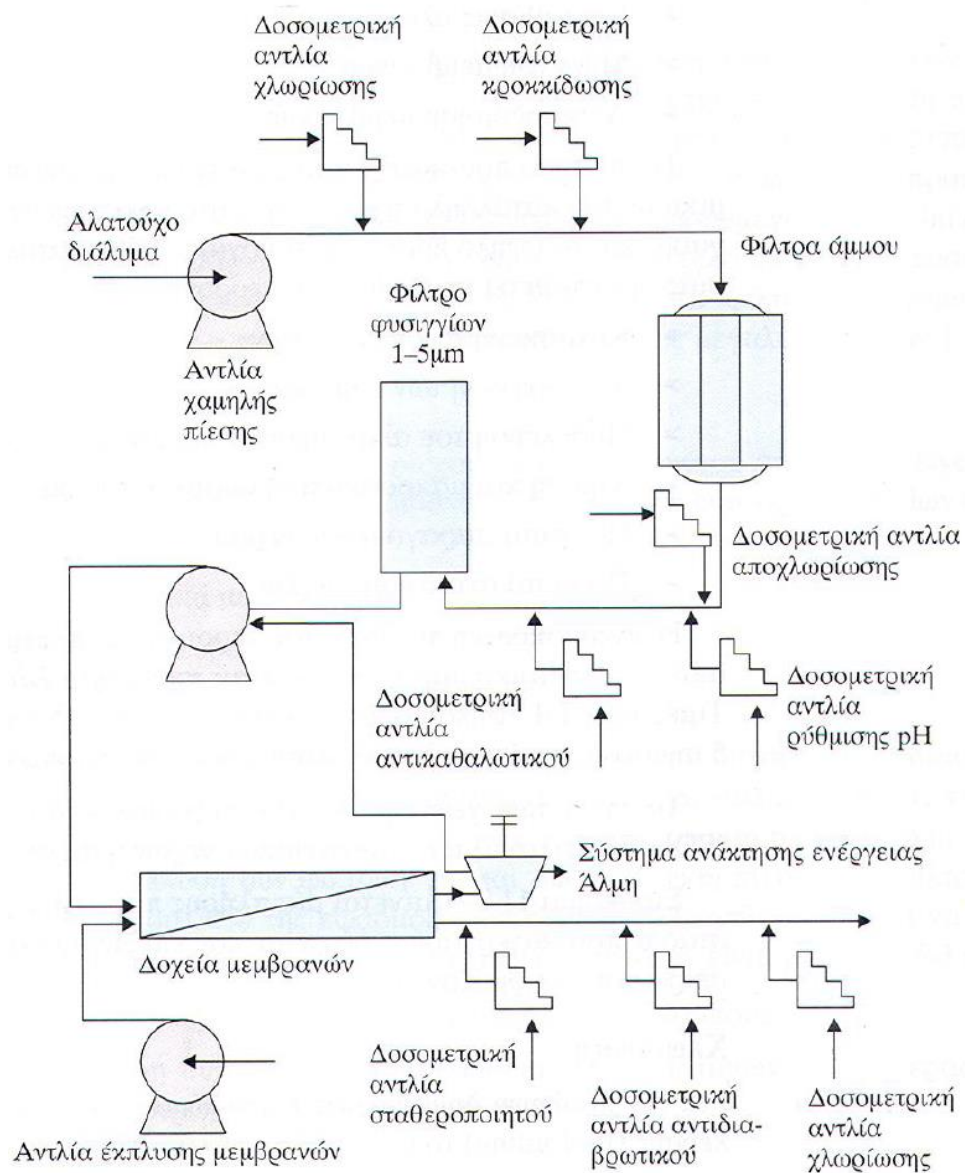
- Εσχάρωση/διαλογή (screening)
- Κροκίδωση (Coagulation): Συγκράτηση αιωρούμενων στερεών
- Συσσωμάτωση (Flocculation)
- Αποσκλήρυνση (Lime Softening)
- Καθίζηση (sedimentation)
- Επίπλευση Διαλυμένου Αέρα (Dissolved Air Flotation, DAF)
- Πολυστρωμικά φίλτρα (Media Filtration): Συγκράτηση αιωρούμενων στερεών
- Προ-επενδεδυμένα Φίλτρα (Pre-coat filtration)
- Μικρο-, υπερ-διήθηση

- Ενεργός Άνθρακας (Activated Carbon)
- Φίλτρα φυσιγγίου (cartridge filtration): Συγκράτηση αιωρούμενων στερεών
- Αντικαθαλατωτικά (Antiscalants): χρησιμοποιείται για την αποφυγή επικάλυψης αλάτων
- Ρύθμιση pH (pH adjustment): χρησιμοποιείται κυρίως για την αποφυγή επικάλυψης αλάτων
- Απολύμανση (Disinfection)
- Χλωρίωση: χρησιμοποιείται για την αποφυγή δημιουργίας επιστρωμάτων μόλυνσης, οργανικής κυρίως προέλευσης
- Αποχλωρίωση: Χρήση χημικών αναγωγικών μέσων με στόχο την απομάκρυνση του χλωρίου, το οποίο είναι καταστροφικό για τις μεμβράνες. Χρησιμοποιούνται φίλτρα ενεργού άνθρακα, τα οποία κατακρατούν επίσης την οργανική ύλη

Η κάθε μονάδα RO αποτελείται από τρία βασικά μέρη: (α) Το σύστημα προεπεξεργασίας, (β) Το κυρίως σύστημα αφαλάτωσης και (γ) Το σύστημα μεταεπεξεργασίας.

Το κυρίως σύστημα αφαλάτωσης αποτελείται, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-9 από τα ακόλουθα τμήματα:

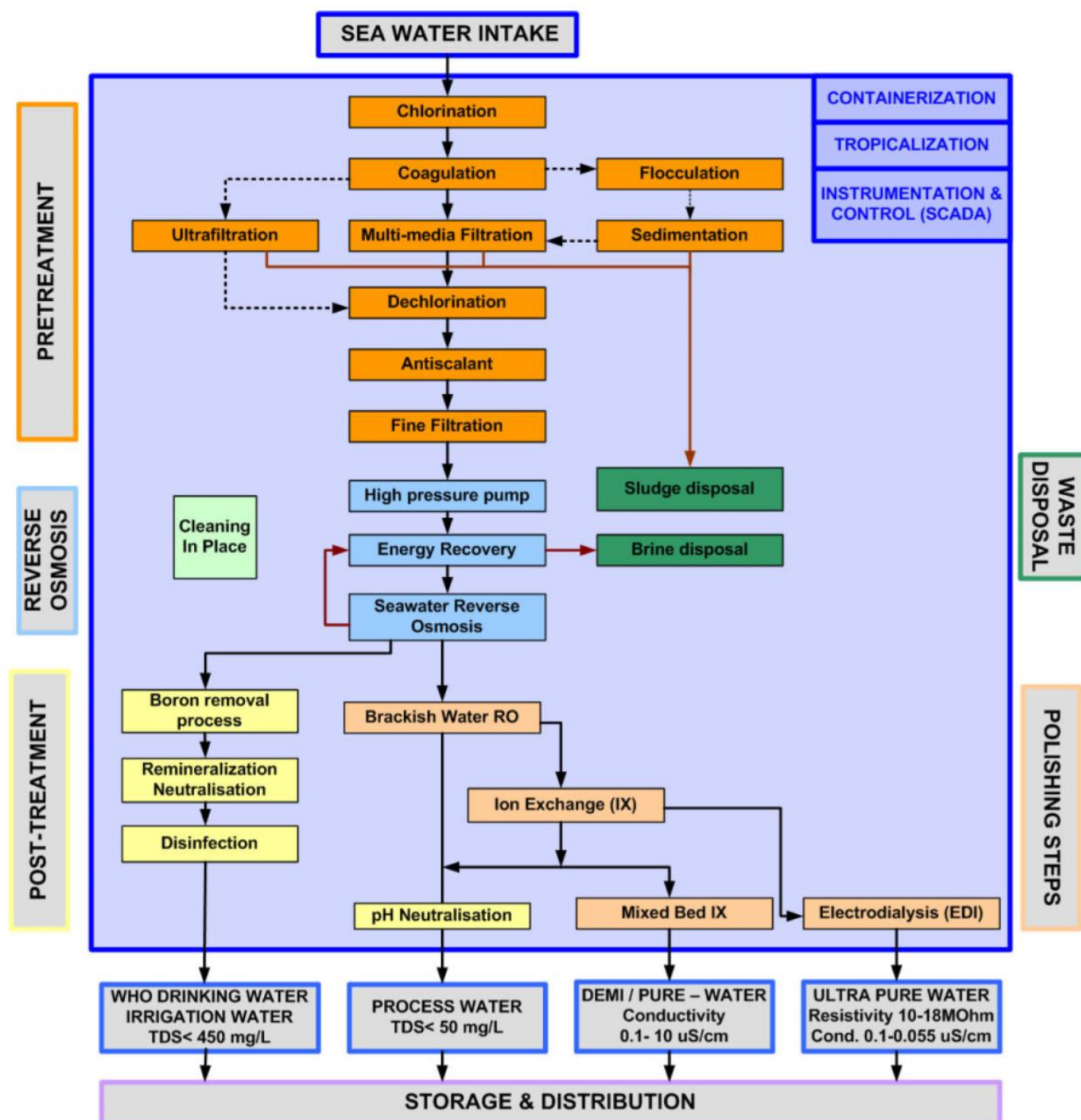
- (α) Αντλία χαμηλής πίεσης ή τροφοδοσίας
- (β) Αντλία υψηλής πίεσης
- (γ) Στοιχεία Αντίστροφης Οσμωσης



Πηγή: (Ράπτης, 2012)

Σχήμα 4-9: Σχηματική αναπαράσταση συστήματος RO

Ακολούθως δίνεται διάγραμμα ροής περιλαμβάνοντας τα στάδια προ-επεξεργασίας και μετ-επεξεργασίας της Αντίστροφης Όσμωσης.



Πηγή: (SOL-BRINE, Report on the evaluation of desalination systems driven by renewable energy sources: focus on solar energy systems used in different desalination applications, 2012)

Σχήμα 4-10: Προ-επεξεργασία, Αντίστροφη Όσμωση και Μετ-επεξεργασία

Ενεργειακές απαιτήσεις

Η ελάχιστη ενεργειακή κατανάλωση για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού εκτιμάται στα 0.78 kWh/m³ (Choon Ng, Thu, Kim, Chakraborty, & Amy, 2013) (UNESCO Centre for Membrane Science and Technology, 2008).

Η αύξηση της πίεσης του νερού τροφοδοσίας αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό της ενεργειακής κατανάλωσης. Δεδομένου ότι η οσμωτική πίεση και κατ'επέκταση η πίεση που απαιτείται για την αφαλάτωση, είναι ευθέως εξαρτώμενη από την περιεκτικότητα σε άλατα, η μέθοδος RO είναι ιδιαίτερα αποδοτική για την αφαλάτωση του υφάλμυρου νερού. Η πίεση λειτουργίας για υφάλμυρο νερό είναι στο εύρος 10-15 bar ενώ για το θαλασσινό νερό γύρω στα 50-80bar (οσμωτική πίεση θαλασσινού νερού με περιεκτικότητα 35g/kg είναι περίπου στα 25 bar) (AQUA-CSP, 2007).

- Θερμικές απαιτήσεις: Μηδενικές απαιτήσεις
- Ηλεκτρική κατανάλωση (Alvarado-Revilla, et al., 2015):
 - 1-3 kWh/m³ (υφάλμυρο νερό)
 - 3-4.5 kWh/m³ (θαλασσινό νερό)

Προδιαγραφές παραγόμενου νερού

- Συντελεστής ανάκτησης: 35-80% (SOL-BRINE, Report on the evaluation of desalination systems driven by renewable energy sources: focus on solar energy systems used in different desalination applications, 2012)
- Ποιότητα παραγόμενου νερού: Πόσιμο

Η μετεπεξεργασία του παραγόμενου νερού περιλαμβάνει απομάκρυνση διαλυμένων αερίων (CO₂) και σταθεροποίηση του pH με προσθήκη αλάτων Ca και Na, καθώς και απομάκρυνση επικίνδυνων ουσιών από το ρεύμα της άλμης (AQUA-CSP, 2007).

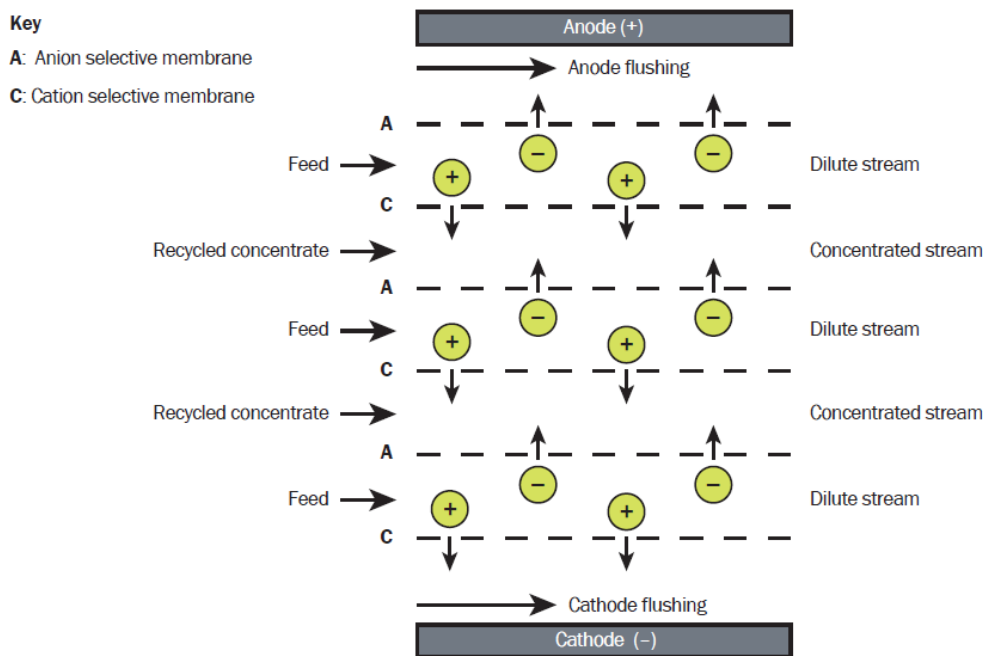
4.1.2.2 Ηλεκτροδιάλυση

Αρχή

Λειτουργίας

Η ηλεκτροδιάλυση ή ηλεκτροδιαπήδηση (Electrodialysis, *ED*) αποτελεί μία μέθοδο αφαλάτωσης, η λειτουργία της οποίας βασίζεται στη διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού. Αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κυττάρων, τα οποία περιέχονται σε ανιονικές και κατιονικές μεμβράνες. Οι μεμβράνες αυτές χωροθετούνται μεταξύ μία ανόδου και μίας καθόδου. Υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, τα ιόντα που περιέχονται στο νερό επεξεργασίας, μετακινούνται ανάλογα με το φορτίο τους είτε προς την άνοδο (αν είναι αρνητικά φορτισμένα, ανιόντα) είτε προς την κάθοδο (αν είναι θετικά φορτισμένα, κατιόντα) (Kim, 2011). Οι μεμβράνες αυτές δεν επιτρέπουν τη διέλευση των μορίων του νερού. Έτσι, η απομάκρυνση των αλάτων πραγματοποιείται από την κίνηση των ιόντων, χωρίς την κίνηση των μορίων του νερού (σε αντίθεση με τη μέθοδο RO), διαμέσου των μεμβρανών (Subramani & Jacangelo, 2014).

Δεδομένου ότι οι μεμβράνες είναι διαπερατές μόνο από κατιόντα ή από ανιόντα, το νερό στα κύτταρα μεταξύ των μεμβρανών εμπλουτίζεται είτε με ανιόντα είτε με κατιόντα. Οι κατιονικές μεμβράνες επιτρέπουν τη διέλευση μόνο των κατιόντων, ενώ αντίστοιχα οι ανιονικές μόνο των ανιόντων (Kim, 2011).



Πηγή: (Allen, και συν., 2015)

Σχήμα 4-11: Κελί ηλεκτροδιάλυσης

Λειτουργικά
χαρακτηριστικά

Η διεργασία ED χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια και συγκεκριμένα απαιτείται ανόρθωση του ρεύματος (μετατροπή από εναλλασσόμενο σε συνεχές ρεύμα).

Οι μεμβράνες των μονάδων ED μπορούν να αστοχήσουν, αν δεν ληφθούν κατάλληλα μέτρα προ-επεξεργασίας του νερού τροφοδοσίας. Για παράδειγμα, ο Subramani (2014) αναφέρει ότι αντιδράστήρας Pellet έχει χρησιμοποιηθεί ως στάδιο προ-επεξεργασίας αυξάνοντας σημαντικά την επίδοση του ED. Χωρίς τη χρήση του αντιδραστήρα, η μονάδα ED παρουσιάζει σημαντικές δυσλειτουργίες (έφτανε στο σημείο μέγιστης τάσης) μέσα σε χρονικό διάστημα 80 λεπτών. Κατά τη λειτουργία, απαιτείται περιοδικός τοπικός καθαρισμός (Clean-In-Place, *CIP*) των μεμβρανών.

Μία σημαντική διαφοροποίηση με την μέθοδο RO, είναι ότι η ED δύναται να επεξεργαστεί νερό με υψηλότερο ποσοστό αιωρούμενων σωματιδίων. Η διαφοροποίηση αυτή έγκειται στο γεγονός ότι κατά τη μέθοδο ED δεν διέρχεται το νερό διαμέσου των μεμβρανών (SOL-BRINE, 2012).

Ταξινόμηση

Η ηλεκτροδιάλυση διακρίνεται στις ακόλουθες υπο-κατηγορίες:

- Ανάστροφη Ηλεκτροδιάλυση
- Ηλεκτροδιάλυση Μετάθεση
- Ηλεκτροαπιονισμός

Ανάστροφη Ηλεκτροδιάλυση

Μία εναλλακτική μέθοδος αναπτύχθηκε για την αντιμετώπιση του προβλήματος αστοχίας. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται Ανάστροφη Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis Reversal, *EDR*). Κατά τη μέθοδο αυτή, η πολικότητα των μεμβρανών αντιστρέφεται 3-4 φορές την ώρα (Subramani & Jacangelo, 2014). Έτσι, τα κανάλια που περιέχουν καθαρό νερό και συμπυκνωμένη άλμη αντιστρέφονται, ενώ οι επικαθίσεις στις ανιονικές και κατιονικές μεμβράνες σπάζουν και απομακρύνονται (SOL-BRINE, Report on the evaluation of desalination systems driven by renewable energy sources: focus on solar energy systems used in different desalination applications, 2012).

Ηλεκτροδιάλυση Μετάθεση (Electrodialysis Metathesis, EDM)

Αποτελεί μία αναδυόμενη, αναπτυσσόμενη τεχνική. Είναι και αυτό παραλλαγή της Ηλεκτροδιάλυσης (βλ. επίσης Case study 3).

Ηλεκτροαπιονισμός

Ο Ηλεκτροαπιονισμός (Electrodeionization, *EDI*) είναι μία ηλεκτροχημική διεργασία απομάκρυνσης ιόντων. Αποτελεί μία παραλλαγή της ED και εφαρμόζει ρητίνες ιοντοεναλλαγής ενσωματωμένες σε στήλες μεμβρανών. Καλείται επίσης και (α)

Συνεχής Ηλεκτροαπιονισμός (Continuous Electrodeionization, CEDI), για να διαχωριστεί από τον χωρητικό απιονισμό (Capacitive Deionization) που είναι μία παρεμφερής διακοπόμενη διεργασία, και (β) Ηλεκτροδιάλυση πληρωμένης κυψέλης (Filled-cell Electrodialysis), τονίζοντας την ομοιότητα του με τη μέθοδο της ηλεκτροδιάλυσης καθώς επίσης και την υπεροχή του αναφορικά με το μειονέκτημα της ED λόγω του φαινομένου της πόλωσης συγκέντρωσης.

Το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο, ιονίζει κάποια από τα μόρια του νερού σε κατιόντα υδρογόνου (H^+) και σε υδροξύλια (OH^-), τα οποία χρησιμοποιούνται για την αναγέννηση των ρητινών ιοντοεναλλαγής, εξαλείφοντας την ανάγκη χρήση χημικών πρόσθετων και κατ'επέκταση το κόστος για τη διάθεσή τους. Το ηλεκτρικό δυναμικό, επίσης, βοηθάει στην εξάλειψη και πρόληψη αστοχίας λόγω μικροβιακής ανάπτυξης.

Για παράδειγμα, στη φαρμακευτική βιομηχανία, η EDI παράγει υπερκάθαρο νερό, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως νερό τροφοδοσίας στις μονάδες απόσταξης και στην παραγωγή ενέσιμου νερού (water for injection, WFI). Χρησιμοποιείται συνήθως και ως μετ-επεξεργασία, π.χ. μετά από δεύτερο πέρασμα RO, με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας του νερού. Η μέθοδος αυτή γίνεται ολοένα πιο δημοφιλής ως εναλλακτική της ιοντοεναλλαγής για την παραγωγή υψηλής ποιότητας βιομηχανικού νερού και για την μετ-επεξεργασία του συμπυκνώματος (Alvarado-Revilla, et al., 2015).

Εφαρμογές

Η ED χρησιμοποιείται για την αφαλάτωση επιφανειακού και υφάλμυρου νερού από τη δεκαετία του '50. Σε αντιστοιχία με την Αντίστροφη Όσμωση, η ενέργεια που απαιτείται για το διαχωρισμό των ιόντων από το νερό τροφοδοσίας αυξάνει με την αύξησή της συγκέντρωσης σε Ολικά Διαλυμένα Στερεά. Έτσι, η ED γενικά περιορίζεται κυρίως σε εφαρμογές αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού (SOL-BRINE, 2012). Για λόγους κόστους, αναφέρεται ότι η Ηλεκτροδιάλυση είναι σχετικά οικονομική για TDS μικρότερο από 3,000 mg/L (Subramani & Jacangelo, 2014). Ωστόσο, στη βιβλιογραφία αναφέρονται εφαρμογές επίσης για την επεξεργασία της άλμης. Οι Karngold et al. (2009) αναφέρουν τη χρήση της τεχνικής EDR για αύξηση του λόγου συγκέντρωσης από το 1.5% στο 10%. Η ηλεκτρική κατανάλωση μετρήθηκε ίση με 7-8 kWh/m³. Η τεχνική αυτή έχει διερευνηθεί για την σκοπιμότητα και επίδοση της για τις ακόλουθες εφαρμογές:

- αφαλάτωση υφάλμυρου νερού (Kim, 2011)

- την επεξεργασία υγρών αποβλήτων (Kim, 2011)
- την παραγωγή άλατος (Kim, 2011). Στην Ιαπωνία έχει χρησιμοποιηθεί η τεχνική αυτή για τη συνδυασμένη παραγωγή νερού και βρώσιμου αλατιού, εδώ και 40 χρόνια. Η κλίμακα της εφαρμογής είναι βιομηχανική (Davis, Zero Discharge Seawater Desalination: Integrating the Production of Freshwater, Salt, Magnesium, and Bromine, 2006). Η παραγωγή άλατος έχει βρει εφαρμογή μόνο στην Ιαπωνία και στο Κουβέιτ, αν και φαίνεται πως έχουν επιδοτηθεί σημαντικά οι εφαρμογές αυτές προκειμένου να καταστούν βιώσιμες (Fidaleo & Moresi, 2006)
- Παραγωγή οξέων, βάσεων και υποχλωριώδες νάτριο (Badruzzaman, Oppenheimer, Adham, & Kumar, 2009)
- Άλλες εφαρμογές: Βιομηχανία γάλακτος, Βιομηχανία Ποτών και Χυμών, Βιομηχανία Ζάχαρης (Fidaleo & Moresi, 2006)
- την ανάκτηση οργανικών οξέων από αλατούχα υγρά απόβλητα (Kim, 2011)
- Η μέθοδος αυτή μπορεί να μειώσει τη συγκέντρωση ιόντων ασβεστίου και θεικών, για την αποφυγή δημιουργίας γύψου κατά την εξάτμιση του νερού σε επόμενο στάδιο (Kim, 2011)

Προκλήσεις

(α) **Αστοχία Μεμβρανών:** Κατά τη λειτουργία μονάδων ED, αστοχία των μεμβρανών μπορεί να παρατηρηθεί λόγω παρουσίας κολλοειδών, οργανικών ή/και βιολογικής ανάπτυξης. Τα προβλήματα αυτά αποτελούν πρόκληση για την περαιτέρω χρήση της ED σε ευρεία εφαρμογή (Kim, 2011). Οι μεμβράνες είναι ιδιαίτερα ευάλωτες σε οργανικό ρυπαντικό φορτίο (Subramani & Jacangelo, 2014)

(β) **Κόστος:** Για την παραγωγή άλατος, η ηλεκτροδιάλυση αναφέρεται ως μία σχετικά ακριβή μέθοδος συγκριτικά με τη Νανοδιήθηση, Εξάτμιση και την Ιοντοεναλλαγή (Kim, 2011).

(γ) **Ενέργεια:** Το κόστος της ενέργειας αυξάνει με την αύξηση σε TDS του νερού επεξεργασίας (Subramani & Jacangelo, 2014). Οι Kwak, Guan, Peng, & Han (2013) διατύπωσαν προτάσεις για τις συνθήκες λειτουργίας (τάση) μονάδων ηλεκτροδιάλυσης προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η απόδοση της διεργασίας.

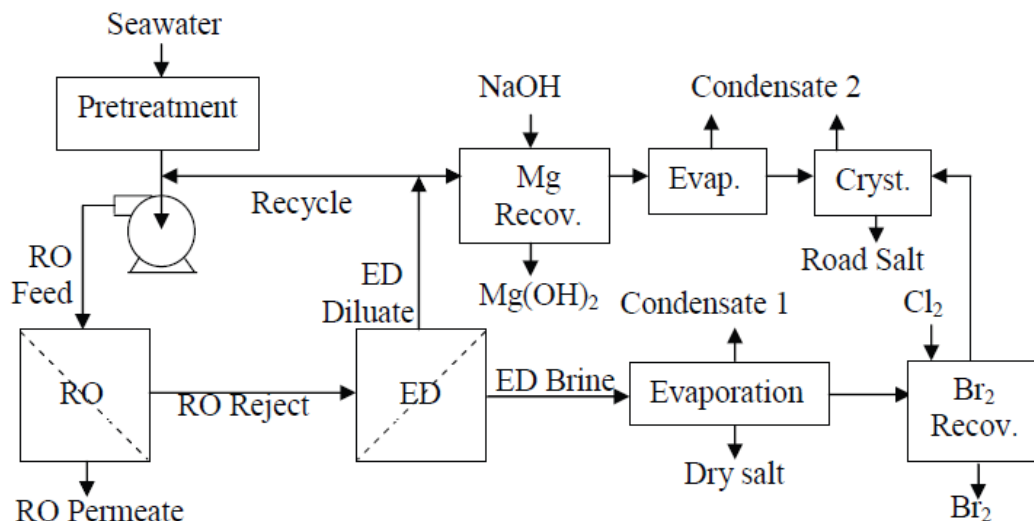
Ακολουθώς παρουσιάζεται μία μελέτη περίπτωσης αναφορικά με την Ηλεκτροδιάλυση Μετάθεσης.

Case study 3: Zero Discharge Desalination, εφαρμογή Ηλεκτροδιάλυσης / Ηλεκτροδιάλυσης Μετάθεσης (EDM), ΗΠΑ

Μελέτη Περίπτωσης: 3			Εργαστηριακή κλίμακα	☒ NAI	☐ OXI
	Χώρα:	ΗΠΑ	Πιλοτικό σύστημα	☐ NAI	☐ OXI
	Πολιτεία:	Νότια Καρολίνα	Εφαρμογή	☐ NAI	☐ OXI
Εφαρμοζόμενη τεχνική Ηλεκτροδιάλυση μετάθεση		Ποιότητα αλατιού	☒ Βρώσιμο	☒ Χημική Βιομηχανία	
			☒ Εκχιονιστικό	☐ Άλλη χρήση	
		Ποιότητα νερού	☐ Πόσιμο	☐ Βιομηχανία	
			☐ Απιονισμένο	☐ Άλλη χρήση	
Έτος 2006		Ιδιοκτησία Τεχνογνωσίας Πανεπιστήμιο Νότιας Καρολίνας			
Περιγραφή: Τεχνολογία "Zero Discharge Desalination" (Αφαλάτωση Μηδενικής Απόρριψης) Η τεχνολογία αυτή στοχεύει στην απομάκρυνση δυσδιάλυτων αλάτων όπως το θειικό ασβέστιο από το ρεύμα επεξεργασίας. Έχει αναπτυχθεί σε εργαστηριακή κλίμακα μόνο το κομμάτι της προεπεξεργασίας. Το κομμάτι αυτό περιλαμβάνει μία μονάδα αντίστροφης όσμωσης και μία μονάδα ηλεκτροδιάλυσης.					
 					
Πηγές: (Davis, 2006) (Seigworth, Ludlum, & Reahl, 1995)					

Τεχνική Περιγραφή

Στο ακόλουθο σχήμα δίνεται το διάγραμμα ροής της τεχνικής Zero Discharge Desalination (ZDD).



Πηγή: (Davis, 2006)

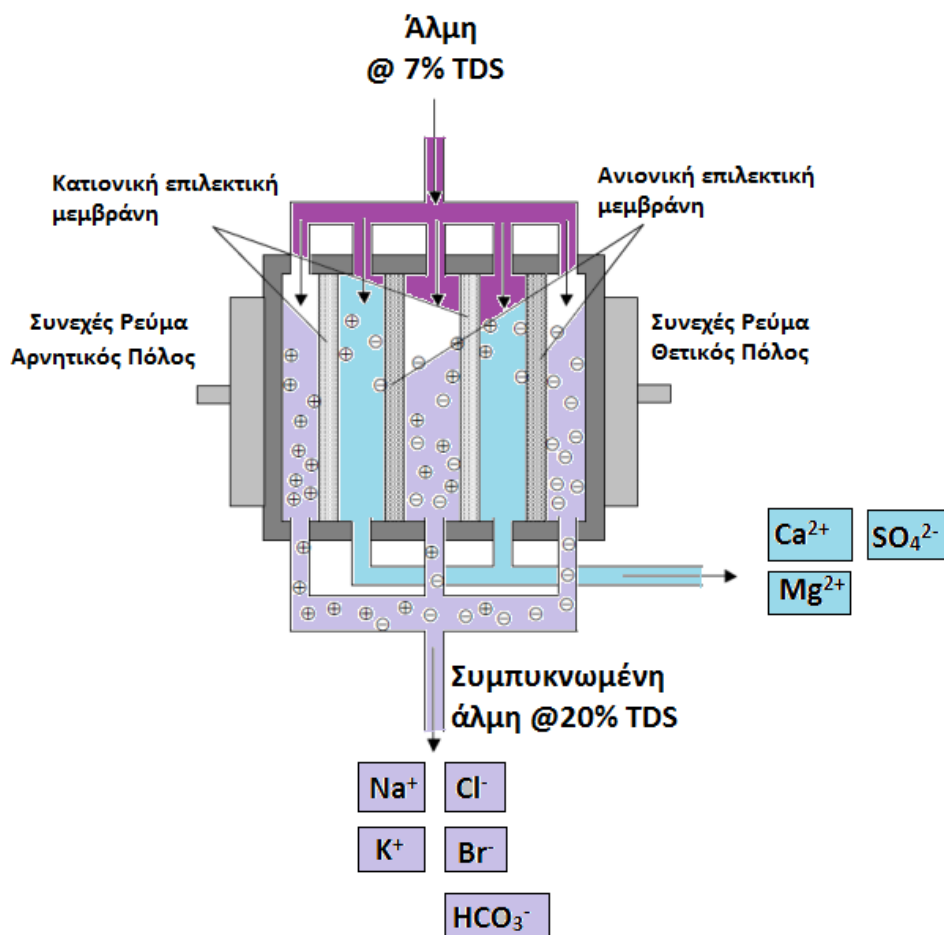
Σχήμα 4-12: Διάγραμμα ροής συστήματος Zero Discharge Desalination

Μονάδα αφαλάτωσης: Χρησιμοποιήθηκε μονάδα RO εργαστηριακής κλίμακας, με συνολική δυναμικότητα ~378 λίτρα/ημέρα. Ο τύπος των μεμβρανών που χρησιμοποιήθηκαν είναι Filmtec SW30-2514. Για την αύξηση της πίεσης, χρησιμοποιήθηκε αντλία θετικής εκτόπισης της εταιρείας CAT, με παροχή 1.9 λίτρα/λεπτό. Η αντλία αναρροφούσε από δεξαμενή πολυαιθυλενίου, χωρητικότητας 113.5 λίτρα.

Η παραγόμενη άλμη διοχετεύεται μέσω βαλβίδας αντίθλιψης και οδηγούταν πίσω στη δεξαμενή. Σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας, το παραγόμενο νερό επέστρεφε στη δεξαμενή, ενώ σε περίπτωση που ήταν επιθυμητή η αύξηση της συγκέντρωσης συλλεγόταν και απομακρυνόταν.

Προκειμένου να αποφευχθεί ανεπιθύμητη συσσώρευση ενέργειας στη δεξαμενή, χρησιμοποιούταν εναλλάκτης θερμότητας ψύξης. Αν και ήταν δυνατή η ταυτόχρονη λειτουργία της αντίστροφης όσμωσης και της ηλεκτροδιάλυσης, κάτι τέτοιο δεν ήταν επιθυμητό, μιας και δημιουργούσε προβλήματα συσσώρευσης θερμότητας στη δεξαμενή τροφοδοσίας. Αυτό συνέβαινε ακόμα και σε περίπτωση χρήσης του εναλλάκτη ψύξης.

Στάδιο προ-συμπύκνωσης: Η εν λόγω τεχνολογία χρησιμοποιεί την Ηλεκτροδιάλυση προκειμένου να απομακρύνει από το ρεύμα της άλμης τα μονοσθενή άλατα (κυρίως χλωριούχο νάτριο, NaCl , και βρωμιούχο κάλιο KBr). Επίσης, αυξάνει τη συγκέντρωση του ρεύματος εξόδου κατά τρεις φορές και το συμπυκνωμένο ρεύμα οδηγείται πλέον στον εξατμιστήρα.



Σχήμα 4-13: Σχηματική απεικόνιση δράσης ηλεκτροδιάλυσης, ZDD case study

Η στήλη της ηλεκτροδιάλυσης περιέχει ειδικές μεμβράνες ιοντοεναλλαγής, οι οποίες είναι επιλεκτικές στη μεταφορά μονοσθενών ιόντων. Το κάθε κελί αποτελείται από τέσσερις μεμβράνες ιοντοεναλλαγής: (α) Μία ανιονική μεμβράνη ιοντοεναλλαγής (A), (β) μία κατιονική μεμβράνη ιοντοεναλλαγής, (γ) μία μονοσθενή, επιλεκτική, ανιονική μεμβράνη (SA), και (δ) μία μονοσθενή, επιλεκτική, κατιονική μεμβράνη (SC), σε διάταξη από την κάθοδο στην άνοδο, όπως απεικονίζεται και στο παραπάνω διάγραμμα⁹.

⁹ Patent No: EP2070583 B1 <https://www.google.com/patents/EP2070583B1>

Ο Davis (2006) αναφέρει ότι, από τα αποτελέσματα φάνηκε πως είναι απαραίτητη η εφαρμογή κάποιου τύπου προεπεξεργασίας του θαλασσινού νερού και συγκεκριμένα για την απομάκρυνση του ασβεστίου πριν την επεξεργασία του ρεύματος εισόδου με τη χρήση της τεχνικής της αντίστροφης όσμωσης.

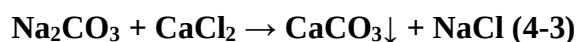
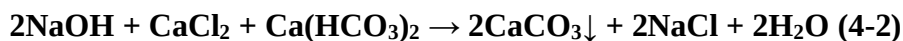
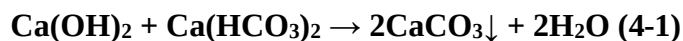
Εξάτμιση: το ρεύμα που εξέρχεται από την μονάδα ηλεκτροδιάλυσης, εισέρχεται σε έναν εξατμιστήρα. Δεδομένης της υψηλής καθαρότητας του σε NaCl, το στερεό άλας που ανακτάται στο τέλος της διεργασίας αποτελεί σχεδόν ένα καθαρό προϊόν, με ελάχιστες προσμίξεις. Ο Davis (2006) ισχυρίζεται ότι με μία απλή κατεργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προϊόν.

Το ρεύμα εξόδου από τον εξατμιστήρα, είναι πλούσιο σε βρώμιο. Οι μεμβράνες ιοντοεναλλαγής που χρησιμοποιούνται στη μονάδα ηλεκτροδιάλυσης έχουν επιλεκτικότητα Br/Cl περίπου ίση με 4/1.

Ανάκτηση Μαγνησίου: Το αραιωμένο διάλυμα που παράγεται από την μονάδα ηλεκτροδιάλυσης οδηγήθηκε για ανάκτηση μαγνησίου. Η επεξεργασία του ρεύματος αυτού περιλαμβάνει σε πρώτο στάδιο την απομάκρυνση του ασβεστίου, ως ακολούθως:

- **Προσθήκη καυστικού νατρίου:** 0.25 mL NaOH 1M. Η προσθήκη του υδροξειδίου του νατρίου αυξάνει το pH από 8.26 σε 9.5.
- **Προσθήκη ανθρακικού νατρίου:** 1 gr Na₂CO₃. Οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση του pH (~9.9) και στη δημιουργία ίζηματος. Το ίζημα ανακτήθηκε με χρήση πορώδους φίλτρου Teflon, διαλύθηκε σε διάλυμα νιτρικού οξέος και αναλύθηκε με στόχο τον προσδιορισμό συγκέντρωσης Mg και Ca.

Από τα αποτελέσματα φάνηκε ότι η προσθήκη ανθρακικού νατρίου μπορούν να οδηγήσουν στην απομάκρυνση του ασβεστίου και έτσι σε ανάκτηση μαγνησίου (Mg(OH)₂) σε επίπεδα καθαρότητας της τάξης του 99%. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ανθρακικό νάτριο και σε υγρή μορφή, χωρίς όμως να διαπιστωθεί καλύτερη καταβύθιση του ανθρακικού ασβεστίου. Οι αντιδράσεις καταβύθισης του ανθρακικού ασβεστίου περιγράφονται στις ακόλουθες εξισώσεις:



Πίνακας 4-2: Ισοζύγιο μάζας, εφαρμογή συστήματος ZDD, Πανεπιστήμιο Νότιας Καρολίνας

Ρεύμα	Παροχή	Ιοντική Συγκέντρωση (millimolar)							
	l/sec	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	Br ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Θάλασσα	196	459	9.72	52.3	9.98	535	0.87	27.6	2.31
Τροφοδοσία RO	260	375	7.86	80.1	3.1	449	0.65	48.7	0.82
Αφαλατωμένο νερό	130	7.13	0.15	0.61	0.023	8.32	0.012	0.090	0.031
Άλμη	130	742	15.57	160	6.1	890	1.30	97.0	1.62
Αραιωμένο διάλυμα ED	107	56	2.19	172	5.7	184	0	113.0	0.85
Ανακύκλωση	54	56	2.19	172	5.7	184	0	113.0	0.85
Έξοδος ανάκτησης Μαγνησίου	54	398	2.19	1	5.3	184	0	113.0	0.4
Άλμη ED	23	3,950	78.1	102.9	8.2	4,190	7.37	25.9	5.2
Συμπύκνωμα Νερού 1	18	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0
Άλμη	3.8	2,000	466	613	49	3,410	43.9	154.3	31.1
Έξοδος Ανάκτηση Βρωμίου	3.8	2,000	466	613	49	3,450	2.2	154.3	31.1
Συμπύκνωμα Νερού 2	57	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0

Προσαρμοσμένο από (Davis, 2006)

Μειονεκτήματα μεθόδου

Η χρήση της μεθόδου απομάκρυνσης του ασβεστίου οδηγεί σε σημαντική μείωση της ανακτημένης ποσότητας μαγνησίου. Αν και η καθαρότητα του προϊόντος είναι υψηλή, ωστόσο σημαντική ποσότητα μαγνησίου καταβυθίζεται μέσω ταυτόχρονης καταβύθισης με το ασβέστιο (περίπου η μισή ποσότητα του μαγνησίου καταβυθίζεται). Η ποσότητα αυτή δεν μπορεί πλέον να ανακτηθεί.

Λόγω της ταυτόχρονης καταβύθισης μαγνησίου και ασβεστίου, απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα χημικών (ανθρακικού νατρίου) και συνεπώς υψηλότερο κόστος. Η ποσότητα ανθρακικού νατρίου που χρησιμοποιείται στην πράξη είναι περίπου δεκαπλάσια της απαιτούμενης στοιχειομετρικής ποσότητας. Επιβαρυντικά προς αυτή την κατεύθυνση λειτουργεί και το γεγονός ότι το ίζημα που προκύπτει (ανθρακικό ασβέστιο και μαγνήσιο) είναι μεγαλύτερο σε όγκο, κάτι το οποίο αυξάνει και τις ανάγκες τελικής διαχείρισης (διάθεσης) του.

Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε σε εργαστηριακή κλίμακα. Αρχικός στόχος ήταν η εφαρμογή της τεχνολογίας για την επεξεργασία υγρού αποβλήτου από μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού. Ωστόσο, δεν βρέθηκε κατάλληλη τοποθεσία για την εφαρμογή της τεχνολογία και έτσι τελικά εφαρμόστηκε για επεξεργασία στραγγισμάτων από άρδευση.

Λειτουργικά Χαρακτηριστικά: Για τη διενέργεια των πειραμάτων, συλλέχθηκε θαλασσινό νερό σε δοχεία 5 γαλονιών (~ 18.9 λίτρα) από τον Ατλαντικό Ωκεανό κοντά στο Χίλτον Χεντ, Νότια Καρολίνα. Τα δοχεία οξινίστηκαν απευθείας μετά τη συλλογή των δειγμάτων και εξουδετερώθηκαν με μεταδιθειώδες νάτριο πριν τη χρήση τους στη δεξαμενή τροφοδοσίας.

Συνθήκες λειτουργίας (μεταβατικό στάδιο RO):

- Αγωγιμότητα νερού τροφοδοσίας: 44 mS/cm (~28,200 ppm ή 2.8%)¹⁰
- Πίεση μονάδας RO: 887 psig (~61 bar)¹¹
- Θερμοκρασία νερού τροφοδοσίας: 21 °C
- Αγωγιμότητα πόσιμου νερού: 0.238 mS/cm (~152ppm)

¹⁰ <http://www.lenntech.com/calculators/conductivity/tds-engels.htm>

¹¹ <http://www.convertunits.com/from/psig/to/bar>

Συνθήκες λειτουργίας (μόνιμη κατάσταση RO):

- Αγωγιμότητα άλμης: 73 mS/cm (~46,700 ppm ή 4.7%)
- Πίεση μονάδας RO: 1,005 psig (~69.3 bar)
- Θερμοκρασία νερού τροφοδοσίας: 22 °C
- Αγωγιμότητα πόσιμου νερού: 0.536 mS/cm (~343ppm)

Το ισοζύγιο μάζας δίνεται στον Πίνακα 4-2, ενώ στον Πίνακα 4-3 δίνεται η οικονομική ανάλυση της εφαρμογής.

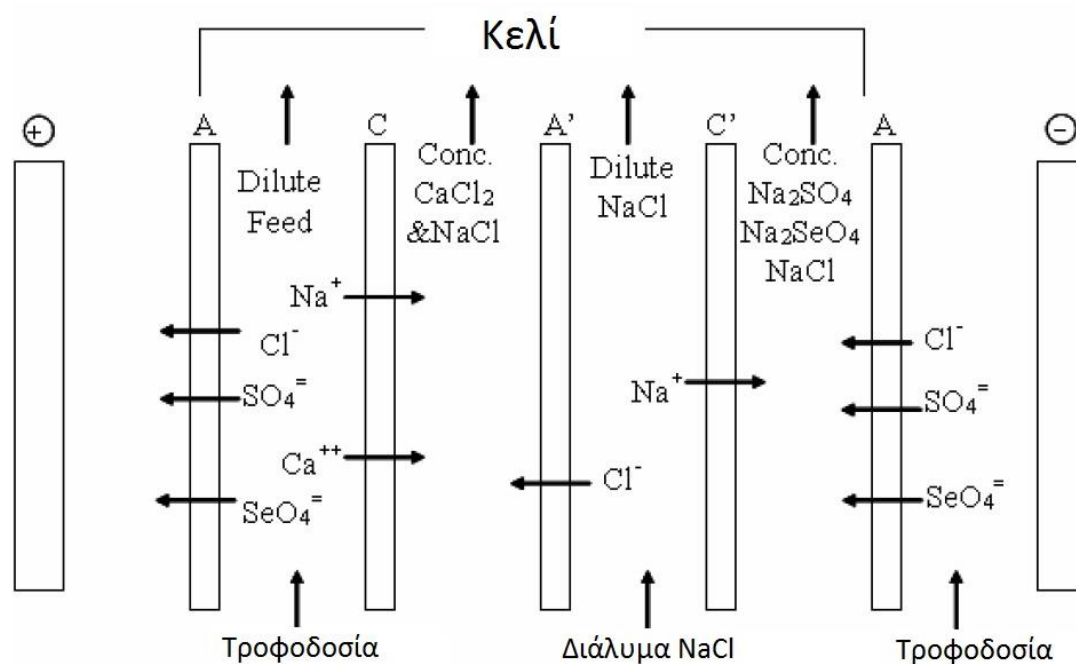
Πίνακας 4-3: Οικονομική ανάλυση συστήματος ZDD

Μονάδα	Ανακτημένο Υλικό	CAPEX (ανηγμένο)	OPEX	Αξία προϊόντων
Προεπεξεργασία		\$65,000	\$853,000	
RO		\$375,000	\$1,351,000	
	Πόσιμο Νερό			\$2,460,000
Ηλεκτροδιάλυση		\$1,640,000	\$3,390,000	
Κρυστ/ρας 1		\$199,000	\$1,617,000	
	NaCl			\$9,159,000
	Πόσιμο Νερό			\$337,000
Ανάκτηση Βρωμίου		\$84,000	\$62,000	
	Βρώμιο			\$383,000
Ανάκτηση Μαγνησίου		\$52,000	\$1,683,000	
	Mg(OH) ₂			\$5,641,000
Εξατμιστήρας		\$484,000	\$2,701,000	
Κρυστ/ρας 2		\$178,000	\$1,616,000	
	Εκχιονιστικό αλάτι			\$1,445,000
	Πόσιμο νερό			1,071,000
Συνολικά		\$3,100,000	\$13,300,000	\$20,500,000
Κέρδος				\$4,100,000

Προσαρμοσμένο από (Davis, 2006)

Ηλεκτροδιάλυση Μετάθεσης

Ο ίδιος ερευνητής προτείνει δύο χρόνια αργότερα, μια παραλλαγή της μεθόδου με χρήση της τεχνικής Ηλεκτροδιάλυσης Μετάθεσης. Σύμφωνα με τον ίδιο, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί πέντε μεμβράνες στην ακόλουθη σειρά: A, C, A', C', A, όταν η άνοδος είναι στα αριστερά (όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-14).



Πηγή: (Davis & Rayman, 2008)

Σχήμα 4-14: Διάταξη μεμβράνης και μεταφορά ιόντων, μέθοδος ηλεκτροδιάλυσης μετάθεσης

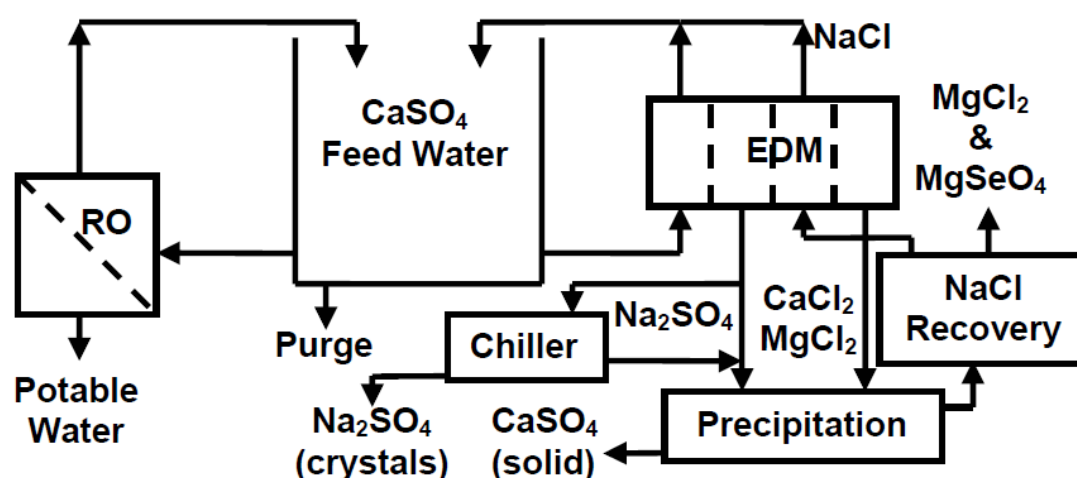
Οι μεμβράνες A' και C' είναι ειδικές (επιλεκτικές) μεμβράνες οι οποίες επιτρέπουν τη διέλευση μονοσθενών ιόντων (αντί δισθενών όπως στις συμβατικές μονάδες ED). Συγκεκριμένα, τα κύρια μονοσθενή ιόντα και η αντίστοιχη διαπερατότητα (relative transport) έχουν ως εξής (Davis & Rayman, 2008):

- Na^+ : 1
- K^+ : 0.8
- Cl^- : 1
- Br^- : 3.8
- HCO_3^- : 0.5

Τα κύρια δισθενή ιόντα και η αντίστοιχη διαπερατότητα (relative transport) έχουν ως εξής (Davis & Rayman, 2008):

- Mg^{2+} : 0.05
- Ca^{2+} : 0.11
- SO_4^{2-} : 0.03

Λόγω της ισχυρής απόρριψης των δισθενών ιόντων, το ρεύμα εξόδου από τη στήλη ηλεκτροδιάλυσης, με ολικά διαλυμένα στερεά στα επίπεδα του 20%, έχει πολύ υψηλότερη καθαρότητα σε NaCl σε σύγκριση από την άλμη εξόδου από την μονάδα αντίστροφης όσμωσης. Ο Davis (2008) προτείνει τη διάταξη που φαίνεται στο Σχήμα 4-15 για την αποφυγή σχηματισμού $CaSO_4$ στη διάταξη της ηλεκτροδιάλυσης.



Πηγή: (Davis & Rayman, 2008)

Σχήμα 4-15: Σχηματική αναπαράσταση διεργασίας ηλεκτροδιάλυσης μετάθεσης, εφαρμογή ZDD, Πανεπιστήμιο της Νότιας Καρολίνα

Συμπεράσματα: Από τα αποτελέσματα των μελετών και περιορισμένων δημοσιευμένων εργαστηριακών ερευνών του Πανεπιστημίου της Νότιας Καρολίνας, φαίνεται ότι η χρήση της ηλεκτροδιάλυσης για την ανάκτηση στερεού άλατος από την άλμη είναι εφικτή. Επίσης, μειώνει πιθανές επιζήμιες συνέπειες από την απόρριψη της άλμης στο θαλάσσιο περιβάλλον. Σύμφωνα με την εργαστηριακή μελέτη (Davis, 2006), η άλμη εξόδου από τη μονάδα ηλεκτροδιάλυσης έχει ολικά διαλυμένα στερεά της τάξεως του 20%, όταν η αντίστοιχη τιμή του ρεύματος εισόδου είναι μόλις της τάξεως του 7%. Συνεπώς, η ηλεκτροδιάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως στάδιο προεπεξεργασίας σε ένα σύστημα Μηδενικών Υγρών Αποβλήτων. Επίσης ο Bond (2010) αναφέρει ότι η EDM επιτυγχάνει υψηλότερο συντελεστή ανάκτησης σε σύγκριση με τις τεχνικές RO, NF και EDR.

4.1.2.3 Ιοντοεναλλαγή

Η ιοντοεναλλαγή (Ion eXchange, IX) αποτελεί μία διεργασία που βασίζεται σε μεταθετικές χημικές αντιδράσεις ενός ηλεκτρολύτη διαλυμένου στη ρευστή φάση και ενός αδιάλυτου ηλεκτρολύτη που βρίσκεται σε στερεά φάση. Η στερεά φάση μπορεί να είναι συνθετική ρητίνη (resin) ή φυσικό προϊόν όπως π.χ. ζεόλιθος (Ιγγλεζάκης, 2002). Έτσι, είναι δυνατόν να γίνει ανταλλαγή ιόντων που περιέχονται στη στερεά φάση (ρητίνη) με κάποια διαφορετικά ιόντα που περιέχονται στην υγρή φάση, εν προκειμένω τα διαλυμένα ανόργανα άλατα που εμπεριέχονται στο ακατέργαστο νερό. Για παράδειγμα, κατιόντα Na^+ του ακατέργαστου νερού μπορούν να αντικατασταθούν με κατιόντα H^+ , ενώ ανιόντα Cl^- μπορούν να αντικατασταθούν με OH^- , οδηγώντας σε πλήρη απιονισμό ενός διαλύματος NaCl .

Οι ρητίνες μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το φορτίο των συστατικών που απομακρύνουν σε: (α) ανιονικές ρητίνες, οι οποίες απομακρύνουν αρνητικά φορτισμένα ιόντα (ανιόντα), και (β) κατιονικές ρητίνες οι οποίες απομακρύνουν θετικά φορτισμένα ιόντα (κατιόντα). Η IX μπορεί να πραγματοποιείται είτε σε χωριστές ιοντοεναλλακτικές στήλες, οι οποίες περιέχουν διαδοχικά (χωριστά) ανιονικές και κατιονικές ρητίνες, τοποθετημένες σε σειρά, είτε με μεικτή ιοντοεναλλακτική ρητίνη (Mixed-bed resin, MB) (η ανιονική και κατιονική ρητίνη περιέχονται στο ίδιο δοχείο).

Κατά τη λειτουργία, όλο και περισσότερες ουσίες παγιδεύονται στις ρητίνες, με αποτέλεσμα αυτές να χάνουν σταδιακά την αποτελεσματικότητά τους. Όταν επέλθει κορεσμός (exhaustion) η ρητίνη μπορεί να αναγεννηθεί με την προσθήκη κατάλληλων χημικών. Κατά την αναγέννηση, αντιστρέφεται η διαδικασία δέσμευσης απομακρύνοντας τα ιόντα που είχε δεσμεύσει η ρητίνη. Οι απαιτήσεις αναγέννησης της ρητίνης (συχνότητα) εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας.

Έπειτα από έναν ορισμένο αριθμό κύκλων αναγέννησης, η ρητίνη χάνει την ικανότητα ιοντοεναλλαγής και απαιτείται κατάλληλη διάθεση της ως απόβλητο.

Η μέθοδος IX χρησιμοποιείται στις ακόλουθες εφαρμογές (Allen, και συν., 2015):

- **Αποσκλήρυνση** (softening): Όξινες κατιονικές ρητίνες χρησιμοποιούνται. Ιόντα που προκαλούν σκληρότητα, όπως το ασβέστιο και το μαγνήσιο, αντικαθίστανται από κατιόντα νατρίου.

- **Απιονισμός** (demineralisation ή deionisation): Απομακρύνονται όλα τα ανεπιθύμητα διαλυμένα ανόργανα στοιχεία (για παράδειγμα μαγνήσιο, νάτριο κ.λπ.). Οι ανεπιθύμητες διαλυμένες ανόργανες ουσίες προσκολλώνται στην ρητίνη, ενώ κατιόντα υδρογόνου και υδροξυλιόντα ελευθερώνονται στο νερό. Το παραγόμενο νερό είναι συγκρίσιμο με το αποσταγμένο νερό. Βασική εφαρμογή της ιοντοεναλλαγής και γενικότερα των μεθόδων που παράγουν υψηλής ποιότητας νερό (αγωγιμότητας $< 1 \mu\text{S/cm}$) είναι η τροφοδότηση εγκαταστάσεων παραγωγής ατμού υψηλής πίεσης (Υφαντής, 2011).
- **Απαλκαλίωση**: Απομακρύνονται διαλυμένα στερεά υψηλής αλκαλικότητας όπως δισανθρακικά, ανθρακικά και θειικά ιόντα, τα οποία αντικαθίστανται με ιόντα χλωρίου.
- **Επιλεκτική απομάκρυνση ιόντων**: Υπάρχουν ειδικές επιλεκτικές ρητίνες για την στοχευμένη απομάκρυνση ιόντων όπως βορίου κα σελενίου.

4.1.3 Θερμική Αφαλάτωση

Στη θερμική αφαλάτωση, ο διαχωρισμός των αλάτων από το θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό πραγματοποιείται μέσω απόσταξης. Κατά τη διεργασία αυτή, το νερό ατμοποιείται και έτσι απομακρύνεται από το αλατούχο διάλυμα. Έπειτα ανακτάται ως καθαρό (κατά κανόνα απιονισμένο) νερό με τη συμπύκνωση του σε επόμενο στάδιο. Η θερμική αφαλάτωση χρησιμοποιείται κυρίως στις χώρες του Περσικού Κόλπου (GCC), όπως επίσης και στα νησιά της Καραϊβικής. Οι διεργασίες αυτές λειτουργούν σύμφωνα με την αρχή μείωσης της πίεσης εντός της εγκατάστασης προκειμένου να επιτευχθεί ατμοποίηση σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, χωρίς την πρόσδοση επιπλέον θερμότητας (Kim, 2011).

Η ομάδα των θερμικών αφαλατώσεων περιλαμβάνει τις ακόλουθες μεθόδους:

(α) Απόσταξη με πολλαπλές βαθμίδες (Multiple Effect Distillation, *MED*) (Ενότητα 4.1.3.1)

(β) Απόσταξη με εκτόνωση (Multi-stage Flash Distillation, *MSF*) (Ενότητα 4.1.3.2)

(γ) Επανασυμπίεση Ατμών (Ενότητα 4.1.3.3):

- ο Μηχανική Επανασυμπίεση Ατμών (Mechanical Vapor Compression, *MVC*)
- ο Θερμική Επανασυμπίεση Ατμών (Multiple Effect Distillation-Thermal Vapor Compression, *MED-TVC*)

(δ) Συμπυκνωτής άλμης (Brine Concentrator, *BC*) (Ενότητα 4.1.3.4)

(ε) Αναδυόμενες τεχνικές: Αυτές περιλαμβάνουν τις ακόλουθες:

- ο Ευτηκτική κρυστάλλωση (Ενότητα 4.1.3.4)
- ο Άλλες: Dynamic Vapour Recovery (DyVaR), Hittite low-temperature evaporator, Fluidised bed evaporator, Fractional Electrodeionisation (FEDI), Radial Deionisation (RDI), Ανάκτηση Μετάλλων. Οι τεχνικές αυτές δεν εξετάζονται περαιτέρω στη διδακτορική διατριβή.

4.1.3.1 Απόσταξη με πολλαπλές βαθμίδες

Η απόσταξη με πολλαπλές βαθμίδες ή πολυβάθμια απόσταξη (Multiple-Effect Distillation, MED) αποτελεί την πρώτη μονάδα αφαλάτωσης σε παγκόσμια κλίμακα. Η μονάδα αυτή εγκαταστάθηκε στο Curaçao, των Ολλανδικών Αντιλλών το 1928 με δυναμικότητα 60 m³ την ημέρα (Ophir & Manor, 1987). Περαιτέρω εμπορική αξιοποίηση της θερμικής αφαλάτωσης πραγματοποιήθηκε αρκετά αργότερα, γύρω στο 1950, αξιοποιώντας την πρόοδο των βιομηχανικών αποστακτήρων (όπως για παράδειγμα στη βιομηχανία ζάχαρης) και για την αφαλάτωση νερού στα πλοία (λεγόμενες "εβαπορέτες") που κατασκευάστηκαν κατά τον Παγκόσμιο Πόλεμο¹². Αποτελείται από έναν αριθμό πανομοιότυπων μονάδων που καλούνται βαθμίδες (effects) (AQUA-CSP, 2007).

Αρχή

Το νερό τροφοδοσίας ψεκάζεται (ή εναλλακτικά διανέμεται) στην επιφάνεια των εναλλακτών των βαθμίδων, σε μορφή λεπτού φιλμ με στόχο τη βελτίωση των συνθηκών ατμοποίησης. Η θερμότητα για τον εναλλάκτη της πρώτης βαθμίδας προσφέρεται από εξωτερική πηγή (π.χ. από ατμοπαραγωγό). Η θερμότητα κάθε επόμενου εναλλάκτη (σε επόμενη βαθμίδα) προσφέρεται από την λανθάνουσα θερμότητας κατά τη συμπύκνωση του ατμού που παράγεται στην προηγούμενη βαθμίδα της μονάδας MED. Για το λόγο αυτό, επιβάλλεται κάθε βαθμίδα να έχει χαμηλότερη πίεση λειτουργίας από τη προηγούμενη. Η διεργασία επαναλαμβάνεται μέχρι το πολύ 16 βαθμίδες. Ο ατμός που παράγεται στην τελευταία βαθμίδα συμπυκνώνεται σε χωριστό εναλλάκτη, ο οποίος ονομάζεται τελικός συμπυκνωτής. Ο συμπυκνωτής αυτός χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας (AQUA-CSP, 2007). Στο Σχήμα 4-16 δίνεται μία σχηματική αναπαράσταση της διεργασίας MED με τρεις βαθμίδες.

Λειτουργίας

Ταξινόμηση

Η MED ταξινομείται ανάλογα με τη σχετική φορά του ρεύματος άλμης και του ρεύματος του ατμού, στις ακόλουθες τέσσερις (4) κατηγορίες (Druetta, Aguirre, & Mussati, 2013):

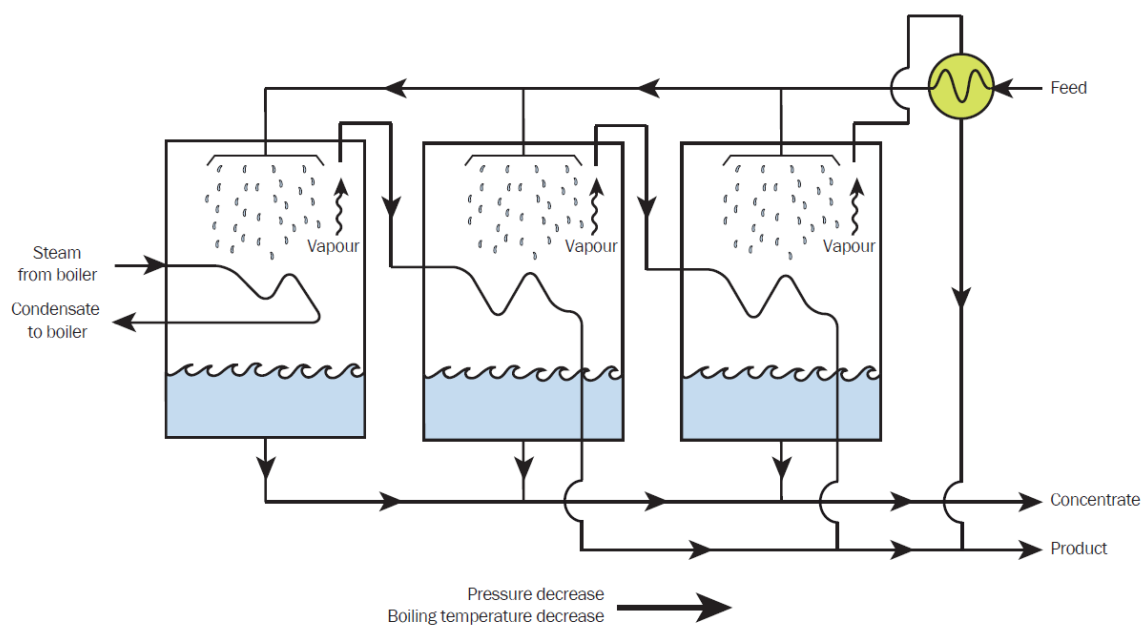
- εμπρόσθια τροφοδοσία (forward feed);
- παράλληλη τροφοδοσία (parallel feed);
- αναμεμειγμένη τροφοδοσία (mixed feed); και

¹² Πηγή: <https://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea59e/ch21.htm>

- οπίσθια τροφοδοσία (backward feed).

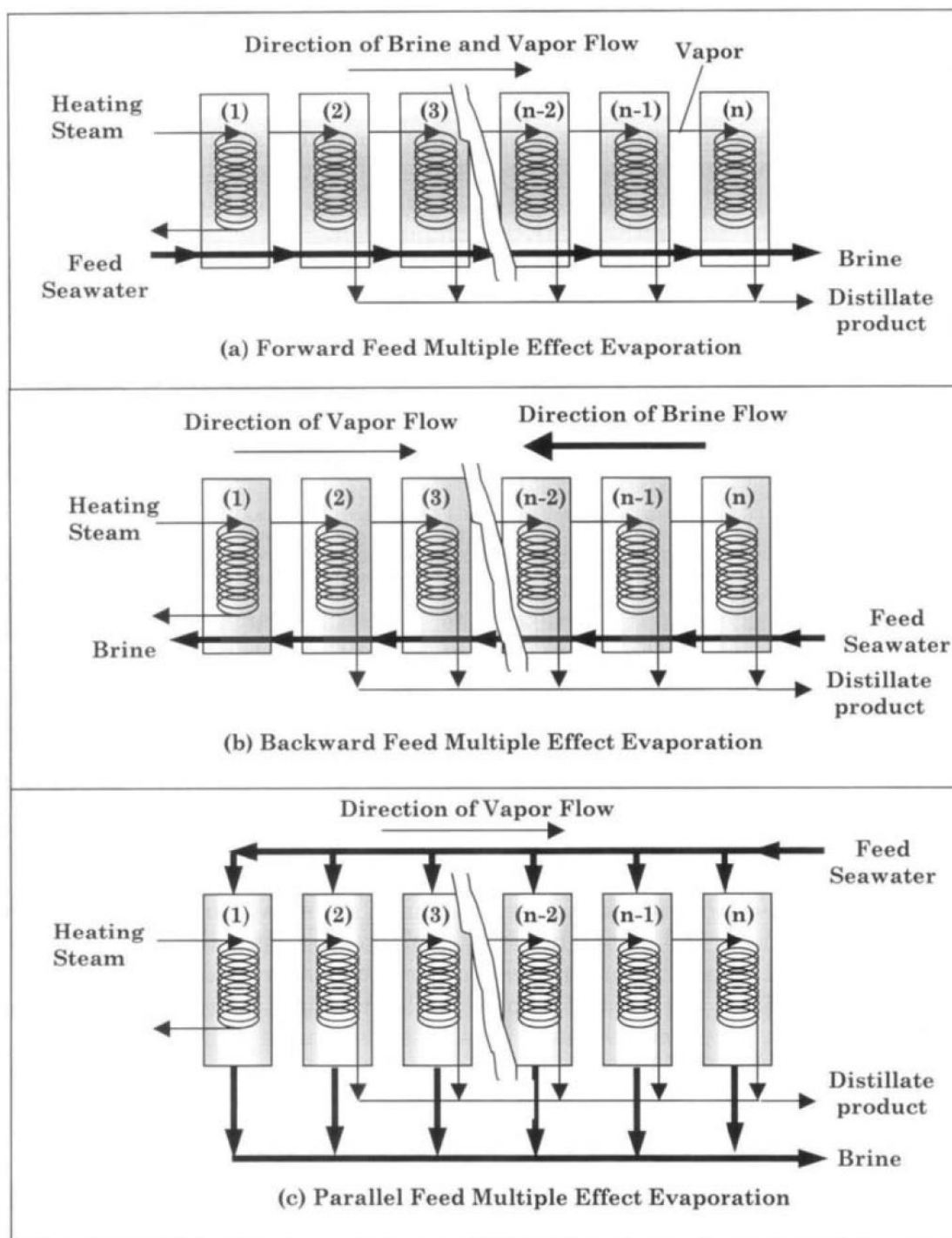
Επίσης, ταξινομούνται στις ακόλουθες κατηγορίες, ανάλογα με την διάταξη των σωλήνων (AQUA-CSP, 2007):

- Εξατμιστήρες μακρών σωλήνων (Long-Tube-Vertical Evaporators, *LTV*)
- Εξατμιστήρες κατακόρυφων σωλήνων με αναρριχόμενο υμένα (Vertical Tube-climbing film Evaporator, *VTE*)
- Εξατμιστήρες κατακόρυφων σωλήνων με κατερχόμενο υμένα (Vertical Tube-falling film Evaporator, *VTE*)
- Εξατμιστήρες με βυθισμένους σωλήνες (Submerged-Tube falling film Evaporator, *STE*)
- **Εξατμιστήρες με οριζόντιους σωλήνες** (Horizontal Tube Evaporator, *HTME*)
- Εξατμιστήρες πολλαπλών βαθμίδων χαμηλής θερμοκρασίας (Multiple Effect Evaporators, *ME*)



Πηγή: (Alvarado-Revilla, et al., 2015)

Σχήμα 4-16: Σχηματική αναπαράσταση διεργασίας MED



Πηγή: (El-Dessouky & Ettouney, 2002)

Εικόνα 4-1: Διατάξεις μονάδων Πολυβάθμιας Εξάτμισης

Λειτουργικά
χαρακτηριστικά

Η τεχνική MED έχει καλύτερο θερμοδυναμικό βαθμό απόδοσης από την τεχνική MSF. Στα συστήματα MED, η υψηλότερη θερμοκρασία του νερού επεξεργασίας περιορίζεται στους 70°C με στόχο την ελαχιστοποίηση των φαινομένων διάβρωσης και των επικαθίσεων (AQUA-CSP, 2007).

Δυναμικότητα

Οι εγκαταστάσεις MED, αποτελούνται από μονάδες με δυναμικότητα μεταξύ 2,000 και 10,000 m³/ημέρα. Οι μονάδες αυτές αποτελούνται από 8 μέχρι 16 βαθμίδες. Μονάδες μεγαλύτερης δυναμικότητας εφαρμόζονται με παράλληλα συστήματα. Οι μεγαλύτερες μονάδες MED σε παγκόσμιο επίπεδο δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Απόδοση

Για τη μέτρηση της απόδοσης των μονάδων MED χρησιμοποιούνται κυρίως οι ακόλουθες δύο (2) παράμετροι:

- Gain Output Ratio: Εκφράζεται σε kg ατμού ανά kg νερού (τελικού προϊόντος). Το μέγεθος αυτό δεν συνυπολογίζει τη θερμοκρασία του ατμού που απαιτείται για την παραγωγή του νερού και ως εκ τούτου, μπορεί να θεωρηθεί ως ελλιπές κριτήριο.
- Performance Ratio: Είναι ο λόγος του παραγόμενου νερού προς την προσδιδόμενη θερμότητα

Κατά το συνδυασμό τους με μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, η θερμότητα προσφέρεται από τον ατμοστρόβιλο σε μορφή ατμού στα 0.35 bar (a). Στην περίπτωση αυτή, η τυπική ενεργειακή κατανάλωση είναι:

- 190-390 kJ/kg (θερμική ενέργεια)
- 1.5-2.5 kWh/m³ (ηλεκτρική ενέργεια για σκοπούς κυκλοφορίας του νερού και ελέγχου της διεργασίας)

Σε περίπτωση συνδυασμού των συστημάτων MED με θερμικό συμπιεστή (MED-TVC), ο ατμός που προκαλεί το φαινόμενο Ventouri πρέπει να είναι πίεσης μεγαλύτερης των 2 bar, συνήθως στο εύρος 10 με 20 bar (AQUA-CSP, 2007).

Εφαρμογές

Οι μονάδες MED έχουν μερίδιο 8% της αγοράς αφαλάτωσης. Η πιο συχνή διάταξη MED είναι αυτή της Παράλληλης Τροφοδοσίας, ενώ η διάταξη Εμπρόσθιας Τροφοδοσίας δεν έχει χρησιμοποιηθεί ακόμη σε βιομηχανική κλίμακα για αφαλάτωση. Ωστόσο, έχει βρει εφαρμογή ιδιαίτερα στη Βιομηχανία Ζάχαρης και στη Βιομηχανία Χάρτου.

Πίνακας 4-4: Δέκα μεγαλύτερες εγκαταστάσεις MED σε παγκόσμιο επίπεδο

Χώρα	Μονάδα	Δυναμικότητα	Ημερομηνία		Προμηθευτής
		m ³ /ημέρα	Σύμβαση	Λειτουργία	
Σαουδική Αραβία	Al Jubail	800,000	2007	2010	Veolia Sidem
Κουβέιτ	Az Zour North 1 IWPP	486,400	2013	2016	Veolia Sidem
UAE	Al Fujairah 2	454,200	2007	2010	Veolia Sidem
Qatar	Ras Laffan C	286,400	2008	2011	Veolia Sidem
Bahrain	Al Hidd 3	272,760	2006	2007	Veolia Sidem
UAE	Al Taweelah A1	240,000	2000	2002	Veolia Sidem
Κίνα	Tianjin SDIC	100,000	2006	2010	IDE Tech
Κίνα	Tianjin SDIC	100,000	2010	2012	IDE Tech
Ινδία	Jamnagar	96,000	2005	2007	IDE Tech
Σαουδική Αραβία	Shoaiba 2	91,200	2015	-	Itochu/ Sasakura

Προσαρμοσμένο από (Alvarado-Revilla, et al., 2015)

4.1.3.2 Απόσταξη με εκτόνωση

Η πρώτη μονάδα MSF κατασκευάστηκε το 1960 και εγκαταστάθηκε στο Kuwait (Curcio, 2006). Η Απόσταξη με Εκτόνωση (Multi-Stage Flash Distillation, *MSF*) μαζί με την Αντίστροφη Όσμωση (Reverse Osmosis, *RO*) αποτελούν τις πιο εμπορικές μεθόδους αφαλατώσεις, με τη μέθοδο *RO* να κατέχει το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς. Η εικόνα της αγοράς παρουσιάζει βέβαια ανομοιομορφία γεωγραφικά, καθώς για παράδειγμα στα Ηνωμένα Εμιράτα, η μέθοδος *MSF* κατέχει κυρίαρχη θέση στην αγορά αφαλάτωσης (SOL-BRINE, Report on the evaluation of desalination systems driven by renewable energy sources: focus on solar energy systems used in different desalination applications, 2012).

Η μέθοδος *MSF* αποτελεί μία αξιόπιστη και ώριμη τεχνολογία. Η σχετικά απλή λειτουργία έχει επιδειχθεί εγκαταστάσεις με ολοένα και μεγαλύτερη δυναμικότητα, κυρίως στην περιοχή του Αραβικού Κόλπου. Οι βελτιώσεις στα υλικά για την αντιμετώπιση της διάβρωσης, καθώς και οι ανάγκες για αυξημένα μεγέθη δυναμικότητας, διατηρούν την παρουσία της τεχνολογίας αυτής σε συγκεκριμένα τμήματα της αγοράς αφαλάτωσης (Alvarado-Revilla, et al., 2015).

Αρχή

Λειτουργίας

Στο λεγόμενο θερμαντήρα άλμης, το εισερχόμενο ρεύμα νερού θερμαίνεται ως την υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας (top brine temperature) με ανάκτηση θερμότητας από τη συμπύκνωση του ατμού. Αυτός ο ατμός μπορεί να προέρχεται από απομάστευση ατμοστροβίλου ή από άλλη πηγή.

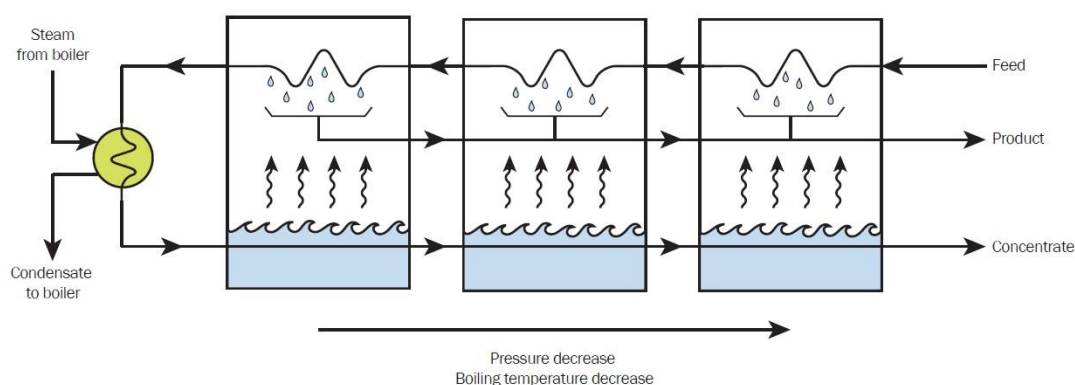
Το προθερμασμένο νερό εισέρχεται στην πρώτη βαθμίδα (stage) όπου η πίεση είναι χαμηλότερη. Η ιδιαιτερότητα στη λειτουργία της μεθόδου αυτής έγκειται στον τρόπο με τον οποίο ατμοποιείται το νερό, με το λεγόμενο φαινόμενο "flashing". Κατά το φαινόμενο αυτό, το νερό υψηλής θερμοκρασίας εισάγεται "βίαια" σε δοχείο χαμηλότερης πίεσης, με αποτέλεσμα να βράζει απότομα και σχεδόν να "εκρήγνυται" σε μορφή ατμού. Μόνο ένα μικρό ποσοστό της συνολικής μάζας του νερού μετατρέπεται σε ατμό, ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης του δοχείου. Έτσι, εξατμίζεται τόση ποσότητα νερού ώστε ψύχεται η μάζα του νερού στο σημείο ισορροπίας του σημείου βρασμού (AQUA-CSP, 2007).

Ο ατμός που παράγεται με flashing, συμπυκνώνεται στον εναλλάκτη της επόμενης βαθμίδας. Οι εναλλάκτες τοποθετούνται στο επάνω μέρος της βαθμίδας και δίνουν τη θερμότητά τους, προθερμαίνοντας το νερό (εξωτερικός εναλλάκτης) που

κατευθύνεται προς το θερμαντήρα άλμης. Η διεργασία αυτή επαναλαμβάνεται από 4 έως και 40 βαθμίδες (Curcio, 2006), με τη συνήθη διάταξη να φτάνει έως τις 20 βαθμίδες (AQUA-CSP, 2007).

Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ανάκτηση νερού και ενέργειας, κάθε βαθμίδα λειτουργεί σε χαμηλότερη πίεση από την προηγούμενη. Το κενό διατηρείται με τη χρήση τζιφαριού ή μηχανικής αντλίας κενού (AQUA-CSP, 2007).

Σχήμα 4-17: Σχηματική αναπαράσταση μεθόδου MSF



Πηγή: (Alvarado-Revilla, et al., 2015)

Ταξινόμηση

Οι βιομηχανικές μονάδες MSF περιλαμβάνουν δύο είδη διατάξεων:

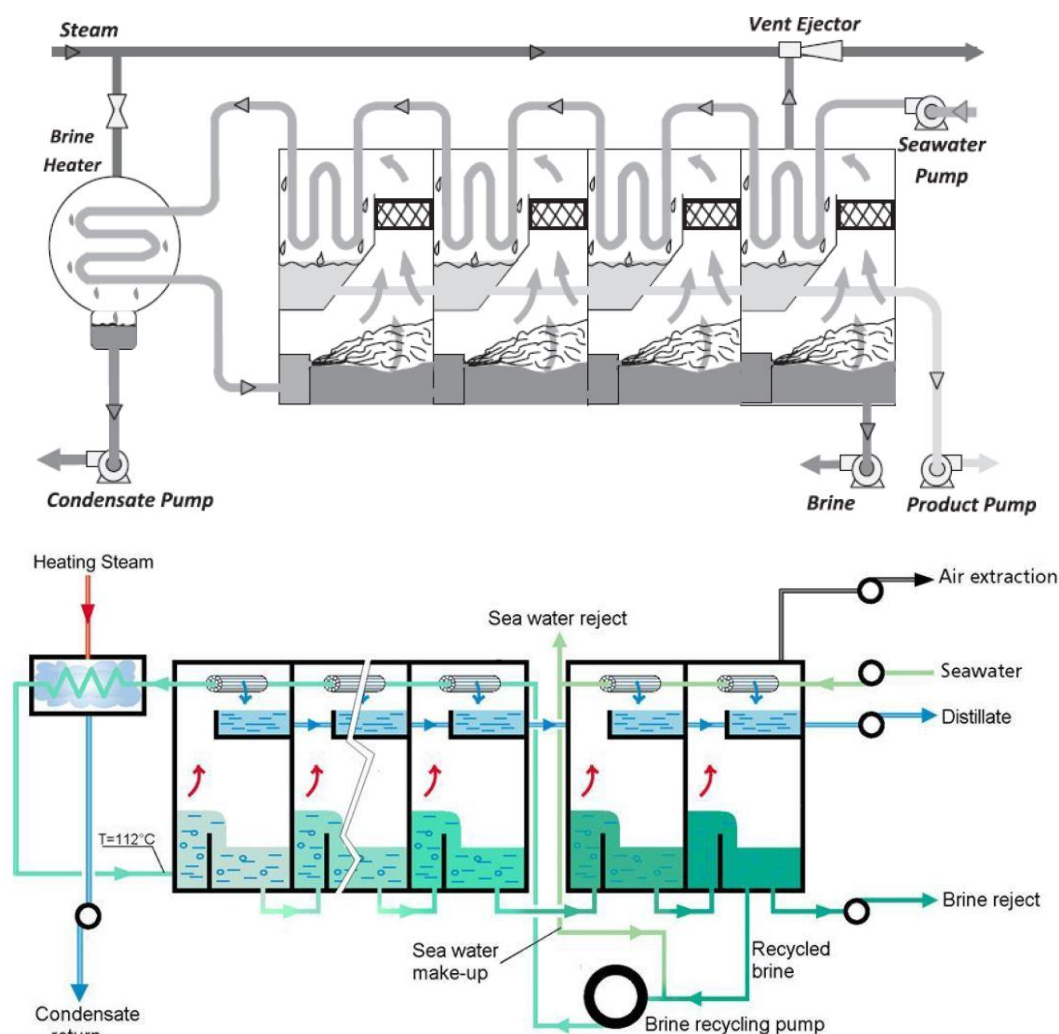
- (α) Τη διάταξη απλής ροής (Multi-Stage Flash – Once Through, **MSF-OT**),
- (β) Τη διάταξη επανακυκλοφορίας της άλμης (Multi-Stage Flash – Brine Recirculation, **MSF-BR**),

Σήμερα, οι περισσότερες εν λειτουργία μονάδες MSF χρησιμοποιούν επανακυκλοφορία της άλμης. Η μέθοδος MSF-BR οδηγεί σε υψηλότερο λόγο ανάκτησης, σε χαμηλότερη χρήση χημικών και σε καλύτερο έλεγχο της διεργασίας. Ωστόσο, MSF-BR έχει μεγαλύτερες ανάγκες άντλησης (και έτσι ηλεκτρική κατανάλωση). Στο ακόλουθο σχήμα δίνεται σχηματική αναπαράσταση και των 2 διατάξεων.

Οι μονάδες ταξινομούνται επίσης ανάλογα με τη διάταξη του εναλλάκτη ως ακολούθως (El-Dessouky & Ettouney, 2002):

- Διάταξη επιμήκους σωλήνα (Long Tube Configuration)
- Διάταξη διασταυρωμένου σωλήνα (Cross Tube Configuration)

Σχήμα 4-18: Σχηματική αναπαράσταση διατάξεων MSF-OT και MSF-BR



Πηγή: (SOL-BRINE, Report on the evaluation of desalination systems driven by renewable energy sources: focus on solar energy systems used in different desalination applications, 2012)

Λειτουργικά

Συνθήκες Λειτουργίας

Χαρακτηριστικά

- Θερμοκρασία: 90-120°C (AQUA-CSP, 2007).

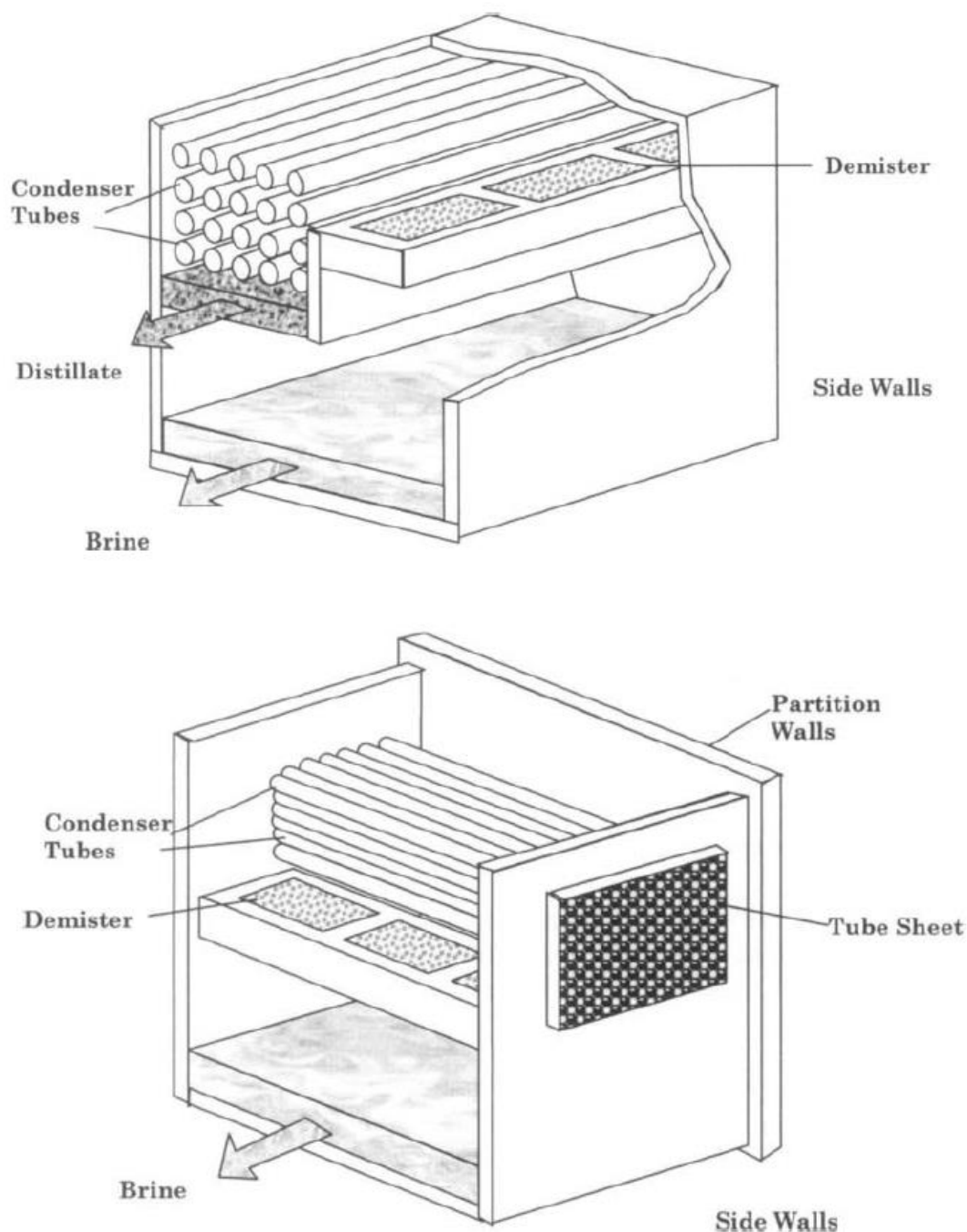
Η θερμοκρασία αυτή ονομάζεται Top Brine Temperature (TBT) και αποτελεί κρίσιμο παράγοντα σχεδιασμού μίας εγκατάστασης MSF (Curcio, 2006).

- Πίεση: Κενό

Δυναμικότητα

Μονάδες με μεγάλη δυναμικότητα, της τάξης των 76,000 m³/ημέρα (AQUA-CSP, 2007).

Σχήμα 4-19: Διάταξη Long Tube (επάνω σχήμα) και Cross Tube (κάτω σχήμα)



Πηγή: (El-Dessouky & Ettouney, 2002)

Προ-επεξεργασία

Η MSF έχει χαμηλές ανάγκες προ-επεξεργασίας, που τυπικά περιλαμβάνουν απλές διατάξεις εσχάρωσης (screening) και διήθησης (filtration) (Curcio, 2006). Είναι ιδιαίτερα κατάλληλη διεργασία για περιπτώσεις όπου η ποιότητα του νερού τροφοδοσίας είναι μη ευνοϊκές (υψηλή αλατότητα, θερμοκρασία και υψηλό ρυπαντικό φορτίο) (AQUA-CSP, 2007).

Ενεργειακές απαιτήσεις

Η MSF αποτελεί μία ιδιαίτερα ενεργοβόρα διεργασία. Απαιτεί μία σημαντική ποσότητα ατμού για την εξάτμιση και επίσης σημαντικές ποσότητες ηλεκτρισμού για την άντληση των μεγάλων ποσοτήτων άλμης (AQUA-CSP, 2007). Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται συνήθως όταν υπάρχει δυνατότητα απομάστευσης ατμού από γειτονική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής (Alvarado-Revilla, et al., 2015).

Η MSF έχει επίσης μεγάλες απαιτήσεις για ψύξη ($8-10\text{m}^3$ ψυκτικού μέσου / m^3 παραγόμενου νερού)

- Θερμικές απαιτήσεις: 250-330 kJ/kg (AQUA-CSP, 2007).
- Ηλεκτρική κατανάλωση: 3-5 kWh/ m^3

Απόδοση διεργασίας

- Gain Output Ratio: ~8 (τυπική τιμή) (Curcio, 2006)

Προδιαγραφές παραγόμενου νερού (AQUA-CSP, 2007)

- Απιονισμένο: <10 mg/L
- Συντελεστής ανάκτησης: 10-25%¹³

Υλικά

- Χαλκονικέλιο (Cu/Ni 90/10 ή Cu/Ni 70/30)
- Τιτάνιο
- Ανοξείδωτος χάλυβας

Εφαρμογές

Βασικοί Προμηθευτές

- Doosan Heavy Industries & Construction
- Fisia Italmimpianti
- Mitsubishi/Sasakura

¹³ Οι χαμηλές τιμές του εύρους αναφέρονται στη διάταξη MSF-OT, ενώ οι υψηλές στη διάταξη MSF-BR [388].

Πίνακας 4-5: Δέκα μεγαλύτερες εγκαταστάσεις MSF σε παγκόσμιο επίπεδο

Χώρα	Μονάδα	Δυναμικότητα	Ημερομηνία		Προμηθευτής
		m ³ /ημέρα	Σύμβαση	Λειτουργία	
Σαουδική Αραβία	Shoaiba 3	880,000	2005	2009	Doosan
Σαουδική Αραβία	Ras Al-Khair	728,000	2010	2015	Doosan
UAE	Jebel Ali M Station	636,000	2007	2013	Fisia Italimpianti
Σαουδική Αραβία	Yanbu 3	550,000	2012	2016	Doosan
Σαουδική Αραβία	Al Jubail	472,794	1981	1984	Mitsubishi/Sasakura
UAE	Shuweihat 2	459,146	2009	2011	Doosan
UAE	Shuweihat 1	454,200	2001	2004	Fisia Italimpianti
Σαουδική Αραβία	Shoaiba 2	454,000	1993	2002	Doosan
Κουβέιτ	Doha West	392,400	1981	1985	Mitsubishi/Sasakura
UAE	Al Taweelah B1	340,950	1992	1996	Fisia Italimpianti

Προσαρμοσμένο από (Alvarado-Revilla, et al., 2015)

4.1.3.3 Επανασυμπίεση ατμών

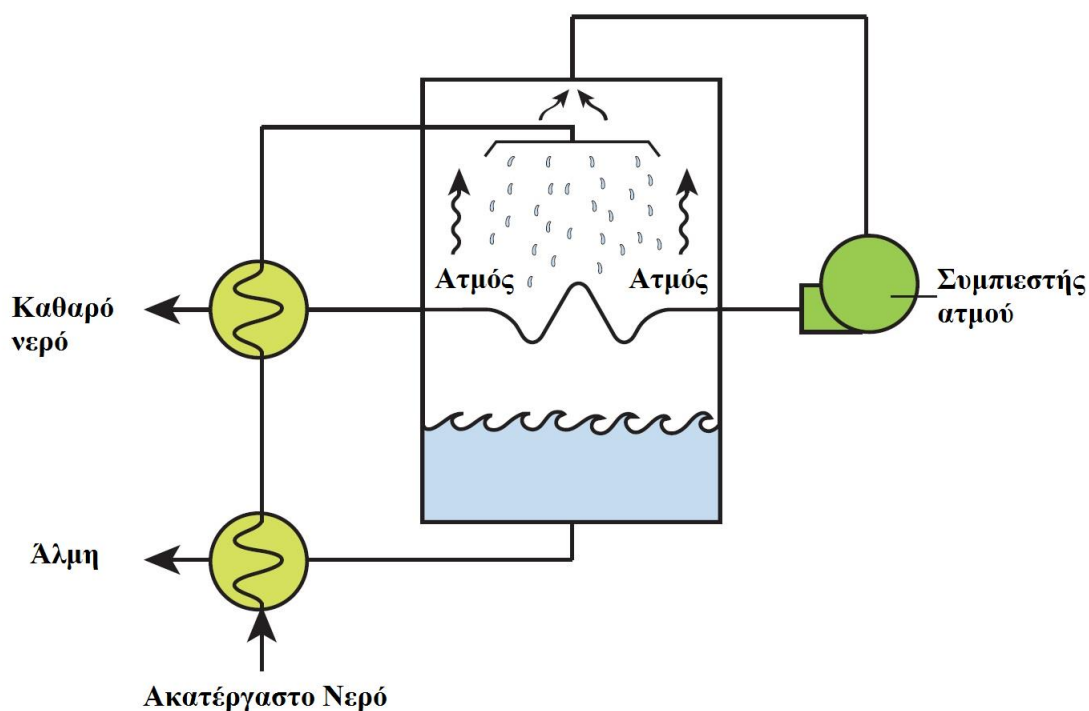
Η επανασυμπύεση ατμών (Vapor Compression, VC) μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο (2) μεγάλες κατηγορίες:

- Μηχανική Επανασυμπίεση Ατμών (Mechanical Vapor Compression, MVC), και
- Θερμική Επανασυμπίεση Ατμών (Thermal Vapor Compression, TVC).

Μηχανική Επανασυμπίεση Ατμών

Η μονοβάθμια αφαλάτωση με μηχανική επανασυμπίεση των ατμών είναι η πιο συνήθης μέθοδος θερμικής αφαλάτωσης με μία βαθμίδα. Ο αρχικός σχεδιασμός συστημάτων MVC δεν επέτρεπε δυναμικότητα μεγαλύτερη των 500m³/ημέρα. Οι βελτιώσεις στο σχεδιασμό των συμπιεστών, αύξησε το όριο της δυναμικότητας σε 1,000m³/ημέρα και σήμερα το όριο αυτό έχει φθάσει τα 5,000m³/ημέρα.

Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα εφαρμόσιμη για εγκαταστάσεις μικρού έως και μεσαίου μεγέθους. Τα συστήματα αυτά μπορεί να είναι έως και τριών βαθμίδων, αν και η συνήθης περίπτωση είναι να έχουν μόνο μία βαθμίδα (AQUA-CSP, 2007).



Πηγή: (Alvarado-Revilla, et al., 2015)

Σχήμα 4-20: Σχηματική αναπαράσταση μεθόδου MVC

Θερμική Επανασυμπίεση Ατμών

Η TVC αποτελείται από έναν θερμικό συμπιεστή, ο οποίος προστίθεται στην τελευταία βαθμίδα συστήματος MED έτσι ώστε να αυξήσει την συνολική απόδοση. Ο ατμός που παράγεται στην τελευταία βαθμίδα, επανασυμπιέζεται σε θερμικό συμπιεστή και χρησιμοποιείται για πρόσδοση θερμότητας στην 1^η βαθμίδα. Ο θερμικός συμπιεστής απαιτεί τη χρήση ατμού υψηλότερων θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών (motive steam), ο οποίος απομαστεύεται από κύκλο Rankine, ή από ατμό που χρησιμοποιείται στην παραγωγική γραμμή βιομηχανίας.

4.1.3.4 Συμπυκνωτής άλμης

Η τεχνική της συμπύκνωσης άλμης μπορεί να ταξινομηθεί στις ακόλουθες δύο (2) ευρείες κατηγορίες:

- Εξατμιστήρες κατακόρυφων σωλήνων με ροή υγρού υμένα (Vertical Tube-falling film Evaporator, VTFF)
- Εξατμιστήρες εξαναγκασμένης κυκλοφορίας.

Στην τεχνική VTFF, η άλμη αντλείται στην κορυφή ενός εναλλάκτη κατακορύφων σωλήνων και ρέει κατακόρυφα εσωτερικά των σωλήνων, σε ροή υμένα (φίλμ) (βλέπε επίσης Σχήμα 4-21). Η άλμη απορροφά θερμότητα από τον ατμό που συμπυκνώνεται στο εξωτερικό των σωλήνων. Τμήμα από την μάζα της άλμης μετατρέπεται σε ατμό, και η υπολειπόμενη άλμη συμπυκνώνεται περαιτέρω. Ο ατμός και η άλμη διαχωρίζονται κατόπιν σε έναν ειδικό θάλαμο διαχωρισμού. Ο ατμός επανασυμπιέζεται, με τη χρήση ενός μηχανικού συμπιεστή και επαναχρησιμοποιείται. Για την αποφυγή καθαλατώσεων, συχνά χρησιμοποιείται η τεχνική εμβολιασμού με κρυστάλλους (seeding), κατά την οποία διατηρείται σταθερή η παρουσία κρυστάλλων θεικού ασβεστίου στο ρεύμα επανακυκλοφορίας. Οι κρύσταλλοι αυτοί λειτουργούν ως επιλεκτικό σημείο πυρηνογέννησης, έτσι ώστε να μη σχηματίζονται οι καθαλατώσεις στην επιφάνεια του εναλλάκτη. Κατά τη λειτουργία του εξατμιστήρα και καθώς η συγκέντρωση των στερεών αυξάνει, ένα μικρό υπολειμματικό ρεύμα (blowdown) απομακρύνεται τακτικά για περαιτέρω συγκέντρωση ή τελική διάθεση.

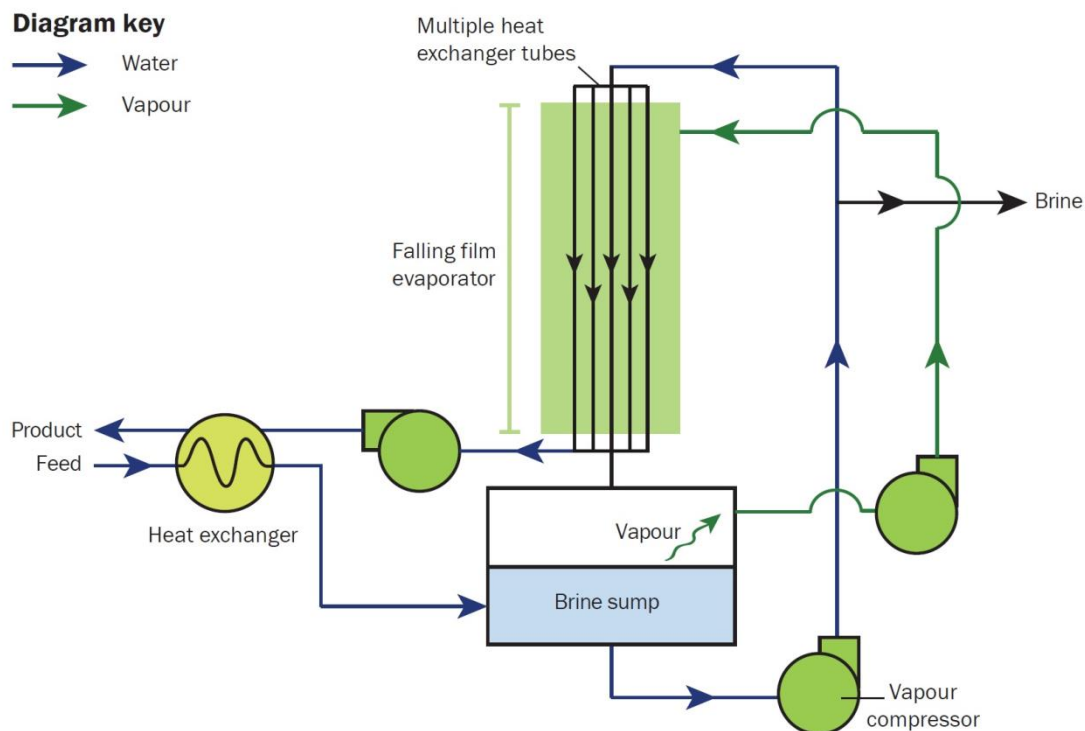
- Τυπική ενεργειακή κατανάλωση: 18-26 kWh/m³
(Subramani & Jacangelo, 2014)
- Λόγος συγκέντρωσης: 40:1 (Jordahl, 2006)

Στην τεχνική εξαναγκασμένης κυκλοφορίας, η προθερμασμένη άλμη οδηγείται μέσω αντλίας σε δοχείο χαμηλότερης πίεσης, με αποτέλεσμα να βράζει απότομα και σχεδόν να "εκρήγνυται" σε μορφή ατμού. Η παροχή ανακυκλοφορίας είναι μεγάλη έτσι ώστε να αποφευχθεί κρυστάλλωση εντός του εξατμιστήρα.

- Τυπική ενεργειακή κατανάλωση: 52-66 kWh/m³
(Subramani & Jacangelo, 2014)

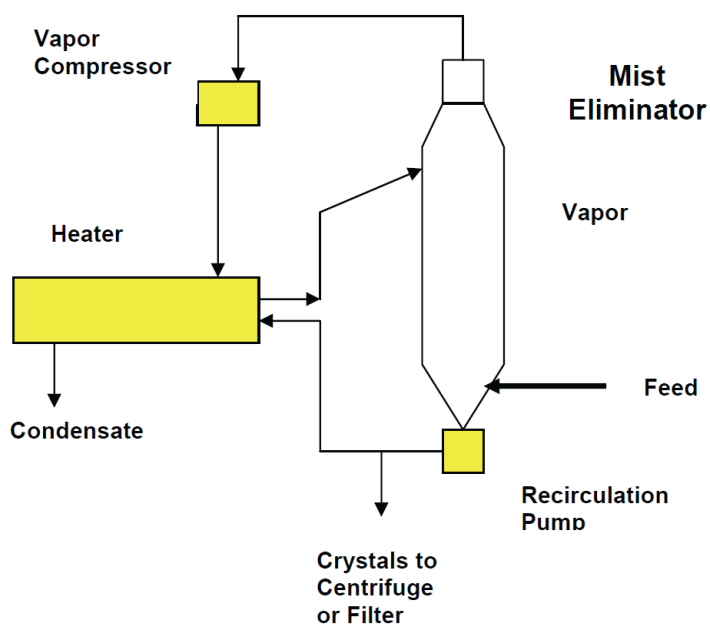
Οι BC απαιτούν σημαντικά ποσά ενέργειας και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές όπου δεν επιτρέπεται η διάθεση της άλμης και έτσι απαιτείται εφαρμογή συστημάτων ZLD. Με τα συστήματα αυτά, ανακτάται νερό υψηλών

προδιαγραφών. Ωστόσο, δημιουργείται και ένα στερεό υπόλειμμα το οποίο χρήζει διάθεσης ως απόβλητο.



Πηγή: (Alvarado-Revilla, et al., 2015)

Σχήμα 4-21: Σχηματική αναπαράσταση τεχνικής BC



Πηγή: (Mickley M. C., 2001)

Σχήμα 4-22: Σχηματική αναπαράσταση κρυσταλλωτήρα εξαναγκασμένης ροής

4.1.3.5 Ευτηκτική κρυστάλλωση

Η Ευτηκτική Κρυστάλλωση (Eutectic Freeze Crystallization, *EFC*) είναι μία διεργασία γνωστή από το 1973 (CRYSTALLIX[™]) (Stepakoff, Siegelman, Johnson, & Gibson, 1974). Παρόλο αυτά, το επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας είναι ιδιαίτερα χαμηλό (βλ. Σχήμα 4-29) και οι εμπορικές εφαρμογές της τεχνολογίας είναι πολύ λίγες, λόγω των σημαντικών λειτουργικών κυρίως προβλημάτων, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

Το χλωριούχο νάτριο είναι από τα υλικά που το διάλυμά του σχηματίζει ευτηκτικό σημείο. Στα διαγράμματα αυτά, υπάρχουν πολλές γραμμές διαλυτότητας, που οριοθετούν διάφορες περιοχές φάσεων, και (τουλάχιστον) μία σύσταση, στην οποία αντιστοιχεί η μικρότερη θερμοκρασία τήξης, ή η μικρότερη θερμοκρασία στην οποία υπάρχει μόνο η υγρή φάση. Το διφασικό διάγραμμα (binary phase diagram) του διαλύματος NaCl δίνεται στο Διάγραμμα 2-1. Το διάλυμα του NaCl παρουσιάζει ευτηκτικό σημείο στους -21.2°C . Κάτω από αυτή τη θερμοκρασία, σχηματίζεται μίγμα πάγου και στερεού $\text{NaCl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Στο διάγραμμα αυτό παρατηρείται επίσης ένα άλλο σημείο, στους 0.1°C και περιεκτικότητα περίπου 25% κατά βάρος σε NaCl, που ονομάζεται περιτηκτικό σημείο, όπου η μία στερεή φάση (NaCl) μετασχηματίζεται σε μίαν άλλη στερεή φάση ($\text{NaCl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

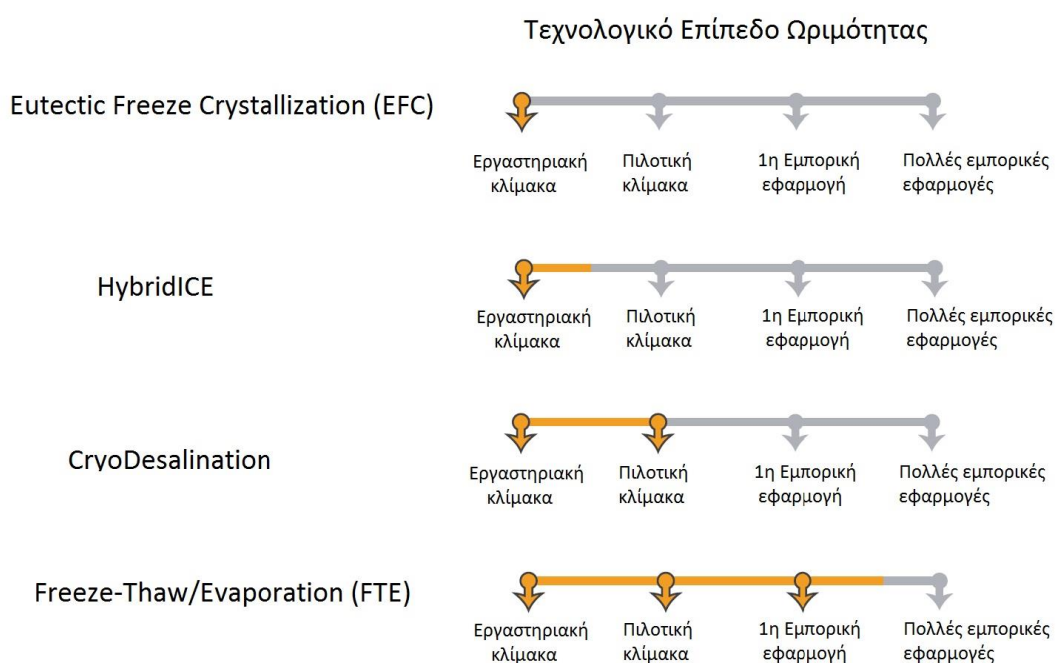
Το υγρό απόβλητο που τροφοδοτείται στον ευτηκτικό κρυσταλλωτήρα ψύχεται μέχρι την ευτηκτική θερμοκρασία του διαλύματος. Στη θερμοκρασία αυτή το νερό και το αλάτι κρυσταλλώνουν ταυτόχρονα. Για το διαχωρισμό των δύο στερεών συνήθως εφαρμόζονται τεχνικές διαφοράς πυκνότητας (π.χ. βαρύτητα) ή μηχανικός διαχωρισμός (π.χ. φυγοκεντρισμός).

Χαρακτηριστικά τεχνολογίας:

- Χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις: Η ενέργεια που απαιτείται για την τήξη του πάγου είναι 6.01 kJ/mol , δηλαδή περίπου 6 φορές λιγότερη σε σύγκριση με την εξάτμιση του νερού που είναι 40.65 kJ/mol .
- Ανάκτηση προϊόντων με υψηλή καθαρότητα: οι Randall, Nathoo, & Lewis (2011) αναφέρουν ότι με τη χρήση της τεχνικής EFC επετεύχθει 99.9% ανάκτηση νερού και ανάκτηση θεικού ασβέστιου (98% καθαρότητα) και θεικό νάτριο (96.4% καθαρότητα)

- Η τεχνολογία έχει επιδειχθεί σε μικρή κλίμακα και έχει ως εκ τούτου χαμηλό επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας (βλ. επίσης Σχήμα 4-23).
- Η εφαρμογή της τεχνικής αυτής περιορίζεται στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων με απλή χημική σύνθεση
- Το κόστος της τεχνολογίας είναι υψηλό (σχεδόν διπλάσιο από έναν εξατμιστήρα ίδιας δυναμικότητας)
- Προμηθευτές:
 - Proxa (University of Cape Town),
 - EFC Separations B.V. (spin off εταιρεία του TU Delft)

Τέλος σημειώνεται ότι, εκτός από την Ευτηκτική Κρυστάλλωση, έχουν δοκιμαστεί και άλλες τεχνικές ψύξης για την συμπύκνωση της άλμης. Οι Williams, Ahmad & Connolly (2013) αναφέρουν πως φάνηκε από εργαστηριακά πειράματα ότι η τεχνική της ψύξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για την ανακύκλωση της άλμης εντός της μονάδας αφαλάτωσης, με αποτέλεσμα τη δραστική μείωση του όγκου απόρριψης. Στο ακόλουθο σχήμα αποτυπώνεται το τεχνολογικό επίπεδο ωριμότητας των διαφορετικών τεχνολογιών ψύξης.



Προσαρμοσμένο από (Allen, και συν., 2015)

Σχήμα 4-23: Επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας – τεχνολογία αφαλάτωσης με ψύξη/ευτηκτική κρυστάλλωση

4.1.4 Αφαλάτωση με χρήση ΑΠΕ

Η αφαλάτωση αποτελεί μία ιδιαίτερα ακριβή μέθοδο παραγωγής νερού, καθώς η λειτουργία των μονάδων έχει υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Οι απαιτήσεις αυτές καλύπτονται μέχρι σήμερα κατά κύριο λόγο από συνδυασμένη χρήση ορυκτών καυσίμων και ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο. Σημειώνεται ότι για την παραγωγή 20 τόνων ποσίου νερού από μία συμβατική μονάδα αφαλάτωσης, απαιτείται ποσότητα ενός τόνου ισοδύναμου πετρελαίου (Gude, Nirmalakhandan, & Deng, 2010). Η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών αυτών οδηγεί σε εκπομπές CO₂ ενώ τις περισσότερες φορές προϋποθέτει σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Η χρήση ΑΠΕ σε μονάδες αφαλάτωσης αποτελεί μία ελκυστική επιλογή, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε ενεργειακή αυτονομία, προσφέροντας παράλληλα χαμηλά λειτουργικά έξοδα και δυνατότητα εφαρμογής σε απομακρυσμένες περιοχές. Επίσης, βελτιώνει σημαντικά το αποτύπωμα άνθρακα της διαδικασίας αφαλάτωσης, μειώνοντας τις εκπομπές των παραγόμενων ρύπων, οδηγώντας σε ολοκληρωμένη πρόταση παραγωγής νερού (με μη συμβατικό τρόπο), σε συνδυασμό με υψηλές περιβαλλοντικές επιδόσεις.

Οι ανανεώσιμες πηγές που μπορούν να συνδυαστούν με την αφαλάτωση (Renewable Energy Source – Desalination, RES-D) είναι οι ακόλουθες:

- Ηλιακή ενέργεια,
- Αιολική ενέργεια,
- Γεωθερμική ενέργεια και
- Ενέργεια των ωκεανών.

Κατάλληλες τεχνικές αφαλάτωσης για την κάθε μορφή ΑΠΕ παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-24, ενώ το πλήθος των εφαρμογών που έχουν αναπτυχθεί έως σήμερα (ποσοστιαία) και το τεχνολογικό τους επίπεδο αποτυπώνονται στο Σχήμα 4-26 και Σχήμα 4-25 αντίστοιχα.

Οι διατάξεις συλλογής της ανανεώσιμης ενέργειας, μπορεί να ταξινομηθούν ανάλογα με την εφαρμοζόμενη μέθοδο που χρησιμοποιείται σε:

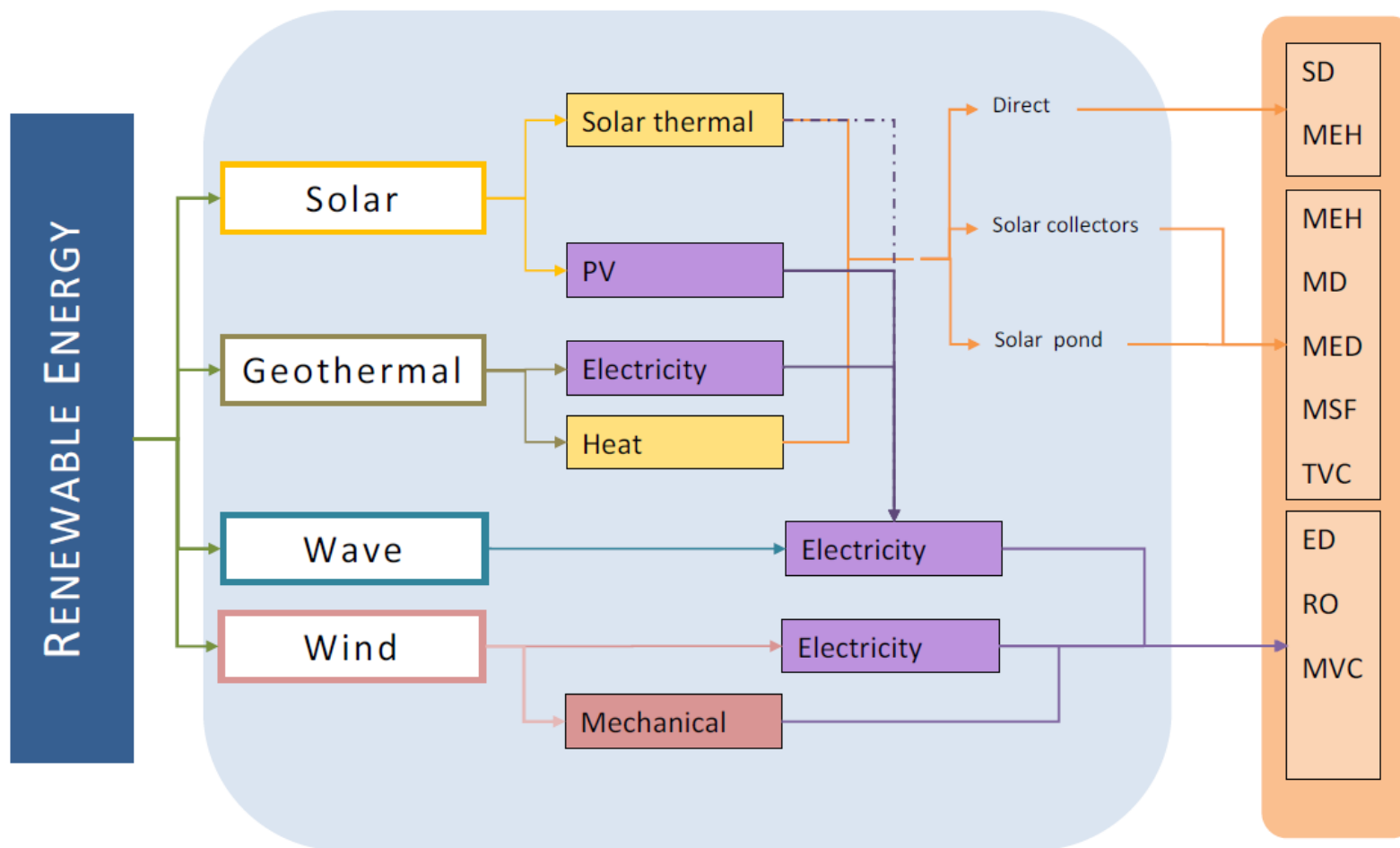
- άμεση (όπως για παράδειγμα στην περίπτωση του ηλιακού αποστακτήρα, Solar still) ή
- έμμεση με τη μετατροπή της ανανεώσιμης στην κατάλληλη μορφή ενέργειας που απαιτεί η τεχνική αφαλάτωσης (Harrison, Ho, & Mathew, 1996):
 - Μετατροπή σε θερμική ενέργεια όταν συνδυάζεται με θερμικές τεχνικές αφαλάτωσης, όπως MSF, MED, TVC,
 - Μετατροπή σε ηλεκτρική (μέσω φωτοβολταϊκών, ανεμογεννητριών, υδροστροβίλων, ενέργεια κυμάτων): (α) για να κινήσει τις αντλίες σε σύστημα αντίστροφης όσμωσης ή εξάτμισης με μηχανική συμπίεση ατμών, ή (β) για τη δημιουργία του ηλεκτρικού πεδίου που απαιτείται στα συστήματα ηλεκτροδιάλυσης.

Η εμπειρία από τη λειτουργία των εφαρμογών αυτών έχει οδηγήσει στον προσδιορισμό κάποιων συνδυασμών που φαίνεται να παρουσιάζουν συγκριτικά πλεονεκτήματα και για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί σε μεγαλύτερο βαθμό. Οι Yilmaz & Soylemez (2012) προσομοίωσαν τη λειτουργία πολυβάθμιου εξατμιστήρα τύπου MED με τη χρήση ηλιακής και αιολικής ενέργειας και προτείνουν τη χρήση ηλιακής ενέργειας λόγω σταθερότερης (και περισσότερο προβλέψιμης) παροχής ενέργειας. Η ταχύτητα του ανέμου (καθώς επίσης και η κατεύθυνση του) αποτελεί μία παράμετρο με σημαντικά μεγαλύτερη διακύμανση σε σύγκριση με την ηλιακή ακτινοβολία.

Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι δεν υπάρχει ένας μοναδικός, προτεινόμενος συνδυασμός RES-D, αλλά αντίθετα η καταλληλότητα του συστήματος εξαρτάται από μία πληθώρα παραγόντων όπως:

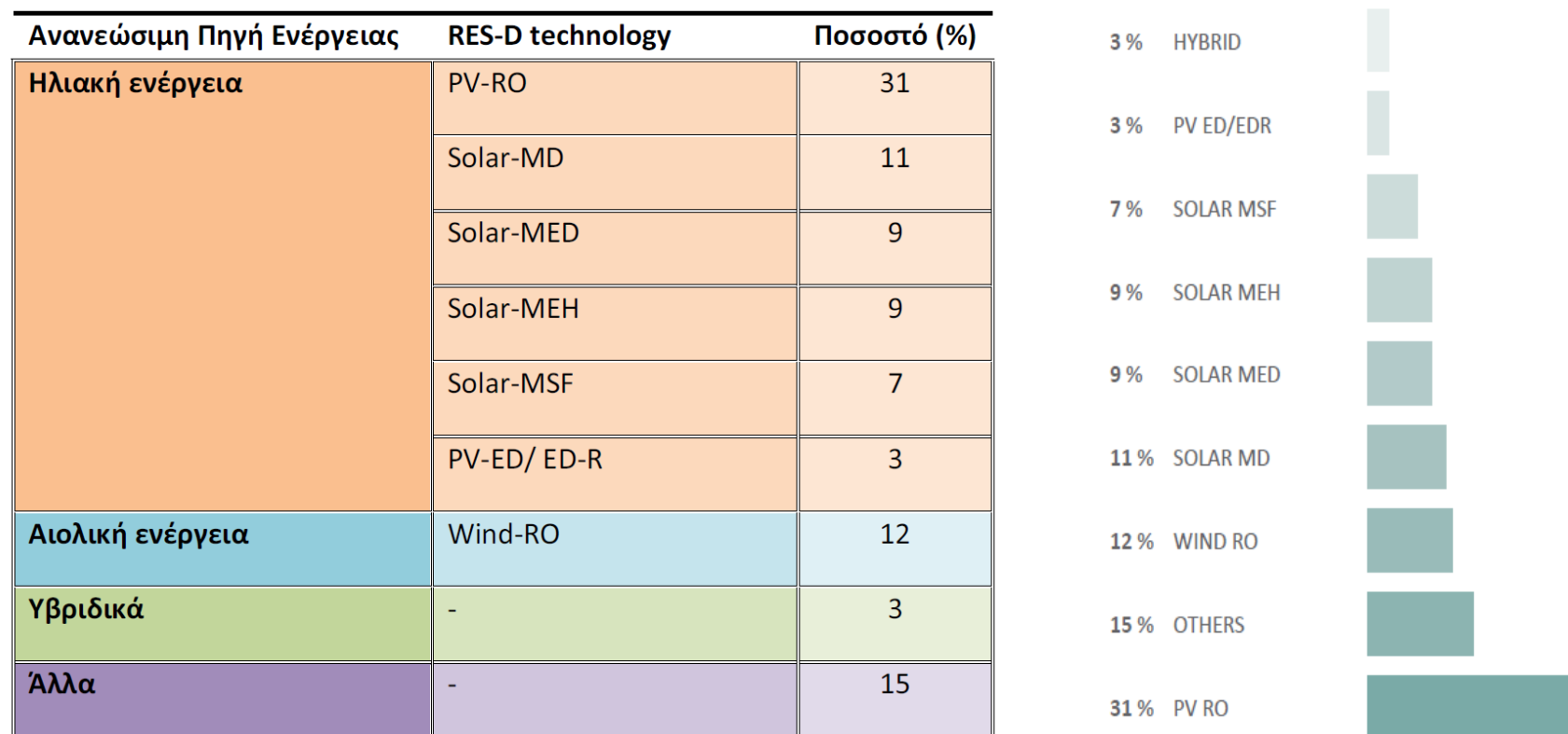
- το μέγεθος της μονάδας,
- η ποιότητα του νερού τροφοδοσίας,
- η διαθεσιμότητα ηλεκτρικού δικτύου και τεχνικών υποδομών, καθώς επίσης
- η διαθεσιμότητα του δυναμικού ανανεώσιμης ενέργειας.

Σχήμα 4-24: Συνδυασμός τεχνικών αφαλάτωσης με τεχνικές συλλογής Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ)



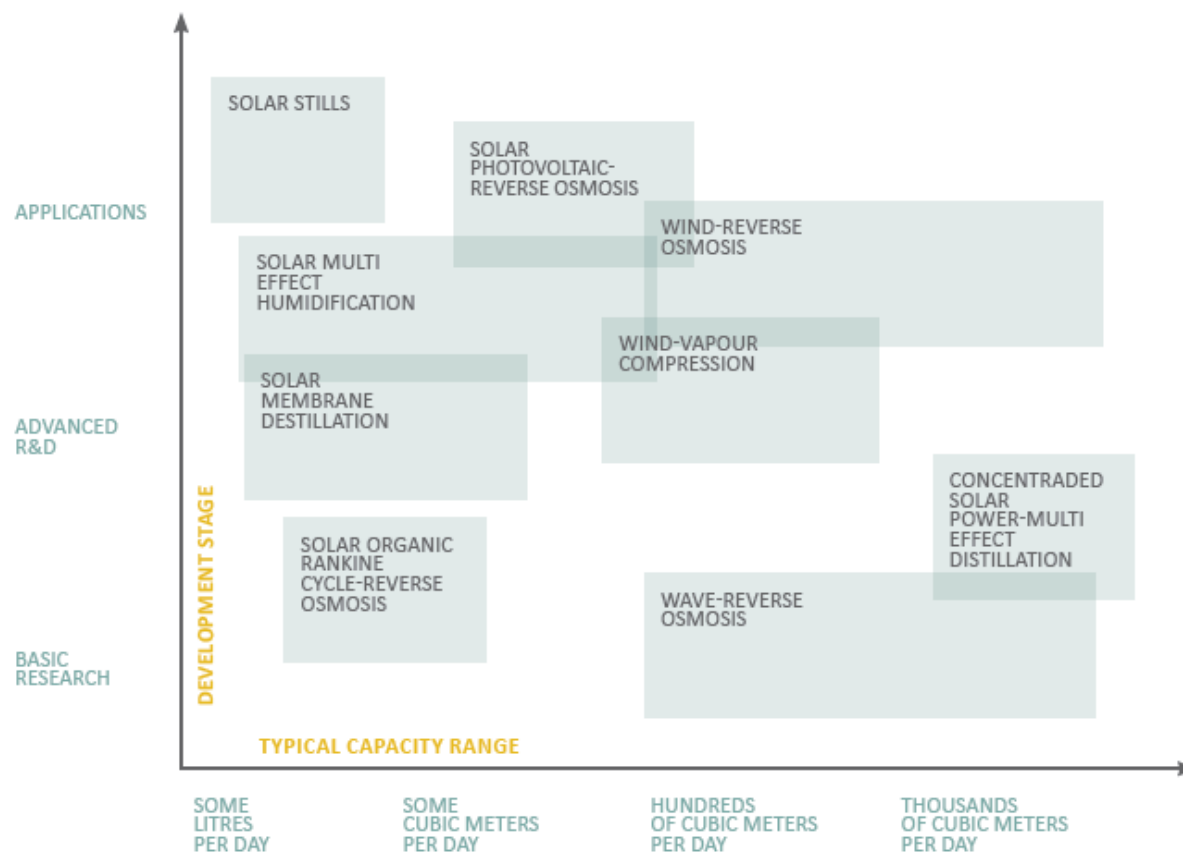
Πηγή: (Xevgenos, Moustakas, Malamis, & Loizidou, 2016) (ADU-RES, 2005)

Σχήμα 4-25: Ποσοστιαία συμμετοχή των τεχνολογιών RES-D στην παγκόσμια παραγωγή πόσιμου νερού με μονάδες αφαλάτωσης με ΑΠΕ.



Πηγή: (Papapetrou, Wieghaus, & Biercamp, 2010)

Σχήμα 4-26: Επίπεδο τεχνικής ανάπτυξης μεθόδων αφαλάτωσης με ΑΠΕ



Πηγή: (Papapetrou, Wieghaus, & Biercamp, 2010)

4.1.5 Αφαλάτωση με ηλιακή ενέργεια

4.1.5.1 Γενικά

Η διάταξη συλλογής της ηλιακής ενέργειας, όπως αναφέρεται παραπάνω, αναφορικά με τη μέθοδο που εφαρμόζεται για την παραγωγή πόσιμου νερού, διακρίνεται στις ακόλουθες δύο κατηγορίες:

- (1) Άμεσα συστήματα, και
- (2) Έμμεσα συστήματα.

Τα άμεσα συστήματα είναι απλά συστήματα αποτελούμενα από μία διάταξη, η οποία διαδραματίζει παράλληλα το ρόλο της μονάδας αφαλάτωσης και της συλλογής της ηλιακής ενέργειας. Η μόνη τεχνική που ανήκει στην κατηγορία αυτή είναι ο ηλιακός αποστακτήρας (solar still).

Αντίθετα, τα έμμεσα συστήματα αποτελούνται από δύο διακριτά συστήματα:

- (α) τη μονάδα συλλογής της ηλιακής ενέργειας και
- (β) τη μονάδα αφαλάτωσης.

Τα συστήματα αυτά μπορούν να συνδυαστούν με τις πλέον δοκιμασμένες τεχνικές αφαλάτωσης, όπως για παράδειγμα με την πολυβάθμια εκτόνωση (MSF) και την αντίστροφη όσμωση (RO).

Για τη συλλογή της ηλιακής ενέργειας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες τεχνολογίες:

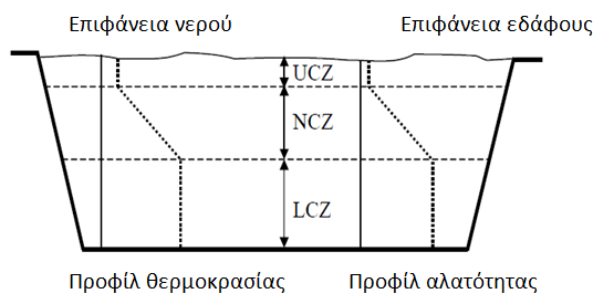
- (1) Ηλιακοί συλλέκτες,
- (2) Ηλιακή λίμνη και
- (3) Φωτοβολταϊκά πάνελ.

Οι ηλιακοί συλλέκτες και τα φωτοβολταϊκά πάνελ αποτελούν τις πλέον χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες, κατέχοντας ποσοστό ίσο προς 36% και 34% αντίστοιχα (βλέπε Σχήμα 4-25). Στην ακόλουθη ενότητα εξετάζονται οι τεχνολογίες αυτές συλλογής ηλιακής ενέργειας.

4.1.5.2 Τεχνολογίες συλλογής ηλιακής ενέργειας

(α) Ηλιακή λίμνη

Η αρχή λειτουργίας της ηλιακής λίμνης βασίζεται στην ανάπτυξη τριών διακριτών στρωμάτων, στα οποία η αλατότητα αυξάνει με το βάθος, όπως αποτυπώνεται στο ακόλουθο σχήμα:



- Άνω ζώνη συναγωγής, upper convective zone (UCZ),
- Ζώνη μεταβαλλόμενης συγκέντρωσης άλατος, non-convective zone (NCZ), και
- Κάτω ζώνη συναγωγής, lower convective zone (LCZ).

Η τεχνική αυτή έχει πολύ λίγες εφαρμογές. Αξίζει να σημειωθεί μία αξιόλογη εφαρμογή από την εταιρεία Atlantis. Στην εφαρμογή αυτή η ηλιακή λίμνη χρησιμοποιείται για να αντιμετωπίσει τις διακυμάνσεις παροχής ενέργειας (λόγω της φύσης της ηλιακής ενέργειας), με την τεχνική *MSF*, η οποία απαιτεί μικρές αποκλίσεις από το σημείο λειτουργίας της.

(β) Ηλιακοί συλλέκτες

Οι ηλιακοί συλλέκτες αποτελούν ένα ειδικό τύπο εναλλάκτη θερμότητας, ο οποίος μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε εσωτερική ενέργεια (θερμική ενέργεια) του εργαζόμενου μέσου. Πρακτικά, το εργαζόμενο μέσο αποτελεί ένα κατάλληλο ρευστό μέσο (συνήθως αέρα, νερό ή κάποιο έλαιο), το οποίο αφαιρεί τη θερμότητα που παράγεται από την ηλιακή ακτινοβολία, από τη φέρουσα κατασκευή. Διακρίνουμε τους ακόλουθους δύο τύπους ηλιακών συλλεκτών:

- (1) οι στατικοί (*stationary*) ή μη συγκεντρωτικοί (*non-concentrating*) συλλέκτες και
- (2) οι συγκεντρωτικοί (*concentrating*) συλλέκτες ή συλλέκτες «ανίχνευσης» (*tracking*) της πορείας του ήλιου.

Στους στατικούς συλλέκτες η επιφάνεια ανάκλασης και η επιφάνεια συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας συμπίπτουν, ενώ αντίθετα στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες η επιφάνεια ανάκλασης διαθέτει καμπύλη (κυρτή ή κοίλη), στην οποία προσπίπτουν οι

ηλιακές ακτίνες και κατόπιν συγκλίνουν σε μία περιοχή (εστία) γραμμική ή σημειακή, μικρότερης επιφάνειας (λόγος συγκέντρωσης, *concentration ratio*), επιτυγχάνοντας έτσι υψηλότερες τιμές πυκνότητας εντάσεως της ακτινοβολίας. Οι τύποι των ηλιακών συλλεκτών, μαζί με το λόγο συγκέντρωσης και το επιτυγχανόμενο θερμοκρασιακό εύρος δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 4-6: Τύποι ηλιακών συλλεκτών

Κίνηση	Τύπος συλλέκτη	Τύπος απορροφητήρας	Λόγος συγκέντρωσης	Ενδεικτικό θερμοκρασιακό εύρος (°C)
Στατικοί	FPC	Επίπεδος	1	30-80
	ETC	Επίπεδος	1	50-200
	CPC	Σωλήνωση	1-5	60-240
Ανίχνευση ηλίου ενός άξονα (Single axis tracking)	CPC	Σωλήνωση	5-15	60-300
	LFR	Σωλήνωση	10-40	60-250
	PTC	Σωλήνωση	15-45	60-300
	CTC	Σωλήνωση	10-50	60-300
Ανίχνευση ηλίου δύο αξόνων (Two- axis tracking)	PDR	Σημειακός	100-1,000	100-500
	HFC	Σημειακός	100-1,500	150-2,000

Σημείωση:

CPC: Compound Parabolic Collector **HFC:** Heliostat Field Collector

CTC: Cylindrical Trough Collector **LFR:** Linear Freshnel Reflector

ETC: Evacuated Tube Collector **PDR:** Parabolic Dish Reflector

FPC: Flat Plate Collector **PTC:** Parabolic Trough Collector

Πηγή: (Kalogirou, 2005)

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες διακρίνονται στις ακόλουθες δύο κατηγορίες, ανάλογα με τη γεωμετρία της εστίας στην οποία συγκεντρώνεται η ηλιακή ακτινοβολία:

- Γραμμική εστία: στην κατηγορία αυτή ανήκουν:

- τα παραβολικά κάτοπτρα ενός άξονα ανίχνευσης (Parabolic Trough Collectors, *PTC*),
- οι γραμμικοί ανακλαστήρες Freshnel (Linear Freshnel Reflector, *LFR*),
- Σημειακή εστία: στην κατηγορία αυτή ανήκουν:
 - Οι παραβολικοί δίσκοι (Parabolic Dish Reflector, *PDR*)
 - Το πεδίο ηλιοστατών συλλεκτών (Heliostat Field Collector, *HFC*)

Από τις παραπάνω τεχνολογίες κυρίως έχουν χρησιμοποιηθεί σε μονάδες αφαλάτωσης τα παραβολικά κάτοπτρα. Ωστόσο, σύγχρονη τάση αποτελεί η χρήση της τεχνολογίας συγκεντρωτικών συλλεκτών στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής (Concentrated Solar Power, CSP) και η αντικατάσταση της μονάδας συμπίκνωσης του κύκλου με μονάδα αφαλάτωσης, σχηματίζοντας έτσι υβριδικά συστήματα πολλαπλού οφέλους.

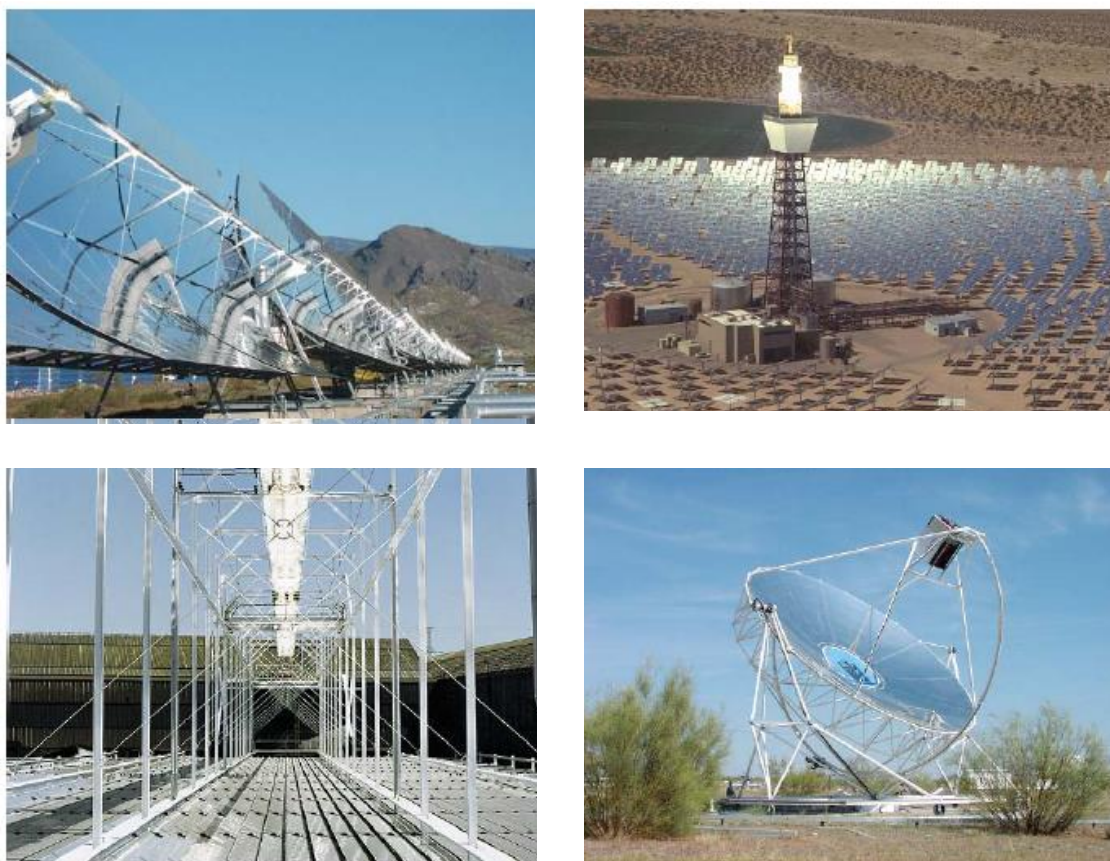
Εικόνα 4-2: Στατικοί συλλέκτες



Σημείωση: Flat Plate Collector (*FPC*, πάνω αριστερά);
Compound Parabolic Collector (*CPC*, κάτω αριστερά)
Evacuated Tube Collector (*ETC*, πάνω δεξιά)

Πηγή: <http://www.tgsenergy.co.uk>
<http://www.paradigma.de>

Εικόνα 4-3: Συγκεντρωτικοί συλλέκτες



Σημείωση: Parabolic Trough (*PTC*, πάνω αριστερά); Linear Fresnel Reflector (*LFR*, κάτω αριστερά); Heliostat Field Collector (*HFC*, πάνω δεξιά) και Parabolic Dish Reflector (*PDR*, κάτω δεξιά).

Πηγή: (AQUA-CSP, 2007)

Φωτοβολταϊκά

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούνται από έναν αριθμό φωτοβολταϊκών στοιχείων, τα οποία αποτελούν τη θεμελιώδη ενεργειακή μονάδα ενός φωτοβολταϊκού πάνελ. Αν και η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς ενός πάνελ κυμαίνεται μεταξύ 50-200 Watts (W), οποιαδήποτε επιθυμητή ισχύς μπορεί να επιτευχθεί ενώνοντας τον κατάλληλο αριθμό πάνελ σε συστοιχία, κάτι το οποίο προσφέρει σημαντική ευελιξία (modularity) στα συστήματα αυτά. Τα βασικά μέρη που απαρτίζουν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα είναι το πάνελ, οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές και οι ανορθωτικές διατάξεις (inverters).

Διάφοροι τύποι φωτοβολταϊκών πάνελ έχουν αναπτυχθεί με ποικιλία τεχνικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών. Ωστόσο, οι εμπορικές τεχνολογίες μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής δύο ευρείες κατηγορίες:

- Κρυσταλλικού πυριτίου (Wafer based crystalline silicon, c-Si)
- Λεπτών υμενίων (Thin films).

Μία λεπτομερή λίστα από τους πλέον κοινούς τύπων φωτοβολταϊκών στοιχείων που χρησιμοποιούνται εμπορικά σήμερα παρουσιάζεται στον Πίνακα 5-6, ενώ οικονομικά και τεχνικά χαρακτηριστικά στοιχεία για το σύνολο των φωτοβολταϊκών στοιχείων που έχουν αναπτυχθεί (ακόμα και σε ερευνητικό επίπεδο) δίνεται στο Σχήμα 4-27.

Πίνακας 4-7: Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τύπος φωτοβολταϊκού στοιχείου		Χαρακτηριστικά	
		Πάχος	Απόδοση (%)
Κρυσταλλικού πυριτίου	Μονοκρυσταλλικού πυριτίου	0.2-0.3mm	15-18
	Πολυκρυσταλλικού πυριτίου	0.24-0.3 mm	13-16
Λεπτών υμενίων (Thin-layer cells)	Άμορφου πυριτίου	0.3 - 2μm	5-7
	Χαλκού–Ινδίου–Δισεληνίου, CuInSe ₂		9-11
	Χαλκού–Ινδίου–Γαλλίου-Δισεληνίου		-
	Κάδμιου - Τελλούριου		7-8.5
	Φωτοηλεκτροχημικά στοιχεία		-
Υβριδικά (Hybrid HIT cells)	Συνδυασμός μονοκρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου	0.2mm	18.5%

Πηγή: (GreenPro project, 2008)

4.1.5.3 Μελέτες περιπτώσεων εφαρμογής αφαλάτωσης με ηλιακή ενέργεια

Έχοντας εξετάσει τους πιθανούς συνδυασμούς διαφόρων τεχνικών αφαλάτωσης και των τεχνολογιών συλλογής ηλιακής ενέργειας, στη συνέχεια εξετάστηκαν σε μεγαλύτερο βάθος μελέτες περιπτώσεων από τους συνδυασμούς εκείνους που φαίνεται πως είναι οι πιο υποσχόμενοι (Πίνακας 4-8).

Πίνακας 4-8: Πιθανοί συνδυασμοί τεχνολογιών συλλογής ηλιακής ενέργειας με τεχνικές αφαλάτωσης

Τεχνική αφαλάτωσης	Στατικοί συλλέκτες	Συγκεντρωτικοί		Φωτοβολταϊκά	Ηλιακή λίμνη
		Θερμική	Ηλεκτρική		
SD	✓				
MEH	✓	✓			
MD	✓	✓			
TVC		✓			
MSF		✓			✓
MED	✓	✓			
ED			✓	✓	
MVC			✓	✓	
RO			✓	✓	

Προσαρμοσμένο από (Papapetrou, Wieghaus, & Biercamp, 2010)

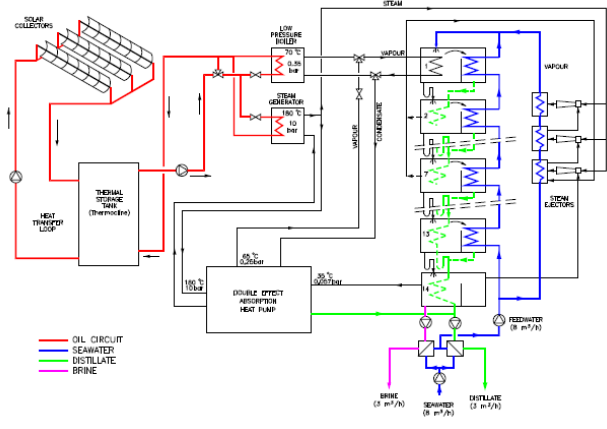
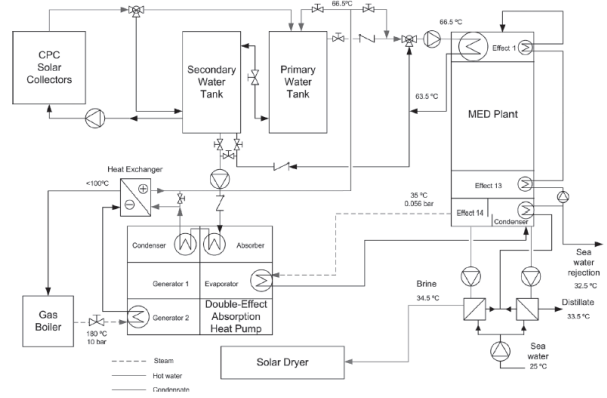
Πιο συγκεκριμένα αναλύθηκαν συνολικά επτά (7) μελέτες περίπτωσης (βλ. Case study 4):

1. Solar MEH: Jeddah, Σαουδική Αραβία
2. Solar MD: Gran Canaria, Ισπανία
3. Solar MED: Almeria, Spain
- 4-7. Solar PV: Μαρόκο

Στο Πίνακα 4-9 συνοψίζονται τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των 4 περιπτώσεων PV-RO.

Case study 4: Τεχνικά, λειτουργικά και οικονομικά χαρακτηριστικά 7 μελετών περίπτωσης αφαλατώσεων με ηλιακή ενέργεια

Τεχνική	Τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά	Κόστος	Παραδείγματα εφαρμογής
Solar MEH	• Τοποθεσία: Jeddah, Σαουδική Αραβία • Νερό τροφοδοσίας: Υφάλμυρο νερό • Δυναμικότητα: 5,000m³/ ημέρα • Τύπος συλλέκτη: FPC, • Επιφάνεια συλλέκτη: 175m² • Συνολική απαιτούμενη επιφάνεια: 250m² • Έτος εγκατάστασης: 2008 • Τύπος εγκατάστασης: εμπορική εφαρμογή • Ειδικά χαρακτηριστικά: εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ (8.3 KW_{peak}) για την τροφοδότηση των αντλιών	2-5 €/m³ (τυπικό εύρος)	
Solar MD	• Τοποθεσία: Gran Canaria, Ισπανία • Νερό τροφοδοσίας: Θαλασσινό νερό • Δυναμικότητα: 1.6 m³/ ημέρα • Τύπος συλλέκτη: FPC, • Επιφάνεια συλλέκτη: 90m² • Έτος εγκατάστασης: 2006 • Τύπος εγκατάστασης: εμπορική εφαρμογή • Ειδικά χαρακτηριστικά: εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ (8.3 KW_{peak}) για την τροφοδότηση των αντλιών	8-15 €/m³ (τυπικό εύρος)	

Τεχνική	Τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά	Κόστος	Παραδείγματα εφαρμογής
Solar MED	• Τοποθεσία: PSA, Almeria, Ισπανία • Νερό τροφοδοσίας: Θαλασσινό νερό • Δυναμικότητα: 72 m³/ ημέρα • Τεχνική αφαλάτωσης: MED (14 βαθμίδες) • Τύπος συλλέκτη: PTC (πρώτη φάση), CPC (δεύτερη φάση) • Επιφάνεια συλλέκτη: 2672m² PTC (πρώτη φάση), 500 m² CPC (δεύτερη φάση) • Χρήση διάταξης αποθήκευσης: δεξαμενή αποθήκευσης θερμού ελαίου χωρητικότητας 155m³ • Θερμική αδράνεια: παρατηρούμενος χρόνος για πλήρες φορτίο: 35min • Ειδική ηλεκτρική κατανάλωση: 3.3 to 5 kWh/m³ • Performance ratio: 10 - 12 • Έτος εγκατάστασης: 1987, 2002 (δεύτερη φάση) • Τύπος εγκατάστασης: έρευνα& ανάπτυξη (R&D) • Ειδικά χαρακτηριστικά: (α) εγκατάσταση θερμικού συμπιεστή, (β) εγκατάσταση αντλίας θερμότητας. Με την εφαρμογή αυτών των παρεμβάσεων κατά τη δεύτερη φάση, παρατηρήθηκε: (α) μείωση κατά 44% των θερμικών αναγκών της εγκατάστασης, δηλαδή από 63 στα 36 kWh/m³ και (β) μείωση της ηλεκτρικής κατανάλωσης κατά 12%, δηλαδή από 3.3 στα 2.9 kWh/m³. Τέλος, στο σύστημα αυτό εγκαταστάθηκε ξηραντήρας για την επεξεργασία του ρεύματος της παραγόμενης	1.8-2.2 €/m ³ (τυπικό εύρος)	 

Τεχνική	Τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά	Κόστος	Παραδείγματα εφαρμογής
	άλμης από τη μονάδα αφαλάτωσης.		
PV-RO	• Τοποθεσία: Amellou, Μαρόκο • Νερό τροφοδοσίας: Υφάλμυρο νερό • Δυναμικότητα: 24 m³/ ημέρα • Ισχύς φωτοβολταϊκών: 4 KW_{peak} • Έτος εγκατάστασης: 2008 • Τύπος εγκατάστασης: R&D	5.45 €/m ³	
	• Τοποθεσία: Tazekra, Μαρόκο • Νερό τροφοδοσίας: Υφάλμυρο νερό (πηγάδι) • Δυναμικότητα: 24 m³/ ημέρα • Ισχύς φωτοβολταϊκών: 4 KW_{peak} • Έτος εγκατάστασης: 2008 • Τύπος εγκατάστασης: R&D	3.99 €/m ³	

Τεχνική	Τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά	Κόστος	Παραδείγματα εφαρμογής
	• Τοποθεσία: Tangarfa, Μαρόκο • Νερό τροφοδοσίας: Υφάλμυρο νερό (πηγάδι) • Δυναμικότητα: 12 m³/ ημέρα • Ισχύς φωτοβολταϊκών: 2.5 KW_{peak} • Έτος εγκατάστασης: 2008 • Τύπος εγκατάστασης: R&D	7.01 €/m ³	
	• Τοποθεσία: Azla, Μαρόκο • Νερό τροφοδοσίας: Υφάλμυρο νερό (πηγάδι) • Δυναμικότητα: 24 m³/ ημέρα • Ισχύς φωτοβολταϊκών: 4 KW_{peak} • Έτος εγκατάστασης: 2008 • Τύπος εγκατάστασης: R&D	4.71 €/m ³	

Πηγή: (SOL-BRINE, Report on the evaluation of desalination systems driven by renewable energy sources: focus on solar energy systems used in different desalination applications, 2012)

Πίνακας 4-9: Σύνοψη τεχνικών χαρακτηριστικών για τις μελέτες περιπτώσεων PV-RO

		Azla	Tazekra	Amellou	Tangafra
Τμήμα νερού	Περιεκτικότητα άλατος νερού τροφοδοσίας [g/l]	2.4	8.2	2.9	2.9
	Δυναμικότητα [m^3/h]	1	1	1	0.5
	Συντελεστής ανάκτησης [%]	76.7	65	76.7	76.7
	Αγωγιμότητα παραγόμενου νερού [ppm]	335	630	508	332
	Πίεση λειτουργίας [bar]	8.4	14.7	10.3	14.5
	Ηλεκτρική κατανάλωση [kWh/m^3]	0.53	0.8	0.71	1.28
	Χωρητικότητα δεξαμενής πόσιμου νερού [m^3]	25	25	20	25
	Επιφάνεια ηλιακής λίμνης (επεξεργασία παραγόμενης άλμης) [m^2]	100	100	100	100
Τμήμα ενέργειας	Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών [kWp]	4	4	4	2.5
	Αριθμός πανελ [-]	32	32	32	20
	Επιφάνεια φωτοβολταϊκών [m^2]	33	33	33	19
	Συνεχής τάση DC [V]	48	48	48	48
	Δυναμικότητα ηλεκτρικών συσσωρευτών [Ah] (Περίοδος εκφόρτισης: 10 h)	650	650	650	450
	Απαιτούμενη εναλλασσόμενη ισχύς [kW]	1.2	1.5	1.7	1.0
	Συνολική επιφάνεια που καλύπτεται από το σύστημα [m^2]	160	160	180	160

Πηγή: (SOL-BRINE, Report on the evaluation of desalination systems driven by renewable energy sources: focus on solar energy systems used in different desalination applications, 2012)

4.1.6 Οικονομικά στοιχεία

Στην ενότητα αυτή, παρέχονται κάποια οικονομικά στοιχεία τόσο για τις μεθόδους αφαλάτωσης, όσο και για τα συστήματα συλλογής ηλιακής ενέργειας.

Μέθοδοι αφαλάτωσης/επεξεργασίας της άλμης

- Κόστος επένδυσης: Πίνακας 4-10
- Λειτουργικό κόστος: Διάγραμμα 4-1

Αναφορικά με την επεξεργασία της άλμης, λήφθηκαν υπόψη τα ακόλουθα:

- Η συνολική δαπάνη σε τεχνολογίες απομάκρυνσης των ολικών διαλυμένων στερεών από τα υγρά απόβλητα (Διάγραμμα 4-2). Η παράμετρος αυτή μπορεί να αποτελέσει μία ένδειξη για την αποτελεσματικότητα της εκάστοτε τεχνολογίας στο πεδίο επεξεργασίας των αποβλήτων και ως εκ τούτου και της άλμης.

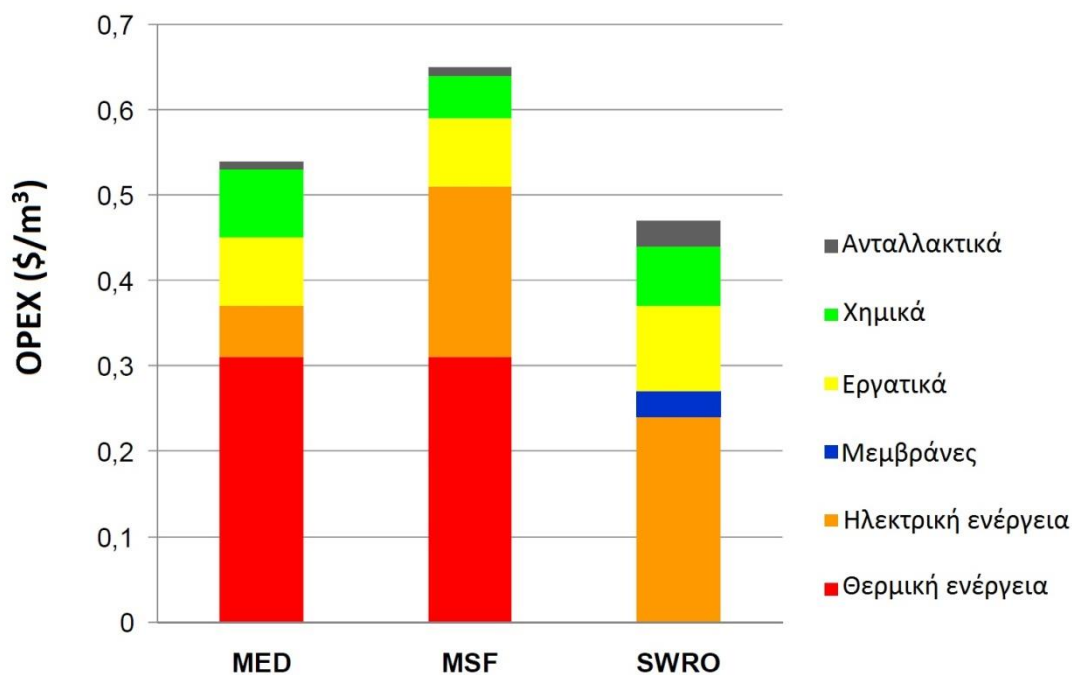
Ηλιακό σύστημα:

- Κόστος των διάφορων φωτοβολταϊκών τεχνολογιών (βλέπε Σχήμα 4-27)
- Κόστος ανά μονάδα προϊόντος (παραγόμενου νερού) για τους συνδυασμούς τεχνολογιών αφαλάτωσης με τις τεχνολογίες συλλογής ηλιακής ενέργειας (βλ. Πίνακα 4-11).

Πίνακας 4-10: Βασικά τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά ανά τεχνική αφαλάτωσης

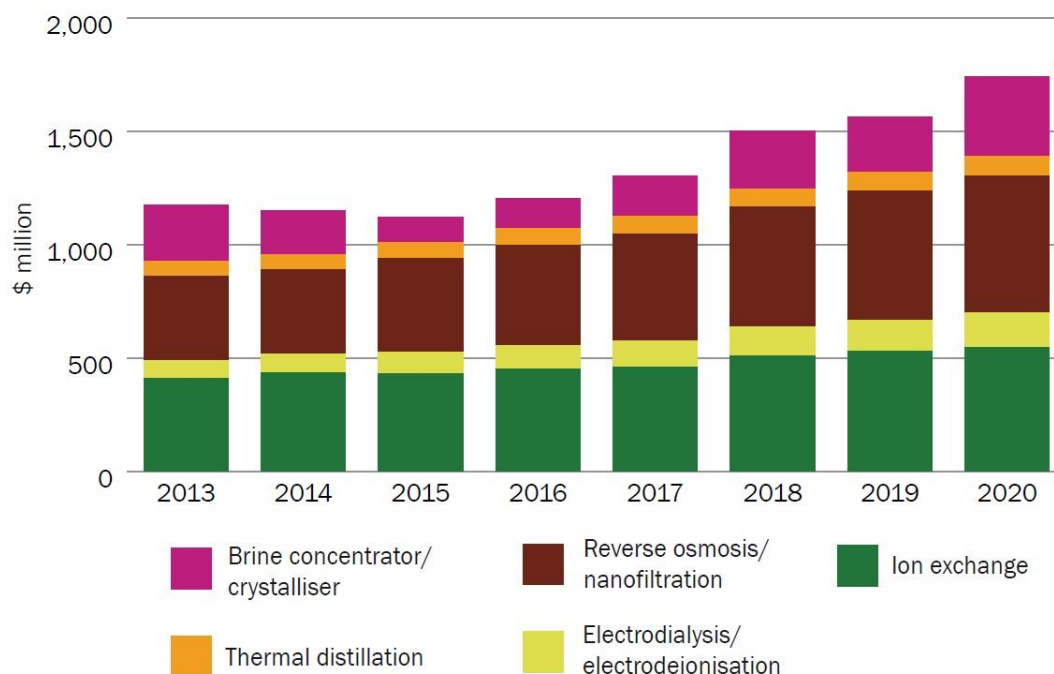
Ενέργεια Παράμετρος		Θερμική		Μηχανική	
		MSF	MED/TVC	MVC	RO
Θερμικές απαιτήσεις	kJ/kg	250-330	145-390	-	-
Ηλεκτρική κατανάλωση	kWh/m ³	3-5	1.5-2.5	8-15	2.5-7
Ειδικό κόστος	\$/m ³ /d	1,500-2,000	900-1,700	1,500-2,000	900-1,500
Χρόνος εγκατάστασης	μήνες	24	18-24	12	18
Δυναμικότητα μονάδας	m ³ /d	<76,000	<36,000	<3,000	<20,000
Λόγος ανάκτησης	%	10-25%	23-33%	23-41%	20-50%

Προσαρμοσμένο από (AQUA-CSP, 2007)



Προσαρμοσμένο από (FICHTNER, 2011)

Διάγραμμα 4-1: Ανηγμένο λειτουργικό κόστος εμπορικών μεθόδων αφαλάτωσης διαλυμένων στερεών, 2013-2020



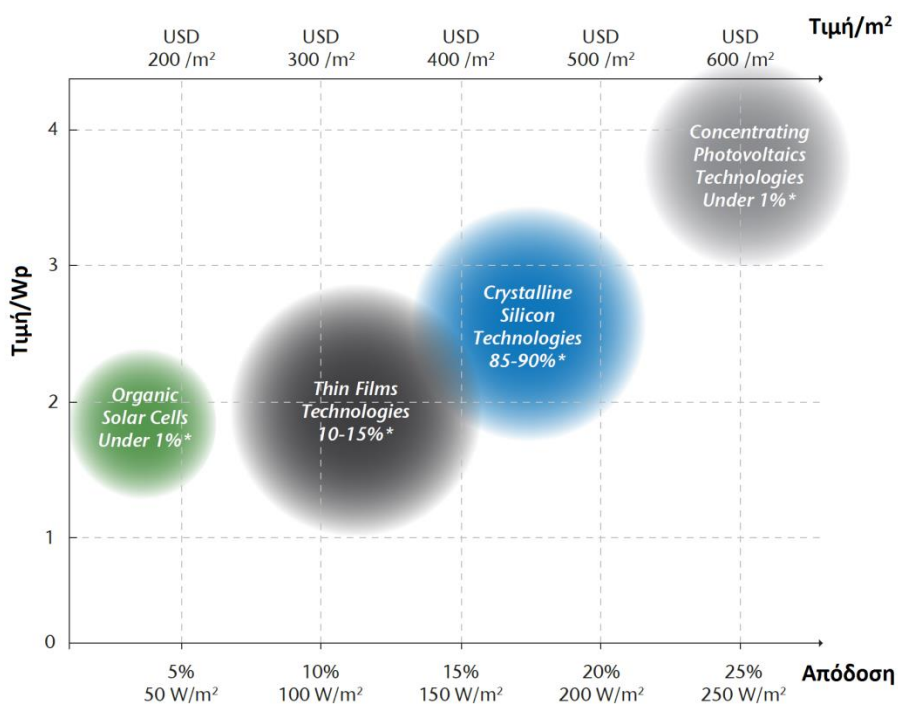
Προσαρμοσμένο από (Allen, και συν., 2015)

Διάγραμμα 4-2: Συνολική δαπάνη παγκοσμίως σε τεχνολογίες απομάκρυνσης

Πίνακας 4-11: Οικονομικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των πιο κοινών τεχνολογιών ηλιακής αφαλάτωσης

	Δυναμικότητα (m ³ /ημέρα)	Ενεργειακές ανάγκες	Κόστος παραγωγής νερού (€/m ³)	Τεχνικό στάδιο ανάπτυξης
Solar Still	< 0.1	Παθητική ηλιακή	1-5	Εφαρμογή
Solar MEH	1-100	Θερμική: 100 kWh/m ³ Ηλεκτρική: 1.5 kWh/m ³	2-5	Εφαρμογή/ προηγμένο R&D
Solar MD	0.15 - 10	Θερμική: 150-200 kWh/m ³	8-15	προηγμένο R&D
CSP-MED	>5,000	Θερμική: 60-70 kWh/m ³ Ηλεκτρική: 1.5-2 kWh/m ³	1.8 – 2.2	προηγμένο R&D
PV-RO	< 100	Ηλεκτρική: BW: 0.5-1.5 kWh/m ³ SW: 4-5 kWh/m ³	5-7	Εφαρμογή/ προηγμένο R&D
PV-EDR	< 100	Ηλεκτρική: BW: 3-4 kWh/m ³	8-9	προηγμένο R&D

Προσαρμοσμένο από (Papapetrou, Wieghaus, & Biercamp, 2010)



Πηγή: (Frankl, 2010)

Σχήμα 4-27: Απόδοση και κόστος των διάφορων φωτοβολταϊκών τεχνολογιών

4.1.7 Συμπεράσματα – Συζήτηση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η διδακτορική διατριβή αυτή, εξετάζει μόνο τις θερμικές τεχνικές και ως εκ τούτου οι τεχνικές μεμβρανών είναι εκτός του σκοπού αυτής της έρευνας. Παρόλα αυτά, εντοπίστηκαν διάφορες τεχνικές μεμβρανών οι οποίες μπορούν να συνδυαστούν κατάλληλα με τις θερμικές τεχνικές προκειμένου να πετύχουν καλύτερα (ή διαφορετικά) αποτελέσματα. Για παράδειγμα οι τεχνικές ηλεκτροδιάλυσης (και Ηλεκτροδιάλυσης Μετάθεσης), όπως επίσης και η Νανοδιήθηση φαίνεται πως αποτελούν πολύ καλά παραδείγματα για συνδυασμό με τις θερμικές τεχνικές, προκειμένου να επιτευχθεί παραγωγή τελικού προϊόντος (στερεών αλάτων) υψηλών προδιαγραφών. Σήμερα, οι θερμικές τεχνικές χρησιμοποιούνται σε συγκεκριμένες εφαρμογές για την εξάλειψη αποβλήτων με υψηλά επίπεδα διαλυμένων στερεών. Το στερεό υπόλειμμα αυτής της τεχνικής είναι ένα παραπροϊόν, το οποίο δεν μπορεί να αξιοποιηθεί εμπορικά και ως εκ τούτου πρέπει να διαχειριστεί ως απόβλητο. Ο κατάλληλος συνδυασμός τεχνικών μεμβρανών και θερμικών τεχνικών μπορεί να οδηγήσει σε ανάκτηση υλικών υψηλής καθαρότητας. Το συμπέρασμα αυτό συζητείται εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 7.2, όπου διατυπώνονται οι προτάσεις μελλοντικής έρευνας.

Εξατμιστήρας:

Ο εξατμιστήρας αποτελεί το πρώτο στάδιο επεξεργασίας της παραγόμενης άλμης. Έπειτα από την εξέταση των διαφόρων θερμικών τεχνικών, τρεις αναδείχθηκαν ως υποψήφιες: (α) Απόσταξη με πολλαπλές βαθμίδες, MED (βλέπε Ενότητα 4.1.3.1), (β) Απόσταξη με Εκτόνωση, MSF (βλέπε Ενότητα 4.1.3.2) και (γ) Συμπυκνωτής άλμης, BC (βλέπε Ενότητα 4.1.3.4).

Η BC είναι μία τεχνική ευρέως διαδεδομένη στις διατάξεις ZLD. Οι κύριες εφαρμογές είναι για υγρά απόβλητα από μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Επίσης, σύμφωνα με το Global Water Intelligence, η ζήτηση της BC στην αγορά τεχνικών επεξεργασίας υγρών αποβλήτων εκτιμάται πως βαίνει αυξανόμενη (βλέπε Διάγραμμα 4-2), φανερώνοντας τη σημασία της τεχνικής στον τομέα. Ωστόσο, η τεχνική αυτή παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα, με βασικότερη την υψηλή ενεργειακή κατανάλωση. Στις μονοβάθμιες αυτές διατάξεις, αν και εφαρμόζονται τεχνικές αύξησης της ενεργειακής αποδοτικότητας όπως για παράδειγμα η μηχανική επανασυμπίεση ατμών, η κατανάλωση ενέργειας παραμένει σε υψηλά επίπεδα. Επίσης, η αγορά αυτή παρουσιάζει υψηλό συγκεντρωτικό χαρακτήρα και είναι

σχετικά ώριμη, αφήνοντας μικρές δυνατότητες για ανάπτυξη καινοτομιών. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η BC απορρίφθηκε κατά τον αρχικό σχεδιασμό.

Οι τεχνικές MSF και MED προκρίνονται ως πιο κατάλληλες. Η MSF αποτελεί μία τεχνική ευρέως διαδεδομένη, κατέχοντας αρκετά μεγαλύτερο μερίδιο στην αγορά αφαλάτωσης. Για το λόγο αυτό, η τεχνολογική ωριμότητα της τεχνολογίας είναι υψηλότερη (βλέπε επίσης Σχήμα 4-29) και ως εκ τούτου θεωρείται και ως μία πιο αξιόπιστη μέθοδος σε σύγκριση με την MED. Ωστόσο, η MED έχει υψηλότερο θερμοδυναμικό βαθμό απόδοσης. Η ηλεκτρική κατανάλωση (ειδικά για την περίπτωση συνδυασμού με θερμικό συμπιεστή ατμού) για την MED είναι της τάξης $1.5 - 2.5 \text{ kWh/m}^3$ (βλ. επίσης Πίνακα 4-10), ενώ αντίθετα για την MSF $3 - 5 \text{ kWh/m}^3$, λόγω των υψηλών απαιτήσεων ανακυκλοφορίας. Το ίδιο ισχύει και για τη θερμικές απαιτήσεις, οι οποίες για την MED είναι $145-390 \text{ kJ/kg}$ και για την MSF $250-330 \text{ kJ/kg}$. Επίσης, λόγω της δυνατότητας χρήσης ατμού χαμηλότερης ενθαλπίας, συνδυάζεται καλύτερα με σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, αντικαθιστώντας το κρύο άκρο του κύκλου. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4-28, η MED μπορεί να μειώσει μέχρι και 10% την παραγωγή ισχύος σε μία μονάδα ηλεκτροπαραγωγής, ενώ η MSF μέχρι και 30%. Σε περίπτωση συνδυασμού με κύκλο ηλεκτροπαραγωγής, πρέπει να συνυπολογιστεί και η απώλεια (μη παραγωγή) ηλεκτρικής ενέργειας στο σταθμό ηλεκτροπαραγωγής της τάξης των $6-8 \text{ kWh/m}^3$. Η μείωση της παραγόμενης ενέργειας οφείλεται στο γεγονός ότι ο ατμοστρόβιλος αναγκάζεται να αποτονώσει ατμό σε υψηλότερες συνθήκες για να συνδυαστεί με τη μονάδα αφαλάτωσης. Επίσης, στην περίπτωση που η μονάδα MSF λειτουργεί σε top brine temperature μεγαλύτερης των 100°C πρέπει να χρησιμοποιηθούν ειδικοί ατμοστρόβιλοι αντίθλιψης (AQUA-CSP, 2007). Δεδομένου ότι το σύστημα θα σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορεί να κάνει χρήση θερμότητας χαμηλής στάθμης (είτε ηλιακή ενέργεια είτε απορριπτόμενη θερμότητα), αυτή είναι μία κρίσιμη παράμετρος. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω η MSF απορρίφθηκε και έτσι η MED προκρίθηκε κατά τον αρχικό σχεδιασμό.

Επίσης, σημειώνεται ότι η θερμική αφαλάτωση, αν και παρουσιάζει σημαντικές ομοιότητες, είναι σημαντικά διαφορετική από άλλες βιομηχανικές εφαρμογές απόσταξης ή εξάτμισης κυρίως στα ακόλουθα δύο (2) σημεία (Tonner, 2008):

- **Μέγεθος:** τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται για την αφαλάτωση νερού με θερμικό τρόπο είναι μεγάλες σε όγκο. Συχνά απαιτούν τουλάχιστον 100 μέτρα, ζυγίζουν χιλιάδες μετρικούς τόνους και παράγουν περίπου $75,000 \text{ m}^3$

από μία μόνο μονάδα. Ένα τυπικό σύστημα θερμικής αφαλάτωσης μπορεί να περιλαμβάνει έξι (6) ή περισσότερες τέτοιες μονάδες σε σειρά. Οι περισσότεροι εξατμιστήρες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία (π.χ. στη χημική βιομηχανία ή γενικότερα στη βιομηχανία μεταποίησης) λειτουργούν σε σημαντικά μικρότερη δυναμικότητα (συνήθως με ρευστά υψηλότερης αξίας).

- **Θερμοδυναμική απόδοση:** Η θερμοδυναμική απόδοση των εξατμιστήρων που χρησιμοποιούνται συνήθως στη βιομηχανία είναι μεταξύ 1 και 4:1. Υπάρχουν συστήματα θερμικής αφαλάτωσης με τέτοια θερμοδυναμική απόδοση. Τα συστήματα αυτά με τους βιομηχανικούς εξατμιστήρες είναι τόσο όμοια που διαφέρουν μόνο στα χρησιμοποιούμενα υλικά κατασκευής τους.

Αναφορικά με τη διάταξη του MED, δύο επιλογές εξετάστηκαν: (α) η παράλληλη τροφοδοσία και (β) η εμπρόσθια τροφοδοσία (βλ. επίσης Ενότητα 4.1.3.1). Στις εφαρμογές αφαλάτωσης χρησιμοποιείται κατά αποκλειστικότητα η διάταξη παράλληλης τροφοδοσίας. Ωστόσο, η επεξεργασία της άλμης αποτελεί μία τελείως διαφορετική διεργασία, δεδομένου ότι ο στόχος της είναι η αύξηση της συγκέντρωσης και όχι η παραγωγή νερού. Ως εκ τούτου, η παράλληλη τροφοδοσία δεν προσφέρεται για κάτι τέτοιο. Επίσης, η χρήση της διάταξης εμπρόσθιας τροφοδοσίας σε πολύ περιορισμένες εφαρμογές αφήνει το περιθώριο για νέα έρευνα και καινοτομία. Τέλος, η διάταξη αυτή μπορεί να προσφέρει σημαντικά για την κλασματική κρυστάλλωση (Ενότητα 3.7) των αλάτων που είναι διαλυμένα στην άλμη. Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει στην επίτευξη τελικών προϊόντων υψηλής καθαρότητας.

Ως εκ τούτου, προκρίθηκε τελικά η εμπρόσθια τροφοδοσία για τον εξατμιστήρα MED του πιλοτικού συστήματος επεξεργασίας της άλμης.

Κρυσταλλωτήρας:

Ο κρυσταλλωτήρας αποτελεί το δεύτερο στάδιο επεξεργασίας της άλμης και μπορεί να είναι τύπου: (α) Μονοβάθμιος εξατμιστήρας με μηχανική επανασυμπίεση ατμών (βλ. επίσης Ενότητα 4.1.3.3), (β) Ευτηκτική κρυστάλλωση (βλ. επίσης Ενότητα 4.1.3.5) και (γ) Συμπυκνωτής άλμης/κρυσταλλωτήρας εξαναγκασμένης ροής (Μαύρος, 2009) (βλ. επίσης Ενότητα 4.1.3.4). Αναφορικά με τον Συμπυκνωτή Άλμης, για τους σκοπούς της κρυστάλλωσης χρησιμοποιείται συγκεκριμένα η

διάταξη εξαναγκασμένης ροής (forced circulation). Όπως συζητήθηκε και παραπάνω για τον εξατμιστήρα, ο συμπυκνωτής άλμης είναι μία τεχνική που εφαρμόζεται ήδη, με γνωστά μειονεκτήματα. Ανάμεσα στον εξατμιστήρα με μηχανική συμπίεση και στην ευτηκτική κρυστάλλωση επελέγη τελικά ο πρώτος, μιας και η ευτηκτική κρυστάλλωση έχει χαμηλό επίπεδο ωριμότητας (Σχήμα 4-29).

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας – Ηλιακή ενέργεια:

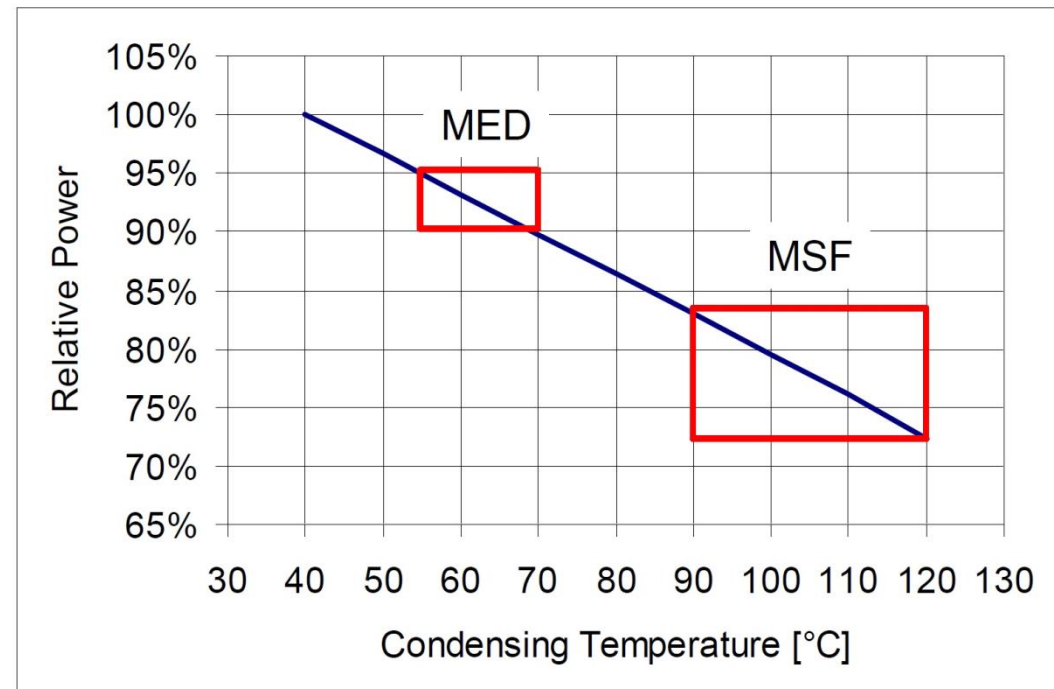
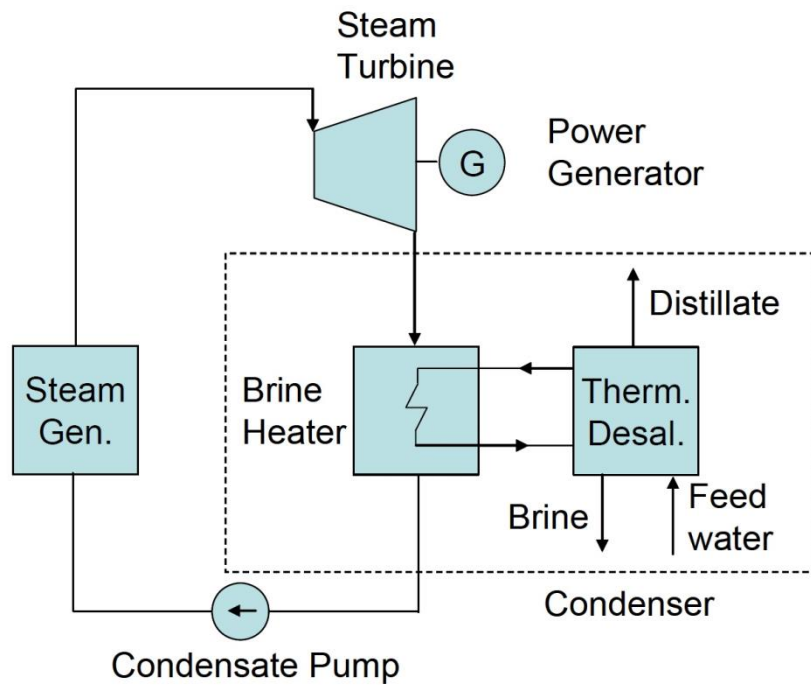
Η αφαλάτωση με ΑΠΕ αρχίζει και κερδίζει έδαφος και θεωρείται πλέον ως δοκιμασμένη και τεχνικά ώριμη τεχνολογία (Tzen & Morris, 2003), ενώ σύντομα αναμένεται πως θα γίνει μία ανταγωνιστική επιλογή για πολλές περιοχές ανά τον κόσμο. Οι διάφοροι συνδυασμοί RES-D έχουν παρουσιαστεί στην Ενότητα 4.1.4, με σημαντικότερους τους ακόλουθους:

- PV-RO (πλήθος εφαρμογών: 32%),
- Wind-RO (πλήθος εφαρμογών: 12%),
- Solar thermal – Thermal desalination techniques (πλήθος εφαρμογών: 35%).

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη ανανεώσιμη πηγή για την οδήγηση μονάδων αφαλάτωσης είναι η ηλιακή ενέργεια. Η αφαλάτωση με χρήση ηλιακής ενέργειας αποτελεί μία εφικτή και πολλά υποσχόμενη επιλογή. Οι περισσότεροι συνδυασμοί ηλιακής αφαλάτωσης [PV-RO, Solar MEH και Solar MED (περιλαμβάνοντας τεχνολογία CSP)] έχουν δοκιμαστεί επαρκώς, προσφέροντας έτσι τη δυνατότητα εφαρμογής σε συστήματα μεγάλης κλίμακας με ασφάλεια και επιτυχία (Ενότητα 4.1.5).

Δεδομένου ότι τα συστήματα MED συνδυάζονται με επιτυχία με τα παραβολικά κάτοπτρα (βλ. Σχήμα 4-24) και ιδιαίτερα για μεγάλη δυναμικότητα (βλ. Σχήμα 4-26), για την παροχή θερμικής ενέργειας προκρίνεται το σύστημα PTC.

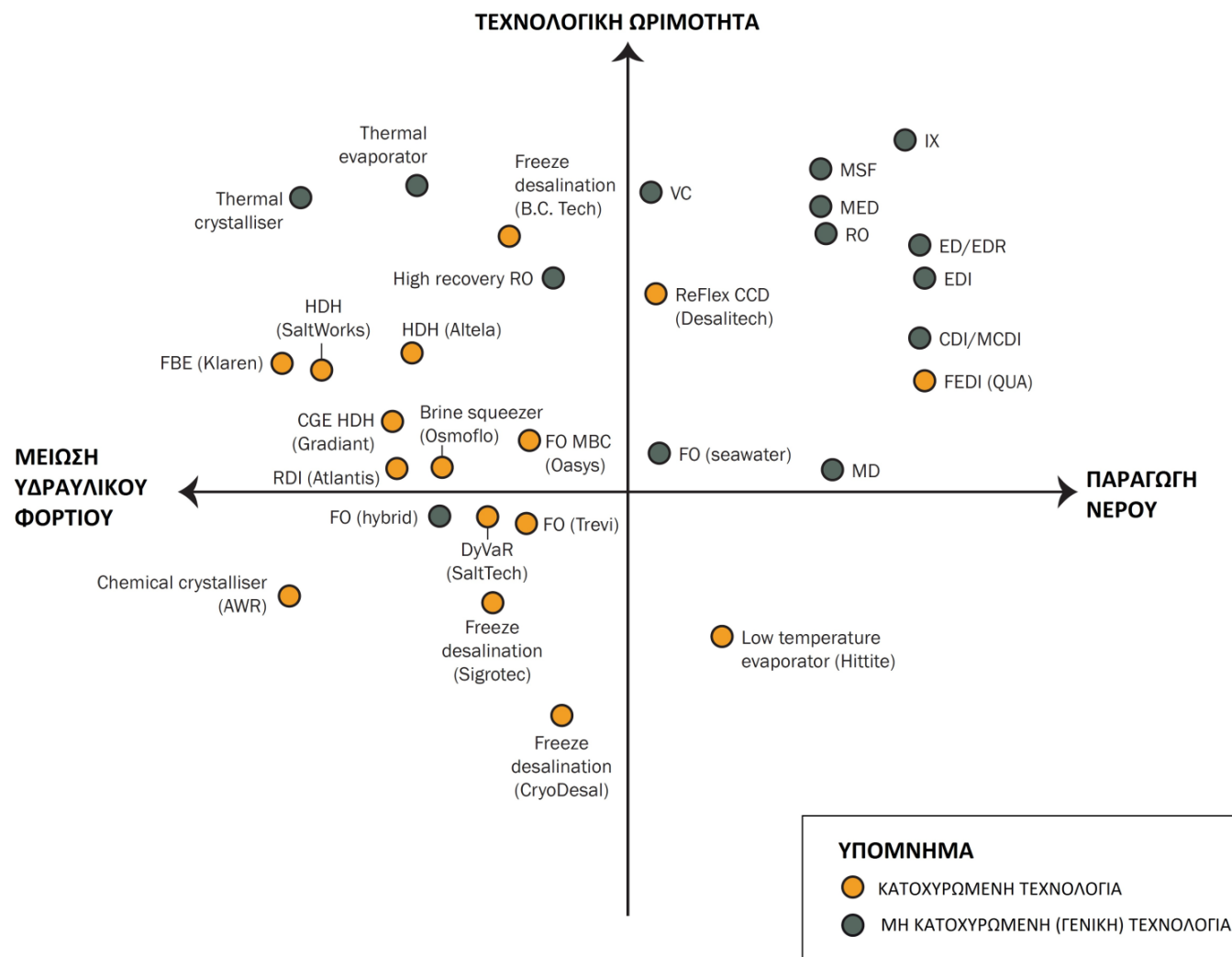
Αναφορικά με τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προκρίνονται τα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου.



Πηγή: (AQUA-CSP, 2007)

Σημείωση: τα κόκκινα τετράγωνα στο δεξί σχήμα αναπαριστούν τις τυπικές περιοχές λειτουργίας των τεχνικών MED και MSF.

Σχήμα 4-28: Τρόπος σύζευξης μία θερμικής τεχνικής με σταθμό ηλεκτροπαραγωγής (αριστερά) και τυπική μείωση της ισχύος ατμοστροβίλου με την αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης.



Προσαρμοσμένο από: (Allen, et al., 2015)

Σχήμα 4-29: Ωριμότητα και εφαρμογές διαφόρων τεχνολογιών απομάκρυνσης διαλυμένων στερεών

4.1.8 Τελικό διάγραμμα ροής

Έχοντας εξετάσει τις περισσότερες πιθανές τεχνολογίες επεξεργασίας της άλμης, επελέγη το διάγραμμα ροής που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-30.

Εξατμιστήρας:

- Τύπος του εξατμιστήρα που θα σχεδιαστεί: πολυβάθμια (3 βαθμίδες) εξάτμισης (Multiple Effect Distillation, MED).
- Φορέας θερμότητας: ατμός.
 - ο Στην πρώτη βαθμίδα διαβιβάζεται (χωρίς να αναμειγνύεται) ατμός που παράγεται είτε από ανανεώσιμη πηγή (ηλιακή ενέργεια)
 - ο Στις επόμενες βαθμίδες, διαβιβάζεται ο παραγόμενος ατμός από την προηγούμενη βαθμίδα εξάτμισης
- Πρόσδοση θερμότητας: συναλλαγή θερμότητας μεταξύ του θερμού ατμού και της άλμης τροφοδοσίας.
- Επιφάνεια συναλλαγής: επιφάνεια του αγωγού που οδηγεί το θερμό ρεύμα ατμού εντός του θαλάμου εξάτμισης.
- Η άλμη ψεκάζεται εντός του θαλάμου και σχηματίζεται λεπτό φιλμ νερού στην επιφάνεια των σωλήνων.
- Η πίεση μειώνεται σταδιακά από τη μία βαθμίδα στην επόμενη, διατηρώντας τους θαλάμους σε συνθήκες κορεσμού χαμηλότερης θερμοκρασιακής στάθμης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται αντλία κενού, προκειμένου να υποβιβαστεί η πίεση στους θαλάμους
- Η διάταξη της πολυβάθμιας εξάτμισης είναι ομορροής, αναφορικά με την κατεύθυνση του φορέα θερμότητας (ατμός) και του θερμαινόμενου μέσου (θαλασσινό νερό).
- Η διάταξη αυτή επελέγη με κριτήριο την καινοτομία της και τη δυνατότητα αύξησης της συγκέντρωσης της άλμης.

Κρυσταλλωτήρας

- **Τύπος:** μονοβάθμιας εξατμιστήρας με μηχανική επανασυμπίεση ατμών
- **Φορέας θερμότητας:** ο παραγόμενος ατμός επανασυμπιέζεται και θερμαίνει το εισερχόμενο ρεύμα συμπυκνωμένης άλμης.

Σε περίπτωση χρήσης παραβολικού κατόπτρου, θα υπάρχει πρόβλεψη σύνδεσης μέσω τρίοδης βάνας, με στόχο την απομάστευση ατμού σε περίπτωση ανάγκης. Το συμπυκνωμένο νερό θα χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του αέρα που εισέρχεται στη διάταξη ξήρανσης (βλ. Σχήμα 4-30).

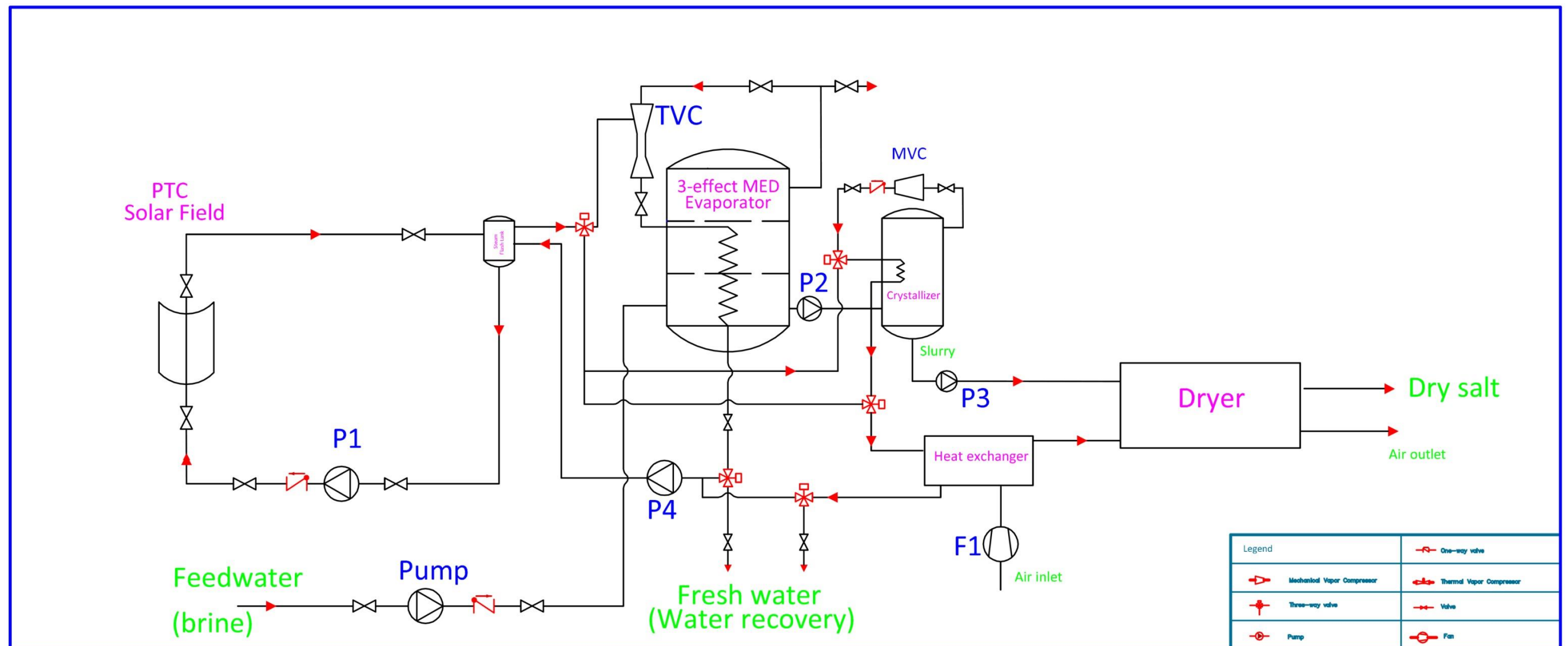
- **Εισερχόμενο ρεύμα άλμης:** έξοδος από την τελευταία βαθμίδα του εξατμιστήρα.
- Ολικά διαλυμένα στερεά: 26%
- Παροχή: ~ 500 λίτρα/ημέρα
- Λειτουργία υπό κενό

Ξηραντήρας

- **Τύπος:** Για την ξήρανση του υπολείμματος κρυστάλλωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ένας εκ των δύο (2) ακόλουθων τύπων ξηραντήρων: (α) τύπου δίσκων ή (β) ηλιακό ξηραντήριο. Ακολουθώς, δίνονται οι τεχνικές προδιαγραφές ανάλογα με τον τύπο της μονάδας ξήρανσης.
- **Φορέας θερμότητας:** Το συμπυκνωμένο νερό που θα ανακτάται από τον κρυσταλλωτήρα, θα χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του αέρα που εισέρχεται στη διάταξη ξήρανσης (βλ. Σχήμα 4-30). Στην περίπτωση του ηλιακού ξηραντηρίου δεν χρειάζεται κάποια επιπρόσθετη κατασκευή.

Ηλιακό σύστημα:

- Παραβολικά κάτοπτρα για την παραγωγή ατμού, και
- Φωτοβολταϊκά πάνελ, μονοκρυσταλλικού πυριτίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 4-30: Τελικό διάγραμμα ροής του συστήματος επεξεργασίας της παραγόμενης άλμης από μονάδες αφαλάτωσης

Page intentionally left blank

4.2 Προκαταρκτικός σχεδιασμός

Στόχοι:

- Διαστασιολόγηση κυρίων συνιστωσών
- Κοστολόγηση συστήματος

Μεθοδολογία:

Το στάδιο του προκαταρκτικού σχεδιασμού ξεκινά όταν οι πολύ βασικές αλλαγές του αρχικού σχεδιασμού έχουν ολοκληρωθεί. Το αρχικό διάγραμμα ροής έχει οριστικοποιηθεί και έτσι ξεκινά η μαθηματική μοντελοποίηση με σκοπό την διαστασιολόγηση των κυρίων συνιστωσών. Με τη χρήση υπολογιστικού εργαλείου¹⁴ γίνεται προσομοίωση των διεργασιών. Προκειμένου να γίνει η διαστασιολόγηση, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας. Ο εν λόγω προσομοιωτής έχει αναρτηθεί στην ιστοσελίδα του έργου SOL-BRINE και αποτελεί το Παραδοτέο 2.2.

Σημειώνεται ότι στον προσομοιωτή έχει ενσωματωθεί το σύνολο των εξισώσεων που παρουσιάζονται στις ενότητες 4.2.1 - 4.2.7. Οι εξισώσεις αυτές περιλαμβάνουν ένα πλήθος μεταβλητών, οι οποίες ταξινομούνται σε δύο (2) κατηγορίες:

- Μεταβλητές σχεδιασμού (*design variables*),
- Μεταβλητές διεργασίας (*process variables*).

Συγκεντρωτικά, οι μεταβλητές σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ακόλουθες:

1. T_s , θερμοκρασία ατμού τροφοδοσίας από τα παραβολικά κάτοπτρα
2. T_1 , Θερμοκρασία διαλύματος στην πρώτη βαθμίδα
3. T_2 , Θερμοκρασία διαλύματος στη δεύτερη βαθμίδα
4. T_3 , Θερμοκρασία διαλύματος στην τρίτη βαθμίδα
5. X_3 , Συγκέντρωση διαλύματος στην τρίτη βαθμίδα
6. τ , χρόνος παραμονής στη μονάδα κρυστάλλωσης

¹⁴ Το υπολογιστικό εργαλείο αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Σχεδιασμού και Ανάλυσης Διεργασιών από τον κ. Παναγιώτη Μιχαηλίδη, υπό την επίβλεψη της αναπληρώτριας καθηγήτριας, κας Κροκίδα.

7. T_a , θερμοκρασία αέρα ξήρανσης

8. u , ταχύτητα αέρα ξήρανσης

Έχοντας προσδιορίσει το σύνολο των μεταβλητών σχεδιασμού, στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας, διερευνώντας την επίδραση των μεταβλητών σχεδιασμού στη γενικότερη λειτουργία και επίδοση του συστήματος, σε όρους τόσο οικονομικούς όσο και περιβαλλοντικούς.

Στόχος του σχεδιασμού είναι οι ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος επεξεργασίας της άλμης να καλύπτονται πλήρως από *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας* (ΑΠΕ) και συγκεκριμένα από ηλιακή ενέργεια, επιδεικνύοντας ένα ιδιαίτερα καινοτόμο και περιβαλλοντικά φιλικό χαρακτήρα. Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι οι ενεργειακές απαιτήσεις θα καλύπτονται αποκλειστικά από ΑΠΕ και δεν θα χρησιμοποιούνται συμβατικές πηγές ενέργειας, το σύστημα μπορεί να χαρακτηριστεί ως ενεργειακά αυτόνομο. Τα ηλιακά δεδομένα λήφθηκαν από βάση δεδομένων της Κοινότητας (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis>).

Τέλος, σημειώνεται πως οι εξισώσεις που περιγράφονται στις επόμενες ενότητες έχουν αντληθεί από τη δημοσίευση του ερευνητή: (Xevgenos, Michailidis, Dimopoulos, Krokida, & Loizidou, 2015b).

4.2.1 Θερμοφυσικές ιδιότητες

$$\Delta H_T = 2491.5 - 2.048 \cdot T - 0.0032 \cdot T^2 \quad (4-4)$$

Η παραπάνω εξίσωση υπολογίζει τη θερμότητα ατμοποίησης διαλύτη στη θερμοκρασία λειτουργίας, T , της μονάδας επεξεργασίας (εξατμιστήρας ή κρυσταλλωτήρας),

$$b_{pr} = b_1 X + b_2 X^2 \quad (4-5)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει την ανύψωση του σημείου βρασμού, λόγω της παρουσίας διαλυμένων στερεών στο διάλυμα,

όπου:

- b_1, b_2 εμπειρικές σταθερές
- X η συγκέντρωση του διαλύματος (kg στερεών/ kg διαλύματος)

$$\rho_i = 248,64 X_i^2 + 700,29 X_i + 1000,1 \quad (4-6)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει την πυκνότητα αλατούχου διαλύματος στον κρυσταλλωτήρα για συγκεκριμένη συγκέντρωση,

όπου X_i είναι η αντίστοιχη συγκέντρωση του διαλύματος.

$$U_{e_i} = \frac{U_{e_o}}{1 + a_1^* X_i^{a_2^*}} \quad (4-7)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας σε κάθε βαθμίδα ως συνάρτηση της συγκέντρωσης του διαλύματος. Όσο τα διαλυμένα στερεά αυξάνουν, το διάλυμα αποκτά μεγαλύτερο ιξώδες και η συναλλαγή θερμότητας γίνεται πιο δύσκολη.

Όπου:

- a_1^*, a_2^* είναι εμπειρικές σταθερές, και
- X_i είναι η συγκέντρωση του διαλύματος

$$P_T = 10^{(8,07131 - \frac{1730,63}{233,426 + T})} \quad (4-8)$$

Η εξίσωση αυτή είναι η γνωστή συνάρτηση Antoine και υπολογίζει τη πίεση της μονάδας επεξεργασίας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας.

$$\rho_w = 0,5133P_{sa}^2 - 13,055P_{sa} + 968,29 \quad (4-9)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει την πυκνότητα κορεσμού του νερού ως συνάρτηση της θερμοκρασίας,

όπου P_{sa} είναι η πίεση του συσσωρευτή (βλ. Ενότητα 4.2.7.2.2).

$$h_w = -3,014P_s^2 + 68,425P_s + 371,89 \quad (4-10)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει την ενθαλπία του κορεσμένου διαλύματος, λαμβάνοντας υπόψη την πίεση ατμού τροφοδοσίας (P_s).

$$H_s = 44,806 \ln P_s + 2675,3 \quad (4-11)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει την ενθαλπία του ατμού ως συνάρτηση της πίεσης, όπου P_s είναι η πίεση του ατμού τροφοδοσίας.

4.2.2 Εξατμιστήρας

4.2.2.1 Περιγραφή διεργασίας

Η συγκέντρωση του διαλύματος άλμης στην έξοδο του εξατμιστήρα θεωρείται κορεσμένη. Ο εξατμιστήρας αποτελείται από 3 βαθμίδες, έναν προθερμαντήρα και έναν μηχανικό ή θερμικό συμπιεστή. Ο προθερμαντήρας προθερμαίνει την άλμη τροφοδοσίας έως τη θερμοκρασία βρασμού. Ο συμπιεστής χρησιμοποιείται για την συμπίεση του ατμού της τελευταίας βαθμίδας και την επαναχρησιμοποίησή του ατμού ως μέσο θερμότητας της πρώτης βαθμίδας. Έτσι, μειώνονται οι ανάγκες ατμού από το παραβολικό κάτοπτρο.

Η πρώτη βαθμίδα θερμαίνεται από εξωτερική πηγή, ενώ η δεύτερη και η τρίτη βαθμίδα θερμαίνονται από τον ατμό που παράγεται από την πρώτη και δεύτερη βαθμίδα αντίστοιχα.

4.2.2.2 Μαθηματική μοντελοποίηση

Ακολουθώς δίνεται η μαθηματική μοντελοποίηση του εξατμιστήρα.

$$L_0 X_0 = L_1 X_1 \quad (4-12)$$

$$L_1 X_1 = L_2 X_2 \quad (4-13)$$

$$L_2 X_2 = L_3 X_3 \quad (4-14)$$

Οι εξισώσεις αυτές αποτελούν το ισοζύγιο μάζας των διαλυμένων στερεών στην 1^η, 2^η και 3^η βαθμίδα του εξατμιστήρα, αντίστοιχα. Οι εξισώσεις αυτές υπολογίζουν την παροχή μάζας του διαλύτη μεταξύ των βαθμίδων όπως επίσης και στην έξοδο του εξατμιστήρα.

- L_0 είναι η παροχή μάζας της άλμης τροφοδοσίας,
- L_1 , L_2 and L_3 είναι οι παροχές μάζας του διαλύματος στην έξοδο κάθε βαθμίδας,
- X_0 είναι η αρχική συγκέντρωση της άλμης τροφοδοσίας, και
- X_1 , X_2 και X_3 είναι οι συγκεντρώσεις του διαλύματος στην έξοδο κάθε βαθμίδας.

$$L_0 = L_1 + V_1 \quad (4-15)$$

$$L_1 = L_2 + V_2 \quad (4-16)$$

$$L_2 = L_3 + V_3 \quad (4-17)$$

Οι παραπάνω τρεις εξισώσεις αποτελούν το συνολικό ισοζύγιο μάζας της κάθε βαθμίδας. Χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της παροχής μάζας του ατμού που παράγεται σε κάθε βαθμίδα.

V_1 , V_2 και V_3 είναι η παροχή μάζας του ατμού που παράγεται στην 1^η, 2^η και 3^η βαθμίδα αντίστοιχα.

$$T_1 = T_{w_1} + bpr_1 \quad (4-18)$$

$$T_2 = T_{w_2} + bpr_2 \quad (4-19)$$

$$T_3 = T_{w_3} + bpr_3 \quad (4-20)$$

Οι εξισώσεις αυτές υπολογίζουν τη θερμοκρασία του διαλύματος στην κάθε βαθμίδα. Η θερμοκρασία αυτή επηρεάζεται από τη συγκέντρωση του διαλύματος στην κάθε βαθμίδα και έτσι είναι το άθροισμα της θερμοκρασίας βρασμού (T_{wi}) στην αντίστοιχη πίεση λειτουργίας, αυξανόμενη κατά την ανύψωση του σημείου βρασμού (bpr_i) λόγω της ύπαρξης διαλυμένων στερεών.

- T_1 , T_2 και T_3 είναι οι πραγματικές θερμοκρασίες λειτουργίας στην κάθε βαθμίδα,
- T_{w1} , T_{w2} και T_{w3} , οι θερμοκρασίες βρασμού, και
- bpr_1 , bpr_2 και bpr_3 η ανύψωση του σημείου βρασμού.

$$Q_{e_1} = L_0 C_p (T_1 - T_0) + V_1 \Delta H_{T_{w_1}} \quad (4-21)$$

$$Q_{e_2} = L_1 C_p (T_2 - T_1) + V_2 \Delta H_{T_{w_2}} \quad (4-22)$$

$$Q_{e_3} = L_2 C_p (T_3 - T_2) + V_3 \Delta H_{T_{w_3}} \quad (4-23)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις υπολογίζουν το ισοζύγιο ενέργειας σε κάθε βαθμίδα του εξατμιστήρα.

όπου,

- Q_{e1} , Q_{e2} , Q_{e3} είναι η ροή θερμότητας σε κάθε βαθμίδα,

- ΔH_{Tw1} , ΔH_{Tw2} , και ΔH_{Tw3} είναι η λανθάνουσα θερμότητα του διαλύτη στην αντίστοιχη πίεση κάθε βαθμίδας
- C_p είναι η θερμοχωρητικότητα του νερού.

Η θερμότητα της κάθε βαθμίδας είναι το άθροισμα της θερμότητας που προσφέρεται από τον ατμό της προηγούμενης βαθμίδας (ή από τον εξωτερικό ατμό για την πρώτη βαθμίδα) και της θερμότητας που παράγεται από την είσοδο του διαλύματος στην βαθμίδα με χαμηλότερη πίεση. Ιδιαίτερα στην πρώτη βαθμίδα πρέπει να συνυπολογιστεί εκτός από την λανθάνουσα και η αισθητή θερμότητα που πρέπει να προσφερθεί μέχρι το διάλυμα να φτάσει την θερμοκρασία βρασμού.

$$m_s = \frac{Q_{e1} - V_{co} (\Delta H_s - C_{ps} (T_{co} - T_s))}{\Delta H_s} \quad (4-24)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει την παροχή μάζας του ατμού m_s στον εξατμιστήρα που προέρχεται από το ηλιακό πεδίο.

- V_{co} είναι η παροχή μάζας του ατμού που προέρχεται από τον συμπιεστή,
- T_{co} είναι η θερμοκρασία του ατμού στην έξοδο του συμπιεστή
- T_s είναι η θερμοκρασία του ατμού τροφοδοσίας,
- ΔH_{Ts} είναι η λανθάνουσα θερμότητα του διαλύτη στην αντίστοιχη πίεση
- C_{ps} είναι η θερμοχωρητικότητα του ατμού

$$Q_{e2} = V_1 \Delta H_{Tw1} \quad (4-25)$$

$$Q_{e3} = V_2 \Delta H_{Tw2} \quad (4-26)$$

Οι εξισώσεις αυτές υπολογίζουν τη ροή θερμότητα στη 2^η και στην 3^η βαθμίδα από την συμπύκνωση του ατμού που παράγεται στην προηγούμενη βαθμίδα.

$$Q_{e1} = A_{e1} U_{e1} (T_s - T_1) \quad (4-27)$$

$$Q_{e2} = A_{e2} U_{e2} (T_{w1} - T_2) \quad (4-28)$$

$$Q_{e3} = A_{e3} U_{e3} (T_{w2} - T_3) \quad (4-29)$$

- A_{e1} , A_{e2} και A_{e3} είναι η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας σε κάθε βαθμίδα, και

- U_{e1} , U_{e2} και U_{e3} οι συντελεστές θερμικής διαπερότητας σε κάθε βαθμίδα.

Οι παραπάνω εξισώσεις υπολογίζουν την επιφάνεια συναλλαγής του εναλλάκτη σε κάθε βαθμίδα, συναρτήσει της θερμοκρασιακής διαφοράς και της ροής θερμότητας. Ένας συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, U) χρησιμοποιείται συμπεριλαμβάνοντας τις αντιστάσεις μεταξύ του ατμού και του διαλύματος.

4.2.2.3 Παράμετροι σχεδιασμού

Εξετάστηκαν οι ακόλουθες παράμετροι σχεδιασμού:

1. T_s , θερμοκρασία ατμού τροφοδοσίας (feed steam temperature);
2. T_1 , θερμοκρασία διαλύματος 1^{ης} βαθμίδας (Solution temperature in 1st effect);
3. T_2 , θερμοκρασία διαλύματος 2^{ης} βαθμίδας (Solution temperature in 2nd effect);
4. T_3 , θερμοκρασία διαλύματος 3^{ης} βαθμίδας (Solution temperature in 3rd effect) και
5. X_3 , Συγκέντρωση διαλύματος 3^{ης} βαθμίδας (Salt concentration in 3rd effect).

4.2.3 Κρυσταλλωτήρας

4.2.3.1 Περιγραφή διεργασίας

Το συμπυκνωμένο ρεύμα άλμης που εξέρχεται από την τελευταία βαθμίδα του εξατμιστήρα, περιέχει περισσότερο από 25% στερεά. Το ρεύμα αυτό τροφοδοτείται στον κρυσταλλωτήρα. Κατά την απομάκρυνση περισσότερης ποσότητας διαλύτη (νερού), το διάλυμα φτάνει σε μία κατάσταση ισορροπίας όπου τα ιόντα σχηματίζουν κρυστάλλους. "Η κρυστάλλωση γίνεται σε δύο στάδια: αρχικά, σχηματίζεται ο κρύσταλλος. Η ακριβής διαδικασία του σχηματισμού των πρώτων κρυστάλλων («πυρηνογένεση») δεν είναι γνωστή, αλλά συνήθως παρατηρείται ένας αυθόρμητος σχηματισμός τους μέσα στο υπέρκορο διάλυμα" (Ζιώμας, 2013). Όταν αυξάνει περαιτέρω η συγκέντρωση του διαλύματος, τα ιόντα κρυσταλλώνουν με μεγαλύτερη ταχύτητα, με αποτέλεσμα το μέγεθος των κρυστάλλων να αυξάνει. Ο ατμός που παράγεται επανασυμπιέζεται και θερμαίνει το διάλυμα κρυστάλλωσης. Οι κρύσταλλοι σχηματίζουν το μάγμα στον πυθμένα του κρυσταλλωτήρα. Το μάγμα απομακρύνεται από τον κρυσταλλωτήρα και τροφοδοτείται στον ξηραντήρα με σκοπό την απομάκρυνση της υγρασίας.

4.2.3.2 Μαθηματική μοντελοποίηση

Το μαθηματικό μοντέλο της διεργασίας περιλαμβάνει το ακόλουθο σετ εξισώσεων.

$$W = L_3(1 - X_3) \quad (4-30)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει τη παροχή μάζας του διαλύτη που εξέρχεται από την τελευταία βαθμίδα του εξατμιστήρα και εισέρχεται στον κρυσταλλωτήρα για περαιτέρω επεξεργασία.

όπου:

- W η παροχή μάζας του διαλύτη που εισέρχεται στον κρυσταλλωτήρα,
- L_3 η παροχή μάζας του διαλύματος που εισέρχεται στον κρυσταλλωτήρα, και
- X_3 η συγκέντρωση του διαλύματος που εισέρχεται στον κρυσταλλωτήρα.

$$C_{eq} = 2,0 \times 10^{-6} T_{cr}^2 + 1,0 \times 10^{-5} T_{cr} + 0,2627 \quad (4-31)$$

όπου:

- C_{eq} , είναι η συγκέντρωση ισορροπίας του διαλύματος στη θερμοκρασία λειτουργίας του κρυσταλλωτήρα, και
- T_{cr} , είναι η θερμοκρασία λειτουργίας του κρυσταλλωτήρα.

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει τη συγκέντρωση ισορροπίας του διαλύματος σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία λειτουργίας του κρυσταλλωτήρα.

$$X_{cr} = C_{eq} - \Delta C \quad (4-32)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει τη συγκέντρωση αλάτων στον κρυσταλλωτήρα κατά τη λειτουργία μόνιμης κατάστασης.

όπου:

- X_{cr} , είναι η συγκέντρωση του διαλύματος στον κρυσταλλωτήρα, και
- ΔC , είναι ο υπερκορεσμός του διαλύματος.

Ένας συνεχής υπερκορεσμός του διαλύματος λαμβάνεται υπόψη. Ο υπερκορεσμός εκφράζει τη μείωση της συγκέντρωσης των στερεών σε σύγκριση με τη συγκέντρωση ισορροπίας.

$$X_{cr}' = \frac{X_{cr}}{1 - X_{cr}} \quad (4-33)$$

Η εξίσωση αυτή ορίζει τη συγκέντρωση των αλάτων με βάση τη μάζα του διαλύματος, δηλαδή ανά μονάδα μάζας του νερού.

Όπου:

- X_{cr}' , είναι η συγκέντρωση του διαλύματος, εκφρασμένη ανά μονάδα μάζας του διαλύτη.

$$G = k_G \Delta C \quad (4-34)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει το ρυθμό ανάπτυξης κρυστάλλων, ο οποίος εκφράζει την απομάκρυνση των αλάτων από το διάλυμα και την απόθεσή τους στους κρυστάλλους, οι οποίοι βρίσκονται εν αιωρήσει στο θάλαμο κρυστάλλωσης.

Όπου:

- k_G είναι η σταθερά κινητικής της κρυστάλλωσης.

$$Q_{Fc} = L_3 \rho \quad (4-35)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει την παροχή όγκου Q_{Fc} του διαλύματος που εξέρχεται από τον εξατμιστήρα, όπου

- ρ , είναι η πυκνότητα του διαλύματος εξόδου από τον εξατμιστήρα.

$$X_{crf}' = \frac{C_{eq}}{1 - C_{eq}} \quad (4-36)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει τη συγκέντρωση διαλύματος ανά μονάδα μάζας του διαλύτη, όπου:

- X_{crf}' είναι η μάζα του άλατος ανά μονάδα διαλύτη, και
- C_{eq} είναι η μάζα άλατος ανά μονάδα διαλύματος, στην κατάσταση ισορροπίας.

$$Y = L_3 \cdot X_3 \quad (4-37)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει την απόδοση, Y , του κρυσταλλωτήρα, όπου:

- R_c είναι ο λόγος του μοριακού βάρους του ένυδρου άλατος προς το μοριακό βάρος του άνυδρου άλατος (ίσο με 1 στην περίπτωση μας), και
- V_{fr} είναι το ποσοστό του διαλύτη που ατμοποιείται προς τη μονάδα του διαλύτη που εισέρχεται στον κρυσταλλωτήρα. Για τους σκοπούς του συγκεκριμένου κρυσταλλωτήρα δεχόμαστε $V_{fr} = 1$, έτσι ώστε όλη η ποσότητα του νερού να εξατμίζεται και να μην παράγονται καθόλου υγρά απόβλητα.

$$V_{scr} = L_3(1 - X_3)V_{fr} - Y_{XM} \quad (4-38)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει την παροχή μάζας του ατμού που παράγεται κατά την θερμική κρυστάλλωση του διαλύματος, όπου:

- V_{scr} είναι η παροχή του παραγόμενου ατμού στον κρυσταλλωτήρα.

$$\tau = \frac{V_{cr}}{Q_{Fc}} \quad (4-39)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει το χρόνο παραμονής (residence time, τ) συναρτήσει του όγκου του κρυσταλλωτήρα και της ογκομετρικής παροχής. Ο χρόνος παραμονής επηρεάζει και το μέγεθος των παραγόμενων κρυστάλλων.

$$M_T = 6\rho_c f_v n^o (G\tau)^4 \quad (4-40)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει την μάζα των κρυστάλλων ανά μονάδα διαλύματος, λαμβάνοντας υπόψη την πυκνότητα των στερεών κρυστάλλων και τον ογκομετρικό συντελεστή. Ο συντελεστής αυτός εκφράζει την απόκλιση του σχήματος των κρυστάλλων από το σχήμα της σφαίρας. Στην εξίσωση αυτή:

- M_T είναι η μάζα των κρυστάλλων ανά μονάδα μάζας διαλύματος,
- ρ_c είναι η πυκνότητα των στερεών κρυστάλλων,
- f_v είναι ο ογκομετρικός συντελεστής των κρυστάλλων,
- n^o είναι η πυκνότητα του πληθυσμού των πυρήνων,
- G είναι ο ρυθμός ανάπτυξης των κρυστάλλων, και
- τ είναι ο χρόνος παραμονής στον κρυσταλλωτήρα.

$$B^o = k_n N^2 G^2 M_T \quad (4-41)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει το ρυθμό πυρηνογένεσης του διαλύματος, B^o , όπου.

- k_n είναι η σταθερά κινητικής της πυρηνογένεσης, και
- N είναι η ταχύτητα περιστροφής του αναδευτήρα.

$$L_d = 3G\tau \quad (4-42)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει το μήκος, L_d , των παραγόμενων κρυστάλλων που κυριαρχούν στο διάλυμα.

$$L_m = 4G\tau \quad (4-43)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει το μέσο μήκος όλων των παραγόμενων κρυστάλλων.

$$Q_c = L_3 C_p (T_{cr} - T_3) + V_{scr} \Delta H_{so} - Y \Delta H_c \quad (4-44)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει τις συνολικές ανάγκες θερμότητας που απαιτούνται για την εξάτμιση του διαλύτη στον κρυσταλλωτήρα, λαμβάνονται επίσης υπόψη την θερμότητα που προσφέρεται (σε αισθητή μορφή) που εξέρχεται από τον εξατμιστήρα, καθώς επίσης και της θερμότητας που απελευθερώνεται κατά την κρυστάλλωση (εξώθερμη διεργασία). Στην εξίσωση αυτή:

- Y είναι η απόδοση της κρυστάλλωσης,
- ΔH_c είναι η θερμότητα της κρυστάλλωσης, και
- ΔH_{so} είναι η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης του διαλύτη στη θερμοκρασία λειτουργίας του κρυσταλλωτήρα.

$$m_{scr} = \frac{Q_c - V_{cocr}(\Delta H_s - C_{ps}(T_{cocr} - T_s))}{\Delta H_s} \quad (4-45)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει την παροχή μάζας, m_{scr} , του ατμού στον κρυσταλλωτήρα, ως συνάρτηση της θερμότητας που προσφέρεται από τον μηχανικό συμπιεστή. Στην εξίσωση αυτή:

- V_{cocr} είναι η παροχή μάζας του ατμού στην έξοδο του μηχανικού συμπιεστή,
- T_{cocr} είναι η θερμοκρασία του ατμού,
- T_s είναι η θερμοκρασία του ατμού από το ηλιακό πεδίο, και
- ΔH_s είναι η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης στην πίεση του ατμού τροφοδοσίας.

4.2.3.3 Παράμετροι σχεδιασμού

Εξετάστηκε μία παράμετρος σχεδιασμού για τον κρυσταλλωτήρα:

1. Χρόνος παραμονής (τ).

4.2.4 Ξηραντήρας

4.2.4.1 Περιγραφή διεργασίας

Το υπόλειμμα που παράγεται κατά την κρυστάλλωση περιέχει μία ποσότητα υγρασίας. Για την απομάκρυνση αυτής της υγρασίας θα χρησιμοποιηθεί ρεύμα ζεστού αέρα, με αποτέλεσμα ένα τελικό ξηρό προϊόν που θα έχει μία παραμένουσα υγρασία κοντά στην σταθερά ισορροπίας. Η σταθερά ισορροπίας είναι η παραμένουσα ποσότητα υγρασίας σε ένα στερεό λόγω της επαφής του με τον ατμοσφαιρικό αέρα (ο οποίος περιέχει μία ποσότητα υγρασίας). Η μαθηματική μοντελοποίηση αφορά ξηραντήρα δίσκων (tray dryer). Το υπόλειμμα κρυστάλλωσης θα τοποθετείται σε δίσκους εντός του ξηραντήρα. Ρεύμα ζεστού αέρα θα έρχεται σε επαφή με το υπόλειμμα σε συγκεκριμένη ταχύτητα. Η υγρασία απομακρύνεται από το υπόλειμμα και μεταφέρεται στο ρεύμα αέρα. Το ρεύμα ζεστού αέρα θερμαίνεται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας από τα ρεύματα συμπυκνωμένου ατμού από τον εξατμιστήρα και τον κρυσταλλωτήρα.

4.2.4.2 Μαθηματική μοντελοποίηση

Το μαθηματικό μοντέλο της διεργασίας περιλαμβάνει το ακόλουθο σετ εξισώσεων.

$$k = k_o T_a^a (RH\%)^b u_a^c \quad (4-46)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει τη σταθερά ξήρανσης των αλατιών υπό εξέταση. Η σταθερά ξήρανσης είναι μία φαινομενολογική σταθερά, η οποία λαμβάνει υπόψη τη μεταφορά μάζας και ενέργειας που λαμβάνει χώρα μεταξύ της επιφάνειας του αλατιού και του ζεστού αέρα. Οι σταθερές της εξίσωσης αυτής υπολογίζονται με παλινδρόμηση από τα δεδομένα που προκύπτουν από πειραματικό προσδιορισμό σε εργαστηριακό ξηραντήρα.

- T_a είναι η θερμοκρασία του θερμού αέρα,
- $RH\%$ είναι η υγρασία του θερμού αέρα,
- u_a είναι η ταχύτητα του θερμού αέρα, και
- k_o , a , b και c είναι οι σταθερές ξήρανσης.

Οι σταθερές αυτές προσδιορίστηκαν με πειραματικό τρόπο. Τα πειράματα έγιναν στο Εργαστήριο Σχεδιασμού και Ανάλυσης Διεργασιών, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

$$t = -\frac{1}{k} \ln \frac{X}{X_M} \quad (4-47)$$

Η εξίσωση αυτή εκφράζει την κινητική ξήρανσης του εν λόγω αλατιού, όπου:

- t είναι ο χρόνος ξήρανσης,
- X είναι η τελική υγρασία που παραμένει στο αλάτι, και
- X_M είναι η υγρασία που περιέχει αρχικά το υπόλειμμα κρυστάλλωσης.

$$W = Y(X_M - X) \quad (4-48)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει την ποσότητα υγρασίας, W , η οποία πρέπει να απομακρύνεται στη μονάδα του χρόνου, έτσι ώστε να παραχθεί στερεό αλάτι, όπου:

- Y , είναι η ποσότητα του υπολείμματος κρυστάλλωσης.

$$F_a = \frac{W}{\Delta Y} \quad (4-49)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει την παροχή του αέρα, F_a , που απαιτείται για την απομάκρυνση της υγρασίας από το αλάτι για ορισμένη αύξηση της απόλυτης υγρασίας (ΔY) του ξηρού αέρα.

$$Q_c = \frac{Y t_{op} 3600}{\rho_{cr}} \quad (4-50)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει τον ολικό όγκο, Q_c , του αλατιού που παράγεται την ημέρα, κατά τη διάρκεια λειτουργίας του ξηραντήρα, όπου:

- Y είναι η ποσότητα του υπολείμματος κρυστάλλωσης,
- ρ_{cr} , είναι η πυκνότητα των κρυστάλλων, και
- t_{op} είναι ο ημερήσιος χρόνος λειτουργίας.

$$A_D = \frac{Q_c}{h_{layer}} \frac{t}{t_{op}} \quad (4-51)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει την επιφάνεια του στρώματος, A_D , που θα ξηραθεί λαμβάνοντας υπόψη το πάχος του στρώματος, h_{layer} , τον απαιτούμενο χρόνο ξήρανσης, t , και το συνολικό ημερήσιο χρόνο λειτουργίας, t_{op} , της μονάδας ξήρανσης.

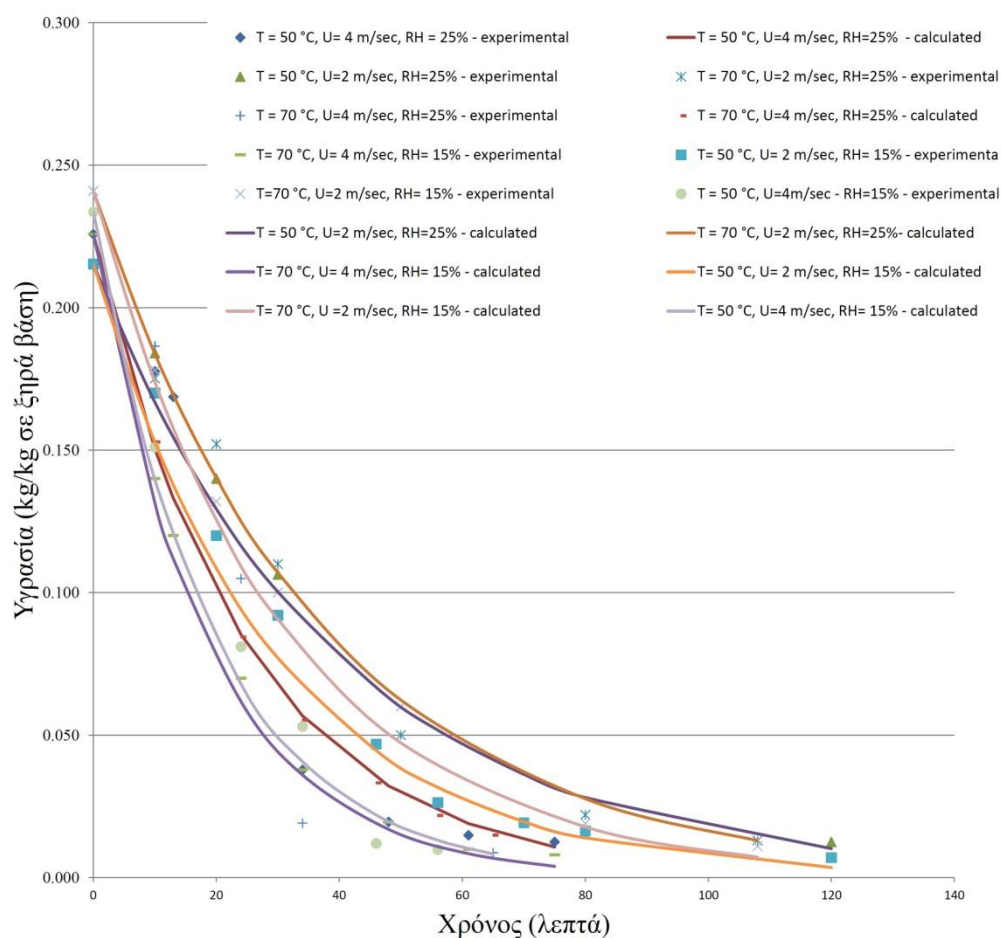
$$N_{tr} = \frac{A_D}{A_{tr}} \quad (4-52)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει τον αριθμό των δίσκων, N_{tr} , που απαιτούνται για την ξήρανση του αλατιού, με γνωστή την επιφάνεια του κάθε δίσκου, A_{tr} .

4.2.4.3 Παράμετροι σχεδιασμού

Εξετάστηκαν οι ακόλουθες δύο (2) παράμετροι σχεδιασμού:

1. Θερμοκρασία αέρα εισόδου στον ξηραντήρα, T_a ;
2. Ταχύτητα θερμού αέρα, u .



Διάγραμμα 4-3: Υγρασία αλατιού και χρόνος ξήρανσης, σύγκριση πειραματικών δεδομένων και προβλέψεων

4.2.5 Μηχανικός συμπιεστής

Η μοντελοποίηση για το μηχανικό συμπιεστή είναι ίδια τόσο για τον εξατμιστήρα, όσο και για τον κρυσταλλωτήρα.

$$V_{co} = V_3 R \quad (4-53)$$

$$V_{cocr} = V_{scr} R_{cr} \quad (4-54)$$

Οι εξισώσεις αυτές υπολογίζουν την ποσότητα του ατμού που τροφοδοτείται στους δύο συμπιεστές, όπου:

- V_{co} είναι η ογκομετρική παροχή του ατμού που συμπιέζεται στον εξατμιστήρα,
- V_{cocr} είναι η ογκομετρική παροχή του ατμού που συμπιέζεται στον κρυσταλλωτήρα,
- V_3 είναι η ογκομετρική παροχή του ατμού της τελευταίας βαθμίδας του εξατμιστήρα,
- V_{scr} είναι η ογκομετρική παροχή του ατμού που εξέρχεται από τον κρυσταλλωτήρα,
- R είναι το ποσοστό του ατμού από τον εξατμιστήρα που οδηγείται στον συμπιεστή, και
- R_{cr} το ποσοστό του ατμού του κρυσταλλωτήρα που οδηγείται στον συμπιεστή.

Στο μοντέλο αυτό, 100% του ατμού οδηγείται στον συμπιεστή.

$$T_{co} = T_3 \left(\frac{P_s}{P_3} \right)^k \quad (4-55)$$

$$T_{cocr} = T_{cr} \left(\frac{P_s}{P_{cr}} \right)^k \quad (4-56)$$

Οι εξισώσεις αυτές υπολογίζουν την τελική θερμοκρασία του ατμού στην έξοδο του συμπιεστή. Η συμπίεση θεωρείται ισεντροπική. Στις εξισώσεις αυτές:

- T_{co} είναι η θερμοκρασία του ατμού που εξέρχεται από τον συμπιεστή του εξατμιστήρα,

- T_{cocr} η θερμοκρασία του ατμού που εξέρχεται από τον συμπιεστή του κρυσταλλωτήρα,
- T_3 η θερμοκρασία του ατμού που εξέρχεται από την τελευταία βαθμίδα του εξατμιστήρα,
- T_{cr} η θερμοκρασία του ατμού που εξέρχεται από τον κρυσταλλωτήρα,
- P_3 η πίεση λειτουργίας της τελευταίας βαθμίδας του εξατμιστήρα,
- P_{cr} η πίεση λειτουργίας του κρυσταλλωτήρα, και
- P_s , η πίεση του δικτύου ατμού του συστήματος.

$$E_{\text{co}} = V_{\text{co}} C_{ps} (T_{\text{co}} - T_3) \quad (4-57)$$

$$E_{\text{cocr}} = V_{\text{cocr}} C_{ps} (T_{\text{cocr}} - T_{\text{cr}}) \quad (4-58)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις υπολογίζουν την απαιτούμενη ενέργεια για την συμπίεση του ατμού, όπου:

- E_{co} , είναι η ισχύς του συμπιεστή για τον εξατμιστήρα,
- E_{cocr} είναι η ισχύς του συμπιεστή για τον κρυσταλλωτήρα, και
- C_{ps} είναι η θερμοχωρητικότητα του ατμού.

4.2.6 Εναλλάκτες θερμότητας

Στο διάγραμμα ροής (βλέπε επίσης Σχήμα 4-30), όπως αυτό προέκυψε από την ολοκλήρωση του αρχικού σχεδιασμού, περιλαμβάνονται δυο (2) εναλλάκτες θερμότητας:

- **Προθερμαντήρας άλμης**

Ένας προθερμαντήρας χρησιμοποιείται προκειμένου να θερμάνει την άλμη που τροφοδοτείται στην πρώτη βαθμίδα του εξατμιστήρα, έως το σημείο βρασμού. Η μαθηματική μοντελοποίηση του προθερμαντήρα παρουσιάζεται την Ενότητα 4.2.6.1.

- **Εναλλάκτης θερμότητας ξηραντήρα**

Ο σκοπός αυτού του εναλλάκτη θερμότητας είναι η θέρμανση του ατμοσφαιρικού αέρα έως τη θερμοκρασία λειτουργίας του ξηραντήρα. Για τη θέρμανση του αέρα χρησιμοποιούνται τα ρεύματα συμπύκνωσης του συμπυκνωμένου ατμού από τον εξατμιστήρα και τον κρυσταλλωτήρα. Η μαθηματική μοντελοποίηση του εναλλάκτη θερμότητας του ξηραντήρα παρουσιάζεται την Ενότητα 4.2.6.2.

4.2.6.1 Προθερμαντήρας

Η μαθηματική μοντελοποίηση του προθερμαντήρα περιλαμβάνει το ακόλουθο σετ εξισώσεων.

$$T_{mix} = \frac{V_1 \cdot T_1 + V_2 \cdot T_2 + V_3 \cdot T_3}{V_1 + V_2 + V_3} \quad (4-59)$$

Όπου:

- T_{mix} είναι η θερμοκρασία εξόδου
- V_1 είναι η ογκομετρική παροχή του ατμού στην έξοδο της 1^{ης} βαθμίδας
- V_2 είναι η ογκομετρική παροχή του ατμού στην έξοδο της 2^{ης} βαθμίδας
- V_3 είναι η ογκομετρική παροχή του ατμού στην έξοδο της 3^{ης} βαθμίδας
- T_1 είναι η θερμοκρασία του διαλύματος στην 1^η βαθμίδα
- T_2 είναι η θερμοκρασία του διαλύματος στην 2^η βαθμίδα, και

- T3 είναι η θερμοκρασία του διαλύματος στην 3^η βαθμίδα.

Η παραπάνω εξίσωση εκφράζει το ενεργειακό ισοζύγιο μίξης τριών διαφορετικών ρευμάτων. Αυτά τα ρεύματα παράγονται κατά την συμπύκνωση του ατμού στις τρεις βαθμίδες του εξατμιστήρα.

$$m_{mix} = V_1 + V_2 + V_3 \quad (4-60)$$

Η εξίσωση αυτή εκφράζει το ισοζύγιο μάζας, όπου m_{mix} , είναι η παροχή που προκύπτει από τη μείξη των τριών ρευμάτων συμπύκνωσης ατμού από τις αντίστοιχες βαθμίδες του εξατμιστήρα.

$$Q_{ec} = m_{mix} \cdot C_{pw} \cdot (T_{mix} - T_{condex}) \quad (4-61)$$

Η εξίσωση αυτή εκφράζει τη ροή θερμότητας, Q_{ec} , για την προθέρμανση της άλμης τροφοδοσίας, όπου:

- C_{pw} είναι η θερμοχωρητικότητα της άλμης,
- T_{mix} είναι η θερμοκρασία μετά τη μείξη, και
- T_{condex} είναι η τελική θερμοκρασία του συμπυκνώματος στην έξοδο του προθερμαντήρα.

$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{mix} - T_{fo}) - (T_{condex} - T_f)}{\ln \frac{T_{mix} - T_{fo}}{T_{condex} - T_f}} \quad (4-62)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει τη λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας, ΔT_{LM} , στα δύο άκρα του προθερμαντήρα.

$$Q_{ec} = U_{ec} A_{ec} \Delta T_{LM} \quad (4-63)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει την επιφάνεια συναλλαγής του προθερμαντήρα, A_{ec} , λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, U_{ec} .

4.2.6.2 Εναλλάκτης θερμότητας ξηραντήρα

$$Q_d = F_a C_{pa} (T_a - T_f) \quad (4-64)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει τη ροή θερμότητα, Q_d , για την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα από την αρχική στην τελική θερμοκρασία.

- F_a είναι η παροχή αέρα στον ξηραντήρα,

- C_{pa} είναι η θερμοχωρητικότητα του αέρα,
- T_a είναι η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του εναλλάκτη, και
- T_f είναι η θερμοκρασία του αέρα στην είσοδο του εναλλάκτη.

$$m_s^{DHE} = V_{scr} \quad (4-65)$$

$$Q_{scr} = m_s^{DHE} \cdot C_{pw} \cdot (T_s - T_{ex}^{DHE}) \quad (4-66)$$

Όπου:

- Q_{scr} είναι η ροή θερμότητας από τον κρυσταλλωτήρα
- m_s^{DHE} είναι η παροχή μάζας του συμπυκνωμένου ατμού από τον κρυσταλλωτήρα
- T_s είναι η θερμοκρασία του ατμού του δικτύου;
- T_{ex}^{DHE} η θερμοκρασία εξόδου του υπόψυκτου νερού από τον εναλλάκτη του ξηραντήρα
- V_{scr} είναι η παροχή ατμού από τον κρυσταλλωτήρα.

$$Q_{steam} = Q_d - Q_{scr} \quad (4-67)$$

Όπου:

- Q_{sst} είναι η ροή θερμότητας από τον ατμό
- Q_d είναι η ροή θερμότητας από τον ξηραντήρα.

$$Q_{steam} = m_s^{DHE'} \cdot (\Delta H_s + c_{ps} \cdot (T_s - T_{ex}^{DHE})) \quad (4-68)$$

Όπου $m_s^{DHE'}$ είναι η παροχή ατμού από τα παραβολικά κάτοπτρα.

$$\Delta T_{LM}^{DHE} = \frac{(T_s - T_a) - (T_{dhe} - T_o)}{\ln \frac{T_s - T_a}{T_{ex}^{DHE} - T_o}} \quad (4-69)$$

Η εξίσωση αυτή εκφράζει τη λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας ΔT_{LM}^{DHE} στα δύο άκρα του εναλλάκτη,

Όπου:

- T_s είναι η θερμοκρασία του συμπυκνωμένου ατμού από τον κρυσταλλωτήρα,

- T_a είναι η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του εναλλάκτη,
- T_o είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος,
- T_{ex}^{DHE} η θερμοκρασία εξόδου του μέσου θέρμανσης από τον εναλλάκτη
- T_{dhe} η θερμοκρασία εξόδου του μέσου θέρμανσης από τον κρυσταλλωτήρα.

$$Q_d = U_D A_{DHE} \Delta T_{LM}^{DHE} \quad (4-70)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει την επιφάνεια του εναλλάκτη θερμότητας του ξηραντήρα, A_{DHE} , με δεδομένο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, U_D .

4.2.7 Ενεργειακό τμήμα συστήματος

4.2.7.1 Ηλιακό δυναμικό

Το πιλοτικό σύστημα επεξεργασίας της άλμης εγκαταστάθηκε στην περιοχή του Αγίου Φωκά, στην Τήνο (βλέπε επίσης Σχήμα 4-31). Για τον προσδιορισμός του ηλιακού δυναμικού της περιοχής χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων [PVGIS](#), εισαγάγωντας τις συντεταγμένες της περιοχής:

- Γεωγραφικό Πλάτος: 37.529° Βόρεια, και
- Γεωγραφικό Μήκος: 25.183° Ανατολικά

Τα αποτελέσματα για ένα τυπικό μετεωρολογικό έτος στην περιοχή του Αγίου Φωκά παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο Παράρτημα 9.3. Στα ακόλουθα διαγράμματα δίνεται:

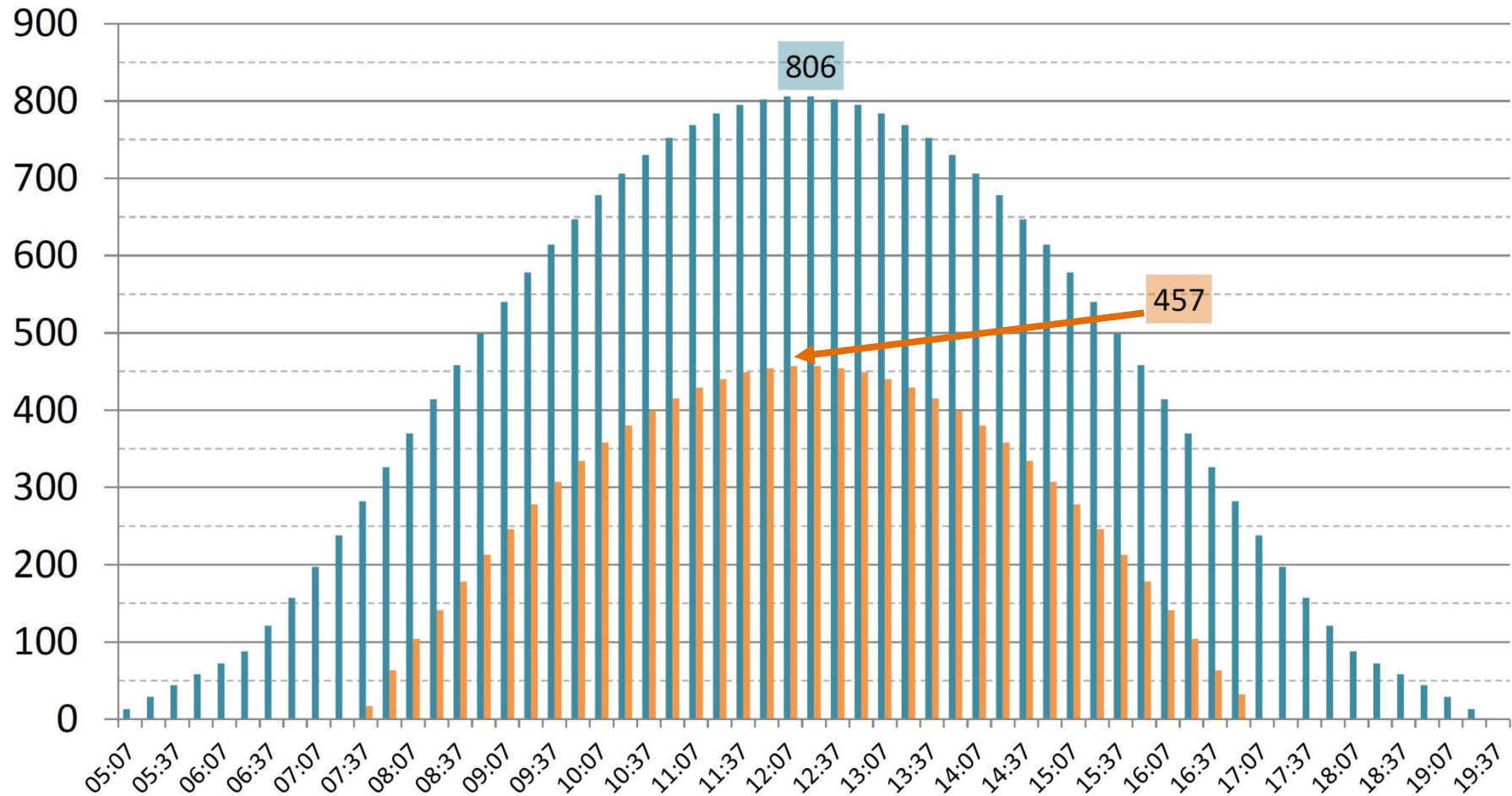
- Η ολική ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο, G, για τον μήνα Ιούνιο και τον μήνα Δεκέμβριο (βλ. Διάγραμμα 4-4) και
- Η ολική ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο, G, και σε επίπεδο ανίχνευσης σε 2 άξονες, A, για τον μήνα Ιούνιο (Διάγραμμα 4-5).



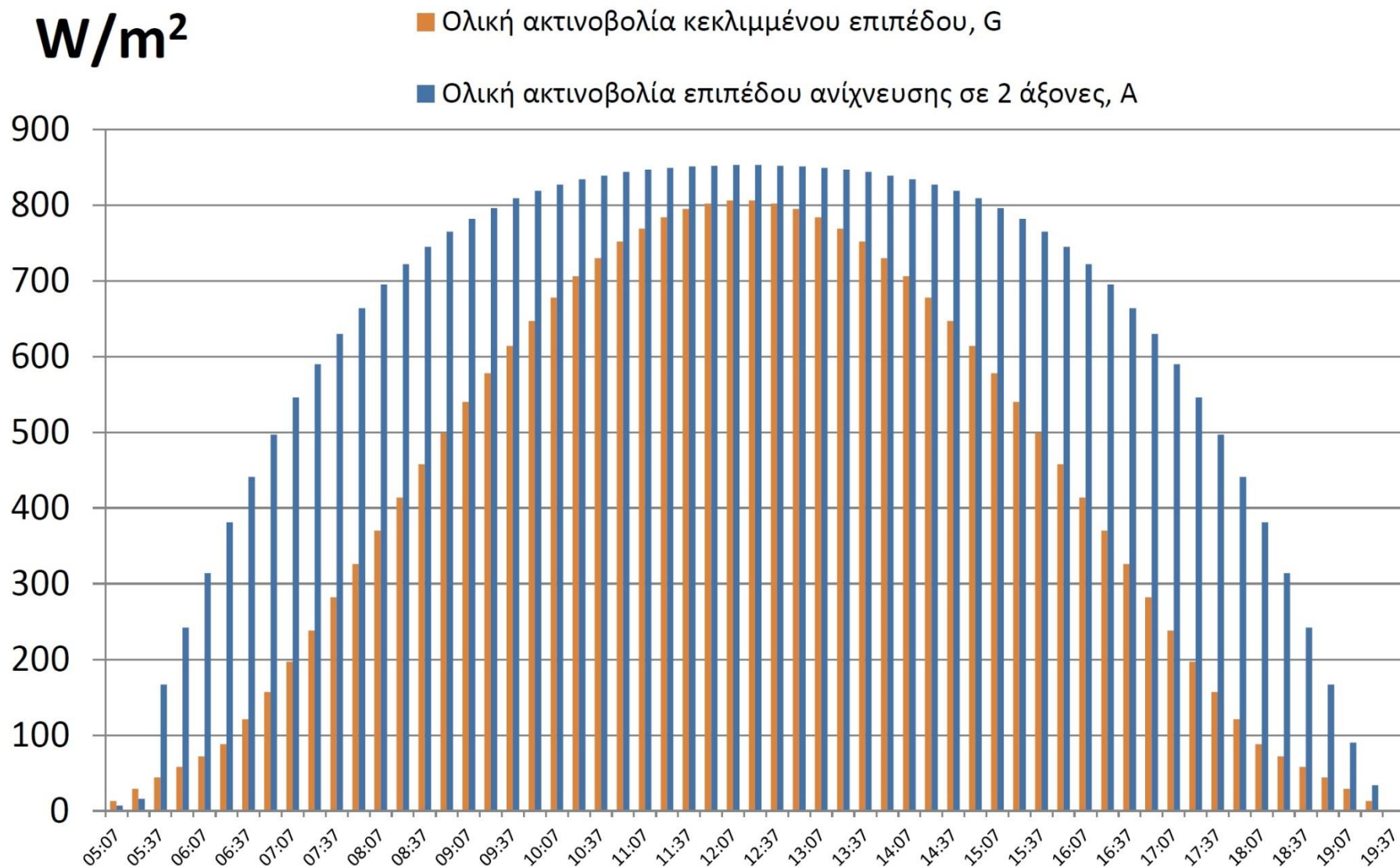
Σχήμα 4-31: Περιοχή εγκατάσταση πιλοτικής μονάδας επεξεργασίας της άλμης (Άγιος Φωκάς, Τήνος)

W/m^2

■ Ιούνιος ■ Δεκέμβριος



Διάγραμμα 4-4: Ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου, G , για μία τυπική μέρα του μήνα Ιουνίου και του Δεκεμβρίου



Διάγραμμα 4-5: Ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου (G) και επιπέδου ανίχνευσης του ήλιου σε 2 άξονες, για τυπική ημέρα του μήνα Ιουνίου, περιοχή Άγιος Φωκάς

4.2.7.2 Παραβολικά κάτοπτρα

Τα παραβολικά κάτοπτρα (Parabolic Trough Collectors, *PTC*) ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των συλλεκτών ανίχνευσης της πορείας του ήλιου. Οι συλλέκτες αυτοί διαθέτουν καμπύλες επιφάνειες ανάκλασης, συγκεντρώνοντας τις ακτίνες του ήλιου σε μία μικρότερη επιφάνεια συλλογής, οδηγώντας έτσι σε αύξηση της ροής της ακτινοβολίας και παραγωγή νερού (υπό πίεση) μεταξύ 50 και 400°C.

Για τον υπολογισμό της αποδιδόμενης ενέργειας του παραβολικού συλλέκτη *PTC*, απαιτείται η γνώση της κάθετης ηλιακής ακτινοβολίας (Direct Normal Irradiance, *DNI*). Δεδομένου ότι η βάση δεδομένων *PVGIS* δεν παρέχει αυτή την πληροφορία, ο υπολογισμός της πραγματοποιήθηκε ως ακολούθως:

1. Συλλογή δεδομένων ακτινοβολίας παρακολούθησης του ήλιου σε δύο άξονες από τη βάση δεδομένων (εφεξής H_{bn})
2. Η ακτινοβολία σε επίπεδο παρακολούθησης διπλού άξονα (H_{bT}) λαμβάνεται ίση προς την άμεση ακτινοβολία επιπέδου κάθετο στον ήλιο, καθώς (Duffie & Beckman, *Solar Engineering of thermal processes. Fourth Edition*, 2013, σ. 22):

$$\cos\theta = 1 \quad (4-71)$$

3. Υπολογισμός της γωνίας πρόσπτωσης θ για σύστημα παρακολούθηση μονού άξονα. Διακρίνονται δυο περιπτώσεις προσανατολισμού (Duffie & Beckman, *Solar Engineering of thermal processes. Fourth Edition*, 2013, σ. 22):

- Προσανατολισμός βορρά-νότου: το συνημίτονο της γωνίας δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$\cos\theta = (1 - \cos^2\delta \cdot \sin^2\omega)^{1/2} \quad (4-72)$$

- Προσανατολισμός ανατολή-δύση: το συνημίτονο της γωνίας δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\cos\theta = (\cos^2\theta_z + \cos^2\delta \cdot \sin^2\omega)^{1/2} \quad (4-73)$$

- θ_z , είναι η γωνία ζενίθ του ήλιου και υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\cos\theta_z = \sin\delta \cdot \sin\Phi + \cos\delta \cdot \cos\Phi \cdot \cos\omega \quad (4-74)$$

- δ , η ηλιακή απόκλιση και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right) \quad (4-75)$$

- n , είναι η ημέρα του έτους και μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια του
- Πίνακας 4-12.
- ω , ωριαία γωνία: είναι η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης γύρω από τον άξονά της με ρυθμό $15^\circ/\text{h} = 0.25^\circ/\text{min}$. Η ωριαία γωνία υπολογίζεται από τη σχέση

$$\omega = \pm 0.25 \cdot (\text{λεπτά από ηλιακό μεσημέρι}) \quad (4-76)$$

Πρέπει να τονιστεί ότι τα ηλιακή δεδομένα δίνονται ως συνάρτηση του ηλιακού χρόνου, ο οποίος δίνεται από την εξίσωση:

$$\text{Ηλιακός χρόνος} = t_{\text{pol}} \pm 4 \cdot (L_{\text{st}} - L_{\text{Loc}}) + E \quad (4-77)$$

Όπου L_{st} είναι το γεωγραφικό μήκος, στο οποίο βασίζεται ο τοπικός χρόνος (για την Ελλάδα 30°) και L_{Loc} είναι το γεωγραφικό μήκος του παρατηρητή (για Αθήνα $\sim 23^\circ$). Η σχέση ισχύει με $+$ για τα δυτικά μήκη και με $-$ για τα ανατολικά (σχετικά με το μεσημβρινό του Γκρινουιτς (για την Ελλάδα ισχύει με $-$). Ο συντελεστής 4 εκφράζει min° . Η τιμή του E δίνεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$E = 229.2 \cdot (0.000075 + 0.001868 \cdot \cos B - 0.032077 \cdot \sin B - 0.014615 \cdot \cos 2B - 0.04089 \cdot \sin 2B) \quad (4-78)$$

Όπου:

$$B = (n - 1) \cdot \frac{360}{365} \quad (4-79)$$

4. Υπολογισμός της κάθετης ακτινοβολίας, H_{BT}

$$H_{bT} = H_{bn} \cdot \cos\theta \quad (4-80)$$

Τα ηλιακά δεδομένα από τη βάση δεδομένων του PVGIS παρέχονται συναρτήσει του χρόνου (βήμα 15 λεπτά). Ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω, η κάθετη ηλιακή ακτινοβολία ανά ημέρα και τετραγωνικό μέτρο μπορεί να υπολογιστεί με χρήση της ακόλουθης εξίσωσης:

$$P = \frac{E}{t} \rightarrow E = P \cdot t \quad (4-81)$$

Ως παράδειγμα δίνεται ο υπολογισμός των ηλιακών δεδομένων για τον Ιανουάριο στον Πίνακα 9-3

5. Υπολογισμός της μέσης κάθετης ημερήσιας ακτινοβολίας: $\overline{H_{bT}}$ (kWh/m²/day):

$$\overline{H_{bT}} = \frac{\sum_{i=1}^{12} H_{bT}}{12} \quad (4-82)$$

6. Υπολογισμός της συνολικής απαιτούμενης επιφάνειας ανοίγματος, A_{PTC}

$$n_{PTC} = \frac{E_{load,PTC}}{H_{bT} \cdot A_{PTC}} \rightarrow A_{PTC} = \frac{E_{load,PTC}}{H_{bT} \cdot n_{PTC}} \quad (4-83)$$

Η εξίσωση αυτή χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της απαιτούμενης επιφάνειας του ανοίγματος για κάθε μήνα του χρόνου. Η επιφάνεια, ωστόσο επελέγη βάσει της ακόλουθης εξίσωσης:

$$n_{PTC} = \frac{E_{load,PTC}}{\overline{H_{bT}} \cdot A_{PTC,selected}} \rightarrow A_{PTC,selected} = \frac{E_{load,PTC}}{\overline{H_{bT}} \cdot n_{PTC}} \quad (4-84)$$

Όπου $E_{load, PTC}$ είναι το ημερήσιο θερμικό φορτίο που απαιτείται για τη λειτουργία του συστήματος. Ο συντελεστής απόδοσης των παραβολικών κατόπτρων λήφθηκε ίση προς **0.6**.

7. Υπολογισμός απαιτούμενης πίεσης λειτουργίας των PTC έτσι ώστε να αποφευχθεί βρασμός

Το νερό βρίσκεται υπό πίεση για την αποφυγή εμφάνισης του

φαινομένου του βρασμού. Η επιλογή της πίεσης πρέπει να γίνει με προσοχή, εφόσον με την αύξηση της πίεσης, αυξάνουν παράλληλα και τα κόστη λειτουργίας που σχετίζονται με τον κυκλοφορητή.

Η πίεση μπορεί να υπολογιστεί με χρήση της ακόλουθης εξίσωσης:

$$Q_{coll} = m_{pw} \cdot c_p \cdot \Delta T \rightarrow \Delta T = \frac{Q_{coll}}{m_{pw} \cdot c_p} \quad (4-85)$$

Όπου:

- Q_{coll} είναι η συνολική θερμότητα που απορροφάται από το ηλιακό πεδίο
- C_p , η θερμοχωρητικότητα του νερού
- m_{pw} , η παροχή μάζας του υπό πίεση νερού (υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (4-88))
- ΔT είναι η αύξηση της θερμοκρασίας στο ηλιακό πεδίο PTC

Συνεπώς, για την αποφυγή του βρασμού πρέπει: (4-86)

$$T_s|_{p=p1} + \Delta T \leq T_s|_{p=p2}$$

Όπου:

- $p1$ είναι η πίεση του θαλάμου εκτόνωση (steam flash vessel)
- $p2$ είναι η πίεση στην οποία πρέπει να διατηρείται το νερό

Πίνακας 4-12: Αύξων αριθμός n ημέρας του έτους, μέση ημέρα μήνα, αριθμός n της μέσης ημέρας κάθε μήνα, ηλιακή απόκλιση δ μέση ημέρας

Μήνας	Αριθμός n για τη ημέρα κάθε μήνα	Μέση ημέρα μήνα	Αριθμός n της μέσης ημέρας κάθε μήνα	Ηλιακή απόκλιση δ μέση ημέρας (deg)
Ιανουάριος	i	17	17	-20.9
Φεβρουάριος	31 + i	16	47	-13.0
Μάρτιος	59 + i	16	75	-2.4
Απρίλιος	90 + i	15	105	9.4
Μάιος	120 + i	15	135	18.8
Ιούνιος	151 + i	11	162	23.1
Ιούλιος	181 + i	17	198	21.2
Αύγουστος	212 + i	16	228	13.5
Σεπτέμβριος	243 + i	15	258	2.2
Οκτώβριος	273 + i	15	288	-9.6
Νοέμβριος	304 + i	14	318	-18.9
Δεκέμβριος	334 + i	10	344	-23.0

4.2.7.2.1 Δοχείο ανάκτησης ατμού (Steam Flash Vessel)

Ακολουθώς δίνεται το σετ των μαθηματικών εξισώσεων για τη μοντελοποίηση του δοχείου ατμού.

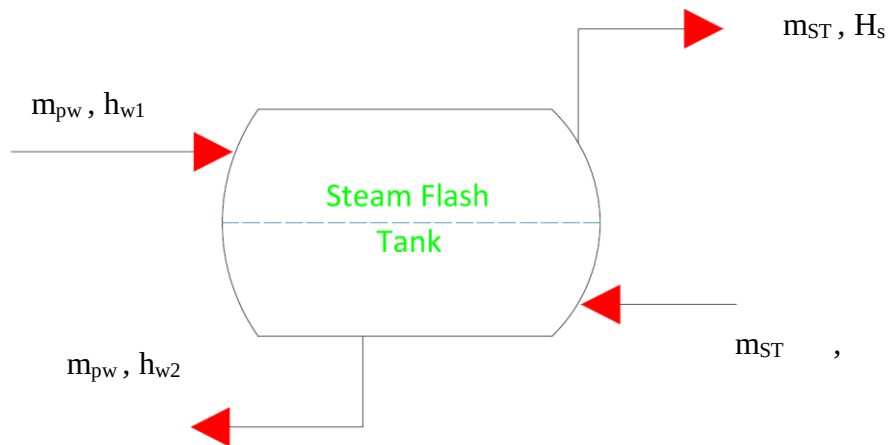
Ισοζύγιο μάζας:

$$m_w + m_{pw} = m_{ST} + m_{pw} \rightarrow m_w = m_{ST} \quad (4-87)$$

Όπου:

- m_{ST} , η παροχή μάζας του κορεσμένου ατμού (kg/s)
- m_{pw} , η παροχή μάζας του νερού υπό πίεση (kg/s)
- m_w , η παροχή μάζας του υπόψυκτου νερού που επιστρέφει στο δοχείο (kg/s)

Σχήμα 4-32: Σχηματική αναπαράσταση και ρεύματα προς και από το δοχείο ατμού



Ισοζύγιο ενέργειας:

$$m_{pw} \cdot h_{w1} + m_{ST} \cdot h_{w3} = m_{ST} \cdot H_s + m_{pw} \cdot h_{w2}$$

$$\rightarrow m_{pw} = \frac{m_{ST} \cdot (H_s - h_{w3})}{h_{w1} - h_{w2}} \quad (4-88)$$

Όπου:

- H_s η ενθαλπία του κορεσμένου ατμού για την πίεση λειτουργίας του δοχείου, p_1 (kJ/kg)
- h_{w1} , η ενθαλπία του υπό πίεση νερού (kJ/kg)
- h_{w2} , η ενθαλπία του κορεσμένου νερού για την πίεση του δοχείου (kJ/kg)
- h_{w3} , η ενθαλπία του υπόψυκτου νερού (kJ/kg)

Εξισώσεις για τη διαστασιολόγηση του δοχείου ατμού:

Από τη βιβλιογραφική έρευνα, προέκυψε ότι για τις μικρές ηλιακές μονάδες ατμοπαραγωγής, τα δοχεία ατμού τύπου Ruth είναι τα πιο κατάλληλα (Thomas, 1996). Το δοχείο αυτό είναι κυλινδρικό και 50% του όγκου του πληρούνται με νερό. Προτιμάται η οριζόντια διάταξη, έτσι ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη επιφάνεια νερού και να διευκολυνθεί το φαινόμενο της ατμοποίησης.

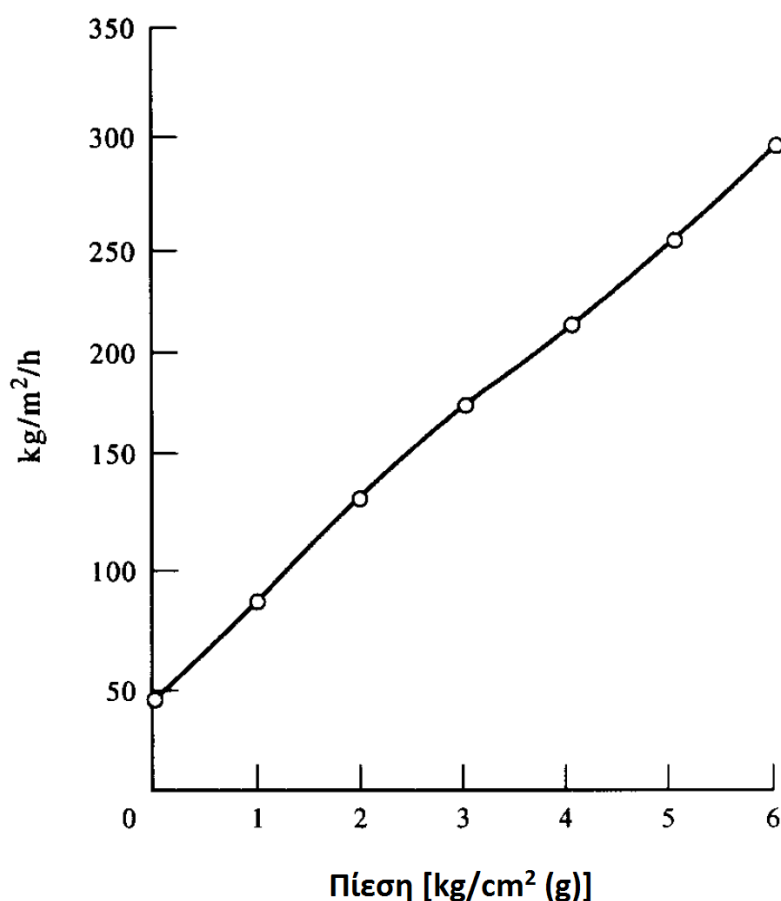
Ο μέγιστος ρυθμός απομάκρυνσης ατμού από το δοχείο, έχει μελετηθεί εκτενώς από τους κατασκευαστές του δοχείου τύπου Ruth. Βάσει της εμπειρίας αυτής, οι κατασκευαστές προτείνουν τη χρήση του Διάγραμμα 4-6. Στο διάγραμμα αυτό δίνεται ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής ατμού έτσι ώστε να μην συμπαρasyρθούν σταγόνες της υγρής φάσης από την ελεύθερη υγρή επιφάνεια (entrainment).

Ο ρυθμός ατμοπαραγωγής υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$y=47.06+41.82x \quad (4-89)$$

Όπου:

- x , είναι η πίεση του δοχείου σε kg/cm^2 , και
- y , είναι τα kg ατμού που παράγονται ανά ώρα και m^2 επιφάνειας νερού.



Πηγή: (SOL-BRINE, 2012b)

Διάγραμμα 4-6: Μέγιστος ρυθμός flash για την αποφυγή από την επιφάνεια του νερού

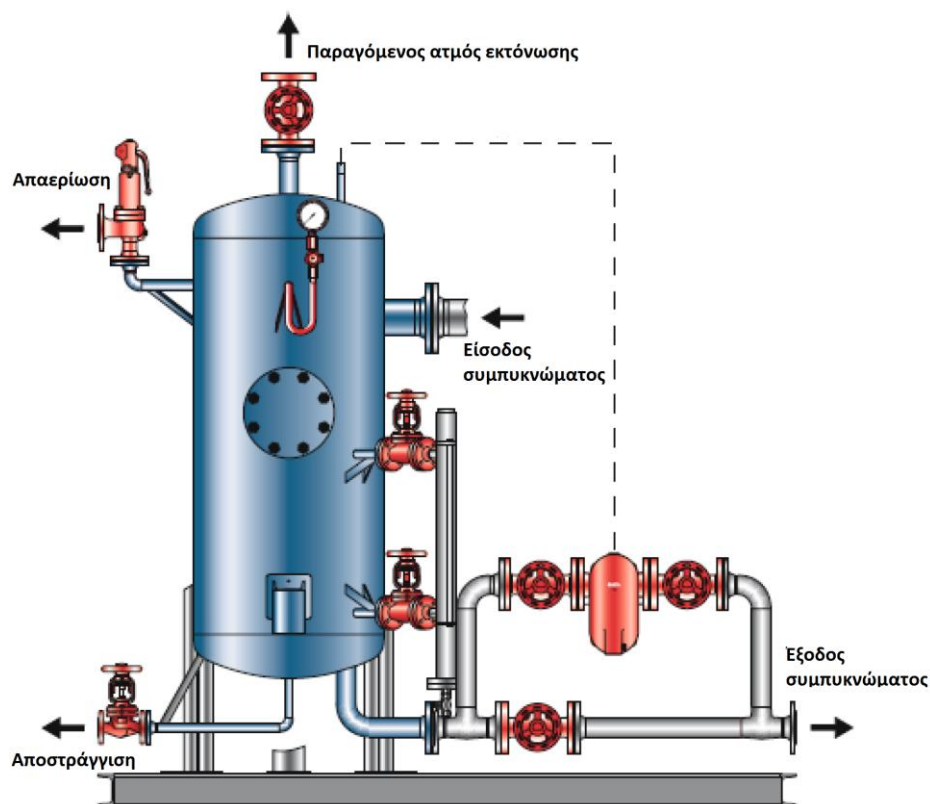
Με χρήση της εξίσωσης και με δεδομένη την απαιτούμενη πίεση και ποσότητα ατμού, υπολογίζεται η επιφάνεια του νερού. Για τη διαστασιολόγηση του κυλινδρικού δοχείου, ακολουθείται επίσης και η κοινή πρακτική να διατηρείται ο λόγος του μήκους προς τη διάμετρο του δοχείου κοντά στο 3.

Έτσι, από τις παραπάνω εξισώσεις και με δεδομένο την πληρότητα του δοχείου κατά 50% με νερό, η διάμετρος του δοχείου μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$D_{FT} = \sqrt{\frac{A_{FT}}{3}} \quad (4-90)$$

Όπου D_{FT} , A_{FT} είναι η διάμετρος και η επιφάνεια του νερού στο δοχείο αντίστοιχα. Τέλος, ο όγκος του δοχείου υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$V_{FT} = \pi \cdot \frac{D_{FT}^2}{4} \cdot L = 3 \cdot \pi \cdot \frac{D_{FT}^3}{4} \quad (4-91)$$



Σχήμα 4-33: Παράδειγμα βιομηχανικού δοχείου ανάκτησης ατμού

4.2.7.2.2 Συσσωρευτής ατμού (Steam Accumulator)

$$pfs = \frac{h_w^{ac} - h_w^{sn}}{H_s^{sn} - h_w^{sn}} \quad (4-92)$$

Όπου:

- h_w^{ac} , η ενθαλπία του κορεσμένου νερού,
- h_w^{sn} , η ενθαλπία του κορεσμένου νερού στην πίεση του δικτύου του ατμού, και
- H_s^{sn} , η ενθαλπία του κορεσμένου ατμού.

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει μία χαρακτηριστική παράμετρο σχεδιασμού του συσσωρευτή ατμού, που ονομάζεται pfs. Αυτή η παράμετρος επηρεάζεται από τα στοιχεία πίεσης των ρευμάτων που εισέρχονται και εξέρχονται από τη μονάδα.

$$sr^{ac} = m_{st} t_{st} \quad (4-93)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει την παροχή του ατμού, sr^{ac} , όπου t_{st} είναι η δυνατότητα αποθήκευσης του ατμού σε ώρες.

$$m_w^{ac} = \frac{sr^{ac}}{pfs} \quad (4-94)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει την παροχή του νερού m_w^{ac} λαμβάνοντας υπόψη την παράμετρο σχεδιασμού pfs.

$$V_w = \frac{m_w^{ac}}{\rho_w} \quad (4-95)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει τον όγκο του νερού V_w που μπορεί να αποθηκευτεί εντός του δοχείου. ρ_w είναι η πυκνότητα του νερού στην αντίστοιχη πίεση.

$$V_{ac} = \frac{V_w}{0.9} \quad (4-96)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει τον όγκο του δοχείου, V_{ac} , υποθέτοντας ότι 90% του δοχείου πληρούται με νερό.

$$SSC = m_w^{ac} \frac{h_w^{ac} - h_w^{sn}}{H_s^{ac} - h_w^{ac}} \quad (4-97)$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει τη χωρητικότητα του ατμού, SSC , η οποία εκφράζει την ποσότητα του ατμού που μπορεί να παράξει ο συσσωρευτής ατμού, στην περίπτωση που το σύστημα PTC είναι εκτός λειτουργίας. Στην εξίσωση αυτή, H_s^{ac} , είναι η ενθαλπία του κορεσμένου ατμού στην πίεση λειτουργίας του συσσωρευτή.

4.2.7.3 Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες

Για τη διαστασιολόγηση των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών χρησιμοποιείται η ίδια φιλοσοφία με το σχεδιασμό του συστήματος PTC. Η μόνη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι γίνεται χρήση διαφορετικών ηλιακών δεδομένων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται τα στοιχεία ηλιακής ακτινοβολίας για κλίση επίπεδου, G (βλ. επίσης Ενότητα 4.2.7.1).

Στο προτεινόμενο διάγραμμα ροής, το θερμικό φορτίο που καλύπτει το ηλιακό πεδίο των επίπεδων συλλεκτών αφορά στις θερμικές ανάγκες του ξηραντήρα (βλ. επίσης Σχήμα 4-30), σε περίπτωση που δεν επαρκεί η ενέργεια από τα συμπυκνώματα ατμού του κρυσταλλωτήρα και του εξατμιστήρα.

Για τη μεγιστοποίηση της απορροφώμενης ηλιακής ενέργειας, η γωνία τοποθέτησης των ηλιακών συλλεκτών επιλέγεται ίση με το Γεωγραφικό Πλάτος της περιοχής στην οποία θα εγκατασταθεί το ηλιακό πεδίο (Duffie & Beckman, 2013).

$$n_{FPC} = \frac{E_{load,FPC}}{\overline{H_{bT}} \cdot A_{FPC}} \rightarrow A_{FPC} = \frac{E_{load,FPC}}{\overline{H_{bT}} \cdot n_{FPC}} \quad (4-98)$$

Όπου:

- n_{FPC} , η θερμική απόδοση των ηλιακών συλλεκτών (θεωρήθηκε ίση προς **0.4**)
- E_{load} , το ημερήσιο θερμικό φορτίο εκφρασμένο σε kWh.
- $\overline{H_{bT}}$, η μέση ημερήσια ακτινοβολία κεκλιμένου επίπεδου σε βέλτιστη κλίση (kWh/m²/day)

4.2.7.4 Φωτοβολταϊκό σύστημα

Το φωτοβολταϊκό σύστημα σχεδιάζεται έτσι ώστε να:

- Καλύπτει τις ηλεκτρικές ανάγκες του πιλοτικού συστήματος, και
- Να έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα αυτό δεν θα είναι αυτόνομο (δηλαδή όχι διασυνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο).

Το ελάχιστο μέγεθος (Minimum Array Size, MAS), μπορεί να υπολογιστεί για κάθε μήνα, χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$MAS=(1.2*ADL*(1+0.25))/(INS*n*PCSE) \quad (4-99)$$

Όπου:

- ADL, το ημερήσιο ηλεκτρικό φορτίο (Average Daily Load)
- INS, ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο (37°)
- PCSE, η απόδοση του συστήματος BoS (βλ. Πίνακα 4-13)
- n, απόδοση φωτοβολταϊκής γεννήτριας (= 14%)

Πίνακας 4-13: Απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος

A/A	Συσκευή	Απόδοση
1	<i>Ρυθμιστής συσσωρευτή</i>	0.95
2	<i>Απόδοση</i>	0.95
3	<i>Καλώδια και έλεγχος</i>	0.97
4	<i>DC/DC Converter</i>	0.95
	Σύνολο	0.95x0.95x0.97x0.95=0.83

Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό module αποτελείται από περίπου 60 φωτοβολταϊκά στοιχεία (0.156m x 0.156m), με συνολική ενεργή επιφάνεια περίπου ίση με 1.46 m² (τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδέονται σε σειρά).

Ένας συσσωρευτής με ονομαστική τάση 48V, μπορεί να φορτιστεί ως ακολούθως.

Δεδομένου ότι κάθε module έχει μέγιστη ισχύ περίπου στα 230Watt, η συνολική ισχύς της φωτοβολταϊκής γεννήτριας μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$P_{\text{nominal}} = 230 \text{ Watt} \times \text{number of PV modules (Watt (peak))} \quad (4-100)$$

Τα modules αυτά συνδέονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι η ισχύς παρέχεται στον inverter (μέσω των συσσωρευτών) σε κατάλληλη τάση. Η μεθοδολογία για την κατάλληλη συνδεσμολογία συζητείται ακολούθως.

Υποθέτοντας ονομαστική τάση ίση με 48V, η τάση εξόδου από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια, V_{PV} , είναι ίση με:

$$V_{PV} = 1.4 \times 48V = 67.2V$$

Η τάση αυτή μπορεί να επιτευχθεί με σύνδεση 3 modules σε σειρά. Με δεδομένη την τάση κάθε module στα 26V, σειρές με 3 modules μπορούν να συνδεθούν σε σειρά, δίνοντας τάση $3 \times 26 = 78V$.

Διαστασιολόγηση συσσωρευτή

Το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι αυτόνομο σύστημα και ως εκ τούτου απαιτείται η χρήση ηλεκτρικών συσσωρευτών (μπαταριών). Τα βασικά χαρακτηριστικά των συσσωρευτών είναι τα ακόλουθα:

- Ονομαστική Τάση V_n
- Ονομαστική χωρητικότητα, C, σε Ah
- Αριθμός εκφορτίσεων, N_k
- Μέγιστος αριθμός εκφορτίσεων, $N_{k\text{max}}$ (=1200),
- Το μεγαλύτερο δυνατό βάθος εκφόρτισης, Depth of Discharge (DoD)

Μία εμπειρική σχέση η οποία συσχετίζει τον αριθμό εκφορτίσεων και το μεγαλύτερο δυνατό βάθος εκφόρτισης είναι η ακόλουθη:

$$N_k \cdot (\text{DoD}) = 1200 \quad (4-101)$$

Η απαιτούμενη χωρητικότητα των μπαταριών μπορεί να υπολογιστεί με χρήση της ακόλουθης εξίσωσης:

$$C(Ah)=1.2*(E_T*n)/(DOD*V_n) \quad (4-102)$$

Όπου:

- E_T , το συνολικό ημερήσιο ηλεκτρικό φορτίο
- n , ο αριθμός των ημερών που το σύστημα λειτουργεί χωρίς ήλιο (στην περίπτωση μας επελέγη 1 ημέρα αυτονομίας)

Επίσης, στην περίπτωση μας επελέγη:

- $DoD = 0.4$ και
- $V_n = 48V$ DC

4.2.8 Ανάλυση ευαισθησίας και τεχνικές προδιαγραφές του συστήματος επεξεργασίας της άλμης

Βάσει της μαθηματικής μοντελοποίησης που παρουσιάζεται στις προηγούμενες ενότητες, αναπτύχθηκε ένας προσομοιωτής. Με τη χρήση αυτού του προσομοιωτή, έγινε αρχικά μία ανάλυση ευαισθησίας και στη συνέχεια διαστασιολογήθηκαν οι επιμέρους συνιστώσες. Ο προσομοιωτής είναι διαθέσιμος στην ιστοσελίδα του έργου¹⁵, ενώ άποψη του προσομοιωτή δίνεται στην Εικόνα 4-4.

4.2.8.1 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για τις κύριες συνιστώσες του συστήματος, δηλαδή του εξατμιστήρα, του κρυσταλλωτήρα και του ξηραντήρα.

Εξατμιστήρας:

Η προσομοίωση του εξατμιστήρα έγινε σύμφωνα με τη μοντελοποίηση που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 4.2.2. Το σύστημα των εξισώσεων λύνεται με δοκιμές. Το διάγραμμα ροής των υπολογισμών δίνεται στο Διάγραμμα 4-7, ενώ οι υπολογισμοί, μετά την επίτευξη της σύγκλισης, δίνονται αναλυτικά στο Παράρτημα 9.4 (Πίνακας 9-4). Η λίστα με τις τελικές τιμές των μεταβλητών περιγραφής της διεργασίας δίνεται στον Πίνακα 4-14.

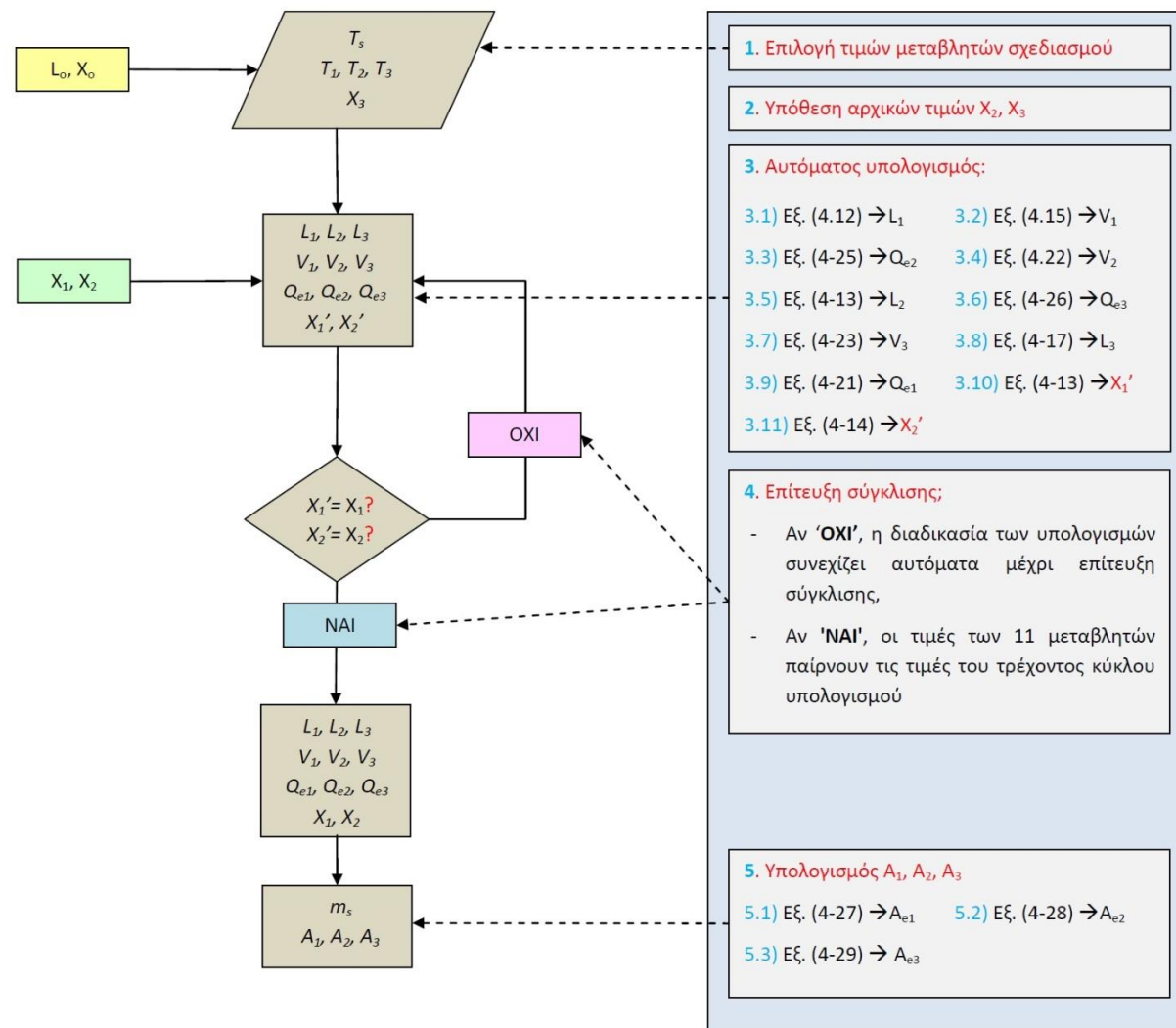
Κρυσταλλωτήρας:

Η προσομοίωση του κρυσταλλωτήρα έγινε σύμφωνα με τη μοντελοποίηση που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 4.2.3. Οι υπολογισμοί δίνονται αναλυτικά στο Παράρτημα 9.4 (Πίνακας 9-5), ενώ η λίστα με τις τελικές τιμές των μεταβλητών περιγραφής της διεργασίας δίνεται στον Πίνακα 4-15.

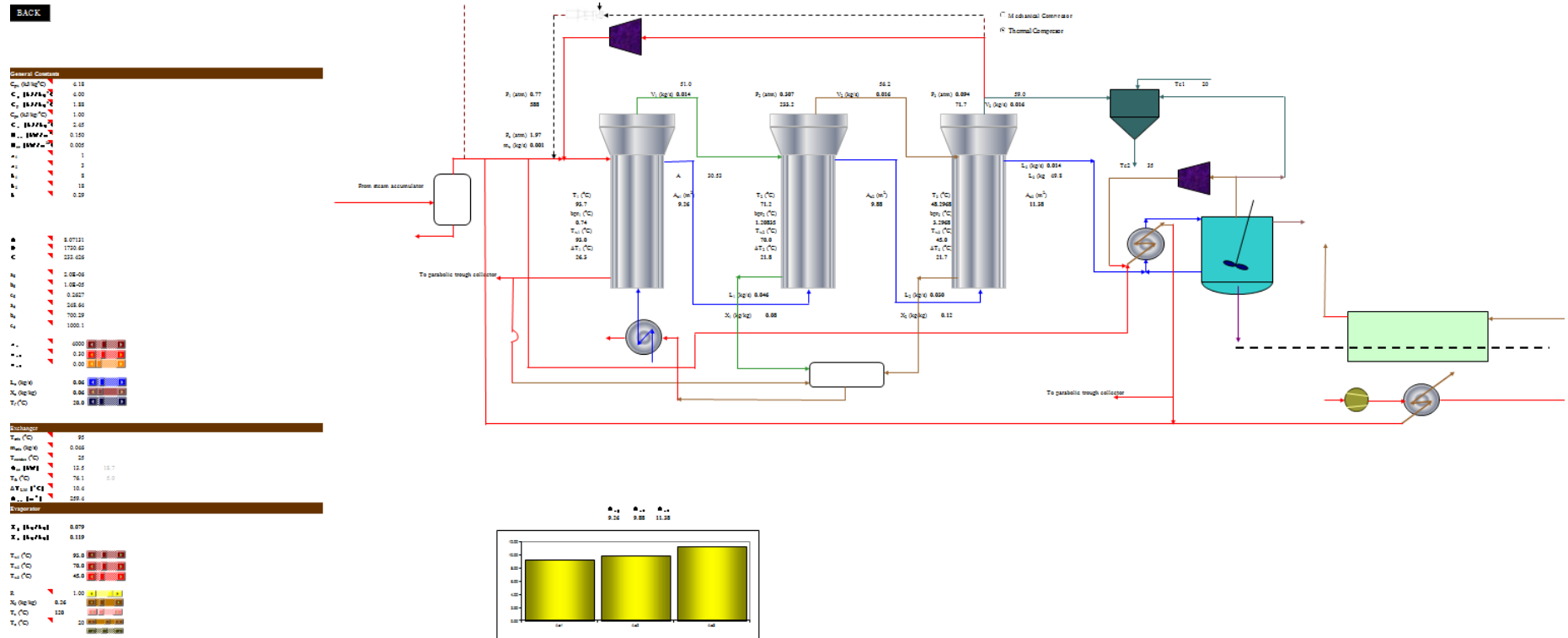
Ξηραντήρας

Η προσομοίωση του κρυσταλλωτήρα έγινε σύμφωνα με τη μοντελοποίηση που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 4.2.4. Οι υπολογισμοί δίνονται αναλυτικά στο Παράρτημα 9.4 (Πίνακας 9-6), ενώ η λίστα με τις τελικές τιμές των μεταβλητών περιγραφής της διεργασίας δίνεται στον Πίνακα 4-16.

¹⁵ Ο προσομοιωτής είναι διαθέσιμος στην ακόλουθη ιστοσελίδα: <http://solbrine.uest.gr/index.php/en/actions/31-action-2-design-of-an-innovative-pilot-scale-energy-autonomous-brine-treatment-system>



Διάγραμμα 4-7: Διάγραμμα ροής υπολογισμών για τη διαστασιολόγηση του εξατμιστήρα



Εικόνα 4-4: Άποψη του λογισμικού προσομοίωσης της διεργασίας του πρότυπου συστήματος επεξεργασίας της άλμης

Πίνακας 4-14: Λίστα με τις τελικές τιμές των μεταβλητών προσομοίωση του εξατμιστήρα

A/A		Περιγραφή παραμέτρου	Σύμβολο	Μονάδες	Τιμή
Εξατμιστήρας					
1.	Μεταβλητές σχεδιασμού	Θερμοκρασία διαλύματος 3 ^{ης} βαθμίδας	T ₃	°C	93.0
2.		Θερμοκρασία διαλύματος 2 ^{ης} βαθμίδας	T ₂	°C	70.0
3.		Θερμοκρασία διαλύματος 1 ^{ης} βαθμίδας	T ₁	°C	45.0
4.		Θερμοκρασία τροφοδοσίας ατμού	T _s	°C	120
5.		Συγκέντρωση άλμης εξόδου από 3 ^η βαθμίδα	X ₃	Kg/kg	0.26
1.	Μεταβλητές διεργασίας	Συγκέντρωση άλμης εξόδου από 1 ^η βαθμίδα	X ₁	Kg/kg	0.079
2.		Συγκέντρωση άλμης εξόδου από 2 ^η βαθμίδα	X ₂	Kg/kg	0.119
3.		Ποσοστό ατμού προς συμπίεστη	R	%	100
4.		Θερμοκρασία περιβάλλοντος	T _o	°C	20
5.		Λανθάνουσα θερμότητα ατμού	ΔH _s	kJ/kg	2,199.7
6.		Λανθάνουσα θερμότητα διαλύματος 1 ^{ης} βαθμιδ.	ΔH ₁	kJ/kg	2,273.4
7.		Λανθάνουσα θερμότητα διαλύματος 2 ^{ης} βαθμιδ.	ΔH ₂	kJ/kg	2,332.5
8.		Λανθάνουσα θερμότητα διαλύματος 3 ^{ης} βαθμιδ.	ΔH ₃	kJ/kg	2,392.9
9.		Ανύψωση θερμοκρασίας βρασμού 3 ^{ης} βαθμίδας	bpr ₃	°C	3.3
10.		Ανύψωση θερμοκρασίας βρασμού 2 ^{ης} βαθμίδας	bpr ₂	°C	1.2
11.		Ανύψωση θερμοκρασίας βρασμού 1 ^{ης} βαθμίδας	bpr ₁	°C	0.7
12.		Παροχή άλμης από την 1 ^η βαθμίδα	L ₁	kg/s	0.046
13.		Παραγωγή ατμού στην 1 ^η βαθμίδα	V ₁	kg/s	0.014
14.		Ροή θερμότητας στη 2 ^η βαθμίδα	Q _{e2}	kW	32.3
15.		Παραγωγή ατμού στην 2 ^η βαθμίδα	V ₂	kg/s	0.016
16.		Παροχή άλμης από την 2 ^η βαθμίδα	L ₂	kg/s	0.030
17.		Ροή θερμότητας στη 3 ^η βαθμίδα	Q _{e3}	kW	36.4
18.		Παραγωγή ατμού στην 3 ^η βαθμίδα	V ₃	kg/s	0.016
19.		Παροχή άλμης από την 3 ^η βαθμίδα	L ₃	kg/s	0.014
20.		Ροή θερμότητας στη 1 ^η βαθμίδα	Q _{e1}	kW	36.5
21.		Παροχή ατμού	m _s	kg/s	0.001
22.		Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας 1 ^η βαθμίδα	U _{e1}	kW/m ² °C	0.150
23.		Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας 2 ^η βαθμίδα	U _{e2}	kW/m ² °C	0.150
24.		Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας 3 ^η βαθμίδα	U _{e3}	kW/m ² °C	0.147
25.		Επιφάνεια εναλλάκτη 1 ^{ης} βαθμίδας	A _{e1}	m ²	9.26
26.		Επιφάνεια εναλλάκτη 2 ^{ης} βαθμίδας	A _{e2}	m ²	9.88
27.		Επιφάνεια εναλλάκτη 3 ^{ης} βαθμίδας	A _{e3}	m ²	11.38
28.		Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	U _{eo}	kW/m ² °C	0.150
Προθερμαντήρας άλμης					
29.	Μεταβλητές διεργασίας	Χρήση προθερμαντήρα;	-	Y/N	Y
30.		Θερμοκρασία συμπυκνώματος μετά τη μείξη	T _{mix}	°C	95
31.		Παροχή μάζας συμπυκνώματος	m _{mix}	kg/s	0.046
32.		Θερμοκρασία εξόδου συμπυκνώματος από τον προθερμαντήρα	T _{condex}	°C	25
33.		Ροή θερμότητας στον προθερμαντήρα	Q _{ec}	kW	13.5
34.		Θερμοκρασία εξόδου άλμης από τον προθερμαντήρα	T _{fo}	°C	76.1
35.		Λογαριθμική μέση θερμοκρασία	ΔT _{LM}	°C	10.4

Πίνακας 4-15: Λίστα με τις τελικές τιμές των μεταβλητών προσομοίωση του κρυσταλλωτήρα

α/α		Περιγραφή παραμέτρου	Σύμβολο	Μονάδες	Τιμή
Κρυσταλλωτήρας					
1.	Μεταβλητές σχεδιασμού	Χρόνος παραμονής	τ	s	5,200
1.	Μεταβλητές διεργασίας	Πυκνότητα διαλύματος εισόδου	ρ_1	kg/m ³	1,199
2.		Πυκνότητα στερεού κρυστάλλου	ρ_c	kg/m ³	2,170
3.		Volumetric Shape Factor	f_v	-	0.52
4.		Crystal Nucleation Kinetic Constant	k_n	-	1.0E+17
5.		Περιεχόμενο υγρασίας μάγματος	X_M	kg/kg	0.23
6.		Nuclei Population Density	n_o	m ⁻³	2.3E+12
7.		Ροή μάζα διαλύτη	W	kg/s	0.010
8.		Πίεση λειτουργίας	P_{cr}	atm	1.00
9.		Θερμοκρασία λειτουργίας	T_{cr}	°C	100.0
10.		Υπερκορεσμός	ΔC	kg/kg	0.004
11.		Σταθερά κινητικής ανάπτυξης κρυστάλλων	k_G	-	2.46E-05
12.		Ratio of molecular weight of hydrated	R_c	-	1
13.		Fraction of Vaporized Solvent per Feed	V_{fr}	kg/kg	1.00
14.		Ταχύτητα περιστροφής	N	Hz	140
15.		Συγκέντρωση κορεσμένου διαλ/τος	C_{eq}	kg/kg	0.2837
16.		Θερμότητα ατμοποίησης	ΔH_{c1}	kJ/kg	2,254.7
17.		Συγκέντρωση (εντός κρυσταλ/ρα)	X_{cr}	kg/kg	0.280
18.		Συγκέντρωση (ανηγμένο στη μάζα διαλύτη)	X_{cr}'	kg/kg	0.388
19.		Ρυθμός ανάπτυξης κρυστάλλων	G	m/s	9.84E-08
20.		Ογκομετρική παροχή	Q_{Fc}	m ³ /s	1.15E-05
21.		Συγκέντρωση κορεσμού (ανά μάζα διαλύτη)	X_{crf}'	kg/kg	0.396
22.		Crystal Yield	Y	kg	0.004
23.		Ρυθμός παραγωγής ατμού	V_{scr}	kg/s	0.0094
24.		Όγκος κρυσταλλωτήρα	V_{cr}	m ³	0.06
25.		Μάζα κρυστάλλων	M_T	kg/m ³	1,064
26.		Nucleation kinetic	B^o	1/s	2.0E+10
27.		Κυρίαρχο μέγεθος κρυστάλλων	L_d	m	1.5E-03
28.		Μέσο μήκος κρυστάλλων	L_m	m	2.0E-03
29.		Πυκνότητα μάγματος εξόδου	ρ_2	kg/m ³	1,316.5
30.		Θερμότητα ατμοποίησης διαλύτη	ΔH_m	kJ/kg	2,254.7
31.		Θερμότητα κρυστάλλωσης	ΔH_c	kJ/kg	97
32.		Παροχή θερμότητας	Q_c	kW	23.9
33.		Παροχή μάζας ατμού	m_s	kg/s	0.001

Πίνακας 4-16: Λίστα με τις τελικές τιμές των μεταβλητών προσομοίωση του ξηραντήρα

α/α		Περιγραφή παραμέτρου	Σύμβολο	Μονάδες	Τιμή
Ξηραντήρας					
1.	Μεταβλητές σχεδιασμού	Θερμοκρασία εισόδου αέρα στον ξηραντήρα	T_a	$^{\circ}\text{C}$	58
2.		Ταχύτητα αέρα	u	m/s	5.00
1.	Μεταβλητές διεργασίας	Αύξηση υγρασίας αέρα ξήρανσης	ΔY	kg/kg db	0.004
2.		Σταθερά κινητικής ξήρανσης	k_o	-	0.039
3.		Σταθερές κινητικής ξήρανσης	a	-	0.1466
4.			b	-	-0.47
5.			c	-	0.74
6.		Ύψος στρώματος μάγματος	d	m	0.25
7.		Τελική υγρασία άλατος	X		0.01
8.		Θερμοκρασία μάγματος	T_m	$^{\circ}\text{C}$	40
9.		Σταθερά ξήρανσης	k	h^{-1}	0.05
10.		Χρόνος ξήρανσης	t	h	1.02
11.		Θερμότητα ατμοποίησης υγρασίας	ΔH_m	kJ/kg	2,362
12.		Παροχή υγρασίας στον ξηραντήρα	W	kg/s	0.001
13.		Παροχή αέρα	F_a	kg/s	0.198
14.		Παροχή θερμότητας	Q_d	kW	7.5
15.		Θερμοκρασία εξόδου υπόψυκτου υγρού από τον εναλλάκτη	T_{ex}^{DHE}	$^{\circ}\text{C}$	30.0
16.		Ροή θερμότητας από τον κρυσταλλωτήρα στον ξηραντήρα	Q_{scr}	kW	3.54
17.		Παροχή μάζας συμπυκνώματος από τον κρυσταλλωτήρα	m_s^{DHE}	kg/s	0.009
18.		Ροή θερμότητας από ρεύμα ατμού	$Q_{s\text{Steam}}$	kW	3.98
19.		Πρόσθετη ανάγκη παροχής μάζας ατμού από παραβολικά κάτοπτρα	$m_s^{DHE'}$	kg/s	0.0017
20.		Συνολικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	U_D	$\text{kW/m}^2\text{C}$	0.100
21.		Μέση λογαριθμική θερμοκρασία	ΔT_{LM}^{DHE}	$^{\circ}\text{C}$	28.5
22.		Επιφάνεια εναλλάκτη θερμότητας	A_{DHE}	m^2	2.64
23.		Ύψος στρώματος άλατος	h_{layer}	m	0.01
24.		Επιφάνεια δίσκου	A_{tr}	m^2	0.1
25.		Παραγωγή άλατος	Q_s	m^3/day	0.054
26.		Επιφάνεια στρώματος άλατος	A_d	m^2	0.61
27.		Αριθμός δίσκων	N_{tr}	-	6.09

4.2.8.2 Τεχνικές προδιαγραφές του συστήματος

Μετά την ολοκλήρωση της ανάλυσης ευαισθησίας, διατυπώθηκαν οι τεχνικές προδιαγραφές του συστήματος. Το τεχνικό δελτίο αυτό χρησιμοποιήθηκε για την επικοινωνία με κατασκευαστές. Οι κατασκευαστές, έχοντας μελετήσει τις προδιαγραφές, διατύπωναν πιθανές τροποποιήσεις βελτιώσεις, καθώς επίσης και την οικονομική τους προσφορά.

Οι τεχνικές προδιαγραφές του συστήματος επεξεργασίας της άλμης δίνονται ακολούθως για τα επιμέρους υπό-συστήματα.

Εξατμιστήρας

Διάταξη εξάτμισης τύπου πολλαπλής εξάτμισης (Multiple Effect Distillation, *MED*), κατακόρυφης ροής (Multiple Effect Stack, *MES*), σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια. Τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του εξατμιστήρα είναι ειδικής ποιότητας, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται μηχανική αντοχή αλλά και αντοχή στη διάβρωση. Έτσι, τόσο οι αυλοί που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή των στοιχείων εξάτμισης της άλμης, όσο και το κέλυφος των τριών βαθμίδων πρέπει να είναι κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα ποιότητας UNS S32750 (Super Duplex) ή κράμα ανώτερης αντοχής σε διάβρωση. Σημειώνεται ότι η μέθοδος συνένωσης ή συγκόλλησης των διαφόρων τμημάτων της εγκατάστασης πρέπει να είναι κατάλληλη, αναλόγως του υλικού, αντίστοιχης αντοχής σε διάβρωση και απολύτως σύμφωνη προς διεθνείς προδιαγραφές (DIN ή ASME). Υλικά όπως ανοξείδωτοι χάλυβες ποιότητας 304 (UNS 1.4301), 316L (UNS 1.4404) δεν αποτελούν αποδεκτά υλικά, παρά μόνο αν χρησιμοποιηθεί ειδική επίστρωση που να εξασφαλίζει αντοχή στις συνθήκες διάβρωσης που περιγράφονται παρακάτω (ενδεικτικά κεραμική επίστρωση με υαλονήματα).

Για την ελαχιστοποίηση των απωλειών θερμότητας, οι εξωτερικές επιφάνειες του εξατμιστήρα θα μονωθούν θερμικά με κατάλληλο θερμομονωτικό υλικό μέγιστης θερμικής αγωγιμότητας 0.05 W/mK και ελάχιστου πάχους 50mm, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της TOTE 2481/86. Η θερμομόνωση διαθέτει σύστημα στήριξης από ανοξείδωτα στρατζαριστά στοιχεία, ενώ φέρει εξωτερικά μανδύα προστασίας από έλασμα αλουμινίου, κατάλληλου πάχους. Ο εξωτερικός μανδύας στηρίζεται μηχανικά στο σύστημα στήριξης της θερμομόνωσης, ενώ φέρει κατάλληλη

διαμόρφωση στις συνδέσεις των φύλλων του, ώστε να εμποδίζεται η εισροή υδάτων στο εσωτερικό της θερμομόνωσης. Για την ασφαλή στήριξη των βαθμίδων εξάτμισης θα χρησιμοποιηθεί ικρίωμα από δοκούς, υλικού St235 με βαφή, σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια.

Η διάταξη θα διαθέτει κατ' ελάχιστον τρεις (3) βαθμίδες εξάτμισης: σε κάθε βαθμίδα διαβιβάζεται ατμός (ή ζεστό νερό για την πρώτη βαθμίδα) παραγόμενος είτε από εξωτερική πηγή (ηλιοθερμικοί συλλέκτες) είτε από τη προηγούμενη βαθμίδα εξάτμισης. Η άλμη υφίσταται θέρμανση μέσω επαφής με τη δέσμη των αυλών που περιέχουν τον ατμό. Η συναλλαγή θερμότητας πραγματοποιείται χωρίς ανάμειξη μέσω της εξωτερικής επιφάνειας συναλλαγής των αυλών. Οι τρεις βαθμίδες λειτουργούν εν σειρά, επιτυγχάνοντας διαδοχική αύξηση της συγκέντρωσης άλατος στο υπόλειμμα, μέχρι το όριο κρυστάλλωσης.

- Προδιαγραφές **πρώτης** βαθμίδας:
 - Κέλυφος βαθμίδας με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
 - Μεταλλικό κέλυφος, ενδεικτικού όγκου 160 lt, κατάλληλης γεωμετρίας και πάχους τοιχώματος σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια, για λειτουργία σε συνθήκες υποπίεσης (0.3 bar(a)) και θερμοκρασίας 70°C.
 - Υλικά κατασκευής σύμφωνα με τα προαναφερόμενα, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά στα κατασκευαστικά σχέδια.
 - Το κέλυφος διαθέτει στόμιο (φλάτζα), κατάλληλης γεωμετρίας, για την προσαρμογή του εναλλάκτη θερμότητας δέσμης αυλών, σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια.
 - Η απαγωγή του ατμού από την βαθμίδα γίνεται μέσω κατάλληλης διάταξης συγκράτησης σταγονιδίων.
 - Όλες οι συνδέσεις τροφοδοσίας ή απαγωγής στο κέλυφος είναι φλατζωτές, σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια.

- Στοιχείο εξάτμισης άλμης: επιφάνεια συναλλαγής: 2 m²
 - Το στοιχείο προσθήκης θερμότητας στη βαθμίδα αποτελείται από δέσμη αυλών, ονομαστικής διαμέτρου DN15, απλής ή διπλής διαδρομής (φουρκέτα).
 - Το υλικό των αυλών είναι ανοξείδωτος χάλυβας super duplex ή κράμα αντίστοιχης αντοχής σε διάβρωση [όπως χαλκονικέλιο 90/10 Cu/Ni (UNS C 70600) ή aluminum brass (UNS C 68700)].
 - Στο εσωτερικό των αυλών διέρχεται θερμό νερό ή ατμός από τους ηλιακούς συλλέκτες θερμότητας.
 - Τα άκρα των αυλών στερεώνονται πάνω σε αυλοφόρο πλάκα με εκτόνωση. Στην αυλοφόρο πλάκα προσαρμόζεται με λυόμενη μηχανική σύνδεση καπάκι για τη διανομή και τη συλλογή του θερμικού μέσου. Με απομάκρυνση των κοχλίων από το καπάκι θα είναι δυνατή η αφαίρεση του στοιχείου εξάτμισης για επιθεώρηση, επισκευή και καθαρισμό.
 - Το υπόλειμμα άλμης από την πρώτη βαθμίδα εξάτμισης συλλέγεται στον πυθμένα του κελύφους, προκειμένου να τροφοδοτηθεί στην επόμενη βαθμίδα. Η τροφοδοσία γίνεται μέσω εξωτερικού αγωγού, ο οποίος διαθέτει κατάλληλη ρυθμιστική βαλβίδα ελέγχου. Το στόμιο του αγωγού βρίσκεται μονίμως κάτω από την επιφάνεια του υπολείμματος άλμης.
 - Το κέλυφος διαθέτει χειροκίνητη βαλβίδα εκκένωσης του περιεχομένου του.
- Προδιαγραφές δεύτερης βαθμίδας:
- Κέλυφος βαθμίδας με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
 - Μεταλλικό κέλυφος, ενδεικτικού όγκου 160 lt, κατάλληλης γεωμετρίας και πάχους τοιχώματος σύμφωνα

με τα κατασκευαστικά σχέδια, για λειτουργία σε συνθήκες υποπίεσης (0.15 bar(a)) και θερμοκρασίας 58°C.

- Υλικά κατασκευής σύμφωνα με τα προαναφερόμενα, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά στα κατασκευαστικά σχέδια.
- Το κέλυφος διαθέτει στόμιο (φλάτζα), κατάλληλης γεωμετρίας, για την προσαρμογή του εναλλάκτη θερμότητας δέσμης αυλών, σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια.
- Η απαγωγή του ατμού από την βαθμίδα γίνεται μέσω κατάλληλης διάταξης συγκράτησης σταγονιδίων.
- Όλες οι συνδέσεις τροφοδοσίας ή απαγωγής στο κέλυφος είναι φλατζωτές, σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια.
- Στοιχείο εξάτμισης άλμης: επιφάνεια συναλλαγής: 5 m²
 - Το στοιχείο προσθήκης θερμότητας στη βαθμίδα αποτελείται από δέσμη αυλών, ονομαστικής διαμέτρου DN15, απλής ή διπλής διαδρομής (φουρκέτα).
 - Το υλικό των αυλών είναι ανοξείδωτος χάλυβας super duplex ή κράμα αντίστοιχης αντοχής σε διάβρωση [όπως χαλκονικέλιο 90/10 Cu/Ni (UNS C 70600) ή aluminum brass (UNS C 68700)].
 - Στο εσωτερικό των αυλών διέρχεται ατμός παραγόμενος από την εξάτμιση της άλμης της πρώτης βαθμίδας.
 - Τα άκρα των αυλών στερεώνονται πάνω σε αυλοφόρο πλάκα με εκτόνωση. Στην αυλοφόρο πλάκα προσαρμόζεται με λυόμενη μηχανική σύνδεση καπάκι για τη διανομή και τη συλλογή του θερμικού μέσου. Με απομάκρυνση των κοχλιών από το καπάκι θα είναι δυνατή

η αφαίρεση του στοιχείου εξάτμισης για επιθεώρηση, επισκευή και καθαρισμό

- Το υπόλειμμα άλμης από την δεύτερη βαθμίδα εξάτμισης συλλέγεται στον πυθμένα του κελύφους, προκειμένου να τροφοδοτηθεί στην επόμενη βαθμίδα. Η τροφοδοσία γίνεται μέσω εξωτερικού αγωγού, ο οποίος διαθέτει κατάλληλη ρυθμιστική βαλβίδα ελέγχου. Το στόμιο του αγωγού βρίσκεται μονίμως κάτω από την επιφάνεια του υπολείμματος άλμης.
 - Το κέλυφος διαθέτει χειροκίνητη βαλβίδα εκκένωσης του περιεχομένου του.
- Προδιαγραφές **τρίτης** βαθμίδας:
- Κέλυφος βαθμίδας με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
 - Μεταλλικό κέλυφος, ενδεικτικού όγκου 160 lt, κατάλληλης γεωμετρίας και πάχους τοιχώματος σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια, για λειτουργία σε συνθήκες υποπίεσης (0.1 bar(a)) και θερμοκρασίας 45°C.
 - Υλικά κατασκευής σύμφωνα με τα προαναφερόμενα, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά στα κατασκευαστικά σχέδια.
 - Το κέλυφος διαθέτει στόμιο (φλάτζα), κατάλληλης γεωμετρίας, για την προσαρμογή του εναλλάκτη θερμότητας δέσμης αυλών, σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια.
 - Η απαγωγή του ατμού από την βαθμίδα γίνεται μέσω κατάλληλης διάταξης συγκράτησης σταγονιδίων.
 - Όλες οι συνδέσεις τροφοδοσίας ή απαγωγής στο κέλυφος είναι φλατζωτές, σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια.
 - Στοιχείο εξάτμισης άλμης: επιφάνεια συναλλαγής: 5 m²

- Το στοιχείο προσθήκης θερμότητας στη βαθμίδα αποτελείται από δέσμη αυλών, ονομαστικής διαμέτρου DN15, απλής ή διπλής διαδρομής (φουρκέτα).
- Το υλικό των αυλών είναι ανοξείδωτος χάλυβας super duplex ή κράμα αντίστοιχης αντοχής σε διάβρωση [όπως χαλκονικέλιο 90/10 Cu/Ni (UNS C 70600) ή aluminum brass (UNS C 68700)]
- Στο εσωτερικό των αυλών διέρχεται ατμός παραγόμενος από την εξάτμιση της άλμης της δεύτερης βαθμίδας.
- Τα άκρα των αυλών στερεώνονται πάνω σε αυλοφόρο πλάκα με εκτόνωση. Στην αυλοφόρο πλάκα προσαρμόζεται με λυόμενη μηχανική σύνδεση καπάκι για τη διανομή και τη συλλογή του θερμικού μέσου. Με απομάκρυνση των κοχλιών από το καπάκι θα είναι δυνατή η αφαίρεση του στοιχείου εξάτμισης για επιθεώρηση, επισκευή και καθαρισμό
- Το υπόλειμμα άλμης από την τρίτη βαθμίδα εξάτμισης συλλέγεται στον πυθμένα του κελύφους, προκειμένου να τροφοδοτήσει την επόμενη μονάδα επεξεργασίας της άλμης (μονάδα κρυστάλλωσης).
- Το κέλυφος διαθέτει χειροκίνητη βαλβίδα εκκένωσης του περιεχομένου του.
- Εναλλάκτης συμπίκνωσης ατμού τρίτης βαθμίδας. Ο εναλλάκτης θα ψύχεται από το ρεύμα της άλμης τροφοδοσίας, επιτυγχάνοντας έτσι παράλληλα προθέρμανση της άλμης πριν την είσοδό της στην πρώτη βαθμίδα του εξατμιστήρα. Στον εναλλάκτη αυτό θα διαβιβάζονται και τα ρεύματα ζεστού νερού που παράγονται στη δεύτερη και στην τρίτη βαθμίδα. Η διάταξη αυτή μπορεί να υλοποιηθεί είτε σε έναν εναλλάκτη πολλαπλών εισόδων είτε σε τρεις ξεχωριστούς εναλλάκτες. Το υλικό του εναλλάκτη θα είναι ανοξείδωτος χάλυβας ποιότητας 316.

- Σύστημα κενού (αντλία κενού ή τζιφάρι), με όλες τις συνοδευτικές διατάξεις ελέγχου, το οποίο να διατηρεί τις συνθήκες υποπίεσης στις επιθυμητά επίπεδα (0.3 bar για την πρώτη, 0.15 bar για τη δεύτερη και 0.1 bar για την τρίτη βαθμίδα)
- Μετρητικά όργανα και σύστημα αυτοματισμού που θα περιλαμβάνει κατ' ελάχιστον τα ακόλουθα:
 - Ψηφιακός αισθητήρας στάθμης στη δεξαμενή εξισορρόπησης, τριών ενδείξεων (High, Low, LowLow).
 - Αισθητήρες άνω και κάτω στάθμης (ενδεικτικά πλωτήρες) σε κάθε ένα εκ των τριών βαθμίδων εξάτμισης άλμης. Τα εν λόγω ζεύγη (άνω και κάτω στάθμη) αισθητήρων θα συνδέονται μέσω προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή με:
 - Την αντλία τροφοδοσίας της πρώτης βαθμίδας.
 - Τη ρυθμιστική βαλβίδα ελέγχου της παροχής άλμης από την πρώτη στη δεύτερη βαθμίδα
 - Τη ρυθμιστική βαλβίδα ελέγχου παροχής άλμης από τη δεύτερη στην τρίτη βαθμίδα.
 - Τρείς ηλεκτρονικούς μεταδότες πίεσης με χαρακτηριστικά:
 - Εύρος μέτρησης στο διάστημα 0 με 1 bar απόλυτη πίεση,
 - Ακρίβεια 0.001bar,
 - Αναλογική έξοδο
 - Δυνατότητα λειτουργίας σε διαβρωτικό περιβάλλον,
 - Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας -5 με 100oC .

Οι μεταδότες πίεσης συνδέονται με τον προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη διατήρηση πίεσης σε κάθε βαθμίδα εξάτμισης.

- Μεταδότες θερμοκρασίας, με αναλογική έξοδο, στο κέλυφος κάθε βαθμίδας εξάτμισης, στην είσοδο και έξοδο του θερμικού μέσου, στην έξοδο του συμπυκνωμένου νερού από τη δεύτερη και τρίτη βαθμίδα εξάτμισης. Οι μεταδότες θερμοκρασίας θα συνδέονται με καταγραφικό.
- Ψηφιακό θερμιδομετρητή, με αναλογική έξοδο, παροχής ενέργειας από τους ηλιακούς συλλέκτες προς την πρώτη βαθμίδα, ο οποίος θα συνδέεται με τον προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή, ρυθμίζοντας την παροχή άλμης προς την πρώτη βαθμίδα.
- Ψηφιακό ροόμετρο, με αναλογική έξοδο, για τη μέτρηση της τροφοδοσίας άλμης στην πρώτη βαθμίδα. Το ροόμετρο θα είναι κατάλληλης τεχνολογίας μέτρησης για ο συγκεκριμένο διαβρωτικό περιβάλλον, με εύρος μέτρησης 0-100 lt/h. Το ροόμετρο συνδέεται με τον προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή για την αποτελεσματικότερη ρύθμιση της παροχής της αντλίας τροφοδοσίας της πρώτης βαθμίδας.
- Εμβαπτιζόμενη αντλία τροφοδοσίας δεξαμενής εξισορρόπησης (αντλία και παρελκόμενα) με χαρακτηριστικά:
 - Παροχή $1\text{m}^3/\text{h}$ κατά μέγιστο,
 - Μανομετρικό ύψος 10m ΣΥ κατ' ελάχιστο και
 - Ισχύ 1kW κατά μέγιστο.

Η εν λόγω αντλία θα τροφοδοτεί σε ημερήσια βάση τη δεξαμενή εξισορρόπησης με παροχή άλμης προερχόμενη από την παρακείμενη μονάδα αφαλάτωσης.

- Σακόφιλτρο πόσιμου νερού, από κατάλληλο πλαστικό υλικό, με ανταλλακτικούς σάκους, διαμέτρου οπής 10μm για την κατακράτηση αιωρούμενων στερεών από την εμβαπτιζόμενη αντλία τροφοδοσίας. Το σακόφιλτρο θα διαθέτει δύο οπτικά μανόμετρα πίεσης εισόδου - εξόδου.

- Δεξαμενή εξισορρόπησης. Για την εξισορρόπηση της παροχής τροφοδοσίας θα χρησιμοποιηθεί δεξαμενή χωρητικότητας 2m^3 κατ' ελάχιστον από πολυαιθυλένιο (PE).
- Δεξαμενή ποσίμου νερού 1m^3 από πολυαιθυλένιο (PE).
- Αντλία θετικής εκτόπισης (δοσομετρική) ή φυγοκεντρική αντλία με χαρακτηριστικά:
 - Ολική παροχή $0.05\text{m}^3/\text{h}$ κατ' ελάχιστον
 - Μανομετρικό ύψος $20\text{m}\Sigma\text{Y}$ κατ' ελάχιστον
 - Ισχύς 0.3kW κατά μέγιστο.
- Η αντλία θα τροφοδοτεί σε ημερήσια βάση τη διάταξη εξάτμισης με ποσότητα άλμης συγκέντρωσης διαλυμένων στερεών (Total Dissolved solids, TDS) $60,000\text{mg}/\text{lt}$.
- Τρίοδη ρυθμιστική βαλβίδα, με αναλογική είσοδο, για τον ακριβή έλεγχο της τροφοδοσίας της πρώτης βαθμίδας εξάτμισης και την εκτροπή της πλεονάζουσας παροχής στη δεξαμενή εξισορρόπησης. Η βαλβίδα συνδέεται με τον προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή

Κρυσταλλωτήρας:

Η μονάδα κρυστάλλωσης θα οδηγεί στην περαιτέρω συμπύκνωση (κρυστάλλωση) της άλμης με τη συνεχή απομάκρυνση (εξάτμιση) ποσότητας ύδατος από το διάλυμα τροφοδοσίας.

Για την εξισορρόπηση της παροχής τροφοδοσίας από τη δεξαμενή εξάτμισης στον κρυσταλλωτήρα, θα χρησιμοποιηθεί δεξαμενή χωρητικότητας 0.5m^3 κατ' ελάχιστον από ανοξείδωτο χάλυβα τύπου INOX 316L. Η τροφοδοσία της μονάδας κρυστάλλωσης θα γίνει με τη χρήση αντλητικού συγκροτήματος με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Τύπος: μονοφασική, φυγοκεντρική,
- Μανομετρικό ύψος $10\text{ m}\Sigma\text{Y}$ κατ' ελάχιστον

- Παροχή $0.02 \text{ m}^3/\text{h}$ κατ' ελάχιστον,
- Ισχύς 0.15 kW ,
- Υλικό κατασκευής ανοξείδωτος χάλυβας (τμήμα αντλίας το οποίο έρχεται σε επαφή με το εργαζόμενο μέσο.

Το εν λόγω αντλητικό συγκρότημα θα τροφοδοτεί σε ημερήσια βάση τον κρυσταλλωτήρα με ποσότητα άλμης ολικής παροχής 120 kg/day και περιεκτικότητας σε στερεά 26%.

Προκειμένου να μειωθούν οι ενεργειακές απαιτήσεις της εγκατάστασης ένας εκ των δύο (2) ακόλουθων τύπων κρυσταλλωτήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν: (α) εξατμιστήρας με επανασυμπίεση ατμών, (β) εξατμιστήρας με αντλία θερμότητας.

Στη συνέχεια ακολουθούν οι τεχνικές προδιαγραφές ανάλογα με τον τύπο του συστήματος κρυστάλλωσης.

❖ **Τύπος: κρυσταλλωτήρας με επανασυμπίεση ατμών**

- Χωρητικότητα δεξαμενής (θάλαμος βρασμού): 60 λίτρα
- Επιφάνεια συναλλαγής: 2 m^2
 - Δέσμη αυλών ρομβοειδούς διατάξεως με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: (α) πλήθος αυλών: 47 (ή 24 για διάταξη φουρκέτας), (β) διάμετρος αυλών: 19 mm , (γ) βήμα διάταξης: 30 mm , (δ) πάχος αυλών: 1.24 mm , (ε) υλικό κατασκευής: ανοξείδωτος χάλυβας τύπου UNS S32750. Τα άκρα των αυλών στερεώνονται πάνω σε αυλοφόρο πλάκα.
 - Οι αυλοί θα τροφοδοτούνται με ατμό
- Μηχανική συμπίεση ατμών με χρήση συμπιεστή θετικής εκτόπισης με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: (α) Τύπος: περιστροφικός συμπιεστής με λοβούς (ενδεικτικά), (β) Παροχή: 10 kg/h , (γ) Κατάθλιψη: 2 bar, (δ) Ηλεκτρική ισχύς: 1 kW κατά μέγιστο.

❖ **Τύπος: κρυσταλλωτήρας με αντλία θερμότητας**

- Παροχή άλμης: $200 \frac{kg}{day}$ κατά μέγιστο,
- Εναλλάκτης θερμότητας με σύστημα απόξεσης τοιχωμάτων (*scraper*)
- Συνθήκες εξάτμισης:
 - Πίεση: 0,1bar κατά μέγιστο
 - Θερμοκρασία: 45°C κατά μέγιστο
- Ισχύς: 2 kW κατά μέγιστο
- Υλικό κατασκευής θαλάμου βρασμού και εναλλάκτη θερμότητας: ενισχυμένος ανοξείδωτος χάλυβας Super Duplex (UNS S32750)
- Σύστημα διαχωρισμού σταγονιδίων: σταγονοσυλλέκτης, τύπου σχάρας με πληρωτικό υλικό
- Αντλία θερμότητας με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
 - Συμπιεστής: παλινδρομικός
 - Σύστημα κενού: αντλία κενού ή τζιφάρι (εγχυτήρας υγρού)

Ξηραντήρας

Το υποσύστημα ξήρανσης θα τροφοδοτείται από δεξαμενή σκυροδέματος χωρητικότητας $0,5m^3$ κατ' ελάχιστον, η οποία θα συλλέγει το υπόλειμμα της κρυστάλλωσης που συσσωρεύεται από την έξοδο του κρυσταλλωτήρα. Οι ποσότητες αυτές θα διοχετεύονται στο υποσύστημα ξήρανσης χειρωνακτικά ή με τη χρήση αντλίας ιλύος (ισχύς: 0.2kW, μανομετρικό: 10m Σ.Υ, παροχή: $0.016m^3/h$)

❖ Τύπος: Ξηραντήρας δίσκων (*tray dryer*)

- Αεραγωγός: (α) κανάλι τετραγωνικής διατομής πλευράς 200mm, (β) μήκος 6m, (γ) υλικός: γαλβανιζέ λαμαρίνα πάχους 1mm,
- Οι δίσκοι θα έχουν τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά:
 - Αριθμός δίσκων: 2

- Γεωμετρία δίσκου: (α) επιφάνεια δίσκου 0.1 m^2 , (β) πλάτος δίσκου: 0.5m
- Υλικό: Ανοξείδωτος χάλυβας 316L ή ανώτερης ποιότητας
- Θερμαντικό στοιχείο ατμού-αέρα: (α) επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας: 0.8m^2 , (β) παροχή αέρα $150\text{m}^3/\text{h}$, (γ) θερμοκρασία εξόδου αέρα 58°C
- Φυγοκεντρικός ανεμιστήρας ισχύος 120W

❖ **Τύπος: ηλιακό ξηραντήριο**

- Βάση από απλό σκυρόδεμα πάχους 10cm
- Δύο (2) πλάτες εκ των οποίων η μία με απορροφητήρα αέρα για κυκλοφορία αέρα εντός του ξηραντηρίου
- Έξι (6) τρίμετρες τέντες με διαφανές νάilon υλικό για θερμοκήπιο σε σωλήνες τύλιξης (μήκους 3m)
- Δέκα (10) ημικυκλικές ράβδοι στήριξης διαφανούς νάilon υλικού
- Stopper στις 30 μοίρες για φυσικό εξαερισμό του ξηραντηρίου
- Πύροι στήριξης

Υποσύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκή γεννήτρια

- Τύπος: μονοκρυσταλλικού ή πολυκρυσταλλικού πυριτίου
- Απόδοση: 14%
- Ονομαστική ισχύς (peak power): 10kW
- Ισχύς/πλαίσιο: 190Watt κατ'ελάχιστον
- Πιστοποίηση απόδοσης κατά CE ή TUV
- Εγγύηση απόδοσης: 25 χρόνια (η απόδοσή τους δε θα μειωθεί περισσότερο από 20%)
- Πλαίσιο από ανοδιωμένο αλουμίνιο

- Αριθμός πλαισίων: 52 κατά μέγιστο
- Αντιστροφέας τάσης DC/AC (inverter): (α) τάση εξόδου: 230V (συχνότητα 50Hz), (β) ονομαστική ισχύς: 5 kW κατ'ελάχιστον
- Βάσεις στήριξης φωτοβολταϊκών πλαισίων: (α) εδαφοπάσσαλος (ενδεικτικά), (β) κλίση πλαισίων 37.5°,
- Συσσωρευτές: κλειστού τύπου, βαθιάς εκφόρτισης, χωρητικότητας 1587 Ah/ 48V DC. Η φόρτισή τους θα ελέγχεται και θα ρυθμίζεται από ρυθμιστές φόρτισης
- Κατάλληλες καλωδιώσεις συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος
- Προμήθεια όλων των επιπλέον υλικών και εξαρτημάτων και εκτέλεση όλων των επιπλέον εργασιών που θα απαιτηθούν για την καλή εγκατάσταση και λειτουργία του συστήματος.

Υποσύστημα ηλιακών συλλεκτών για την παραγωγή θερμικής ενέργειας

Οι θερμικοί ηλιακοί συλλέκτες θα χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των ενεργειακών (θερμικών) απαιτήσεων του εξατμιστήρα. Οι ανάγκες αυτές ανέρχονται στις **95kWh/ημέρα** και μπορούν να καλυφθούν είτε με την παροχή ατμού ή ζεστού νερού. Ανάλογα, με τον τύπο του εργαζόμενου μέσου οι ακόλουθοι δύο τύποι συλλεκτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

- **Παραβολικό κάτοπτρο (Parabolic Trough Collector)**, για την παραγωγή ατμού 100°C/ 1 bar
- **Συλλέκτης κενού (Evacuated Tube Collector) ή Σύνθετος Παραβολικός Συλλέκτης (Compound Parabolic Collector)**, για την παραγωγή ζεστού νερού 80°C/ 1 bar. Για την επίτευξη των συνθηκών αυτών σε σταθερή βάση θα χρησιμοποιηθεί κλειστό κύκλωμα νερού με θερμοδοχείο (*boiler*), υδραυλικής παροχής 0.4 kg/s και θερμοκρασία σχεδιασμού επιστροφής από τον εναλλάκτη του εξατμιστήρα ίση προς 75°C

Ακολουθώς δίνονται οι ειδικές προδιαγραφές ανάλογα με τον τύπο συλλέκτη.

❖ Τύπος συλλέκτης: παραβολικό κάτοπτρο (παραγωγή ατμού)

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συλλέκτη:
 - Πλάτος [Π]: 2m κατά μέγιστο
 - Ύψος [Υ]: 2m κατά μέγιστο
 - Ενεργός επιφάνεια συλλογής (aperture area): 30m² [ενδεικτικά 1.2x25 m (ΠxΜ)]
- Υλικό ανακλαστικής επιφάνειας: μέταλλο με υψηλό συντελεστή ανακλαστικότητας (>90%) με πάχος κατά μέγιστο 0.8mm
- Υλικό απορροφητήρα: ανοξείδωτος χάλυβας με επιλεκτική επικάλυψη (ενδεικτική επικάλυψη: μαύρη επιχρωμίωση / black chrome)
- Ο αγωγός πρέπει να περιβάλλεται με γυάλινο περίβλημα, το οποίο να έχει υψηλό συντελεστή διαπερατότητας (>85%)
- Μεταλλική βάση στήριξης του παραβολικού συστήματος από επιψευδαργυρωμένο (γαλβανισμένο) χάλυβα.
- Μηχανισμός παρακολούθησης του ήλιου σε ένα άξονα (single axis tracking), ηλεκτρονικά αυτοματοποιημένος. Η κίνηση του συστήματος θα επιτυγχάνεται με τη χρήση βηματικού ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος θα οδηγείται από PLC (βλέπε παράγραφος αυτοματισμών παρακάτω)
- Λόγος συγκέντρωσης: 40 κατ'ελάχιστον
- Τύπος συστήματος: εκτόνωσης πεπιεσμένου νερού προς παραγωγή ατμού (steam flash-steam generation concept). Το ρεύμα του νερού θα βρίσκεται υπό πίεση (11 bar)
- Δεξαμενή εκτόνωσης (από υψηλή πίεση, 11 bar, σε χαμηλή πίεση, 2 bar) χωρητικότητας 50 λίτρα
- Αντλία: (α) Τύπος: μονοφασική, φυγοκεντρική, μεταβλητών στροφών, (β) μανομετρικό ύψος: 110m Σ.Υ, (γ) παροχή: 1.85m³/h, (δ) Ισχύς: 0.85KW, (ε) υλικό: ανοξείδωτος χάλυβας (τμήμα αντλίας το οποίο έρχεται σε επαφή με το εργαζόμενο μέσο)

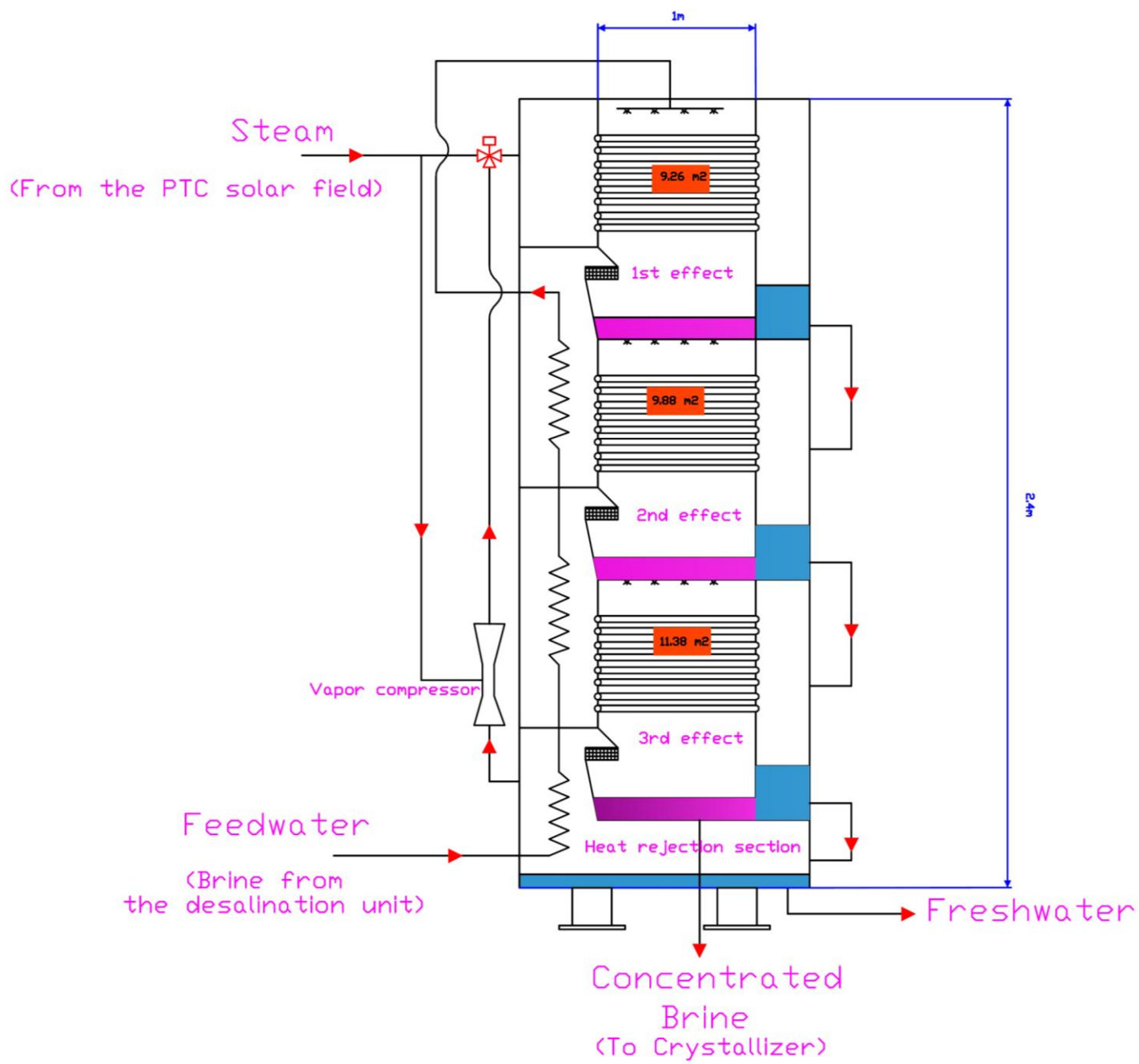
- Αυτοματισμοί: η οδήγηση του ηλεκτροκινητήρα για την παρακολούθηση της πορείας του ήλιου θα πραγματοποιείται από Λογικό Ελεγκτή (Programmable Logic Controller, PLC).
 - Ο ελεγκτής πρέπει να διαθέτει ενσωματωμένο αλγόριθμο υπολογισμού της θέσης του ήλιου.
 - Τροφοδοσία: 24V DC
 - Καταναλισκόμενη ισχύς: 10W κατά μέγιστο

Η εναλλακτικά:

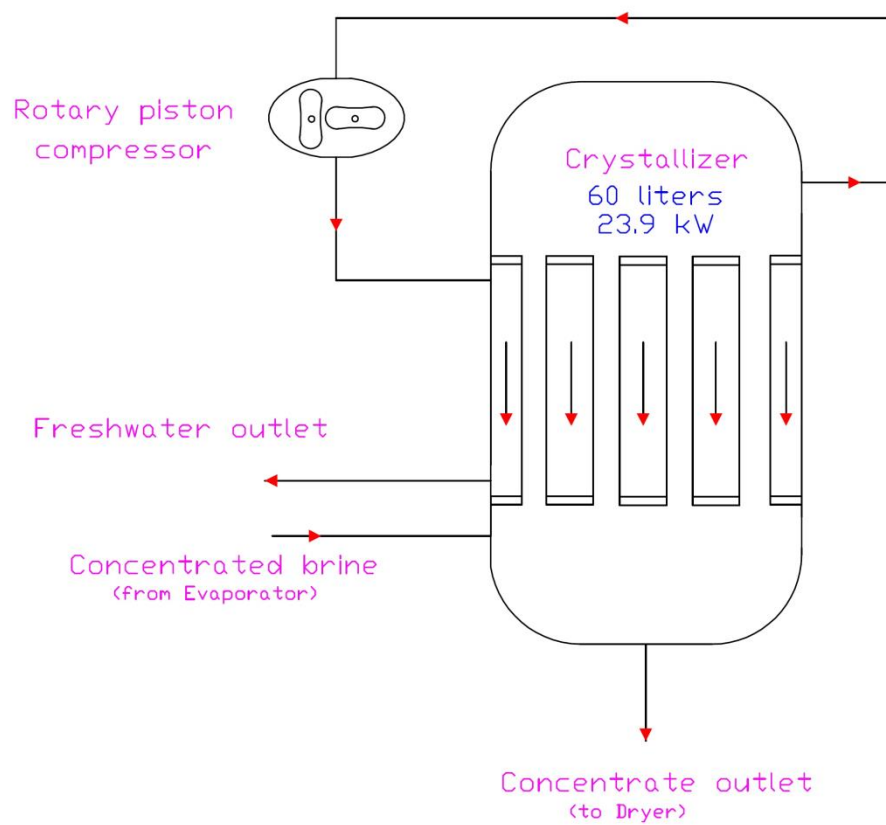
❖ Τύπος συλλέκτη: συλλέκτης κενού (παραγωγή ζεστού νερού)

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συλλέκτη:
 - Ενεργός επιφάνεια συλλογής (aperture area): 35m²
- Τύπος: σωλήνας κενού κλειστού τύπου (*heat pipe*)
- Χαρακτηριστικά σωλήνα κενού:
 - Υλικό: βοριοπυριτικό γυαλί (borosilicate glass)
 - Διάμετρος σωλήνα: 58mm κατά μέγιστο
 - Πάχος γυαλιού: 2mm κατ'ελάχιστον
 - Συντελεστής εκπομπής: >90%
 - Κενό: <10⁻² bar
- Χαρακτηριστικά σωλήνα απορρόφησης:
 - Υλικό: Αλουμίνιο ή χαλκός. Ο σωλήνας πρέπει να διαθέτει επιλεκτική επίστρωση (ενδεικτικά: επιμεταλλωμένο νιτρίδιο αλουμινίου)
 - Συντελεστής απορροφητικότητας: >90%
 - Συντελεστής εκπομπής: <8%

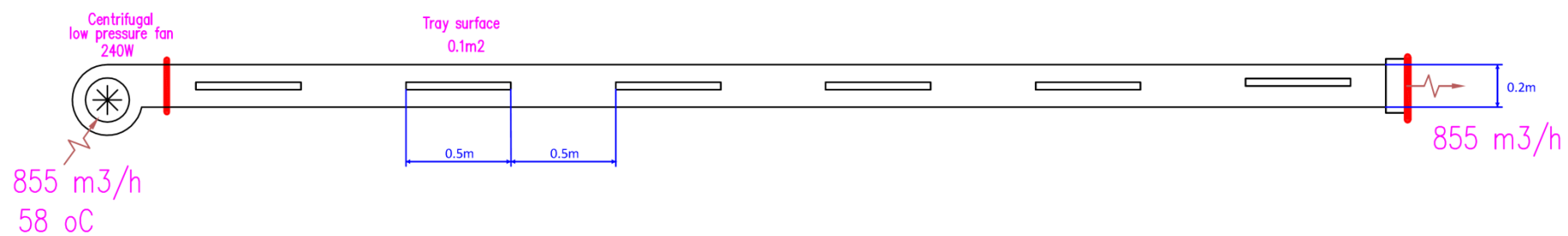
- Πιστοποίηση EN 12975
 - Ο συλλέκτης διανομής πρέπει να διαθέτει μόνωση με ικανό πάχος ώστε να εξασφαλίζονται οι επιθυμητές συνθήκες (ενδεικτικά: αφρώδης πολυουρεθάνη)
 - Μέγιστη θερμοκρασία αδράνειας (stagnation temperature): 280°C
- Θερμοδοχείο αποθήκευσης (boiler): χωρητικότητα 800lt κατ'ελάχιστον
 - Διαφορικός θερμοστάτης για τον έλεγχο της θερμοκρασίας τροφοδοσίας του εναλλάκτη του εξατμιστήρα (80°C)



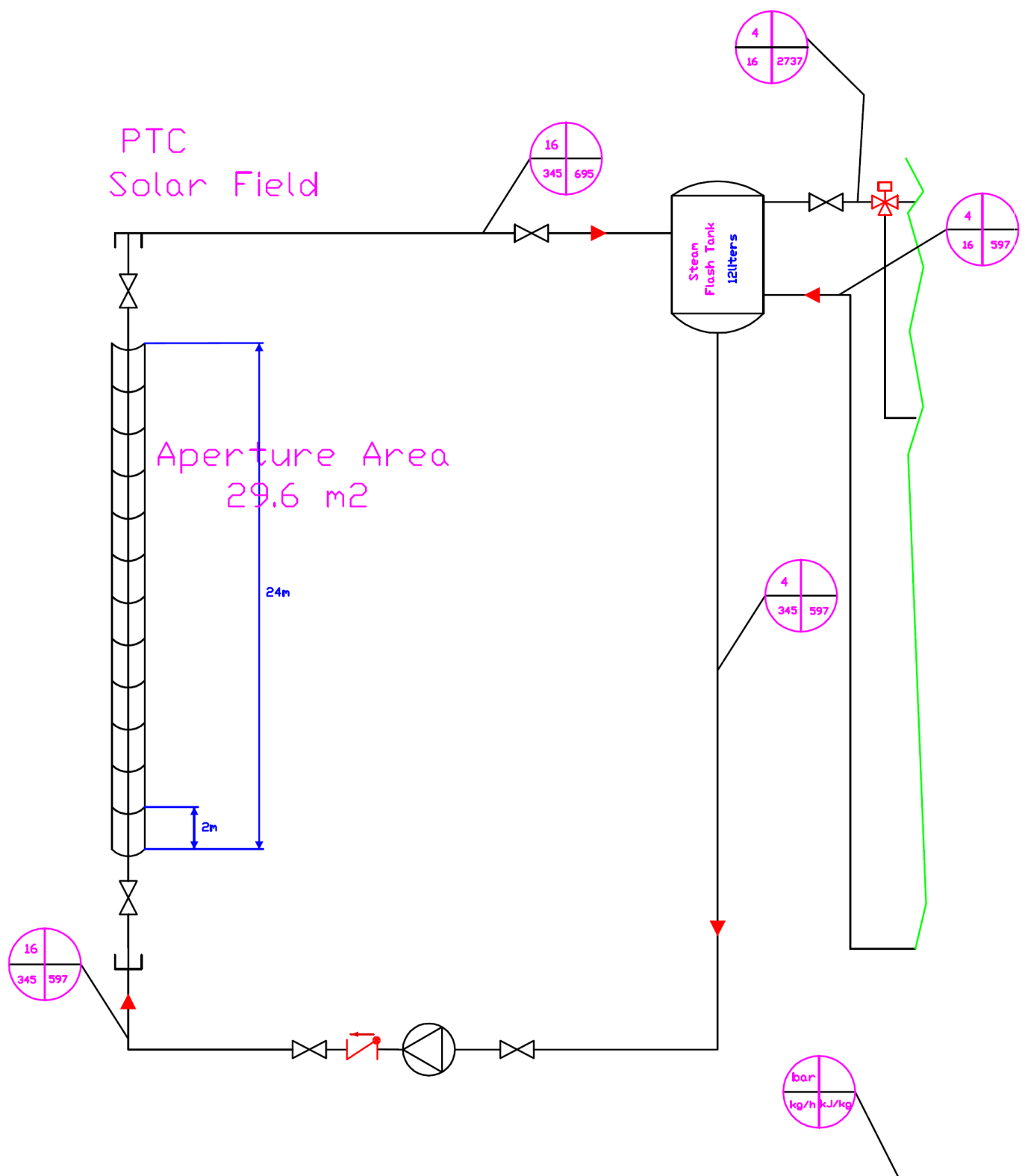
Σχέδιο 4-1: Προκαταρκτικός σχεδιασμός εξατμιστήρα, διαστασιολόγηση εναλλακτών θερμότητας



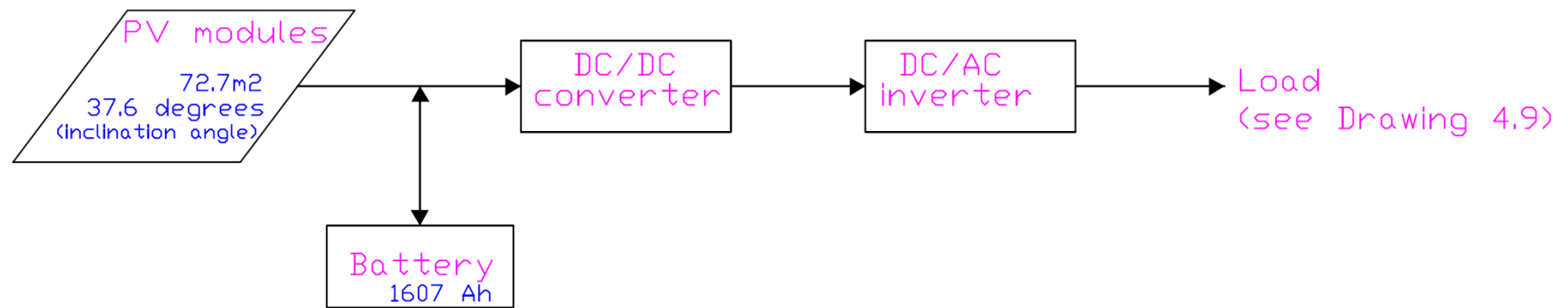
Σχέδιο 4-2: Κρυσταλλωτήρας, προκαταρκτικό σχέδιο



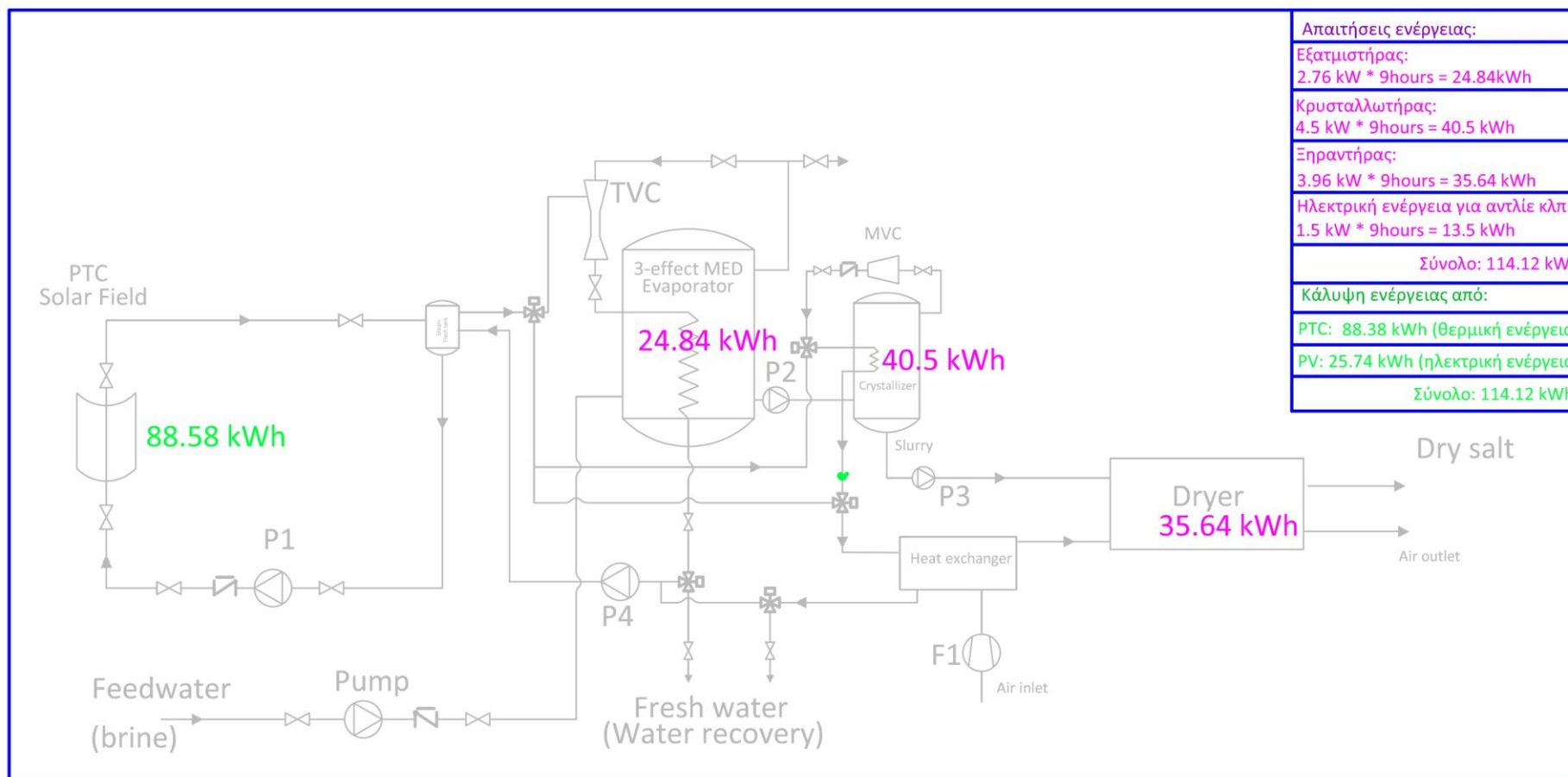
Σχέδιο 4-3: Ξηραντήρας, προκαταρκτικό σχέδιο



Σχέδιο 4-4: Ηλιακό πεδίο PTC, προκαταρκτικό σχέδιο



Σχέδιο 4-5: Φωτοβολταϊκή γεννήτρια, προκαταρκτικό σχέδιο



Σχέδιο 4-6: Διάγραμμα ροής και ισοζύγιο ενέργειας, προκαταρκτικός σχεδιασμός

4.3 Λεπτομερής σχεδιασμός

Στόχοι:

- Αναλυτικοί Υπολογισμοί
- Επιλογή υλικών και εξαρτημάτων
- Λεπτομέρειες συγκολλήσεων
- Κατασκευαστικά σχέδια

Μεθοδολογία:

Έχοντας πλέον διαστασιολογήσει τις επιμέρους μονάδες, ακολουθεί η λεπτομερής σχεδίαση του συστήματος επεξεργασίας της άλμης. Κατά τη φάση αυτή παράγονται τα κατασκευαστικά σχέδια και πραγματοποιείται η οργάνωση και επίβλεψη της κατασκευής.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως το τελικό διάγραμμα ροής τροποποιήθηκε σημαντικά κατά τη φάση αυτή. Αυτό είναι κάτι αναμενόμενο, δεδομένου ότι οι κατασκευαστές συνηθίζουν να προτείνουν τροποποιήσεις στο τελικό σχέδιο με γνώμονα την απλοποίηση της κατασκευής, καθώς και τη μείωση του συνολικού κόστους. Έτσι, γίνονται συμβιβασμοί τόσο από τον κατασκευαστή όσο και από τον σχεδιαστεί προκειμένου να πραγματοποιηθεί η κατασκευή του συστήματος με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Σε κάθε περίπτωση η κατασκευή φυσικά θα πρέπει να είναι σύμφωνη με τις οριζόμενες τεχνικές προδιαγραφές.

Το τελικό διάγραμμα ροής παρουσιάζεται Σχήμα 4-35.

Ακολουθώντας παρουσιάζονται οι βασικές αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στο σύστημα κατά τη φάση του λεπτομερή σχεδιασμού:

Εξατμιστήρας:

- Η μονάδα του εξατμιστήρα αποτελεί την καρδιά του πιλοτικού συστήματος επεξεργασίας της άλμης και ως εκ τούτου αποφασίστηκε να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί εξολοκλήρου από την αρχή.
- Αποτελείται από 2 αντί για 3 βαθμίδες, όπως αρχικά προβλεπόταν.
- Το μέσο θέρμανσης της βαθμίδας είναι ζεστό νερό αντί για τον ατμό που προτείνεται στον προκαταρκτικό σχεδιασμό. Αυτό οδήγησε σε σημαντικές

αλλαγές και στο ηλιακό σύστημα. Ο λόγος για την αλλαγή αυτή είναι πως τα συστήματα των παραβολικών κατόπτρων γίνονται απαγορευτικά ακριβά σε μικρά μεγέθη της τάξης των 10 kW. Οι εταιρείες που κατασκευάζουν παραβολικά κάτοπτρα για βιομηχανικές εφαρμογές ατμού (και όχι για ηλεκτροπαραγωγή) επίσης είναι λίγες. Η εταιρεία με την οποία πραγματοποιήθηκε επαφή και κατασκευάζει τέτοιες μονάδες είναι η ελβετική εταιρεία [NEP SOLAR](#). Η εταιρεία ενημέρωσε πως ο αυτοματισμός για μία τέτοια κατασκευή θα κοστίζει περίπου όσο και το ίδιο το σύστημα και πως δεν θα πρότειναν την αγορά του εξοπλισμού για μία τέτοια μικρή εφαρμογή.

- Δεν εγκαταστάθηκε μηχανικός ή θερμικός συμπιεστής ατμού. Έπειτα από έρευνα αγοράς, διαπιστώθηκε ότι δεν ήταν δυνατόν να βρεθεί εμπορικός συμπιεστής (ή τζιφάρι) τόσο μικρού μεγέθους.

Σχεδιασμός εξατμιστήρα (Xevgenos, Michailidis, Dimopoulos, Krokida, & Loizidou, 2015b)

Ο εξατμιστήρας αποτελείται από δύο (2) βαθμίδες. Η κάθε βαθμίδα έχει κυλινδρικό σχήμα, τοποθετημένη οριζόντια σε ικρίωμα. Η εισερχόμενη άλμη διανέμεται ομοιόμορφα στο θερμαντικό στοιχείο (εναλλάκτης θερμότητας) της πρώτης βαθμίδας. Το θερμαντικό στοιχείο αποτελείται από οριζόντιους σωλήνες σε σχήμα U (φουρκέτα), τοποθετημένους σε τριγωνική διάταξη. Η φουρκέτα αποτελείται από μεταλλικούς ανοξείδωτους σωλήνες EN 1.4410 /εξωτερικής/εσωτερικής διαμέτρου 19.05/18.57mm, σχήματος φουρκέτας. Τα άκρα των σωλήνων στερεώνονται πάνω σε αυλοφόρο πλάκα με εκτόνωση. Το θερμαντικό στοιχείο είναι τοποθετημένο έκκεντρα στην μία πλευρά του κυλινδρικού δοχείου.

Μία ιδιοκατασκευή αποτελούμενη από πολλαπλά στρώματα είναι τοποθετημένη στο πάνω μέρος του θερμαντικού στοιχείου. Η κατασκευή αυτή εξασφαλίζει την ομοιόμορφη διανομή της εισερχόμενης άλμης και αποτελείται από τρία φύλλα ανοξείδωτου χάλυβα, διάτρητα με διάμετρο οπής 5.0, 3.0 και 2.0 mm από την κορυφή προς τον πυθμένα της κατασκευής. Η διάταξη είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται ομοιόμορφη διανομή με ελάχιστη πτώση πίεσης.

Οι βαθμίδες είναι τοποθετημένες σε κατακόρυφη διάταξη, ώστε να διευκολύνεται η ροή της συμπυκνωμένης άλμης μεταξύ των βαθμίδων, ακόμα και σε συνθήκες χαμηλής διαφοράς πίεσης. Η τοποθέτηση αυτή των βαθμίδων έχει ως μειονέκτημα το

συνολικό ύψος της κατασκευής, σε περίπτωση προσθήκης περισσότερων βαθμίδων. Η εξάτμιση πραγματοποιείται σε σειρά στο εσωτερικό των κυλίνδρων. Ο σχεδιασμός προβλέπει πως το 40% της εισροής εξατμίζεται στην πρώτη βαθμίδα. Στο εσωτερικό του κυλίνδρου, ο ατμός διαχωρίζεται από τις σταγόνες άλμης και η συμπυκνωμένη άλμη οδηγείται με φυσική ροή στη δεύτερη βαθμίδα. Η εξάτμιση πραγματοποιείται με ένα πέρασμα, χωρίς την εφαρμογή ανακυκλοφορίας.

Η θερμότητα της πρώτης βαθμίδας προσφέρεται από ηλιακό πεδίο. Το ζεστό νερό ρέει εντός του θερμαντικού στοιχείου σε θερμοκρασία 85°C. Η θερμοκρασία αυτή ρυθμίζεται ανάλογα με τη διαθεσιμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο σχεδιασμός έχει πραγματοποιηθεί για πτώση θερμοκρασίας ίση προς 10°C, ενώ η παροχή ρυθμίζεται ανάλογα με τις ανάγκες.

Η θερμότητα στη δεύτερη βαθμίδα προσφέρεται από τον ατμό που παράγεται από την εξάτμιση της άλμης στην πρώτη βαθμίδα. Ο ατμός συμπυκνώνεται στο θερμαντικό στοιχείο της δεύτερης βαθμίδας. Η διαφορά πίεσης μεταξύ των βαθμίδων και η συνεπακόλουθη διαφορά στο σημείο βρασμού, παρέχει την απαιτούμενη διαφορά θερμοκρασίας για τη μεταφορά θερμότητας. Λόγω του φαινομένου της συμπύκνωσης, ο συνολικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι υψηλότερος, επιτρέποντας έτσι χαμηλότερες θερμοκρασιακές διαφορές. Ο συμπυκνωμένος ατμός (απιονισμένο νερό) ψύχεται περαιτέρω στην υπόψυκτη περιοχή, με τη χρήση δυο εναλλακτών ομόκεντρων σωλήνων (tube-in-tube), πριν την τελική του εκτόνωση στο δοχείο συλλογής απιονισμένου νερού. Χωρίς ψύξη, η εκτόνωση του ατμού θα οδηγούσε σε ατμοπαραγωγή ίση προς 7.0 m³/h. Οι εναλλάκτες tube-in-tube έχουν ονομαστική θερμική ισχύ 1.0kW και λειτουργούν παράλληλα ως προθερμαντήρες της άλμης τροφοδοσίας. Ο ατμός της δεύτερης βαθμίδας, αφού έχει διαχωριστεί από τα σταγονίδια, συμπυκνώνεται σε πλακοειδή εναλλάκτη, με χρήση κρύας άλμης τροφοδοσίας.

Η μονάδα είναι εξοπλισμένη με δύο δοχεία συλλογής, ένα για τη συμπυκνωμένη άλμη και ένα για το απιονισμένο (παραγόμενο) νερό. Τα δοχεία αυτά λειτουργούν επίσης ως δοχεία αναρρόφησης για τη λειτουργία της αντλίας κενού. Τα τελικά προϊόντα συλλέγονται από τα δοχεία της άλμης, όταν η στάθμη φτάσει σε ένα ορισμένο ύψος. Τότε, το κάθε υγρό απομακρύνεται με τη χρήση φυγοκεντρικής αντλίας από τον πυθμένα του αντίστοιχου δοχείου. Οι διαστάσεις των δοχείων αυτών είναι Φ 400 × 500 mm, με ωφέλιμο ύψος 400 mm.

Το σημείο αναρρόφησης της αντλίας κενού βρίσκεται στο πάνω σημείο των δύο δοχείων. Οι τεχνικές προδιαγραφές της αντλίας βασίζονται στην επίτευξη ενός λογικού χρόνου εκκίνησης της μονάδας και στην ανάγκη απομάκρυνσης των διαρροών αέρα και των μη-συμπυκνούμενων αερίων κατά τη μόνιμη λειτουργία της μονάδας. Τα στοιχεία της αντλίας κενού έχουν ως ακολούθως:

- Όγκος εκκένωσης: 1,200 l
- Χρόνος εκκένωσης: 6.0 λεπτά
- Διαρροή αέρα: 0.5 kg/h (μόνιμη κατάσταση λειτουργίας)
- Μη συμπυκνούμενα αέρια: 0.025 g/kg εισερχόμενου ρεύματος.

Τελικό σχέδιο εξατμιστήρα

Ο εξατμιστήρας έχει κυλινδρικό σχήμα με καμπύλες κεφαλές (end-cups). Το μήκος του κυλινδρικού τμήματος είναι 1,000mm, ενώ το συνολικό μήκος, με τις κεφαλές είναι 1,200mm. Ο ωφέλιμος όγκος της βαθμίδας είναι περίπου 200 λίτρα. Το δοχείο είναι σχεδιασμένο σύμφωνα με τις προδιαγραφές ASME για πλήρες κενό και ελέγχεται υπό πίεση 6 bar(a). Το υλικό είναι EN 1.4410 (Super Duplex), με πάχος 5.0mm.

Το θερμαντικό στοιχείο τοποθετείται έκκεντρα στην κεφαλή με χρήση φλάντζας. Το στοιχείο αποτελείται από σωλήνες σε σχήμα φουρκέτας, σε εξαγωνική διάταξη. Επιλέχθηκε βήμα 0.25mm για τη διάταξη των σωλήνων στην αυλοφόρο πλάκα, με στόχο να επιτευχθεί μέγιστη πυκνότητα στην κατεύθυνση διαβροχής με άλμη. Το θερμαντικό στοιχείο έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές TEMA (Tubular Exchange Manufacturers' Association).

Ένα διάφραγμα τοποθετείται στο μέσο περίπου της διατομής, κατά μήκος του κυλινδρικού δοχείου, το οποίο το διαιρεί σε δύο τμήματα. Το θερμαντικό στοιχείο είναι τοποθετημένο στο αριστερό τμήμα, ενώ το δεξί τμήμα είναι ελεύθερο. Ο ατμός που παράγεται στο αριστερό τμήμα με την πρόσδοση θερμότητας, αναγκάζεται να κινηθεί κάτω από το διάφραγμα προκειμένου να εξέλθει από τη βαθμίδα. Αυτή η διαδρομή του ατμού αυξάνει σημαντικά το διαχωρισμό του παραγόμενου ατμού από τα σταγονίδια της άλμης. Για τον περαιτέρω διαχωρισμό των σταγονιδίων, χρησιμοποιείται σταγονοσυλλέκτης, κυλινδρικού σχήματος.

Οι βαθμίδες έχουν σχεδιαστεί σύμφωνα με τους κανονισμούς TEMA, ως ακολούθως:

- Σύστημα: TEMA BKU (Bonnet, Kettle type, Utubebundle)
- Κλάση: TEMA C
- Σωλήνες
 - Βήμα: 1.25mm
 - Σχέδιο: τριγωνικό, 30°
 - Εξωτερική διάμετρος: 19.05mm
 - Πάχος: 1.24mm (σύμφωνα με TEMA RCB-2.31 και διαθεσιμότητα εμπορίου)
 - Υλικό: EN 1.4410 (Ανοξείδωτος Χάλυβας Super Duplex)
 - Μήκος: 52.4m ανά βαθμίδα
 - Συνολική επιφάνεια: 7m² (4m² πρώτη βαθμίδα, 3 m² δεύτερη βαθμίδα)

Δοχείο:

- Έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με τους κανονισμούς TEMA και ASME BPVC S.8
- Μήκος: 1,200.0mm (συνολικό)
- Εξωτερική Διάμετρος: 478mm
- Πάχος: 5.0mm (σύμφωνα με ASME BPVC για εξωτερική πίεση και διαθεσιμότητα εμπορίου)
- Όγκος: 200 l

Σύστημα διανομής άλμης:

- Εξειδικευμένος σχεδιασμός (custom design) και σύμφωνα με προδιαγραφές CRANE TP-410 (πειραματική επικύρωση)
- 3 στάδια διανομής
- Τελικό στάδιο: διάτρητη λαμαρίνα με 130 τρύπες Φ 2,0 mm, συνολική επιφάνεια 0.4110⁻³ m².

Κρυσταλλωτήρας:

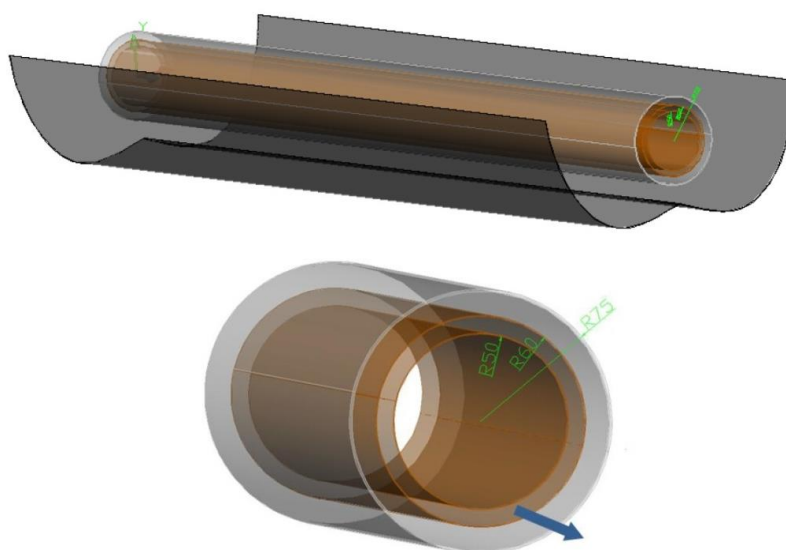
- Ο κρυσταλλωτήρας προμηθεύτηκε από την εταιρεία EVALED, βρίσκοντας μονάδα που ικανοποιεί τις τεχνικές προδιαγραφές. Αντί για μηχανικό συμπιεστή ατμού, η μονάδα χρησιμοποιεί αντλία θερμότητας.
- Η χρήση ειδικού ξέστρου βελτιώνει σημαντικά την πιθανότητα αστοχίας του υλικού όπως επίσης βελτιώνει τη μετάδοση θερμότητας (Robertson & Nghiem, 2011)

Ξηραντήρας:

- Λόγω διαθεσιμότητας χώρου και απλούστερης κατασκευής, προτιμήθηκε η διάταξη του ηλιακού θερμοκηπίου, αντί για το σύστημα ξηραντήρα με δίσκους

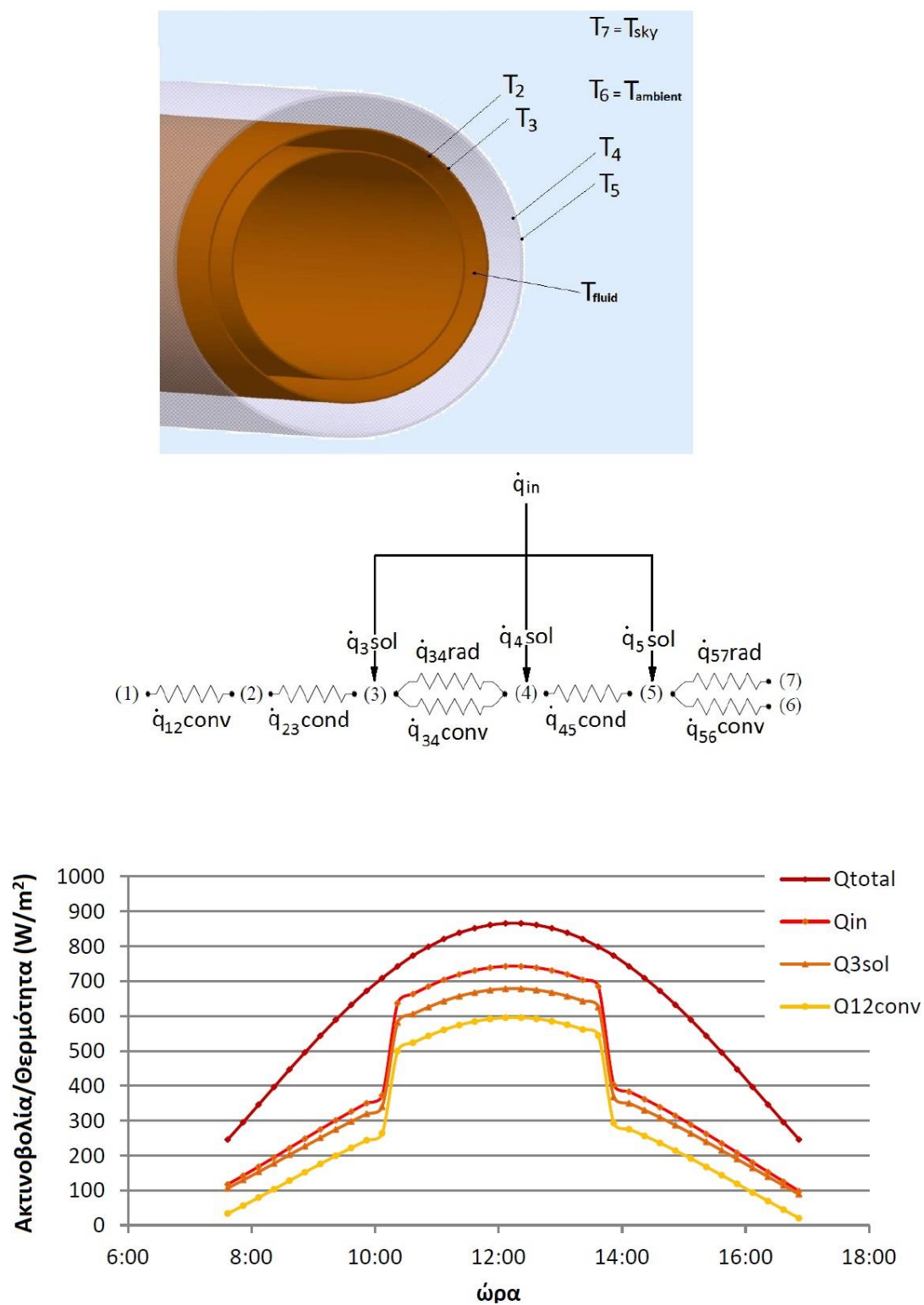
Ηλιακό σύστημα:

- Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, προτιμήθηκε η χρήση ζεστού νερού αντί για την παραγωγή ατμού. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν παραβολικοί συλλέκτες κενού. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συλλέκτη παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-34 και στο Διάγραμμα 4-6.
- Οι επίπεδοι συλλέκτες δεν ήταν πλέον απαραίτητοι, δεδομένου ότι η ηλιακή ενέργεια συλλέγεται και αξιοποιείται απευθείας από το ηλιακό ξηραντήριο.



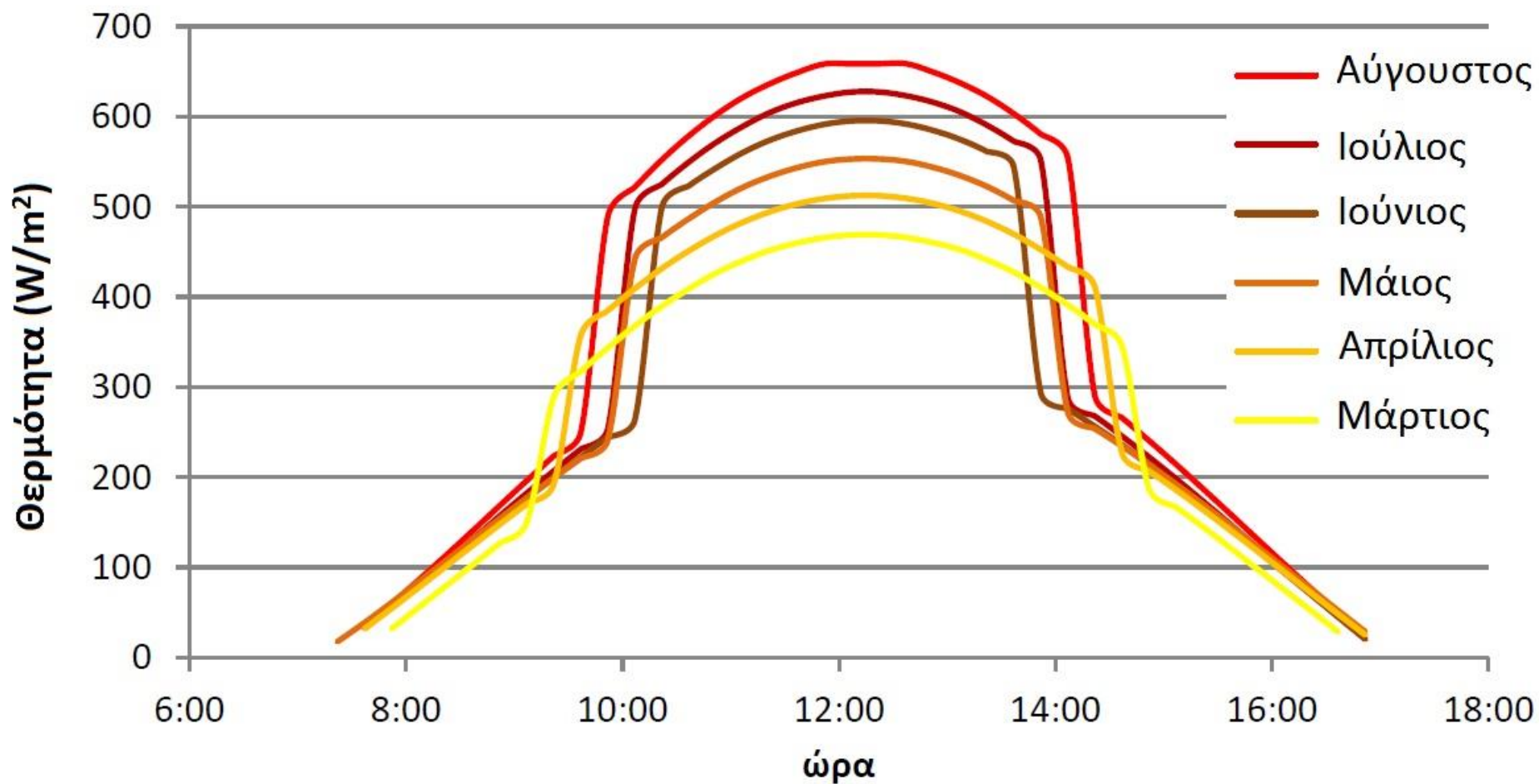
Πηγή: (Ξεύγενο, Μιχαηλίδης, Δημόπουλος, & Λοϊζίδου, 2013)

Σχέδιο 4-7: Σχεδίαση ηλιακού συστήματος κενού με χρήση AutoCAD



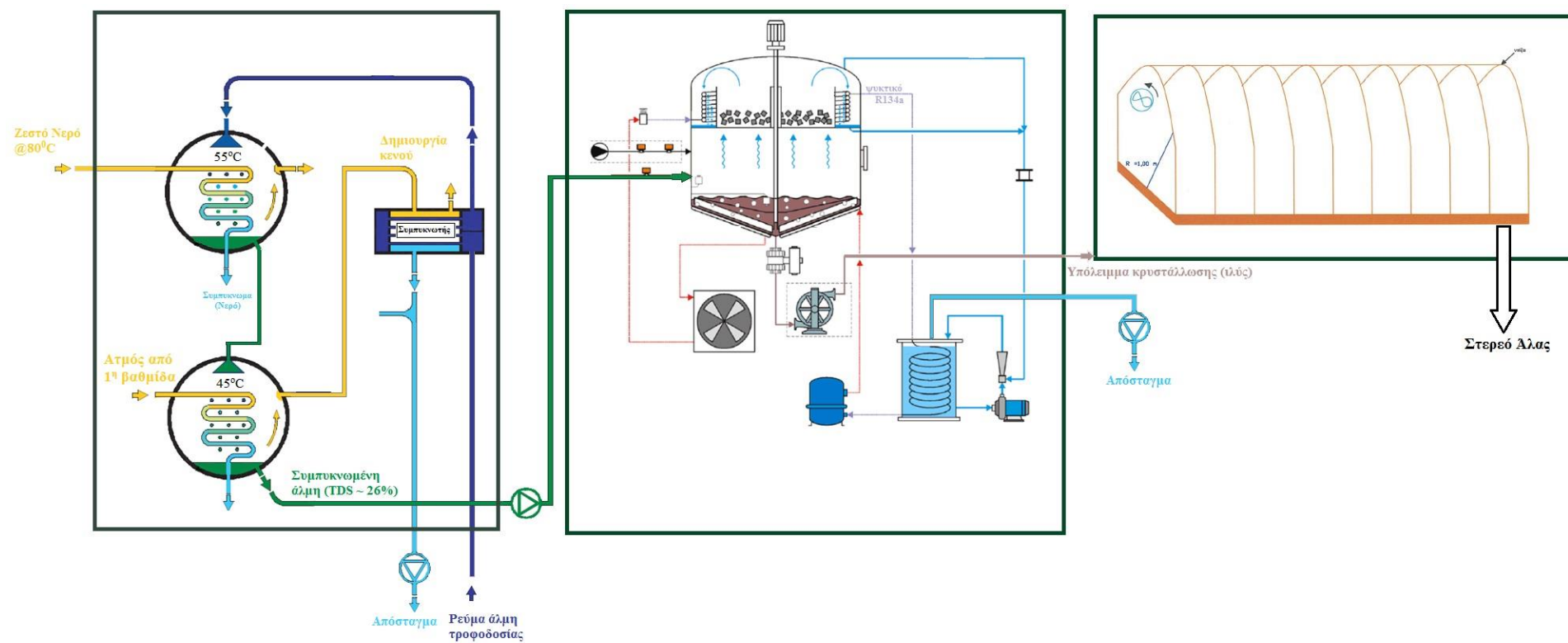
Πηγή: (Παπάζογλου, 2013)

Σχήμα 4-34: Δίκτυο θερμορροών για το δέκτη του ηλιακού συστήματος που χρησιμοποιήθηκε στην εφαρμογή

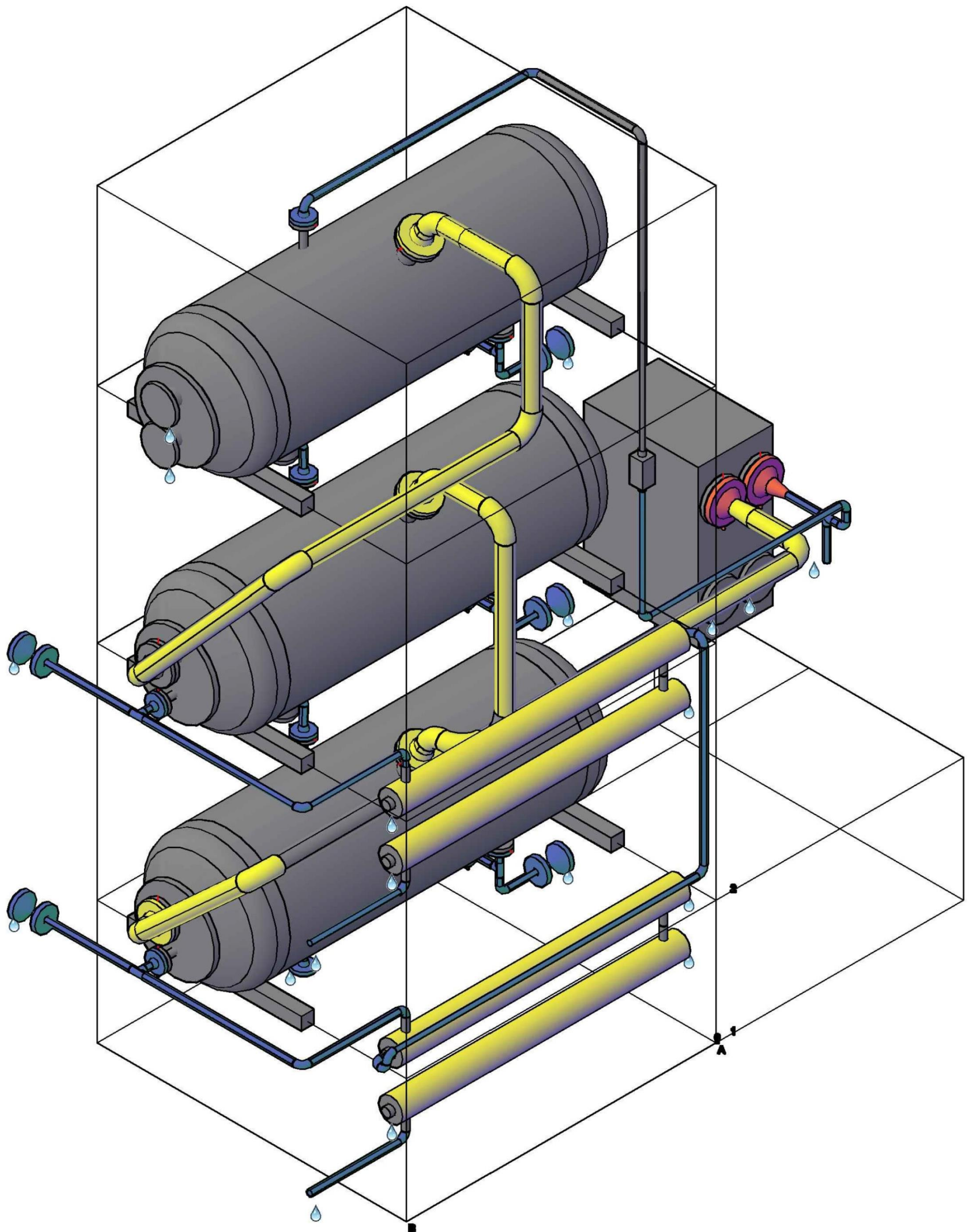


Πηγή: (Παπάζογλου, 2013)

Διάγραμμα 4-8: Ωφέλιμη θερμότητα που προσδίδεται στο νερό κατά τη διάρκεια της μέσης ημέρας των θερινών μηνών

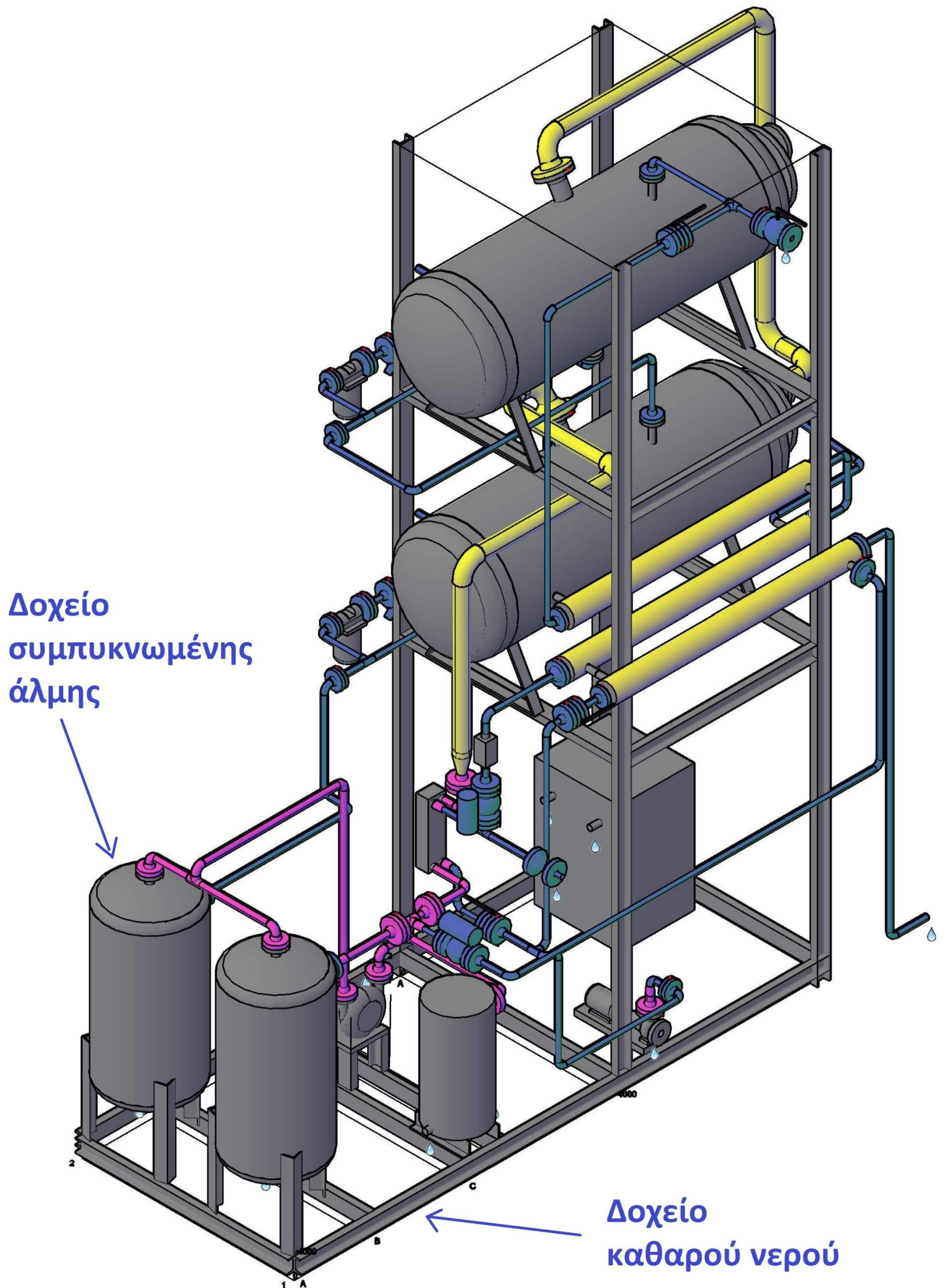


Σχήμα 4-35: Τελικό διάγραμμα ροής, φάση λεπτομερή σχεδιασμού



Σχέδιο 4-8: Τρισδιάστατη άποψη εξατμιστήρα, τελικό σχέδιο προτεινόμενο στον κατασκευαστή

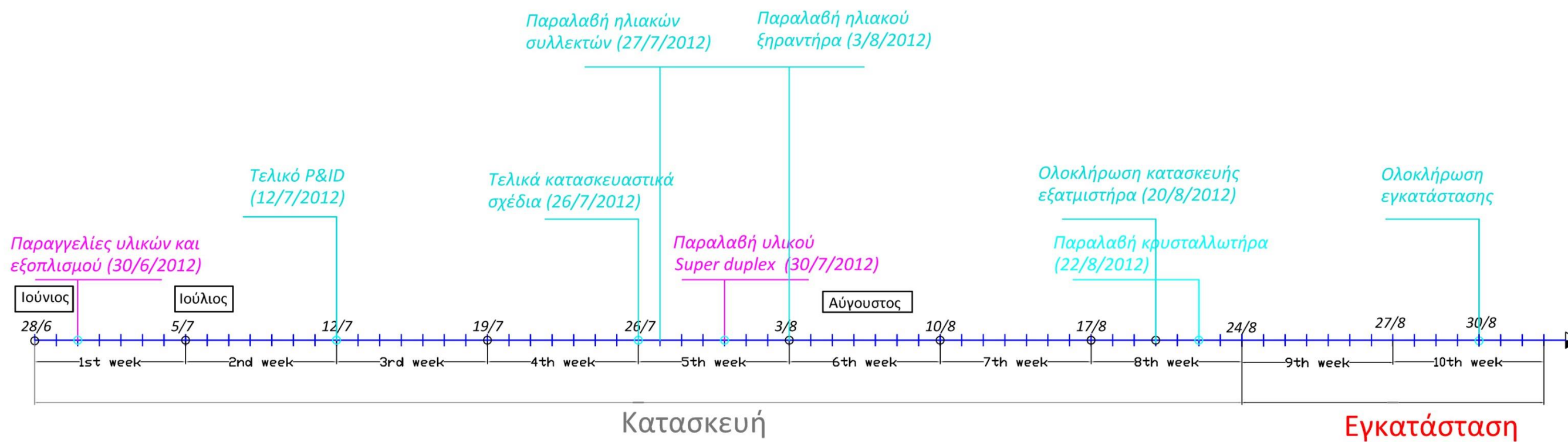
Page intentionally left blank



Σχέδιο 4-9: Τελικό σχέδιο εξατμιστήρα, έπειτα από προσθήκες του κατασκευαστή, απεικόνιση δοχείων συλλογής συμπυκνωμένης άλμης και καθαρού (παραγόμενου) νερού

Page intentionally left blank

Πλάνο κατασκευής (Έναρξη εργασιών: 5/6/2012)



Σχέδιο 4-10: Πλάνο κατασκευής της πιλοτικής μονάδας επεξεργασίας της άλμης

Page intentionally left blank

5 Κατασκευή, λειτουργία και βελτιστοποίηση πιλοτικής μονάδας επεξεργασίας της άλμης

5.1 Κατασκευή και εγκατάσταση πιλοτικής μονάδας

Η κατασκευή του πιλοτικού συστήματος διήρκεσε περίπου 3 ½ μήνες, (Ιούνιος – Οκτώβριος 2012). Η πραγματική υλοποίηση παρέκκλινε από το αρχικό πλάνο κατασκευής, λόγω καθυστέρησης παραλαβής των υλικών κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, για την εξασφάλιση της αντοχής της κατασκευής (προστασία έναντι pitting corrosion), επελέγη ανοξείδωτος χάλυβας ειδικών προδιαγραφών (Stainless Steel Super Duplex/ EN 1.4410/ UNS S32750). Τα υλικά αυτά προμηθεύτηκαν από τη Sandvik Φιλανδίας.

5.1.1 Επιλογή υλικού

Τα υλικά που εξετάστηκαν περιλαμβάνουν τιτάνιο, ζirkόνιο, χαλκονικέλιο, aluminium brass, ανοξείδωτος χάλυβας (316L) και Super Duplex. Τα κριτήρια που εξετάστηκαν για την τελική επιλογή του υλικού ήταν τα ακόλουθα:

- **Αντοχή στη διάβρωση.** Το περιβάλλον εργασίας είναι ιδιαίτερα διαβρωτικό λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και της υψηλής συγκέντρωσης σε άλατα. Η ειδική παράμετρος που πρέπει να εξετάζεται στις περιπτώσεις αυτές ονομάζεται Critical Pitting Temperature (CPT).
- **Διαθεσιμότητα υλικών:** Το σύστημα κατασκευάστηκε στην Αθήνα. Δεδομένου ότι οι περισσότερες τοπικές εταιρείες, είχαν διαθέσιμο χαλκονικέλιο μόνο στη μορφή των αυλών και όχι σε φύλλα, θα έπρεπε να γίνει συνδυασμός χαλκονικελίου και Aluminium Brass, κάτι το οποίο δεν προτείνεται για την αποφυγή γαλβανικής διάβρωσης.
- **Οικονομικότητα υλικών:** Τα υλικά όπως τιτάνιο και ζirkόνιο έχουν ικανοποιητική αντοχή στη διάβρωση. Ωστόσο, αποφεύχθηκε η χρήση τους λόγω του υψηλού τους κόστους.
- Τελικά επελέγη η χρήση Super Duplex.

Για την κατασκευή του πρότυπου πιλοτικού συστήματος, ο υποψήφιος διδάκτορας ήρθε σε επαφή με διάφορους προμηθευτές/κατασκευαστές (Πίνακας 9-7). Ακολουθώς δίνονται φωτογραφίες από την κατασκευή του εξατμιστήρα.



Εικόνα 5-1: Υλικά κατασκευής (αυλοί και φύλλα Super Duplex)



Εικόνα 5-2: Φωτογραφίες από την κατασκευή του εξατμιστήρα

5.1.2 Εγκατάσταση

5.1.2.1 Σημείο εγκατάστασης

Το πιλοτικό σύστημα επεξεργασίας της άλμης εγκαταστάθηκε σε οικόπεδο υπάρχουσας μονάδας αφαλάτωσης, στην Τήνο. Πριν την τελική επιλογή της ακριβούς θέσης, εξετάστηκαν όλες οι πιθανές θέσεις (βλ. Εικόνα 5-3), λαμβάνοντας υπόψη διάφορα κριτήρια όπως:

- (α) προσβασιμότητα (για την μεταφορά και ασφαλή εγκατάσταση της πιλοτικής μονάδας),
- (β) πρόσβαση σε δίκτυα (ηλεκτρικό δίκτυο, δίκτυο νερού, αποχέτευσης κ.λπ.),
- (γ) εγγύτητα στο σημείο απόρριψης της άλμης που παράγεται από την παρακείμενη μονάδα αφαλάτωσης,
- (δ) αποφυγή σκίασης από γειτονικά κτήρια (για την βέλτιστη λειτουργία του ηλιακού συστήματος) κ.λπ.



Βορεινή άποψη



Νοτιο-δυτική άποψη



Δυτική άποψη



Ανατολική άποψη



Σημείο απόρριψης



Νότια άποψη

Εικόνα 5-3: Απόψεις του οικοπέδου υφιστάμενης μονάδας αφαλάτωσης, στην περιοχή του Αγίου Φωκά, στην Τήνο

Η τοποθεσία είναι μία επίπεδη περιοχή, 250m από την ακτογραμμή με σύνδεση με το οδικό δίκτυο και τα δίκτυα παροχής ρεύματος και νερού του νησιού. Ο χάρτης με σημειωμένη την ακριβή θέση δίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Σημείωση: Με μαύρη γραμμή σημειώνεται το οικόπεδο της μονάδας αφαλάτωσης και με κίτρινο επισημαίνεται η περιοχή στην οποία εγκαταστάθηκε το πιλοτικό σύστημα.

Εικόνα 5-4: Τοποθεσία πιλοτικού συστήματος επεξεργασίας της άλμης

5.1.2.2 Έργα πολιτικού μηχανικού

Τα έργα πολιτικού μηχανικού που πραγματοποιήθηκαν περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Έργα προετοιμασίας: καθαρισμός (π.χ. αφαίρεση βλάστησης) και ισοπέδωση της περιοχής (βλ. Εικόνα 5-5)
- Πλάκα σκυροδέματος: 110 m² και πάχος 10cm (βλ. Εικόνα 5-6)



Εικόνα 5-5: Εργασίες προετοιμασίας της περιοχής εγκατάστασης του πιλοτικού συστήματος



Εικόνα 5-6: Τελική άποψη πλατφόρμας σκυροδέματος

5.1.2.3 Εγκατάσταση συστήματος επεξεργασίας της άλμης

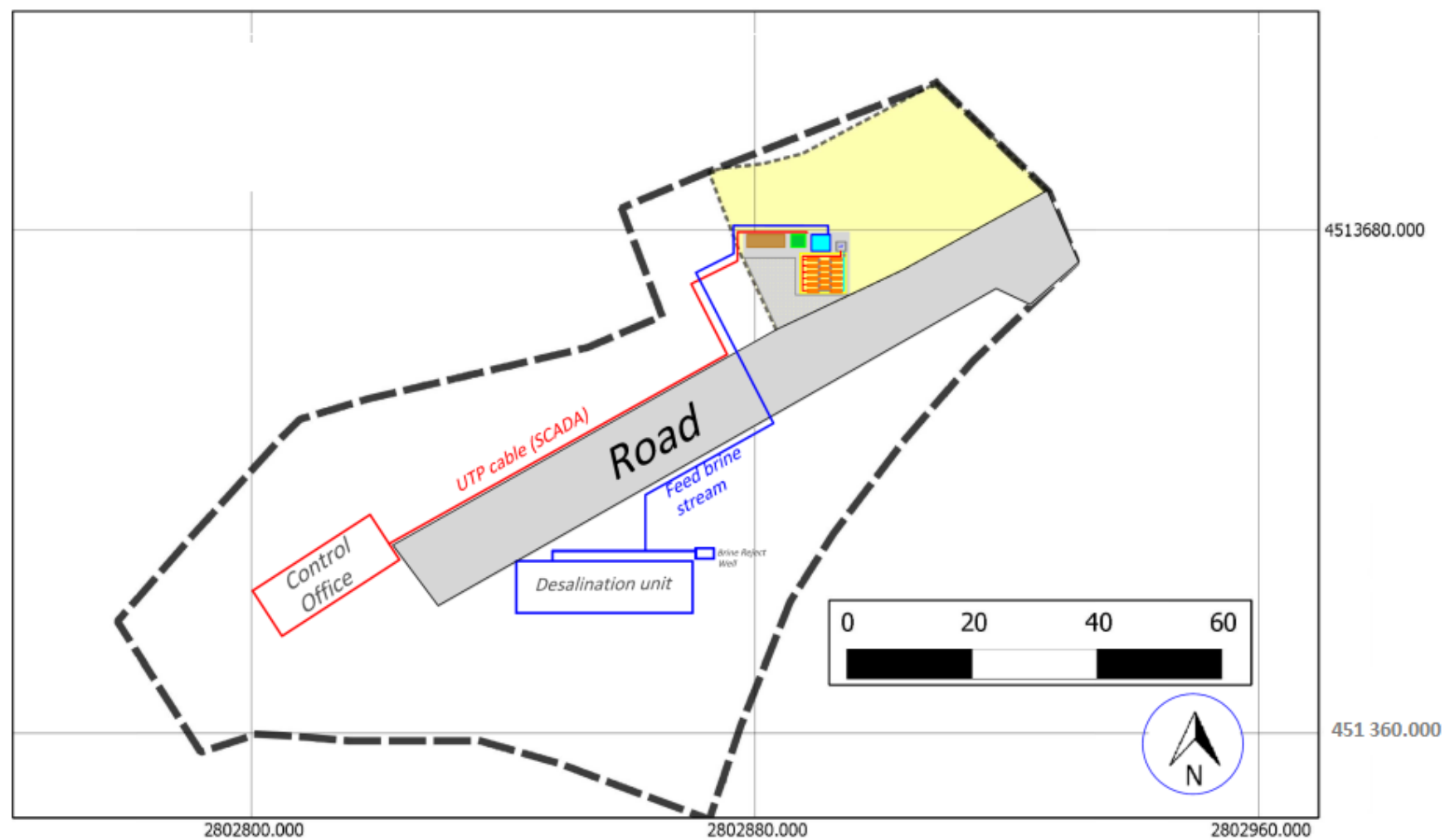
Το πιλοτικό σύστημα εγκαταστάθηκε σε πλατφόρμα από σκυρόδεμα επιφάνειας 110m^2 . Η τελική άποψη του εγκατεστημένου συστήματος δίνεται στην παρακάτω εικόνα, ενώ στο Σχήμα 5-1 δίνεται η κάτοψη του συστήματος.



Υπόμνημα

- | | |
|---|----------------|
| 1 | Εξατμιστήρας |
| 2 | Κρυσταλλωτήρας |
| 3 | Ξηραντήρας |
| 4 | Ηλιακό σύστημα |

Εικόνα 5-7: Τελική άποψη συστήματος



Σχήμα 5-1: Κάτοψη οικοπέδου, σύνδεση πιλοτικού με τη μονάδα αφαλάτωσης και κάτοψη πιλοτικού συστήματος

Εγκατάσταση ηλιακού συστήματος (26-27/09/2012)



Άποψη εγκατεστημένου ηλιακού συστήματος



Εικόνα 5-8: Ηλιακό σύστημα

Εγκατάσταση ξηραντήρα – 12-13/10/2012



Άποψη εγκατεστημένου ξηραντήρα (λεπτομέρειες)



Εικόνα 5-9: Εγκατάσταση ξηραντήρα



**Μεταφορά εξατμιστήρα
με χρήση γερανογέφυρας από το
μηχανουργείο της εταιρείας
[Θερμοσολ Ατμολέβητες Α.Ε.](#)**

**Τοποθέτηση εξατμιστήρα σε παπαγάλο
για μεταφορά του στην Τήνο—
[12/10/2012](#)**



Εικόνα 5-10: Μεταφορά εξατμιστήρα από το μηχανουργείο στην Τήνο



Εικόνα 5-11: Φωτογραφίες από τον εγκατεστημένο εξατμιστήρα



Μεταφορά με μηχανήμα
JCB και τοποθέτηση του
κρυσταλλωτήρα –

16/10/2012



Εικόνα 5-12: Φωτογραφίες από τον κρυσταλλωτήρα

5.1.3 Σύστημα ελέγχου εξατμιστήρα

Αναφορικά με το σύστημα ελέγχου, αναφέρεται πως ο εξατμιστήρας, ο κρυσταλλωτήρας και το ηλιακό σύστημα ελέγχονται από τρία διαφορετικά συστήματα ελέγχου, ενώ ο ξηραντήρας λειτουργεί χειροκίνητα. Τα σήματα από τους αισθητήρες του ηλιακού συστήματος και του εξατμιστήρα συλλέγονται και οπτικοποιούνται σε κοινό σύστημα SCADA. Ο κρυσταλλωτήρας διαθέτει ανεξάρτητο σύστημα ελέγχου.

Ακολούθως, παρουσιάζεται ο αυτοματισμός του εξατμιστήρα. Ο αυτοματισμός της μονάδας εξάτμισης επιτελεί τις εξής λειτουργίες:

- Έλεγχος – Λειτουργία της εγκατάστασης
- Καταγραφή των δεδομένων λειτουργίας και εμφάνιση σε πραγματικό χρόνο

5.1.3.1 Έλεγχος – Λειτουργία

Ο έλεγχος της ορθής λειτουργίας του εξοπλισμού της μονάδας εξάτμισης, γίνεται από Ηλεκτρονικό Υπολογιστή, μέσω του ηλεκτρικού πίνακα του συγκροτήματος. Εντός του πίνακα, προβλέπεται η εγκατάσταση PLC, που είναι προγραμματισμένο κατάλληλα ώστε να είναι δυνατή η λειτουργία της μονάδας εξάτμισης. Μέσω ψηφιακών σημάτων υπάρχει επικοινωνία με το PLC του Γενικού Πίνακα Χαμηλής Τάσης (Γ.Π.Χ.Τ.).

Το PLC που εγκαταστάθηκε στον Γ.Π.Χ.Τ., ελέγχει την ορθή λειτουργία των παρακάτω μονάδων / λειτουργιών:

- Λειτουργία αντλίας κενού
- Τροφοδοσία εισόδου
- Έλεγχος και διατήρηση πίεσης στους εξατμιστήρες
- Έλεγχος στάθμης στους εξατμιστήρες
- Εκκένωση δοχείων εξαγωγής απεσταγμένου νερού και υπολείμματος άλμης

Η μονάδα PLC, έχει δυνατότητα σύνδεσης με Ηλεκτρονικό Υπολογιστή, μέσω κατάλληλου λογισμικού της εταιρίας κατασκευής του PLC, με δυνατότητα προβολής

των λειτουργικών παραμέτρων της εγκατάστασης και ελέγχου αυτών, καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας της μονάδας και δυνατότητα τροποποίησης των παραμέτρων και του αλγορίθμου ελέγχου, από τον χειριστή της μονάδας εξάτμισης, σε περίπτωση που απαιτηθούν διορθωτικές ενέργειες για την ορθότερη λειτουργία του συστήματος. Ο Η/Υ επιτελεί λειτουργία SCADA.

Η τροφοδοσία του PLC, καθώς και όλου του αυτοματισμού αλλά και των οργάνων μέτρησης πεδίου, γίνεται μέσω κατάλληλης ισχύος UPS (τροφοδοτικό αδιάλειπτης λειτουργίας), τοποθετημένο κατάλληλα εντός του πεδίου αυτοματισμού του Γ.Π.Χ.Τ. της μονάδας. Επιτυγχάνεται έτσι προστασία του αυτοματισμού από μεταβολές της ηλεκτρικής τάσης του δικτύου.

Το σύστημα του PLC, εκτός από την κάρτα επεξεργασίας (CPU) και τις κάρτες με τις απαραίτητες θύρες για την υλοποίηση των παραπάνω επικοινωνιών, περιλαμβάνει και κάρτες ψηφιακών και αναλογικών εισόδων / εξόδων, ο αριθμός και τα χαρακτηριστικά των οποίων, προκύπτουν από τον υπολογισμό των απαιτούμενων σημάτων, για τον πλήρη έλεγχο της λειτουργίας των καταναλωτών / λειτουργιών που το PLC ελέγχει.

Επίσης το PLC είναι σε δίκτυο επικοινωνίας με το πολύ-όργανο ηλεκτρικών μετρήσεων στην είσοδο του Γ.Π.Χ.Τ. της μονάδας, έτσι ώστε να μεταδίδονται όλες οι βασικές ηλεκτρικές μετρήσεις, για έλεγχο, καταγραφή και στατιστική επεξεργασία: φασικές τάσεις, πολικές τάσεις, ένταση ρεύματος ανά φάση, ενεργός και άεργος ισχύς ανά φάση και συνολικά, ενεργός και άεργος ενέργεια ανά φάση και συνολικά, συχνότητα, συντελεστής ισχύος ($\cos \phi$) κλπ.

Τα διαθέσιμα σήματα από το σύστημα PLC, ψηφιακών και αναλογικών εισόδων / εξόδων, ανά κατηγορία είναι τουλάχιστον ίσα με τα απαραίτητα από τον παραπάνω υπολογισμό.

Στον Πίνακα 5-10 καταγράφονται αναλυτικά ανά λειτουργία τα σήματα αυτά, καθώς και τα αισθητήρια / όργανα μέτρησης ανά λειτουργία, με περιγραφή κάθε σήματος. Το άθροισμα των σημάτων ανά στήλη, καθορίζει τον ελάχιστο αριθμό σημάτων, που διαθέτει το σύστημα PLC.

5.1.3.2 Φιλοσοφία ελέγχου και λειτουργίας της μονάδας

Ο αυτόματος έλεγχος της εγκατάστασης, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, βασίζεται στη μονάδα ελέγχου (PLC).

Σκοπός του συστήματος αυτοματισμού είναι ο έλεγχος των διεργασιών χωρίς την υποχρεωτική συμμετοχή του χειριστή και η συλλογή, απεικόνιση και καταγραφή όλων των πληροφοριών που αφορούν τις διεργασίες, την λειτουργία του εξοπλισμού κλπ.

Για κάθε ελεγχόμενο στοιχείο του εξοπλισμού (π.χ. κινητήρας) προβλέπεται ο παρακάτω εξοπλισμός:

- Ένα (1) μπουτόν εκκίνησης πράσινου χρώματος.
- Ένα (1) μπουτόν στάσης κόκκινου χρώματος.
- Μία (1) λυχνία λειτουργίας πράσινου χρώματος.
- Μία (1) λυχνία βλάβης κόκκινου χρώματος.

Τα παραπάνω είναι εγκατεστημένα στην πρόσοψη του ηλεκτρικού πίνακα, που τροφοδοτεί και ελέγχει τη μονάδα.

- Στοιχείο σε λειτουργία PLC-AUTO: Σε αυτήν την περίπτωση ο εξοπλισμός λειτουργεί με βάση το σενάριο αυτόματης λειτουργίας και τις παραμέτρους που έχουν εισαχθεί από τον χειριστή του SCADA.
- Στοιχείο εκτός λειτουργίας (PLC-OFF): Σε αυτήν την περίπτωση ο εξοπλισμός δεν δουλεύει (καμία εντολή λειτουργίας από το PLC).
- Στοιχείο σε απομακρυσμένη χειροκίνητη λειτουργία PLC-MANUAL: Σε αυτήν την περίπτωση, ο εξοπλισμός ξεκινάει και σταματάει με το πάτημα των εικονικών πλήκτρων εκκίνησης και παύσης από το SCADA.

5.1.3.3 Περιγραφή ελέγχου λειτουργίας

Στη συνέχεια ακολουθεί αναλυτική περιγραφή με τον αυτοματισμό των επιμέρους λειτουργιών όπου αναφέρεται ο εγκατεστημένος εξοπλισμός με τα όργανα ελέγχου και περιγραφή της λειτουργίας της μονάδας.

5.1.3.3.1 Σύστημα δημιουργίας και διατήρησης κενού

Πίνακας 5-1: Λίστα οργάνων συστήματος κενού, αυτοματισμός εξατμιστήρα

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΚΩΔΙΚΟΣ
1	Μεταδότης πίεσης	P-018

Πίνακας 5-2: Λίστα εξοπλισμού συστήματος κενού, αυτοματισμός εξατμιστήρα

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΚΩΔΙΚΟΣ
1	Αντλία κενού υγρού δακτυλίου	P-002
2	Ηλεκτρική βαλβίδα απομόνωσης δοχείου K-001	CV-007
3	Ηλεκτρική βαλβίδα απομόνωσης δοχείου K-002	CV-008
4	Ηλεκτρική βαλβίδα ελέγχου τροφοδοσίας	CV-001
5	Ηλεκτρική βαλβίδα απομόνωσης αντλίας κενού	CV-009

Περιγραφή λειτουργίας

Η αντλία κενού ενεργοποιείται κατά την εκκίνηση της μονάδας, με σκοπό να εκκενώσει το σύστημα εξάτμισης από τον αέρα. Η βαλβίδα CV-009 ανοίγει ταυτόχρονα με την εκκίνηση της αντλίας κενού. Η αντλία κενού σταματάει τη λειτουργία της μόλις η πίεση στο σημείο (018) αποκτήσει τιμή 80 mbar, οπότε μένει σε κατάσταση stand-by, ενώ ταυτόχρονα κλείνει η CV-

009. Ενεργοποιείται ξανά αν σε οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της μονάδας η πίεση στο συγκεκριμένο σημείου υπερβεί τα 110 mbar, επαναλαμβάνοντας τον κύκλο.

5.1.3.3.2 Τροφοδοσία εισόδου

Πίνακας 5-3: Λίστα οργάνων τροφοδοσίας εισόδου εξατμιστήρα

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΚΩΔΙΚΟΣ
1	Μεταδότης θερμοκρασίας προσαγωγής ζεστού νερού από τους	T-SC001
2	Ροόμετρο προσαγωγής ζεστού νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες	FL-SC001
3	Ροόμετρο προσαγωγής τροφοδοσίας άλμης	FL-001

Πίνακας 5-4: Λίστα εξοπλισμού τροφοδοσίας εισόδου εξατμιστήρα

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΚΩΔΙΚΟΣ
1	Ηλεκτρική βαλβίδα ελέγχου τροφοδοσίας	CV-001

Περιγραφή λειτουργίας

Λόγω της διαφοράς πίεσης μεταξύ του ρευστού τροφοδοσίας και των συνθηκών λειτουργίας της μονάδας, δεν απαιτείται κάποια αντλία τροφοδοσίας. Η τροφοδοσία της άλμης γίνεται με διαρκή αναλογική ρύθμιση της βαλβίδας CV-001 η οποία στραγγαλίζοντας την παροχή επιτυγχάνει την απαιτούμενη τροφοδοσία. Ο υπολογισμός της απαιτούμενης ποσότητας άλμης που θα τροφοδοτηθεί στη μονάδα γίνεται από το σύστημα αυτοματισμού μέσω της εξίσωσης:

$$FL001 = (3 \times FLSC001 \times 4.21 \times (TSC001 - 70)) / ((1 - P) \times 2366.5)$$

Η παράμετρος P έχει την τιμή 0.30, εκτός αν καθοριστεί αλλιώς από τον χειριστή, μέσω του λογισμικού λειτουργίας.

Μέσω της παραπάνω εξίσωσης καθορίζεται διαρκώς η τιμή στόχος της παροχής τροφοδοσίας, ανάλογα της θερμικής ενέργειας που προσδίδεται στο σύστημα από τους ηλιακούς συλλέκτες. Η θέση της βαλβίδας CV-001 ρυθμίζεται έτσι ώστε η παροχή, όπως μετράται από το ροόμετρο FL-001 να ισούται της τιμής στόχος. Ο έλεγχος της θέσης της βαλβίδας είναι κλειστού βρόγχου PID, με εισόδους το αποτέλεσμα της εξίσωσης και την ένδειξη του ροομέτρου και έξοδο τη θέση ανοίγματος της βαλβίδας.

5.1.3.3.3 Έλεγχος και διατήρηση πίεσης στους εξατμιστήρες

Πίνακας 5-5: Λίστα οργάνων, διατήρηση πίεσης εξατμιστήρα

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΚΩΔΙΚΟΣ
1	Μεταδότης πίεσης	P-006
2	Μεταδότης πίεσης	P-008

Πίνακας 5-6: Λίστα εξοπλισμού, διατήρηση πίεσης εξατμιστήρα

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΚΩΔΙΚΟΣ
1	Ηλεκτροπνευματική βαλβίδα ρύθμισης πίεσης	CV-015

Περιγραφή λειτουργίας

Οι ηλεκτροπνευματικές βαλβίδες CV-015 και CV-017 ρυθμίζονται να βρίσκονται σε τέτοια θέση ώστε στραγγαλίζοντας τη ροή στις αντίστοιχες γραμμές να επιτυγχάνεται η επιθυμητή πίεση στο εσωτερικό των εξατμιστήρων W-001 και W-002. Ο έλεγχος της θέσης των βαλβίδων είναι κλειστού βρόγχου PID, με είσοδο την ένδειξη του μεταδότη πίεσης και έξοδο τη θέση ανοίγματος της βαλβίδας.

5.1.3.3.4 Έλεγχος στάθμης

Πίνακας 5-7: Λίστα οργάνων, έλεγχος στάθμης στις βαθμίδες εξάτμισης

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΚΩΔΙΚΟΣ
1	Αισθητήρας στάθμης	LC-003
2	Αισθητήρας στάθμης	LC-004
3	Αισθητήρας στάθμης	LC-005

Περιγραφή λειτουργίας

Η συγκεκριμένη λειτουργία είναι προειδοποιητικού χαρακτήρα και έχει σκοπό να αποτρέψει την υπερβολική συσσώρευση άλμης στο εσωτερικό των εξατμιστήρων. Μόλις ενεργοποιηθεί κάποιος από τους αισθητήρες στάθμης LC-003, LC-004 και LC-005 ενεργοποιείται ηχητική προειδοποίηση και η αντίστοιχη προειδοποιητική λυχνία στην πρόσοψη του ηλεκτρικού πίνακα.

5.1.3.3.5 Εκκένωση δοχείων εξαγωγής αποσταγμένου νερού και υπολείμματος άλμης

Πίνακας 5-8: Λίστα οργάνων, εκκένωση δοχείων νερού και άλμης

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΚΩΔΙΚΟΣ
1	Αισθητήρας ανώτατης στάθμης	LC-006
2	Αισθητήρας άνω στάθμης	LC-007
3	Αισθητήρας κάτω στάθμης	LC-008
4	Αισθητήρας ανώτατης στάθμης	LC-009
5	Αισθητήρας άνω στάθμης	LC-010
6	Αισθητήρας κάτω στάθμης	LC-011

Πίνακας 5-9: Λίστα εξοπλισμού, εκκένωση δοχείων νερού και άλμης

<i>A/A</i>	<i>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ</i>	<i>ΚΩΔΙΚΟΣ</i>
1	Εμβολοφόρος αντλία	P-003
2	Εμβολοφόρος αντλία	P-004
3	Ηλεκτρική βαλβίδα απομόνωσης δοχείου K-001	CV-007
4	Ηλεκτρική βαλβίδα απομόνωσης δοχείου K-002	CV-008

Περιγραφή λειτουργίας

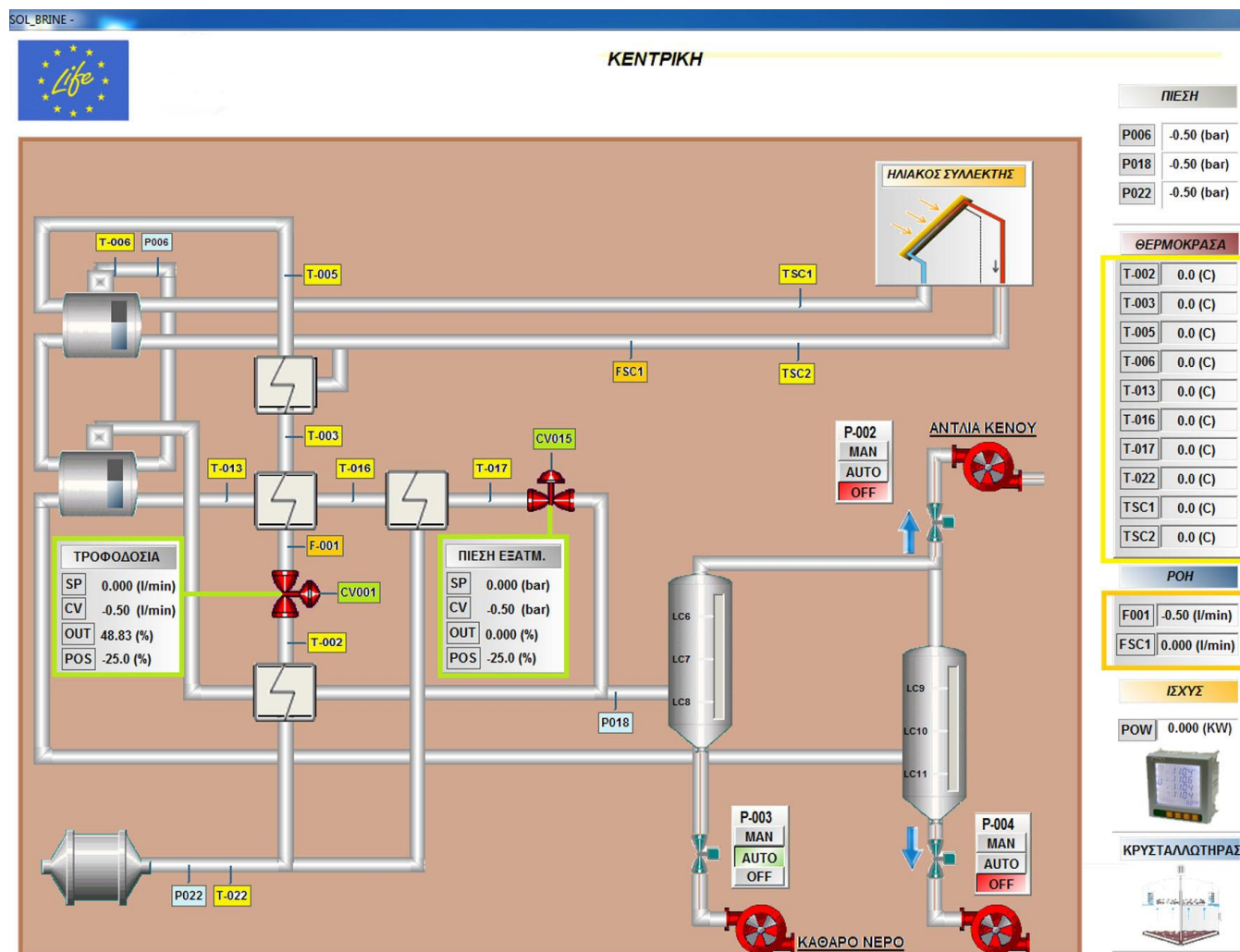
Οι ηλεκτρικές βαλβίδες απομόνωσης των δοχείων βρίσκονται κανονικά σε κλειστή θέση. Μόλις ενεργοποιηθεί ο αισθητήρας άνω στάθμης σε κάποιο δοχείο, ανοίγει η αντίστοιχη ηλεκτρική βαλβίδα ταυτόχρονα με την αντίστοιχη αντλία εκκένωσης του δοχείου. Με την ενεργοποίηση του αισθητήρα κάτω στάθμης του δοχείου, κλείνει η αντίστοιχη ηλεκτρική βαλβίδα ταυτόχρονα με την αντίστοιχη αντλία εκκένωσης του δοχείου. Η ενεργοποίηση κάποιου από τους αισθητήρες ανώτατης στάθμης ενεργοποιεί την ηχητική προειδοποίηση και την αντίστοιχη προειδοποιητική λυχνία στην πρόσοψη του ηλεκτρικού πίνακα.

Πίνακας 5-10: Όργανα για τον έλεγχο και την παρακολούθηση του πρότυπου συστήματος επεξεργασίας της άλμης

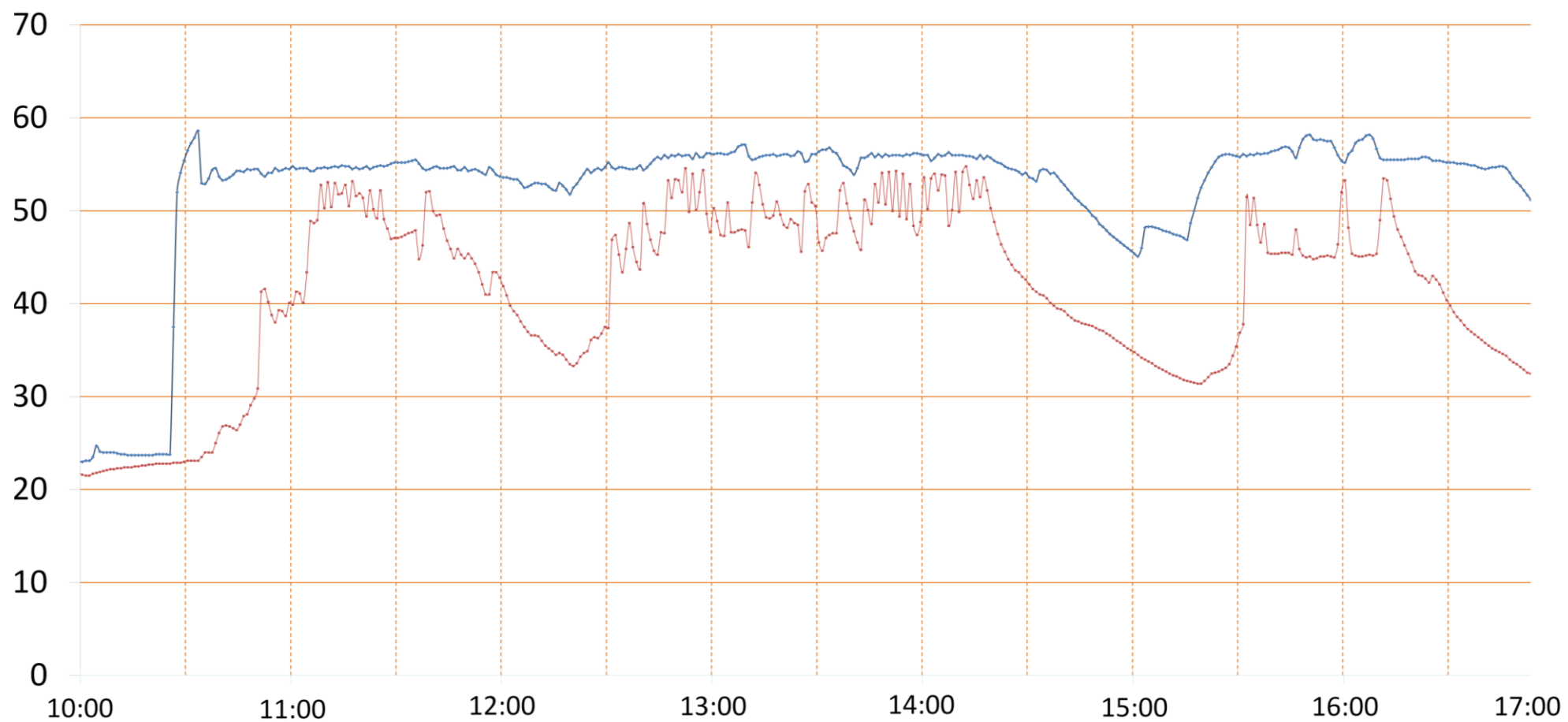
Α/Α	TAG	Περιγραφή	Είσοδος από	Έξοδος σε	Σήματα από/προς PLC			
					Ψηφιακά		Αναλογικά	
					Είσοδος	Έξοδος	Είσοδος	Έξοδος
1.	P-002	Vacuum pump	CV-009	-	2	1	0	0
2.	P-003	Distillate reciprocating pump, 100 lt/h @ 1.5 bar	K-001	Water Collection Tank	2	1	0	0
3.	P-004	Brine pump	K-002	Crystallizer	2	1	0	0
4.	CV-001	Control Valve	T-002	F-001	1	0	1	1
5.	CV-007	Control Valve	K-001	P-003	2	1	0	0
6.	CV-008	Control Valve	K-002	P-004	2	1	0	0
7.	CV-009	Control Valve	K-001	P-002	2	1	0	0
8.	CV-017	Control Valve	W-007	K-001	1	0	0	1
9.	F-001	Flowmeter, 4-20mA	CV-001	T-003	0	0	1	0
11.	FSC-001	Flowmeter, 4-20mA	Collectors	TSC-002	0	0	1	0
12.	P-022	Pressure transmitter	Feed brine pressure		0	0	1	0

A/A	TAG	Περιγραφή	Είσοδος από	Έξοδος σε	Σήματα από/προς PLC			
					Ψηφιακά		Αναλογικά	
					Είσοδος	Έξοδος	Είσοδος	Έξοδος
13.	P-018	Pressure transmitter	W-004	K-001	0	0	1	0
14.	P-006	Pressure Transmitter	W-001	W-002	0	0	1	0
15.	T-022	Temperature Transmitter, PT1000	Feed brine temperature		0	0	1	0
16.	T-002	Temperature Transmitter, PT1000	W-004	CV-001				
17.	T-003	Temperature Transmitter, PT1000	W-006	W-009	0	0	1	0
18.	T-005	Temperature Transmitter, PT1000	W-009	W-001	0	0	1	0
19.	T-006	Temperature Transmitter, PT1000	W-001	W-002	0	0	1	0
20.	T-013	Temperature Transmitter, PT1000	W-002	W-006	0	0	1	0
21.	T-016	Temperature Transmitter, PT1000	W-006	W-007	0	0	1	0
22.	T-017	Temperature Transmitter, PT1000	W-007	CV-017	0	0	1	0
23.	TSC-001	Temperature Transmitter, PT1000	Solar system		0	0	1	0
24.	TSC-001	Temperature Transmitter, PT1000	Solar system		0	0	1	0
25.	LC-003	Level Transmitter	W-001		1	0	0	0

A/A	TAG	Περιγραφή	Είσοδος από	Έξοδος σε	Σήματα από/προς PLC			
					Ψηφιακά		Αναλογικά	
					Είσοδος	Έξοδος	Είσοδος	Έξοδος
26.	LC-005	Level Transmitter	W-002		1	0	0	0
27.	LC-006	Level Transmitter	K-001		1	0	0	0
28.	LC-007	Level Transmitter			1	0	0	0
29.	LC-008	Level Transmitter			1	0	0	0
30.	LC-009	Level Transmitter	K-002		1	0	0	0
31.	LC-010	Level Transmitter			1	0	0	0
32.	LC-011	Level Transmitter			1	0	0	0
35.	Other	Other components	-		-	-	-	-



Σχέδιο 5-1: Άποψη του συστήματος ελέγχου SCADA του πιλοτικού συστήματος



Διάγραμμα 5-1: Θερμοκρασιακό προφίλ του διαλύματος άλμης στην πρώτη (μπλε γραμμή) και δεύτερη (κόκκινη γραμμή) βαθμίδα του εξατμιστήρα

5.1.4 Κόστος συστήματος

Το κόστος του πιλοτικού συστήματος αναλύεται στον ακόλουθο πίνακα:

Συνιστώσα	Κόστος
Εξατμιστήρας	43,000 €
Κρυσταλλωτήρας (with heat pump for energy saving)	20,000 €
Ξηραντήρας	2,000 €
Ηλιακό σύστημα	16,600 €
Παραβολικοί συλλέκτες κενού	13,500 €
Αποθήκευση ενέργειας	3,100 €
Σύστημα Ελέγχου	5,500 €
Βάση σκυροδέματος	1,000 €
Εγκατάσταση	1,000 €
Στέγαστρο	1,000 €
Σύνολο	90,100 €

5.2 Εργαστηριακές αναλύσεις

5.2.1 Πειραματικό Πρωτόκολλο

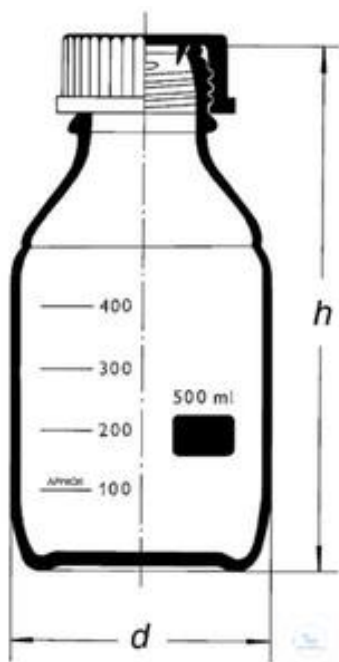
5.2.1.1 Πρωτόκολλο δειγματοληψιών

Τα δείγματα ελήφθησαν από την πιλοτική μονάδα επεξεργασίας της άλμης και μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο της Μονάδας Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας, στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, σύμφωνα με το πρωτόκολλο δειγματοληψίας.

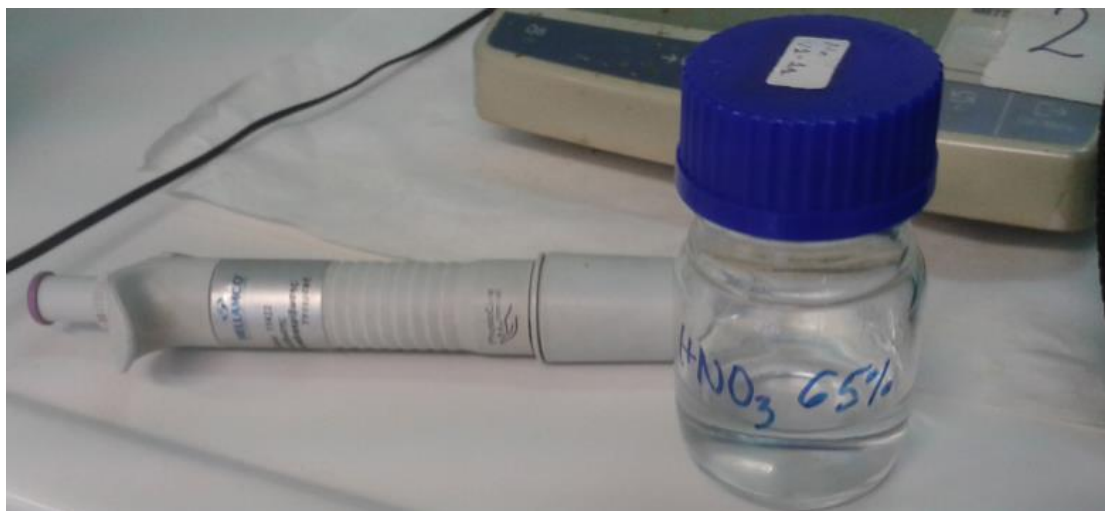
Ο κύριος στόχος κατάρτισης ενός πρωτοκόλλου δειγματοληψίας είναι η εξασφάλιση ότι τα δείγματα δεν αλλοιώνονται μέχρι την τελική τους ανάλυση στο εργαστήριο. Κατά τη δειγματοληψία, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία έτσι ώστε να αποφευχθεί αλλοίωση της συγκέντρωσης των συστατικών κατά το χρόνο της συλλογής μέχρι το χρόνο της εργαστηριακής ανάλυσης.

Εξοπλισμός δειγματοληψίας

1. **Δοχεία δειγματοληψίας (περιέκτες)** (βλ. επίσης Εικόνα 5-13)
2. **Πιπέττες:** Η κύρια χρήση τους κατά τη δειγματοληψία είναι η προσθήκη αντιδραστηρίων (διάλυμα νιτρικού οξέος) για τη σωστή διατήρησή τους
3. **Σάκοι:** ο όλος εξοπλισμός τοποθετείται σε σάκο για την τακτική και ασφαλή μεταφορά των δειγμάτων στο εργαστήριο



Εικόνα 5-13: Γυάλινος περιέκτης



Εικόνα 5-14: Πιπέττα, οξίνιση συλλεγμένων δειγμάτων



Εικόνα 5-15: Ισόθερμος σάκος για την τακτική και ασφαλή μεταφορά των δειγμάτων

Επισήμανση (labelling)

Κατά τη συλλογή των δειγμάτων, ένας μοναδικός αριθμός (ετικέτα) καθορίζεται για κάθε δείγμα και τοποθετείται επάνω στον περιέκτη, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται

ταυτοποίηση του δείγματος. Ο αριθμός της ετικέτας ταυτοποιείται με τον αριθμό που αναγράφεται στο αντίστοιχο δελτίο δειγματοληψίας.

Συντήρηση:

Τα περισσότερα δείγματα οξινίστηκαν και έπειτα τοποθετήθηκαν σε ισόθερμο σάκο και διατηρήθηκαν στους 0 έως 4°C με χρήση παγοκυστών. Έπειτα πραγματοποιείται μεταφορά στο εργαστήριο ανάλυσης, όπου και φυλάσσονται στο ψυγείο στους 4°C. Η οξίνιση επιτρέπει τη διατήρηση των μετάλλων, αποτρέποντας την καθίζησή τους. Δεδομένου ότι οι ογκομετρικοί κύλινδροι είχαν χωρητικότητα 500mL, η δόση του νιτρικού οξέος που χρησιμοποιήθηκε ήταν 8.8 mL

Νιτρικό οξύ (HNO_3):

❖ Περιεχόμενο (kg%): 65%

Για τη σωστή οξίνιση των δειγμάτων, και για ποσότητα 400g δείγματος, πρέπει να προστεθούν περίπου 8g (ή 2%) νιτρικού οξέος, ή περίπου 8.8 mL διαλύματος με περιεκτικότητα 65% w/w (πυκνότητα του διαλύματος 1.39 kg/l)

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη χρήση των αντιδραστηρίων, έτσι ώστε να μην αλλοιώσει την ανάλυση. Έτσι χρησιμοποιήθηκε νιτρικό οξύ, δεδομένου ότι η μέτρηση των νιτρικών δεν είναι από τις κρίσιμες παραμέτρους για την ανάλυση μας.

Συνιστώμενος μέγιστος χρόνος συντήρησης:

Ανάλογα με την παράμετρο ανάλυσης. Ο αναγνώστης μπορεί να βρει περισσότερες πληροφορίες σε διάφορες οδηγίες δειγματοληψίας (KEELPINO, 2014).

Εικόνα 5-16: Φωτογραφίες από τα στάδια δειγματοληψίας, σύμφωνα με το καταρτισμένο πρωτόκολλο δειγματοληψίας

Στάδιο προετοιμασίας



Διάλυμα Νιτρικού Οξέος



Οργάνωση εξοπλισμού δειγματοληψίας (πιπέτες, περιέκτες κ.λπ.)



Προετοιμασία διαλύματος οξίνισης

Στάδιο δειγματοληψίας



Επιλογή σημείου δειγματοληψίας



Συλλογής αντιπροσωπευτικών δειγμάτων



Επισήμανση δειγμάτων

Οξίνιση και προετοιμασία για μεταφορά δειγμάτων



Προσθήκη αντιδραστηρίου οξίνισης (HNO_3)



Προσωρινή αποθήκευση δειγμάτων (επισήμανση σύμφωνα με το πρωτόκολλο)



Προσθήκη αντιδραστηρίου οξίνισης (HNO_3)



Page intentionally left blank

5.2.1.2 Πρωτόκολλο μετρήσεων

Πραγματοποιήθηκαν τρεις (3) κύκλοι πειραμάτων:

1^{ος} κύκλος: Παρακολούθηση εκροής μονάδας αφαλάτωσης

- ✓ Αυτός ο κύκλος πειραμάτων περιλαμβάνει την παρακολούθηση της εκροής (άλμη) της μονάδας αφαλάτωσης που είναι εγκατεστημένη στην περιοχή του Αγίου Φωκά, στην Τήνο. Τα δείγματα συλλέχθηκαν σύμφωνα με το πρωτόκολλο δειγματοληψίας. Οι παράμετροι που αναλύθηκαν παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-2.

2^{ος} κύκλος πειραμάτων: Παρακολούθηση προϊόντων πιλοτικού συστήματος

- ✓ Αυτός ο κύκλος πειραμάτων περιλαμβάνει την ποσοτική και ποιοτική μελέτη των ακόλουθων δειγμάτων: (α) συμπυκνωμένος ατμός (απιονισμένο, παραγόμενο νερό) από τον εξατμιστήρα, (α) συμπυκνωμένος ατμός (απιονισμένο, παραγόμενο νερό) από τον κρυσταλλωτήρα και (γ) στερεό άλας από τον ξηραντήρα. Οι παράμετροι που αναλύθηκαν παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-2.

3^{ος} κύκλος πειραμάτων: Παρακολούθηση επίδοσης συστήματος (συμπύκνωση της άλμης)

- ✓ Αυτός ο κύκλος πειραμάτων περιλαμβάνει κυρίως τη μέτρηση της αγωγιμότητας της άλμης στην έξοδο του εξατμιστήρα.

Η περιγραφή των κύκλων πειραμάτων και των αναλυτών δίνονται στο ακόλουθο σχήμα.

1^η σειρά πειραμάτων

Σημείο δειγματοληψίας:
εκροή αφαλάτωσης

Παράμετροι:

- Αγωγιμότητα (mS/cm)
- TDS (ppm)
- Κατιόντα όπως Ca, Na, K, Mg (ppm)
- Βαρέα μέταλλα Pb, Sn, Zn, Cr, Ni, Cu, Cd (ppt)
- Ανιόντα όπως HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , PO_4^{3-}

2^η σειρά πειραμάτων

Σημείο δειγματοληψίας:
Εξατμιστήρας, Κρυσταλλωτήρας,
Ξηραντήρας

Παράμετροι:

- Αγωγιμότητα (mS/cm)
- TDS (ppm)
- Κατιόντα όπως Ca, Na, K, Mg (ppm)
- Βαρέα μέταλλα Pb, Sn, Zn, Cr, Ni, Cu, Cd (ppt)
- Ανιόντα όπως HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , PO_4^{3-}
- Κατανομή μεγέθους
- Υγρασία
- Ποιοτική ανάλυση με χρήση ακτίνων X για κρυσταλλικές ενώσεις όπως NaCl, MgCl_2 , KCl, CaCl_2 , MgSO_4 , NaHCO_3
- SEM-EDX ανάλυση

3^η σειρά πειραμάτων

Σημείο δειγματοληψίας:
Εξατμιστήρας

Παράμετροι:

- Αγωγιμότητα (mS/cm)

Σχήμα 5-2: Σχεδιασμός πειραματικών κύκλων

5.2.2 Μέθοδοι μετρήσεων

5.2.2.1 Υγρά δείγματα

5.2.2.1.1 pH

Σκοπός

Το pH αποτελεί μέτρηση της δραστηριότητας των υδρογονοϊόντων και εκφράζεται ως ο αρνητικός λογάριθμος της συγκέντρωσης τους σε δεδομένη θερμοκρασία. Είναι πολύ σημαντική παράμετρος για την ανάλυση και επεξεργασία των αποβλήτων. Έχει εύρος 0-14, με τα δείγματα να κατατάσσονται στις ακόλουθες τρεις (3) κατηγορίες:

- [0-7): Όξινα διαλύματα
- (7-14]: Βασικά ή αλκαλικά διαλύματα, και
- =7 Ουδέτερα διαλύματα

Η μέθοδος εφαρμόζεται για την ανάλυση τόσο υγρών όσο και στερεών δειγμάτων. Η Οδηγία Εργασίας βασίζεται:

- Standard Methods APHA-AWWA-WEF (21st Edition) Method 4500-H+;
- EPA Methods 150.1, καθώς επίσης και στις
- Οδηγίες χρήσης του οργάνου (βλέπε παρακάτω)

Όργανο

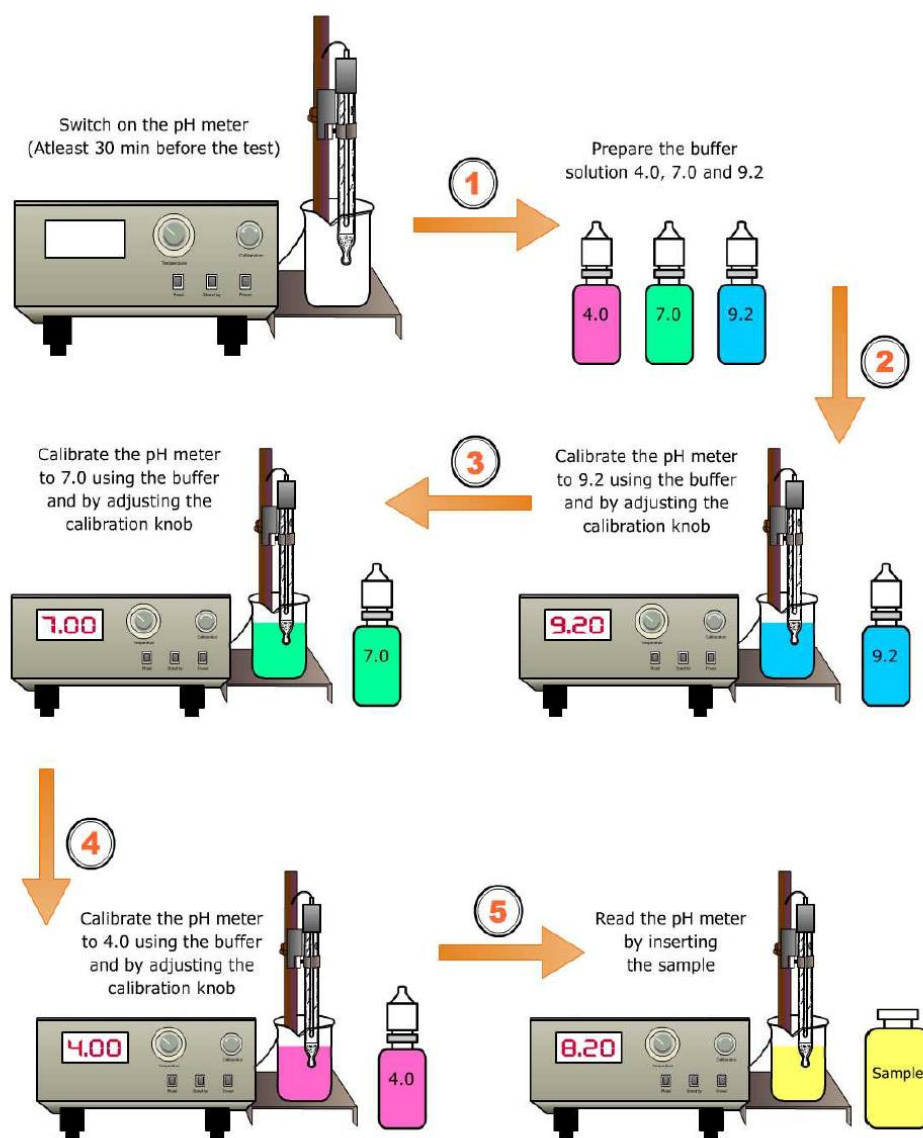


- ❖ Mettler Toledo MPC227
- ❖ WTW inolab 720

Η κλίμακα μετρήσεων είναι από 0.00 έως 14.00 με την ευκρίνεια 0.01 και την σχετική ακρίβεια ± 0.01 .

Διαδικασία

Αρχικά ρυθμίζεται το πεχάμετρο χρησιμοποιώντας ρυθμιστικά διαλύματα με pH 4, 7, 10 (δημιουργία καμπύλης αναφοράς). Ακολούθως βυθίζεται το ηλεκτρόδιο στο δείγμα και μετρείται η ένδειξη στην κλίμακα του pH-μετρου. Καταγράφουμε το pH και την θερμοκρασία. Κατόπιν πλένεται το ηλεκτρόδιο με αποσταγμένο νερό και επαναλαμβάνεται η μέτρηση του δείγματος. Σε περίπτωση των δειγμάτων με μεγάλη περιεκτικότητα αιρούμενων στερεών αναδεύουμε καλά το διάλυμα με χρήση μαγνητικού αναδευτήρα για καλή ομογενοποίηση. Για συνήθεις μετρήσεις απαιτείται η χρήση pH-μετρου υψηλής ακρίβειας Mettler Toledo MPC227 με προσαρμοσμένο εξισορροπιστή θερμοκρασίας.



Σχήμα 5-3: Διαδικασία μέτρησης pH

Το pH μετρήθηκε επίσης και επιτόπου, με τη χρήση φορητού πολυ-μέτρου (Τύπος: WTW 3410), το οποίο διαθέτει τρία ηλεκτρόδια (probes) για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, του pH και της αγωγιμότητας.



Εικόνα 5-17: Φορητό όργανο WTW και ηλεκτρόδιο μέτρησης pH



Εικόνα 5-18: Επιτόπου μέτρηση pH, εκροή μονάδας αφαλάτωσης Τήνου

5.2.2.1.2 Αγωγιμότητα

Σκοπός

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι μια μαθηματική έκφραση της ικανότητας ενός υδατικού διαλύματος να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Αγωγιμότητα είναι το ρεύμα προς την διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται σε δυο ηλεκτρόδια μέσα σε ένα διάλυμα. Η ικανότητα αυτή εξαρτάται από:

- την παρουσία ιόντων,
- το σθένος τους,
- την κινητικότητα τους,
- τη συγκέντρωσή τους,
- τη θερμοκρασία και το ιξώδες του διαλύματος, καθώς και
- το μέγεθος της διαφοράς δυναμικού, με την οποία γίνεται η μέτρηση.

Σε ένα υδατικό διάλυμα, η αγωγιμότητα είναι ανάλογη της συγκέντρωσης των διαλυμένων αλάτων στο υγρό. Έτσι λοιπόν, όσο υψηλότερη είναι η συγκέντρωση των αλάτων τόσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα. Τα διαλύματα των περισσότερων ανόργανων οξέων και βάσεων και όλων των αλάτων είναι σχετικά καλοί αγωγοί του ρεύματος. Αντίθετα, τα μόρια των οργανικών ενώσεων που δεν διίστανται όταν διαλυθούν στο νερό, άγουν ελάχιστα ή καθόλου το ηλεκτρικό ρεύμα. Η πιο κοινή μονάδα μέτρησης της αγωγιμότητας είναι το Siemens/cm (S/cm).

Τα αγωγιμόμετρα διαχωρίζονται σε 2 κατηγορίες, ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιούν: την αμπερομετρική και την ποτενσιομετρική. Η *αμπερομετρική* μέθοδος στα αγωγιμόμετρα χρησιμοποιεί μία γνωστή διαφορά δυναμικού (V) σε δύο ηλεκτρόδια και μετράει το ρεύμα (I) που διαρρέεται μέσω αυτών. Σύμφωνα με τον νόμο του Ohm: $I = V/R$ όπου :R= αντίσταση, V= η γνωστή διαφορά δυναμικού, I = το ρεύμα (I) που διαρρέεται από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο. Λογικό είναι ότι όσο αυξάνεται το ρεύμα τόσο αυξάνεται και η αγωγιμότητα. Όμως η αντίσταση εξαρτάται από την απόσταση που υπάρχει μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων και την επιφάνειά τους, η οποία επιφάνεια μπορεί να μεταβληθεί λόγω της εναπόθεσης αλάτων ή άλλων υλικών (ηλεκτρόλυση). Για τον λόγο αυτόν η αμπερομετρική μέθοδος συνιστάται για

μετρήσεις σε διαλύματα με χαμηλό ποσοστό αλάτων (έως 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Η ποτενσιομετρική μέθοδος των 4 δακτυλίων εκμηδενίζει τα προβλήματα που εμφανίζονται στην αμπερομετρική μέθοδο. Οι δύο ακραίοι δακτύλιοι εφαρμόζουν μια εναλλασσόμενη τάση και δημιουργούν ροή ρεύματος στο διάλυμα. Οι δύο εξωτερικοί δακτύλιοι, μετράνε την τάση την τάση που δημιουργείται από τη ροή ρεύματος στο διάλυμα, η οποία είναι ανάλογη της αγωγιμότητας του διαλύματος. Το PVC - υλικό μεταξύ των δακτυλίων - εξασφαλίζει τη σωστή μόνωση, ώστε το ρεύμα να παραμένει σταθερό χωρίς απώλειες. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των 4 δακτυλίων, έχουμε τη δυνατότητα να μετράμε αγωγιμότητα σε διαλύματα έως 200.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (200 mS/cm).

Η μέθοδος εφαρμόζεται για την ανάλυση τόσο υγρών όσο και στερεών δειγμάτων. Η Οδηγία Εργασίας βασίζεται:

- ❖ Standard Methods APHA-AWWA-WEF (21st Edition) Method 2510;
- ❖ EPA Method 9050A, καθώς και
- ❖ Οδηγίες χρήσης του οργάνου (βλέπε παρακάτω)

Όργανο

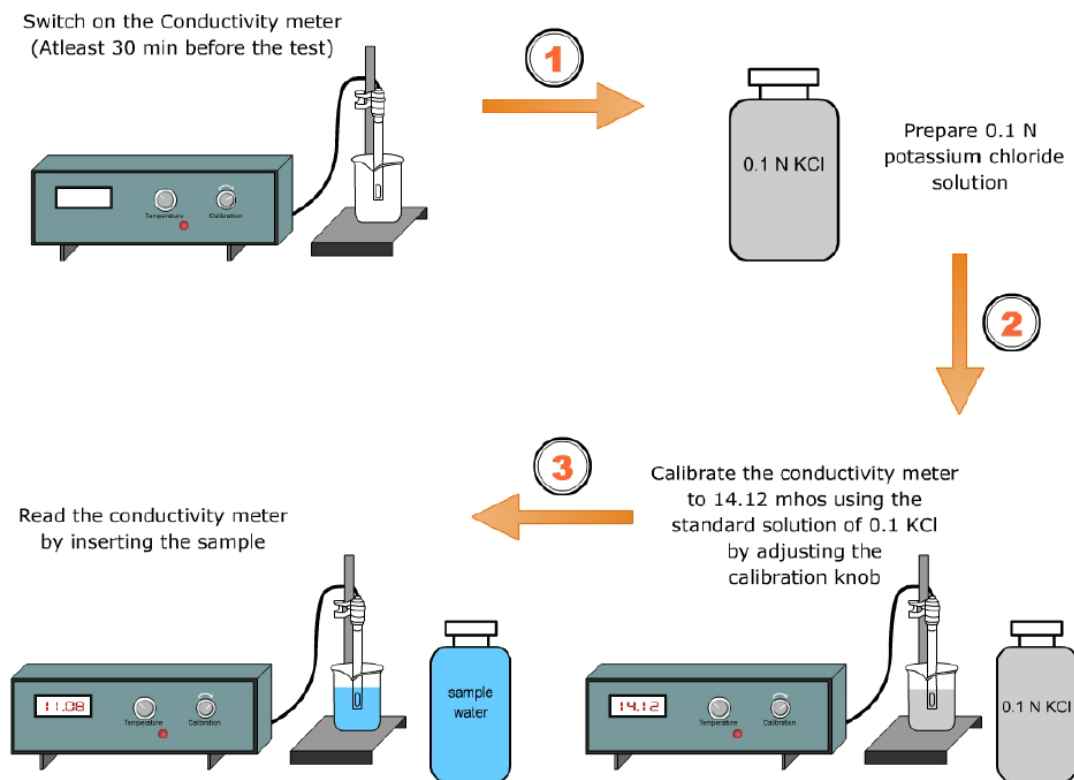


- ❖ Mettler Toledo MPC227
- ❖ WTW inolab 720

Διαδικασία

Αρχικά ρυθμίζεται το αγωγιμόμετρο χρησιμοποιώντας δυο πρότυπα διαλύματα με αγωγιμότητα 84 $\mu\text{S}/\text{cm}$ και 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ακολουθώντας βυθίζεται το ηλεκτρόδιο στο δείγμα και μετρείται η ένδειξη στην κλίμακα του αγωγιμόμετρου. Κατόπιν πλένεται το ηλεκτρόδιο με αποσταγμένο νερό και επαναλαμβάνεται η μέτρηση του δείγματος.

Για συνήθεις μετρήσεις απαιτείται η χρήση αγωγιμόμετρου υψηλής ακρίβειας όπως είναι το Mettler Toledo MPC227 με προσαρμοσμένο εξισορροπιστή θερμοκρασίας. Η κλίμακα μετρήσεων είναι από 0.00 έως 1000 mS/cm με την σχετική ακρίβεια $\pm 0.5 \%$.



Σχήμα 5-4: Διαδικασία μέτρησης αγωγιμότητας

5.2.2.1.3 Ολικά διαλυμένα στερεά

Σκοπός

Η αγωγιμότητα είναι ανάλογη της συγκέντρωσης των Ολικών Διαλυμένων Στερεών (Total Dissolved Solids, TDS) και εκφράζεται αναλόγως της εφαρμογής – κατά προσέγγιση ως εξής:

- Αγγλικοί Βαθμοί : $1,4 \mu\text{S}/\text{cm} = 1 \text{ ppm}$ (parts per million CaCO_3) ή
- Αμερικανικοί Βαθμοί : $2 \mu\text{S}/\text{cm} = 1 \text{ ppm}$ (parts per million CaCO_3)

όπου $1 \text{ ppm} = 1 \text{ mg}/\text{L}$, η μονάδα μέτρησης για τα διαλυμένα στερεά (TDS).

Είναι δυνατόν μετρώντας την αγωγιμότητα του νερού να γνωρίζουμε κατά προσέγγιση την σκληρότητα του νερού.

Η μέθοδος εφαρμόζεται για την ανάλυση τόσο υγρών όσο και στερεών δειγμάτων. Η Οδηγία Εργασίας βασίζεται:

- ❖ Standard Methods APHA-AWWA-WEF (21st Edition) Method 2540-C και
- ❖ EPA Methods 160.1

Όργανα

Ζυγός



Φίλτρο & Αντλία κενού



Φούρνος



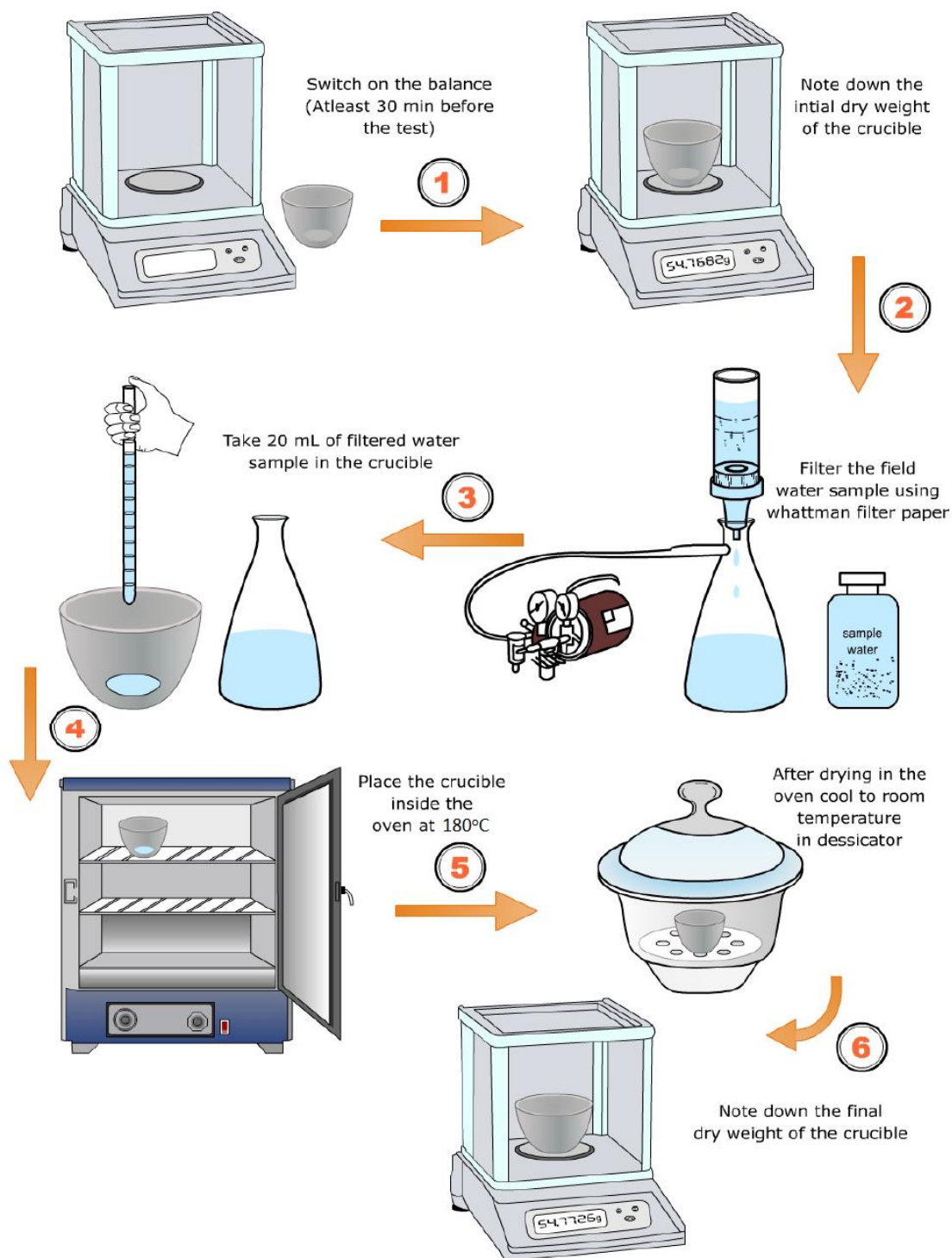
Ξηραντήρας



Διαδικασία

Για να μετρήσουμε τα Ολικά Διαλυμένα Στερεά ενός διαλύματος, ακολουθείται η ακόλουθη διαδικασία (βλ. επίσης Σχήμα 5-5):

- 1^ο Βήμα:** Προετοιμασία της συσκευής: ζυγός και πορσελάνινη κάψα
- 2^ο Βήμα:** *Ζύγιση του αρχικού βάρους της κάψας.* Η κάψα τοποθετείται στο φούρνο στους 180°C για μία ώρα. Πριν τη μέτρηση του βάρους της, η κάψα τοποθετείται στον ξηραντήρα για περίπου 1 ώρα.
- 3^ο Βήμα:** *Φιλτράρισμα του δείγματος με τη χρήση διηθητικού χαρτιού Whattman.* Έπειτα από ανάδευση, τμήμα του δείγματος φιλτράρεται σε διηθητικό χαρτί Whattman 934-AH, με μέγεθος πόρων 1.5 μm. Η διήθηση επιτυγχάνεται με τη χρήση μεμβράνης και αντλίας κενού.
- 4^ο Βήμα:** *Έγχυση 20mL φιλτραρισμένου δείγματος στην κάψα.* Με τη χρήση πιπέτας, ορισμένος όγκος (20mL) τοποθετείται επί της ζυγισμένης πορσελάνινης κάψας.
- 5^ο Βήμα:** Τοποθέτηση κάψας στο φούρνο στους 180°C. Το διηθημένο δείγμα ξηραίνεται στο φούρνο. Η διαφορά (αύξηση) στο βάρος της κάψας αναπαριστά τα ολικά διαλυμένα στερεά.
- 6^ο Βήμα:** Μετά την ξήρανση, η κάψα τοποθετείται σε ξηραντήρα.
- 7^ο Βήμα:** Μέτρηση τελικού βάρους κάψας στο ζυγό.



Σχήμα 5-5: Διαδικασία μέτρησης Ολικών Διαλυμένων Στερεών διαλύματος

5.2.2.1.4 Μέταλλα

Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης των μετάλλων στα υγρά δείγματα πραγματοποιείται με τη χρήση Φασματομετρία Ατομικής Απορρόφησης (Atomic Absorption Spectrometry, AAS). Η Οδηγία Εργασίας βασίζεται:

- Στη Μέθοδο D 3111.

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό των ακόλουθων μετάλλων:

❖ Αντιμόνιο (Sb)	❖ Μαγγάνιο (Mn)
❖ Βισμούθιο (Bi)	❖ Νικέλιο (Ni)
❖ Κάδμιο (Cd)	❖ Παλλάδιο (Pd)
❖ Ασβέστιο (Ca)	❖ Λευκόχρυσος (Pt)
❖ Κέσιο (Cs)	❖ Κάλιο (K)
❖ Χρώμιο (Cr)	❖ Ρόδιο (Rh)
❖ Κοβάλτιο (Co)	❖ Ρουθήνιο (Ru)
❖ Χαλκός (Cu)	❖ Άργυρος (Ag)
❖ Χρυσός (Au)	❖ Νάτριο (Na)
❖ Ιρίδιο (Ir)	❖ Στρόντιο (Sr)
❖ Σίδηρος (Fe)	❖ Θάλιο (Th)
❖ Μόλυβδος (Pb)	❖ Κασσίτερος (Sn)
❖ Λίθιο (Li)	❖ Ψευδάργυρος (Zn)
❖ Μαγνήσιο (Mg)	

Η ατομική απορρόφηση βασίζεται στη μέτρηση της ακτινοβολίας χαρακτηριστικού μήκους κύματος που απορροφούν οι ατομοποιημένες μορφές μετάλλων που βρίσκονται στη θεμελιώδη κατάσταση. Επειδή η ενέργεια των ατόμων είναι κβαντισμένη, οι μεταπτώσεις των ηλεκτρονίων συντελούνται μόνο μεταξύ καθορισμένων ενεργειακών επιπέδων. Έτσι, όταν στις ατομοποιημένες μορφές μετάλλων προσπίπτει ακτινοβολία, απορροφώνται μόνο συγκεκριμένες ενεργειακές στάθμες, οπότε λαμβάνεται το φάσμα απορρόφησης. Η απορρόφηση της ακτινοβολίας οδηγεί σε μετάπτωση ενός ηλεκτρονίου σε ανώτερη ενεργειακή στιβάδα, που αντιστοιχεί σε διεγερμένη κατάσταση του ατόμου.

Οι διεγερμένες καταστάσεις είναι ασταθέστερες σε σχέση με τη θεμελιώδη, με αποτέλεσμα την αυθόρμητη επαναφορά του ηλεκτρονίου στη θεμελιώδη κατάσταση, με εκπομπή ακτινοβολίας μικρότερου μήκους κύματος, της ακτινοβολίας φθορισμού.

Η ηλεκτρονική δομή του ατόμου, στη θεμελιώδη και τις διεγερμένες καταστάσεις, είναι μοναδική για κάθε στοιχείο, επομένως και η ακτινοβολία που απαιτείται για τη διέγερση είναι χαρακτηριστική για κάθε στοιχείο.

Η AAS χρησιμοποιείται σε τρεις (3) παραλλαγές (Παππά, 2015):

- AAS με φλόγα (Flame AAS, FAAS), για υγρά δείγματα
- AAS με φούρνο γραφίτη (GFAAS, ETAAS) για υγρά ή στερεά δείγματα
- AAS με σχηματισμό υδριδίων (HGAAS, ETAAS) για υγρά δείγματα

FAAS:

Ακτινοβολία χαρακτηριστικού μήκους για κάθε προσδιοριζόμενο στοιχείο εκπέμπεται από κατάλληλη πηγή και διέρχεται από ατομικό νέφος, όπου τα άτομα του προσδιοριζόμενου στοιχείου την απορροφούν. Στη συνέχεια, με ένα μονοχρωμάτορα επιλέγεται το χαρακτηριστικό για το στοιχείο μήκος κύματος μέσα από το φασματικό εύρος που εκπέμπεται από την ατομοποίηση, και οδηγείται στον ανιχνευτή. Εκεί μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα, ενισχύεται και τέλος καταγράφεται από κατάλληλο όργανο.

Ως πηγή ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται οι λυχνίες κοίλης καθόδου. Η λυχνία κοίλης καθόδου αποτελείται από γυάλινο σωλήνα, πληρωμένο με ευγενές αέριο σε χαμηλή πίεση που περιέχει μια κυλινδρική κάθοδο και μια άνοδο. Η κάθοδος είναι κατασκευασμένη από το ίδιο το μέταλλο που πρόκειται να προσδιορισθεί. Με εφαρμογή τάσης μεταξύ των ηλεκτροδίων το ευγενές αέριο ιονίζεται. Τα θετικά ιόντα που προκύπτουν προσπίπτουν στην επιφάνεια της καθόδου και προκαλούν την εξαέρωση και ατομοποίηση μέρους αυτής. Τα εντός της κοίλης καθόδου παραγόμενα άτομα των μετάλλων διεγείρονται και εκπέμπουν την επιθυμητή χαρακτηριστική ακτινοβολία του προσδιοριζόμενου στοιχείου. Το απέναντι από την κάθοδο τμήμα της λυχνίας αποτελείται από χαλαζία για την δίοδο της υπεριώδους ακτινοβολίας.

Στην φασματομετρία ατομικής απορρόφησης με φλόγα (FAAS) χρησιμοποιείται σύστημα ατομοποίησης που περιλαμβάνει καυστήρα όπου δημιουργείται η φλόγα με ανάμιξη του καύσιμου με το οξειδωτικό αέριο, είτε πριν, σε ειδικό θάλαμο προ-ανάμειξης (βλ. επίσης Σχήμα 5-7), είτε κατά τη δημιουργία της. Η διαδικασία της ατομοποίησης περιλαμβάνει τα στάδια της εκνέφωσης του υγρού δείγματος, της

επιλογής σταγονιδίων κατάλληλου μεγέθους, της ανάμειξης με τα αέρια της φλόγας και της εισαγωγής στον καυστήρα και στη φλόγα. Εκεί η θερμότητα της φλόγας οδηγεί σε απομάκρυνση του διαλύτη και σχηματισμό μικροσκοπικών στερεών σωματιδίων που στη συνέχεια υγροποιούνται, εξατμίζονται και διασπώνται στα άτομα των συστατικών που τα αποτελούν. Για τη δημιουργία της φλόγας χρησιμοποιείται μίγμα ακετυλενίου-αέρα που δημιουργεί φλόγα θερμοκρασίας περί τους 2300°C κατάλληλη για τα περισσότερα στοιχεία που δεν σχηματίζουν δύστηκτα οξείδια.

Η λειτουργία του μονοχρωμάτορα συνίσταται στο να απομονώνει τη χαρακτηριστική φασματική γραμμή του προσδιοριζόμενου στοιχείου από τις υπόλοιπες γραμμές που εκπέμπει η πηγή, αλλά και από μοριακές εκπομπές ή άλλες ακτινοβολίες υποβάθρου που προέρχονται από τον ατομοποιητή. Ο φωτοπολλαπλασιαστής χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του φωτεινού σήματος σε ηλεκτρικό και στη συνέχεια την ενίσχυση του ηλεκτρικού σήματος.

Η διόρθωση της ακτινοβολίας υποβάθρου (η οποία οφείλεται στην παρουσία στον χώρο του ατομοποιητή μορίων ή ριζών που απορροφούν την ακτινοβολία της πηγής, όπως και στερεών σωματιδίων που παράγονται κατά την εξάερωση του δείγματος και σκεδάζουν την ακτινοβολία της πηγής) με πηγή συνεχούς ακτινοβολίας εφαρμόζεται και στην FAAS. Μια πηγή συνεχούς ακτινοβολίας δευτερίου εκπέμπει ακτινοβολία σε μια ευρεία περιοχή μηκών κύματος. Η ακτινοβολία αυτή διέρχεται από τον ατομοποιητή παράλληλα με την ακτινοβολία της λυχνίας κοίλης καθόδου. Το προσδιοριζόμενο στοιχείο απορροφά αποτελεσματικά μόνο την ακτινοβολία της λυχνίας κοίλης καθόδου ενώ η απορρόφηση υποβάθρου επηρεάζει και τις δύο δέσμες. Οι δύο δέσμες ανιχνεύονται διαδοχικά από τον ανιχνευτή και τα ηλεκτρονικά όργανα αφού διαχωρίσουν και επεξεργαστούν τα σήματα, παρέχουν τη διορθωμένη απορρόφηση του προσδιοριζόμενου στοιχείου.

Η φασματοσκοπία εκπομπής πλάσματος δεν απαιτεί πηγή φωτός και είναι ικανή να μετρά έως και 70 στοιχεία ταυτοχρόνως με έναν ανιχνευτή έγχυσης φορτίου. Με τη μέθοδο του επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος - φασματομετρία μάζας (Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry, ICP-MS), η οποία διαχωρίζει και μετρά τα ιόντα του πλάσματος, επιτυγχάνονται χαμηλότερα όρια ανίχνευσης.

Για τα όρια ανίχνευσης ανά μέταλλο και μέθοδο φασματομετρίας βλέπε Σχήμα 5-6.

Μέθοδος

1. Προετοιμασία πρότυπου διαλύματος για σχεδιασμό καμπύλης βαθμονόμησης

Όλα τα αντιδραστήρια πρέπει να είναι αναλυτικού βαθμού καθαρότητας. Για την παρασκευή προτύπων βαθμονόμησης χρησιμοποιούνται πρότυπα διαλύματα, τα οποία είναι εμπορικά διαθέσιμα και έχουν συγκέντρωση 1000 mg/l. Διατηρούνται τουλάχιστον μέχρι την ημερομηνία λήξης που αναγράφεται στο μπουκάλι ή το πιστοποιητικό τους.

Πίνακας 5-11: Πρότυπα διαλύματα ανά μέταλλο

Στοιχείο	Standard (ppm)	ml/100ml	μl/100ml
Cr	1	0.1	
	2	0.2	
	3	0.3	
	4	0.4	
	5	0.5	
Cu	0.5		50
	1	0.1	
	2	0.2	
	3	0.3	
	4	0.4	
Ni	1	0.1	
	2	0.2	
	3	0.3	
	4	0.4	
	5	0.5	
Mn	0.4		40
	0.8		80
	1.2	0.12	
	1.6	0.16	
	2	0.2	
Cd	0.2		20
	0.4		40
	0.6		60
	0.8		80
	1		100
Pb	2	0.2	
	4	0.4	
	6	0.6	
	8	0.8	
	10	1	
Zn	0.1		10
	0.3		30

Στοιχείο	Standard (ppm)	ml/100ml	μl/100ml
	0.5		50
	0.7		70
	0.9		90

Οι συγκεντρώσεις που έχουν επιλεγεί να παρασκευάζονται για κάθε μέταλλο συνδέονται με τις γραμμικές περιοχές του κάθε μετάλλου, σύμφωνα με τον νόμο Lambert-Beer και αναφέρονται στον παραπάνω Πίνακα.

Με χρήση πιπέττας μεταφέρονται σε ογκομετρικές φιάλες των 100 ml συγκεκριμένες ποσότητες από το πρότυπο εμπορίου (1000 mg/l) του κάθε μετάλλου που θέλουμε να μετρήσουμε και γίνεται αραίωση στη χαραγή με προσθήκη 1.5 ml νιτρικού οξέος 65%. Οι συγκεντρώσεις των πρότυπων διαλυμάτων κάθε μετάλλου που κατασκευάζουμε όπως και οι αναλογικές ποσότητες αρχικού προτύπου του κάθε μετάλλου που μεταφέρονται σε ογκομετρικές φιάλες των 100 ml φαίνονται στον παραπάνω αναλυτικό πίνακα.

Επίσης, παρασκευάζεται τυφλό διάλυμα βαθμονόμησης (**CAL ZERO**) και ετοιμάζεται ακολούθως: σε γυάλινο δοχείο μεταφέρονται 500 ml υπερκαθαρού νερού και στην συνέχεια προστίθεται 7.5 ml νιτρικού οξέος 65%.

2. Εσωτερικός Έλεγχος ποιότητας

Ο έλεγχος ποιότητας πραγματοποιείται σε δύο επίπεδα και περιγράφονται παρακάτω.

- **Πρώτο επίπεδο ελέγχου ποιότητας (Έλεγχος βαθμονόμησης καμπύλης)**

Το πρώτο επίπεδο ελέγχου ποιότητας αφορά τη διαδικασία μέτρησης του οργάνου. Για το σκοπό αυτό αμέσως μετά το τέλος της καμπύλης βαθμονόμησης μετρούνται τα διαλύματα ελέγχου βαθμονόμησης QC (-1, -2, -3, -4) που έχουμε ήδη προπαρασκευάσει. Το κριτήριο αποδοχής της μετρούμενης τιμής του είναι $\pm 10 \%$ της ονομαστικής-θεωρητικής συγκέντρωσης. Αν το διάλυμα ελέγχου βαθμονόμησης μετρηθεί εκτός των αποδεκτών ορίων η ανάλυση διακόπτεται και ακολουθεί επαναβαθμονόμηση. Αν την ίδια μέρα μετριοούνται περισσότερες σειρές δειγμάτων το διάλυμα αυτό μετριέται πριν από την νέα σειρά δειγμάτων.

Για τον έλεγχο βαθμονόμησης της μεθόδου της AAS, παρασκευάζονται τέσσερα διαλύματα από το εμπορικά διαθέσιμο πολυστοιχειακό πρότυπο με συγκέντρωση 1000 mg/l. Φυλάσσονται σε σκοτεινό θάλαμο C-6C.

Τα πρότυπα πολυστοιχειακά διαλύματα που παρασκευάζονται είναι τα παρακάτω:

Πρότυπο πολυστοιχειακό διάλυμα (QC-1: 3 mg/l): Με χρήση πιπέτας μεταφέρονται 0.3 ml από το πυκνό πρότυπο πολυστοιχειακό διάλυμα (Merck-1000 mg/l) σε ογκομετρική φιάλη των 100 ml και αραιώνεται έως τη χαραγή, προσθέτοντας και 1.5 ml νιτρικού οξέος 65%. Με το QC-1 ελέγχονται μόνο το μέταλλο Cr.

Πρότυπο πολυστοιχειακό διάλυμα (QC-2: 3 mg/l): Με χρήση πιπέτας μεταφέρονται 0.3 ml από το πυκνό πρότυπο πολυστοιχειακό διάλυμα (Merck-1000 mg/l) σε ογκομετρική φιάλη των 100 ml και αραιώνεται έως τη χαραγή, προσθέτοντας και 1.5 ml νιτρικού οξέος 65%. Με το QC-2 ελέγχονται μόνο τα μέταλλα Cu, Ni, Pb.

Πρότυπο πολυστοιχειακό διάλυμα (QC-3: 0.8 mg/l): Με χρήση πιπέτας μεταφέρονται 80 μl από το πυκνό πρότυπο πολυστοιχειακό διάλυμα (Merck-1000 mg/l) σε ογκομετρική φιάλη των 100 ml και αραιώνεται έως τη χαραγή, προσθέτοντας και 1.5 ml νιτρικού οξέος 65%. Με το QC-2 ελέγχονται μόνο τα μέταλλα Mn, Cd.

Πρότυπο πολυστοιχειακό διάλυμα (QC-4: 0.5 mg/l): Με χρήση πιπέτας μεταφέρονται 50 μl από το πυκνό πρότυπο πολυστοιχειακό διάλυμα (Merck-1000 mg/l) σε ογκομετρική φιάλη των 100 ml και αραιώνεται έως τη χαραγή, προσθέτοντας και 1.5 ml νιτρικού οξέος 65%. Με το QC-3 ελέγχονται μόνο το μέταλλο Zn.

- **Δεύτερο επίπεδο ελέγχου ποιότητας (Ελεγχος χώνευσης)**

Το δεύτερο επίπεδο ελέγχου αφορά ολόκληρη τη διαδικασία χώνευσης των στερεών δειγμάτων. Ο έλεγχος αυτός γίνεται με την διαδικασία χώνευσης του πιστοποιημένου υλικού αναφοράς (CRM). Το CRM χωνεύεται μαζί με κάθε σειρά δειγμάτων και μετριέται μαζί με αυτά. Οι συγκεντρώσεις που μετρώνται πρέπει να είναι εντός της αβεβαιότητας της πιστοποιημένης τιμής του κάθε μετάλλου.

Το δεύτερο επίπεδο ελέγχου μπορεί να προσδιοριστεί και με το QC- RM COMPOST σε περίπτωση που το CRM AgroMAT έχει τελειώσει. Οι συγκεντρώσεις που μετρώνται πρέπει να είναι εντός των ορίων προειδοποίησης που φαίνονται στον πίνακα 4. Αν οι συγκεντρώσεις μετρηθούν εντός των ορίων δράσης, όπως φαίνονται στον πίνακα 4, τότε η ανάλυση επαναλαμβάνεται. Η ανάλυση του RM-Compost

διενεργείται κάθε 15 δείγματα πελατών ή κάθε μήνα. Τα αποτελέσματα του εσωτερικού ελέγχου ποιότητας παρακολουθείται μέσω διαγραμμάτων τάσης.

3. Προετοιμασία δείγματος

Η προετοιμασία του δείγματος αναφέρεται στην OE 504A-00 και στην OE 504A-23 για την συντήρηση και χώνευση του δείγματος.

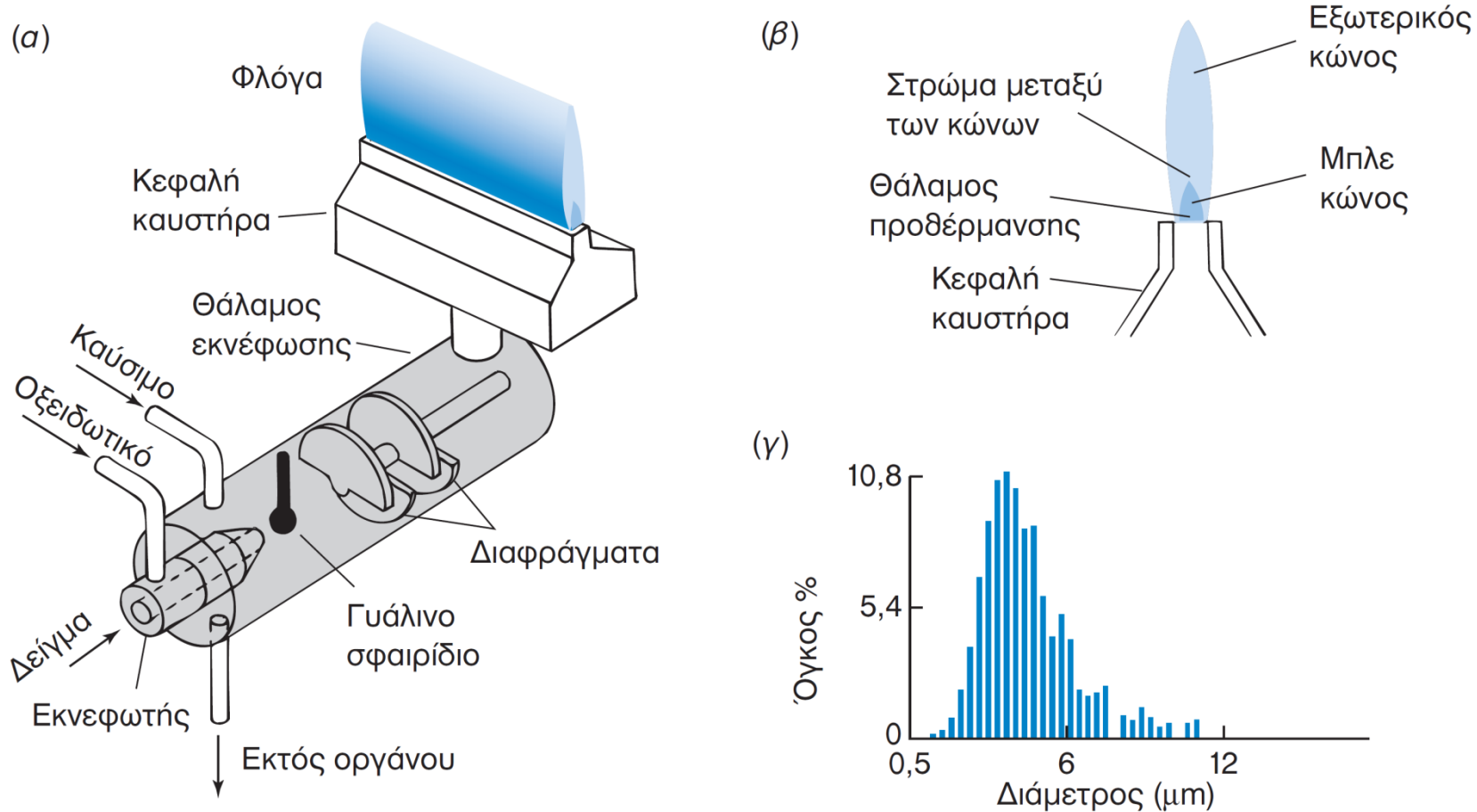
Στην περίπτωση που το δείγμα μετρήθηκε κάτω από το όριο ανίχνευσης, στα αποτελέσματα, η τιμή που αναφέρεται (Limit of Quantification) είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από το όριο ανίχνευσης.

Πίνακας 5-12: Όρια ανίχνευσης μεθόδου ατομικής απορρόφησης με φλόγα

Μέταλλο	Γραμμικό εύρος (mg/L)	Standards για την βαθμονόμηση της καμπύλης (mg/L)	Όριο ανίχνευσης (mg/L) F-AAS
Pb	0-10	0, 2.5, 5, 10	0.0587
Cu	0-4	0, 1, 2, 4	0.0113
Zn	0-1	0, 0.2, 0.4, 0.8	0.0035
Cd	0-1	0, 0.25, 0.5, 1	0.0014
Cr	0-5	0, 1.5, 2.5, 5	0.0168
Fe	0-4	0, 1, 2, 4	0.02
K	0-1	0, 0.25, 0.5, 1	0.005
Na	0-0.8	0, 0.2, 0.4, 0.8	0.002
Mg	0-0.8	0, 0.2, 0.4, 0.8	0.003
Mn	0-4	0, 1, 2, 4	0.01
Ni	0-6	0, 1.5, 3, 6	0.0154

Όρια ανίχνευσης (ng/mL)																		B	C	N	O	F	Ne
Li	Be	Fe	Εκπομπή επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος															1	10				
0,7	0,07	0,7	Ατομική απορρόφηση φλόγας															500	—				
2	1	5	Ατομική απορρόφηση φούρνου γραφίτη															15	—				
0,1	0,02	0,02	Φασματομετρία μάζας επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος															0,0008					
0,0002	0,0009	0,008																					
Na	Mg												Al	Si	P	S	Cl	Ar					
3	0,08												2	5	7	3	60						
0,2	0,3												30	100	40.000	—	—						
0,005	0,004												0,01	0,1	30	—	—						
0,0002	0,0003												0,0002	<0,0001	<0,0001	0,0001	—						
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
20	0,07	0,3	0,4	0,7	2	0,2	0,7	1	3	0,9	0,6	10	20	7	10	150							
3	0,5	40	70	50	3	2	5	4	90	1	0,5	60	200	200	250	—							
0,1	0,01	—	0,5	0,2	0,01	0,01	0,02	0,02	0,1	0,02	0,001	0,5	—	0,2	0,5	—							
0,0002	0,007	0,0002	0,004	0,0003	0,0003	0,0002	0,008	0,0002	0,001	0,0005	0,003	0,006	0,002	0,003	0,05	0,02							
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
1	0,2	0,6	2	5	3		10	20	4	0,8	0,5	20	9	9	4	40							
7	2	200	1000	2000	20		60	4	10	2	0,4	40	30	40	30	—							
0,05	0,1	—	—	—	0,02		1	—	0,3	0,005	0,003	1	0,2	0,1	0,1	—							
0,0003	0,0003	0,0003	0,0006	0,0008	0,002		0,001	0,0003	0,001	0,0007	0,0008	0,0003	0,0009	0,001	0,02	0,002							
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
40.000	0,6	1	4	10	8	3	0,2	7	7	2	7	10	10	7									
4	10	2000	2000	2000	1000	600	100	400	100	10	150	20	10	40									
0,2	0,04	—	—	—	—	—	—	—	0,2	0,1	2	0,1	0,05	0,1									
0,0003	0,0003	0,0003	0,0008	0,0005	0,002	0,0007	0,002	0,0004	0,001	0,0009	0,0009	0,0004	0,0006	0,0005									
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu										
2	9	10		10	0,9	5	6	2	2	0,7	2	0,3	0,3										
—	6000	1000		1000	20	2000	500	30	40	30	900	4	300										
—	—	—		—	0,5	—	0,1	1	—	2	—	—	—										
0,0003	0,0002	0,001		0,001	0,0004	0,001	0,0002	0,0009	0,0002	0,0007	0,0002	0,001	0,0002										
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr										
7		60																					
—		40.000																					
0,0003		0,0005																					
																		Απαιτεί φλόγα N ₂ O/C ₂ H ₂ , οπότε είναι προτιμότερο να αναλυθεί με επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα					
																		Αναλύεται καλύτερα με εκπομπή					

Σχήμα 5-6: Όρια ανίχνευσης (ng/g=ppb) φασματομετρίας ατομικής απορρόφησης με φλόγα, με φούρνο γραφίτη και επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος και ICP-MS της εταιρείας GBC Scientific. Η ακριβής ποσοτική ανάλυση απαιτεί συγκεντρώσεις 10-100 φορές μεγαλύτερες από το όριο ανίχνευσης.



Πηγή: (Harris, 2011)

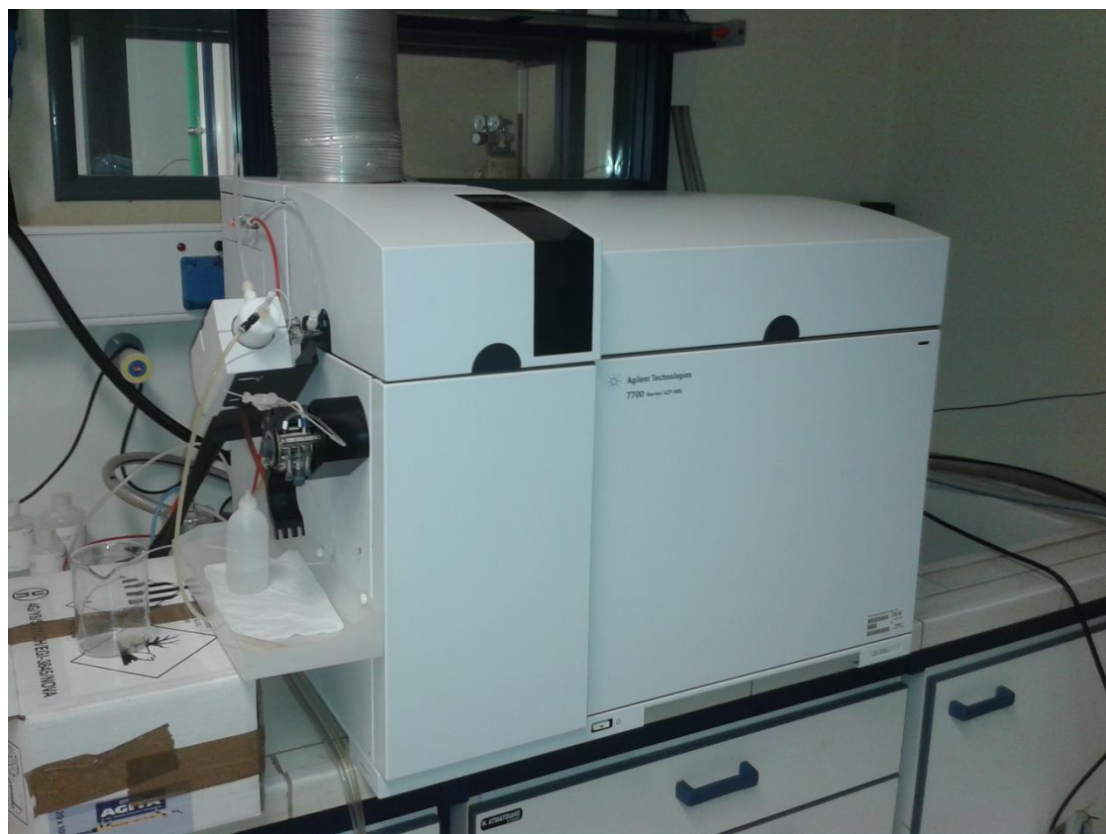
Σχήμα 5-7: (α) Καυστήρας προ-ανάμειξης. (β) Άποψη του άκρου της φλόγας. Η σχισμή του καυστήρα έχει πλάτος περίπου 0.5mm (γ) Κατανομή του μεγέθους των σταγονιδίων που παράγονται από συγκεκριμένο εκνεφωτή

Όργανο

Ατομική Απορρόφηση



ICP-MS



5.2.2.1.5 Αλκαλικότητα

Εργαστηριακά όργανα και σκεύη:

- Ογκομετρικός κύλινδρος 100mL,
- Ποτήρια ζέσεως
- Προχοΐδα
- Υδροβολέας

Χρησιμοποιούμενα αντιδραστήρια:

- Πρότυπο διάλυμα H_2SO_4 (0.1 N)
- Άγνωστο διάλυμα άλμης
- Διάλυμα ηλιανθίνης

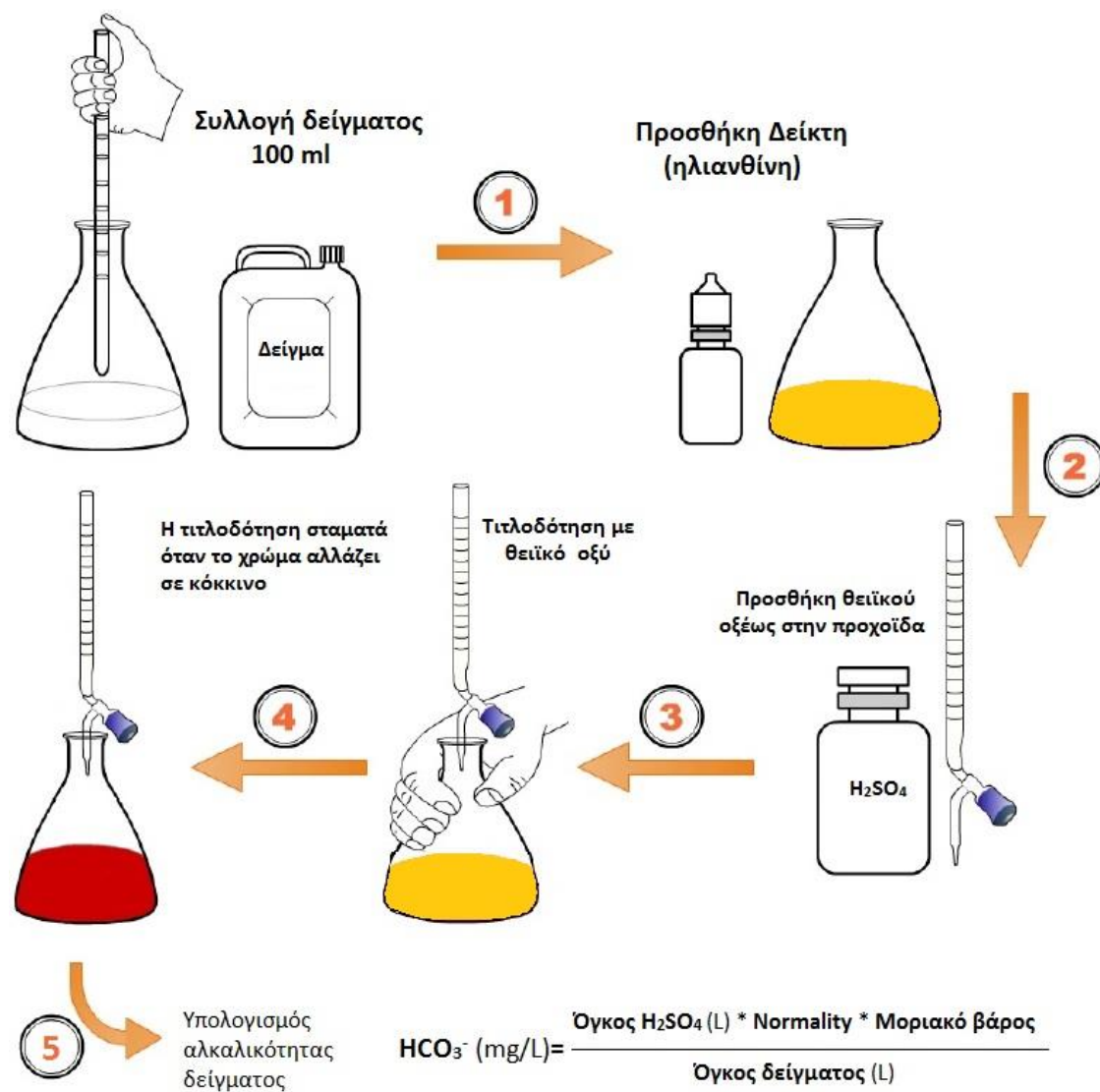
Σκοπός της μέτρησης:

Προσδιορισμός της συγκέντρωσης HCO_3^- , CO_3^{2-} , CO_2 στο δείγμα. Η συγκέντρωση προσδιορίζεται με γνωστό τον όγκο του πρότυπου διαλύματος (H_2SO_4 , 0.1N) που καταναλώθηκε και το ισοδύναμο βάρος του δείγματος-ουσίας στην αντίδραση ογκομέτρησης.

Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής αυτής, ο καθορισμός του τελικού σημείου της ογκομέτρησης έγινε με τους ακόλουθους δύο (2) τρόπους:

- (i) Με τη βοήθεια δείκτη (ηλιανθίνη ή πορτοκαλί του μεθυλίου/methyl orange), παρουσιάζεται απότομη αλλαγή χρώματος του διαλύματος, στην περιοχή του τελικού σημείου (βλ. Εικόνα 5-19),
- (ii) Με μέτρηση του pH.

Το πέρας της διαδικασίας προσδιορίστηκε άμεσα και ακαριαία, όταν η τιμή του pH υποβιβάστηκε στην τιμή 4.4.



Εικόνα 5-19: Πειραματική διαδικασία ογκομέτρησης με τη βοήθεια δείκτη (ηλιανθίνη)

5.2.2.1.6 Χλωριόντα

Σκοπός

Η Οδηγία Εργασίας αυτή περιγράφει τον τρόπο μέτρησης των χλωριόντων Cl^- με Spectroquant Chloride Test kit της Merck.

Η μέθοδος βασίζεται στην αντίδραση των χλωριόντων με θειοκυανιούχο υδράργυρο ($\text{Hg}(\text{SCN})_2$) για το σχηματισμό ελαφρά διασπασμένου (slightly dissociated) χλωριούχου υδράργυρου. Αποδεσμευμένα θειοκυανιούχα ιόντα αντιδρούν με ιόντα σιδήρου (III) για το σχηματισμό κόκκινου θειοκυανιούχου σιδήρου (III) το οποίο προσδιορίζεται φωτομετρικά.

Η μέθοδος είναι ανάλογη:

- της μεθόδου της EPA 325.1 και
- US Standard Methods 4500- Cl^- E.

Όργανο

Spectroquant® NOVA 60



Αντιδραστήρια

- Διάλυμα θειοκυανιούχου υδραργύρου
- Διάλυμα νιτρικού σιδήρου
- Διάλυμα χλωριόντων

Διαδικασία

Χρησιμοποιείται το Chloride Test kit της Merck με κωδικό 1.14897.0001. Τα θολά δείγματα διηθούν με φίλτρα μεμβράνης 0.45 μm . Το pH του δείγματος πρέπει να είναι μεταξύ 1-12. Εάν το δείγμα δεν είναι στο επιθυμητό pH τότε γίνεται ρύθμιση του pH με σταγόνες HNO_3 ή NH_4OH . Πραγματοποιείται κατάλληλη αραίωση ώστε η τελική συγκέντρωση των χλωριόντων του δείγματος να είναι μέσα στα επιθυμητά όρια.

Στον Πίνακα δίνεται η περιοχή μέτρησης των χλωριόντων Cl^- .

Κωδικός Chloride Test	Περιοχή μέτρησης mg/l Cl^-
1.14897.0001	2.5 – 25.0 10 – 250

Για τη Μέτρηση στην περιοχή 2.5 – 25.0 mg/l Cl^- :

Σε ένα φιαλίδιο ανάπτυξης χρώματος:

- (1) Μεταγγίζουμε τα **5 ml** του προετοιμαζόμενου δείγματος
- (2) Προσθέτουμε **2.5 ml** αντιδραστήριου **Cl-1** και αναμιγνύουμε
- (3) Προσθέτουμε **0.5 ml** αντιδραστήριου **Cl-2** και αναμιγνύουμε
- (4) Αναμένουμε **1 λεπτό** και φωτομετρούμε στην κυψελίδα των 10 mm στο NOVA60.

Για τη Μέτρηση στην περιοχή 10 – 250 mg/l Cl⁻:

Σε ένα φιαλίδιο ανάπτυξης χρώματος:

- (1) Μεταγγίζουμε τα **1 ml** του προετοιμαζόμενου δείγματος
- (2) Προσθέτουμε **2.5 ml** αντιδραστηρίου **Cl-1** και αναμιγνύουμε
- (3) Προσθέτουμε **0.5 ml** αντιδραστηρίου **Cl-2** και αναμιγνύουμε
- (4) Αναμένουμε **1 λεπτό** και φωτομετρούμε στην κυψελίδα των 10 mm στο NOVA60.

Έλεγχος μεθόδου

Ο έλεγχος και των τριών μεθόδων πραγματοποιείται με Merck kit Combicheck 10 (1.14676.0001). Η διαδικασία είναι η ακόλουθη της παραπάνω αναφερόμενης εκτός ότι το δείγμα αντικαθίσταται με 1 ml του reagent R-1. Το κριτήριο αποδοχής της μετρούμενης τιμής είναι 25 ± 6 mg/l.

Ο έλεγχος της μεθόδου πραγματοποιείται με τη χρήση χλωριούχου νατρίου. Ζυγίζονται 1,6485 g NaCl και διαλύονται σε ογκομετρική φιάλη του ενός λίτρου. Το συγκεκριμένο διάλυμα έχει συγκέντρωση φωσφόρου 1,000 mg/l. Πραγματοποιείται αραίωση 1/10 σε φιάλη των 100 ml, ώστε να υπάρχει μια τελική συγκέντρωση χλωρινών 100.0 mg/l. Μετά προσδιορίζεται η συγκέντρωση των χλωρινών με την διαδικασία που ακολουθείται στην ανάλυση. Η μέγιστη απόκλιση πρέπει να είναι ± 10 mg/l.

5.2.2.2 Στερεά δείγματα

Τα στερεά δείγματα αναλύθηκαν με τεχνικές ανάλυσης επιφάνειας. Αυτές περιλαμβάνουν τις ακόλουθες τεχνικές:

- Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (Scanning Electron Microscopy, SEM) σε συνδυασμό με φασματοσκοπία ενεργειακής διασποράς (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS);
- Φασματοσκοπία φθορισμού ακτίνων X (X-Ray Fluorescence, XRF) και
- Φασματοσκοπία περίθλασης ακτίνων X (X-Ray diffraction, XRD)

SEM-EDX

Το SEM αποτελεί ένα μικροσκόπιο το οποίο μεγεθύνει την εικόνα του δείγματος μέσω σάρωσης του με μία δέσμη ηλεκτρονίων (ενέργειας από 0 έως 50 KeV). Η δέσμη αυτή, αφού περάσει πρώτα από διαφράγματα, κατευθύνεται με τη χρήση πηνίου οδήγησης με περιοδικό τρόπο ώστε να σαρώσει την προς μελέτη επιφάνεια του δείγματος. Δευτερογενή ηλεκτρόνια εκπέμπονται από το δείγμα (ενέργειας 2 έως 5 eV) και συλλέγονται στον ανιχνευτή του μικροσκοπίου. Επίσης παράγονται οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια. Τα σήματα αυτά, αφού ενισχυθούν, διαμορφώνουν μία καθοδική δέσμη που προσπίπτει σε φθορίζουσα οθόνη, με αποτέλεσμα την μεγεθυμένη εικόνα της προς εξέταση επιφάνειας. Με τη χρήση του SEM, είναι δυνατόν να προσδιοριστούν η μορφολογία και το μέγεθος των σωματιδίων. Το EDS αποτελεί ένα όργανο που συλλέγει και ταξινομεί τις ακτίνες X σε διάφορα επίπεδα ενέργειας. Οι ακτίνες X εκπέμπονται από το δείγμα, το οποίο έχει βομβαρδιστεί με ακτίνα ηλεκτρονίου. Έτσι, παράγεται ένα φάσμα από ακτίνες X συναρτήσει της συχνότητας. Το φάσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το προσδιορισμό της σύστασης του δείγματος, καθώς και για τη συγκέντρωσή τους.

XRF (Αυλωνίτου, 2010)

Όταν ένα δείγμα ακτινοβολείται από ακτίνες-X που εκπέμπονται από μία λυχνία παραγωγής ακτίνων-X ή μια ραδιενεργή πηγή (πρωτογενείς), τότε παράγονται φθορίζουσες ακτίνες-X (δευτερογενείς) οι οποίες μπορούν να μετρηθούν ώστε να δώσουν ποσοτικές αναλυτικές πληροφορίες για τα συστατικά του στοιχείου. Η μέθοδος αυτή, που ονομάζεται φθορισμομετρία ακτίνων-X (X-ray fluorescence –XRF) είναι ταχεία, ακριβής και μη καταστρεπτική.

Η εκπεμπόμενη αυτή ακτινοβολία περιλαμβάνει χαρακτηριστικές κορυφές ακτίνων-X που οφείλονται στα κύρια, δευτερεύοντα και ιχνοστοιχεία που περιέχει το δείγμα. Έτσι, είναι δυνατή η ποιοτική και ποσοτική ανάλυση του δείγματος.

XRD (Αυλωνίτου, 2010)

Κατά την πρόσπτωση μιας ακτινοβολίας μήκους κύματος λ σε φράγμα αποτελούμενο από παράλληλες σχισμές ίσου πλάτους d και μόνο όταν $d < \lambda$, παρατηρείται το φαινόμενο της περίθλασης της ακτινοβολίας. Όσο μικρότερο είναι το λ τόσο μικρότερο d απαιτείται. Στην περίπτωση των ακτίνων-X, των οποίων το μήκος κύματος κυμαίνεται στην περιοχή 0,1 - 1 Å (1 Å = 10⁻¹⁰ m), δεν υπάρχει δυνατότητα κατασκευής μηχανικού φράγματος, καθώς το d μπορεί να μειωθεί μέχρι τα 1000 Å. Με αρχή έναν ορισμένο κρύσταλλο, ένα γνωστό δηλαδή d , μπορεί κανείς να υπολογίσει το λ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η αντίστροφη όμως διαδικασία αποτελεί τη βάση της μεθόδου που ονομάζεται φασματοσκοπία περίθλασης ακτίνων-X (X-ray Diffraction Spectroscopy – XRD). Χρησιμοποιώντας μία ακτινοβολία με γνωστό λ υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού του d του κρυστάλλου, με βάση το φάσμα περίθλασής του. Ο προσδιορισμός του d οδηγεί ουσιαστικά στην ταυτοποίηση της ένωσης και της δομής του κρυστάλλου. Τα φάσματα περίθλασης μπορούν να αποτυπωθούν σε κατάλληλο φωτογραφικό φιλμ με τη μορφή ομόκεντρων κύκλων είτε σαν πλέγματα από φωτεινά σημεία που ονομάζονται διαμορφώματα περίθλασης.

Πίνακας 5-13: Παράμετροι λειτουργίας οργάνου SEM-EDS (FEI-QUANTA 200)

Παράμετρος		Τιμή
Διακριτική ικανότητα	(α) Υψηλό κενό	❖ 3.0nm στα 30kV (SE) ❖ 4.0nm στα 30kV (BSE) ❖ 10nm στα 3kV (SE)
	(β) Χαμηλό κενό	❖ 3.0nm στα 30kV (SE) ❖ 4.0nm στα 30kV (BSE) ❖ < 12nm στα 3kV (SE)
	(γ) Extended Vacuum Mode (ESEM)	❖ 3.0nm στα 30kV (SE)
Τάση επιτάχυνσης		❖ 200V – 30kV
Ρεύμα διεγέρτη		❖ μέχρι 2μΑ – συνεχώς ρυθμιζόμενο



Εικόνα 5-20: X-Ray Siemens D5000 Diffractometer (αριστερά) και FEI-QUANTA 200 SEM συζευγμένο με αναλυτή EDS (δεξιά)

5.2.3 Ανάλυση και Επεξεργασία Πειραματικών Αποτελεσμάτων

5.2.3.1 Γενικά

Υγρά δείγματα:

Όπως περιγράφεται και στην Ενότητα 5.2.2, τα υγρά δείγματα αναλύθηκαν με τη χρήση του ακόλουθου εξοπλισμού:

- ❖ Ατομική Απορρόφηση με φλόγα (**F-AAS**)
- ❖ Επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα – Φασματομετρία μάζας (**ICP-MS**),
- ❖ Φωτόμετρο

Οι αναλύτες που προσδιορίστηκαν με τον παραπάνω εξοπλισμό περιλαμβάνουν:

- ❖ Συγκέντρωση κατιόντων όπως Ca, Na, K, Mg (ppm),
- ❖ Συγκέντρωση βαρέων μετάλλων όπως Pb, Sn, Zn, Cr, Ni, Cu, Cd (ppt),
- ❖ Συγκέντρωση ανιόντων όπως HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , PO_4^{3-}

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων συνοψίζονται στον Πίνακα 5-15, ενώ σχολιάζονται στην Ενότητα 5.2.3.2.

Στερεά δείγματα:

Όπως περιγράφεται και στην Ενότητα 5.2.2, τα στερεά δείγματα αναλύθηκαν με χρήση του ακόλουθου εξοπλισμού:

- Φασματοσκοπία περίθλασης ακτίνων X (X-ray diffractometer, XRD),
- Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (Scanning Electron Microscope, SEM)

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στην Ενότητα 5.2.3.

Πίνακας 5-14: Αναλυτικές μέθοδοι για τον χαρακτηρισμό των υγρών και στερεών δειγμάτων

Παράμετρος	Μονάδες	Μέθοδος/Όργανο
Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ ,	mg/L	Ατομική Απορρόφηση
Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	mg/L	Φωτόμετρο
Βαρέα μέταλλα (Cr, Cu, Cd, Mn, Ni, Pb, Zn)	ppb	ICP-MS
Αλκαλικότητα	mg/L	Τιτλοδότηση
Ορυκτολογία	-	XRD
Μορφολογία	-	SEM
Χημική σύσταση	-	SEM-EDS

Πίνακας 5-15: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων αναλύσεων υγρών δειγμάτων

Όργανο	Αναλύτης / παράμετρος		Θαλασσινό νερό	Άλμη	Συμπυκνωμένη άλμη
Φορητό Πολύμετρο (WTW Multi 3410)	pH	-	n.m.	6.94	n.m.
	Αγωγιμότητα	mS/cm	56.3	95.8	220.3
	Θερμοκρασία	°C	24.8	26.7	n.m.
Αγωγιμόμετρο (Mettler Toledo MPC227)	Αγωγιμότητα	mS/cm	56.25	95.8	168.4
Ογκομέτρηση	Αλκαλικότητα	mg/L	178.9	242.0	332.5
Φωτόμετρο (Spectroquant® NOVA 60)	Cl⁻	mg/L	24,500	43,250	164,000
	SO₄²⁻	mg/L	2,370	5,300	9,550
Φούρνος (Milestone Start D)	TDS	mg/L	42,508	74,100	275,370
Ατομική Απορρόφηση (Agilent AA240 FS)	K⁺	mg/L	535.3	849	3,415
	Na⁺	mg/L	12,400	19,350	70,640
	Mg²⁺	mg/L	1,385	2,486	10,220
	Ca²⁺	mg/L	548.67	908	693

Σημείωση: n.m. not measured

5.2.3.2 Υγρά δείγματα

5.2.3.2.1 Μέτρηση pH

Οι μετρήσεις του pH έγιναν επιτόπου με τη χρήση του ακόλουθου οργάνου:

❖ WTW Multi 3410

Η εκροή της άλμης από την μονάδα αφαλάτωσης είναι σε τιμές pH κοντά στην ουδέτερη περιοχή (βλ. επίσης Εικόνα 5-21):

❖ $\text{pH} = [6.941 - 6.948]$

❖ Μέση τιμή: 6.945



Εικόνα 5-21: Αποτέλεσμα μέτρησης pH

5.2.3.2.2 Χλωριόντα και κατιόντα νατρίου

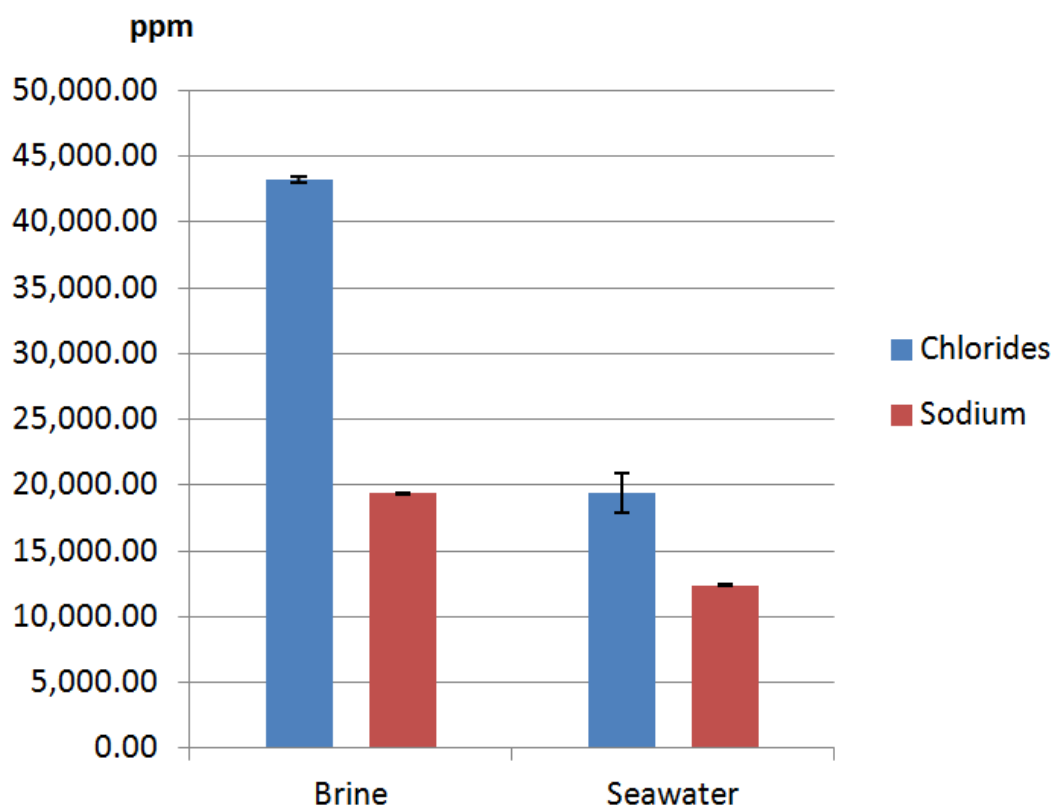
Τα αποτελέσματα από τις εργαστηριακές μετρήσεις παρουσιάζονται ανά παράμετρο στα ακόλουθα διαγράμματα.

Αναφορικά με τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν:

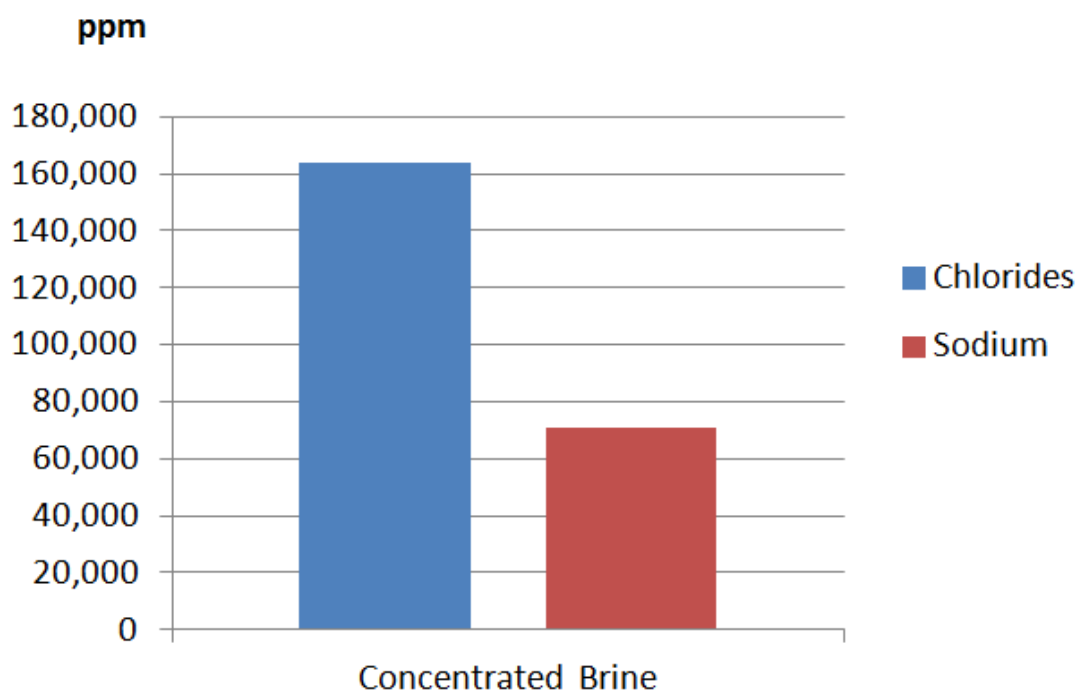
- ❖ Η συγκέντρωση των χλωριόντων (Cl^-) μετρήθηκε με φωτόμετρο
- ❖ Η συγκέντρωση του νατρίου (Na^+) μετρήθηκε με την Ατομική Απορρόφηση

Τα διαγράμματα αφορούν τα ακόλουθα δείγματα:

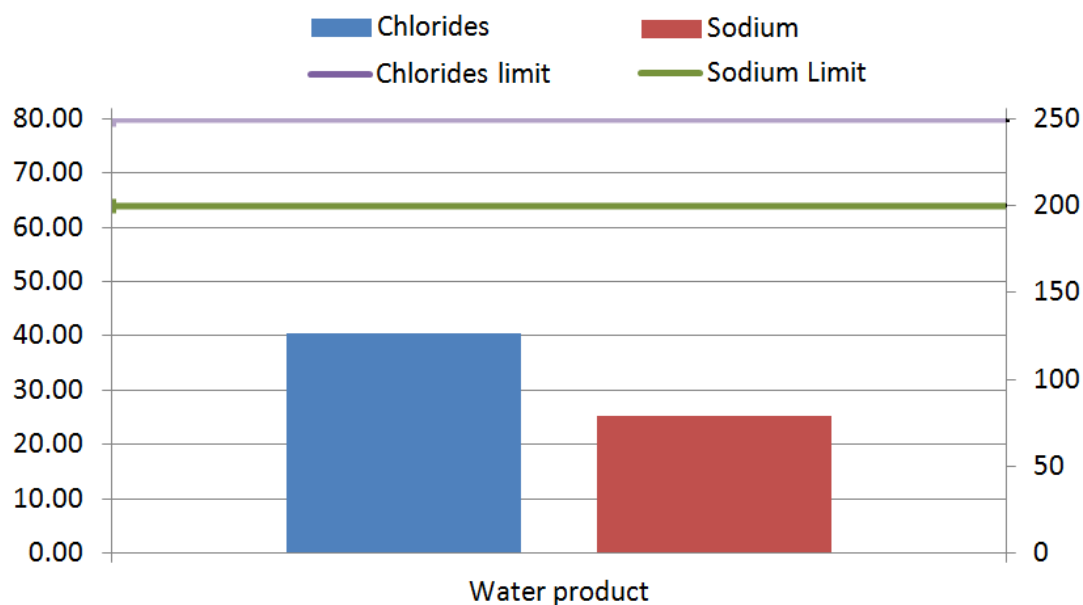
- ❖ Θαλασσινό νερό (βλ.Διάγραμμα 5-2)
- ❖ Άλμη (βλ. Διάγραμμα 5-2)
- ❖ Συμπυκνωμένη άλμη (βλ. Διάγραμμα 5-3)
- ❖ Παραγόμενο νερό (από εξατμιστήρα) (βλ. Διάγραμμα 5-4)



Διάγραμμα 5-2: Συγκέντρωση χλωριόντων και νατρίου, δείγματα άλμης και θαλασσινού νερού



Διάγραμμα 5-3: Συγκέντρωση χλωριόντων και νατρίου, δείγμα συμπυκνωμένης άλμης (έξοδος εξατμιστήρα)



Διάγραμμα 5-4: Συγκέντρωση χλωριόντων και νατρίου και αντίστοιχα όρια σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία για το πόσιμο νερό (δείγμα παραγόμενου νερού)

Αποτελέσματα αναλύσεων & Σχολιασμός

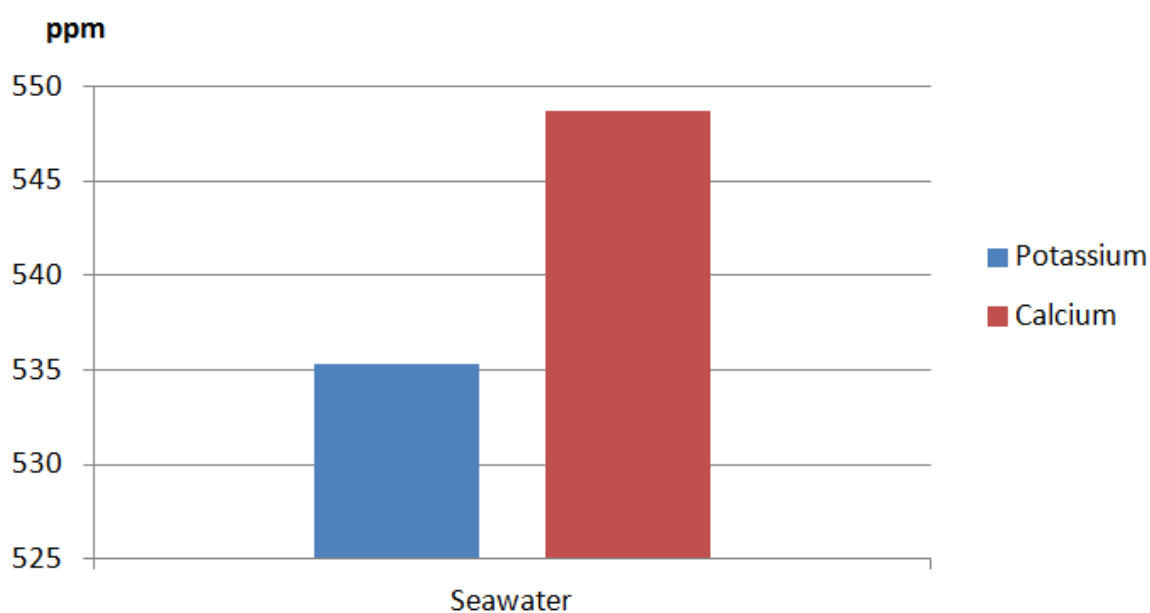
- ❖ **Θαλασσινό νερό:** η συγκέντρωση των Cl^- και Na^+ είναι 24,500 και 12,400 mg/L αντίστοιχα. Η τυπική σύνθεση του θαλασσινού νερού (Ανατολική Μεσόγειος) είναι 21,200 mg/L για τα Cl^- και 11,800 mg/L Na^+ .
- ❖ **Άλμη (εκροή μονάδας αφαλάτωσης):** η συγκέντρωση των Cl^- και Na^+ είναι 43,250 και 19,350 mg/L αντίστοιχα. Η συγκέντρωση αυτή είναι σχεδόν διπλάσια σε σύγκριση με το θαλασσινό νερό, όπως είναι αναμενόμενο, αν θεωρηθεί λόγος ανάκτησης 40% για τη μονάδα αντίστροφης όσμωσης.
- ❖ **Συμπυκνωμένη άλμη (εκροή εξατμιστήρα):** η συγκέντρωση των Cl^- και Na^+ μετρήθηκε 164,000 και 70,640 mg/L αντίστοιχα. Οι συγκεντρώσεις αυτές είναι 6 φορές υψηλότερες σε σύγκριση με το θαλασσινό νερό, όπως αναμένεται από το λόγο συγκέντρωσης (concentration factor) που επιτυγχάνεται με τη χρήση του εξατμιστήρα. Ο σχεδιασμός του εξατμιστήρα είναι τέτοιος ώστε να επιτυγχάνει στην εκροή ολικά διαλυμένα στερεά 26% (σημείο κρυστάλλωσης του NaCl , βλέπε επίσης Ενότητα 4.2.3.1) με είσοδο 7%. Αυτό συνεπάγεται ολικό συντελεστή συμπύκνωσης (συμπεριλαμβάνοντας τη μονάδα αντίστροφης όσμωσης και τον εξατμιστήρα) $\text{C.F.} = 26\% / 3.5\% = 7.6$ και λόγο ανάκτησης νερού $R = 86.8\%$.
- ❖ **Παραγόμενο νερό:** η συγκέντρωση των Cl^- και Na^+ είναι 40.5 and 25.33 mg/L αντίστοιχα. Οι συγκεντρώσεις αυτές είναι χαμηλότερες από τα επιτρεπτά όρια της ισχύουσας Ευρωπαϊκής Οδηγίας για τα πόσιμα νερά (Drinking Water Directive, Council Directive 98/83/EC) (βλ. Διάγραμμα 5-4).

5.2.3.2.3 Κάλιο και ασβέστιο

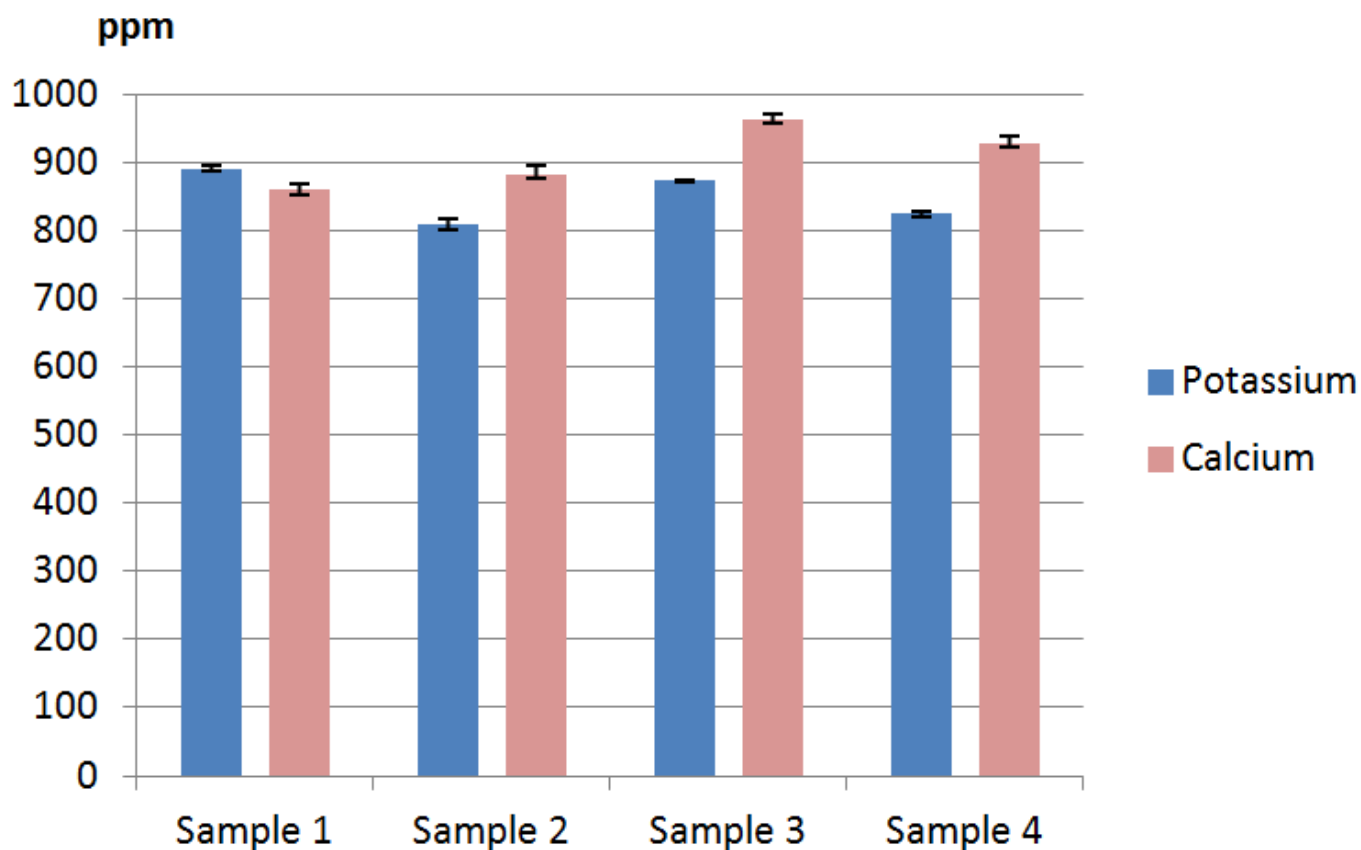
Τα αποτελέσματα από τις εργαστηριακές μετρήσεις παρουσιάζονται ανά παράμετρο στα ακόλουθα διαγράμματα. Οι παράμετροι αυτές μετρήθηκαν με τη χρήση ατομικής απορρόφησης.

Τα διαγράμματα αφορούν τα ακόλουθα δείγματα:

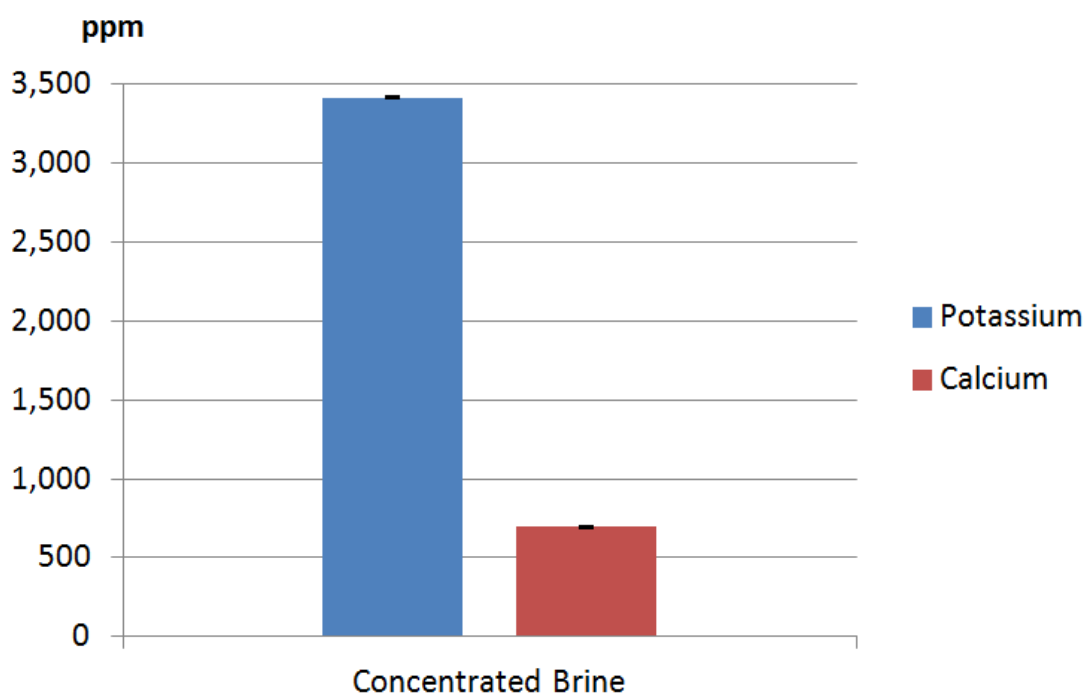
- ❖ Θαλασσινό νερό (βλ. Διάγραμμα 5-5)
- ❖ Άλμη (βλ. Διάγραμμα 5-6)
- ❖ Συμπυκνωμένη άλμη (βλ. Διάγραμμα 5-7)



Διάγραμμα 5-5: Συγκέντρωση καλίου και ασβεστίου, δείγμα θαλασσινού νερού



Διάγραμμα 5-6: Συγκέντρωση καλίου και ασβεστίου, δείγματα άλμης



Διάγραμμα 5-7: Συγκέντρωση καλίου και ασβεστίου, δείγμα συμπυκνωμένης άλμης

Αποτελέσματα αναλύσεων & Σχολιασμός:

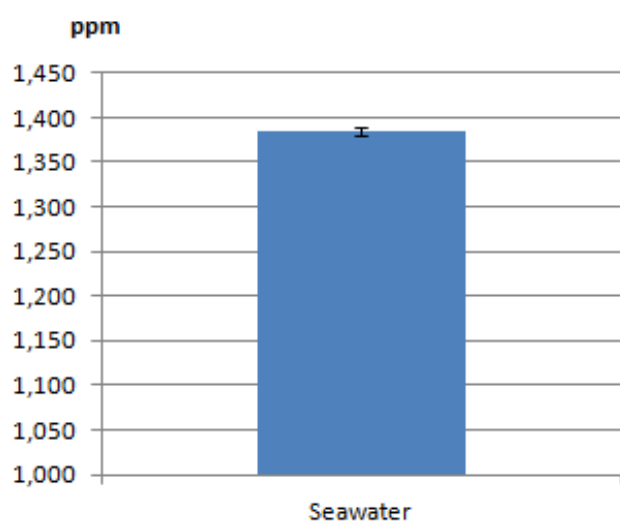
- ❖ **Θαλασσινό νερό:** η συγκέντρωση των K^+ και Ca^{2+} είναι 535.3 και 548.67 mg/L αντίστοιχα. Η τυπική σύνθεση του θαλασσινού νερού (Ανατολική Μεσόγειος) είναι 423 mg/L και 463 mg/L για τα K^+ και Ca^{2+} αντίστοιχα.
- ❖ **Άλμη (εκροή μονάδας αφαλάτωσης):** η συγκέντρωση των K^+ και Ca^{2+} είναι 849 και 908 mg/L αντίστοιχα. Η συγκέντρωση αυτή είναι σχεδόν διπλάσια σε σύγκριση με το θαλασσινό νερό, όπως είναι αναμενόμενο, αν θεωρηθεί λόγος ανάκτησης 40% για τη μονάδα αντίστροφης όσμωσης.
- ❖ **Συμπυκνωμένη άλμη (εκροή εξατμιστήρα):** η συγκέντρωση των K^+ και Ca^{2+} είναι 3,415 και 693 mg/L αντίστοιχα. Η συγκέντρωση του K^+ είναι σχεδόν 6 φορές υψηλότερες σε σύγκριση με το θαλασσινό νερό, όπως αναμένεται από το λόγο συγκέντρωσης (concentration factor) που επιτυγχάνεται με τη χρήση του εξατμιστήρα. Δεν ισχύει το ίδιο και για τη συγκέντρωση του Ca^{2+} . Ο λόγος είναι ότι το ασβέστιο καταβυθίζεται στη μορφή των αντίστοιχων ανθρακικών και θεικών αλάτων πριν την κρυστάλλωση του χλωριούχου νατρίου.

5.2.3.2.4 Μαγνήσιο

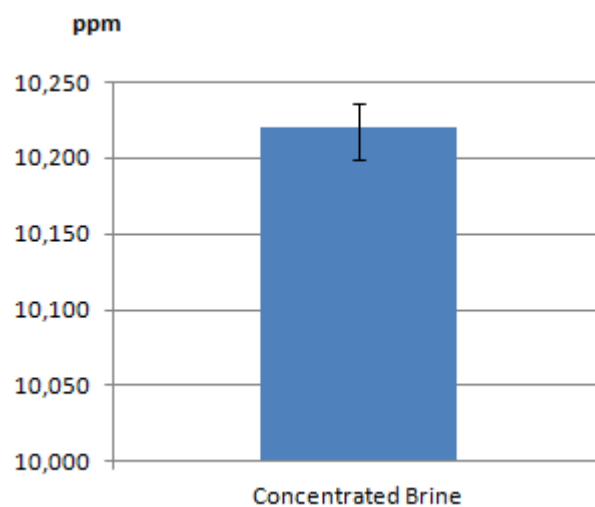
Τα αποτελέσματα από τις εργαστηριακές μετρήσεις παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα. Η μέτρηση της συγκέντρωσης του μαγνησίου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ατομικής απορρόφησης.

Τα διαγράμματα αφορούν τα ακόλουθα δείγματα:

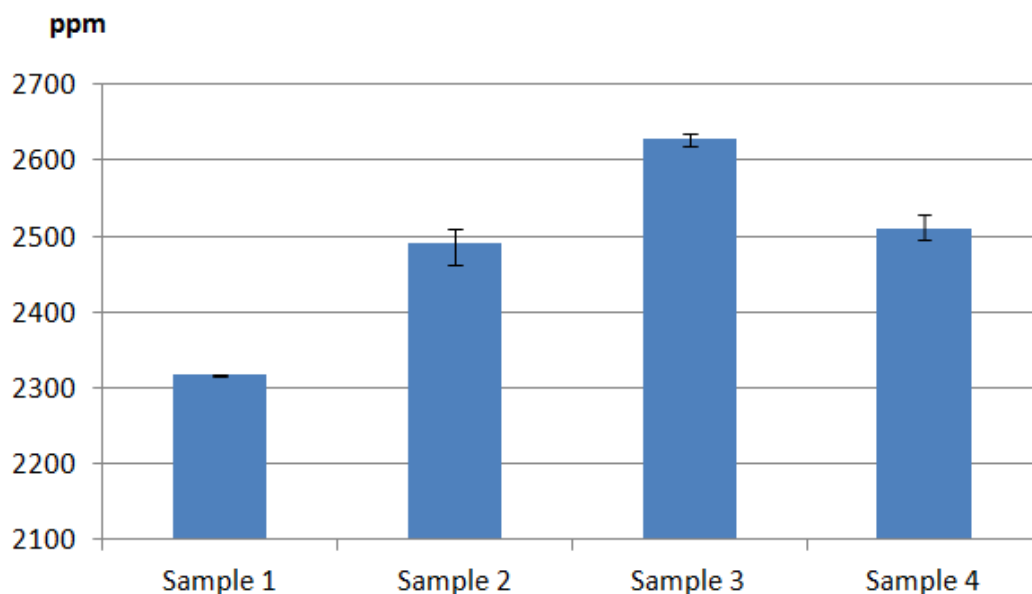
- ❖ Θαλασσινό νερό (βλ. Διάγραμμα 5-8)
- ❖ Άλμη (βλ. Διάγραμμα 5-10)
- ❖ Συμπυκνωμένη άλμη (βλ. Διάγραμμα 5-9)



Διάγραμμα 5-8: Συγκέντρωση μαγνησίου, δείγμα θαλασσινού νερού



Διάγραμμα 5-9: Συγκέντρωση μαγνησίου, δείγμα συμπυκνωμένης άλμης

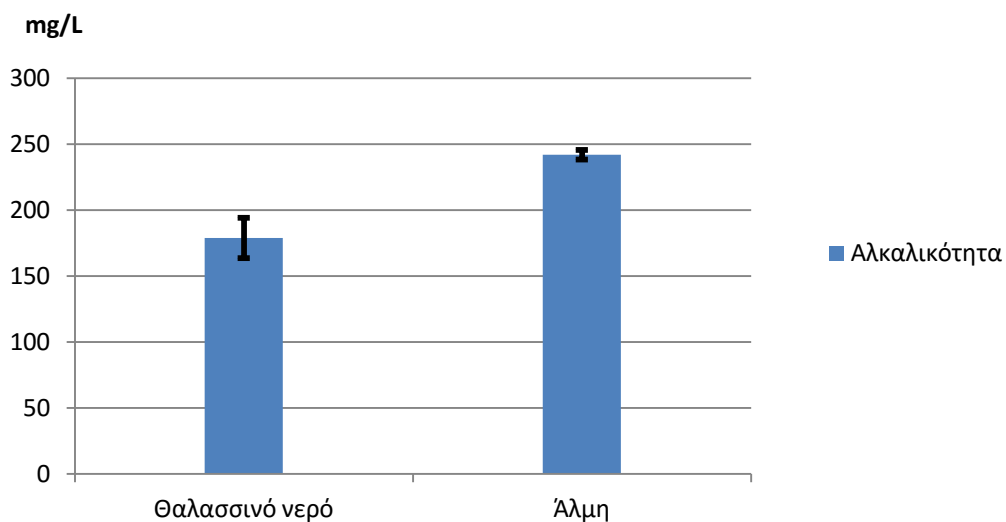


Διάγραμμα 5-10: Συγκέντρωση μαγνησίου, δείγμα άλμης
Αποτελέσματα αναλύσεων & Σχολιασμός:

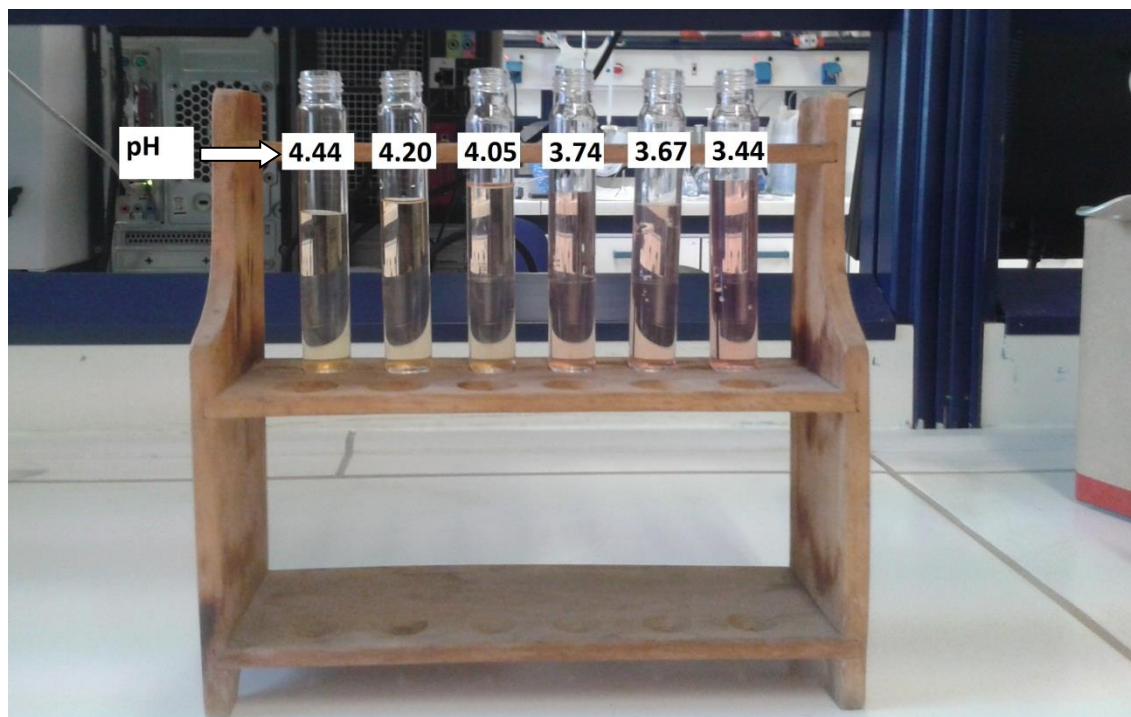
- ❖ **Θαλασσινό νερό:** η συγκέντρωση του Mg^{2+} είναι 1,385. Η τυπική συγκέντρωση του Mg^{2+} στο θαλασσινό νερό (Ανατολική Μεσόγειος) είναι 1,403 mg/L.
- ❖ **Άλμη (εκροή μονάδας αφαλάτωσης):** η συγκέντρωση του Mg^{2+} είναι 2,486. Η συγκέντρωση αυτή είναι σχεδόν διπλάσια σε σύγκριση με το θαλασσινό νερό, όπως είναι αναμενόμενο, αν θεωρηθεί λόγος ανάκτησης 40% για τη μονάδα αντίστροφης όσμωσης.
- ❖ **Συμπυκνωμένη άλμη (εκροή εξατμιστήρα):** η συγκέντρωση του Mg^{2+} είναι 10,220 mg/L. Η συγκέντρωση του Mg^{2+} είναι σχεδόν 7 φορές υψηλότερες σε σύγκριση με το θαλασσινό νερό, όπως αναμένεται από το λόγο συγκέντρωσης (concentration factor) που επιτυγχάνεται με τη χρήση του εξατμιστήρα.

5.2.3.2.5 Αλκαλικότητα

Η μέτρηση της αλκαλικότητας πραγματοποιήθηκε με τιτλοδότηση για τα δείγματα άλμης και θαλασσινού νερού (βλ. Διάγραμμα 5-11).



Διάγραμμα 5-11: Αλκαλικότητα, δείγματα θαλασσινού νερού και άλμης

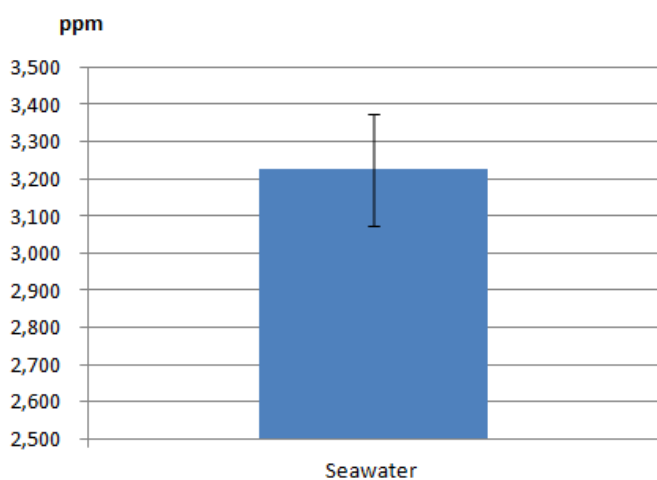


Εικόνα 5-22: Χρωματική διαφοροποίηση δείγματος άλμης με ηλιανθίνη σε εύρος pH: 3.44 - 4.44

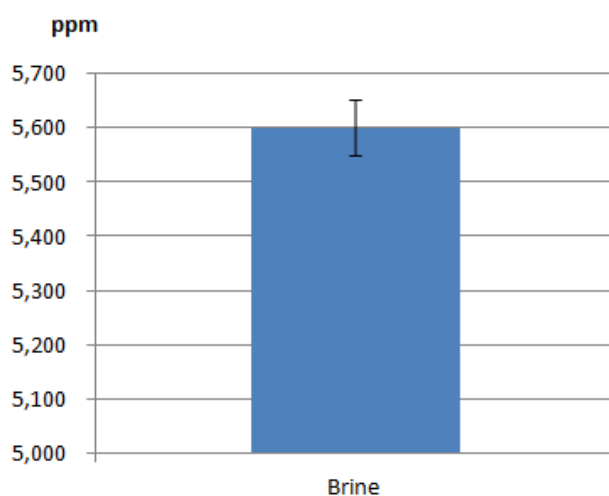
5.2.3.2.6 Θειικά

Η συγκέντρωση των θεικών (SO_4^{2-}) μετρήθηκε με χρήση φωτομέτρου για τα ακόλουθα δείγματα:

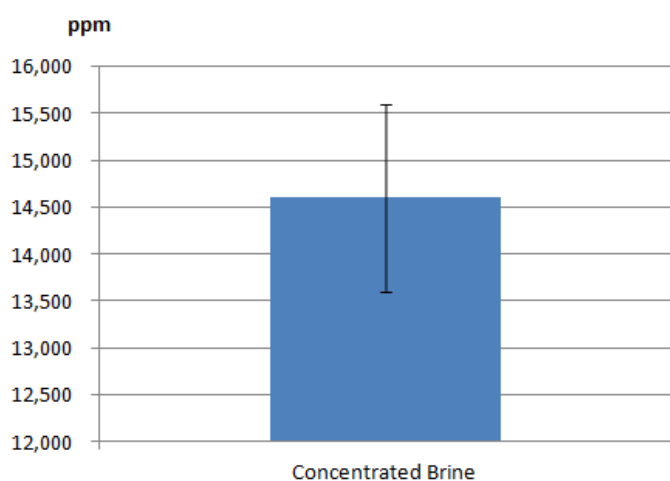
- ❖ Θαλασσινό νερό (βλ. Διάγραμμα 5-12 Διάγραμμα 5-5)
- ❖ Άλμη (βλ. Διάγραμμα 5-13)
- ❖ Συμπυκνωμένη άλμη (βλ. Διάγραμμα 5-14)
- ❖ Παραγόμενο νερό (βλ. Διάγραμμα 5-15)



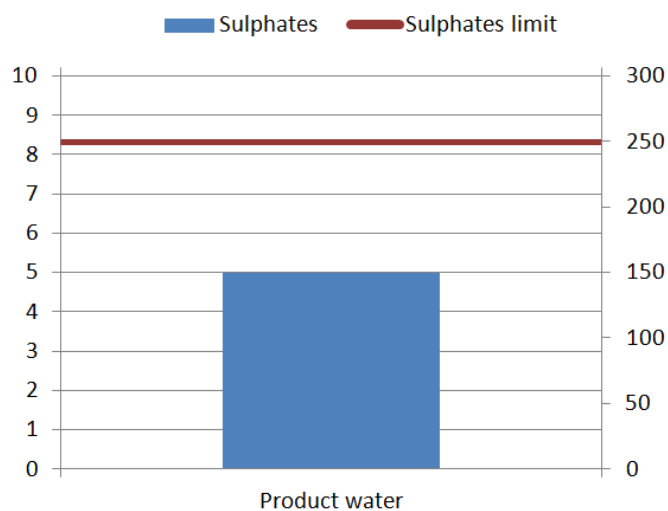
Διάγραμμα 5-12: Συγκέντρωση SO_4^{2-} , δείγμα θαλασσινού νερού



Διάγραμμα 5-13: Συγκέντρωση SO_4^{2-} , δείγμα άλμης



Διάγραμμα 5-14: Συγκέντρωση SO_4^{2-} , δείγμα συμπυκνωμένης άλμης



Διάγραμμα 5-15: Συγκέντρωση SO_4^{2-} , δείγμα παραγόμενου νερού

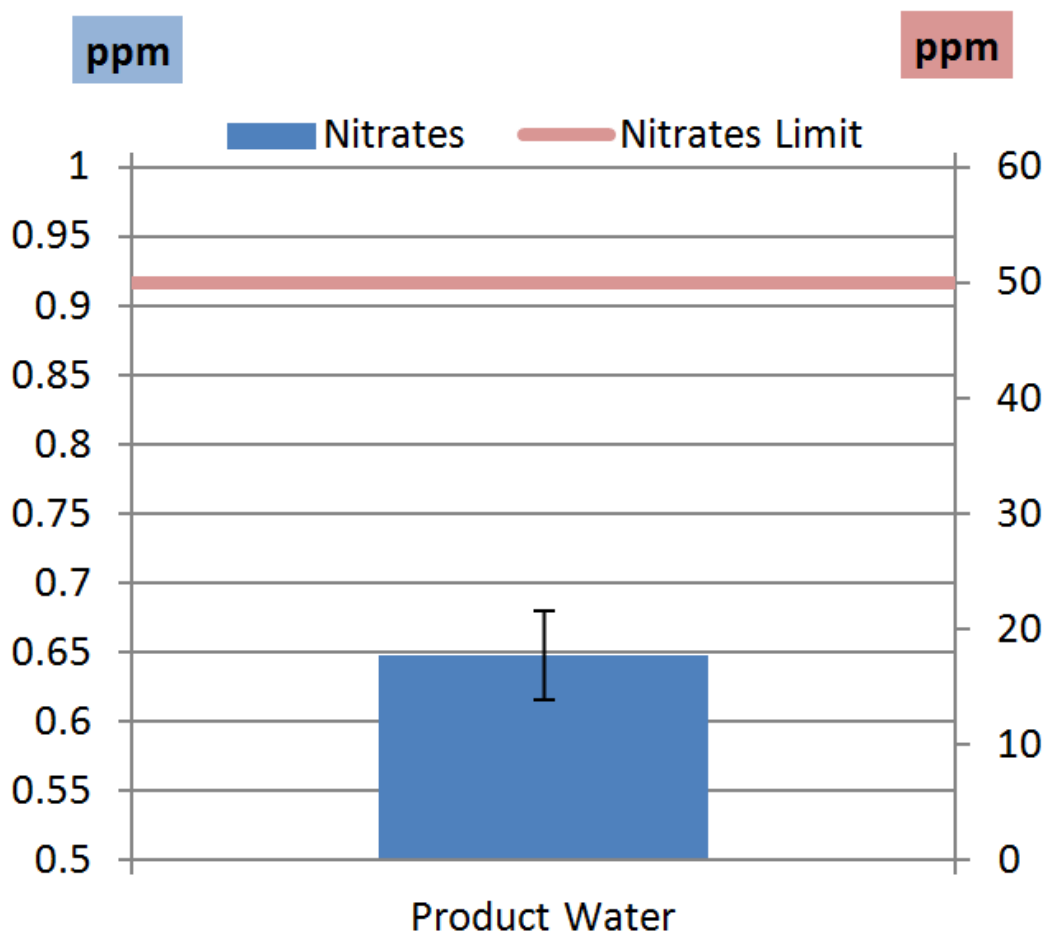
Σημείωση: η συγκέντρωση διαβάζεται στον αριστερό άξονα, ενώ το όριο της νομοθεσίας στον δεξί άξονα.

Αποτελέσματα αναλύσεων & Σχολιασμός:

- ❖ **Θαλασσινό νερό:** η συγκέντρωση των SO_4^{2-} είναι 3,225. Η τυπική συγκέντρωση των SO_4^{2-} στο θαλασσινό νερό (Ανατολική Μεσόγειος) είναι 2,950 mg/L.
- ❖ **Άλμη (εκροή μονάδας αφαλάτωσης):** η συγκέντρωση των SO_4^{2-} είναι 5,600 mg/L. Η συγκέντρωση αυτή είναι σχεδόν διπλάσια σε σύγκριση με το θαλασσινό νερό, όπως είναι αναμενόμενο, αν θεωρηθεί λόγος ανάκτησης 40% για τη μονάδα αντίστροφης όσμωσης.
- ❖ **Συμπυκνωμένη άλμη (εκροή εξατμιστήρα):** η συγκέντρωση των SO_4^{2-} είναι 14,600 mg/L. Η συγκέντρωση των SO_4^{2-} είναι λιγότερο από 5 φορές υψηλότερη σε σύγκριση με το θαλασσινό νερό, σε αντίθεση με το λόγο συγκέντρωσης (concentration factor) που επιτυγχάνεται με τη χρήση του εξατμιστήρα. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι πριν την κρυστάλλωση του NaCl, καταβυθίζεται το θειικό ασβέστιο. Έτσι, η συγκέντρωση των θεικών που βρίσκεται σε μορφή ανιόντων είναι μικρότερη.
- ❖ **Παραγόμενο νερό:** η συγκέντρωση των SO_4^{2-} είναι 5 mg/L, αρκετά χαμηλότερη από το όριο που ισχύει από την Ευρωπαϊκή Οδηγία.

5.2.3.2.7 Νιτρικά

Η μέτρηση των νιτρικών πραγματοποιήθηκε με τη χρήση φωτόμετρου για δείγμα του νερού που παράγεται κατά τη λειτουργία του εξατμιστήρα (βλ. Διάγραμμα 5-16).



Διάγραμμα 5-16: Συγκέντρωση νιτρικών, δείγμα παραγόμενου νερού

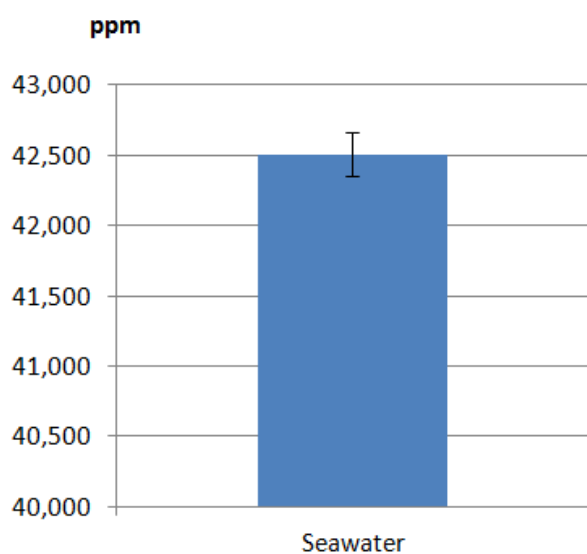
Αποτελέσματα αναλύσεων & Σχολιασμός:

- ❖ **Παραγόμενο νερό:** η συγκέντρωση των NO_3^- είναι 0.648 mg/L, αρκετά χαμηλότερη από το όριο που ισχύει από την Ευρωπαϊκή Οδηγία.

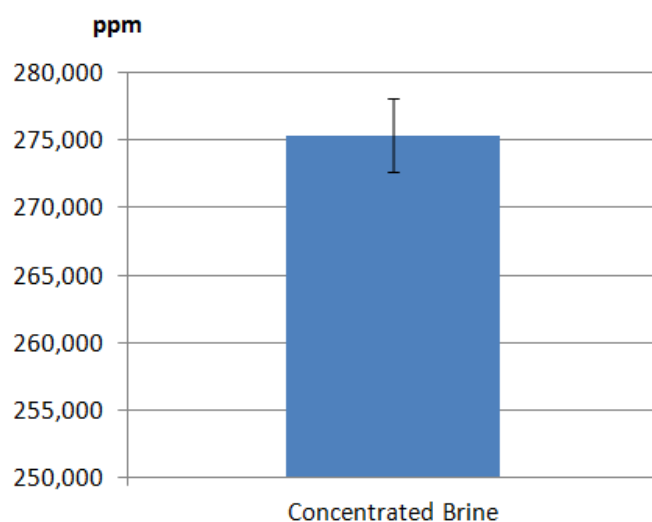
5.2.3.2.8 Ολικά Διαλυμένα Στερεά

Η μέτρηση των Ολικών Διαλυμένων Στερεών έγινε με εξάτμιση σε φούρνο (βλ. Ενότητα 5.2.2.1.3) για τα ακόλουθα δείγματα:

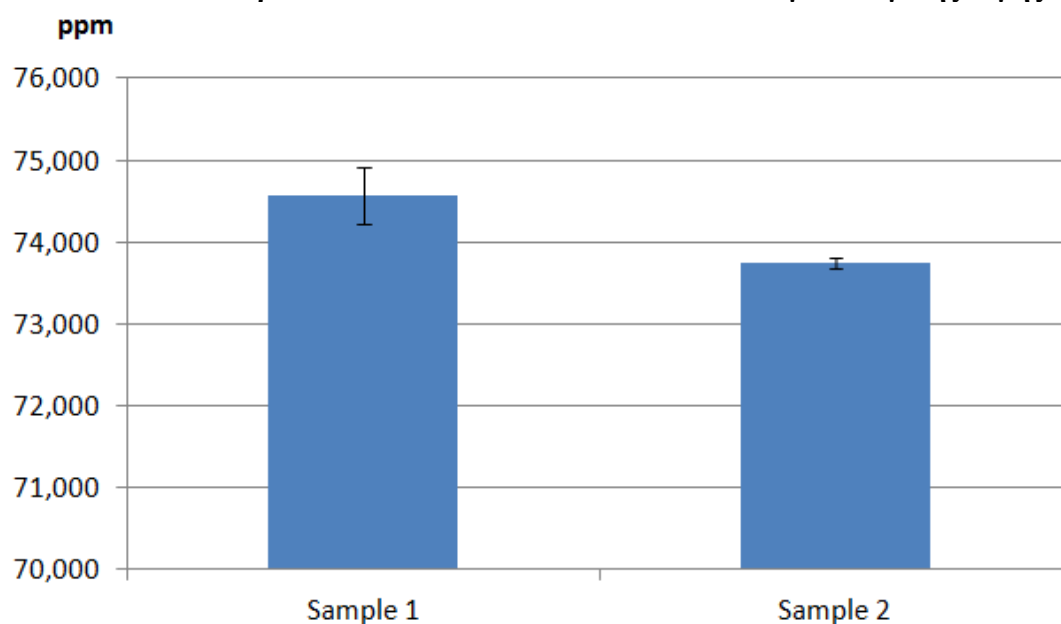
- ❖ Θαλασσινό νερό (βλ. Διάγραμμα 5-12 Διάγραμμα 5-5)
- ❖ Άλμη (βλ. Διάγραμμα 5-13)
- ❖ Συμπυκνωμένη άλμη (βλ. Διάγραμμα 5-14)
- ❖ Παραγόμενο νερό (βλ. Διάγραμμα 5-15)



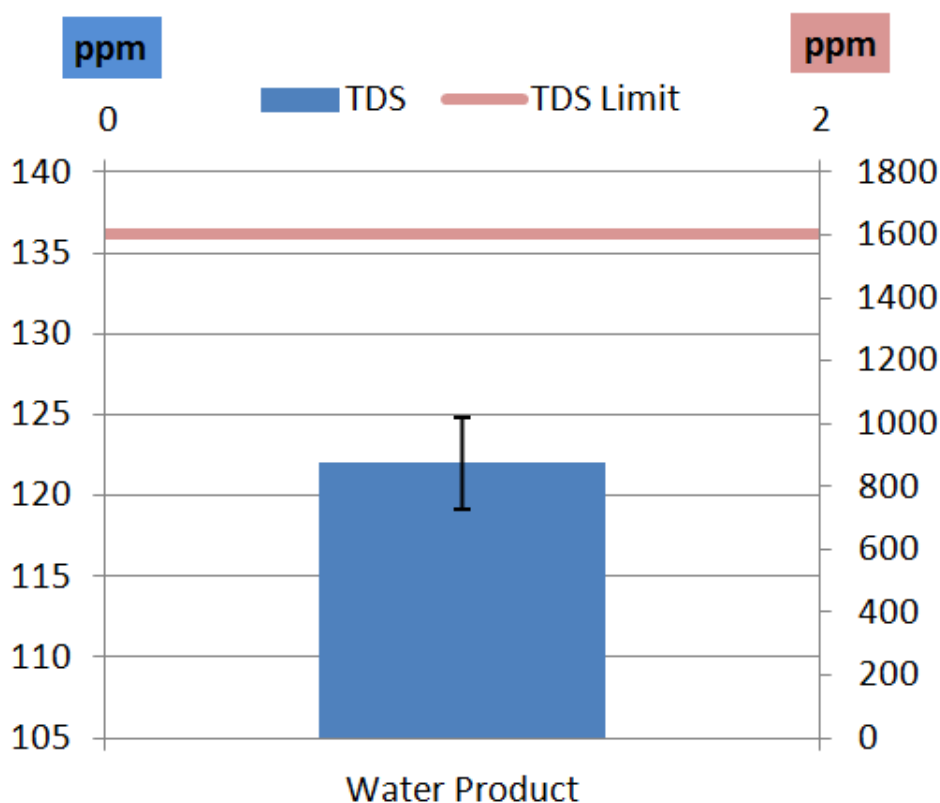
Διάγραμμα 5-17: Ολικά διαλυμένα στερεά, δείγμα θαλασσινού νερού



Διάγραμμα 5-18: Ολικά διαλυμένα στερεά, δείγμα συμπυκνωμένης άλμης



Διάγραμμα 5-19: Ολικά διαλυμένα στερεά, δείγμα άλμης



Διάγραμμα 5-20: Ολικά διαλυμένα στερεά, δείγμα παραγόμενου νερού

Αποτελέσματα αναλύσεων & Σχολιασμός:

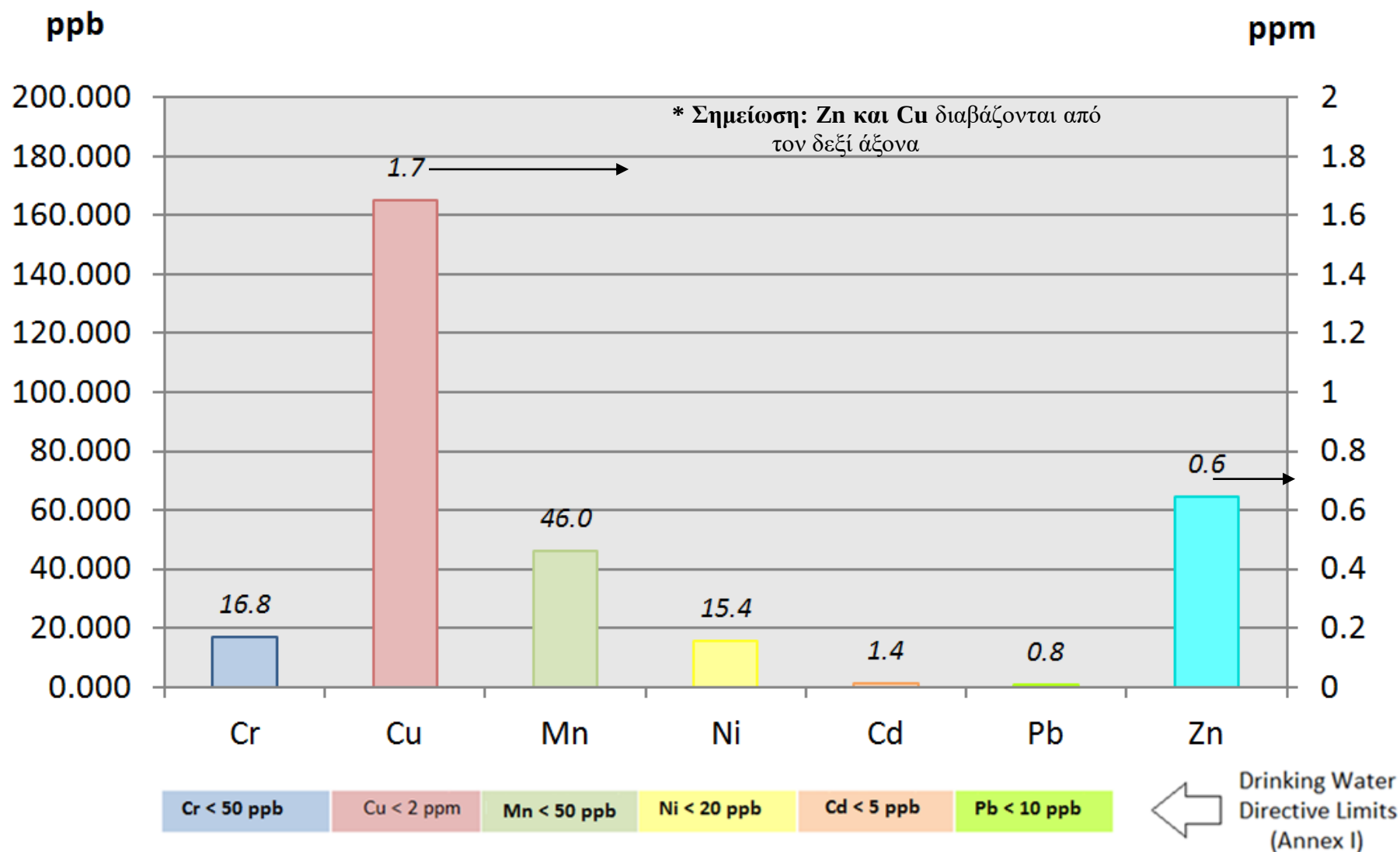
- ❖ **Θαλασσινό νερό:** η συγκέντρωση των TDS είναι 42,508 mg/L. Η τυπική συγκέντρωση των TDS στο θαλασσινό νερό (Ανατολική Μεσόγειος) είναι 38,600 mg/L.
- ❖ **Άλμη (εκροή μονάδας αφαλάτωσης):** η συγκέντρωση των TDS είναι 74,100 mg/L. Η συγκέντρωση αυτή είναι σχεδόν διπλάσια σε σύγκριση με το θαλασσινό νερό, όπως είναι αναμενόμενο, αν θεωρηθεί λόγος ανάκτησης 40% για τη μονάδα αντίστροφης όσμωσης.
- ❖ **Συμπυκνωμένη άλμη (εκροή εξατμιστήρα):** η συγκέντρωση των TDS είναι 275,370 mg/L, 7 φορές μεγαλύτερη από τη συγκέντρωση του θαλασσινού νερού.
- ❖ **Παραγόμενο νερό:** η συγκέντρωση των TDS είναι 125 ppm, χαμηλότερη από το όριο της Ευρωπαϊκής Οδηγίας.

5.2.3.2.9 Βαρέα μέταλλα

Τα βαρέα μέταλλα μετρήθηκαν με τη χρήση ατομικής απορρόφησης και επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος, για δείγματα από το παραγόμενο νερό.

Αποτελέσματα αναλύσεων & Σχολιασμός:

- ❖ **Cr:** η συγκέντρωση του χρωμίου ήταν χαμηλότερη από το όριο ανίχνευσης του οργάνου. Στο διάγραμμα αναφέρεται ως μέτρηση, το όριο ανίχνευσης του οργάνου (17 ppb), το οποίο είναι χαμηλότερο από το επιτρεπτό όριο της Ευρωπαϊκής Οδηγίας για τα πόσιμα νερά (50 ppb).
- ❖ **Cu:** η συγκέντρωση του χαλκού είναι 1.65 ppm, η οποία είναι χαμηλότερη από το επιτρεπτό όριο της Ευρωπαϊκής Οδηγίας για τα πόσιμα νερά (2 ppm).
- ❖ **Mn:** η συγκέντρωση του μαγγανίου είναι 46 ppb, η οποία είναι χαμηλότερη από το επιτρεπτό όριο της Ευρωπαϊκής Οδηγίας για τα πόσιμα νερά (50 ppb).
- ❖ **Ni:** η συγκέντρωση του νικελίου ήταν χαμηλότερη από το όριο ανίχνευσης του οργάνου. Στο διάγραμμα αναφέρεται ως μέτρηση, το όριο ανίχνευσης του οργάνου (15.4 ppb) το οποίο είναι χαμηλότερο από το επιτρεπτό όριο της Ευρωπαϊκής Οδηγίας για τα πόσιμα νερά (20 ppb).
- ❖ **Cd:** η συγκέντρωση του καδμίου ήταν χαμηλότερη από το όριο ανίχνευσης του οργάνου. Στο διάγραμμα αναφέρεται ως μέτρηση, το όριο ανίχνευσης του οργάνου (1.4 ppb) το οποίο είναι χαμηλότερο από το επιτρεπτό όριο της Ευρωπαϊκής Οδηγίας για τα πόσιμα νερά (5 ppb).
- ❖ **Pb:** η συγκέντρωση του μολύβδου είναι 0.75 ppb η οποία είναι χαμηλότερη από το επιτρεπτό όριο της Ευρωπαϊκής Οδηγίας για τα πόσιμα νερά (10 ppb).
- ❖ **Zn:** η συγκέντρωση του ψευδαργύρου είναι 0.6 ppm. Σημειώνεται πως στην Ευρωπαϊκή Οδηγία για τα πόσιμα νερά δεν αναφέρεται κάποιο όριο για την παράμετρο αυτή, έτσι χρησιμοποιήθηκε το όριο της εθνικής νομοθεσίας (KYA Y2/2600/11 Ιούνιος 2001) (3ppm).



Διάγραμμα 5-21: Συγκέντρωση βαρέων μετάλλων, δείγματα παραγόμενου νερού από εξατμιστήρα – σύγκριση με όρια πόσιμου νερού

5.2.3.2.10 Συμπεράσματα

Οι εργαστηριακές αναλύσεις έγιναν για τα ακόλουθα υγρά δείγματα:

- ❖ Θαλασσινό νερό
- ❖ Άλμη (εκροή μονάδας αφαλάτωσης μονάδας αφαλάτωσης Τήνου)
- ❖ Συμπυκνωμένη άλμη (εκροή εξατμιστήρα)
- ❖ Παραγόμενο νερό.

Τα κύρια συμπεράσματα που προκύπτουν από τις εργαστηριακές αναλύσεις των υγρών δειγμάτων συνοψίζονται ακολούθως:

- ❖ Οι αναλύσεις των δειγμάτων του θαλασσινού νερού φανερώνουν πως οι συγκεντρώσεις είναι όπως αναμενόταν κοντά στις τυπικές τιμές που δίνονται για τη σύσταση του θαλασσινού νερού για την περιοχή της ανατολικής Μεσογείου (Πίνακας 5-16). Παρόλο αυτά η σύσταση του νερού τροφοδοσίας της μονάδας αφαλάτωσης είναι διαφορετική (αραιωμένη με γλυκό νερό) από τη σύσταση του θαλασσινού νερού της περιοχής.
- ❖ Οι αναλύσεις της άλμης έδειξαν πως η παραγόμενη άλμη είναι χαμηλότερης συγκέντρωσης από την αναμενόμενη.
- ❖ Οι αναλύσεις της συμπυκνωμένης άλμης προσέφεραν σημαντικές πληροφορίες για την βελτιστοποίηση του πιλοτικού συστήματος επεξεργασίας της άλμης. Πιο συγκεκριμένα, ενώ ο αναλυτικός (τελικός) σχεδιασμός προέβλεπε πως ο εξατμιστήρας θα λειτουργεί με απλή κυκλοφορία, κατά τις δοκιμές προέκυψε ότι πρέπει να προστεθεί κλάδος ανακυκλοφορίας έτσι ώστε να επιτευχθεί ο επιδιωκόμενος συντελεστής συγκέντρωσης.
- ❖ Οι αναλύσεις του παραγόμενου νερού ήταν ιδιαίτερης αξίας, εφόσον προσέφεραν πληροφορία σχετικά με την δυνητική εμπορική αξιοποίηση του τελικού προϊόντος του συστήματος. Μετά τη βελτιστοποίηση του συστήματος, η ποιότητα του νερού βελτιώθηκε περαιτέρω. Στην Ενότητα αυτή διερευνήθηκε η ποσοτικοποίηση των παραμέτρων εκείνων για τις οποίες δίνονται συγκεκριμένα όρια από την Ευρωπαϊκή Οδηγία για τα πόσιμα νερά (Council Directive 98/83/EC - 3 Νοεμβρίου 1998).

Πίνακας 5-16: Χημική σύσταση θαλασσινού νερού (σε mg/l) στην ανατολική Μεσόγειο, στον Αραβικό Κόλπο και στην Ερυθρά Θάλασσα

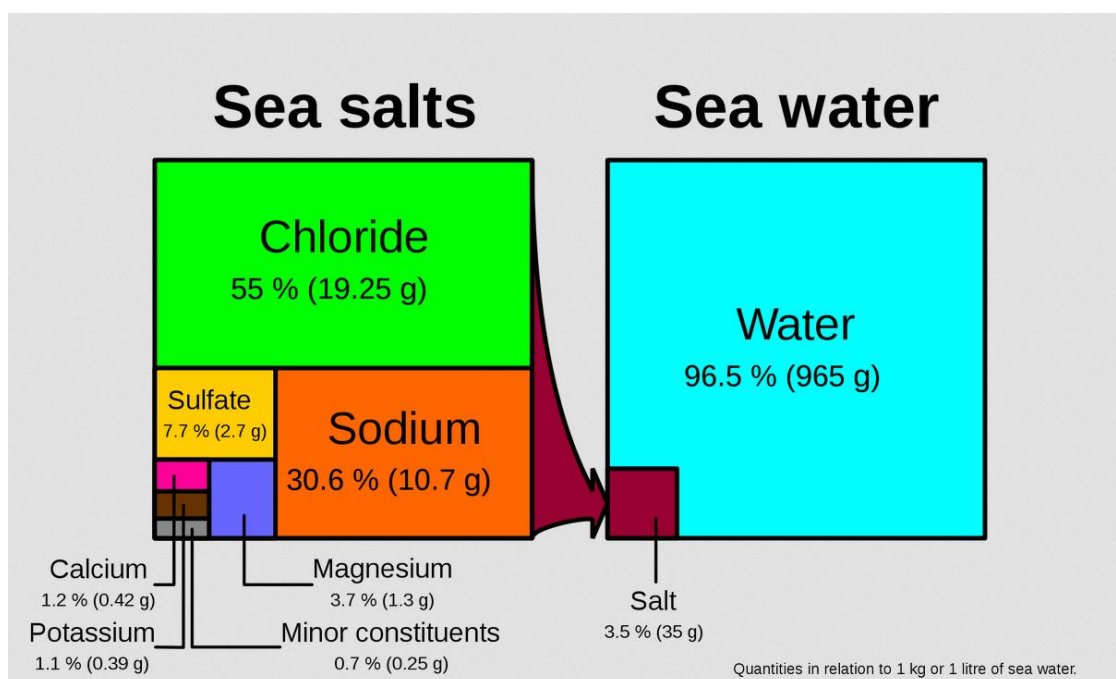
Παράμετρος	Τυπικό θαλασσινό νερό	Ανατολική Μεσόγειος	Αραβικός Κόλπος (Kuwait)	Ερυθρά Θάλασσα (Jeddah)
Cl ⁻	18,980	21,200	23,000	22,219
Na ⁺	10,556	11,800	15,850	14,255
SO ₄ ²⁻	2,649	2,950	3,200	3,078
Mg ²⁺	1,262	1,403	1,765	742
Ca ²⁺	400	423	500	225
K ⁺	380	463	460	210
HCO ₃ ⁻	140	-	142	146
Sr ²⁺	13	-	-	-
Br ⁻	65	155	80	72
H ₃ BO ₃	26	72	-	-
F ⁻	1	-	-	-
TDS	34,483	38,600	45,000	41,000

Πηγή: (SOL-BRINE, 2013)

5.2.3.3 Στερεά δείγματα

Πριν την πραγματοποίηση των αναλύσεων, έγινε βιβλιογραφική έρευνα με στόχο τον εντοπισμό εκείνων των ενώσεων που μπορεί να ανακτηθούν κατά την συμπύκνωση/εξάτμιση της άλμης.

Όπως έχει αναφερθεί, η χημική σύσταση του θαλασσινού νερού μπορεί να περιγραφεί με 99% ακρίβεια, δίνοντας τις συγκεντρώσεις των 6 στοιχείων που φαίνονται στο Σχήμα 5-8.



Σχήμα 5-8: Κατά μάζα σύσταση θαλασσινού νερού

Στον Πίνακα 5-17 δίνονται οι ενώσεις που μπορούν να ανακτηθούν από τη συμπύκνωση της άλμης. Η παρουσίαση γίνεται ανά στοιχείο, λαμβάνοντας υπόψη τα 6 βασικά στοιχεία του θαλασσινού νερού, όπως συζητήθηκε παραπάνω. Στον πίνακα αυτό γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της βιβλιογραφίας και των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν με χρήση XRD.

Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις XRD παρουσιάζονται:

- στο Διάγραμμα 5-22
- στο Διάγραμμα 5-23
- στο Διάγραμμα 5-24

Πίνακας 5-17: Ενώσεις που μπορούν να ανακτηθούν κατά τη συμπύκνωση της θάλασσας ή της παραγόμενης άλμης από μονάδες αφαλάτωσης

Στοιχείο	Ενώσεις στοιχείων		XRD
Chloride (5)	Halite:	NaCl	☒
	Bischofite:	MgCl ₂	☒
	Sylvite:	KCl	☒
	Carnalite:	KCl • MgCl ₂ • 6H ₂ O	
	Kainite	4KCl • 4MgSO ₄ • 11H ₂ O	
Sodium (4)	Halite:	NaCl	☒
	Mirabilite:	Na ₂ SO ₄ •10H ₂ O	
	Glauberite:	Na ₂ Ca(SO ₄) ₂	
	Bloedite:	Na ₂ Mg(SO ₄)•4H ₂ O	
Sulphate (10)	Celestite:	SrSO ₄	
	Gypsum:	CaSO ₄	☒
	Mirabilite:	Na ₂ SO ₄ •10H ₂ O	
	Epsomite:	MgSO ₄	☒
	Hexahydrite:	MgSO ₄ •6H ₂ O	
	Glauberite:	Na ₂ Ca(SO ₄) ₂	
	Bloedite:	Na ₂ Mg(SO ₄)•4H ₂ O	
	Langbeinite:	K ₂ SO ₄ • 2MgSO ₄	
	Kainite:	4KCl • 4MgSO ₄ • 11H ₂ O	
	Polyhalite:	K ₂ SO ₄ • MgSO ₄ • 2CaSO ₄ • 2H ₂ O	
Magnesium (9)	Magnesite:	MgCO ₃	
	Brucite:	Mg(OH) ₂	
	Epsomite:	MgSO ₄ • 7H ₂ O	☒
	Hexahydrite:	MgSO ₄ •6H ₂ O	
	Bloedite:	Na ₂ Mg(SO ₄)•4H ₂ O	
	Carnalite:	KCl • MgCl ₂ • 6H ₂ O	
	Langbeinite:	K ₂ SO ₄ • 2MgSO ₄	
	Kainite:	4KCl • 4MgSO ₄ • 11H ₂ O	
	Polyhalite:	K ₂ SO ₄ • MgSO ₄ • 2CaSO ₄ • 2H ₂ O	
Calcium (6)	Gypsum:	CaSO ₄ •2H ₂ O	☒
	Anhydrite:	CaSO ₄	☒
	Epsomite:	MgSO ₄ • 7H ₂ O	☒
	Glauberite:	Na ₂ Ca(SO ₄) ₂	
	Polyhalite	K ₂ SO ₄ • MgSO ₄ • 2CaSO ₄ • 2H ₂ O	

Στοιχείο	Ενώσεις στοιχείων		XRD
	Calcite:	CaCO_3	☒
Potassium (5)	Langbeinite:	$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4$	
	Sylvite:	KCl	☒
	Carnalite:	$\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	
	Kainite:	$4\text{KCl} \cdot 4\text{MgSO}_4 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$	
	Polyhalite:	$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	

Τα στοιχεία αντλήθηκαν από (Macedonio, και συν., 2013) (Babel & Schreiber, 2014)

Για την ποιοτική και ποσοτική στοιχειακή ανάλυση του ξηρού υπολείμματος της κρυστάλλωσης (έξοδος ξηραντήρα), χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος φασματοσκοπίας φθορισμού ακτίνων X (XRF) και περίθλασης ακτίνων X (XRay Diffractometer). Οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τύπου Arl Advant Xp (για τη μέθοδο XRF) και SIEMENS D5000 X-Ray Diffractometer (για τη μέθοδο XRD).

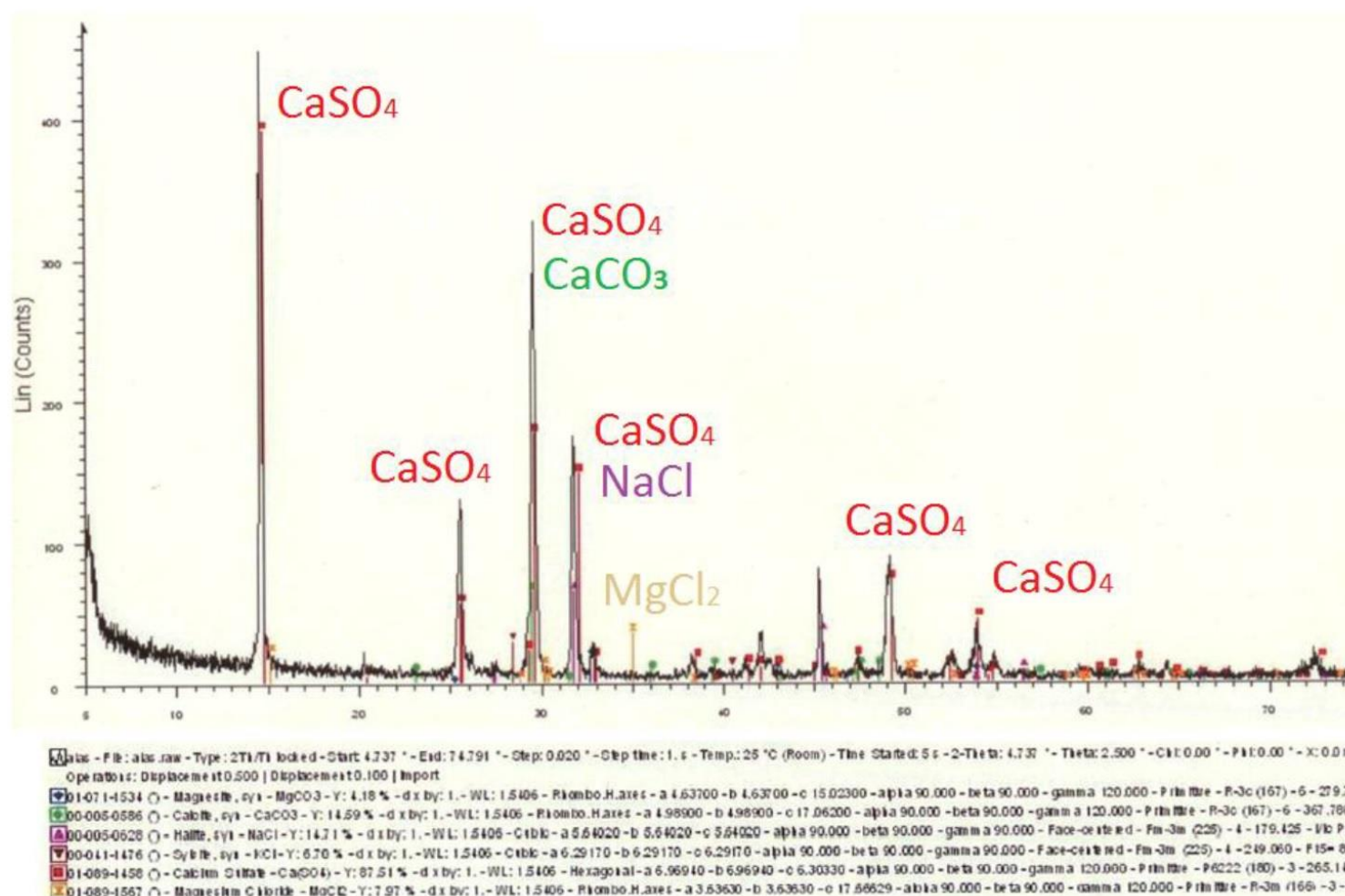
Τα δείγματα προετοιμάστηκαν (λειοτριβημένα σε μορφή πούδρας) και εισήχθησαν στο δειγματοφορέα. Ο ρυθμός σάρωσης περίθλασης της μονοχρωματικής ακτινοβολίας ήταν $0.02^\circ/\text{sec}$ από 5° έως 75° . Η ανάλυση βασίζεται στη σύγκριση των κορυφών του διαγράμματος με αντίστοιχες πρότυπες κορυφές που είναι αρχειοθετημένες στο λογισμικό του οργάνου (Joint Committee on Powder Diffraction Standards, JCPDS). Η θέση των χαρακτηριστικών κορυφών που εμφανίζονται, οδηγεί στην ταυτοποίηση των στοιχείων που περιέχονται στο δείγμα (ποιοτική ανάλυση), ενώ από την έντασή τους προκύπτουν οι σχετικές ή απόλυτες συγκεντρώσεις των στοιχείων του δείγματος (ημι-ποσοτική ή ποσοτική ανάλυση).

Τα αποτελέσματα από τη συσκευή XRF δίνονται στον Πίνακα 5-18, ενώ τα αποτελέσματα από τη συσκευή XRD στα ακόλουθα διαγράμματα. Για την διεξαγωγή των αναλύσεων χρησιμοποιήθηκαν τρία δείγματα τα οποία ελήφθησαν από την έξοδο του κρυσταλλωτήρα (υπόλειμμα κρυστάλλωσης) ή από τον ξηραντήρα.

Πίνακας 5-18: Αποτελέσματα ανάλυσης XRF σε στερεό δείγμα άλατος

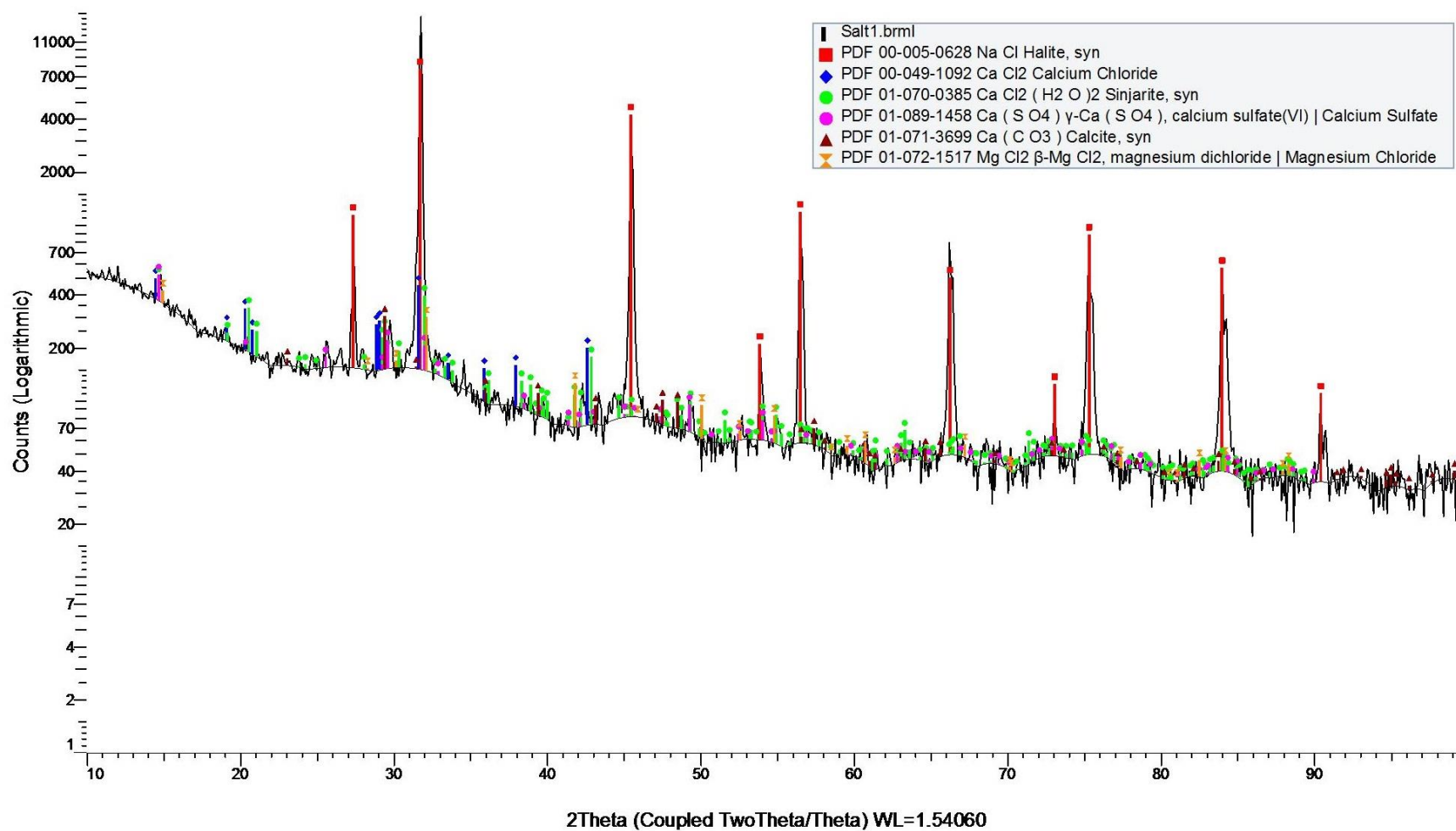
Στοιχείο		Συγκέντρωση (%)
Ασβέστιο	Ca	36.1
Θείο	S	25.4
Χλώριο	Cl	3.15
Στρόντιο	Sr	0.873
Νάτριο	Na	0.810
Μαγνήσιο	Mg	0.511
Κάλιο	K	0.499
Πυρήτιο	Si	0.111
Βρώμιο	Br	260 ppm
Ψευδάργυρος	Zn	170 ppm
Αλουμίνιο	Al	33ppm
Φώσφορος	P	21ppm
Χαλκός	Cu	14ppm

Πηγή: (Ξεύγενο, Μιχαηλίδης, Δημόπουλος, & Λοϊζίδου, 2013)

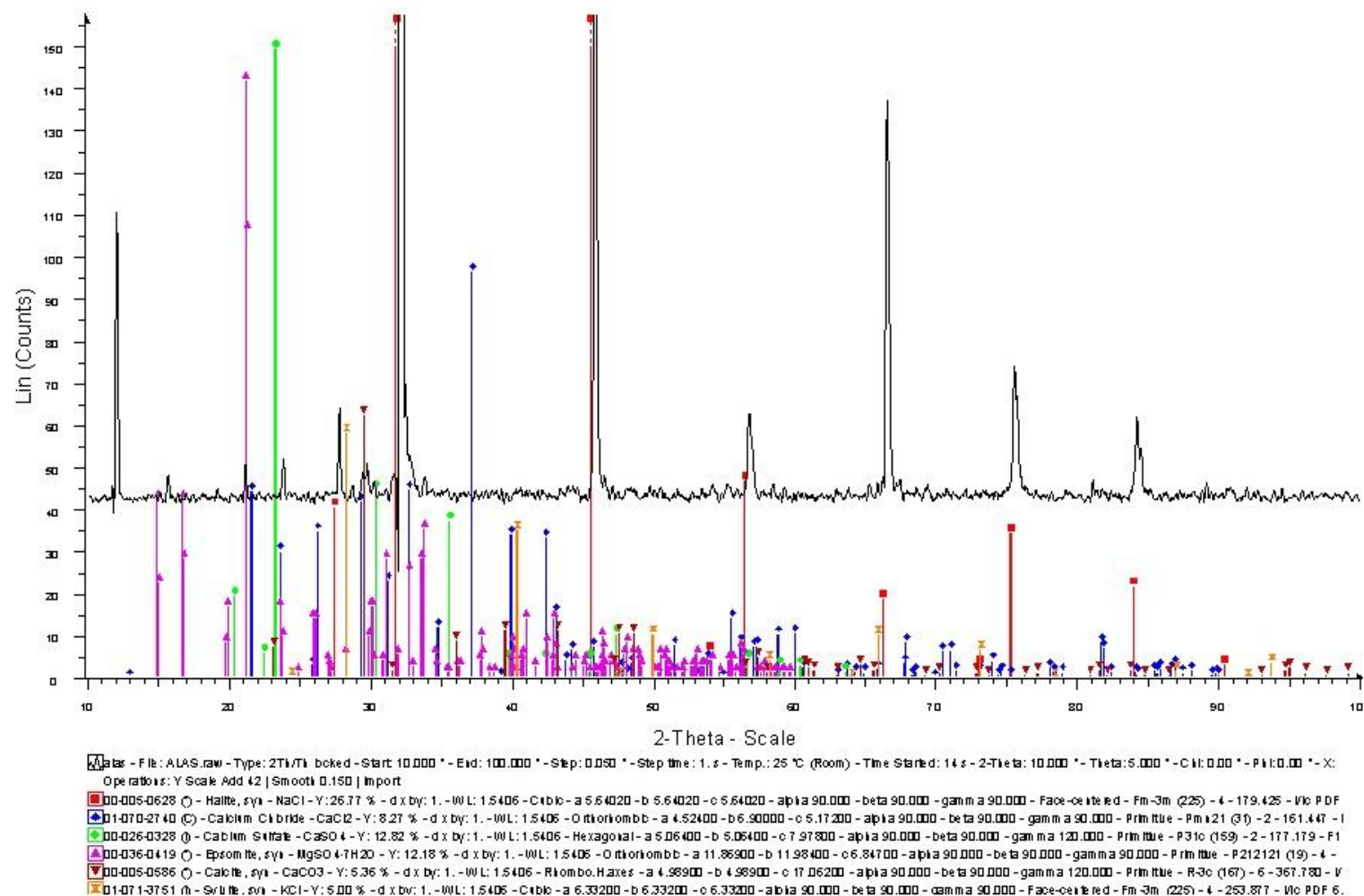


Πηγή: (Ξεύγενος, Μιχαηλίδης, Δημόπουλος, & Λοϊζίδου, 2013)

Διάγραμμα 5-22: Διάγραμμα XRD από το υπόλειμμα κρυστάλλωσης (ιλύς) του συστήματος επεξεργασίας της άλμης



Διάγραμμα 5-23: Διάγραμμα XRD από το υπόλειμμα κρυστάλλωσης (ιλύς) του συστήματος επεξεργασίας της άλμης (2^ο δείγμα)

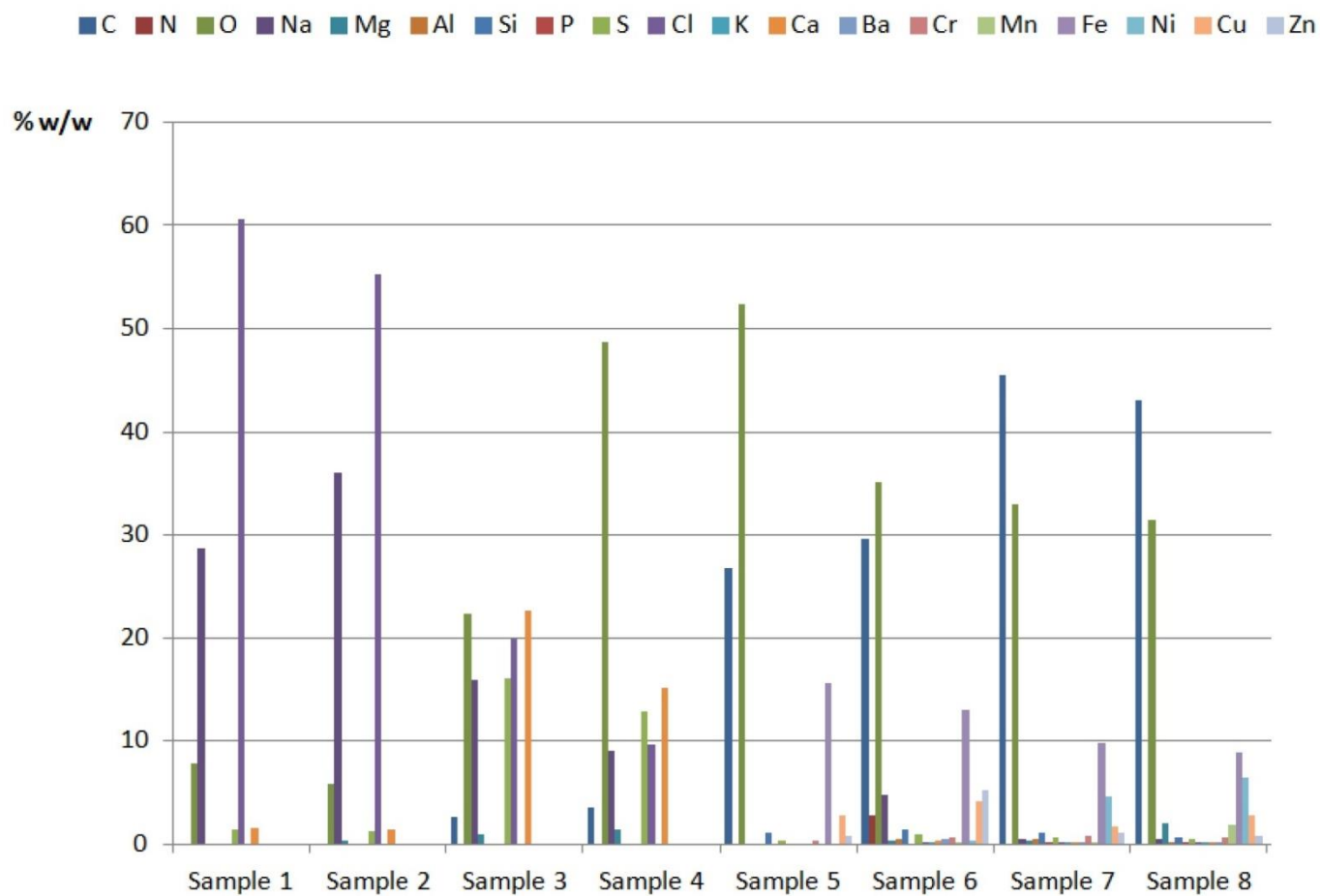


Διάγραμμα 5-24: Διάγραμμα XRD από το υπόλειμμα κρυστάλλωσης (ιλύς) του συστήματος επεξεργασίας της άλμης (3^ο δείγμα)

Ακολουθούν αναλύσεις 7 στερεών δειγμάτων άλατος με χρήση SEM-EDS. Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 5-19 και στο Διάγραμμα 5-25.

Πίνακας 5-19: Κατά μάζα σύσταση δειγμάτων στερεού άλατος ανά στοιχείο

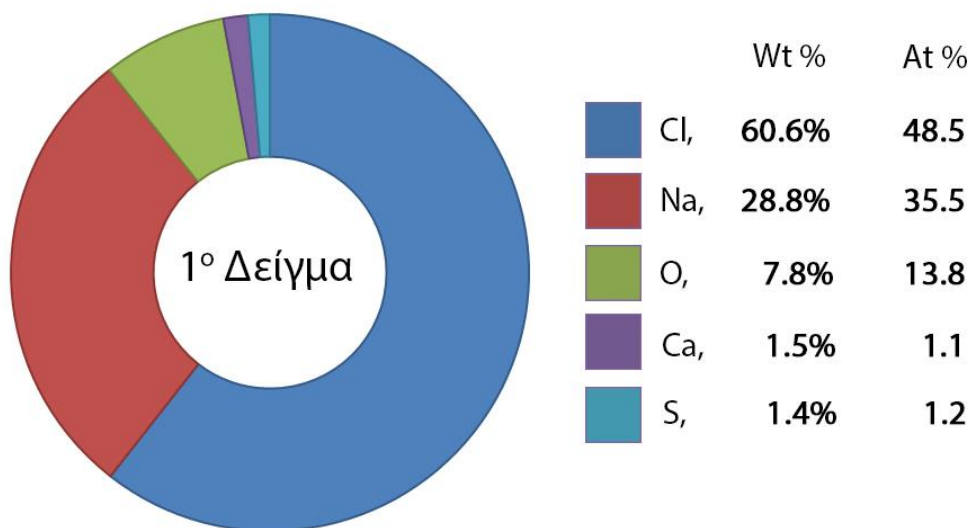
Στοιχείο	Δείγματα αλάτων						
	1	2	3	4	5	6	7
C			2.6	3.47	26.78	29.69	45.56
N						2.72	
O	7.77	5.87	22.24	48.65	52.34	35.14	33.04
Na	28.75	36.02	15.81	8.98		4.81	0.42
Mg		0.29	0.9	1.32		0.33	0.33
Al						0.48	0.46
Si					1.09	1.41	1.04
P							0.06
S	1.36	1.19	16.02	12.84	0.38	0.85	0.63
Cl	60.58	55.23	19.86	9.6		0.13	0.11
K						0.06	0.08
Ca	1.54	1.4	22.58	15.14		0.28	0.17
Ba						0.53	0.21
Cr					0.27	0.59	0.74
Mn						0.2	0.13
Fe					15.64	13.05	9.72
Ni						0.32	4.51
Cu					2.69	4.17	1.75
Zn					0.81	5.2	1.03



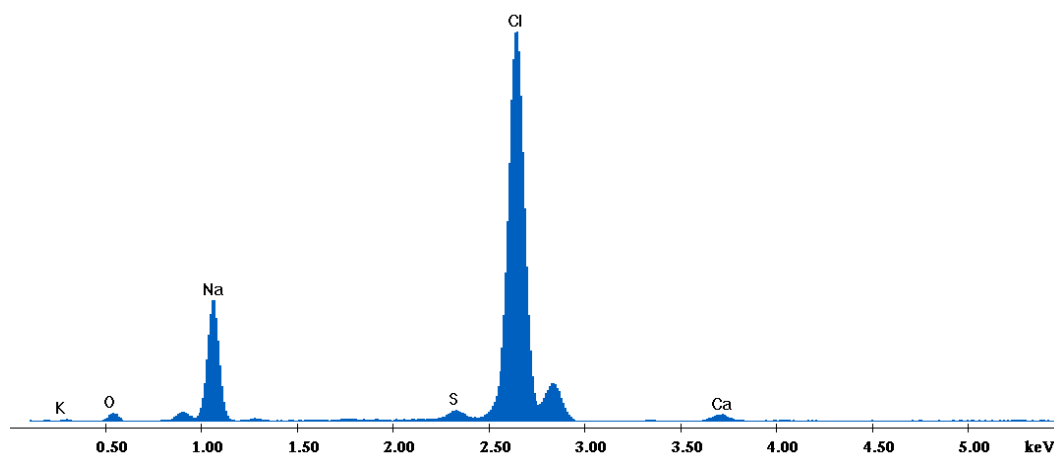
Διάγραμμα 5-25: Κατά μάζα σύσταση δειγμάτων στερεού άλατος ανά στοιχείο

5.2.3.3.1 1^ο Δείγμα

Η κατά μάζα σύσταση και η ποσοστιαία εμφάνιση των στοιχείων ως άτομα δίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα για το πρώτο δείγμα.



Διάγραμμα 5-26: Κατά μάζα σύσταση 1^{ου} δείγματος στερεού άλατος



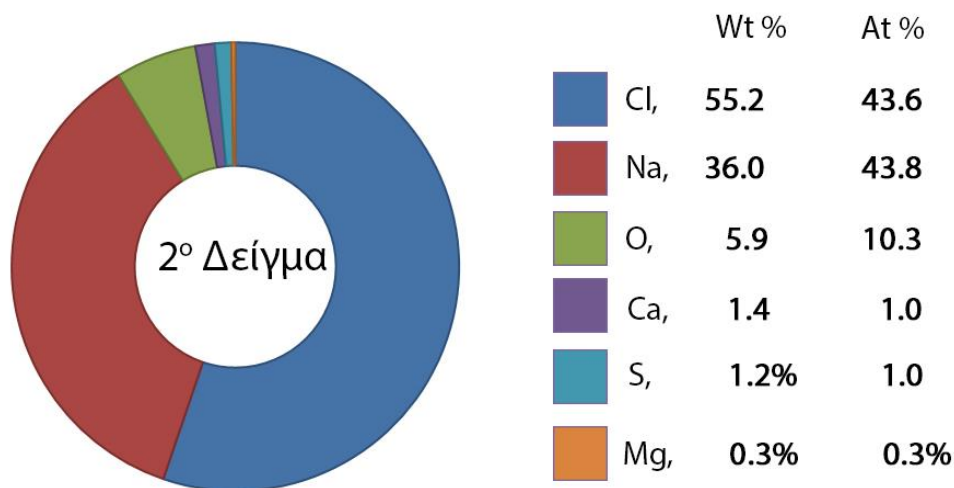
Διάγραμμα 5-27: Φάσμα EDX, Δείγμα 1

Αποτελέσματα αναλύσεων & Σχολιασμός:

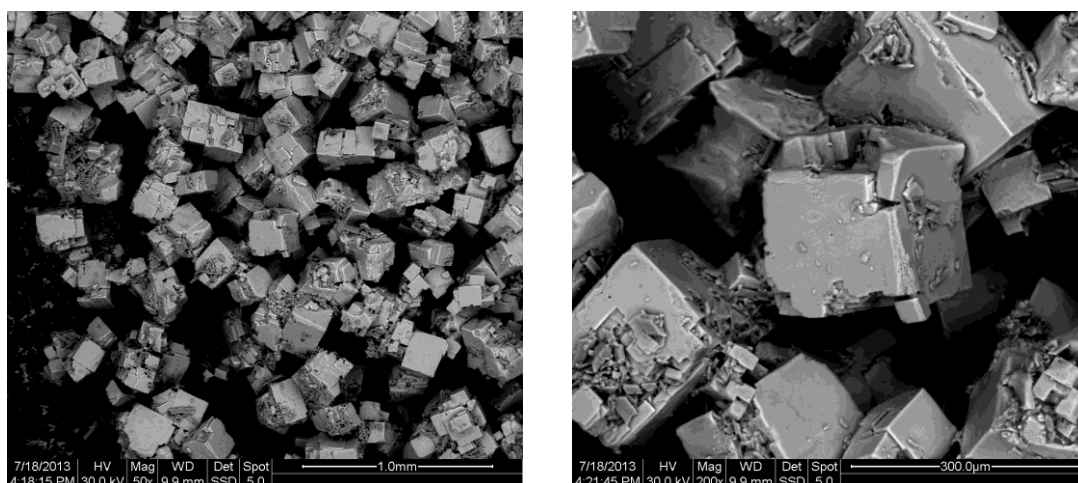
Το δείγμα χαρακτηρίζεται από υψηλά επίπεδα χλωρίου και νατρίου. Η αναλογία των ατόμων τους είναι κοντά στη μονάδα, κάτι που υποδηλώνει πως το εξεταζόμενο δείγμα αποτελεί κυρίως χλωριούχο νάτριο.

5.2.3.3.2 2^ο Δείγμα

Η κατά μάζα σύσταση και η ποσοστιαία εμφάνιση των στοιχείων ως άτομα δίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα για το δεύτερο δείγμα.



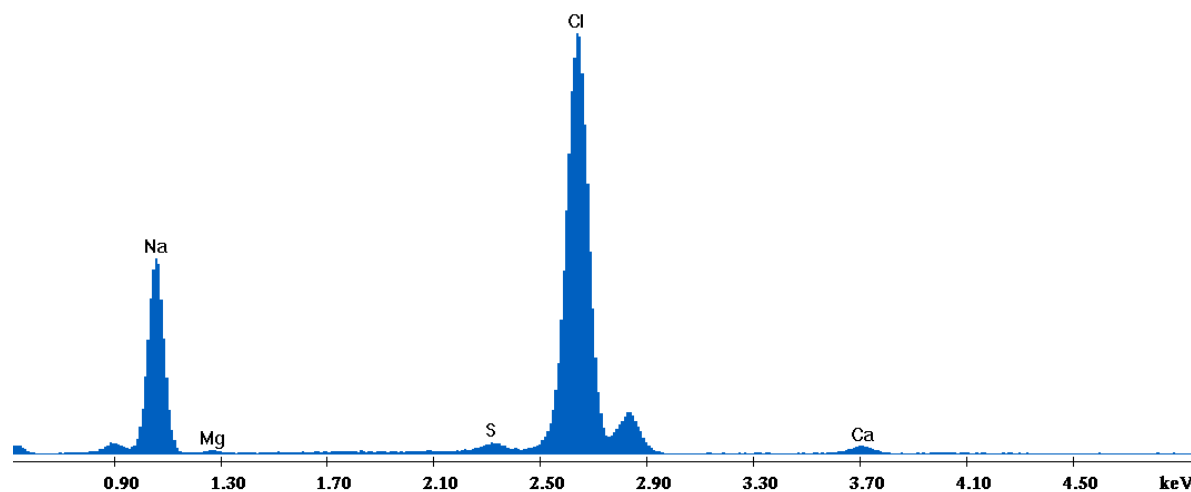
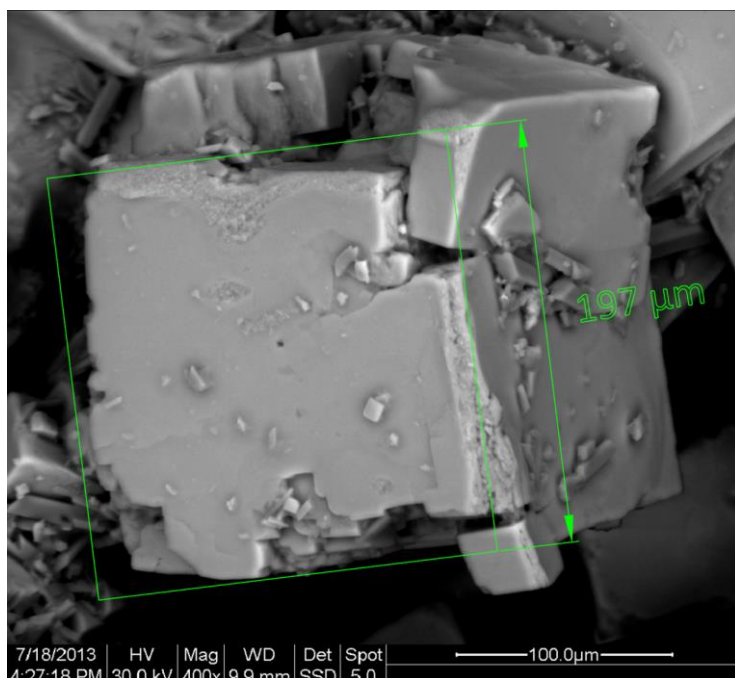
Διάγραμμα 5-28: Κατά μάζα σύσταση 2^{ου} δείγματος στερεού άλατος



Εικόνα 5-23: SEM εικόνα 2^{ου} δείγματος στερεού άλατος: μεγέθυνση x50 (αριστερά) και x200 (δεξιά)

Αποτελέσματα αναλύσεων & Σχολιασμός:

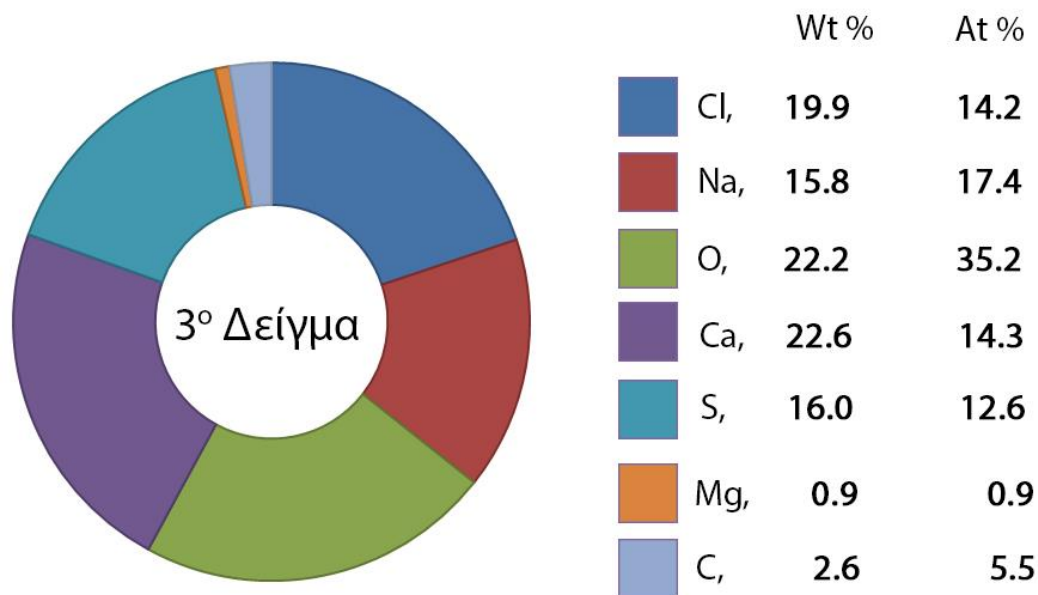
Το δείγμα χαρακτηρίζεται από υψηλά επίπεδα χλωρίου και νατρίου. Η αναλογία των ατόμων τους είναι κοντά στη μονάδα, κάτι που υποδηλώνει πως το εξεταζόμενο δείγμα αποτελεί κυρίως χλωριούχο νάτριο. Το σχήμα του κρυστάλλου είναι κυβικό, ενώ το μέσο μέγεθός του είναι περίπου 197μm (βλ. επίσης Εικόνα 5-24).



Εικόνα 5-24: Μέσο μέγεθος κρυστάλλου χλωριούχου νατρίου (αριστερά), (β) Φάσμα EDS ιδίου δείγματος (δεξιά)

5.2.3.3.3 3^ο Δείγμα

Η κατά μάζα σύσταση και η ποσοστιαία εμφάνιση των στοιχείων ως άτομα δίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα για το τρίτο δείγμα.



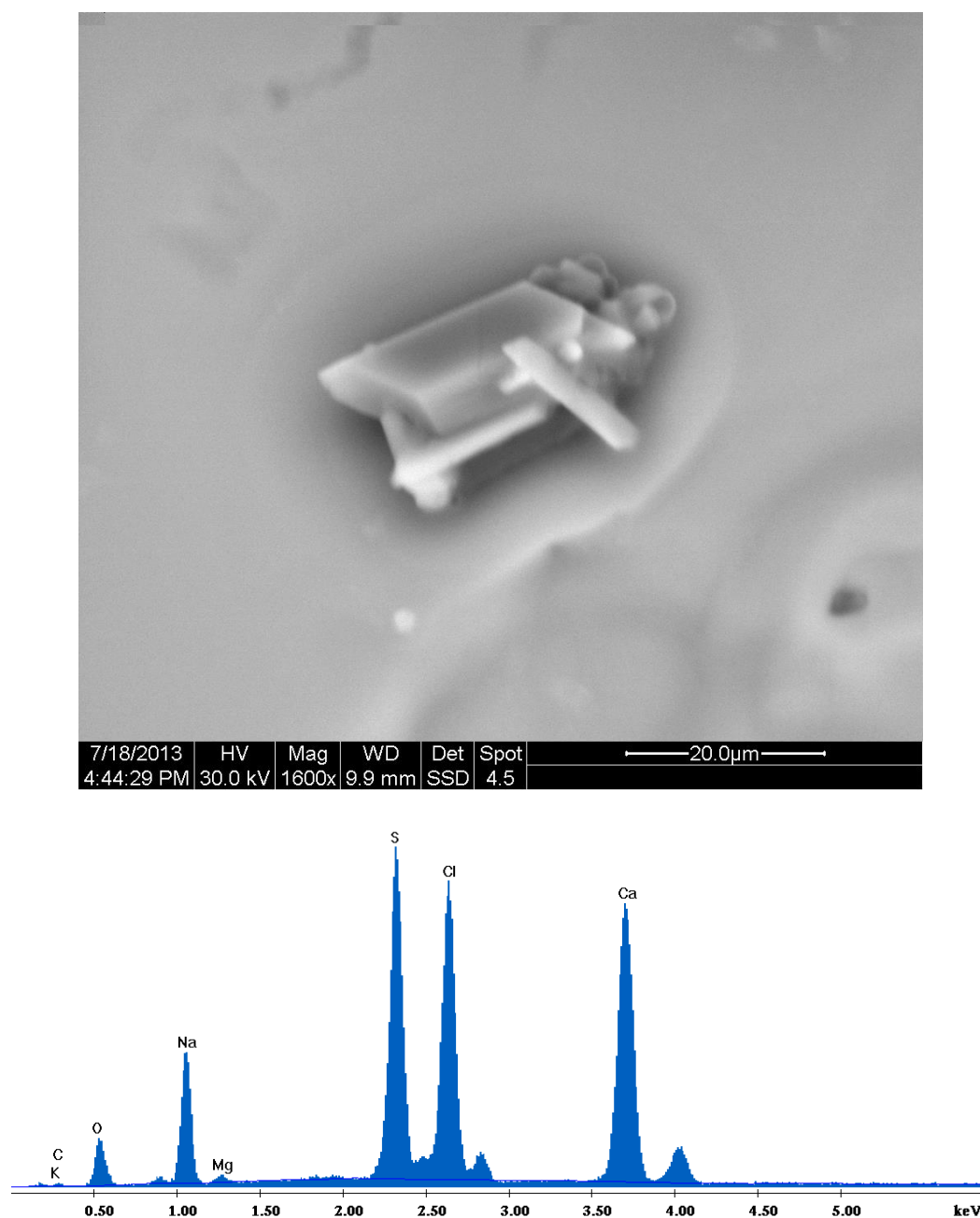
Διάγραμμα 5-29: Κατά μάζα σύσταση 3ου δείγματος στερεού άλατος

Αποτελέσματα αναλύσεων & Σχολιασμός:

Η κατά μάζα σύσταση του τρίτου δείγματος κατανέμεται σχεδόν ομοιόμορφα μεταξύ των στοιχείων του ασβεστίου (22.58%), οξυγόνου (22.24%), χλωρίου (19.86%), θείου (16.02%) και νατρίου (15.81%). Προκειμένου να γίνει μία πρώτη προσέγγιση για το χαρακτηρισμό των αλάτων σε αυτό το δείγμα, υπολογίζονται οι λόγοι μεταξύ των ατόμων.

Έτσι, παρατηρούμε ότι ο λόγος ασβεστίου προς το θείο είναι 1:1, ενώ οξυγόνου προς ασβέστιο είναι περίπου 2.5:1, υπονοώντας ότι το άλας πιθανώς να είναι θεικό ασβέστιο (CaSO_4).

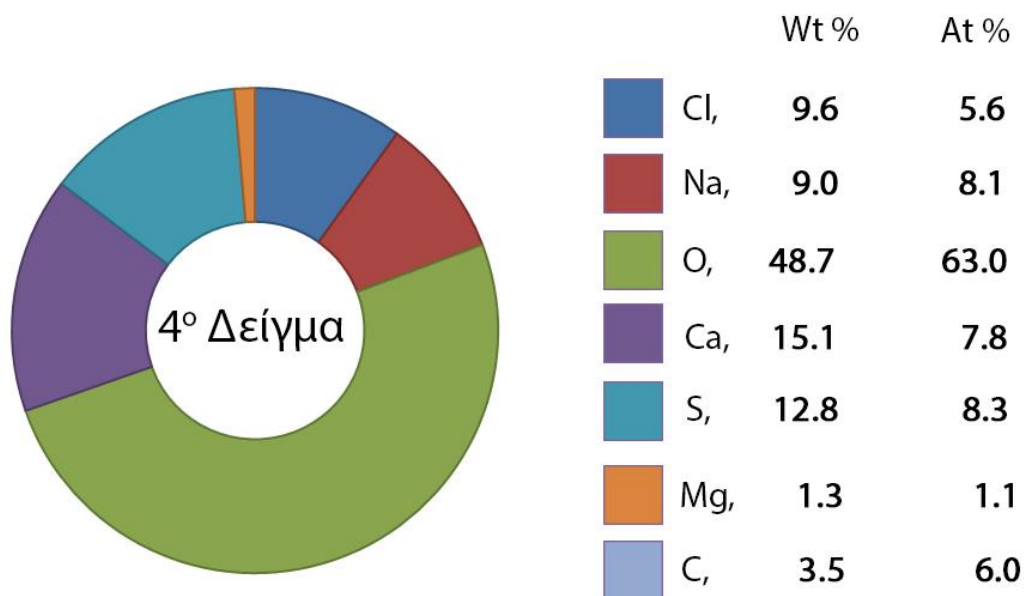
Επίσης παρατηρείται λόγος ατόμων χλωρίου προς νατρίου περίπου ίσος 1:1, κάτι που υπονοεί ταυτόχρονη ύπαρξη κρυστάλλων χλωριούχου νατρίου.



Εικόνα 5-25: SEM εικόνα 3^{ου} δείγματος στερεού άλατος: μεγέθυνση x1600 (επάνω) και φάσμα EDS (κάτω)

5.2.3.3.4 4^ο Δείγμα

Η κατά μάζα σύσταση και η ποσοστιαία εμφάνιση των στοιχείων ως άτομα δίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα για το τέταρτο δείγμα.

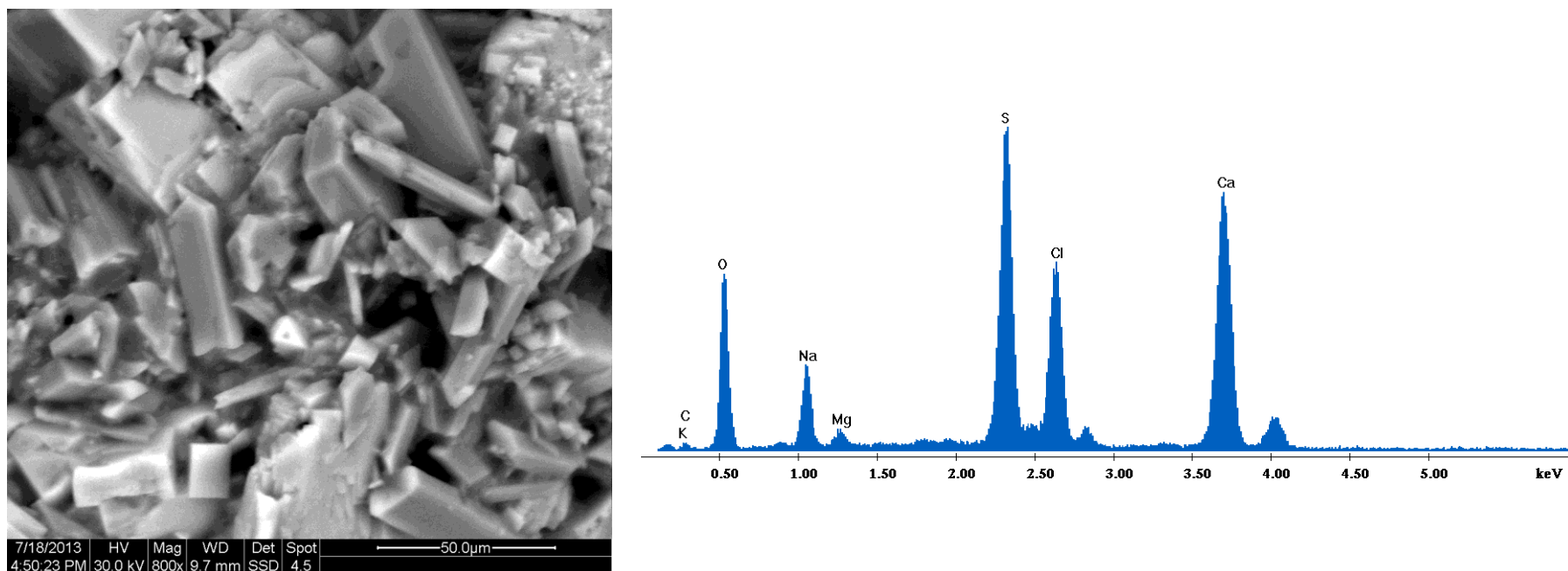


Διάγραμμα 5-30: Κατά μάζα σύσταση 4ου δείγματος στερεού άλατος

Αποτελέσματα αναλύσεων & Σχολιασμός:

Η κατά μάζα σύσταση του τέταρτου δείγματος χαρακτηρίζεται από υψηλά επίπεδα οξυγόνου (48.7%), ενώ κατανέμεται σχεδόν ομοιόμορφα μεταξύ των στοιχείων του ασβεστίου (15.1%), του θείου (12.8%), του χλωρίου (9.6%) και του νατρίου (9.0%). Σε μικρότερη ποσότητα παρατηρείται ο άνθρακας (3.5%) και το μαγνήσιο (1.3%). Προκειμένου να γίνει μία πρώτη προσέγγιση για το χαρακτηρισμό των αλάτων σε αυτό το δείγμα, υπολογίζονται οι λόγοι μεταξύ των ατόμων.

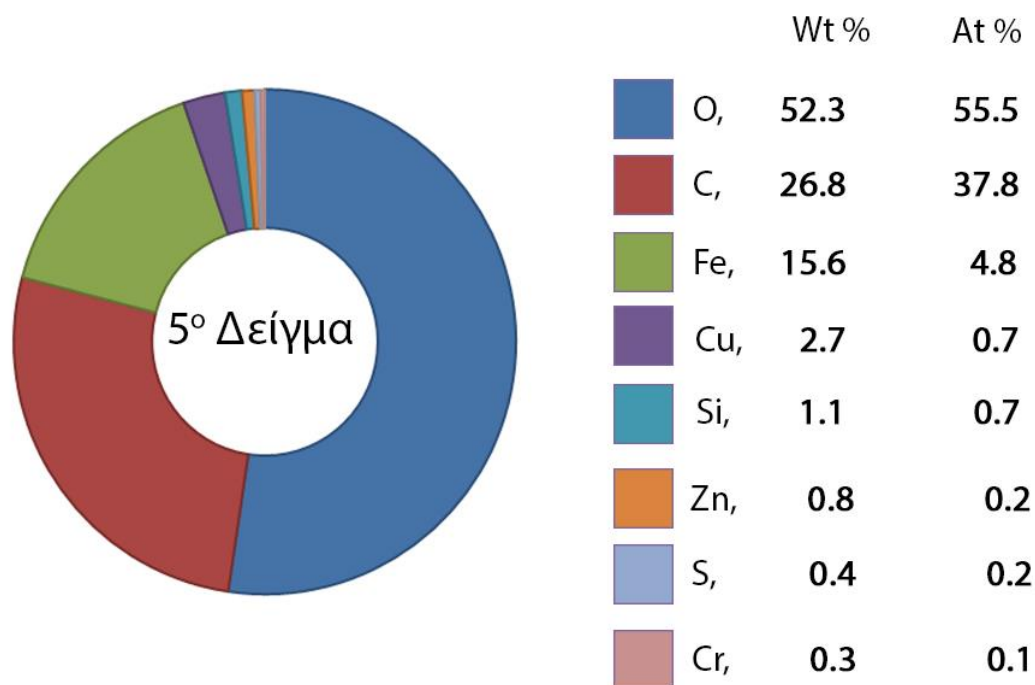
Ο λόγος των ατόμων νατρίου προς χλωρίου είναι 1.44:1 κάτι το οποίο υπονοεί πως εκτός από την ένωση του χλωριούχου νατρίου, λόγω περίσσειας ατόμων, το νάτριο σχηματίζει και κάποια άλλη ένωση όπως θειικό νάτριο ή κάποιο συναφές ορυκτό, όπως mirabilite, glauberite ή bloedite (βλ. Πίνακας 5-17). Ο λόγος των ατόμων θείου προς ασβέστιο είναι σχεδόν ίσος προς 1, υποδηλώνοντας πιθανώς την παρουσία θειικού ασβεστίου.



Εικόνα 5-26: SEM εικόνα 4^{ου} δείγματος στερεού άλατος: μεγέθυνση x800 (αριστερά) και φάσμα EDS (δεξιά)

5.2.3.3.5 5^ο Δείγμα

Η κατά μάζα σύσταση και η ποσοστιαία εμφάνιση των στοιχείων ως άτομα δίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα για το πέμπτο δείγμα.

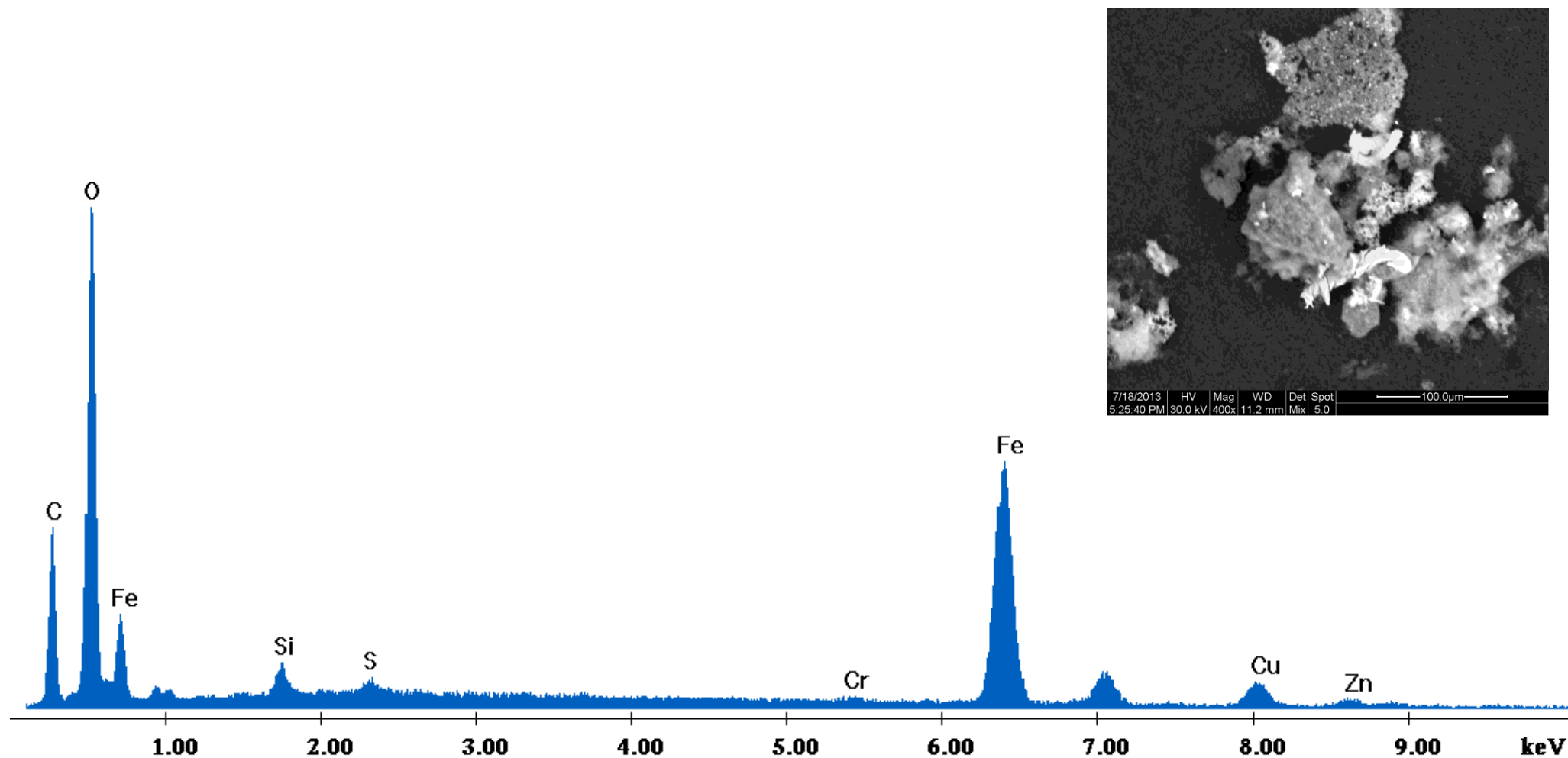


Διάγραμμα 5-31: Κατά μάζα σύσταση 5^{ου} δείγματος στερεού άλατος

Αποτελέσματα αναλύσεων & Σχολιασμός:

Η κατά μάζα σύσταση του τρίτου δείγματος χαρακτηρίζεται από υψηλά επίπεδα οξυγόνου (52.3%), άνθρακα (26.8%) και σιδήρου (15.6%). Σε χαμηλότερα επίπεδα παρατηρείται ο χαλκός (2.7%), το πυρίτιο (1.1%), ο ψευδάργυρος (0.8%), το θείο (0.4%) και το χρώμιο (0.3%).

Η απουσία των στοιχείων που παρατηρούνται στα άλλα δείγματα (1-4) όπως χλώριο, νάτριο, ασβέστιο, καθώς και η παρουσία μετάλλων όπως χρώμιο, σίδηρος, ψευδάργυρος υποδηλώνει πως το δείγμα αυτό αφορά πιθανώς σε μεταλλική επιφάνεια όπως π.χ. προϊόν διάβρωσης.



Διάγραμμα 5-32: Φάσμα EDS και SEM εικόνα στερεού δείγματος άλατος (x400 μεγέθυνση)

5.2.3.3.6 6^ο Δείγμα

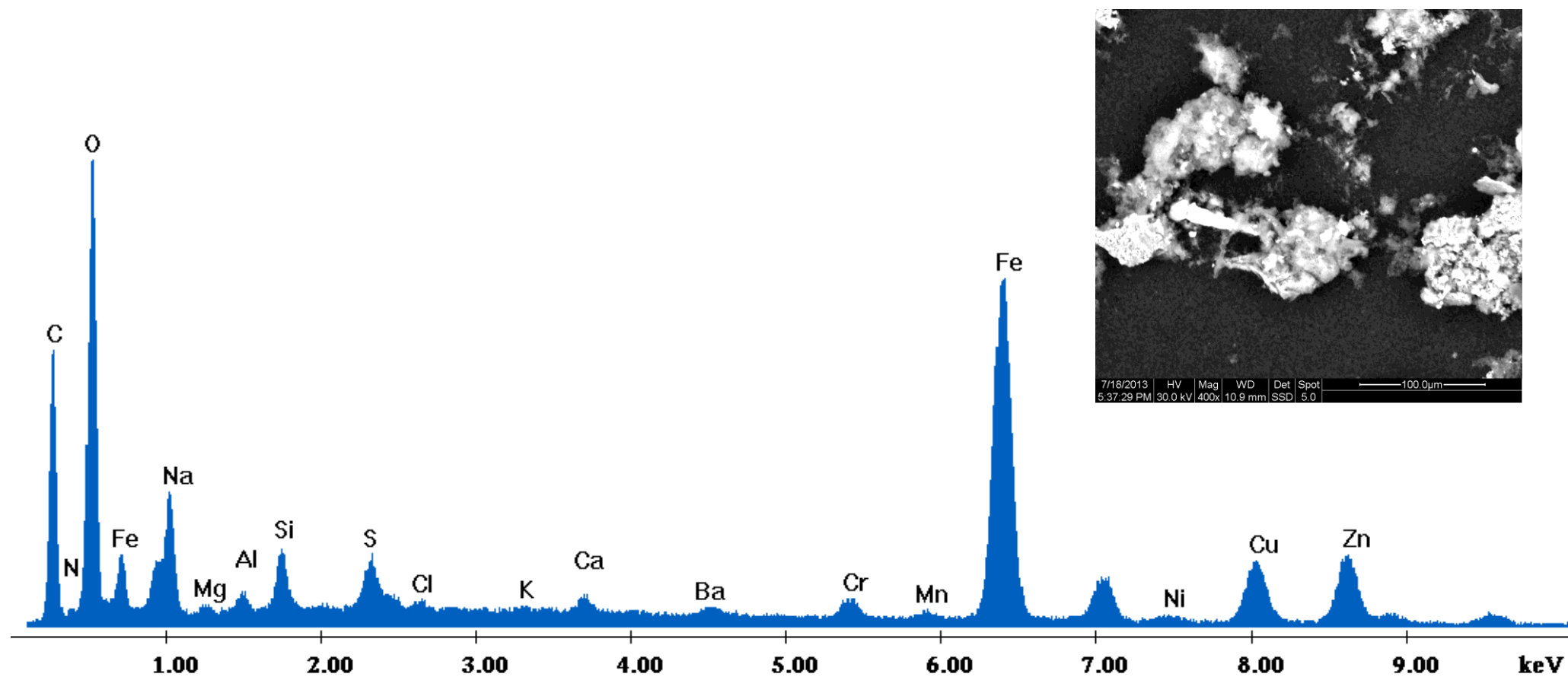
Η κατά μάζα σύσταση και η ποσοστιαία εμφάνιση των στοιχείων ως άτομα δίνεται στο ακόλουθο πίνακα για το έκτο δείγμα.

Πίνακας 5-20: Κατά μάζα σύσταση 6^{ου} δείγματος στερεού άλατος

Στοιχείο	Wt %	At %
C	29.69	44.17
N	2.72	3.47
O	35.14	39.25
Na	4.82	3.75
Mg	0.33	0.24
Al	0.48	0.32
Si	1.41	0.9
S	0.85	0.48
Cl	0.13	0.07
K	0.06	0.03
Ca	0.28	0.13
Ba	0.53	0.07
Cr	0.59	0.2
Mn	0.2	0.07
Fe	13.05	4.18
Ni	0.32	0.1
Cu	4.17	1.17
Zn	5.2	1.42

Αποτελέσματα αναλύσεων & Σχολιασμός:

Η κατά μάζα σύσταση του τρίτου δείγματος χαρακτηρίζεται από υψηλά επίπεδα οξυγόνου (35.1%), άνθρακα (29.7%) και σιδήρου (13.05%). Σε χαμηλότερα επίπεδα παρατηρείται πολλά διαφορετικά στοιχεία, υποδηλώνοντας την ταυτόχρονη παρουσία πολλών διαφορετικών ενώσεων.



Διάγραμμα 5-33: Φάσμα EDS και SEM εικόνα έκτου δείγματος άλατος (x400 μεγέθυνση)

5.2.3.3.7 7^ο Δείγμα

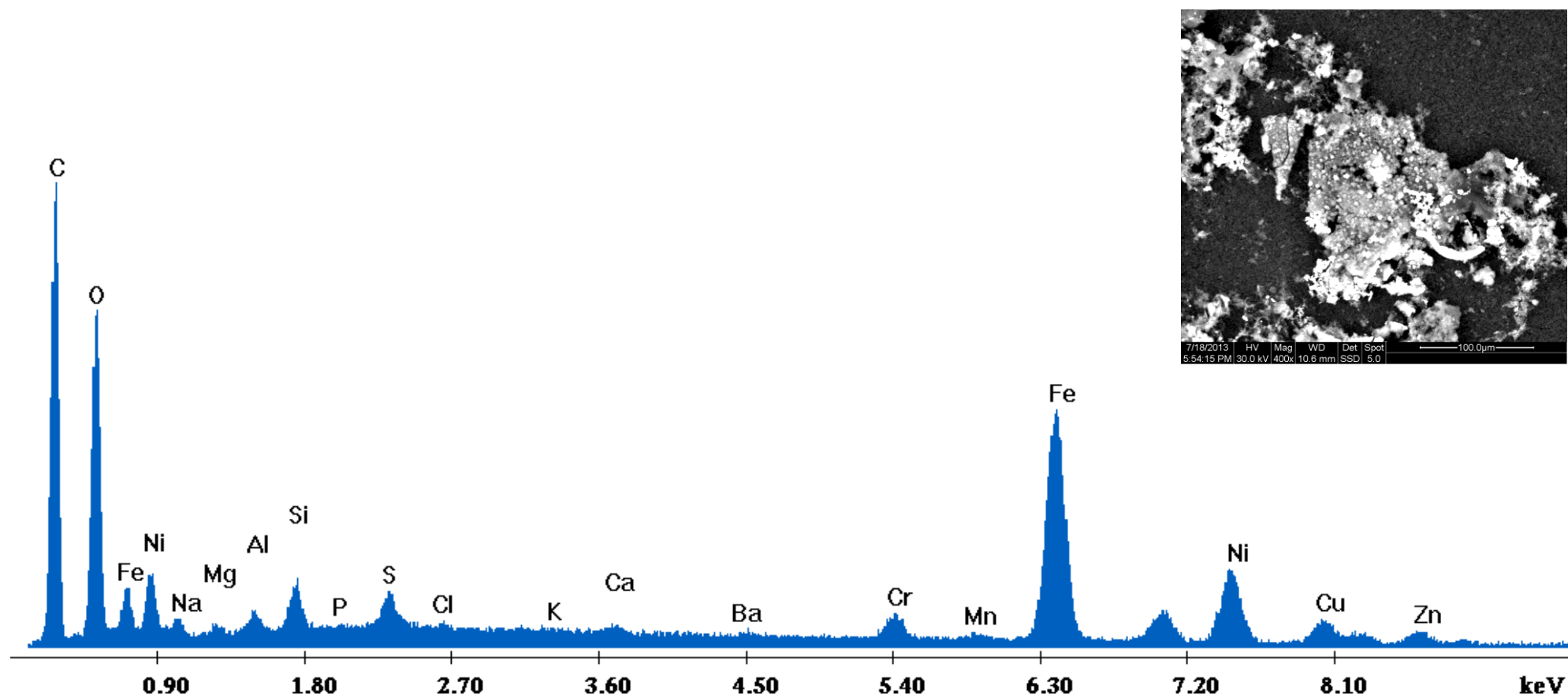
Η κατά μάζα σύσταση και η ποσοστιαία εμφάνιση των στοιχείων ως άτομα δίνεται στο ακόλουθο πίνακα για το έβδομο δείγμα.

Πίνακας 5-21: Κατά μάζα σύσταση 7^{ου} δείγματος στερεού άλατος

Element	Wt %	At %
C	45.56	60.32
O	33.04	32.85
Na	0.42	0.29
Mg	0.33	0.22
Al	0.46	0.27
Si	1.04	0.59
S	0.63	0.31
Cl	0.11	0.05
K	0.08	0.03
Ca	0.17	0.07
Ba	0.21	0.02
Cr	0.74	0.23
Mn	0.13	0.04
Fe	9.72	2.77
Ni	4.51	1.22
Cu	1.75	0.44
Zn	1.03	0.25

Αποτελέσματα αναλύσεων & Σχολιασμός:

Η κατά μάζα σύσταση του τρίτου δείγματος χαρακτηρίζεται από υψηλά επίπεδα οξυγόνου (33.0%), άνθρακα (45.6%) και σιδήρου (9.7%). Σε χαμηλότερα επίπεδα παρατηρείται νικέλιο (4.5%), χαλκός (1.8%). Η σύσταση αυτή παραπέμπει πιθανώς σε προϊόν διάβρωσης και σε κάποιο άλας που περιέχει οξυγόνο, όπως, π.χ. ανθρακικό άλας.



Διάγραμμα 5-34: Φάσμα EDS και SEM εικόνα έβδομου δείγματος άλατος (x400 μεγέθυνση)

5.3 Βελτιστοποίηση πιλοτικής μονάδας

5.3.1 Βελτιστοποίηση ξηραντήρα

Το τελευταίο στάδιο επεξεργασίας του πιλοτικού αποτελεί έναν ηλιακό ξηραντήρα. Το αρχικό σχέδιο του ξηραντήρα παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-27.

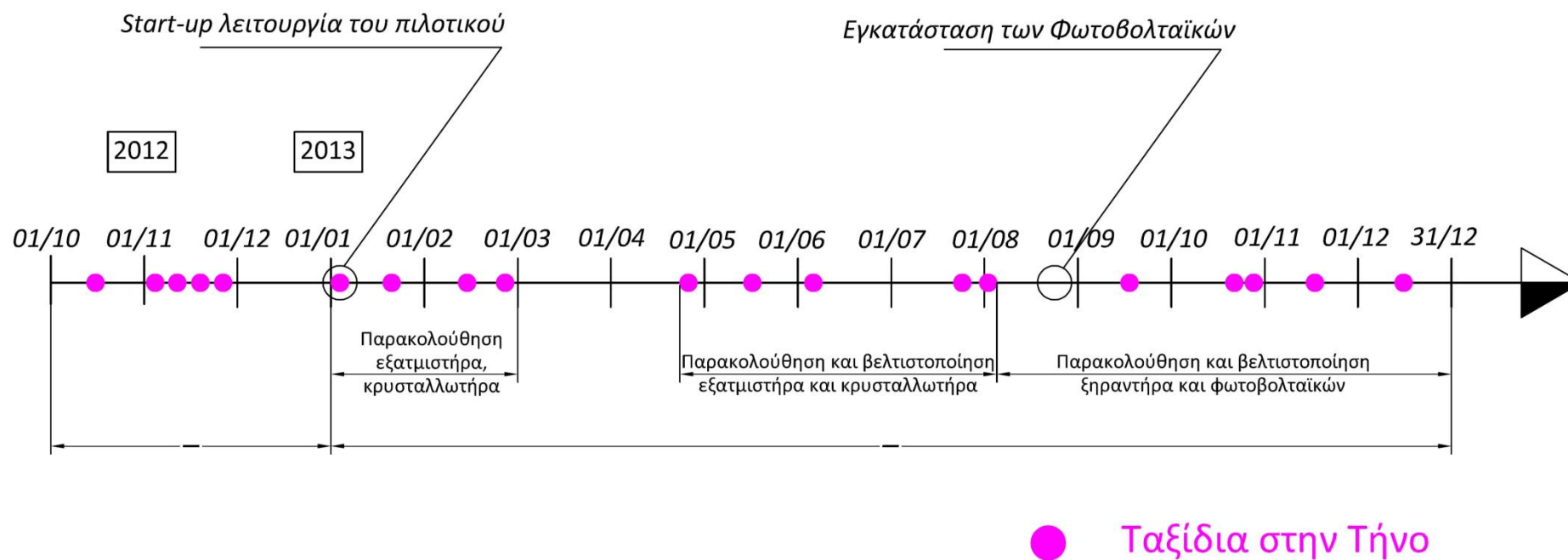


Εικόνα 5-27: Αρχικό σχέδιο του ξηραντήρα

Οι παρεμβάσεις που πραγματοποιήθηκαν στον ξηραντήρα είναι κυρίως πρακτικές και αφορούν τη διευκόλυνση του χειρισμού του. Έτσι, εγκαταστάθηκαν δύο πλαίσια από γαλβανιζέ λαμαρίνα με στόχο:

- την εύκολη τοποθέτηση του υγρού υπολείμματος από τον κρυσταλλωτήρα και την απομάκρυνση του ξηρού άλατος
- την αποφυγή επιμόλυνσης του τελικού παραπροϊόντος με ξένες προσμίξεις (κυρίως σκόνη και νερό, λάσπη σε περίπτωση βροχής)

Κατασκευαστικά επιλέχθηκε ως υλικό γαλβανιζέ λαμαρίνα για προστασία έναντι διάβρωσης, ενώ τοποθετήθηκαν δύο σωλήνες σε απόσταση μεταξύ τους στο κάτω μέρος του κρυσταλλωτήρα, προκειμένου να μειωθεί η τριβή κατά την απομάκρυνση και επανατοποθέτηση των πλαισίων.



Σχήμα 5-9: Επισκέψεις στην πιλοτική μονάδα στην Τήνο και φάσεις λειτουργίας

Εικόνα 5-28: Τοποθέτηση πλαισίων στο ξηραντήρα



5.3.2 Σχεδίαση και εγκατάσταση υποδομής στέγασης

Το πιλοτικό σύστημα επεξεργασίας της άλμης είναι κατασκευασμένο από ανθεκτικά υλικά υψηλών προδιαγραφών (βλ. επίσης Ενότητα 5.1.1). Για το λόγο αυτό το σύστημα αρχικά αποφασίστηκε να προστατευτεί με ένα απλό στέγαστρο.



Εικόνα 5-29: Αρχική άποψη του εγκατεστημένου πιλοτικού συστήματος

Ωστόσο, για λόγους προστασίας του εξοπλισμού όπως επίσης και για διευκόλυνση κατά τη λειτουργία του συστήματος σε δύσκολες συνθήκες (όπως άνεμο, βροχή και νυχτερινές ώρες λειτουργίας), σχεδιάστηκε ειδική υποδομή με τις διαστάσεις και τη διάταξη που φαίνεται στο Σχέδιο 5-2.

Η υποδομή αυτή σχεδιάστηκε έτσι ώστε να επιτελεί τους ακόλουθους σκοπούς:

- Προστασία πιλοτικού συστήματος
- Προσωρινή αποθήκευση δειγμάτων πριν την τελική μεταφορά στο εργαστήριο της Μονάδας Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας
- Δυνατότητα επίδειξης της μονάδας για εκπαιδευτικούς, επιστημονικούς και άλλους σκοπούς (βλ. επίσης Εικόνα 5-31). Ειδικά για να επιτελεστεί ο σκοπός αυτός τοποθετήθηκε συρόμενη πόρτα στη νότια πλευρά του συστήματος

- Εύκολη λειτουργία και συντήρηση του πιλοτικού συστήματος. Για την επιτέλεση αυτού του σκοπού, η υποδομή προέβλεπε δύο μεγάλα ανοίγματα στο βορεινό και ανατολικό τμήμα για τη λειτουργία και συντήρηση του εξατμιστήρα.

Αναφορικά με την κατασκευή, αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω του ύψους του εξατμιστήρα καθώς και των ιδιαίτερων σκοπών που έπρεπε να εξυπηρετήσει, η υποδομή στέγασης δεν υπήρχε διαθέσιμη στο εμπόριο. Ως εκ τούτου, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε επί τούτου. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι πάνελ πολυουρεθάνης.



Εικόνα 5-30: Εγκατάσταση υποδομής στέγασης πιλοτικού συστήματος



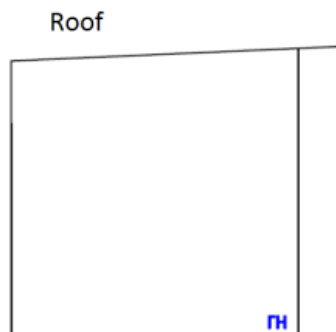
Εικόνα 5-31: Άποψη συστήματος κατά την επίσκεψη ομάδων για εκπαιδευτικούς, επιστημονικούς και άλλους σκοπούς



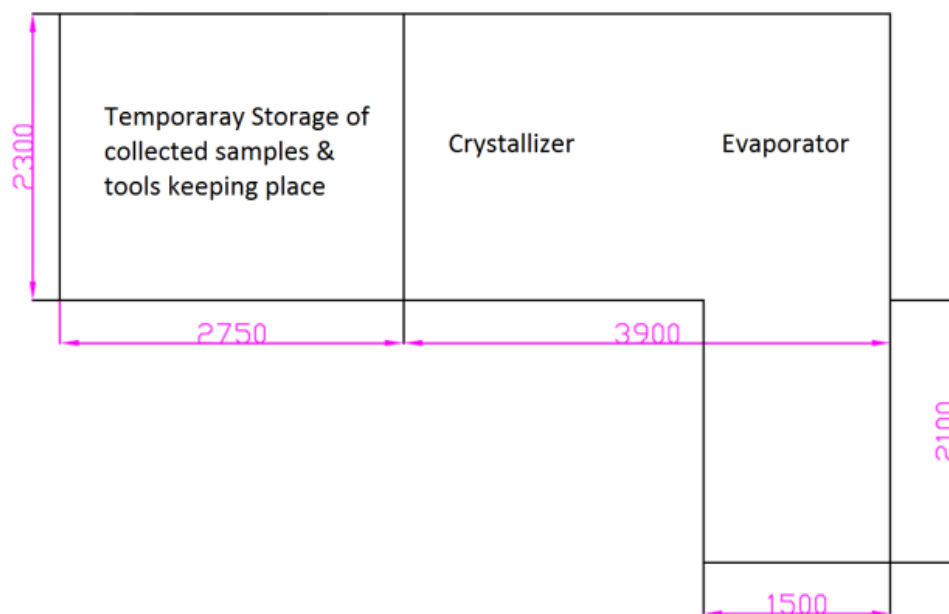
Εικόνα 5-32: Απόψεις από την εγκατεστημένη υποδομή στέγασης του πιλοτικού



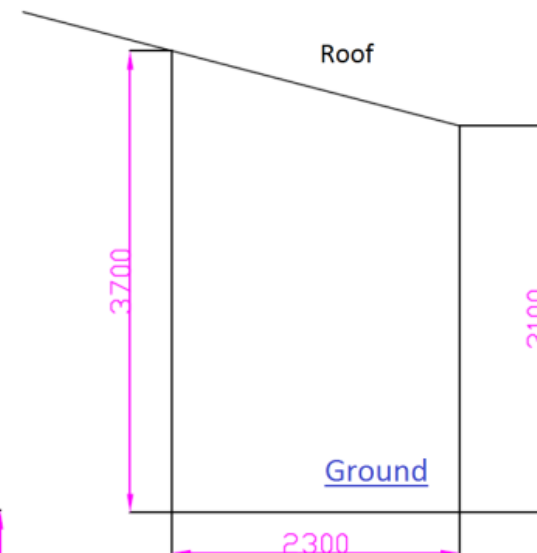
West View



Top View



East View



Σχέδιο 5-2: Διάταξη και διαστάσεις υποδομής στέγασης του πιλοτικού συστήματος

5.3.3 Ανακυκλοφορία της άλμης

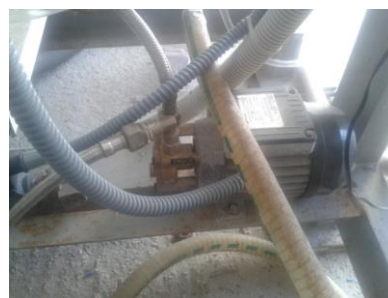
Ο σχεδιασμός του εξατμιστήρα της πιλοτικής μονάδας προβλέπει πως κατά τη λειτουργία επιτυγχάνεται λόγος συμπύκνωσης τέτοιος ώστε στην έξοδο τα Ολικά Διαλυμένα Στερεά να είναι κοντά στο σημείο κρυστάλλωσης του χλωριούχου νατρίου, δηλαδή περίπου 26% (βλ. Ενότητα 2.2.6). Κατά τη λειτουργία του εξατμιστήρα διαπιστώθηκε πως περίπου 39% του νερού μπορούσε να απομακρυνθεί (λόγος συμπύκνωσης ~ 1.64) αντί για 78.6% (λόγος συμπύκνωσης ~ 4.7) που προβλέπει ο σχεδιασμός. Για το λόγο αυτό, αποφασίστηκε να τοποθετηθεί κλάδος ανακυκλοφορίας.

Υλοποίηση συστήματος ανακυκλοφορίας (βλ. Εικόνα 5-33):

1. Δοχείο συλλογής άλμης (υφιστάμενος εξοπλισμός)
2. Αντλία ανακυκλοφορίας (νέος εξοπλισμός)
3. Υδραυλικές συνδέσεις (νέος εξοπλισμός)
4. Αισθητήρια για την παρακολούθηση (θερμοκρασίας, πίεσης και ροόμετρο) και τον έλεγχο (αγωγιμόμετρο) της διεργασίας



Αντλία ανακυκλοφορίας



Εικόνα 5-33: Εγκατάσταση συστήματος ανακυκλοφορίας

5.3.4 Ηλιακό σύστημα

Το ηλιακό σύστημα αποτελείται από 17 ηλιακούς συλλέκτες, διατεταγμένους σε έξι σειρές όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 5-34: Άποψη ηλιακού συστήματος

Σε συνθήκες χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας (πρώτες πρωινές ώρες, απογευματινές ώρες, συννεφιά) παρατηρήθηκε δυσλειτουργία του ηλιακού συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, τα αισθητήρια θερμοκρασίας έδειχναν πτώση θερμοκρασίας κατά τη ροή του εργαζόμενου μέσου μέσα στους ηλιακούς συλλέκτες.

Η αιτία για την αναστροφή του θερμοκρασιακού προφίλ οφειλόταν σε κλίση της πλατφόρμας από μπετόν. Λόγω κλίσης του δαπέδου, παρατηρήθηκε το φαινόμενο του θερμοσιφωνισμού σε περιόδους μη λειτουργίας του κυκλοφορητή. Σύμφωνα με τον αυτοματισμό του ηλιακού συστήματος, ο κυκλοφορητής εκκινούσε θερμοκρασιακή διαφορά τουλάχιστον 5°C στην είσοδο και έξοδο του ηλιακού πεδίου. Για $\Delta T < 5^{\circ}\text{C}$, ο κυκλοφορητής σταματούσε. Στα χρονικά διαστήματα αυτά παρατηρήθηκε το φαινόμενο του θερμοσιφωνισμού που αναφέρεται παραπάνω.

Για την επίλυση του προβλήματος αυτού, έγιναν οι κατάλληλες παρεμβάσεις στη μεταλλική βάση του ηλιακού πεδίου, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 5-35: Διόρθωση κλίσης μεταλλικής βάσης ηλιακού πεδίου

5.3.5 Εγκατάσταση ηλεκτρικών θερμαντήρων

Για τη συνεχή λειτουργία του συστήματος, ακόμα και σε περιόδους μειωμένης ή και μηδαμινής ηλιακής ακτινοβολίας (νυχτερινές ώρες) εγκαταστάθηκαν δύο ηλεκτρικοί θερμαντήρες ειδικού σχεδιασμού συνολικής ισχύος 10kW. Ένας ηλεκτρικός θερμαντήρας είναι εγκατεστημένος στον κλάδο τροφοδοσίας της άλμης και ένας στον κλάδο ανακυκλοφορίας.



Εικόνα 5-36: Εγκατάσταση ηλιακού θερμαντήρα, κλάδος ανακυκλοφορίας (πάνω) και κλάδος τροφοδοσίας της άλμης (κάτω)

5.4 Προτάσεις ανάπτυξης σε πλήρη κλίμακα

Το πιλοτικό σύστημα επεξεργασίας της άλμης έχει δυναμικότητα 2 m³/ημέρα. Μία τυπική μονάδα βιομηχανικού μεγέθους έχει δυναμικότητα 1,000 m³/ημέρα. Για το λόγο αυτό, η κλίμακα που θα χρησιμοποιηθεί για τους υπολογισμούς ακολούθως είναι 100 m³/ημέρα. Ένα τέτοιο σύστημα είναι 50 φορές μεγαλύτερο από το υπάρχον πιλοτικό και θεωρήθηκε πως αποτελεί πιο λογικό επόμενο βήμα ανάπτυξης της τεχνολογίας. Άλλωστε, η δυναμικότητα των 1,000 m³/ημέρα μπορεί να επιτευχθεί βάζοντας 10 παράλληλα συστήματα των 100 m³/ημέρα. Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να τονιστεί ότι για την επίτευξη αλάτων υψηλής καθαρότητας αναμένεται πως η τελική διάταξη θα περιλαμβάνει και συνδυασμό με τεχνικές μεμβρανών όπως νανοδιήθηση, ηλεκτροδιάλυση, ιοντοεναλλαγή κ.λπ.

5.4.1 Εξοπλισμός επεξεργασίας άλμης

5.4.1.1 Εξατμιστήρας

Ο σχεδιασμός του εξατμιστήρα θα περιλαμβάνει 10 βαθμίδες που λειτουργούν σε σταδιακά μειούμενη στάθμη πίεσης (κενό), όπως στο πιλοτικό σύστημα. Σε κάθε βαθμίδα, η άλμη εξατμίζεται και δύο ρεύματα δημιουργούνται:

1. Ένα ρεύμα ατμού, το οποίο στη συνέχεια συμπυκνώνεται και ανακτάται ως απιονισμένο νερό. Έτσι, παράλληλα αξιοποιείται και η λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης, η οποία προσφέρεται για να καλύψει όλες τις ανάγκες ατμοποίησης της επόμενης βαθμίδας. Έτσι, απαιτείται πρόσδοση θερμότητας από εξωτερική πηγή μόνο στην πρώτη βαθμίδα, επιτυγχάνοντας υψηλή θερμοδυναμική απόδοση
2. Ένα ρεύμα συμπυκνωμένης άλμης, η οποία διοχετεύεται στην επόμενη βαθμίδα. Η έξοδος από τον 10-βάθμιο εξατμιστήρα πρέπει να είναι κοντά στο σημείο κρυστάλλωσης του χλωριούχου νατρίου (TDS: ~ 260,000 ppm)

Μία από τις σημαντικότερες διαφορές του συστήματος εξάτμισης που σχεδιάστηκε στα πλαίσια αυτής της διατριβής με τους καθιερωμένους εξατμιστήρες πολλαπλών βαθμίδων (MED) είναι ότι ο εν λόγω εξατμιστήρας έχει διάταξη εμπρόσθιας τροφοδοσίας (forward feed design) και όχι παράλληλης τροφοδοσίας (parallel feed design). Σχεδόν όλοι οι εμπορικοί εξατμιστήρες MED είναι τύπου παράλληλης τροφοδοσίας και δεν μπορούν να πετύχουν υψηλούς λόγους συμπύκνωσης

(concentration factor: ~ 1.4). Ο εξατμιστήρας που σχεδιάστηκε στη διατριβή πετυχαίνει λόγο συμπύκνωσης περίπου ίσο με 7:1. Επίσης, ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι η διάταξη της πλήρους κλίμακας με τις 10 βαθμίδες μπορεί να γίνει έτσι ώστε να επιτρέπει κλασματική εξάτμιση (fractional evaporation) κάτι το οποίο αναμένεται πως θα συνδράμει σημαντικά προς την κατεύθυνση διαχωρισμού των αλάτων (βλ. επίσης Σχήμα 6-2). Ακολούθως δίνονται οι τεχνικές προδιαγραφές του εξατμιστήρα για δυναμικότητα επεξεργασίας της άλμης $100 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$.

Πίνακας 5-22: Τεχνικές προδιαγραφές εξατμιστήρα πλήρους κλίμακας

Ονομαστική δυναμικότητα παραγωγής νερού	$73 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$
Κατανάλωση θερμικής ισχύος	200kW
Ποιότητα παραγόμενου νερού	50 ppm TDS
Δυναμικότητα επεξεργασίας άλμης	$100 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$
Συγκέντρωση συμπυκνωμένης άλμης στην έξοδο	26%
Αριθμός βαθμίδων	10

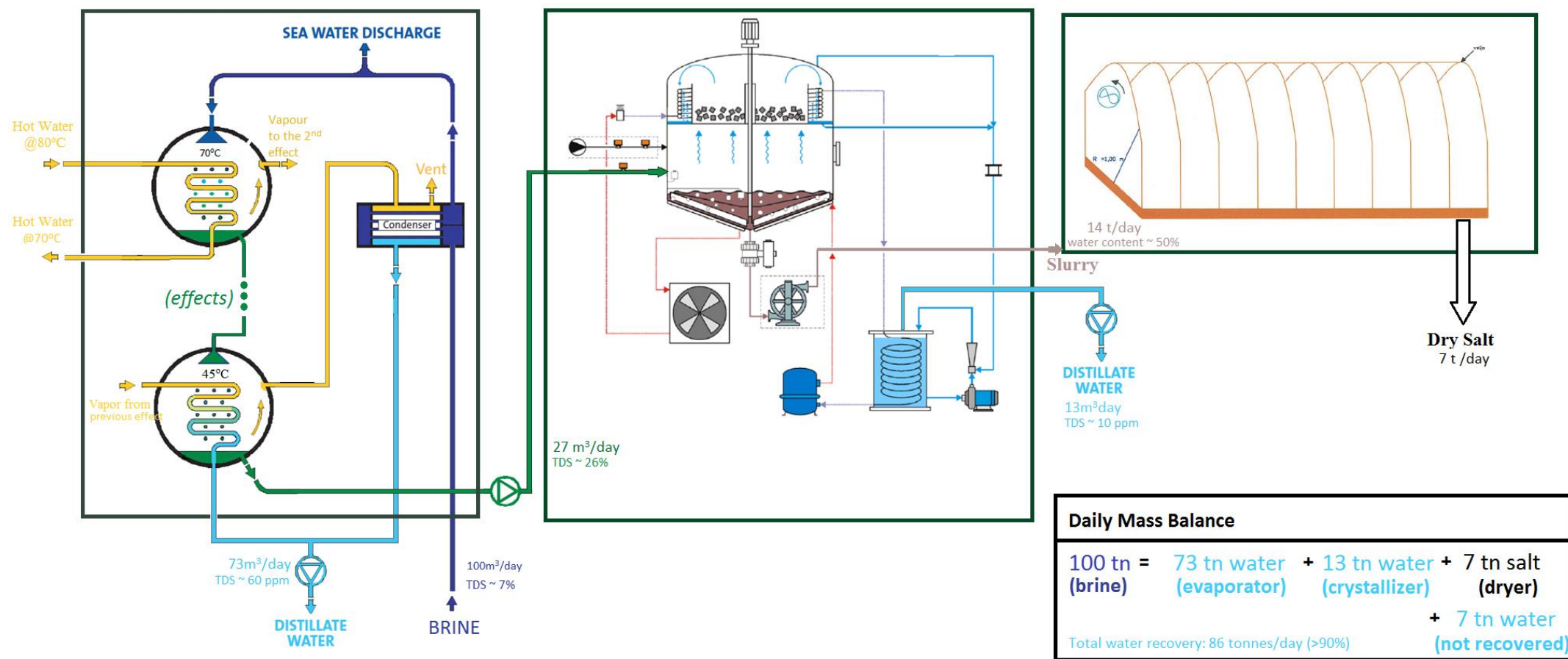
Σημείωση: Η θερμική ισχύς μπορεί να μειωθεί αισθητά με τη χρήση συστήματος ανάκτησης/αξιοποίησης της θερμικής ισχύος της τελευταίας βαθμίδας είτε με τη χρήση συμπιεστή ατμού είτε με τη χρήση αντλίας θερμότητας.

5.4.1.2 Κρυσταλλωτήρας

Τόσο ο κρυσταλλωτήρας όσο και ο εξατμιστήρας βασίζονται στην αρχή της εξάτμισης υπό κενό. Ο κρυσταλλωτήρας θα αποτελείται από μία βαθμίδα και θα χρησιμοποιεί μηχανική επανασυμπίεση ατμού (ή αντλία θερμότητας) για την αύξηση του ενεργειακού βαθμού απόδοσης. Δεδομένου ότι στο σύστημα πλήρους κλίμακας στόχος θα είναι επίσης η ανάκτηση αλάτων υψηλής καθαρότητας, ο κρυσταλλωτήρας μπορεί να συνδυαστεί με διαφορετικά στάδια συμπύκνωσης του εξατμιστήρα. Έτσι, τα ρεύματα που θα φτάνουν στον κρυσταλλωτήρα μπορεί να είναι εκτός από την τελική έξοδο με συγκέντρωση άλμης 26%, κάποια ρεύματα ενδιάμεσης συμπύκνωσης στα οποία έχει αρχίσει ήδη η κρυστάλλωση άλλων ενώσεων, σύμφωνα με τη σειρά καθίζησής τους (βλ. επίσης Ενότητα 6.1.1).

5.4.2 Ξηραντήρας

Τελικό στάδιο επεξεργασίας για την ξήρανση των αλάτων πριν τη διάθεσή τους στις τελικές αγορές. Ακολούθως δίνεται το διάγραμμα ροής του συστήματος επεξεργασίας της άλμης με δυναμικότητα $100 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$.



Διάγραμμα 5-35: Διάγραμμα ροής μονάδας επεξεργασίας της άλμης πλήρους κλίμακας

5.4.3 Σύστημα ενεργειακής τροφοδοσίας

Για την κάλυψη των θερμικών ενεργειακών αναγκών του συστήματος, τρία διαφορετικά σενάρια εξετάστηκαν. Τα σενάρια αυτά παρουσιάζονται στις ακόλουθες ενότητες.

5.4.3.1 Σενάριο 1: Ηλιακή ενέργεια (στατικοί ηλιακοί συλλέκτες κενού)

Η θερμική ενέργεια (200 kW) μπορεί να προσφερθεί από ηλιακό πεδίο αποτελούμενο από ηλιακούς συλλέκτες, οι οποίοι φτάνουν το επιθυμητό θερμοκρασιακό εύρος (80°C). Τα διαφορετικά είδη ηλιακών συλλεκτών και οι επιτυγχανόμενες θερμοκρασίες λειτουργίας συζητούνται εκτενώς στην Ενότητα 4.1.5.2. Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 4-6 της ενότητας αυτής, ακόμα και επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες φτάνουν οριακά τη θερμοκρασία λειτουργίας. Ωστόσο, προτείνεται η χρήση παραβολικών συλλεκτών τύπου CPC, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η θερμοκρασία αυτή ακόμη και με μικρότερη ηλιακή ακτινοβολία.

Διαστασιολόγηση ηλιακού πεδίου:

Οι θερμικές ανάγκες σε ετήσια βάση είναι ίσες προς 1,752,000 kWh. Υποθέτοντας συντελεστή θερμικής απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη περίπου 0.5 και με βάση τα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας για την περιοχή που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-23 (1,792.15 kWh/m²/year) η επιφάνεια του ηλιακού πεδίου, μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως:

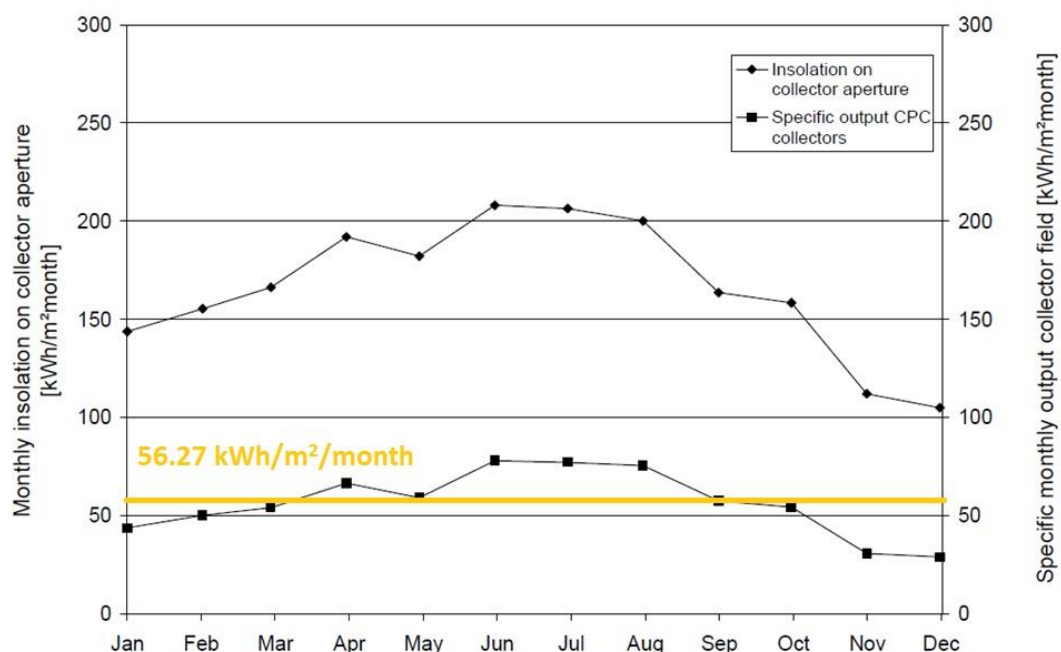
$$Area = \frac{Q_{thermal}}{Q_{solar} * n} = \frac{1,752,000 \frac{kWh}{year}}{1,792.15 \frac{kWh}{m^2 \cdot year} * 0.5} = 1,955.2 m^2$$

Ωστόσο, προκειμένου να μετριάστεί τόσο το κόστος του εξοπλισμού για τα ηλιακά πεδία και την αποθήκευση, όσο και η συνολική απαιτούμενη επιφάνεια, προτείνεται η υβριδική λειτουργία του συστήματος ενεργειακής τροφοδοσίας. Προτείνεται έτσι η χρήση λέβητα φυσικού αερίου. Για την διαστασιολόγηση του υβριδικού συστήματος ενεργειακής τροφοδοσίας έγινε βιβλιογραφική έρευνα και εντοπίστηκε η περίπτωση ενός συστήματος παραπλήσιας σκοπιμότητας και μεγέθους στην Ισπανία. Το σύστημα αυτό παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Περιγραφή συστήματος AQUA-SOL, Almeria, Ισπανία

Το σύστημα ηλιακής αφαλάτωσης περιγράφεται στην Ενότητα 4.1.5.3. Όπως αναφέρεται και σε αυτή την ενότητα, ο εξατμιστήρας είναι τύπου MED και αποτελείται από 14 βαθμίδες. Η συνολική θερμική ισχύς που απαιτείται για τη λειτουργία του είναι 160kW. Μετά την εγκατάσταση αντλίας θερμότητας, η θερμική κατανάλωση έπεσε από τα 62.4 στα 37.4 kWh/m³ (Alarcón D. , et al., 2006b)

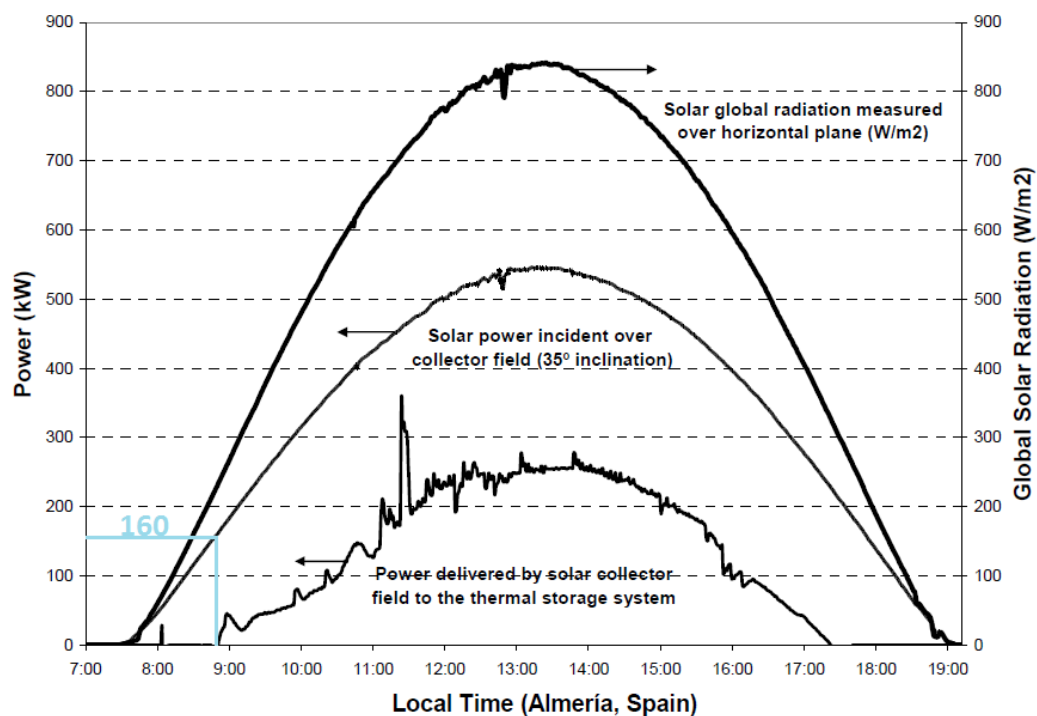
Η ηλιακή ενέργεια συλλέγεται από ηλιακό πεδίο 252 στατικών συλλεκτών τύπου CPC (CPC Ao Sol 1.12x) με συνολική επιφάνεια συλλογής 498.96 m². Η διάταξη των συλλεκτών είναι τέσσερις σειρές των 63 συλλεκτών (Alarcón-Padilla, Blanco-Gálvez, García-Rodríguez, Gernjak, & Malato-Rodríguez, 2008).



Διάγραμμα 5-36: Κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας και θερμικής απόδοσης ανά μήνα ηλιακού πεδίου, σύστημα AQUASOL

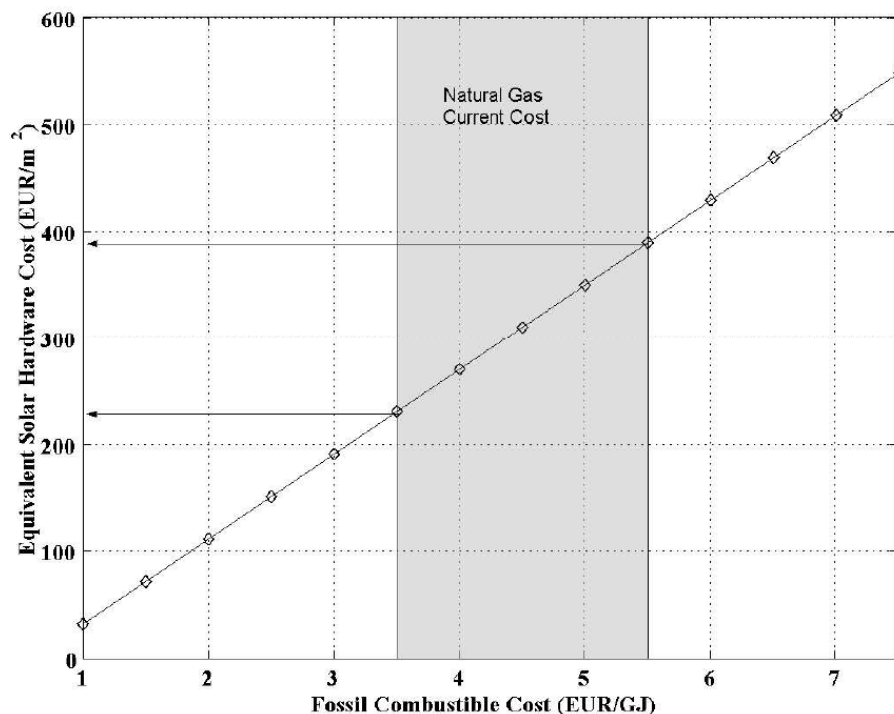
Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα η μέση θερμική απόδοση του ηλιακού συλλέκτη είναι ίση με 56.27 kWh/m²/month. Δεδομένου ότι ο κάθε συλλέκτης έχει επιφάνεια 1.98m², η προσομοίωση έδειξε πως απαιτούνται 600 συλλέκτες για να καλύψουν το θερμικό φορτίο.

Με την τοποθέτηση αντλίας θερμότητας οι θερμικές απαιτήσεις μειώθηκαν από τα 200kW στα 90kW, κάτι το οποίο συνεπάγεται στην πράξη και υποδιπλασιασμό της απαιτούμενης επιφάνειας συλλογής του ηλιακού πεδίου (270 συλλέκτες).



Προσαρμοσμένο από (Alarcón D. , Blanco, Malato, Maldonado, & Fernandez, 2006)

Διάγραμμα 5-37: Θερμική απορροφώμενη ισχύς από τους ηλιακούς συλλέκτες, έργο AQUASOL



Πηγή: (Blanco, Alarcon, Zarza, Malato, & Leon, 2002)

Διάγραμμα 5-38: Εκτιμώμενο κόστος καυσίμου συναρτήσει του αντίστοιχου κόστους εξοπλισμού ηλιακού πεδίου (υπόθεση: solar fraction 50%)

Αξιοποιώντας την εμπειρία από το σύστημα AQUASOL, εκτιμώνται οι ανάγκες για το σύστημα πλήρους κλίμακας επεξεργασίας της άλμης ως ακολούθως. Τα ηλιακά δεδομένα για την περιοχή δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

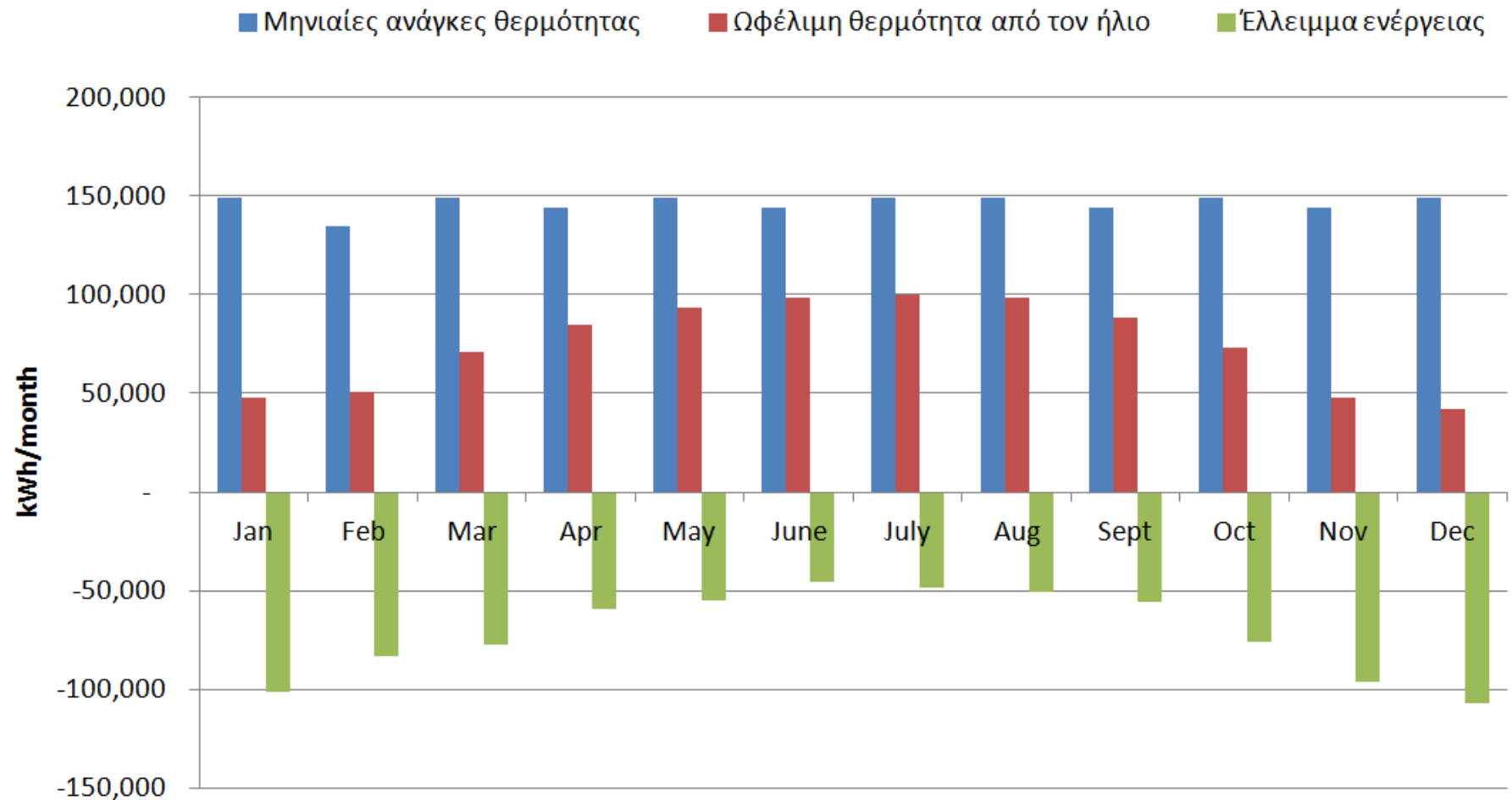
Πίνακας 5-23: Ηλιακά δεδομένα για την περιοχή του Αγίου Φωκά, Τήνος

Μήνας	Hopt (Wh/m ² /ημέρα)
Ιανουάριος	3,080
Φεβρουάριος	3,640
Μάρτιος	4,600
Απρίλιος	5,630
Μάιος	6,040
Ιούνιος	6,560
Ιούλιος	6,460
Αύγουστος	6,340
Σεπτέμβριος	5,880
Οκτώβριος	4,700
Νοέμβριος	3,170
Δεκέμβριος	2,700
Ετήσιο	4,910
Hopt	Ημερήσια ολική ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο με κλίση βέλτιστη

Το υβριδικό σύστημα θα λειτουργεί με solar fraction 50%, δηλαδή μισή από την ενέργεια θα προσφέρεται από το ηλιακό πεδίο και η υπόλοιπη μισή από λέβητα φυσικού αερίου. Το ηλιακό πεδίο θα έχει επιφάνεια 1,000 m², ενώ με τη χρήση του Διάγραμμα 5-38 το κόστος του συστήματος του φυσικού αερίου (για τυπικό μοναδιαίο κόστος ηλιακού πεδίου ίσο με 200€/m²) εκτιμάται στα 3.5€/GJ. Στο Διάγραμμα 5-39, παρουσιάζεται το έλλειμμα θερμικής ενέργειας για ηλιακό σύστημα με επιφάνεια συλλέκτη 1,000 m².

Πίνακας 5-24: Τεχνικές προδιαγραφές ηλιακού πεδίου (Σενάριο 1)

Τύπος ηλιακού συλλέκτη	Compound Parabolic Collectors
Θερμική Ισχύς	210kW
Επιφάνεια ηλιακού πεδίου (m ²)	1,000m ²
Όγκος συστήματος θερμικής αποθήκευσης	25m ³
Υβριδικό σύστημα	Λέβητας (φυσικό αέριο)



Διάγραμμα 5-39: Ανάγκες θερμότητας ανά μήνα του έτους, ωφέλιμη θερμότητα από τον ήλιο και έλλειμμα θερμικής ενέργειας για σύστημα πλήρους κλίμακας επεξεργασίας της άλμης

5.4.3.2 Σενάριο 2: Ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας από βιομηχανία

Το σύστημα επεξεργασίας της άλμης που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο αυτής της διατριβής χρησιμοποίησε ηλιακή ενέργεια για την τροφοδοσία του συστήματος. Ωστόσο, η χρήση της ενέργειας αυτής παρουσιάζει κάποιους περιορισμούς όπως:

- Το ηλιακό δυναμικό είναι κατάλληλο για τις χώρες της νοτίου Ευρώπης
- Η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στη μέρα, καθώς επίσης και οι νυχτερινές ώρες απαιτούν τη χρήση συστήματος αποθήκευσης, κάτι το οποίο αυξάνει περαιτέρω το κεφαλαιουχικό κόστος
- Απαίτηση μεγάλων εκτάσεων γης.

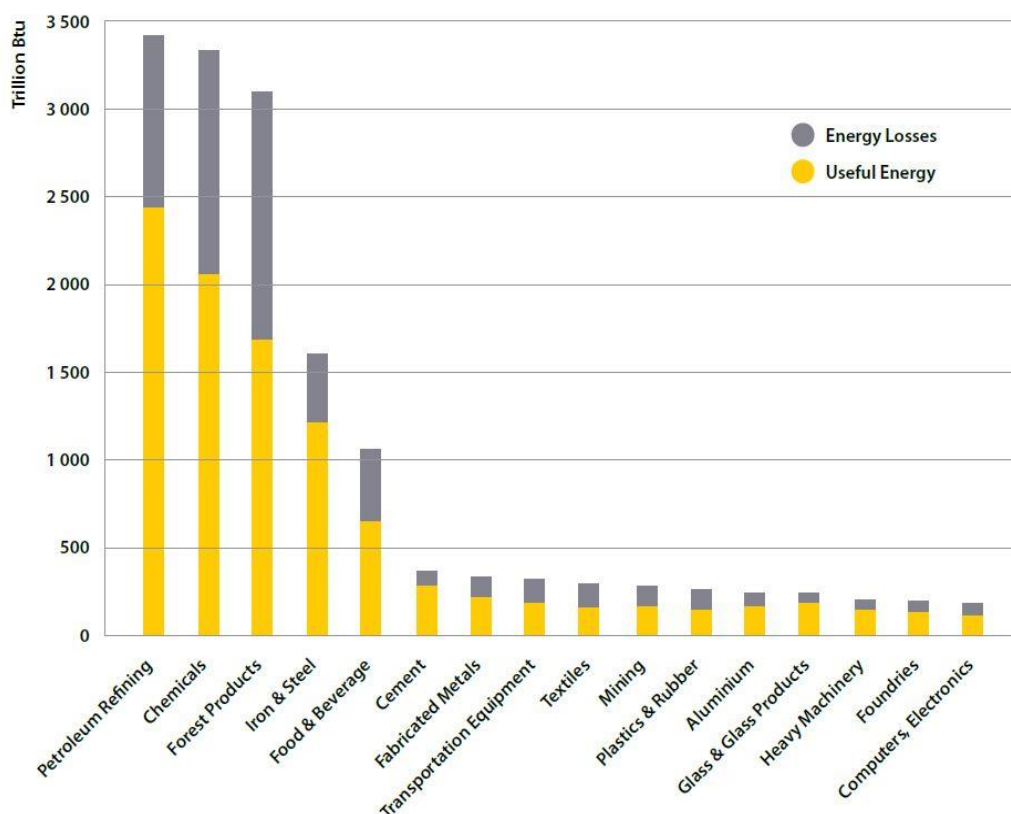
Για τους λόγους αυτούς, διατυπώνεται και αυτό το δεύτερο σενάριο, το οποίο αφορά στην ανάκτηση θερμότητας κυρίως από βιομηχανικές ενεργειακές ροές, οι οποίες δεν αξιοποιούνται. Η ροή αυτή μπορεί να αποτελεί απορριπτόμενη θερμότητα υπό τη μορφή των υγρών αποβλήτων ή των καυσαερίων. Σύμφωνα με τον οδηγό που έχει δημοσιεύσει σχετικά πρόσφατα το SPIRE¹⁶, η βιομηχανία μεταποίησης απορρίπτει περίπου 20% – 50% θερμότητα η οποία θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για άλλους σκοπούς (βλ. επίσης) (SPIRE, 2013).

Οι Li, Goswami, Shapiro, Stefanakos, & Demirkaya (2012) δημοσιεύουν τα αποτελέσματα από τη μαθηματική μοντελοποίηση συστήματος MED, τύπου forward-feed, για συμπύκνωση της άλμης με χρήση θερμότητας χαμηλής στάθμης. Καταλήγουν ότι με προσεκτικό σχεδιασμό του θερμικού συμπιεστή, μπορεί να επιτευχθεί συμπύκνωση της άλμης με χρήση μόνο θερμικής ενέργειας (χωρίς πρόσθετη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας).

Χρήση ατμού χαμηλής πίεσης (μετά τη μερική εκτόνωση του ατμού σε ατμοστρόβιλο)

Αντί να απορρίπτονται μεγάλα ποσά θερμότητας μέσω ψύξης, οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής μπορούν να προσφέρουν τη θερμική ενέργεια αυτή για τη λειτουργία ενός συστήματος επεξεργασίας άλμης. Ο συνδυασμός του συστήματος με έναν τυπικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής δίνεται στο Σχήμα 5-10.

¹⁶ Sustainable Process Industry through Resource and Energy efficiency ([SPIRE](#))



Πηγή: (SPIRE, 2013)

Διάγραμμα 5-40: Ενεργειακή αξιοποίηση και απορριπτόμενη θερμότητα στη βιομηχανία μεταποίησης της Αμερικής

Ανάκτηση ενέργειας από θερμά καυσαέρια

Η θερμότητα των θερμών καυσαερίων που εκπέμπονται από πολλές βιομηχανικές μονάδες, μπορεί να ανακτηθεί με τη χρήση κατάλληλων εναλλακτών θερμότητας. Στο Σχέδιο 5-3, δίνεται το σχέδιο ενός τέτοιου τύπου λέβητα ανάκτησης θερμότητας.

Για την πρόσδοση της απαιτούμενης θερμικής ισχύος στο σύστημα επεξεργασίας της άλμης, θα απαιτηθεί μία συγκεκριμένη παροχή μάζας όπως υπολογίζεται ακολούθως.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta\theta$$

Όπου:

- $\dot{Q}$, απαιτούμενη θερμική ισχύς
- $\dot{m}$, παροχή μάζας

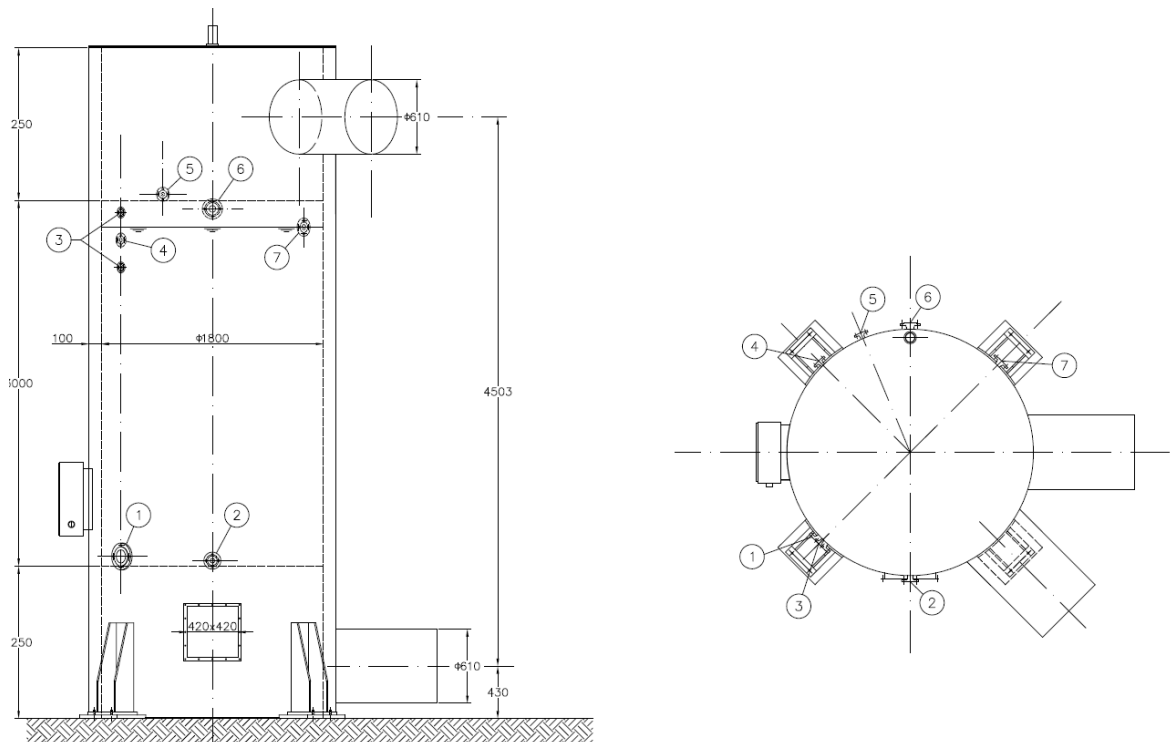
- c_p , ειδική θερμοχωρητικότητα νερού (4.187 kJ/kgK)
- $\Delta\theta$, θερμοκρασιακή διαφορά λειτουργίας εναλλάκτη (είσοδος έξοδος)

Υποθέσεις:

- $\dot{Q}$: Όπως αναφέρεται στον , οι θερμικές απαιτήσεις θεωρούνται ίσες με 200kW
- $\Delta\theta = 10^\circ\text{C}$.

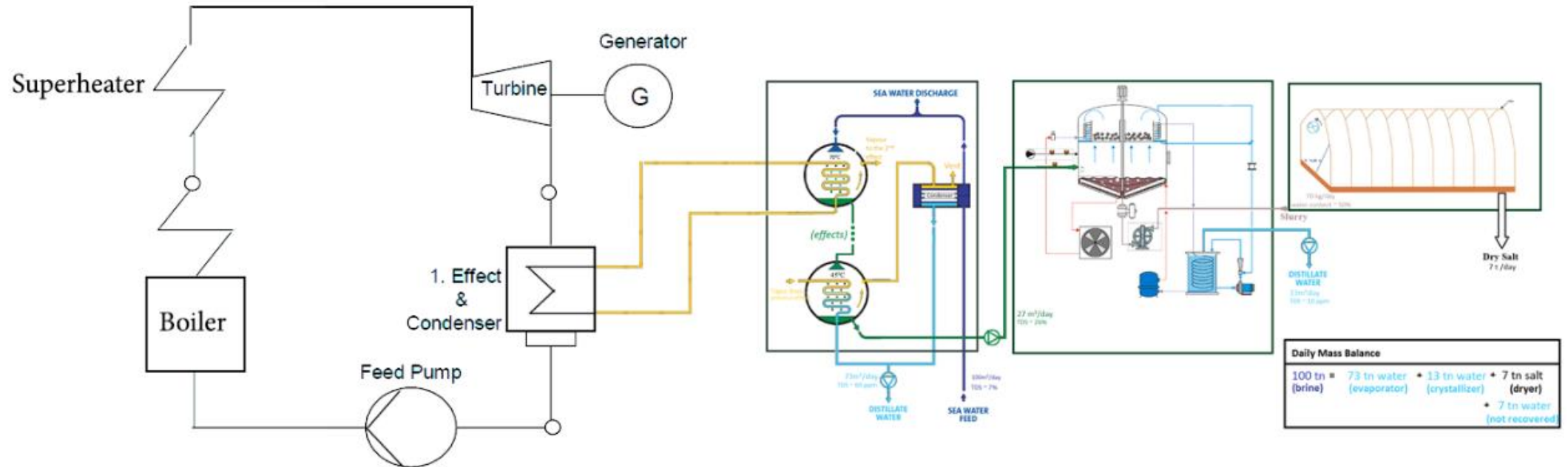
Έτσι, η παροχή μάζας υπολογίζεται ίση προς:

$$200 \text{ kW} = \dot{m} \cdot 4.187 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 10\text{K} \rightarrow \dot{m} = 4.8 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 17,196 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \approx 413 \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$



Σημείωση: το σχέδιο αποτελεί ευγενική χορηγία της εταιρείας Θερμοσωλ Ατμολεβητες Α.Ε.

Σχέδιο 5-3: Σχέδιο λέβητα ανάκτησης θερμότητας από καυσάεργια



Σχήμα 5-10: Συνδυασμός συστήματος επεξεργασίας της άλμης με μονάδα ηλεκτροπαραγωγής για ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας

5.4.3.3 Concentrating Solar Power (CSP)

Η ενότητα αυτή δεν αποτελεί σενάριο που θα αξιολογηθεί στη συνέχεια, δεδομένου ότι η τεχνολογία CSP ακόμα δεν έχει φτάσει σε εμπορική κλίμακα ευρείας εφαρμογής. Ωστόσο, δεδομένου ότι θεωρείται μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, κρίθηκε σημαντικό να συζητηθούν στην ενότητα αυτή κάποιες βασικές παράμετροι.

Προτείνεται η ανάπτυξη συστημάτων τριπλού σκοπού (triple purpose plant), δηλαδή παραγωγή:

- Ενέργειας
- Νερού
- Αλάτων

Με τη χρήση της τεχνολογίας των συγκεντρωτικών συλλεκτών. Τα τεχνικά στοιχεία του συστήματος είναι τα ακόλουθα:

- Τύπος συλλεκτών: **Parabolic Trough Collectors (PTC)**
- Θερμοδυναμικός κύκλος: **Συμβατικός ή Οργανικός κύκλος Rankine**
- Σύζευξη με σύστημα άλμης: **Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-10**

Όταν εξετάζονται συστήματα CSP, η κρίσιμη παράμετρος για την αξιολόγηση της σκοπιμότητας μίας τέτοιας εφαρμογής είναι η άμεση κάθετος ακτινοβολία (Direct Normal Irradiance, DNI)¹⁷. Στο Σχήμα 5-11 δίνεται ένας χάρτης με το ηλιακό δυναμικό DNI για την περιοχή της Νότιας Ευρώπης και της Βόρειας Αφρικής (Euro MENA region).

Κατά τη σύγκριση του ηλιακού δυναμικού DNI με άλλες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι εφαρμογές CSP κρίνονται ιδιαίτερα σημαντικές για τις ακόλουθες Ευρωπαϊκές χώρες (βλ. επίσης Πίνακα 5-25):

- Κύπρος
- Μάλτα
- Πορτογαλία

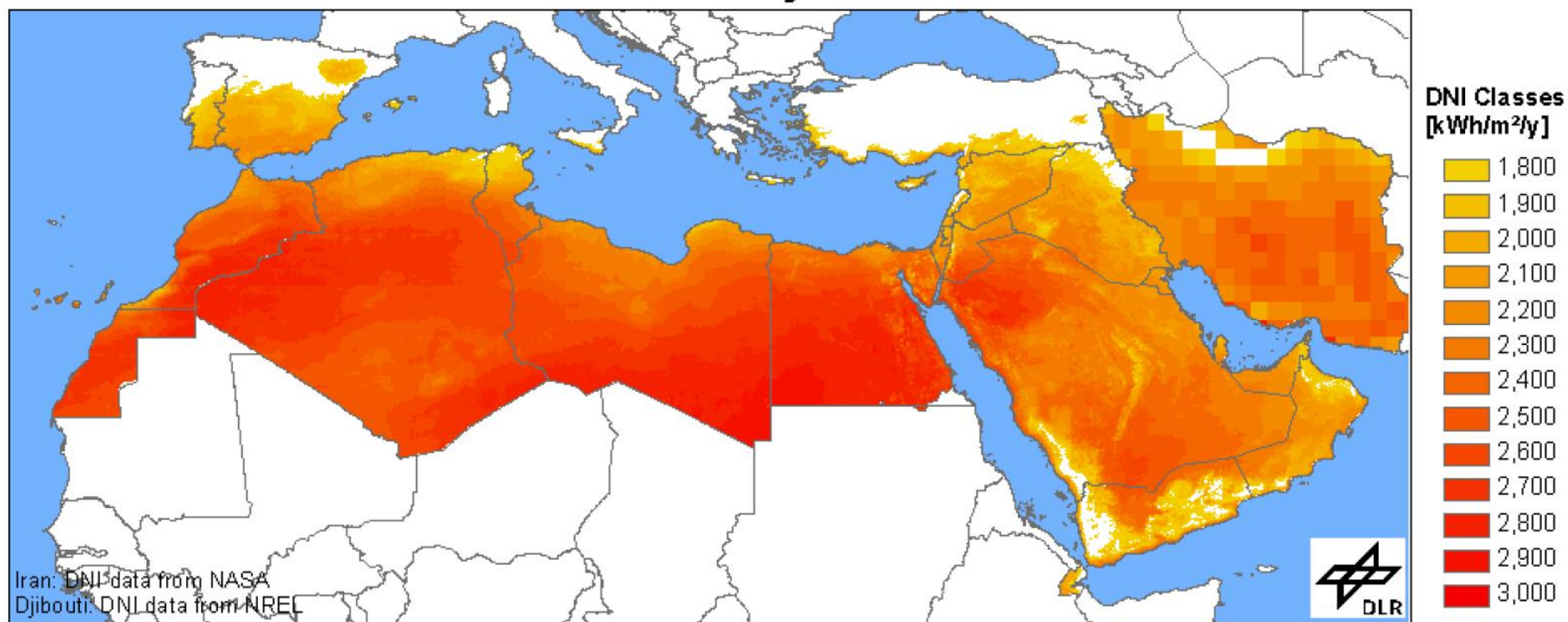
¹⁷ Άμεση είναι η ακτινοβολία που είναι κάθετη σε επιφάνεια που ακολουθεί την πορεία του ήλιου. Η άμεση ακτινοβολία δεν περιλαμβάνει το κλάσμα της διάχυτης ακτινοβολίας.

- Ισπανία

Τέλος, για τη μελέτη εφαρμογής ενός συστήματος CSP, εκτός από το ηλιακό δυναμικό, πρέπει να εξετάζονται και άλλες παράμετροι που μπορεί να μην επιτρέπουν τη δυνατότητα εγκατάστασης τέτοιων συστημάτων. Τέτοιες παράμετροι, μεταξύ άλλων, περιλαμβάνουν:

- Περιοχή με ποτάμια, λίμνες
- Αστικές περιοχές (ειδικά με υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα)
- Υποδομές (όπως π.χ. αεροδρόμια)
- Γεωμορφολογία
- Τοπογραφία.

Μία σχετική μελέτη πραγματοποιήθηκε από το Γερμανικό Κέντρο Αεροδιαστημικής τεχνολογίας, DLR. Με τη χρήση κατάλληλων εργαλείων (GIS), χρησιμοποιήθηκαν τα παραπάνω κριτήρια αποκλεισμού. Το αποτέλεσμα αυτής της δουλειάς είναι ο χάρτης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-12. Η Ισπανία και η Ιταλία φαίνεται πως αποτελούν τις ιδανικότερες περιοχές για ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων στην Ευρώπη.



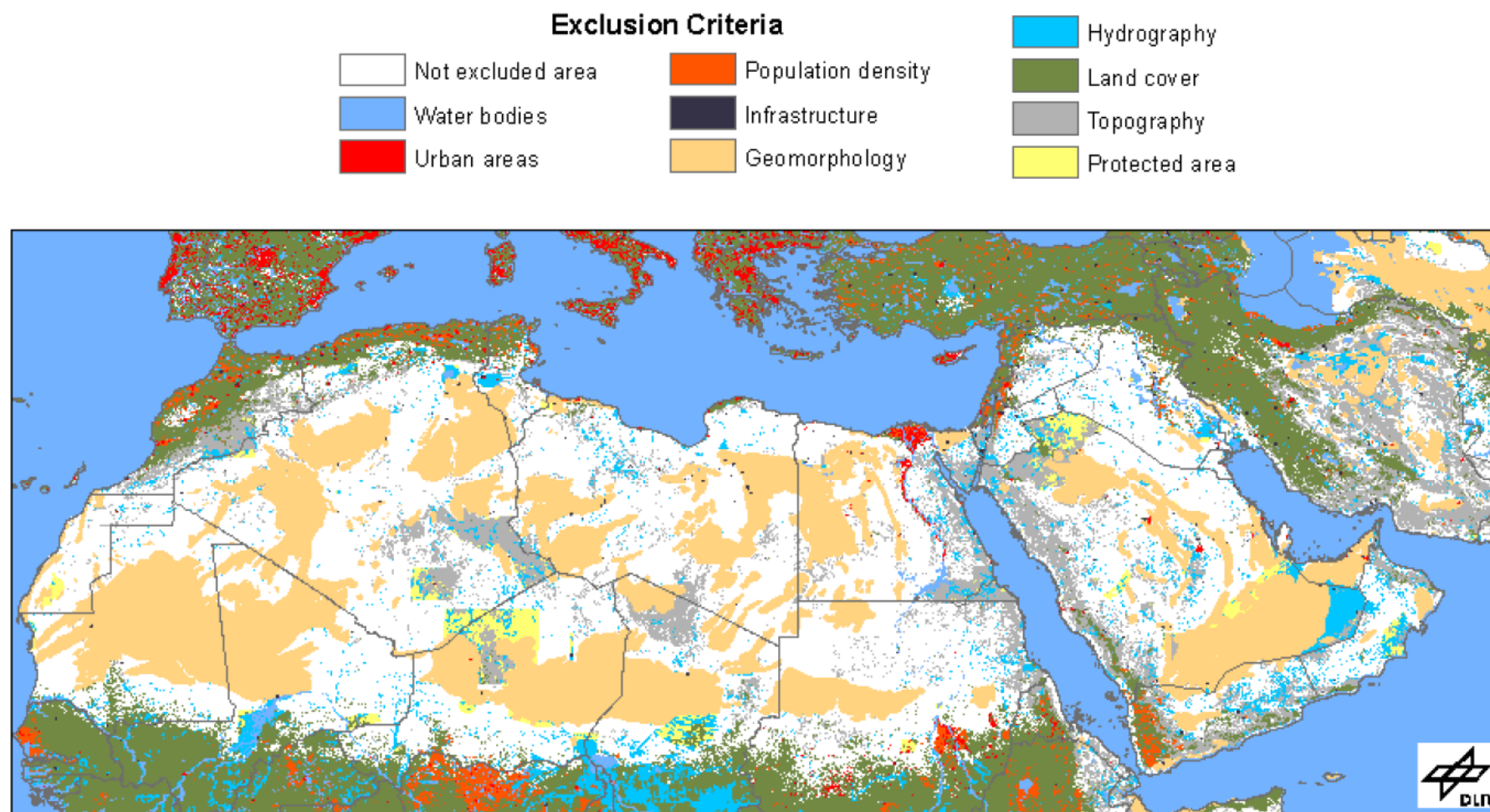
Πηγή: (FICHTNER, 2011)

Σχήμα 5-11: Κάθετη ακτινοβολία σε kWh/m²/χρόνο (2002)

Πίνακας 5-25: Τεχνικά και οικονομικά αποδεκτό δυναμικό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε TWh/χρόνο

	Hydro		Geo		Bio		CSP		Wind		PV	
	Tech.	Econ.	Tech.	Econ.	Tech.	Econ.	Tech.	Econ.	Tech.	Econ.	Tech.	Econ.
Cyprus	24.0	1.0	n.a.	n.a.	n.a.	0.5	23	20	10.0	0.5	n.a.	0.2
Greece	25.0	12.0	n.a.	4.7	n.a.	11.8	44	4	136.0	15.0	n.a.	4.0
Italy	105.0	54.0	n.a.	9.8	n.a.	86.4	88	7	223.0	60.0	n.a.	10.0
Malta	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.2	2	2	n.a.	0.2	n.a.	0.1
Portugal	33.0	20.0	n.a.	7.0	n.a.	26.6	436	142	63.0	20.0	n.a.	3.0
Spain	70.0	41.0	n.a.	9.4	n.a.	111.1	1646	1278	226.0	60.0	n.a.	5.0
Turkey	216.0	122.0	n.a.	150.0	n.a.	55.0	405	131	200.0	55.0	n.a.	28.6

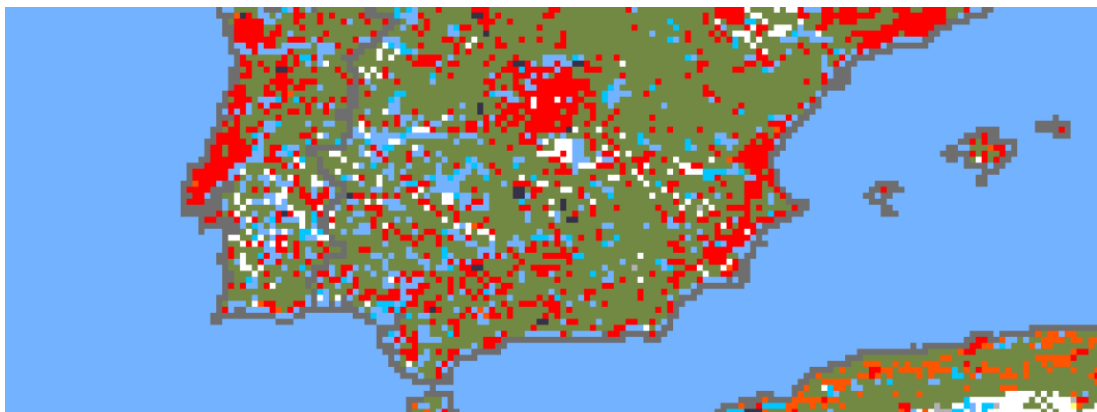
Πηγή: (Trieb, 2005)



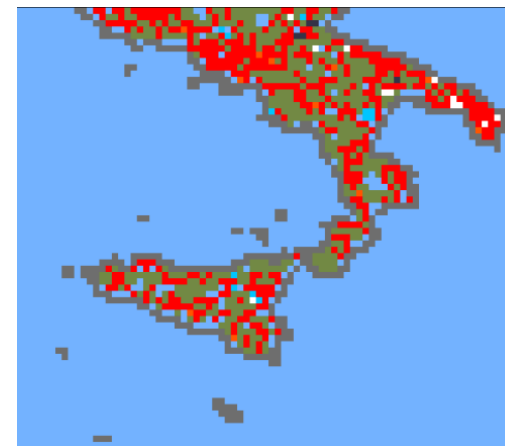
Πηγή: (FICHTNER, 2011)

Σχήμα 5-12: Κριτήρια αποκλεισμού υποψήφιων θέσεων CSP στην περιοχή της Μεσογείου και της Βόρειας Αφρικής (MENA region)

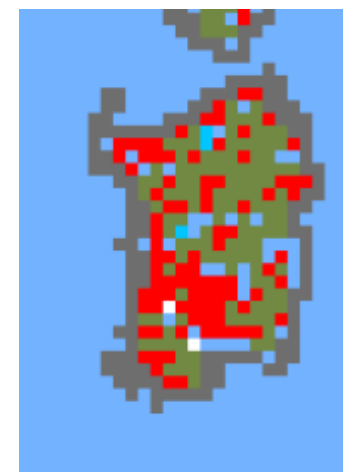
Spain



Italy



Sardinia



Πηγή: (FICHTNER, 2011)

Σχήμα 5-13: Χάρτης αποκλεισμού υποψήφιων θέσεων CSP, εστίαση στις χώρες της Ισπανίας και της Ιταλίας (με άσπρο επισημαίνονται οι περιοχές όπου είναι εφικτή η εγκατάσταση συστήματος CSP)

6 Αξιοποίηση υγρού υπολείμματος

Στόχοι

- Προσδιορισμός οικονομικής αξίας της άλμης
- Προσδιορισμός κόστους επεξεργασίας της άλμης
- Μελέτη σκοπιμότητας
- Διατύπωση προτάσεων εφαρμογής σε πλήρη κλίμακα στην Ελλάδα

Μεθοδολογία

Κύριος στόχος του κεφαλαίου είναι η εκπόνηση μελέτης σκοπιμότητας εφαρμογής του συστήματος σε πλήρη κλίμακα. Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για τη μελέτη σκοπιμότητας στηρίζεται στη σύγκριση της οικονομικής αξίας 1 m^3 άλμης (που παράγεται από μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού) και του κόστους επεξεργασίας με τη χρήση του συστήματος που περιγράφεται στην διδακτορική διατριβή.

Προσδιορισμός οικονομικής αξίας 1 m^3 άλμης: Κατά την εξάτμιση του νερού από ένα διάλυμα που περιέχει διαλυμένα άλατα, τα άλατα αυτά αρχίζουν και καθιζάνουν με σειρά αντίστροφη από τη διαλυτότητα τους. Η καθίζηση αυτή εξαρτάται από: (α) τη χημική σύσταση του υπό εξέταση νερού, (β) το pH, (γ) τη θερμοκρασία, (δ) το χρόνο παραμονής, (ε) την παρουσία άλλων χημικών όπως τα αντικαταλατωτικά κ.λπ. Για τον ποσοτικό προσδιορισμό των ενώσεων εφαρμόστηκε η μεθοδολογία που προτείνουν οι Δεληγιάννη & Μπελεσιώτης (1995) και τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν με σχετικές δημοσιεύσεις στη διεθνή βιβλιογραφία.

Προσδιορισμός κόστους επεξεργασίας 1 m^3 άλμης: Κατά τη διάρκεια υλοποίησης της διατριβής κατασκευάστηκε πρότυπη πιλοτική μονάδα επεξεργασίας της άλμης με δυναμικότητα επεξεργασίας 2 m^3 άλμης/ημέρα. Το συνολικό κόστος της μονάδας αυτής είναι 90,100€ (βλ. Ενότητα 5.1.4). Με εφαρμογή κατάλληλης μεθοδολογίας εκτίμησης κόστους για μεγαλύτερη κλίμακα ("6/10 power rule") διατυπώθηκε το κόστος (CAPEX) για μονάδα 50 φορές μεγαλύτερη (100 m^3 άλμης/ημέρα). Επίσης, εκτιμήθηκαν τα κόστη επένδυσης για το σύστημα ενεργειακής τροφοδοσίας για τα σενάρια που διατυπώθηκαν στην Ενότητα 5.4.3 και τα κόστη λειτουργίας. Τα κόστη επένδυσης ανήχθησαν σε ετήσια βάση με τη χρήση του συντελεστή ανάκτησης

κεφαλαίου (Capital Recovery Factor, *CRF*). Έτσι, γνωρίζοντας τη συνολική ποσότητα επεξεργασίας άλμης σε ετήσια βάση ($100 * 365 = 36,500 \text{ m}^3$ άλμης/χρόνο) έγινε αναγωγή του συνολικού κόστους (CAPEX & OPEX) ανά κυβικό μέτρο άλμης.

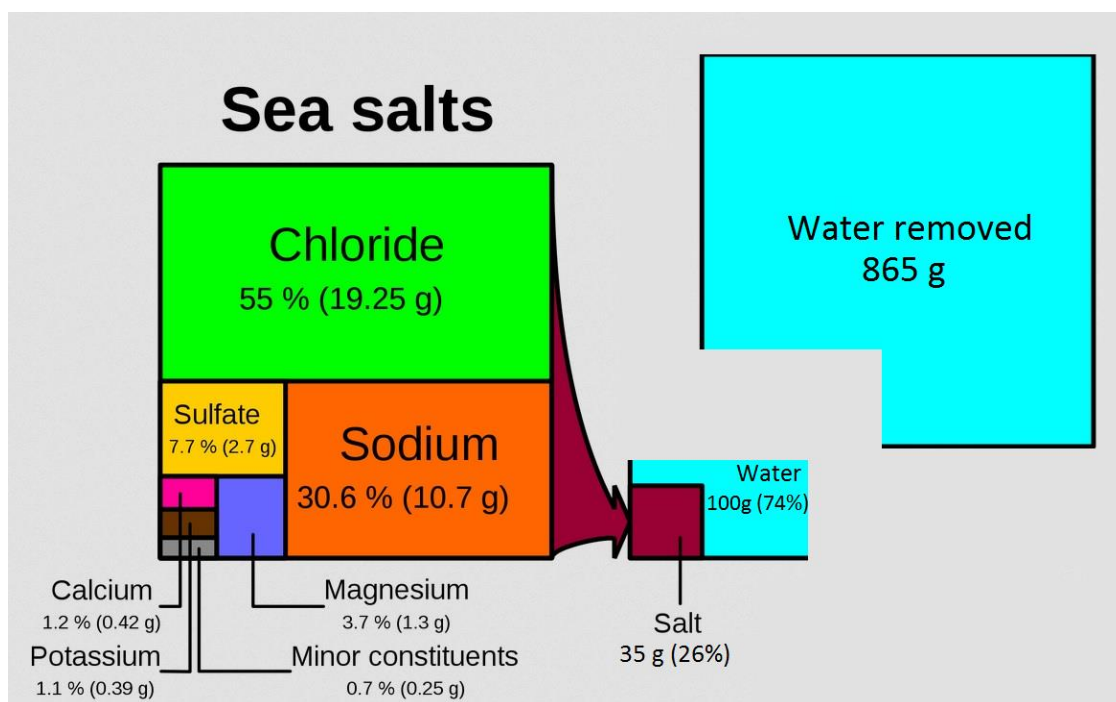
Προτάσεις εφαρμογής σε πλήρη κλίμακα στην Ελλάδα: Μία από τις προκλήσεις της έρευνας ήταν η αξιολόγηση των δυνατοτήτων εμπορικής αξιοποίησης του πιλοτικού συστήματος επεξεργασίας της άλμης, αναφορικά με την επιλογή συγκεκριμένης θέσης/περιοχής. Αν και μία φυσική επιλογή θα ήταν η Τήνος (περιοχή στην οποία εγκαταστάθηκε και λειτούργησε το πιλοτικό σύστημα) ωστόσο η Τήνος δεν φαίνεται να αποτελεί κατάλληλη ευκαιρία για εφαρμογή πλήρους κλίμακας του συστήματος επεξεργασίας της άλμης, ιδιαίτερα για τα πρώτα στάδια πιθανής εμπορικής αξιοποίησής, εφόσον δεν διαθέτει καθόλου βιομηχανική δραστηριότητα, η οποία αποτελεί τους τελικούς χρήστες των προϊόντων. Λόγω έλλειψης προηγούμενης μελέτης στο πεδίο αυτό από άλλους ερευνητές και λόγω της πρωτοτυπίας της εφαρμογής, η αξιολόγηση αυτή δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί στην παρούσα φάση με αυστηρά ποσοτικούς όρους. Για το λόγο αυτό, αποτυπώθηκε η σχετική βιομηχανία στην Ελλάδα και η αγορά αφαλάτωσης, έτσι ώστε να αποτελέσει τη βάση για μία μελλοντική ποσοτική αξιολόγηση των περιοχών ανά την Ελλάδα με εφαρμογή κατάλληλης μεθοδολογίας (βλ. επίσης Ενότητα 7.2).

6.1 Εκτίμηση οικονομικής αξίας της άλμης

Προκειμένου να εκτιμηθεί η οικονομική αξία της άλμης, πρέπει πρώτα να εκτιμηθούν οι ποσότητες των ενώσεων που μπορούν δυνητικά να ανακτηθούν από την επεξεργασία της. Σε μεγάλο βαθμό αυτές είναι οι ίδιες ενώσεις που μπορούν να προκύψουν από την φυσική εξάτμιση του θαλασσινού νερού, με τη διαφορά ότι η τεχνολογία που περιγράφεται στη διδακτορική διατριβή μπορεί να ανακτήσει και το νερό που εξατμίζεται.

Κατά την επεξεργασία της άλμης με το πιλοτικό σύστημα, η ποσότητα των αλάτων παραμένει η ίδια, ενώ σταδιακά απομακρύνεται ποσότητα καθαρού νερού από το διάλυμα. Στο Σχήμα 6-1 παρουσιάζεται απλουστευμένα το αποτέλεσμα από τη συνδυασμένη λειτουργία του εξατμιστήρα και της μονάδας αφαλάτωσης (τροφοδοσία: θαλασσινό νερό).

- TDS εξόδου: 26%
- Λόγος συγκέντρωσης: $C.F. = \frac{26\%}{3.5\%} = 7.4$
- Λόγος ανάκτησης: $R = 1 - \frac{1}{C.F.} = 1 - \frac{1}{7.4} = 86.54\%$
- Παραγόμενο νερό: $\text{Παραγόμενο νερό} = R \cdot 1kg = 865.4g$



Σχήμα 6-1: Χημική σύσταση συμπυκνωμένης άλμης, εκροή εξατμιστήρα

6.1.1 Παραγωγή αλάτων από την εξάτμιση του θαλασσινού νερού

Σε 1 kg θαλασσινού νερού υπάρχουν: (α) 965 g καθαρού νερού, (β) 35 g αλάτων. Κατά την εξάτμιση του θαλασσινού νερού, τα χημικά στοιχεία που είναι διαλυμένα συνδυάζονται μεταξύ τους, σχηματίζοντας κρυσταλλικές ενώσεις. Οι ενώσεις αυτές συζητούνται εκτενώς στην Ενότητα 5.2.3.3. Η κάθε ένωση από αυτές καθιζάνει σε διαφορετικό λόγο συγκέντρωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-2. Στο σχήμα αυτό εκφράζεται το ποσοστό της μάζας (αθροιστικά) που καθιζάνει με την αύξηση της συμπύκνωσης της άλμης. Στο διάγραμμα αυτό η συμπύκνωση της άλμης απεικονίζεται με χρήση της κλίμακας Baumé (βλ. επίσης Ενότητα 2.2.9).

Ένας άλλος τρόπος παρουσίασης του φαινομένου καθίζησης των αλάτων είναι με διαγράμματα συσχέτισης του δείκτη κορεσμού (saturation index) και του λόγου συγκέντρωσης (concentration factor, C.F.) (βλ. επίσης Διάγραμμα 6-1). Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα θερμοδυναμικής μοντελοποίησης της εξάτμισης θαλασσινού νερού με τη χρήση του λογισμικού PHREEQC (Macedonio, και συν., 2013).

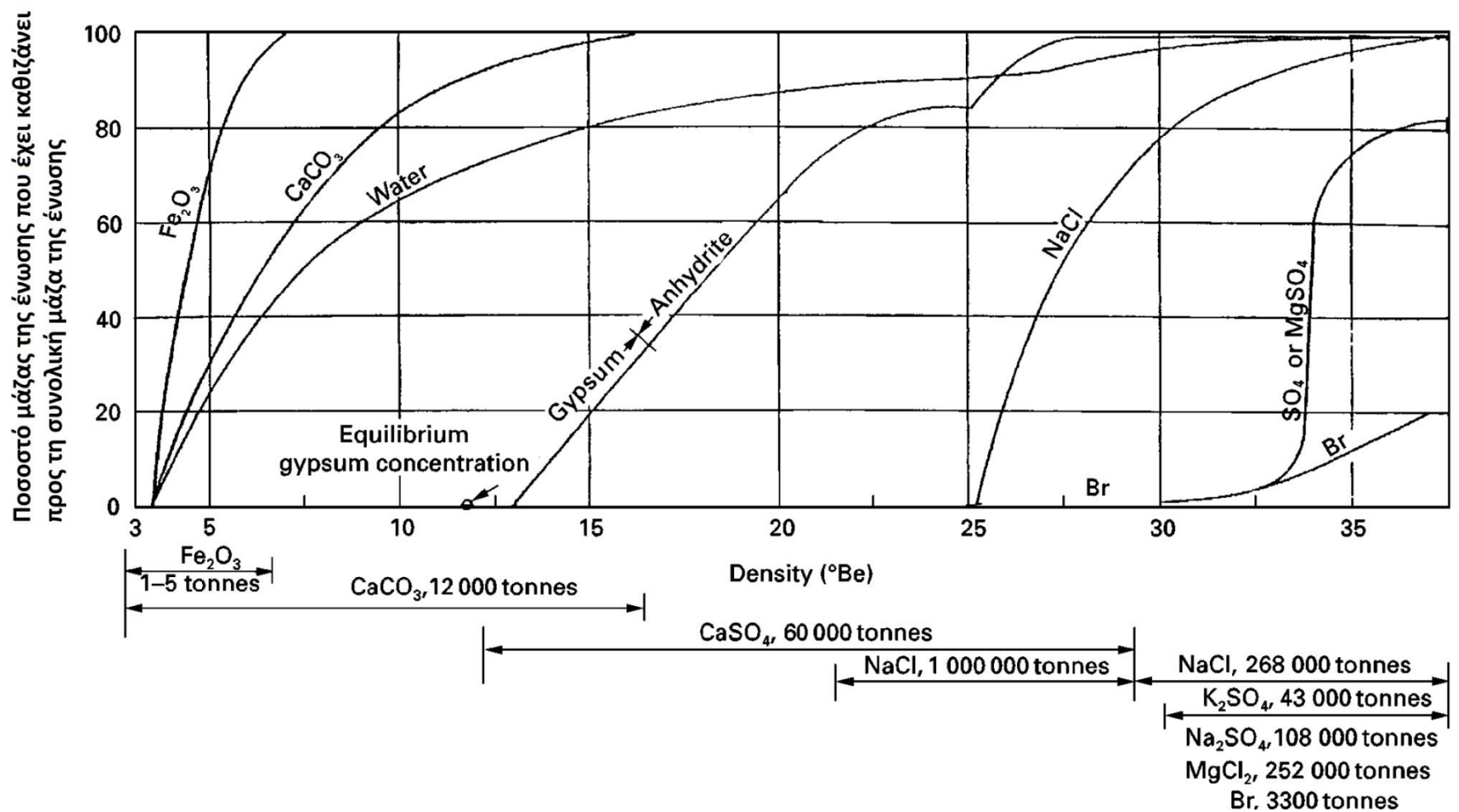
Πίνακας 6-1: Συγκεντρώσεις κρυστάλλωσης αλάτων

Ποσότητα θαλασσινού νερού που απομένει μετά την εξάτμιση (% κατά βάρος)	Άλας που ξεκινά να καθιζάνει	Χημικός τύπος άλατος
100.00	Calcite	CaCO_3
32.22	Gypsum	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
12.13	Halite	NaCl
2.45	Astrakainite	$\text{NaSO}_4 \cdot \text{Mg}(\text{SO}_4) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
2.18	Epsomite	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
1.96	Kainite	$4\text{KCl} \cdot 4\text{MgSO}_4 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$
1.63	Hexahydrate	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
1.22	Carnalite	$\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
0.93	Bischofite	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Σημείωση: για τις ονομασίες των αλάτων βλ. Ενότητα 5.2.3.3

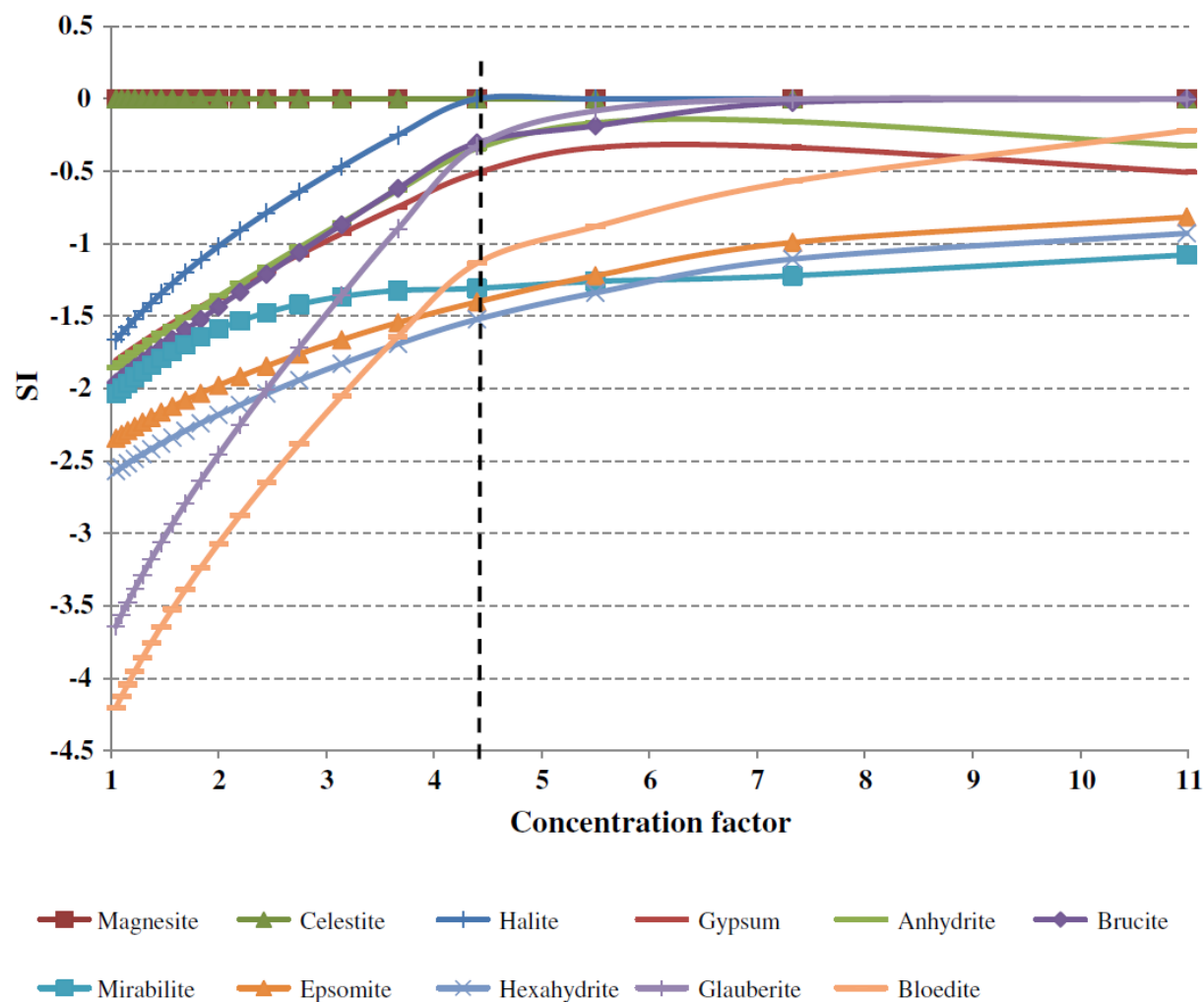
Πηγή: (Mannar, 1982)

Τα ανιόντα και τα κατιόντα συνδυάζονται μεταξύ τους κατά την αντίστροφη τάξη διαλυτότητας των ενώσεων που προκύπτουν.



Πηγή: (Geertman, 2000)

Σχήμα 6-2: Καθίζηση αλάτων κατά την εξάτμιση του θαλασσινού νερού στους 25°C



Πηγή: (Macedonio, και συν., 2013)

Διάγραμμα 6-1: Αποτελέσματα θερμοδυναμικής μοντελοποίησης αύξησης του συντελεστή συγκέντρωσης με τη χρήση του λογισμικού PHREEQC

6.1.2 Ποσοτικοποίηση παραγόμενων αλάτων κατά την εξάτμιση 1 m³ άλμης

Για τον υπολογισμό των ποσοτήτων ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που προτείνεται από τους Δεληγιάννη & Μπελεσιώτη (1995). Η μεθοδολογία αυτή βασίζεται στη διαλυτότητα των διαφόρων αλάτων. Η σειρά με την οποία καθιζάνουν τα άλατα είναι αντίστροφη από τη διαλυτότητά τους. Αυτό σημαίνει ότι πρώτα καθιζάνουν τα άλατα με την μικρότερη διαλυτότητα. Η διαλυτότητα ορισμένων σχετικών αλάτων δίνεται στον Πίνακα 6-2.

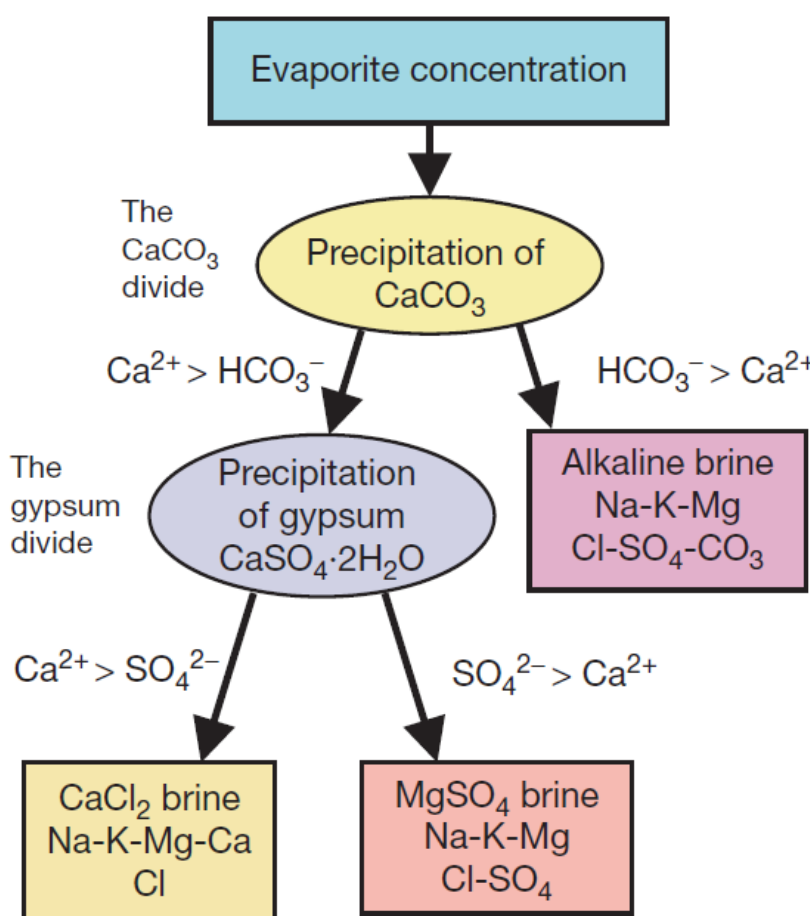
Πίνακας 6-2: Διαλυτότητα αλάτων στο νερό

Ορυκτό (Άλας)	Χημικός τύπος	Διαλυτότητα (g/l)	Θερμοκρασία (°C)
Barite	BaSO ₄	0.0025	25±1
Calcite	CaCO ₃	0.012	25
Aragonite	CaCO ₃	0.014	25
Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	0.05	25
Celestite	SrSO ₄	0.114	25±1
Gypsum	CaSO ₄ • 2H ₂ O	0.207	25
Anhydrite	CaSO ₄	0.275	25
Glaserite	Na ₂ SO ₄ •3K ₂ SO ₄	145	20
Epsomite	MgSO ₄ • 7H ₂ O	38.5	25
Hexahydrate	MgSO ₄ • 6H ₂ O	308	20
Sylvite	KCl	32.95*	18
		340	20
Halite	NaCl	36.12*	25
		360	
Thenardite	Na ₂ SO ₄	16.83*	18
		388	40
Mirabilite	Na ₂ SO ₄ • 10H ₂ O	28**	25
		448	20
Bischofite	MgCl ₂ • 6H ₂ O	56.7**	25
		2635	20
Antarcticite	CaCl ₂ • 6H ₂ O	5360	20

Σημείωση *ln g/100cm³ H₂O

** ln g/100g H₂O

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η διαλυτότητα των αλάτων επηρεάζεται σημαντικά και από τη σύσταση του νερού υπό εξέταση. Για παράδειγμα η διαλυτότητα του ανθρακικού ασβεστίου επηρεάζεται αρκετά από την ύπαρξη διαλυμένη CO_2 στο νερό ως εξής: 0.012 g/l, 0.06 g/l και 0.4 g/l για μερική πίεση του CO_2 0, 0.001 και 0.1 bar αντίστοιχα (Babel & Schreiber, 2014). Στο Σχήμα 6-3 παρουσιάζεται η επίδραση της σχετικής συγκέντρωσης των ιόντων ασβεστίου, της αλκαλικότητας και των θεικών στην αλληλουχία σχηματισμού των ενώσεων.



Πηγή: (Babel & Schreiber, 2014)

Σχήμα 6-3: Επίδραση της σχετικής συγκέντρωσης των ιόντων στην αλληλουχία σχηματισμού ενώσεων

Τα βήματα που προτείνονται από τη μεθοδολογία των Δεληγιάννη & Μπελεσιώτη (1995) είναι τα ακόλουθα:

Βήμα 1: Υπολογισμός χιλιοστοϊσοδυνάμων ιόντων

Το χημικό ισοδύναμο ενός στοιχείου ή μίας ρίζας είναι η ποσότητα της μάζας του η οποία μπορεί να ενωθεί με την μάζα ενός ατόμου υδρογόνου, ή να αντικαταστήσει ίση ποσότητα υδρογόνου σε μία ένωση (βλ. επίσης Ενότητα 2.2.2).

Σημείωση: Η μάζα ενός ατόμου H είναι 1.0079 g. Η ισοδύναμη μάζα ενός οποιουδήποτε στοιχείου βρίσκεται από την διαίρεση της ατομικής του μάζας δια του σθένους του, π.χ. το ασβέστιο έχει ατομική μάζα 40.08 και είναι δισθενές, επόμενες έχει ισοδύναμο $40.08 / 2 = 20.04$ eq. Αυτό σημαίνει ότι 20.04 g ασβεστίου αντικαθιστούν 1.0079 g υδρογόνου. Η αναγωγή της μάζας των στοιχείων (ή ριζών) σε ισοδύναμο υδρογόνου διευκολύνει τη σύγκριση της ποσότητας των ενώσεων και χρησιμεύει ως έλεγχος ακριβείας της γενικής χημικής ανάλυσης του νερού στον σχηματισμό των υποθετικών ενώσεων. Το άθροισμα των όξινων ιόντων πρέπει να ισούται με αυτό των βασικών ιόντων. Ακολουθώντας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την άλμη τροφοδοσίας στο πιλοτικό.

Πίνακας 6-3: Χιλιοστοϊσοδύναμα ιόντων άλμης τροφοδοσίας πιλοτικού συστήματος

Όνομα	Άλμη	Ατομικό Βάρος	Σθένος	Χιλιοστοϊσοδύναμα (meq) ανά L
K⁺	727.81	39.0983	1	18.61
Na⁺	23,161.03	22.9897	1	1007.00
Mg⁺²	2,599.64	24.305	2	213.79
Ca⁺²	983.65	40.078	2	49.08
CO₃⁻²	12.53	60.008	2	0.42
HCO₃⁻	308.81	61.016	1	5.06
Cl⁻	41,971.72	35.45	1	1183.64
SO₄⁻²	4,792.08	95.056	2	99.75

Βήμα 2: Υπολογισμός χλιοστοϊσοδύναμων ενώσεων

Η σειρά σχηματισμού των υποθετικών ενώσεων είναι η ακόλουθη:

Πίνακας 6-4: Σειρά σχηματισμού ενώσεων έπειτα από πλήρη εξάτμιση θαλασσινού νερού

Ένωση	Τύπος	Αλγόριθμος υπολογισμού
• Ανθρακικό Ασβέστιο	CaCO_3	$\text{Ca}^{2+} \leq \text{CaCO}_3 \leq \text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$
• Υδροξείδιο του μαγνησίου	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	$\text{Mg} \leq \text{Mg}(\text{OH})_2 \leq \text{OH}^-$
• Ανθρακικό μαγνήσιο	MgCO_3	$\text{Mg} \leq \text{MgCO}_3$ ή $(\text{CO}_2 + \text{HCO}_3) - \text{CaCO}_3 \leq \text{MgCO}_3$
• Θεϊκό Ασβέστιο	CaSO_4	$\text{Ca} - \text{CaCO}_3 \leq \text{CaSO}_4 \leq \text{SO}_4$
• Χλωριούχο ασβέστιο	CaCl_2	$\text{Ca} - (\text{CaCO}_3 + \text{CaSO}_4)$
• Θεϊκό μαγνήσιο	MgSO_4	$\text{SO}_4 - \text{CaSO}_4 \leq \text{MgSO}_4$ ή $\text{Mg} - [\text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{MgCO}_3]$
• Χλωριούχο μαγνήσιο	MgCl_2	$\text{Mg} - [\text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{MgCO}_3 + \text{MgSO}_4]$
• Θεϊκό νάτριο	NaSO_4	$\text{SO}_4 - (\text{CaSO}_4 - \text{MgSO}_4)$
• Χλωριούχο κάλιο	KCl	K
• Χλωριούχο νάτριο	NaCl	Μέσος όρος μεταξύ: $\text{Cl} - (\text{CaCl}_2 + \text{MgCl}_2 + \text{KCl})$ και $\text{Na} - (\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NaNO}_3)$
• Ανθρακικό νάτριο	Na_2CO_3	$(\text{CO}_3 + \text{HCO}_3) - (\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3)$

Σύμφωνα με τη σειρά σχηματισμού αυτή, τα χλιοστοϊσοδύναμα για τις ενώσεις που προκύπτουν από την εξάτμιση της άλμης του πιλοτικού είναι τα ακόλουθα:

- CaCO_3 $= 0.42 + 5.06$ $= 5.48 \text{ meq/l}$
- Mg(OH)_2 $= 0.00 \text{ meq/l}$
Εφόσον δεν προσδιορίστηκαν υδροξυλιόντα
- MgCO_3 $= 0.00 \text{ meq/l}$
Εφόσον τα ανθρακικά είναι μικρότερα των eq του ασβεστίου όλα καταναλώθηκαν ως CaCO_3
- CaSO_4 $= 49.08 - 5.48$ $= 43.61 \text{ meq/l}$
Το ασβέστιο έτσι έχει καταναλωθεί πλήρως. Τα θειικά που περισσεύουν είναι ίσα με $99.75 - 43.61 = 56.15 \text{ meq/l}$
- CaCl_2 $= 0.00 \text{ meq/l}$
Εφόσον το ασβέστιο έχει πλήρως απομακρυνθεί ως ανθρακικό και ως θειικό
- MgSO_4 $= 56.15 \text{ meq/l}$
Ίσο προς τα χιλιοστοϊσοδύναμα των θεικών που έχουν περισσέψει. Το μαγνήσιο που περισσεύει είναι ίσο με $213.79 - 56.15 = 157.64 \text{ meq/l}$
- MgCl_2 $= 157.64$
- Na_2SO_4 $= 0.00 \text{ meq/l}$
Εφόσον όλα τα θειικά καταναλώθηκαν από το μαγνήσιο.
- KCl $= 18.61 \text{ meq/l}$
- NaCl $= 1,183.64 - 18.61$ $= 1,083.27 \text{ meq/l}$
Περισσεύουν 81.75 meq/l

Βήμα 3: Έλεγχος

Από τον ισολογισμό των κατιόντων και των ανιόντων βρίσκεται ένα πλεόνασμα ανιόντων από $1,288.93 - 1,288.49 = 0.44$ meq/l. Η διαφορά οφείλεται στο ότι με τα χλωριούχα συνυπολογίζονται και τα βρωμιούχα, τα ιωδιούχα και τα φθοριούχα.

Βήμα 4: Υπολογισμός περιεκτικότητας των ενώσεων του δείγματος

- $\text{CaCO}_3 = 50.04 \text{ g/mol} * 5.48 \text{ meq/l} = 274.18 \text{ g/m}^3$
- $\text{CaSO}_4 = 68.07 \text{ g/mol} * 43.61 \text{ meq/l} = 2,968.19 \text{ g/m}^3$
- $\text{MgSO}_4 = 60.20 \text{ g/mol} * 56.15 \text{ meq/l} = 3,380.04 \text{ g/m}^3$
- $\text{MgCl}_2 = 47.62 \text{ g/mol} * 157.64 \text{ meq/l} = 7,506.79 \text{ g/m}^3$
- $\text{KCl} = 74.56 \text{ g/mol} * 18.61 \text{ meq/l} = 1,387.86 \text{ g/m}^3$
- $\text{NaCl} = 58.46 \text{ g/mol} * 1,083.27 \text{ meq/l} = 63,328.07 \text{ g/m}^3$

Έτσι προκύπτει ότι για 1 m^3 άλμης προκύπτουν οι ακόλουθες ποσότητες των ενώσεων:

- NaCl: 63.33 kg
- MgCl_2 : 7.51 kg
- MgSO_4 : 3.38 kg
- CaSO_4 : 2.97 kg
- KCl: 1.39 kg
- CaCO_3 : 0.27 kg

Οι ποσότητες των ενώσεων αυτών, σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες τιμές, θα χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της οικονομικής αξίας της άλμης. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι ποσότητες που υπολογίστηκαν με την παραπάνω μεθοδολογία,

συμφωνούν με τη διεθνή βιβλιογραφία (Πίνακας 6-5) καθώς επίσης και με τις αναλύσεις που έγιναν με τη χρήση XRD (βλ. Ενότητα 5.2.3.3).

Πίνακας 6-5: Συγκέντρωση αλάτων στο θαλασσινό νερό

Άλας	Συγκέντρωση (g/l)	
	(Madani et al, 2011)	(Mannar, 1982)
NaCl	27.319	27.21
MgCl ₂	4.146	3.81
MgSO ₄	1.668	1.66
MgBr ₂	0.076	0.08
CaSO ₄	1.268	1.26
Ca(HCO ₃) ₂	0.178	0.12
K ₂ SO ₂	0.869	Δ/Α
B ₂ O ₃	0.029	Δ/Α
SiO ₂	0.008	Δ/Α
Iron/Alumina	0.022	Δ/Α
KCl	Δ/Α	0.86

Σημείωση: Δ/Α: Δεν Αναφέρεται

6.1.3 Αγορά αλάτων

Όπως προέκυψε από την ανάλυση στην Ενότητα 6.1.1, με την εξάτμιση του θαλασσινού νερού παράγονται οι ακόλουθες ενώσεις:

- NaCl: 63.33 kg
- MgCl₂: 7.51 kg
- MgSO₄: 3.38 kg
- CaSO₄: 2.97 kg
- KCl: 1.39 kg
- CaCO₃: 0.27 kg

Η αγορά για τις ενώσεις αυτές εξετάζεται στη συνέχεια

6.1.3.1 Χλωριούχο νάτριο

Το χλωριούχο νάτριο βρίσκεται σε αφθονία στη φύση ως ορυκτό αλάτι, γνωστό με το όνομα αλίτης (halite) και ως αλάτι της θάλασσας. Μεγάλα κοιτάσματα ορυκτού αλατιού βρίσκονται στην Πολωνία, στην Αυστρία, στη Λιβύη και στη Γερμανία¹⁸. Παγκοσμίως παράγονται περίπου 225 εκ. τόνοι αλατιού το χρόνο (2005) (Serra Salt Engineers, 2005) και 290 εκ. τόνοι το 2011 (USGS, 2012).

Χρήσεις

Το NaCl έχει περισσότερες από 14,000 άμεσες και έμμεσες χρήσεις (Geertman, 2000). Στις άμεσες χρήσεις του χλωριούχου νατρίου περιλαμβάνονται κυρίως οι ακόλουθες (Κοροβέσης, 2013):

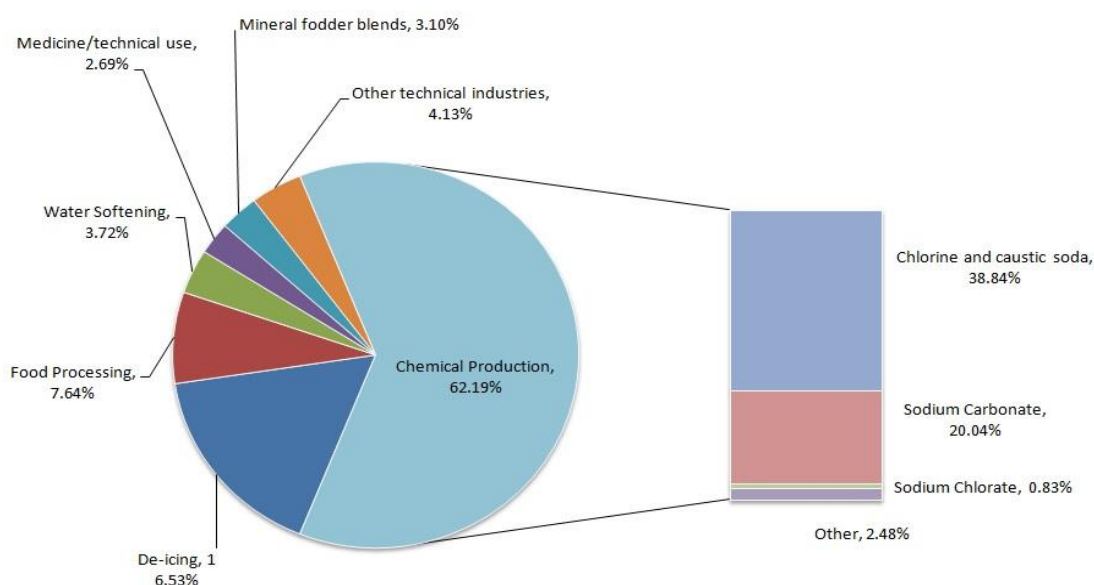
- Μαγειρικό ή κοινό αλάτι¹⁹
- Σαν πρόσθετο σε πολλά βιομηχανικά επεξεργασμένα προϊόντα διατροφής
- Σαν πρόσθετο στις ζωοτροφές

¹⁸ Πηγή: http://www.chem.uoa.gr/chemicals/chem_NaCl.htm

¹⁹ Σύμφωνα με τον Κώδικα Τροφίμων & Ποτών: «Η περιεκτικότητα σε χλωριούχο νάτριο πρέπει να είναι τουλάχιστον 97% (υπολογιζόμενη επί ξηρού), οι αδιάλυτες στο νερό ουσίες να μην είναι πάνω από 0.2%» (General Chemical State Laboratory, 2009)

- Στην παραγωγή αλίπαστων τροφών που συντηρούνται στο αλάτι (ψάρια, κρέας)
- Στην παραγωγή γαλακτοκομικών προϊόντων και αλλαντικών
- Για τον αποχιονισμό των δρόμων κατά την χειμερινή περίοδο
- Για την αναγέννηση μονάδων αποσκλήρυνσης νερού
- Σαν βασικό συστατικό στην παρασκευή φυτοφαρμάκων και χρησιμοποιείται από τους γεωργούς για την λίπανση αγρών
- Σαν κύριο συστατικό στην αρωματοποιία και φαρμακευτική
- Βυρσοδεψία (συντήρηση δερμάτων)
- Παραγωγή σαπουνιών
- Βαφή υφασμάτων, νημάτων (σταθεροποίηση χρώματος)
- Μεταλλουργία (καθαρισμός μετάλλων)
- Παραγωγή χρωμάτων και βερνικιών
- Κατεργασία μαλλιού

Στο Διάγραμμα 6-2, δίνονται τα αντίστοιχα ποσοστά κατανάλωσης ανά τομέα στην Ευρώπη (2012). Όπως είναι φανερό από το σχήμα αυτό, η χημική βιομηχανία κυριαρχεί στην κατανάλωση χλωριούχου νατρίου, με τις μονάδες παραγωγής χλωρίνης, να κατέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό.



Τα στοιχεία αντλήθηκαν από (Roskill, 2014)

Διάγραμμα 6-2: Κατανάλωση χλωριούχου νατρίου στην Ευρώπη (2012)

Τιμή

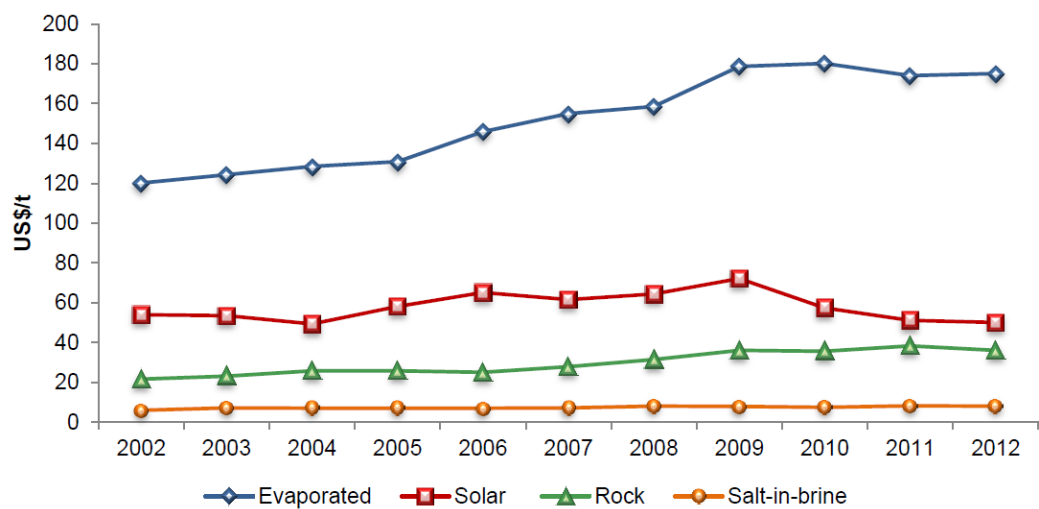
Η τιμή αγοράς του χλωριούχου νατρίου εξαρτάται ανάλογα με την τελική χρήση και τις αντίστοιχες τεχνικές προδιαγραφές:

- Στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 6-6) δίνονται οι τεχνικές προδιαγραφές, η ποσότητα και η τιμή πώλησης ανά χρήση αλατιού στην Ολλανδία.
- Στο Διάγραμμα 6-3, δίνονται οι τιμές πώλησης του χλωριούχου νατρίου για την αγορά των Η.Π.Α. ανά διαφορετικό τύπο άλατος (αλάτι αλυκών, κενού και ορυκτό αλάτι)
- Στο Διάγραμμα 6-4 παρουσιάζεται η διαφοροποίηση του κόστους παραγωγής και αντίστοιχα της τιμής πώλησης του χλωριούχου νατρίου ανάλογα με την επιθυμητό επίπεδο καθαρότητας του τελικού προϊόντος

Πίνακας 6-6: Ενδεικτικό μέγεθος αγοράς, τεχνικές προδιαγραφές και τιμή αγοράς χλωριούχου νατρίου (Ολλανδία)

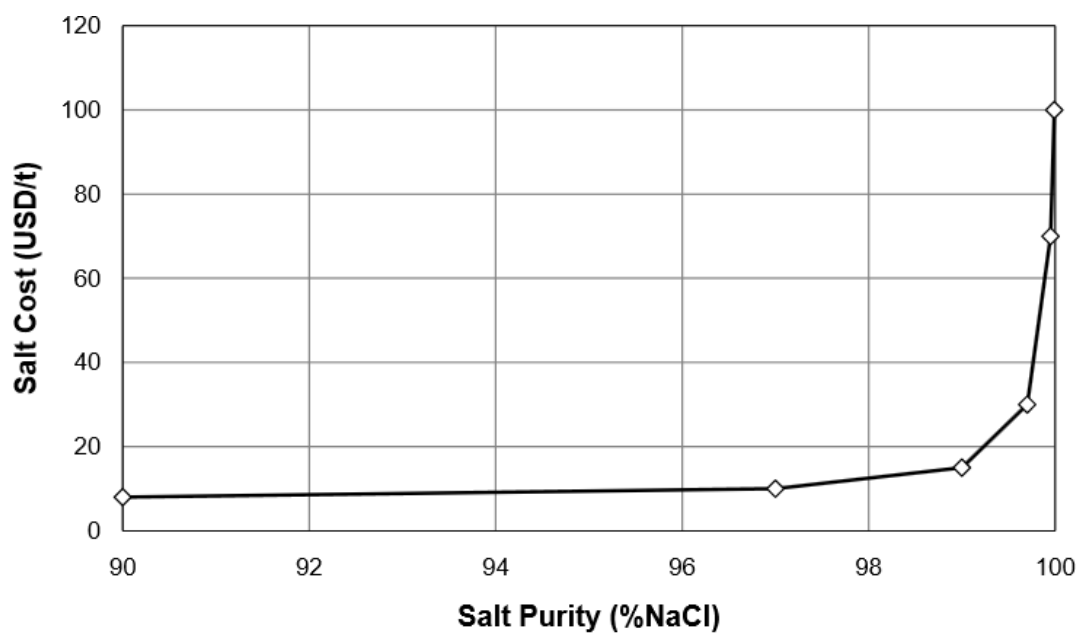
Τύπος	Ποσότητα (τόνοι/χρόνο)	Τιμή (€/τόνο)	Σύνθεση
Αποπαγοποιητικό	200,000	25	>97 % NaCl 4% υγρασία (max.) 15 ppm (συγκέντρωση βαρέων μετάλλων) Απαιτήσεις κατανομής μεγέθους
Βιομηχανική χρήση	1,000,000	50-100	99.8% NaCl
Αποσκλήρυνση νερού	~100,000	100-200	99.9% 0.1% υγρασία (max.) Απαιτήσεις κατανομής μεγέθους
Φαρμακευτική χρήση	< 100,000	> 500	Υπερκάθαρο αλάτι

Πηγή: (WssTP, 2012)



Πηγή: (Roskill, 2014)

Διάγραμμα 6-3: Μέσες τιμές πώλησης NaCl ανά τύπο, 2002-2012, ΗΠΑ



Πηγή: (Sedivy, 2008)

Διάγραμμα 6-4: Τιμή πώλησης NaCl συναρτήσει της καθαρότητας

6.1.3.2 Χλωριούχο μαγνήσιο, $MgCl_2$

Χρήσεις

- Αποπαγοποίηση δρόμων
- Λίπασμα: θεωρείται ως υποκατάστατο του λιπάσματος epsom ($MgSO_4$)
- Κατασταλτικό σκόνης και σταθεροποιητικό εδάφους
- Καταβύθιση υδροξειδίου του μαγνησίου

Τιμή

- 53€/μετρικό τόνο²⁰

6.1.3.3 Θεικό μαγνήσιο, $MgSO_4$

Χρήσεις

- Λίπασμα

Τιμή

- 79€/μετρικό τόνο

6.1.3.4 Θεικό ασβέστιο, $CaSO_4$

Χρήσεις

- Κατασκευαστικός τομέας. Ο γύψος χρησιμοποιείται ως δομικό υλικό, στα κονιάματα, σε γύψινες διακοσμήσεις. Ο ημιυδρίτης (ονομάζεται επίσης και «γύψος ταχείας πήξεως») χρησιμοποιείται για μαρμαροκονιάματα και διακοσμήσεις (Stamataki, Argiraki, & Mitsi, 2011)
- Ιατρική
- Γεωργία (εδαφοβελτιωτικό): ο ανυδρίτης (σκληρότερος του γύψου) χρησιμοποιείται ως λίπασμα σε υγρά μόνο εδάφη.

Τιμή

- 7-32 €/μετρικό τόνο (Fowlie, Howe, & Goldman, 2011)

²⁰ Χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη ισοτιμία: USD 1.00 = EUR 0.88

Ο μεγαλύτερος καταναλωτής γύψου στην Ελλάδα είναι η τσιμεντοβιομηχανία.

6.1.3.5 Ανθρακικό ασβέστιο, CaCO_3

Χρήσεις

Συχνά αναφέρεται και ως ασβεστίτης (calcite). Η παραγωγή ανθρακικού ασβεστίου για το 2012 ανέρχεται σε 450,000 τόνους, σε εθνικό επίπεδο (ΣΜΕ, 2010). Οι βασικές χρήσεις του ανθρακικού ασβεστίου είναι (Νικολαΐδης, 2003) (Ευαγγελίδου, 2008):

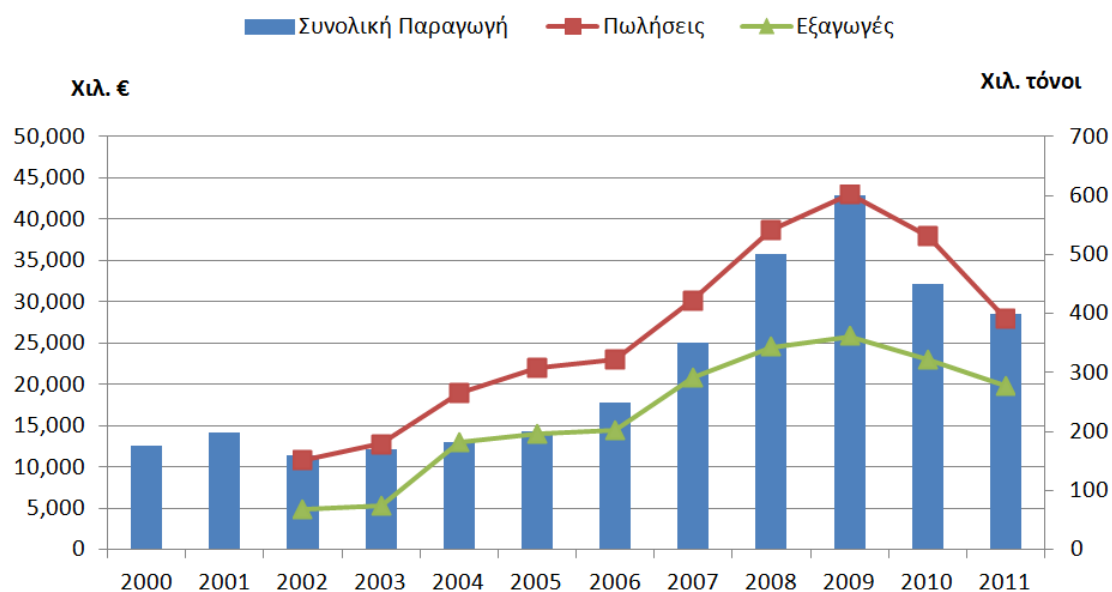
- Χαρτοβιομηχανία
- Βιομηχανία Πλαστικών
- Αδρανή για σκυρόδεμα, επιχρίσματα
- Υαλουργία για ζωοτροφές
- Επεξεργασία νερού
- Πληρωτικό, στιλβωτικό, εντομοκτόνα
- Υαλουργία, ζωοτροφές

Οι προδιαγραφές καθαρότητας του υλικού αλλά και της κοκκομετρίας δίνονται στον ακόλουθο πίνακα ανάλογα με τη προοριζόμενη χρήση του ανθρακικού ασβεστίου.

Πίνακας 6-7: Προδιαγραφές ανθρακικού ασβεστίου ανά χρήση

Χρήση	Κοκκομετρία	Σύσταση/Άλλα χαρακτηριστικά
Πληρωτικό υλικό	~1μm	-
Χαρτοβιομηχανία	< 15 μm	95 – 97% CaCO_3
Τσιμεντοβιομηχανία	-	>65% CaCO_3 < 5% MgCO_3
Βελτιωτικό εδαφών	~ 2 μm	pH ~ 6
Συμπλήρωμα ζωοτροφών	<30μm	98 – 98.5% CaCO_3
Επεξεργασία νερού	300 – 800 μm	85 - 95% CaCO_3 < 5% MgCO_3
Υαλουργία	20-500 μm	> 54.85% CaCO_3 < 0.1% Υγρασία

Πηγή: (Νικολαΐδης, Μουζά, Κακαλιάς, & Παράς, 2003)



Πηγή: <http://www.orykta.gr/istoria/istoria-ellinikis-metalleias/101-h-elliniki-metalleia-ston-21o-aiona>

Διάγραμμα 6-5: Στοιχεία για την παραγωγή και τις πωλήσεις ανθρακικού ασβεστίου στην Ελλάδα

Στην αγορά απαντώνται δύο διαφορετικοί τύποι ανθρακικού ασβεστίου:

- Κονιοποιημένο Ανθρακικό Ασβέστιο - Ground Calcium Carbonate (GCC)
- Καταβυθιζόμενο Ανθρακικό Ασβέστιο – Precipitated Calcium Carbonate (PCC)

Τιμή (Jordahl, 2006) (Juby, και συν., 2008)

- GCC (coarse, 9-17 μm): 60-66 €/τόνο
- GCC (medium, 4-9 μm): 95-100 €/τόνο
- GCC (fine, 0.5 μm): 230 – 280 €/τόνο
- PCC (fine, 0.5 μm): 264 – 350 €/τόνο

6.1.4 Οικονομική αξία άλμης

Στον ακόλουθο πίνακα, συνοψίζονται τα αποτελέσματα από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε για την τιμή πώλησης των αλάτων. Στον πίνακα αυτό δίνεται το εύρος της τιμής πώλησης για το κάθε αλάτι καθώς και η τιμή που τελικά επελέχθη για τον προσδιορισμό της οικονομικής αξίας της άλμης που θα χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια αυτής της διδακτορικής διατριβής για τη μελέτη σκοπιμότητας.

Πίνακας 6-8: Συγκεντρωτικός πίνακας τιμών πώλησης των αλάτων

Άλας	Τιμή (€/τόνο)		Επιλογή (€)
	Από	Έως	
Χλωριούχο Νάτριο (NaCl)	25	500	50
Χλωριούχο Μαγνήσιο (MgCl ₂)	Η τιμή του μαγνησίου παρουσιάζει υψηλή διαφοροποίηση ανάλογα με το τύπο άλατος		53
Θεικό Μαγνήσιο (MgSO ₄)			79
Ανθρακικό ασβέστιο (CaCO ₃)	60	350	100
Θεικό ασβέστιο (CaSO ₄)	7	32	20
Χλωριούχο κάλιο (KCl)	Δεν βρέθηκαν πληροφορίες		-

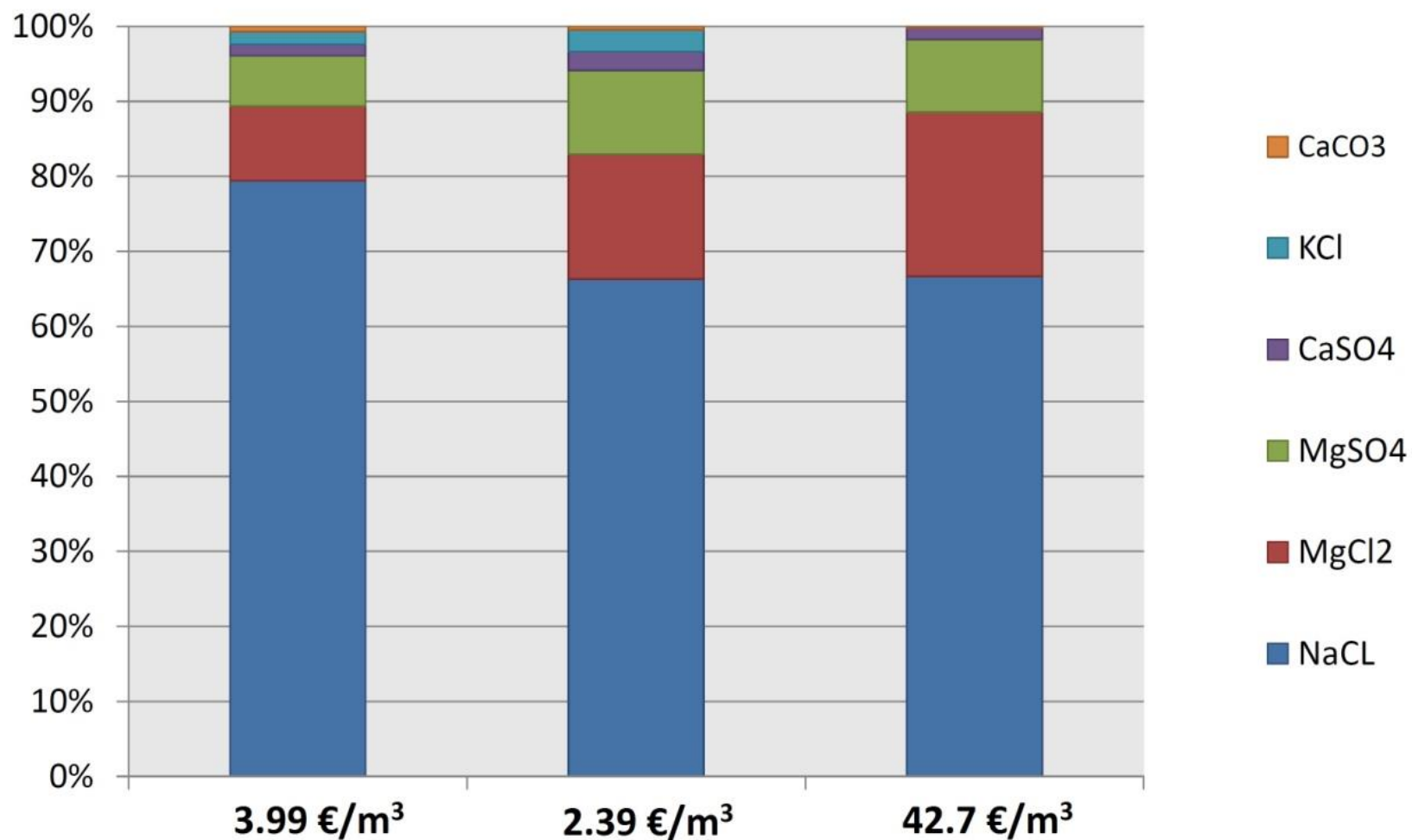
Στον παραπάνω πίνακα είναι φανερό πως υπάρχει μεγάλο εύρος στην τιμή πώλησης των αλάτων, ανάλογα με την καθαρότητα του τελικού προϊόντος. Επίσης για την περίπτωση του μαγνησίου, θεωρήθηκε και η περίπτωση ανάκτησης υδροξειδίου του μαγνησίου αντί για χλωριούχο μαγνήσιο και θεικό μαγνήσιο. Το υδροξείδιο του μαγνησίου έχει αρκετά υψηλότερη τιμή πώλησης.

Στον Πίνακα 6-9 δίνεται ο υπολογισμός της οικονομικής αξία της άλμης για τις τιμές πώλησης των αλάτων που επελέγησαν. Οι τιμές αυτές αποτελούν το χαμηλό όριο του εύρους για όλα τα αλάτια πλην του χλωριούχου νατρίου και του ανθρακικού ασβεστίου, στα οποία έγινε εκτενέστερη έρευνα αγοράς και διαπιστώθηκε πως είναι εφικτό να επιτευχθεί λίγο υψηλότερη τιμή. Στον πίνακα αυτό επίσης προστίθεται στην τελευταία σειρά και η ποσότητα του νερού που ανακτάται. Σημειώνεται εδώ πως για κάθε 1 m³ άλμης, δυνητικά μπορεί να ανακτηθούν περίπου 78.9 kg χωρισμένων αλάτων και 921 kg απιονισμένου νερού.

Πίνακας 6-9: Υπολογισμός οικονομικής αξίας 1 m³ άλμης

Άλας	Ποσότητα άλατος/νερού (kg)	Τιμή (€/τόνο)	€/m ³
Χλωριούχο Νάτριο (NaCl)	63.33	0.05	3.17
Χλωριούχο Μαγνήσιο (MgCl ₂)	7.51	0.053	0.40
Θεικό Μαγνήσιο (MgSO ₄)	3.38	0.079	0.27
Ανθρακικό ασβέστιο (CaCO ₃)	0.27	0.1	0.06
Θεικό ασβέστιο (CaSO ₄)	2.97	0.02	0.07
Χλωριούχο κάλιο (KCl)	1.39	0.05	0.03
Άθροισμα:			3.99
Απιονισμένο νερό	~920.0	2	1.84
Τελικό άθροισμα:			5.83

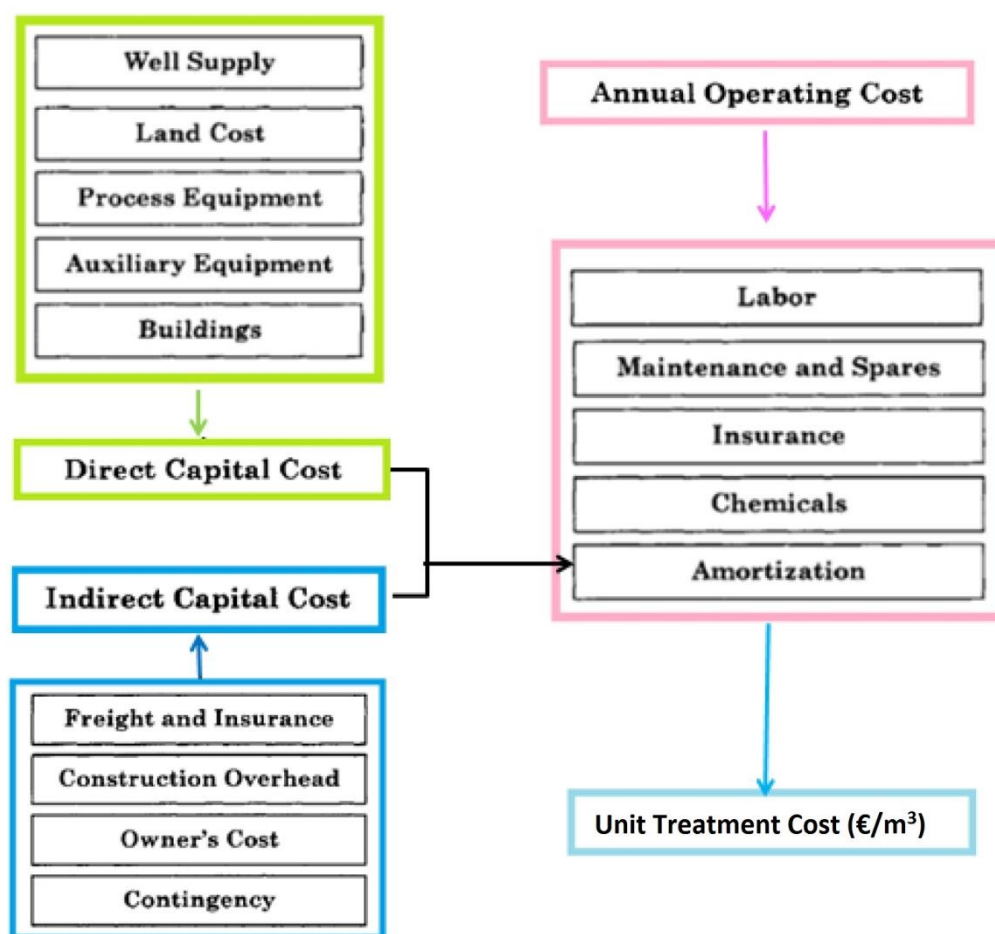
Τέλος, ο υπολογισμός για τα αλάτια πραγματοποιήθηκε για τη χαμηλότερη και υψηλότερη τιμή του εύρους δίνοντας έτσι αποτέλεσμα 2.39 €/m³ και 42.7 €/m³ αντίστοιχα. Στο Διάγραμμα 6-6 δίνεται η ποσοστιαία συνεισφορά των διαφόρων αλάτων για τις περιπτώσεις αυτές. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα για την υψηλότερη τιμή των αλάτων, πρακτικά τρία άλατα είναι αυτά που συνεισφέρουν στην οικονομική αξία, το χλωριούχο νάτριο και οι ενώσεις του μαγνησίου, φανερώνοντας έτσι τη σημασία του πρώτου, κυρίως λόγω ποσότητας και του δεύτερου (του μαγνησίου), κυρίως λόγω υψηλής τιμής πώλησης. Αν και η τιμή των 42.7 €/m³ θεωρείται ιδιαίτερα υψηλή, παρόλα αυτά επιλέχθηκε να παρουσιαστεί προκειμένου να δώσει στον αναγνώστη την ευκαιρία να αξιολογήσει την επιλεγείσα τιμή των 3.99 €/m³ για τα άλατα και κατ'επέκταση την τιμή των 5.8 € ανά m³ άλμης, συμπεριλαμβανομένου και του απιονισμένου νερού. Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 6-9, θεωρήθηκε τιμή πώλησης του απιονισμένου νερού, τα 2€ ανά m³.



Διάγραμμα 6-6: Ποσοστιαία συνεισφορά αλάτων στην οικονομική αξία 1m³ άλμης για διάφορες τιμές πώλησης των αλάτων

6.2 Εκτίμηση κόστους επεξεργασίας

Για την εκτίμηση του κόστους επεξεργασίας λήφθηκαν υπόψη τόσο το κόστος κεφαλαίου (capital expenditure, CAPEX) όσο και τα λειτουργικά κόστη (operating expenditure, OPEX). Στη βιβλιογραφία συναντάται συχνά η ενσωμάτωση του κόστους κεφαλαίου στα ετήσια έξοδα μέσω του συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου (Ghaffour, Missimer, & Amy, 2013) (Khayet, 2013). Μία τέτοια αποτύπωση δίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Πηγή: Προσαρμόστηκε από (El-Dessouky & Ettouney, 2002)

Σχήμα 6-4: Παράμετροι κόστους που λήφθηκαν υπόψη για τον υπολογισμό του κόστους επεξεργασίας 1 m³ άλμης

Μέθοδος συντελεστή απόδοσης κεφαλαίου

Η μέθοδος συντελεστή απόδοσης κεφαλαίου (Capital Recovery Factor, *CRF*) αποτελεί ένα από τα οικονομικά κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση επενδυτικών σχεδίων. Άλλα εργαλεία είναι η καθαρά παρούσα αξία, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (Internal Rate of Return, *IRR*), ο λόγος κόστους οφέλους (Benefit

to Cost Ratio, *BCR*) και η έντοκη περίοδος αποπληρωμής (Discounted Pay Back period, *DPB*) (Τσικαλάκης, 2010).

Το κριτήριο αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την εκπόνηση της μελέτης σκοπιμότητας που διερευνάται σε αυτή τη διατριβή, καθώς μπορεί να προσφέρει ένα ομοιόμορφο, ισοδύναμο ετήσιο κόστος. Στη συνέχεια το κόστος αυτό αθροίζεται με τα προβλεπόμενα λειτουργικά έξοδα στη βάση ενός χρόνου. Μέσω της δυναμικότητας της μονάδας επεξεργασίας της άλμης (100m³/ημέρα) τα κόστη αυτά ανάγονται τελικώς ανά m³ επεξεργασίας. Ο συντελεστής απόδοσης κεφαλαίου δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση (Καλιαμπάκος & Δαμίγος, 2008) (Τσικαλάκης, 2010):

$$CRF = \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} = i + \frac{i}{(1 + i)^n - 1}$$

όπου,

- *i*, το επιτόκιο προεξόφλησης ανά περίοδο
- *n*, η εκτιμώμενη διάρκεια ζωής του έργου σε έτη

Ως επιτόκιο προεξόφλησης ορίζεται η ελάχιστη αποδεκτή απόδοση της επένδυσης. Αναφορικά με το επιτόκιο προεξόφλησης, συχνά στηρίζεται σε υποκειμενική βάση, με βάση την εμπειρία του επενδυτή²¹. Η τιμή που επιλέγεται συχνά εξαρτάται από το κόστος ευκαιρίας του κεφαλαίου και από τον επιχειρηματικό κίνδυνο που ενέχει μία επένδυση. Στη διδακτορική διατριβή το επιτόκιο προεξόφλησης θεωρήθηκε ίσο με 5%.

6.2.1 CAPEX και OPEX

Σύστημα επεξεργασίας της άλμης

Η ανάλυση του κόστους εξοπλισμού ανά συνιστώσα δίνεται στον Πίνακα 6-10. Αναφορικά με την απόσβεση του εξοπλισμού, έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές:

- Διάρκεια ζωής εξοπλισμού: 25 χρόνια
- Επιτόκιο προεξόφλησης: 5%

²¹ Ένας τρόπος ποσοτικής αντιμετώπισης του είναι μέσω του μέσου σταθμικού κόστους κεφαλαίων (Weighted Average Capital Cost, WACC).

- Συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου: 0.071

Πίνακας 6-10: Ανάλυση κόστος εξοπλισμού, συστήματος επεξεργασίας της άλμης δυναμικότητας 100m³/ημέρα

Συνιστώσα	Κόστος
Εξατμιστήρας	400,000 €
Κρυσταλλωτήρας	80,000 €
Ξηραντήρας	10,000 €
Έλεγχος & SCADA	10,000 €
Σύνολο	500,000 €
Απόσβεση εξοπλισμού	35,500 €/year
Ειδικό κόστος	0.97 €/m³

Σημείωση: Στην ανάλυση δεν συνυπολογίστηκαν τα ακόλουθα κόστη: μεταφορά, εγκατάσταση, υποδομές, αγορά γης και απρόβλεπτα.

Κόστος συστήματος ενεργειακής τροφοδοσίας

Σενάριο 1: Κόστος ηλιακού πεδίου συλλεκτών κενού

Κόστος κεφαλαίου

Πίνακας 6-11: Ανάλυση κόστους ηλιακού πεδίου, Σενάριο 1

Συνιστώσα	Κόστος
Ηλιακό πεδίο (συλλέκτες)	200,000 €
Θερμική αποθήκευση	40,000 €
Λέβητας φυσικού αερίου	20,000 €
Σύνολο	260,000 €
Ετήσια ράντα	18,450 €/year
Ειδικό κόστος	0.51 €/m³

Λειτουργικά έξοδα

Τα λειτουργικά έξοδα που λήφθηκαν υπόψη περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Έξοδα προσωπικού: χρειάζονται 3 άτομα για τη λειτουργία του συστήματος (3 βάρδιες). Το κάθε άτομο υπολογίστηκε με ετήσια αποζημίωση ίση με 20,000€.
- Καύσιμα (υβριδική λειτουργία): Το ηλιακό σύστημα δεν έχει έξοδα λειτουργίας (παρά μόνο την ηλεκτρική κατανάλωση του κυκλοφορητή που είναι ασήμαντη). Το κόστος καυσίμου για το λέβητα φυσικού αερίου εκτιμάται στα 6,165 GJ σε ετήσια βάση. Βάση του πρακτικού κανόνα που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5-38, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τιμή 3.5€/GJ, η οποία δίνει ετήσιο κόστος ίσο με 22,000€.

Πίνακας 6-12: Λειτουργικά κόστη συστήματος επεξεργασίας άλμης, Σενάριο 1

Συνιστώσα	Κόστος
Καύσιμα (υβριδική λειτουργία)	22,000 €/χρόνο
Κόστος προσωπικού	60,000 €/χρόνο
Σύνολο:	82,000 €/χρόνο
Ειδικό κόστος	2.25 €/m³

Σενάριο 2: Ανάκτηση ενέργειας από καυσαέρια

Κόστος επένδυσης

Πίνακας 6-13: Ανάλυση κόστους συστήματος ενεργειακής τροφοδοσίας, Σενάριο 2

Συνιστώσα	Κόστος
Λέβητας ανάκτησης θερμότητας	20,000 €
Σύνολο	20,000 €
Ετήσια ράντα (απόσβεση)	1,420 €
Ειδικό κόστος	0.04 €/m³

Λειτουργικά έξοδα:

Το κύριο λειτουργικό κόστος είναι οι αμοιβές προσωπικού (3 άτομα).

Πίνακας 6-14: Λειτουργικά κόστη για το σύστημα επεξεργασίας της άλμης (Σενάριο 2)

Συνιστώσα	Κόστος
Αμοιβές προσωπικού	60,000 €/χρόνο
Σύνολο:	60,000 €/χρόνο
Ειδικό κόστος:	1.64 €/m³

6.2.2 Μοναδιαίο κόστος επεξεργασίας

Για τον υπολογισμό του μοναδιαίου κόστους επεξεργασίας, δηλαδή του κόστους επεξεργασίας 1 m³ άλμης, χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{(\text{Απόσβεση εξοπλισμού επεξεργασίας}) + (\text{Απόσβεση συστήματος ενέργειας}) + (\text{Λειτουργικά έξοδα})}{(\text{ποσότητα άλμης που επεξεργάζεται σε ετήσια βάση})}$$

Με εφαρμογή της εξίσωσης αυτής υπολογίζεται το κόστος επεξεργασίας για τα 2 σενάρια ως ακολούθως.

1^ο Σενάριο: Ηλιακή ενέργεια (Υβριδική λειτουργίας: 50%)

$$\frac{(\text{Ράντα εξ. επεξ.}) + (\text{Ράντα συστ. ενέργειας}) + (\text{Λειτουργικά κόστη})}{(\text{ποσότητα άλμης που επεξεργάζεται σε ετήσια βάση})}$$

$$= \frac{35,500 + 18,450 + 82,000}{36,500} = 3.72 \text{ €/m}^3$$

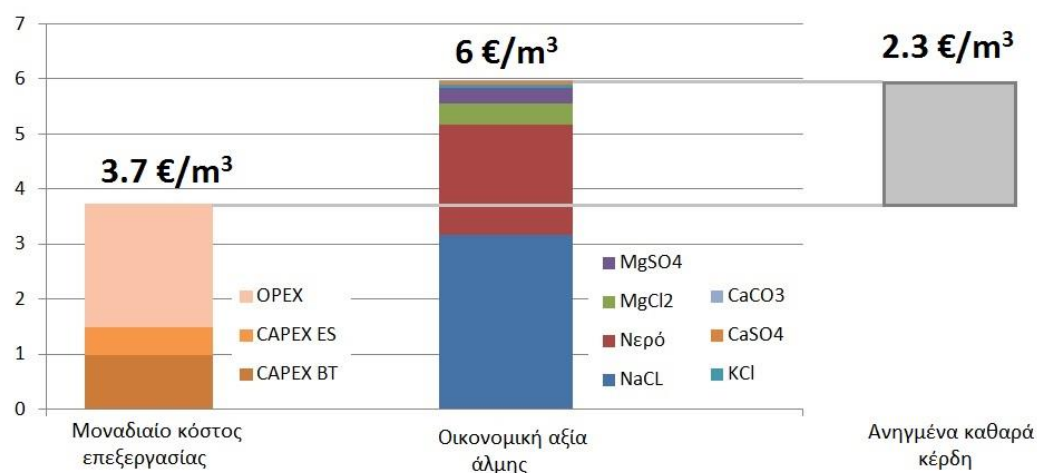
2^ο Σενάριο: Ανάκτηση θερμότητας από καυσάερια

$$\frac{(\text{Ράντα εξ. επεξ.}) + (\text{Ράντα συστ. ενέργειας}) + (\text{Λειτουργικά κόστη})}{(\text{ποσότητα άλμης που επεξεργάζεται σε ετήσια βάση})}$$

$$= \frac{35,500 + 1,420 + 60,000}{36,500} = 2.65 \text{ €/m}^3$$

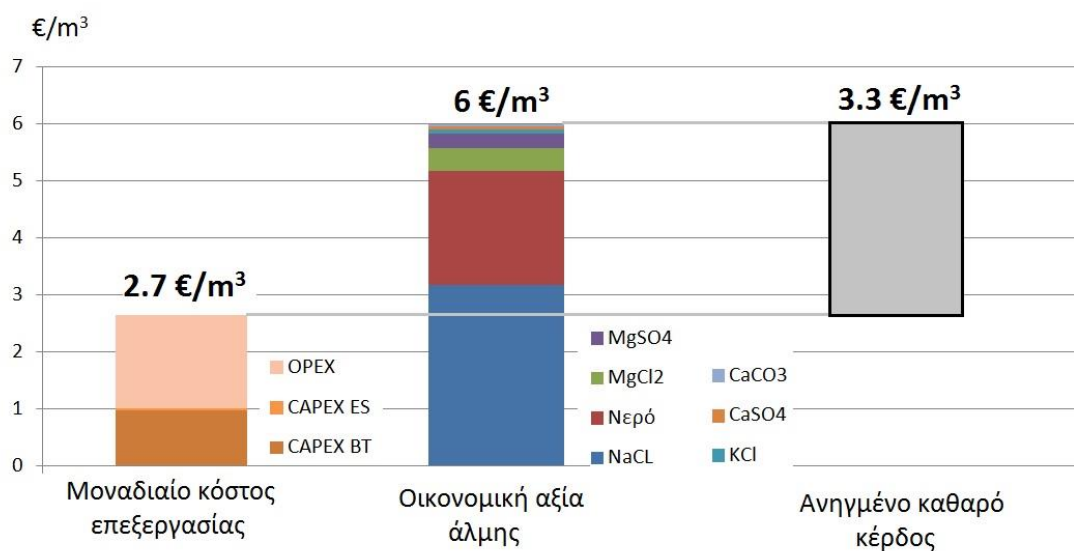
6.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Η σύγκριση του κόστους επεξεργασίας και της οικονομικής αξίας της άλμης δίνονται:



Σημείωση: CAPEX ES, Capital Expenditure Energy System, CAPEX BT: Capital Expenditure Brine Treatment system

Διάγραμμα 6-7: Μοναδιαίο κόστος επεξεργασίας και ανηγμένα καθαρά κέρδη (Σενάριο 1)



Σημείωση: CAPEX ES: Capital Expenditure Energy System, CAPEX BT: Capital Expenditure Brine Treatment system

Διάγραμμα 6-8: Μοναδιαίο κόστος επεξεργασίας και ανηγμένα καθαρά κέρδη (Σενάριο 2)

Και τα 2 σενάρια φαίνεται πως αποτελούν βιώσιμες επενδύσεις. Πιο συγκεκριμένα:

- Σύμφωνα με το Διάγραμμα 6-7, τα ανηγμένα καθαρά κέρδη για το Σενάριο 1 είναι ίσα με 2.3 €/m^3 . Δεδομένου ότι σε ετήσια βάση θα επεξεργάζονται $100 \times 365 = 36,500 \text{ m}^3$ άλμης, τα ετήσια καθαρά κέρδη εκτιμώνται στα 83,950€.

Επίσης, τα ακαθάριστα έσοδα και για τα 2 σενάρια είναι ίσα με $6 \text{ €/m}^3 \times 36,500 \text{ m}^3/\text{χρόνο} = 219,000\text{€}$. Αν αφαιρέσουμε μόνο τα λειτουργικά έξοδα (Πίνακας 6-12) (αν δεν συνυπολογιστεί δηλαδή η απόσβεση) τα έσοδα είναι ίσα 137,000€ το χρόνο. Στο Σενάριο 1, η συνολική επένδυση, δηλαδή το άθροισμα του εξοπλισμού επεξεργασίας της άλμης (Πίνακας 6-10) και του εξοπλισμού του ηλιακού πεδίου (Πίνακας 6-11) είναι 760,000€. Έτσι, η περίοδος αποπληρωμής του εξοπλισμού αυτού εκτιμάται στα 5.5 χρόνια

- Σύμφωνα με το Διάγραμμα 6-8, τα ανηγμένα καθαρά κέρδη για το Σενάριο 2 είναι ίσα με 3.3 €/m^3 . Δεδομένου ότι σε ετήσια βάση θα επεξεργάζονται $100 \times 365 = 36,500 \text{ m}^3$ άλμης, τα ετήσια καθαρά κέρδη εκτιμώνται στα 120,450€.

Επίσης, από τους πίνακες που αφορούν το Σενάριο 2 συνεπάγεται ότι αν από τα ακαθάριστα έσοδα (219,000€) αφαιρεθούν μόνο τα λειτουργικά έξοδα (Πίνακας 6-14) (αν δεν συνυπολογιστεί δηλαδή η απόσβεση) τα έσοδα είναι ίσα 159,000€ το χρόνο. Στο Σενάριο 2, η συνολική επένδυση, δηλαδή το άθροισμα του εξοπλισμού επεξεργασίας της άλμης (Πίνακας 6-10) και του εξοπλισμού του συστήματος ανάκτησης θερμότητας (Πίνακας 6-13) είναι 520,000€. Έτσι, η περίοδος αποπληρωμής του εξοπλισμού αυτού εκτιμάται στα 3.3 χρόνια.

6.4 Δυνατότητες εφαρμογής συστήματος στον Ελληνικό χώρο

Στην ενότητα αυτή, καταγράφεται η ελληνική βιομηχανία με σκοπό τον εντοπισμό των επιχειρηματικών ευκαιριών για την ανάπτυξη του συστήματος επεξεργασίας της άλμης σε πλήρη κλίμακα. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε η ακόλουθη διαδικασία:

1^ο Βήμα: Ταυτοποίηση σχετικών βιομηχανικών κλάδων:

Όπως συζητείται στην Ενότητα 6.1.3.1, οι βιομηχανικές χρήσεις του χλωριούχου νατρίου (το οποίο αποτελεί και το άλας με τη σημαντικότερη ποσότητα) κατέχουν περίπου το 74% του συνόλου, με τη χημική βιομηχανία να αναπαριστά το μεγαλύτερο ποσοστό (62.2%) (βλ. Διάγραμμα 6-2). Την ίδια στιγμή, οι βιομηχανίες αυτές αποτελούν τις μεγαλύτερες πηγές παραγωγής αποβλήτων επιβαρυνμένων με χλωριόντα (Πίνακας 2-6).

2^ο Βήμα: Συλλογή πρωτογενών στοιχείων σχετικά με την τοποθεσία των βιομηχανικών μονάδων στην Ελλάδα

Τα στοιχεία αυτά δεν είναι δημοσιευμένα. Ως εκ τούτου, ζητήθηκαν πρωτογενή στοιχεία από την Ελληνική Στατιστική Αρχή (Request ID: 2125 / 27-01-2016). Το μητρώο παρείχε τις πληροφορίες για τους κωδικούς ΣΤΑΚΟΔ που ζητήθηκαν ανά περιφέρεια.

3^ο Βήμα: Επεξεργασία των πρωτογενών στοιχείων

Σε αυτό το βήμα, τα συλλεγμένα πρωτογενή δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή πληροφορίας σχετικής για την αξιοποίηση του συστήματος επεξεργασίας της άλμης σε πλήρη κλίμακα στην Ελλάδα. Πιο συγκεκριμένα, οι θέσεις των βιομηχανικών μονάδων αποτυπώθηκαν με τη χρήση GIS σε χάρτες, επιτρέποντας την παρουσίαση του βαθμού συγκέντρωσης των μονάδων αυτών ανά περιφέρειες. Η παράμετρος αυτή κρίνεται ως ιδιαίτερα σημαντική, εφόσον τα μεταφορικά κόστη μπορούν να αποτελέσουν κρίσιμο παράγοντα επιτυχίας του εγχειρήματος.

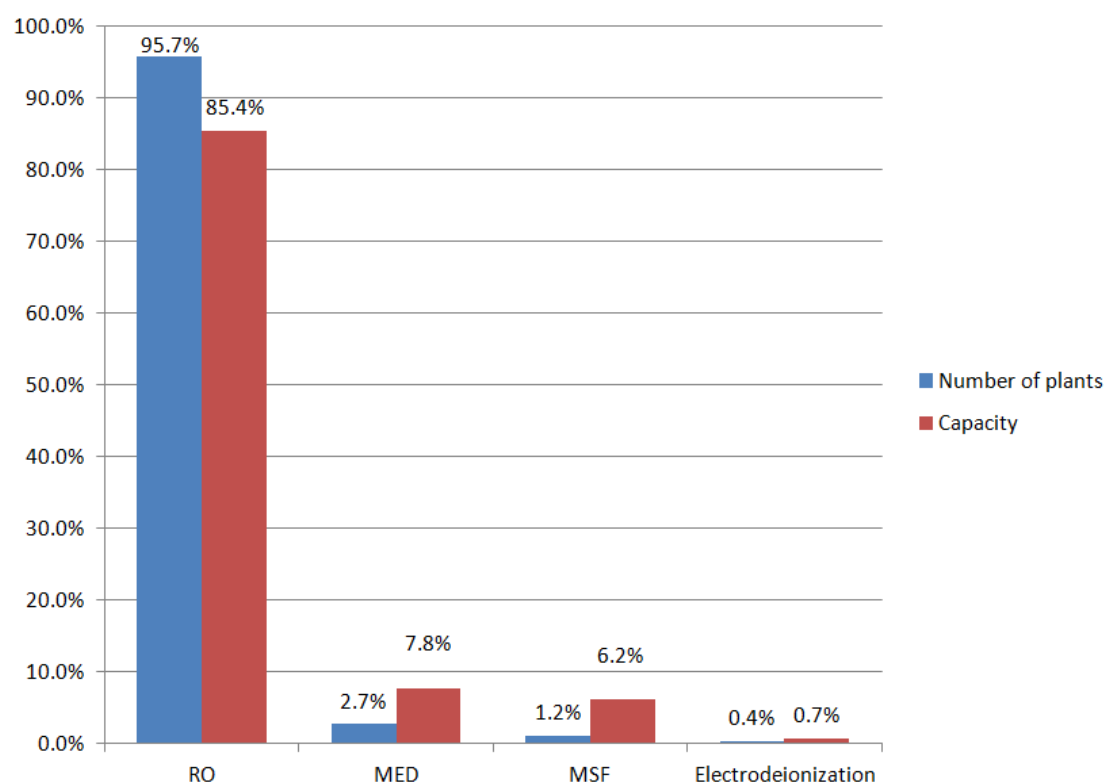
4^ο Βήμα: Αξιολόγηση των περιοχών

Στο βήμα αυτό γίνεται η αξιολόγηση των επιλεγμένων περιοχών με χρήση κριτηρίων όπως: (α) ο αριθμός της σχετικής βιομηχανικής δραστηριότητας ανά περιοχή (ΣΤΑΚΟΔ 10, 13, 15, 17, 19, 20), (β) ο τζίρος της βιομηχανικής δραστηριότητας, προκειμένου να εκτιμηθεί το μέγεθος της αγοράς συγκριτικά, (γ) χρήση αποιονισμένου νερού.

6.4.1 Ελληνική αγορά αφαλάτωσης

Στην Ελλάδα, υπάρχουν καταγεγραμμένες 269 μονάδες αφαλάτωσης, ενώ 257 θεωρούνται λειτουργικές. Η συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα ανέρχεται στα 163,659 m³/ημέρα. Στα επόμενα διαγράμματα γίνεται ανάλυση των μονάδων αυτών ως προς:

- Την τεχνική αφαλάτωσης που χρησιμοποιείται,
- Το μέγεθος των μονάδων,
- Την τελική χρήση
- Το νερό τροφοδοσίας των μονάδων.



Σημείωση:

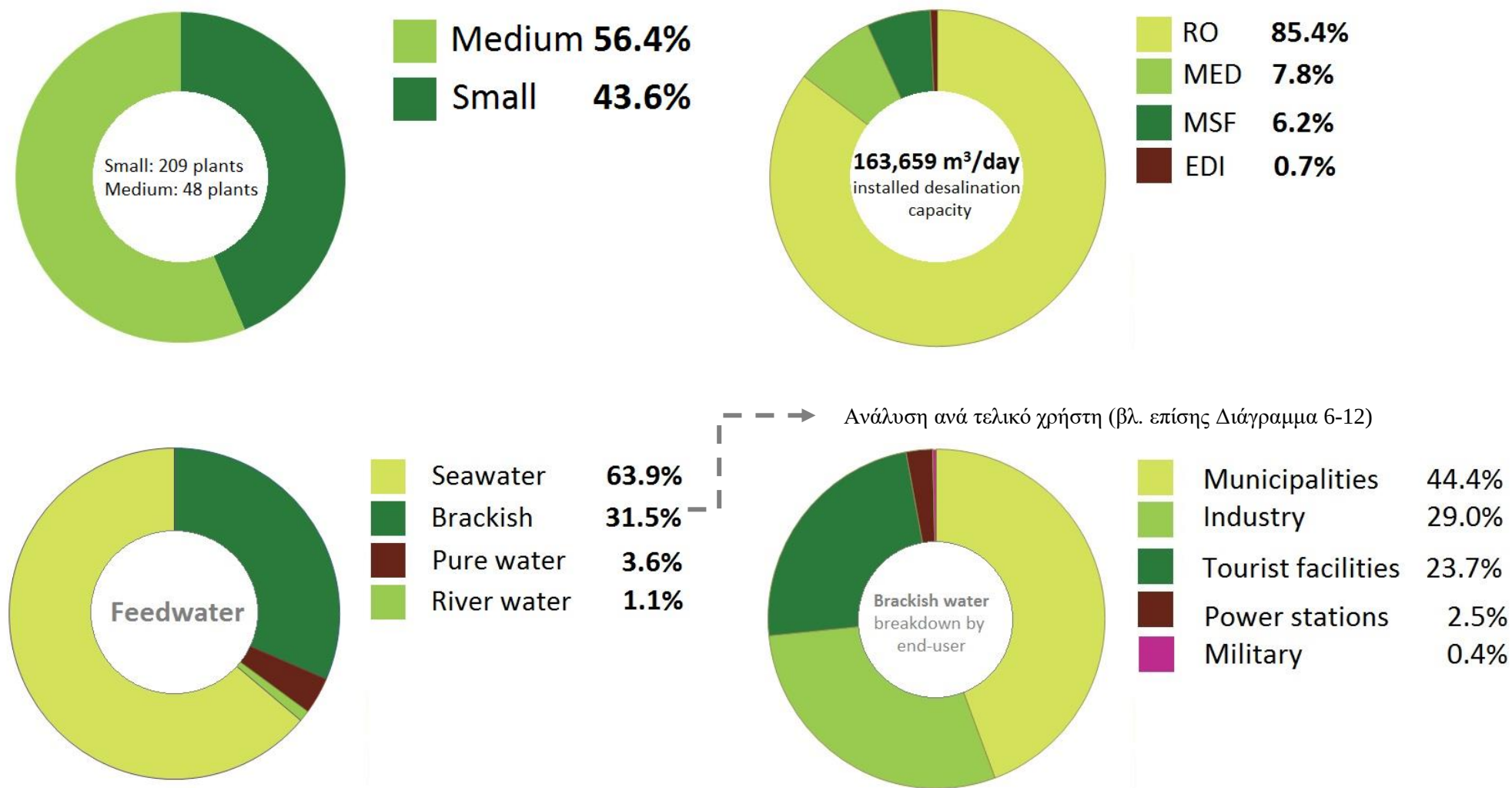
RO: Reverse Osmosis

MED: Multiple Effect Distillation

MSF: Multi-Stage Flash Distillation

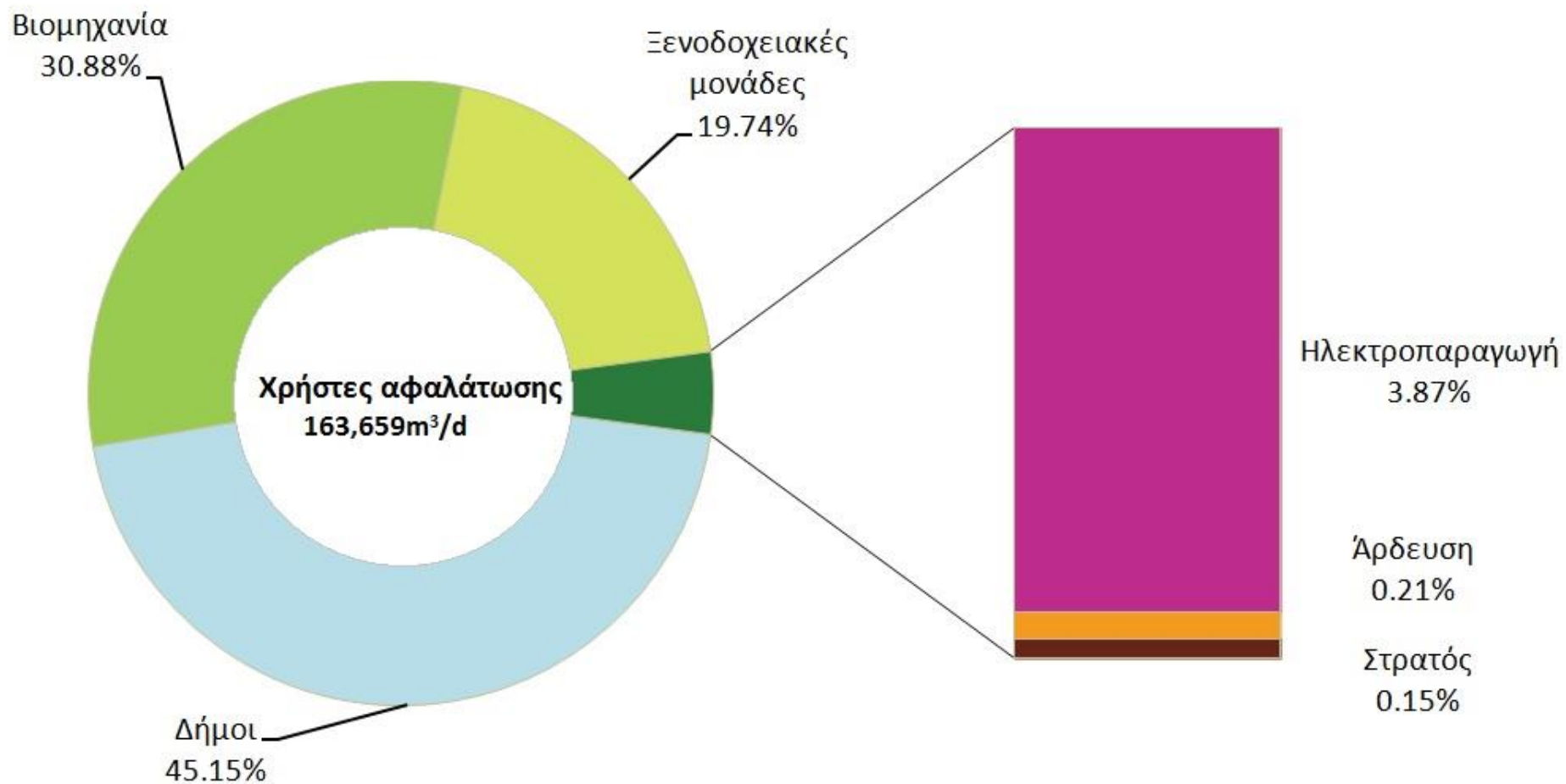
Τα στοιχεία αντλήθηκαν από: (Alvarado-Revilla, et al., 2015)

Διάγραμμα 6-9: Μονάδες αφαλάτωσης, ανάλυση ανά τεχνολογία, Ελλάδα (2014)



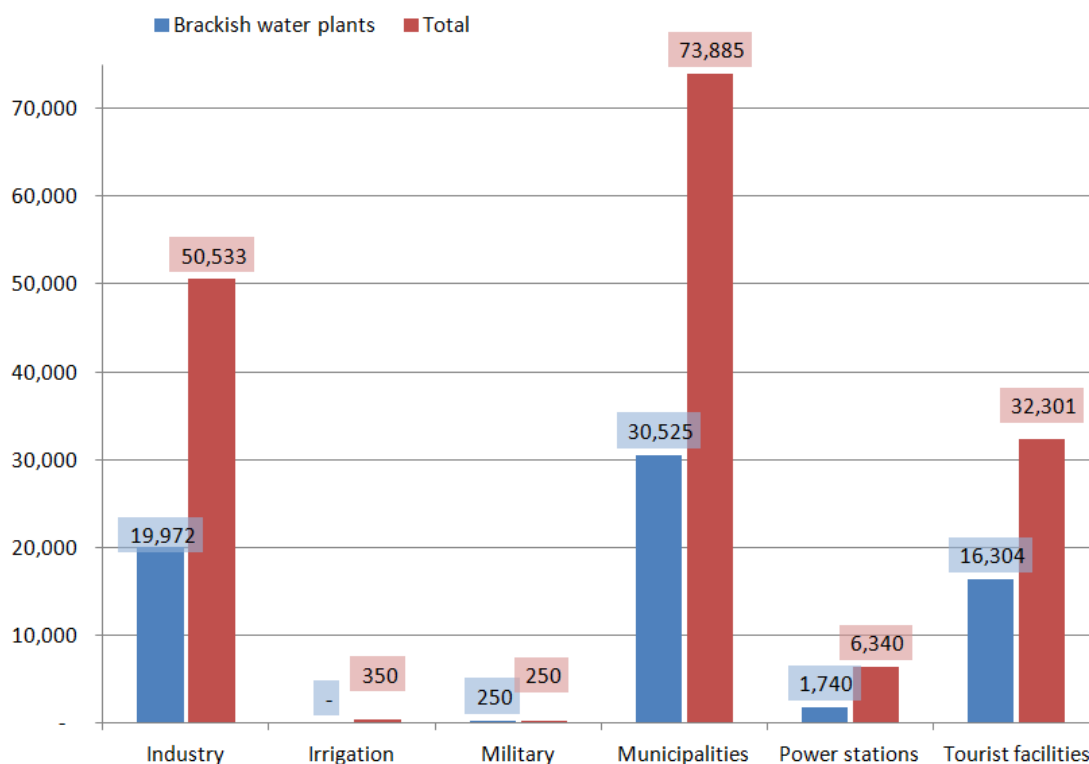
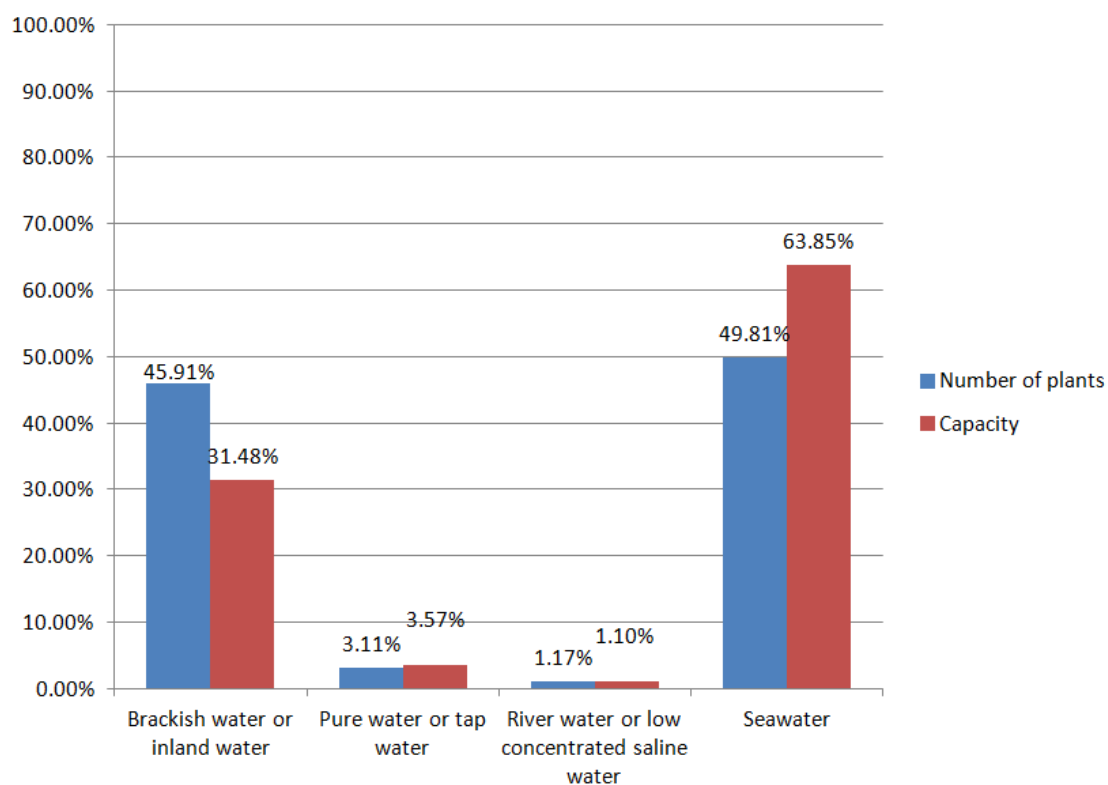
Τα στοιχεία αντλήθηκαν από: (Alvarado-Revilla, et al., 2015)

Διάγραμμα 6-10: Ελληνική αγορά αφαλάτωσης, κατάταξη σύμφωνα με το μέγεθος των μονάδων (πάνω αριστερά), με την τεχνική αφαλάτωσης (πάνω δεξιά), την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας (κάτω αριστερά) και τον τελικό χρήστη μονάδων αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού (κάτω δεξιά)



Τα στοιχεία αντλήθηκαν από (Alvarado-Revilla, et al., 2015)

Διάγραμμα 6-11: Εγκατεστημένη δυναμικότητα ανά τελικό χρήστη, Ελλάδα (2014)



Τα στοιχεία αντλήθηκαν από (Alvarado-Revilla, et al., 2015)

Διάγραμμα 6-12: Ανάλυση ελληνικής αγοράς αφαλάτωσης ανά τελικό χρήστη. Ανάλυση στις μονάδες υφάλμυρου νερού

Στο Διάγραμμα 6-11, η εγκατεστημένη δυναμικότητα των μονάδων αφαλάτωσης αναλύεται ανά τελικό χρήστη. Το μεγαλύτερο ποσοστό των μονάδων αφαλάτωσης είναι εγκατεστημένο στους Δήμους (45.15%), έπειτα στη βιομηχανία (30.88%) και τέλος τον τουριστικό τομέα (19.74%). Ένα μικρό ποσοστό είναι εγκατεστημένο στις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής για παραγωγή νερού υψηλής ποιότητας για την τροφοδοσία του λέβητα.

Οι παραπάνω τομείς παρουσιάζουν ενδιαφέρον για την εφαρμογή του συστήματος επεξεργασίας της άλμης και αναλύονται χωριστά στις ακόλουθες ενότητες.

6.4.1.1 Δημοτικές μονάδες αφαλάτωσης

Σύμφωνα με την πιο πρόσφατη μελέτη του Global Water Intelligence (2015), στους Δήμους της Ελλάδας είναι εγκατεστημένες (και λειτουργικές) 102 μονάδες αφαλάτωσης με συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα ίση με 73,885 m³/ημέρα. Η δυναμικότητα αυτή αντιστοιχεί σε ποσοστό 45.15% της συνολικής εγκατεστημένης δυναμικότητας (163,659 m³/ημέρα) για όλες τις χρήσεις αφαλάτωσης στην Ελλάδα (βλ.Διάγραμμα 6-11). Τα στοιχεία των μονάδων αυτών δίνονται στον Πίνακα 6-15 ενώ οι θέσεις τους έχουν αποτυπωθεί με χρήση GIS στο Χάρτη 6-1.

Όπως φαίνεται από τον πίνακα, όλες οι μονάδες χρησιμοποιούν την τεχνική της αντίστροφης όσμωσης, εκτός από μία μονάδα στην Αθήνα, η οποία χρησιμοποιεί τη μέθοδο της εξάτμισης με πολλαπλές βαθμίδες (MED).

Αναφορικά με το νερό τροφοδοσίας:

- 54,160 m³/ημέρα (ή ποσοστό 73.3%) παράγονται από θαλασσινό νερό
- 16,025 m³/ημέρα (ή ποσοστό 21.7%) παράγονται από υφάλμυρο νερό
- 2,200 m³/ημέρα (ή ποσοστό 3.0%) παράγονται από νερό δικτύου
- 1,500 m³/ημέρα (ή ποσοστό 2.0%) παράγονται από επιφανειακό νερό

Αναφορικά με το μέγεθος των μονάδων:

- 82 από τις 102 μονάδες (ή ποσοστό 80.4%) είναι μονάδες μικρού μεγέθους
- 20 από τις 102 μονάδες (ή ποσοστό 19.6%) είναι μεσαίου μεγέθους

15 από τις 20 μονάδες αυτές είναι εγκατεστημένες στο νησιωτικό χώρο και έχουν συνολική δυναμικότητα 40,490 m³/ημέρα, ή ποσοστό 54.8% της συνολικής δυναμικότητας μονάδων αφαλάτωσης που είναι εγκατεστημένες σε Δήμους. Ωστόσο μεγάλο ποσοστό και από τις μικρές μονάδες είναι εγκατεστημένες επίσης στο νησιωτικό χώρο (58 από τις 77 μονάδες) και έχουν συνολική δυναμικότητα 23,197 m³/ημέρα, ή ποσοστό 31.4% της συνολικής δυναμικότητας μονάδων αφαλάτωσης που είναι εγκατεστημένες σε Δήμους.

Αθροιστικά, οι μονάδες που είναι εγκατεστημένες σε Δήμους του νησιωτικού χώρου της Ελλάδας είναι 73 και έχουν εγκατεστημένη δυναμικότητα 63,687 m³/ημέρα, ή ποσοστό 86.2% της συνολικής δυναμικότητας μονάδων αφαλάτωσης που είναι εγκατεστημένες σε Δήμους. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι πολλά από τα νησιά μας είναι άνυδρα, ενώ ο ηπειρωτικός χώρος παρουσιάζει πλούσια υδατικά αποθέματα.

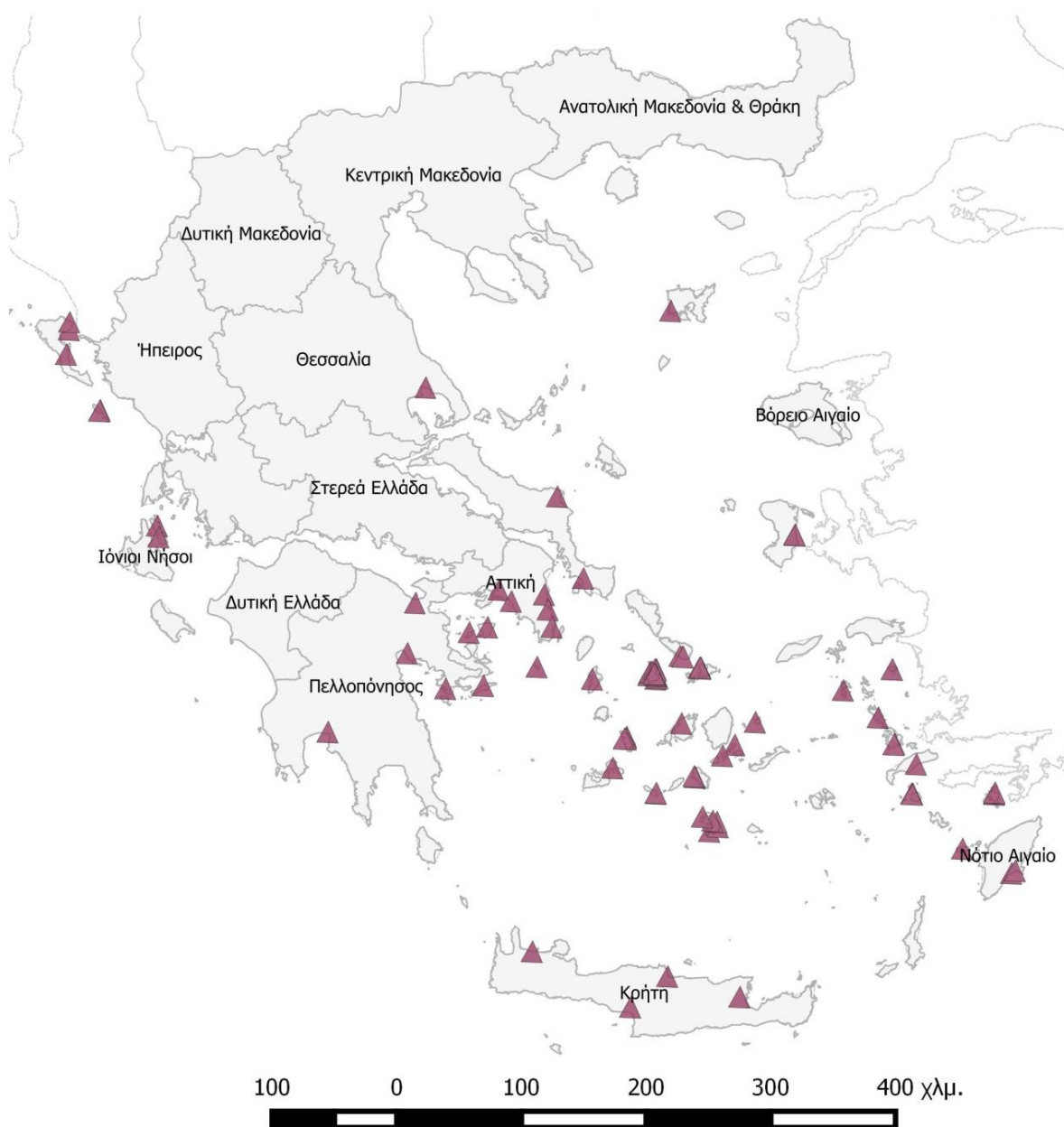
Πίνακας 6-15: Μονάδες αφαλάτωσης εγκατεστημένες σε Δήμους (2013)

α/α	Τοποθεσία	Δυναμικότητα (m ³ /d)	Μέγεθος	Τεχνολογία	Νερό Τροφοδοσίας
1	Νησιά Αιγαίου	300	S	RO	Υφάλμυρο
2	Χάλκη	600	S	RO	Θαλασσινό
3	Κουφονήσι	600	S	RO	Θαλασσινό
4	Σχοινούσα	400	S	RO	Θαλασσινό
5	Ύδρα	1600	M	RO	Θαλασσινό
6	Ακρωτήρι	250	S	RO	Θαλασσινό
7	Φθιώτιδα	300	S	RO	Υφάλμυρο
8	Κρήτη	450	S	RO	Θαλασσινό
9	Αρχαία Κόρινθος	210	S	RO	Υφάλμυρο
10	Κύθνος	600	S	RO	Θαλασσινό
11	Ρόδος	550	S	RO	Υφάλμυρο
12	Κώς	300	S	RO	Υφάλμυρο
13	Φολέγανδρος	360	S	RO	Θαλασσινό
14	Παλαιό Φάληρο	100	S	RO	Θαλασσινό
15	Καλαμάτα	150	S	RO	Υφάλμυρο
16	Τήνος	720	S	RO	Θαλασσινό
17	Αγκίστρι	1200	M	RO	Θαλασσινό
18	Δονούσα	150	S	RO	Θαλασσινό
19	Κάλυμνος	6	S	RO	Θαλασσινό

α/α	Τοποθεσία	Δυναμικότητα (m ³ /d)	Μέγεθος	Τεχνολογία	Νερό Τροφοδοσίας
20	Κάλυμνος	12	S	RO	Θαλασσινό
21	Αθήνα	53	S	RO	Θαλασσινό
22	Έξω Λακωνία	350	S	RO	Υφάλμυρο
23	Πόρτο Χέλι	445	S	RO	Θαλασσινό
24	Φολέγανδρος	720	S	RO	Θαλασσινό
25	Πάτμος	1200	M	RO	Θαλασσινό
26	Αίγινα	500	S	RO	Θαλασσινό
27	-	8000	M	RO	Θαλασσινό
28	Σαντορίνη	500	S	RO	Θαλασσινό
29	Θηρασιά	140	S	RO	Θαλασσινό
30	Αγαθονήσι	80	S	RO	Θαλασσινό
31	Εύβοια	700	S	RO	Υφάλμυρο
32	Επαρχία Χίου	1000	M	RO	Θαλασσινό
33	Κρήτη	1000	M	RO	Θαλασσινό
34	Ίος	1000	M	RO	Θαλασσινό
35	Ιθάκη	535	S	RO	Θαλασσινό
36	Τήνος	1000	M	RO	Θαλασσινό
37	Σύμη	1800	M	RO	Θαλασσινό
38	Βόλος	5000	M	RO	Υφάλμυρο
39	Μύκονος	4500	M	RO	Θαλασσινό
40	Σίφνος	500	S	RO	Θαλασσινό
41	Σίφνος	750	S	RO	Υφάλμυρο
42	Σύμη	600	S	RO	Θαλασσινό
43	Σίφνος	500	S	RO	Θαλασσινό
44	Σύμη	550	S	RO	Θαλασσινό
45	Αθήνα	250	S	RO	Θαλασσινό
46	Ερμούπολη	1590	M	RO	Θαλασσινό
47	Θήρα	130	S	RO	Υφάλμυρο
48	Παξοί	264	S	RO	Θαλασσινό
49	Κρήτη	310	S	RO	Υφάλμυρο
50	Εύβοια	480	S	RO	Υφάλμυρο
51	Αθήνα	720	S	MED	Θαλασσινό
52	Παξοί	250	S	RO	Θαλασσινό
53	Ρόδος	450	S	RO	Υφάλμυρο
54	Κέρκυρα	200	S	RO	Θαλασσινό
55	Ναύπλιο	240	S	RO	Υφάλμυρο
56	Αθήνα	1300	M	RO	Υφάλμυρο

α/α	Τοποθεσία	Δυναμικότητα (m ³ /d)	Μέγεθος	Τεχνολογία	Νερό Τροφοδοσίας
57	Λήμνος	290	S	RO	Υφάλμυρο
58	Ερμούπολη	740	S	RO	Θαλασσινό
59	-	600	S	RO	Θαλασσινό
60	-	1200	M	RO	Θαλασσινό
61	Ίος	500	S	RO	Θαλασσινό
62	Σίφνος	250	S	RO	Θαλασσινό
63	-	384	S	RO	Θαλασσινό
64	-	425	S	RO	Υφάλμυρο
65	-	600	S	RO	Θαλασσινό
66	-	568	S	RO	Θαλασσινό
67	-	473	S	RO	Θαλασσινό
68	-	1500	M	RO	Επιφανειακό
69	Τήνος	500	S	RO	Θαλασσινό
70	Θήρα	320	S	RO	Θαλασσινό
71	Θήρα	160	S	RO	Θαλασσινό
72	Σύρος	140	S	RO	Θαλασσινό
73	Σύρος	2000	M	RO	Θαλασσινό
74	Σύρος	500	S	RO	Θαλασσινό
75	Σύρος	250	S	RO	Θαλασσινό
76	Σύρος	1200	M	RO	Θαλασσινό
77	Σύρος	500	S	RO	Θαλασσινό
78	Σύρος	500	S	RO	Θαλασσινό
79	Σύρος	800	S	RO	Θαλασσινό
80	Σύρος	600	S	RO	Θαλασσινό
81	Σύρος	500	S	RO	Θαλασσινό
82	Σύρος	140	S	RO	Θαλασσινό
83	Πάρος	1200	M	RO	Υφάλμυρο
84	Νίσυρος	300	S	RO	Θαλασσινό
85	Νίσυρος	300	S	RO	Θαλασσινό
86	Νίσυρος	300	S	RO	Θαλασσινό
87	Μύκονος	2000	M	RO	Θαλασσινό
88	Μύκονος	1200	M	RO	Θαλασσινό
89	Μύκονος	500	S	RO	Θαλασσινό
90	Λέρος	240	S	RO	Υφάλμυρο
91	Κίμωλος	100	S	RO	Θαλασσινό
92	Ιθάκη	500	S	RO	Θαλασσινό
93	Χίος	750	S	RO	Υφάλμυρο

α/α	Τοποθεσία	Δυναμικότητα (m ³ /d)	Μέγεθος	Τεχνολογία	Νερό Τροφοδοσίας
94	Χίος	600	S	RO	Υφάλμυρο
95	Κασσιόπη	500	S	RO	Υφάλμυρο
96	Άνω Σύρος	140	S	RO	Θαλασσινό
97	Άγιος Γεώργιος	500	S	RO	Υφάλμυρο
98	Αμοργός	450	S	RO	Θαλασσινό
99	-	350	S	RO	Δικτύου
100	-	350	S	RO	Δικτύου
101	-	750	S	RO	Δικτύου
102	-	750	S	RO	Δικτύου



Χάρτης 6-1: Δήμοι με μονάδες αφαλάτωσης στην Ελλάδα (στοιχεία 2015)

6.4.1.2 Βιομηχανία

Σύμφωνα με την πιο πρόσφατα μελέτη του Global Water Intelligence (2015), στην ελληνική βιομηχανία είναι εγκατεστημένες (και λειτουργικές) 61 μονάδες αφαλάτωσης με συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα ίση με 49,233 m³/ημέρα. Η δυναμικότητα αυτή αντιστοιχεί σε ποσοστό 30% της συνολικής εγκατεστημένης δυναμικότητας (163,659 m³/ημέρα) για όλες τις χρήσεις αφαλάτωσης στην Ελλάδα (βλ. Διάγραμμα 6-10). Τα στοιχεία των μονάδων αυτών δίνονται στον Πίνακα 6-16 ενώ οι θέσεις τους έχουν αποτυπωθεί με χρήση GIS στο Χάρτη 6-2.

Αναφορικά με τις μεθόδους αφαλάτωσης που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, ισχύουν τα ακόλουθα:

- 54 μονάδες με δυναμικότητα 30,681 m³/ημέρα (ή ποσοστό 62.3% επί του συνόλου των βιομηχανικών μονάδων αφαλάτωσης) χρησιμοποιούν τη μέθοδο της αντίστροφης όσμωσης (RO)
- 3 μονάδες με δυναμικότητα 10,080 m³/ημέρα (ή ποσοστό 20.2% επί του συνόλου των βιομηχανικών μονάδων αφαλάτωσης) χρησιμοποιούν τη μέθοδο της πολυβάθμιας εκρηκτικής εξάτμισης (MSF)
- 3 μονάδες με δυναμικότητα 7,320 m³/ημέρα (ή ποσοστό 2.3% επί του συνόλου των βιομηχανικών μονάδων αφαλάτωσης) χρησιμοποιούν τη μέθοδο της πολυβάθμιας εξάτμισης (MED)
- 1 μονάδα με δυναμικότητα 1,152 m³/ημέρα (ή ποσοστό 14.7% επί του συνόλου των βιομηχανικών μονάδων αφαλάτωσης) χρησιμοποιούν τη μέθοδο του ηλεκτροαπιονισμού (EDI)

Αναφορικά με το νερό τροφοδοσίας:

- 19 μονάδες με δυναμικότητα 28,382 m³/ημέρα (ή ποσοστό 57.6%) επεξεργάζονται θαλασσινό νερό
- 36 μονάδες με δυναμικότητα 16,451 m³/ημέρα (ή ποσοστό 33%) επεξεργάζονται υφάλμυρο νερό
- 2 μονάδες με δυναμικότητα 300 m³/ημέρα (ή ποσοστό 0.6%) επεξεργάζονται επιφανειακό νερό

- 4 μονάδες με δυναμικότητα 3,650 m³/ημέρα (ή ποσοστό 7.3%) επεξεργάζονται νερό από το δίκτυο ύδρευσης

Αναφορικά με το μέγεθος των μονάδων:

- 42 από τις 61 μονάδες (ή ποσοστό 68.9%) είναι μονάδες μικρού μεγέθους
- 19 από τις 61 μονάδες (ή ποσοστό 31.1%) είναι μεσαίου μεγέθους

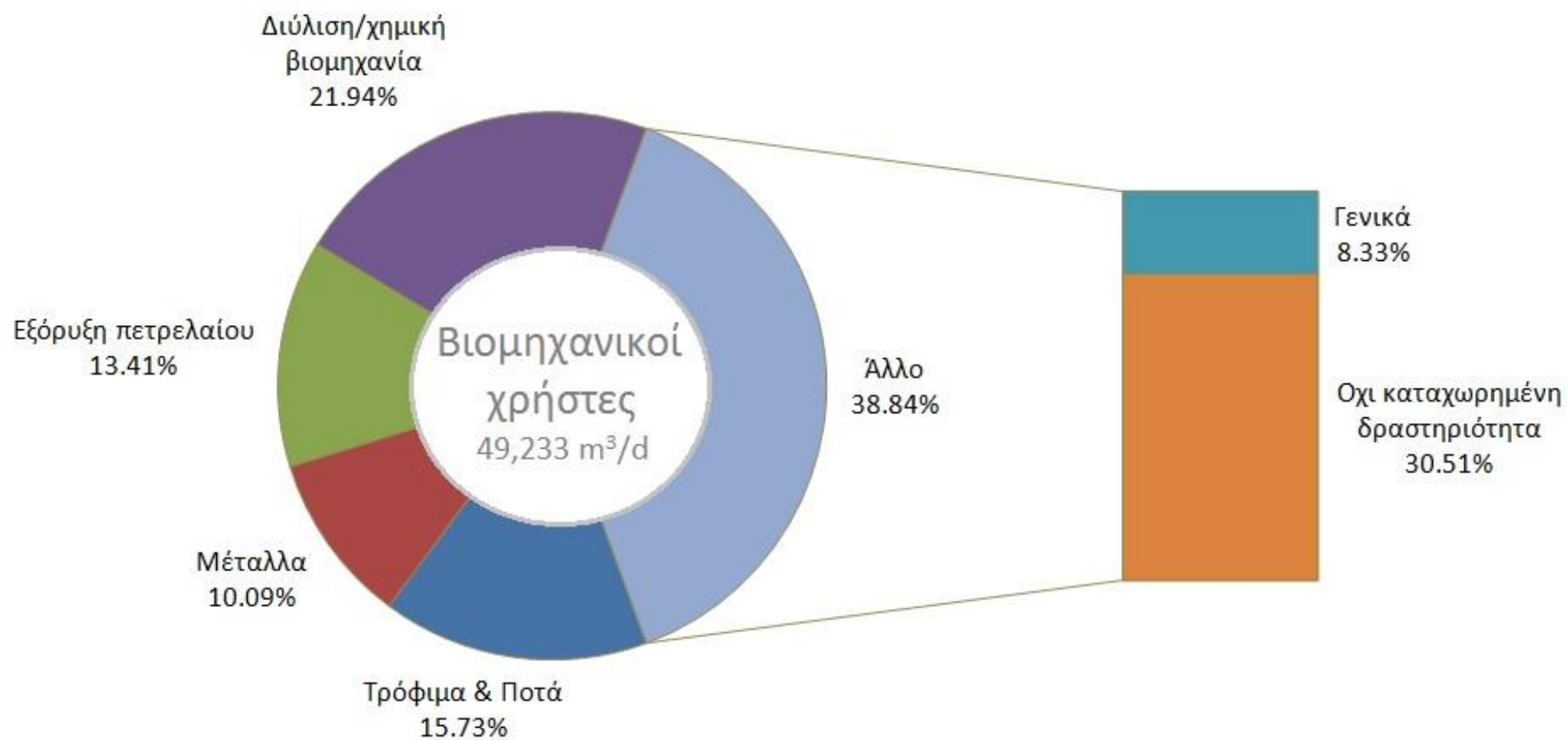
Οι μονάδες μεσαίου μεγέθους έχουν συνολική δυναμικότητα 36,544 m³/ημέρα, ή ποσοστό 74.2% της συνολικής δυναμικότητας βιομηχανικών μονάδων αφαλάτωσης.

Στο Διάγραμμα 6-13, αναλύεται περαιτέρω η χρήση της αφαλάτωσης ανά βιομηχανικό κλάδο.

Πίνακας 6-16: Μονάδες αφαλάτωσης για βιομηχανική χρήση στην Ελλάδα.

α/α	Τοποθεσία	Δυναμικότητα (m ³ /d)	Μέγεθος	Μέθοδος	Νερό Τροφοδοσίας
1		64	S	RO	Θαλασσινό
2	Θεσσαλονίκη	120	S	RO	Υφάλμυρο
3		180	S	RO	Υφάλμυρο
4	Κρήτη	188	S	RO	Θαλασσινό
5	Αθήνα	300	S	RO	Θαλασσινό
6	Κώς	325	S	RO	Υφάλμυρο
7	Πόρτο Χέλι	360	S	RO	Θαλασσινό
8	Νομός Αργολίδος	365	S	RO	Υφάλμυρο
9	Λάρισα	470	S	RO	Υφάλμυρο
10	Θεσσαλονίκη	570	S	RO	Υφάλμυρο
11	Αθήνα	690	S	RO	Υφάλμυρο
12	Ρόδος	700	S	RO	Θαλασσινό
13	Σπερσοπούλα	300	S	RO	Θαλασσινό
14	Αττική	200	S	RO	Υφάλμυρο
15	Αυλώνα	100	S	RO	Δίκτυο ύδρευσης
16	Ξάνθη	750	S	RO	Υφάλμυρο
17	Πάρος	2600	M	RO	Θαλασσινό
18	Κρήτη	1000	M	RO	Θαλασσινό
19	Χίος	1000	M	RO	Θαλασσινό
20	Αττική	1000	M	RO	Θαλασσινό
21	Ίος	1100	M	RO	Θαλασσινό
22	Βόλος	1200	M	RO	Υφάλμυρο

α/α	Τοποθεσία	Δυναμικότητα (m ³ /d)	Μέγεθος	Μέθοδος	Νερό Τροφοδοσίας
23	Μάνδρα	200	S	RO	Επιφανειακό
24	Αθήνα	200	S	RO	Υφάλμυρο
25	Λάρισα	225	S	RO	Υφάλμυρο
26	Κοζάνη	300	S	RO	Υφάλμυρο
27	Χαλκίδα	350	S	RO	Υφάλμυρο
28	Ελλάδα	1172	M	RO	Υφάλμυρο
29	Λαμία	350	S	RO	Υφάλμυρο
30	Πάτρα	240	S	RO	Υφάλμυρο
31	Βόλος	228	S	RO	Υφάλμυρο
32	-	1200	M	RO	Θαλασσινό
33	Βέροια	170	S	RO	Υφάλμυρο
34	Οινόφυτα	104	S	RO	Υφάλμυρο
35	Αθήνα	228	S	RO	Υφάλμυρο
36	Κρήτη	100	S	RO	Επιφανειακό
37	Βόλος	2400	M	RO	Υφάλμυρο
38	Κρήτη	235	S	RO	Υφάλμυρο
39	Ρόδος	340	S	RO	Υφάλμυρο
40	Χαλκίδα	340	S	RO	Υφάλμυρο
41	Σχηματάρι	185	S	RO	Υφάλμυρο
42	Βόνιτσα	220	S	RO	Υφάλμυρο
43	Κρήτη	144	S	RO	Υφάλμυρο
44	Θεσσαλονίκη	1000	M	RO	Υφάλμυρο
45	Θεσσαλονίκη	1000	M	RO	Δίκτυο ύδρευσης
46	Θεσσαλονίκη	960	S	RO	Υφάλμυρο
47	Σύρος	250	S	RO	Θαλασσινό
48	Σύρος	150	S	RO	Δίκτυο ύδρευσης
49	Πάτρα	2400	M	RO	Δίκτυο ύδρευσης
50	Ηράκλειο	288	S	RO	Υφάλμυρο
51	Εύβοια	160	S	RO	Υφάλμυρο
52	Χίος	1920	M	RO	Θαλασσινό
53	Χαλκίδα	230	S	RO	Υφάλμυρο
54	Άργος	180	S	RO	Υφάλμυρο
55	Άργος	180	S	RO	Υφάλμυρο



Διάγραμμα 6-13: Ανάλυση μονάδων αφαλάτωσης ανά βιομηχανικό χρήστη, Ελλάδα



Χάρτης 6-2: Μονάδες αφαλάτωσης εγκατεστημένες στη βιομηχανία, Ελλάδα (Στοιχεία 2015)

6.4.1.3 Ηλεκτροπαραγωγή

Σύμφωνα με την πιο πρόσφατη μελέτη του Global Water Intelligence (2015), έχουν εγκατασταθεί 8 συστήματα αφαλάτωσης σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, με συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα ίση με 7,640 m³/ημέρα. Η δυναμικότητα αυτή αντιστοιχεί σε ποσοστό 4.7% της συνολικής εγκατεστημένης δυναμικότητας (163,659 m³/ημέρα) για όλες τις χρήσεις αφαλάτωσης στην Ελλάδα (βλ.Διάγραμμα 6-11). Τα στοιχεία των μονάδων αυτών δίνονται στον Πίνακα 6-17.

Αναφορικά με τις μεθόδους αφαλάτωσης που χρησιμοποιούνται στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, ισχύουν τα ακόλουθα:

- 5 μονάδες με δυναμικότητα 3,040 m³/ημέρα (ή ποσοστό 39.8% επί του συνόλου των βιομηχανικών μονάδων αφαλάτωσης) χρησιμοποιούν τη μέθοδο της αντίστροφης όσμωσης (RO)
- 3 μονάδες με δυναμικότητα 4,600 m³/ημέρα (ή ποσοστό 60.2% επί του συνόλου των βιομηχανικών μονάδων αφαλάτωσης) χρησιμοποιούν τη μέθοδο της πολυβάθμιας εξάτμισης (MED).

Αναφορικά με το νερό τροφοδοσίας:

- 4 μονάδες με δυναμικότητα 5,600 m³/ημέρα (ή ποσοστό 73.3%) επεξεργάζονται θαλασσινό νερό
- 4 μονάδες με δυναμικότητα 2,040 m³/ημέρα (ή ποσοστό 26.7%) επεξεργάζονται υφάλμυρο νερό

Αναφορικά με το μέγεθος των μονάδων:

- 5 από τις 8 μονάδες (ή ποσοστό 62.5%) είναι μονάδες μικρού μεγέθους
- 3 από τις 8 μονάδες (ή ποσοστό 37.5%) είναι μεσαίου μεγέθους

Οι μονάδες μεσαίου μεγέθους έχουν συνολική δυναμικότητα 5,000 m³/ημέρα, ή ποσοστό 65.4% της συνολικής δυναμικότητας βιομηχανικών μονάδων αφαλάτωσης.

Πίνακας 6-17: Μονάδες αφαλάτωσης εγκατεστημένες σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής

α/α	Τοποθεσία	Δυναμικότητα (m ³ /ημέρα)	Μέγεθος	Τεχνική	Νερό τροφοδοσίας
1	Λαύριο	2,400	M	MED	Θαλασσινό
2	Κρήτη	1,600	M	MED	Θαλασσινό
3	Άγ. Γεώργιος	1,000	M	RO	Θαλασσινό
4	Ηράκλειο	860	S	RO	Υφάλμυρο
5	Θεσσαλονίκη	600	S	MED	Θαλασσινό
6	Αλιβέρι	480	S	RO	Υφάλμυρο
7	Κρήτη	400	S	RO	Υφάλμυρο
8	Κοζάνη	300	S	RO	Υφάλμυρο

Σημείωση: Τα στοιχεία έχουν αντληθεί από (Allen, και συν., 2015)

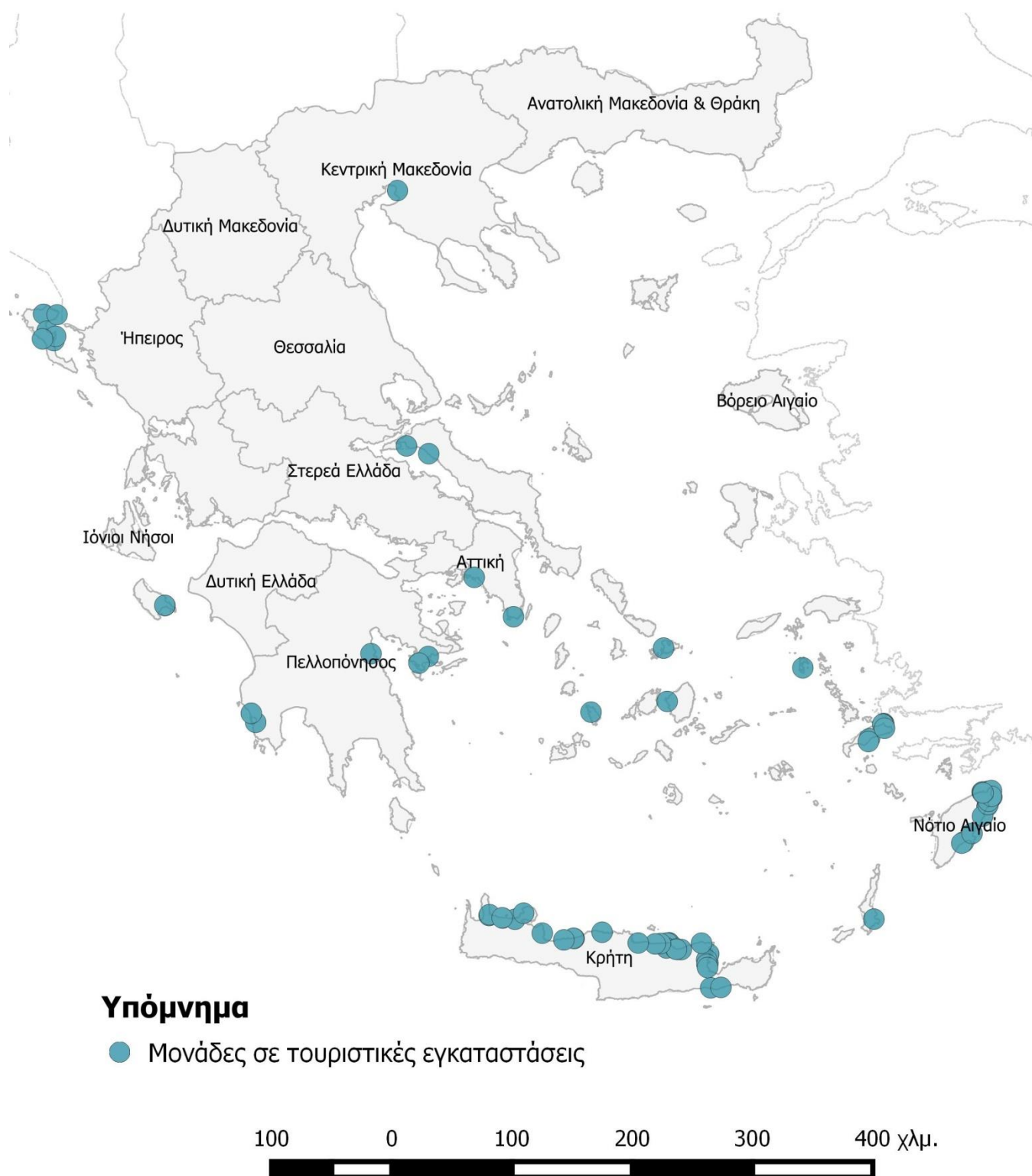
6.4.1.4 Τουριστικός τομέας

Σύμφωνα με την πιο πρόσφατα μελέτη του Global Water Intelligence (2015), στην ελληνική βιομηχανία είναι εγκατεστημένες (και λειτουργικές) 84 μονάδες αφαλάτωσης με συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα ίση με 32,301 m³/ημέρα. Η δυναμικότητα αυτή αντιστοιχεί σε ποσοστό 19.7% της συνολικής εγκατεστημένης δυναμικότητας (163,659 m³/ημέρα) για όλες τις χρήσεις αφαλάτωσης στην Ελλάδα (βλ.Διάγραμμα 6-11). Οι θέσεις των μονάδων αυτών έχουν αποτυπωθεί με χρήση GIS στο Χάρτη 6-3.

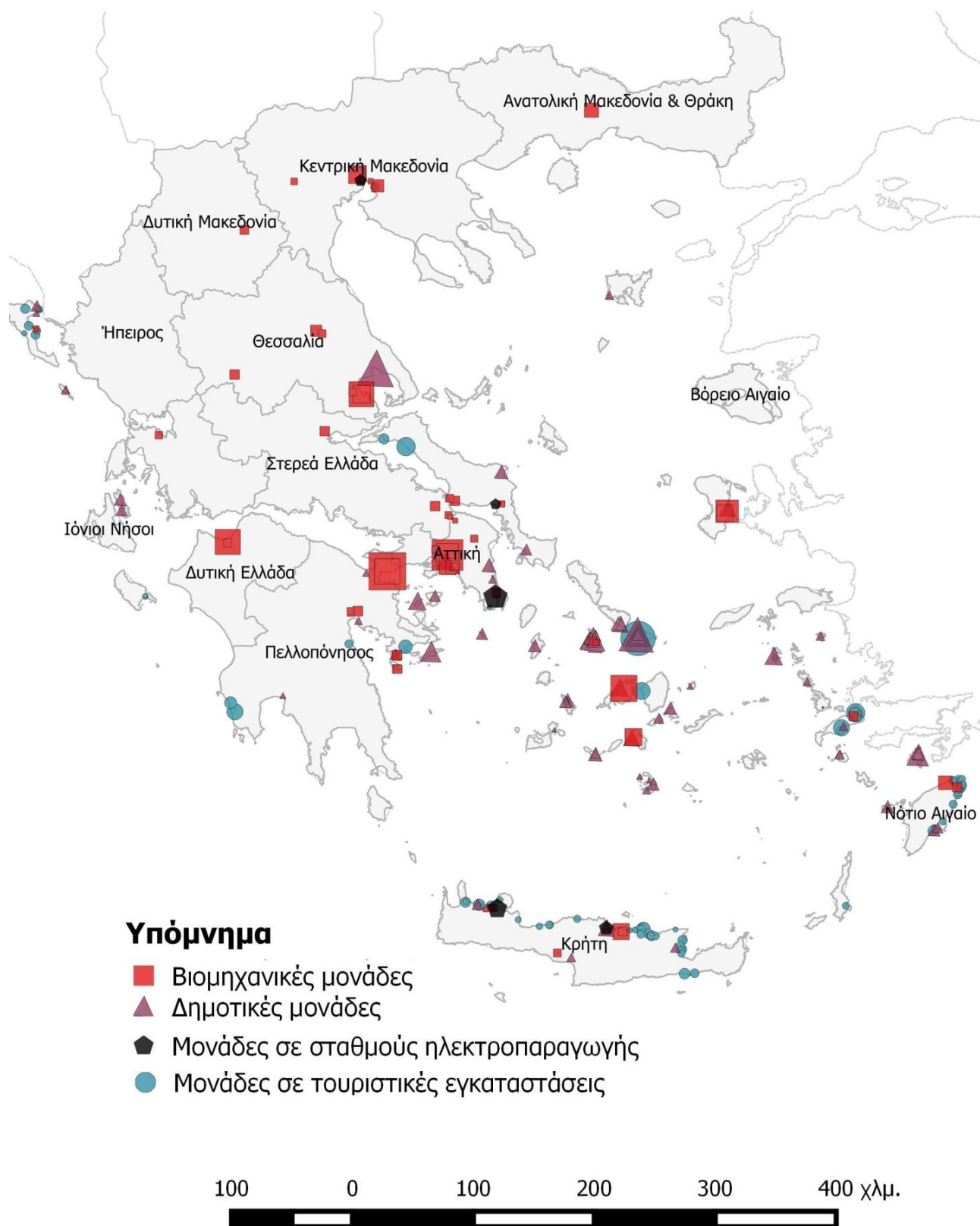
Όλες οι τουριστικές μονάδες που έχουν μονάδες αφαλάτωσης είναι τύπου Αντίστροφης Όσμωσης. Από τις μονάδες αυτές, το 69% αποτελεί μικρές μονάδες (<1,000 m³/ημέρα). Οι μονάδες αυτές είναι συγκεντρωμένες κυρίως στα Δωδεκάνησα, στις Κυκλάδες και στην Κρήτη.

Πολλές από τις τουριστικές μονάδες αντιμετωπίζουν πρόβλημα με τη διαχείριση της άλμης που παράγεται από τις μονάδες αφαλάτωσης. Αυτό συμβαίνει κυρίως διότι ένα μεγάλο ποσοστό των ξενοδοχειακών μονάδων βρίσκεται στην ενδοχώρα και αξιοποιεί υφάλμυρο νερό (50.5% των μονάδων). Η σωστή διαχείριση της άλμης είναι πολλές φορές μία επιτακτική ανάγκη για τις μονάδες αυτές, κάτι το οποίο θα μπορούσε να δημιουργήσει κατάλληλες ευκαιρίες για εμπορική αξιοποίηση της καινοτόμου τεχνολογίας που προτείνεται στη διατριβή.

Ωστόσο, η αξιοποίηση των τελικών προϊόντων από το σύστημα ενδέχεται να είναι προβληματική. Το παραγόμενο νερό αν και υψηλότερων προδιαγραφών, μπορεί να καλύψει τις ανάγκες των τουριστικών μονάδων. Ωστόσο, αναφορικά με τα άλατα, στο τωρινό στάδιο ανάπτυξης θα απαιτούν τελική διάθεση σε ΧΥΤΑ, ενώ σε επιτυχή εφαρμογή διαχωρισμού των αλάτων, οι τελικοί χρήστες είναι κυρίως βιομηχανικοί. Η διαχείριση του τελικού προϊόντος εκτιμάται πως δεν εμπίπτει στα πλαίσια της επιχειρηματικής δραστηριότητάς τους, ούτε της γενικότερης γνώσης/τεχνογνωσίας.



Χάρτης 6-3: Μονάδες αφαλάτωσης εγκατεστημένες σε ξενοδοχειακές μονάδες, Ελλάδα (στοιχεία 2015)



Σημείωση: στο χάρτη αυτό έχει εφαρμοστεί κανόνας δυναμικότητας. Το μέγεθος του συμβόλου αντιστοιχεί στη σχετική δυναμικότητα της μονάδας.

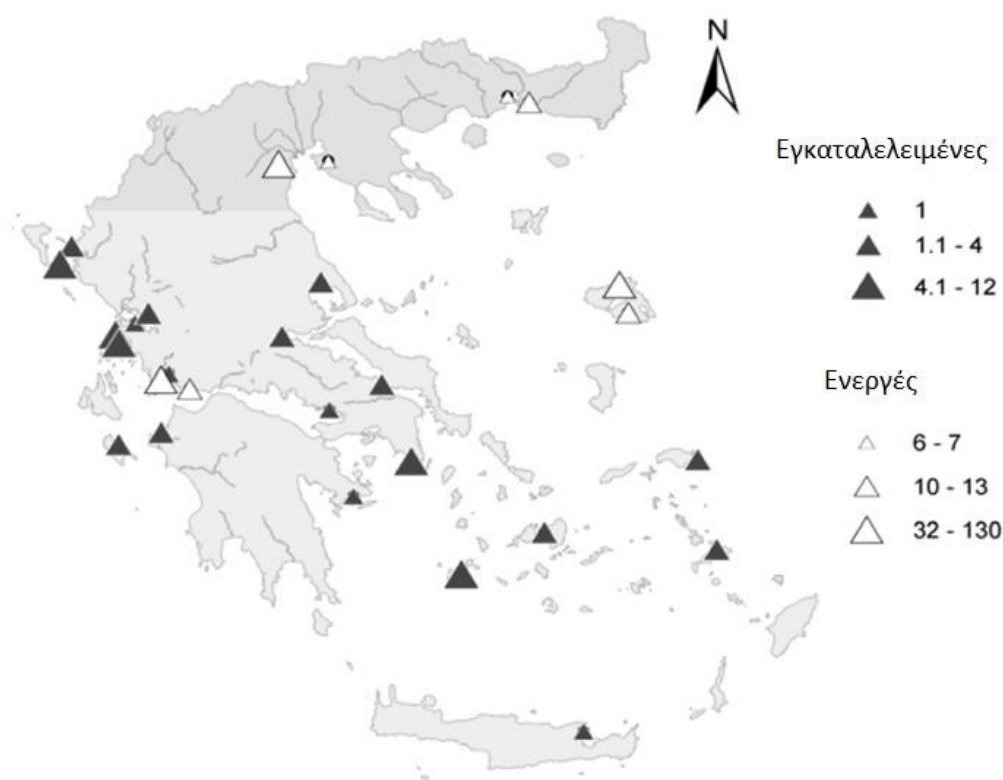
Χάρτης 6-4: Μονάδες αφαλάτωσης (συγκεντρωτικός χάρτης), Ελλάδα (στοιχεία 2015)

6.4.2 Αγορά άλατος

Πριν την παρουσίαση της αγοράς άλατος (κατανάλωση), κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστεί σύντομα η παραγωγή άλατος στην Ελλάδα.

6.4.3 Παραγωγή άλατος (αλυκές)

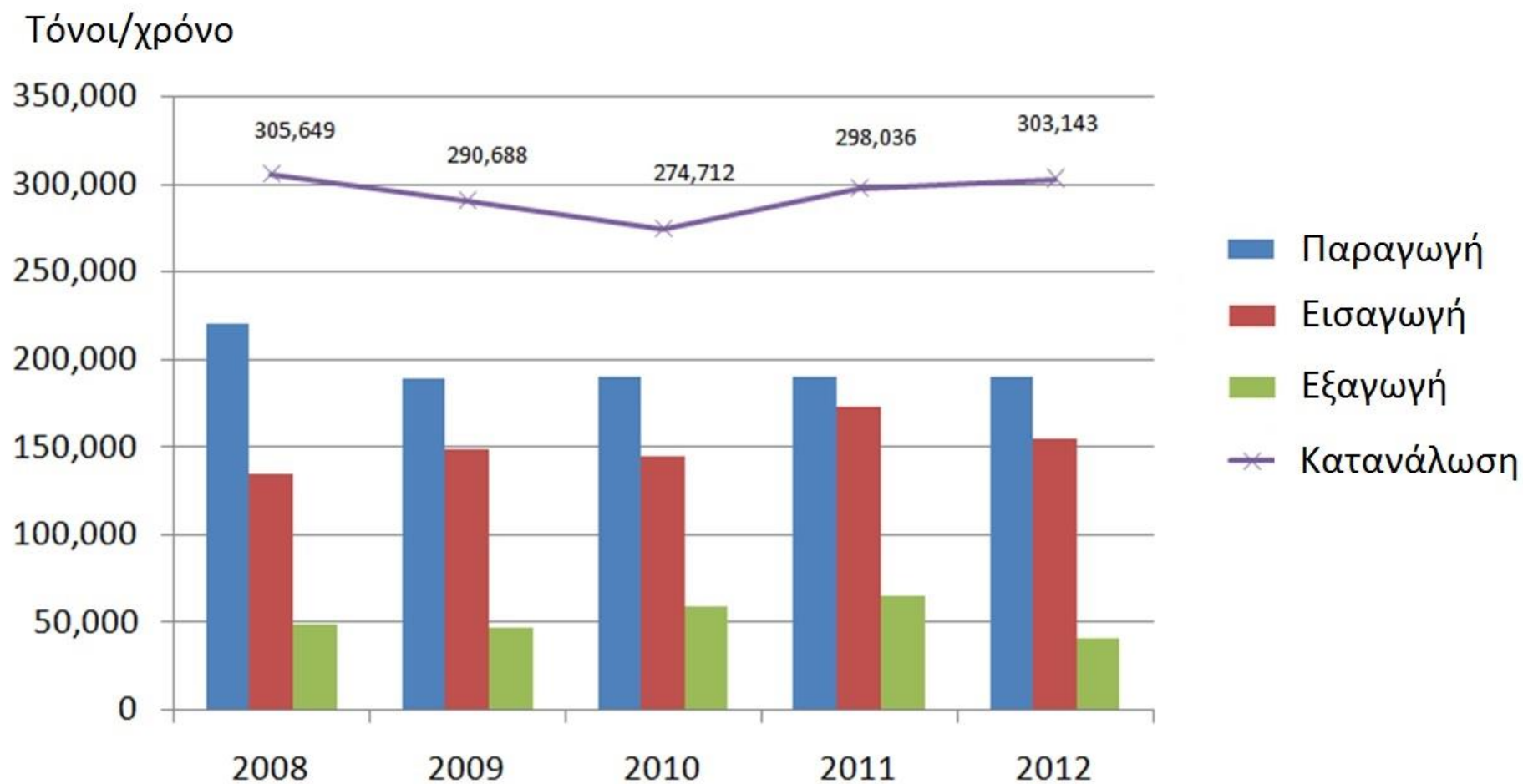
Η παραγωγή άλατος στην Ελλάδα εκτιμάται στους 190,000 τόνους (2012). Όλη η ποσότητα παράγεται με τη μέθοδο των αλυκών, όπως στις περισσότερες νότιες χώρες της Ευρώπης (βλ. Σχήμα 6-6). Κατά την ίδια χρονολογία, 67,985 τόνοι χλωριούχου νατρίου εξήχθησαν, ενώ περίπου 176,575 τόνοι χλωριούχου νατρίου εισήχθησαν στην Ελλάδα. Οι ποσότητες αλατιού εισάγονται συνήθως από τη Γαλλία, Ιταλία, Ισπανία, Αίγυπτο και Τυνησία (Mohar & Zagar, 2002). Η εγχώρια παραγωγή συνεισφέρει περίπου στο 65% της εγχώριας ζήτησης. Περισσότερο από το 92% της συνολικής ποσότητας αλατιού, παράγεται από τις Ελληνικές Αλυκές Α.Ε (Roskill, 2014). Η παραγωγή άλατος αποτελούσε παραδοσιακά έναν σημαντικό οικονομικό τομέα στην Ελλάδα τους τελευταίους δύο αιώνες. Πάνω από 20 αλυκές έχουν καταγραφεί στο χώρο της Ελλάδας, όμως οι περισσότερες από αυτές εγκαταλείφθηκαν μετά το 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο.



Σχήμα 6-5: Ελληνικές αλυκές (ενεργές και εγκαταλελειμμένες)



Σχήμα 6-6: Εγκαταστάσεις παραγωγής χλωριούχου νατρίου στην Ευρώπη, παρουσίαση ανά μέθοδο παραγωγής



Σημείωση: Τα στοιχεία αντλήθηκαν από (Roskill, 2014)

Διάγραμμα 6-14: Παραγωγή, εισαγωγή, εξαγωγή και κατανάλωση αλατιού στην Ελλάδα (2008-2012)

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 6-5, στην Ελλάδα υπάρχουν σήμερα 8 αλυκές εν λειτουργία. Η δυναμικότητα των αλυκών αυτών παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 6-18: Δυναμικότητα παραγωγής αλατιού ανά σύστημα στην Ελλάδα

α/α	Τοποθεσία	Έκταση (στρέμματα)	Δυναμικότητα (τόνοι/χρόνο)
1	Μεσολόγγι	11,220	120,000
2	Κίτρους, Πιερία	3,620	40,000
3	Καλλονή, Λέσβος	2,630	40,000
4	Μέση, Κομοτηνή	1,400	12,000
5	Πολυχνίτου, Λέσβος	600	10,000
6	Αγγελοχώρι	1,050	5,000
7	Νέα Κεσσάνη, Ξάνθη	900	5,000
Σύνολο:		21,420	232,000

Πηγή: (Ελληνικές Αλυκές, 2005)

6.4.4 Κατανάλωση άλατος

Η εγχώρια παραγωγή άλατος ικανοποιεί περίπου 65% της ζήτησης. Το 2012, εισήχθησαν 176,000 τόνοι άλατος, εκ των οποίων 75% από την Αίγυπτο. Οι βασικές χρήσεις του άλατος στην Ελλάδα είναι ο εκχιονισμός των δρόμων, η χημική βιομηχανία και η βιομηχανία τροφίμων. Γενικά, η κατανάλωση ανά χρήση δεν καταγράφεται συστηματικά στην Ελλάδα. Ως εκ τούτου δεν υπάρχει ανάλυση της κατανάλωσης στις επιμέρους χρήσεις. Η μόνη δημοσιευμένη πληροφορία αποτελεί τη συνολική κατανάλωση (303,143 τόνοι το 2012) και την κατανάλωση του άλατος στον τομέα της χημικής βιομηχανίας (~ 64,000 τόνοι).

Πίνακας 6-19: Κατανάλωση άλατος στη βιομηχανία παραγωγής χλωρίνης & καυστικού νατρίου, Ελλάδα (2012)

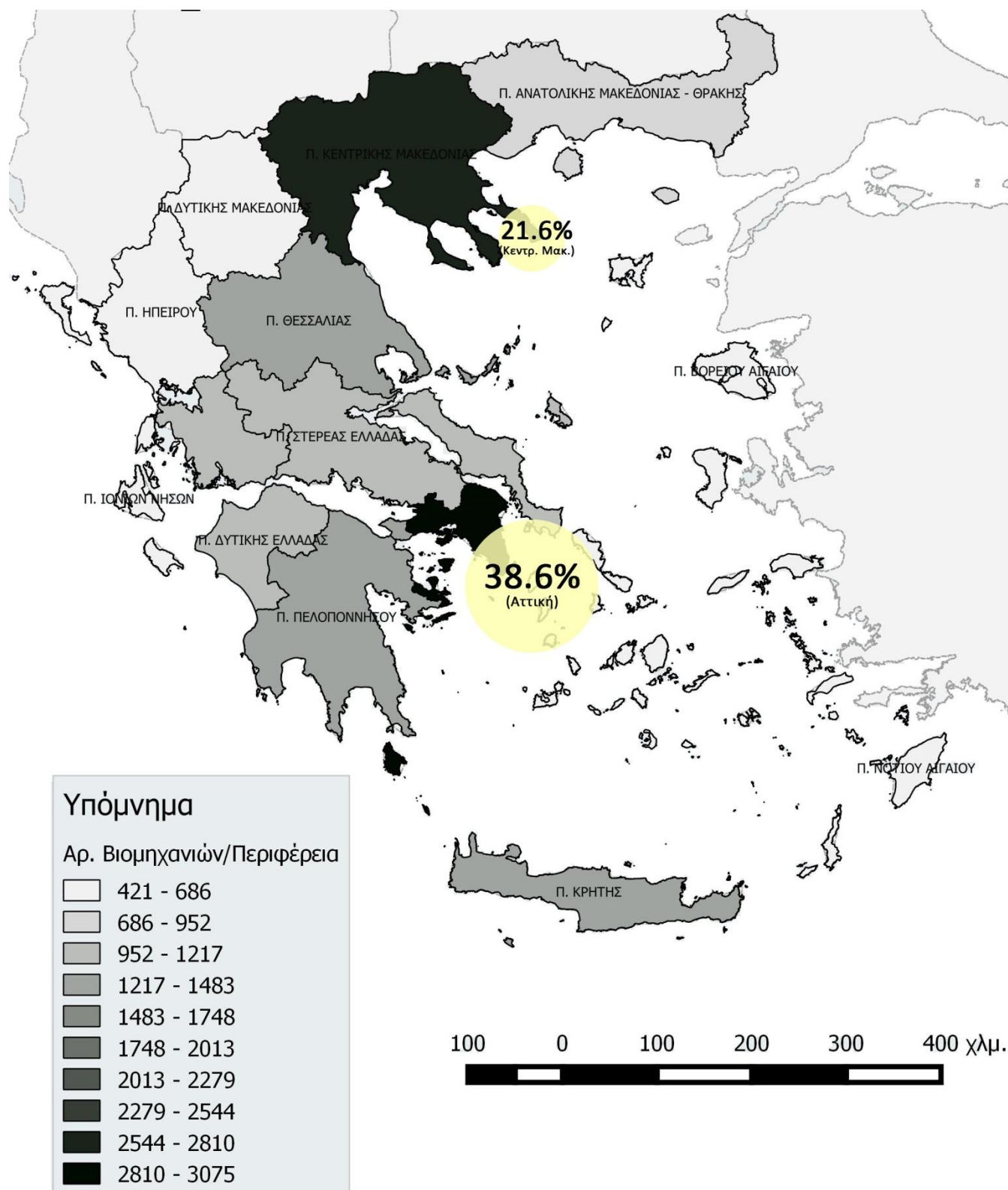
Εταιρεία	Τοποθεσία	Κατανάλωση (τόνοι/χρόνο)
Ελληνικά Πετρέλαια	Θεσσαλονίκη	40,000
Karachim	Οινόφυτα, Βοιωτία	4,000
Unilever Knorr	Μαρουσι, Αττική	20,000

Τα στοιχεία αντλήθηκαν από (Euro Chlor, 2011)

Ένας από τους στόχους της διατριβής αυτής είναι να γίνει μία πρώτη αποτύπωση των εμπορικών ευκαιριών για εφαρμογή τέτοιων συστημάτων στην Ελλάδα. Στην παρούσα φάση και δεδομένου ότι το στάδιο ανάπτυξης του καινοτόμου πιλοτικού συστήματος είναι στο επίπεδο της εφαρμοσμένης έρευνας και όχι στο επίπεδο της εμπορικής εφαρμογής, είναι αντιληπτό ότι μία εμπορική προσέγγιση έχει περιορισμούς και δεν μπορεί να γίνει εις βάθος.

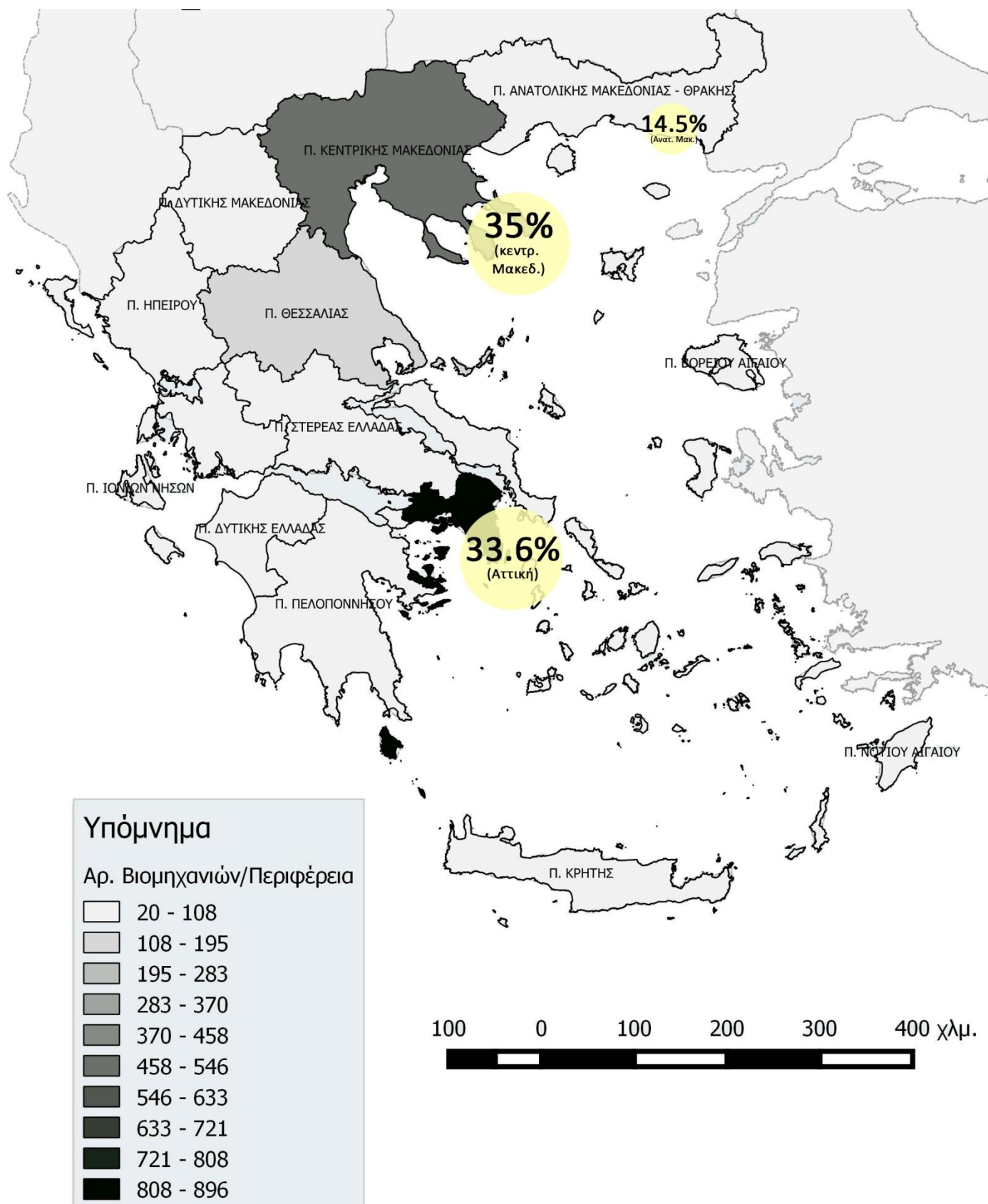
Παρόλα αυτά, θεωρείται σημαντικό να διατυπωθούν οι πρώτες σκέψεις υλοποίησης του συστήματος αυτού σε εμπορική κλίμακα. Μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους είναι η αξιοποίηση των άλατος από τους τελικούς βιομηχανικούς χρήστες. Για το λόγο αυτό, αποτυπώθηκαν οι θέσεις και το μέγεθος των ακόλουθων βιομηχανικών δραστηριοτήτων κατά ΣΤΑΚΟΔ (ΕΛΣΤΑΤ, 2008):

- Χάρτης 6-5: Βιομηχανία τροφίμων (ΣΤΑΚΟΔ: 10), Ελλάδα (2010)
- Χάρτης 6-6: Παραγωγή κλωστοϋφαντουργικών υλών (ΣΤΑΚΟΔ 13), Ελλάδα (2010)
- Χάρτης 6-7: Βιομηχανία δέρματος και δερμάτινων ειδών (ΣΤΑΚΟΔ: 15), Ελλάδα (2010)
- Χάρτης 6-8: Χαρτοποιία και κατασκευή χάρτινων προϊόντων (ΣΤΑΚΟΔ: 17), Ελλάδα (2010)
- Χάρτης 6-9: Παραγωγή οπτάνθρακα και προϊόντων διύλισης πετρελαίου (ΣΤΑΚΟΔ 19), Ελλάδα (2010)
- Χάρτης 6-10: Παραγωγή χημικών ουσιών και προϊόντων (ΣΤΑΚΟΔ 20), Ελλάδα (2010)



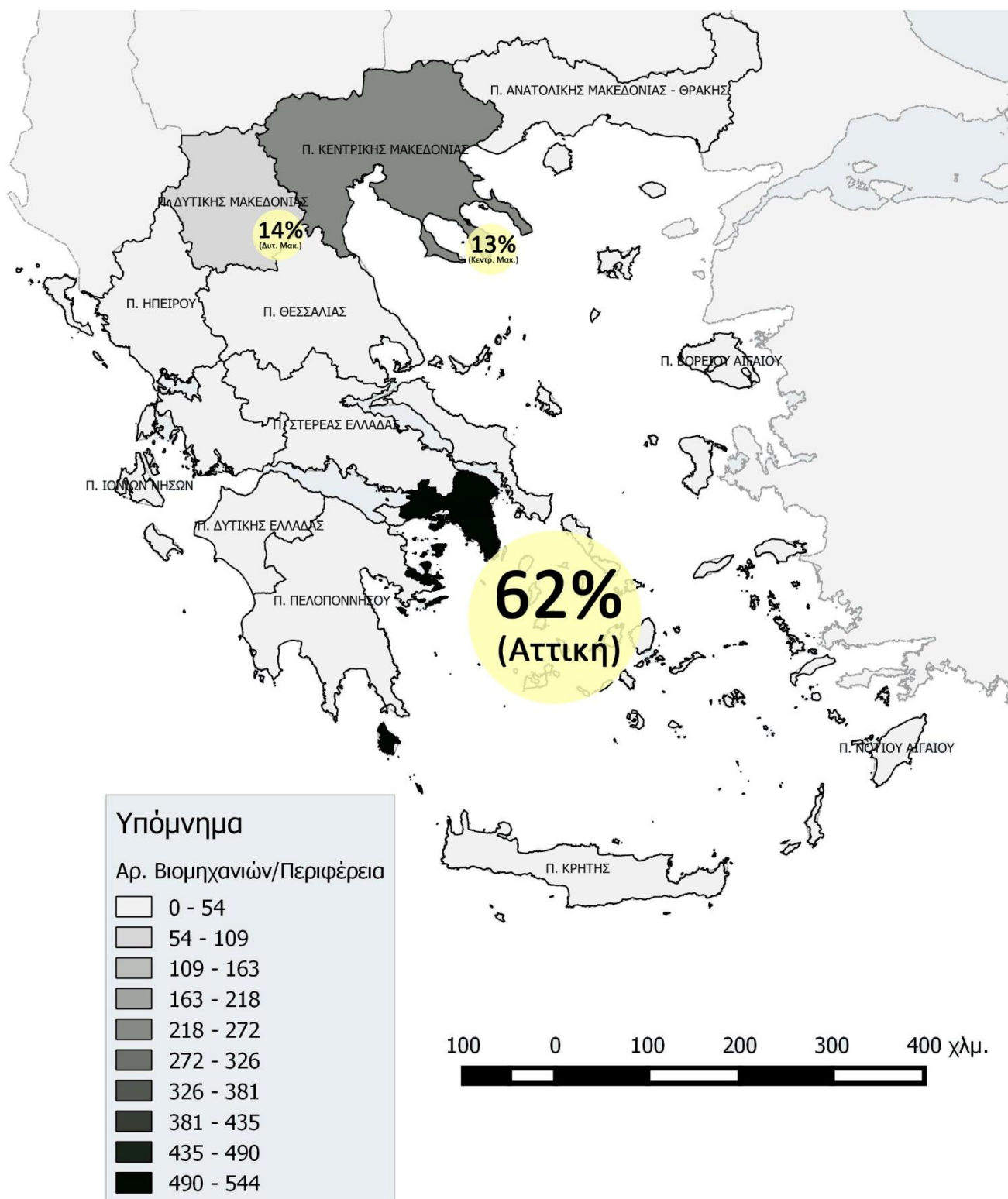
Σημείωση: με τους κύκλους σημειώνεται το ποσοστό του κύκλου εργασιών σε μία περιοχή προς το συνολικό κύκλο εργασιών του κλάδου (~11.1 δις€). Τα στατιστικά στοιχεία αντλήθηκαν από την ΕΛΣΤΑΤ

Χάρτης 6-5: Βιομηχανία τροφίμων (ΣΤΑΚΟΔ: 10), Ελλάδα (2010)



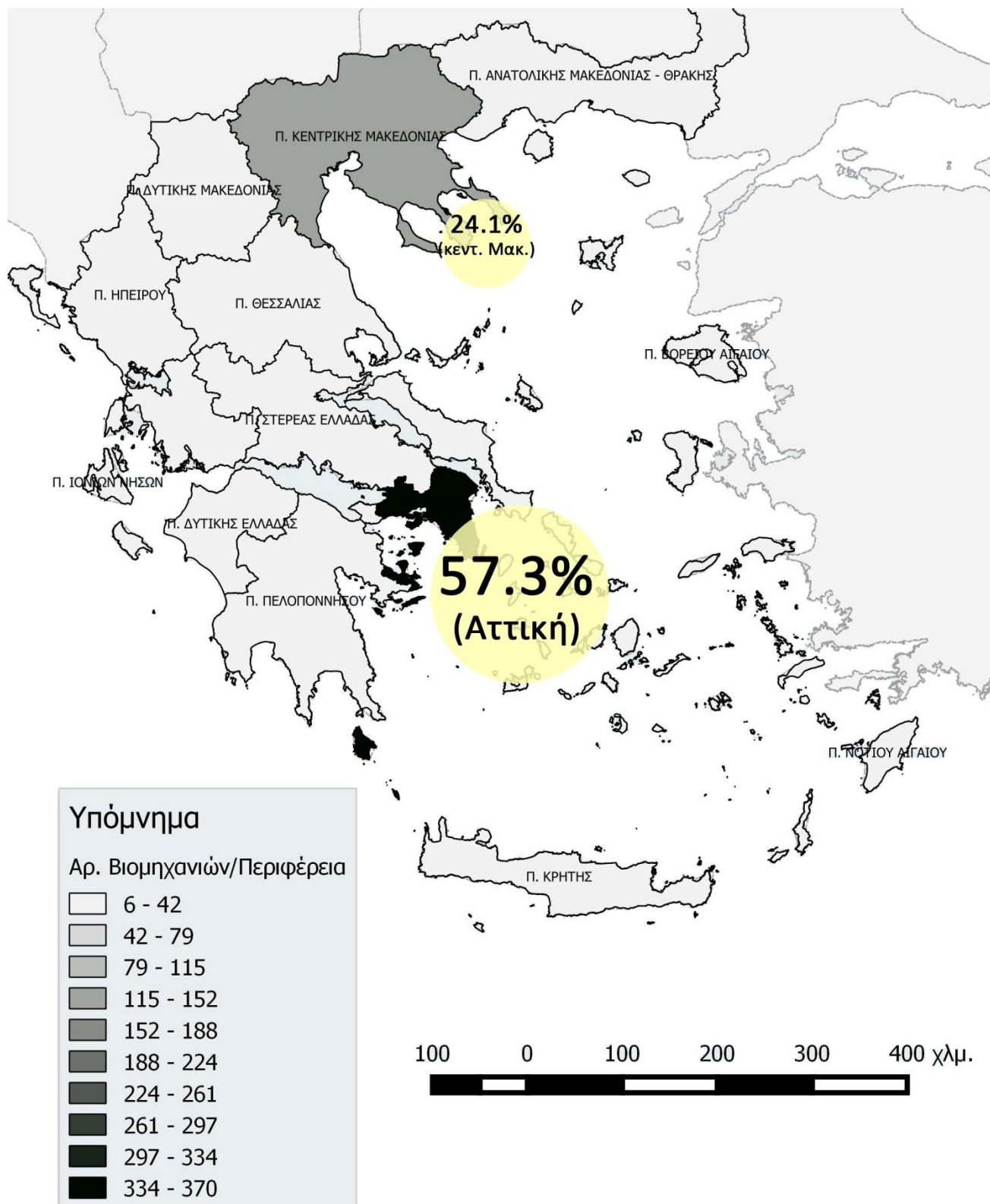
Σημείωση: με τους κύκλους σημειώνεται το ποσοστό του κύκλου εργασιών σε μία περιοχή προς το συνολικό κύκλο εργασιών του κλάδου (~1 δις€). Τα στατιστικά στοιχεία αντλήθηκαν από την ΕΛΣΤΑΤ.

Χάρτης 6-6: Παραγωγή κλωστοϋφαντουργικών υλών (ΣΤΑΚΟΔ 13), Ελλάδα (2010)



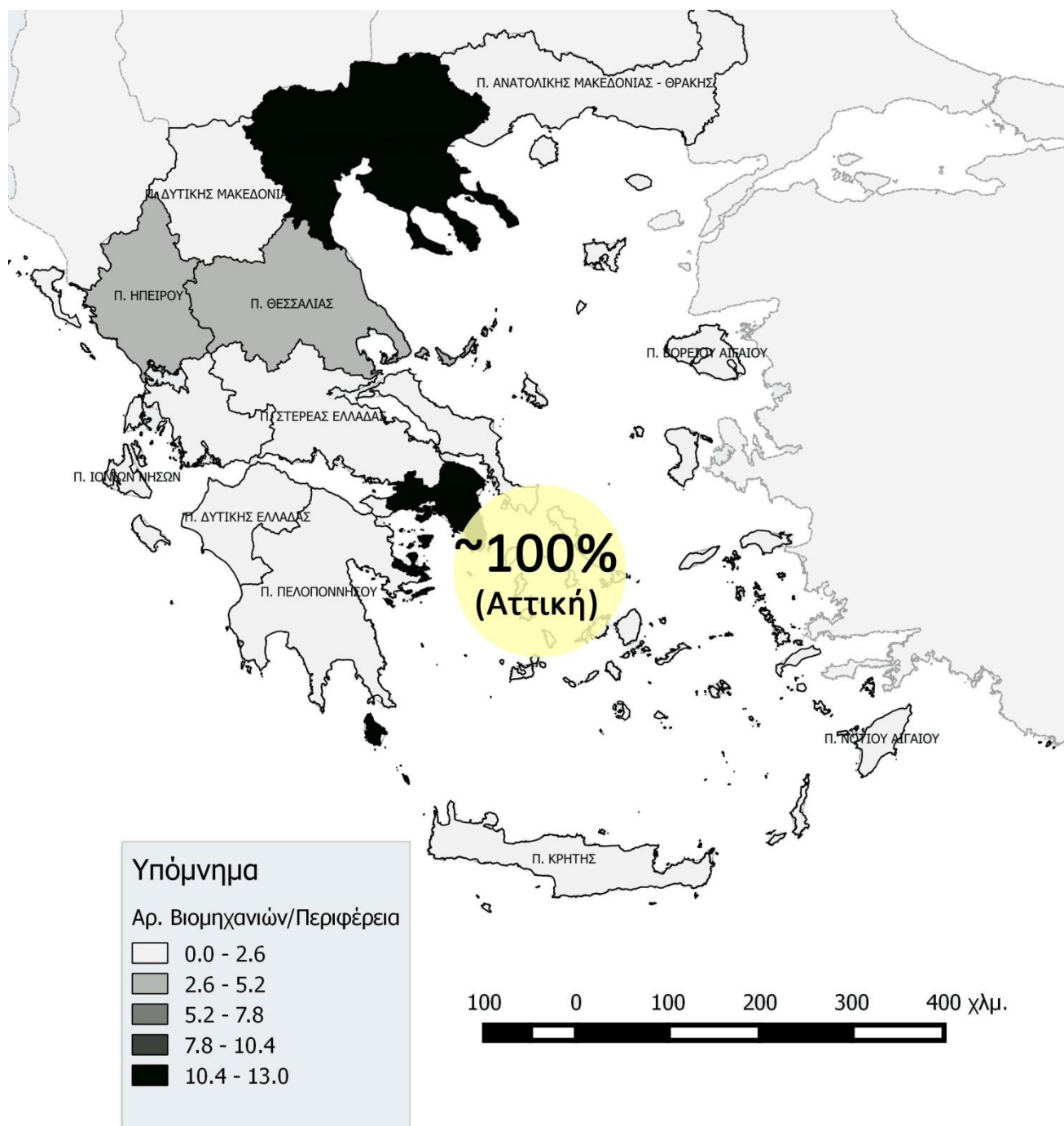
Σημείωση: με τους κύκλους σημειώνεται το ποσοστό του κύκλου εργασιών σε μία περιοχή προς το συνολικό κύκλο εργασιών του κλάδου (~243 εκ. €). Τα στατιστικά στοιχεία αντλήθηκαν από την ΕΛΣΤΑΤ.

Χάρτης 6-7: Βιομηχανία δέρματος και δερμάτινων ειδών (ΣΤΑΚΟΔ: 15), Ελλάδα (2010)



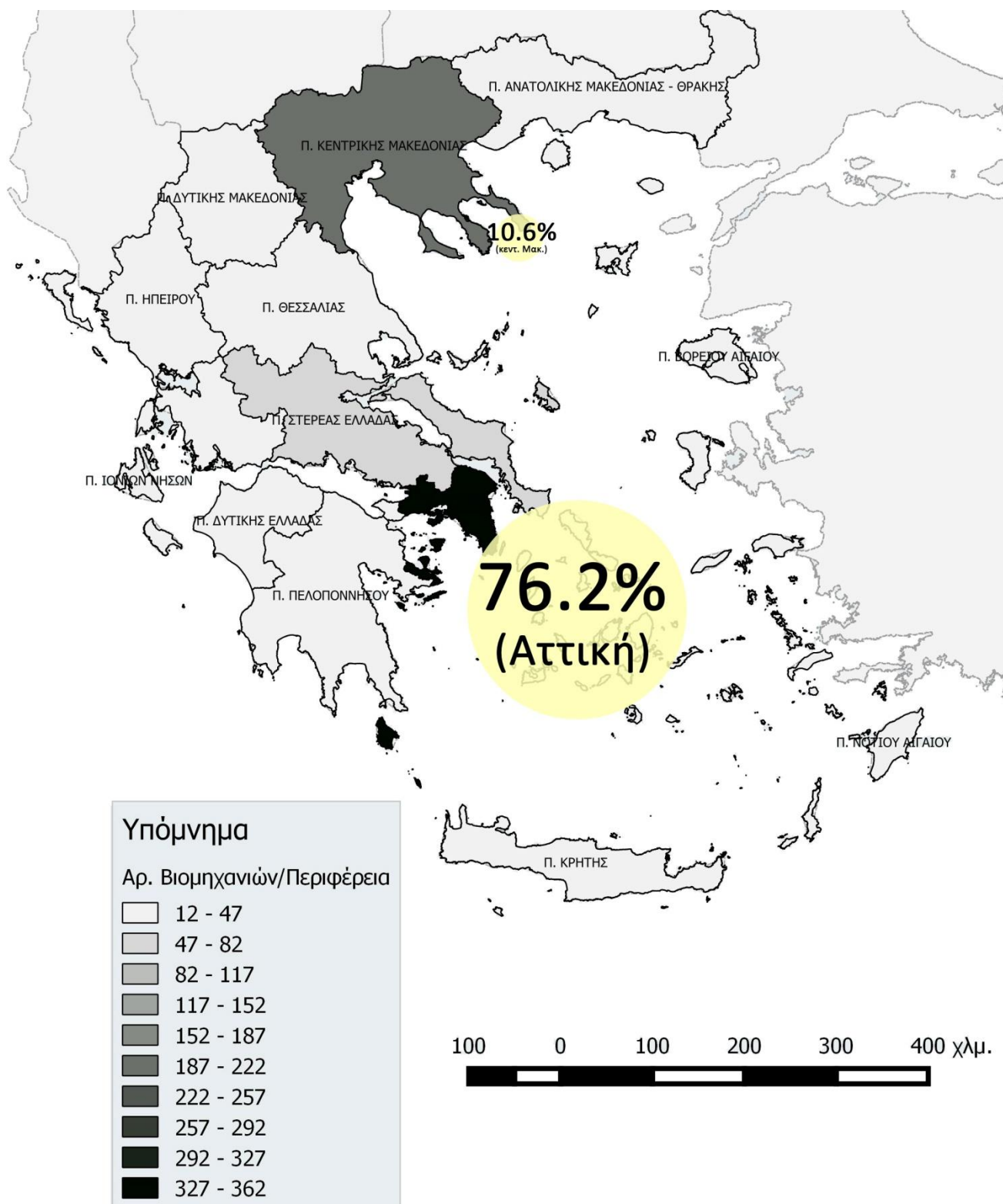
Σημείωση: με τους κύκλους σημειώνεται το ποσοστό του κύκλου εργασιών σε μία περιοχή προς το συνολικό κύκλο εργασιών του κλάδου (~1.4δισ €). Τα στατιστικά στοιχεία αντλήθηκαν από την ΕΛΣΤΑΤ.

Χάρτης 6-8: Χαρτοποιία και κατασκευή χάρτινων προϊόντων (ΣΤΑΚΟΔ: 17), Ελλάδα (2010)



Σημείωση: με τους κύκλους σημειώνεται το ποσοστό του κύκλου εργασιών σε μία περιοχή προς το συνολικό κύκλο εργασιών του κλάδου (~16.4δισ €). Τα στατιστικά στοιχεία αντλήθηκαν από την ΕΛΣΤΑΤ.

Χάρτης 6-9: Παραγωγή οπτάνθρακα και προϊόντων διύλισης πετρελαίου (ΣΤΑΚΟΔ 19), Ελλάδα (2010)



Σημείωση: με τους κύκλους σημειώνεται το ποσοστό του κύκλου εργασιών σε μία περιοχή προς το συνολικό κύκλο εργασιών του κλάδου (~2.8δισ €). Τα στατιστικά στοιχεία αντλήθηκαν από την ΕΛΣΤΑΤ.

Χάρτης 6-10: Παραγωγή χημικών ουσιών και προϊόντων (ΣΤΑΚΟΔ 20), Ελλάδα (2010)

6.5 Συζήτηση/συμπεράσματα

6.5.1 Αγορά νερού

Αναφορικά με την αγορά του νερού, όπως αναλύεται στην Ενότητα 6.4.1, σημειώνονται τα ακόλουθα:

- Αν και η συνολική ζήτηση νερού για τη βιομηχανία είναι περίπου 1.9% της συνολικής ζήτησης νερού (βλ. Ενότητα 1.3), η ανάγκη για αφαλάτωση στη βιομηχανία αντιπροσωπεύει το 34.75% της συνολικής εγκατεστημένης δυναμικότητας στην Ελλάδα (Διάγραμμα 6-11). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πολλοί βιομηχανικοί χρήστες απαιτούν νερό υψηλών προδιαγραφών (απαλλαγμένο από διαλυμένα άλατα) είτε ως πρώτη ύλη (π.χ. βιομηχανία τροφίμων) ή ως εργαζόμενο μέσο για την παραγωγική διαδικασία (π.χ. τροφοδοσία ατμολεβήτων). Ανάλογα με την απαιτούμενη ποιότητα νερού, χρησιμοποιείται και η κατάλληλη μέθοδος επεξεργασίας, κατά κανόνα κάποια τεχνική αφαλάτωσης.
- Στο Διάγραμμα 6-13 παρουσιάζεται η ανάλυση της εγκατεστημένης δυναμικότητας αφαλάτωσης ανά βιομηχανικό χρήστη. Η διύλιση πετρελαίου και η χημική βιομηχανία κατέχουν το υψηλότερο ποσοστό (21.9%), ακολουθούμενη από τη βιομηχανία τροφίμων (15.7%), την εξόρυξη πετρελαίου (13.4%) και τη βιομηχανία παραγωγής μετάλλων (10.1%). Αν και η ποιότητα του παραγόμενου νερού από το πιλοτικό σύστημα επεξεργασίας της άλμης μπορεί να φτάσει τις προδιαγραφές αυτών των βιομηχανιών, για λόγους κυρίως κοινωνικής αντίληψης, το νερό προτείνεται κυρίως για χρήσεις που δεν έχουν αντίκτυπο στην ανθρώπινη υγεία και ως εκ τούτου προτείνεται η αποφυγή χρήσης στη βιομηχανία τροφίμων (εντός της παραγωγικής διαδικασίας).
- Οι μονάδες αφαλάτωσης που είναι εγκατεστημένες στις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής βρίσκονται στην Αττική, στην Κεντρική Μακεδονία, στην Κρήτη και στην Κοζάνη.
- Οι περισσότερες μονάδες αφαλάτωσης των βιομηχανικών χρηστών βρίσκονται στην Αττική, στην Κεντρική Ελλάδα και στην Κεντρική Μακεδονία (Χάρτης 6-4).

- Οι μονάδες αφαλάτωσης που επεξεργάζονται υφάλμυρο νερό αντιπροσωπεύουν το 31.5% της συνολικής εγκατεστημένης δυναμικότητας αφαλάτωσης. Οι μονάδες αυτές αποτελούν πιθανώς καλές ευκαιρίες εμπορικής αξιοποίησης της εξεταζόμενης τεχνολογίας επεξεργασίας της άλμης, δεδομένου ότι οι μονάδες αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού: (α) αντιμετωπίζουν συχνά εντονότερα προβλήματα διαχείρισης της άλμης, μιας και συνήθως είναι εγκατεστημένα στην ενδοχώρα, και (β) ο όγκος επεξεργασίας είναι σημαντικά μικρότερος σε σύγκριση με τις μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού. Οι περισσότερες από αυτές τις μονάδες έχουν ως τελικό χρήστη τους Δήμους (44.4%), τη βιομηχανία (29%) και τον τουριστικό τομέα (23.7%) (Διάγραμμα 6-10).
- Οι μεγαλύτεροι καταναλωτές βιομηχανικού νερού είναι η Κεντρική Μακεδονία (80 Mm³/χρόνο), η Δυτική Μακεδονία (30 Mm³/ χρόνο), η Αττική (17.5 Mm³/ χρόνο), η Κεντρική Ελλάδα (12.6 Mm³/ χρόνο) και η Θράκη (11 Mm³/ χρόνο).
- Οι δημοτικές μονάδες παρουσιάζουν μεγάλη ομοιομορφία. Περίπου 86% των μονάδων είναι εγκατεστημένες στον νησιωτικό χώρο. Σε αντίθεση οι μονάδες αφαλάτωσης που είναι εγκατεστημένες στη βιομηχανία (61 μονάδες) παρουσιάζουν μεγαλύτερη διασπορά ανά την Ελλάδα (κυρίως την ηπειρωτική).

6.5.2 Αγορά αλάτων

Αναφορικά με την αγορά του νερού, όπως αναλύεται στην Ενότητα 6.4.1), σημειώνονται τα ακόλουθα:

- Η εγχώρια παραγωγή αλατιού καλύπτει περίπου το 65% της συνολικής ζήτησης, αφήνοντας έτσι σημαντικά περιθώρια για είσοδο νέων επιχειρήσεων (και ως εκ τούτου και καινοτόμων προσεγγίσεων) στην αγορά του αλατιού
- Η βιομηχανία παραγωγής χλωρίνης και καυστικού νατρίου (chlor-alkali industry) συνεισφέρει κατά 21% στη συνολική κατανάλωση αλατιού στην Ελλάδα. Στην Ελλάδα υπάρχουν 3 μονάδες, δύο στην ευρύτερη περιφέρεια της Αττικής και 1 στη Θεσσαλονίκη. Δεν υπάρχουν δημοσιευμένα στοιχεία κατανάλωσης αλατιού από τους υπόλοιπους βιομηχανικοί χρήστες. Αν και δεν υπάρχουν αναλυτικά στοιχεία, στη συνέχεια παρουσιάζεται μία ανάλυση των σχετικών οικονομικών δραστηριοτήτων:

Κλωστοϋφαντουργία:

Στην Ελλάδα δραστηριοποιούνται 2,080 επιχειρήσεις με συνολικό τζίρο €946 εκ. Περισσότερη από τη δραστηριότητα αυτή, συγκεντρώνεται στη Κεντρική Μακεδονία, στην Αττική, την Ανατολική Μακεδονία και Θράκη (Χάρτης 6-6), συγκεντρώνοντας περισσότερο από 83% της δραστηριότητας στην Ελλάδα.

Χημική βιομηχανία:

Στην Ελλάδα δραστηριοποιούνται 871 επιχειρήσεις με συνολικό τζίρο €2.8 δις. Η πλειοψηφία της δραστηριότητας αυτής συγκεντρώνεται στην Αττική (76.2%), ακολουθούμενη από την Κεντρική Μακεδονία (10.6%) και τη Στερεά Ελλάδα (4.4%) (Χάρτης 6-10).

Λιύλιση πετρελαίου:

Στην Ελλάδα δραστηριοποιούνται 36 επιχειρήσεις με συνολικό τζίρο €16.4 δις. Το σύνολο της δραστηριότητας (>99%) είναι συγκεντρωμένη στην περιοχή της Αττικής.

Βιομηχανία τροφίμων:

Στην Ελλάδα δραστηριοποιούνται 15,000 επιχειρήσεις με συνολικό τζίρο €11 δις. Το μεγαλύτερο μέρος της δραστηριότητας είναι συγκεντρωμένη στην Κεντρική Μακεδονία (38.6%), στην Ήπειρο (21.6%) και στη Στερεά Ελλάδα (8.9%) (Χάρτης 6-5).

Βιομηχανία δέρματος:

Στην Ελλάδα δραστηριοποιούνται 1,000 επιχειρήσεις με συνολικό τζίρο €243 εκ. Το μεγαλύτερο μέρος της δραστηριότητας είναι συγκεντρωμένη στην Αττική (62%), Δυτική Μακεδονία (14%) και Κεντρική Μακεδονία (13%) (Χάρτης 6-7).

Βιομηχανία χαρτιού:

Στην Ελλάδα δραστηριοποιούνται 762 επιχειρήσεις με συνολικό τζίρο €1.4 δις. Το μεγαλύτερο μέρος της δραστηριότητας είναι συγκεντρωμένη στην Αττική (57.3%), Κεντρική Μακεδονία (24.1%) και στη Στερεά Ελλάδα (6.3%) (Χάρτης 6-8).

6.5.3 Αξιολόγηση/Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό χαρτογραφήθηκαν οι μονάδες αφαλάτωσης στην Ελλάδα. Για τη χαρτογράφηση αυτή, χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων του Global Water Intelligence (Στοιχεία 2015). Στη βάση αυτή, χαρτογραφούνται 237 από τις συνολικά 269 μονάδες, που αντιστοιχεί σε δυναμικότητα 139,191 m³/ημέρα (συνολική 163,659 m³/ημέρα). Έτσι, το ποσοστό χαρτογράφησης των μονάδων υπερβαίνει το 85%.

Από τη συζήτηση στις Ενότητες 6.5.1 και 6.5.2, είναι φανερό ότι οι περιοχές που παρουσιάζουν μεγαλύτερη συγκέντρωση στις οικονομικές δραστηριότητες που είναι σχετικές με τα τελικά προϊόντα που μπορούν να παραχθούν από την εξεταζόμενη καινοτόμο τεχνολογία.

Οι περιοχές αυτές περιλαμβάνουν τις ακόλουθες:

- Κεντρική Μακεδονία
- Αττική
- Ανατολική Μακεδονία και Θράκη
- Δυτική Μακεδονία και
- Στερεά Ελλάδα

Στον ακόλουθο πίνακα συγκεντρώνεται το ποσοστό της δραστηριότητας του εκάστοτε κλάδου στις περιοχές αυτές. Τα ποσοστά αντιπροσωπεύουν συνεισφορά των βιομηχανικών μονάδων που είναι εγκατεστημένες σε μία περιοχή, στο συνολικό τζίρο των βιομηχανικών μονάδων του ίδιου τομέα στο σύνολο της Ελλάδας.

Πίνακας 6-20: Συγκεντρωτικός πίνακας με τη συνεισφορά των επιχειρήσεων ενός τομέα σε μία περιοχή προς το σύνολο των επιχειρήσεων του ίδιου τομέα στην Ελλάδα

	Κλωστ.	Χαρτιού	Χημικά	Τροφίμων	Δέρμα	Πετρέλαιο
Κεντρική Μακεδονία	35.0%	24.1%	10.6%	38.6%	13.1%	0.1%
Αττική	33.6%	57.3%	76.2%	5.1%	62.0%	99.9%
Ανατολική Μακεδονία	14.5%	3.6%	2.0%	0.5%	1.3%	-
Στερεά Ελλάδα	1.5%	6.3%	4.4%	8.9%	0.9%	-
Δυτική Μακεδονία	2.1%	1.0%	-	3.0%	14.0%	-
Άλλες περιοχές	13.30%	7.70%	6.80%	43.90%	8.70%	0.00%

Με στόχο την κατάταξη των περιοχών αυτών, εφαρμόστηκε μεθοδολογία αξιολόγησης σε δύο επίπεδα: (Α) Βαθμολόγηση ανά κριτήριο αξιολόγησης, και (Β) Τελική βαθμολογηση περιοχών

(Α) Βαθμολόγηση ανά κριτήριο αξιολόγησης

Διατυπώθηκαν τα ακόλουθα τέσσερα (4) κριτήρια:

- Αξιοποίηση απιονισμένου νερού
- Αξιοποίηση αλάτων
- Αξιοποίηση πλεονάζουσας θερμότητας (waste heat)
- Αξιοποίηση παραγόμενης άλμης

Για την βαθμολογία κάθε περιοχής ανά κριτήριο, χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη απλοποιημένη εξίσωση:

$$\text{Σταθμισμένο Score} = \frac{\sum \text{Ποσοστό κλάδου}_i \cdot WF_i}{\sum WF_i}$$

Όπου,

- i , αναπαριστά τους 6 τελικού χρήστες που χρησιμοποιήθηκαν στην αξιολόγηση: (α) κλωστοϋφαντοργία, (β) διύλιστήρια, (γ) χημική βιομηχανία, (δ) βιομηχανία τροφίμων, (ε) βιομηχανία δέρματος και (στ) αλάτι αποχιονισμού (χρησιμοποιήθηκε μόνο στο κριτήριο χρήση άλατος).
- Τα ποσοστά για την οικονομική δραστηριότητα ανά κλάδο και περιφέρεια δίνονται στον Πίνακα 6-20
- WF_i , είναι ο συντελεστής βαρύτητας του κάθε τελικού χρήστη. Στον Πίνακα 6-21 δίνονται οι συντελεστές βαρύτητας που χρησιμοποιήθηκαν ανά τελικό χρήστη και κριτήριο.

Οι συντελεστές βαρύτητας που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-21. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι οι συντελεστές βαρύτητας αυτοί έχουν διατυπωθεί από τον ερευνητή και δεν στηρίζεται σε έρευνα προηγούμενη ερευνητή, καθώς η εφαρμογή (και η προσέγγιση) αφορά πρότυπης τεχνολογίας. Ακολούθως, παρουσιάζεται το σκεπτικό για την επιλογή των αντίστοιχων συντελεστών βαρύτητας:

- Αναφορικά με τη χρήση απιονισμένου νερού, έγινε προσπάθεια να διαχωριστεί η έννοια της χρήσης (κατανάλωσης) βιομηχανικού νερού από τη χρήση νερού για ψύξη. Ο λόγος είναι ότι το απιονισμένο νερό χρησιμοποιείται για κατανάλωση και όχι για λόγους ψύξης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε το Διάγραμμα 1-1. Στο διάγραμμα αυτό, δίνεται αυτή η διαφοροποίηση ανά τελικό χρήστη για την περίπτωση του Βελγίου. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το Διάγραμμα 1-3, στο οποίο αποτυπώνονται οι χρήσεις νερού ανά υδατικό διαμέρισμα της Ελλάδας. Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι η Κεντρική Μακεδονία είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής βιομηχανικού νερού (50.6%), ενώ η Κεντρική Μακεδονία έρχεται δεύτερη στα αποτελέσματα της αξιολόγησης. Για το λόγο αυτό προτείνεται η περαιτέρω διερεύνηση εις βάθος για τη διερεύνηση της κατανάλωσης βιομηχανικού νερού ανά περιοχή και ποιότητα.
- Αναφορικά με τη χρήση άλατος, αξιοποιήθηκε το Διάγραμμα 6-2. Στο διάγραμμα αυτό δίνεται η ποσοστιαία συνεισφορά στην κατανάλωση χλωριούχου νατρίου ανά τελικό χρήστη. Αναφορικά με τη βιομηχανία χαρτοβιομηχανίας, παρόλο που δεν αναφέρεται στο Διάγραμμα 6-2, δόθηκε συντελεστής βαρύτητας 3 δεδομένου ότι αποτελεί κύριο χρήστη για το άλας του ανθρακικού ασβεστίου.
- Για τη αξιολόγηση ως προς τη διαθεσιμότητα πλεονάζουσας θερμότητας χρησιμοποιήθηκε το Διάγραμμα 5-40. Στο διάγραμμα αυτό, παρουσιάζεται η χρήση ενέργειας και η ενέργεια που απορρίπτεται αναξιοποίητη στη βιομηχανία μεταποίησης για την περίπτωση της Αμερικής.
- Για την αξιολόγηση των δυνατοτήτων αξιοποίησης της παραγόμενης άλμης χρησιμοποιήθηκε ο Χάρτης 6-4. Στο χάρτη αυτό φαίνεται συγκεντρωτικά οι μονάδες αφαλάτωσης που είναι εγκατεστημένες στην Ελλάδα, τόσο στους Δήμους όσο και στις βιομηχανίες και στις τουριστικές μονάδες.

Τα αποτελέσματα από εφαρμογή της μεθοδολογίας δίνονται στον Πίνακα 6-22. Σημειώνεται πως με εφαρμογή της μεθοδολογίας με ακριβέστερα στοιχεία στο μέλλον, τα αποτελέσματα αυτά ενδέχεται να αλλάξουν.

Πίνακας 6-21: Κριτήρια και συντελεστές βαρύτητας για αξιολόγηση περιοχών στην Ελλάδα αναφορικά με την εφαρμογή της τεχνολογίας σε πλήρη κλίμακα

Κριτήριο Τελικός χρήσης	Χρήση νερού	Χρήση άλατος	Διαθ. θερμότητας
Κλωστοϋφαντουργία	4	1	4
Διύλιστήρια	6	0	10
Βιομηχανία χαρτιού	7	3	0
Χημική Βιομηχανία	10	10	9
Βιομηχανία Τροφίμων	8	4	7
Βιομηχανία Δέρματος	0	1	0
Αλάτι αποχιονισμού	0	6	0
Σύνολο	35	25	30

1 – χαμηλότερη βαθμολογία

10 – υψηλότερη βαθμολογία

Πίνακας 6-22: Αποτελέσματα αξιολόγησης περιοχών ανά κριτήριο

Κριτήριο Περιφέρεια	Αξιοποίηση:			
	Απιονισμένου νερού	Άλατος	Απορ. θερμότητας	Παραγωγή άλμης
Κεντρική Μακεδονία	21%	18%	17%	10%
Αττική	55%	46%	62%	80%
Ανατολική Μακεδονία	3%	5%	3%	5%
Στερεά Ελλάδα	5%	15%	4%	5%
Δυτική Μακεδονία	1%	4%	1%	5%

(B) Τελική βαθμολόγηση περιοχών

$$\text{Σταθμισμένο Score} = \frac{\sum \text{Score}|_{\text{κριτήριο}_i} \cdot \text{WF}_i}{\sum \text{WF}_i}$$

- i, αναπαριστά τα 4 κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν στην αξιολόγηση
- Οι συντελεστές βαρύτητας που χρησιμοποιήθηκαν ανά κριτήριο είναι οι ακόλουθοι: (α) αξιοποίηση απιονισμένου νερού: 7, (β) αξιοποίηση άλατος: 9, (γ) αξιοποίηση απορριπτόμενης θερμότητας (waste heat): 8, και (δ) αξιοποίηση παραγόμενης άλμης: 5. Ο συντελεστής βαρύτητας για την αξιοποίηση του άλατος είναι μεγαλύτερος από το συντελεστή βαρύτητας για το απιονισμένο νερό, δεδομένου ότι από την ανάλυση που παρουσιάζεται στην Ενότητα 6.1.4, προκύπτει ότι τα αλάτια προσφέρουν ποσοστιαία σημαντικότερα στην οικονομική αξία της άλμης. Τέλος, ο συντελεστής βαρύτητας για την αξιοποίηση της παραγόμενης άλμης από μονάδες αφαλατώσης είναι σχετικά χαμηλός, δεδομένου ότι από την ανάλυση προκύπτει πως άλμη επιβαρυνμένη με χλωριόντα και κατιόντα νατρίου προκύπτει και από βιομηχανικές δραστηριότητες λόγω της χρήσης αλατιού ως πρώτη ύλη (π.χ. παραγωγή χλωρίνης στη χημική βιομηχανία).

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθοδολογίας παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 6-23: Τελική αξιολόγηση περιοχών για εφαρμογή του συστήματος σε πλήρη κλίμακα στην Ελλάδα

Περιφέρεια	Τελική βαθμολογία
Κεντρική Μακεδονία	17%
Αττική	59%
Ανατολική Μακεδονία	4%
Στερεά Ελλάδα	7%
Δυτική Μακεδονία	3%

Συνεπώς, φαίνεται πως οι πιο αξιόλογες περιοχές για την εφαρμογή του συστήματος επεξεργασίας της άλμης σε πλήρη κλίμακα είναι η Αττική και η Κεντρική Μακεδονία. Ωστόσο, σημειώνεται ότι προτείνεται περαιτέρω διερεύνηση, έτσι ώστε να εφαρμοστεί η μεθοδολογία με ακριβέστερα στοιχεία.

7 Συμπεράσματα – Προτάσεις

7.1 Συμπεράσματα

Η διαχείριση της άλμης που παράγεται από μονάδες αφαλάτωσης, σήμερα πραγματοποιείται συμβατικά με τη χρήση των ακόλουθων πέντε (5) τεχνικών: (1) Διάθεση σε επιφανειακά ύδατα, (2) Διάθεση σε δίκτυο αποχέτευσης, (3) Έγχυση άλμης σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς, (4) Άρδευση και (5) Λίμνες εξάτμισης.

Από τη βιβλιογραφική έρευνα διαπιστώνεται ότι:

- Η διάθεση της άλμης σε επιφανειακά ύδατα είναι η τεχνική που χρησιμοποιείται σχεδόν κατά κανόνα, ειδικά στη Μεσόγειο Θάλασσα και την Ελλάδα. Η τεχνική αυτή είναι μία ώριμη τεχνικά λύση, η οποία όμως προκαλεί σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Είδη τα οποία προστατεύονται από το δίκτυο Natura 2000 (όπως τα Λιβάδεια Ποσειδωνίας) διατρέχουν σημαντικό κίνδυνο, δεδομένου ότι δεν αντέχουν έστω και μικρές αλλαγές στην αλατότητα.
- Καμμία από τις τεχνικές αυτές δεν οδηγεί σε ανάκτηση προϊόντων. Η τάση στην Ευρώπη είναι η ανάκτηση προϊόντων από τα υγρά απόβλητα και τα απορρίμματα σύμφωνα με την αρχή της Κυκλικής Οικονομίας.
- Για την ανάκτηση νερού έχουν εφαρμοστεί τα λεγόμενα συστήματα Zero Liquid Discharge (ZLD). Τα συστήματα ZLD εξαλείφουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την απόρριψη των υγρών αποβλήτων και επιτρέπουν την παραγωγή νερού υψηλών προδιαγραφών. Ωστόσο, τα συστήματα αυτά έχουν τρία σημαντικά μειονεκτήματα: (α) παράγουν ένα στερεό παραπροϊόν που χρήζει τελικής διάθεσης σε Χ.Υ.Τ.Α. (β) έχουν υψηλή ενεργειακή κατανάλωση και (γ) υψηλό κόστος επένδυσης. Σημειώνεται πως αν και υπάρχουν σήμερα 258 εφαρμογές συστημάτων ZLD, καμμία δεν αφορά επεξεργασία της άλμης από μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού.

Από την ανάλυση των συστημάτων ZLD προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Όλες οι διατάξεις ZLD που εφαρμόζονται σήμερα χρησιμοποιούν ένα στάδιο συμπύκνωσης της άλμης. Αυτό το στάδιο στις περισσότερες εφαρμογές αποτελεί ένα σύστημα εξάτμισης. Ο εξατμιστήρας αυτός κατά κανόνα αποτελεί

ένα συμπυκνωτή άλμης (Brine Concentrator) ο οποίος είναι ένας μονοβάθμιος εξατμιστήρας με χρήση μηχανικής επανασυμπίεσης ατμών. Η τεχνική αυτή απαιτεί ηλεκτρική ενέργεια και δεν προωθεί τη χωριστή ανάκτηση των αλάτων που περιέχονται στην άλμη.

Αναφορικά με τον εξατμιστήρα που σχεδιάστηκε στα πλαίσια αυτής της διατριβής, ο τύπος του είναι MED με εμπρόσθια τροφοδοσία. Στις εφαρμογές αφαλάτωσης χρησιμοποιείται κατά αποκλειστικότητα η διάταξη παράλληλης τροφοδοσίας. Ωστόσο, η επεξεργασία της άλμης αποτελεί μία τελείως διαφορετική διεργασία, δεδομένου ότι ο στόχος της είναι η αύξηση της συγκέντρωσης και όχι η παραγωγή νερού. Ως εκ τούτου, η παράλληλη τροφοδοσία δεν προσφέρεται για κάτι τέτοιο. Επίσης, η χρήση της διάταξης εμπρόσθιας τροφοδοσίας σε πολύ περιορισμένες εφαρμογές αφήνει το περιθώριο για νέα έρευνα και καινοτομία. Τέλος, η διάταξη αυτή μπορεί να προσφέρει σημαντικά για την κλασματική κρυστάλλωση (Ενότητα 3.7) των αλάτων που είναι διαλυμένα στην άλμη. Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει στην επίτευξη τελικών προϊόντων υψηλής καθαρότητας.

Επίσης το σύστημα MED που χρησιμοποιήθηκε συνδυάζεται άριστα με θερμότητα χαμηλής στάθμης και με σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Αυτό είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για την ανάπτυξη του συστήματος σε πλήρη κλίμακα.

- Έχουν γίνει ελάχιστες προσπάθειες εφαρμογής τεχνικών ZLD με παράλληλη ανάκτηση διαχωρισμένων αλάτων. Πιο συγκεκριμένα, στη βιβλιογραφία αναφέρονται δύο εμπορικές τεχνικές: (α) η τεχνική ZDD, η οποία εφαρμόζει μία τελείως διαφορετική τεχνολογία (ηλεκτροδιάλυση μετάθεση) και (β) η GEO-PROCESSORS που στηρίζεται στην εκτεταμένη χρήση χημικών για την καταβύθιση των αλάτων.

Από τη λειτουργία του πιλοτικού συστήματος φαίνεται ότι:

- Επιτυγχάνεται πλήρης εξάλειψη της άλμης.
- Η πρότυπη μονάδα εμφανίζει ικανοποιητικά αποτελέσματα αναφορικά με την τεχνική αρτιότητα (λειτουργικότητά) της, ενώ τα πειραματικά αποτελέσματα

από τις αναλύσεις των πρώτων δειγμάτων είναι ενθαρρυντικά σχετικά με την παραγωγή χρήσιμων τελικών προϊόντων.

- Ανακτάται νερό υψηλών προδιαγραφών. Η ανάκτηση του νερού είναι κοντά στο 90%. Οι προδιαγραφές του νερού που παράγεται κατά την εξάτμιση της άλμης είναι κοντά σε αυτές του απιονισμένου νερού.
- Το σύστημα στην παρούσα φάση δεν διαθέτει τη δυνατότητα ανάκτησης άλατος υψηλής καθαρότητας. Αντ'αυτού τα άλατα ανακτώνται αναμεμειγμένα.

Η μελέτη σκοπιμότητας αναδεικνύει τα ακόλουθα σημεία:

- Η οικονομική αξία 1 m³ άλμης εκτιμάται στα 5.8€
- Το αντίστοιχο κόστος επεξεργασίας, λαμβάνοντας υπόψη τόσο το κόστος επένδυσης όσο και το κόστος λειτουργίας εκτιμάται στα 2.7- 3.7 €/ m³
- Αυτό φανερώνει πως υπάρχουν σημαντικά περιθώρια κέρδους από μία εφαρμογή σε πλήρη κλίμακα. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί πως τμήμα της διαφοράς μεταξύ της οικονομικής αξίας της άλμης και του κόστους επεξεργασίας πρέπει να δοθεί και για την αγορά και λειτουργία τεχνικών κατάλληλων για το διαχωρισμό των αλάτων.

Καινοτομία

Αν και σήμερα είναι καταγεγραμμένες 258 εμπορικές εφαρμογές συστημάτων ZLD, αυτές αφορούν κατ'αποκλειστικότητα εφαρμογές στη βιομηχανία (Allen, και συν., 2015). Το ίδιο αναφέρεται και από μελέτες που αφορούν την περιοχή των Η.Π.Α., η οποία αποτελεί την περιοχή στην οποία αναπτύχθηκαν τα συστήματα αυτά. Ο Mickley (2008) αποτυπώνει περισσότερες από 120 εμπορικές εφαρμογές συστημάτων ZLD (βλ. επίσης Παράρτημα), καμμία όμως δεν αφορά σε συστήματα αφαλάτωσης για παραγωγή πόσιμου νερού.

Βασικός στόχος αυτής της διδακτορικής διατριβής ήταν η αξιοποίηση της άλμης από μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού. Για την επίτευξη του στόχου:

- Σχεδιάστηκε ένα καινοτόμο σύστημα επεξεργασίας της άλμης σύμφωνα με την αρχή ZLD, προσαρμόζοντας τον σχεδιασμό στις ιδιαίτερες ανάγκες της εφαρμογής (Ενότητα 4)

- Αναπτύχθηκε, λειτούργησε και βελτιστοποιήθηκε πιλοτική μονάδα επεξεργασίας της άλμης. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να διατυπωθούν προτάσεις για την αξιοποίηση της άλμης.
- Εκπονήθηκε μελέτη σκοπιμότητας, η οποία στοχεύει στην εκτίμηση (i) της οικονομικής αξίας 1m³ άλμης από μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού και (ii) του κόστους επεξεργασίας 1m³ άλμης με τη χρήση του εν λόγω συστήματος επεξεργασίας της άλμης. Η σύγκριση των δύο τιμών προσφέρει τη δυνατότητα εκτίμησης της σκοπιμότητας μίας τέτοιας εφαρμογής. Στο τέλος, αποτυπώνονται η αγορά αφαλάτωσης, η αγορά άλατος και η αγορά απιονισμένου νερού στην Ελλάδα, με στόχο την διατύπωση συγκεκριμένων προτάσεων εφαρμογής.

7.2 Προτάσεις για μελλοντικές ερευνητικές δραστηριότητες

Ακολούθως δίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα:

- **Υλικά κατασκευής συστήματος:** σημαντικός παράγοντας κόστους για το σύστημα επεξεργασίας της άλμης είναι το υλικό κατασκευής του. Αυτό οφείλεται στο ιδιαίτερα διαβρωτικό περιβάλλον λειτουργίας λόγω συνδυασμού υψηλής αλατότητας και υψηλών θερμοκρασιών. Στη διατριβή αυτή εξετάστηκαν υλικά όπως το χαλκονικέλιο, το τιτάνιο, αλλά και οι ειδικές προδιαγραφές χαλύβων (όπως το Super Duplex). Προκειμένου να βελτιωθεί η οικονομικότητα του συστήματος προτείνεται η διερεύνηση καταλληλότητας φθηνότερων υλικών με βάση το πλαστικό. Έτσι για παράδειγμα προτείνεται η διερεύνηση κατασκευής του συστήματος από σύνθετα υλικά (polymeric hollow fiber heat exchangers, PHFHE), ενώ οι Christman, Krätz & Bart (2013) προτείνουν έπειτα από πειραματική αξιολόγηση το πολυμερές polyetheretherketone (PEEK).
- **Παραγωγή αλάτων συγκεκριμένων τεχνικών προδιαγραφών.** Πιθανό εμπόδιο εμπορικής εφαρμογής της τεχνολογίας που περιγράφεται στη διατριβή μπορεί να είναι η αδυναμία εύρεσης κατάλληλης τελικής αγοράς για τα άλατα που ανακτώνται. Προτείνεται η συνεργασία με τον ιδιωτικό τομέα (π.χ. χημική βιομηχανία) για τη διατύπωση συγκεκριμένων τεχνικών προδιαγραφών και η περαιτέρω ανάπτυξη του συστήματος προκειμένου να καλυφθούν αυτές οι

συγκεκριμένες προδιαγραφές. Από τη βιβλιογραφική έρευνα που έγινε στη διατριβή φαίνεται ότι για την επίτευξη υψηλής καθαρότητας, πρέπει να συνδυαστούν τόσο οι θερμικές τεχνικές αφαλάτωσης, όσο και οι τεχνικές μεμβρανών. Έτσι, αναμένεται πως η περαιτέρω ανάπτυξη του συστήματος θα περιλαμβάνει στη διάταξη επίσης κάποιου τύπου αφαλάτωση με μεμβράνες (πιθανώς ηλεκτροδιάλυση ή νανοδιήθηση). Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως το Global Water Intelligence αναφέρει πως ο επιλεκτικός διαχωρισμός των αλάτων αποτελεί την πιο πολλά υποσχόμενη πρόκληση στον τομέα της αφαλάτωσης, με δυνητικό μέγεθος αγοράς 2δισ € (Alvarado-Revilla, et al., 2015)

- **Ανάκτηση μετάλλων.** Το θαλασσίνο νερό περιλαμβάνει μέταλλα σε μικρές ποσότητες (Πίνακας 7-1). Η ανάκτηση αυτών των μετάλλων μπορεί να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως μείωση της εισαγωγής των υλικών αυτών εκτός Ευρώπης, εξασφάλιση της προμήθειας πρώτων υλών και κατ'επέκταση αύξηση της ανταγωνιστικότητας της Ευρώπης. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η ανάκτηση μετάλλων από την άλμη μονάδων αφαλάτωσης αναγνωρίστηκε το 2014 από το World Economic Forum ως μία από τις 10 κορυφαίες αναδυόμενες τεχνολογίες. Αν και ερευνητές από την Ιαπωνία συμπεραίνουν ότι η ανάκτηση του λιθίου είναι 5 φορές πιο ακριβή από το σημείο να θεωρηθεί οικονομικά βιώσιμη, στη Νότια Κορέα υπάρχουν ερευνητές που υποστηρίζουν ότι η απόδοση της εξόρυξης λιθίου από την άλμη έχει βελτιωθεί κατά 30% (Research& Consulting, 2013).

Πίνακας 7-1: Συγκέντρωση μετάλλων στο θαλασσίνο νερό, ποσότητα μετάλλων στον ωκεανό και ετήσια κατανάλωση

Στοιχείο	Συγκέντρωση στο θαλασσίνο νερό (ppm)	Ποσότητα στους ωκεανούς (τόνοι) ²²	Παραγωγή το 2007 (τόνοι)
Li	0.178000	2.31×10^{11}	1.4×10^4
Fe	0.034000	4.42×10^9	2.26×10^9
Mo	0.010000	1.3×10^{10}	1.87×10^5
Ni	0.006600	8.58×10^8	1.78×10^6

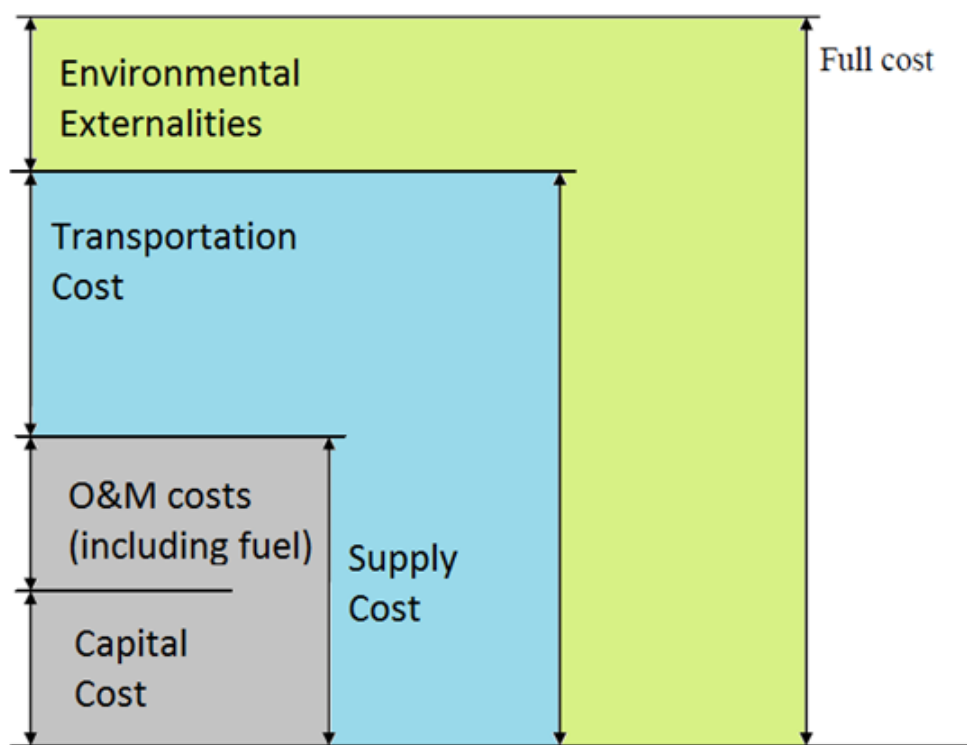
²² Για τον υπολογισμό της συνολικής ποσότητας των μετάλλων στους ωκεανούς, θεωρήθηκε συνολικός όγκος νερού $1.3 \times 10^9 \text{ km}^3$ ή 1.3×10^{18} τόνοι (Bardi, 2010).

Στοιχείο	Συγκέντρωση στο θαλασσινό νερό (ppm)	Ποσότητα στους ωκεανούς (τόνοι) ²²	Παραγωγή το 2007 (τόνοι)
Zn	0.005000	6.50×10^9	1.80×10^8
U	0.003300	4.29×10^9	6.65×10^4
V	0.001900	2.47×10^9	5.86×10^4
Ti	0.001000	1.30×10^6	6.10×10^6
Al	0.001000	1.30×10^9	3.80×10^7
Cu	0.000900	1.17×10^9	1.56×10^7
Mn	0.000400	5.20×10^8	1.16×10^7
Co	0.000390	5.07×10^8	6.23×10^7
Sn	0.000280	3.64×10^8	3.00×10^5
Cr	0.000200	2.60×10^8	2.00×10^7
Cd	0.000110	1.43×10^8	1.99×10^4
Pb	0.000030	3.90×10^7	3.55×10^6
Au	0.000011	1.43×10^7	2.50×10^3

Πηγή: (Bardi, 2010)

- Αποτίμηση περιβαλλοντικού κόστους από τη διάθεση της άλμης. Αν και η αφαλάτωση χρησιμοποιείται συστηματικά από τη δεκαετία του 1950, ωστόσο μέχρι σήμερα δεν έχει πραγματοποιηθεί μία συστηματική μελέτη για την αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και κατ'επέκταση του περιβαλλοντικού κόστους από τη διάθεση της άλμης. Μία τέτοια μελέτη θεωρείται σημαντική για να αναδείξει το πραγματικό κόστος της αφαλάτωσης, στο οποίο πρέπει να ενσωματώνονται και τα εξωτερικά κόστη, όπως το περιβαλλοντικό κόστος από τη διάθεση της άλμης (βλ. επίσης Σχήμα 7-1). Για την αποτίμηση του περιβαλλοντικού κόστους υπάρχουν κατάλληλες μεθοδολογίες όπως η Μέθοδος Υποθετικής Αξιολόγησης (Contingent Valuation Method, CVM) (Γεωργαλή, 2013). Συγκεκριμένα προτείνεται η χρήση της μεθοδολογίας Willingness-To-Pay (WTP).
- Προσδιορισμός βέλτιστης θέσης ανάπτυξης πρώτου συστήματος επεξεργασίας της άλμης σε πλήρη κλίμακα. Με βάση την αποτύπωση της βιομηχανίας και της αγοράς αφαλάτωσης στην Ελλάδα, προτείνεται η εφαρμογή κατάλληλης μεθοδολογίας για την ποσοτική αξιολόγηση των διαφορετικών περιοχών. Προτείνεται η χρήση της μεθοδολογίας AHP (Analytic Hierarchy Process).

Αντί για τον αυστηρό μαθηματικό προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης, η τεχνική αυτή επιτρέπει την οργάνωση της δομής ενός προβλήματος, με την ποσοτικοποίηση των εναλλακτικών λύσεων βάσει κριτηρίων που ορίζει ο χρήστης. Το πλεονέκτημα της μεθοδολογίας είναι ότι επιτρέπει τη χρήση κριτηρίων που είναι επίσης αφηρημένες έννοιες ή που δεν μπορούν να ποσοτικοποιηθούν επακριβώς. Αυτό επιτρέπει στο χρήστη να χρησιμοποιήσει την κρίση του για τον προσδιορισμό της σχετικής σημασίας του κάθε κριτηρίου και την αποτίμηση μίας εναλλακτικής βάσει της κατανόησης που διαθέτει ο ίδιος για το πρόβλημα. Έτσι, αναπτύχθηκε ένα δέντρο αποφάσεων, καθιερώνοντας κάποια γενικά κριτήρια για την ποιοτική αξιολόγηση. Εφαρμόζοντας τα κριτήρια αυτά, έγινε μία πρώτη εξέταση των περιφερειών. Στη συνέχεια, επιχειρήθηκε μία ημι-ποσοτική προσέγγιση για τις περιοχές που προκρίθηκαν από το πρώτο στάδιο εφαρμογής της μεθοδολογίας.



Πηγή: (United Nations, 2009)

Σχήμα 7-1: Πλήρες κόστος παραγωγής αφαλατωμένου νερού

8 Βιβλιογραφία

- ADU-RES. (2005). AUTONOMOUS DESALINATION UNITS USING RES. ADU-RES project. Retrieved from http://www.adu-res.org/ADU-RES%20Deliverables/ADU-RES_D2_1.pdf
- Ahmad, N., & Baddour, R. E. (2014). A review of sources, effects, disposal methods, and regulations of brine into marine environments. *Ocean & Coastal Management*, 1-7.
- Ahmed, M. S., Hoey, D., Mahendran, A., Morris, R., & Al-Handaly, J. (2000). Use of evaporation ponds for brine disposal in desalination plants. *DESALINATION*, 130, 155-168.
- Alarcón, D., Blanco, J., Lozano, A., Malato, S., Maldonado, M. I., & Pilar, F. (2006b). Experimental results of AQUASOL project: Development of an advanced hybrid solar-gas multi-effect distillation system. SOLAR PACES 2006 Conference. Retrieved from http://www.psa.es/en/projects/aquasol/files/Congresos/SolarPACES%202006%20FullPaper%20_final_.pdf
- Alarcón, D., Blanco, J., Malato, A., Maldonado, M., & Fernandez, P. (2006). Experimental results of aquasol project: Development of an advanced hybrid solar-gas multi-effect distillation system. *Environmental Applications of Solar Energy and Characterization of Solar Radiation*.
- Alarcón-Padilla, D.-C., Blanco-Gálvez, J., García-Rodríguez, L., Gernjak, W., & Malato-Rodríguez, S. (2008). First experimental results of a new hybrid solar/gas multi-effect distillation system: the AQUASOL project. *DESALINATION*, 1-3, pp. 619-625.
- Allen, G., Brown, H., Charamidi, M., Elkins, I., Gasson, C., & Pankratz, T. (2015). *Industrial Water Technology Markets 2015*. Oxford: Media Analytics Ltd.
- Almela, E. D., & Duarte, C. M. (2008). Management of Natura 2000 habitats * Posidonia beds (*Posidonia oceanica*) 1120 (Technical Report 2008 01/24). European Commission. Ανάκτηση από <http://ec.europa.eu/environment/nature/natura2000/management/habitats>

- Al-Mutaz, I. S. (1987). By-product recovery from Saudi desalination plants. *DESALINATION*, 64, 97-110.
- Al-mutaz, I., & Wagialla, K. (1988). Techno-Economic feasibility of extracting minerals from desalination brines. *DESALINATION*, 69, 297-307.
- Alvarado-Revilla, F., Brown, H., Charamidi, M., Elkins, I., Filou, E., Gasson, C., . . . Uzelac, J. (2015). *Desalination Markets 2016*. United Kingdom: Media Analytics Ltd.
- AQUA-CSP. (2007). WP 1: Review of CSP and Desalination Technology. Ανάκτηση από http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/projects/aqua-csp/WP01_AQUA-CSP-Technologies-Final.pdf
- Babel, M., & Schreiber, B. (2014). Geochemistry of Evaporites and Evolution of seawater. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/237838492_Geochemistry_of_Evaporites_and_Evolution_of_Seawater
- Badruzzaman, M., Oppenheimer, J., Adham, S., & Kumar, M. (2009). Innovative beneficial reuse of reverse osmosis concentrate using bipolar membrane electrodialysis and electrochlorination processes. *J. Membr. Sci.*, 326(2), 392-399.
- Balasubramanian, P. (2013). A brief review on best available technologies for reject water management in industries. Ανάκτηση από <http://www.ipublishing.co.in/ijesarticles/thirteen/articles/volthree/EIJES31198.pdf>
- Bardi, U. (2010). Extracting Minerals from Seawater: An Energy Analysis. Ανάκτηση από <http://www.mdpi.com/2071-1050/2/4/980/pdf>
- Biermann, T. (2014). The EU Drinking Water Directive. Retrieved from <http://www.madrid2014water.com/listado pon/2-BIERMANN%20Jornada%20Madrid%202014.pdf>
- Blanco, J., Alarcon, D., Zarza, E., Malato, S., & Leon, J. (2002). Advanced Solar Desalination: A Feasible Technology to the Mediterranean Area. Ανάκτηση

από <http://www.psa.es/en/projects/aquasol/files/Congresos/JBlanco%20-%20EuroSUN2002.pdf>

Bleninger, T., & Jirka, G. (2010). Environmental planning, prediction and management of brine discharges from desalination plants - Final report. Middle East Desalination Research Center. Ανάκτηση από <http://www.ifh.uni-karlsruhe.de/science/envflu/research/brinedis/brinedis-finalreport.pdf>

Bond, R. (2010). Zero Liquid Discharge Desalination [Παρουσίαση]. Ανάκτηση από https://www.watereuse.org/files/s/Rick_Bond__Compatibility_Mode_.pdf

Bostjancic, J., & Ludlum, R. (2013). Getting to Zero Discharge: How to recycle that last bit of really bad wastewater. Ανάκτηση από https://knowledgecentral.gewater.com/kcpguest/documents/Technical_Papers_Cust/Americas/English/TP1041EN.pdf

Brandhuber, P., Cerone, J., Kwan, P., Moore, E., & Vieira, A. (2008). A look at conventional and emerging brine disposal and waste minimization technologies. Ανάκτηση από <http://www.hdrinc.com/sites/all/files/content/articles/article-files/3601-a-look-at-conventional-and-emerging-brine-disposal-and-waste-minimization-technologies.pdf>

Bushnak, A. (2012). Assessment of best available technologies for desalination in rural/local areas - Revised Final Report. Retrieved from http://www.swim-sm.eu/files/BAT_on_Desalination_Final.pdf

Choon Ng, K., Thu, K., Kim, Y., Chakraborty, A., & Amy, G. (2013). Adsorption desalination: An emerging low-cost thermal desalination method. *DESALINATION*, 308, 161-179.

Christmann, J. B., Krätz, L. J., & Bart, H.-J. (2013). Falling film evaporation with polymeric heat transfer surfaces. *DESALINATION*, pp. 56-62.

Cob, S. S., Yeme, C., Hofs, B., Cornelissen, E., Vries, D., Güner, F., & Witkamp, G. (2015). Towards zero liquid discharge in the presence of silica: Stable 98% recovery in nanofiltration and reverse osmosis. *SEP PURIF TECHNOL*, 140, 23-31.

- Cooley, H., Ajami, N., & Heber, M. (2013). Key issues in seawater desalination in California - Marine Impacts. Ανάκτηση από <http://pacinst.org/wp-content/uploads/sites/21/2013/12/desal-marine-impacts-full-report.pdf>
- Cuenca, J. C. (2012). Report on water desalination status in the Mediterranean countries. Ανάκτηση από http://www.imida.es/docs/publicaciones/06_REPORT_ON_WATER%20DESALINATION.pdf.
- Curcio, E. (2006). *Report of critical analysis on the desalination technologies*.
- Darwish, M., Hassabou, A. H., & Shomar, B. (2013). Using Seawater Reverse Osmosis (SWRO) desalting system for less environmental impacts in Qatar. *DESALINATION*, pp. 113-124.
- Davis, T. A. (2006). Zero Discharge Seawater Desalination: Integrating the Production of Freshwater, Salt, Magnesium, and Bromine. Ανάκτηση από <https://www.usbr.gov/research/AWT/reportpdfs/report111.pdf>
- Davis, T. A., & Rayman, S. C. (2008). Pilot Testing of Zero-Discharge Seawater Desalination – Application to Selenium Removal from irrigation drainage. Denver, Colorado: U.S. Department of the Interior. Ανάκτηση από <http://www.usbr.gov/research/AWT/reportpdfs/report135.pdf>
- Douglas, C. (2009). Charting Our Water Future - Economic frameworks to inform decision-making. Ανάκτηση από www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/Sustainability%20and%20Resource%20Productivity/Our%20Insights/Charting%20our%20water%20future/Charting%20our%20water%20future%20Full%20Report.ashx
- Drake, M., Wise, S., & Venkatadri, R. (2011). Treatment Of Cooling Tower Blowdown Water With Membranes In A Zero Liquid Discharge Power Plant [Presentation]. Retrieved from http://www.naes.com/sites/default/files/documents/iwc_ppt_2012_naes_willer.pdf

- Drew, R. (2010). Desalination in Florida: Technology, Implementation and Environmental Issues. Florida. Retrieved from <http://www.dep.state.fl.us/water/docs/desalination-in-florida-report.pdf>
- Druetta, P., Aguirre, P., & Mussati, S. (2013). Optimization of Multi-Effect Evaporation desalination plants. *DESALINATION*, 311, 1-15.
- Duffie, J., & Beckman, W. (2013). *Solar Engineering of thermal processes. Fourth Edition*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Duffie, J., & Beckman, W. (2013). *Solar Engineering of thermal processes. Fourth Edition*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Einav, R. (n.d.). Minimizing the Impact of the Desalination Processes on the Environment. Retrieved from http://www.idswater.com/Common/Paper/Paper_153/Minimizing
- El-Dessouky, H. T., & Ettouney, H. M. (2002). Fundamentals of seawater desalination. Netherlands: Elsevier. Ανάκτηση από <http://web.mit.edu/~mcyang/www/Fundamentals%20of%20desalination.pdf>
- Ericsson, B., & Hallmans, B. (1996). Treatment of saline wastewater for zero discharge at the Debiensko coal mines in Poland. *DESALINATION*, 105(1-2), 115-123.
- Euro Chlor. (2011). Chlorine industry review 2010-2011. Ανάκτηση από <http://www.eurochlor.org/media/10677/annualreview-2010-hd.pdf>
- European Commission. (2010). Second Follow-up Report to the Communication on water scarcity and droughts in the European Union (COM(2007) 414 final) {COM(2010)228 final}. Ανάκτηση από <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52010SC0573&from=EN>
- European Commission. (2012). Report on the Review of the European Water Scarcity and Droughts Policy {SWD(2012) 380 final}. Ανάκτηση από <http://ec.europa.eu/environment/water/quantity/pdf/COM-2012-672final-EN.pdf>

- European Commission. (2016). CIS Guidance on Water Reuse, Draft version 3. Ανάκτηση από <https://circabc.europa.eu/d/a/workspace/SpacesStore/b7f5165f-7acc-462d-8bcd-bfa6a8342a18/Guidance%20on%20Water%20Reuse%20-%20draft%203.docx>
- FAO. (2003). Review of world water resources by country. Rome. Ανάκτηση από <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/wr23e.pdf>
- FICHTNER. (2011). MENA Regional Water Outlook Part II Desalination Using Renewable Energy FINAL REPORT. Ανάκτηση από http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/projects/MENA_REGIONAL_WATER_OUTLOOK.pdf
- Fidaleo, M., & Moresi, M. (2006). Electrodialysis Applications in The Food Industry. *Advances in Food and Nutrition Research*, 51, 265-360.
- Forum, W. E. (2014). Top 10 Emerging Technologies 2014. Ανάκτηση από <https://www.weforum.org/agenda/2014/09/top-ten-emerging-technologies-2014>
- Fowlie, R., Howe, K., & Goldman, J. (2011). Marketability and Selective Recovery of Salts from Brackish Water Desalination. Ανάκτηση από http://wri.nmsu.edu/conf/conf11/pdf/abstract4_fowlie.pdf
- Frankl, P. (2010). Technology Roadmap: Solar photovoltaic energy. Ανάκτηση από https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/pv_roadmap.pdf
- Gacia, E., Invers, O., Manzanera, M., Ballesteros, E., & Romero, J. (2007). Impact of the brine from a desalination plant on a shallow seagrass (*Posidonia oceanica*) meadow. *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 72(4), 579-590.
- Geertman, R. M. (2000). Sodium Chloride: Crystallization. Ανάκτηση από <http://worldtracker.org/media/library/Science/Chemistry/Crystalization,%20Purification,%20Separation/Encyclopedia%20of%20Separation%20Science/Level%20III%20-%20Practical%20Applications/SODIUM%20CHLORIDE%20-%20CRYSTALLIZATION.pdf>
- General Chemical State Laboratory. (2009). Κώδικας τροφίμων και ποτών: αλάτι. Ανάκτηση από <http://www.gcsel.gr/media/trofima/38-iss1.pdf>

- General Electric. (2011). Debiensko, Poland Desalination Plant Treats Drainage for Zero Liquid Discharge (ZLD). Ανάκτηση από https://knowledgecentral.gewater.com/kcpguest/salesedge/documents/TechnicalPapers_Cust/Americas/English/TP1039EN.pdf
- Ghaffour, N., Missimer, T. M., & Amy, G. L. (2013). Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability. *DESALINATION*, pp. 197-207.
- Gikas, P., & Angelakis, A. (2009). Water resources management in Crete and in the Aegean Islands, with emphasis on the utilization of non-conventional water resources. *Desalination*, 248, 1049–1064.
- Gikas, P., & Tchobanoglous, G. (2009). Sustainable use of water in the Aegean Islands. *J. Environ. Manage.*, 90, 2601-2611.
- Gilon, J., Folkman, Y., Savliev, R., Waisman, M., & Kedem, O. (2003). WAIV — wind aided intensified evaporation for reduction of desalination brine volume. *DESALINATION*, 1-3, pp. 205-214.
- Global Water Intelligence. (2009). From Zero to Hero - the Rise of ZLD. Ανάκτηση από <http://www.epa.gov/region1/npdes/merrimackstation/pdfs/ar/AR895.pdf>
- GreenPro project. (2008). *Planning and installing photovoltaic systems. A guide for installers, architects and engineers. Second Edition, co-funded by the European Commission*. The German Energy Society, Inc.
- Gude, V. G., Nirmalakhandan, N., & Deng, S. (2010). Renewable and sustainable approaches for desalination. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 14(9), 2641-2654.
- Halet, D., & Stede, D. (2015). The socio-economic importance of water - Challenges of the future. Ανάκτηση από <http://www.cefic.org/Documents/Learn%20and%20Share/Flagship-Initiatives/Water-Management/Workshop-11June2015/3.The-Socio-Economic-importance-of-water-challenges-of-the-future-by-Dirk-Hale-from-Vlakwa.pdf>

- Harris, D. C. (2011). *Ποσοτική χημική ανάλυση, Τόμος Β*. (Χ. Ν., & Φ. Μ., Μεταφρ.) Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης. Ανάκτηση από <http://www.cup.gr/Files/files/chapters/xhmikh%20analysi%20II.pdf>
- Harrison, D. G., Ho, G. E., & Mathew, K. (1996). Desalination using renewable energy in Australia, *Renewable Energy*, 8(1-4), 509-513.
- Ibáñez, R., Pérez-González, A., Gómez, P., Urtiaga, A., & Ortiz, I. (2013). Acid and base recovery from softened reverse osmosis (RO) brines. Experimental assessment using model concentrates. , 309,. *DESALINATION*, 309, 165-170.
- Jordahl, J. (2006). Beneficial and Nontraditional Uses of Concentrate. Ανάκτηση από http://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/grants_loans/water_recycling/research/02_006b.pdf
- Juby, G., Zacheis, A., Shih, W., Ravishanker, P., Mortazavi, B., & Nusser, M. (2008). Evaluation and Selection of Available Processes for a Zero-Liquid Discharge System for the Perris, California, Ground Water Basin (Agreement No. 05-FC-81-1153). Denver, Colorado: U.S. Department of the Interior. Ανάκτηση από <https://www.usbr.gov/research/AWT/reportpdfs/report149.pdf>
- Kalogirou, S. A. (2005). Seawater desalination using renewable energy sources. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 31(3), 242-281.
- Karagiannis, C. (2010). Economic and environmental evaluation of desalination systems powered by conventional and renewable energy sources. Alternative strategies for Greece. (Doctoral dissertation, Agricultural University of Athens, 2010). Ανάκτηση από http://dspace.aua.gr/xmlui/bitstream/handle/10329/541/Karagiannis_I.pdf?sequence=3
- Khayet, M. (2013). Solar desalination by membrane distillation: Dispersion in energy consumption analysis and water production costs (a review). *DESALINATION*, pp. 89-101.
- Khordagui, H. (2016). Assessment of potential cumulative environmental impacts of desalination plants around the Mediterranean Sea. Ανάκτηση από http://www.swim-sm.eu/files/Environmental_Impacts_of_Desalination.pdf

- Kim, D. H. (2011). A review of desalting process techniques and economic analysis of the recovery of salts from retentates. *DESALINATION*, 270, 1-8.
- Kobuchi, Y., Terada, Y., & Tani, Y. (1983). The First Salt Plant in the Middle East Using Electrodialysis and Ion Exchange Membranes. Ανάκτηση από <http://salt-partners.com/pdf/TheSaltPlantMiddleEastElectrodialysis7996.pdf>
- Korngold, E., Aronov, L., & Daltrophe, N. (2009). Electrodialysis of brine solutions discharged from an RO plant. *DESALINATION*, 1-3, pp. 215-227.
- Kwak, R., Guan, G., Peng, W. K., & Han, J. (2013). Microscale electrodialysis: Concentration profiling and vortex visualization. *DESALINATION*, pp. 138-146.
- Laspidou, C., Hadjibiros, K., & Gialis, S. (2009). Minimizing the Environmental Impact of Sea Brine Disposal by Coupling Desalination Plants with Solar Saltworks: A Case Study for Greece. 2nd International Conference on the Ecological Importance of Solar .
- Latorre, M. (2005). Environmental impact of brine disposal on Posidonia seagrasses. *DESALINATION*, 1-3, pp. 517-524.
- Latteman, S. (2010). Development of an environmental impact assessment and decision support system for seawater desalination plants. Netherlands. Retrieved from repository.tudelft.nl/assets/uuid:0a684765-bc85-48cb-8a18-833c8fa94037/Lattemann-PhDthesis____.pdf
- Lattemann, S., & Höpner, T. (2008). Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *DESALINATION*, 1-3, pp. 1-15.
- Lefebvre, O., & Moletta, R. (2006). Treatment of organic pollution in industrial saline wastewater: A literature review. *Water Res.*, 40, 3671 – 3682.
- Lewis, A. (2014). Making value out of waste Why Eutectic Freeze Crystallization is a hot topic.... Ανάκτηση από http://www.acqueau.eu/wp-content/uploads/2014/03/12_A.Lewis_Compressed.pdf

- Li, C., Goswami, D. Y., Shapiro, A., Stefanakos, E. K., & Demirkaya, G. (2012). A new combined power and desalination system driven by low grade heat for concentrated brine. *Energy*, 1, pp. 582-595.
- Lonsdale, J. (2011). DETAILED ASSESSMENT OF THE MARKET POTENTIAL, AND DEMAND FOR, AN EU ETV SCHEME. Retrieved from <http://ec.europa.eu/environment/etv/pdf/ETV%20Final%20Report%20Business%20Case%20Annexes.pdf>
- Lonsdale, J., Peacock, M., Shembavnekar, N., Erbilgic, A., & Kulyk, T. (2011). Detailed assessment of the market potential and demand for an EU ETV scheme. Brussels. Ανάκτηση από <http://ec.europa.eu/environment/etv/pdf/ETV%20Final%20Report.pdf>
- Macedonio, F., Katzir, L., Geisma, N., Simone, S., Drioli, E., & Gilron, J. (2011). Wind-Aided Intensified eVaporation (WAIV) and Membrane Crystallizer (MCR) integrated brackish water desalination process: Advantages and drawbacks. *DESALINATION*, pp. 127-135.
- Macedonio, F., Quist-Jensen, C., Al-Harbi, O., Alromaih, H., Al-Jlil, S., & Al Shabouna, F. (2013). Thermodynamic modeling of brine and its use in membrane crystallizer. *DESALINATION*, 323, 83-92.
- Mackey, E., & Seacord, T. (2006). Regional solutions for concentrate disposal. Ανάκτηση από <http://colowqforum.org/pdfs/membrane-treatment/report-to-cwqcc/Appendix%20F%20-%20AMTA%20Report.pdf>
- Madani, M. H., Hey, G., Goldenberg, R., & Plasse, C. (2011). Use of magnesium compounds in wastewater treatment. Ανάκτηση από <http://www2.lwr.kth.se/grundutbildning/ae2301/edmaza/groupwork/2seawaterasresource.pdf>
- Mannar, V. M. (1982). Guidelines for the establishment of solar salt facilities from seawater, underground brines and salted lakes. Ανάκτηση από http://www.amisac.org.mx/index_archivos/guia_sal.pdf
- Markozanes, S. (2013). Σύστημα Αφαλάτωσης στην Σαντορίνη. Chania: Technical University of Crete. Ανάκτηση από

- <http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse/stef/sdfp/2013/MarkozannesSigouras/attachd-document-1366704488-428948-3586/MarkozannesSigouras2013.pdf>
- MED WWR WG. (2007). Mediterranean Wastewater Reuse Report. Ανάκτηση από http://ec.europa.eu/environment/water/water-urbanwaste/info/pdf/final_report.pdf
- Mentis, D. (2011). Renewable driven desalination for water deficient islands of Aegeon Archipelagos. (Thesis, National Technical University of Athens, 2011). Retrieved from http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/3962/3/mentisd_desalination.pdf
- Mickley, M. (2004). Review of Concentrate Management Options. Ανάκτηση από <http://texaswater.tamu.edu/readings/desal/concentratedisposal.pdf>
- Mickley, M. (2008). Survey of high recovery and Zero Liquid Discharge Technologies for water utilities. Alexandria: Water Reuse. Ανάκτηση από http://www.swrcb.ca.gov/water_issues/programs/grants_loans/water_recycling/research/02_006a_01.pdf
- Mickley, M. (2009). Treatment of Concentrate. Denver, Colorado: U.S. Department of the Interior. Retrieved from <http://www.usbr.gov/pmts/water/media/pdfs/report155.pdf>
- Mickley, M. C. (2001). Membrane Concentrate Disposal: Practices and Regulation (Second Edition). Ανάκτηση από <https://www.usbr.gov/research/AWT/reportpdfs/report123.pdf>
- Mohamed, A., Maraqa, M., & Al Handhaly, J. (2005). Impact of land disposal of reject brine from desalination plants on soil and groundwater. *DESALINATION*, 1-3, pp. 411-433.
- Mohar, E. B., & Zagar, Z. (2002). COMPILATION OF ECONOMIC INFORMATION INTERREGIONAL STUDY. Retrieved from www.aegean.gr/alas/interr/Compilation_of_economic%20in.doc
- Morillo, J. U., Rosado, D., El Bakouri, H., Riaza, A., & Bernaola, F.-J. (2014). Comparative study of brine management technologies for desalination plants. *DESALINATION*, 366, 32-49.

- Mortazavi, S. (2008). Application of Membrane Separation Technology to Mitigation of Mine Effluent and Acidic Drainage. Mine Environment Neutral Drainage (MEND) Program. Ανάκτηση από <http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2013/01/3.15.1.pdf>
- Münk, W.-I. F. (2008). Ecological and economic analysis of seawater desalination plants. UNIVERSITY OF KARLSRUHE. Retrieved from <http://www.ifh.uni-karlsruhe.de/science/envflu/research/brinedis/muenk-diplomathesis.pdf>
- Nastos, P., Politi, N., & Kapsomenakis, J. (2013). Spatial and temporal variability of the Aridity Index in Greece. *Atmos. Res.*(119), 140-152.
- National Research Council. (2008). Desalination: A National Perspective Committee on Advancing Desalination Technology. Washington D.C.: National Research Council. Ανάκτηση από http://waterwebster.org/documents/NRCDesalinationreport_000.pdf
- Ophir, A., & Manor, S. (1987). The Curacao kae-lt-med and auxiliary steam turbine project : A model for dual purpose msf plants replacement. *DESALINATION*, 66, 33-42.
- Palomar, P., & Losada, I. J. (2011). Impacts of Brine Discharge on the Marine Environment. Modelling as a Predictive Tool. Ανάκτηση από <http://www.cacoastkeeper.org/document/impacts-of-brine-discharge-on-the-marine-environment.pdf>
- Papapetrou, M., Wieghaus, M., & Biercamp, C. (2010). Roadmap for the development of desalination powered by renewable energy. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Retrieved from: . Ανάκτηση από http://www.prodes-project.org/fileadmin/Files/ProDes_Road_map_on_line_version.pdf
- Pérez-González, A., Urtiaga, A., Ibáñez, R., & Ortiz, I. (2012). State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates. *Water Res.*, 46(2), 267-283.
- Qurie, M., Abbadi, J., Scrano, L., Mecca, S., Bufo, G. A., & Khamis, M. (2013). Inland Treatment of the Brine Generated from Reverse Osmosis Advanced

- Membrane Wastewater Treatment Plant Using Epuvalisation System. *Int. J. Mol. Sci.*
- Randall, D., Nathoo, J., & Lewis, A. (2011). A case study for treating a reverse osmosis brine using Eutectic Freeze Crystallization—Approaching a zero waste process. *DESALINATION*, 1-3, pp. 256-262.
- Ravizky, A., & Nadav, N. (2007). Salt production by the evaporation of SWRO brine in Eilat: a success story. *DESALINATION*, 205(1-3), 374-379.
- Reig, M., Casas, S., Aladjem, C., Valderrama, C., Gibert, O., & Valero, F. (2014). Concentration of NaCl from seawater reverse osmosis brines for the chlor-alkali industry by electrodialysis. *DESALINATION*, 342, 107-117.
- Research& Consulting. (2013). Sea Water Mining. Retrieved from http://www.oakdenehollins.co.uk/media/CN001/Brine_mining.pdf
- Riera, R., Tuya, F., Ramos, E., Rodríguez, M., & Monterroso, Ó. (2012). Variability of macrofaunal assemblages on the surroundings of a brine disposal. *DESALINATION*, pp. 94-100.
- Rigali, M. J. (2010). Implementation of the National Desalination and Water Purification Technology Roadmap: Structuring and Directing the Development of Water Supply Solutions. United States Department of Energy's National Nuclear. Retrieved from https://www.usbr.gov/research/AWT/s_t_publications/Desalination%20Implementation%20Roadmap%201-26-2010_c_web.pdf
- Roberts, D. A., Johnston, E. L., & Knott, N. A. (2010). Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: A critical review of published studies. *Water Res.*, 44, 5117-5128.
- Robertson, A., & Nghiem, L. D. (2011). Treatment of High TDS Liquid Waste: Is Zero Liquid Discharge Feasible? *Journal of Water Sustainability*, 2, pp. 153-163.
- Roskill. (2014). *Salt: Global Industry Markets and Outlook Fourteenth Edition*. United Kingdom: Roskill Information Services Ltd.

- Rynders, T. (2011). Design & Piloting of a Brine Minimization System for Concentrate Disposal. Ανάκτηση από http://wrii.nmsu.edu/conf/conf11/pdf/abstract15_rynders.pdf
- Sajid Hussain, I. (2014). An overview of case studies on zero liquid discharge – Indian experience. Ανάκτηση από <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=566dc1055cd9e321148b4586&assetKey=AS%3A306276477669376%401450033410796>
- Sánchez, A., Nogueira, I., & Kalid, R. (2015). Uses of the reject brine from inland desalination for fish farming, Spirulina cultivation, and irrigation of forage shrub and crops. *DESALINATION*, 364, 96-107.
- Sanciolo, P., Ostarcevic, E., Atherton, P., Leslie, G., Fane, T., & Cohen, Y. (2012). Enhancement of reverse osmosis water recovery using interstage calcium precipitation. *DESALINATION*, pp. 43-52.
- Sedivy, V. M. (2008). Economy of Salt in Chloralkali Manufacture. National Salt Conference 2008, Gandhidham. Ανάκτηση από <http://www.salt-partners.com/pdf/Gandhidham2008/Economy%20of%20Salt%20in%20Chloralkali%20Manufacture.pdf>
- Seigworth, A., Ludlum, R., & Reahl, E. (1995). Case study: Integrating membrane processes with evaporation to achieve economical zero liquid discharge at the Doswell Combined Cycle Facility. *DESALINATION*, 102(1-3), 81-86.
- Serra Salt Engineers. (2005). Purification and refining of salt for chemical and human consumptions. Ανάκτηση από <http://www.serraprocess.com/wp-content/uploads/2013/01/Purification-of-salt-for-chemical-and-human-consumption.pdf>
- Sobhani, R., Abahusayn, M., Gabelich, C. J., & Rosso, D. (2012). Energy Footprint analysis of brackish groundwater desalination with zero liquid discharge in inland areas of the Arabian Peninsula. *DESALINATION*, pp. 106-116.
- SOL-BRINE. (2012). Report on the evaluation of desalination systems driven by renewable energy sources: focus on solar energy systems used in different

- desalination applications. Ανάκτηση από <http://solbrine.uest.gr/uploads/files/Deliverable1.2.pdf>
- SOL-BRINE. (2012b). Deliverable 2.4: Technical report explaining the design procedure and the sizing of the brine treatment system. Athens. Ανάκτηση από <http://solbrine.uest.gr/index.php/en/deliverables/50-deliverable-2-4-technical-report-explaining-the-design-procedure-and-the-sizing-of-the-brine-treatment-system>
- SOL-BRINE. (2013). Deliverable 4.2: Technical report on the results of the lab measurements made during the operation of the system. Ανάκτηση από http://solbrine.uest.gr/uploads/files/deliverable_4.2.pdf
- SOL-BRINE. (2016). Literature review on the potential alternative uses of the final products from similar brine treatment processes on a worldwide basis. Ανάκτηση από http://solbrine.uest.gr/uploads/files/deliverable_6.1.pdf
- Sonderegger, T., Pfister, S., & Hellweg, S. (2015). Criticality of Water: Aligning Water and Mineral Resources Assessment. *Environ. Sci. Technol.*, 49(20), 12315-12323. doi:DOI: 10.1021/acs.est.5b02982
- SPIRE. (2013). SPIRE Roadmap. Retrieved from http://www.spire2030.eu/uploads/Modules/Publications/spire-roadmap_december_2013_pbp.pdf
- Stamatakis, M., Argiraki, A., & Mitsi, I. (2011). ΟΔΗΓΟΣ ΑΣΚΗΣΗΣ ΥΠΟΧΡΕΩΣΤΩΝ ΣΤΟ ΑΙΤΩΛΙΚΟ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΣΤ' ΕΞΑΜΗΝΟΥ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΟΡΥΚΤΑ- ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ. Ανάκτηση από http://www.geol.uoa.gr/attachments/article/835/aitoliko_fieldtrip-guide.pdf
- Stepakoff, G. L., Siegelman, D., Johnson, R., & Gibson, W. (1974). Development of a eutectic freezing process for brine disposal. *DESALINATION*, 14, 25-38.
- Subramani, A., & Jacangelo, J. G. (2014). Treatment technologies for reverse osmosis concentrate volume minimization: A review. *SEP PURIF TECHNOL*, 122, 472-489.

- Tanaka, Y., Ehara, R., Itoi, S., & Goto, T. (2003). Ion-exchange membrane electrodialytic salt production using brine discharged from a reverse osmosis seawater desalination plant, *Journal of Membrane Science*. *J MEMBRANE SCI*, 222(1-2), 71-86.
- Thomas, A. (1996). Solar steam generating systems using parabolic trough concentrators. *Energy Convers. Mgmt*, 37(2), 215-245.
- Tonner, J. (2008). Barriers to Thermal Desalination in the United States. Ανάκτηση από <https://www.usbr.gov/research/AWT/reportpdfs/report144.pdf>
- Tree, K. S. (2013). Water Industry Report Desalination. Ανάκτηση από <http://www.sdwtc.org/Resources/WEMI/Segment%20Report/130226.Desalination.pdf>
- Trieb, F. (2005). Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region Final Report. Stuttgart, Germany. Ανάκτηση από http://www.dlr.de/Portaldata/1/Resources/portal_news/newsarchiv2008_1/algerien_med_csp.pdf
- Turek, M. (2004). Electrodialytic desalination and concentration of coal-mine brine. *DESALINATION*, pp. 355-359.
- Turek, M., Dydo, P., & Klimek, R. (2008). Salt production from coal-mine brine in NF — evaporation — crystallization system. *DESALINATION*, pp. 238-243.
- Tzen, E. (2009). DES environmental considerations. Athens. Ανάκτηση από http://www.cres.gr/kape/publications/pdf/PRODES/DESAL_ENVIRONM_ASPECTS.pdf
- Tzen, E. (2009b). Desalination Technologies (I). Athens. Retrieved from http://www.cres.gr/kape/publications/pdf/PRODES/DESALINATION_GENERAL_1.pdf
- Tzen, E. (2009c). Desalination Technologies (II). Athens. Ανάκτηση από http://www.cres.gr/kape/publications/pdf/PRODES/DESALINATION_GENERAL_2.pdf

- Tzen, E., & Morris, R. (2003). Renewable energy sources for desalination. *Solar Energy*, 75(5), 375-379.
- UNEP-MAP. (2012). State of the Mediterranean marine and coastal environment. Athens. Ανάκτηση από http://195.97.36.231/publications/SoMMCER_Eng.pdf
- UNEP-MAP/MEDPOL. (2003). Sea water desalination in the Mediterranean - Assessment and guidelines (MAP Technical Reports Series No. 139). Athens. Ανάκτηση από <http://195.97.36.231/acrobatfiles/MTSAcrobatfiles/mts139eng.pdf>
- UNESCO Centre for Membrane Science and Technology. (2008). Emerging trends in desalination: A review. Retrieved from http://www.nwc.gov.au/__data/assets/pdf_file/0009/11007/Waterlines_-_Trends_in_Desalination_-_REPLACE_2.pdf
- United Nations. (2009). ESCWA WATER DEVELOPMENT REPORT 3 ROLE OF DESALINATION IN ADDRESSING WATER SCARCITY. New York: United Nations. Ανάκτηση από <http://www.escwa.un.org/information/publications/edit/upload/sdpd-09-4.pdf>
- USGS. (2012). Salt. United States Geological Survey. Retrieved from <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/salt/mcs-2012-salt.pdf>
- Veolia Water. (2008). Innovative Process solutions, Zero Liquid Discharge (ZLD). Ανάκτηση από <http://www.veoliawatertech.com/hpdsystems/ressources/files/1/7436,HPD-ZLD-6P-9-26.pdf>
- Voutchkov, N. (2011). Overview of seawater concentrate disposal alternatives. *DESALINATION*, 273, 205-219.
- Water Reuse Association. (2010). Seawater Concentrate Management. Ανάκτηση από https://www.watereuse.org/sites/default/files/u8/Seawater_Concentrate_WP.pdf
- Williams, P., Ahmad, M., & Connolly, B. (2013). Freeze desalination: An assessment of an ice maker machine for desalting brines. *DESALINATION*, pp. 219-224.

- Wolthek, N., Raat, K., Ruijter, J. A., Kemperman, A., & Oosterhof, A. (2013). Desalination of brackish groundwater and concentrate disposal by deep well injection. *Desalin. Water Treat.*, 51(4-6), 1131-1136.
- World Economic Forum. (2015). Global Risks 2015. Ανάκτηση από http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_2015_Report15.pdf
- WssTP. (2012). Brines Management - Research and Technology Development Needs Water in Industry. Ανάκτηση από <http://wsstp.eu/files/2013/11/ExS-Brines.pdf>
- Xevgenos, D., Michailidis, P., Dimopoulos, K., Krokida, M., & Loizidou, M. (2015b). Design of an innovative vacuum evaporator system for brine concentration assisted by software tool simulation. *DESALIN WATER TREAT*, 53(12), 3407-3417.
- Xevgenos, D., Moustakas, K., Malamis, D., & Loizidou, M. (2016). An overview on desalination & sustainability: renewable energy-driven desalination and brine management. *DESALIN WATER TREAT*, 57, 2304–2314.
- Xevgenos, D., Vidalis, A., Moustakas, K., Malamis, D., & Loizidou, M. (2015). Sustainable management of brine effluent from desalination plants: the SOL-BRINE system. *DESALIN WATER TREAT*, 53, 3151–3160.
- Xu, P., Cath, T. Y., Robertson, A. P., Reinhard, M., Leckie, & Drewes, J. E. (2013). Critical Review of Desalination Concentrate Management, Treatment and Beneficial Use. *ENVIRON ENG SCI*, 30(8), 502-514.
- Yilmaz, İ. H., & Söylemez, M. S. (2012). Design and computer simulation on multi-effect evaporation seawater desalination system using hybrid renewable energy sources in Turkey. *DESALINATION*, pp. 23-40.
- Zhou, J., Chang, V. W.-C., & Fane, A. G. (2013). An improved life cycle impact assessment (LCIA) approach for assessing aquatic eco-toxic impact of brine disposal from seawater desalination plants. *DESALINATION*, pp. 233-241.
- Αλμπανάκης, Κ. (n.d.). 4. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του νερού. Ανάκτηση από http://www.geo.auth.gr/courses/gge/gge768e/E_OCEAN_ALBANAKIS/PDF/KEF_4_PHYSICOCHEMICAL_PROPERTIES_OF_WATER.pdf

- Αυλωνίτου, Λ. (2010). Μελέτη με φυσικοχημικές τεχνικές - XRD, μ-XRF, SEM-EDS - της κεραμικής του Νεολιθικού οικισμού στον Μακρύγαλο Περίας. Θεσσαλονίκη. Ανάκτηση από <http://ikee.lib.auth.gr/record/126494/files/GRI-2011-6655.pdf>
- Γεωργαλή, Σ. (2013). Οικονομική αποτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων του «Κέντρου Επεξεργασίας Λυμάτων Μεταμόρφωσης» στο Δήμο Λυκόβρυσης Πεύκης. Αθήνα. Ανάκτηση από http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/7845/1/georgalis_cvm.pdf
- Γεωργιοπούλου, Μ. (2007). Ανάπτυξη μεθόδων για την επιλογή της καλύτερης διαθέσιμης τεχνολογίας για την επεξεργασία υγρών βιομηχανικών αποβλήτων. Ανάκτηση από nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/764/11/Nimertis_Georgiopoulou%28cm%29.pdf
- Δανιλάκης, Β. (2012). Κυκλάδες και νερό: προς μία βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων ή όχι;. Retrieved from <http://nomosphysis.org.gr/12560/kuklades-kai-nero-pros-mia-biosimi-diaxeirisi-ton-udatikon-poron-i-oxi/>
- Δελγιάννη, Ε., & Μπελεσιώτης, Β. (1995). *Μέθοδοι και συστήματα αφαλάτωσης - Αρχές διεργασιών αφαλάτωσης*. Αθήνα: Γραφικές Τέχνες.
- Εθνική Στατιστική Υπηρεσία της Ελλάδος (ΕΛΣΤΑΤ). (2008). ΣΤΑΚΟΔ 2008. Ανάκτηση από http://www.anhma.gr/files/stakod_2008.pdf
- Ελληνικές Αλυκές. (2005). Ελληνικές Αλυκές: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΗΛΩΣΗ Κοινοτικού Συστήματος Οικολογικής Διαχείρισης και Οικολογικού Ελέγχου (EMAS). Ανάκτηση από http://www.minenv.gr/emas/downloads/emas_reports/08.93.el.ellinikes.alikes.a.e.05.pdf
- Ευαγγελίδου, Σ. (2008). Στρατηγική Διοίκηση στον κλάδιο της παγκόσμιας βιομηχανίας χάρτου. Retrieved from <http://digilib.lib.unipi.gr/dspace/bitstream/unipi/2806/1/Evaggelidou.pdf>
- Ζαλώνης, Ι. (2013). Η διαχείριση των υδάτων στην Τήνο. *WIN4LIFE: Water Is Necessary for LIFE*.

- Ζιώμας, Ι. (2013). Μηχανική Φυσικών Διεργασιών I & II, Εργαστηριακή άσκηση 1: Κρυστάλλωση. Ανάκτηση από <http://lpad.chemeng.ntua.gr/LAB/PDFs/Crystallization.pdf>
- Ιγγλεζάκης, Β. (2002). Σχεδιασμός στήλης ιοντοεναλλαγής με φυσικά ορυκτά ως πληρωτικό υλικό. Ανάκτηση από <http://www.didaktorika.gr/eadd/handle/10442/16704?locale=en>
- Καλιαμπάκος, Δ., & Δαμίγος, Δ. (2008). Σημειώσεις Μαθήματος Οικονομικά του Περιβάλλοντος και των Υδατικών Πόρων Χρηματοοικονομική και κοινωνικοοικονομική αξιολόγηση επενδύσεων. Ανάκτηση από http://mycourses.ntua.gr/courses/PSTGR1094/document/Investment_analysis_notes.pdf
- ΚΕΕΛΠΝΟ. (2014). Οδηγία δειγματοληψίας υγρών αποβλήτων από συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων για χημική ανάλυση. Ανάκτηση από <http://www.keelpno.gr/Portals/0/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%B1/%CE%9A%CE%95%CE%94%CE%A5-%CE%A0%CE%95%CE%94%CE%A5/%CE%9F%CE%B4%CE%B7%CE%B3%CE%AF%CE%B5%CF%82%20%CE%94%CE%B5%CE%B9%CE%B3%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CE%BB%CE%B7%CF%88%CE%AF%CE%B1%CF%82/%CE%9D>
- Κοροβέσης, Ν. (2013). Εξέλιξη Αλοπηγικής τεχνολογίας – Σύγχρονες αλυκές. Αθήνα. Ανάκτηση από <http://periigites.gr/files/alikes.pdf>
- Λάζος, Ε. (n.d.). Αλάτιση τροφίμων. Retrieved from <http://www.foodtech.gr/old/pdfs/alatishtrof.pdf>
- Μαμάης, Δ. (2008). Αρχές οικολογίας & περιβαλλοντικής χημείας. Αθήνα. Ανάκτηση από http://users.itia.ntua.gr/nikos/oikologia/vasikes_enies_ximias%20Sissy_1.pdf
- Μαύρος, Π. (2009). Κεφάλαιο 13: Κρυστάλλωση. Ανάκτηση από http://www.eng.auth.gr/~chemtech/foititika/fd/mavros/ch13_crystallization_a4.pdf

Νικολαΐδης, Γ. (2003). Αξιοποίηση Υγρών Αποβλήτων Μονάδας Επεξεργασίας Μαρμάρων. Ανάκτηση από <http://philon.cheng.auth.gr/philon/site/sdocs/s30.pdf>

Νικολαΐδης, Γ., Μουζά, Α., Κακαλιάς, Σ., & Παράς, Σ. (2003). Αξιοποίηση υγρών αποβλήτων μονάδας επεξεργασίας μαρμάρων. Ανάκτηση από <http://philon.cheng.auth.gr/philon/site/sdocs/Nikol%20Thesis.pdf>

Ξεύγενος, Δ., Μιχαηλίδης, Π., Δημόπουλος, Κ., & Λοϊζίδου, Μ. (2013). Επεξεργασία παραγόμενου ύγρου αποβλήτου (άλμη) με χρήση συστήματος εξάτμισης υπό κενό – ανάπτυξη πιλοτικού συστήματος τροφοδοτούμενου από ηλιακή ενέργεια. *9ο ΠΕΣΧΜ: Η Συμβολή της Χημικής Μηχανικής στην Αειφόρο Ανάπτυξη*. Αθήνα.

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. (n.d.). Εκφράσεις περιεκτικότητας και συγκέντρωσης. Ανάκτηση από <http://eclass.uth.gr/eclass/modules/document/file.php/SEYC123/1.%20%CE%95%CE%9A%CE%A6%CE%A1%CE%91%CE%A3%CE%95%CE%99%CE%A3%20%CE%A0%CE%95%CE%A1%CE%99%CE%95%CE%9A%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%9F%CE%A4%CE%97%CE%A4%CE%91%CE%A3-%CE%A3%CE%A5%CE%93%CE%9A%CE%95%CE%9D%CE%>

Παπάζογλου, Α. (2013). Προσομοίωση πρότυπου ηλιακού συλλέκτη με ανάπτυξη υπολογιστικού κώδικα. Αθήνα.

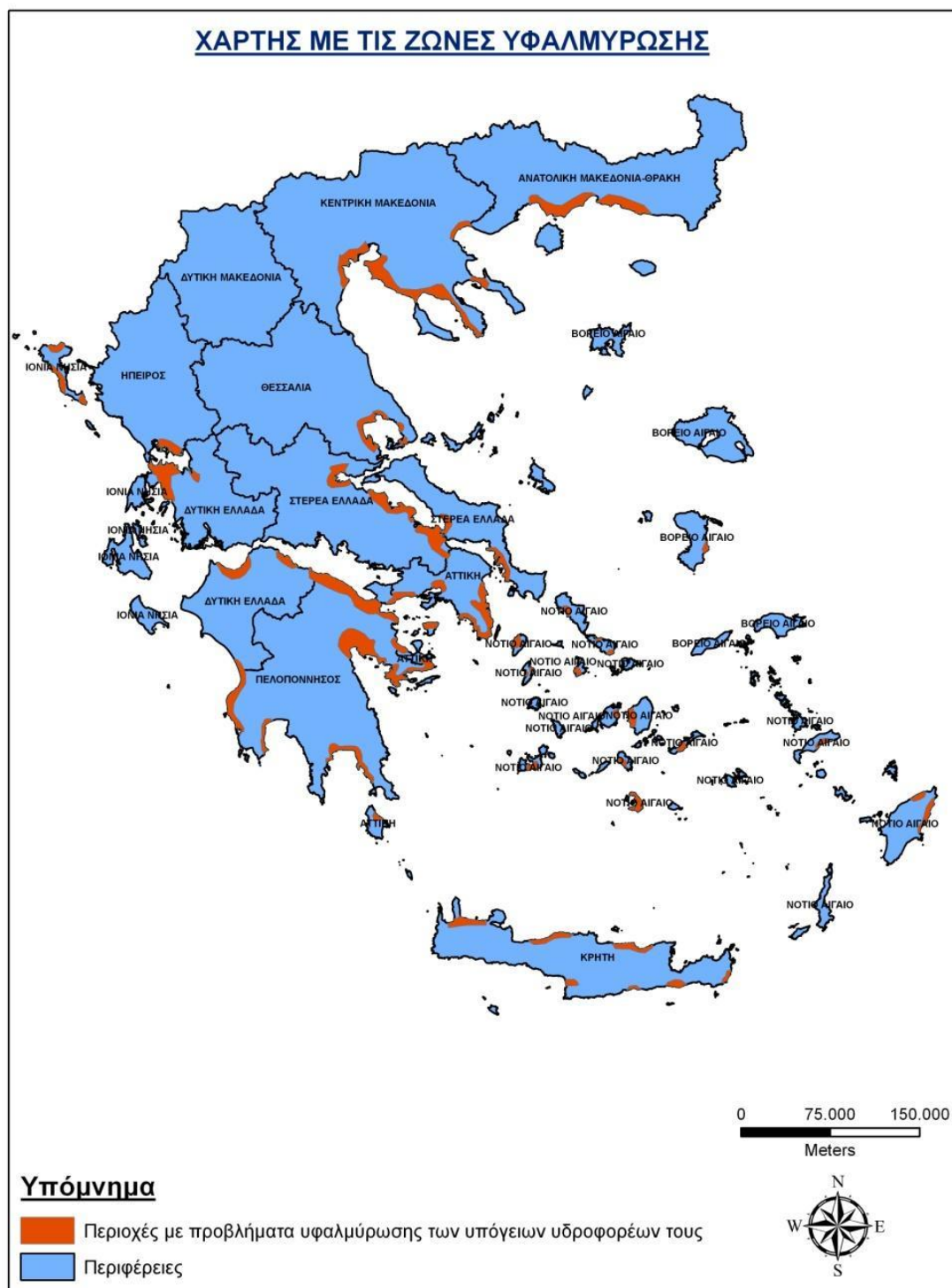
Παππά, Α. (2015). Φασματομετρία ατομικής απορρόφησης. Ανάκτηση από <http://www.chemeng.ntua.gr/courses/fma/files/%CE%A6%CE%B1%CF%83%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CE%BC%CE%B5%CF%84%CF%81%CE%AF%CE%B1%20%CE%91%CF%84%CE%BF%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CF%82%20%CE%91%CF%80%CE%BF%CF%81%CF%81%CF%8C%CF%86%CE%B7%CF%83%CE%B7%CF%82.pdf>

Παρανυχιανάκης, Ν., Κοτσελίδου, Ο., Βαρδάκου, Ε., & Αγγελάκης, Α. (2009). Οδηγίες ανακύκλωσης επεξεργασμένων εκροών αστικών υγρών αποβλήτων στην Ελλάδα. Ανάκτηση από <http://www.edeya.gr/2013-09-23-10-58-06/2013-09-23-11-11-03/ekdoseis/68-odigies-anakiklosis-epksergamenon-igron-apovliton-stin-elladan/file>

- Περιφέρεια Νοτίου Αιγαίου. (2013). Απόφαση: Χορήγηση Άδειας Μηχανολογικής Εγκατάστασης Τριών Μονάδων. Retrieved from <http://static.diavgeia.gov.gr/doc/%CE%92%CE%95%CE%A587%CE%9B%CE%9E-0%CE%9E0>
- Ράπτης, Δ. (2012). Μελέτη αφαλάτωσης με μικρές μονάδες. Ειδικά με αυτόνομη μονάδα αντίστροφης όσμωσης και χρήση ΑΠΕ. Ανάκτηση από <http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/5936/1/%CE%94%CE%B9%CF%80%CE%BB%CF%89%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE%20%CE%95%CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1%20%CE%A1%CE%AC%CF%80%CF%84%CE%B7%20%CE%94%CE%B7%CE%BC%CE%AE%CF%84%CF%81%CE%B7.pdf>
- ΣΜΕ. (2010). Έκθεση Δραστηριοτήτων 2010. Ανάκτηση από http://www.sme.gr/phocadownload/userupload/ektheseis/ekthesi_2010.pdf
- Τσικαλάκης, Α. (2010). Πρόσθετες σημειώσεις για την Οικονομική Ανάλυση Επενδυτικών Σχεδίων. Ανάκτηση από https://eclass.teicrete.gr/modules/document/file.php/TH132/Oikonomiki_analysi_ependisewn.pdf
- ΥΠΕΧΩΔΕ. (2007). Στρατηγική εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων επιχειρησιακού προγράμματος περιβάλλον & αειφόρος ανάπτυξη 2007 – 2013. Retrieved from http://www.eib.org/attachments/pipeline/20100240_sea1_el.pdf
- Υπουργείο Γεωργίας Αγροτικής Ανάπτυξης και Περιβάλλοντος Κύπρου. (2007). Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων: "Μονάδα αφαλάτωσης για το έργο Larnaca Golf resort & Country Club Cyprus". Ανάκτηση από [http://www.moa.gov.cy/moa/environment/environment.nsf/0/59F8B1D93106C6F2C225790A003AAC84/\\$file/5-2007_2.pdf](http://www.moa.gov.cy/moa/environment/environment.nsf/0/59F8B1D93106C6F2C225790A003AAC84/$file/5-2007_2.pdf)
- Υφαντής, Ν. (2011). Σχεδιασμός και Λειτουργία μονάδων αφαλάτωσης Νερού Αντίστροφης Όσμωσης - Μελέτες περίπτωσης. Retrieved from <http://phdtheses.ekt.gr/eadd/handle/10442/31585>
- Χαραλάμπους, Α. (2007). *Υδατικό Περιβάλλον*. Αθήνα: ΕΜΠ.

9 Παραρτήματα

9.1 Ζώνες υφαλμύρωσης, Ελλάδα



Πηγή: (Markozanes, 2013)

9.2 Εμπορικά συστήματα Zero Liquid Discharge

Client	Plant	Location	Startup	Vol, gpm	Industry	Provider
Asarco	Hayden	AZ	1984	200	Copper smelt	RCC
IBM	Tucson	AZ	1985	100	Electronics	RCC
Salt River Project	Phoenix	AZ	1986		Power	HPD
Apache Nitrogen	Benson	AZ	1994	90	Fertilizer	RCC
Calpine	South Point	AZ	2000	400	Power	RCC
Intel	Fab 22	AZ	2001	155	Manufacturing	RCC
Pinnacle West Energy	West Phoenix	AZ	2001	100	Power	RCC
Pinnacle West Energy	Phoenix	AZ	2001		Power	HPD
Pinnacle West Energy	Tonopah	AZ	2001		Power	HPD
NEPCO	Gila River	AZ	2003	900	Power	RCC
Salt River Project	Navajo	AZ	1974-1980	1400	Power	RCC
Los Angeles County	Pitchess	CA	1988	150	Power	RCC
Thermo Electron Corp.	Mendota	CA	1988	38	Power	RCC
National Energy Constructors	Hanford	CA	1989	75	Power	RCC
Aerojet	Sacramento	CA	1990	15	Chemical	RCC
Harbert International	Tracy	CA	1990	50	Power	RCC
Walsh Construction	Mecca	CA	1991	50	Power	RCC
Simpson Paper	Ripon	CA	1993	11	Paper	HPD
La Paloma Generating	La Palmoa	CA	2001	600	Power	RCC
Constellation Energy	Victorville	CA	2001		Power	HPD
FP&L	Blythe	CA	2003	420	Power	RCC
SMUD	Cosumnes	CA	2004	280	Power	RCC
Con Agra	King City	CA	2005	50	Food	RCC
Public Service of CO	Hayden	CO	1976	250	Power	RCC
Tri-State Generation & Trans.	Craig	CO	1978	700	Power	RCC
Public Service of CO	Pawnee	CO	1980	450	Power	RCC
City of Colorado Springs	RD Nixon	CO	1980	350	Power	RCC
Calpine	Rocky Mountain	CO	2003		Power	HPD
City of Gainesville	Deerhaven	FL	1981	300	Power	RCC
Orlando Utilities Commission	Orlando	FL	1986			
Orlando Utilities Commission	Stanton	FL	1993	600	Power	RCC
Northern Canadian Power	Lake	FL	1993	3	Power	RCC
Pasco Cogen/Zurn/Nepco	Pasco	FL	1993	3	Power	RCC
Misson Energy	Auburndale	FL	1993	130	Power	RCC
Bechtel/US Generating	Cedar Bay	FL	1993	300	Power	RCC
Bechtel/US Generating	Indiantown	FL	1994	580	Power	RCC
Pasco County	N Port Richey	FL	1997	30	Ash landfill	RCC
U.S. Navy	Jacksonville	FL	1997	3.5	Mfg cleanup	RCC

Tallahassee Electric	St. Marks	FL	2000	230	Power	RCC
Orlando Utilities Commission	Stanton CC	FL	2004	500	Power	RCC
Cogentrix Rathdrum	Rathdrum	ID	2001	2	Power	RCC
Global Energy	Wabash River	IN	2002	100	Power	RCC
Brown & Root	Shreveport	LA	1990			HPD
CRS Serrine	Stratton	ME	1988	20	Power	RCC
Westinghouse	Bellingham	MA	1991	30	Power	RCC
Harquahala Generating	Foxboro	MA	2001		Power	HPD
Tractabel/Parsons	Choctaw	Missouri	2005	106	Power	RCC
Resources Technology Group	Weldon Springs	MO	1995	50	Pit cleanup	RCC
Aquila Utilicorp	Aries Power	MO	2000	280	Power	RCC
Pennsylvania Power & Light	Colstrip	MT	1977	350	Power	RCC
Nevada Power	Clark	NV	1982	600	Power	RCC
Southern California Edison	Mojave	NV	1985	600	Power	RCC
Kerr-McGee Chemical Corp.	Henderson	NV	1989	100	Chemical	RCC
Stone & Webster	Apex	NV	2002	82	Power	RCC
Arizona Public Service	Four Corners	NM	1979	400	Power	RCC
Phelps Dodge	Hidalgo	NM	1991	200	Copper smelt	RCC
Public Service of NM	San Juan	NM	1974-1984	3300	Power	RCC
New York State Gas & Elec	Milliken	NY	1993	30	Power	RCC
Panda	Rosemary	NC	2002	50	Power	RCC
NC Power	E-Town	NC	2003	23	Power	RCC
East Penn	Lyon Station	PA	1995	100	Battery mfg	RCC
AES Ironwood	Ironwood	PA	2001	200	Power	RCC
Ocean State Power	Harrisville	RI	1990		Power	HPD
Ocean State Power	Harrisville	RI	1997	150	Power	RCC
EMI/Stone & Webster	Tiverton	RI	1998	20	Power	RCC
Otter Tail Power	Big Stone	SD	1980	600	Power	RCC
Texas Utilities	Monticello	TX	1982	250	Power	RCC
Texas Utilities	Martin Lake	TX	1983	500	Power	RCC
Texas New Mexico Power	Bremond	TX	1989	322	Power	RCC
Asarco	El Paso	TX	1991	150	Copper smelt	RCC
EI Dupont	Orange	TX	1992			HPD
Texas Independent Energy	Guadalupe	TX	2000	400	Power	RCC
Hays Energy	San Marcos	TX	2001	1,000	Power	RCC
Parsons/Tractebel	Wise County	TX	2002	60	Power	RCC
Utah Power & Light	Huntington	UT	1974	200	Power	RCC
US Army	Tooule	UT	1990			HPD
PacifiCorp	Huntington	UT	2002	200	Power	RCC
Fluor Daniel/Doswell	Doswell	VA	1991	90	Power	RCC
Northwest Alloys	Addy	WA	1981	80	Magnesium	RCC
Japanese Gas Corp	Hanford	WA	1994	20	Nuclear power	RCC
USKDK Corporation	Moses Lake	WA	1997			HPD
Coastal Chemical	Cheyenne	WY	1991	150	Chemical	RCC

RCC: Resources Conservation Company, HPD: Εμπορική ονομασία συστήματος ZLD της Veolia Water Treatment Technologies (Mickley, 2008)

9.3 Ηλιακά δεδομένα, Άγιος Φωκάς, Τήνος

Πίνακας 9-1: Ηλιακά δεδομένα (Ιανουάριος - Ιούνιος) για ένα τυπικό μετεωρολογικό έτος, Άγιος Φωκάς

Ωρα	Ιανουάριος		Φεβρουάριος		Μάρτιος		Απρίλιος		Μάιος		Ιούνιος	
	G(W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G(W/m ²)	A (W/m ²)
5:07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	7
5:22	-	-	-	-	-	-	-	-	13	7	29	16
5:37	-	-	-	-	-	-	-	-	30	17	44	167
5:52	-	-	-	-	-	-	16	8	47	154	58	242
6:07	-	-	-	-	-	-	34	105	63	224	72	314
6:22	-	-	-	-	10	5	56	184	82	291	88	381
6:37	-	-	-	-	34	75	85	256	113	352	121	441
6:52	0	0	0	0	64	148	119	322	147	408	157	497
7:07	0	0	23	12	98	215	157	381	184	459	197	546
7:22	0	0	68	139	136	275	197	433	223	504	238	590

Ωρα	Ιανουάριος		Φεβρουάριος		Μάρτιος		Απρίλιος		Μάιος		Ιούνιος	
	G(W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G(W/m ²)	A (W/m ²)
7:37	23	12	108	204	175	329	239	479	264	544	282	630
7:52	82	149	147	259	216	376	282	519	306	580	326	664
8:07	125	211	186	307	257	417	325	554	347	611	370	695
8:22	165	264	224	348	297	453	367	585	389	639	414	722
8:37	205	310	262	383	336	485	408	612	429	663	458	745
8:52	243	349	298	414	374	512	448	635	468	684	499	765
9:07	280	383	333	440	411	536	487	655	506	702	540	782
9:22	314	412	365	463	445	557	523	672	541	717	578	796
9:37	346	436	396	482	477	574	556	686	574	730	614	809
9:52	376	458	424	499	507	589	588	698	605	741	647	819
10:07	403	476	449	513	534	602	616	708	634	750	678	827

Ωρα	Ιανουάριος		Φεβρουάριος		Μάρτιος		Απρίλιος		Μάιος		Ιούνιος	
	G(W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G(W/m ²)	A (W/m ²)
10:22	427	491	472	525	558	613	642	716	659	758	706	834
10:37	449	504	492	535	579	622	665	723	682	764	730	839
10:52	467	514	509	543	598	629	684	728	701	768	752	844
11:07	483	523	524	550	613	634	701	732	718	772	769	847
11:22	495	530	535	555	626	639	714	736	731	775	784	849
11:37	505	534	544	559	635	642	724	738	741	777	795	851
11:52	511	538	550	561	641	644	730	739	748	778	802	852
12:07	514	539	553	562	644	645	734	740	751	779	806	853
12:22	514	539	553	562	644	645	734	740	751	779	806	853
12:37	511	538	550	561	641	644	730	739	748	778	802	852
12:52	505	534	544	559	635	642	724	738	741	777	795	851

Ωρα	Ιανουάριος		Φεβρουάριος		Μάρτιος		Απρίλιος		Μάιος		Ιούνιος	
	G(W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G(W/m ²)	A (W/m ²)
13:07	495	530	535	555	626	639	714	736	731	775	784	849
13:22	483	523	524	550	613	634	701	732	718	772	769	847
13:37	467	514	509	543	598	629	684	728	701	768	752	844
13:52	449	504	492	535	579	622	665	723	682	764	730	839
14:07	427	491	472	525	558	613	642	716	659	758	706	834
14:22	403	476	449	513	534	602	616	708	634	750	678	827
14:37	376	458	424	499	507	589	588	698	605	741	647	819
14:52	346	436	396	482	477	574	556	686	574	730	614	809
15:07	314	412	365	463	445	557	523	672	541	717	578	796
15:22	280	383	333	440	411	536	487	655	506	702	540	782
15:37	243	349	298	414	374	512	448	635	468	684	499	765

Ωρα	Ιανουάριος		Φεβρουάριος		Μάρτιος		Απρίλιος		Μάιος		Ιούνιος	
	G(W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G(W/m ²)	A (W/m ²)
15:52	205	310	262	383	336	485	408	612	429	663	458	745
16:07	165	264	224	348	297	453	367	585	389	639	414	722
16:22	125	211	186	307	257	417	325	554	347	611	370	695
16:37	82	149	147	259	216	376	282	519	306	580	326	664
16:52	46	82	108	204	175	329	239	479	264	544	282	630
17:07	0	0	68	139	136	275	197	433	223	504	238	590
17:22	-	-	36	71	98	215	157	381	184	459	197	546
17:37	-	-	0	0	64	148	119	322	147	408	157	497
17:52	-	-	-	-	34	75	85	256	113	352	121	441
18:07	-	-	-	-	10	5	56	184	82	291	88	381
18:22	-	-	-	-	0	0	34	105	63	224	72	314

Ωρα	Ιανουάριος		Φεβρουάριος		Μάρτιος		Απρίλιος		Μάιος		Ιούνιος	
	G(W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G(W/m ²)	A (W/m ²)
18:37	-	-	-	-	0	0	16	40	47	154	58	242
18:52	-	-	-	-	-	-	0	0	30	83	44	167
19:07	-	-	-	-	-	-	-	-	13	30	29	90
19:22	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	13	34
19:37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0

Πίνακας 9-2: Ηλιακά δεδομένα (Ιούλιος - Δεκέμβριος) για ένα τυπικό μετεωρολογικό έτος, Άγιος Φωκάς

Time	Ιούλιος		Αύγουστος		Σεπτέμβριος		Οκτώβριος		Νοέμβριος		Δεκέμβριος	
	G(W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G(W/m ²)	A (W/m ²)
5:07	5	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5:22	21	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5:37	36	129	10	5	-	-	-	-	-	-	-	-

Time	Ιούλιος		Αύγουστος		Σεπτέμβριος		Οκτώβριος		Νοέμβριος		Δεκέμβριος	
	G(W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G(W/m ²)	A (W/m ²)
5:52	51	204	27	84	-	-	-	-	-	-	-	-
6:07	66	278	42	166	6	3	-	-	-	-	-	-
6:22	83	347	63	246	22	12	-	-	-	-	-	-
6:37	114	410	93	322	51	164	-	-	-	-	-	-
6:52	150	467	130	391	84	250	18	9	0	0	0	0
7:07	190	519	170	454	124	330	57	135	0	0	0	0
7:22	231	565	214	509	169	402	99	218	17	9	0	0
7:37	275	606	260	558	217	465	144	291	59	107	17	9
7:52	319	643	307	602	267	520	190	356	98	173	63	110
8:07	364	675	355	640	318	568	238	413	137	228	104	174
8:22	408	703	402	674	369	611	286	462	176	277	141	224

Time	Ιούλιος		Αύγουστος		Σεπτέμβριος		Οκτώβριος		Νοέμβριος		Δεκέμβριος	
	G(W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G(W/m ²)	A (W/m ²)
8:37	452	727	449	703	419	647	333	505	215	320	178	268
8:52	494	748	495	728	468	679	379	542	252	356	213	305
9:07	535	767	538	749	515	707	423	574	288	388	246	336
9:22	574	782	580	768	560	730	465	602	322	416	278	363
9:37	610	795	619	783	603	750	504	625	353	439	307	387
9:52	644	806	656	797	642	767	541	646	382	459	334	406
10:07	675	815	689	807	678	781	574	663	409	477	358	423
10:22	703	822	719	816	711	793	604	677	433	491	380	437
10:37	728	828	746	824	740	803	631	689	454	504	399	449
10:52	749	833	769	830	765	811	654	699	472	514	415	459
11:07	768	836	789	834	786	817	673	707	488	522	429	467

Time	Ιούλιος		Αύγουστος		Σεπτέμβριος		Οκτώβριος		Νοέμβριος		Δεκέμβριος	
	G(W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G(W/m ²)	A (W/m ²)
11:22	782	839	805	838	803	822	689	713	500	528	440	473
11:37	793	841	817	840	816	825	701	717	509	533	449	478
11:52	801	842	825	842	824	828	709	720	515	536	454	481
12:07	804	843	828	842	829	829	713	721	518	538	457	482
12:22	804	843	828	842	829	829	713	721	518	538	457	482
12:37	801	842	825	842	824	828	709	720	515	536	454	481
12:52	793	841	817	840	816	825	701	717	509	533	449	478
13:07	782	839	805	838	803	822	689	713	500	528	440	473
13:22	768	836	789	834	786	817	673	707	488	522	429	467
13:37	749	833	769	830	765	811	654	699	472	514	415	459
13:52	728	828	746	824	740	803	631	689	454	504	399	449

Time	Ιούλιος		Αύγουστος		Σεπτέμβριος		Οκτώβριος		Νοέμβριος		Δεκέμβριος	
	G(W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G(W/m ²)	A (W/m ²)
14:07	703	822	719	816	711	793	604	677	433	491	380	437
14:22	675	815	689	807	678	781	574	663	409	477	358	423
14:37	644	806	656	797	642	767	541	646	382	459	334	406
14:52	610	795	619	783	603	750	504	625	353	439	307	387
15:07	574	782	580	768	560	730	465	602	322	416	278	363
15:22	535	767	538	749	515	707	423	574	288	388	246	336
15:37	494	748	495	728	468	679	379	542	252	356	213	305
15:52	452	727	449	703	419	647	333	505	215	320	178	268
16:07	408	703	402	674	369	611	286	462	176	277	141	224
16:22	364	675	355	640	318	568	238	413	137	228	104	174
16:37	319	643	307	602	267	520	190	356	98	173	63	110

Time	Ιούλιος		Αύγουστος		Σεπτέμβριος		Οκτώβριος		Νοέμβριος		Δεκέμβριος	
	G(W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G(W/m ²)	A (W/m ²)
16:52	275	606	260	558	217	465	144	291	59	107	32	54
17:07	231	565	214	509	169	402	99	218	28	49	0	0
17:22	190	519	170	454	124	330	57	135	0	0	-	-
17:37	150	467	130	391	84	250	26	59	-	-	-	-
17:52	114	410	93	322	51	164	0	0	-	-	-	-
18:07	83	347	63	246	24	77	-	-	-	-	-	-
18:22	66	278	42	166	6	3	-	-	-	-	-	-
18:37	51	204	27	84	0	0	-	-	-	-	-	-
18:52	36	129	10	27	-	-	-	-	-	-	-	-
19:07	21	59	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
19:22	5	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Time	Ιούλιος		Αύγουστος		Σεπτέμβριος		Οκτώβριος		Νοέμβριος		Δεκέμβριος	
	G(W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G (W/m ²)	A (W/m ²)	G(W/m ²)	A (W/m ²)
19:37	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Πίνακας 9-3: Απορροφώμενη ηλιακή ακτινοβολία από σύστημα ανίχνευσης μονού άξονα, Ιανουάριος

Δεδομένα τοποθεσίας:	Γεωγραφικό πλάτος:			37°31'45"	Βόρειο							
	Γεωγραφικό μήκος:			25°10'57"	Ανατολικό							
Notation	A: Ολική ακτινοβολία σε επίπεδο ανίχνευσης διπλού άξονα (W/m2)											
	Ac: Ολική ακτινοβολία αίθριας ατμόσφαιρας σε επίπεδο ανίχνευσης διπλού άξονα (W/m2)											
	Td: Μέση θερμοκρασία (deg. C)											
Αποτελέσματα:	Ιανουάριος											
Ωρα				cosθ		A	G _{BT}		Ac	G _{bt} (clear sky)		Td
Ωρα		Ηλιακή ώρα	ω	Βορράς-Νότος	Ανατολή – Δύση		Βορράς-Νότος	Ανατολή – Δύση		Βορράς-Νότος	Ανατολή – Δύση	
5:07	5,116666667	4,629196226	-110,562	0,997	0,485	n/a	n/a		n/a	n/a	n/a	n/a
5:22	5,366666667	5,045333333	-104,320	0,990	0,425	n/a	n/a		n/a	n/a	n/a	n/a
5:37	5,616666667	5,795333333	-93,070	0,968	0,360	n/a	n/a		n/a	n/a	n/a	n/a
5:52	5,866666667	5,965	-90,525	0,961	0,357	n/a	n/a		n/a	n/a	n/a	n/a
6:07	6,116666667	5,875666667	-91,865	0,964	0,358	n/a	n/a		n/a	n/a	n/a	n/a
6:22	6,366666667	6,045333333	-89,320	0,957	0,357	n/a	n/a		n/a	n/a	n/a	n/a
6:37	6,616666667	5,947	-90,795	0,961	0,357	n/a	n/a		n/a	n/a	n/a	n/a
6:52	6,866666667	7,170819333	-72,438	0,891	0,455	0	0		0	0	0	8.9
7:07	7,116666667	6,795333333	-78,070	0,916	0,406	0	0		0	0	0	9.2
7:22	7,366666667	7,045333333	-74,320	0,900	0,437	0	0		0	0	0	9.5
7:37	7,616666667	7,295333333	-70,570	0,881	0,473	12	10,57778419	5,67739	11	9,69630217	5,2042742	9.8

Ωρα				cosθ		A	G _{BT}		A _c	G _{bt} (clear sky)		T _d
7:52	7,86666666 7	7,54533333 3	-66,820	0,862	0,512	149	128,4376327	76,337147	25 4	218,947374	130,13178	10. 0
8:07	8,11666666 7	7,79533333 3	-63,070	0,841	0,553	211	177,5035047	116,77242	36 1	303,69083	199,78599	10. 3
8:22	8,36666666 7	8,04533333 3	-59,320	0,819	0,595	264	216,3108979	157,18031	45 2	370,350477	269,11174	10. 5
8:37	8,61666666 7	8,29533333 3	-55,570	0,796	0,637	310	246,9079089	197,58831	52 9	421,336399	337,1749	10. 7
8:52	8,86666666 7	8,54533333 3	-51,820	0,773	0,679	349	269,69867	236,89008	59 4	459,028682	403,18828	10. 9
9:07	9,11666666 7	8,79533333 3	-48,070	0,748	0,719	383	286,6588705	275,37613	65 0	486,496778	467,34853	11. 1
9:22	9,36666666 7	9,04533333 3	-44,320	0,724	0,758	412	298,185971	312,13939	69 7	504,455393	528,06106	11. 2
9:37	9,61666666 7	9,29533333 3	-40,570	0,699	0,794	436	304,7324826	346,29513	73 7	515,109724	585,36585	11. 4
9:52	9,86666666 7	9,54533333 3	-36,820	0,674	0,829	458	308,8212677	379,48935	77 1	519,87161	638,8347	11. 5
10:0 7	10,1166666 7	9,79533333 3	-33,070	0,650	0,860	476	309,4722521	409,51043	80 0	520,121432	688,25282	11. 7
10:2 2	10,3666666 7	10,0453333 3	-29,320	0,627	0,889	491	307,8121135	436,6101	82 4	516,572671	732,72245	11. 8
10:3 7	10,6166666 7	10,2953333 3	-25,570	0,605	0,915	504	304,8993744	461,213	84 4	510,58546	772,34876	11. 9
10:5 2	10,8666666 7	10,5453333 3	-21,820	0,585	0,938	514	300,5554313	482,01773	86 1	503,459584	807,42659	12. 0
11:0 7	11,1166666 7	10,7953333 3	-18,070	0,567	0,957	523	296,3833082	500,56132	87 4	495,294477	836,50209	12. 1
11:2 2	11,3666666 7	11,0453333 3	-14,320	0,551	0,973	530	292,1852773	515,65749	88 4	487,342991	860,07777	12. 2
11:3 7	11,6166666 7	11,2953333 3	-10,570	0,539	0,985	534	287,7999298	526,10065	89 1	480,205501	877,81962	12. 2
11:5 2	11,8666666 7	11,5453333 3	-6,820	0,530	0,994	538	285,1666131	534,67914	89 6	474,924322	890,46936	12. 3

Ωρα				cosθ		A	G _{BT}		A _c	G _{bt} (clear sky)		T _d
12:0 7	12,1166666 7	11,7953333 3	-3,070	0,525	0,999	539	282,909847	538,32496	89 9	471,866331	897,8741	12. 3
12:2 2	12,3666666 7	12,0453333 3	0,680	0,524	1,000	539	282,2298744	538,96687	89 9	470,732202	898,94474	12. 4
12:3 7	12,6166666 7	12,2953333 3	4,430	0,526	0,997	538	283,1542891	536,59751	89 6	471,572942	893,66426	12. 4
12:5 2	12,8666666 7	12,5453333 3	8,180	0,533	0,991	534	284,5470772	529,26157	89 1	474,777988	883,09373	12. 4
13:0 7	13,1166666 7	12,7953333 3	11,930	0,543	0,981	530	287,8153448	520,0233	88 4	480,054273	867,35961	12. 5
13:2 2	13,3666666 7	13,0453333 3	15,680	0,557	0,968	523	291,0744441	506,05561	87 4	486,422685	845,68375	12. 5
13:3 7	13,6166666 7	13,2953333 3	19,430	0,573	0,950	514	294,5014411	488,54974	86 1	493,318562	818,36834	12. 5
13:5 2	13,8666666 7	13,5453333 3	23,180	0,592	0,930	504	298,2891375	468,68752	84 4	499,515937	784,86561	12. 5
14:0 7	14,1166666 7	13,7953333 3	26,930	0,613	0,906	491	300,8568126	444,88613	82 4	504,900231	746,61135	12. 4
14:2 2	14,3666666 7	14,0453333 3	30,680	0,635	0,879	476	302,3602607	418,44291	80 0	508,168505	703,26539	12. 4
14:3 7	14,6166666 7	14,2953333 3	34,430	0,659	0,849	458	301,7399599	388,89746	77 1	507,950893	654,67236	12. 4
14:5 2	15,8666666 7	15,5453333 3	53,180	0,781	0,664	436	340,7139021	289,44563	73 7	575,931527	489,26933	12. 3
15:0 7	15,1166666 7	14,7953333 3	41,930	0,708	0,781	412	291,6657474	321,86253	69 7	493,42482	544,51015	12. 3
15:2 2	15,3666666 7	15,0453333 3	45,680	0,733	0,744	383	280,6395355	284,88458	65 0	476,281196	483,48559	12. 3
15:3 7	15,6166666 7	15,2953333 3	49,430	0,757	0,705	349	264,3094446	245,8955	59 4	449,856189	418,51555	12. 2
15:5 2	15,8666666 7	15,5453333 3	53,180	0,781	0,664	310	242,2507102	205,7985	52 9	413,389115	351,18518	12. 1
16:0 7	16,1166666 7	15,7953333 3	56,930	0,805	0,622	264	212,4883637	164,25772	45 2	363,805835	281,22913	12. 1

Ωρα				cosθ		A	G _{BT}		A _c	G _{bt} (clear sky)		T _d
16:2 2	16,3666666 7	16,0453333 3	60,680	0,827	0,580	211	174,5858434	122,40521	36 1	298,699002	209,42314	12. 0
16:3 7	16,6166666 7	16,2953333 3	64,430	0,849	0,538	149	126,4879646	80,217446	25 4	215,623779	136,74652	11. 9
16:5 2	16,8666666 7	16,5453333 3	68,180	0,869	0,498	82	71,27569408	40,822085	13 9	120,820994	69,198413	11. 8
17:0 7	17,1166666 7	16,7953333 3	71,930	0,888	0,460	0	0	0	0	0	0	11. 8
17:2 2	17,3666666 7	17,0453333 3	75,680	0,906	0,425	0	0	0	0	0	0	11. 7
17:3 7	17,6166666 7	17,2953333 3	79,430	0,922	0,396	0	0	0	0	0	0	11. 6
17:5 2	17,8666666 7	17,5453333 3	83,180	0,937	0,374	0	0	0	0	0	0	11. 5
18:0 7	18,1166666 7	17,7953333 3	86,930	0,950	0,360	0	0	0	0	0	0	11. 4
18:2 2	18,3666666 7	18,0453333 3	90,680	0,961	0,357	0	0	0	0	0	0	11. 3
18:3 7	18,6166666 7	18,2953333 3	94,430	0,971	0,364	0	0	0	0	0	0	11. 2
18:5 2	18,8666666 7	18,5453333 3	98,180	0,979	0,381	0	0	0	0	0	0	11. 1
19:0 7	19,1166666 7	18,7953333 3	101,930	0,986	0,406	0	0	0	0	0	0	11. 0
19:2 2	19,3666666 7	19,0453333 3	105,680	0,992	0,437	0	0	0	0	0	0	10. 8
19:3 7	19,6166666 7	19,2953333 3	109,430	0,996	0,473	0	0	0	0	0	0	10. 7
19:5 2	19,8666666 7	19,5453333 3	113,180	0,998	0,512	0	0	0	0	0	0	10. 6
20:0 7	20,1166666 7	19,7953333 3	116,930	1,000	0,553	0	0	0	0	0	0	10. 5
20:2 2	20,3666666 7	20,0453333 3	120,680	1,000	0,595	0	0	0	0	0	0	10. 4

Ωρα				cosθ		A	G _{bt}		Ac	G _{bt} (clear sky)		Td
20:3 7	20,6166666 7	20,2953333 3	124,430	0,999	0,637	0	0	0	0	0	0	10. 3
					kWh/m ² /day	3,83 4	2,461501246	3,2760946	6,4	4,14365075	5,5019482	

9.4 Ανάλυση ευαισθησίας

Πίνακας 9-4: Υπολογισμός τελικών τιμών μεταβλητών περιγραφής της διεργασίας του εξατμιστήρα

Τιμές παραμέτρων σχεδιασμού (5)		$x_3=26\%$, $T_s=120^\circ\text{C}$, $T_1=93^\circ\text{C}$, $T_2=70^\circ\text{C}$, $T_3=45^\circ\text{C}$	
Σταθερές (3)		$L_0=0.06\text{kg/s}$, $x_0=6\%$ (η συγκέντρωση προέκυψε από εργαστηριακές μετρήσεις) $C_p=4\text{kJ/kg K}$ (φυσική ιδιότητα)	
Συγκεντρώσεις στην 1 ^η και 2 ^η βαθμίδα (2)		$x_1=7.86\%$, $x_2=11.91\%$	
Εξίσωση	Μαθηματική σχέση	Υπολογισμοί	Αποτέλεσμα
(9-12)	$L_0 X_0 = L_1 X_1$	$0.06 * 0.06 = L_1 * 0.0786 \rightarrow L_1 = 0.0458 \text{ kg/s}$	$L_1 = 0.0458 \text{ kg/s}$
(9-15)	$L_0 = L_1 + V_1$	$0.06 = 0.0458 + V_1 \rightarrow V_1 = 0.01418 \text{ kg/s}$	$V_1 = 0.01418 \text{ kg/s}$
(9-25)	$Q_{e2} = V_1 \Delta H_{Tw1}$	$Q_{e2} = 0.01418 * 2,273.4 \rightarrow Q_{e2} = 32.25 \text{ kW}$ Σημείωση: για τον υπολογισμό του ΔH_{Tw1} χρησιμοποιήθηκε η εξίσ. (4-4)	$Q_{e2} = 32.25 \text{ kW}$
(9-22)	$Q_{e2} = L_1 C_p (T_2 - T_1) + V_2 \Delta H_{Tw2}$	$32.25 = 0.0458 * 4 * (72.208 - 93.739) + V_2 * 2332.5 \rightarrow V_2 = 0.01560 \text{ kg/s}$ Σημείωση: για τον υπολογισμό των T_1 , T_2 χρησιμοποιήθηκε η εξίσ.(4-5) για τον υπολογισμό της ανύψωσης της θερμοκρασίας βρασμού	$V_2 = 0.01560 \text{ kg/s}$
(9-16)	$L_1 = L_2 + V_2$	$0.0458 = L_2 + 0.01560 \rightarrow L_2 = 0.03022$	$L_2 = 0.03022$
(9-26)	$Q_{e3} = V_2 \Delta H_{Tw2}$	$Q_{e3} = 0.03022 * 2332.5 \rightarrow Q_{e3} = 36.41 \text{ kW}$ Σημείωση: για τον υπολογισμό του ΔH_{Tw2} χρησιμοποιήθηκε η εξίσ. (4-4)	$Q_{e3} = 36.41 \text{ kW}$

(9-23)	$Q_{e_3} = L_2 C_p (T_3 - T_2) + V_3 \Delta H_{Tw_3}$	$36.41 = 0.03022 * 4 * (48.297 - 71.208) + V_3 * 2392.9 \rightarrow V_3 =$ 0.01638 kg/s Σημείωση: για τον υπολογισμό των T_3 χρησιμοποιήθηκε η εξίσ.(4-5) για τον υπολογισμό της ανύψωσης της θερμοκρασίας βρασμού	$V_3 = 0.01638 \text{ kg/s}$
(9-17)	$L_2 = L_3 + V_3$	$0.03022 = L_3 + 0.01638 \rightarrow L_3 = 0.01385 \text{ kg/s}$	$L_3 = 0.01385 \text{ kg/s}$
(9-21)	$Q_{e_1} = L_0 C_p (T_1 - T_0) + V_1 \Delta H_{Tw_1}$	$Q_{e1} = 0.06 * 4 * (93.739 - 76.1) + 0.01418 * 2273.4 \rightarrow Q_{e1} =$ 36.463 kW	$Q_{e1} = 36.463 \text{ kW}$
(9-14)	$L_2 X_2 = L_3 X_3$	$0.03022 * X_2 = 0.01385 * 0.26 \rightarrow X_2 = 11.91\%$ Σημείωση: επίτευξη σύγκλισης	$X_2 = 11.91\%$
(4-13)	$L_1 X_1 = L_2 X_2$	$0.0458 * X_1 = 0.03022 * 0.1191 \rightarrow X_1 = 7.86\%$ Σημείωση: επίτευξη σύγκλισης	$X_1 = 7.86\%$
(4-27)	$Q_{e_1} = A_{e_1} U_{e_1} (T_s - T_1)$	$36.463 = A_{e1} * 0.14993 * (120 - 93.739) \rightarrow A_{e1} = 9.26 \text{ m}^2$ Σημείωση: για τον υπολογισμό του συντελεστή ολικής θερμικής αγωγιμότητας, χρησιμοποιήθηκε η εξίσ. (4-7)	$A_{e1} = 9.26 \text{ m}^2$
(4-28)	$Q_{e_2} = A_{e_2} U_{e_2} (T_{w_1} - T_2)$	$32.25 = A_{e2} * 0.14675 * (93 - 71.208) \rightarrow A_{e2} = 9.88 \text{ m}^2$ Σημείωση: για τον υπολογισμό του συντελεστή ολικής θερμικής αγωγιμότητας, χρησιμοποιήθηκε η εξίσ. (4-7)	$A_{e2} = 9.88 \text{ m}^2$
(9-29)	$Q_{e_3} = A_{e_3} U_{e_3} (T_{w_2} - T_3)$	$36.417 = A_{e3} * 0.1474 * (70 - 48.297) \rightarrow A_{e3} = 11.38 \text{ m}^2$ Σημείωση: για τον υπολογισμό του συντελεστή ολικής θερμικής αγωγιμότητας, χρησιμοποιήθηκε η εξίσ. (4-7)	$A_{e3} = 11.38 \text{ m}^2$

Εναλλάκτης θερμότητας: προθερμαντήρας άλμης			
Εξίσωση	Μαθηματική σχέση	Υπολογισμοί	Αποτέλεσμα
(4-59)	$T_{mix} = \frac{V_1 \cdot T_1 + V_2 \cdot T_2 + V_3 \cdot T_3}{V_1 + V_2 + V_3}$	$T_{mix} = (0.014 \cdot 93 + 0.016 \cdot 70 + 0.016 \cdot 120) / (0.014 + 0.016 + 0.016) \rightarrow T_{mix} = 95^\circ\text{C}$	$T_{mix} = 95^\circ\text{C}$
(4-60)	$m_{mix} = V_1 + V_2 + V_3$	$m_{mix} = 0.014 + 0.016 + 0.016 \rightarrow m_{mix} = 0.046 \text{ kg/s}$	$m_{mix} = 0.046 \text{ kg/s}$
(4-61)	$Q_{ec} = m_{mix} \cdot C_{pw} \cdot (T_{mix} - T_{condex})$	$Q_{ec} = 0.046 \cdot 4.18 \cdot (95 - 25) \rightarrow Q_{ec} = 13.5 \text{ kW}$ Σημείωση: Η θερμοκρασία εξόδου του συμπυκνώματος θεωρήθηκε 25°C	$Q_{ec} = 13.5 \text{ kW}$
(4-62)	$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{mix} - T_{fo}) - (T_{condex} - T_f)}{\ln \frac{T_{mix} - T_{fo}}{T_{condex} - T_f}}$	$\Delta T_{LM} = ((95 - 76.1) - (25 - 20)) / \ln (95 - 76.1) / (25 - 20) \rightarrow \Delta T_{LM} = 10.4^\circ\text{C}$ Σημείωση: η θερμοκρασία εξόδου της άλμης από τον προθερμαντήρα (T_{fo}) θεωρήθηκε 76.1°C, ενώ η θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_f) 20°C.	$\Delta T_{LM} = 10.4^\circ\text{C}$

Πίνακας 9-5: Υπολογισμός τελικών τιμών μεταβλητών περιγραφής της διεργασίας του κρυσταλλωτήρα

Τιμές παραμέτρων σχεδιασμού		$\tau=1.4h$	
Σταθερές (13)		$\rho_c=2170\text{kg/m}^3$, $f_v=0.5$, $kn=1017$, $X_m=0.23 \text{ kg/kg}$, $no=2.3 \cdot 10^{12}$, $P_{cr}=1\text{atm}$ $(T_{cr}=100^\circ\text{C})$, $\Delta C=0.004$, $kG=0.0000246$, $R_c=1$, $V_{fr}=1$, $N=140\text{s}^{-1}$, $\Delta H_c=97\text{kJ/kg}$ (αποτέλεσμα εργαστηριακών μετρήσεων) $C_p=4\text{kJ/kg K}$ (φυσική ιδιότητα)	
Εξίσωση	Μαθηματική σχέση	Υπολογισμοί	Αποτέλεσμα
(4-6)	$\rho_1 = 248,64X_3^2 + 700,29X_3 + 1000,1$	$P_1 = 248.64 * 0.26^2 + 700.29 * 0.26 + 1000.1 \rightarrow \rho_1 = 1,199\text{kg/m}^3$	$\rho_1 = 1,199\text{kg/m}^3$
(4-30)	$W = L_3(1 - X_3)$	$W = 0.014 * (1 - 0.26) \rightarrow W = 0.010 \text{ kg/s}$	$W = 0.010 \text{ kg/s}$
(4-31)	$C_{eq} = 2,0 \times 10^{-6} T_{cr}^2 + 1,0 \times 10^{-5} T_{cr} + 0,2627$	$C_{eq} = 2.0 * 10^{-6} * 100^2 + 1.0 * 10^{-5} * 100 + 0.2627 \rightarrow C_{eq} = 0.2837 \text{ kg/kg}$	$C_{eq} = 0.2837 \text{ kg/kg}$
(4-4)	$\Delta H_{c1} = 2491.5 - 2.048 \cdot T_{cr} - 0.0032 \cdot T_{cr}^2$	$\Delta H_{c1} = 2491.5 - 2.0488 * 100 - 0.0032 * 100^2 \rightarrow \Delta H_{c1} = 2254.7 \text{ kJ/kg}$	$\Delta H_{c1} = 2254.7 \text{ kJ/kg}$
(4-32)	$X_{cr} = C_{eq} - \Delta C$	$X_{cr} = 0.284 - 0.004 \rightarrow X_{cr} = 0.280 \text{ kg/kg}$	$X_{cr} = 0.280 \text{ kg/kg}$
(4-33)	$X_{cr}' = \frac{X_{cr}}{1 - X_{cr}}$	$X_{cr}' = 0.280 / (1 - 0.280) \rightarrow X_{cr}' = 0.388 \text{ kg/kg}$	$X_{cr}' = 0.388 \text{ kg/kg}$
(4-34)	$G = k_G \Delta C$	$G = 2.46 * 10^{-5} * 0.004 \rightarrow G = 9.84 * 10^{-8} \text{ m/s}$	$G = 9.84 * 10^{-8} \text{ m/s}$
(4-35)	$Q_{Fc} = \frac{L_3}{\rho}$	$Q_{Fc} = 0.014 / 1199 \rightarrow Q_{Fc} = 1.15 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{Fc} = 1.15 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

(4-36)	$X_{crf}' = \frac{C_{eq}}{1 - C_{eq}}$	$X_{crf}' = 0.284 / (1 - 0.284) \rightarrow X_{crf}' = 0.396 \text{ kg/kg}$	$X_{crf}' = 0.396 \text{ kg/kg}$
(4-37)	$Y = L_3 \cdot X_3$	$Y = 0.014 * 0.26 \rightarrow Y = 0.004 \text{ kg/s}$	$Y = 0.004 \text{ kg/s}$
(4-38)	$V_{scr} = L_3(1 - X_3)V_{fr} - YX_M$	$V_{scr} = 0.014 * (1 - 0.26) * 1.0 - 0.004 * 0.23 \rightarrow V_{scr} = 0.0094 \text{ kg/s}$	$V_{scr} = 0.0094 \text{ kg/s}$
(4-39)	$\tau = \frac{V_{cr}}{Q_{Fc}}$	$V_{cr} = 5.2 * 10^3 \text{ s} * 1.15 * 10^{-5} \rightarrow V_{cr} = 0.06 \text{ m}^3$	$V_{cr} = 0.06 \text{ m}^3$
(4-40)	$M_T = 6\rho_c f_v n^o (G\tau)^4$	$M_T = 6 * 2170 * 0.52 * 2.3 * 10^{-12} * (9.84 * 10^{-8} * 5.2 * 10^3)^4 \rightarrow M_T = 1064 \text{ kg/m}^3$	$M_T = 1,064 \text{ kg/m}^3$
(4-41)	$B^o = k_n N^2 G^2 M_T$	$B_o = 1.0 * 10^{17} * 140^2 * (9.84 * 10^{-8})^2 * 1064 \rightarrow B_o = 2.0 * 10^{10}$ Note: The crystal nucleation kinetic constant was considered to be $1.0 * 10^{17}$	$B_o = 2.0 * 10^{10}$
(4-42)	$L_d = 3G\tau$	$L_d = 3 * 9.84 * 10^{-8} * 5.2 * 10^3 \rightarrow L_d = 1.5 * 10^{-3} \text{ m}$	$L_d = 1.5 * 10^{-3} \text{ m}$
(4-43)	$L_m = 4G\tau$	$L_m = 4 * 9.84 * 10^{-8} * 5.2 * 10^3 \rightarrow L_m = 2.0 * 10^{-3} \text{ m}$	$L_m = 2.0 * 10^{-3} \text{ m}$
(4-6)	$\rho_2 = 248,64X_{crf}'^2 + 700,29X_{crf}' + 1000,1$	$\rho_2 = 248.64 * 0.396^2 + 700.29 * 0.396 + 1000.1 \rightarrow \rho_2 = 1,316.5 \text{ kg/m}^3$	$\rho_2 = 1,316.5 \text{ kg/m}^3$
(4-4)	$\Delta H_m = 2491.5 - 2.048 \cdot T - 0.0032 \cdot T^2$	$\Delta H_m = 2491.5 - 2.0488 * 100 - 0.0032 * 100^2 \rightarrow \Delta H_m = 2254.7 \text{ kJ/kg}$	$\Delta H_m = 2254.7 \text{ kJ/kg}$
(4-44)	$Q_c = L_3 C_p (T_{cr} - T_3) + V_{scr} \Delta H_{so} - Y \Delta H_c$	$Q_c = 0.014 * 4.0 * (100 - 45) + 0.0094 * 2254.7 - 0.004 * 97 \rightarrow Q_c = 23.9 \text{ kW}$	$Q_c = 23.9 \text{ kW}$
(4-45)	$m_{scr} = \frac{Q_c - V_{cocr}(\Delta H_s - C_{ps}(T_{cocr} - T_s))}{\Delta H_s}$	$m_{scr} = (23.9 - 0.009 * (2199.7 - 1.88 * (121.7 - 120))) / 2199.7 \rightarrow m_{scr} = 0.001 \text{ kg/s}$	$m_{scr} = 0.001 \text{ kg/s}$

Πίνακας 9-6: Υπολογισμός τελικών τιμών μεταβλητών περιγραφής της διεργασίας του ξηραντήρα

Τιμές μεταβλητών σχεδιασμού		$T_a=58^{\circ}\text{C}$, $u=5\text{m/s}$	
Σταθερές (12)		$k_0=0.039$, $a=0.1466$, $b=-0.47$, $c=0.74$ (αποτελέσματα εργαστηριακών μετρήσεων) $RH^{23}=25\%$ (relative humidity), $\Delta Y=0.004$ kg/kg, $T_{ex}^{DHE}=30^{\circ}\text{C}$, $h_{layer}=0.01\text{m}$ (ύψος στρώματος άλατος), $A_{tr}=0.1\text{m}^2$ (επιφάνεια δίσκου), $X=0.01$ kg/kg, $C_{pa}=1$ kJ/kg $^{\circ}\text{C}$, $U_D=0.1\text{kW/m}^2\text{C}$	
Εξίσωση	Μαθηματική σχέση	Υπολογισμοί	Αποτέλεσμα
(4-46)	$k = k_0 T_a^a (RH\%)^b u_a^c$	$k=0.039 * 58^{0.1466} * 25^{-0.47} * 5^{0.74} \rightarrow k=0.0513$	$k=0.0513$
(4-47)	$t = -\frac{1}{k} \ln \frac{X}{X_M}$	$t = -1/0.0513 * \ln (0.01/0.23) \rightarrow t = 61.12\text{min} \rightarrow t = 1.02\text{h}$	$t = 1.02\text{h}$
(4-4)	$\Delta H_m = 2491.5 - 2.048 \cdot T - 0.0032 \cdot T^2$	$\Delta H_m = 2491.5 - 2.0488 * 58 - 0.0032 * 58^2 \rightarrow \Delta H_m = 2362$ kJ/kg	$\Delta H_m = 2362$ kJ/kg
(4-48)	$W = Y(X_M - X)$	$W = 0.004 * (0.23 - 0.01) \rightarrow W = 0.00079$	$W = 0.00079$

²³ RH: It is noted that in Deliverable 2.2 the relative humidity has been wrongly spelled as “d: height of magma”

(4-49)	$F_a = \frac{W}{\Delta Y}$	$F_a = 0.0008 / 0.004 \rightarrow F_a = 0.198$	$F_a = 0.198$
(4-64)	$Q_d = F_a C_{pa} (T_a - T_f)$	$Q_d = 0.198 * 1 * (58-20) \rightarrow Q_d = 7.524 \text{ kW}$	$Q_d = 7.524 \text{ kW}$
(4-65)	$m_s^{DHE} = V_{scr}$	$m_s^{DHE} = 0.0094 \text{ kg/s}$	$m_s^{DHE} = 0.0094 \text{ kg/s}$
(4-66)	$Q_{scr} = m_s^{DHE} \cdot C_{pw} \cdot (T_s - T_{ex}^{DHE})$	$Q_{scr} = 0.0094 * 4.18 * (120- 30) \rightarrow Q_{scr} = 3.54 \text{ kW}$	$Q_{scr} = 3.54 \text{ kW}$
(4-67)	$Q_{steam} = Q_d - Q_{scr}$	$Q_{steam}=7.524-3.54 \rightarrow Q_{steam}= 3.98 \text{ kW}$	$Q_{steam}= 3.98 \text{ kW}$
(4-68)	$Q_{steam} = m_s^{DHE'} \cdot (\Delta H_s + c_{ps} \cdot (T_s - T_{ex}^{DHE}))$	$m_s^{DHE'} = 3.98 / (2199.7 + 1.88 * (1201-30)) \rightarrow m_s^{DHE'} = 0.0017 \text{ kg/s}$	$m_s^{DHE'} = 0.0017 \text{ kg/s}$
(4-69)	$\Delta T_{LM}^{DHE} = \frac{(T_s - T_a) - (T_{dhe} - T_o)}{\ln \frac{T_s - T_a}{T_{ex}^{DHE} - T_o}}$	$\Delta T_{LM}^{DHE} = ((120-58) - (30-20)) / \ln(((120-58) / (30-20)) \rightarrow \Delta T_{LM}^{DHE} = 28.5^\circ\text{C}$	$\Delta T_{LM}^{DHE} = 28.5^\circ\text{C}$
(3-76)	$Q_d = U_D A_{DHE} \Delta T_{LM}^{DHE}$	$A_{DHE}=7.524/(0.1*28.5) \rightarrow A_{DHE}=2.64 \text{ m}^2$ Note: The value of U_d was considered $0.1 \text{ kW/m}^2\text{C}$	$A_{DHE}=2.64 \text{ m}^2$

(3-47)	$Q_s = \frac{Y t_{op} 3600}{\rho_{cr}}$	$Q_s = 0.004 * 9 * 3600 / 2170 \rightarrow Q_s = 0.054 \text{ m}^3/\text{d}$ Note: For the crystal yield (Y) and the solid crystal density (ρ_{cr}) see calculations for crystallizer (eq. 3-34) and ‘constant values cell’, respectively.	$Q_s = 0.054 \text{ m}^3/\text{d}$
(3-48)	$A_D = \frac{Q_s}{h_{layer}} \frac{t}{t_{op}}$	$A_D = 0.054 * 1.02 / (0.01 * 9) \rightarrow A_D = 0.61 \text{ m}^2$	$A_D = 0.61 \text{ m}^2$
(3-49)	$N_{tr} = \frac{A_D}{A_{tr}}$	$N_{tr} = 0.61 / 0.1 \rightarrow N_{tr} = 6.1$	$N_{tr} = 6.1$

9.5 Λίστα με τους κατασκευαστές

Πίνακας 9-7: Λίστα προμηθευτών/κατασκευαστών

A/A	Εταιρεία	Ονοματεπώνυμο	Διεύθυνση	Website	Τηλέφωνο	Διεύθυνση e-mail	Σημειώσεις
Εξατμιστήρας, Κρυσταλλωτήρας, Ξηραντήρας							
1.	SUK	Aggelakopoulos	14 Iasonos, Palaio Faliro, Athens, Greece, 17564	http://suk.gr	+30 210 971 9104	info@suk.gr	Crystallizer
2.	Alfa Laval	Asteris Georgios	20 th km, Lavrio Av., Karella, Koropi, Athens, Greece, 19400	http://local.alfalaval.com/el-gr	+30 210 668 3572	hellas@alfalaval.com	Evaporator
3.	Envitec	Dimopoulos Konstantinos	12 – 14 Agiou Ioannou Str., Halandri – Athens, Greece, 15233	http://www.envitec.gr	+30 210 685 5793	kostas.dimopoulos@gmail.com	Evaporator
4.	Chemitec	Lioumis Christos	23, Spyrou Vrettou str., Acharnes, Greece, 136 71 GR	http://www.chemitec.gr/	+30 210 244 7590	cl-chemtec@tee.gr	Dryer
5.	Maltezos	Maltezos	66 Dragatsaniou Str, Pireaus, Greece, 185 45	http://www.pmaltezos.gr	+30 210 461 2551	-	Evaporator

A/A	Εταιρεία	Ονοματεπώνυμο	Διεύθυνση	Website	Τηλέφωνο	Διεύθυνση e-mail	Σημειώσεις
6.	Hellasenergy	Mprouzianis Konstantinos	10, Saint George Sq., Kipseli, Athens, Greece, 112 57	http://www.hellasenergy.gr	+30 210 822 2519	kostas@hellasenergy.gr	Evaporator, crystallizer, dryer
7.	Shielco	Nakos Konstantinos	32A, 28 October Str., Pefki, Athens, Greece, 151 21	http://en.shielco.com	+30 210 802 6515	shielco@otenet.gr	Evaporator, crystallizer
8.	Thermossol Steamboilers SA	Xenogiannis Dimitrios	368A, Tatoiou Str., Acharnes, Greece, 136.71	http://www.thermossol.gr	+30 210 620 0630	thermossol@yahoo.gr	Evaporator, crystallizer
9.	Liakos	Tsiaras Christos	10, Dervenakion Str, Piraeus, Greece, 185 45	liakosrepairs.eu	+30 210 463 0126	liakos@otenet.gr	Evaporator, crystallizer
10.	Veoliawater	Sales Manager	Kings Place, 5th Floor, 90 York Way, N1 9AG, London	http://www.veoliawater.com/	+33 1 49 24 49 24	-	Evaporator, crystallizer
11.	MageWater	Seltman Torsten	8, Rudolf-Diesel Str., Odelzhausen, Ger many, 85235	http://www.mage- watermanagement.com/	+49 813493 59987	seltmann@mage- watermanagement.com	Evaporator

A/A	Εταιρεία	Ονοματεπώνυμο	Διεύθυνση	Website	Τηλέφωνο	Διεύθυνση e-mail	Σημειώσεις
12.	Future Technology Systems (FTS) SA	Sittas Themis	1st Industrial Zone, Volos, Greece, 38 500	http://www.engineering.fts.gr/index.php	+30 24210 96 700	themis.sittas@gmail.com	Evaporator, crystallizer, dryer
13.	Entropie SAS	Sandrine Bourdin	20-22 rue de Clichy, Paris, France, 75009	www.entropie.com	+33 1 56 35 3529	s.bourdin@entropie.com	Evaporator
14.	Mage Water Management GMBH	Torsten Seltmann	8 Rudolf-Diesel-Strasse, Odelzhausen, Germany, 85235	www.mage-watermanagement.com	+49 8134 935 9987	Seltmann@mage-watermanagement.com	Evaporator
15.	Wenzhou Taikang Evaporator Co., Ltd.	Allen Wang	No.700, the 7th Road, Binhai Industrial Zone, Wenzhou, China	http://www.wztaikang.com/en/	+86 577 86801989	allen.wang@wztaikang.com	Evaporator, crystallizer, dryer

A/A	Εταιρεία	Ονοματεπώνυμο	Διεύθυνση	Website	Τηλέφωνο	Διεύθυνση e-mail	Σημειώσεις
16.	Suzhou Fenggang Titanium Products And Equipment Manufacturing Co., Ltd.	Robby Yuan	368, Qianqiao Road, Fengqiao Town, New District, Suzhou, Jiangsu Province, China, 215129	www.szti.com	+86 512 6653416	robby@szti.com	Evaporator, crystallizer, dryer
17.	Michos SA	Floros Nikos	1, Chrisostomou Smirnis, Neo Psychiko, Athens, Greece, GR-15451	http://www.michos.gr/	+30 210 677 4280	sales2@michos.gr	Compressor
18.	Speck Hellas SA	Hatzigeorgopoulos Grigoris	54, Salaminos Str., Kallithea, Athens, Greece, GR-17676	http://www.chatzigeorgopoulos.com	+30 210 958 8314	speck.chatzigeorgopoulos@on.gr	Compressor
19.	Fulton Systems Inc.	Jeff Smith	5875 Peachtree Industrial Suite 330, Norcross, GA 30092	http://www.fultonsystems.com	+1 770 447 1400	info@fultonsystems.com	Compressor

A/A	Εταιρεία	Ονοματεπώνυμο	Διεύθυνση	Website	Τηλέφωνο	Διεύθυνση e-mail	Σημειώσεις
20.	Spraying Systems Hellas S.A.	Nicholas P. Pantazis	4, Tziraion str., Athens, Greece, 11742	www.spray.com	+30 210 923 5051	spray-gr@otenet.gr	Evaporator
21.	Thermoplasic Construction	Spanidis Athanasios	Boudoutsi 20 Str., Athens, Greece, 18538	-	+30 210 463 4181	thercongr@gmail.com	
Υλικά κατασκευής							
22.	Argyrakis	Argyrakis	-	-	+30 210 342 1202	-	Copper, Aluminium
23.	Emporohalko	Vergopoulou	74, Irakleidon Str., Athens, Greece, 11854	http://www.emporohalco.gr/	+30 210 321 6250	info@emporohalco.gr	Copper, Aluminium
25.	Metalchrom	Kalavritinos Nikolaos	32, Sostratou Str., Neos Kosmos, Athens, Greece, 11854	http://www.metalchrom.gr/	+30 210 901 7584	csigalas@metalchrom.gr	Metal plating
26.	HALCOR METAL WORKS S.A.	Karakousi Katerina	Athens Tower - 2nd Building, 2-4 Mesogeion Ave., Athens, Greece, GR 115 27,	http://www.halcor.gr/	+30 210 686 1111	info@halcor.vionet.gr	Copper

A/A	Εταιρεία	Ονοματεπώνυμο	Διεύθυνση	Website	Τηλέφωνο	Διεύθυνση e-mail	Σημειώσεις
27.	Sandvik	Leivadaros Antonis	Kungsbron 1 (section G, floor 6) Str., Stockholm, Sweeden	http://www.sandvik.com/	+30 210 682 3604	antonios.livadaros@sandvik.com	Stainless Steel
28.	Bobou	Bobou Dimitra	12, Mavromihali Kiriakou Str., Piraeus, Greece, 18545	-	+30 210 411 4935	-	Copper, Alumium Brass
29.	Rentas Ioannis SA	Renta Tatiana	9, Mavromihali Kiriakou Str., Piraeus, Greece, 18545	http://www.rentas.gr/	+30 210 417 6682	-	Copper, Alumium Brass
30.	Spanidis	Spanidis Athanasios	-	-	+30 210 463 4181	-	Plastic
31.	Tarinas Eustratios	Tarinas Stratis	40, Retsina Str., Piraeus, Greece, 18545	-	+30 210 412 3511	stratistar@yahoo.gr	Copper, Alumium Brass
32.	Texnisis	Tsaousis Nikolaos	28, Agion Asomaton Str., Athens, Greece, 105 53	-	+30 210 321 4531	texnisis@ath.forthnet.gr	Metals

A/A	Εταιρεία	Ονοματεπώνυμο	Διεύθυνση	Website	Τηλέφωνο	Διεύθυνση e-mail	Σημειώσεις
33.	Technometal SA	Oikonomou	20, Dragatsaniou Str., Peiraeus, Greece, 18545	http://www.txmetal.gr	+30 210 422 6251	txmetal@hol.gr	Stainless Steel
34.	National Metal Distributors	Kathy Jameson	12323 NE 99th Street, Vancouver, United States of America, WA 98682	http://www.nationalmetaldistributors.com/	+1 800 878 3675	kathy@nmdmetals.com	Stainless Steel
35.	Pyrogenesis SA	Vardavoulis Mihalis	Technical Park of Lavrio, Lavrio, Greece, 19500	http://www.pyrogenesis-sa.gr/Template%202/nanospray_Gr.html	+30 22920 23477	mvardavoulis@pyrogenesis-sa.gr	Metal Plating
36.	Chryssafidis	Antonis Kovas	3, Agriniou Str. Tavros, Athens, Greece 177 78	http://www.chryssafidis.gr	+30 210 483 6315	akovas@chryssafidis.gr	Stainless Steel (Sole agent of Spirax Sarco in Greece)
Έλεγχος							
37.	Energineering	Vasilopoulos Anastasios	-	-	+30 211 790 0051	tasiosvas@energineering.gr	Control for solar thermal system – Design of PCM storage system
38.	Automation Technique SA	Ovvadias Dimitris	46 Chiou Str, Athens, Greece, 104 39	http://www.automationtechnique.gr/en/	+30 210 882 3464	ovvadias@automationtechnique.gr	Industrial Automation Systems

A/A	Εταιρεία	Ονοματεπώνυμο	Διεύθυνση	Website	Τηλέφωνο	Διεύθυνση e-mail	Σημειώσεις
Ηλιακό Σύστημα							
39.	Calpak SA	Kourmpoglou Miltos	9, Sygrou Av., Athens, Greece, 11743	http://www.calpak.gr/	+30 210 963 8840	miltos@omniref.gr	Evacuated Tube Collectors
40.	Antares	Konstas Kostas	235, Marathonos Av., Pikermi, Athens, Greece	http://www.antares.com.gr/	+30 210 604 3507	antareskonkon@gmail.com	Evacuated Tube Collectors
41.	Sanet	Maglaras Dimos	209 Tatoiou Av., Ind. Park Metamorphosis, Athens, Greece, 14452	http://www.sanet.gr/mag.php	+30 210 572 6605	info@sanet.gr	Concentrated, Evacuated Tube Collectors
42.							
43.	Spirax Sarco	Keith Woolnough	1150 Northpoint Blvd., Blythewood, SC USA, 29016	http://www.spiraxsarco.com/	+1 (800) 575-0394	Keith.Woolnough@uk.spiraxsarco.com	Steam Accumulator for PTC system
44.	Silcio Solar Technologies	Drakopoulos	38-40 Kapodistriou Av, Maroussi Athens, Greece, GR-15123	http://www.silcio.gr/	+30 210 684 8506	info@silcio.gr	Photovoltaic generator

A/A	Εταιρεία	Ονοματεπώνυμο	Διεύθυνση	Website	Τηλέφωνο	Διεύθυνση e-mail	Σημειώσεις
45.	Heliosphera SA	Sergiannidis	37A Kifissias Av., GOLDEN HALL, Building A, 2nd Floor, Maroussi, Athens, Greece, 15123,	http://www.heliosphera.com/	+30 210 641 2009	info@heliosphera.com	Photovoltaic generator (thin film)
46.	Cocoon Solar Energy	Mihalis Koutsouris	8, Miaouli Str., Athens, Greece, 10554	www.cocoon.gr	+30 210 325 0458	mkoutsouris@cocoon.gr	Photovoltaic generator
47.	Solar Cells Hellas	Sehremeli Giota	64, Kifissias Av. & Premetis, Athens, Greece, 15125	http://www.schellas.gr/en	+30 210 959 5159	-	Photovoltaic generator
48.	Acciona	(Website Contact Form)	(Website Contact Form)	http://www.acciona- energia.com/activity_areas/csp.aspx	(Website Contact Form)	(Website Contact Form)	Parabolic Trough Collectors (PTC)
49.	Abengoa	Cen May	1909 K Str., NW, Suite 840, Washington, DC 20006	http://www.abengoasolar.com/	+1 (303) 323 9505	cen.may@solar.abengoa.com	Parabolic Trough Collectors (PTC)

A/A	Εταιρεία	Ονοματεπώνυμο	Διεύθυνση	Website	Τηλέφωνο	Διεύθυνση e-mail	Σημειώσεις
50.	NEP SOLAR AG	Florian Pithan	Technoparkstrasse 1, Zürich, Switzerland, 8005	http://www.nep-solar.com/	+41 44 445 1695	florian.pithan@nep-solar.com	Parabolic Trough Collectors (PTC)
51.	ACS-Cobra	-	10, Cardenal Marcelo Spinola, Madrid, Spain, 28016	http://www.grupocobra.com	+34 914569500	central@grupocobra.com	Parabolic Trough Collectors (PTC)
52.	Flabeg Holding GmbH	-	13, Waldaustraße Str., Nürnberg, Germany, 90441	http://www.flabeg.com	+49 911 964560	info@flabeg.com	Parabolic Trough Collectors (PTC)
53.	Flagsol GmbH	-	30 Agrippinawerft Str., Köln (Cologne) Germany, 50678	http://www.flagsol-gmbh.com/flagsol/cms/	+49 221 925 970 - 0	info@flagsol.com	Parabolic Trough Collectors (PTC)
54.	Fichtner Solar GmbH	-	3, Sarweystraße, Stuttgart, Germany, 70191	http://www.fichtnersolar.com/	+49 711 899 51870	lp@fichtner.de	Parabolic Trough Collectors (PTC)

A/A	Εταιρεία	Ονοματεπώνυμο	Διεύθυνση	Website	Τηλέφωνο	Διεύθυνση e-mail	Σημειώσεις
55.	Kingspan Environmental Ltd.	Katherine Raghfar	180 Gilford Road Portadown, Co. Armagh United Kingdom, BT63 5LF	www.kingspan-renewables.com	+44 (0)787901 2504	catherine.raghfar@kingspan.com	Thermal Solar Collectors
56.	Schott AG	-	10, Hattenbergstrasse Str., Mainz Germany, 55122	http://www.schottsolar.com/us/home/	+49 (0)6131/66-0	-	Glass for PTC
57.	Solitem GmbH	-	24, Uersfeld, Aachen, Germany, 52072	http://www.solitem.com.tr	+49 (0)241980 9060	info@solitem.de	Parabolic Trough Collectors (PTC)

Πίνακας 9-8: Ιδιότητες διαλύματος χλωριούχου νατρίου για διάφορες συγκεντρώσεις διαλυμένης ουσίας

Chart Title

NaCl (% wt)	s.g. (kg/l)	Density (lb/gal)	Cl ⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/l)	NaCl (lb/bbl)	Water (bbl)	Cryst. Pt. (°F)	Water Activity
1	1.005	8.38	6,127	3,973	3.5	0.995	30.9	0.994
2	1.013	8.44	12,254	7,946	7.1	0.992	29.9	0.989
3	1.020	8.50	18,563	12,037	10.7	0.989	28.8	0.983
4	1.027	8.56	24,932	16,168	14.4	0.986	27.7	0.977
5	1.034	8.62	31,363	20,337	18.1	0.982	26.5	0.970
6	1.041	8.68	37,914	24,586	21.9	0.979	25.3	0.964
8	1.056	8.81	51,260	33,240	29.6	0.971	22.9	0.950
10	1.071	8.93	64,970	42,130	37.5	0.964	20.2	0.935
12	1.086	9.05	79,044	51,256	45.6	0.955	17.3	0.919
14	1.101	9.18	93,481	60,619	53.9	0.947	14.1	0.902
16	1.116	9.31	108,344	70,256	62.5	0.938	10.6	0.883
18	1.132	9.44	123,570	80,130	71.3	0.928	6.7	0.862
20	1.148	9.57	139,282	90,318	80.4	0.918	2.4	0.839
22	1.164	9.71	155,357	100,743	89.6	0.908	-2.5	0.815
24	1.180	9.84	171,858	111,442	99.2	0.897	1.4	0.788
26	1.197	9.98	188,843	122,457	109.0	0.886	27.9	0.759

Properties based on 100% purity NaCl and 68°F (20°C).

% Volume salt = 100 x (1.0 – bbl water).

Πηγή:

[430]

9.6 Βιογραφικό σημείωμα του ερευνητή

CURRICULUM VITAE
DIMITRIS XEVGENOS

1. PERSONAL INFORMATION	
Address:	Rietveld 212 St., 2611 LR, Delft, the Netherlands
Contact Details:	Mobile: +30 693 907 4359/ +310638451579, Phone: +30 210 231 8149, email: d.xevgenos@gmail.com
Date of Birth:	26 April 1985
Place of Birth:	Athens, Greece
Marital Status:	Married
Nationality	Greek
Military obligations:	Not fulfilled
2. EDUCATION	
05/2012 – Today	Doctorate, School of Chemical Engineering , National Technical University of Athens, Title of Doctoral Dissertation: "Making value out of the desalination wastewater effluent (brine) Demonstration of a renewable powered treatment system for water and salt recovery"
10/2008-06/2010	National Technical University of Athens MSc « Energy Production and Management » School of Electrical Engineering , Specialization: Energy Efficiency, Simulation of solar cooling with the use of the software package TRNSYS (Diploma Thesis) Grade: 9.08/10.00 (Excellent)
09/2003-09/2008	National Technical University of Athens School of Mechanical Engineering Specialization: Energy

	Solar Cooling (Diploma Thesis) Grade: 8.27/10.00 (Very Good)
09/2000-06/2003	3 rd High School of Acharnon Grade: 19/20 (Excellent)
3. PARTICIPATION IN/COORDINATION OF RESEARCH PROJECTS	
05/2015-10/2015	Green Desalination: "A closed-loop technology for full recovery of water and raw materials from the wastewater effluent" Project supported by: European Commission (HORIZON 2020 – SME Phase I Project No. 674455) Duration: 6 months (Start Date: 01/05/2015) Role of Researcher: Project Scientific Coordinator
12/2012-Today (22 months)	Recycling at Home : Development and demonstration of an ecological, innovative system for in house waste recycling” Project supported by: European Commission (LIFE11 ENV/GR/000950) Duration: 39 months (Start Date: 01/09/2012)
02/2014-09/2014 (2 months)	ISWM-TINOS : "Development and implementation of a demonstration system of integrated solid waste management for Tinos in line with the Waste Framework Directive" Project funded by: European Commission (LIFE10 ENV/GR/000610) Duration: 46 months (Start Date: 01/10/2011)
06/2014 (1 month)	e-SYMBIOSIS : "Development of knowledge-based web services to promote and advance industrial symbiosis in Europe" Project funded by: European Commission (LIFE09 ENV/GR/000300) Duration: 45 months (Start Date: 01/10/2010)
12/2011-03/2014 (8 months)	CYPADAPT : "Development of a national strategy for adaptation to climate change adverse impacts in Cyprus" Project supported by: European Commission (LIFE10 ENV/CY/000723) Duration: 31 months (Start Date: 01/09/2011)
10/2010-12/2013 (39 months)	SOL-BRINE : "Development of an advanced, innovative, energy autonomous system for the treatment of brine from seawater

	desalination plants" Project supported by: European Commission (LIFE09 ENV/GR/000299) Duration: 39 months (Start Date: 01/10/2010)
09/2010-06/2011	«Qualitative characteristics and monitoring of the wastewater effluent produced by the Hellenic Aerospace Industry (HAICORP) facilities - Suggestions for the optimization of the existing treatment facilities» Project funded by: Hellenic Aerospace Industry (undisclosed information) Duration: 10 months
	«Minimization of the pollutant load produced by the production line of the metal finishing industry Hellenic Aerospace Industry facilities » Project funded by: Hellenic Aerospace Industry (undisclosed information) Duration: 10 months
	«Application of the Best Available Techniques (BAT) in the production process of Hellenic Aerospace Industry facilities» Project funded by: Hellenic Aerospace Industry (undisclosed information) Duration: 10 months
05/2010-06/2010 (2 months)	Interwaste: "Demonstration of an integrated waste-to-energy generation from biodegradable organic waste and wastewater" Project supported by: European Commission (LIFE08 ENV/CY/000457) Duration: 42 months (Start Date: 01/01/2010)
09/2008-10/2008 (2 months)	MESSIB: "The Integrated safe & smart built concept" Project supported by: European Commission (FP7 Contract No. 211624) Duration: 4 years (Start date: 01/03/2009)
4. EMPLOYMENT – WORK EXPERIENCE	
01/2016 – Today	Chief Executive Officer, SEALEAU B.V.
05/2015-12/2015	Employer: Aephoria Network P.C. (Private Company) 6-month contract: Scientific Coordinator of GReen Desalination project (HORIZON 2020 Project, Contract no. 674455)

06/2010-Today	Employer: Unit of Environmental Science and Technology, School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens Collaboration in 11 European projects and 1 privately funded project. The Researcher has coordinated 2 out of the 11 European projects and has provided engineering consulting services for the other projects. He was Action Leader for the design, operation and optimization of two pilot systems in the framework of SOL-BRINE and Recycling@Home projects (see also above). Also, he prepared 3 successful proposals: GReen Desalination (Project No. 674455), PAVetheWAYSTE (LIFE14 ENV/GR/000722) and Recycling@Home (LIFE11 ENV/GR/000950)
09/2008-10/2008	Employer: Laboratory of Heterogeneous Mixtures and Combustion Systems, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens Collaboration in the framework of MESSIB project.
5. HONOURS AND AWARDS	
2015:	STARTUPBOOTCAMP Competition The Researcher has established a startup company (GReen Desalination B.V.) which was distinguished among 15,000 companies and will be accelerated in the STARTUPBOOTCAMP incubator at the HIGH TECH XL Campus, in Eindhoven, the Netherlands.
2014:	1st Prize in the Blue Growth Piraeus Contest Blue Growth Piraeus comprises the first Innovation and Entrepreneurship Contest for Maritime Economy. It is currently assisting me to turn the research performed in my PhD into a start-up business.
2013-2015:	State Scholarship Foundation Award Scholarship for the completion of the PhD entitled « Valorization of the wastewater effluent (brine) from desalination plants with the use of renewable energy sources, for water and raw material recovery» (Duration: 3 years)
2012:	"Stamatis Restis" Award «Our energetical choices and their consequences" study awarded in the context of Stamatis Restis Competition for Environmental Education. The Competition was launched by the Music Friend"

	jointly with Victoras Restis Group.
2011:	"Thomaidi Award" Academic Scholarship Award for best academic performance in the 9 th - 10 th semesters (Mechanical Engineering Studies)
2010:	«Idryma Tiftixsi» Award Academic Scholarship Award for best academic performance in the 9 th semester (Mechanical Engineering Studies)
	«Idryma Gazi-Triantafyllopoulou» Scholarship Scholarship for the completion of the MsC «Energy Production and Management»
2009:	State Scholarship Foundation Award Academic Scholarship Award for best academic performance in the 9 th - 10 th semesters (Mechanical Engineering Studies)
	«Idryma Eygenidou» Scholarship Scholarship for the completion of the MsC «Energy Production and Management»
2008:	«Grigoris Farakos» Award Academic Scholarship Award for best academic performance in the 7 th - 8 th semesters (Mechanical Engineering Studies)
	State Scholarship Foundation Award Academic Scholarship Award for best academic performance in the 7 th - 8 th semesters (Mechanical Engineering Studies)
6. PUBLICATIONS IN PEER-REVIEWED JOURNALS	
[1]	<u>D. Xevgenos</u> , A. Vidalis, K. Moustakas, D. Malamis & M. Loizidou (2015): Sustainable management of brine effluent from desalination plants: the SOL-BRINE system, Desalin. Water Treat., 53(12), 3151-3160.
[2]	<u>D. Xevgenos</u> , P. Michailidis, K. Dimopoulos, M. Krokida & M. Loizidou (2015): Design of an innovative vacuum evaporator system for brine concentration assisted by software tool simulation, Desalin. Water Treat., 53(12), 3407-3417.
[3]	<u>D. Xevgenos</u> , N Athanasopoulos, PK Kostazos, DE Manolakos, K Moustakas, D Malamis and M Loizidou (2015): Design of an innovative, ecological, portable waste compressor for in-house recycling of paper, plastic and metal packaging waste, Waste Management & Research, 33(5), 439-452
[4]	<u>D. Xevgenos</u> , C. Papadaskalopoulou, V. Panaretou, K. Moustakas, D. Malamis (2015): Success Stories for Recycling of MSW at Municipal Level: A Review. Waste & Biomass Valorization, DOI: 10.1007/s12649-015-9389-9
[5]	<u>D. Xevgenos</u> , K. Moustakas, D. Malamis, M. Loizidou (2014): An overview on desalination & sustainability: renewable energy driven desalination and brine management, Desalination and Water Treatment. DOI:

10.1080/19443994.2014.984927

7. PUBLICATIONS/POSTER PRESENTATION IN CONFERENCES

- [1] Δ. Ξεύγενοs (2015): Εξοικονόμηση ενέργειας και νερού: μία βιώσιμη πρόταση για την ελληνική βιομηχανία. Presentation made in [Water Conference 2015](#), 16 June, 2015, Athens, Greece.
- [2] D. Xevgenos, M. Loizidou (2015). First blue growth award: GReen Desalination: a Zero Liquid Discharge technology aiming at full recovery of resources. Presentation in the [European Maritime Day](#), 28-29 May, 2015, Piraeus, Greece.
- [3] D. Xevgenos, M. Loizidou (2015). A closed-loop technology for full recovery of water and raw materials from the wastewater effluent. Paper presented in Industrial Waste & Wastewater Treatment & Valorization ([IWWATV](#)), 21-23 May, 2015, Athens, Greece
- [4] D. Xevgenos, K. Moustakas, D. Malamis, M. Loizidou (2014). Securing water supply in israel: an eco-innovative water treatment solution applied to the desalination brine effluent. Invited presentation in Drylands, Deserts, Desertification Conference, 17-19 November, 2014, Ben Gurion, Israel.
- [5] D. Xevgenos, K. Dimopoulos, M. Loizidou (2014): Zero Liquid Discharge Desalination: a demonstrated pilot application in Greece. Poster presentation in 2nd IWA Specialized Conference on Ecotechnologies for wastewater treatment, 23-25 June, 2014, Verona, Italy
- [6] D. Xevgenos, K. Dimopoulos, K. Moustakas, D. Malamis, M. Loizidou (2014). Enhanced Resource Efficiency in the desalination sector through recovery of resources from brine. Paper in "[Symbiosis 2014](#)" Conference, 19 June, 2014, Athens, Greece.
- [7] V. Psiloglou, G. Lemesios, D. Xevgenos, M. Zachariou-Dodou, K. Moustakas, K. Ioannou, C. Giannakopoulos, M. Petrakis, M. Loizidou, Vulnerability assessment of energy demand due to climate change in Cyprus. Paper presented in ADAPTtoCLIMATE Conference, 27 March, 2014, Nicosia, Cyprus
- [8] C. Papadaskalopoulou, D. Xevgenos, G. Lemesios, K. Moustakas, D. Malamis, K. Ioannou, M. Zachariou-Dodou, C. Giannakopoulos, T. Mesimeris, M. Loizidou. Assessment of Cyprus' vulnerability to climate change and development of a national adaptation strategy (2014). Paper presented in ADAPTtoCLIMATE Conference, 27 March, 2014, Nicosia, Cyprus
- [9] D. Xevgenos, K. Moustakas, D. Malamis & M. Loizidou (2014). Desalination & sustainability: renewable energy driven desalination and brine management. Paper presented in ADAPTtoCLIMATE Conference, 27 March, 2014, Nicosia, Cyprus
- [10] C. Giannakopoulos, C. Papadaskalopoulou, G. Lemesios, D. Xevgenos, B. Psiloglou, T. Kopania, M. Petrakis, and M. Loizidou, 2013. 'Future climate change impact, Vulnerability and adaptation assessment for the island state of Cyprus'. Poster presented in EMS Annual Meeting Abstracts, Vol. 10, EMS2013-638-1, 13 September 2013, [13th EMS / 11th ECAM](#), United Kingdom.
- [11] D. Xevgenos, K. Moustakas, M. Loizidou (2014): Brine Management & Sustainability: the example of an energy autonomous pilot system in Tinos Island. 3rd International Exergy, Life Cycle Assessment and Sustainability Workshop & Symposium (ELCAS3), 07-09 July, 2013, Nisyros-Greece.
- [12] Δ. Ξεύγενοs, Π. Μιχαηλίδης, Κ. Δημόπουλος, Μ. Λοϊζίδου, 2013. Έπεξεργασία παραγόμενου υγρού απόβλητου από μονάδες αφαλάτωσης (άλμη) με χρήση συστήματος εξάτμισης υπό κενό – ανάπτυξη πιλοτικού συστήματος τροφοδοτούμενου από ηλιακή ενέργεια, 9ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής ([9 PESXM](#)), 23-25 May, 2013, Athens, Greece.
- [13] D. Xevgenos, K. Moustakas, M. Loizidou (2013): Renewable energy driven system for brine management with water recovery. Paper presentation in "Water Resources

Management: Needs and Prospects" Conference, 22 April, 2013, Amman, Jordan.
7. ORGANIZATION OF INTERNATIONAL CONFERENCES
[1] Organizing Committee Member of the International Conference entitled "Water Is Necessary for life - WIN4Life" [2] Organizing Committee Member of the International Conference entitled "Athens 2014: 2nd International Conference on Sustainable Solid Waste Management" [3] Organizing Committee Member of the International Conference entitled "IWWATV: Industrial Waste & Wastewater Treatment & Valorization"
8. SUPERVISING/MENTORING ACTIVITIES
[1] Supervision and contribution to the execution of laboratory exercises with under-graduate students in the School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens [2] Supervision of two under-graduate theses, Schools of Mechanical Engineering and Chemical Engineering, National Technical University of Athens [3] Delivery of lectures in under-graduate students, School of Chemical Engineering [4] Organization and delivery of educational activities in secondary and primary education, in collaboration with the Greek Ministry of Education and Religious Affairs
9. LANGUAGES
[1] Greek (native) [2] English (Fluent) [3] French (Good)
10. COMPUTATIONAL EXPERIENCE
[1] Microsoft Office: Word, Excel, PowerPoint, Access, Outlook [2] Operating Systems: Windows [3] Autocad [4] Programming languages: FORTRAN, MATLAB [5] Simulation Software: TRNSYS
11. COMMUNITY SERVICES AND MEMBERSHIPS
[1] European Technology Platform for Water Sanitation & Supply (WssTP): Resource Recovery Working Group [2] European Technology Platform for Water Sanitation & Supply (WssTP): Water & Industry Working Group [3] European Technology Platform for Water Sanitation & Supply (WssTP): Renewable Energy Desalination [4] European Innovation Partnership for Water



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΜΟΝΑΔΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ