ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ (ΕΛΜΕΠΑ)

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

Αξιολόγηση Τεχνολογιών Αφαλάτωσης για την Άρδευση Θερμοκηπίων στην Ανατολική Κρήτη

Φοιτητής: ΜΑΡΙΝΑ ΠΙΤΡΟΠΑΚΗ

Α.Μ.: ΤΜ20139

Επιβλέπων Καθηγητής: Νίκος Σακάς

Ηράκλειο, 2026

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΛΜΕΠΑ. Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Νίκο Σακά για την καθοδήγηση, τις ουσιαστικές παρατηρήσεις και την εμπιστοσύνη του. Ευχαριστώ επίσης τις/τους παραγωγούς και υπεύθυνες/ους θερμοκηπίων στην Ανατολική Κρήτη για τη διάθεση χρόνου και πληροφοριών κατά τις επιτόπιες επισκέψεις. Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια και τους φίλους μου για την αδιάκοπη υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης.

Περίληψη (Ελληνικά)

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη στρατηγική ενσωμάτωση τεχνολογιών αφαλάτωσης για την άρδευση θερμοκηπίων στην Ανατολική Κρήτη, μια περιοχή που πλήττεται έντονα από τη λειψυδρία και την ποιοτική υποβάθμιση των υδροφορέων. Η επιτόπια έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή της Ιεράπετρας κατά την περίοδο 2024-2025 επιβεβαίωσε το πρόβλημα, καταγράφοντας τιμές αγωγιμότητας έως και 2,9 mS/cm στον ταμιευτήρα Μπραμιανών, επίπεδα που προκαλούν φαινόμενα μικροκαρπίας, χλώρωσης και σημαντική μείωση της παραγωγικότητας έως και 40%. Ο κύριος στόχος της μελέτης είναι η συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών Αντίστροφης Ώσμωσης (RO/CCRO), Ηλεκτροδιάλυσης (EDR/MS-EDR) και Membrane Capacitive Deionization (MCDI) με βάση τεχνικούς, οικονομικούς και περιβαλλοντικούς δείκτες. Η μεθοδολογία συνδύασε τη συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση με την ανάλυση πρωτογενών δεδομένων από αντιπροσωπευτικές θερμοκηπιακές μονάδες. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν την RO ως την τεχνολογία αναφοράς για θαλάσσιες τροφοδοσίες, παρά την ανάγκη για στάδιο επαναμεταλλικοποίησης (re-ionization). Αντιθέτως, για τις υφάλμυρες γεωτρήσεις της ενδοχώρας, οι τεχνολογίες EDR και MS-EDR κρίνονται καταλληλότερες, καθώς επιτρέπουν την εκλεκτική απομάκρυνση μονοσθενών ιόντων (Na^+, Cl^-) διατηρώντας τα ωφέλιμα δισθενή (Ca^{2+}, Mg^{2+}), γεγονός που μειώνει το κόστος θρέψης. Η οικονομική ανάλυση υπογραμμίζει ότι η δυναμική μίξη (blending) αφαλατωμένου και υφάλμυρου νερού αποτελεί τον κεντρικό μοχλό βιωσιμότητας, επιτρέποντας την επίτευξη των ποιοτικών στόχων με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

Παράλληλα, η σύζευξη με φωτοβολταϊκά συστήματα (PV) μειώνει δραστικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, αν και η πλήρης οικονομική ισοτιμία προϋποθέτει τη μείωση του ισοδύναμου κόστους της ηλιακής kWh στην περιοχή των 0,10–0,20 €. Το βασικό παραδοτέο της εργασίας είναι ένα στρατηγικό Πλαίσιο Λήψης Αποφάσεων 5 βημάτων, το οποίο καθοδηγεί τον παραγωγό στην επιλογή τεχνολογίας, τον προσδιορισμό ποιοτικών setpoints και την ενεργειακή βελτιστοποίηση της μονάδας . Η εργασία καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η υιοθέτηση «έξυπνων» συστημάτων αφαλάτωσης, σε συνδυασμό με κοινοτικές υποδομές και ΑΠΕ, αποτελεί μονόδρομο για τη διασφάλιση της αγροδιατροφικής ανθεκτικότητας στην Ανατολική Κρήτη.

Λέξεις-κλειδιά: αφαλάτωση, θερμοκήπια, Ανατολική Κρήτη, αντίστροφη ώσμωση, ηλεκτροδιάλυση, MS-EDR, μίξη, άλμη, ΑΠΕ, πλαίσιο λήψης αποφάσεων.

Abstract (English)

This thesis investigates the use of desalinated water for greenhouse irrigation in Eastern Crete, a region facing increasing water scarcity and aquifer salinization. The objective is to comparatively assess desalination technologies ocusing on reverse osmosis (RO/CCRO), electrodialysis (ED/EDR, MS-EDR), and advanced electrochemical approaches (MCDI), against technical, economic, and environmental criteria tailored to greenhouse systems (hydroponics/soil).
The methodology integrates a systematic literature review with on-site surveys of representative greenhouses in Eastern Crete. Evaluation criteria include: technical indicators (specific energy consumption SEC, recovery R, product water quality in terms of EC/TDS and key ions), economic indicators (€/m³ and Levelized Cost of Water LCoW, accounting for CAPEX/OPEX, water blending, and remineralization/nutrient needs), and environmental indicators (brine volume/salinity, energy footprint). Scenarios consider blending desalinated with brackish/groundwater sources and coupling with renewables (e.g., PV) to reduce costs and emissions.

Expected outputs are a decision framework for technology selection by salinity zone, practical blending guidelines, and renewable-coupled options that enhance the sustainability of greenhouse irrigation in Eastern Crete.

Keywords: desalination, greenhouses, Eastern Crete, reverse osmosis, electrodialysis, MCDI, SEC, LCoW, blending, brine, renewables.

Κατάλογος Πινάκων

- Πίνακας 1.1: Απαιτήσεις ποιότητας νερού άρδευσης για θερμοκηπιακές καλλιέργειες (EC/TDS, Na^+, Cl^-, B, pH).
- Πίνακας 2.1: Σύνοψη τεχνολογιών αφαλάτωσης για γεωργική χρήση (RO/CCRO, EDR/MS-EDR, MCDI, θερμικές).
- Πίνακας 2.2: Βασικοί δείκτες και εξισώσεις για τη βιβλιογραφική ανασκόπηση (SEC, R, LCoW κ.λπ.).
- Πίνακας 2.3: Οικονομικοί δείκτες (€/m^3, LCoW) και παράμετροι κόστους (CAPEX/OPEX, μίξη, θρέψη).
- Πίνακας 3.1: Κλιματικά/υδρογεωλογικά γνωρίσματα Ανατολικής Κρήτης (σύνοψη).
- Πίνακας 4.1: Κριτήρια ένταξης/αποκλεισμού βιβλιογραφίας.
- Πίνακας 4.2: Ορισμοί δεικτών και εξισώσεις υπολογισμού (SEC, R, LCoW).
- Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα τεχνικής αξιολόγησης ανά σενάριο τροφοδοσίας–στόχων.
- Πίνακας 5.2: Κόστος νερού (€/m^3, LCoW) και επιδράσεις μίξης/ΑΠΕ.
- Πίνακας 5.3: Όγκος/αλμικότητα άλμης και επιλογές διάθεσης/μετριασμού.
- Πίνακας 5.5: Ευρήματα από Επιτόπια Έρευνα σε Θερμοκηπιακές Εκμεταλλεύσεις Ανατολικής Κρήτης.

Συντομογραφίες & Σύμβολα

Τεχνολογίες & Φορείς

- RO: Αντίστροφη Ώσμωση (Reverse Osmosis)
- CCRO: Κλειστός βρόχος Αντίστροφης Ώσμωσης (Closed-Circuit Reverse Osmosis)
- ED: Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis)
- EDR: Ηλεκτροδιάλυση με αντιστροφή πολικότητας (Electrodialysis Reversal)
- MS-EDR: Μονοσθενώς Εκλεκτική Ηλεκτροδιάλυση (Monovalent-Selective Electrodialysis)
- MCDI / CDI: Χωρητικός Απιονισμός με μεμβράνες (Membrane Capacitive Deionization)
- MD: Απόσταξη με μεμβράνη (Membrane Distillation)
- RED: Αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση (Reverse Electrodialysis)
- HDH: Ύγρανση-Αφύγρανση (Humidification-Dehumidification)
- ZLD: Μηδενική Απόρριψη Υγρών (Zero Liquid Discharge)
- ΑΠΕ: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
- PV: Φωτοβολταϊκά (Photovoltaics)
- TOEB: Τοπικός Οργανισμός Εγγείων Βελτιώσεων
- FAO: Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών
- CEA: Γεωργία Ελεγχόμενου Περιβάλλοντος (Controlled Environment Agriculture)
- MENA: Μέση Ανατολή και Βόρεια Αφρική (Middle East and North Africa)

Τεχνικοί & Οικονομικοί Δείκτες

- SEC: Ειδική κατανάλωση ενέργειας (Specific Energy Consumption, kWh/m3)
- LCoW: Εξισορροπημένο κόστος νερού (Levelized Cost of Water, €/m3)
- CAPEX: Δαπάνες επένδυσης / Κεφαλαιουχικές δαπάνες (Capital Expenditures)
- OPEX: Δαπάνες λειτουργίας (Operational Expenditures)
- GHG: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Greenhouse Gases)
- DSW: Αφαλατωμένο θαλασσινό νερό (Desalinated Seawater)

- TDS: Ολικά διαλυμένα στερεά (Total Dissolved Solids, mg/L)
- EC: Ηλεκτρική αγωγιμότητα (Electrical Conductivity, mS/cm ή dS/m)
- R: Βαθμός ανάκτησης (Recovery)

Φυσικά Μεγέθη & Σύμβολα

- Qf: Παροχή τροφοδοσίας (Feed flow, m3/h)
- Qp: Παροχή προϊόντος (Permeate/Product flow, m3/h)
- Qb: Παροχή άλμης (Brine flow, m3/h)
- Cf: Συγκέντρωση αλάτων στην τροφοδοσία
- Cp: Συγκέντρωση αλάτων στο προϊόν
- Cb: Συγκέντρωση αλάτων στην άλμη
- E: Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh)
- Vp: Παραγόμενος όγκος προϊόντος (m3)
- fi: Κλάσμα ή ποσοστό συμμετοχής μίας πηγής στο τελικό μείγμα

Χημικά Στοιχεία & Ιόντα

- Na+: Νάτριο
- Cl-: Χλώριο / Χλωριούχα ιόντα
- B: Βόριο
- Ca2+: Ασβέστιο
- Mg2+: Μαγνήσιο
- NO3-: Νιτρικά ιόντα
- pH: Δείκτης οξύτητας ή αλκαλικότητας του διαλύματος

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Πλαίσιο προβλήματος: Κλιματική μεταβλητότητα, λειψυδρία και υφαλμύρινση στην Ανατολική Κρήτη

Η Ανατολική Κρήτη αντιμετωπίζει έντονη υδατική πίεση λόγω της κλιματικής μεταβλητότητας, των παρατεταμένων ξηρών περιόδων και της άνισης εποχικής κατανομής των βροχοπτώσεων. Οι συνθήκες αυτές, σε συνδυασμό με αυξανόμενες αρδευτικές και τουριστικές απαιτήσεις, επιβαρύνουν τα υδατικά ισοζύγια και οδηγούν σε υπεράντληση και πτωτική τάση της στάθμης των υπόγειων υδροφόρων, με αποτέλεσμα την πρόκληση ή και την ενίσχυση υφαλμύρινσης σε παράκτιες και πεδινές ζώνες (Tzanakakis, Angelakis, Paranychianakis, Dialynas, & Tchobanoglous, 2020). Η διεθνής και μεσογειακή βιβλιογραφία τεκμηριώνει ότι, υπό τέτοιες πιέσεις, οι γεωργικές περιοχές καταφεύγουν συχνά σε μη συμβατικούς υδατικούς πόρους (π.χ. αφαλάτωση θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού) ή και σε συνδυαστικές πρακτικές μίξης πηγών για να διασφαλίσουν αξιόπιστες παροχές άρδευσης (El Kharraz et al., 2023). Σε τοπική κλίμακα, συμμετοχικές μελέτες στην Κρήτη ανέδειξαν τη διάχυτη επίπτωση της αλατότητας στα εδάφη και στα διαθέσιμα νερά, ιδίως σε υδροφόρους που επιβαρύνονται εποχικά από θαλάσσια διείσδυση, επιβεβαιώνοντας την ανάγκη για μέτρα διαχείρισης όπως βελτίωση αποδοτικότητας άρδευσης, συγκομιδή βρόχινου νερού και, όπου απαιτείται, συμπληρωματική χρήση αφαλατωμένου νερού μέσω μίξης (Panagea, Daliakopoulos, Tsanis, & Schwilch, 2016; Tzanakakis et al., 2020). Η εικόνα αυτή συνάδει με τα ευρήματα από μεσογειακές εφαρμογές, όπου η αφαλάτωση για την γεωργία εξετάζεται ως μέρος ευρύτερων στρατηγικών προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή και στην υδατική ανεπάρκεια, με ρητή προσοχή σε κόστος, ενέργεια και διαχείριση της άλμης (El Kharraz et al., 2023).

Πέρα από τη διαθεσιμότητα, κρίσιμο ζήτημα αποτελεί η ποιότητα του νερού άρδευσης. Για θερμοκηπιακές καλλιέργειες, η υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC/TDS) και τα ιόντα-κλειδιά (π.χ. Na^+, Cl^-, B) συνδέονται με κινδύνους φυτοτοξικότητας, με τη βιβλιογραφία να υποδεικνύει απαιτήσεις/στόχους για TDS και ιχνοστοιχεία και να επισημαίνει το πρόσθετο κόστος απομάκρυνσης βορίου/αλμικότητας όπου επιλέγεται RO (El Kharraz et al., 2023). Σε αυτό το

πλαίσιο, η αφαλάτωση αναδύεται ως τεχνικά εφικτή επιλογή (ιδίως για υφάλμυρα νερά), αλλά η ενσωμάτωσή της στα συστήματα άρδευσης πρέπει να αξιολογείται συστημικά (τεχνικά–οικονομικά–περιβαλλοντικά), λαμβάνοντας υπόψη τη σύζευξη με ΑΠΕ και τη στρατηγική μίξης για επίτευξη των απαιτούμενων ποιοτικών προδιαγραφών με βιώσιμο κόστος (Nayar & Lienhard, 2020; El Kharraz et al., 2023).

Συνολικά, το πρόβλημα στην Ανατολική Κρήτη μπορεί να συνοψιστεί σε τρεις αλληλένδετους πυλώνες: (α) κλιματική μεταβλητότητα και αυξανόμενα υδατικά ελλείμματα, (β) πίεση στους υπόγειους υδροφορείς με εκδήλωση/επιδείνωση υφαλμύρινσης, και (γ) αυστηρότερες απαιτήσεις ποιότητας νερού για θερμοκηπιακές καλλιέργειες.
Η παρούσα εργασία εντάσσει την αφαλάτωση στο πλαίσιο της ολοκληρωμένης διαχείρισης υδατικών πόρων ως συμπληρωματική και όχι αποκλειστική λύση, εστιάζοντας κυρίως σε στοχευμένες εφαρμογές πάνω σε υφάλμυρες τροφοδοσίες, οι οποίες μπορούν να βελτιωθούν ποιοτικά με χαμηλότερο ενεργειακό και οικονομικό κόστος σε σχέση με την πλήρη αφαλάτωση θαλασσινού νερού. Παράλληλα, εξετάζεται η μίξη αφαλατωμένου, υφάλμυρου και λοιπών διαθέσιμων πηγών, ώστε να διαμορφωθούν κατάλληλα μίγματα αρδευτικού νερού που να ικανοποιούν τα ποιοτικά όρια των θερμοκηπιακών καλλιεργειών με ελεγχόμενο κόστος.
Τέλος, η εργασία διερευνά τη σύζευξη των μονάδων αφαλάτωσης με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, κυρίως φωτοβολταϊκά, ως μέσο μείωσης της ενεργειακής δαπάνης και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, με στόχο να αξιολογηθεί συνολικά η τεχνική και οικονομική βιωσιμότητα αυτών των λύσεων για τα θερμοκήπια της Ανατολικής Κρήτης.

1.2 Θερμοκηπιακή γεωργία: ρόλος, ανάγκες άρδευσης και απαιτήσεις ποιότητας νερού (EC/TDS, Na^+, Cl^-, B, pH)

Η θερμοκηπιακή γεωργία σε μεσογειακά, άνυδρα και ημίξηρα περιβάλλοντα αξιοποιεί εντατικά την ακριβή διαχείριση του νερού για να διασφαλίσει σταθερή παραγωγή υψηλής αξίας. Η ποιότητα του αρδευτικού νερού αποτελεί καθοριστικό παράγοντα επιτυχίας, επηρεάζοντας τη δυναμική του ριζοστρώματος, την αγωγιμότητα (EC/TDS), το pH και τη διαθεσιμότητα/τοξικότητα ιόντων-κλειδιών

(Na^+, Cl^-, B), άρα και την τελική απόδοση. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, η αφαλάτωση αναδύεται όχι ως αυτοσκοπός αλλά ως **εργαλείο ποιοτικής ρύθμισης** καθώς προσφέρει σταθερή βάση νερού, πάνω στην οποία «χτίζεται» το καλλιεργητικό πρόγραμμα (μίξη πηγών, επαναμεταλλικοποίηση, έλεγχος pH) ώστε να τηρούνται οι στόχοι ποιότητας με το ελάχιστο δυνατό κόστος και αποτύπωμα. Η πρόσφατη βιβλιογραφία για «resource-intelligent» θερμοκήπια στις ξηρικές ζώνες (ξηροθερμικες περιοχές) υπογραμμίζει ακριβώς αυτή τη συστημική ένταξη της αφαλάτωσης (RO, ED, CDI, MD) σε ροές άρδευσης/θρέψης με στάδιο «re-ionization» (επαναμεταλλικοποίηση) πριν την υδρολίπανση, και με δυνατότητες σύζευξης με ΑΠΕ και ανακτήσεις/ανακυκλώσεις εντός του θερμοκηπίου (π.χ. HDH, ZLD) .

1.2.1 Γιατί μετράει η ποιότητα νερού στα θερμοκήπια

Η ποιότητα νερού στα θερμοκήπια είναι κρίσιμη γιατί επηρεάζει άμεσα τόσο την υγεία των φυτών όσο και το κόστος παραγωγής. Υψηλά Na^+ aπCl^- lποB μπορούν να προκαλέσουν αλατοστρές, εγκαύματα στα φύλλα και μείωση της παραγωγής, ενώ ακατάλληλες συγκεντρώσεις Ca^{2+} και Mg^{2+} επηρεάζουν τη θρέψη και τη δομή του υποστρώματος. Παράλληλα, κακή ποιότητα νερού (π.χ. υψηλή EC ή ιζήματα TDS) αυξάνει τα προβλήματα κυρίως στα φυτά δημιουργώντας προβλήματα στο ριζόστρωμα και κατά συνέπεια μείωση της παραγωγής.

EC/TDS: Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και τα ολικά διαλυμένα στερεά (TDS) λειτουργούν ως συνοπτικοί δείκτες αλατότητας. Στα θερμοκήπια, στοχεύουμε σε σταθερή και κατάλληλη EC/TDS στο νερό βάσης ώστε να ελέγχουμε αξιόπιστα τη θρέψη και να περιορίζουμε το στρες των φυτών από το αλάτι. Η μεθοδολογική βιβλιογραφία για θερμοκήπια Μεσογείου (Ισπανία) αξιοποιεί μίξη αφαλατωμένου θαλασσινού νερού (DSW) με υφάλμυρο υπόγειο ώστε το τελικό μίγμα να έχει την επιθυμητή EC σε βιώσιμο κόστος. Κατά συνέπεια, ακόμα κι αν το DSW κοστίζει περισσότερο, μπορεί να αποφέρει μεγαλύτερο κέρδος από το υφάλμυρο νερό επειδή το κέρδος από τη χαμηλότερη αλατότητα αντισταθμίζει την υψηλότερη τιμή του DSW προσφέροντας μεγαλύτερη απόδοση στην καλλιέργεια .

Na^+ και Cl^-: Τα μονοσθενή ιόντα συνδέονται με φυτοτοξικότητες/στρες (ιδίως σε λαχανικά). Η **εκλεκτική** μείωση Na^+/Cl^- είναι, συνεπώς, ιδιαίτερα χρήσιμη. Εδώ, τεχνολογίες ηλεκτροδιάλυσης με μονοσθενή εκλεκτικότητα (**MS-EDR**) μπορούν να μειώνουν δυσανάλογα Na^+/Cl^- ενώ **διατηρούν** σε μεγαλύτερο βαθμό δισθενή κατιόντα (Ca^{2+}, Mg^{2+}) στο προϊόν, κάτι που είναι ευνοϊκό για την αγρονομική θρέψη και μειώνει τις ανάγκες επαναμεταλλικοποίησης σε σχέση με αμιγές RO .

Βόριο (B): Σε θαλασσινές τροφοδοσίες, ο έλεγχος του B απαιτεί ειδική προσοχή. Η πρακτική που προτείνεται σε ολοκληρωμένες προσεγγίσεις περιλαμβάνει συνδυασμό (α) κατάλληλου σχεδιασμού/λειτουργίας RO, (β) μίξης με άλλες πηγές, και (γ) επόμενων σταδίων ή pH-προσαρμογών, όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο στο επίπεδο έργου (ανάλογα με τις απαιτήσεις καλλιεργειών και υποστρωμάτων) .

pH: Επηρεάζει κρίσιμα τη διαθεσιμότητα θρεπτικών στο διάλυμα. Τα σχήματα ολοκλήρωσης αφαλάτωσης για θερμοκήπια προβλέπουν στάδιο **επαναμεταλλικοποίησης** πριν την υδρολίπανση, για να εξασφαλίζεται σταθερότητα pH και ιοντικής ισορροπίας. Η διατήρηση μέρους των Ca^{2+}/Mg^{2+} σε προϊόν «μερικής» αφαλάτωσης (π.χ. EDR/MS-EDR) συχνά διευκολύνει τον έλεγχο του pH σε σχέση με το «λευκής βάσης » RO-νερό, όπου απαιτούνται συστηματικές προσθήκες/ρυθμίσεις . «Συνοπτικά, οι επιχειρησιακοί στόχοι ποιότητας νερού για θερμοκηπιακές καλλιέργειες στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1.1**, ο οποίος συγκεντρώνει τα όρια για TDS/EC, pH και τα ιόντα-κλειδιά (Na^+, Cl^-, B).

Πίνακας 1.1 –Απαιτήσεις ποιότητας νερού άρδευσης για θερμοκηπιακές καλλιέργειες (EC/TDS, Na^+, Cl^-, B, pH)

Παράμετρος	Στόχος / όριο	Παρατηρήσεις – Χρήση	Τεκμηρίωση
TDS (mg/L)	500–1,500 (στόχος για θερμοκήπια)	Εύρος–στόχος για άρδευση θερμοκηπιακών καλλιεργειών, ιδίως σε υδροπονία· επιτυγχάνεται με μίξη (blending) αφαλατωμένου και υφάλμυρου νερού.	Evaluation of Desalination Technologies for Greenhouse Irrigation in Eastern Crete
EC (dS/m)	Συνεπές με τον στόχο TDS	Η EC ρυθμίζεται επιχειρησιακά μέσω μίξης, με on-line παρακολούθηση EC/TDS για τήρηση setpoints.	Evaluation of Desalination Technologies for Greenhouse Irrigation in Eastern Crete

pH (—)	5.5–6.5 (υδροπονία)	Τυπικό εύρος για διαλύματα άρδευσης/υδρολίπανσης σε θερμοκηπιακά συστήματα χωρίς έδαφος.	Evaluation of Desalination Technologies for Greenhouse Irrigation in Eastern Crete
Na^+ (mg/L)	≈23 (στόχος στη θρεπτική λύση), αποδεκτό έως ≈115	Επιθυμητές συγκεντρώσεις νατρίου στη θρεπτική λύση θερμοκηπίων· χαμηλότερο Na^+ μειώνει κίνδυνο αλατότητας/σοδοτικότητας.	Nayar (greenhouse preprint)
Cl^- (mg/L)	< 105 (γενικό κριτήριο άρδευσης)	Γενικό συνιστώμενο όριο για άρδευση· σε ευαίσθητες καλλιέργειες στοχεύεται χαμηλότερο.	CHAPTE2 (Desalination for Agriculture)
B (mg/L)	< 0.5	Γενικό συνιστώμενο όριο βορίου για άρδευση. Σε RO απαιτείται προσοχή/πρόσθετη κατεργασία για μείωση B.	CHAPTE2 (Desalination for Agriculture)

1.2.2 Επιπτώσεις της επιλογής τεχνολογίας στο «προφίλ» ποιότητας

Η επιλογή της τεχνολογίας αφαλάτωσης επηρεάζει άμεσα το «προφίλ» ποιότητας του νερού, δηλαδή ποια ιόντα και σε τι επίπεδα θα φτάσουν τελικά στο θερμοκήπιο. Τεχνολογίες όπως η RO τείνουν να αφαιρούν σχεδόν όλα τα άλατα, δημιουργώντας μια «λευκή βάση» που απαιτεί επαναμεταλλικοποίηση, ενώ λύσεις όπως η EDR/MS-EDR ή η MCDI μπορούν να διατηρήσουν μέρος των δισθενών ιόντων (Ca^{2+}, Mg^{2+}) και να μειώσουν κυρίως τα προβληματικά Na^+a) καCl^-l) και να μειώσουν σε διαφορές στη θρέψη, στο κόστος λιπασμάτων και στη συμπεριφορά του νερού στο υπόστρωμα και στο αρδευτικό δίκτυο.

Αντίστροφη Ώσμωση (RO/CCRO): Παράγει νερό πολύ χαμηλού TDS, άρα προσφέρει ισχυρό έλεγχο σε «προβληματικά» μονοσθενή (Na^+, Cl^-) και, με κατάλληλο σχεδιασμό, μπορεί να αντιμετωπίσει και το B, αλλά απαιτεί **επαναϊονισμό** πριν από τη θρέψη (επαναμεταλλικοποίηση) και πιθανώς προσαρμογές pH. Τα σενάρια ολοκλήρωσης με ΑΠΕ (PV) εξετάζονται, με το κόστος να εξαρτάται από την ειδική κατανάλωση ενέργειας SEC και τιμές ηλεκτρισμού, ενώ η ένταξη σε μικροδίκτυα θερμοκηπίων βελτιώνει τη συνολική διαχείριση ενέργειας/φορτίων .

Ηλεκτροδιάλυση (ED/EDR): Η EDR (electrodialysis reversal) είναι μια τεχνολογία αφαλάτωσης που **αφαιρεί άλατα από το νερό** με τη βοήθεια ηλεκτρικού ρεύματος και **μεμβρανών ιόντων**. Τυπικά δίνει προϊόν **μερικής αφαλάτωσης** (π.χ. νερό περί τα «μερικές εκατοντάδες ppm» σε μελέτες θερμοκηπίων), χρήσιμο ως «βάση» για μίξη, με μικρότερη ανάγκη επαναμεταλλικοποίησης από το RO, επειδή διατηρούνται δισθενή κατιόντα. Ωστόσο, η **μη εκλεκτική** EDR μειώνει ομοιόμορφα ιόντα, κάτι που δεν είναι ιδανικό όταν θέλουμε να κρατήσουμε θρεπτικά ιόντα και να μειώσουμε μόνο τον Na^+ γι' αυτό, σε γεωργικά σενάρια με αυστηρά όρια στο νάτριο **(Na^+)**, χρησιμοποιούμε την **MS-EDR**, η οποία στοχεύει ειδικά τους μονοσθενείς ρύπους, διατηρώντας τα χρήσιμα στοιχεία.

MS-EDR (μονοσθενές εκλεκτική): Προσφέρει **εκλεκτική** απομάκρυνση Na^+/Cl^- και **σχετική διατήρηση** Ca^{2+}/Mg^{2+}, μειώνοντας ανάγκες λιπασμάτων. Το σημερινό κόστος συχνά υπερβαίνει το RO, αλλά με πτώση τιμών μεμβρανών και/ή χαμηλό κόστος ηλεκτρισμού/SEC, η MS-EDR προσεγγίζει την οικονομική ανταγωνιστικότητα, ειδικά σε προφίλ τροφοδοσίας που ευνοούν την εκλεκτικότητα (αναλύσεις κόστους–ευαισθησίας για θερμοκήπια) .

Μίξη πηγών: πρακτικός «ρυθμιστής» ποιότητας–κόστους

Η μίξη DSW (αφαλατωμένου θαλασσινού νερού) με υφάλμυρο υπόγειο νερό μας επιτρέπει να φτιάξουμε ένα μείγμα με κατάλληλη ποιότητα για άρδευση, ρυθμίζοντας EC/TDS και συγκεντρώσεις ιόντων με ελάχιστο κόστος, αντί της αποκλειστικής χρήσης DSW.

Σε πραγματικό θερμοκηπιακό σενάριο Μεσογείου, το μοντέλο βελτιστοποίησης αναδεικνύει ότι το οικονομικά άριστο μείγμα μπορεί να μειώσει σημαντικά την αλατότητα του μείγματος, ως αποτέλεσμα την μείωση του αλατικού στρες στα φυτά. Η ρύθμιση της ποιότητας με χρήση μεγαλύτερης ποσότητας αφαλατωμένου νερού, αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη ποσότητα παραγωγής, επιμερίζοντας το κόστος νερού από το κέρδος της παραγωγής.

1.2.3 Δείκτες λειτουργίας που θα χρησιμοποιηθούν στη μεθοδολογία

Ανάκτηση (Recovery): Η «Ανάκτηση» R είναι ένας από τους βασικούς δείκτες που περιγράφουν πώς δουλεύει μια μονάδα αφαλάτωσης.

$$R = Qp / Qf$$

- **Qf** = *feed flow* → παροχή τροφοδοσίας
  Είναι το νερό που μπαίνει στο σύστημα (π.χ. υφάλμυρο ή θαλασσινό νερό).
- **Qp** = *permeate (product) flow* → παροχή προϊόντος
  Είναι το καθαρό/αφαλατωμένο νερό που βγαίνει από τη μονάδα.
- **R** = *recovery* → βαθμός ανάκτησης
  Δείχνει **τι ποσοστό** του νερού τροφοδοσίας μετατρέπεται σε προϊόν.

(γενικός ορισμός – εφαρμόζεται σε RO/EDR/MS-EDR).

Ειδική κατανάλωση ενέργειας (SEC):

SEC = E / Vp

όπου E = καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια, Vp = παραγόμενος όγκος προϊόντος. Η SEC είναι κρίσιμη για συγκρίσεις τεχνολογιών και για μοντελοποίηση κόστους σε θερμοκήπια και σενάρια με/χωρίς PV (αναλύσεις κόστους–ευαισθησίας σε RO/EDR/MS-EDR για θερμοκήπια) .

1.2.4 Πρακτικές συνέπειες για θερμοκήπια Ανατολικής Κρήτης[MK1]

Η ενότητα «Πρακτικές συνέπειες για θερμοκήπια Ανατολικής Κρήτης» παρουσιάζει τι σημαίνουν στην πράξη τα αποτελέσματα της εργασίας για τους παραγωγούς της περιοχής. Εστιάζει στο αν και πώς η αφαλάτωση μπορεί να ενταχθεί στα υφιστάμενα αρδευτικά σχήματα, ποιοι τύποι μονάδων και ποιες στρατηγικές μίξης πηγών είναι πιο κατάλληλες, ποιο είναι το αναμενόμενο κόστος και όφελος, καθώς και πώς η χρήση ΑΠΕ μπορεί να βελτιώσει τη βιωσιμότητα των θερμοκηπίων.

1. **Καθορισμός στόχων ποιότητας ανά καλλιέργεια και υπόστρωμα.**

Σε κάθε καλλιέργεια και υπόστρωμα χρειάζεται να ορίζονται ξεκάθαροι στόχοι ποιότητας νερού, όχι μόνο ως προς την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC/TDS), αλλά και ως προς τα ιόντα Na^+, Cl^- και, όπου είναι κρίσιμο, το B. Για κάθε είδος και στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας διαμορφώνονται «ζώνες» αποδεκτής ποιότητας, μέσα στις οποίες πρέπει να κινείται το αρδευτικό νερό. Η χρήση αφαλάτωσης, σε συνδυασμό με επανιονισμό όπου χρειάζεται, βοηθά ώστε αυτοί οι στόχοι να τηρούνται με συνέπεια σε όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.

2. **Επιλογή τεχνολογίας σύμφωνα με τη φύση της τροφοδοσίας.**

Η επιλογή της τεχνολογίας αφαλάτωσης πρέπει να γίνεται ανάλογα με το είδος του νερού τροφοδοσίας. Για υφάλμυρα υπόγεια νερά, τεχνολογίες όπως η ED/EDR μπορούν να προσφέρουν «μερική» αφαλάτωση, μειώνοντας το TDS, ενώ η MS-EDR επιτρέπει πιο στοχευμένη μείωση Na^+ και Cl^-, διατηρώντας τα ωφέλιμα Ca^{2+} και Mg^{2+} και έτσι μειώνοντας την ανάγκη επαναμεταλλικοποίησης και πολύπλοκου ελέγχου pH. Για θαλασσινό νερό, η RO/CCRO χρησιμοποιείται για βαθιά αποαλάτωση, με δυνατότητα προσεκτικού ελέγχου των ιχνοστοιχείων μέσω σχεδιασμού, μίξης και επανιονισμού. Τελικά, η καταλληλότερη επιλογή προκύπτει από τον συνδυασμό ενεργειακής κατανάλωσης (SEC), τιμών ηλεκτρικής ενέργειας και μεμβρανών, αγρονομικών στόχων και της δυνατότητας σύζευξης με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.

Για **υφάλμυρα υπόγεια**: ED/EDR ως «μερική» αφαλάτωση για προϊόν με χαμηλότερο TDS, ενώ η **MS-EDR** προσφέρει εκλεκτική μείωση Na^+/Cl^- με διατήρηση Ca^{2+}/Mg^{2+}, μειώνοντας ανάγκες επαναμεταλλικοποίησης και απλοποιώντας τον pH-έλεγχο.

Για **θαλασσινές τροφοδοσίες**: RO/CCRO ως εργαλείο βαθιάς αποαλάτωσης με δυνατότητα ελέγχου ιχνοστοιχείων μέσα από κατάλληλο σχεδιασμό/μίξη/επαναϊονισμό.

Η τελική επιλογή κρίνεται από SEC, τιμές ηλεκτρικής ενέργειας/μεμβρανών, αγρονομικούς στόχους και δυνατότητες σύζευξης με ΑΠΕ .

3. **Μίξη ως βασικό εργαλείο κόστους–ποιότητας.**

Η δυναμική προσαρμογή των συντελεστών μίξης (fi) ανά εποχή/παρτίδα επιτρέπει σταθεροποίηση EC/ιόντων στο επιθυμητό εύρος, ενώ το οικονομικό αποτέλεσμα βελτιώνεται όταν η υποχώρηση του αλατούχου στρες (λόγω υψηλότερου DSW) αποδίδει περισσότερο από τη διαφορά τιμής ανά m^3. Το τεκμηριωμένο εργαλείο βελτιστοποίησης για θερμοκήπια Μεσογείου παρέχει σαφές προηγούμενο εφαρμογής αυτής της λογικής στο πεδίο .

4. **Θρέψη και pH: σχεδιασμός με (επανιονισμό) επαναμεταλλικοποίηση.**

Σε RO απαιτείται τυπικά επαναμεταλλικοποίηση (π.χ. Ca^{2+}/Mg^{2+}) και προσεκτική ρύθμιση pH πριν την υδρολίπανση. Στην ED/MS-EDR, η σχετική διατήρηση δισθενών κατιόντων διευκολύνει τη σταθερότητα του συστήματος θρέψης. Η ένταξη επανιονισμού ως τυπικού σταδίου πριν το σύστημα θρέψης συνάδει με τις σύγχρονες προτάσεις ολοκλήρωσης αφαλάτωσης στα θερμοκήπια ξηρικών ζωνών.

5. **Συστημική βιωσιμότητα και ενέργεια.**

Η οικονομική ανταγωνιστικότητα επηρεάζεται από την ειδική κατανάλωση ενέργειας SEC, τιμές ηλεκτρισμού και κόστος μεμβρανών. Αναλύσεις κόστους για θερμοκηπιακές εφαρμογές δείχνουν ότι με συγκεκριμένες προϋποθέσεις (π.χ. μείωση τιμών MS-EDR μεμβρανών, χαμηλό κόστος kWh) η MS-EDR μπορεί να πλησιάσει/αγγίξει το RO σε κόστος, ενώ τα πιθανά οφέλη από λιγότερη επαναμεταλλικοποίηση/θρέψη βελτιώνουν το συνολικό ισοζύγιο. Η σύζευξη με ΑΠΕ (PV) λειτουργεί συμπληρωματικά, αλλά απαιτεί συνεκτίμηση κεφαλαιουχικού κόστους και λειτουργικών παραμέτρων ώστε να «κλείσει» οικονομικά στο επίπεδο εκμετάλλευσης .

1.3 Η αφαλάτωση ως εναλλακτική/συμπληρωματική πηγή άρδευσης για θερμοκήπια.

Η αφαλάτωση αποτελεί μια στοχευμένη λύση ρύθμισης ποιότητας και διασφάλισης παροχής για τα θερμοκήπια σε περιοχές με λειψυδρία και/ή υφαλμύρινση, όπως η Ανατολική Κρήτη. Δεν λειτουργεί ως αυτόνομο «αντίδοτο» σε όλες τις περιπτώσεις, αλλά ως συμπληρωματική πηγή που εντάσσεται συστηματικά σε μίξεις με υφάλμυρα/υπόγεια νερά, σε αγρονομικά πρωτόκολλα θρέψης

(επαναμεταλλικοποίηση πριν την υδρολίπανση) και όπου ενδείκνυται σε σύζευξη με ΑΠΕ, με ταυτόχρονη μέριμνα για τη διαχείριση της άλμης (brine) . Η διεθνής εμπειρία σε μεσογειακά συστήματα δείχνει ότι, υπό ορισμένες προϋποθέσεις (τιμές ενέργειας, κλίμακα, ανάκτηση, πρακτική μίξης), η αφαλάτωση μπορεί να είναι τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά βιώσιμη, ειδικά για καλλιέργειες υψηλής αξίας σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα (θερμοκήπια) .

1.3.1 Κύριες τεχνολογικές επιλογές και «προφίλ» ποιότητας

Αντίστροφη ώσμωση (RO/CCRO). Προσφέρει «βαθιά» αφαλάτωση με πολύ χαμηλό TDS/Cl^- και δυνατότητες ελέγχου ιχνοστοιχείων μέσω κατάλληλης λειτουργίας/μίξης, αλλά αφαιρεί και ωφέλιμα δισθενή (Ca^{2+}, Mg^{2+}). Αυτό συνεπάγεται **ανάγκη επαναμεταλλικοποίησης** πριν τη θρέψη (επαναμεταλλικοποίηση). Η RO είναι σήμερα η επικρατέστερη τεχνολογία, με πλεονέκτημα την ωριμότητα, την αυτοματοποίηση και την ευκολία κλιμάκωσης (οικονομίες κλίμακας και υψηλές ανακτήσεις μειώνουν το κόστος) .
Ηλεκτροδιάλυση (ED/EDR) και μονοσθενώς εκλεκτική EDR (MS-EDR).
Η ηλεκτροδιάλυση (ED/EDR) προσφέρει «μερική» αφαλάτωση, δηλαδή μειώνει την αλατότητα σε επίπεδα κατάλληλα για άρδευση ή μίξη με άλλες πηγές. Η μονοσθενώς εκλεκτική EDR (MS-EDR) πηγαίνει ένα βήμα παραπέρα, αφαιρώντας κυρίως τα μονοσθενή ιόντα (Na^+, Cl^-) και διατηρώντας σε μεγαλύτερο βαθμό τα δισθενή (Ca^{2+}, Mg^{2+}), κάτι που είναι αγρονομικά θετικό γιατί μειώνει την ανάγκη επαναμεταλλικοποίησης και την προσθήκη λιπασμάτων Ca/Mg. Παρ' όλα αυτά, με τα σημερινά κόστη μεμβρανών και ενέργειας, η MS-EDR είναι συνήθως ακριβότερη από την RO, εκτός αν μειωθούν αυτά τα κόστη ή αν ληφθούν υπόψη οικονομικά τα οφέλη από την εξοικονόμηση στη θρέψη.

Συνολικά, το **προφίλ ποιότητας προϊόντος** διαφέρει: Η RO παρέχει «καθαρό νερό» πολύ χαμηλού TDS που απαιτεί θρεπτικό επανεμπλουτισμό, ενώ η MS-EDR παράγει **νερό μερικής αποαλάτωσης** με μειωμένα μονοσθενή και **σχετική διατήρηση δισθενών**, άρα δυνητικά **λιγότερο κόστος επαναμεταλλικοποίησης** για θερμοκήπια. Η τελική επιλογή εξαρτάται από την **αλμικότητα τροφοδοσίας**, τους **αγρονομικούς**

στόχους και το **ενεργειακό/οικονομικό πλαίσιο** της εγκατάστασης (κόστος kWh, τιμές μεμβρανών, διαθέσιμες ΑΠΕ) .

Μίξη πηγών: ρύθμιση ποιότητας και κόστους για θερμοκήπια

Σε θερμοκηπιακές εφαρμογές της Μεσογείου, η μίξη **αφαλατωμένου θαλασσινού νερού (DSW)** με **υφάλμυρο υπόγειο** είναι καθιερωμένη πρακτική: μειώνει το αλατούχο στρες και επιτρέπει να ρυθμιστεί η ποιότητα στις καλλιεργητικές προδιαγραφές με **ελεγχόμενο κόστος**. Μάλιστα, βελτιστοποιητικά μοντέλα δείχνουν ότι το **οικονομικά άριστο μείγμα** συχνά απαιτεί **υψηλότερο μερίδιο DSW** από την τρέχουσα πρακτική, γιατί η αύξηση της απόδοσης (λόγω χαμηλότερης αλατότητας) αντισταθμίζει την υψηλότερη τιμή ανά m^3 του DSW.

Σχέσεις μίξης:

EC του μίγματος:

$ECw = f1 EC_1 + f2 EC_2 + \dots + fn * ECn$, με $f1+f2+\dots+fn = 1$

Τιμή νερού μίγματος:

$p_w = f1 p1 + f2 p2 + \dots + fn * p_n$

Οι παραπάνω σχέσεις χρησιμοποιούνται ρητά σε μεσογειακά θερμοκήπια όπου οι δύο κύριες πηγές είναι DSW και υφάλμυρο υπόγειο νερό (διαφορετικής τιμής και ποιότητας) .

Δείκτες λειτουργίας και βασικές εξισώσεις

- **Ανάκτηση (Recovery):**

  $R = Qp / Qf$

  όπου Qp = παροχή προϊόντος, Qf = παροχή τροφοδοσίας. Η ανάκτηση επηρεάζει άμεσα SEC, όγκο/αλμικότητα άλμης και, έμμεσα, κόστη διάθεσης/μίξης (γενικός ορισμός, χρησιμοποιείται σε RO/EDR/MS-EDR).

- **Ειδική κατανάλωση ενέργειας (SEC):**

  $SEC = E / Vp$

  όπου E = καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια, Vp = παραγόμενος όγκος προϊόντος. Η SEC αποτελεί κρίσιμο κριτήριο σύγκρισης τεχνολογιών και

είσοδο σε αναλύσεις κόστους/σενάρια με/χωρίς PV (τεκμηριωμένη σε συγκρίσεις RO–MSED για θερμοκήπια) .

- **Κόστος, κλίμακα και σύζευξη με ΑΠΕ**

Το **κόστος αφαλάτωσης για αγροτική χρήση** εξαρτάται έντονα από την κλίμακα και την ανάκτηση: **μεσαίου μεγέθους κεντρικές μονάδες** με υψηλές ανακτήσεις επιτυγχάνουν χαμηλότερο κόστος έναντι μικρών μονάδων (ενδεικτικά εύρη 0.46–1.32 USD/m³ με μέσο ~0.55 USD/m³, ανά μέγεθος/πλαίσιο), ενώ η **μίξη** με άλλες πηγές μειώνει περαιτέρω το τελικό κόστος άρδευσης. Στην πράξη, χώρες όπως η Ισπανία αξιοποιούν και **χρονικά τιμολόγια ενέργειας** (λειτουργία σε περιόδους χαμηλής τιμής) για να συμπιέσουν το κόστος RO για άρδευση .

Η **MS-EDR** μπορεί να προσφέρει **εξοικονομήσεις σε λίπανση** λόγω διατήρησης Ca^{2+}/Mg^{2+}, αλλά με τα τρέχοντα κόστη μεμβρανών/ενέργειας συνήθως παραμένει ακριβότερη από RO.

Αναλύσεις κόστους σε σενάρια θερμοκηπίων δείχνουν ότι η MS-EDR πλησιάζει/αγγίζει το RO όταν

(α) μειωθεί ουσιαστικά η **τιμή μεμβρανών** (π.χ. σε ~58 USD/m² για συγκεκριμένες σειρές) ή/και

(β) μειωθεί η **SEC** (π.χ. σε ~4.6–5.5 kWh/m³ ανά χώρα/τιμή kWh), ή/και

(γ) υπάρχει **χαμηλό κόστος ηλεκτρισμού** (< 0.08 USD/kWh). Η επίδραση της **τιμής kWh** είναι καθοριστική για τη σύγκλιση κόστους RO–MS-EDR .

Όσον αφορά στη **σύζευξη με φωτοβολταϊκά (PV)**, συγκριτικά πλαίσια κόστους δείχνουν ότι για να είναι **ισότιμη** η ηλιακή τροφοδότηση με τη συμβατική ηλεκτρική ενέργεια, απαιτείται σημαντική **μείωση του ισοδύναμου κόστους PV** (από 0.32–0.46 σε ~0.10–0.20 USD/kWh, ανά SEC/τιμή δικτύου). Διαφορετικά, τα συστήματα PV-RO ή PV-MS-EDR καταλήγουν ακριβότερα από τα συμβατικά τροφοδοτούμενα αντίστοιχα, με την απόσταση να συρρικνώνεται όσο μειώνεται το κόστος PV και η SEC της διεργασίας . Παρόλα αυτά, **πιλοτικές μονάδες PV-RO** για άρδευση έχουν εγκατασταθεί σε αγροτικά περιβάλλοντα, με στόχο τη βελτιστοποίηση λειτουργίας/μίξης και την επίδειξη ορθής διαχείρισης άλμης (π.χ. εξατμισοδεξαμενές) στο επίπεδο εκμετάλλευσης .

1.3.2 Περιβαλλοντική διάσταση: άλμη και κύκλος πόρων

Η περιβαλλοντική διάσταση της αφαλάτωσης επικεντρώνεται κυρίως στη διαχείριση της άλμης, που αποτελεί το βασικό «προβληματικό» παραπροϊόν, ιδιαίτερα σε μικρομεσαίες αγροτικές εφαρμογές. Η βιβλιογραφία προτείνει τρόπους μετριασμού και αξιοποίησής της, όπως συμπύκνωση και ανάκτηση αλάτων/μετάλλων, χρήση σε υδατοκαλλιέργειες, καλλιέργεια αλμυρόφυτων και μικροαλγών, καθώς και βελτίωση της προεπεξεργασίας με μεμβράνες ώστε να μειώνονται τα χημικά που καταλήγουν στην απόρριψη. Αν και πολλές λύσεις ανάκτησης είναι ακόμη οριακά βιώσιμες οικονομικά, υπάρχουν ενθαρρυντικά παραδείγματα (π.χ. αύξηση βιομάζας σε υδατοκαλλιέργειες), ενώ η χρήση μεμβρανικών προεπεξεργασιών συμβάλλει στη μείωση της «χημικά φορτισμένης» άλμης και σε πιο κυκλική διαχείριση των πόρων.

1.3.3 Τι σημαίνουν όλα αυτά για την Ανατολική Κρήτη

Για τα θερμοκήπια της Ανατολικής Κρήτης, η **πρακτική στρατηγική** συνίσταται σε:

1. **Επιλογή τεχνολογίας βάσει τροφοδοσίας και ποιοτικών στόχων**
   Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας αφαλάτωσης εξαρτάται από τον τύπο της υδατικής τροφοδοσίας και τους στόχους ποιότητας για την άρδευση. Σε περιοχές με θαλάσσιο νερό, η τεχνολογία αντίστροφης όσμωσης (RO ή CCRO) αποτελεί την προτεινόμενη λύση για την παραγωγή νερού πολύ χαμηλής αγωγιμότητας. Το παραγόμενο νερό απαιτεί επαναμετάλλωση (επαναμεταλλικοποίηση) και, όπου είναι διαθέσιμο, μίξη με υφάλμυρο για προσαρμογή στα επιθυμητά χαρακτηριστικά.

   Στην περίπτωση υφάλμυρων υπόγειων νερών, η χρήση EDR αποτελεί μια αποδοτική επιλογή, ενώ όταν προέχει η εκλεκτική απομάκρυνση μονοσθενών (Na^+/Cl^-) με ταυτόχρονη διατήρηση δισθενών (Ca^{2+}/Mg^{2+}), προτιμάται η τεχνολογία MS-EDR, καθώς προσφέρει αγρονομικό πλεονέκτημα και απλοποιεί τη διαχείριση της θρέψης των φυτών. **Μίξη DSW–υφάλμυρου** με χρήση των απλών γραμμικών σχέσεων EC και τιμής (βλ. παραπάνω τύπους), ώστε το μίγμα να επιτυγχάνει τα καλλιεργητικά setpoints με **ελάχιστο κόστος**. Η διεθνής εμπειρία σε μεσογειακά θερμοκήπια αποτελεί **άμεσο προηγούμενο** εφαρμογής αυτής της λογικής .

1. **Βελτιστοποίηση κόστους μέσω κλίμακας/ανάκτησης και «έξυπνης» ενέργειας.** Όπου είναι εφικτό, επιδίωξη κεντρικότερων μονάδων (economies of scale, υψηλότερες ανακτήσεις), λειτουργία σε **ζώνες χαμηλής τιμής ενέργειας** και, προοδευτικά, **σύζευξη με PV** καθώς μειώνεται το κόστος PV και βελτιώνονται τα SEC των διεργασιών .
2. **Προληπτικός σχεδιασμός περιβάλλοντος/άλμης.** Επιλογή ασφαλών οδών διάθεσης/αξιοποίησης άλμης και προεπεξεργασιών που περιορίζουν χημικά, με γνώμονα τη ρυθμιστική συμμόρφωση και το τοπικό περιβάλλον (π.χ. παραθαλάσσιες ζώνες, ευαισθησία δεκτών) .
3. **Τοπική προσαρμογή και κλιμάκωση.** Στο κείμενο της εργασίας-πλαισίου για την Ανατολική Κρήτη προτείνονται **πιλοτικές εφαρμογές** σε διαφορετικές κλίμακες, με **ενσωμάτωση ΑΠΕ**, **εκπαίδευση/πιστοποίηση** και **μηχανισμούς χρηματοδότησης** ώστε να «τρέξουν» έγκαιρα ανταγωνιστικά μοντέλα διδακτικά και για την υπόλοιπη Μεσόγειο .

- Ανάκτηση: R = Qp / Qf
- Ειδική κατανάλωση ενέργειας: SEC = E / Vp
- EC μίγματος: ECw = f1*EC1* + *f2*EC2 + … + fn*ECn, με f1+f2+…+fn = 1
- Τιμή μίγματος: pw = f1*p1* + *f2*p2 + … + fn*pn

1.4 Στόχοι και Ερευνητικά Ερωτήματα

Η εργασία στοχεύει στη συγκριτική αξιολόγηση τεχνολογιών αφαλάτωσης ως εναλλακτικής/συμπληρωματικής πηγής άρδευσης για θερμοκήπια στην Ανατολική Κρήτη, με έμφαση: (α) στην επίτευξη στοχευμένης ποιότητας νερού (EC/TDS, Na^+, Cl^-, B, pH) για υδροπονικά/εδάφους συστήματα, (β) στη μείωση κόστους μέσω μίξης πηγών και κατάλληλης επιλογής τεχνολογίας, και (γ) στη βιωσιμότητα ως προς ενέργεια και διαχείριση άλμης.

Η διεθνής τεκμηρίωση σε μεσογειακά θερμοκήπια δείχνει ότι η μίξη αφαλατωμένου θαλασσινού νερού (DSW) με υφάλμυρο υπόγειο νερό βελτιστοποιεί ταυτόχρονα ποιότητα και κόστος, ενώ το οικονομικά άριστο μείγμα συχνά απαιτεί υψηλότερο

ποσοστό DSW από την τρέχουσα πρακτική λόγω μείωσης αλατούχου στρες και αύξησης της απόδοσης (Reca et al., 2018) . Παράλληλα, οι πρόσφατες ανασκοπήσεις για αφαλάτωση στη γεωργία τεκμηριώνουν εύρη κόστους που εξαρτώνται από την κλίμακα/ανάκτηση, την τιμή ενέργειας και τη μίξη, με ιδιαίτερη σημασία στη σωστή διαχείριση άλμης και τη σύζευξη με ΑΠΕ (El Kharraz et al., 2023). Για ειδικές θερμοκηπιακές εφαρμογές, η MS-EDR (μονοσθενώς εκλεκτική ηλεκτροδιάλυση) προσφέρει πλεονεκτήματα στο «προφίλ» ποιότητας (εκλεκτική μείωση Na^+/Cl^-, σχετική διατήρηση Ca^{2+}/Mg^{2+}), όμως η οικονομική ισοτιμία με RO εξαρτάται από SEC, τιμή kWh και κόστος μεμβρανών (Ahdab et al., 2021) .

Κύριος σκοπός

Να αναπτυχθεί ένα **πλαίσιο λήψης αποφάσεων** για θερμοκήπια της Ανατολικής Κρήτης που:

1. καθορίζει **στόχους ποιότητας** νερού ανά καλλιέργεια/σύστημα,
2. επιλέγει **τεχνολογία αφαλάτωσης** και **στρατηγική μίξης** με βάση τροφοδοσία–κόστος–ενέργεια,
3. εκτιμά **δείκτες βιωσιμότητας** (€/m³, SEC, όγκος/αλμικότητα άλμης) και
4. προτείνει εφικτές οδούς σύζευξης με ΑΠΕ και μετριασμού περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Ειδικοί στόχοι

- **Τεχνικοί**: Να ποσοτικοποιηθούν οι απαιτήσεις ποιότητας (EC/TDS, Na^+, Cl^-, B, pH) και να αντιστοιχηθούν σε προϊόν RO/CCRO, EDR/EDR-MS μέσω μίξης ή επαναμεταλλικοποίησης (Reca et al., 2018; El Kharraz et al., 2023) .
- **Οικονομικοί**: Να εκτιμηθούν **κόστος νερού** (€/m³) για εναλλακτικές τεχνολογίες και σενάρια ενέργειας/ΑΠΕ, συμπεριλαμβάνοντας επιδράσεις μίξης και «κρυφών» δαπανών (π.χ. επαναμεταλλικοποίηση) (Ahdab et al., 2021; El Kharraz et al., 2023) .
- **Περιβαλλοντικοί**: Να εκτιμηθεί ο **όγκος/αλμικότητα άλμης** και να παρουσιαστούν **εναλλακτικές** διάθεσης/αξιοποίησης και μέτρα μετριασμού (El Kharraz et al., 2023) .

- **Λειτουργικοί/Ενεργειακοί**: Να αξιολογηθούν δείκτες **SEC** και προϋποθέσεις ανταγωνιστικότητας PV-τροφοδοτούμενων συστημάτων (Ahdab et al., 2021; El Kharraz et al., 2023) .

Ερευνητικά Ερωτήματα (ΕΕ1–ΕΕ5) και επιχειρησιακή μετάφραση

ΕΕ1. Ποιες τεχνολογίες αφαλάτωσης είναι οι πιο κατάλληλες για την άρδευση θερμοκηπίων στην Ανατολική Κρήτη;

ΕΕ2. Υπό ποιες προϋποθέσεις μπορεί το αφαλατωμένο νερό να ενσωματωθεί βιώσιμα στα συστήματα άρδευσης;

ΕΕ3. Ποια είναι η οικονομική βιωσιμότητα της χρήσης αφαλατωμένου νερού σε συνδυασμό με άλλες πηγές;

ΕΕ4. Ποιες είναι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και πώς μετριάζονται;

ΕΕ5. Πώς οι ΑΠΕ καθιστούν την αφαλάτωση οικονομικότερη/βιώσιμη;

Αναμενόμενη συμβολή

Η αναμενόμενη συμβολή της εργασίας είναι η διαμόρφωση ενός σαφούς πλαισίου λήψης αποφάσεων για την Ανατολική Κρήτη, το οποίο συνδέει τους στόχους ποιότητας νερού με τη μίξη διαφόρων πηγών, την επιλογή τεχνολογίας αφαλάτωσης και τις αντίστοιχες ενεργειακές παραμέτρους. Με αξιοποίηση της εμπειρίας από μεσογειακές εφαρμογές, το πλαίσιο αυτό επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση RO και MS-EDR υπό τοπικές συνθήκες, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο το εμφανές κόστος (επένδυση, ενέργεια, μεμβράνες), αλλά και τα «κρυφά» κόστη και οφέλη που συνδέονται με τη θρέψη και την επαναμεταλλικοποίηση του αρδευτικού νερού.
Η εργασία διαμορφώνει ένα πρακτικό πλαίσιο επιλογών για την Ανατολική Κρήτη, όπου ο παραγωγός ή ο φορέας διαχείρισης μπορεί να συνδυάζει στόχους ποιότητας νερού, μίξη διαφορετικών πηγών, επιλογή κατάλληλης τεχνολογίας αφαλάτωσης και σενάρια ενεργειακού εφοδιασμού. Βασίζεται σε τεχνογνωσία από ώριμες μεσογειακές εφαρμογές, όπως μίξη αφαλατωμένου θαλασσινού με υφάλμυρο, λειτουργία σε ώρες χαμηλής τιμής ενέργειας και συστήματα PV–RO,

προσαρμοσμένη στις τοπικές συνθήκες. Παράλληλα, εξετάζει συγκριτικά RO και MS-EDR υπό τις πραγματικές τιμές kWh, SEC και μεμβρανών, συνεκτιμώντας και τις «κρυφές» δαπάνες θρέψης και επαναμεταλλικοποίησης, ώστε να προκύπτουν ρεαλιστικές και εφαρμόσιμες επιλογές για τα θερμοκήπια της περιοχής.

Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση[MK2]

Το Κεφάλαιο 2 παρουσιάζει τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που στηρίζει θεωρητικά και τεχνικά την παρούσα εργασία. Εστιάζει στις διαθέσιμες τεχνολογίες αφαλάτωσης για γεωργική χρήση, με έμφαση στην αντίστροφη όσμωση (RO/CCRO), την ηλεκτροδιάλυση (ED/EDR, MS-EDR) και τις δυνατότητες μίξης αφαλατωμένου και υφάλμυρου νερού για άρδευση θερμοκηπίων σε μεσογειακά και ξηροθερμικά περιβάλλοντα. Παράλληλα, εξετάζονται ζητήματα ποιότητας νερού, ενεργειακού κόστους, περιβαλλοντικών επιπτώσεων (άλμη, κατανάλωση ενέργειας) και σύζευξης με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, με στόχο τη μεταφορά τεκμηριωμένης γνώσης στο πλαίσιο της Ανατολικής Κρήτης. Μέσα από αυτή τη δομημένη ανασκόπηση διαμορφώνεται το εννοιολογικό και μεθοδολογικό υπόβαθρο για τα ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας.

2.1 Τεχνολογίες αφαλάτωσης για γεωργική χρήση (RO/CCRO, EDR/MS-EDR, MCDI· σύντομη αναφορά σε θερμικές)

Η σύγχρονη βιβλιογραφία για την αφαλάτωση με σκοπό την άρδευση θερμοκηπίων συγκλίνει στις **μεμβρανικές τεχνολογίες** ως κορμό των εφαρμόσιμων λύσεων, με κυρίαρχες την **αντίστροφη ώσμωση (RO)** και τις **ηλεκτροδιαλυτικές διεργασίες (ED/EDR)**. Για υφάλμυρες τροφοδοσίες σε θερμοκήπια, η βιβλιογραφία εξετάζει επίσης τις παραλλαγές **CCRO** (κλειστού βρόχου αντίστροφης ώσμωσης) και **MS-EDR** (μονοσθενώς εκλεκτική ηλεκτροδιάλυση), ακριβώς επειδή επιτρέπουν **στοχευμένη προσαρμογή της ποιότητας** του νερού προϊόντος (π.χ. έλεγχος Na^+/Cl^- έναντι διατήρησης Ca^{2+}/Mg^{2+}) και άρα **ευθυγράμμιση** με τις ανάγκες της υδρολίπανσης στα θερμοκήπια (Nayar & Lienhard, 2020· Ahdab et al., 2021) . Παράλληλα, πρόσφατη ανασκόπηση για τη **γεωργία στη MENA** (Middle East and North Africa) επισημαίνει ότι η αφαλάτωση μπορεί να είναι λύση με **σαφή ενεργειακά/περιβαλλοντικά προαπαιτούμενα** και με ανάγκη ορθής διαχείρισης της άλμης. Η **σύζευξη με ΑΠΕ** (ιδίως PV) βελτιώνει τη βιωσιμότητα, αλλά το **κόστος** παραμένει καθοριστικός παράγοντας (El Kharraz et al., 2023) .

Αντίστροφη ώσμωση (RO) και CCRO Η RO αποτελεί ώριμη και ευρέως εφαρμοζόμενη τεχνολογία, με πολύ υψηλή απόρριψη αλάτων και δυνατότητα

παραγωγής νερού πολύ χαμηλού TDS, που λειτουργεί ως βασικό σημείο αναφοράς κόστους για υφάλμυρες τροφοδοσίες σε θερμοκήπια (Nayar & Lienhard, 2020). Το προϊόν της είναι ουσιαστικά μια «λευκή βάση σχεδόν αποϊονισμένο νερό » για υδρολίπανση, καθώς μαζί με τα ανεπιθύμητα άλατα αφαιρούνται και τα ωφέλιμα Ca^{2+} και Mg^{2+}, γεγονός που απαιτεί επαναμεταλλικοποίηση πριν την προσθήκη θρεπτικών. Σε προ-βιομηχανικές αξιολογήσεις, η RO και η ημι-ασυνεχής παραλλαγή CCRO επιτυγχάνουν βαθιά αποαλάτωση από υφάλμυρη τροφοδοσία ~850 ppm, ενώ οι EDR/MS-EDR στοχεύουν σε μερική αποαλάτωση με προϊόν γύρω στα 250 ppm, με την CCRO να στοχεύει σε υψηλότερες ανακτήσεις και βελτιωμένο ενεργειακό προφίλ (Nayar & Lienhard, 2020).

Ηλεκτροδιάλυση (ED/EDR) και μονοσθενώς εκλεκτική EDR (MS-EDR)

Η ηλεκτροδιάλυση (ED/EDR) προσφέρει μερική αποαλάτωση, με τυπικό προϊόν γύρω στα 250 ppm, κατάλληλο για άρδευση ή για μίξη με υφάλμυρο ή νερό RO ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι EC/TDS και Na^+/Cl^- (Nayar & Lienhard, 2020). Βασικός περιορισμός της κλασικής, μη εκλεκτικής EDR είναι ότι δεν ξεχωρίζει επαρκώς μεταξύ Na^+ και δισθενών, με αποτέλεσμα να μειώνονται παράλληλα και τα Ca^{2+}/Mg^{2+}. Η μονοσθενώς εκλεκτική MS-EDR υπερτερεί σε αυτό, καθώς οι εκλεκτικές μεμβράνες απομακρύνουν αναλογικά περισσότερο τα μονοσθενή (ιδίως Na^+) σε σχέση με τα δισθενή, κάτι που διατηρεί υψηλότερα επίπεδα Ca^{2+} και Mg^{2+} στο προϊόν και συνεπάγεται μικρότερη ανάγκη προσθήκης τους μέσω λίπανσης σε σύγκριση με την RO (Ahdab et al., 2021· Nayar & Lienhard, 2020).

MCDI (Membrane Capacitive Deionization)

Η **MCDI/CDI** απαντάται ως λύση **χαμηλής ενεργειακής έντασης** για **υφάλμυρα χαμηλού TDS** και συχνά προτείνεται όταν δεν απαιτείται πλήρη αποαλάτωση αλλά ως βελτίωση ποιότητας **polishing**. Στο πλαίσιο θερμοκηπίων, εμφανίζεται κυρίως **συμπληρωματικά** έναντι RO/EDR/MS-EDR ή χρησιμοποιείται όταν το νερό είναι **ήπια υφάλμυρο** (π.χ. TDS < 2.000–3.000 mg/L).

Πίνακας 2.1 – Σύνοψη τεχνολογιών αφαλάτωσης για γεωργική χρήση (RO/CCRO, EDR/MS-EDR, MCDI, θερμικές)

Τεχνολογία	Feed (TDS)	Προϊόν & χρήση	SEC & R	Βασικά υπέρ	Βασικά κατά	Τεκμηρίωση
RO / CCRO	Θαλάσσιο ~35–45 g/L και υφάλμυρο	Πολύ χαμηλό TDS ("λευκή βάση"), ιδανικό για υδροπονία· απαιτεί επαναμεταλλικοποίηση (Ca^{2+}/Mg^{2+})	Seawater: ~3.2 kWh/m³, R ~35–50%· σε υφάλμυρα χαμηλότερο SEC, υψηλότερο R	Ώριμη, έλεγχος Na^+/Cl^-/B, σταθερό προϊόν	Περισσότερη άλμη στο seawater· επαναμεταλλικοποίηση απαραίτητο	Evaluation (Eastern Crete); Nayar (2019)
EDR	Υφάλμυρο ~2–8 g/L	Ενδιάμεσο TDS για μίξη (setpoints θερμοκηπίου)	~2.03 kWh/m³ (brackish), R έως ~83%	Υψηλή ανάκτηση, χαμηλό κόστος σε «μερική» αποαλάτωση	Μη εκλεκτική (vs MS-EDR)· σε «βαθύ» στόχο αυξάνει SEC	Evaluation (Eastern Crete)
MS-EDR	Υφάλμυρο (έμφαση σε Na^+/Cl^-)	Εκλεκτική μείωση Na^+/Cl^-, διατήρηση Ca^{2+}/Mg^{2+} (ευνοϊκό για θρέψη/pH)	R υψηλό (brackish)· σε «βαθιά» μείωση μονοσθενών το SEC μπορεί > RO	Αγρονομικό πλεονέκτημα, λιγότερες ανάγκες επαναμεταλλικοποίηση	Συχνά ακριβότερη από RO (εξαρτάται από τιμή kWh/μεμβρανών)	Ahdab et al., 2021; Nayar (2019)
MCDI	Υφάλμυρο χαμηλό–μεσαίο TDS	Ενδιάμεσο TDS· "polishing" ή βασική διεργασία σε χαμηλά TDS feeds	40–70% χαμηλότερο SEC vs LPRO, R +10–20% vs LPRO	Πολύ χαμηλό ενεργειακό αποτύπωμα, ευελιξία/modular	Όχι κατάλληλη για «λευκή βάση» ή αυστηρό έλεγχο B	Evaluation (Eastern Crete)
Θερμικές (MSF/MED/MVC)	Θαλάσσιο/υπεραλμυρό, ειδικές περιπτώσεις	Πολύ χαμηλό TDS όταν υπάρχει φθηνή/απορριπτόμενη θερμότητα	Θερμική ενέργεια υψηλή· ηλεκτρική ποικίλει (MVC χαμηλότερη)	Ανθεκτικές σε δύσκολα feeds, αξιοποίηση waste heat	Υψηλό συνολικό κόστος για μικρομεσαία θερμοκήπια	CHAPTE2 (Desalination for Agriculture)

Πλαίσιο εφαρμογής στην Ανατολική Κρήτη[MK3]

Το πλαίσιο εφαρμογής στην Ανατολική Κρήτη αφορά μια παράκτια, ξηροθερμική περιοχή με περιορισμένους γλυκούς υδατικούς πόρους, όπου η βροχόπτωση (περίπου 400–600 mm/έτος) υπολείπεται σημαντικά της εξατμισοδιαπνοής (περίπου 1.200–1.600 mm/έτος) και οι υπόγειοι υδροφορείς είναι ήδη υπερεκμεταλλευμένοι και υφαλμυρισμένοι. Στις παράκτιες πεδιάδες αναπτύσσονται περίπου 2.000 ha

θερμοκηπίων, με καλλιέργειες υψηλής αξίας (τομάτα, αγγούρι, πιπεριά, άνθη) και αυξανόμενη χρήση υδροπονίας, που απαιτούν σταθερή και ελεγχόμενη ποιότητα αρδευτικού νερού. Η εγγύτητα στη θάλασσα, σε συνδυασμό με την υψηλή ηλιοφάνεια, καθιστούν ρεαλιστική την εξέταση της αφαλάτωσης, σε σύζευξη με ΑΠΕ ως συμπληρωματικής λύσης ενίσχυσης της ασφάλειας νερού για τα θερμοκήπια της περιοχής.

Με δεδομένες τις υδρογεωλογικές προκλήσεις και την ανάγκη **στοχευμένης ποιότητας άρδευσης** στα θερμοκήπια, οι επιλογές **RO/CCRO** και **EDR/MS-EDR** παρέχουν **διαφορετικά προφίλ προϊόντος** που μπορούν να ρυθμιστούν μέσω **μίξης** και (όπου απαιτείται) **επαναμεταλλικοποίηση**. Η **RO** προσφέρει προϊόν «λευκής βάσης[MK4]» και ενδείκνυται όταν απαιτείται **βαθιά αποαλάτωση** ή/και συστηματική μίξη.

Η **MS-EDR** είναι ελκυστική όπου θέλουμε **εκλεκτική μείωση Na^+/Cl^-** με **διατήρηση Ca^{2+}/Mg^{2+}**, περιορίζοντας έτσι **κρυφά κόστη θρέψης** υπό τις προϋποθέσεις **μείωσης κόστους μεμβρανών/ενέργειας** που συζητήθηκαν (Ahdab et al., 2021· Nayar & Lienhard, 2020). Στο περιβαλλοντικό σκέλος (άλμη, ενέργεια), απαιτείται **προληπτικός σχεδιασμός** και, όπου σκόπιμο, **υβριδικά** σχήματα για **μείωση/αξιοποίηση** ροών υψηλής αλατότητας (El Kharraz et al., 2023· Ahdab et al., 2021) .

Πίνακας 2.2 Βασικοί δείκτες και εξισώσεις για τη βιβλιογραφική ανασκόπηση

Δείκτης / Μεταβλητή	Ορισμός / Εξίσωση	Περιγραφή – Χρήση	Τεκμηρίωση (από τα ανεβασμένα αρχεία)
SEC (kWh/m³)	SEC = E / V_p	Ειδική κατανάλωση ενέργειας ανά παραγόμενο m³. Βασικός δείκτης σύγκρισης τεχνολογιών και σεναρίων ενέργειας.	Evaluation of Desalination Technologies for Greenhouse Irrigation in Eastern Crete; Ahdab et al. (2021)
Ανάκτηση R (—)	R = Qp / Qf	Κλάσμα τροφοδοσίας που μετατρέπεται σε προϊόν. Συνδέεται με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα (όγκος άλμης).	Evaluation of Desalination Technologies for Greenhouse Irrigation in Eastern Crete
Όγκος άλμης Q_b (m³)	Q_b = Q_f − Q_p = Q_f*(1 − R)	Παραγόμενος όγκος άλμης. Κρίσιμο μέγεθος για διάθεση/μετριασμό περιβαλλοντικών επιπτώσεων.	Evaluation of Desalination Technologies for Greenhouse Irrigation in Eastern Crete

Συγκέντρωση άλμης C_b (mg/L)	C_f*Q_f = C_p*Q_p + C_b*Q_b ⇒ C_b = (C_f*Q_f − C_p*Q_p) / Q_b	Μαζικό ισοζύγιο άλατος για προσδιορισμό αλμικότητας άλμης.	Evaluation of Desalination Technologies for Greenhouse Irrigation in Eastern Crete
EC μίγματος EC_w (dS/m)	EC_w = f1*EC_1 + f2*EC_2 + ... + fn*EC_n, με f1+f2+...+fn = 1	Γραμμική μίξη για επίτευξη setpoints αγωγιμότητας (θερμοκηπιακά συστήματα).	Reca et al. (2018); Evaluation of Desalination Technologies for Greenhouse Irrigation in Eastern Crete
Συγκέντρωση μίγματος C_mix (mg/L)	C_mix = f1*C_1 + f2*C_2 + ... + fn*C_n	Γραμμική μίξη ιόντων-κλειδιών (Na^+, Cl^-, B) για επίτευξη ορίων με ελάχιστο κόστος.	Reca et al. (2018)
Κόστος μίγματος p_w (€/m³)	p_w = f1*p_1 + f2*p_2 + ... + fn*p_n	Τελικό μοναδιαίο κόστος νερού μετά από μίξη πηγών/προϊόντων αφαλάτωσης.	Nayar (2019 preprint); Evaluation of Desalination Technologies for Greenhouse Irrigation in Eastern Crete
LCoW (€/m³)	LCoW ≈ (CAPEX_ann + OPEX_tot) / V_p	Εξισορροπημένο κόστος νερού: ενσωματώνει ετήσιο κεφαλαιακό κόστος και λειτουργικά έξοδα ανά όγκο παραγωγής.	Nayar (2019 preprint); Evaluation of Desalination Technologies for Greenhouse Irrigation in Eastern Crete
Ενέργεια αφαλάτωσης (ετήσια)	E_tot = SEC * V_p	Ετήσιο ενεργειακό αποτύπωμα της μονάδας για τον παραγόμενο όγκο νερού.	Evaluation of Desalination Technologies for Greenhouse Irrigation in Eastern Crete

2.2 Εφαρμογές αφαλάτωσης στη γεωργία/θερμοκήπια: διεθνείς εμπειρίες και καλές πρακτικές

Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι η αφαλάτωση μπορεί να ενταχθεί λειτουργικά και οικονομικά σε θερμοκηπιακές εκμεταλλεύσεις, όταν αντιμετωπίζεται ως συμπληρωματική πηγή και συνδυάζεται με μίξη άλλων υδατικών πόρων, στοχευμένη θρέψη (επαναμεταλλικοποίηση, όπου απαιτείται), ενεργειακή στρατηγική (time-of-use, ΑΠΕ) και ορθή διαχείριση άλμης.
Στη Μεσόγειο, πρακτικές εφαρμογές τεκμηριώνουν ότι η μίξη αφαλατωμένου θαλασσινού νερού (DSW) με υφάλμυρο υπόγειο νερό είναι ο βασικός «ρυθμιστής» για επίτευξη στόχων ποιότητας (EC/TDS, Na^+, Cl^-, B) με ελάχιστο δυνατό κόστος.

Μίξη πηγών: εργαλείο ρύθμισης ποιότητας–κόστους

Σε βελτιστοποιημένα μοντέλα θερμοκηπίων με DSW και υφάλμυρο υπόγειο νερό, το οικονομικά άριστο μείγμα συχνά απαιτεί υψηλότερο ποσοστό DSW από το συνήθως

εφαρμοζόμενο, επειδή η μείωση του αλατούχου στρες βελτιώνει την παραγωγικότητα και αντισταθμίζει την υψηλότερη τιμή ανά m^3 του DSW. Οι υπολογισμοί βασίζονται σε απλές γραμμικές σχέσεις που επιτρέπουν διαφανή σύνδεση ποιότητας–τιμής στο τελικό νερό:

- EC μίγματος: ECw = f1EC_1 + $f2$$EC_2$ + ... + fn*EC_n, με f1+f2+...+fn = 1
- Τιμή μίγματος: p_w = f1p_1 + $f2$p_2 + ... + fn*p_n
- Συγκέντρωση ιόντος (γενικά): Cmix = f1$C1$ + $f2$C2 + ... + fn*Cn

όπου:

f_i= κλάσμα (ποσοστό) από την πηγή i (π.χ. 0,3 = 30%)
EC_i= EC της πηγής i
p_i= τιμή νερού πηγής i (€/m^3)
C_i= συγκέντρωση κάποιου ιόντος (Na^+, Cl^-, NO_3^- κ.λπ.)

Οι ίδιες σχέσεις χρησιμοποιούνται σε βελτιστοποιητικά πλαίσια διαχείρισης άρδευσης θερμοκηπιακών καλλιεργειών στη Μεσόγειο (π.χ. Campo de Níjar), όπου τεκμηριώνεται και ο ρόλος των **διαφορετικών τιμολογίων ενέργειας** στη συμπίεση κόστους RO για αγροτική χρήση.

Τεχνολογικές επιλογές στο πεδίο: RO/CCRO, EDR και MS-EDR

Στις εφαρμογές θερμοκηπίων, η **RO/CCRO** χρησιμοποιείται όταν απαιτείται **βαθιά αποαλάτωση** (πολύ χαμηλό TDS/Cl^-) και «λευκή βάση» για υδρολίπανση. Συνοδεύεται συνήθως από **επαναμεταλλικοποίηση** (Ca^{2+}/Mg^{2+}) πριν την προσθήκη θρεπτικών. Αντιθέτως, η **EDR** (μερική αποαλάτωση) στοχεύει σε προϊόν **μερικών εκατοντάδων ppm** ως βάση μίξης. Η **MS-EDR** προσφέρει **εκλεκτική μείωση μονοσθενών** (Na^+, Cl^-) και **σχετική διατήρηση δισθενών** (Ca^{2+}, Mg^{2+}), στοιχείο αγρονομικά ευνοϊκό για τη θρέψη και τον έλεγχο pH. Πειραματικά δεδομένα σε θαλασσινές συνθέσεις δείχνουν λόγους απομάκρυνσης **Na^+:Ca^{2+} ~3.2–7.7** και

Na^+:Mg^{2+} ~4.2–7.1 Αυτές οι υψηλές αναλογίες δείχνουν ισχυρή εκλεκτικότητα υπέρ του **Na^+** → δηλαδή **το Na^+ απομακρύνεται πολύ περισσότερο** από Ca^{2+}/Mg^{2+} → ιδανικό για άρδευση.

Σε επίπεδο κόστους, η MS-EDR είναι σήμερα **ακριβότερη** από RO (κατά μέσο **+72%** χωρίς «savings», **+30%** με συνυπολογισμό εξοικονομήσεων λιπασμάτων/νερού), αλλά η **σύγκλιση** επέρχεται όταν (α) μειώνεται το **κόστος μεμβρανών** (π.χ. ~58 \$/m²), (β) το **κόστος ηλεκτρικής ενέργειας** είναι χαμηλό (≤ 0.08 \$/kWh) ή/και (γ) μειώνεται η **SEC** (π.χ. ~4.6–5.5 kWh/m³, ανά χώρα/τιμή kWh). Στις ίδιες αναλύσεις, καταγράφεται ότι η **RO** παραμένει συνήθως γραμμή βάσης κόστους για υφάλμυρες τροφοδοσίες θερμοκηπίων, με πλεονεκτήματα κλίμακας και δυνατότητα λειτουργίας των αντλιακών συστημάτων σε **ώρες χαμηλής τιμολόγησης ηλεκτρικής ενέργειας (time-of-use λειτουργίας)** (Ισπανία) για περαιτέρω συμπίεση κόστους .

Πιλοτικές και επιχειρησιακές εφαρμογές: Μεσόγειος και Μέση Ανατολή και Βόρεια Αφρική (MENA)

Η ανασκόπηση για τη γεωργία στη MENA καταγράφει:

(α) **Εκτεταμένη χρήση μίξης** (DSW + υφάλμυρο) για να τηρηθούν τα όρια ποιότητας με **χαμηλότερο κόστος**.

(β) **Οικονομίες κλίμακας** και **υψηλές ανακτήσεις** ως κλειδιά για μείωση κόστους (ενδεικτικό εύρος **0.46–1.32 USD/m³**, μέσο **~0.55 USD/m³**, ανά μέγεθος/πλαίσιο),

(γ) **Λειτουργία σε ζώνες χαμηλής τιμής ενέργειας** (Ισπανία: πολυζωνικά τιμολόγια) και

(δ) πιλοτικές λύσεις **PV-RO** (π.χ. MEDRC–SQU, 1.3 m³/h) με **εξατμισοδεξαμενές άλμης** για επίδειξη ορθής πρακτικής διάθεσης στο επίπεδο εκμετάλλευσης .

Παράλληλα, τεκμηριώνεται ότι η **αφαλάτωση στη γεωργία** είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για **καλλιέργειες υψηλής αξίας** και **ελεγχόμενα περιβάλλοντα** (CEA/θερμοκήπια), υπό προϋποθέσεις **ορθολογικής ενέργειας** και **διαχείρισης άλμης** .

Ενέργεια και ΑΠΕ στις εφαρμογές θερμοκηπίων

Για **PV-τροφοδοτούμενα** σχήματα (PV-RO, PV-MS-EDR), τα δεδομένα κόστους δείχνουν ότι παρά τη σημαντική μείωση λειτουργικού ενεργειακού κόστους το **πρόσθετο κεφαλαιουχικό κόστος PV** καθιστά το συνολικό κόστος **υψηλότερο** έναντι της συμβατικής τροφοδοσίας, εκτός αν το **ισοδύναμο κόστος PV** πέσει περίπου στα **0.10–0.20 $/kWh** (ενώ αναφορές για 0.32–0.46 $/kWh παραμένουν ασύμφορες σε τυπικά σενάρια).

Αναλυτικοί πίνακες για PV-RO/MS-EDR σε θερμοκήπιο ισπανικού πλαισίου καταδεικνύουν ακριβώς αυτή τη μεταβολή στο CapEx/OpEx και τη συνακόλουθη διαφοροποίηση ετήσιων δαπανών.

CapEx (Capital Expenditures) = Κεφαλαιουχικές δαπάνες = κόστος εγκατάστασης (π.χ. εξοπλισμός, μεμβράνες, PV πάνελ, δεξαμενές),

OpEx (Operational Expenditures) = Λειτουργικές δαπάνες = κόστος χρήσης (π.χ. ηλεκτρισμός, συντήρηση, αντικατάσταση μεμβρανών, αναλώσιμα).

Η σύζευξη με PV αλλάζει τη σχέση CapEx/OpEx:

Με PV:

- Το CapEx αυξάνεται (λόγω αγοράς πάνελ, inverter, βάσεων),
- Αλλά το OpEx μειώνεται σημαντικά (λόγω μηδενικού ή πολύ φθηνού ρεύματος) Με αποτέλεσμα η κατάταξη των ετήσιων δαπανών να αλλάζει.

Στο ίδιο πνεύμα, η **MS-EDR** γίνεται περισσότερο ελκυστική οικονομικά όσο **μειώνονται**

(i) το κόστος μεμβρανών,
(ii) το κόστος kWh ή/και

(iii) η **SEC** της διεργασίας, με σαφή σενάρια σύγκλισης κόστους έναντι RO στις αναλύσεις ευαισθησίας.

Περιβαλλοντική διάσταση: άλμη & κυκλικές χρήσεις

Η διαχείριση της άλμης αποτελεί την κύρια περιβαλλοντική πρόκληση της αφαλάτωσης. Η βιβλιογραφία προτείνει λύσεις μετριασμού και αξιοποίησης, όπως χρήση της άλμης σε υδατοκαλλιέργειες, καλλιέργεια αλμυρόφυτων (π.χ. Salicornia) και μικροαλγών όπως η Spirulina, καθώς και προοπτικές ανάκτησης αλάτων και μετάλλων (NaCl, Mg, Li κ.ά.), αν και αυτές παραμένουν σήμερα οικονομικά οριακές. Παράλληλα, η ευρύτερη χρήση μεμβρανικών προεπεξεργασιών συμβάλλει στη μείωση των χημικών στην απόρριψη, βελτιώνοντας το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η ανάγκη τεκμηριωμένης διαχείρισης της άλμης και συμμόρφωσης με ρυθμιστικά όρια είναι ιδιαίτερα έντονη σε παράκτια έργα, όπως αυτά σε περιοχές τύπου MENA.

Επιχειρησιακές κατευθύνσεις (best practices) που προκύπτουν από τις εφαρμογές.

1. **Καθορισμός στόχων ποιότητας** ανά καλλιέργεια/σύστημα (EC/TDS, Na^+, Cl^-, B, pH) και μετατροπή τους σε **στόχους μίξης** (χρήση των γραμμικών σχέσεων ECw, Cmix, pw). Η μίξη DSW με υφάλμυρο νερό αποτελεί «λεπτό ρύθμισμα» ποιότητας/κόστους, με **υψηλότερο μερίδιο DSW** όταν το όφελος από τη μείωση αλατότητας υπερκαλύπτει τη διαφορά τιμής .
2. **Επιλογή τεχνολογίας** βάσει τροφοδοσίας και **προφίλ ιόντων**:
   - Για θαλάσσιες/υψηλής αλατότητας τροφοδοσίες: **RO/CCRO** ως «λευκή βάση» (με επαναμεταλλικοποίηση και μίξη).
   - Για υφάλμυρες τροφοδοσίες: **EDR** για μερική αποαλάτωση όταν απαιτείται **αυστηρός έλεγχος Na^+/Cl^-** με διατήρηση Ca^{2+}/Mg^{2+}, **MS-EDR** (εφόσον οι οικονομικές προϋποθέσεις είναι ευνοϊκές).

3. **Ενέργεια & λειτουργία**: σε αυτή την κατεύθυνση τοποθετείται η αξιοποίηση **time-of-use** τιμολογίων (όπου υπάρχουν) καθώς και δύο σημαντικά τεχνικοοικονομικά πλεονεκτήματα:

   Οικονομίες κλίμακας:

   - Όσο **μεγαλύτερο** το σύστημα, τόσο **χαμηλότερο το κόστος ανά m³** (λόγω σταθερών δαπανών που επιμερίζονται σε μεγαλύτερη παραγωγή).

   Υψηλές ανακτήσεις:

   - Ποσοστό νερού που μετατρέπεται σε καθαρό (περατό) νερό έναντι της τροφοδοσίας.
   - Π.χ. μια RO με 75% recovery αποδίδει 75 λίτρα καθαρού νερού ανά 100 λίτρα τροφοδοσίας (ανάκτηση = λιγότερη απώλεια και μικρότερο κόστος ανά m^3)

4. **Άλμη**: πρόβλεψη ασφαλούς διάθεσης/αξιοποίησης (π.χ. εξατμισοδεξαμενές, επιλεγμένες κυκλικές χρήσεις) και **προεπεξεργασίες με μεμβράνες** για μείωση χημικών, με ρητή συμπερίληψη στο κοστολογικό/περιβαλλοντικό ισοζύγιο του έργου .

2.3 Οικονομική διάσταση: δείκτες κόστους νερού (€/m³, LCoW), ρόλος μίξης και «κρυφά» κόστη (επαναμεταλλικοποίηση/θρέψη)

Η οικονομική αξιολόγηση της αφαλάτωσης για άρδευση θερμοκηπίων δεν εξαντλείται στο «κόστος νερού στην έξοδο της μονάδας».

Για να είναι χρήσιμη στη λήψη αποφάσεων, πρέπει να συνυπολογίζει:

(α) Δείκτες κόστους νερού

- **€/m³**: πόσο πληρώνω για κάθε κυβικό μέτρο νερού που παράγεται.
- **LCoW (Levelized Cost of Water)**: ο «εξισωμένος»/μακροχρόνιος μέσος όρος κόστους νερού, που συνυπολογίζει επένδυση, λειτουργία, συντήρηση, διάρκεια ζωής κ.λπ. Είναι ένας πιο πλήρης δείκτης από το απλό €/m^3 μιας χρονιάς.

(β) **μίξη πηγών** και τη διαφάνεια που δίνει στις ανταλλαγές κόστους–ποιότητας,

(γ) «**κρυφά**» ή **έμμεσα κόστη** που προκύπτουν από την ποιότητα του προϊόντος (π.χ. ανάγκη επαναμεταλλικοποίησης μετά από RO, εξοικονομήσεις λίπανσης σε MS-EDR),

(δ) το **ενεργειακό σκέλος** (SEC, τιμή kWh, time-of-use) και

(ε) τις περιβαλλοντικές δαπάνες (π.χ. άλμη).

Η διεθνής βιβλιογραφία για θερμοκήπια στη Μεσόγειο και για «resource-intelligent» αγροτικά συστήματα καταγράφει εργαλεία, τιμές αναφοράς και ευαισθησίες που οριοθετούν πότε και πώς η αφαλάτωση είναι οικονομικά βιώσιμη.

Δείκτες κόστους και απλοί τύποι

Κόστος νερού ανά m³ (γραμμή βάσης τεχνολογίας):

Cost = (CAPEX_ann + OPEX_tot) / Vp

Αυτή είναι η βασική εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό **κόστους ανά κυβικό μέτρο παραγόμενου νερού** για μία τεχνολογία (π.χ. RO ή MS-EDR)

Όπου:

CAPEXann = Ετήσιο κόστος εγκατάστασης (π.χ. εξοπλισμός, PV, μεμβράνες κ.λπ.)

OPEXtot = Συνολικό ετήσιο λειτουργικό κόστος (ενέργεια, συντήρηση, αναλώσιμα κ.λπ.)

Vp = Όγκος παραγόμενου καθαρού νερού ανά έτος (m^3/έτος)

- **Εξισορροπημένο κόστος νερού (Levelized Cost of Water (LCoW)):**

LCoW ≈ (CAPEX_ann + OPEX_tot) / Vp

Αυτή είναι ίδια με την προηγούμενη **σε απλουστευμένη μορφή**, αλλά εδώ:

Στην πλήρη μορφή της, περιλαμβάνει:

Discount rate (r),

Χρόνους ζωής εξοπλισμού (n),

Υπολειμματική αξία

- **Κόστος μίγματος νερού:**

pw = f1*p1* + *f2*p2 + ... + fn*pn

pw: το τελικό κόστος ανά m^3 του νερού που προκύπτει από τη μίξη.

p_1, p_2, ..., p_n: τα κόστη ανά m^3 των πηγών νερού που αναμειγνύονται (π.χ. DSW, γεώτρηση, επιφανειακό).

f_1, f_2, ..., f_n: τα ποσοστά συμμετοχής κάθε πηγής στη συνολική παροχή

- **Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) του μίγματος:**

ECw = f1*EC1* + *f2*EC2 + ... + fn*ECn, με f1+f2+...+fn = 1

ECw: τελική ηλεκτρική αγωγιμότητα του μείγματος (σε μS/cm ή dS/m).

EC_i: αγωγιμότητα κάθε πηγής.

f_i: ποσοστό συμμετοχής κάθε πηγής.

- **Συγκέντρωση ιόντος στο μίγμα:**

Cmix = f1*C1* + *f2*C2 + ... + fn*Cn

C_{mix}: συγκέντρωση ενός συγκεκριμένου ιόντος στο τελικό μίγμα (σε mg/L ή mmol/L).

$\mathbf{C_i}$: συγκέντρωση του ιόντος στην κάθε πηγή.

$\mathbf{f_i}$: ποσοστό συμμετοχής της κάθε πηγής

Χρησιμοποιείται **ξεχωριστά για κάθε ιόν**: Na^+, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}, NO_3^-, B^+, κ.λπ.

Οι τρεις γραμμικές σχέσεις μίξης (EC, συγκέντρωση ιόντος, τιμή) είναι η «ραχοκοκαλιά» των βελτιστοποιητικών μοντέλων σε μεσογειακά θερμοκήπια που συνδυάζουν αφαλατωμένο θαλασσινό νερό (DSW) με υφάλμυρο υπόγειο νερό: επιτρέπουν ρητή στάθμιση ποιότητας–κόστους και τεκμηριώνουν γιατί το **οικονομικά άριστο μείγμα** συχνά έχει **υψηλότερο ποσοστό DSW** από το συνήθως εφαρμοζόμενο, καθώς το κέρδος από τη μείωση αλατούχου στρες βελτιώνει την απόδοση και αντισταθμίζει την υψηλότερη τιμή του DSW.

«Κρυφά» κόστη και εξοικονομήσεις που εξαρτώνται από την ποιότητα του προϊόντος

Τα «κρυφά» κόστη και οι αντίστοιχες εξοικονομήσεις σχετίζονται με το **τι ποιότητα νερού παράγει** η αφαλάτωση, πέρα από το άμεσο κόστος €/m³ και την ενέργεια. Ένα νερό πολύ «φτωχό» σε Ca^{2+} και Mg^{2+} (π.χ. προϊόν RO) αυξάνει το κόστος θρέψης και επαναμεταλλικοποίησης, ενώ ένα προϊόν με διατηρημένα δισθενή (π.χ. από MS-EDR) μειώνει την ανάγκη σε λιπάσματα. Αντίστοιχα, κακή ποιότητα (υψηλό Na^+, Cl^-, B) μπορεί να οδηγήσει σε απώλειες παραγωγής, προβλήματα στο δίκτυο άρδευσης και αυξημένα κόστη συντήρησης. Έτσι, η ποιότητα του νερού επηρεάζει σημαντικά το «πραγματικό» συνολικό κόστος χρήσης του, όχι μόνο την τιμή στην έξοδο της μονάδας.

RO/CCRO. Η RO απομακρύνει μονοσθενή (Na^+, Cl^-) αλλά και **δισθενή** (Ca^{2+}, Mg^{2+}), οπότε απαιτείται **επαναμεταλλικοποίηση** πριν την υδρολίπανση (προσθήκη Ca^{2+}/Mg^{2+} για επιθυμητή θρεπτική βάση και σταθερό pH). Σε αναλυτικό μοντέλο κόστους για θερμοκήπια, το «καθαρό» RO νερό επιβαρύνεται με **επιπλέον κόστος λιπασμάτων** (π.χ. γύψος/epsom) για να ανακτηθούν τα δισθενή στο θρεπτικό

διάλυμα. Ενδεικτικά, καταγράφονται μοναδιαία κόστη λίπανσης ανά ιόν (π.χ. για Ca^{2+} και Mg^{2+}), που εισάγονται ως «extra RO costs» στο οικονομικό ισοζύγιο.

Το αποτέλεσμα: ο συγκριτικός «λογαριασμός» RO έναντι εναλλακτικών δεν είναι μόνο θέμα €/m³ στην έξοδο της μεμβράνης, αλλά και €/στρέμμα-έτος σε λιπάσματα.

MS-EDR. Η μονοσθενώς εκλεκτική EDR αφαιρεί δυσανάλογα τα μονοσθενή (Na^+, Cl^-) και **διατηρεί** σε μεγάλο βαθμό Ca^{2+}, Mg^{2+} στο προϊόν, άρα μπορεί να προσφέρει **εξοικονομήσεις λίπανσης**/επαναμεταλλικοποίηση σε σχέση με RO. Σε ολοκληρωμένη μελέτη κόστους για θερμοκήπια, οι ετήσιες **εξοικονομήσεις** που πιστώνονται στην MS-EDR (έναντι RO) είναι σημαντικές (π.χ. τάξης χιλιάδων $/ha-yr), και εισάγονται ρητά στο μοντέλο ως «extra RO costs», μειώνοντας τη διαφορά κόστους μεταξύ των τεχνολογιών.
Ωστόσο, με **τρέχουσες τιμές μεμβρανών** και **SEC** η MS-EDR παραμένει ακριβότερη: κατά μέσο **+72%** χωρίς να ληφθούν υπόψη οι εξοικονομήσεις και **+30%** με την ενσωμάτωσή τους. Με **πτώση τιμής μεμβρανών** στο ~**58 $/m²** και/ή **χαμηλή τιμή ηλεκτρικής ενέργειας** (≤ **0.08 $/kWh**), η MS-EDR πλησιάζει την **ισοτιμία κόστους** με RO. Επιπλέον μείωση **SEC** (π.χ. ~**5.5 kWh/m³** σε ορισμένες χώρες/τιμές) ενισχύει τη σύγκλιση.

Ενέργεια, SEC και τιμή kWh: ο κρίσιμος μοχλός της οικονομίας
Το **ενεργειακό προφίλ** καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το €/m³. Η RO σε τυπικά εύρη **2–4.5 kWh/m³** διατηρεί πλεονέκτημα έναντι MS-EDR, η οποία, αναλόγως συνθηκών, απαντάται στην περιοχή **3.7–15 kWh/m³**. Κατά συνέπεια, το **κόστος kWh** και οι **στρατηγικές λειτουργίας** (π.χ. λειτουργία σε ζώνες χαμηλής τιμής – time-of-use) γίνονται κομβικά εργαλεία για τη συμπίεση κόστους στην αγροτική χρήση.
Ειδικά για θερμοκήπια της Μεσογείου, η βιβλιογραφία τεκμηριώνει αξιοποίηση πολυζωνικών τιμολογίων και βελτιστοποίηση λειτουργίας, ενώ η **μίξη** (βλ. παραπάνω τύπους) επιτρέπει να επιτευχθούν στόχοι ποιότητας με το **ελάχιστο δυνατό €/m³** σε πραγματικό χρόνο .
Σύζευξη με ΑΠΕ (PV).

Περιβαλλοντικά βελτιώνει το αποτύπωμα, αλλά οικονομικά είναι **ισότιμη** με τη συμβατική ηλεκτρική τροφοδοσία μόνο αν το **ισοδύναμο κόστος PV** πέσει από ~**0.32–0.46 $/kWh** σε περίπου **0.10–0.20 $/kWh** (για τα σημερινά SEC). Σε αντιπροσωπευτική ανάλυση 30 ha (Ισπανία), η **ενεργειακή δαπάνη** μειώνεται με PV, αλλά το **επιπλέον PV-CapEx** κάνει τα σχήματα **PV-RO/MS-EDR** ακριβότερα συνολικά, έναντι «grid-powered» επιλογών, υπό τα τρέχοντα κόστη φωτοβολταϊκών.

Μίξη πηγών: οικονομική ρύθμιση ποιότητας

Η γραμμική κοστολόγηση μίγματος (pw) δείχνει ξεκάθαρα γιατί η **μίξη DSW–υφάλμυρου** είναι ισχυρό εργαλείο: μειώνει το **οριακό κόστος** για επίτευξη συγκεκριμένου EC/στόχων ιόντων, σε σχέση με την αποκλειστική χρήση DSW. Το βελτιστοποιητικό πλαίσιο που εφαρμόστηκε σε μεσογειακό θερμοκήπιο κατέδειξε ότι, παρά την υψηλότερη τιμή DSW, το **οικονομικό optimum** μετατοπίζεται σε **υψηλότερα ποσοστά DSW** από την πρακτική, λόγω κέρδους από τη μείωση αλατότητας/στρες και της επίδρασης στην παραγωγικότητα/έσοδα.

Τι σημαίνουν όλα αυτά για τον σχεδιασμό στην Ανατολική Κρήτη

1. **Εργαλείο μίξης**: Χρήση των γραμμικών τύπων (ECw, Cmix, pw) για καθημερινή ρύθμιση ποιότητας–κόστους· στόχοι EC/Na^+/Cl^-/B επιτυγχάνονται με ελάχιστο €/m^3, με προσαρμογή των fi στη διακύμανση τροφοδοσίας/τιμών. Η διεθνής εμπειρία σε μεσογειακά θερμοκήπια τεκμηριώνει την οικονομική υπεροχή αυτού του πλαισίου .
2. **Επιλογή τεχνολογίας με βάση τα «κρυφά κόστη»**: Αν απαιτείται «λευκή βάση» και υπάρχει οργάνωση επαναμεταλλικοποίηση, η RO παραμένει προφανής λύση. Αν προέχει ο **αυστηρός έλεγχος Na^+** με **διατήρηση Ca^{2+}/Mg^{2+}** (μείωση κόστους θρέψης/χημικών), τότε **MS-EDR** αποκτά πλεονέκτημα, ιδίως εάν η τιμή kWh είναι χαμηλή ή/και οι μεμβράνες προσφέρονται σε **μειωμένες τιμές** .

3. **Ενέργεια–λειτουργία**: εξετάζονται **time-of-use** στρατηγικές και **μεγαλύτερη κλίμακα** (όπου είναι εφικτό) για μείωση €/m³. Η **PV σύζευξη** να αξιολογείται με ρεαλιστικά ισοδύναμα κόστη (στόχος **0.10–0.20 $/kWh** για ισοτιμία), αλλιώς το πρόσθετο PV-CapEx «σπρώχνει» προς τα πάνω το συνολικό €/m³, παρά τη μείωση ενεργειακών δαπανών .
4. **Άλμη**: Το τοπικό σχήμα διάθεσης επηρεάζει το LCoW. Σε περιπτώσεις με **μηδενική** ή πολύ χαμηλή δαπάνη διάθεσης (π.χ. ανάμειξη με θρεπτικές εκροές και χρήση εκτός θερμοκηπίου) τα σενάρια είναι ευνοϊκότερα· σε **επιβαρυμένα** πλαίσια (0.03–0.30 $/m³) το πλεονέκτημα τεχνολογιών που **μειώνουν τον όγκο άλμης**/αυξάνουν **R** ενισχύεται (υπολογιστικά: Qb = Qf − Q_p =Qf*(1 − R)) .

Πίνακας 2.3 – Οικονομικοί δείκτες (€/m³, LCoW) και παράμετροι κόστους (CAPEX/OPEX, μίξη, θρέψη)

Δείκτης / Παράμετρος	Ορισμός / Τύπος (ευθύ κείμενο)	Περιγραφή – Χρήση	Τεκμηρίωση (από τα ανεβασμένα αρχεία)
Μοναδιαίο κόστος πηγής (€/m³)	p_i (ανά πηγή/τεχνολογία)	Τιμή νερού ανά m³ πριν από μίξη· περιλαμβάνει ό,τι ορίζεται από τοπικό σενάριο (ενέργεια, αναλώσιμα, συντήρηση, διάθεση άλμης, επαναμεταλλικοποίηση όπου ισχύει).	Evaluation of Desalination Technologies for Greenhouse Irrigation in Eastern Crete; Nayar (2019 preprint)
Κόστος μίγματος (€/m³)	p_w = f1*p_1 + f2*p_2 + ... + fn*p_n (με f1+f2+...+fn = 1)	Τελικό κόστος νερού μετά από μίξη πηγών (π.χ. RO/EDR/MCDI προϊόν & υφάλμυρο). Βασικό εργαλείο ελαχιστοποίησης κόστους με ταυτόχρονη επίτευξη setpoints.	Nayar (2019 preprint); Reca et al. (2018)
Εξισορροπημένο κόστος νερού (LCoW, €/m³)	LCoW ≈ (CAPEX_ann + OPEX_tot) / V_p	Συνολικό κόστος παραγωγής νερού ανά m³, με ετήσια κεφαλαιακή επιβάρυνση (CAPEX_ann) και λειτουργικές δαπάνες (OPEX_tot).	Nayar (2019 preprint)
Ετήσια κεφαλαιακή επιβάρυνση	CAPEX_ann (γενικός όρος)	Ετήσιο κόστος κεφαλαίου μονάδας αφαλάτωσης (και PV όπου υπάρχει). Εισάγεται στον αριθμητή του LCoW.	Nayar (2019 preprint); Ahdab et al. (2021)
Λειτουργικά έξοδα – ενέργεια	Cost_energy ≈ SEC * Price_kWh (€/m³)	Κόστος ενέργειας ανά m³, με βάση το SEC και την τιμή kWh (grid/PV–ισοδύναμο). Κρίσιμος όρος OPEX.	Evaluation of Desalination Technologies for Greenhouse Irrigation in Eastern Crete;

			Ahdab et al. (2021)
Λειτουργικά έξοδα – αναλώσιμα/συντήρηση	OPEX_parts ⊂ OPEX_tot	Μεμβράνες/ηλεκτρόδια, χημικά, καθαρισμοί, ανταλλακτικά, εργασία. Συνεισφέρουν άμεσα στο €/m³ και στο LCoW.	Evaluation of Desalination Technologies for Greenhouse Irrigation in Eastern Crete
Κόστος διάθεσης άλμης	Cost_brine (€/m³ προϊόντος ή €/m³ άλμης)	Μη μηδενική χρέωση όπου εφαρμόζεται· μειώνεται με υψηλότερη ανάκτηση R (λιγότερος όγκος άλμης Q_b).	Evaluation of Desalination Technologies for Greenhouse Irrigation in Eastern Crete
Ανάκτηση (—)	R = Q_p / Q_f	Κρίσιμη για οικονομία/περιβάλλον: R↑ ⇒ Q_b↓. Επηρεάζει έμμεσα το κόστος (διάθεση άλμης, χημικά, ενέργεια).	Evaluation of Desalination Technologies for Greenhouse Irrigation in Eastern Crete
Όγκος άλμης (m³)	Q_b = Q_f − Q_p = Q_f*(1 − R)	Όγκος άλμης ανά m³ προϊόντος· σχετίζεται με περιβαλλοντική επιβάρυνση και πιθανό κόστος διάθεσης.	Evaluation of Desalination Technologies for Greenhouse Irrigation in Eastern Crete
Κόστος «θρέψης» / επαναμεταλλικοποίηση	Cost_nutrients / Cost_reion	Πρόσθετα κόστη για ρύθμιση Ca^{2+}/Mg^{2+}, pH και θρεπτικής ισορροπίας. Σε MS-EDR καταγράφονται «πιστώσεις θρέψης» λόγω διατήρησης δισθενών.	Ahdab et al. (2021)
Πίστωση/χρέωση θρέψης (MS-EDR vs RO)	Credit_nutrients ≈ 9,292–9,334 $/ha-yr	Ετήσιο οικονομικό όφελος στη θρέψη υπέρ MS-EDR σε θερμοκήπια (όταν συγκρίνεται με RO). Χρησιμοποιείται ως «πίστωση» στον συγκριτικό υπολογισμό €/m³.	Ahdab et al. (2021, Applied Energy)
Κόστος μίγματος με ποιότητα (συνδυασμός)	Minimize p_w subject to EC_w, C_mix setpoints	Βελτιστοποίηση κλασμάτων μίξης f_i για επίτευξη ποιοτικών στόχων (EC_w, C_mix) με ελάχιστο κόστος p_w.	Reca et al. (2018); Nayar (2019 preprint)

2.4 Περιβαλλοντική διάσταση: διαχείριση/διάθεση άλμης, κατανάλωση ενέργειας, αποτύπωμα εκπομπών

Η περιβαλλοντική διάσταση της αφαλάτωσης για θερμοκηπιακή άρδευση εστιάζει σε τρεις βασικούς άξονες: τη διαχείριση της άλμης, την κατανάλωση ενέργειας και το αποτύπωμα εκπομπών. Ο όγκος και η αλατότητα της άλμης απαιτούν προσεκτική διάθεση ή/και αξιοποίηση, ειδικά σε παράκτια περιβάλλοντα. Παράλληλα, το ενεργειακό φορτίο της διεργασίας (SEC) και η πηγή ενέργειας καθορίζουν τόσο το λειτουργικό κόστος όσο και τις εκπομπές. Η διεθνής εμπειρία σε ξηροθερμικές περιοχές, όπως η Μεσόγειος, αναδεικνύει ότι η αφαλάτωση μπορεί να είναι

περιβαλλοντικά βιώσιμη μόνο όταν συνδυάζεται με αυξημένη ανάκτηση, «έξυπνη» χρήση ενέργειας και ιδανικά σύζευξη με ανανεώσιμες πηγές (ΑΠΕ), ώστε να περιορίζεται η εξάρτηση από το δίκτυο και να μειώνονται οι συνολικές εκπομπές. (El Kharraz et al., 2023) .

2.4.1 Άλμη: όγκος, αλμικότητα, διάθεση και (όπου εφικτό) αξιοποίηση

Ο **όγκος** της άλμης (Qb) είναι γραμμική συνάρτηση της ανάκτησης (R), άρα κρίσιμος ρυθμιστής περιβαλλοντικού φορτίου και κόστους διάθεσης.

Παροχή άλμης: $Qb = Qf - Qp = Qf*(1 - R)$

Ανάκτηση: $R = Qp / Qf$

Η **αλμικότητα** της άλμης συναρτάται από τη συγκέντρωση τροφοδοσίας και την απόρριψη των ιόντων. Ένας απλός (μαζικός) ισολογισμός άλατος που συχνά χρησιμοποιείται περιγραφικά είναι:

- Ισολογισμός άλατος: $Cf Qf = Cp Qp + Cb Qb \Rightarrow Cb = (Cf Qf - Cp*Qp) / Qb$

Η βιβλιογραφία υπογραμμίζει ότι η **διαχείριση/διάθεση** της άλμης είναι η **πρωτεύουσα περιβαλλοντική πρόκληση** της αγροτικής αφαλάτωσης. Απαιτεί προληπτικό σχεδιασμό, συμμόρφωση με ρυθμιστικά όρια και, όπου είναι εφικτό, **μείωση του παραγόμενου όγκου** μέσω αύξησης ανάκτησης και βελτιστοποίησης των συνθηκών λειτουργίας (El Kharraz et al., 2023). Σημαντικό είναι επίσης ότι το τοπικό πλαίσιο διάθεσης μπορεί να **ανατρέψει** την οικονομία του έργου: όταν το κόστος διάθεσης είναι υψηλό, οι τεχνολογίες/στρατηγικές που **εξοικονομούν νερό** (με υψηλότερη R) μειώνοντας την άλμη αποκτούν περιβαλλοντικό **και** οικονομικό πλεονέκτημα (Ahdab et al., 2021) .
Παράλληλα, τεκμηριώνονται διαδικασίες μετριασμού/αξιοποίησης (valorization) όπου οι συνθήκες το επιτρέπουν, όπως **συμπύκνωση/ανάκτηση** αλάτων, και **βιολογικές χρήσεις** (π.χ. υδατοκαλλιέργεια, καλλιέργεια αλμυρόφυτων, Spirulina). Αν και οι περισσότερες τέτοιες επιλογές παραμένουν **οικονομικά οριακές** ή «case-specific», καταγράφονται **ενθαρρυντικές εφαρμογές** και επισημαίνεται ότι οι

μεμβρανικές προεπεξεργασίες συνεισφέρουν σε **μείωση χημικών** και σε καθαρότερες ροές προς απόρριψη (El Kharraz et al., 2023) .

2.4.2 Ενέργεια (SEC) και λειτουργικές επιλογές

Η **ειδική κατανάλωση ενέργειας** είναι βασικός δείκτης περιβαλλοντικής και οικονομικής επίδοσης:
Ειδική κατανάλωση ενέργειας: **SEC = E / Vp**
Η ειδική κατανάλωση ενέργειας (SEC) αποτελεί κρίσιμο κριτήριο επιλογής τεχνολογίας, καθώς επηρεάζει άμεσα τόσο το κόστος παραγωγής νερού όσο και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Σε εφαρμογές αφαλάτωσης θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού, η αντίστροφη όσμωση (RO) εμφανίζει συνήθως SEC μεταξύ 2 και 4.5 kWh/m³, ενώ η εκλεκτική ηλεκτροδιάλυση (MS-EDR) κυμαίνεται σε ευρύτερο φάσμα, από 3.7 έως και 15 kWh/m³, ανάλογα με τις συνθήκες και τον σχεδιασμό της μονάδας (Ahdab et al., 2021). Η διαφορά αυτή έχει άμεση επίδραση στο τελικό €/m³, ενώ σε περιοχές όπου η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται κυρίως από ορυκτά καύσιμα, η υψηλότερη SEC συνεπάγεται και αυξημένες εκπομπές, εντείνοντας την ανάγκη για ενεργειακά αποδοτικές λύσεις ή/και σύζευξη με ΑΠΕ. (El Kharraz et al., 2023).

Στο **επιχειρησιακό** επίπεδο, η βιβλιογραφία τονίζει δύο πρακτικές κατευθύνσεις για τη μείωση του περιβαλλοντικού φορτίου:

1. **Αύξηση ανάκτησης (R)** όπου είναι τεχνικοοικονομικά βιώσιμη: μειώνει το **Qb** (όγκο άλμης) και, σε βελτιστοποιημένες συνθήκες, το **μοναδιαίο κόστος**, συμβάλλοντας έμμεσα και στη μείωση των περιβαλλοντικών παρενεργειών (Ahdab et al., 2021) .
2. **Στοχευμένη λειτουργία** σε ζώνες χαμηλής τιμής/έντασης του δικτύου (**time-of-use**), πρακτική που έχει εφαρμοστεί σε μεσογειακά θερμοκήπια με RO για συμπίεση ενεργειακού κόστους και άρα έμμεση μείωση «οικονομικού βάρους» των εκπομπών (El Kharraz et al., 2023) .

2.4.3 ΑΠΕ και αποτύπωμα εκπομπών

Η σύζευξη αφαλάτωσης με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, κυρίως με φωτοβολταϊκά (PV), μειώνει σημαντικά το αποτύπωμα εκπομπών, βελτιώνοντας το περιβαλλοντικό

προφίλ των θερμοκηπιακών συστημάτων. Ωστόσο, παρά τα οφέλη στον λειτουργικό τομέα, οικονομικές αναλύσεις δείχνουν ότι το πρόσθετο κόστος επένδυσης για τα PV συστήματα (PV-CapEx) εξακολουθεί να καθιστά τα σχήματα αυτά ακριβότερα από τα αντίστοιχα που λειτουργούν με δίκτυο, τουλάχιστον στις σημερινές τιμές (El Kharraz et al., 2023· Ahdab et al., 2021).

Κρίσιμο εύρημα των μελετών αποτελεί ότι η ισοτιμία κόστους μεταξύ PV και συμβατικής ενέργειας απαιτεί σημαντική μείωση του ισοδύναμου κόστους PV, από ~0.32–0.46 $/kWh σε περίπου 0.10–0.20 $/kWh, σε συνδυασμό με χαμηλότερο SEC (Ahdab et al., 2021). Αν και το συμπέρασμα αυτό είναι κυρίως οικονομικό, έχει ισχυρή περιβαλλοντική προέκταση: όσο πιο οικονομικά βιώσιμη γίνεται η τροφοδότηση από PV, τόσο μειώνεται το λειτουργικό αποτύπωμα εκπομπών ανά κυβικό μέτρο παραγόμενου νερού, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα της αφαλάτωσης.

2.4.4 Ποιοτική–ποσοτική σύνδεση με τα θερμοκήπια: τι «ρίχνει» πραγματικά το αποτύπωμα

(i) Μείωση άλμης στη «πηγή»: Η ποιοτική και ποσοτική σύνδεση της αφαλάτωσης με τα θερμοκήπια αναδεικνύει ότι η αύξηση της ανάκτησης (R) αποτελεί κρίσιμο εργαλείο μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη η R, τόσο μικρότερος ο παραγόμενος όγκος άλμης (Qb), γεγονός που μειώνει τις απαιτήσεις για διάθεση και περιορίζει τις επιπτώσεις στα οικοσυστήματα. Επιπλέον, σε περιοχές όπου η διάθεση της άλμης έχει κόστος (ενδεικτικά 0.03–0.30 $/m³), η μείωση της Qb προσφέρει διπλό όφελος: μειώνει τα λειτουργικά έξοδα και ενισχύει τη συμμόρφωση με τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις, βελτιώνοντας έτσι τη συνολική βιωσιμότητα του συστήματος αφαλάτωσης για γεωργική χρήση. (Ahdab et al., 2021) .

(ii) «Ευφυής» επιλογή τεχνολογίας–μίξης: Στα θερμοκήπια, συστήματα μερικής αφαλάτωσης (EDR/MS-EDR) μπορούν να επιτύχουν προϊόν κατάλληλο για μίξη με επιθυμητή εκλεκτική μείωση Na^+/Cl^- και σχετική διατήρηση Ca^{2+}/Mg^{2+}, άρα μικρότερες ανάγκες επαναμεταλλικοποίηση από RO. Αυτό μειώνει έμμεσα χημικά/λιπάσματα στο σύστημα και βοηθά στη σταθερότητα pH/θρέψης, με περιβαλλοντικά οφέλη. Ωστόσο, η υψηλότερη ενεργειακή απαίτηση (SEC) της MS-EDR απαιτεί συμπληρωματική μίξη με άλλες πηγές και προσεκτικά στοχευμένη

λειτουργία, ώστε να επιτυγχάνεται συνολική αποδοτικότητα και βιωσιμότητα. (Ahdab et al., 2021) .

(iii) ΑΠΕ και λειτουργία: Η χρήση **PV** περιορίζει δραστικά το λειτουργικό αποτύπωμα, αλλά η **οικονομική** επίτευξη ισοτιμίας προϋποθέτει πτώση του ισοδύναμου κόστους PV στα ~0.10–0.20 $/kWh (για σημερινά SEC). Στο μεσοδιάστημα, η λειτουργία με βάση τις ζώνες χαμηλής τιμής ρεύματος (time-of-use) αποτελεί ρεαλιστική και άμεσα εφαρμόσιμη πρακτική, με διπλό όφελος: μείωση κόστους και περιορισμό εκπομπών μέσω αποφυγής χρήσης του δικτύου σε ώρες υψηλής έντασης άνθρακα. (Ahdab et al., 2021· El Kharraz et al., 2023) .

2.4.5 Συνοπτικές στρατηγικές για την βιώσιμη εφαρμογή της αφαλάτωσης στην Ανατολική Κρήτη

Πρόληψη και σχεδιασμός διάθεσης της άλμης στο αρχικό στάδιο: Η πρόληψη μπορεί να συμβεί μέσω της βελτιστοποίησης ανάκτησης (R) με περισσότερο καθαρό νερό και λιγότερης άλμης. Επίσης με την συντηρητική χρήση χημικών ώστε να ελαχιστοποιείται η ρύπανση της άλμης με πρόσθετες ουσίες καθώς και προεπεξεργασίες με μεμβράνες όπου χρειάζεται με σκοπό την βελτίωση της άλμης. Τέλος θα πρέπει να έχουμε εξ αρχής σαφή σχεδιασμό διάθεσης/διάχυσης της άλμης διερευνώντας **χαμηλού ρίσκου** αξιοποιήσιμων οδών (π.χ. ελεγχόμενη χρήση σε ανθεκτικές βιολογικές εφαρμογές) όταν και όπως επιτρέπεται (El Kharraz et al., 2023) .

- **SEC–R–μίξη ως ενιαίο πακέτο**: μικρότερη SEC και υψηλότερη R μειώνουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου **(GHG)** και τον όγκο άλμης **Qb**, ενώ η μίξη (DSW–υφάλμυρο) ισοσταθμίζει την ποιότητα με **ελάττωση** περιβαλλοντικών φορτίων σε σχέση με την αποκλειστική χρήση DSW/υψηλής αφαλάτωσης (Reca et al., 2018) .
- **ΑΠΕ με ρεαλιστική οικονομία**: Η αξιολόγηση χρήσης φωτοβολταϊκών (PV) πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα πραγματικά κόστη, όχι μόνο ιδεατές λύσεις. Έως ότου επιτευχθεί ισοτιμία **κόστους PV** με το δίκτυο (grid parity), δίνουμε προτεραιότητα σε **time-of-use** λειτουργία και σε λειτουργικές

βελτιστοποιήσεις που έχουν **άμεσο** περιβαλλοντικό όφελος (Ahdab et al., 2021)

2.5 Σύζευξη αφαλάτωσης με ΑΠΕ: τεκμηριωμένο κόστος–όφελος των φωτοβολταϊκών συστημάτων

Η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, κυρίως φωτοβολταϊκών (PV), στις μονάδες αφαλάτωσης για άρδευση θερμοκηπίων αναγνωρίζεται ως βασική στρατηγική για τη μείωση των εκπομπών και τη βελτίωση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Παρότι η χρήση PV μειώνει σημαντικά το λειτουργικό ενεργειακό κόστος (OpEx), το συνολικό κόστος παραγωγής νερού ανά κυβικό μέτρο (€/m³) μπορεί να αυξηθεί, λόγω του πρόσθετου κόστους επένδυσης (CapEx) για τα φωτοβολταϊκά συστήματα.
Η οικονομική ισορροπία επιτυγχάνεται όταν το ισοδύναμο κόστος της ηλιακής kWh πέσει στην περιοχή των 0.10–0.20 $/kWh ή όταν επιτευχθεί η «ισοτιμία με το δίκτυο» (grid parity). Τα ευρήματα αυτά επιβεβαιώνονται και από πρόσφατες διεθνείς ανασκοπήσεις, σύμφωνα με τις οποίες η βιωσιμότητα των ΑΠΕ είναι σαφής, αλλά η οικονομία αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα για την πρακτική υιοθέτηση των PV-τροφοδοτούμενων σχημάτων. (El Kharraz et al., 2023) .

2.5.1 Τι συμβαίνει στο κόστος όταν «μπαίνει» PV

Σε αναλυτική μελέτη για θερμοκηπιακή εκμετάλλευση 30 ha στην Ισπανία, διαπιστώθηκε ότι η χρήση φωτοβολταϊκών (PV) μειώνει σημαντικά το ετήσιο λειτουργικό κόστος ενέργειας – περίπου $90.000/έτος για PV–RO και $179.000/έτος για PV–MS-EDR, έναντι $283.000 και $566.000 αντίστοιχα για λειτουργία με ρεύμα δικτύου. Ωστόσο, το συνολικό ετήσιο κόστος παραμένει υψηλότερο στα σενάρια με PV λόγω του αυξημένου κόστους επένδυσης σε φωτοβολταϊκά συστήματα (π.χ. +$736.000/έτος για RO και +$1.472.000/έτος για MS-EDR στο συγκεκριμένο παράδειγμα). (Ahdab et al., 2021). Συνεπώς, τα PV–συστήματα είναι προς το παρόν οικονομικά λιγότερο ανταγωνιστικά σε σχέση με τα αντίστοιχα που λειτουργούν με ενέργεια δικτύου. Η ισοτιμία κόστους (cost parity) απαιτεί σημαντική μείωση της τιμής της παραγόμενης ηλιακής kWh – από περίπου 0.32–0.46 $/kWh σε 0.10–0.20

$/kWh – ανάλογα με την τεχνολογία και το ενεργειακό της αποτύπωμα (SEC). (Ahdab et al., 2021) .

Το **SEC** και το **κόστος kWh** κινούν ουσιαστικά το τελικό €/m³. Έτσι, τεχνολογίες με **χαμηλότερη SEC** (π.χ. RO) «ευνοούνται» οικονομικά με PV, αλλά εξακολουθούν να επιβαρύνονται αν το PV παραμένει ακριβό ως επένδυση (Ahdab et al., 2021) .

2.5.2 Σύγκριση RO και MS-EDR με και χωρίς PV: τεχνικοοικονομικά συμπεράσματα

Η τεχνολογία MS-EDR παρουσιάζει σημαντικά αγρονομικά πλεονεκτήματα έναντι της RO, καθώς προσφέρει εκλεκτική απομάκρυνση των μονοσθενών ιόντων Na^+/Cl^- και διατηρεί τα απαραίτητα δισθενή Ca^{2+}/Mg^{2+}, μειώνοντας έτσι τις ανάγκες για θρέψη και επαναμεταλλικοποίηση. Σε σενάρια θερμοκηπίων με θαλασσινή τροφοδοσία, οι ετήσιες εξοικονομήσεις σε θρέψη εκτιμώνται στα 9.292–9.334 $/ha (σύμφωνα με δεδομένα από Neosepta και Fujifilm) και λαμβάνονται υπόψη στο συνολικό κόστος ως «επιπλέον κόστος RO». (Ahdab et al., 2021).

Ωστόσο, παρά αυτά τα οφέλη, η MS-EDR εξακολουθεί να είναι ακριβότερη από την RO: περίπου +72% χωρίς πίστωση των εξοικονομήσεων και περίπου +30% όταν αυτές ενσωματωθούν. Το αυξημένο αυτό κόστος αποδίδεται κυρίως στην υψηλή τιμή των μεμβρανών MS-EDR (Neosepta ~180 $/m², Fujifilm ~162 $/m²) και στο μεγαλύτερο ενεργειακό της αποτύπωμα, καθιστώντας την οικονομικά λιγότερο ανταγωνιστική με τα σημερινά δεδομένα. (Ahdab et al., 2021) .

Οικονομική σύγκλιση MS-EDR και RO υπό ευνοϊκές συνθήκες

Η οικονομική ανταγωνιστικότητα της MS-EDR σε σχέση με την RO βελτιώνεται σημαντικά όταν πληρούνται συγκεκριμένες τεχνικοοικονομικές προϋποθέσεις: μείωση του κόστους των μεμβρανών σε περίπου 58 $/m² (όπως προβλέπεται με την τεχνολογική ωρίμανση των μεμβρανών Fujifilm), πτώση της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας σε ≤ 0.08 $/kWh και/ή μείωση του ειδικού ενεργειακού κόστους (SEC) της διεργασίας σε 4.6–5.5 kWh/m³. Υπό αυτές τις συνθήκες, η MS-EDR μπορεί να προσεγγίσει ή ακόμη και να εξισωθεί με το κόστος της RO, με διαφορές στο

συνολικό κόστος νερού που περιορίζονται σε ±1% σε περιοχές με φθηνή ενέργεια. (Ahdab et al., 2021). Συνεπώς, η επιλογή τεχνολογίας αφαλάτωσης σε θερμοκήπια που αξιοποιούν ΑΠΕ εξαρτάται όχι μόνο από την πηγή ενέργειας αλλά και από κρίσιμες παραμέτρους όπως το κόστος μεμβρανών, το SEC και οι τοπικές τιμές ηλεκτρικού ρεύματος.

2.5.3 Ο ρόλος των υβριδικών σχημάτων στην ενεργειακή βελτιστοποίηση της αφαλάτωσης

Τα υβριδικά σχήματα που συνδυάζουν τεχνολογίες αφαλάτωσης με τεχνικές ανάκτησης ενέργειας αναδεικνύονται ως καινοτόμες λύσεις για τη μείωση του ειδικού ενεργειακού κόστους (SEC) και τη βελτίωση της διαχείρισης άλμης. Τέτοια παραδείγματα περιλαμβάνουν τις συνδυασμένες διεργασίες RO–RED και MD–RED, στις οποίες η διαφορά αλατότητας αξιοποιείται μέσω της αντίστροφης ηλεκτροδιάλυσης (RED) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Ahdab et al., 2021, βιβλιογραφικές αναφορές σε Applied Energy). Αν και αυτά τα σχήματα βρίσκονται ακόμη σε στάδιο έρευνας ή πιλοτικής επίδειξης, κυρίως για εφαρμογές σε θερμοκήπια, παρέχουν σαφείς ενδείξεις για μελλοντικές ενεργειακά αποδοτικότερες λύσεις σε συνδυασμό με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), ενισχύοντας τη βιωσιμότητα των αγροδιατροφικών συστημάτων.

2.5.4 «Οικονομία συστήματος: ο ρόλος της κλίμακας, της μίξης και των παραδοχών κόστους

Η οικονομική απόδοση των συστημάτων αφαλάτωσης επηρεάζεται άμεσα από την κλίμακα, τη στρατηγική μίξης και τις υποκείμενες παραδοχές κόστους. Μεγαλύτερες μονάδες ή θερμοκηπιακές εκτάσεις επωφελούνται από οικονομίες κλίμακας, οδηγώντας σε χαμηλότερο ειδικό κόστος ($/m³), ενώ το συνολικό ετήσιο κόστος παραμένει σχεδόν γραμμικά εξαρτώμενο από το μέγεθος. Τα οικονομικά μοντέλα βασίζονται σε «λογιστικές» τιμές (π.χ. 0.32 $/m³ για υπόγειο νερό, 1.05 $/m³ για τιμή προϊόντος, 0 $/m³ για διάθεση άλμης όπου επιτρέπεται) ώστε να αποτυπωθεί με σαφήνεια η ευαισθησία σε τοπικές συνθήκες. (Nayar & Lienhard, 2020, preprint) . Σε πραγματικά σενάρια με κόστος διάθεσης άλμης, η αύξηση της ανάκτησης (R) και η μείωση της άλμης (Q_b) βελτιώνουν τόσο την οικονομική απόδοση όσο και το

περιβαλλοντικό αποτύπωμα, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα του συνολικού κόστους νερού (LCoW).

Τύποι που αξιοποιούνται στη σύζευξη ΑΠΕ–αφαλάτωσης

- Ανάκτηση: R = Qp / Qf
- Παροχή άλμης: Qb = Qf − Qp = Qf*(1 − R)
- Κόστος μίγματος: pw = f1p_1 + $f2$$p_2$ + ... + fn*pn
- EC μίγματος: ECw = f1EC_1 + $f2$$EC_2$ + ... + fn*ECn, με f1+f2+...+fn = 1

Οι παραπάνω σχέσεις επιτρέπουν να ρυθμίσουμε **ποιότητα–κόστος** μέσω **μίξης** (π.χ. DSW με υφάλμυρο), ενώ ο **ενεργειακός σχεδιασμός** (SEC, πηγή kWh) καθορίζει αν το **PV** μπορεί να γίνει **οικονομικά ισοδύναμο** με το grid parity στο εκάστοτε πλαίσιο (Nayar & Lienhard, 2020· Ahdab et al., 2021) .

2.5.5 Εφαρμογές για θερμοκήπια στην Ανατολική Κρήτη

1. Για τα θερμοκηπιακά συστήματα της Ανατολικής Κρήτης, η προτεραιότητα θα πρέπει να δίνεται στη μείωση της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας (SEC) και στην αξιοποίηση οικονομιών κλίμακας. Σε περιπτώσεις όπου επιλέγεται η άμεση χρήση φωτοβολταϊκών (PV), η τεχνολογία αντίστροφης όσμωσης (RO) προσφέρει οικονομικό πλεονέκτημα λόγω του χαμηλότερου SEC σε σχέση με την MS-EDR, ιδίως όσο το κόστος της ηλιακής kWh παραμένει υψηλό. Ωστόσο, η μετάβαση σε MS-EDR καθίσταται πιο συμφέρουσα όταν συνδυαστούν παράγοντες όπως χαμηλό ενεργειακό κόστος, βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης και πτώση του κόστους μεμβρανών.(Ahdab et al., 2021).
2. **Συστηματική μίξη πηγών.** Η ρύθμιση EC/ιόντων με μίξη DSW–υφάλμυρου βελτιστοποιεί ταυτόχρονα ποιότητα και κόστος. Η σύζευξη με ΑΠΕ δεν αναιρεί την ανάγκη μίξης, αντίθετα την καθιστά, ακόμη σημαντικότερη για να κρατηθεί το €/m³ χαμηλά (Nayar & Lienhard, 2020) .
3. **Ρεαλιστική προσέγγιση στο κόστος PV**
   Πριν η τιμή της ηλιακής ενέργειας φτάσει τα 0.10–0.20 $/kWh, τα πλήρως PV-τροφοδοτούμενα σχήματα (PV-RO, PV-MS-EDR) παραμένουν

ακριβότερα από τα αντίστοιχα του δικτύου, παρά τα χαμηλότερα λειτουργικά έξοδα. Η σταδιακή ένταξη PV μέσω net metering ή υβριδικών μοντέλων προσφέρει πρακτική μετάβαση. (Ahdab et al., 2021).

4. **Υβριδικά σχήματα ως μεσοπρόθεσμη επιλογή.** Τα υβριδικά σχήματα τύπου RO–RED ή MD–RED αποτελούν υποσχόμενες μεσοπρόθεσμες επιλογές, καθώς συνδυάζουν μείωση του ενεργειακού κόστους (SEC) με βελτιωμένη διαχείριση άλμης, και αξίζει να παρακολουθούνται καθώς εξελίσσονται τεχνολογικά. (Ahdab et al., 2021) .
5. **Περιβαλλοντικό όφελος με οικονομική λογική** Η χρήση φωτοβολταϊκών μειώνει σημαντικά τις εκπομπές, αλλά το περιβαλλοντικό και οικονομικό όφελος μεγιστοποιείται μόνο όταν συνδυάζεται με χαμηλό SEC, υψηλή ανάκτηση (R), αποδοτική μίξη και ρεαλιστική εκτίμηση του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας. (El Kharraz et al., 2023· Ahdab et al., 2021).

Κεφάλαιο 3. Περιοχή Μελέτης: Ανατολική Κρήτη

3.1 Γεωγραφικά, κλιματικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά

Η Ανατολική Κρήτη εμφανίζει το τυπικό αποτύπωμα άνυδρης–ημίξηρης μεσογειακής ζώνης, με ισχυρή εποχικότητα υετών, θερμά–ξηρά καλοκαίρια και ήπιους–υγρούς χειμώνες. Η άνιση κατανομή της βροχόπτωσης συμπίπτει με περιόδους αιχμής των αρδευτικών αναγκών, γεγονός που οξύνει το υδατικό έλλειμμα και εντείνει την εξάρτηση από υπόγειους πόρους και/ή μη συμβατικές πηγές (π.χ. αφαλάτωση) για τη θερμοκηπιακή γεωργία. Παράλληλα, η εποχική αύξηση της αστικής/τουριστικής ζήτησης νερού επιβαρύνει την κατανομή πόρων ακριβώς το καλοκαίρι, προκαλώντας ισχυρό ανταγωνισμό χρήσεων και πίεση στις τοπικές υδροληψίες .

Γεωγραφία & μορφολογία

Η παράκτια ζώνη της Ανατολικής Κρήτης χαρακτηρίζεται από εκτεταμένες, χαμηλού υψομέτρου λεκάνες και κοίλες ακτογραμμές που φιλοξενούν παραγωγικές θερμοκηπιακές συστάδες. Η γειτνίαση με τη θάλασσα δημιουργεί αφενός ευκαιρίες (διαθεσιμότητα θαλασσινής τροφοδοσίας για αφαλάτωση), αφετέρου κινδύνους (θαλάσσια διείσδυση σε υπεραντλούμενους υδροφορείς, με υφαλμύρινση). Η τροφοδοσία των υπόγειων νερών γίνεται από ενδοχωρικές λεκάνες απορροής δηλαδή **κλειστά γεωγραφικά συστήματα** όπου το νερό της βροχής ή επιφανειακής απορροής **συγκεντρώνεται** και **διεισδύει στο υπέδαφος**. Τα νερά που καταλήγουν στους **υδροφορείς** έχουν **διαφορετική ποιότητα.** Σε κάποιες περιοχές μπορεί να είναι **γλυκά**, σε άλλες **υφάλμυρα, με** εποχική διακύμανση αλατότητας ανάλογα με την άντληση και την αναπλήρωση

Κλίμα & ενεργειακό δυναμικό

Το κλιματικό προφίλ συνοψίζεται σε (i) χαμηλότερα ετήσια ύψη βροχής από τα δυτικότερα τμήματα του νησιού, (ii) μακρά ξηρή περίοδο, (iii) έντονη θερινή εξατμισοδιαπνοή, και (iv) υψηλό ηλιακό δυναμικό. Η Ανατολική Κρήτη καταγράφει υψηλή ετήσια ολική ακτινοβολία, στοιχείο που τη καθιστά κατάλληλη για **σύζευξη αφαλάτωσης με φωτοβολταϊκά (PV)**, ιδίως σε μονάδες με σταθερό φορτίο (π.χ. παραγωγή νερού «βάσης» για μίξη) και σε σχήματα **time-of-use** λειτουργίας

(μετατόπιση σε ωράρια χαμηλότερου κόστους δικτύου). Η αξιοποίηση ΑΠΕ βελτιώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της αφαλάτωσης, αν και η οικονομική ισοτιμία με τη συμβατική ενέργεια εξαρτάται από το ισοδύναμο κόστος PV και τα SEC των διεργασιών (βλ. Κεφ. 2.5) .

Υδρογεωλογικό πλαίσιο & ποιότητα υδάτων

Δύο βασικές κατηγορίες τροφοδοσίας είναι διαθέσιμες στο ανατολικό τμήμα του νησιού:

(α) Θαλάσσια τροφοδοσία, με TDS τυπικά ~35.000–45.000 mg/L, προσβάσιμη σχεδόν παντού κατά μήκος της ακτής (κατάλληλη για RO/CCRO).

(β) Υφάλμυρα υπόγεια, με TDS συχνά ~2.000–8.000 mg/L (κατάλληλα για μερική αφαλάτωση με EDR/MS-EDR και/ή MCDI ως polishing), υπό έντονη **εποχικότητα** λόγω άντλησης και ανεπαρκούς αναπλήρωσης κατά την ξηρή περίοδο .

Η **υφαλμύρινση** (θαλάσσια διείσδυση) αποτελεί επίμονο κίνδυνο στις παράκτιες υδροληψίες όταν η **άντληση** υπερβαίνει την **αναπλήρωση** (recharge). Σε τέτοιες περιπτώσεις, καταγράφεται αύξηση EC/TDS, Na^+ και Cl^- στα αντλούμενα νερά, δυσχεραίνοντας την απευθείας χρήση τους σε θερμοκήπια. Η αφαλάτωση εισάγεται ως εναλλακτική/συμπληρωματική πηγή που αποδίδει **σταθερό «προφίλ» ποιότητας νερού**, ικανό να καλύψει απαιτητικά αγρονομικά στοιχεία υδροπονικών και εδάφους συστημάτων (EC/TDS, Na^+, Cl^-, B, pH) με **μίξη** και, όπου απαιτείται, και επαναμεταλλικοποίηση/επαναιοντισμό πριν τη θρέψη (βλ. Κεφ. 2.1–2.3) .

Λειτουργική εποχικότητα και επιπτώσεις στη διαχείριση

Η **θερινή αιχμή** ζήτησης (θερμοκήπια + τουρισμός) συμπίπτει με τις **χαμηλότερες** εισροές (βροχή/επιφανειακά), αυξάνοντας τη **διακύμανση** τόσο της **διαθεσιμότητας** όσο και της **ποιότητας** των υπόγειων νερών. Το γεγονός αυτό καθιστά κρίσιμη τη χρήση **δυναμικής μίξης πηγών** με βάση την εποχική ποιότητα και τιμή.

Υδατικό ισοζύγιο (εννοιολογικό) για προγραμματισμό παραγωγής

Το **ευδατικό ισοζύγιο** αποτελεί ένα απλό εργαλείο σχεδιασμού για τη διαχείριση των υδατικών ροών σε θερμοκηπιακές μονάδες. Βασίζεται σε έναν λογιστικό υπολογισμό εισροών και εκροών, χωρίς να λαμβάνονται αρχικά υπόψη απώλειες ή διαρροές, ώστε να διευκολυνθεί ο προγραμματισμός παραγωγής και η αξιολόγηση αναγκών. Εάν απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια, οι απώλειες μπορούν να ενσωματωθούν ως πρόσθετος όρος. Το μοντέλο αυτό επιτρέπει τον έλεγχο ισορροπίας μεταξύ των διαθέσιμων υδάτων (π.χ. DSW, υπόγειο), της άρδευσης, της άλμης και των αποθεμάτων.

Ισοζύγιο αποθήκευσης: $S_{t+1} = S_t + Qin - Qut$

Παραγόμενη ποσότητα αφαλάτωσης: $Qdesal = R * Qf$

Παροχή άλμης: $Q_b = Qf - Q_p = Qf*(1 - R)$

Ανάκτηση: $R = Q_p / Qf$

Με βάση εποχικές καμπύλες ζήτησης (θερμοκήπιο) και προβλέψεις ποιότητας υπόγειων, προδιαγράφονται ελάχιστες **ικανότητες αποθήκευσης** (π.χ. 2–3 ημέρες αιχμής) και **προγράμματα λειτουργίας** που ευθυγραμμίζονται με **time-of-use** τιμολόγια για μείωση κόστους ενέργειας (βλ. Κεφ. 2.3–2.5) .

Συσχέτιση φυσικών/τεχνικών χαρακτηριστικών με επιλογή τεχνολογίας

Θαλάσσια τροφοδοσία (παράκτια): Προκρίνει RO/CCRO για βαθιά αποαλάτωση. Το προϊόν λειτουργεί ως «λευκή βάση» για μίξη με υπόγειο και επαναμεταλλικοποίηση πριν την υδρολίπανση (έλεγχος pH/δισθενών), με δυνατότητα PV-σύζευξης όπου το οικονομικό πλαίσιο είναι ευνοϊκό (κόστος PV, SEC RO) .

Υφάλμυρα υπόγεια (ενδοχώρα/παράκτιοι υδροφορείς):

Προκρίνεται **EDR/MS-EDR** για μερική/εκλεκτική αποαλάτωση (μείωση Na^+/Cl^-, σχετική διατήρηση Ca^{2+}/Mg^{2+}), συχνά με **υψηλότερες ανακτήσεις** και μικρότερο **Qb** η **MCDI** μπορεί να λειτουργήσει ως **polishing/προεπεξεργασία** για χαμηλότερα

TDS. Η τεχνολογική επιλογή οριστικοποιείται με βάση **στόχους ποιότητας**, **SEC**, **τιμή kWh** και **κόστος μεμβρανών** (βλ. Κεφ. 2.1–2.5) .

Περιβαλλοντικές–ρυθμιστικές παράμετροι

Σε παράκτιες εφαρμογές, η **διάθεση άλμης** υπόκειται σε ειδικές ρυθμίσεις/όρια. Ο **όγκος** και η **αλμικότητα** της άλμης ελέγχονται λειτουργικά μέσω της **ανάκτησης (R)** και της επιλεγμένης διεργασίας, ενώ η υιοθέτηση **μεμβρανικών προεπεξεργασιών** μειώνει τις ανάγκες χημικών και βελτιώνει το προφίλ της εκροής. Η **προληπτική** περιβαλλοντική αδειοδότηση και οι σαφείς οδοί διάθεσης/διάχυσης αποτελούν προϋποθέσεις ωρίμανσης έργων αφαλάτωσης στη ζώνη μελέτης (βλ. Κεφ. 2.4) .

«Συνοπτικά, τα βασικά κλιματικά και υδρογεωλογικά γνωρίσματα που διαμορφώνουν τη διαθεσιμότητα και ποιότητα νερού στην Ανατολική Κρήτη παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.1**, μαζί με τις επιχειρησιακές τους συνέπειες για την άρδευση θερμοκηπίων και τη χρήση αφαλάτωσης/μίξης.»

Πίνακας 3.1 – Κλιματικά/υδρογεωλογικά γνωρίσματα Ανατολικής Κρήτης (σύνοψη)

Γνώρισμα	Σύνοψη για Ανατολική Κρήτη	Επιπτώσεις για άρδευση θερμοκηπίων	Σημείωση για αφαλάτωση/μίξη
Κλιματικό πρότυπο (Μεσογειακό)	Ξηροθερμικά καλοκαίρια, ήπιοι υγροί χειμώνες· έντονη εποχικότητα υετού/εξατμισοδιαπνοής.	Θερινή λειψυδρία και αυξημένη ζήτηση άρδευσης στα θερμοκήπια.	Ανάγκη για αποθήκευση/εξομάλυνση παροχής και προσαρμογή προγραμμάτων άρδευσης.
Υδρολογία επιφανειακών υδάτων	Περιορισμένες μόνιμες απορροές· ροές με έντονη εποχικότητα και υψηλή διακύμανση.	Μικρή διαθεσιμότητα σταθερών επιφανειακών πόρων για άρδευση.	Έμφαση σε υπόγειους πόρους και συμπληρωματικές πηγές (αφαλάτωση/μίξη).
Υδρογεωλογία/ Υδροφορείς	Παράκτιοι και ενδοχώρας υδροφορείς με διαφοροποίηση ως προς βάθη/περατότητα.	Ευαισθησία σε υπεραντλήσεις και ποιοτική υποβάθμιση κοντά στην ακτογραμμή.	Παρακολούθηση στάθμης/αγωγιμότητας· επιλογή κατάλληλης τεχνολογίας (RO στη θάλασσα, EDR/MCDI στα υφάλμυρα).
Ποιότητα διαθέσιμων υδάτων	Μεταβλητή αλατότητα· παρουσία ιόντων-κλειδιών (Na^+, Cl^-, B) σε	Κίνδυνος αλατότητας/σοδοτικότητας	Στοχευμένη μερική αποαλάτωση + μίξη για

	αυξημένες τιμές το καλοκαίρι.	στη ριζόσφαιρα χωρίς έλεγχο ποιότητας.	επίτευξη setpoints (EC/TDS, Na^+, Cl^-, B).
Εποχικότητα υφαλμύρινσης	Εντονότερη το καλοκαίρι σε παράκτιες/υποπαράκτιες γεωτρήσεις λόγω ζήτησης/εξάτμισης.	Αστάθεια ποιότητας υφάλμυρου τροφοδοτικού νερού.	On-line μίξη με αφαλατωμένο προϊόν για σταθερότητα ποιότητας και κόστους.
Ενεργειακό/ΑΠΕ δυναμικό	Υψηλό δυναμικό ηλιοφάνειας για φωτοβολταϊκά· δυνατότητα υβριδικής λειτουργίας.	Περιθώρια μείωσης ενεργειακού OpEx στην παραγωγή αρδευτικού νερού.	ToU σήμερα· σταδιακή PV-σύζευξη όταν η PV-kWh προσεγγίσει το οικονομικό παράθυρο.
Λειτουργικές/περιβαλλοντικές παράμετροι	Ανάγκη ορθής διάθεσης άλμης ιδίως σε παράκτιες θέσεις· προεπεξεργασία με «λιτή» χημεία.	Ελαχιστοποίηση κινδύνων σε οικοσυστήματα και συμμόρφωση με τοπικούς περιορισμούς.	Σχεδιασμός για υψηλή ανάκτηση (R) σε brackish και τεκμηριωμένη διάθεση σε seawater–RO.

3.2 Θερμοκήπια: καλλιέργειες, συστήματα (υδροπονία/έδαφος), τυπικές ποιοτικές απαιτήσεις νερού

Η θερμοκηπιακή γεωργία στην Ανατολική Κρήτη χαρακτηρίζεται από καλλιέργειες υψηλής αξίας (τομάτα, αγγούρι, πιπεριά, ανθοκομικά), με ολοένα αυξανόμενη υιοθέτηση υδροπονικών συστημάτων. Στα υδροπονικά συστήματα, το νερό δεν είναι απλώς φορέας άρδευσης αλλά και το βασικό υπόστρωμα θρέψης, άρα η ποιότητά του καθορίζει τη σταθερότητα του θρεπτικού διαλύματος, τη συμπεριφορά του pH και την ικανότητα του παραγωγού να κρατά σταθερές τις παραμετρικές τιμές/ποιοτικές απαιτήσεις για EC/TDS και ιόντα-κλειδιά. Η διεθνής τεκμηρίωση για θερμοκήπια καταγράφει ότι οι παραγωγοί παρακολουθούν συστηματικά pH και αλατότητα (EC/TDS), καθώς αυτά αποτελούν τους δύο πρωτεύοντες δείκτες «καταλληλότητας» του νερού για υψηλές αποδόσεις σε ελεγχόμενο περιβάλλον (Nayar & Lienhard, 2020). Στο επιχειρησιακό πλαίσιο της Ανατολικής Κρήτης, οι απαιτήσεις για θερμοκηπιακή άρδευση συνοψίζονται σε στόχο TDS ~500–1.500 mg/L, pH 5.5–6.5 για συστήματα χωρίς έδαφος, και τήρηση αποδεκτών ορίων για συγκεκριμένα ιόντα-κλειδιά (Na^+, Cl^-, B^{3+}), τα οποία καθορίζουν ανοχές αλατότητας/τοξικότητας ανά καλλιέργεια (εφαρμόζονται μέσω μίξης πηγών και προσαρμογής της υδρολίπανσης) .

Καλλιέργειες και συστήματα καλλιέργειας (έδαφος vs υδροπονία)

Σε θερμοκηπιακές μονάδες με υδροπονία, η ανάγκη για «καθαρό νερό βάσης» (χαμηλό TDS, σταθερό pH, ελεγχόμενα ίχνη βορίου, περιορισμός Na^+/Cl^-) είναι εντονότερη, διότι τα άλατα της πηγής εισέρχονται απευθείας στο θρεπτικό διάλυμα. Ως εκ τούτου, λύσεις αφαλάτωσης όπως RO/CCRO χρησιμοποιούνται συχνά για να παραχθεί νερό «λευκής βάσης», πάνω στο οποίο εμπλουτίζεται η υδρολίπανση (με επαναμεταλλικοποίηση Ca^{2+}/Mg^{2+} και ακριβή δοσομέτρηση θρεπτικών). Αντίστροφα, στα συστήματα εδάφους οι ανοχές αλατότητας είναι συνήθως υψηλότερες, όμως και εκεί η εντεινόμενη αλατότητα (υφάλμυρο υπόγειο, υφαλμύρινση) αυξάνει το ρίσκο για Na^+/Cl^- και B^{3+}, ιδίως το καλοκαίρι. Σε κάθε περίπτωση, οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες προσδίδουν υψηλή αξία ανά m^3 νερού, γεγονός που καθιστά οικονομικά εύλογη την επένδυση σε «ποιότητα νερού» για σταθερή παραγωγικότητα/ποιότητα (Nayar & Lienhard, 2020) .

Τυπικές ποιοτικές απαιτήσεις νερού για θερμοκήπια (στόχοι – εργαλεία επίτευξης)

Η **ποιότητα νερού** για θερμοκήπια κυρίως στην υδροπονία βασίζεται σε 4 κρίσιμους παράγοντες: (α) αλατότητα (EC/TDS), (β) pH, (γ) μονοσθενή ιόντα (ιδίως Na^+ και Cl^-) και (δ) βόριο (B^{3+}). Στην πράξη, οι **βέλτιστες τιμές** που στοχεύουμε για **υδροπονικές καλλιέργειες** είναι TDS ~500–1.500 mg/L και pH 5.5–6.5 (με προσαρμογή ανά καλλιέργεια και στάδιο ανάπτυξης), ενώ για τα ιόντα-κλειδιά εφαρμόζονται agribest όρια μέσω μίξης/επιλογής τεχνολογίας/θρέψης (π.χ. έλεγχος B^{3+} με RO και έλεγχος Na^+/Cl^- με RO ή MS-EDR). Για να επιτευχθούν τα απαιτούμενα όρια **χωρίς υπερβολικό κόστος**, η πιο αποτελεσματική στρατηγική είναι η **μίξη νερών** σε σωστή αναλογία, σε συνδυασμό με κατάλληλη **τεχνολογία αφαλάτωσης** (όπως RO ή MS-EDR) (Reca et al., 2018· Nayar & Lienhard, 2020).

Σε θερμοκηπιακές εφαρμογές της Μεσογείου (όπως στην Ισπανία ή την Κρήτη), όπου χρησιμοποιείται **μίξη νερού**, έχει καταγραφεί ότι το οικονομικά άριστο μείγμα συχνά περιέχει υψηλότερο ποσοστό αφαλατωμένου σε σχέση με την «κοινή πρακτική»,

επειδή το αγρονομικό όφελος (μείωση στρες αλατότητας → μεγαλύτερη παραγωγή καλύτερη ποιότητα) υπερκαλύπτει τη διαφορά τιμής (Reca et al., 2018).

3.3 Ποιότητα διαθέσιμων υδάτων: εύρη EC/TDS, ιόντα-κλειδιά, εποχικότητα υφαλμύρινσης

Η Ανατολική Κρήτη διαθέτει δύο κύριες κατηγορίες υδατικών τροφοδοσιών για την άρδευση θερμοκηπίων: (α) θαλάσσιο νερό κατά μήκος της ακτογραμμής και (β) υφάλμυρα υπόγεια νερά στην ενδοχώρα και σε παράκτιους υδροφορείς που έχουν επηρεαστεί από υφαλμύρινση. Οι καταγραφές που χρησιμοποιούμε ως βάση σχεδιασμού συνοψίζονται ως εξής: TDS θαλάσσιου νερού 35.000–45.000 mg/L (παράκτιες θέσεις) και TDS υφάλμυρων υπόγειων 2.000–8.000 mg/L, με εποχική μεταβολή λόγω αλληλεπίδρασης άντλησης–επαναπλήρωσης και διεργασιών υφαλμύρινσης στους παράκτιους υδροφορείς . Στην έξοδο του συστήματος διαχείρισης/μίξης νερού για θερμοκήπια, ο στόχος ποιότητας προϊόντος (για χρήση ως «βάση» υδρολίπανσης, ιδίως σε υδροπονία) ορίζεται ενδεικτικά ως TDS 500–1.500 mg/L, με pH 5,5–6,5 και συγκεκριμένα όρια για ιόντα-κλειδιά Na^+, Cl^- και B^{3+} ανάλογα με την καλλιέργεια και το στάδιο ανάπτυξης .

3.3.1 Εύρη EC/TDS και σημασία τους για τα θερμοκήπια

Η αλατότητα του νερού (εκφραζόμενη ως EC ή TDS) αποτελεί τον πρώτο δείκτη καταλληλότητας για θερμοκηπιακή άρδευση. Σε υδροπονικά συστήματα, όπου το νερό αποτελεί το υπόστρωμα θρέψης, απαιτείται χαμηλό TDS και σταθερό pH ώστε να επιτυγχάνεται προβλέψιμη διαθεσιμότητα θρεπτικών και σταθερότητα του θρεπτικού διαλύματος. Στην πράξη, οι παραγωγοί σε μεσογειακές περιοχές στοχεύουν σε νερό αφαλάτωσης κατάλληλης ποιότητας, είτε μέσω RO για θαλασσινές τροφοδοσίες, είτε μέσω EDR, MS-EDR ή MCDI για υφάλμυρα νερά ώστε, με χρήση μίξης και επαναπροσθήκης ιόντων (επαναμεταλλικοποίηση) όπου χρειάζεται, να ρυθμίζουν την EC/TDS και τα βασικά ιόντα σύμφωνα με τα απαιτούμενα όρια της καλλιέργειας (setpoints).

Προφίλ τροφοδοσίας και στόχων (για χρήση στη Μεθοδολογία/Σενάρια):

- Θαλάσσιο νερό: TDS ≈ 35.000–45.000 mg/L → απαιτεί **βαθιά αποαλάτωση** (RO/CCRO) και επαναμεταλλικοποίηση.
- Υφάλμυρο υπόγειο: TDS ≈ 2.000–8.000 mg/L (με εποχική μεταβολή) → **μερική/εκλεκτική αποαλάτωση** (EDR/MS-EDR ή MCDI), με δυνατότητα διατήρησης Ca^{2+}/Mg^{2+}.
- Στόχος άρδευσης θερμοκηπίου: TDS ≈ 500–1.500 mg/L (προσαρμόζεται ανά καλλιέργεια), pH ≈ 5,5–6,5 (υδροπονία), **$Na^{+}/Cl^{-}/B^{3+}$ εντός ορίων** της εκάστοτε καλλιέργειας .

3.3.2 Ιόντα-κλειδιά (Na^{+}, Cl^{-}, B^{3+}) και λειτουργικές επιπτώσεις

Τα μονοσθενή Na^{+} και Cl^{-} συνδέονται με ωσμωτικό στρες και φυτοτοξικότητα σε ευαίσθητες καλλιέργειες (λαχανικά, ανθοκομικά), ενώ το βόριο (B^{3+}) έχει στενή σχέση μεταξύ επάρκειας και τοξικότητας. Σε θαλάσσιες τροφοδοσίες, η RO μειώνει αποτελεσματικά $B^{3+}/Na^{+}/Cl^{-}$ σε πολύ χαμηλά επίπεδα, δημιουργώντας «λευκή βάση» για υδρολίπανση (απαιτείται όμως επαναμεταλλικοποίηση Ca^{2+}/Mg^{2+}). Σε υφάλμυρες τροφοδοσίες, η EDR προσφέρει μερική αποαλάτωση, ενώ η MS-EDR επιτυγχάνει εκλεκτική μείωση των μονοσθενών (ιδίως Na^{+}, Cl^{-}) με σχετική διατήρηση των δισθενών (Ca^{2+}, Mg^{2+}), κάτι που ευνοεί την αγρονομία (μικρότερη ανάγκη επαναμεταλλικοποίησης, ευκολότερη σταθεροποίηση pH) και διευκολύνει την επίτευξη των παραμετρικών τιμών με μικρότερη «χημική παρέμβαση» στη θρέψη .

3.3.3 Εποχικότητα υφαλμύρινσης και μεταβλητότητα ποιότητας

Στις παράκτιες ζώνες της Ανατολικής Κρήτης, η υπεράντληση κατά την αρδευτική περίοδο και η χαμηλή αναπλήρωση (ξηρό καλοκαίρι) ενισχύουν το μέτωπο υφαλμύρινσης και αυξάνουν EC/TDS στα υπόγεια. Το αποτέλεσμα είναι εποχική υποβάθμιση ποιότητας (άνοδος Na^{+}/Cl^{-}/EC), που επιβάλλει δυναμική μίξη πηγών και ευελιξία στον τρόπο λειτουργίας της αφαλάτωσης (φορτία/ροές, setpoints προϊόντος) ώστε να διατηρούνται σταθερά τα όρια ποιότητας στο θερμοκήπιο όλον τον χρόνο . Η ίδια τεκμηρίωση προκρίνει on-line παρακολούθηση (TDS/EC, pH, επιλεγμένα ιόντα), αυτοματοποιημένη μίξη, και εφεδρική αποθήκευση 2–3 ημερών αιχμιακής ζήτησης ως βασικά λειτουργικά μέτρα αξιοπιστίας και ποιότητας .

3.3.4 Επιλογές τεχνολογίας με βάση την ποιότητα και την εποχικότητα

- **Θαλάσσια τροφοδοσία (παράκτια): RO/CCRO** για βαθιά αποαλάτωση, **χαμηλό TDS** και αποτελεσματικό έλεγχο **B^{3+}/Na^{+}/Cl^{-}**· κατόπιν **επαναμεταλλικοποίηση** (Ca^{2+}/Mg^{2+}) και **μίξη** για το τελικό setpoint (EC/TDS, pH).
- **Υφάλμυρη τροφοδοσία (ενδοχώρα/παράκτιοι υδροφορείς): EDR** για μερική αποαλάτωση και **MS-EDR** για **εκλεκτικό** έλεγχο **Na^{+}/Cl^{-}** με **διατήρηση Ca^{2+}/Mg^{2+}**, στοιχείο αγρονομικά ευνοϊκό και χρήσιμο σε εποχική υποβάθμιση ποιότητας· **MCDI** ως **polishing/προεπεξεργασία** σε χαμηλότερα TDS. Τα παραπάνω συνδυάζονται με **μίξη** ώστε να τηρούνται τα όρια **Na^{+}/Cl^{-}/B^{3+}** και ο στόχος **TDS 500–1.500 mg/L** .

3.3.5 Πλαισίωση από περιφερειακή/διεθνή τεκμηρίωση

Σε ευρύτερο μεσογειακό/MENA πλαίσιο, η βιβλιογραφία αναγνωρίζει την **αύξηση αλατότητας** και την **υφαλμύρινση** ως καθοριστικές προκλήσεις για την άρδευση, προτείνοντας την **αφαλάτωση** (ιδίως σε καλλιέργειες υψηλής αξίας/θερμοκήπια) και τη **μίξη** ως βασικές στρατηγικές προσαρμογής, με συνεκτίμηση **ενέργειας** και **άλμης** (βλ. Κεφ. 2.4–2.5) . Το πλαίσιο αυτό συμβαδίζει με τις **ειδικές συνθήκες** της Ανατολικής Κρήτης και ενσωματώνεται στο παρόν σχέδιο μεθοδολογίας/σεναρίων.

Κεφαλαιο 4. Μεθοδολογία

4.1 Σχεδιασμός βιβλιογραφικής έρευνας και κριτήρια ένταξης/αποκλεισμού

Σκοπός και πεδίο

Ο σχεδιασμός της βιβλιογραφικής έρευνας στοχεύει στην **αξιολόγηση τεχνολογιών αφαλάτωσης για άρδευση θερμοκηπίων** σε μεσογειακά/ξηροθερμικά περιβάλλοντα με έμφαση στην **Ανατολική Κρήτη**, καλύπτοντας: (α) τεχνική επίδοση (SEC, R, ποιότητα προϊόντος), (β) οικονομική βιωσιμότητα (€/m³, LCoW, επιδράσεις μίξης), (γ) περιβαλλοντικές επιπτώσεις (άλμη, ενέργεια, εκπομπές), (δ) σύζευξη με ΑΠΕ, και (ε) εφαρμοσμένη πρακτική σε θερμοκήπια. Η μεθοδολογία ακολουθεί **συστηματική αναζήτηση** και **δομημένη εξαγωγή δεδομένων**, όπως περιγράφεται στο συνοδευτικό «Evaluation of Desalination Technologies for Greenhouse Irrigation in Eastern Crete» (ενότητα *Research Questions and Methodology*), με χρονικό ορίζοντα ~2015–2025 και στόχευση σε Mediterranean/MENA και θερμοκηπιακές εφαρμογές .

Πηγές και κανάλια αναζήτησης

Η αναζήτηση βασίστηκε σε **επιστημονικές βάσεις** και τεκμηρίωση που περιλαμβάνονται στα ανεβασμένα αρχεία της εργασίας:

• **Διεθνείς βάσεις/ευρετήρια & πλατφόρμες** όπως αναφέρονται στο εκτελεστικό υπόμνημα (SciSpace, Google Scholar, PubMed), με εξαγωγή/φιλτράρισμα του υλικού που εντέλει περιλαμβάνεται στα αρχεία της εργασίας .

• **Peer-reviewed άρθρα και κεφάλαια βιβλίων** σχετικά με αφαλάτωση για γεωργία/θερμοκήπια (π.χ. El Kharraz et al., 2023), τεχνο-οικονομικές μελέτες για RO/EDR/MS-EDR (Nayar & Lienhard, 2020), καθώς και προδημοσιεύσεις/πλήρεις προεκτυπώσεις που περιλαμβάνονται στα αρχεία (π.χ. preprint Nayar 2019) .

• **Μελέτες/μοντέλα βελτιστοποίησης** για μίξη DSW–υφάλμυρου νερού σε θερμοκήπια (Reca et al., 2018) .

• **Εσωτερικό πλαίσιο** για Ανατολική Κρήτη (ερευνητικά ερωτήματα, μεθοδολογία, thresholds/στοχεύσεις ποιότητας, εύρη τροφοδοσιών) .

Λέξεις-κλειδιά και λογική αναζήτησης

Συνδυάστηκαν όροι: *desalination, greenhouse irrigation, RO, EDR, MS-EDR, MCDI, LCoW, specific energy, brine, mixing, Mediterranean, Crete*. Η λογική ήταν (ενδεικτικά):

("greenhouse" AND "desalination") AND ("RO" OR "EDR" OR "MS-EDR" OR "MCDI") AND ("cost" OR "LCoW" OR "SEC") AND ("mixing" OR "brine") AND ("Mediterranean" OR "MENA").

Το φιλτράρισμα εστίασε σε **θερμοκηπιακές/αγροτικές** εφαρμογές και **μεσογειακά** κλίματα, ώστε η τεκμηρίωση να είναι **απευθείας μεταφέρσιμη** στο κρητικό πλαίσιο (βλ. περιγραφή στο εκτελεστικό υπόμνημα) .

Κριτήρια ένταξης

Τύπος πηγής: Peer-reviewed άρθρα, ανασκοπήσεις, κεφάλαια επιστημονικών βιβλίων/πρακτικών και πλήρεις προεκτυπώσεις που περιέχονται στα ανεβασμένα αρχεία

1. Παραδείγματα:

   Τεχνολογική–οικονομική σύγκριση RO/CCRO/EDR/MS-EDR για θερμοκήπια (Nayar & Lienhard, 2020· preprint 2019). **Ανασκόπηση για αφαλάτωση στη γεωργία (MENA/Μεσόγειος)** με εστίαση σε κόστος–ενέργεια–άλμη–ΑΠΕ (El Kharraz et al., 2023) . **Βελτιστοποίηση μίξης** DSW–υφάλμυρου για θερμοκήπια (Reca et al., 2018) .

   Πλαίσιο/οδηγός για την περιοχή μελέτης (Evaluation report) .

- **Θεματικό περιεχόμενο**: Αφαλάτωση για άρδευση/θερμοκήπια ή μεταβίβαση τεκμηρίων απευθείας χρήσιμων για θερμοκηπιακή άρδευση: τεχνολογία (RO, EDR, MS-EDR, MCDI), δείκτες (SEC, R, LCoW), μίξη/ποιοτικά setpoints (EC/TDS, Na^+, Cl^-, B, pH), περιβάλλον (άλμη), ΑΠΕ.
- **Χωρική/κλιματική συνάφεια**: Μεσογειακές/παράκτιες/ξηροθερμικές περιπτώσεις (Ισπανία, Μάλτα, Β. Αφρική, Μ. Ανατολή) και το **περιφερειακό πλαίσιο Κρήτης** όπου αυτό συνοδεύεται από τεχνικές/οικονομικές παραδοχές στο εσωτερικό αρχείο .

- **Χρονικός ορίζοντας**: Κατά κανόνα 2015–2025, με **εξαιρέσεις** για κλασικές/θεμελιώδεις αναφορές που συνδέονται άμεσα με τα υπό εξέταση μεγέθη/μοντέλα (όπου περιλαμβάνονται στα αρχεία, π.χ. πρότυποι τύποι/μετρικές στη βιβλιογραφία κεφαλαίου) .

Κριτήρια αποκλεισμού

α) Πηγές εκτός των ανεβασμένων αρχείων ή **μη** peer-reviewed (π.χ. γενικά ενημερωτικά χωρίς επιστημονική τεκμηρίωση).
β) Μελέτες **αμιγώς αστικών** χρήσεων νερού χωρίς άμεση δυνατότητα μεταφοράς σε αγροτική/θερμοκηπιακή άρδευση.
γ) **Θερμικές** τεχνολογίες χωρίς σύνδεση με θερμοκηπιακή άρδευση (κρατούνται μόνο ως συγκριτικό υπόβαθρο όπου χρειάζεται και υπάρχει τεκμηρίωση στα αρχεία).
δ) Υλικό με **ελλιπή ποσοτικά στοιχεία** για κρίσιμες μεταβλητές (SEC, R, LCoW, ιόντα-κλειδιά) ή/και χωρίς σαφές πλαίσιο αγροτικής εφαρμογής.
ε) Δεδομένα **εκτός χρονικού παράθυρου** εφόσον υπάρχουν νεότερες/συγκρίσιμες πηγές μέσα στα αρχεία.

Διαδικασία επιλογής (screening) και τεκμηρίωση
Η επιλογή έγινε σε **δύο στάδια**: (1) πρωτογενές screening τίτλου/περιλήψεων στις αναφορές που **ήδη** περιλαμβάνονται στα αρχεία, (2) **πλήρης ανάγνωση** για εξαγωγή μεταβλητών και **κριτικό έλεγχο** μεταθετικότητας στο θερμοκηπιακό πλαίσιο Ανατολικής Κρήτης (με αναφορά στο *Regional Context* του εσωτερικού αρχείου). Το εσωτερικό υπόμνημα αναφέρει **συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση 440+ δημοσιεύσεων**, από τις οποίες αποστάχθηκαν οι πιο συναφείς για τα ερευνητικά ερωτήματα (ΕΕ1–ΕΕ5) .

4.2 Επιχειρησιακή ερμηνεία των ερευνητικών ερωτημάτων (ΕΕ1–ΕΕ5) με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία

Η διατύπωση των ερευνητικών ερωτημάτων ΕΕ1–ΕΕ5 δεν είναι μόνο θεωρητική, αλλά αποτυπώνει και τον τρόπο με τον οποίο η διεθνής βιβλιογραφία αξιολογεί την αφαλάτωση για γεωργική χρήση σε μεσογειακά, ξηροθερμικά περιβάλλοντα. Τα ερωτήματα μεταφράζονται σε συγκεκριμένα τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά

κριτήρια (ποιότητα νερού, ειδική ενεργειακή κατανάλωση, κόστος ανά m^3, διαχείριση άλμης, ενσωμάτωση ΑΠΕ), τα οποία χρησιμοποιούνται συστηματικά σε μελέτες για θερμοκηπιακές καλλιέργειες στην Ισπανία, στη Μέση Ανατολή και στη Βόρεια Αφρική, και είναι άμεσα μεταφέρσιμα στο πλαίσιο της Ανατολικής Κρήτης (Jauad El Kharraz,2023)

ΕΕ1 – Καταλληλότητα τεχνολογιών αφαλάτωσης για άρδευση θερμοκηπίων

Η βιβλιογραφία συγκλίνει στο ότι η αντίστροφη όσμωση (RO) αποτελεί την τεχνολογικά πιο ώριμη και ευρέως διαδεδομένη λύση για αγροτική αφαλάτωση, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για υφάλμυρα και θαλάσσια νερά σε παράκτιες, μεσογειακές περιοχές. Συγκριτικές αναλύσεις δείχνουν ότι τα συστήματα RO επιτυγχάνουν συνήθως χαμηλότερη ειδική ενεργειακή κατανάλωση και κόστος ανά m^3 σε σχέση με άλλες μεμβρανικές διεργασίες, ενώ μπορούν να παράγουν νερό πολύ υψηλής ποιότητας για άρδευση υψηλής αξίας καλλιεργειών (A. El-Gendi, 2021)

Ωστόσο, η υπερβολικά «βαθιά» αποαλάτωση (πολύ χαμηλή αγωγιμότητα, σχεδόν απιονισμένο νερό) δεν θεωρείται ιδανική για θερμοκηπιακές καλλιέργειες, καθώς αυξάνει την ανάγκη επαναμεταλλικοποίησης (παροχή Ca^{2+} και Mg^{2+}) και συμπληρωματικής λίπανσης. Για τον λόγο αυτό, αρκετές μελέτες για θερμοκήπια προτείνουν είτε μερική αποαλάτωση είτε μίξη του προϊόντος RO με υφάλμυρο νερό, με στόχο να επιτευχθούν στόχοι ως προς EC/TDS, Na^+, Cl^-, B και pH που είναι συμβατοί με τις ανάγκες των καλλιεργειών, χωρίς να μηδενίζεται πλήρως η σκληρότητα του νερού (J. Reca a, C, 2018)

Σε αυτό το πλαίσιο, τεχνολογίες εκλεκτικής ηλεκτροδιαπίδυσης (EDR, monovalent-selective EDR – MS-EDR) αναδεικνύονται ως ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες για αγροτικές εφαρμογές, επειδή επιτρέπουν «ρυθμιζόμενη» αποαλάτωση και διατήρηση ωφέλιμων δισθενών κατιόντων (Ca^{2+}, Mg^{2+}), ενώ μειώνουν κυρίως το NaCl. Σύγχρονες τεχνο-οικονομικές μελέτες δείχνουν ότι τα συστήματα MS-EDR μπορούν να παράγουν νερό με σαφώς χαμηλότερο Na^+ και κατάλληλο «προφίλ» ιόντων για άρδευση, με ενεργειακό κόστος συγκρίσιμο ή ελαφρώς υψηλότερο από το RO, ιδίως όταν αξιοποιούνται βελτιωμένες μεμβράνες και χαμηλό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (Yvana D.Ahdab, et.al 2020).

Συνολικά, τα κριτήρια που προκύπτουν από τη βιβλιογραφία για την απάντηση του ΕΕ1 αφορούν: (α) την ικανότητα της τεχνολογίας να διαμορφώσει ένα τελικό νερό με κατάλληλα EC/TDS, Na^+, Cl^-, B και pH, (β) τη δυνατότητα διατήρησης Ca^{2+}/Mg^{2+},

ώστε να περιορίζεται η ανάγκη επαναμεταλλικοποίησης, και (γ) την ειδική ενεργειακή κατανάλωση και το επίπεδο ωριμότητας/κλίμακας της τεχνολογίας σε αγροτικές εφαρμογές (Jamel Orfi et.al, 2025)

ΕΕ2 – Όροι βιώσιμης ενσωμάτωσης του αφαλατωμένου νερού στα δίκτυα άρδευσης

Για τη βιώσιμη ενσωμάτωση του αφαλατωμένου νερού στα συστήματα άρδευσης, η βιβλιογραφία δίνει έμφαση στη μίξη νερών διαφορετικής ποιότητας (desalinated seawater – DSW και υφάλμυρο/γεωτρητικά νερά) και στην ομοιομορφία άρδευσης σε επίπεδο αγρού. Το μοντέλο των Reca et al. για θερμοκήπια στη νοτιοανατολική Ισπανία δείχνει ότι η οικονομικά άριστη λύση είναι συνήθως ένα μίγμα DSW και υφάλμυρου νερού, με ποσοστό DSW υψηλότερο από αυτό που εφαρμόζεται στην πράξη, ακριβώς επειδή η μείωση της αλατότητας του νερού οδηγεί σε αύξηση της παραγωγικότητας και των εσόδων (Reca, J. & Trillo,2018).

Πρόσφατα εργαλεία λήψης απόφασης, όπως το Irriblend-DSW, επεκτείνουν αυτή τη λογική, βελτιστοποιώντας ταυτόχρονα μίγματα νερού διαφορετικής τιμής και ποιότητας και τα σχήματα λίπανσης, ώστε να ελαχιστοποιούν το συνολικό κόστος υδρολίπανσης, περιορίζοντας παράλληλα την έκπλυση θρεπτικών στοιχείων (Jauad El Kharraz 2023).

Από τις μελέτες αυτές προκύπτει ότι η «βιώσιμη ενσωμάτωση» δεν εξαρτάται μόνο από την τιμή του αφαλατωμένου νερού, αλλά από ένα σύνολο παραγόντων: αλατότητα και διαθεσιμότητα των τοπικών πηγών, ομοιομορφία άρδευσης, ανοχή των καλλιεργειών και δυνατότητα προσαρμογής των προγραμμάτων λίπανσης.

Επιπλέον, μελέτες που εξετάζουν την αφαλάτωση για αγροτική χρήση σε επίπεδο περιφέρειας τονίζουν ότι η βιωσιμότητα προϋποθέτει και ελεγχόμενο όγκο και αλμικότητα της άλμης, κατάλληλο σχεδιασμό διάθεσης (π.χ. διάχυση στη θάλασσα ή συνδυασμό με εξατμισοδεξαμενές, όταν δεν υπάρχει θαλάσσιο αποδέκτη) και ενεργειακό σχεδιασμό σε όρους SEC και τιμής kWh ((Jauad El Kharraz 2023). Τα στοιχεία αυτά συνδέουν το ΕΕ2 με δείκτες όπως: επίτευξη στόχων ποιότητας μέσω μίξης, έλεγχος της παραγωγής άλμης και διασφάλιση ομοιόμορφης και αξιόπιστης παροχής νερού σε επίπεδο θερμοκηπίου.

ΕΕ3 – Οικονομική βιωσιμότητα χρήσης αφαλατωμένου νερού και μίξης πηγών

Οι τεχνο-οικονομικές μελέτες για θερμοκηπιακή γεωργία συγκλίνουν ότι το κρίσιμο μέγεθος δεν είναι μόνο το «ονομαστικό» κόστος παραγωγής αφαλατωμένου νερού

(€/m³ στην έξοδο της μονάδας), αλλά το κόστος του τελικού μίγματος στην πύλη του αγρού, λαμβάνοντας υπόψη τη μίξη, τη λίπανση, την παραγωγικότητα των καλλιεργειών και την τιμή πώλησης της παραγωγής (J. Reca a, C. Trillo b, 2018) Η ανάλυση των Nayar & Lienhard για θερμοκηπιακή καλλιέργεια με υφάλμυρο νερό δείχνει ότι, για τυπικά μεσογειακά επίπεδα αλατότητας, η RO παραμένει η τεχνολογία με το χαμηλότερο κόστος νερού, αλλά η EDR/MS-EDR προσεγγίζει το κόστος αυτό όταν συνυπολογιστούν οι εξοικονομήσεις σε λιπάσματα (λόγω καλύτερου «προφίλ» ιόντων) και όταν το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλό. (A. El-Gendi* et.al, 2021).

Παράλληλα, η εργασία του Ahdab για monovalent-selective EDR σε θερμοκήπια καταδεικνύει ότι, με τις σημερινές τιμές μεμβρανών, το MS-EDR είναι κατά μέσο όρο ακριβότερο από το RO, αλλά το κόστος συγκλίνει όταν μειώνονται οι τιμές μεμβρανών και της ηλεκτρικής ενέργειας· σε ορισμένα σενάρια η διαφορά περιορίζεται σε περίπου μία τάξη μεγέθους 10 % σε σχέση με το RO (Yvana D.Ahdab, et.al 2020).

Σημαντικό εύρημα από τα μοντέλα βελτιστοποίησης μίξης είναι ότι η οικονομική βιωσιμότητα δεν συνδέεται με «ελάχιστη χρήση DSW», αλλά συχνά με υψηλότερα ποσοστά DSW από ό,τι επιλέγουν εμπειρικά οι παραγωγοί: καθώς η αλατότητα μειώνεται, η αύξηση παραγωγής και ποιότητας μπορεί να αντισταθμίσει την υψηλότερη τιμή ανά m³ του DSW (J. Reca a, C. 2018). Αυτό οδηγεί σε ένα συνεκτικό πλαίσιο για το ΕΕ3: η οικονομική αξιολόγηση πρέπει να γίνεται στο επίπεδο του τελικού μίγματος και της εκμετάλλευσης (€/m³ μίγματος, LCoW, καθαρό κέρδος ανά στρέμμα), λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή παραγωγής και κόστους λίπανσης.

ΕΕ4 – Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και στρατηγικές μετριασμού

Σε κλίμακα Μεσογείου, οι κυριότερες περιβαλλοντικές ανησυχίες σχετικά με την αφαλάτωση είναι η υψηλή ενεργειακή κατανάλωση (και οι αντίστοιχες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου), καθώς και η διάθεση της συμπυκνωμένης άλμης στους θαλάσσιους ή χερσαίους αποδέκτες. Πολιτική μελέτη για την περιοχή της Μεσογείου καταγράφει ότι η εντατική χρήση αφαλάτωσης, αν δεν συνδυαστεί με στροφή σε ΑΠΕ και βελτιωμένη διαχείριση της άλμης, αυξάνει το ενεργειακό αποτύπωμα και τον κίνδυνο τοπικών οικολογικών επιπτώσεων στο παράκτιο θαλάσσιο περιβάλλον (Bdredin Suliman,et.al 2024). Ανασκοπήσεις πάνω στις τεχνολογίες αφαλάτωσης

προτείνουν ένα σύνολο δεικτών «βιώσιμης αφαλάτωσης» (ενεργειακή απόδοση, ειδικός ενεργειακός δείκτης, κόστος νερού, δυνατότητα ανάκτησης πόρων από την άλμη, διαχείριση εκπομπών), με τους οποίους μπορούν να συγκριθούν οι τεχνολογίες μεταξύ τους και να αξιολογηθούν σενάρια πολιτικής. (Jamel Orfi et.al 2025). Ειδικά για τη γεωργία, οι El Kharraz et al. υπογραμμίζουν ότι η βιωσιμότητα της αφαλάτωσης συνδέεται στενά με την επίλυση δύο ζητημάτων: την παροχή ανταγωνιστικού κόστους νερού και την ανάπτυξη «έξυπνων» λύσεων για την άλμη (π.χ. αραίωση, σταδιακή ανάμειξη, πιθανή αξιοποίηση σε παραγωγή βιομάζας ή εξόρυξη αλάτων).(El Kharraz, et.al 2023).

Έτσι, το ΕΕ4 μεταφράζεται σε αξιολόγηση: (α) του όγκου και της αλμικότητας της παραγόμενης άλμης ανά m^3 μίγματος άρδευσης, (β) των διαθέσιμων επιλογών διάθεσης ή χρήσης της άλμης στις τοπικές συνθήκες, και (γ) της ενεργειακής έντασης του συστήματος (SEC, προέλευση ενέργειας και αντίστοιχες εκπομπές), σε συνάρτηση με τις τοπικές περιβαλλοντικές προτεραιότητες.

ΕΕ5 – Ρόλος των ΑΠΕ στην οικονομικότητα και βιωσιμότητα της αφαλάτωσης

Η διεθνής εμπειρία σε περιοχές MENA δείχνει ότι η σύζευξη αφαλάτωσης με φωτοβολταϊκά και άλλες ΑΠΕ αποτελεί βασική στρατηγική για τη μείωση του λειτουργικού κόστους και του ανθρακικού αποτυπώματος. Εκτενείς ανασκοπήσεις καταγράφουν ότι η ηλιακή ενέργεια, σε συνδυασμό με RO, έχει ήδη υλοποιηθεί σε μεγάλα έργα με ανταγωνιστικό κόστος νερού, ιδίως σε περιοχές με υψηλή ηλιοφάνεια και σχετικά υψηλές τιμές συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας.(Mohammad Al-Addous et.al 2024). Σε επίπεδο θερμοκηπίου, η εργασία του Ahdab για monovalent-selective ED σε θερμοκήπια καταδεικνύει ότι η οικονομικότητα των συστημάτων αυτών εξαρτάται έντονα από την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας: όταν το κόστος ηλεκτρισμού είναι χαμηλό (ή όταν η ενέργεια παρέχεται από φθηνή ηλιακή παραγωγή), η διαφορά κόστους σε σχέση με RO μειώνεται σημαντικά και μπορεί να καταστεί οριακά αμελητέα (Kishor G. Nayar et.al 2020).

Παράλληλα, ανασκοπήσεις για PV-RO στην περιοχή MENA καταλήγουν ότι η ηλιακή τροφοδότηση μειώνει τις εκπομπές και καθιστά την RO πιο οικονομική σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα, υπό την προϋπόθεση ότι το κόστος των φωτοβολταϊκών και των συστημάτων αποθήκευσης συνεχίζει να μειώνεται (Abderrahim Maftouh,et.al 2022)

Ένα ακόμη στοιχείο που αναδεικνύεται από πρόσφατες μελέτες είναι οι «λειτουργικές στρατηγικές» (time-of-use), δηλαδή η προσαρμογή της λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης στις ώρες χαμηλότερου κόστους ή υψηλής διαθεσιμότητας ΑΠΕ, με στόχο τη μείωση του μέσου κόστους kWh και τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος. (El-Gend et.al 2021). Κατά συνέπεια, για το ΕΕ5 οι κρίσιμοι δείκτες είναι: (α) η σύγκλιση κόστους μεταξύ συμβατικής και ηλιακής ηλεκτρικής ενέργειας, (β) οι απαιτήσεις σε SEC των διαφορετικών τεχνολογιών (RO, EDR, MS-EDR) ώστε να είναι οικονομικά ανταγωνιστικές υπό τροφοδότηση από ΑΠΕ, και (γ) ο σχεδιασμός λειτουργίας της μονάδας σε συνάρτηση με τα προφίλ παραγωγής των ΑΠΕ.

Σύνοψη

Η σύνθεση της βιβλιογραφίας δείχνει ότι τα ΕΕ1–ΕΕ5 δεν είναι ανεξάρτητα, αλλά αλληλοσυνδεόμενα: η επιλογή τεχνολογίας αφαλάτωσης (ΕΕ1) επηρεάζει τις δυνατότητες μίξης και βιώσιμης ένταξης στο δίκτυο άρδευσης (ΕΕ2), οι οποίες με τη σειρά τους καθορίζουν την οικονομική βιωσιμότητα σε επίπεδο εκμετάλλευσης (ΕΕ3). Παράλληλα, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις (ΕΕ4) εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον ενεργειακό σχεδιασμό και τη διαθεσιμότητα ΑΠΕ (ΕΕ5).
Με την επιχειρησιακή μετάφραση των ερωτημάτων σε συγκεκριμένους δείκτες (ποιότητα νερού, SEC, κόστος ανά m^3 μίγματος, χαρακτηριστικά άλμης, μερίδιο ΑΠΕ) και με βάση τα συμπεράσματα των υπαρκτών μελετών για θερμοκηπιακές και αγροτικές εφαρμογές στη Μεσόγειο, το κεφάλαιο 4.1 θεμελιώνει ένα συνεκτικό πλαίσιο αξιολόγησης που μπορεί να εφαρμοστεί στην Ανατολική Κρήτη, χωρίς να βασίζεται σε πρωτογενή δεδομένα, αλλά σε τεκμηριωμένες, δημοσιευμένες αναφορές.

4.1.Επιχειρησιακή ερμηνεία των ερευνητικών ερωτημάτων (ΕΕ1–ΕΕ5) με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία

Η διατύπωση των ερευνητικών ερωτημάτων ΕΕ1–ΕΕ5 δεν είναι μόνο θεωρητική, αλλά αποτυπώνει και τον τρόπο με τον οποίο η διεθνής βιβλιογραφία αξιολογεί την αφαλάτωση για γεωργική χρήση σε μεσογειακά, ξηροθερμικά περιβάλλοντα. Τα ερωτήματα μεταφράζονται σε συγκεκριμένα τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια (ποιότητα νερού, ειδική ενεργειακή κατανάλωση, κόστος ανά m^3, διαχείριση

άλμης, ενσωμάτωση ΑΠΕ), τα οποία χρησιμοποιούνται συστηματικά σε μελέτες για θερμοκηπιακές καλλιέργειες στην Ισπανία, στη Μέση Ανατολή και στη Βόρεια Αφρική, και είναι άμεσα μεταφέρσιμα στο πλαίσιο της Ανατολικής Κρήτης (Jauad El Kharraz, 2023)

ΕΕ1 – Καταλληλότητα τεχνολογιών αφαλάτωσης για άρδευση θερμοκηπίων

Η βιβλιογραφία συγκλίνει στο ότι η αντίστροφη όσμωση (RO) αποτελεί την τεχνολογικά πιο ώριμη και ευρέως διαδεδομένη λύση για αγροτική αφαλάτωση, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για υφάλμυρα και θαλάσσια νερά σε παράκτιες, μεσογειακές περιοχές. Συγκριτικές αναλύσεις δείχνουν ότι τα συστήματα RO επιτυγχάνουν συνήθως χαμηλότερη ειδική ενεργειακή κατανάλωση και κόστος ανά m^3 σε σχέση με άλλες μεμβρανικές διεργασίες, ενώ μπορούν να παράγουν νερό πολύ υψηλής ποιότητας για άρδευση υψηλής αξίας καλλιεργειών.(El-Gendi*.2021)

Ωστόσο, η υπερβολικά «βαθιά» αποαλάτωση (πολύ χαμηλή αγωγιμότητα, σχεδόν απιονισμένο νερό) δεν θεωρείται ιδανική για θερμοκηπιακές καλλιέργειες, καθώς αυξάνει την ανάγκη επαναμεταλλικοποίησης (παροχή Ca^{2+} και Mg^{2+}) και συμπληρωματικής λίπανσης. Για τον λόγο αυτό, αρκετές μελέτες για θερμοκήπια προτείνουν είτε μερική αποαλάτωση είτε μίξη του προϊόντος RO με υφάλμυρο νερό, με στόχο να επιτευχθούν στόχοι ως προς EC/TDS, Na^+, Cl^-, B και pH που είναι συμβατοί με τις ανάγκες των καλλιεργειών, χωρίς να μηδενίζεται πλήρως η σκληρότητα του νερού. (J. Reca a, C et.al 2018)

Σε αυτό το πλαίσιο, τεχνολογίες εκλεκτικής ηλεκτροδιαπίδυσης (EDR, monovalent-selective EDR – MS-EDR) αναδεικνύονται ως ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες για αγροτικές εφαρμογές, επειδή επιτρέπουν «ρυθμιζόμενη» αποαλάτωση και διατήρηση ωφέλιμων δισθενών κατιόντων (Ca^{2+}, Mg^{2+}), ενώ μειώνουν κυρίως το NaCl. Σύγχρονες τεχνο-οικονομικές μελέτες δείχνουν ότι τα συστήματα MS-EDR μπορούν να παράγουν νερό με σαφώς χαμηλότερο Na^+ και κατάλληλο «προφίλ» ιόντων για άρδευση, με ενεργειακό κόστος συγκρίσιμο ή ελαφρώς υψηλότερο από το RO, ιδίως όταν αξιοποιούνται βελτιωμένες μεμβράνες και χαμηλό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (Kishor G. Nayar et.al 2020).

Συνολικά, τα κριτήρια που προκύπτουν από τη βιβλιογραφία για την απάντηση του ΕΕ1 αφορούν: (α) την ικανότητα της τεχνολογίας να διαμορφώσει ένα τελικό νερό με κατάλληλα EC/TDS, Na^+, Cl^-, B και pH, (β) τη δυνατότητα διατήρησης Ca^{2+}/Mg^{2+}, ώστε να περιορίζεται η ανάγκη επαναμεταλλικοποίησης, και (γ) την ειδική

ενεργειακή κατανάλωση και το επίπεδο ωριμότητας/κλίμακας της τεχνολογίας σε αγροτικές εφαρμογές. (Jamel Orfi et.al 2025)

ΕΕ2 – Όροι βιώσιμης ενσωμάτωσης του αφαλατωμένου νερού στα δίκτυα άρδευσης

Για τη βιώσιμη ενσωμάτωση του αφαλατωμένου νερού στα συστήματα άρδευσης, η βιβλιογραφία δίνει έμφαση στη μίξη νερών διαφορετικής ποιότητας (desalinated seawater – DSW και υφάλμυρο/γεωτρητικά νερά) και στην ομοιομορφία άρδευσης σε επίπεδο αγρού. Το μοντέλο των Reca et al. για θερμοκήπια στη νοτιοανατολική Ισπανία δείχνει ότι η οικονομικά άριστη λύση είναι συνήθως ένα μίγμα DSW και υφάλμυρου νερού, με ποσοστό DSW υψηλότερο από αυτό που εφαρμόζεται στην πράξη, ακριβώς επειδή η μείωση της αλατότητας του νερού οδηγεί σε αύξηση της παραγωγικότητας και των εσόδων (J. Reca a, C.et.al 2018)

Πρόσφατα εργαλεία λήψης απόφασης, όπως το Irriblend-DSW, επεκτείνουν αυτή τη λογική, βελτιστοποιώντας ταυτόχρονα μίγματα νερού διαφορετικής τιμής και ποιότητας και τα σχήματα λίπανσης, ώστε να ελαχιστοποιούν το συνολικό κόστος υδρολίπανσης, περιορίζοντας παράλληλα την έκπλυση θρεπτικών στοιχείων (B. Gallego-Elvira et.al 2021). Από τις μελέτες αυτές προκύπτει ότι η «βιώσιμη ενσωμάτωση» δεν εξαρτάται μόνο από την τιμή του αφαλατωμένου νερού, αλλά από ένα σύνολο παραγόντων: αλατότητα και διαθεσιμότητα των τοπικών πηγών, ομοιομορφία άρδευσης, ανοχή των καλλιεργειών και δυνατότητα προσαρμογής των προγραμμάτων λίπανσης.

Επιπλέον, μελέτες που εξετάζουν την αφαλάτωση για αγροτική χρήση σε επίπεδο περιφέρειας τονίζουν ότι η βιωσιμότητα προϋποθέτει και ελεγχόμενο όγκο και αλμικότητα της άλμης, κατάλληλο σχεδιασμό διάθεσης (π.χ. διάχυση στη θάλασσα ή συνδυασμό με εξατμισοδεξαμενές, όταν δεν υπάρχει θαλάσσιο αποδέκτη) και ενεργειακό σχεδιασμό σε όρους SEC και τιμής kWh. (El Kharraz et.al 2023).Τα στοιχεία αυτά συνδέουν το ΕΕ2 με δείκτες όπως: επίτευξη στόχων ποιότητας μέσω μίξης, έλεγχος της παραγωγής άλμης και διασφάλιση ομοιόμορφης και αξιόπιστης παροχής νερού σε επίπεδο θερμοκηπίου.

ΕΕ3 – Οικονομική βιωσιμότητα χρήσης αφαλατωμένου νερού και μίξης πηγών

Οι τεχνο-οικονομικές μελέτες για θερμοκηπιακή γεωργία συγκλίνουν ότι το κρίσιμο μέγεθος δεν είναι μόνο το «ονομαστικό» κόστος παραγωγής αφαλατωμένου νερού (€/m^3 στην έξοδο της μονάδας), αλλά το κόστος του τελικού μίγματος στην πύλη του

αγρού, λαμβάνοντας υπόψη τη μίξη, τη λίπανση, την παραγωγικότητα των καλλιεργειών και την τιμή πώλησης της παραγωγής.,(J. Reca a & Trillo, C et.al 2018).

Η ανάλυση των Nayar & Lienhard για θερμοκηπιακή καλλιέργεια με υφάλμυρο νερό δείχνει ότι, για τυπικά μεσογειακά επίπεδα αλατότητας, η RO παραμένει η τεχνολογία με το χαμηλότερο κόστος νερού, αλλά η EDR/MS-EDR προσεγγίζει το κόστος αυτό όταν συνυπολογιστούν οι εξοικονομήσεις σε λιπάσματα (λόγω καλύτερου «προφίλ» ιόντων) και όταν το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλό (A. El-Gendi* et.al 2021).

Παράλληλα, η εργασία του Ahdab για monovalent-selective EDR σε θερμοκήπια καταδεικνύει ότι, με τις σημερινές τιμές μεμβρανών, το MS-EDR είναι κατά μέσο όρο ακριβότερο από το RO, αλλά το κόστος συγκλίνει όταν μειώνονται οι τιμές μεμβρανών και της ηλεκτρικής ενέργειας· σε ορισμένα σενάρια η διαφορά περιορίζεται σε περίπου μία τάξη μεγέθους 10 % σε σχέση με το RO (Kishor G. Nayar et.al 2021).

Σημαντικό εύρημα από τα μοντέλα βελτιστοποίησης μίξης είναι ότι η οικονομική βιωσιμότητα δεν συνδέεται με «ελάχιστη χρήση DSW», αλλά συχνά με υψηλότερα ποσοστά DSW από ό,τι επιλέγουν εμπειρικά οι παραγωγοί: καθώς η αλατότητα μειώνεται, η αύξηση παραγωγής και ποιότητας μπορεί να αντισταθμίσει την υψηλότερη τιμή ανά m^3 του DSW (J. Reca a & Trillo, C et.al 2018). Αυτό οδηγεί σε ένα συνεκτικό πλαίσιο για το ΕΕ3: η οικονομική αξιολόγηση πρέπει να γίνεται στο επίπεδο του τελικού μίγματος και της εκμετάλλευσης (€/m^3 μίγματος, LCoW, καθαρό κέρδος ανά στρέμμα), λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή παραγωγής και κόστους λίπανσης.

ΕΕ4 – Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και στρατηγικές μετριασμού

Σε κλίμακα Μεσογείου, οι κυριότερες περιβαλλοντικές ανησυχίες σχετικά με την αφαλάτωση είναι η υψηλή ενεργειακή κατανάλωση (και οι αντίστοιχες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου), καθώς και η διάθεση της συμπυκνωμένης άλμης στους θαλάσσιους ή χερσαίους αποδέκτες. Πολιτική μελέτη για την περιοχή της Μεσογείου καταγράφει ότι η εντατική χρήση αφαλάτωσης, αν δεν συνδυαστεί με στροφή σε ΑΠΕ και βελτιωμένη διαχείριση της άλμης, αυξάνει το ενεργειακό αποτύπωμα και τον κίνδυνο τοπικών οικολογικών επιπτώσεων στο παράκτιο θαλάσσιο περιβάλλον (Bdredin Suliman et.al, 2024).

Ανασκοπήσεις πάνω στις τεχνολογίες αφαλάτωσης προτείνουν ένα σύνολο δεικτών «βιώσιμης αφαλάτωσης» (ενεργειακή απόδοση, ειδικός ενεργειακός δείκτης, κόστος νερού, δυνατότητα ανάκτησης πόρων από την άλμη, διαχείριση εκπομπών), με τους οποίους μπορούν να συγκριθούν οι τεχνολογίες μεταξύ τους και να αξιολογηθούν σενάρια πολιτικής (**Jamel Orfi** et.al, 2025). Ειδικά για τη γεωργία, οι El Kharraz et al. υπογραμμίζουν ότι η βιωσιμότητα της αφαλάτωσης συνδέεται στενά με την επίλυση δύο ζητημάτων: την παροχή ανταγωνιστικού κόστους νερού και την ανάπτυξη «έξυπνων» λύσεων για την άλμη (π.χ. αραίωση, σταδιακή ανάμειξη, πιθανή αξιοποίηση σε παραγωγή βιομάζας ή εξόρυξη αλάτων). (El Kharraz et.al, 2023)
Έτσι, το EE4 μεταφράζεται σε αξιολόγηση: (α) του όγκου και της αλμικότητας της παραγόμενης άλμης ανά m^3 μίγματος άρδευσης, (β) των διαθέσιμων επιλογών διάθεσης ή χρήσης της άλμης στις τοπικές συνθήκες, και (γ) της ενεργειακής έντασης του συστήματος (SEC, προέλευση ενέργειας και αντίστοιχες εκπομπές), σε συνάρτηση με τις τοπικές περιβαλλοντικές προτεραιότητες.

EE5 – Ρόλος των ΑΠΕ στην οικονομικότητα και βιωσιμότητα της αφαλάτωσης

Η διεθνής εμπειρία σε περιοχές MENA δείχνει ότι η σύζευξη αφαλάτωσης με φωτοβολταϊκά και άλλες ΑΠΕ αποτελεί βασική στρατηγική για τη μείωση του λειτουργικού κόστους και του ανθρακικού αποτυπώματος. Εκτενείς ανασκοπήσεις καταγράφουν ότι η ηλιακή ενέργεια, σε συνδυασμό με RO, έχει ήδη υλοποιηθεί σε μεγάλα έργα με ανταγωνιστικό κόστος νερού, ιδίως σε περιοχές με υψηλή ηλιοφάνεια και σχετικά υψηλές τιμές συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας (Mohammad Al-Addous Et.al, 2024).

Σε επίπεδο θερμοκηπίου, η εργασία του Ahdab για monovalent-selective ED σε θερμοκήπια καταδεικνύει ότι η οικονομικότητα των συστημάτων αυτών εξαρτάται έντονα από την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας: όταν το κόστος ηλεκτρισμού είναι χαμηλό (ή όταν η ενέργεια παρέχεται από φθηνή ηλιακή παραγωγή), η διαφορά κόστους σε σχέση με RO μειώνεται σημαντικά και μπορεί να καταστεί οριακά αμελητέα (Yvana D.Ahdab et.al 2020).

Παράλληλα, ανασκοπήσεις για PV-RO στην περιοχή MENA καταλήγουν ότι η ηλιακή τροφοδότηση μειώνει τις εκπομπές και καθιστά την RO πιο οικονομική σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα, υπό την προϋπόθεση ότι το κόστος των φωτοβολταϊκών και των συστημάτων αποθήκευσης συνεχίζει να μειώνεται (Abderrahim Maftouh, et.al 2022)

Ένα ακόμη στοιχείο που αναδεικνύεται από πρόσφατες μελέτες είναι οι «λειτουργικές στρατηγικές» (time-of-use), δηλαδή η προσαρμογή της λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης στις ώρες χαμηλότερου κόστους ή υψηλής διαθεσιμότητας ΑΠΕ, με στόχο τη μείωση του μέσου κόστους kWh και τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος. (Ruoqing Wang1&WeiHe, 2024). Κατά συνέπεια, για το ΕΕ5 οι κρίσιμοι δείκτες είναι: (α) η σύγκλιση κόστους μεταξύ συμβατικής και ηλιακής ηλεκτρικής ενέργειας, (β) οι απαιτήσεις σε SEC των διαφορετικών τεχνολογιών (RO, EDR, MS-EDR) ώστε να είναι οικονομικά ανταγωνιστικές υπό τροφοδότηση από ΑΠΕ, και (γ) ο σχεδιασμός λειτουργίας της μονάδας σε συνάρτηση με τα προφίλ παραγωγής των ΑΠΕ.

Σύνοψη

Η σύνθεση της βιβλιογραφίας δείχνει ότι τα ΕΕ1–ΕΕ5 δεν είναι ανεξάρτητα, αλλά αλληλοσυνδεόμενα: η επιλογή τεχνολογίας αφαλάτωσης (ΕΕ1) επηρεάζει τις δυνατότητες μίξης και βιώσιμης ένταξης στο δίκτυο άρδευσης (ΕΕ2), οι οποίες με τη σειρά τους καθορίζουν την οικονομική βιωσιμότητα σε επίπεδο εκμετάλλευσης (ΕΕ3). Παράλληλα, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις (ΕΕ4) εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον ενεργειακό σχεδιασμό και τη διαθεσιμότητα ΑΠΕ (ΕΕ5).
Με την επιχειρησιακή μετάφραση των ερωτημάτων σε συγκεκριμένους δείκτες (ποιότητα νερού, SEC, κόστος ανά m^3 μίγματος, χαρακτηριστικά άλμης, μερίδιο ΑΠΕ) και με βάση τα συμπεράσματα των υπαρκτών μελετών για θερμοκηπιακές και αγροτικές εφαρμογές στη Μεσόγειο, το κεφάλαιο 4.1 θεμελιώνει ένα συνεκτικό πλαίσιο αξιολόγησης που μπορεί να εφαρμοστεί στην Ανατολική Κρήτη, χωρίς να βασίζεται σε πρωτογενή δεδομένα, αλλά σε τεκμηριωμένες, δημοσιευμένες αναφορές.

Κεφάλαιο 5. Αποτελέσματα

Κεφάλαιο 5. Συζήτηση Αποτελεσμάτων και Σύνθεση για την Ανατολική Κρήτη

Σε αυτό το κεφάλαιο τα αποτελέσματα της τεχνικής, οικονομικής και περιβαλλοντικής αξιολόγησης συντίθενται σε μια ενιαία, περισσότερο «ποιοτική» και επιχειρησιακή συζήτηση, όπως θα γινόταν σε μια σύγχρονη μελέτη αφαλάτωσης για γεωργία στη Μεσόγειο. Η ανάλυση οργανώνεται γύρω από τα ερευνητικά ερωτήματα ΕΕ1–ΕΕ5, με έμφαση στη μεταφορά γνώσης από τη διεθνή βιβλιογραφία στο συγκεκριμένο πλαίσιο της Ανατολικής Κρήτης.

5.1 Τεχνική καταλληλότητα τεχνολογιών για θερμοκηπιακή άρδευση (ΕΕ1)

Η διεθνής εμπειρία στη γεωργική αφαλάτωση συγκλίνει σε μια σχετικά καθαρή εικόνα:

Αντίστροφη ώσμωση (RO/CCRO) είναι το «σημείο αναφοράς» για θαλασσινό νερό, όταν απαιτείται πολύ χαμηλό TDS, πλήρης έλεγχος βορίου και μονοσθενών ιόντων, και σταθερή ποιότητα για υδροπονία ή μίξη. Οι σύγχρονες μονάδες θαλάσσιας RO στη Μεσόγειο επιτυγχάνουν μέτρια ειδική κατανάλωση ενέργειας και ιδιαίτερα υψηλή ποιότητα προϊόντος, αλλά με σχετικά χαμηλή ανάκτηση και αυξημένο όγκο άλμης (Kishor G. Nayar et.al,2020). **Ηλεκτροδιάλυση με αντιστροφή πόλωσης (EDR) και εκλεκτική ηλεκτροδιάλυση μονοσθενών (MS-EDR)** θεωρούνται σήμερα από τις πιο ενδιαφέρουσες λύσεις για υφάλμυρες τροφοδοσίες σε θερμοκήπια. Σε μεσογειακά περιβάλλοντα, όπου οι γεωτρήσεις συχνά έχουν TDS μερικών g/L, η EDR επιτρέπει «μερική» αποαλάτωση με υψηλές ανακτήσεις και ήπια άλμη. Η MS-EDR προσθέτει το κρίσιμο πλεονέκτημα της **εκλεκτικής απομάκρυνσης Na^+/Cl^- με διατήρηση Ca^{2+}/Mg^{2+}**, κάτι που ταιριάζει

ιδιαίτερα στις ανάγκες υδρολίπανσης και στα θερμοκηπιακά συστήματα κλειστού κύκλου (Kishor G. Nayar et.al,2020).

MCDI (Membrane Capacitive Deionization) αναδεικνύεται διεθνώς ως ευέλικτη λύση για νερά χαμηλής–μέσης αλατότητας: επιτυγχάνει **μερική μείωση EC/TDS με χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις και υψηλή ανάκτηση**, χωρίς να προσφέρει την «απόλυτη» καθαρότητα της RO. Κατά συνέπεια το προφίλ της την καθιστά πιο κατάλληλη είτε ως βασική διεργασία σε σχετικά ήπια υφάλμυρα νερά είτε ως τελικό «polishing» σε υβριδικά σχήματα (Tavishi Guleria,et,al 2024).

Στο πλαίσιο της **Ανατολικής Κρήτης**, όπου συνυπάρχουν:

- παράκτιες ζώνες με κίνδυνο υφαλμύρινσης και δυνατότητα άντλησης θαλασσινού νερού, και
- ενδοχώριες περιοχές με υφάλμυρες γεωτρήσεις που ήδη πιέζονται από άντληση για άρδευση. (Kapsalis Panagiotis, Kritsotaki Melpomeni , 2017).

η διεθνής βιβλιογραφία υποστηρίζει τις εξής τεχνικές κατευθύνσεις:

1. **Παράκτιες περιοχές**:
    - RO/CCRO ως κύρια διεργασία, με παραγωγή «λευκού» νερού πολύ χαμηλού TDS.
    - Υποχρεωτική επαναμεταλλικοποίηση (Ca^{2+}/Mg^{2+}) και εν συνεχεία μίξη με υφάλμυρο ή νερό ταμιευτήρων ώστε να επιτευχθούν θερμοκηπιακά setpoints (TDS 500–1.500 mg/L, κατάλληλο pH, έλεγχος Na^{+}/Cl^{-}/B) (Jauad El Kharraz et.ai, 2023)
2. **Ενδοχώρα με υφάλμυρες γεωτρήσεις**:
    - EDR ή MS-EDR όταν ο κύριος στόχος είναι μερική ή εκλεκτική αποαλάτωση και περιορισμός Na^{+}/Cl^{-}, με ταυτόχρονη διατήρηση Ca^{2+}/Mg^{2+} (Yvana D. Ahdab et.al, 2021)
    - MCDI όπου αρκεί μία ήπια μείωση EC/TDS και επιδιώκεται χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση και υψηλή ανάκτηση (π.χ. σε μικρότερες γεωτρήσεις ή σε υβριδικά σχήματα με συλλογή βρόχινου νερού) (I. S. Panagea et.al, 2016).

Συνολικά, ως προς το **ΕΕ1**, προκύπτει ότι **RO** είναι η τεχνολογία αναφοράς για θαλάσσιο νερό, ενώ για τα υφάλμυρα της Ανατολικής Κρήτης ένα «εργαλειοθήκη» που περιλαμβάνει **EDR/MS-EDR και MCDI** επιτρέπει τεχνικά πιο ευέλικτες και αγρονομικά φιλικές λύσεις.

5.2 Οικονομική βιωσιμότητα και μίξη πηγών (ΕΕ2–ΕΕ3)

Η οικονομική ανάλυση των τεχνολογιών δεν μπορεί να αποσπαστεί από δύο βασικούς παράγοντες:
(α) το κόστος ενέργειας και μεμβρανών, και
(β) τη **στρατηγική μίξης** desalinated–υφάλμυρου νερού.

Μελέτες κόστους για θερμοκήπια δείχνουν ότι:
Η **RO από θαλασσινό νερό** προσφέρει την χαμηλότερη τιμή ανά m^3 για πολύ χαμηλό TDS, όταν συμπεριληφθούν όλες οι τεχνολογίες που μπορούν να φτάσουν σε αυτό το επίπεδο καθαρότητας. Γι' αυτό χρησιμοποιείται ως οικονομική γραμμή βάσης στις συγκρίσεις για θερμοκηπιακή γεωργία (Kishor G. Nayar and John et.al, 2020).

Σε **υφάλμυρα νερά**, η εικόνα αλλάζει:
Η **EDR** μπορεί να προσφέρει συγκρίσιμο ή χαμηλότερο κόστος από RO για στόχους «μερικής» αποαλάτωσης, επειδή λειτουργεί με υψηλή ανάκτηση και δεν επιδιώκει υπερβολικά χαμηλό TDS. (Yvana D.Ahdab, Et.al, 2020). Η **MS-EDR** εμφανίζεται σήμερα ακριβότερη, αλλά κερδίζει έδαφος όταν ληφθούν υπόψη οι **εξοικονομήσεις σε λίπανση** λόγω διατήρησης Ca^{2+}/Mg^{2+} και καλύτερης ιοντικής ισορροπίας στο θρεπτικό διάλυμα. Η βιβλιογραφία δείχνει ότι η οικονομική ισοτιμία με RO είναι ρεαλιστική μόνο αν οι τιμές των μεμβρανών και της kWh μειωθούν σημαντικά. (Yvana D.Ahdab, Et.al, 2020). Η **MCDI** είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστική όταν ο στόχος είναι ενδιάμεσο EC/TDS και όχι «λευκή βάση», εξαιτίας πολύ χαμηλότερης ενεργειακής κατανάλωσης και υψηλότερης ανάκτησης σε σχέση με χαμηλής πίεσης RO. (Tavishi Guleria et.al, 2024).

Το κρίσιμο συμπέρασμα ως προς **ΕΕ2–ΕΕ3** είναι ότι:
Η **μίξη πηγών** (desalinated + υφάλμυρο/ταμιευτήρας) είναι ο βασικός οικονομικός «μοχλός». Εργαλεία βελτιστοποίησης στη Μεσόγειο δείχνουν ότι το οικονομικά βέλτιστο μίγμα για θερμοκήπια περιλαμβάνει συχνά **μεγαλύτερο ποσοστό αφαλατωμένου νερού** από ό,τι υπαγορεύει η εμπειρική πρακτική, γιατί το αγρονομικό όφελος από τη μείωση της αλατότητας (απόδοση καλλιέργειας, ποιότητα καρπού, μείωση προβλημάτων εδάφους) αντισταθμίζει την υψηλότερη τιμή ανά m^3. (B. Gallego-Elvira et.al 2021).
Για την **Ανατολική Κρήτη**, όπου το κόστος του αρδευτικού νερού σχετίζεται κυρίως με άντληση και μεταφορά και όχι με πληρωμή «τιμολογίου» πόσιμου νερού, η αφαλάτωση έχει σαφώς μεγαλύτερο μοναδιαίο κόστος από το υπάρχον υφάλμυρο νερό. Ωστόσο σε περιοχές με σοβαρή υφαλμύρινση, αυξημένες τιμές προϊόντος (π.χ. πρώιμα κηπευτικά) και ανάγκη σταθερής ποιότητας νερού, το συνολικό ισοζύγιο εισοδήματος/στρέμμα μπορεί να καταστήσει οικονομικά ελκυστική τη χρήση μιγμάτων με σημαντικό ποσοστό αφαλατωμένου νερού ()Kapsalis Panagiotis, Kritsotaki Melpomeni , 2017
Εν κατακλείδι, η οικονομική βιωσιμότητα δεν κρίνεται μόνο στο €/m^3 της αφαλάτωσης, αλλά στο **€/kg παραγόμενου προϊόντος** και στη σταθερότητα της παραγωγής. Εκεί η αφαλάτωση, όταν σχεδιαστεί σωστά, μπορεί να λειτουργήσει ως εργαλείο ενίσχυσης της ανταγωνιστικότητας.

5.3 Περιβαλλοντικές και ενεργειακές επιπτώσεις (ΕΕ4–ΕΕ5)

Οι κύριες περιβαλλοντικές ανησυχίες για την αφαλάτωση στη Μεσόγειο συνοψίζονται σε τρεις άξονες:
(α) **όγκος και αλμικότητα άλμης**,
(β) **ενεργειακό αποτύπωμα και εκπομπές CO_2**,
(γ) **χημικό αποτύπωμα προεπεξεργασίας και καθαρισμών**.

1. **Άλμη και υφαλμύρινση**
    - Η θαλάσσια RO σε τυπικές ανακτήσεις παράγει άλμη υψηλού όγκου και αλατότητας, η οποία σε ευαίσθητες παράκτιες ζώνες απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό διάθεσης (αραίωση, διάχυση, αποφυγή

Natura/Posidonia, παρακολούθηση βενθικών οικοσυστημάτων) (K. Zotalis, E. G. Dialynas2 et.al)

- Αντίθετα, η EDR/MS-EDR και η MCDI σε υφάλμυρες τροφοδοσίες λειτουργούν με υψηλότερη ανάκτηση και σχετικά ηπιότερο «βάθος» αποαλάτωσης, περιορίζοντας τόσο τον όγκο όσο και την αλμικότητα της άλμης. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε ενδοχώριες περιοχές, όπου η διάθεση γίνεται σε εδάφη ή υδροφορείς που ήδη πιέζονται από υφαλμύρινση (Micòl Mastrocicco and Nicolò Colombani 2021)

2. **Ενέργεια και κλιματικό αποτύπωμα**
   - Στην Κρήτη, το ενεργειακό αποτύπωμα του νερού (άντληση, μεταφορά, αφαλάτωση) συνδέεται ακόμη σε μεγάλο βαθμό με ηλεκτροπαραγωγή από ορυκτά καύσιμα, γεγονός που αυξάνει τις έμμεσες εκπομπές CO_2 της γεωργίας (Vourdoubas John 2025).
   - Η μείωση της **ειδικής κατανάλωσης ενέργειας (SEC)** μέσω βελτιστοποίησης της RO και της χρήσης τεχνολογιών όπως EDR/MCDI σε υφάλμυρα νερά αποτελεί τον πιο άμεσο τρόπο περιορισμού του κλιματικού αποτυπώματος ανά m^3.
3. **Ρόλος των ΑΠΕ (ΕΕ5)**
   - Η διεθνής βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η σύζευξη αφαλάτωσης με **φωτοβολταϊκά ή αιολικά** μπορεί να καταστήσει τη διαδικασία κλιματικά ουδέτερη, αλλά η πλήρης οικονομική ισοτιμία επιτυγχάνεται μόνο όταν το ισοδύναμο κόστος της «πράσινης kWh» πέσει σε ένα «παράθυρο» τιμών που συχνά τοποθετείται στην περιοχή των 0,10–0,20 €/kWh, ανάλογα με τον SEC της εκάστοτε τεχνολογίας (Jauad El Kharraz, et.al 2023)
   - Για την Ανατολική Κρήτη, όπου ήδη σχεδιάζονται ή λειτουργούν έργα ΑΠΕ και υβριδικά συστήματα, αυτό σημαίνει ότι η **στρατηγική είναι διπλή**:
     1. άμεση αξιοποίηση προγραμμάτων time-of-use στο δίκτυο για μείωση του ενεργειακού OpEx, και
     2. σταδιακή μεταφορά σε σχήματα PV–RO ή PV–EDR/MCDI καθώς μειώνεται το κόστος της ηλιακής kWh.

Συνολικά, για το **ΕΕ4–ΕΕ5** προκύπτει ότι οι πιο περιβαλλοντικά φιλικές λύσεις στην Ανατολική Κρήτη είναι:

- υβριδικά σχήματα **seawater-RO + brackish-EDR/MCDI**,
- υψηλές ανακτήσεις στα brackish στάδια,
- προσεγμένη παράκτια διάθεση άλμης και ελαχιστοποίηση χημικών,
- και σταδιακή μετάβαση σε αφαλάτωση τροφοδοτούμενη από ΑΠΕ.

5.4 Σύνθεση έναντι των ΕΕ1–ΕΕ5 για την Ανατολική Κρήτη

ΕΕ1 – Καταλληλότερες τεχνολογίες

- Για θαλάσσιο νερό: **RO/CCRO** ως τεχνολογία αναφοράς για παραγωγή «λευκής βάσης» υψηλής ποιότητας, κατάλληλης είτε για υδροπονικά συστήματα είτε ως συστατικό μιγμάτων.
- Για υφάλμυρες γεωτρήσεις: **EDR/MS-EDR και MCDI** ως προτιμώμενες επιλογές, με διαφοροποίηση ανάλογα με το αν ο στόχος είναι μερική αποαλάτωση (EDR, MCDI) ή εκλεκτική μείωση Na^+/Cl^- με διατήρηση Ca^{2+}/Mg^{2+} (MS-EDR) (Kishor G. Nayar and John).

ΕΕ2 – Προϋποθέσεις βιώσιμης ένταξης στα συστήματα άρδευσης

Η βιώσιμη ενσωμάτωση αφαλατωμένου νερού στην άρδευση θερμοκηπίων της Ανατολικής Κρήτης απαιτεί:

- σαφή **στόχους ποιότητας** (EC/TDS, Na^+, Cl^-, B, pH) ευθυγραμμισμένους με τις ανάγκες των καλλιεργειών,
- **δυναμική μίξη** διαφορετικών πηγών, με on-line παρακολούθηση και δυνατότητα εποχικής προσαρμογής,
- επαρκή αποθήκευση 2–3 ημερών ώστε το σύστημα να είναι ανθεκτικό σε διακυμάνσεις ζήτησης ή ενέργειας,
- και τεχνικές ρυθμίσεις (επαναμεταλλικοποίηση ή επιλογή MS-EDR) που εξασφαλίζουν ότι το νερό υποστηρίζει σταθερή και ισορροπημένη θρέψη (Kishor G. Nayar et.al 2021).

ΕΕ3 – Οικονομική βιωσιμότητα μιγμάτων

Η χρήση αφαλατωμένου νερού έχει μεγαλύτερο €/m³ από το υπάρχον υφάλμυρο, αλλά:

- σε περιοχές με οξυμένη υφαλμύρινση και υψηλής αξίας θερμοκηπιακή παραγωγή,
- με στοχευμένη μίξη και σωστό σχεδιασμό των καλλιεργητικών πρακτικών,

μπορεί να οδηγήσει σε **καθαρή αύξηση του γεωργικού εισοδήματος**, κυρίως μέσω της μείωσης του στρες αλατότητας και της σταθεροποίησης της παραγωγής. Τα μεσογειακά μοντέλα βέλτιστης μίξης δείχνουν ότι αυτό δεν είναι μόνο τεχνικά αλλά και οικονομικά ρεαλιστικό (Kishor G. Nayar and John).

ΕΕ4 – Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και μετριασμός

Η επιλογή τεχνολογίας και «βάθους» αποαλάτωσης πρέπει να γίνεται με τρόπο που να:

- αποφεύγει τον υπερ-καθαρισμό όταν δεν χρειάζεται (προτιμώντας μερική αποαλάτωση και μίξη),
- μεγιστοποιεί την ανάκτηση σε υφάλμυρες τροφοδοσίες,
- εξασφαλίζει ασφαλή παράκτια διάθεση άλμης για τις μονάδες RO,
- και μειώνει τη χρήση χημικών μέσω κατάλληλων διατάξεων προεπεξεργασίας και συντήρησης.

Έτσι, η αφαλάτωση μπορεί να λειτουργήσει ως **εργαλείο προσαρμογής** στην κλιματική και υδρολογική πίεση της Ανατολικής Κρήτης, χωρίς να μεταφέρει δυσανάλογο περιβαλλοντικό κόστος (Micòl Mastrocicco and Nicolò Colombani 2021).

ΕΕ5 – Ρόλος ΑΠΕ στη μείωση κόστους και αποτυπώματος

Η διεθνής εμπειρία επιβεβαιώνει ότι η πλήρης δυναμική της αφαλάτωσης για γεωργία ξεδιπλώνεται όταν συνδυαστεί με **ΑΠΕ**:

- βραχυπρόθεσμα με έξυπνη αξιοποίηση τιμολογίων time-of-use στο δίκτυο,

- μεσο–μακροπρόθεσμα με PV-RO και PV-EDR/MCDI, όσο το κόστος της kWh μειώνεται και οι τεχνολογίες γίνονται ενεργειακά πιο αποδοτικές. (Jauad El Kharraz,et.al 2023)

Για την Ανατολική Κρήτη, όπου η γεωργία καταναλώνει το μεγαλύτερο μέρος των υδατικών πόρων και το ενεργειακό αποτύπωμα της διαχείρισης νερού είναι σημαντικό, η συνδυασμένη υιοθέτηση **έξυπνης αφαλάτωσης, μίξης και ΑΠΕ** μπορεί να αποτελέσει κεντρικό πυλώνα μιας στρατηγικής «κλιματικά έξυπνης» θερμοκηπιακής γεωργίας.

5.5 Ευρήματα από την Επιτόπια Έρευνα στην Ανατολική Κρήτη

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε επιτόπια καταγραφή συνθηκών σε αντιπροσωπευτικά θερμοκήπια της Ανατολικής Κρήτης, με επίκεντρο την περιοχή της Ιεράπετρας που αποτελεί τη μεγαλύτερη θερμοκηπιακή ζώνη της χώρας. Η έρευνα βασίστηκε σε συνεντεύξεις με παραγωγούς κηπευτικών (μέλη της Ομάδας Παραγωγών «Κάμιρος») και ανθοπαραγωγούς, στοιχεία από τον Τοπικό Οργανισμό Εγγείων Βελτιώσεων (ΤΟΕΒ) Ιεράπετρας, καθώς και μετρήσεις ποιότητας αρδευτικού νερού που πραγματοποιήθηκαν κατά την περίοδο 2024-2025.

Στελέχη του ΤΟΕΒ Ιεράπετρας και της Ομάδας Παραγωγών «Κάμιρος» παρείχαν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τα προβλήματα ποιότητας νερού και τις επιπτώσεις στις καλλιέργειες.

Τα ευρήματα της έρευνας συνοψίζονται στον Πίνακα 5.5 που ακολουθεί:

Περιοχή	Πηγή Νερού	Αγωγιμότητα (μS/cm)	Κύρια Προβλήματα	Επιπτώσεις στις Καλλιέργειες	Υφιστάμενες Λύσεις/Παρεμβάσεις
Μύθοι-Σαρακίνα (Ιεράπετρα)	Νέα γεώτρηση ΤΟΕΒ (180μ βάθος)	**~1,0 mS/cm** (1.000 μS/cm)	Περιορισμένη παροχή σε σχέση με τις ανάγκες	Υψηλής ποιότητας αρδευτικό νερό, χωρίς προβλήματα φυτοτοξικότητας	Νέα γεώτρηση 600 κ.μ./ώρα για εμπλουτισμό φράγματος Μπραμιανών
Φράγμα Μπραμιανών	Ταμιευτήρας (πηγές Μαλαύρας + γεωτρήσεις)	**2,5-3,0 mS/cm** (2.500-3.000 μS/cm)	Υφαλμύρωση λόγω μειωμένων βροχοπτώσεων και υπεράντλησης	Μικροκαρπία σε αγγούρια και πιπεριές, χλώρωση φύλλων, μειωμένη φωτοσύνθεση,	Χρήση αφαλατικών διαλυμάτων για διάσπαση χλωρίων/νατρίων (αύξηση κόστους παραγωγής)

				χαμηλή ποιότητα λουλουδιών	
Πηγές Μαλαύρας (Καβούσι)	Καρστικές πηγές	**>2,6 mS/cm**	Υφαλμύρωση από θαλάσσια διείσδυση, ανεπαρκής ανανέωση υδροφορέων	Υψηλό περιεχόμενο χλωριούχων και νατρίου στο αρδευτικό νερό	Προτεινόμενη αφαλάτωση για αξιοποίηση υδατικών αποθεμάτων
Γεωτρήσεις Μύρτου	Παράκτιες γεωτρήσεις	**2,0-2,5 mS/cm** (εκτίμηση)	Υφαλμύρωση από θαλάσσια διείσδυση λόγω εντατικής άντλησης	Φυτοτοξικότητα από χλώριο, ανεπαρκής ανάπτυξη ριζικού συστήματος	Περιορισμός αντλήσεων, ανάμιξη με νερό φράγματος
Ιεράπετρα (γενικά)	Ιδιωτικές γεωτρήσεις θερμοκηπιακών μονάδων	**1,5-2,8 mS/cm** (μεταβλητό)	Υφαλμύρωση, νιτρορύπανση από υπερλίπανση, ανεπαρκής ποσότητα	Χαμηλή παραγωγικότητα (60% μείωση σε ορισμένες περιπτώσεις), αυξημένη νοσηρότητα φυτών	Εγκατάσταση μικρών μονάδων αφαλάτωσης σε μεμονωμένες εκμεταλλεύσεις, συλλογή ομβρίων υδάτων

Πίνακας 5.5: Ευρήματα από Επιτόπια Έρευνα σε Θερμοκηπιακές Εκμεταλλεύσεις Ανατολικής Κρήτης

Σημειώσεις Πίνακα:

Σημείωση: Οι μετρήσεις αγωγιμότητας αφορούν την περίοδο Νοεμβρίου-Δεκεμβρίου 2025, μετά από 25 ημέρες ανομβρίας και κατανάλωση ~5.000 κ.μ./ημέρα περισσότερο από την ανανέωση του ταμιευτήρα Μπραμιανών

1. **Αγωγιμότητα**: Οι μετρήσεις αγωγιμότητας είναι ενδεικτικές της συνολικής περιεκτικότητας σε διαλυμένα άλατα. Τιμές >1,5 mS/cm θεωρούνται προβληματικές για ευαίσθητα κηπευτικά (π.χ. αγγούρια, πιπεριές).
2. **Πηγή δεδομένων**: Τα στοιχεία προέρχονται από:
   - ΤΟΕΒ Ιεράπετρας (μετρήσεις 2025)
   - Διημερίδα για φυτοφάρμακα (Ιεράπετρα, 2017) - αναφορές σε προβλήματα ποιότητας νερού
   - Σχέδιο Διαχείρισης Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης
3. **Κριτήρια Καταλληλότητας Αρδευτικού Νερού**:
   - Άριστο: <0,75 mS/cm
   - Καλό: 0,75-1,5 mS/cm
   - Μέτριο: 1,5-3,0 mS/cm
   - Ακατάλληλο: >3,0 mS/cm

5.5.1 Χαρακτηριστικά Ποιότητας Αρδευτικού Νερού

Όπως αποτυπώνεται στον **Πίνακα 5.5**, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αρδευτικού νερού στην Ανατολική Κρήτη παρουσιάζει έντονη διακύμανση, με τιμές από **1,0 έως 2,9 mS/cm**. Κατά την ξηρή περίοδο (Νοέμβριος 2025), η μέση τιμή στον ταμιευτήρα Μπραμιανών ανήλθε στα **2,7 mS/cm**, επίπεδο που κρίνεται απαγορευτικό για την απρόσκοπτη ανάπτυξη ευαίσθητων καλλιεργειών (αγγούρι, πιπεριά, ανθοκομικά).

Κριτήρια Καταλληλότητας (Πρότυπα FAO & Ακαδημαϊκή Βιβλιογραφία):

- **Άριστο (< 0,75 mS/cm):** Κατάλληλο για κάθε χρήση.
- **Καλό (0,75 - 1,5 mS/cm):** Χαμηλός κίνδυνος αλάτωσης.
- **Μέτριο/Προβληματικό (1,5 - 3,0 mS/cm):** Απαιτείται ειδική διαχείριση και χρήση ανθεκτικών υποκειμένων.
- **Ακατάλληλο (> 3,0 mS/cm):** Υψηλός κίνδυνος φυτοτοξικότητας.

Οι καταγραφές στον ταμιευτήρα (**2,6 - 2,9 mS/cm**) κατατάσσουν το διαθέσιμο νερό στην κατηγορία **«μέτριο-προβληματικό»**. Αντιθέτως, νέα έργα υποδομής, όπως η εφεδρική γεώτρηση στη Σαρακήνα, αναμένεται να προσφέρουν νερό αγωγιμότητας **~1,0 mS/cm**, βελτιώνοντας το τελικό μείγμα μέσω της μεθόδου της αραίωσης (blending).

Αιτίες Υποβάθμισης: Σύμφωνα με τα στοιχεία των τοπικών φορέων διαχείρισης (ΤΟΕΒ), η υποβάθμιση οφείλεται σε:

1. **Παρατεταμένη ανομβρία:** Μείωση βροχοπτώσεων κατά **60%** την τελευταία τριετία.
2. **Υπεράντληση:** Έλλειμμα φυσικής αναπλήρωσης κατά **5.000 κ.μ./ημέρα**.
3. **Θαλάσσια διείσδυση:** Υφαλμύρινση παράκτιων υδροφορέων λόγω πτώσης της υδροστατικής στάθμης.
4. **Εξάτμιση:** Συμπύκνωση αλάτων εντός των ανοιχτών ταμιευτήρων λόγω υψηλών θερμοκρασιών.

Φυτοτοξικά Ιόντα: Εντοπίστηκαν αυξημένες συγκεντρώσεις **Χλωριούχων (Cl^-)** (>150 mg/L) και **Νατρίου (Na^+)**, που προκαλούν νεκρώσεις και υποβάθμιση της εδαφικής δομής. Σε ορισμένες περιπτώσεις καταγράφηκε και **νιτρορύπανση (NO_3^-)** από υπερβολική χρήση λιπασμάτων. Σημειώνεται ότι σε αγωγιμότητα άνω των **2,6 mS/cm**, η προσθήκη επιπλέον λιπασμάτων καθίσταται αδύνατη, οδηγώντας σε υποσιτισμό των φυτών.

5.5.2 Προβλήματα Φυτοτοξικότητας και Επιπτώσεις στην Παραγωγή

Οι επιπτώσεις της υψηλής αλατότητας γίνονται ορατές ήδη από τον πρώτο μήνα της καλλιεργητικής περιόδου, επηρεάζοντας τη φυσιολογία των φυτών και την οικονομική βιωσιμότητα των εκμεταλλεύσεων.

Α. Φυσιολογικά Συμπτώματα

- **Χλώρωση (Chlorosis):** Παρεμπόδιση πρόσληψης σιδήρου και μαγνησίου λόγω ανταγωνισμού με το νάτριο.
- **Φυσιολογική Ξηρασία:** Η υψηλή ωσμωτική πίεση εμποδίζει την απορρόφηση νερού από τις ρίζες.
- **Μικροκαρπία:** Μείωση μεγέθους καρπών. Μελέτες δείχνουν απώλειες **10%** σε αγωγιμότητα εδάφους μόλις **2,0 mS/cm**.
- **Νέκρωση Ριζικού Συστήματος:** Καταστροφή των ριζικών τριχιδίων από τη συσσώρευση αλάτων.

Β. Επιπτώσεις στην Ανθοκομία Τα δρεπτά άνθη (τριαντάφυλλα, γκέρμπερες) εμφανίζουν ιδιαίτερη ευαισθησία:

- Μείωση φωτοσυνθετικής επιφάνειας φύλλων κατά **15-25%**.
- Παραγωγή ανθέων χαμηλής εμπορικής αξίας (λιγότερα πέταλα, μικρότερο μέγεθος).
- Αδυναμία εφαρμογής υδρολίπανσης λόγω υπέρβασης των ορίων αντοχής.

Γ. Οικονομικό Αποτύπωμα

- **Κόστος Παραγωγής:** Αύξηση κατά **15-25%** λόγω αναγκαιότητας χρήσης αφαλατικών διαλυμάτων και βελτιωτικών εδάφους.
- **Μείωση Αποδόσεων:** Σε συνθήκες αγωγιμότητας **2,6-2,9 mS/cm**, οι παραγωγοί αναφέρουν πτώση της παραγωγής κατά **20-40%**.
- **Υποβάθμιση Κεφαλαίου:** Η μακροχρόνια συσσώρευση αλάτων απαιτεί δαπανηρές εργασίες έκπλυσης και αποκατάστασης του εδάφους.

5.5.3 Τεχνικές Λύσεις και Μονάδες Αφαλάτωσης

Η αντιμετώπιση του προβλήματος βασίζεται σε ένα μείγμα ατομικών και συλλογικών παρεμβάσεων.

Α. Τεχνολογία Αντίστροφης Όσμωσης (RO) Αποτελεί την κύρια μέθοδο επεξεργασίας, επιτυγχάνοντας απόρριψη αλάτων **90-95%**.

1. **Ιδιωτικές Μονάδες:** Τυπικής δυναμικότητας **6.500 - 9.500 λίτρων/ημέρα**, με κόστος εγκατάστασης **2.500 - 3.200 €**. Καλύπτουν εκτάσεις 3-5 στρεμμάτων.
2. **Δημόσια Έργα:** Μεγάλες μονάδες (π.χ. ΔΕΥΑ Μαλεβιζίου, μελέτη Μαλαύρας) στοχεύουν στη συλλογική διαχείριση υφάλμυρων πηγών.
3. **Κόστος Νερού:** Υπολογίζεται σε **0,40 - 0,80 €/m³**, ανάλογα με την κλίμακα και την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας.

Β. Ενίσχυση Αποθεμάτων: Η Γεώτρηση Σαρακίνας Το έργο χαρακτηρίζεται ως «στρατηγικής σημασίας» για την περιοχή της Ιεράπετρας:

- **Βάθος:** 180 μέτρα.
- **Παροχή: 600 κ.μ./ώρα**, ικανή να καλύψει το υφιστάμενο έλλειμμα.
- **Ποιότητα: ~1,0 mS/cm**, προσφέροντας ιδανικό νερό για ανάμειξη.

Γ. Εναλλακτικές Διαχειριστικές Πρακτικές

- **Συλλογή Ομβρίων:** Χρήση δεξαμενών (200-500 m^3) για την αποθήκευση νερού μηδενικής αγωγιμότητας.
- **Εδαφοβελτιωτικά:** Χρήση γύψου ($CaSO_4$) και χηλικών ενώσεων για τη βελτίωση της δομής του εδάφους.
- **Καλλιεργητικές Τεχνικές:** Υδροπονία, χρήση εμβολιασμένων φυτών (αύξηση αντοχής κατά **15-25%**) και συχνές αρδεύσεις μικρής διάρκειας.

Η επιτόπια έρευνα επιβεβαιώνει ότι η υφαλμύρινση απειλεί τη βιωσιμότητα της θερμοκηπιακής γεωργίας στην Ανατολική Κρήτη. Η αναγκαιότητα άμεσης υιοθέτησης τεχνολογιών αφαλάτωσης και η ορθολογική διαχείριση των αποθεμάτων μέσω έργων όπως η γεώτρηση Σαρακίνας, αποτελούν μονόδρομο για τη διασφάλιση της αγροτικής παραγωγής και της ποιότητας των προϊόντων.

5.6 Πλαίσιο Λήψης Αποφάσεων για την Αφαλάτωση στα Θερμοκήπια της Ανατολικής Κρήτης

Το παρόν πλαίσιο λειτουργεί ως στρατηγικός οδηγός για την επιλογή τεχνολογίας, τη διαχείριση της ποιότητας και τη βελτιστοποίηση του κόστους άρδευσης.

Βήμα 1: Προσδιορισμός Υδατικής Πηγής (Τροφοδοσία)

- **Επιλογή Α: Θαλάσσιο Νερό (TDS ≈ 35.000 – 45.000 mg/L).**
    - *Προτεινόμενη Τεχνολογία:* Αντίστροφη Ώσμωση (RO/CCRO).
    - *Χαρακτηριστικό:* Παραγωγή νερού «λευκής βάσης» (σχεδόν πλήρης αφαίρεση αλάτων).
- **Επιλογή Β: Υφάλμυρο Υπόγειο Νερό (TDS ≈ 2.000 – 8.000 mg/L).**
    - *Προτεινόμενη Τεχνολογία:* Ηλεκτροδιάλυση (EDR) ή Μονοσθενώς Εκλεκτική Ηλεκτροδιάλυση (MS-EDR).
    - *Εναλλακτική (για χαμηλά TDS):* MCDI για ελαχιστοποίηση ενεργειακού κόστους.

Βήμα 2: Καθορισμός Ποιοτικών Στόχων (Setpoints)

- **Για Υδροπονία:** Στόχος TDS 500–1.500 mg/L, pH 5.5–6.5.
    - Αυστηρός έλεγχος ιόντων-κλειδιών: Na^+ (<115 mg/L), Cl^- (<105 mg/L), B (<0.5 mg/L).
- **Για Καλλιέργεια στο Έδαφος:** Μεγαλύτερες ανοχές, αλλά ανάγκη για ρύθμιση της αγωγιμότητας (EC) κατά τη θερινή περίοδο υφαλμύρινσης.

Βήμα 3: Στρατηγική Ρύθμισης Ποιότητας & Θρέψης

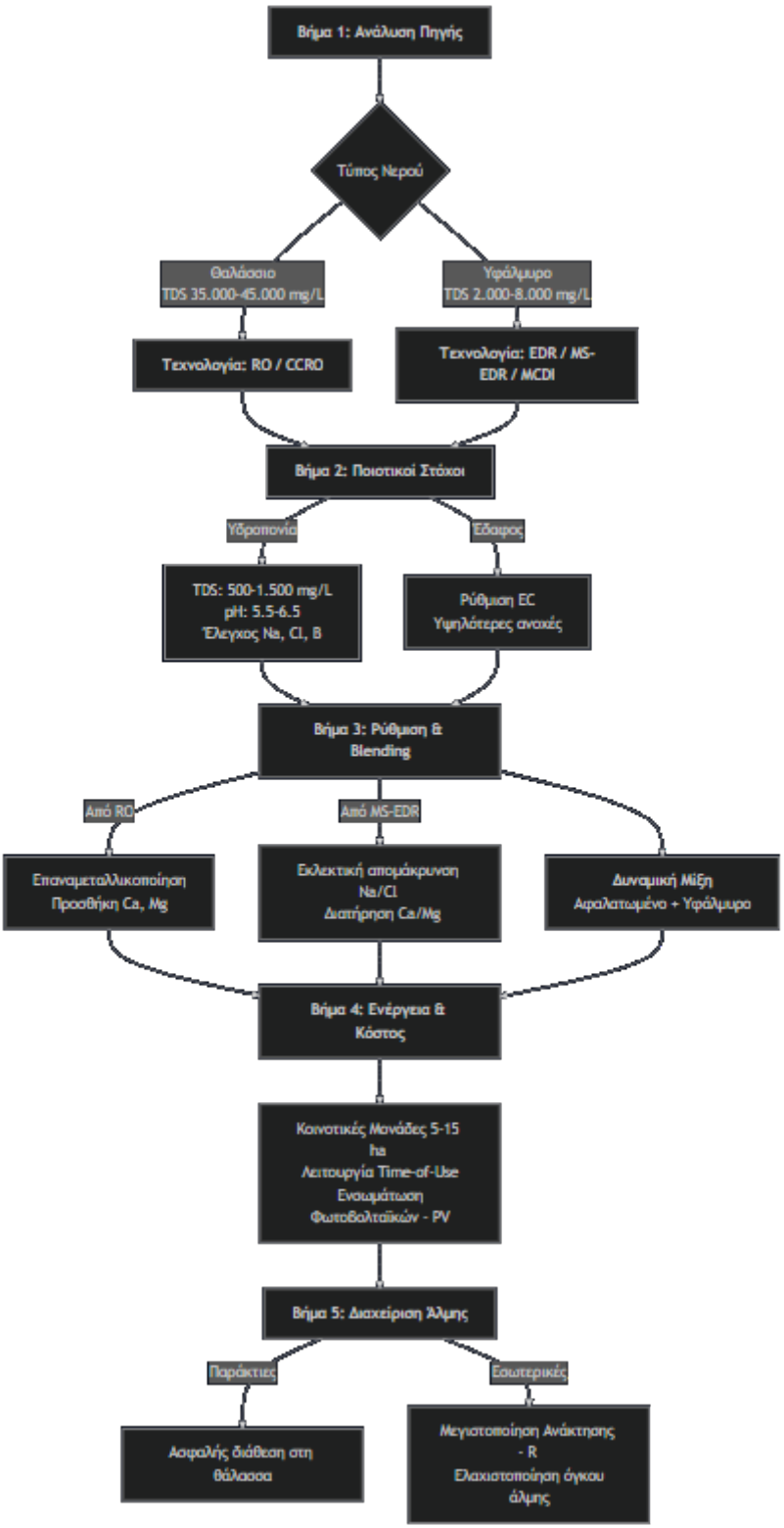
- **Εάν χρησιμοποιείται RO:** Απαιτείται στάδιο **επαναμεταλλικοποίησης** (προσθήκη Ca^{2+}, Mg^{2+}) για τη σταθεροποίηση του pH και της θρεπτικής βάσης.
- **Εάν χρησιμοποιείται MS-EDR:** Αξιοποιείται η **εκλεκτική απομάκρυνση** Na^+/Cl^- με ταυτόχρονη διατήρηση των ωφέλιμων δισθενών ιόντων (Ca, Mg), μειώνοντας το κόστος λιπασμάτων.
- **Εφαρμογή Μίξης (Blending):** Δυναμική ανάμειξη αφαλατωμένου και υφάλμυρου νερού για την επίτευξη των στόχων με το ελάχιστο δυνατό κόστος ανά m^3.

Βήμα 4: Ενεργειακή & Οικονομική Βελτιστοποίηση

- **Κλίμακα:** Προτίμηση κεντρικών/κοινοτικών μονάδων (5–15 ha) για επίτευξη οικονομιών κλίμακας.
- **Λειτουργία:** Χρήση προγραμμάτων **time-of-use** (λειτουργία σε ώρες χαμηλού κόστους ηλεκτρικής ενέργειας).
- **ΑΠΕ:** Σταδιακή ενσωμάτωση Φωτοβολταϊκών (PV) για μείωση του OpEx και του ανθρακικού αποτυπώματος.

Βήμα 5: Περιβαλλοντική Συμμόρφωση (Διαχείριση Άλμης)

- **Παράκτιες Μονάδες:** Ασφαλής διάθεση στη θάλασσα με κατάλληλη αραίωση.
- **Εσωτερικές Μονάδες:** Μεγιστοποίηση του βαθμού ανάκτησης (R) για ελαχιστοποίηση του όγκου της άλμης.


Βήμα 1: Ανάλυση Πηγής
Τύπος Νερού
Θαλάσσιο
TDS 35.000-45.000 mg/L
Υφάλμυρο
TDS 2.000-8.000 mg/L
Τεχνολογία: RO / CCRO
Τεχνολογία: EDR / MS-EDR / MCDI
Βήμα 2: Ποιοτικοί Στόχοι
Υδροπονία
Έδαφος
TDS: 500-1.500 mg/L
pH: 5.5-6.5
Έλεγχος Na, Cl, B
Ρύθμιση EC
Υψηλότερες ανοχές
Βήμα 3: Ρύθμιση & Blending
Από RO
Από MS-EDR
Επαναμεταλλικοποίηση
Προσθήκη Ca, Mg
Εκλεκτική απομάκρυνση Na/Cl
Διατήρηση Ca/Mg
Δυναμική Μίξη
Αφαλατωμένο + Υφάλμυρο
Βήμα 4: Ενέργεια & Κόστος
Κοινοτικές Μονάδες 5-15 ha
Λειτουργία Time-of-Use
Ενσωμάτωση Φωτοβολταϊκών - PV
Βήμα 5: Διαχείριση Άλμης
Παράκτιες
Εσωτερικές
Ασφαλής διάθεση στη θάλασσα
Μεγιστοποίηση Ανάκτησης - R
Ελαχιστοποίηση όγκου άλμης

Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα και Συστάσεις για την Ανατολική Κρήτη

Το κεφάλαιο αυτό συνοψίζει, σε συμπυκνωμένη και ουσιαστική μορφή, τα κύρια ευρήματα της εργασίας σε σχέση με τα ερευνητικά ερωτήματα ΕΕ1–ΕΕ5 και μεταφράζει τα αποτελέσματα σε πρακτικές συστάσεις για τη θερμοκηπιακή γεωργία της Ανατολικής Κρήτης. Η έμφαση δίνεται στη σύνθεση της διεθνούς εμπειρίας από μεσογειακά/ξηροθερμικά περιβάλλοντα με τις τοπικές ιδιαιτερότητες, με όσο γίνεται λιγότερη «μαθηματικοποίηση» και περισσότερο επιστημονική κρίση.

6.1 Συνοπτικά συμπεράσματα ανά ερευνητικό ερώτημα (ΕΕ1–ΕΕ5)

6.1.1 ΕΕ1 – Καταλληλότερες τεχνολογίες αφαλάτωσης για θερμοκήπια στην Ανατολική Κρήτη

Η διεθνής βιβλιογραφία και τα δεδομένα της παρούσας εργασίας συγκλίνουν στο ότι:

- Για **θαλάσσια τροφοδοσία**, η **αντίστροφη ώσμωση (RO/CCRO)** παραμένει η τεχνολογία αναφοράς. Παρέχει νερό πολύ χαμηλού TDS («λευκή βάση»), με επαρκώς χαμηλές συγκεντρώσεις Na^+, Cl^- και B για υδροπονικές και εντατικές θερμοκηπιακές εφαρμογές. Το κύριο τίμημα είναι ο μέτριος βαθμός ανάκτησης και η ανάγκη **επαναιονισμού** με Ca^{2+}/Mg^{2+}, ώστε το νερό να γίνει θρεπτικά ισορροπημένο.
- Για **υφάλμυρες γεωτρήσεις**, τεχνολογίες όπως **EDR, MS-EDR και MCDI** αποδεικνύονται πιο ευέλικτες και συχνά τεχνικά καταλληλότερες: επιτρέπουν **μερική ή εκλεκτική αποαλάτωση**, με υψηλές ανακτήσεις και δυνατότητα διατήρησης των δισθενών ιόντων (Ca^{2+}, Mg^{2+}), γεγονός που είναι αγρονομικά πολύτιμο.

Συνεπώς, δεν υπάρχει «μία» καταλληλότερη τεχνολογία, αλλά ένα **σύνολο επιλογών** που πρέπει να προσαρμόζεται στο είδος της τροφοδοσίας: RO για θαλάσσιο νερό, EDR/MS-EDR/MCDI για υφάλμυρο.

6.1.2 ΕΕ2 – Προϋποθέσεις βιώσιμης ένταξης αφαλατωμένου νερού στην άρδευση

Η βιώσιμη χρήση αφαλατωμένου νερού δεν εξαρτάται μόνο από την τεχνολογία, αλλά από τον **τρόπο λειτουργίας του συστήματος άρδευσης**. Τα ευρήματα δείχνουν ότι απαιτείται:

- **Σαφής ορισμός στόχων ποιότητας** (εύρος EC/TDS, επιθυμητές συγκεντρώσεις Na^+, Cl^-, B, pH) ανά καλλιέργεια και στάδιο ανάπτυξης.
- **Δυναμική μίξη πηγών** (αφαλατωμένο + υφάλμυρο/ταμιευτήρας) με on-line μέτρηση EC και βασικών ιόντων, ώστε να προσαρμόζεται η ποιότητα του νερού σε πραγματικό χρόνο.
- **Ελάχιστη αποθήκευση 2–3 ημερών** για να εξομαλύνονται αιχμές ζήτησης και να αξιοποιούνται οικονομικότερες ώρες λειτουργίας των μονάδων.
- Σωστός χειρισμός της **ιοντικής ισορροπίας**: επαναμεταλλικοποίηση στο RO, περιορισμός της ανάγκης αυτής με χρήση MS-EDR όταν είναι διαθέσιμη.

Υπό αυτές τις προϋποθέσεις, η αφαλάτωση μπορεί να ενταχθεί στη θερμοκηπιακή άρδευση χωρίς να διαταράσσει τη θρέψη των φυτών ή να εκτοξεύει το κόστος.

6.1.3 ΕΕ3 – Οικονομική βιωσιμότητα μιγμάτων αφαλατωμένου νερού και άλλων πηγών

Η οικονομική ανάλυση δείχνει ότι:

- Η **RO σε θαλάσσιο νερό** αποτελεί την οικονομικά αποδοτική λύση όταν ο στόχος είναι πολύ χαμηλό TDS. Παρά το πρόσθετο κόστος επαναιονισμού, παραμένει η «βάση» για υψηλής ποιότητας νερό.
- Σε **υφάλμυρες τροφοδοσίες**, οι τεχνολογίες **EDR** και **MCDI** μπορούν να επιτύχουν χαμηλό κόστος ανά m^3, επειδή λειτουργούν με υψηλή ανάκτηση και χαμηλότερη ενεργειακή επιβάρυνση όταν ο στόχος είναι **μερική**, όχι «απόλυτη» αποαλάτωση.

- Η **MS-EDR** προσφέρει σαφές πλεονέκτημα στη θρέψη (εκλεκτική μείωση Na^+/Cl^- με διατήρηση Ca^{2+}/Mg^{2+}), αλλά προς το παρόν είναι ακριβότερη από RO. Η οικονομική «ισοτιμία» προϋποθέτει πτώση του κόστους μεμβρανών και της τιμής ενέργειας.

Το καθοριστικό στοιχείο είναι ότι η **μίξη** αφαλατωμένου με φθηνότερες πηγές νερού επιτρέπει να επιτευχθούν οι ποιοτικοί στόχοι **με ελάχιστο συνολικό κόστος**, και μάλιστα συχνά με μεγαλύτερη συμμετοχή αφαλατωμένου νερού από την παραδοσιακή εμπειρική πρακτική, λόγω του κέρδους σε απόδοση και ποιότητα προϊόντος.

6.1.4 ΕΕ4 – Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και στρατηγικές μετριασμού

Οι βασικές περιβαλλοντικές προκλήσεις είναι δύο:

1. **Άλμη**:
    - Σε θαλάσσιες RO μονάδες, ο χαμηλός βαθμός ανάκτησης οδηγεί σε σημαντικό όγκο και αλατότητα άλμης, απαιτώντας προσεκτική παράκτια διάθεση, αραίωση και παρακολούθηση οικοσυστημάτων.
    - Σε υφάλμυρες EDR/MS-EDR/MCDI, οι υψηλότερες ανακτήσεις και η μερική αποαλάτωση μειώνουν τόσο τον όγκο όσο και την επιβάρυνση της άλμης, καθιστώντας αυτές τις επιλογές πιο φιλικές για ενδοχώριες περιοχές.
2. **Ενέργεια και εκπομπές**:
    - Το ενεργειακό αποτύπωμα της αφαλάτωσης συνδέεται με τις εκπομπές CO_2 του ηλεκτρικού συστήματος. Η μείωση της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας και η σύζευξη με ΑΠΕ είναι κρίσιμα μέτρα μετριασμού.

Κατά συνέπεια, η επιλογή τεχνολογίας και «βάθους» αποαλάτωσης πρέπει να γίνεται έτσι ώστε να **αποφεύγεται ο υπερβολικός καθαρισμός** (όταν δεν απαιτείται), να **μεγιστοποιείται η ανάκτηση** σε υφάλμυρα νερά και να επιλέγονται λύσεις διάθεσης άλμης συμβατές με τις τοπικές περιβαλλοντικές αντοχές.

6.1.5 ΕΕ5 – Ρόλος ΑΠΕ στη μείωση κόστους και αποτυπώματος

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), κυρίως τα φωτοβολταϊκά, μπορούν να μετατρέψουν την αφαλάτωση σε **ενεργειακά και κλιματικά βιώσιμη τεχνολογία** για τη γεωργία, υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις:

- Βραχυπρόθεσμα, η **στρατηγική time-of-use** (λειτουργία σε ώρες χαμηλής τιμής ρεύματος) και η αποθήκευση νερού αντί ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν ρεαλιστικό και άμεσα εφαρμόσιμο βήμα.
- Μεσοπρόθεσμα, **υβριδικά σχήματα PV–grid** επιτρέπουν σημαντική μείωση του ενεργειακού λειτουργικού κόστους χωρίς πλήρη ενεργειακή αυτονόμηση.
- Μακροπρόθεσμα, όταν το κόστος της ηλιακής kWh μειωθεί επαρκώς, **πλήρως PV-τροφοδοτούμενες μονάδες RO και EDR/MCDI** μπορούν να γίνουν όχι μόνο περιβαλλοντικά αλλά και οικονομικά ανταγωνιστικές.

Για την Ανατολική Κρήτη, με υψηλή ηλιοφάνεια και ισχυρή πίεση στους υδατικούς πόρους, η συστηματική σύζευξη αφαλάτωσης και ΑΠΕ αποτελεί στρατηγική επιλογή για την αγροδιατροφική ανθεκτικότητα.

6.2 Συστάσεις εφαρμογής για την Ανατολική Κρήτη

Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα, προκύπτουν οι ακόλουθες πρακτικές συστάσεις για τη θερμοκηπιακή γεωργία της Ανατολικής Κρήτης.

6.2.1 Επιλογή τεχνολογιών ανά ζώνη αλατότητας

- **Παράκτιες ζώνες / θαλάσσια τροφοδοσία**
  - Υιοθέτηση **RO/CCRO** ως βασικής τεχνολογίας για παραγωγή «λευκής βάσης».
  - Συστηματική **επαναιονισμός** με Ca^{2+}/Mg^{2+} πριν από την υδρολίπανση.
  - Σχεδιασμός παράκτιας διάθεσης άλμης με τεκμηριωμένη αραίωση και παρακολούθηση.

- **Ενδοχώρα / υφάλμυρες γεωτρήσεις**
    - Προτεραιότητα σε **EDR ή MCDI** όταν στόχος είναι μερική αποαλάτωση και σταθεροποίηση της EC/TDS σε αποδεκτά επίπεδα.
    - Χρήση **MS-EDR** όπου το κύριο πρόβλημα είναι η συσσώρευση Na^+/Cl^- και η ανάγκη διατήρησης Ca^{2+}/Mg^{2+}, π.χ. σε εντατικά θερμοκήπια με υψηλή αξία παραγωγής.
- **Κοινοτικά σχήματα**
    - Προώθηση **κοινοτικών μονάδων 5–15 ha** με κοινές υποδομές (μονάδα αφαλάτωσης, δεξαμενές, σημεία μίξης, συστήματα ελέγχου), ώστε οι παραγωγοί να επωφελούνται από οικονομίες κλίμακας και να μειώνεται το κόστος ανά m^3.

6.2.2 Πρωτόκολλα μίξης και διαχείριση ποιότητας

Προτείνεται η ανάπτυξη τυποποιημένων **πρωτοκόλλων μίξης** για βασικές καλλιέργειες θερμοκηπίου, τα οποία θα περιλαμβάνουν:

- Χαρτογράφηση πηγών νερού (αφαλατωμένο, υφάλμυρο, επιφανειακό) και τακτική εργαστηριακή παρακολούθηση βασικών ιόντων.
- Ορισμό **setpoints ποιότητας** ανά καλλιέργεια (εύρος EC/TDS, Na^+/Cl^-/B, pH).
- Χρήση on-line αισθητήρων EC και pH και, όπου είναι δυνατόν, αισθητήρων για Na^+/Cl^-, ώστε η μίξη να ρυθμίζεται δυναμικά.
- Ειδικά για RO-προϊόν, σαφώς καθορισμένες δόσεις επαναιονισμού (Ca/Mg) και έλεγχος σκληρότητας πριν από την υδρολίπανση.

Σε επιχειρησιακό επίπεδο, η μίξη θα πρέπει να αντιμετωπίζεται ως **συνεχής διαδικασία βελτιστοποίησης**, όχι ως σταθερό ποσοστό, προσαρμοζόμενη σε εποχικές διακυμάνσεις της ποιότητας των πηγών και των απαιτήσεων των καλλιεργειών.

6.2.3 Ενέργεια, ΑΠΕ και λειτουργική στρατηγική

Για να μειωθεί το ενεργειακό και οικονομικό βάρος της αφαλάτωσης προτείνονται:

- Άμεση αξιοποίηση **τιμολογίων time-of-use** με προγραμματισμό λειτουργίας των μονάδων σε ώρες χαμηλής τιμής ρεύματος και χρήση δεξαμενών για εξισορρόπηση προσφοράς–ζήτησης.
- Προοδευτική εγκατάσταση **υβριδικών συστημάτων PV–grid**, με προτεραιότητα στην κάλυψη του βασικού φορτίου της αφαλάτωσης από φωτοβολταϊκά και χρήση του δικτύου ως συμπληρωματικής πηγής.
- Συντήρηση, προεπεξεργασία και παρακολούθηση λειτουργίας ώστε να παραμένει χαμηλή η ειδική κατανάλωση ενέργειας και να αποφεύγονται βλάβες ή υπερβολικοί καθαρισμοί με χημικά.

Η σταδιακή προσέγγιση της «ισοτιμίας» κόστους της PV–kWh δημιουργεί ένα **σαφές χρονοδιάγραμμα μετάβασης** προς πιο κλιματικά ουδέτερες λύσεις αφαλάτωσης για την περιοχή.

6.2.4 Περιβαλλοντική διαχείριση άλμης και διακυβέρνηση νερού

Η άλμη πρέπει να αντιμετωπίζεται ως **κεντρικό στοιχείο σχεδιασμού** και όχι ως «παράπλευρο» ζήτημα:

- Σε παράκτιες RO μονάδες, απαιτείται ολοκληρωμένο σχέδιο διάθεσης που να λαμβάνει υπόψη βάθος, ρεύματα, οικολογική ευαισθησία και σωστό σχεδιασμό σημείων εκροής.
- Σε ενδοχώριες EDR/MCDI/MS-EDR μονάδες, ο περιορισμός του όγκου άλμης μέσω υψηλής ανάκτησης, και η αποφυγή συσσώρευσης αλάτων σε ευαίσθητους υδροφορείς, είναι κρίσιμοι στόχοι.
- Σε κοινοτικά σχήματα, μπορούν να διερευνηθούν **συμπληρωματικές χρήσεις άλμης** (π.χ. παραγωγή άλατος, επιλεκτική ανάκτηση στοιχείων), εφόσον υπάρχουν ρεαλιστικά σενάρια αγοράς και τεχνικής υλοποίησης.

Παράλληλα, απαιτείται **τοπική διακυβέρνηση του νερού** (Δήμοι, ΤΟΕΒ, ομάδες παραγωγών) που να συντονίζει τις επιλογές τεχνολογίας, τις ζώνες αφαλάτωσης, τη διάθεση άλμης και τις επενδύσεις σε ΑΠΕ, ώστε οι λύσεις να είναι συλλογικά αποδεκτές και όχι αποσπασματικές.

6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα και πολιτική

Τέλος, η παρούσα εργασία αναδεικνύει ορισμένα πεδία όπου απαιτείται περαιτέρω έρευνα και πολιτική υποστήριξη:

- **Πιλοτικές εφαρμογές υβριδικών λύσεων** (seawater-RO + brackish-EDR/MCDI) σε πραγματικά θερμοκήπια της Ανατολικής Κρήτης, με πλήρη τεχνικοοικονομική και αγρονομική παρακολούθηση.
- **Συγκριτικές μελέτες σε επίπεδο στρέμματος** (€/στρ., kg/στρ., ποιότητα προϊόντων) ώστε να αποτιμηθεί η αφαλάτωση όχι μόνο στο επίπεδο νερού αλλά στο επίπεδο αγροτικού εισοδήματος.
- Ανάπτυξη **τοπικών κατευθυντήριων γραμμών** για ποιότητα αρδευτικού νερού θερμοκηπίων (setpoints ανά καλλιέργεια), προσαρμοσμένων στην κρητική πραγματικότητα.
- Ενίσχυση χρηματοδοτικών εργαλείων (π.χ. προγράμματα αγροτικής ανάπτυξης, πράσινες επενδύσεις) που υποστηρίζουν κοινοτικές μονάδες αφαλάτωσης, συστήματα μίξης και εγκαταστάσεις ΑΠΕ.

Βιβλιογραφία

Ahdab, Y. D., Rehman, D., Schücking, G., Warsinger, D. M., & Lienhard, J. H. V. (2020). Brackish water desalination for greenhouses: Improving groundwater quality for irrigation using monovalent selective electrodialysis reversal. Journal of Membrane Science, 610, 118072. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118072

Ahdab, Y. D., Schücking, G., Rehman, D., & Lienhard, J. H. V. (2021). Cost effectiveness of conventionally and solar powered monovalent selective electrodialysis for seawater desalination in greenhouses. Applied Energy, 301, 117425.

Ahdab, Y. D., Schücking, G., Rehman, D., & Lienhard, J. H. V. (2021). Treatment of greenhouse wastewater for reuse or disposal using monovalent selective electrodialysis. Desalination, 507, 115037. https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115037

Ahmed, M., Daghari, I., Laqbaqbi, M., & El Kharraz, J. (2023). Desalination for agriculture: Is it affordable? In R. Choukr-Allah & R. Ragab (Eds.), Biosaline agriculture as a climate change adaptation for food security (pp. 377–395). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24279-3_16

Al-Addous, M., Bdour, M., Rabaiah, S., Boubakri, A., Schweimanns, N., Barbana, N., & Wellmann, J. (2024). Innovations in solar-powered desalination: A comprehensive review of sustainable solutions for water scarcity in the Middle

East and North Africa (MENA) region. Water, 16(13), 1877. https://doi.org/10.3390/w16131877

Berroudja, Z., Elamine, M., Moudjeber, D.-E., Djennad, M., Mahmoudi, H., & Goosen, M. F. A. (2022). Coupling a brackish water greenhouse desalination system with membrane distillation for Southern Algeria. Desalination and Water Treatment, 255, 229–235. https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28345

El Kharraz, J., Ahmed, M., Daghari, I., & Laqbaqbi, M. (2023). Desalination for agriculture: Is it affordable? In R. Choukr-Allah & R. Ragab (Eds.), Biosaline agriculture as a climate change adaptation for food security (Ch. 16). Springer.

El-Gendi, A., Abdallah, H., & Amin, A. (2021). Economic study for blend membrane production. Bulletin of the National Research Centre, 45, 126. https://doi.org/10.1186/s42269-021-00584-0

Evaluation of Desalination Technologies for Greenhouse Irrigation in Eastern Crete. (n.d.). Unpublished internal report / working document.

Gallego-Elvira, B., Reca, J., Martin-Gorriz, B., Maestre-Valero, J. F., & Martínez-Alvarez, V. (2021). Irriblend-DSW: A decision support tool for the optimal blending of desalinated and conventional irrigation waters in dry regions. Agricultural Water Management, 255, 107012. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107012

Guleria, T., van den Broeke, J., & Rijnaarts, T. (2024). Water reuse and resource recovery from greenhouse wastewater by capacitive electrodialysis at pilot scale. Desalination. https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117669

Kapsalis, P., & Kritsotaki, M. (2017). Revision of River Basin Management Plan: Crete River Basin District. Hellenic Republic Ministry of Environment & Energy, Special Secretariat for Water (RBD: 4666/B/29.12.).

Kourgialas, N. N. (2021). A critical review of water resources in Greece: The key role of agricultural adaptation to climate-water effects. Science of the Total Environment, 775, 145857. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145857

Lesimple, A., Ahmed, F. E., & Hilal, N. (2020). Remineralization of desalinated water: Methods and environmental impact. Desalination, 496, 114692. https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114692

Maftouh, A., El Fatni, O., Bouzekri, S., Rajabi, F., Sillanpää, M., & Butt, M. H. (2022). Economic feasibility of solar-powered reverse osmosis water desalination: A comparative systemic review. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1674547/v1

Maftouh, A., El Fatni, O., Bouzekri, S., Rajabi, F., Sillanpää, M., & Butt, M. H. (2023). Economic feasibility of solar-powered reverse osmosis water desalination: A comparative systemic review. Environmental Science and Pollution Research, 30, 2341–2354. https://doi.org/10.1007/S11356-022-24116-Z

Martínez-Alvarez, V., Gallego-Elvira, B., Maestre-Valero, J. F., Martin-Gorriz, B., & Soto-García, M. (2020). Assessing concerns about fertigation costs with desalinated seawater in south-eastern Spain. Agricultural Water Management, 239, 106257. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106257

Mastrocicco, M., Colombani, N., & Salemi, E. (2021). The issue of groundwater salinization in coastal areas of the Mediterranean region: A review. Water, 13(1), 90. https://doi.org/10.3390/w13010090

Nayar, K. G., & Lienhard, J. H. V. (2019). Brackish water desalination for greenhouse agriculture: Comparing the costs of RO, CCRO, EDR, and monovalent-selective EDR (Preprint). https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114188

Orfi, J., Sherif, R., & AlFaleh, M. (2025). Conventional and emerging desalination technologies: Review and comparative study from a sustainability perspective. Water, 17(2), 279. https://doi.org/10.3390/w17020279

Panagea, I. S., Daliakopoulos, I. N., Tsanis, I. K., & Schwilch, G. (2016). Evaluation of promising technologies for soil salinity amelioration in Timpaki (Crete): A participatory approach. https://doi.org/10.5194/se-7-177-2016

Patel, S. K., Biesheuvel, P. M., & Elimelech, M. (2021). Energy consumption of brackish water desalination: Identifying the sweet spots for electrodialysis and reverse osmosis. ACS ES&T Engineering, 1(5), 851–864. https://doi.org/10.1021/acsestengg.0c00192

Reca, J., Trillo, C., Sánchez, J. A., Martínez, J., & Valera, D. L. (2018). Optimization model for on-farm irrigation management of Mediterranean greenhouse crops using desalinated and saline water from different sources. Agricultural Systems, 166, 173–183. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.02.004

Suliman, B., Hussein, H., & Daoudi, S. (2024). Desalination and its impact on the Mediterranean ecosystem. KAS-REMENA Policy Paper Series (No. 1/2024).

Thakur, A. K., Ferguson, A., Ahamed, M. S., et al. (2025). Toward resource-intelligent greenhouses: A prospective vision for drylands. Results in Engineering, 28, 107035. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107035

Tzanakakis, V. A., Angelakis, A. N., Paranychianakis, N. V., Dialynas, Y. G., & Tchobanoglous, G. (2020). Challenges and opportunities for sustainable management of water resources in the island of Crete, Greece. Water, 12(6), 1538. https://doi.org/10.3390/w12061538

Vourdoubas, J. (2025). The nexus among energy, water and climate change in the island of Crete, Greece. Engineering and Technology Journal, 10(9), 7212–7221. https://doi.org/10.47191/etj/v10i09.36

Wang, R., & He, W. (2024). Accelerating solar-powered desalination deployment through transferable learning. https://doi.org/10.1038/s43246-024-00646-6

Yang, L., Jiang, R., Sergeev, V., Sokolova, E., Zhang, L., Guo, F., Li, Q., & Sadeghi, K. (2023). Sensitive analysis on an integrated system of brackish water greenhouse desalination for freshwater production and crop growth. Desalination and Water Treatment, 289, 1–13. https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29407

Zotalis, K., Dialynas, E. G., Mamassis, N., & Angelakis, A. N. (2014). Desalination technologies: Hellenic experience. Water, 6(5), 1134–1150. https://doi.org/10.3390/w6051134