



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
ΚΑΙΝΟΤΟΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕΣΩ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΠΟΣΤΑΞΗΣ
ΠΡΟΣ ΑΡΔΕΥΤΙΚΗ ΧΡΗΣΗ**

Δημήτρης Μιχαηλάρης

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»

Επιβλέπων: Συμεών Μαλαμής,
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τους ανθρώπους μου που με στήριξαν, ο καθένας με τον τρόπο του, κατά το διάστημα εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, και ειδικότερα τη Ζωή Αστάρα. Ευχαριστώ ξεχωριστά, τον επιβλέπων καθηγητή μου κ. Συμεών Μαλαμή για την καθοδήγηση και την ευκαιρία να εργαστώ στο ερευνητικό πρόγραμμα *HYDROUSA*, όπως και τον καθηγητή μου κ. Κων/νο Νουτσόπουλο για τη συμμετοχή μου αντίστοιχα στο πρόγραμμα *SureNexus*. Επιπλέον, ευχαριστώ την ομάδα και τους συνεργάτες των προγραμμάτων για τη βοήθεια τους και την πρόσβαση στα δεδομένα, και κατά κύριο λόγο την Ελένη Νύκταρη, τον Νίκο Κουρή και τον Alessandro Zecca. Τέλος, ευχαριστώ το σύνολο των ανθρώπων του μεταπτυχιακού για την συνεισφορά τους στην εξέλιξή μου.

Περίληψη

Η παρούσα μελέτη διερευνά την απόδοση ενός καινοτόμου συστήματος αφαλάτωσης θαλασσινού νερού, του οποίου η λειτουργία βασίζεται στις αρχές εξάτμισης και συμπύκνωσης του νερού. Οι εγκαταστάσεις του εν λόγω συστήματος βρίσκονται εν λειτουργία στο νησί της Τήνου, υπό την ονομασία HYDRO5 όπως αναπτύχθηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος *HYDROUSA* το 2020. Η συγκεκριμένη περιοχή επιλέχθηκε λόγω του ελλειμματικού υδατικού της ισοζυγίου που απορρέει από τις υδρογεωλογικές και μορφολογικές της ιδιαιτερότητες, τον ανεπτυγμένο τουριστικό τομέα του νησιού και την μακρά ξηρή και θερμή περίοδο που βιώνει ετησίως. Τα παραπάνω διαμορφώνουν περιόδους υψηλής ζήτησης και ποσοτικής ανεπάρκειας υδατικών αποθεμάτων προς κάθε χρήση. Μεταξύ άλλων, ο αγροδιατροφικός τομέας στην Τήνο, δέχεται ισχυρές πιέσεις λόγω της έλλειψης επαρκών αποθεμάτων νερού προς άρδευση των καλλιεργειών.

Το υπό μελέτη σύστημα, καλούμενο *Mangrove Still System (MSS)*, σχεδιάστηκε από την ιταλική εταιρεία *Planet SAS.*, ως ένα πρότυπο παθητικό σύστημα αφαλάτωσης, βασιζόμενο στις αρχές του βιομιμιτισμού. Λειτουργεί αξιοποιώντας την ηλιακή ακτινοβολία σε 80 κλιμακωτούς ηλιακούς αποστακτήρες, οι οποίοι δέχονται θαλασσινό νερό έπειτα από διήθηση, για την ανάκτηση αρδευτικού νερού. Το παραγόμενο νερό από το MSS, ικανοποιεί το σύνολο των ποιοτικών απαιτήσεων που τίθενται από τη Νομοθεσία για τη χρήση του προς απεριόριστη άρδευση. Συγκεκριμένα, με pH 7.3 είναι εντός του απαιτούμενου εύρους, χαρακτηρίζεται ως εξαιρετικής ποιότητας βάσει της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) που διατηρήθηκε σταθερά < 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ενώ δεν αναφέρεται καμία άλλη φυσικοχημική και μικροβιολογική επιβάρυνση. Παράλληλα, το νερό από το MSS βρέθηκε να πληροί και τα ποιοτικά πρότυπα σχετικά με την ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης, με μόνη απαίτηση τον εμπλουτισμό του σε Ca^{2+} και Mg^{2+} που στερείται λόγω της φύσης της διεργασίας.

Στο HYDRO5, η εκροή του MSS αξιοποιήθηκε αποτελεσματικά για την ανάπτυξη των καλλιεργούμενων φυτών και την παραγωγή 517 kg τροπικών καρπών και αξιοποιήσιμης βιομάζας στο θερμοκήπιο (PGH) της εγκατάστασης. Το σύστημα δύναται επιπλέον να ανακτά 700 kg βρώσιμο αλάτι ετησίως μέσω περαιτέρω επεξεργασίας της άλμης η οποία προκύπτει ως παραπροϊόν της διεργασίας, ενώ διατάξεις συλλογής βρόχινου νερού συνεισφέρουν 55L/day νερού κλάσης C2-S1, στις αρδευτικές ανάγκες. Η συνολική έκταση του HYDRO5 είναι $\approx 500 \text{ m}^2$, επιμεριζόμενη σε 150 m^2 για το MSS, 200 m^2 για το PGH και 150 m^2 για βοηθητικούς χώρους. Η εγκατάσταση στοχεύει στην πλήρη κυκλικότητα του νερού, όπου βάσει της χαμηλής ενεργειακής απαίτησης της των 10.1 kWh/day, προωθεί την εγκαθίδρυση του άξονα *WEFE* και την επίτευξη βιώσιμης διαχείρισης των πόρων, συνολικά.

Δεδομένου ότι παρόμοια δεδομένα δεν είναι ευρέως διαθέσιμα έως σήμερα στη βιβλιογραφία, η απόδοση του MSS αξιολογήθηκε πιλοτικά υπό πλήρη λειτουργία 10 ωρών ημερησίως για διάστημα ενός έτους. Η ημερήσια παραγωγή αρδευτικού νερού βρέθηκε ίση με 123.6 L/day, με μέγιστη τα 280 L/day και αντίστοιχη ειδική παραγωγή 2.2 L/m²/day και 5 L/m²/day. Η προκύπτουσα απόδοση του συστήματος υπολογίστηκε σε 17.4%, με μέγιστη 29.4%, ενώ ο συντελεστής μέσης θερμικής απόδοσης του MSS βρέθηκε ίσος με 20.4%, με μέγιστη τιμή 58.1%. Το ειδικό κόστος νερού που προέκυψε από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων ανήλθε στα 0.19 €/L ενώ η ειδική κατανάλωση ενέργειας ισούται με 0.05 kWh/L. Τα εν λόγω ευρήματα όπως απορρέουν υπό συνθήκες συνεχούς λειτουργίας στο πεδίο, απέχουν από εκείνα που εκτίμα ο κατασκευαστής του MSS, με μέση παραγωγή νερού τα 210 L/day, ειδική παραγωγή 3.8 L/m²/day, μέση απόδοση συστήματος 28%, θερμική απόδοση 32.1%, ειδικό κόστος νερού και κατανάλωση ενέργειας 0.11 €/L και 0.03 kWh/L, αντιστοίχως. Συνολικά, το σύστημα βρέθηκε εντός των τυπικών παραμέτρων για συστήματα ηλιακής απόσταξης όπως έχουν μελετηθεί βιβλιογραφικά. Ωστόσο, ως αναδυόμενη τεχνολογία εμφανίζεται υποδεέστερη των συμβατικών μεθόδων αφαλάτωσης, γεγονός που αποδίδεται κυρίως στη χαμηλότερη συγκριτικά δυναμικότητά τους, την υψηλή απαίτηση επιφάνειας και την εξάρτηση από κλιματικούς παράγοντες.

Η λειτουργία του συστήματος βρέθηκε να εξαρτάται ισχυρά από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας με συντελεστή συσχέτισης 0.9 και συντελεστή προσδιορισμού 0.7, αφού με την αύξηση αυτής αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας μέσω συναγωγής από την επιφάνεια εξάτμισης του αποστακτήρα στο περιεχόμενο νερό και τελικά ο ρυθμός εξάτμισης του. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκε 44.9% αύξηση της απόδοσης με την αύξηση της έντασης από 508.1 W/m² σε 561.2 W/m², υπό σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ μέγιστη παραγωγή

νερού βρέθηκε σε εύρος θερμοκρασίας νερού στα πάνελ 35-43°C, έντασης ηλιακής ακτινοβολίας 500-600 W/m², σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 28.9°C.

Συνολικά παρατηρήθηκε έλλειμμα ≈30 L/day του παραγόμενου νερού έναντι των αρδευτικών αναγκών, το οποίο θα μπορούσε να αντισταθμιστεί με την εκμετάλλευση του συλλεγόμενου βρόχινου νερού. Ωστόσο, τόσο λόγω ποσοτικής ανεπάρκειας όσο και λόγω χαμηλής συσχέτισης της EC: 0.01 μS/cm με το δείκτη SAR 0.3, επιλέχθηκε η ανάμιξη με μικρότερη ποσότητα νερού από το δίκτυο. Σε περίπτωση πλήρους κάλυψης της άρδευσης με το παραγόμενο νερό, η EC του μπορεί εύκολα να διατηρηθεί στα απαιτούμενα επίπεδα.

Για την αύξηση της ημερήσιας παραγωγής νερού στο MSS, πραγματοποιήθηκαν επιπρόσθετα δοκιμές βελτιστοποίησης της απόδοσης του μέσω εφαρμογής συγκεκριμένων τροποποιήσεων. Η απόδοση του συστήματος βρέθηκε να αυξάνει κατά 15%, με προθέρμανση του νερού στους 35°C, 9.5% με την εισαγωγή υλικού “φυτυλιού” στους αποστακτήρες και 6.8% με την μείωση του ρυθμού ροής στα πάνελ από 2 L/hr σε 1 L/hr. Η μέγιστη ημερήσια παραγωγή των 261.3 L/day επετεύχθη σε αποστακτήρα που εφαρμόστηκε το σύνολο των τροποποιήσεων, με ειδική παραγωγή 4.6 L/m²/day, διαμορφώνοντας το ειδικό κόστος νερού στα 0.087 €/L. Ωστόσο, χωρίς προθέρμανση εισόδου, ο συνδυασμός των δύο άλλων τροποποιήσεων έδειξε τη βέλτιστη ενίσχυση απόδοσης σε ποσοστό 15.9% έναντι του συμβατικού, υποδηλώνοντας πως απλές χαμηλού κόστους εφαρμογές μπορούν να αυξήσουν την απόδοση του MSS χωρίς πρόσθετη απαίτηση ενέργειας.

Τελικά το MSS, αποτελεί ένα απλό και αξιόπιστο σύστημα με χαμηλή απαίτηση ενέργειας, συντήρησης και εξειδίκευσης, και ανάγκες πλήρους απασχόλησης 66 ημερών ετησίως. Χαρακτηρίζεται από ευελιξία αφού είναι επεκτάσιμο μέσω προσθήκης επιπλέον αποστακτών, και ευκολία χειρισμού με δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου μέσω αισθητήρων χαμηλού κόστους, τροφοδοτούμενοι με ΑΠΕ. Συνιστά, έτσι ιδανική εναλλακτική για αγρότες μικρής κλίμακας σε αποκεντρωμένες παράκτιες περιοχές που χαρακτηρίζονται από υψηλές πιέσεις προς τη διαθεσιμότητα ασφαλούς νερού, έντονη ηλιοφάνεια και υψηλή διαθεσιμότητα γης. Περαιτέρω χρηματοδότηση, μελέτη και εξέλιξη συστημάτων ηλιακής απόσταξης θα συμβάλει στο μετριασμό φαινομένων λειψυδρίας και στη διαχείριση του νερού στα πλαίσια της βιωσιμότητας.

Abstract

The present study investigates the performance of an innovative seawater desalination system whose operation is based on the principles of water evaporation and condensation. The demo site currently in operation, is located on the island of Tinos and is called HYDRO5, which was developed in the context of HYDROUSA project in 2020. This particular area was chosen due to its water deficit resulting from its hydrogeological and morphological particularities, its well-developed tourism sector combined with the annual long, dry and hot season. These factors result in periods of high demand and quantitative shortage of fresh water. Consequently, the agricultural and food sector in Tinos comes under severe pressure due to the insufficient supply of irrigation water supplies.

The system under study, called the *Mangrove Still System* (MSS), was developed by the Italian company *Planet SAS*, as a prototype, of a passive desalination system, based on the principles of biomimicry. It uses solar radiation to power 80 solar stills, which are fed with filtered seawater to recover irrigation water. The water produced by the MSS was found to meet the legislation's quality requirements for use in unlimited irrigation. In particular, it is within the required range with a pH average value of 7.3 and it's also characterized as of excellent quality based on its electrical conductivity (EC) which consistently maintained below 250 μS/cm. No other physicochemical restriction or microbiological contamination was reported. At the same time, the MSS fresh water was also found to meet the drinking water quality standards, with the only requirement being its enrichment with Ca²⁺ and Mg²⁺, which is not present due to the nature of the process.

In HYDRO5, MSS effluent was efficiently valorized to produce 517 kg of fruits and usable biomass, received from the tropical cultivation into the greenhouse (PGH) of HYDRO5. In addition, the system is capable of recovering 700 kg per year of edible salt, through further treatment of the brine, which is the by-product of the process, while rainwater harvesting devices adjusted in the system collect 55 L/day water of C2-S1 class, contributing to PGH irrigation. HYDRO5 covers an area of ≈ 500 m², divided into 150 m² for the MSS, 200 m² for the PGH and 150 m² for

ancillary areas. The plant aims to achieve full water circularity, while based on its low energy demand of 10.1 kWh/day, it promotes the establishment of WEFE nexus and the sustainable management of resources.

Considering that comparable data are not available in the literature, this pilot study evaluates the performance of MSS at full operation of 10 hrs/day over a period one year period. The daily water production of the MSS was found to be 123.6 L of irrigation water/day, with a maximum of 280 L/day, while the corresponding specific production was 2.2 L/m²/day and 5 L/m²/day. The resulting system yield was 17.4%, with a maximum of 29.4%, while its average thermal efficiency was 20.4%, with a maximum of 58.1%. The specific water cost determined from the results amounted to 0.19 €/L while the specific energy consumption was 0.05 kWh/L. These results obtained from continuous field operation of the MSS, are far from those estimated by its manufacturer, which indicate an average water production of 210 L/day, a specific production of 3.8 L/m²/day, 28%, mean yield, 32.1% thermal efficiency and a specific water cost and energy consumption of 0.11 €/L and 0.03 kWh/L, respectively. In both cases, the system was found to be within the typical parameters of solar distillation systems as described in the literature. However, as an emerging technology it appears to be inferior to the conventional desalination technologies, mainly due to its comparatively low capacity, its high surface area demand and its dependence on climatic factors.

The system was found to be strongly dependent on solar irradiation intensity with a correlation coefficient of 0.9 and a coefficient of determination of 0.7, since the increase of solar irradiation increases the heat transfer rate from the evaporation surface to the contained water, leading to an increase in the evaporation rate. More specifically, an efficiency rise of 44.9% was calculated by increasing the solar intensity from 508.1 W/m² to 561.2 W/m², under constant ambient temperature, while maximum water production was achieved at a water inlet temperature range of 35-43°C, solar radiation intensity of 500-600 W/m² and an average ambient temperature of 28.9°C.

Using the MSS, an overall water deficit of 40 L/day was observed compared to irrigation water demand, which could be compensated for by using the daily collected rainwater. Furthermore, the quality of the produced water was found to meet the quality standards for unrestricted irrigation, classified as excellent quality (electrical conductivity (EC) was stably measured below 250 µS/cm). However, due to both quantitative inadequacy and its combined low EC value of 0.01 µS/cm and SAR indicator value of 0.3, the use of mixed MSS fresh water together with a small amount of tap water was chosen. However, in case of full coverage of PGH irrigation with the produced water, its EC can be easily maintained at the required levels.

Furthermore, yield optimization tests were carried out for MSS, in which various modifications were applied. The system performance was found to increase by 15% by using preheated water inflow at a temperature of 35°C, 9.5% by applying wick material into the stills and 6.8% by reducing the flow rate from 2 L/hr to 1 L/hr. A maximum daily production of 261.3 L/day was achieved by applying all the modifications simultaneously, with corresponding specific production of 4.6 L/m²/day, reducing the specific water cost to 0.087 €/L. However, without the preheating treatment, the combine application of the remaining modifications resulted to an optimal yield enhancement of 15.9% compared to the conventional still, indicating that these simple and cost-effective applications can increase the MSS performance without additional energy requirements.

Ultimately, MSS was found to be a simple and reliable system with low energy, maintenance and expertise requirements, with a demand of a full-time equivalent of 66 days/year. It is characterised by flexibility due to its upscaling potential through a simple addition of extra stills, and ease of operation with remote control feasibility via low cost, renewable energy powered sensors. It is therefore, an ideal alternative for small-scale farmers in decentralized coastal areas characterized by water stressed periods, intense sunlight and high land availability. Further funding and research into the progress of solar distillation systems will help to mitigate future water scarcity phenomena in conjunction with the achievement of sustainable water management.

Περιεχόμενα

1 ^ο Κεφάλαιο – Εισαγωγή	8
1.1 Το πρόβλημα και τα εργαλεία διαχείρισης της λειψυδρίας	8
1.2 Σκοπός της μελέτης	13
2 ^ο Κεφάλαιο – Βιβλιογραφική ανασκόπηση	15
2.1 Εισαγωγικά στοιχεία για την αφαλάτωση νερού.....	15
2.2 Αφαλάτωση μέσω Αντίστροφης Ώσμωσης (<i>Reverse Osmosis – RO</i>)	17
2.3 Αφαλάτωση μέσω Πολυβάθμιας Εκτόνωσης (<i>Multi-stage Flash Distillation – MSF</i>)	28
2.4 Αφαλάτωση μέσω Ηλιακής Απόσταξης (<i>Solar Still Desalination – SS</i>)	32
2.5 Ποιοτικός προσδιορισμός – Παράμετροι, και θεσμικά πρότυπα αρδευτικού νερού	39
2.5.1 Αλατότητα	39
2.5.2. Λοιπές παράμετροι.....	43
3 ^ο Κεφάλαιο – Περιοχή Μελέτης.....	48
4 ^ο Κεφάλαιο – Μέθοδοι και Υλικά.....	58
4.1 Παράθεση μεθόδων και εργαλείων επεξεργασίας δεδομένων	58
4.2 Ερευνητικό πρόγραμμα <i>HYDROYSA</i>	61
4.3 Αναλυτική περιγραφή εγκατάστασης <i>HYDRO5</i>	65
4.3.1 Περιγραφή συστήματος αφαλάτωσης - <i>Mangrove Still System (MSS)</i>	66
4.3.2 Περιγραφή συστήματος ανάκτησης εδώδιμου αλατιού - <i>Salt Factory (SF)</i>	79
4.3.3 Περιγραφή διάταξης συλλογής βρόχινου νερού - <i>Rainwater (RC)</i>	81
4.3.4 Περιγραφή παραγωγικού θερμοκηπίου - <i>Productive Greenhouse (PGH)</i>	82
4.3.5 Περιγραφή αρδευτικού δικτύου του PGH	88
5 ^ο Κεφάλαιο - Παράθεση και ανάλυση αποτελεσμάτων.....	93
5.1 Ποιοτικά χαρακτηριστικά παραγόμενου νερού.....	93
5.2 Ποσοτικά χαρακτηριστικά παραγόμενου νερού.....	99
5.3 Εκτίμηση θερμικής απόδοσης αποστακτήρα <i>MSS</i>	103
5.4 Εκτίμηση ειδικού κόστους παραγόμενου νερού.....	105
5.5 Συγκριτική αξιολόγηση διαφόρων τύπων ηλιακών αποστακτήρων.....	106
5.6 Απαιτήσεις του <i>MSS</i> σε ενέργεια και ανθρώπινο δυναμικό	109
5.7 Συντήρηση & Έλεγχος <i>MSS</i>	111
5.8 Προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν	111

5.9 Ανάκτηση εδώδιμου αλατιού.....	113
5.10 Χαρακτηριστικά καλλιέργειας του ΡGH.....	115
5.10.1 Καταλληλότητα καλλιεργήσιμου εδάφους	115
5.10.2 Επάρκεια αρδευτικού νερού & αρδευτικού συστήματος.....	119
5.10.3 Απόδοση καλλιέργειας	122
5.11. Δράσεις που εκπονήθηκαν στα πλαίσια της κοινωνικής δέσμευσης	126
5.12 Τελικό οικονομικό μοντέλο της εγκατάστασης HYDRO5	127
6° Κεφάλαιο – Δοκιμές βελτιστοποίησης του συστήματος MSS	130
6.1 Ερευνητικό πρόγραμμα <i>SureNexus</i>	130
6.2 Περιγραφή δοκιμών βελτιστοποίησης	131
6.3 Παράθεση και ανάλυση αποτελεσμάτων δοκιμών βελτιστοποίησης	132
7° Κεφάλαιο – Συμπεράσματα	140
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	145

1^ο Κεφάλαιο – Εισαγωγή

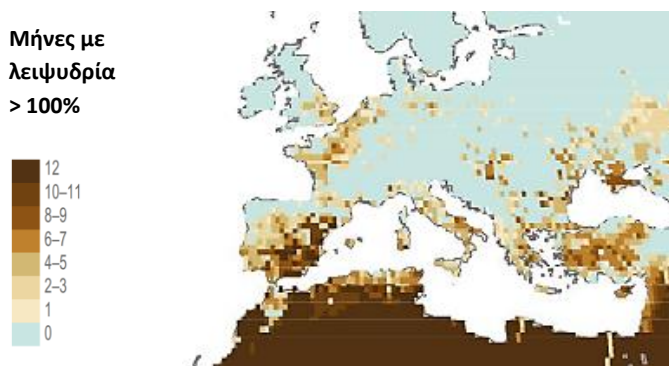
1.1 Το πρόβλημα και τα εργαλεία διαχείρισης της λειψυδρίας

Το νερό βρίσκεται στον πυρήνα της βιώσιμης ανάπτυξης καθώς αποτελεί δημόσιο και κοινωνικό αγαθό με ζωτική σημασία για την κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη, την παραγωγή ενέργειας και τροφίμων, τα υγιή οικοσυστήματα και την ίδια την ανθρώπινη επιβίωση (UN, 2015). Η πρόσβαση σε επαρκές και ασφαλές νερό, ανεξαρτήτου επιπέδου οικονομικής ανάπτυξης, αποτελεί αδιαμφισβήτητο ανθρώπινο δικαίωμα όπως προσδιορίστηκε το 1977 στη Γενική Συνέλευση των Ηνωμένων Εθνών (HE), αναγνωρίστηκε επισήμως το 2002 από την Ειδική Επιτροπή των ΗΕ (General Comment No.15, UN Committee, 2002) και τεκμηριώθηκε ρητά ως θεμελιώδες ανθρώπινο δικαίωμα με το Ψήφισμα 64/292 το 2010. Αποτελεί κομβικό παράγοντα για τη διατήρηση της δημόσιας υγείας σε κάθε χρήση του, ενώ η βελτίωση της παροχής και η αποτελεσματική διαχείριση των υδάτινων πόρων μπορούν να δώσουν ώθηση στην οικονομική ανάπτυξη των χωρών και να συμβάλουν στη μείωση της φτώχειας (WHO, 2022).

Ωστόσο σήμερα, άνω του μισού παγκόσμιου πληθυσμού, περίπου 8 δις άνθρωποι, εκτιμάται ότι βιώνουν σοβαρή ανεπάρκεια νερού τουλάχιστον για κάποια περίοδο του έτους λόγω κλιματικών και μη παραγόντων (AR6 IPCC, 2022). Με τον όρο ανεπάρκεια νερού υποδηλώνεται το έλλειμμα μεταξύ της ζήτησης για όλες τις χρήσεις και της προσφοράς διαθέσιμων και εκμεταλλεύσιμων στο χώρο και το χρόνο αποθεμάτων νερού. Μπορεί ως εκ τούτου να θεωρηθεί ως η ανισορροπία μεταξύ των υδάτινων πόρων έναντι των υδατικών πόρων, και προκύπτει λόγω σπανιότητας αυτών, υπερβολικής ζήτησης, αστοχίας του συστήματος διανομής ή λόγω κλιματικών φαινομένων όπως π.χ. η ξηρασία. Διακρίνεται τέλος βάσει 2 μακρο-οικονομικών δεικτών: (i) την διαθεσιμότητα του πόρου, σε “water stress” για $< 1000 \text{ m}^3/\text{year} \text{ } \bar{\text{capita}}$ και “water scarcity” για $< 500 \text{ m}^3/\text{year} \text{ } \bar{\text{capita}}$ και (ii) το δείκτη εκμετάλλευσης των πόρων [Λόγος απολήψεων/Διαθέσιμων ανανεώσιμων πόρων φυσικού νερού] σε ενδεχόμενη ένταση για $> 50\%$ και διαθρωτική έλλειψη για $> 100\%$, με ιδιαίτερη σημασία για χώρες όπου το αρδευτικό νερό αποτελεί μεγάλο ποσοστό της ζήτησης (MED WS&D Report, 2007).

Οι υδατικοί πόροι είναι άνισα κατανομημένοι στο χώρο και το χρόνο και η διαθεσιμότητά τους επηρεάζεται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες και την οικονομική ανάπτυξη της εκάστοτε περιοχής. Ο ολοένα αυξανόμενος παγκόσμιος πληθυσμός και η συνεπαγόμενη αύξηση στη ζήτηση νερού έχουν καταλυτική επίδραση σε αυτή. Επιπροσθέτως, η κλιματική κρίση που βιώνει σήμερα ο πλανήτης αμβλύνει δυσχερώς το χάσμα προσφοράς-ζήτησης επί των διαθέσιμων αποθεμάτων, ως απόρροια της εντεινόμενης αύξησης της επιφανειακής θερμοκρασίας και της μείωσης των βροχοπτώσεων. Έτσι, οδηγούμαστε σε πιο συχνά, παροδικά ή μη, φαινόμενα ξηρασίας και πλημμυρών (Mancuso *et.al.* 2020).

Χώρες του ευρωπαϊκού βορρά διαθέτουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στις κλιματικές μεταβολές λόγω πιο σταθερού υδατικού ισοζυγίου στη διάρκεια του έτους και άρα μειωμένης απαίτησης πρόσθετων αποθεμάτων (Mancuso *et.al.* 2020). Από την άλλη, άνυδρες-ημιάνυδρες περιοχές με ζεστά, ξηρά καλοκαίρια και ήπιους χειμώνες με ακανόνιστες βροχοπτώσεις όπως οι χώρες της μεσογειακής λεκάνης, χαρακτηρίζονται διεθνώς ως “Water scarce areas” (Kourgialas & Dokou, 2021, Ukhurebor *et. al.* 2022), **(Εικόνα 1)**. Επιπλέον, λόγω των ιδιαιτεροτήτων τους, περιγράφονται ως “hot spot” για την ευπάθειά τους σε κλιματικούς κινδύνους. Βασική αιτία αποτελεί η προβλεπόμενη περαιτέρω μείωση της διαθεσιμότητας του νερού κυρίως λόγω της αναμενόμενης μεγάλης μείωσης και αύξησης της μεταβλητότητας της μέσης βροχόπτωσης (Giorgi 2006, Soares & Lima 2022).



Εικόνα 1: Αριθμός μηνών ανά έτος με σοβαρή λειψυδρία (WG2 AR6, chapter_04, IPCC 2022)

Συγκεκριμένα, η επιφανειακή θερμοκρασία στην περιοχή της Μεσογείου έχει αυξηθεί ήδη κατά 1.5°C σε σχέση με το προβιομηχανικό επίπεδο, μία τιμή που τέθηκε σαν όριο διατήρησης για τα Κράτη Μέλη (Κ-Μ) της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) με ορίζοντα το 2030 (COP 21 conclusions, Paris 2015). Παρατηρούνται ολοένα πιο έντονα, διαρκή και συχνά φαινόμενα θερμών κυμάτων και ξηρασίας που αναμένεται να ενταθούν λόγω της προβλεπόμενης περαιτέρω αύξησης κατά 3.5°C έως το 2080–2099 συγκριτικά των επιπέδων του 1980–1999. Οι ετήσιες απορροές προς τα ποτάμια αναμένεται να μειωθούν κατά 12-15% έως το 2100 λόγω της αντίστοιχης μείωσης 12% των βροχοπτώσεων όπως υπολογίστηκε ως μέση τιμή από 21 μοντέλα. Τα παραπάνω, θα αυξήσουν τους ρυθμούς εξάτμισης από τους ταμειυτήρες και το δυνητικό ρυθμό εξατμισοδιαπνοής από τις χερσαίες εκτάσεις. Ταυτόχρονα επιβαρύνεται και η χημική ποιότητα του νερού, καθώς υψηλότερες συγκεντρώσεις θρεπτικών και ρυπαντών αναμένονται σε χαμηλότερες ροές (Sabater & Barcelo, 2010).

Στις μεσογειακές περιοχές, ο τομέας της γεωργίας είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής γλυκού νερού όπου υπερβαίνει το 80% της συνολικής κατανάλωσης φτάνοντας σε μη βιώσιμα επίπεδα διαχείρισης, μη συνυπολογίζοντας τις απολήψεις νερού από ιδιωτικές γεωτρήσεις χωρίς υδρομετρητές (Alexandridis *et. al.* 2009). Η ζήτηση δε, αναμένεται να ενταθεί λόγω κλιματικής αλλαγής καθώς σύμφωνα με τους Soares & Lima (2022), η προβλεπόμενη μεταβολή της εδαφικής υγρασίας σε ετήσιο κύκλο, όπως μελετήθηκε σε εδάφη της Πορτογαλίας, εκτιμάται σε -5% έως -20% σε σχέση με τα σημερινά επίπεδα, και η αντίστοιχη μεταβολή της επιφανειακής υγρασίας σε -4% έως -8% έως το τέλος του αιώνα. Το γεγονός αυτό αποδίδεται, στη μεταβολή του κλίματος σε πιο έντονα ημι-άνυδρο και την ενίσχυση των κυμάτων καύσωνα και ξηρασίας στην περιοχή.

Οι μεσογειακές χώρες χαρακτηρίζονται από ραγδαία αυξανόμενο πληθυσμό, μόνιμο και εποχιακό, με υψηλή πυκνότητα ιδίως σε παράκτιες περιοχές όπου συγκεντρώνεται σημαντικό κομμάτι των δραστηριοτήτων (WG2 AR6, IPCC 2022). Μεταξύ άλλων, ένας ακόμη κεντρικός τομέας δραστηριοτήτων που επιδρά στη διαθεσιμότητα του νερού είναι ο τομέας του τουρισμού, με έμφαση στις νησιωτικές περιοχές. Η βιομηχανία του τουρισμού σε χώρες υψηλής επισκεψιμότητας όπως Ισπανία, Ιταλία, Τουρκία και Ελλάδα, συνεισφέρει στο 53% του ΑΕΠ τους αντιπροσωπεύοντας το 80% των αφίξεων όλης της Μεσογείου και οι οποίες εκτιμάται ότι θα φθάσουν τα 500 εκατομμύρια έως το 2030. Παρόλο που αποτελεί κεντρικό τομέα της οικονομικής και κοινωνικής ανάπτυξης των περιοχών αυτών, ο μη διαχειριζόμενος τουρισμός ασκεί σημαντικές πιέσεις (**Πίνακας 1**) στην περιβαλλοντική ευμάρεια των περιοχών επιταχύνοντας τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής (Mejjad *et. al.* 2022).

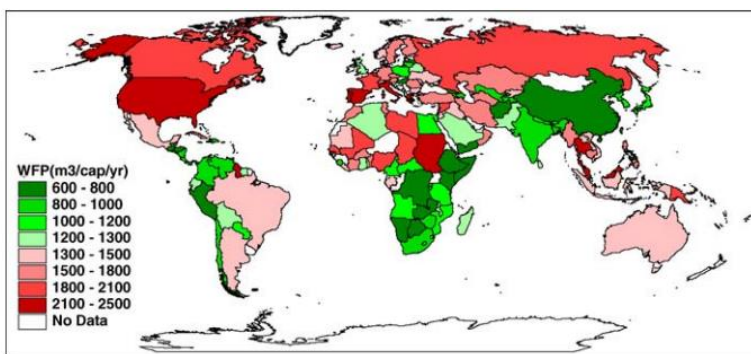
Πίνακας 1: Οι επιπτώσεις του τουρισμού σε άλλους τομείς

		Αλιείας & Υδατοκαλλιέργειας	Θαλάσσιες μεταφορές & λιμενικές δραστηριότητες	Γεωργία	Κατανάλωση Ενέργειας	Κατανάλωση Νερού	Πολεοδομίας & Υποδομών
Επιπτώσεις Τουρισμού	Κοινωνικές						
	Οικονομικές						
	Περιβαλλοντικές						

(Mejjad *et.al.* 2022), (Πράσινο: Θετικές, Κόκκινο: Αρνητικές, Κίτρινο: Ουδέτερες)

Ειδικότερα, εκτιμάται ότι ο μέσος τουρίστας καταναλώνει 3 φορές περισσότερο νερό με μέση κατανάλωση τα 450-800 L/day έναντι 127 L/day ανά μόνιμο κάτοικο. (Mejjad *et.al.* 2022). Σε περιοχές με έντονη γεωργική και τουριστική δραστηριότητα, η έλλειψη νερού οδηγεί δυνητικά σε σημαντική αύξηση του κόστους του (Kourgiyalas *et.al.* 2018). Ως απόρροια αυτών λοιπόν, πιθανολογείται μελλοντικά η ερημοποίηση των νησιωτικών περιοχών της Μεσογείου με αντιδιαμετρικά σημαντικό αντίκτυπο στην οικονομική ανάπτυξής τους. Ο IPCC εκτιμά ακόμη, ότι από το 2050 και μετά η περιοχή θα γίνει λιγότερο ελκυστικός προορισμός ειδικά κατά τους θερινούς μήνες.

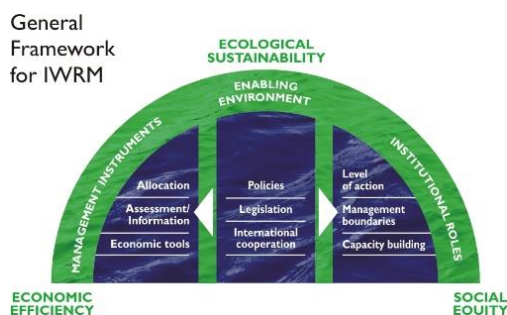
Σημαντικό είναι το γεγονός πως το υδατικό αποτύπωμα της Ελλάδας, ο όγκος δηλαδή του νερού που καταναλώνεται ή ρυπαίνεται και ο οποίος αντανακλά την πίεση που δέχεται ο πόρος, ισούται με 2,389 m³/cap/year, δεύτερο μεγαλύτερο μετά των ΗΠΑ και διπλάσιο από το παγκόσμιο μέσο όρο των 1,243 m³/cap/year (**Εικόνα 2**). Το γεγονός αυτό, οφείλεται παράλληλα στην εσφαλμένη και μη βιώσιμη διαχείριση των υδάτινων μας πόρων, τόσο σε θεσμικό και τεχνικό-κατασκευαστικό επίπεδο (μέθοδοι άρδευσης, απώλειες δικτύου κ.ο.κ) όσο και σε κοινωνικό (κουλτούρα, εκπαίδευση, ενημέρωση), (Hoekstra & Charagain, 2007). Ως εκ τούτου, συνιστά επιτακτική ανάγκη η υιοθέτηση διαχειριστικών μέτρων που θα προωθούν τη βιωσιμότητά του.



Εικόνα 2: Το παγκόσμιο υδατικό αποτύπωμα σε κυβικά νερού ανά κάτοικο ετησίως (Hoekstra & Charagain, 2007)

Η Ε.Ε. με την εφαρμογή της Οδηγίας πλαίσιο για τα ύδατα (ΟΠΥ) θέτει ποιοτικούς, οικολογικούς και ποσοτικούς στόχους με γνώμονα την καλή κατάσταση των υδάτινων σωμάτων, με κεντρική ιδέα την ολοκληρωμένη διαχείριση τους στη γεωγραφική κλίμακα των Λεκανών Απορροής Ποταμών (Οδηγία 2000/60/ΕΚ). Επιπλέον τα ΗΕ, με την υιοθέτηση της Agenda 2030 το 2015 αποσαφήνισαν 17 στόχους ενσωμάτωσης των τριών διαστάσεων της βιώσιμης ανάπτυξης (Sustainable Development Goals – SDGs), κοινωνική, περιβαλλοντική και οικονομική, προάγοντας τη διασύνδεση τους στο πλαίσιο θεσμικών ρυθμίσεων των κρατών. Ανάμεσά τους, ο *SDG no.6* και οι οκτώ υποστόχοι αυτού, στοχεύουν στη “Διασφάλιση της διαθεσιμότητας και της βιωσιμότητας της διαχείρισης των υδάτων και αποχέτευσης για όλους έως το 2030”, αποτελώντας σήμερα πυρήνα της βιώσιμης προσέγγισης.

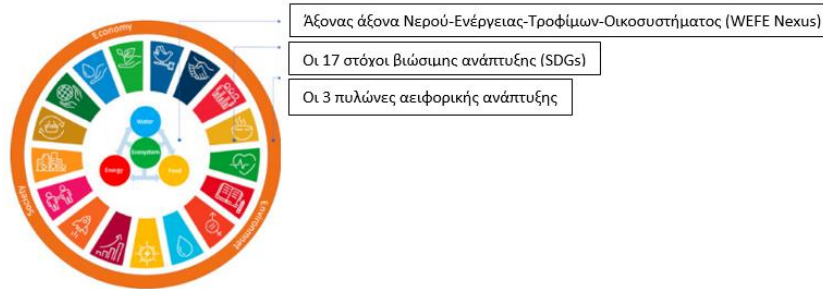
Ένα από τα “εργαλεία” για την επίτευξη του SDG 6, αποτελεί η “Ολοκληρωμένη διαχείριση υδάτινων πόρων” (Integrated Water Resources Management – IWRM) ως μία ολιστική και διασυνδεδεμένη μεθοδολογία. Αυτή, ορίζει το νερό ταυτόχρονα ως αναπόσπαστο συστατικό του οικοσυστήματος, φυσικό πόρο, κοινωνικό και οικονομικό αγαθό, του οποίου η ποιότητα και ποσότητα ορίζει την εκμετάλλευσή του. Η μεθοδολογία ορίζεται ως “Η διαδικασία που προωθεί τη συντονισμένη ανάπτυξη και διαχείριση των υδατικών αποθεμάτων, εδαφών και συσχετιζόμενων πόρων με σκοπό τη μεγιστοποίηση της οικονομικής και κοινωνικής ευημερίας με δίκαιο τρόπο, χωρίς να διακυβεύεται η βιωσιμότητα των ζωτικών οικοσυστημάτων”. Η εφαρμογή της εμπίπτει στην αναγνώριση των αναγκών διαχείρισης τόσο σε τοπικό αλλά και σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Η ίδια βασίζεται σε τρεις πυλώνες (**Εικόνα 3**): (i) τη διαμόρφωση ενός ευνοϊκού περιβάλλοντος κατάλληλων πολιτικών και στρατηγικών σχετικά με την αειφορική διαχείριση των υδατικών πόρων, (ii) τη δημιουργία του θεσμικού πλαισίου μέσω του οποίου θα εφαρμοστούν αυτές στην πράξη, και (iii) την ανάπτυξη των απαιτούμενων διαχειριστικών μέσων. Έμφαση δίνεται στην ισότητα ως προς την ασφαλή πρόσβαση στις υπηρεσίες του νερού και τη συμμετοχική λήψη διαχειριστικών αποφάσεων από τα ενδιαφερόμενα μέρη (stakeholders), προωθώντας την ανταλλαγή γνώσεων και τη χρηματοδότηση σύγχρονων εργαλείων (GWP, 2020).



Εικόνα 3: Γενικό πλαίσιο της “Ολοκληρωμένης διαχείριση υδατικών πόρων” (gwp.org)

Παρά την ελκυστικότητά του ως όρος, αποτελεί πεδίο αντιπαράθεσης καθώς εμπεριέχει ασάφειες που καθιστούν την προσέγγιση αυτή δύσκολα εφαρμόσιμη στην πράξη. Σήμερα, απαιτεί πιο αντικειμενικούς και μετρήσιμους δείκτες για να γίνει αποτελεσματική, ενώ προτείνεται η προσαρμογή του κάθε κράτους να προσμετράται σε επίπεδο ολοκληρωμένων στρατηγικών (Benson *et.al.* 2020, Islam *et.al.* 2023). Επιπλέον, οι μεταρρυθμίσεις υπό το πρίσμα της IWRM εμπεριέχουν αβεβαιότητα λόγω ευρύτερων κοινωνικοοικονομικών ή αστάθμητων παραγόντων, όπως η έλλειψη χρηματοδότησης, η πολιτική αστάθεια, εμπορικές πολιτικές, ξηρασίες κ.ο.κ. Η εμπλοκή και η συμμετοχή των ενδιαφερόμενων μερών παραμένει σχετικά χαμηλή (Al-Saidi, 2017), ενώ ο IPCC (2022) αναφέρει ότι πρέπει να διπλασιαστεί ο ρυθμός προσαρμογής στην IWRM για την επίτευξη του SDG no 6.

Μία εναλλακτική προσέγγιση αποτελεί ο “Άξονας Νερού-Ενέργειας-Τροφίμων” (Water-Energy-Food – WEF Nexus), υπό τον οποίο το νερό διαδραματίζει βασικό ρόλο στην κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη, άρρηκτα συνδεδεμένο με την παραγωγή τροφίμων και ενέργειας. Η ανάπτυξη του τομέα της γεωργίας περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα του νερού, η οποία με τη σειρά της περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα της ενέργειας. Ειδικά σε άνυδρες και ημιάνυδρες περιοχές όπως οι μεσογειακές, αναμένεται έντονος ανταγωνισμός στις χρήσεις νερού. Η αλληλεξάρτηση αυτών των πόρων προσφέρει μια ευκαιρία για συνεργιστικές στρατηγικές με στόχο την ανθεκτικότητά τους (Sun *et.al.* 2020). Επαρκέστερη προσέγγιση αποτελεί η ενσωμάτωση των οικοσυστημικών υπηρεσιών, αποδίδοντας τον “Άξονα Νερού-Ενέργειας-Τροφίμων-Οικοσυστήματος” (Water-Energy-Food-Ecosystem – WEF Nexus), ως πυλώνας καθοριστικής συμβολής για την επίτευξη των SDGs (**Εικόνα 4**). Αυτή η διασύνδεση, εμπλέκοντας τη λειτουργικότητα των οικοσυστημάτων, στοχεύει στη βιώσιμη χρήση των πόρων, μειώνοντας τις αντισταθμίσεις και ενισχύοντας τις συνέργειες μεταξύ τους (Malago *et.al.* 2021).



Εικόνα 4: Εννοιολογικό πλαίσιο διασύνδεσης των διαστάσεων του άξονα *WEFE* με τους *SDGs* (Malago *et.al.* 2021)

Πρακτικός σκοπός όλων των παραπάνω ως προς τη αποκατάσταση της διαθεσιμότητας αρδευτικού νερού, είναι η αξιοποίηση σύγχρονων τεχνολογιών και πολιτικών υπό δύο προσεγγίσεις: (i) τη μείωση της ζήτησης μέσω πρακτικών όπως π.χ. μεθόδων στάγδην άρδευσης, εδαφοκάλυψης, η διαμόρφωση πρανών κ.ά., και (ii) την εύρεση εναλλακτικών πηγών υδατικών πόρων μέσω π.χ. αφαλάτωσης, επαναχρησιμοποίησης λυμάτων και εκμετάλλευσης βρόχινου νερού. Κεντρικό σημείο και εδώ, αποτελεί η συμμετοχή των ενδιαφερόμενων μερών με απώτερο σκοπό την ευρύτερη αποδοχή και υιοθέτησή τους.

Ένα επίκαιρο πλέον μέσο για την επίτευξη όσων αναφέρθηκαν, αποτελούν τα “Συστήματα εμπνευσμένα από τη φύση” (Nature inspired systems) υπό τον άξονα του βιομιμητισμού. Τέτοιες εναλλακτικές συγκεντρώνουν ολοένα αυξανόμενο ενδιαφέρον τόσο από τον επιστημονικό κόσμο όσο και από την ευρωπαϊκή κοινότητα και τον κατασκευαστικό τομέα. Ο βιομιμητισμός ως όρος διαδόθηκε αρχικά από τον Benyus (1997), ως “μια καινοτόμος μέθοδος που βασίζεται στην έμπνευση, τη γνώση και τη μίμηση των στρατηγικών που βρίσκονται στη φύση για την επίλυση ανθρωπογενών προκλήσεων και τη δημιουργία ενός πιο υγιούς, πράσινου και βιώσιμου μέλλοντος” και συμπυκνώνεται ως “η συνειδητή μίμηση της ευφυΐας της ζωής”.

Στη φύση, πρακτικά δεν υπάρχει παραγωγή αποβλήτων, καθώς τα πάντα είναι χρήσιμα για κάτι άλλο και ανακυκλώνονται σε ένα κλειστό σύστημα υλικών. Το πλαίσιο του βιομιμητισμού αντλεί έμπνευση από τους φυσικούς κύκλους με στόχο να κλείσει τους ανθρωπογενείς, λαμβάνοντας λιγότερα από το περιβάλλον και απορρίπτοντας λιγότερα σε αυτό (Ajayi, 2023). Βιο-εμπνευσμένα καινοτόμα συστήματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τη πηγή έμπνευσής τους ως εξής: (i) το πως δημιουργούνται τα πράγματα στη φύση (υλικά), το πως οι οργανισμοί αντιλαμβάνονται το περιβάλλον τους (αισθητήρες), το πως κινούνται στο περιβάλλον τους (βιο-μηχανική και κινητική) και το πως συμπεριφέρονται και λειτουργούν (διεργασίες), (Lurie-Luke, 2014). Εφαρμογές βιομιμητισμού, βρίσκουν γόνιμο έδαφος και ως προς την βιώσιμη διαχείριση των νερού με επιπλέον στόχο τη δημιουργία ενός ανθεκτικού και αυτοτροφοδοτούμενου συστήματος παραγωγής τροφίμων. Ιδιαίτερο παράδειγμα αποτελεί το *Sietch Nevada*, μια υπόγεια πόλη, η οποία αποθηκεύει νερό κάτω από τις κατοικίες, σε σπήλαια με κυψελωτή δομή ενώ οι σήραγγες της χρησιμεύουν ως κανάλια μεταφοράς και άρδευσης. Ο σχεδιασμός τέτοιων λύσεων συνεισφέρει λοιπόν και στο μετριασμό προβλημάτων λειψυδρίας, αξιοποιώντας μη παρεμβατικούς σχεδιασμούς. Ωστόσο, περιορίζονται ακόμη, λόγω ετερόκλητων πολιτικών, απουσίας επενδύσεων και ανεπαρκούς πρόσβασης στη γνώση και τους πόρους (Othmani *et.al.* 2021).

Τα μεσογειακά νησιά, λόγω των ιδιομορφιών τους, αποτελούν ελεύθερο πεδίο “πειραματισμού” και υλοποίησης τέτοιων συστημάτων καθώς στερούνται τοπικά προσαρμοσμένων περιβαλλοντικών πληροφοριών. Ταυτόχρονα, αντιμετωπίζουν ιδιαίτερα εμπόδια ως προς τη βιώσιμη ανάπτυξή τους, λόγω κακώς καθορισμένων πολιτικών στόχων, ανεπαρκούς λήψης αποφάσεων και έλλειψης υποδομών (Grace *et.al.* 2021).

1.2 Σκοπός της μελέτης

Σκοπό της παρούσας εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της απόδοσης ενός καινοτόμου συστήματος αφαλάτωσης θαλασσινού νερού, το οποίο βασίζεται στις διεργασίες της εξάτμισης και της συμπύκνωσης για την παραγωγή αρδευτικού νερού. Το εν λόγω σύστημα υπάγεται στην αναδυόμενη τεχνολογία αφαλάτωσης που είναι γνωστή ως ηλιακή απόσταξη. Η εν λόγω τεχνολογία στοχεύει παράλληλα, την ενίσχυση της διαθεσιμότητας ασφαλούς νερού καθώς και τη βιωσιμότητα των πόρων στη βάση του άξονα WEFE. Η μελέτη συνολικά, επιχειρεί να συνεισφέρει στην εξέλιξη της εν λόγω τεχνολογίας, καθώς η επιστημονική κοινότητα στερείται επαρκών δεδομένων μελέτης αντίστοιχων συστημάτων μέσω πρακτικής εφαρμογής υπό συνεχή λειτουργία.

Συγκεκριμένα, το έργο καλούμενο *Mangrove Still System (MSS)*, λειτουργεί σε πιλοτική κλίμακα και σε αποκεντρωμένο επίπεδο στο νησί της Τήνου. Ανακτά γλυκό νερό για την αξιοποίησή του προς κάλυψη των αρδευτικών αναγκών τροπικής καλλιέργειας που αναπτύσσεται στο συνοδό παραγωγικό θερμοκήπιο (Productive Greenhouse - PGH) της εγκατάστασης. Τμήμα του MSS, αποτελεί και το “εργοστάσιο” παραγωγής αλατιού (Salt Factory – SF) που σκοπεύει στην ανάκτηση βρώσιμου αλατιού μέσω επεξεργασίας του παραπροϊόντος της άλμης. Επικουρικά αυτών, λειτουργεί η διάταξη συλλογής βρόχινου νερού (Rainwater Collector - RC) για την συλλογή και εκμετάλλευση των κατακρημνισμάτων, συνεισφέροντας στις ανάγκες άρδευσης κατά τις περιόδους βροχοπτώσεων και χαμηλής ηλιοφάνειας, όπου η παραγωγή του συστήματος εμφανίζεται μειωμένη. Το σύνολο της εγκατάστασης, γνωστό ως HYDRO5, υπάγεται στο όλο εγχείρημα του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος *HYDROUSA*, το οποίο έχει στόχο την εύρεση και εγκαθίδρυση καινοτόμων λύσεων μέσω της αξιοποίησης μη συμβατικών πηγών για την ανάκτηση γλυκού νερού. Παράλληλα, σκοπεύει στο κλείσιμο των κύκλων του νερού επιδιώκοντας τελικά οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη σε τοπικό ή και ευρύτερο επίπεδο.

Διαρθρωτικά η μελέτη, μέσω ανασκόπησης της διαθέσιμης βιβλιογραφίας (**2^ο Κεφάλαιο**) παραθέτει αρχικά το θεωρητικό υπόβαθρο της τεχνολογίας ηλιακής απόσταξης. Γίνεται περιγραφή των τεχνικών και λειτουργικών της παραμέτρων, εφαρμογών, πλεονεκτημάτων και περιορισμών της, σε αντιπαραβολή με τις τεχνολογίες αντίστροφης ώσμωσης και πολυβάθμιας εκτόνωσης, οι οποίες κατέχουν το μεγαλύτερο μερίδιο αγοράς στο τομέα της αφαλάτωσης. Παρουσιάζεται επιπλέον συνοπτικά, το θεσμικό πλαίσιο που διέπει τα ποιοτικά πρότυπα επαναχρησιμοποίησης και κατανάλωσης του νερού. Βάσει αυτών προσδιορίζονται βασικές παράμετροι ποιότητας που εξετάζονται ως προς την καταλληλότητα του ανακτώμενου νερού, με έμφαση στην αρδευτική του χρήση.

Συνεχίζοντας, στο **3^ο Κεφάλαιο** γίνεται εκτενής αναφορά στην περιοχή μελέτης και τα γεωμορφολογικά, κλιματικά, υδρογεωλογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά καθώς και τις ιδιαιτερότητές της οι οποίες συνάδουν με το πρόβλημα της λειψυδρίας στη Μεσογειακή λεκάνη και βάσει των οποίων επιλέχθηκε για την εγκατάσταση του υπό μελέτη πιλοτικού. Στο **4^ο Κεφάλαιο** γίνεται η περιγραφή του μεθόδων που αξιοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσης και περιγράφονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά και οι παράμετροι κατασκευής και λειτουργίας για το σύνολο του HYDRO5, ταυτόχρονα με τις τεχνολογίες και τα όργανα που το απαρτίζουν. Στο **5^ο Κεφάλαιο** καταλήγοντας, παρατίθενται και σχολιάζονται τα ευρήματα ως προς τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά του παραγόμενου νερού πρωτίστως, καθώς και του ανακτώμενου αλατιού. Πιο συγκεκριμένα εδώ, εξετάζεται η καταλληλότητα του νερού του MSS ως νερό άρδευσης, ενώ ελέγχονται οι προδιαγραφές αυτού και ως πόσιμο νερό. Ακόμη, σχολιάζεται η ποιότητα του εδάφους και η απόδοση της καλλιέργειας βάσει της ποιοτικής και ποσοτικής επάρκειας του νερού, όπως απορρέει από την αξιοποίησή του για άρδευση. Εξάγονται έτσι, χρήσιμα συμπεράσματα για την απόδοση του συστήματος, τους περιορισμούς που υπόκειται και τα οφέλη που παρέχει η εκμετάλλευση τέτοιων καινοτόμων λύσεων. Επιχειρείται δε, μία οικονομική και ενεργειακή αξιολόγηση αυτού, ξεχωριστά καθώς και συγκριτικά με τα αντίστοιχα βιβλιογραφικά δεδομένα, που θα συνεισφέρει στον προσδιορισμό της σχέσης “κόστους-οφέλους” βασιζόμενη στα αποτελέσματα πρακτικής εφαρμογής και τη συλλογή δεδομένων στο πεδίο.

Τέλος στα πλαίσια της έρευνας, αξιολογούνται εφαρμοσμένες τροποποιήσεις (**6^ο Κεφάλαιο**) που σκοπεύουν στην αύξηση της απόδοσής του MSS και την αύξηση της ημερήσιας παραγωγής του συστήματος, όπως δοκιμάστηκαν στα πλαίσια της έρευνας. Απώτερος σκοπός όλων και δεδομένης της απουσίας μελετών σχετικά με την πρακτική εφαρμογή τέτοιων συστημάτων σε αντίστοιχη κλίμακα, είναι η αποσαφήνιση των παραμέτρων λειτουργίας και απόδοσης και των βέλτιστων λειτουργικών συνθηκών. Έτσι, η μελέτη επιχειρεί τελικά να συνεισφέρει στην ερευνητική πρόοδο, μέσα από την αναγνώριση των περιορισμών και των κινήτρων εφαρμογής αλλά και τον προσδιορισμό των περιθωρίων βελτιστοποίησης της εν λόγω αναδυόμενης τεχνολογίας αφαλάτωσης, που θα συμβάλλουν στην περαιτέρω εξέλιξη και αναπαραγωγή των συστημάτων ηλιακής απόσταξης.

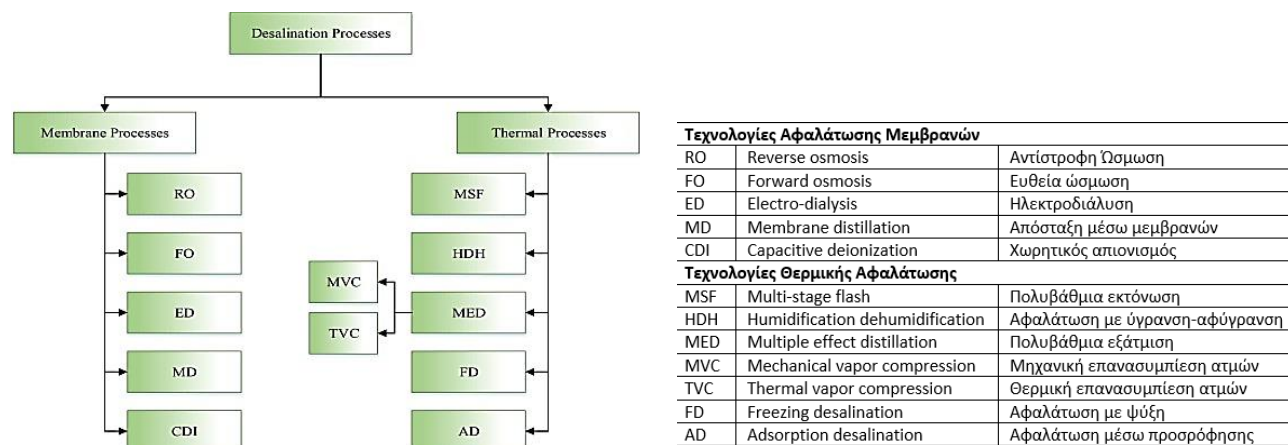
2^ο Κεφάλαιο – Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Το κεφάλαιο αυτό αφορά στη βιβλιογραφική ανασκόπηση συγκεντρωτικών πληροφοριών αναφορικά με το τομέα της αφαλάτωσης και του πλαισίου λειτουργίας των δύο πιο διαδεδομένων τεχνολογιών αφαλάτωσης. Γίνεται επιπλέον περιγραφή της μελετώμενης στην παρούσα εργασία ηλιακής αφαλάτωσης, ως αναδυόμενη τεχνολογία. Παρατίθενται, στατιστικά στοιχεία που αφορούν τις εγκαταστάσεις αφαλάτωσης στο σήμερα καθώς όπως και οι γενικές αρχές και παράμετροι λειτουργίας, οι απαιτήσεις αλλά και οι περιορισμοί κάθε τεχνολογίας. Γίνεται επίσης αναφορά, στην εξέλιξη της εκάστοτε τεχνολογίας καθώς και σε σύγχρονα υβριδικά συστήματα αυτών, που στοχεύουν στον περιορισμό του κόστους και των επιπτώσεών τους αλλά και στην αύξηση του χρόνου ζωής τους. Επιχειρείται επιπρόσθετα, μία συγκριτική παράθεση των τυπικών παραμέτρων ενεργειακής κατανάλωσης, κόστους επένδυσης, λειτουργικού κόστους και κόστους συντήρησης, καθώς και του απορρέοντος κόστους νερού. Αυτές, αποτελούν τις βασικότερες μεταβλητές εφαρμοσιμότητας και αποδοτικότητας της εκάστοτε τεχνολογίας αφαλάτωσης. Διαμέσου της αναγνώρισης των πρακτικών πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων κάθε τεχνολογίας, και βάσει της ανάγνωσης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν στην παρούσα, θα εξαχθούν εν τέλει χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με το υπό μελέτη σύστημα.

2.1 Εισαγωγικά στοιχεία για την αφαλάτωση νερού

Βάσει της προβλεπόμενης αύξησης της παγκόσμιας κατανάλωσης νερού έως 50% το 2030, αναμένεται το μισό του παγκόσμιου πληθυσμού να δεχτεί πιέσεις λόγω λειψυδρίας. Παρόλο που 71% του πλανήτη καλύπτεται από νερό, το 97% αφορά το κλάσμα θαλασσινού νερού που δεν είναι διαθέσιμο προς άμεση αξιοποίηση (Alawad *et.al.* 2023). Στη βάση αυτών, η επιστημονική κοινότητα και η παγκόσμια αγορά στρέφεται με αυξανόμενο ενδιαφέρον στην ανάκτηση γλυκού νερού μέσω μη συμβατικών μεθόδων με κυρίαρχη την αφαλάτωση θαλασσινού νερού.

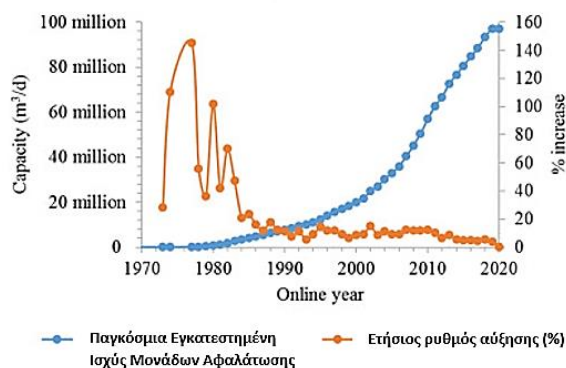
Συνολικά, οι τεχνολογίες αφαλάτωσης ταξινομούνται βάσει της μεθόδου διαχωρισμού των αλάτων από το νερό σε τεχνολογίες: (i) θερμικής αφαλάτωσης και (ii) αφαλάτωσης με μεμβράνες. Η θερμική αφαλάτωση διαχωρίζει το αλάτι από το νερό μέσω διεργασιών αλλαγής φάσης, όπως εξάτμιση και συμπύκνωση (Fritzmann *et.al.* 2007), συμπεριλαμβανομένης ως εκ τούτου και της μελετώμενης τεχνολογίας ηλιακής απόσταξης. Από την άλλη πλευρά, οι διεργασίες με μεμβράνες βασίζονται στην πίεση που ασκείται ώστε να μειωθεί το επίπεδο των διαλυτών στερεών (TDS) στο επιθυμητό, καθώς τα μόρια του νερού διαχέονται μέσω ημιπερατής μεμβράνης, ενώ τα άλατα συγκρατούνται στο ρεύμα της άλμης (Amy *et.al.* 2017). Στην **Εικόνα 5** αποτυπώνονται συγκεντρωτικά οι τεχνολογίες αφαλάτωσης ανά κατηγορία, συμπεριλαμβανομένων των αναδυόμενων ακόμη τεχνολογιών.



Εικόνα 5: Τεχνολογίες αφαλάτωσης νερού

Σήμερα, η τεχνολογία αντίστροφης ώσμωσης (Reverse Osmosis – RO) από την κατηγορία μεμβρανών και τα συστήματα πολυβάθμιας εκτόνωσης (Multi-stage flash distillation – MSF) από τις θερμικές μεθόδους αφαλάτωσης αποτελούν τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες αφαλάτωσης ανά τον κόσμο (Eke *et.al.* 2020). Η επιλογή μίας συγκεκριμένης τεχνολογίας αφαλάτωσης επηρεάζεται από ποικίλους παράγοντες όπως η αλατότητα του ανεπεξέργαστου νερού, η απαιτούμενη ποιότητα εκροής και από τοπικούς παράγοντες, όπως το κόστος εργασίας, η διαθέσιμη έκταση και η κατά τόπους αγορά ηλεκτρικής ενέργειας (Fritzmann *et.al.* 2007). Σημαντική επιπλέον, κρίνεται σήμερα και η περιβαλλοντική διάσταση των εγκαταστάσεων, καθώς παρά την αποτελεσματικότητά τους συνοδεύονται και από περιβαλλοντικές επιπτώσεις με κυριότερες (i) τη μεγάλη ποσότητα θερμών αέριων εκπομπών που προκύπτουν από την εντατική κατανάλωση ενέργειας, (ii) την ποσότητα και τη θερμοκρασία της απορριπτόμενης άλμης και (iii) την απόρριψη χημικών ουσιών που χρησιμοποιούνται κατά την προεπεξεργασία της εισροής (Karaghoulis & Kazmerski, 2013).

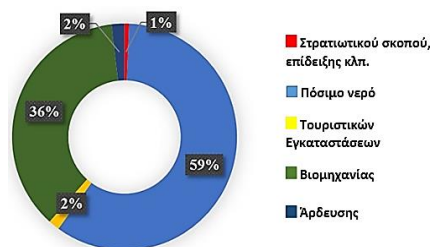
Συνολικά, παρατηρείται αυξητική τάση της αθροιστικής δυναμικότητας των εγκατεστημένων μονάδων αφαλάτωσης παγκοσμίως, από 27,252 m³/day το 1969 σε 97.2 εκατ. m³/day το 2020. Επιπλέον, έως και το διάστημα 2010-2019 η παγκόσμια εγκατεστημένη δυναμικότητα διατηρεί θετικό ρυθμό ανάπτυξης με μέση ποσοστιαία αύξηση ≈ 7%, ετησίως (**Διάγραμμα 1**).



Διάγραμμα 1: Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς εγκαταστάσεων αφαλάτωσης και ετήσιος ρυθμός μεταβολής. (Eke *et.al.* 2020)

Από τις 16,876 μονάδες αφαλάτωσης σε λειτουργία και τις 270 μονάδες υπό κατασκευή το 85% και το 91% αυτών αντιστοίχως, αποτελούν μονάδες αφαλάτωσης RO, με συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα 30.6 εκατ. m³/day από θαλασσινό και 17.8 εκατ. m³/day από υφάλμυρο νερό, ενώ ακολουθεί η τεχνολογία MSF με δυναμικότητα παραγωγής νερού 15.3 εκατ. m³/day. Οι χώρες του Αραβικού κόλπου κατέχουν τη μερίδα του λέοντος λόγω των περιορισμένων συμβατικών πηγών νερού, αντιπροσωπεύοντας το 39% της παγκόσμιας δυναμικότητας αφαλάτωσης (Eke *et.al.* 2020). Εκεί, αν και η τεχνολογία RO κερδίζει γρήγορα μερίδιο αγοράς, οι θερμικές διεργασίες αφαλάτωσης εξακολουθούν να κυριαρχούν λόγω του χαμηλού κόστους ενέργειας που απορρέει από τη μεγάλη διαθεσιμότητα ορυκτών καυσίμων στην περιοχή, ενώ ταυτόχρονα συνδυάζεται η αφαλάτωση με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Από την άλλη, παράκτιες, άνυδρες και ημι-άνυδρες περιοχές της Ευρώπης, όπως οι Μεσογειακές, στρέφονται κλιμακούμενα στην αφαλάτωση θαλασσινού νερού (Fritzmann *et.al.* 2007), με κυριότερα χρησιμοποιούμενη τεχνολογία αυτή της αντίστροφης ώσμωσης. Αν και μόνο ένα 11% της παγκόσμιας δυναμικότητας αντιστοιχεί σε εγκαταστάσεις εντός Ευρώπης, η συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα κλιμακώθηκε από 604,274 m³/d το 1990 σε άνω των 10.6 εκατ. m³/d το 2019, με ποσοστιαία αύξηση 1600%. Ως πηγή εισροής προς αφαλάτωση προτιμάται το θαλασσινό νερό με 57% των υπάρχουσών μονάδων να λειτουργούν με αυτό, ακολουθούμενες από το 20% που χρησιμοποιεί υφάλμυρο νερό. Ο λόγος επιλογής αυτών έναντι εναλλακτικών ρευμάτων όπως τα λύματα, είναι η μεγάλη διαθεσιμότητά τους για την επίτευξη της

απαιτούμενης ημερήσιας παραγωγής. Αξίζει τέλος να σημειωθεί πως, το 36% του ανακτώμενου νερού χρησιμοποιείται για βιομηχανικούς σκοπούς, έναντι 2% για άρδευση και 2% στον τομέα του τουρισμού, παρότι αποτελούν τους μεγαλύτερους καταναλωτές νερού (Διάγραμμα 2, Eke *et.al.* 2020).



Διάγραμμα 2: Επιμερισμός δυναμικότητας εγκαταστάσεων αφαλάτωσης ανά τομέα. (Eke *et.al.* 2020)

Στην Ελλάδα, η πλειοψηφία των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης χρησιμοποιούν την τεχνολογία αντίστροφης ώσμωσης με το 73% να δέχεται ως είσοδο θαλασσινό νερό. Το 40% της συνολικά εγκατεστημένης δυναμικότητας βρίσκεται στο σύμπλεγμα των Κυκλάδων λόγω του ελλειμματικού ισοζυγίου νερού, εξυπηρετώντας το 51% του πληθυσμού τους. Η δυναμικότητα εγκαταστάσεων αφαλάτωσης κάθε νομού και κάθε δήμου στις Κυκλάδες αποτυπώνεται παρακάτω (Μπακογιάννη, 2016).



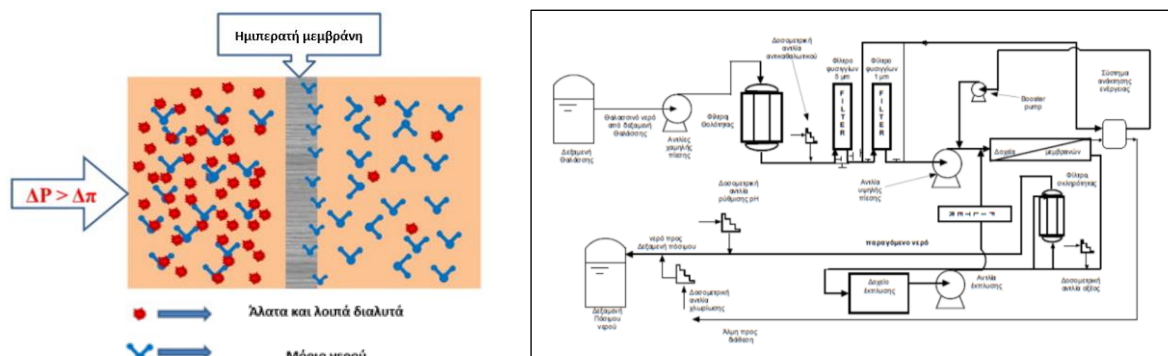
Εικόνα 6: Δυναμικότητα εγκαταστάσεων αφαλάτωσης στην Ελλάδα (αριστερά) και τις Κυκλάδες (δεξιά). (Μπακογιάννη, 2016)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι δύο ευρύτερα εφαρμοζόμενες τεχνολογίες αφαλάτωσης καθώς και το γενικό πλαίσιο ανάπτυξης και λειτουργίας της μελετώμενης τεχνολογίας ηλιακής απόσταξης.

2.2 Αφαλάτωση μέσω Αντίστροφης Ώσμωσης (Reverse Osmosis – RO)

Όπως εισαγωγικά αναφέρθηκε η τεχνολογία της αντίστροφης ώσμωσης (Reverse Osmosis – RO) είναι η ευρύτερα εφαρμοζόμενη τεχνολογία αφαλάτωσης παγκοσμίως. Κατά το φυσικό φαινόμενο της ώσμωσης, το νερό ρέει από ένα διάλυμα χαμηλής ωσμωτικής πίεσης [χαμηλής συγκέντρωση ολικών διαλυτών στερεών – Total dissolved solids (TDS)] προς το διάλυμα υψηλής ωσμωτικής πίεσης (υψηλής συγκέντρωσης TDS) διαμέσου μίας ημί-περατής μεμβράνης που επιτρέπει μόνο σε αυτό να διέλθει, έως την επίτευξη ωσμωτικής ισορροπίας. Η αφαλάτωση με συστήματα RO βασίζεται στην εφαρμογή εξωτερικής (διαφοράς, Δp) πίεσης στο ανεπεξέργαστο νερό ώστε να υπερνικήσει την (διαφορά, Δp) ωσμωτικής πίεσης και ομοίως διαμέσου ημί-περατής μεμβράνης να κινηθεί αντίθετα, απαλλαγμένο από τις διαλυτές ουσίες, επιτυγχάνοντας έτσι την ανάκτηση αμιγώς καθαρού νερού (Shenvi *et.al.* 2015). Σαν γενικός κανόνας, απαιτούνται 0.04 – 0.08 bar (0.6 – 1.1 psi) για κάθε 100 ppm ολικών διαλυμένων στερεών. Ωστόσο λόγω της υψηλής αντίστασης των μεμβρανών η εφαρμοζόμενη πίεση είναι στην πράξη σημαντικά υψηλότερη, με τυπικό εύρος 65 – 78 bar (798 – 986 psi) που φτάνει έως τα 104 bar (1500 psi).

Οι μεμβράνες δύνανται να διαχωρίσουν το αλάτι από νερό σε ποσοστό 98-99.5%, ανάλογα με το είδος τους, (Qasim *et.al.* 2019, Fritzmann *et.al.* 2007). Στην **Εικόνα 7** παρουσιάζονται σχηματικά η διεργασία RO και το ενδεικτικό ροϊκό διάγραμμα μίας εγκατάστασης.



Εικόνα 7: Σχηματική απεικόνιση της διεργασίας αντίστροφης ώσμωσης (αριστερά, Shenvi *et.al.* 2015) και ροϊκό διάγραμμα εγκατάστασης RO (δεξιά, ΜΕΛΕΤΗ Αρ.3/2021)

Τα πλεονεκτήματα που συνιστούν στο ολόένα αυξανόμενο μερίδιο αγοράς των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης RO, αφορούν την απλότητα κατασκευής τους και τη χαμηλή απαίτηση ενέργειας σε σύγκριση με τις συμβατικές εγκαταστάσεις θερμικής αφαλάτωσης (Shenvi *et.al.* 2015). Παρουσιάζουν ακόμη, μικρή απαίτηση έκτασης (σχεδιασμός compact μονάδων), εύκολη επεκτασιμότητα της εγκατάστασης με προσθήκη επιπλέον μονάδων, υψηλού βαθμού αυτοματισμού ελέγχου και λειτουργίας, που συνολικά συνεισφέρουν στο σχετικά μειωμένο ειδικό κόστος νερού (€/m³), (Atab *et.al.* 2016). Έτσι, οι εγκαταστάσεις RO δύνανται να εξυπηρετήσουν αυξημένη ζήτηση με μεγάλες διακυμάνσεις με τυπική απόδοση ανάκτησης νερού 50% (Sheng *et.al.* 2020).

Παρόλα τα θετικά της, η αφαλάτωση με RO χαρακτηρίζεται συνολικά ως κοστοβόρα και πολύπλοκη διαδικασία, με αυξημένο κόστος υλικών και απαιτήσεις συντήρησης. Επιπλέον, η ποιότητα εκροής της χαρακτηρίζεται ως χαμηλότερη έναντι των συμβατικών θερμικών διεργασιών. Παραμένει επίσης μία ενεργοβόρα τεχνολογία λόγω της υψηλής απαίτησης υδραυλικής πίεσης ώστε να ξεπεραστεί η ωσμωτική πίεση του εισερχόμενου νερού υψηλής αλατότητας, που συνεπάγεται υψηλό κόστος ενέργειας για άντληση (Atab *et.al.* 2016).

Το κόστος της όλης διεργασίας ανεβαίνει περισσότερο λόγω των απαιτήσεων προεπεξεργασίας του εισερχόμενου νερού. Ο κυριότερος λόγος αυτών, που συνιστά και τον βασικότερο περιοριστικό παράγοντα της τεχνολογίας, αφορά το πρόβλημα πλήρωσης των μεμβρανών (fouling). Η πλήρωση αποτελεί συνεπακόλουθο του φαινομένου της πόλωσης συγκέντρωσης (Concentration Polarization – CP), όπου λόγω διάχυσης του διηθήματος συσσωρεύονται διαλυμένες ουσίες στην επιφάνεια της μεμβράνης, δημιουργώντας ένα οριακό στρώμα υψηλότερης συγκέντρωσης συγκριτικά με αυτή της εισροής, με δυσμενείς συνέπειες. Αυτές περιλαμβάνουν, την πιθανή κατακρήμνιση δισθενών ιόντων και διαλυμένων αλάτων (Scaling) αλλά και κυριότερα τη μείωση του ρυθμού μεταφοράς μάζας του διηθήματος λόγω αύξησης της ωσμωτικής πίεσης εντός του οριακού στρώματος με ταυτόχρονη αύξηση της υδραυλικής αντίστασης της μεμβράνης ως προς τη ροή του νερού. Αυξάνει ως τούτου έτσι και η απαίτηση ενέργειας ώστε να συνεχιστεί η διαδικασία. (Qasim *et.al.* 2019). Γενικά τα προβλήματα πλήρωσης αφορούν στην πλήρωση των πόρων της μεμβράνης επιφανειακά ή εσωτερικά. Η επιφανειακή πλήρωση είναι συνηθέστερη για μεμβράνες RO, ενώ αντιμετωπίζεται ευκολότερα μέσω βελτίωσης των υδροδυναμικών συνθηκών τροφοδοσίας, αντίστροφης έκπλυσης της μεμβράνης, κατάλληλη προεπεξεργασία του νερού ή χημικό καθαρισμό (**Πίνακας 3**). Αντιθέτως, η εσωτερική πλήρωση αποτελεί δυσκολότερα αναστρέψιμο φαινόμενο που εάν δεν ελεγχθεί κατάλληλα συνιστά στο τέλος ζωής και την αντικατάσταση της μεμβράνης (Jiang *et.al.* 2017). Η πλήρωση των μεμβρανών εξαρτάται από χαρακτηριστικά της εισροής, τη συγκέντρωση των ρύπων

και τα φυσικοχημικά (φ/χ) χαρακτηριστικά τους, τις ιδιότητες των μεμβρανών και τις συνθήκες λειτουργίας της διεργασίας. Συνοπτικά, το φαινόμενο σύμφωνα με τους Jiang *et al.* (2017), κατηγοριοποιείται ως εξής:

- Κολλοειδής πλήρωση, η οποία προκαλείται από λεπτά αιωρούμενα σωματίδια, μεγέθους από 1 nm έως 1 μm (κολλοειδή), (i) ανόργανης φύσης όπως πυριτικά ορυκτά αργιλίου, πυρίτιο, και οξείδια/υδροξείδια του σιδήρου ή (ii) οργανικής προέλευσης όπως πολυσακχαρίτες, πρωτεΐνες, καθώς και ορισμένα φυσικά οργανικά υλικά. Η παρουσία κολλοειδών στην εισροή ενισχύει το φαινόμενο CP και συνεπακόλουθα τη πλήρωση της μεμβράνης δημιουργώντας ένα οριακό στρώμα με μορφή “κέικ”, που οδηγεί σε πρόσθετη υδραυλική αντίσταση.
- Οργανική πλήρωση, η οποία προκαλείται συνήθως από χουμικές ουσίες, πολυσακχαρίτες, πρωτεΐνες, λιπίδια, νουκλεϊκά οξέα και αμινοξέα, οργανικά οξέα και κυτταρικά συστατικά φυσικής προέλευσης. Η οργανική πλήρωση είναι δύσκολο να ελεγχθεί λόγω των πολύπλοκων δομών που σχηματίζονται από τα διαλυμένα οργανικά υλικά ενώ, οργανικές ουσίες χαμηλού μοριακού βάρους είναι δυσκολότερα αντιμετωπίσιμες μέσω των συμβατικών μεθόδων προεπεξεργασίας.
- Ανόργανη πλήρωση (Scaling), που συνιστά την εναπόθεση ανόργανων ουσιών στην επιφάνεια της μεμβράνης ή στο εσωτερικό των πόρων της μεμβράνης, λόγω χαμηλής διαλυτότητας ή υψηλής συγκέντρωσης. Συγκεκριμένα, όταν τα ανόργανα ιόντα στο προς επεξεργασία νερό υπερβούν το όριο ισορροπίας της διαλυτότητάς, καθιστούν το διάλυμα υπερκορεσμένο και δημιουργούν επικαθίσεις στη μεμβράνη λόγω ομογενούς ή ετερογενούς κρυστάλλωσης, ή καθιζάνουν σχηματίζοντας στρώμα μορφής “κέικ”. Και στις δύο περιπτώσεις επιβαρύνουν τη διαπερατότητα της μεμβράνης. Το θειικό ασβέστιο και το ανθρακικό ασβέστιο είναι οι πιο συχνά αναφερόμενοι παράγοντες ανόργανης πλήρωσης, η οποία ωστόσο μπορεί να ελεγχθεί πιο εύκολα από την οργανική πλήρωση και τη βιοπλήρωση.
- Βιοπλήρωση, η οποία προκαλείται μέσω πολύπλοκων διεργασιών προσκόλλησης και πολλαπλασιασμού μικροοργανισμών (μ/ο) στην επιφάνεια της μεμβράνης με αποτέλεσμα την δημιουργία βιοφίλμ. Κυριότερες αιτίες είναι τα βακτήρια και οι εξωκυτταρικές πολυμερείς ουσίες (EPS), οι οποίες αποβάλλονται από τα βακτήρια κατά το μεταβολισμό τους. Αναφέρεται ως το πολυπλοκότερο φαινόμενο πλήρωσης, το οποίο μπορεί να αποφέρει σημαντική αύξηση του λειτουργικού κόστους. Ο έλεγχος του μπορεί να επιτευχθεί είτε μέσω 100% απομάκρυνσης των βακτηρίων στην προεπεξεργασία, είτε μέσω της απομάκρυνσης των θρεπτικών ώστε να αποφευχθεί ο πολλαπλασιασμός των κυττάρων τους.

Στον **Πίνακα 2** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι πλέον εφαρμοζόμενες τεχνικές προεπεξεργασίας του θαλασσινού νερού πριν την είσοδό του στις μονάδες RO (Jiang *et al.* 2017, Qasim *et al.* 2019), ενώ στον **Πίνακα 3** παρατίθενται συνοπτικά, οι χρησιμοποιούμενες χημικές ενώσεις και ο σκοπός που επιτελεί η χρήση τους κατά το στάδιο προεπεξεργασίας, (Panagoroulos *et al.* 2019).

Πίνακας 2: Μέθοδοι προεπεξεργασίας της εισροής RO

Διεργασία Προεπεξεργασίας	Στόχος
Φυσική φίλτρανση υποστρώματος (Πηγάδια)	Απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών, αλγών, βακτηρίων, διαλυτού οργανικού άνθρακα (DOC) με διήθηση μέσω ιζημάτων, άμμου και πετρωμάτων.
Απολύμανση με διάλυμα χλωρίου ή όζον	Καταστροφή μ/ο, αποτροπή σχηματισμού βιοφίλμ – Απαιτήση απομάκρυνσης υπολειμματικού χλωρίου για την προστασία των μεμβρανών.
Κροκίδωση – Συσσωμάτωση – Καθίζηση ή Επίπλευση Αέρα	Αποσταθεροποίηση και απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών
Κοκκώδης διήθηση	Απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών, μ/ο, βαρέων μετάλλων με διήθηση/προσρόφηση μέσω πορώδους & κοκκώδους μέσου από άμμο, ανθρακίτη ή ενεργού άνθρακα
Μικροδιήθησης MF και Υπερδιήθησης UF	Ελαχιστοποίηση του φορτίου προς επεξεργασία και παρεμπόδιση σχηματισμού βιοφίλμ
Αντίστροφη Έκπλυση (Παροχή νερού και αέρα υπό πίεση)	Τυπικός καθημερινός καθαρισμός των πόρων της μεμβράνης

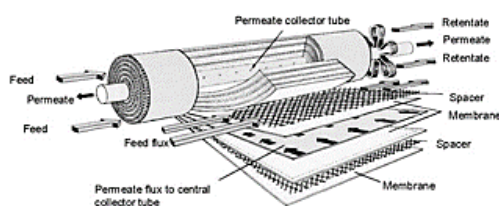
Πίνακας 3: Χημικοί παράγοντες προεπεξεργασίας της εισροής RO

Τύπος	Ουσία	Στόχος
Αναγωγικοί παράγοντες	Διθειώδες (HSO_3^-)	Αντιστάθμιση επιπτώσεων οξειδωτικών παραγόντων
Οξειδωτικοί παράγοντες	Υποχλωριώδες νάτριο (NaOCl)	Αποτροπή δημιουργίας βιομάζας
Κροκιδωτικά	Πολυμερείς ουσίες, Υδροχλωρικό οξύ (HCl), Θεικό οξύ (H_2SO_4)	Απομάκρυνσης αιωρούμενων στερεών
Πηκτικά	Πολυηλεκτρολύτες, Τριχλωριούχος σίδηρος (FeCl_3), Θεικός σίδηρος [$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$]	Απομάκρυνσης αιωρούμενων στερεών
Αντικαθαλωτικά	Πολυμερείς ουσίες	Αύξηση διαλυτότητας αλάτων (κυρίως CaSO_4 και MgSO_4)

Για την αποτελεσματικότητα της διεργασίας, οι χρησιμοποιούμενες μεμβράνες θα πρέπει να διαθέτουν υψηλή πυκνότητα σύνθεσης (μεγάλη επιφάνεια μεμβρανών συσκευασμένη σε μικρό όγκο), ευκολία καθαρισμού και αντικατάστασης και χαμηλό κόστος. Τα είδη μεμβρανών RO συνοπτικά περιλαμβάνουν τις μεμβράνες: (i) λειτουργίας πλάκας και πλαισίου, (ii) σωληνοειδούς διαμόρφωσης, (iii) κοίλων ινών και (iv) σπειροειδούς περιέλιξης.

Σήμερα η πλειοψηφία των μεγάλων εγκαταστάσεων αφαλάτωσης χρησιμοποιεί μεμβράνες σπειροειδούς περιέλιξης, καθώς λόγω της δομής τους επιτυγχάνουν υψηλότερη οικονομική αποδοτικότητα που απορρέει από την καλή ισορροπία μεταξύ πυκνότητας σύνθεσης ($< 1000 \text{ m}^2/\text{m}^3$), επίτευξης υψηλών ρυθμών μεταφοράς μάζας νερού, ευκολίας λειτουργίας και ελέγχου φαινομένων επιφανειακής πλήρωσης. Ωστόσο, είναι δύσκολο να καθαριστούν και απαιτούν αποτελεσματική προεπεξεργασία για την αποφυγή φαινομένων πλήρωσης, τα οποία σε αντίθετη περίπτωση συμβάλλουν σε υψηλή πτώση της πλευρικής πίεσης τροφοδοσίας (Qasim *et.al.* 2019).

Συνοπτικά, η δομή της σπειροειδούς περιέλιξης (**Εικόνα 8**) απαρτίζεται από φύλλα όπου το καθένα αποτελείται από ένα ζεύγος επίπεδων μεμβρανών κολλημένες σε τρεις πλευρές ενώ ανάμεσά τους υπάρχει ένα διαχωριστικό ύφασμα. Κάθε φύλλο διαχωρίζεται από το άλλο με ένα πλέγμα, και όλα τυλίγονται γύρω από το κεντρικό διάτρητο σωλήνα. Έτσι εναλλάσσονται, δημιουργώντας κανάλια τροφοδοσίας και διηθήματος. Το νερό εισέρχεται παράλληλα του διάτρητου σωλήνα και εξαναγκάζεται να διέλθει ακτινικά μέσα από τη δομή μεμβρανών. Το διήθημα έπειτα συλλέγεται στο διάτρητο σωλήνα και απορρέει ενώ η υπολειπόμενη άλμη απορρέει από την αντίθετη πλευρά (Fritzmann *et.al.* 2007).



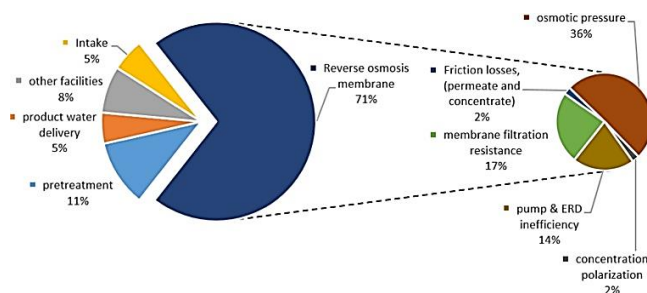
Εικόνα 8: Μονάδα μεμβράνης RO με σπειροειδή περιέλιξη. (Qasim *et.al.* 2019)

Ως προς το υλικό, σήμερα οι μεμβράνες “σύνθετου λεπτού φιλμ” (Thin film composite – TFC) χρησιμοποιούνται σε ποσοστό 90% των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης. Τα πλεονεκτήματά τους περιλαμβάνουν υψηλή σταθερότητα, υψηλότερη συγκράτηση αλάτων και πυριτίου, μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας (έως $45 \text{ }^\circ\text{C}$) και pH (2-12), ικανοποιητικό ρυθμό μεταφοράς μάζας νερού, αντίσταση στη βακτηριακή αποικοδόμηση και απαίτηση χαμηλότερης πίεσης λειτουργίας λόγω του εξαιρετικά λεπτού και πορώδους υποστρώματος, χαρακτηριστικά που συνεπάγονται χαμηλότερο κόστος λειτουργίας. Ωστόσο, οι μεμβράνες TFC είναι ευάλωτες στην επιφανειακή πλήρωση και ιδιαίτερα ευαίσθητες στο ελεύθερο χλώριο και το όζον, (Qasim *et.al.* 2019, Fritzmann *et.al.* 2007).

Οι μεμβράνες TFC αποτελούνται από ένα ενεργό στρώμα πολυαμίδιου (TFC-PA) και ένα πορώδες υπόστρωμα, συνήθως μία μεμβράνη μικρό- ή υπέρ- διήθησης από πολυσουλφόνη. Το τελικό προϊόν παράγεται με διεπιφανειακό πολυμερισμό, μια μέθοδο που αναπτύχθηκε από τον Cadotte το 1988 και επιτρέπει την παραγωγή πολυμερικών στρωμάτων πάχους μικρότερου των 50 nm. Η εμπορική ονομασία των μεμβρανών αυτών είναι FT-30 και ο μεγαλύτερος κατασκευαστής είναι η εταιρεία *DOW FILMTEC*. Η FT-30 αποδίδει ρυθμό μεταφοράς μάζας σχεδόν $1 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-day}$, με 99.2% συγκράτηση αλάτων και απαίτηση πίεσης 55 bar. Η δομή της παρέχει υψηλού βαθμού αντοχή σε συμπίεση καθώς και θερμική και χημική αντοχή. Αν και δεν είναι πλήρως ανθεκτική, η FT-30 παρουσιάζει ικανοποιητικό βαθμό αντοχής στο χλώριο, επαρκή σε περίπτωση τυχαίας έκθεσης (Lee *et.al.* 2011). Ο Bennett (2013) αναφέρει πως η ανάπτυξη των μεμβρανών TFC-PA έφερε επανάσταση στο τομέα της αφαλάτωσης RO, με σημαντικές βελτιώσεις λόγω των χαρακτηριστικών τους, γεγονός που συνέβαλε στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών CO₂. Επιπλέον, μέθοδοι βελτιστοποίησης των μεμβρανών όπως η επιφανειακή τροποποίηση για την “υδρόφιλοποίηση” τους δύναται να επιφέρουν περαιτέρω αύξηση της διαπερατότητας και της αντοχής στο χλώριο (Lee *et.al.* 2011). Ωστόσο, η βελτιστοποίησή τους μπορεί να επιδράσει και αρνητικά όπως π.χ. η επικάλυψη μεμβρανών (coating) για την αύξηση της αντίστασης στην πλήρωση είναι πιθανό να επιφέρει μείωση στο ρυθμό διήθησης. Ως εκ τούτου, η βέλτιστη ισορροπία διηθητικότητας, απόρριψης αλάτων και αντίστασης στην πλήρωση δεν έχει επιτευχθεί (Jiang *et.al.* 2017).

Τα τελευταία χρόνια, διάφοροι τύποι καινοτόμων υλικών μελετώνται ως εναλλακτικοί σχεδιασμοί, αναπτύσσοντας υψηλής διηθητικότητας και μεγάλης αντίστασης στην πλήρωση μεμβράνες με στόχο τη μείωση της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας (kWh/m^3) και αντιστοίχως των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ($\text{kg CO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$), (Amy *et.al.* 2017). Επιτυγχάνουν επιπλέον, μειωμένη απαίτηση χημικών, αυξημένη διάρκεια ζωής και αυξημένη λειτουργική απόδοση (Qasim *et.al.* 2019). Υλικά μεμβρανών όπως νανοπορώδες γραφένιο, νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs), νανοσωματίδια οξειδίων μετάλλων, μεμβράνες άκαμπτων αστεροειδών αμφίφυλων μορίων (Polymeric membrane fabricated via rigid star-shaped amphiphilic molecules), νανο-συνθετικές μεμβράνες με ζεόλιθο και βιομιμητικές μεμβράνες παρουσιάζουν βελτιστοποιημένες ιδιότητες σε εργαστηριακής κλίμακας εφαρμογές. Ωστόσο, απέχουν ακόμα σημαντικά από την ευρεία αξιοποίησή τους, καθώς παρουσιάζουν αυξημένο κόστος λόγω της πολυπλοκότητας (Jiang *et.al.* 2017, Lee *et.al.* 2011).

Η καταναλισκόμενη ενέργεια που απαιτείται για την κυρίως διεργασία της RO αντιπροσωπεύει το 71% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης μίας εγκατάστασης αφαλάτωσης RO ($2.54 \text{ kWh}/\text{m}^3$ από $3.57 \text{ kWh}/\text{m}^3$ συνολικής ειδικής κατανάλωσης (**Διάγραμμα 3**), (Voutchkov 2018).



Διάγραμμα 3: Επιμερισμός τυπικής κατανάλωσης ενέργειας εγκατάστασης RO. (Voutchkov, 2018)

Ο τομέας που επέφερε αλματώδη αποτελέσματα στη τεχνολογία αντίστροφης ώσμωσης ως προς τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας και του αντιστοιχού κόστους, είναι αυτός της ανάκτησης ενέργειας. Με τη χρήση συσκευών όπως εναλλάκτες πίεσης (αντλίες θετικής εκτόπισης), υδροστρόβιλους (Atab *et.al.* 2016), τουρμπίνες Pelton ή υπερσυμπίεστες, γίνεται εφικτή η αξιοποίηση της ενέργειας που φέρει ως πίεση το ρεύμα της απορριπτόμενης άλμης, με σκοπό την αύξηση της πίεσης της εισροής (Lange, 2013). Αναφέρεται πως λόγω

τριβών, 1-5 bar πίεσης χάνονται από το ρεύμα της εκροής άλμης, τα οποία συμπληρώνονται στην τροφοδοσία με την χρήση αντλιών χαμηλής πίεσης, επιτυγχάνοντας έτσι σημαντική μείωση του κόστους άντλησης (Nashed & Dang, 2020). Σήμερα, τις πλέον χρησιμοποιούμενες συσκευές ανάκτησης αποτελούν οι εναλλάκτες πίεσης, ακολουθούμενες από τους υπερσυμπιεστές (Eke *et.al.* 2020). Μέσω της ανάκτησης ενέργειας, η κατανάλωση μειώθηκε δραματικά από 5 με 10 kWh/m³ τη δεκατία του '90 σε 3 με 4 kWh/m³ σήμερα (Amy *et.al.* 2017). Οι αποδοτικότερες εγκαταστάσεις από πλευράς ενεργειακής κατανάλωσης σήμερα χρησιμοποιούν 2.5 με 2.8 kWh/m³, ενώ η χαμηλότερη ειδική κατανάλωση που έχει καταγραφεί είναι 1.58 kWh/m³ (Voutchkon, 2018, Bennett, 2013). Η μέση κατανάλωση της βιομηχανίας RO υπολογίζεται στις 3.1 kWh/m³ (Voutchkon, 2018), συγκριτικά 10 φορές μικρότερη συγκριτικά των εγκαταστάσεων θερμικών μεθόδων αφαλάτωσης. Ως εκ τούτου, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι συγκριτικά χαμηλότερες της τάξης των 1.7 έως 2.8 kg CO₂/m³ (Alawad *et.al.* 2023). Παρά τη πρόοδο που καταγράφεται, τα επίπεδα καταναλισκόμενης ενέργειας στις εγκαταστάσεις RO παραμένουν υψηλά, υπερδιπλάσια του θεωρητικού θερμοδυναμικού ορίου των 1.1 kWh/m³ που απαιτείται για την διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης (Ali *et.al.* 2018). Ως εκ τούτου, προτείνεται μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης κατά 20% στο εγγύς μέλλον, με μεσοπρόθεσμο στόχο (3-5 έτη) τη μείωση σε 2.5 kWh/m³ και μακροπρόθεσμο (> 5 έτη) σε 1.5 kWh/m³ (Amy *et.al.* 2017).

Στη βάση αυτή, εναλλακτικές όπως (i) συνεγκατάσταση μονάδων RO με μονάδες παραγωγής ενέργειας και αξιοποίηση του νερού ψύξης αυτών για την προθέρμανση της εισροής και αύξηση του ρυθμού διηθησιμότητας, (ii) επεξεργασία εισροής με χαμηλότερη αλατότητα ή μείγμα θαλασσινού-υφάλμυρου νερού και (iii) μεγιστοποίηση της απόδοσης του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού με τη χρήση π.χ. μεγάλων αντλιών που εξυπηρετούν πολλαπλές σειρές RO, ενδέχεται να επιφέρουν μείωση της απαιτούμενης ενέργειας σε ποσοστό 3-5%, > 50% και 5-10% αντιστοίχως (Voutchkon, 2018).

Καθώς η αφαλάτωση με RO, βασίζεται ως επί το πλείστον σε ενέργεια που εξάγεται από καύσιμα με βάση τον άνθρακα, μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον έχει στραφεί στην ανάπτυξη συστημάτων που θα τροφοδοτούνται πλήρως ή εν μέρει μέσω αξιοποίησης διαφόρων τύπων ΑΠΕ (Ali *et.al.* 2018). Στη συγκριτική τους μελέτη οι Alawad *et.al.* (2023) αναφέρουν πως υβριδικά συστήματα RO-ηλιακής ενέργειας και RO-αιολικής ενέργειας είναι τα ευρύτερα εφαρμοζόμενα έναντι των υπολοίπων ΑΠΕ, κατέχοντας αντίστοιχο ποσοστό της αγοράς 32% και 19%. Συμπερασματικά οι ίδιοι σε συμφωνία με τους Amy *et.al.* (2017), αναφέρουν πως ενώ η χρήση υβριδικών συστημάτων RO με ΑΠΕ δεν μειώνει την ειδική κατανάλωση ενέργειας της διεργασίας, συμβάλει στον περιορισμό των εκπομπών CO₂, χωρίς ωστόσο να παρατίθεται ποσοτικοποίηση αυτών. Οι Amy *et.al.* (2017) εντοπίζουν την μεγαλύτερη μονάδα αφαλάτωσης που λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια στη Σαουδική Αραβία, με δυναμικότητα 300,000 m³/day. Κομβικό περιορισμό στην εφαρμογή όμως τέτοιων συστημάτων σε βιομηχανική κλίμακα αποτελεί η απαίτηση αποθήκευσης της ανακτώμενης ενέργειας με την χρήση μπαταριών μολύβδου-οξέος, οι οποίες απαιτούν συχνή αντικατάσταση ανεβάζοντας τελικά το κόστος αφαλάτωσης και επιβαρύνοντας το περιβάλλον μέσω της διάθεσής τους (Ali *et.al.* 2018). Στο αντίποδα, προτείνεται συνδυασμός συμβατικής ενέργειας-ΑΠΕ ή η χρήση διαφορετικών ταχυτήτων λειτουργίας (Alawad *et.al.* 2023).

Περαιτέρω περιορισμοί της τεχνολογίας αφαλάτωσης RO συνολικά, αφορούν στη διάθεση της παραγόμενης άλμης, την συγκράτηση του βορίου κατά τη διεργασία καθώς και στην ανάγκη μετεπεξεργασίας της εκροής προς εμπλουτισμό και απολύμανση.

Η παραγόμενη άλμη από μία εγκατάσταση RO συνίσταται τυπικά από νερό αντίστροφης έκπλυσης των μεμβρανών με υψηλά φορτία στερεών, που περιέχουν βιολογική, ανόργανη και οργανική ύλη, και το αλατούχο συμπύκνωμα που συχνά περιέχει αντιδιαβρωτικά και λοιπά διαλύματα καθαρισμού των μεμβρανών (Fritzmann *et.al.* 2007). Οι μέθοδοι διάθεσης της άλμης περιλαμβάνουν την άμεση απόρριψη στη θάλασσα, την επιφανειακή απόρριψη, τις λίμνες εξάτμισης και την έγχυση σε πηγάδια. Η απευθείας διάθεση στη θάλασσα είναι η πλέον

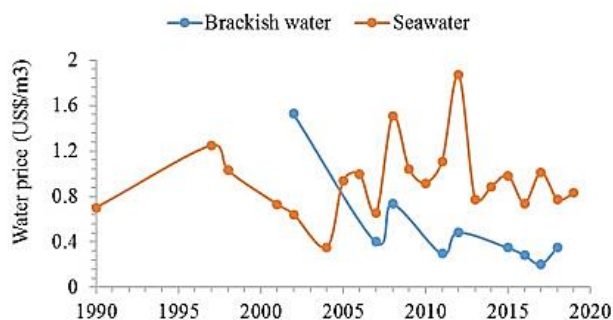
εφαρμοζόμενη μέθοδος, προξενώντας μεταβολή στην αλατότητα, την αλκαλικότητα και τη θερμοκρασία του υδατινού σώματος (Qasim *et.al.* 2019). Λόγω της υψηλότερης πυκνότητας από το θαλασσινό νερό (υψηλά επίπεδα TDS), αποτελεί σοβαρή περιβαλλοντική απειλή, με κίνδυνο πρόκλησης ωσμωτικού στρες στους υδρόβιους οργανισμούς (Fritzmann *et.al.* 2007). Επιπλέον, η απευθείας απόρριψη στη θάλασσα επηρεάζει τον πληθυσμό των μικρο-αλγών, την χλωρίδα της θάλασσας και έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ιλύος. Εκτός της υψηλής αλατότητας η άλμη μπορεί να περιλαμβάνει και άλλα συστατικά, όπως αλογονωμένες οργανικές ενώσεις, μέταλλα, βιοκτόνα (χλώριο), αντιδιαβρωτικά, αντιρρυπαντικά, διαβρωτικά και οξέα (Shenvi *et.al.* 2015). Πιθανές επιλογές επεξεργασίας της περιλαμβάνουν τη μείωση της ποσότητάς της με λειτουργία σε χαμηλότερα επίπεδα ανάκτησης νερού, την ανάκτηση άλατος και των περιεχόμενων χημικών, την αραίωση της άλμης με θαλασσινό νερό, λύματα ή νερό άλλων βιομηχανιών, τη χρήση συσκευών διάχυσης της άλμης σε μεγαλύτερη περιοχή με αυξημένη ταχύτητα διασποράς κ.ά. (Qasim *et.al.* 2019, Amy *et.al.* 2017, Fritzmann *et.al.* 2007).

Η συγκράτηση του βορίου μέσω των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης παραμένει έως σήμερα ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που επηρεάζουν την απόδοση και το κόστος της διεργασίας. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (ΠΟΥ) θέτει όριο βορίου στο πόσιμο νερό τα 0.5 mg/L, καθώς σε υψηλότερες συγκεντρώσεις αναφέρεται ότι επιφέρει γενετικές βλάβες και θανάσιμες ανωμαλίες. Επιπλέον, προκαλεί δυσμενείς επιπτώσεις στην χλωρίδα και την πανίδα. Το πρόβλημα αναγνωρίστηκε με τη χρήση αφαλατωμένου νερού για άρδευση στο Ισραήλ το 1997, όπου παρατηρήθηκε δηλητηρίαση των καλλιεργειών και μάρανση των φύλλων τους (Qasim *et.al.* 2019, Fritzmann *et.al.* 2007). Το βόριο υπάρχει στο θαλασσινό νερό σε τυπικές συγκεντρώσεις 5-6 mg/L, κυρίως ως βορικό οξύ λόγω του pH του νερού. Το βόριο ως βορικό οξύ, σε αντίθεση με της θερμικές μεθόδους αφαλάτωσης, δεν συγκρατείται από τις μεμβράνες RO, και μπορεί να διαχυθεί άνετα ακριβώς όπως το νερό, με τυπικό ποσοστό συγκράτησης < 80%. Σε pH > 9.3, το βόριο υφίσταται στο νερό ως βορικό ανιόν (τετραϋδροξυβορικό ανιόν) βάσει της: $B(OH)_3 + OH^- \leftrightarrow B(OH)_4^-$. Το βορικό ανιόν συγκρατείται αποτελεσματικότερα από τις μεμβράνες RO, σε ποσοστό έως 99%. Ως εκ τούτου απαιτείται ρύθμιση του pH για την αποτελεσματική απομάκρυνσή του. Συνήθως, εφαρμόζεται μία διαδικασία 2 σταδίων διήθησης όπου στην πρώτη συγκρατείται το κλάσμα των TDS χωρίς ρύθμιση του pH, ενώ κατά το 2^ο στάδιο υπό χαμηλή πίεση λειτουργίας, αυξάνεται το pH σε 9.0-11.0 για να επιτευχθεί η συγκράτηση των βορικού ανιόντος (Shenvi *et.al.* 2015) ή ακόμη κατά την επανακυκλοφορία γίνεται χρήση αντικαθαλωτικών (Voutchkon, 2018). Άλλες εφαρμογές για την απομάκρυνση του βορίου αποτελούν, η χρήση μεμβρανών υψηλής συγκράτησης βορίου (Qasim *et.al.* 2019) ή η μετεπεξεργασία του διηθήματος με τη χρήση επιλεκτικών στο βόριο ιοντοανταλλακτικών ρητινών (Shenvi *et.al.* 2015). Σε κάθε περίπτωση, η απαίτηση συγκράτησης του βορίου ανεβάζει επιπλέον το κόστος της διεργασίας RO.

Αν και το νερό που προκύπτει από τη διεργασία της RO χαρακτηρίζεται ως υψηλής ποιότητας απαλλαγμένο από παθογόνα και ακαθαρσίες, μεταπεξεργασία απαιτείται επιπλέον ώστε να τηρεί τις ποιοτικές απαιτήσεις ως πόσιμο ή αρδευτικό νερό. Οι μέθοδοι μετεπεξεργασίας περιλαμβάνουν (Shenvi *et.al.* 2015, Delion *et.al.* 2004):

- Εμπλουτισμός μεταλλικών ιόντων μέσω φίλτρανης ή έγχυσης χημικών. Σκοπός είναι (ii) η επίτευξη άσβεστο-ανθρακική ισορροπία για την αποφυγή δημιουργίας επικαθίσεων στις σωληνώσεις του δικτύου, (ii) ο περιορισμός της δράσης των χλωριόντων μέσω αύξησης της αλκαλικότητας για την εξάλειψη της διαβρωτικής δράσης του νερού και (iii) η ρύθμιση του δείκτη SAR σχετικά με την καταλληλότητά του για άρδευση.
- Εξάλειψη της δράσης των ιόντων νατρίου και των χλωριόντων και για τον περιορισμό της επίγερσης στο νερό. Προσθήκη ασβεστίου και διττανθρακικών.
- Απαερίωση του CO₂ και αερισμός για την απομάκρυνση του H₂S.
- Απολύμανση με τη χρήση υποχλωριώδους νατρίου (χλωρίνης) για την αποφυγή ανάπτυξης παθογόνων στο δίκτυο. Οι Eke *et.al.* (2020) αναφέρουν εδώ πως το 84% των εγκαταστάσεων χρησιμοποιούν αυτή τη μέθοδο απολύμανσης λόγω μικρότερου κόστους.

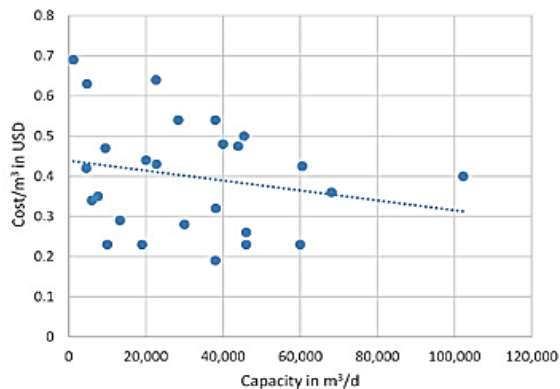
Φτάνοντας στην οικονομική εκτίμηση, η εξέλιξη αλλά και οι λειτουργικοί περιορισμοί της τεχνολογίας όπως αναπτύχθηκαν, αποτυπώνονται συγκεντρωτικά στο ειδικό κόστος παραγόμενου νερού ή κόστος κύκλου ζωής. Το κόστος αυτό υπολογίζεται διαιρώντας το σύνολο ετήσιου κόστους κεφαλαίου, ετήσιων λειτουργικών εξόδων και εξόδων συντήρησης με το ετήσιο όγκο παραγόμενου αφαλατωμένου νερού (Shokri & Fard, 2023). Συνολικά, η μέθοδος αντίστροφης ώσμωσης παρουσιάζει το μικρότερο κόστος νερού έναντι των υπολοίπων μεθόδων χάρις στην τεχνολογική της πρόοδο που συνέβαλε στη μείωση αυτού διαχρονικά. ().



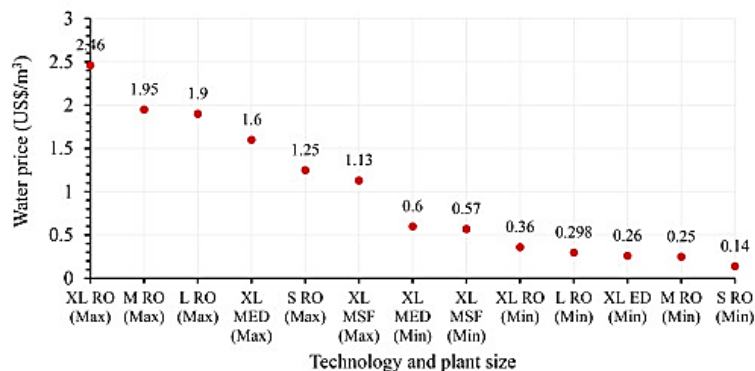
Διάγραμμα 4: Διαχρονική μεταβολή του μέσου ειδικού κόστους νερού από εγκαταστάσεις RO (Eke *et.al.* 2020)

Πολλοί παράγοντες ωστόσο, παίζουν ρόλο στην τελική διαμόρφωση του κόστους νερού, όπως η ποιότητα του νερού προς αφαλάτωση, το ετήσιο επιτόκιο, το κόστος κεφαλαίου της μονάδας, το κόστος ενέργειας, το κόστος εργασίας και συντήρησης, η περιοδικότητα αντικατάστασης των μεμβρανών και η μέθοδος διάθεσης της άλμης. Από αυτούς η ενέργεια αποτελεί την ποσοστιαία υψηλότερη μεταβλητή καθώς συμβάλει κατά 44% στη διαμόρφωση του κόστους νερού μέσω συστημάτων RO (Al-Karaghoulis & Kazmerski, 2013). Το κόστος της ενέργειας ωστόσο ποικίλει ανάλογα την περιοχή που λαμβάνει χώρα η εγκατάσταση, καθώς συγκριτικά η τιμή της κιλοβατώρας στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα (ΗΑΕ) υπολογίζεται σε \$0.025/kWh έναντι \$0.05/kWh σε ΗΠΑ, Κίνα, Ισπανία και Αλγερία. Άλλος παράγοντας που βρέθηκε να επηρεάζει την τιμή του παραγόμενου νερού είναι η δυναμικότητα της εγκατάστασης. Για μονάδες τεχνολογίας RO αναφέρεται πως το κόστος αυξάνει με την αύξηση της δυναμικότητας αφού το ελάχιστο μέσο κόστος νερού υπολογίζεται σε 0.14, 0.25, 0.298 και 0.36 \$/m³, για εγκαταστάσεις μικρής, μεσαίας, μεγάλης και πολύ μεγάλης κλίμακας RO αντίστοιχα. Παράλληλα, η μέγιστη τιμή του φτάνει αντιστοίχως στα 1.25, 1.95, 1.9 και 2.46 \$/m³. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται καθώς με την αύξηση της δυναμικότητας, το κόστος κεφαλαίου αυξάνει σημαντικά, ενώ υπολογίζεται πως αντιπροσωπεύει το 52% του συνολικού κόστους της αφαλάτωσης (Eke *et.al.* 2020). Πιο συγκεκριμένα, βρέθηκε ότι το μέσο κόστος κεφαλαίου για μονάδες RO της μεσογειού υπερβαίνει τα μέσα λειτουργικά κόστη με τιμή 0.63 \$/m³ έναντι 0.35 \$/m³, αντίστοιχα (Shokri & Fard, 2023). Ένα μέσο εύρος κόστους κεφαλαίου εκτιμάται σε 500–600 \$/m³, ωστόσο μπορεί να φτάσει σε σημαντικά υψηλότερη τιμή των 2974 \$/m³, όπως αναφέρθηκε σε εγκατάσταση της Β. Καλιφόρνιας (Pearson *et.al.* 2021). Ωστόσο, φαίνεται πως για να ισχύει η παραπάνω συσχέτιση δεν θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κόστη άντλησης, απόρριψης και μεταφοράς, τα οποία κλιμακώνονται για μικρότερες μονάδες, αφού το κόστος νερού μίας μικρής εγκατάστασης RO (< 4,000 m³/day) βρέθηκε να μειώνεται από \$3.20/m³ σε \$0.53 – \$1.58/m³, υπό αυτή την προσέγγιση (<https://www.advisian.com/en/global-perspectives/the-cost-of-desalination>)

Έτσι, παρατηρείται επικρατέστερα μία αντικρουόμενη εκτίμηση του ειδικού κόστους νερού σε σχέση με την δυναμικότητα της μονάδας, στην διαθέσιμη βιβλιογραφία Συγκεκριμένα, υποστηρίζεται πως με την αύξηση της εγκατάστασης μειώνεται το ειδικό κόστος νερού βάσει του συμβατικού μοντέλου οικονομίας της κλίμακας (Fritzmann *et.al.* 2007, Wenten *et.al.* 2016, Shokri & Fard, 2023). Αυτό αποδίδεται στην μείωση του λειτουργικού κόστους με την αύξηση της δυναμικότητας, όπως απεικονίζεται στο **Διάγραμμα 6**. Η μεγάλη διασπορά των τιμών που παρατηρείται ωστόσο, δε συνιστά σε ασφαλή εκτίμηση, παρά μόνο σε μία εκτίμηση της τάσης.



Διάγραμμα 6: Μεταβολή λειτουργικού κόστους έναντι δυναμικότητας εγκαταστάσεων RO (Pearson *et.al.* 2021)



Διάγραμμα 5: Εύρος ειδικού κόστους παραγόμενου νερού σε συνάρτηση με τη δυναμικότητα των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης. (Eke *et.al.* 2020)

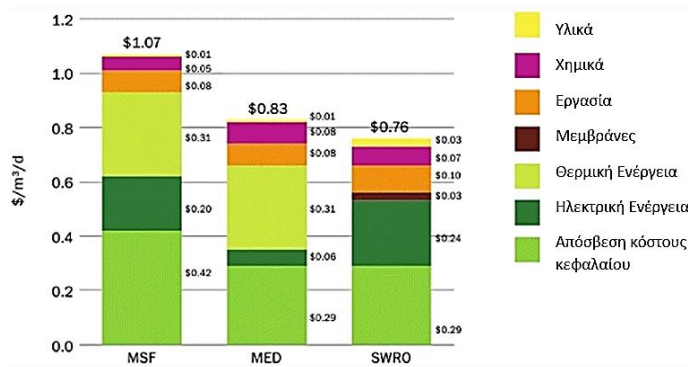
Ωστόσο, καθώς η μονάδες RO αφορούν κυρίως *compact* εγκαταστάσεις, η οικονομία κλίμακας δεν έχει σημαντική επίδραση στη διακύμανση της τιμής του παραγόμενου νερού όπως επιβεβαιώνεται και από το μεγάλο εύρος ανάμεσα στην μέγιστη και ελάχιστη τιμή του νερού για κάθε κλίμακα (**Διάγραμμα 5**) (Shokri & Fard, 2023).

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά το κόστος παραγόμενου νερού είναι η ποιότητα εισροής. Το κόστος του νερού που προέρχεται από αφαλάτωση RO υφάλμυρου νερού βρέθηκε να κυμαίνεται μεταξύ 0.2–0.4 \$/m³ έναντι 0.5–1.2 \$/m³ για αφαλάτωση θαλασσινού νερού, με αντίστοιχα κόστη επένδυσης 300–1200 \$/m³/d και 900–2500 \$/m³/d. Ενδεικτικό είναι το γεγονός πως μονάδα RO πολύ μεγάλης κλίμακας παρήγαγε νερό με κόστος 0.21 \$/m³, καθώς χρησιμοποιούσε ως εισροή λύματα με μειωμένη απαίτηση ενέργειας (Eke *et.al.* 2020).

Αξίζει λοιπόν συνολικά να σημειωθεί, πως το υπολογιζόμενο κόστος νερού ποικίλει ανά εγκατάσταση σε σημαντικό βαθμό ακόμα και μεταξύ ίδιας δυναμικότητας. Αρκετές διαφορές στις πραγματικές τιμές προσφοράς μπορεί να οφείλονται σε ιδιαίτερους παράγοντες, όπως πολιτικοί και οικονομικοί κίνδυνοι, αποσβέσεις, επιδοτήσεις (Shokri & Fard, 2023), και διαφορές σχετικά με διοικητικά έξοδα, συμπεριλαμβανομένου του κέρδους του παρόχου (Qasim *et.al.* 2019). Επιπλέον τα λειτουργικά κόστη κάθε εγκατάστασης δύναται να διαφέρουν σημαντικά εξαιτίας διαφορών σε εφαρμοζόμενες ρυθμιστικές πολιτικές, ενεργειακό κόστος και απόσταση διανομής της ενέργειας, χρησιμοποιούμενη τεχνολογία, μέγεθος της μονάδας, ποιότητα της εισροής, κόστος άντλησης και παροχέτευσης (Pearson *et.al.* 2021).

Προτείνεται ακόμη, η εφαρμογή “ανάλυσης κόστους ζωής” (Life Cost Analysis – LCA), αντί της εκτίμησης του ειδικού κόστους, συμπεριλαμβάνοντας έτσι και τις περιβαλλοντικές διαστάσεις του κόστους αφαλάτωσης (Qasim *et.al.* 2019). Δυσεύρετα στοιχεία τέτοιων αναλύσεων, έδειξαν πως η τεχνολογία RO έχει σημαντικά χαμηλότερο περιβαλλοντικό φορτίο από τις θερμικές διεργασίες αφαλάτωσης (MSF και MED), ως προς τις αέριες εκπομπές που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας στο στάδιο λειτουργίας. Το γεγονός εξηγείται, καθώς η κατανάλωση της RO, σε όρους πρωτογενούς ενέργειας, είναι περίπου 5-6 φορές χαμηλότερη από τις θερμικές τεχνολογίες (Raluy *et.al.* 2006).

Τελικά, η εκτίμηση του ειδικού κόστους αποτελεί μία περίπλοκη διαδικασία διαφόρων προσεγγίσεων που δεν επιτρέπει εύκολα την άμεση συσχέτιση των τιμών. Έτσι, λαμβάνεται υπόψη μία τυπική διαμόρφωση του μέσου ειδικού κόστους νερού συναρτήσει των διαφόρων παραμέτρων λειτουργικού κόστους και αποσβέσεων, όπως απεικονίζονται στο **Διάγραμμα 7**, για τις εγκαταστάσεις RO έναντι των δύο δημοφιλέστερων τεχνολογιών θερμικής αφαλάτωσης MSF και MED (Shokri & Fard, 2023, GWI 2011).



Διάγραμμα 7: Τυπική διαμόρφωση ειδικού κόστους νερού για εγκαταστάσεις RO, MSF, MED (Shokri & Fard, 2023)

Παρά τη σημαντική μείωση του συνολικού κόστους αφαλάτωσης μέσω RO, και της σημαντικής ωρίμανσης της τεχνολογίας, παραμένει μία ενεργειακά απαιτητική διεργασία. Εκτιμάται επιπροσθέτως πως το κόστος του παραγόμενου νερού δεν θα μειωθεί μελλοντικά με τον ίδιο ρυθμό λόγω της αύξησης του κόστους βελτιστοποιημένων μεμβρανών, νομισματικών διακυμάνσεων και του ασταθούς κόστους του αργού πετρελαίου. Έτσι, διάφορες εταιρείες παραγωγής μεμβρανών προβλέπουν ότι η αύξηση στο εγγύς μέλλον θα είναι αναπόφευκτη. Επιπλέον λόγω των ολοένα αυστηρότερων περιβαλλοντικών προδιαγραφών, το κόστος των χημικών ουσιών και των αδειών προβλέπεται να επιβαρύνει την αγορά αφαλάτωσης (Shokri & Fard, 2023).

Η ερευνητική κοινότητα προτείνει ένα ευρύ φάσμα παρεμβάσεων και καινοτομιών για την περαιτέρω πρόοδο της αφαλάτωσης RO, με σκοπό την μείωση της ενεργειακής απαίτησης, του συνολικού κόστους και την αύξηση της αποτελεσματικότητάς της στον ορίζοντα των εντεινόμενων φαινομένων λειψυδρίας. Βάσει των προτάσεων εξέλιξης ο Voutchkov (2018) προβλέπει περαιτέρω μείωση της ειδικής ενεργειακής απαίτησης και ειδικού κόστους νερού σε 2.1–2.4 kWh/m³ και 0.3-0.5 \$/m³, αντίστοιχα. Οι προτάσεις αυτές συνοπτικά αφορούν (Shokri & Fard, 2023, Eke *et.al.* 2020, Voutchkov, 2018, Ali *et.al.* 2018, Shenvi *et.al.* 2015, Fritzmann *et.al.* 2007):

- Βελτιστοποίηση της χρήσης χημικών.
- Βελτιστοποίηση των μεθόδων μετεπεξεργασίας και εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών καθαρισμού των μεμβρανών χωρίς τη διακοπή λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης.
- Ωρίμανση προηγμένων μεμβρανών (νανοσυνθετικές, βιομημητικές, αυξημένης συγκράτησης βορίου κ.ά.) και αύξηση του χρόνου ζωής τους από 5-7 σήμερα σε 15-20 έτη.
- Καινοτόμοι σχεδιασμοί διεργασιών RO πολλών σταδίων.
- Εφαρμογή οικιακών συστημάτων αφαλάτωσης, μικρής ενεργειακής απαίτησης.
- Εφαρμογή υβριδικών τεχνολογιών με ενσωμάτωση, θερμικών μεθόδων, μεμβρανών νάνο- ή υπερ-διήθησης (απόσταξη μεμβρανών – MD), προωθημένης όσμωσης (FO), ώσμωσης με υδραυλική καθυστέρηση (PRO), αντίστροφης ηλεκτροδιάλυσης (RED) κ.ά.
- Χρήση μεγαλύτερων στοιχείων μεμβρανών (16 ιντσών έναντι των συμβατικών 8 ιντσών, με σκοπό τη περαιτέρω μείωση του αποτυπώματος του συστήματος (μειωμένα έργα Π/Μ).
- Ενεργειακή αξιοποίηση, ανάκτηση υλικών ή βέλτιστη διάθεση της παραγόμενης άλμης
- Ωρίμανση και ενσωμάτωση συστημάτων RO-ΑΠΕ με βελτιστοποιημένα και μεγάλου χρόνου ζωής συστήματα ενεργειακής δέσμωσης και αποθήκευσης. Σήμερα, υβριδικά συστήματα RO-ΑΠΕ παρότι ενεργειακά αποδοτικότερα και φιλικά στο περιβάλλον απαιτούν μεγαλύτερο κόστος κεφαλαίου από τα συμβατικά και ως εκ τούτου προκύπτει αυξημένο ειδικό κόστος νερού.

Στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα, παρουσιάζονται οι τυπικές παράμετροι κόστους και λειτουργίας εγκαταστάσεων RO που συζητήθηκαν παραπάνω, όπως αυτές συναντώνται στη διαθέσιμη βιβλιογραφία.

Πίνακας 4: Τυπικές παράμετροι κόστους και λειτουργίας εγκαταστάσεων RO

Παράμετρος	Τιμή		Βιβλιογραφία
	Υφάλμυρο	Θαλασσινό	
Εισροή νερού			
Ποιότητα Εισροής - TDS (μg/L)	500 – 15000	15000 – 50000	Alawad <i>et.al.</i> 2023
Ποιότητα Εκροής - TDS (μg/L)	200 – 500	400 – 500	Karaghoulis & Kazmerski, 2013
Ποιότητα εκροής άλμυρης - TDS (μg/L) – θερμοκρασία (°C)		65,000–85,000 – T _{amb}	Dawoud & Mulla <i>et.al.</i> 2012
Μέσο Ειδικό Κόστος Νερού (συμβατικό σύστημα, \$/m ³)	i) 0.2 – 0.4 ii) 0.2 –1.8 iii) 0.26 – 1.33 iv) 0.2 iv) 0.26 – 1.33	i) 0.5 – 1.2 (Τυπική: 0.76) ii) 0.5 –3.0 iii) 0.45 – 1.72 iv) 0.48 iv) 0.35 –2.70 v) 0.75	i) Shokri & Fard, 2023 ii) Alawad <i>et.al.</i> 2023 iii) Wenten <i>et.al.</i> 2016, Karaghoulis & Kazmerski, 2013 iv) Fritzmman <i>et.al.</i> 2007 v) Karagiannis & Soldatos, 2008 v) Youssef <i>et.al.</i> 2014
Ειδική κατανάλωση ενέργειας (kWh/m ³)	i) 0.5 – 2.5 ii) 0.3 – 2.8 iii) – iv) 1.5 – 2.5	i) 3 – 4 ii) 2.5 – 4 iii) 2.5 – 4 iv) 4 – 6	i) Shokri & Fard, 2023 ii) Alawad <i>et.al.</i> 2023 iii) Panagopoulos <i>et.al.</i> 2019 iv) Karaghoulis & Kazmerski, 2013
Ενέργεια ως ποσοστό του κόστους νερού (%)	44		Karaghoulis & Kazmerski, 2013
Μέσο λειτουργικό κόστος (\$/m ³)	-	0.35	Shokri & Fard, 2023
Μέσο κόστος κεφαλαίου (\$/m ³)	-	0.63	Shokri & Fard, 2023
Μέγιστη Δυναμικότητα εγκατάστασης (m ³ /day)	98,000	624,000	Alawad <i>et.al.</i> 2023
Πίεση λειτουργίας (MPa)	1.5 – 2.5	2 – 8	Alawad <i>et.al.</i> 2023
Απόδοση Ανάκτησης νερού (%)	i) 60 – 85 ii) 60 – 75	i) 30 – 50 ii) 40 – 60	i) Mezher <i>et.al.</i> 2011 ii) Alawad <i>et.al.</i> 2023
Κόστος χημικών	i) 0.03 (\$/m ³) - 4812.27 (\$/day) ii) 0.07		i) Fritzmman <i>et.al.</i> 2007 ii) Shokri & Fard, 2023
Κόστος Επένδυσης (\$/m ³ /d)	300 – 1200	900 –2500	Shokri & Fard, 2023,
Μέσο κόστος ανθρωπίνου δυναμικού (\$/m ³)	i) 0.02 ii) 0.10		i) Fritzmman <i>et.al.</i> 2007 ii) Shokri & Fard, 2023
Μέσο κόστος μεμβρανών (\$/m ³)	i) 0.024 – 0.028 ii) €1500/στοιχείο μεμβράνης σπειροειδούς περιέλιξης) iii) 0.03		i) Wenten <i>et.al.</i> 2016 ii) Fritzmman <i>et.al.</i> 2007 iii) Shokri & Fard, 2023
Επαναφορά άλμυρης (%)	60 – 85	30 – 50	Mezher <i>et.al.</i> 2011
Μερίδιο Αγοράς (%) – Συν. Δυναμικότητα (m ³ /day)	69 εκατ.		Eke <i>et.al.</i> 2020
Ποσοστό εγκαταστάσεων πολύ μεγάλης κλίμακας (%)	39		Eke <i>et.al.</i> 2020
Εκπομπές Αερίων Θερμοκηπίου (kg CO ₂ /m ³)	i) 1.75 – 2.79 ii) 3.8		i) Mezher <i>et.al.</i> 2011 ii) Youssef <i>et.al.</i> 2014
Υβριδικά Συστήματα RO-ΑΠΕ (θαλασσινό νερό)			
Μέσο Ειδικό Κόστος Νερού (Ηλιακή Λίμνη-RO, \$/m ³)	0.66 – 0.77		i) Karaghoulis & Kazmerski, 2013, Alawad <i>et.al.</i> 2023
Μέσο Ειδικό Κόστος Νερού (Ηλιακό PV-RO, \$/m ³)	i) 11.7 – 15.6 ii) 3.1 – 9.0		i) Alawad <i>et.al.</i> 2023 ii) Karagiannis & Soldatos, 2008
Μέσο Ειδικό Κόστος Νερού (Αιολική-RO, \$/m ³)	i) 6.6 – 9.0 ii) 1.0 – 5.0 iii) 2 – 5.2		i) Karaghoulis & Kazmerski, 2013 ii) Karagiannis & Soldatos, 2008 iii) Alawad <i>et.al.</i> 2023
Ηλιακός Συλλέκτης-RO	i) 3.5 – 8.0		Karagiannis & Soldatos, 2008
Μέσο Ειδικό Κόστος Νερού (Κυματική-RO, \$/m ³)	0.7 – 1.2		Alawad <i>et.al.</i> 2023
Μέσο Ειδικό Κόστος Νερού ORC-RO, \$/m ³)	4.3–9.5		Alawad <i>et.al.</i> 2023

Συνοψίζοντας, η αφαλάτωση μέσω μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης κερδίζει διαρκώς έδαφος στην παγκόσμια αγορά λόγω της τεχνολογικής της προόδου και εξέλιξης στο σχεδιασμό των μεμβρανών. Επί του παρόντος, αποτελεί μία αξιόπιστη τεχνολογία ευρέως εφαρμοζόμενη για την ανάκτηση νερού. Λόγω του σχεδιασμού *compact* μονάδων, απαιτεί μικρότερη επιφάνεια κάλυψης με αποτέλεσμα να εφαρμόζεται σε μεγάλο εύρος, από οικιακές έως βιομηχανικές εγκαταστάσεις, με μικρότερο συγκριτικά κόστος επένδυσης. Επιπλέον, παρουσιάζει

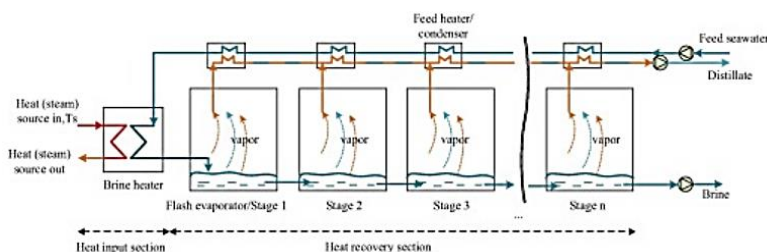
χαμηλότερο κόστος ενέργειας έναντι των θερμικών μεθόδων αφαλάτωσης και ως εκ τούτου χαρακτηρίζεται από χαμηλότερο κόστος νερού. Από την άλλη πλευρά, αποτελεί μία πιο περίπλοκη και συνεχώς εξελισσόμενη τεχνολογία που δεν έχει φτάσει στη πλήρη ωρίμανσή της. Ως εκ τούτου, έχει συγκριτικά αυξημένες ανάγκες σε προσωπικό και εξειδίκευση. Η απόδοσή της συνδέεται άρρηκτα με την αποτελεσματικότητα των μεμβρανών, οι οποίες είναι επιρρεπείς στην έμφραξη που συνεπάγεται υψηλή απαίτηση προεπεξεργασίας της εισροής, παύση λειτουργίας λόγω ανάγκης τακτικής συντήρησης (με ανάλογα κόστη χημικών) και αναπόφευκτη αντικατάστασή τους στο τέλος ζωής τους. Καθώς παραμένει μία ενεργειακά απαιτητική διεργασία, στοχεύεται η εξέλιξη βελτιστοποιημένων μεμβρανών που ενδέχεται να αυξήσει το κόστος του νερού, ενώ ο συνδυασμός της με συστήματα ΑΠΕ αν και εφικτός παρουσιάζει σημαντικό βαθμό επικινδυνότητας ως προς την απρόσκοπτη λειτουργία της και ανεβάζει το κόστος κεφαλαίου των εγκαταστάσεων. Επιπρόσθετα, για την επίτευξη της απαιτούμενης ποιότητας εκροής, έχει αυξημένες ανάγκες μετεπεξεργασίας του νερού έναντι των συμβατικών διυλιστηρίων νερού και των θερμικών μεθόδων αφαλάτωσης. Από περιβαλλοντικής σκοπιάς, είναι φιλικότερη προς το περιβάλλον έναντι των θερμικών μεθόδων λόγω των χαμηλότερων αέριων εκπομπών και της απόρριψης άλμης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το ρεύμα της άλμης όμως, έως σήμερα δεν αξιοποιείται περαιτέρω, με τη πλειοψηφία των εγκαταστάσεων να επιλέγει την απευθείας απόρριψή της στη θάλασσα. Συνολικά, η τάση στη παγκόσμια αγορά αφαλάτωσης δείχνει πως η τεχνολογία RO θα κυριαρχήσει μελλοντικά, δεδομένης της περαιτέρω εξέλιξης και βελτιστοποίησης της.

2.3 Αφαλάτωση μέσω Πολυβάθμιας Εκτόνωσης (*Multi-stage Flash Distillation – MSF*)

Η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη θερμική μέθοδος αφαλάτωσης, και η δεύτερη από πλευράς εγκατεστημένης δυναμικότητας παγκοσμίως μετά την τεχνολογία αντίστροφης ώσμωσης, είναι αυτή της πολυβάθμιας εκτόνωσης (Multiple stage flashing – MSF) με περίπου 35% μερίδιο της αγοράς αφαλάτωσης (Eke *et.al.* 2020). Η MSF κυριαρχεί επί των εγκατεστημένων μονάδων αφαλάτωσης στις χώρες της Μέσης Ανατολής, όπου ενδεικτικά στα ΗΑΕ αντιπροσωπεύει το 63% των εν λειτουργία μονάδων. Οι λόγοι επικράτησης της εν λόγω τεχνολογίας στην συγκεκριμένη περιοχή είναι η υψηλή και χαμηλού κόστους διαθεσιμότητα ενέργειας, η αξιοπιστία της μεθόδου ως πλήρως ώριμη τεχνολογία, η υψηλή ζήτηση νερού αφαλάτωσης, η υψηλή συγκέντρωση TDS της εισροής θαλασσινού νερού από τον Αραβικό Κόλπο (41 – 45 ppt), και το εκτεταμένο υπάρχων δίκτυο μονάδων MSF με συμπαράγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή, μειώνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας της εν λόγω τεχνολογίας όπως και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο, λόγω της κλιμακούμενης ανάπτυξης συστημάτων αφαλάτωσης RO, ο ρυθμός ανάπτυξης νέων εγκαταστάσεων MSF στην περιοχή προβλέπεται σημαντικά μειωμένος, από 6.51% την περίοδο 2000-2005 σε 1.64% το 2025 (Mezher *et.al.* 2011). Η επικράτηση της MSF έναντι των λοιπών θερμικών μεθόδων, με πιο γνωστές την πολυβάθμια απόσταξη (Multiple Effect Distillation – MED) και την επανασυμπύεση ατμών (Vapor Compression – VC), βασίζεται στο γεγονός πως παρά την απαίτηση σχετικά υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας στην MSF, δεν έχει το μειονέκτημα της συσσώρευσης αλάτων πάνω στις επιφάνειες των σωληνώσεων λόγω της χρήσης ελεύθερης ροής άλμης σε κάθε στάδιο αντί της χρήσης βυθισμένων σωληνών θέρμανσης για την εξάτμιση του νερού (Rosen & Farsi, 2022).

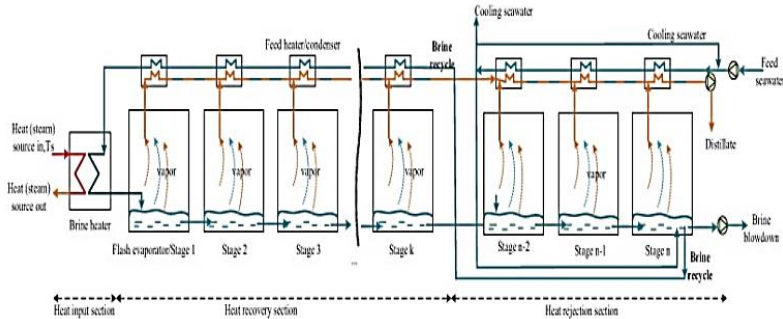
Αναλυτικότερα, μία τυπική εγκατάσταση πολυβάθμιας εκτόνωσης αποτελείται από 4 έως 40 βαθμίδες, με τυπική διάταξη τις 18 έως 25 βαθμίδες (**Εικόνα 9**), (Mezher *et.al.* 2011). Το εισερχόμενο θαλασσινό νερό ρέει από το ψυχρό άκρο του συστήματος στο θερμό μέσω ενός δικτύου σωληνώσεων που λειτουργούν ως εναλλάκτες θερμότητας, και στη συνέχεια προθερμαίνεται στο θάλαμο προθέρμανσης πριν την είσοδό του στο σύστημα. Κάθε βαθμίδα έχει ολοένα χαμηλότερη πίεση, η οποία αντιστοιχεί στην θερμοκρασία βρασμού του νερού σε αυτήν. Το προθερμασμένο νερό έχοντας υψηλότερη θερμοκρασία από την θερμοκρασία βρασμού στην εκάστοτε πίεση κάθε βαθμίδας, εκτονώνεται με αποτέλεσμα ένα μέρος του να ατμοποιείται ταχέως (flashing) ώστε να επιτευχθεί θερμική ισορροπία σε κάθε στάδιο. Οι ατμοί που προκύπτουν σε κάθε βαθμίδα έρχονται σε επαφή ανερχόμενοι με τους σωλήνες τροφοδοσίας φρέσκου ψυχρότερου θαλασσινού νερού και έτσι συμπυκνώνονται.

Παράλληλα, η προκύπτουσα λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης προθερμαίνει το εισερχόμενο νερό που ρέει αντίθετα στις σωληνώσεις προς το θάλαμο προθέρμανσης. Το παραγόμενο απεσταγμένο νερό συλλέγεται στο κανάλι αποστάγματος ενώ η υπολειπόμενη άλμη οδηγείται στην επόμενη βαθμίδα χαμηλότερης πίεσης και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μεγιστοποιώντας την ανάκτηση νερού. Στο τελικό στάδιο, τα δύο ρεύματα, γλυκού νερού και άλμης έχουν θερμοκρασία κοντά στη θερμοκρασία της εισροής θαλασσινού νερού (30-40°C) και τελικά αντλούνται εκτός της μονάδας υπό ατμοσφαιρική πίεση (Rosen & Farsi, 2022). Σημειώνεται εδώ πως η απαιτούμενη θερμική ενέργεια στο θάλαμο προθέρμανσης προσφέρεται υπό μορφή ατμού από διάφορες πηγές όπως λέβητες ορυκτών καυσίμων, απορριπτέα θερμότητα σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, πυρηνικούς αντιδραστήρες, ΑΠΕ ή οποιαδήποτε άλλη πηγή, με σκοπό τη προθέρμανση της εισροής στους 90 -110 °C (Karaghoulis & Kazmerski, 2013). Ο κύριος λόγος για τη χρήση πολλαπλών βαθμίδων αντί μίας στη χαμηλότερη θερμοκρασία και πίεση, είναι πως το μεγαλύτερο μέρος του ατμού δεν μπορεί να συμπυκνωθεί σε ένα στάδιο και κατά συνέπεια η πίεση και η θερμοκρασία δεν μπορούν να διατηρηθούν σε χαμηλές τιμές. Η παραπάνω διαδικασία καλείται πιο συγκεκριμένα πολυβάθμια εκτόνωση μονής διέλευσης (Once-through MSF – MSF-OT).



Εικόνα 9: Ροϊκό διάγραμμα εγκατάστασης MSF μονής διέλευσης. (Rosen & Farsi, 2022)

Εναλλακτική διάταξη αφορά σε βελτιστοποιημένα βιομηχανικά συστήματα MSF με ανακυκλοφορία του τελικού ρεύματος άλμης. Υπό αυτή τη διαμόρφωση, η μονάδα MSF χωρίζεται σε δύο τμήματα, αυτό της απόρριψης θερμότητας και αυτό της ανάκτησης θερμότητας (**Εικόνα 10**). Ένα τμήμα της εκροής άλμης του τελευταίου σταδίου (απόρριψης θερμότητας) δεν απορρίπτεται, αλλά αξιοποιείται μέσω ανακυκλοφορίας στο τμήμα ανάκτησης θερμότητας, όπου εισάγεται στο δίκτυο των σωληνών-εναλλακτών θερμότητας. Από εκεί αναμεμιγμένο με την εισροή θαλασσινού νερού ρέει κατά την ίδια ακολουθία με την MSF-OT προς το θάλαμο προθέρμανσης ώστε στη συνέχεια να εισαχθεί εκ νέου στη μονάδα MSF, αυξάνοντας ως εκ τούτου σημαντικά την απόδοσή της. Το υπόλοιπο τμήμα της άλμης απορρίπτεται. Στο θάλαμο προθέρμανσης το μίγμα άλμης-θαλασσινού νερού προθερμαίνεται στη μέγιστη τιμή σχεδιασμού, γνωστή ως ανώτερη θερμοκρασία άλμης (Top brine temperature – TBT), όπου η τιμή της εξαρτάται από τον τύπο και τη συγκέντρωση των χημικών ουσιών που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των φαινομένων καθαλάτωσης των σωληνώσεων. Σε περιπτώσεις χαμηλών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια του χειμώνα, όπου η εισροή έχει θερμοκρασία της τάξης των 5-15°C, το απορριπτόμενο τμήμα της άλμης δύναται να αξιοποιηθεί στο τμήμα ανάκτησης θερμότητας για την αύξηση της θερμοκρασίας της εισροής. Ο έλεγχος αυτός της θερμοκρασίας εισόδου, συνιστά και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της διάταξης και για το λόγο αυτό υπερτερεί έναντι των εγκαταστάσεων MSF μονής διέλευσης. Από την άλλη πλευρά, λόγω της υψηλότερης αλατότητας στο θάλαμο προθέρμανσης, υπάρχει υψηλότερη απαίτηση χημικών για την αποτροπή ανόργανης κλιμάκωσης. Επιπλέον, απαιτείται 10-30% υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας λόγω των επιπρόσθετων αναγκών άντλησης της άλμης (Rosen & Farsi, 2022).



Εικόνα 10: Ροϊκό διάγραμμα εγκατάστασης MSF με ανακυκλοφορία άλμης. (Rosen & Farsi, 2022)

Συνολικά, και σε αυτή τη τεχνολογία, η κατανάλωση ενέργειας αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο ποσοστό του κόστους παραγόμενου νερού, που φτάνει το 60%, το οποίο είναι συγκριτικά υψηλότερο με το αντίστοιχο 44% της τεχνολογίας RO (Alawad *et.al.* 2023).

Η μέθοδος της πολυβάθμιας εκτόνωσης δεν έχει υψηλές απαιτήσεις προ- και μετά- επεξεργασίας του νερού, καθώς βασίζεται κυρίως σε απλή επεξεργασία (Saleem *et.al.* 2023), με αντικαθαλωτικά και αντιδιαβρωτικά (Fritzmann *et.al.* 2007). Πιο συγκεκριμένα, ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει τη διεργασία MSF είναι η ανόργανη κλιμάκωση από τη συσσώρευση επικαθίσεων, κυρίως αλκαλικών λόγω ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3) και υδροξειδίου του μαγνησίου (Mg(OH)_2), αλλά και μη αλκαλικών λόγω θειικού ασβεστίου (CaSO_4). Σε $\text{TBT} \geq 120^\circ\text{C}$ σχηματίζουν μονωτικό φιλμ στις επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας και συνηθέστερα στους σωλήνες του θαλάμου προθέρμανσης της άλμης και το δίκτυο σωληνώσεων-εναλλακτών θερμότητας, επιδρώντας στο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και ως εκ τούτου στην απόσταξη του νερού.

Ο περιορισμός του φαινομένου επιτυγχάνεται με (i) τη χρήση αντικαθαλωτικών (ii) τη ρύθμιση του pH με οξέα για το περιορισμό της συγκέντρωσης CO_3^{2-} και OH^- και την πρόληψη σχηματισμού επικαθίσεων CaCO_3 και Mg(OH)_2 , καθώς και (iii) το μηχανικό καθαρισμό με σφουγγάρι (On-line mechanical sponge ball cleaning) για την αποτροπή δημιουργίας ιζήματος στις μεταλλικές επιφάνειες (Hamed 2004, Zhao *et.al.* 2018). Ο δεύτερος κεντρικός παράγοντας που επιδρά στην τεχνολογία συστημάτων MSF είναι η εσωτερική διάβρωση που μπορεί να προκληθεί λόγω λειτουργίας σε αυξημένη θερμοκρασία και αλατότητα, καθώς και από την παρουσία μη συμπυκνώσιμων διαλυμένων αερίων (Non-condensable gases - NCG) όπως το οξυγόνο, η αμμωνία και το υδρόθειο. Για τον παραπάνω λόγω απαιτείται η χρήση αντιδιαβρωτικών πρόσθετων και ο εξαερισμός των NCG σε όλες τις βαθμίδες της μονάδας MSF (Brandt *et.al.* 2017, Rosen & Farsi, 2022).

Αν και η MSF θεωρείται μία πλήρως ώριμη τεχνολογία που δεν επιδέχεται περαιτέρω βελτιστοποιήσεις από μόνη της, οι Mezher *et.al.* (2011) αναφέρουν πως με την εξέλιξη συστημάτων περισσότερων σταδίων ή και υψηλότερης TBT λειτουργίας ($\geq 120^\circ\text{C}$) η απόδοση και το κόστος βελτιστοποιούνται σημαντικά. Ωστόσο, με μία αυξημένη TBT λειτουργίας αυξάνει παράλληλα και ο κίνδυνος κλιμάκωσης και διάβρωσης. Στη βάση αυτού, πλέον κερδίζουν έδαφος συστήματα MSF με προεπεξεργασία μέσω μεμβρανών νάνο-διήθησης για το περιορισμό της πιθανότητας σχηματισμού επικαθίσεων λόγω CaSO_4 (Zhao *et.al.* 2018). Ο Hamed (2004), αναφέρει ακόμη πως η λειτουργία μίας εγκατάστασης MSF σε αυξημένη TBT = 130°C , θα απέδιδε αύξηση παραγωγής νερού έως και 48%.

Ο συνδυασμός συστημάτων MSF με ΑΠΕ εμπεριέχει σημαντικό βαθμό επικινδυνότητας και δεν θεωρείται οικονομικά εφικτός λόγω της απαίτησης συνεχούς λειτουργίας με υψηλή κατανάλωση ενέργειας (Tan *et.al.* 2022, Alawad *et.al.* 2023, Saleem *et.al.* 2023). Ωστόσο, ενδιαφέρον συγκεντρώνει ο συνδυασμός μονάδας MSF με ηλιακή λίμνη (solar pond) η οποία επιτυγχάνει υψηλή ικανότητα συλλογής και αποθήκευσης της ηλιακής ενέργειας ως θερμότητα για την αξιοποίησή της στην μονάδα αφαλάτωσης (Karaghoulis & Kazmerski, 2013). Αναφέρεται ότι μονάδα αφαλάτωσης MSF 10 βαθμίδων θα μπορούσε να παράγει έως και $15 \text{ m}^3/\text{day}$ εάν συνδυαζόταν με ηλιακή λίμνη 1.0 m^2 , λειτουργώντας στους 70°C και πίεση 0.9 bar (Alawad *et.al.* 2023).

Συνολικά οι εγκαταστάσεις θερμικής αφαλάτωσης με κυριότερη την MSF, πλεονεκτούν έναντι των συστημάτων αφαλάτωσης μεμβρανών στις εξής παραμέτρους:

- Αποτελούν πλήρως ώριμη τεχνολογία με συνεχή λειτουργία και μικρή απαίτηση ελέγχου.
- Αποτελούν απλούστερη διεργασία, απαλλαγμένες από το κόστος αντικατάστασης μεμβρανών.
- Έχουν σημαντικά χαμηλότερη απαίτηση προεπεξεργασίας της εισροής.
- Δεν επηρεάζονται από την ποιότητα εισροής.
- Παρουσιάζουν υψηλότερη ποιότητα εκροής.
- Έχουν υψηλό δυναμικό επεξεργασίας του παραπροϊόντος της άλμης.

Από την άλλη, πλευρά τα συστήματα MSF υστερούν των μονάδων RO στα εξής:

- Έχουν συγκριτικά υψηλότερο κόστος νερού του οποίου η διακύμανση επηρεάζεται από το κόστος ορυκτών καυσίμων, αφού αυξάνει σημαντικά από \$1/m³ για τιμή πετρελαίου \$20/βαρέλι σε \$4/m³ για τιμή πετρελαίου \$100/βαρέλι (Mezher *et.al.* 2011).
- Έχουν 21% αυξημένη απαίτηση ενέργειας, σύμφωνα με τους Eke *et.al.* (2020) και ως εκ τούτου αυξημένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Raluy *et.al.* 2006).
- Παρουσιάζουν υψηλότερο κόστος κεφαλαίου, ειδικότερα λόγω ακριβών υλικών (ανοξειδωτος χάλυβας, τιτάνιο) που απαιτούνται για την αποφυγή της διάβρωσης (Panagopoulos *et.al.* 2019).
- Έχουν μεγαλύτερη απαίτηση σε κάλυψη γης.
- Είναι ευάλωτα στην καθαλάτωση και την διάβρωση καθώς λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες.
- Η απορριπτέα άλμη είναι 5-10°C υψηλότερη της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (T_{amb}) έναντι της RO (ίση με T_{amb}) και χαμηλότερη κατά 15% σε επίπεδα αλατότητας. Η υψηλή θερμοκρασία της άλμης που απορρίπτεται στη θάλασσα, επιδρά ωστόσο σημαντικά στα θαλάσσια οικοσυστήματα καθώς αυξάνει την τοξικότητα των περιεχόμενων μετάλλων και χημικών, ενώ μειώνει δραστικά τα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου (Karaghoulis & Kazmerski, 2013, Panagopoulos *et.al.* 2019).

Η τυπική διαμόρφωση του μέσου ειδικού κόστους νερού συναρτήσει των διαφόρων παραμέτρων λειτουργικού κόστους και αποσβέσεων, παρατίθεται στο **Διάγραμμα 7**, παραπάνω. Επιπλέον, στον **Πίνακα 5** ακολούθως, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τυπικές παράμετροι κόστους και λειτουργίας εγκαταστάσεων MSF, όπως αυτές συναντώνται στη διαθέσιμη βιβλιογραφία.

Πίνακας 5: Τυπικές παράμετροι κόστους και λειτουργίας εγκαταστάσεων MSF

Παράμετρος	Τιμή	Βιβλιογραφία
Ποιότητα Εισροής - TDS (μg/L)	Έως 70,000	Tan <i>et.al.</i> 2022
Ποιότητα Εκροής - TDS (μg/L)	< 10	Saleem <i>et.al.</i> 2023
Ποιότητα εκροής άλμης - TDS (μg/L) – θερμοκρασία (°C)	50,000 – 5 έως 15°C > T _{amb}	Dawoud & Mulla <i>et.al.</i> 2012
Μέσο Ειδικό Κόστος Νερού (\$/m ³)	i) 0.8 – 1.5 (Τυπική: 1.07) ii) 0.52 – 1.75 iii) 0.9 – 1.5 iv) 1.40 v) 0.56 – 1.75 vi) 0.96	i) Shokri & Fard, 2023 ii) Karagiannis & Soldatos, 2008, Zhao <i>et.al.</i> 2018, Fritzmann <i>et.al.</i> 2007 iii) Mezher <i>et.al.</i> 2011 iv) Panagopoulos <i>et.al.</i> 2019 v) Karaghoulis & Kazmerski, 2013 vi) Youssef <i>et.al.</i> 2014
Ειδική κατανάλωση ενέργειας (kWh/m ³) (Σύνολο ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας)	i) 20 ii) 10–16 iii) 12.5–24 iv) 19.58–27.25	i) Saleem <i>et.al.</i> 2023 ii) Alawad <i>et.al.</i> 2023, Eke <i>et.al.</i> 2020 iii) Panagopoulos <i>et.al.</i> 2019 iv) Karaghoulis & Kazmerski, 2013
Ενέργεια ως ποσοστό του κόστους νερού (%)	60	Karaghoulis & Kazmerski, 2013
Μέσο λειτουργικό κόστος (\$/m ³)	0.26	Shokri & Fard, 2023
Μέσο κόστος κεφαλαίου (\$/m ³)	1.18	Shokri & Fard, 2023
Μέγιστη Δυναμικότητα εγκατάστασης (m ³ /day)	528,000	Alawad <i>et.al.</i> 2023
Τυπική θερμοκρασία λειτουργίας (TBT, °C)	90 – 110	Karaghoulis & Kazmerski, 2013

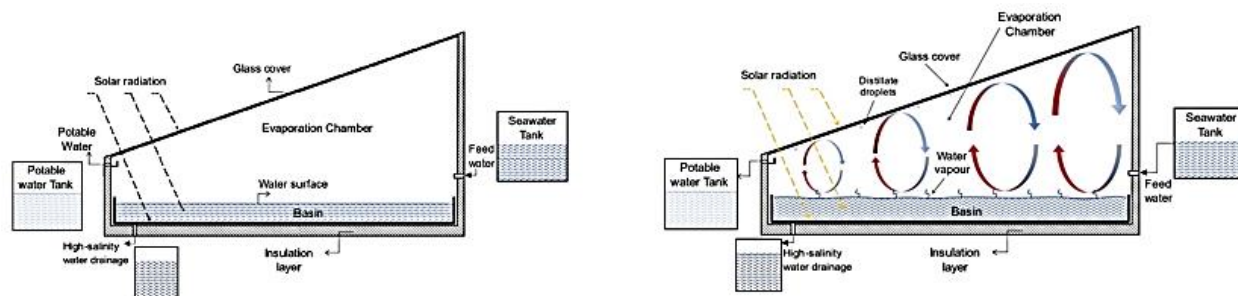
Απόδοση Ανάκτησης νερού (%)	85 – 90	i) Panagopoulos <i>et.al.</i> 2019
Κόστος χημικών (\$/m ³)	0.05	Shokri & Fard, 2023
Κόστος Επένδυσης (\$/m ³ /d)	i) 1750 ii) 1200–2500	i) Saleem <i>et.al.</i> 2023 ii) Shokri & Fard, 2023
Μέσο κόστος ανθρωπίνου δυναμικού (\$/m ³)	0.08	Shokri & Fard, 2023
Εκπομπές Αερίων Θερμοκηπίου (kg CO ₂ /m ³)	i) 14.67 ii) 20.4–25.0 9.41–15.6 (Με συμπαράγωγή ηλ. ενέργειας) iii) 6.9	i) Saleem <i>et.al.</i> 2023 ii) Mezher <i>et.al.</i> 2011k iii) Youssef <i>et.al.</i> 2014
Μερίδιο Αγοράς (%) – Συν. Δυναμικότητα (m ³ /day)	18 – 15.5 εκατ.	Eke <i>et.al.</i> 2020
Ποσοστό εγκαταστάσεων πολύ μεγάλης κλίμακας (%)	89	Eke <i>et.al.</i> 2020
Μείωση κόστους νερού, MSF-με συμπαράγωγή Ενέργειας (%)	48	Mezher <i>et.al.</i> 2011

Εν κατακλείδι, η μέθοδος αφαλάτωσης MSF αποτελεί μία αποδεδειγμένα αποτελεσματική τεχνολογία ικανή να ανταπεξέλθει σε μεγάλη ζήτηση με υψηλή ποιότητας εκροής. Η απόδοσή της δεν επηρεάζεται σημαντικά από την ποιότητα του εισερχόμενου νερού καθώς μπορεί να δεχθεί νερό υψηλής αλατότητας και περιεχόμενων ρύπων (β. μέταλλα, οργανική ύλη κλπ.), χωρίς την απαίτηση επιπλέον συντήρησης. Ωστόσο, καθώς οι εγκαταστάσεις σχεδιάζονται με συγκεκριμένες προδιαγραφές, παρουσιάζουν συγκεκριμένο ρυθμό απόδοσης και δεν μπορούν να ανταποκριθούν σε ακραίες διακυμάνσεις ζήτησης. Αποτελεί επίσης, μία απλή και ώριμη τεχνολογία και ως εκ τούτου έχει μικρότερη απαίτηση σε ανταλλακτικά και ανθρώπινο δυναμικό, συγκριτικά με τις εγκαταστάσεις RO. Από την άλλη πλευρά, θεωρείται ορθώς μία μέθοδος εντατικής κατανάλωσης ενέργειας με αυξημένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, η οποία δεν συνδυάζεται αποδοτικά με συστήματα ΑΠΕ και θεωρείται οικονομικά αποδοτική κυρίως σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις. Αυτές με τη σειρά τους χαρακτηρίζονται από μεγάλο κόστος επένδυσης και υποδομών και υψηλή απαίτηση γης, συγκεκριμένα παράκτιων εκτάσεων που συνεπάγονται υψηλό κόστος. Τα παραπάνω αντικατοπτρίζονται τελικά στις τιμές της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας και του ειδικού κόστους νερού. Η συνεγκατάσταση ωστόσο με ενεργειακές μονάδες αποτελεί βέλτιστη πρακτική για τον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας και των αέριων εκπομπών. Επιπλέον, η ανάκτηση και αξιοποίηση της εξερχόμενης άλμης, συμβάλει στην ελαχιστοποίηση των απορρίψεων περιορίζοντας περαιτέρω την κατανάλωση ενέργειας. Τελικά όμως, σήμερα η εν λόγω τεχνολογία ακολουθεί πτωτική επενδυτική τροχιά, καθώς η οικονομική βιωσιμότητά της συνδέεται άρρηκτα με το κόστος ενέργειας, με αποτέλεσμα να περιορίζεται κυρίως σε χώρες με χαμηλό κόστος ενέργειας, όπως αυτές του Αραβικού Κόλπου.

2.4 Αφαλάτωση μέσω Ηλιακής Απόσταξης (*Solar Still Desalination – SS*)

Τα παθητικά συστήματα αφαλάτωσης μέσω ηλιακής απόσταξης συνιστούν μία φιλική προς το περιβάλλον, μη παρεμβατική ελκυστική εναλλακτική έναντι των διαδεδομένων τεχνολογιών (RO, MSF, κλπ.). Η ηλιακή απόσταξη απαλλάσσεται της χρήσης ορυκτών καυσίμων αφού δεν απαιτεί εξωτερική πηγή ενέργειας παρά μόνο της ηλιακής. Αποτελεί επιπροσθέτως, μία απλή τεχνολογία, χωρίς καμία απαίτηση χημικής προεπεξεργασίας και με περιορισμένη απαίτηση εξειδίκευσης και ανθρωπίνου δυναμικού. Η εν λόγω διεργασία πρόσκειται στη φύση και έχει χαρακτηριστεί ως ανθρωπογενής κύκλος του νερού, καθώς βασίζεται ακριβώς στις ίδιες διαδικασίες που στη φύση προκαλούν βροχοπτώσεις, δηλαδή την εξάτμιση και τη συμπύκνωση (Saxena *et.al.* 2022, Μαργέλου 2013). Τα δομικά στοιχεία ενός συμβατικού ηλιακού αποστακτήρα περιλαμβάνουν το διαφανές κεκλιμένο κάλυμμα (επιφάνεια συμπύκνωσης), τον αεροστεγή θάλαμο (θάλαμος εξάτμισης), την επιφάνεια εξάτμισης, τη θερμομόνωση και το κανάλι απόσταξης, (**Εικόνα 11**) (Mohsenzadeh *et.al.* 2021, Saxena *et.al.* 2022). Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία διαπερνάει το θάλαμο του αποστακτήρα, μεταδίδεται μέσω του διαφανούς καλύμματος και απορροφάται από τη συνήθως μαύρου χρώματος για μέγιστη απορρόφηση, επιφάνεια εξάτμισης και εν μέρει από το θαλασσινό νερό που τη διαρρέει. Το θαλασσινό νερό αρχίζει τότε να θερμαίνεται (μέσω ακτινοβολίας & συναγωγής) σε θερμοκρασία μικρότερης του σημείου βρασμού και μεγαλύτερη της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος, του οποίου η εξωτερική του πλευρά βρίσκεται σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα.

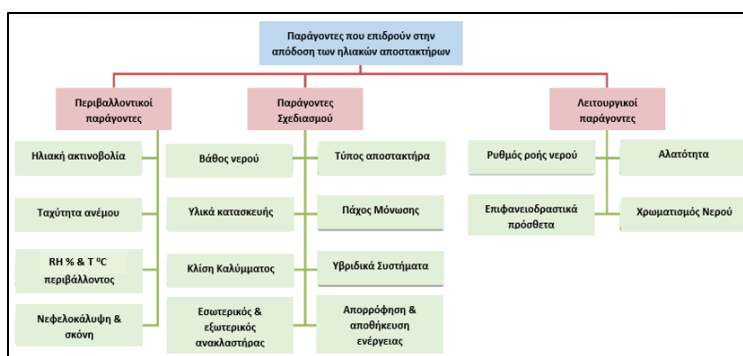
Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του νερού, αυξάνεται και η πίεση των ατμών του. Μόλις η τοπική πίεση ατμών των μορίων στην επιφάνεια του νερού γίνει μεγαλύτερη από εκείνη του αέρα, αρχίζει η εξάτμιση (Mohsenzadeh *et.al.* 2021, 2023). Στο εσωτερικό του θαλάμου, το στρώμα του υγρού αέρα κοντά στην επιφάνεια του νερού έχει υψηλότερη θερμοκρασία από εκείνη στα ανώτερα επίπεδα. Αυτό δημιουργεί μια διαφορά πυκνότητας με αποτέλεσμα ο ελαφρύτερος θερμός αέρας να ανέρχεται, περιέχοντας υδατμούς. Ο ανερχόμενος υγρός αέρας φτάνει στο κάλυμμα που δρα τότε ως επιφάνεια συμπύκνωσης λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας του από το σημείο δρόσου του υγρού αέρα. Οι περιεχόμενοι υδατμοί εγκαταλείπουν τον αέρα και εμφανίζονται ως συμπυκνωμένα σταγονίδια απεσταγμένου πλέον νερού, στο γυάλινο κάλυμμα. Λόγω της απώλειας θερμότητας κοντά στην επιφάνεια συμπύκνωσης, ο αέρας γίνεται βαρύτερος και κατεβαίνει στα χαμηλότερα επίπεδα μέχρι να φτάσει στην επιφάνεια του νερού. Κατά τη διάρκεια της όλης διαδικασίας, το νερό στην επιφάνεια εξάτμισης χάνει θερμότητα μέσω της λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης, συναγωγής και ακτινοβολίας ενώ η θερμότητα που δέχεται το γυάλινο κάλυμμα εξέρχεται από το σύστημα προς το περιβάλλον. Η όλη διεργασία διέπεται από την συνεχή αυτή ακολουθία και το απεσταγμένο νερό συγκεντρώνεται λόγω βαρύτητας στο κανάλι απόσταξης και ανακτάται (**Εικόνα 11**) (Serradj *et.al.* 2021, Mohsenzadeh *et.al.* 2022).



Εικόνα 11: Σχηματική απεικόνιση των δομικών στοιχείων ενός συμβατικού ηλιακού αποστακτήρα (αριστερά) της διεργασίας ηλιακής απόσταξης (δεξιά). (Mohsenzadeh *et.al.* 2021, 2022)

Η ποιότητα του ανακτώμενου αποστάγματος είναι πολύ υψηλή διότι όλα τα άλατα, τα ανόργανα και οργανικά συστατικά καθώς και τα μικρόβια παραμένουν στην επιφάνεια εξάτμισης ενώ παράλληλα λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας θανατώνονται τα παθογόνα βακτήρια στον πυθμένα της δεξαμενής (Μαργέλου, 2013). Καθοριστικό ρόλο στην παραπάνω διαδικασία έχει συνεπώς η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του νερού στην επιφάνεια εξάτμισης και της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος, καθορίζοντας της απόδοση και το ρυθμό απόσταξης του νερού (Singh *et.al.* 2021).

Κύριες παράμετροι που επιδρούν στην διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ καλύμματος-νερού και στην απόδοση της διεργασίας ευρύτερα, αποτελούν τα κλιματικά και μετεωρολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής, τα οποία δεν δύναται να ελεγχθούν, αλλά και παράμετροι σχεδιασμού και λειτουργίας (**Διάγραμμα 8**), (Saxena *et.al.* 2022).



Διάγραμμα 8: Η επίδραση διαφόρων παραγόντων στην απόδοση ηλιακού αποστακτήρα (Saxena *et.al.* 2022)

Πιο συγκεκριμένα, η απόδοση των ηλιακών αποστακτήρων εκφράζεται ως ο όγκος παραγόμενου καθαρού νερού προς τον όγκο εισερχόμενου θαλασσινού νερού και επηρεάζεται από τους παρακάτω παράγοντες.

Μη ελεγχόμενοι παράγοντες:

- Η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή, η οποία αποτελεί τον κυρίαρχο παράγοντα απόδοσης του συστήματος. Όσο υψηλότερη είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται ο αποστακτήρας τόσο μεγαλύτερη η παραγωγικότητά του καθώς αυξάνεται ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μέσω συναγωγής. Αυξάνει έτσι, αυξάνει η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του νερού στην επιφάνεια εξάτμισης και του καλύμματος, που επιτρέπει την αύξηση του ρυθμού εξάτμισης και συμπύκνωσης του νερού, αντίστοιχα (Ithare *et.al.* 2017, Feria-Díaz *et.al.* 2023). Ωστόσο, εάν ο ρυθμός εισερχόμενης ενέργειας υπερβεί το ρυθμό εξερχόμενης θερμότητας η διαφορά θερμοκρασίας καλύμματος-νερού μειώνει με αποτέλεσμα την πτώση της απόδοσης του αποστακτήρα (Singh *et.al.* 2022). Οι Mosahebi (2023), Sharshir (2022), και Amiri (2022) συμφωνούν, πως η τάση ημερήσιας παραγωγής νερού ακολουθεί την ημερήσια τάση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ωστόσο, σύμφωνα με τον τελευταίο παρατηρείται μία υστέρηση 2-3 ωρών (κατά τις πρωινές ώρες έναρξης λειτουργίας) λόγω της υψηλής ειδικής θερμοχωρητικότητας του νερού και της χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας νωρίς το πρωί.
- Η θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_{amp}), η οποία καθώς αυξάνεται, αυξάνει τη θερμοκρασία των στοιχείων του αποστακτήρα, συμπεριλαμβανομένης της επιφάνειας εξάτμισης με το θαλασσινό νερό. Έτσι αυξάνεται η διαφορά θερμοκρασίας νερού-καλύμματος λόγω της μεγαλύτερης θερμοχωρητικότητας του υλικού της επιφάνειας εξάτμισης. Αναφέρεται, αύξηση της απόδοσης έως και 8.2% για αύξηση της $T_{amp} = 10^{\circ}\text{C}$ (Feria-Díaz *et.al.* 2023), ενώ σύμφωνα με την εργασία της Μαργέλου (2013) η αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος συνεισφέρει σε μικρότερο ποσοστό αυξάνοντας την παραγωγικότητα του αποστακτήρα περίπου 5% για κάθε αύξηση 10°C θερμοκρασίας. Από την άλλη υποστηρίζεται, πως όσο μεγαλύτερη είναι η T_{amp} τόσο μειώνει ο ρυθμός απώλειας θερμότητας από το εξωτερικό του καλύμματος, μειώνοντας τη διαφορά θερμοκρασίας και την συμπύκνωση του νερού (Singh *et.al.* 2022). Οι Rahbar *et.al.* (2017) αναφέρουν πως μια χαμηλότερη T_{amp} μπορεί να είναι ευνοϊκότερη από υψηλότερη ηλιακή ακτινοβολία ως προς την απόδοση του αποστακτήρα και πως η πτώση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της νύχτας αυξάνει την ημερήσια παραγωγή νερού. Αυτό εξηγείται, καθώς αυξάνουν οι απώλειες θερμότητας από το εξωτερικό του καλύμματος (Ahmed *et.al.* 2021).
- Η ταχύτητα του αέρα, όπου όσο αυξάνει αυξάνεται ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από το εξωτερικό του καλύμματος στο περιβάλλον, αυξάνοντας τη διαφορά θερμοκρασίας του με τη μάζα του θαλασσινού νερού και ενισχύοντας την κυκλοφορία του αέρα μέσα στον αποστακτήρα (El-Agouz *et.al.* 2015). Η απόδοση αυτή βρέθηκε να αυξάνει έως 62.3% με αύξηση της ταχύτητας ανέμου έως και 5.5 m/s. Περαιτέρω αύξηση από την κρίσιμη αυτή τιμή δρα ανασταλτικά στην απόδοση των ηλιακών αποστακτήρων (Castillo-Tellez *et al.* 2015).
- Η σχετική υγρασία, η οποία μειούμενη κατά 5% μειώνει το σημείο δρόσου κατά 1°C (Lawrence, 2005), με αποτέλεσμα την ανάγκη περαιτέρω ψύξης του καλύμματος για τη συμπύκνωση του νερού. Οι Koffi *et. al.* (2009) παρατήρησαν βέλτιστη απόδοση σε τιμές ατμοσφαιρικής υγρασίας 65% και 40-55% τις υγρές και ξηρές περιόδους του χρόνου, αντίστοιχα. Ωστόσο, όσο η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνει η σχετική υγρασία μειώνει, αποτελώντας έτσι παράγοντα ισορροπίας στην απόδοση του συστήματος (Castillo-Tellez *et al.* 2015).
- Η δημιουργία στρώματος σκόνης στην επιφάνεια των πάνελ, όπου παρατηρήθηκε πως αμμοθύελλες πιθανές να δημιουργήσουν υπερκείμενο στρώμα σκόνης δύναται να μειώσουν τη διαπερατότητα του αποστακτήρα έως 10% το καλοκαίρι και 6% το χειμώνα. Η μείωση της διαπερατότητας μπορεί να φτάσει έως 70% ετησίως, χωρίς τακτικό καθαρισμό των πάνελ. (Singh *et.al.* 2022, Feria-Díaz *et.al.* 2023).
- Το ποσοστό νεφελοκάλυψης, καθώς παρατηρήθηκε πως για ποσοστό μικρότερο του 10% και διάρκεια μικρότερης των 5-10 λεπτών η παραγωγή καθαρού νερού και η απόδοση του συστήματος είναι σημαντικά υψηλότερες (Feria-Díaz *et.al.* 2023).

Ελεγχόμενοι παράγοντες

- Η επιφάνεια εξάτμισης του αποστακτήρα, η οποία είναι άμεσα ανάλογη της απόδοσης του αποστακτήρα (Ithare *et.al.* 2017). Σημαντική επίδραση στο ρυθμό παραγωγής έχει ο ρυθμός εξάτμισης του νερού στην επιφάνεια εξάτμισης. Επομένως, η αύξηση της ελεύθερης επιφάνειας εξάτμισης θα αυξήσει την απόδοση του ηλιακού αποστακτήρα (Singh *et.al.* 2022).
- Το βάθος του νερού στην επιφάνεια εξάτμισης του αποστακτήρα, καθώς παρατηρήθηκε ότι η απόδοση μειώνεται όσο αυξάνεται το βάθος, λόγω της αύξησης της ογκομετρικής θερμοχωρητικότητας του νερού η οποία τείνει να μειώσει τη θερμοκρασία της μάζας του νερού, μειώνοντας έτσι τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αυτής και του καλύμματος συμπύκνωσης (Ithare *et.al.* 2017). Ως εκ τούτου, το βάθος του νερού στον ηλιακό αποστακτήρα επηρεάζει την παραγωγικότητά του αφού η μείωση του βάθους συντελεί στην ανάπτυξη υψηλότερων θερμοκρασιών στην επιφάνεια εξάτμισης (Nougraya *et.al.* 2021). Επιπλέον, έχει πειραματικά αποδειχθεί πως ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής είναι υψηλότερος όταν το βάθος του νερού στην επιφάνεια εξάτμισης είναι μικρό με βέλτιστο βάθος τα 4 cm και συνιστάμενο εύρος 2-4 cm (Abujazar *et.al.* 2016). Αντίστοιχη επίδραση έχει ο συνολικός όγκος του θαλασσινού νερού στον αποστακτήρα αφού βρέθηκε μείωση της ημερήσιας παραγωγής καθαρού νερού από 3.9 L/day σε 2.4 L/day με την αύξηση του όγκου του νερού από 3 L σε 9 L (Al-hassan & Algarni, 2013). Σημαντικό από την άλλη, είναι να αποφεύγονται τα ξηρά σημεία, ενώ ακόμη το μεγαλύτερο βάθος συνεισφέρει στη νυχτερινή παραγωγή νερού, καθώς το νερό εγκλωβίζει μεγαλύτερα ποσά θερμότητας (Saxena *et.al.* 2022, Siddula *et.al.* 2022).
- Το υλικό και το πάχος του καλύμματος, το οποίο πρέπει να επιτρέπει την επιλεκτική διέλευση ακτινοβολίας μικρότερου μήκους κύματος (υψηλότερης θερμικής ενέργειας), μπλοκάροντας τα μεγαλύτερα μήκη κύματος και χωρίς να επιτρέπει την ακτινοβολία να επιστρέψει στο περιβάλλον (Singh *et.al.* 2022). Ταυτόχρονα, το υλικό θα πρέπει να διατηρεί ικανοποιητικό βαθμό απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον (Saxena *et.al.* 2022). Βρέθηκε πως βέλτιστη απόδοση επιτυγχάνεται με την χρήση καλύμματος από χαλκό λόγω της υψηλής του θερμικής αγωγιμότητας, ακολουθούμενος από το γυαλί και το πλαστικό και με βέλτιστο πάχος 3-4 mm (Ithare *et.al.* 2017).
- Η κλίση των πάνελ, όπου αυξάνοντας την γωνία κλίσης η απόδοση βρέθηκε να αυξάνει κατά τους χειμερινούς μήνες ενώ κατά τους θερινούς μήνες βρέθηκε να μειώνει. Αυτό εξηγείται καθώς η απόκλιση του ηλίου (γωνία δ) παίρνει θετικές τιμές το καλοκαίρι και αρνητικές το χειμώνα. Μειώνοντας λοιπόν, τη γωνία κλίσης των πάνελ με μία θετική γωνία απόκλισης αυξάνεται η προσπίπτουσα ακτινοβολία στο κάλυμμα (Al-Hinai *et.al.* 2001). Σαν γενικός κανόνας ωστόσο αναφέρεται, πως μέγιστη ετήσια παραγωγικότητα του αποστακτήρα επιτυγχάνεται σε κλίση της επιφάνειας συμπύκνωσης ισοδύναμη με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής (Saxena *et.al.* 2022).
- Το υλικό της επιφάνειας εξάτμισης, το οποίο πρέπει να έχει υψηλή θερμοχωρητικότητα και θερμική αγωγιμότητα και να δρα σαν απορροφητής της ηλιακής ακτινοβολίας αλλά όχι του νερού. Επιπλέον, πρέπει να είναι ικανό να ανακτά τη λανθάνουσα θερμότητα αυξάνοντας περαιτέρω την απόδοση του αποστακτήρα. Βέλτιστα υλικά που έχουν εξεταστεί είναι το αλουμίνιο και ο χαλκός αλλά συνήθως χρησιμοποιείται ο σίδηρος λόγω του χαμηλού κόστους του. Επίσης υλικά όπως το τσιμέντο, τα γαλβανισμένα φύλλα σιδήρου, πλαστικό ενισχυμένο με ίνες (FRP) ή μαύρα πολυανθρακικά φύλλα χαρακτηρίζονται αποτελεσματικά (Ithare *et.al.* 2017).
- Οι διαστάσεις των πάνελ, καθώς σύμφωνα με τους Feilizadeh *et.al.* (2017) βρέθηκε πως με αύξηση του ύψους του μπροστινού τοιχώματος του αποστακτήρα από 0.1 σε 2 m και με ισοδύναμη αύξηση του οπίσθιου τοιχώματος από 0.68 σε 2.58 m, διατηρώντας σταθερή κλίση, η απόδοση μειώθηκε κατά 55% και 73% το καλοκαίρι και το χειμώνα αντίστοιχα. Αυτό εξηγείται καθώς τα τοιχώματα λαμβάνουν μεγαλύτερο μερίδιο της εισερχόμενης ηλιακής ενέργειας σε βάρος του νερού. Βέλτιστο ύψος του εμπρόσθιου τοιχώματος βρέθηκε να είναι τα 0.1 m. Επιπλέον, ο ίδιος αναφέρει πως με την αύξηση του μήκους (Δ -A διάσταση), βρέθηκε να αυξάνει η απόδοση λόγω μικρότερης σκίασης του νερού από τα τοιχώματα. Ωστόσο, το ιδανικό μήκος αναφέρεται να είναι διπλάσιο από το φάρδος (B-N διάσταση),

γεγονός που καθιστά τα πάνελ μη αποδοτικά από άποψη κόστους και έκτασης. Τέλος, με την αύξηση του φάρδους έως ένα κρίσιμο σημείο η απόδοση αυξάνεται καθώς η επιφάνειά του νερού δέχεται παραπάνω ακτινοβολία. Περαιτέρω αύξησή του δρα ανασταλτικά, διότι τότε τα τοιχώματα δέχονται περισσότερη ακτινοβολία. Ο ιδανικός λόγος φάρδους προς πλάτους βρέθηκε ίσος με 0.4.

- Η αναλογία των διαστάσεων σχετικού ύψους (απόσταση μεταξύ επιφάνειας συμπύκνωσης-εξάτμισης) προς φάρδος του αποστακτήρα. Εδώ βρέθηκε πως, με αναλογία 1.02 και 2.3, (μικρότερη απόσταση μεταξύ των επιφανειών) βρέθηκε να αυξάνει η θερμοκρασία του νερού στην επιφάνεια εξάτμισης κατά 9.2% και 11.3% αντίστοιχα, καθώς η επιφάνεια του νερού όντας πιο κοντά στο κάλυμμα δεχόταν παραπάνω ηλιακή ακτινοβολία. Ωστόσο, αναφέρεται πως με την αναλογία 2.3 το κάλυμμα ήταν κατά 5.6% θερμότερο, μειώνοντας τη διαφορά θερμοκρασίας των δύο επιφανειών. Ως εκ τούτου προτείνεται μία χαμηλότερη αναλογία (Mohsenzadeh *et.al.* 2023).
- Η σχετική υγρασία στο εσωτερικό του αποστακτήρα, όπου βάσει των ίδιων ερευνητών, παρατηρήθηκε πως διατηρώντας μία χαμηλότερη σχετική υγρασία (72.8%) με τη προσθήκη εξωτερικού συμπυκνωτή επιτυγχάνεται μεγαλύτερος ρυθμός εξάτμισης και μικρότερη αύξηση της θερμοκρασίας του καλύμματος λόγω μειωμένης συμπύκνωσης σε αυτό, με αποτέλεσμα την αύξηση της ημερήσιας απόδοσης του συστήματος κατά 17.7% (Mohsenzadeh *et.al.* 2023).
- Η θερμομόνωση, χωρίς την οποία η επίδραση του βάθους δεν παίζει κανένα ρόλο στην απόδοση. Διάφορα υλικά αναφέρονται στη βιβλιογραφία για τη μείωση των απωλειών θερμότητας όπως πολουρεθάνη, φελιζόλ, θερμοκόλληση, γύψος, ξύλο και πριονίδι ενώ η θερμική αγωγιμότητά τους καθορίζει το ιδανικό πάχος τους. Ενδεικτικά, οι Khalifa & Hamood (2009) αναφέρουν πως η παραγωγικότητα συμβατικού αποστακτήρα αυξήθηκε από 1.81 L/m²-day χωρίς μόνωση σε 3.28 L/m²-day ημέρα με μόνωση πάχους 60 mm από φύλλο φελιζόλ, ενώ οι Al-Hinai *et.al.* (2001) έδειξαν ότι η απόδοση των πάνελ αυξήθηκε με την αύξηση του πάχους μόνωσης του έως τα 0.13 m.
- Η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού πριν την είσοδο στον αποστακτήρα, με την απόδοση να αυξάνει έως και 9% με την αύξηση της θερμοκρασίας του από τους 20°C στους 40°C. Περαιτέρω αύξηση είχε αρνητική επίπτωση στην παραγωγικότητα (Al-Hinai *et.al.* 2001).
- Ο ρυθμός ροής του θαλασσινού νερού μέσα στον αποστακτήρα, όπου η αύξησή του από 0.07 σε 0.2 kg/min μείωσε την ολική απόδοση από 63.3% σε 36.7% λόγω της μείωσης του χρόνου παραμονής του νερού στον αποστακτήρα (Tabrizi *et.al.* 2022).
- Η συγκέντρωση αλατιού του θαλασσινού νερού, καθώς αυξημένη αλατότητα αυξάνει την θερμοχωρητικότητα του νερού συντελώντας στην μείωση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ νερού και καλύμματος και ως εκ τούτου στη μειωμένη απόδοση του συστήματος (Saxena *et.al.* 2022).

Πολλές διαφορετικές μορφές εξειδικευμένων και μη, παθητικών ή και ενεργητικών συστημάτων ηλιακής αφαλάτωσης έχουν δοκιμαστεί σε πειραματική κλίμακα βάσει της διαθέσιμης βιβλιογραφίας. Συγκεντρωτικά, τις κυριότερες κατηγορίες σχεδιασμού ηλιακών παθητικών αποστακτήρων αποτελούν οι εξής:

- Τυπικοί Ηλιακοί αποστακτήρες μονής επίδρασης (Single Effect solar stills), (Mohsenzadeh *et.al.* 2021).
- Ηλιακοί αποστακτήρες με κάλυμμα μονής ή διπλής κλίσης (Single or Double slope solar stills), (Feilzadeh *et.al.* 2021, Dubey *et.al.* 2022).
- Ηλιακοί αποστακτήρες πολλαπλής επίδρασης, (Multi-effect solar stills).
- Ηλιακός αποστακτήρας διπλής και τριπλής επιφάνειας εξάτμισης, (Double/Triple-basin solar still) (Rajaseenivasan & Murugavel *et.al.* 2013, El-Sebaai *et.al.* 2005).
- Ηλιακοί Αποστακτήρες τύπου “φυτιλιού” μονής (Wick solar stills) ή πολλαπλής επίδρασης (Multi-wick type solar still), (Jobrane *et.al.* 2021).
- Σύστημα αποστακτήρα “φυτιλιού” (Wick-basin type still) (Minasian & Al-Karaghoulis 1995)
- Ηλιακοί αποστακτήρες τύπου καταρράκτη μαιανδρικής ροής (Weir-type cascade solar still), (Tabrizi *et.al.* 2010).
- Ηλιακοί αποστακτήρες διάχυσης μονής (Diffusion solar stills) ή πολλαπλής επίδρασης [Multi-effect diffusion type solar still], (Lee *et.al.* 2023).

Επιπλέον, πολυπλοκότερα συστήματα έχουν σχεδιαστεί με σκοπό την αύξηση της απόδοσης και της παραγωγικότητάς τους, όπως:

- Αποστακτήρας με κοίλο κάτοπτρο (Inverted absorber solar still - IASS), (Tiwari & Suneja, 1998).
- Σωληνοειδής ηλιακός αποστακτήρας (Tubular solar still), (Alatawi *et.al.* 2022).
- Σφαιρικός ηλιακός αποστακτήρας (Spherical solar still), (Dhiman, 1988).
- Κλιμακωτός Ηλιακός Αποστακτήρας (Stepped solar still), (Nougriaya *et.al.* 2021).

Καθώς η παρούσα εργασία αφορά πρότυπο σχεδιασμό αποστακτήρα που συνδυάζει τη φιλοσοφία κλιμακωτού αποστακτήρα με τη δυνατότητα εισαγωγής υλικού “φυτιλιού”, αξίζει η αναφορά στα πλεονεκτήματα αυτών, τα οποία ευνοούν την απόδοσή τους, όπως περιγράφονται στη βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα αναφέρεται πως:

- Η χρήση κλιμακωτού αποστακτήρα μειώνει και διατηρεί το χώρο μεταξύ της διαθέσιμης επιφάνειας εξάτμισης και του γυάλινου καλύμματος αυξάνοντας τον ρυθμό εξάτμισης και απόσταξης (Chaurasiya *et.al.* 2022) και κάνοντας τα κλιμακωτά πάνελ αποδοτικότερα από τα συμβατικά (Nougriaya *et.al.* 2021)
- Ο σχεδιασμός κλιμακωτών αποστακτήρων με εσωτερικά φράγματα (μυαυδρικής ροής), αυξάνει το χρόνο παραμονής του νερού και μειώνει ως εκ τούτου το ρυθμό ροής του θαλασσινού νερού, αυξάνοντας την θερμική απόδοση και τελικά την ημερήσια παραγωγή έως και 30% (Tabrizi *et.al.* 2010).
- Το υλικό “φυτιλιού” αναφέρεται πως ενισχύει την απόδοση των αποστακτήρων μέσω της απορρόφησης νερού και χάρης του πορώδους του υλικού και της τριχοειδούς ανύψωσης του νερού. Συγκεκριμένα, αυξάνει την ενεργή επιφάνεια εξάτμισης, μειώνει των βάθος του νερού και ως εκ τούτου τη (ογκομετρική) θερμοχωρητικότητά του (Younes *et.al.* 2021). Ακόμα αυξάνει την θερμοκρασία του νερού καθώς αυξάνει το χρόνο παραμονής και ως εκ τούτου μειώνει το ρυθμό ροής του. Από την άλλη αναφέρονται προβλήματα αποκοδόμοισης του υλικού λόγω έμφραξης των πόρων του από άλατα και δυσκολία έλεγχου της ποσότητας που απορροφά γεγονός που ενδέχεται να δημιουργήσει ξηρά σημεία στον αποστακτήρα. Τελικά, με την ανάπτυξη αποστακτήρων τύπου “φυτιλιού” βρέθηκε 60% αύξηση της απόδοσης έναντι των συμβατικών (Jobrane *et.al.* 2021).

Συνολικά, η παθητική ηλιακή απόσταξη αποτελεί μία απλή εναλλακτική, χαμηλού επενδυτικού και λειτουργικού κόστους για την παραγωγή γλυκού νερού με ποιοτικά χαρακτηριστικά που καλύπτουν έως και τις απαιτήσεις ποιότητας του πόσιμου νερού (Tan *et.al.* 2022). Η διεργασία χαρακτηρίζεται ακόμη από μηδαμινή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, με εξαίρεση ένα μικρό ποσοστό αυτής που απαιτείται για την άντληση, μεταφορά και παροχέτευση των ρών της. Δεν έχει δαπάνες σε χημικά και οι απαιτήσεις της σε ανθρώπινο δυναμικό είναι πολύ περιορισμένες σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες.

Από την άλλη πλευρά, τα συγκεκριμένα συστήματα παρουσιάζουν χαμηλή ημερήσια παραγωγή νερού και χαμηλή απόδοση ως προς την επιφάνεια που καταλαμβάνουν, σε παράκτιες περιοχές υψηλού κόστους γης. Έτσι παρά το ελαχιστοποιημένο λειτουργικό κόστος που απαιτούν για την ανάκτηση καθαρού νερού, παρουσιάζουν σημαντικό κόστος κεφαλαίου (Tan *et.al.* 2022). Οι Karaghoulis & Kazmerski (2013) αναφέρουν μία μέση τυπική παραγωγή 4-6 L/m²/day, με τυπική δυναμικότητα εγκατάστασης < 100 m³/day και τυπική απόδοση που δεν ξεπερνά το 10-20%. Τα παραπάνω, συνεπάγονται ως εκ τούτου σε πολύ αυξημένο ειδικό κόστος νερού με τυπικό μέσο εύρος τα 1.3 – 6.5 \$/m³. Η βέλτιστη απόδοση των συμβατικών παθητικών ηλιακών αποστακτήρων αναφέρεται ότι αγγίζει το 30-40%, ενώ το κόστος νερού για παραγωγή 4 L/m² /day, φτάνει έως τα 23.8 \$/m³, με κόστος κατασκευής τα 315 \$/μονάδα αποστακτήρα (Al-Karaghoulis *et.al.* 2009, 2013). Συμπερασματικά συμφωνείται, πως τα εν λόγω συστήματα είναι κατάλληλα για αποκεντρωμένες παράκτιες περιοχές με υψηλή διαθεσιμότητα γης, χαμηλή διαθεσιμότητα ενέργειας και για χρήσεις που δεν απαιτούν σημαντικές ποσότητες νερού, όπως π.χ. η μη εντατική γεωργία (Al-Karaghoulis *et.al.* 2009, 2013, Tan *et.al.* 2022).

Πλήθος ερευνητικών εργασιών απαντάται στη διαθέσιμη βιβλιογραφία σχετικά με την αύξηση της ημερήσιας παραγωγικότητας και της θερμικής απόδοσης τέτοιων συστημάτων, όπου εξετάζεται η απόκρισή τους υπό

διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας και πολυπλοκότερους σχεδιασμούς (Hussen *et.al.* 2023). Ενδεικτικά αναφέρεται, η ανάπτυξη ηλιακού αποστακτήρα μονής κλίσης με χάλκινο θερμαντικό πηνίο, εξωτερικό συμπακνωτή, υλικό αλλαγής φάσης και εσωτερικούς-εξωτερικούς ανακλαστήρες που εξέτασαν πρόσφατα οι Abdullah *et.al.* 2023, η αξιολόγηση ενός τροποποιημένου ηλιακού αποστακτήρα τύπου πυραμίδας με “φυτίλι”, ανακλαστήρες, ψυχόμενο κάλυμμα και νανοϋλικά (TiO₂) (Sharshir *et.al.* 2022) και η μελέτη απόδοσης τροποποιημένου ηλιακού αποστακτήρα με επιφάνειας εξάτμισης μονής κλίσης, απορροφητή, συμπακνωτή και πετάσματα τύπου καρφίτσας (Rabhi *et.al.* 2017).

Επιπλέον, έχουν πειραματικά αναπτυχθεί πολλαπλές ενεργητικές διατάξεις άμεσης ηλιακής αφαλάτωσης, οι οποίες βασίζονται στην ενσωμάτωση συστημάτων παροχής πρόσθετης θερμικής ενέργειας για την προθέρμανση του θαλασσινού νερού και την αύξηση της διαφοράς θερμοκρασίας του με το κάλυμμα με στόχο πάντα την παραγωγή περισσότερου νερού ανά μονάδα επιφάνειας και ημέρα. Τέτοιες περιπτώσεις αποτελούν μεταξύ πολλών ο ηλιακός αποστακτήρας με θερμοηλεκτρική ψύξη (Shatar *et.al.* 2023), ο σωληνοειδής ηλιακός αποστακτήρας αυξημένης απόδοσης με χρήση ηλεκτρικού θερμαντήρα (Nayagam *et.al.* 2022) κ.ά., καθώς και ευρύτερα ο συνδυασμός ηλιακών συστημάτων με ΑΠΕ (Adam *et.al.* 2023).

Παρά την ολοένα κλιμακούμενη πρόοδο της τεχνολογίας ηλιακής αφαλάτωσης ωστόσο, μηδαμινό ποσοστό αυτών έχει αναπτυχθεί ή διατηρηθεί σε ευρύτερη κλίμακα λειτουργίας πέραν της εργαστηριακής, τόσο δε σε αστικό επίπεδο όσο και για την εξυπηρέτηση αποκεντρωμένων παραθαλάσσιων περιοχών. Οι κυριότερες αιτίες εντοπίζονται στην πολυπλοκότητα σχεδιασμού τους, την μειωμένη απόδοση ως προς την έκταση που καταλαμβάνουν και το υψηλό τους κόστος. Τοπικοί περιορισμοί όπως η έλλειψη χρηματοδοτικών εργαλείων και διαχειριστικών σχεδίων από την πολιτεία, το υψηλό κόστος - χαμηλή διαθεσιμότητα γης και η έλλειψη εξειδικευμένου εργατικού δυναμικού αποτρέπουν περαιτέρω την εφαρμογή τους σε αποκεντρωμένο επίπεδο.

Αξίζει κλείνοντας να αναφερθεί, πως η μοναδική διαθέσιμη στη βιβλιογραφία εφαρμογή συμβατικών ηλιακών αποστακτήρων στο πεδίο, έγινε πολύ παλαιότερα από τους Eibling *et.al.* (1971). Οι ίδιοι εγκατέστησαν μεταξύ άλλων, ηλιακά πάνελ έκτασης 2,686.76 m² για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού στο νησί της Σύμης και η δυναμικότητα τους υπολογίστηκε στα 7.57 m³/day, και ως εκ τούτου σε 2.82 L/m²day. Σε μεταγενέστερη εργασία, η Μαργέλου (2013) υπολόγισε την παραγωγή των ίδιων αποστακτήρων σε περίπτωση που βρίσκονταν εγκατεστημένοι στην Αθήνα, την 21^η κάθε μηνός για ένα έτος. Τα αποτελέσματά της έδειξαν μέγιστη ειδική παραγωγή 3.79 L/m²day και συνολική 10.18 m³/day την 21^η Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο) και ελάχιστες αντίστοιχες τιμές 1.26 L/m²day και 3.39 m³/day την 21^η Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο), δείχνοντας πως ο παράγοντας της έντασης της ηλιακής ακτινοβολία έχει σημαντική επίδραση στην απόδοση της τεχνολογίας.

Ως προς τα κόστη του εν λόγω έργου συνολικά αναφέρεται πως με επένδυση 100,000 \$ για την κατασκευή ηλιακών αποστακτήρων έκτασης 9290.3 m², και ως εκ τούτου 10.7 \$/m², τα λειτουργικά κόστη ήταν ιδιαίτερα χαμηλά της τάξης των 0.013 \$/m². Το κόστος παραγωγής νερού που προέκυψε, υπολογίστηκε σε 0.79 έως 1.03 \$/m³, το οποίο συσχετίζεται με το κόστος γης και υλικών την δεδομένη περίοδο της μελέτης (Eibling *et.al.* 1971).

Στην παρούσα εργασία, περιγράφονται τα χαρακτηριστικά και η απόδοση ενός πρότυπου παθητικού συστήματος ηλιακής απόσταξης υπό συνθήκες συνεχούς λειτουργίας. Το έργο καλούμενο *Mangrove Still System* (MSS), περιλαμβάνει 80 αποστακτήρες και αναπτύσσεται σε πιλοτική κλίμακα πεδίου 190 m² στο νησί της Τήνου. Καθώς το έργο στοχεύει στην παραγωγή αρδευτικού νερού για την κάλυψη των αναγκών ενός θερμοκηπίου, με παράλληλη ανάκτηση βρώσιμου αλατού, κρίνεται σκόπιμη εν συνεχεία η επεξήγηση βασικών ποιοτικών παραμέτρων οι οποίες παρακολουθούνται προς συμμόρφωση των εκροών με την ισχύουσα νομοθεσία. Επειδή το νερό του συστήματος ελέγχεται και ως πόσιμο νερό, αν και δεν προορίζεται ούτε και αξιοποιείται για αυτή τη

χρήση, η πλειοψηφία των παραμέτρων προσδιορίζεται συνοπτικά και ως προς τις αντίστοιχες προδιαγραφές. Αναφορά γίνεται τέλος, και στο εν λόγω ισχύον νομοθετικό πλαίσιο.

2.5 Ποιοτικός προσδιορισμός – Παράμετροι, και θεσμικά πρότυπα αρδευτικού νερού

Η ποιοτική επάρκεια του νερού για τη χρήση του προς αρδευτικούς σκοπούς οφείλει σύμφωνα με την κείμενη ευρωπαϊκή και εθνική νομοθεσία να επαληθεύεται εργαστηριακά. Παρακάτω, προσδιορίζονται οι βασικές παράμετροι που πρέπει να εξετάζονται σύμφωνα με τα πρότυπα επαναχρησιμοποίησης των λυμάτων για άρδευση, τα οποία λαμβάνονται υπόψη και για το νερό που προέρχεται από αφαλάτωση.

2.5.1 Αλατότητα

Κεντρικό ρόλο στην παρούσα μελέτη λόγω της φύσης της μελετώμενης τεχνολογίας, αποτέλεσε ο έλεγχος της αλατότητας του παραγόμενου νερού ως προς την καταλληλότητά του για άρδευση. Ως αλατότητα αναφέρεται η συνολική μάζα των διαλυμένων ανόργανων ουσιών ανά μονάδα μάζας θαλασσινού νερού, με μέση τιμή τα 35 μέρη ανά εκατομμύριο (ppt). Το νερό άρδευσης περιέχει διαλυμένα ορυκτά άλατα με σύσταση που ποικίλει ανάλογα με την πηγή προέλευσής του. Βάσει αυτής, το νερό μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως υπεράλμυρο, θαλασσινό, υφάλμυρο, χαμηλής συγκέντρωσης αλατούχο και γλυκό νερό (Eke *et.al.* 2020). Η τυπική σύσταση ιόντων του θαλασσινού νερού που αφορά την περιοχή της Αν. Μεσογείου παρατίθεται στον **Πίνακας 7** (Water Condition & purification, 2005) ενώ η σύσταση της εισερχόμενου θαλασσινού νερού στο μελετώμενο σύστημα εμφανίζεται στον **Πίνακας 6** (Hydroysa D2.3, 2019).

Πίνακας 7: Τυπική σύσταση θαλασσινού νερού Αν. Μεσογείου **Πίνακας 6:** Σύσταση θαλασσινού νερού εισροής στο MSS

Κατιόντα (+)	mg/L
Ca ²⁺	423
Mg ²⁺	1403
Na ⁺	11,800
K ⁺	463
Ανιόντα(-)	mg/L
Cl ⁻	21,200
HCO ₃ ⁻	146
SO ₄ ²⁻	2,950
NO ₃ ⁻	<1-30
Br ⁻	155
BO ₃ ³⁻	72
TDS	38600

Παράμετρος	Συγκέντρωση (mg/L)
Cl ⁻	23,922.20
Na ⁺	13,202.92
SO ₄ ²⁻	2,726.66
Mg ²⁺	1,480.00
Ca ²⁺	560
K ⁺	415
HCO ₃ ⁻	180.44
CO ₃ ²⁻	5.59
Sr ²⁺	8
H ₃ BO ₃	4.50
CO ₂	3.83
SiO ₂	3
NO ₃ ⁻	2.10
F ⁻	0.50
Ba ²⁺	0.01
TDS	42,532.16
pH	7.40

Τα ιόντα Na⁺ και Cl⁻ παρουσιάζουν την υψηλότερη συγκέντρωση ως προς την αλατότητα των θαλασσινών νερών. Στο πόσιμο νερό συγκεντρώσεις άνω των 200 mg Na⁺/L και 250 mg Cl⁻/L προσδίδουν στο νερό αλμυρή γεύση, ενώ πρόσληψη αυξημένων συγκεντρώσεων συνδέεται με καρδιαγγειακά προβλήματα. Ακόμη, ο Οργανισμός τροφίμων και γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (FAO) ορίζει ως σύνηθες εύρος συγκέντρωσης του Na⁺ και Cl⁻ στο αρδευτικό νερό τα 0-30 meq/L (έως 920 mg/L) και 0-30 meq/L (έως 1000 mg/L), αντίστοιχα, όπως διακρίνεται στο συγκεντρωτικό πίνακα κριτηρίων καταλληλότητας (**Πίνακας 8**). Ισχύει ωστόσο η προϋπόθεση να έχουν χαμηλότερη αθροιστικά αναλογία συγκέντρωσης ως προς το σύνολο ανιόντων.

Πίνακας 8: Κατευθυντήριες της Υπηρεσίας περιβαλλοντικής προστασίας των Η.Π.Α. (USEPA) και του Οργανισμού τροφίμων και γεωργίας των Η.Ε. (FAO) για το νερό άρδευσης (Biswas *et.al.* 2021)

Παράμετρος	Μονάδα	Όρια USEPA & FAO	
pH	^a	6.50-8.40	6.50-8.50
Total dissolved solid (TDS)	mg/l	<450	2,000
Biochemical oxygen demand (BOD)	mg/l	10	^{a,b}
Chemical oxygen demand (COD)	mg/l	^{a,b}	^{a,b}
Ammonium (NH ₄)	mg/l	^{a,b}	0-5
Nitrite (NO ₂)	mg/l	^{a,b}	^{a,b}
Nitrate (NO ₃)	mg/l	<5	0-10
Total Nitrogen (TN)	mg/l	^{a,b}	30
Phosphate (PO ₄)	mg/l	^{a,b}	0-2
Total Phosphorus (TP)	mg/l	^{a,b}	^{a,b}
Potassium (K)	mg/l	^{a,b}	0-2
Calcium (Ca)	mg/l	^{a,b}	400
Magnesium (Mg)	mg/l	^{a,b}	60
Sodium (Na)	mg/l	<69	900
Manganese (Mn)	mg/l	0.20	0.20
Iron (Fe)	mg/l	5.00	5.00
Cadmium (Cd)	mg/l	0.01	0.01
Cromium (Cr)	mg/l	0.10	0.10
Zinc (Zn)	mg/l	2.00	^{a,b}
Lead (Pb)	mg/l	5.00	2.00
Nickel (Ni)	mg/l	0.20	5.00

Παράμετρος	Μονάδα	Όρια USEPA & FAO	
Boron (B)	mg/l	0.75	0-2
Chloride (Cl)	mg/l	<70	1,100
Sulphate (SO ₄)	mg/l	^{a,b}	1,000
Carbonate (CO ₃)	mg/l	^{a,b}	0-100
Bicarbonate (HCO ₃)	mg/l	<150	600
Sodium adsorption ratio (SAR)	^{a,b}	<5	15
Electrical Conductivity (EC)	dS/m	<0.70	3.00
Vanadium (V)	mg/l	0.10	^{a,b}
Selenium (Se)	mg/l	0.02	^{a,b}
Lithium (Li)	mg/l	2.50	^{a,b}
Fecal Coliform (FC)	Count per 100 ml	25	<200
Copper (Cu)	mg/l	0.20	0.10
Aluminium (Al)	mg/l	5.00	^{a,b}
Cobalt (Co)	mg/l	0.05	0.05
Fluoride (F)	mg/l	1.00	^{a,b}
Arsenic (As)	mg/l	0.10	^{a,b}
Beryllium (Be)	mg/l	0.10	^{a,b}
Molybdenum (Mo)	mg/l	0.01	^{a,b}

^a & ^b Δεν αναφέρεται τιμή

Είναι γνωστό πως η αλατότητα που προκαλείται από το NaCl σε νερά άρδευσης, σχετίζεται με ένα από τα πιο συνηθισμένα αβιοτικά στρες που επηρεάζουν τη φυσιολογία των φυτών, προκαλώντας τους σημαντικές διαταραχές όπως ανισορροπία θρεπτικών ιόντων, μείωση της αγωγιμότητας των στομάτων, χαμηλή φωτοσυνθετική δραστηριότητα, οξειδωτικές ενώσεις, μορφολογικές μεταβολές στα φύλλα και τις ρίζες κ.λπ. Ως εκ τούτου, απαιτείται προσδιορισμός των ορίων ευαισθησίας για κάθε είδος ως προς την περιεχόμενη αλατότητα του αρδευτικού νερού. (Petretto *et.al.* 2019). Ωστόσο, κύρια επίπτωση της αλατότητας στα καλλιεργούμενα εδάφη είναι ότι καθιστά το νερό λιγότερο διαθέσιμο στα φυτά καθώς η ωσμωτική πίεση του εδαφικού διαλύματος αυξάνεται με την αύξηση αυτής (fao.org).

Δύο παράμετροι σχετίζονται με τον προσδιορισμό της αλατότητας, αυτή των ολικών διαλυμένων στερεών (Total Dissolved Solids – TDS) που μετρούνται σε mg/L (ppm) και εκείνη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Electrical Conductivity – EC) η οποία μετράται σε mS/cm. Τα TDS αντιπροσωπεύουν το σύνολο ανόργανων και οργανικών ενώσεων σε ένα διάλυμα. Από την άλλη πλευρά, η ηλεκτρική αγωγιμότητα εκφράζει την ικανότητα του νερού να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα και οφείλεται στην παρουσία κυρίως ανόργανων διαλυμένων ενώσεων. Η ικανότητα αυτή εξαρτάται από την παρουσία αλάτων με τη μορφή ιόντων και τη συγκέντρωση, την ευκινησία, και το σθένος τους (Ανδρεαδάκης, 2008), ενώ αυξάνει με αύξηση της θερμοκρασίας (≈2-4% ανά 1°C) και της υδροστατικής πίεσης (βάθος) του νερού. Προσεγγιστικά γίνεται η παρακάτω παραδοχή συσχέτισης των δύο παραμέτρων:

$$TDS = k_e EC, (1)$$

όπου τα TDS εκφράζονται σε mg/L και η EC σε μS/cm στους 25 °C (ειδική αγωγιμότητα), ενώ ο συντελεστής συσχέτισης k_e κυμαίνεται μεταξύ 0.5 για χαμηλές τιμές EC και 0.8 για μεγαλύτερες (τυπικά λαμβάνεται 0.64), (Atekwana *et.al.* 2004).

Στον **Πίνακα 9** αποτυπώνεται η κατάταξη του νερού ως προς τη χρήση του για άρδευση, βάσει του προσδιορισμού των τιμών EC και TDS αυτού.

Πίνακας 9: Ποιότητα νερού άρδευσης βάσει EC και TDS (Wilcox, 1985, αριστερά) και TDS (Sakthivel, 2007, δεξιά)

Quality of Water	Electrical conductivity (μS/cm)	Classes of water	Total dissolved solids(mg/l)
Excellent	<250	Class 1, Excellent	175
Good	250 – 750	Class 2, Good	175 - 525
Doubtful	750 – 2250	Class 3, Permissible1	525 - 1400
Unsuitable	>2250	Class 4, Doubtful2	1400 - 2100
		Class 5, Unsuitable2	> 2100

Τα ολικά διαλυμένα στερεά (TDS) είναι συνήθως χαμηλά σε νερά από πηγές γλυκού νερού, με τιμή μικρότερη των 500 ppm, ενώ τιμή άνω των 1000 ppm προσδίδει χαρακτηριστική γεύση στο νερό. Οι τιμές των TDS για νερό ποταμών ή χαμηλής συγκέντρωσης αλατούχο νερό κυμαίνονται από 500 ppm έως < 3000 ppm, για το υφάλμυρο νερό ή νερό εσωτερικών υδάτων από 3,000 ppm με < 20,000 ppm, για το θαλασσινό νερό από ≥ 20,000 ppm έως 50,000 ppm και για την άλμη ή υπεράλμυρο νερό σε > 50.000 ppm (Eke *et.al.* 2020). Σε εμπορικά εργαστήρια τα TDS αντιπροσωπεύουν το συνολικό αριθμό mg αλάτων που θα παρέμεναν σε στερεά μορφή μετά από εξάτμιση 1 L νερού μέσω ξήρασης. Σε περιπτώσεις νερού πολύ υψηλής καθαρότητας, η ποιότητά του καθορίζεται μόνο μέσω της ηλεκτρικής αγωγιμότητάς του όπου το απιονισμένο νερό έχει πολύ χαμηλά επίπεδα της τάξης των 0.06 μS/cm. (Moran, 2018). Οι τυπικές τιμές της EC του νερού ανάλογα την προέλευσή του φαίνονται στον **Πίνακα 10:**

Πίνακας 10: Τυπικές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας νερού

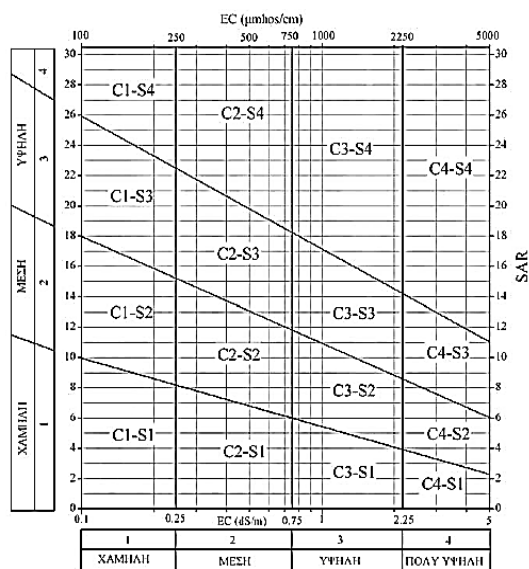
Τύπος	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (μS/cm)
Υπερκάθαρο Νερό	0.055
Απεσταγμένο Νερό	1
Νερό Αντίστροφης Ώσμωσης	5 – 15
Επιφανειακά νερά	100 – 10,000
Νερό Λίμνης	40 - 1500
Νερό Ποταμού	400 - 800
Πόσιμο νερό	< 1,000
Εμφιαλωμένο νερό	350 - 450
Θαλασσινό Νερό	40,000 – 60,000
Υπεράλμυρο νερό	> 60,000

Για τον ακριβέστερο προσδιορισμό της καταλληλότητας του νερού για άρδευση, παράλληλα με την EC λαμβάνεται υπόψη και ο δείκτης προσρόφησης νατρίου (Sodium Adsorption Ratio – SAR). Αποτελεί ένα κρίσιμο δείκτη για το αρδευτικό νερό, ο οποίος ορίζει τη σχετική συγκέντρωση νατρίου (Na^+ , meq/L) σε σύγκριση με το άθροισμα αυτής των ιόντων ασβεστίου (Ca^{2+} , meq/L) και μαγνησίου (Mg^{2+} , meq/L) σε ένα δείγμα. Ο υπολογισμός γίνεται ως εξής:

$$SAR = \frac{Na^+_{meq/L}}{\sqrt{\frac{(Ca^{2+}_{meq/L}) + (Mg^{2+}_{meq/L})}{2}}} \quad (2)$$

Αν και η συγκέντρωση νατρίου στο νερό άρδευσης συνεισφέρει στην αύξηση της συνολικής αλατότητάς του, το σημαντικότερο πρόβλημα που επιφέρει αφορά την αλλοίωση της εδαφικής δομής αποτελεσματικά (Zaman *et.al.* 2018). Ο SAR αξιολογεί το δυναμικό προβλημάτων διηθητικότητας του εδάφους λόγω της ανισορροπίας που

προκαλείται από το νάτριο στο νερό άρδευσης (Bauder *et.al.* 2014). Η συνεχής χρήση νερού με υψηλή τιμή SAR οδηγεί σε διάσπαση της φυσικής δομής του εδάφους, λόγω υψηλής συγκέντρωσης προσροφημένου νατρίου στα κολλοειδή του εδάφους (αλκαλίωση). Αποτέλεσμα αυτού είναι η διασπορά του εδαφικού περιεχόμενου αργίλου, κάνοντας το έδαφος σκληρό και συμπαγές όταν είναι ξηρό και όλο και πιο αδιαπέραστο από το νερό λόγω διασποράς και διόγκωσης όταν είναι υγρό. Το πρόβλημα ως εκ τούτου δυσχεραίνει όταν το περιεχόμενο αργίλου στο έδαφος είναι υψηλό, ενώ γενικά ορίζεται μέγιστη επιτρεπτή τιμή SAR = 10. Εδάφη με κυρίαρχα ανταλλάξιμα κατιόντα το Ca²⁺ και Mg²⁺ είναι ιδανικότερα λόγω διαπερατής κοκκώδους δομής που τα κάνει εύκολα να καλλιεργηθούν αποτελεσματικά (Zaman *et.al.* 2018). Οι τιμές του SAR είναι αντιστρόφως ανάλογες της EC. Μία χαμηλή τιμή EC στο αρδευτικό νερό με ένα υψηλό SAR μπορεί να επιφέρει διάσπαση των μεγάλων πόρων του εδάφους, οι οποίοι είναι απαραίτητοι για τον αερισμό και την αποστράγγιση, ιδίως στη ζώνη του ριζικού στρώματος των φυτών, και να κάνει το έδαφος αδιαπέρατο. Σε μία δεδομένη τιμή SAR η διαπερατότητα αυξάνει όσο αυξάνει η αλατότητα και αντίστροφα. Για το λόγο αυτό η ταξινόμηση των αρδευτικών νερών, απαιτεί και παράλληλη εκτίμηση του SAR με τη EC για τον ταυτόχρονο προσδιορισμό της επικινδυνότητας αλκαλίωσης του εδάφους και αλατότητας. Ο εν λόγω χαρακτηρισμός γίνεται μέσω 16 κατηγοριών, όπως προτάθηκε μέσω της κατασκευής αντίστοιχου διαγράμματος από την από το *U.S. Salinity Laboratory* το 1954 (**Διάγραμμα 9**).



ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΝΕΡΟΥ	ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑ ΓΙΑ ΑΡΔΕΥΣΗ
C1-S1	Νερό πολύ καλής ποιότητας με χαμηλή περιεκτικότητα σε άλατα. Κατάλληλο
C1-S2	Νερό καλής ποιότητας. Κατάλληλο για άρδευση με εξαίρεση ευαίσθητα φυτά στα άλατα
C2-S1	ή εδάφη με κακή στράγγιση.
C2-S2 C1-S3 C3-S1	Νερό μέσης ποιότητας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άρδευση με περιορισμούς
C1-S4 C2-S3	Νερό μέσης προς κακής ποιότητας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε ανθεκτικές σε
C3-S2 C4-S1	άλατα καλλιέργειες και σε στραγγιζόμενα εδάφη.
C2-S4, C4-S2	Νερό κακής ποιότητας. Δεν συνιστάται η χρήση του. Παρόλα αυτά μπορεί να
C3-S3	χρησιμοποιηθεί με αυστηρούς περιορισμούς σε καλά στραγγιζόμενα εδάφη και φυτά ανθεκτικά στα άλατα. Κίνδυνος αύξησης της αλατότητας του εδάφους. Συνιστάται περιοδική έκπλυση των αλάτων.
C3-C4, C4-S3	Νερό κακής ποιότητας. Δεν συνιστάται η χρήση του. Σε εξαιρετικές περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άρδευση κάτω από αυστηρούς περιορισμούς
C4-S4	Νερό πολύ κακής ποιότητας. Η εφαρμογή του για άρδευση καθίσταται απαγορευτική

Διάγραμμα 9: Ταξινόμηση του αρδευτικού νερού ως προς την επικινδυνότητα αλατότητας και Νατρίου (*USSL, 1954*).

Επιπλέον ο **Πίνακας 11**, συνοψίζει τις επιθυμητές χαρακτηριστικές τιμές ως προς την ανωτέρω συσχέτιση EC και SAR σχετικά με την διαπερατότητα του εδάφους, καθώς και λοιπών επιπτώσεων όπως περιγράφονται στο ισχύον θεσμικό πλαίσιο.

Πίνακας 11: Τυπικές παράμετροι ασφαλείας αρδευτικού νερού (Υ.Α. 145116/2011, Παράρτημα ΙΙΙ).

Πιθανό πρόβλημα κατά την άρδευση	Μονάδες	Βαθμός περιορισμών κατά την εφαρμογή		
		Μηδαμινός	Μικρός-Μέτριος	Μεγάλος
Αλατότητα (Επηρεάζει την διαθεσιμότητα του νερού στο έδαφος)				
EC _w ⁽¹⁾	dS/m	< 0.7	0.7 -3.0	> 3.0
H				
TDS (ολικά διαλυμένα)	mg/l	< 450	450 -2000	> 2000
Διαπερατότητα				
SAR ⁽²⁾ = 0 - 3 και EC _w				
=		> 0.7	0.7 -0.2	< 0.2
3 - 6		> 1.2	1.2 -0.3	< 0.3
6 -12		> 1.9	1.9 -0.5	< 0.5
12-20		> 2.9	2.9 -1.3	< 1.3
20-40		> 5.0	5.0 -2.9	< 2.9
Ειδική τοξικότητα ιόντων				
Νάτριο (Na)				
Επιφανειακή άρδευση (προσρόφηση δια των ριζών)	SAR	< 3	3 -9	> 9
Καταισισμός (προσρόφηση δια των φύλλων)	mg/l	≤ 70	> 70	
Χλωριόντα (Cl)				
Επιφανειακή άρδευση (προσρόφηση δια των ριζών)	mg/l	< 140	140 -350	> 350
Καταισισμός (προσρόφηση δια των φύλλων)	mg/l	≤ 100	> 100	
Άλλες επιπτώσεις				
Αζώτο (NO ₃ -N) ⁽³⁾	mg/l	< 5	5 -30	> 30
HCO ₃ (μόνο για άρδευση για καταισισμό)	mg/l	< 90	90-500	> 500
Ph		Τυπικό διάστημα 6.5-8.5		

2.5.2. Λοιπές παράμετροι

Τα πρότυπα ποιότητας του αρδευτικού νερού αφορούν μεταξύ άλλων το προσδιορισμό των επιπρόσθετων παραμέτρων που περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω. Η πλειοψηφία αυτών αφορά και τη χρήση του προς ανθρώπινη κατανάλωση, για την οποία το παραγόμενο νερό ελέγχθηκε χωρίς ωστόσο να προορίζεται για αυτήν.

Ενεργός οξύτητα (pH): Ενεργός οξύτητα είναι η συγκέντρωση των ιόντων H₃O⁺ στο διάλυμα και εκφράζεται με το pH, δηλ. με τον αρνητικό δεκαδικό λογάριθμο της συγκέντρωσης των ιόντων H₃O⁺. Το pH αποτελεί ένδειξη όξινης ή αλκαλικής συμπεριφοράς του εξεταζόμενου διαλύματος. Τυπικό εύρος τιμών στο αρδευτικό νερό αποτελεί το pH 6.5-8.5 όπου δεν δημιουργούνται προβλήματα στις καλλιέργειες. Τιμή εκτός αυτού, αποτελεί ένδειξη για περαιτέρω έλεγχο του νερού λόγω πιθανής παρουσίας τοξικότητας και πρόκλησης ανισορροπίας στην πρόσληψη των θρεπτικών, ενώ τιμές pH > 7.0 πιθανώς να δημιουργήσουν προβλήματα στο αρδευτικό δίκτυο σταλακτών καθώς και στην ανάμιξη λιπασμάτων (fao.org). Σε τιμές EC < 0.2 μS/cm ωστόσο, το pH εμφανίζει τιμές χαμηλότερες των τυπικών χωρίς ωστόσο περαιτέρω κίνδυνο (Πεπονάκης, 2012). Το επιτρεπόμενο διάστημα στο πόσιμο νερό κυμαίνεται σε pH 6.5-9.5, αποσκοπούμενο κυρίως στο έλεγχο διαβρώσεων στο δίκτυο σωληνώσεων καθώς τα όρια ανοχής του οργανισμού είναι ευρεία. Ενδείκνυται ωστόσο, ένα ανώτατο όριο pH 8-8.5 για την αποφυγή σχηματισμού καρκινογόνων τριαλογονομεθανίων (THM) κατά τη χλωρίωση και τη δράση του υπολειμματικού χλωρίου στο δίκτυο (Ανδρεαδάκης, 2008).

Νιτρικό άζωτο: Τα νιτρικά ιόντα (NO_3^-) αποτελούν οξειδωμένη μορφή των αζωτούχων ενώσεων και προκύπτουν ως τελικό προϊόν της αερόβιας αποικοδόμησης του αζωτούχου οργανικού υλικού. Σπάνια συναντώνται στα επιφανειακά νερά σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες των 5-10 mg/L, με εξαίρεση περιπτώσεις περιστατικών οργανικής ρύπανσης και περιοχές καλλιεργειών που εφαρμόζονται εντατικά αζωτούχα λίπασματα. Τα νιτρικά αποτελούν ένα από τα βασικά θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη των φυτών, όμως σε συγκεντρώσεις > 30 mg/L μπορεί να προκαλέσουν σοβαρό πρόβλημα πρόωρης ανάπτυξης, μη γέμισμα των καρπών και μειωμένη ποιότητα τελικού προϊόντος (Δασκάλου, 2021). Στο πόσιμο νερό η επικινδυνότητά του συνδέεται με την πιθανότητα τους αναγωγή προς νιτρώδη ιόντα (NO_2^-) στο στομάχι, τα οποία αποτελούν την άμεσα τοξική μορφή αζώτου. Οι μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση το νιτρικών στο πόσιμο νερό είναι 50 mg/L ενώ αντίστοιχα για τα νιτρώδη 0.5 mg/L με την προϋπόθεση να ισχύει η ο όρος $[\text{NO}_3^-]/50 + [\text{NO}_2^-]/3 \leq 1$ (Ανδρεαδάκης, 2008).

Θειικά ιόντα: Κυριότερη πηγή των θειικών (SO_4^{2-}) στο νερό αποτελεί η διαλυτοποίηση πετρωμάτων στα οποία περιέχονται όπως π.χ. ο γύψος. Ωστόσο, εισέρχονται σε αυτό και ανθρωπογενώς, μέσω λυμάτων ή εκπτώσεων εδαφών όπου εφαρμόζονται θειούχα λιπάσματα. Σε συγκεντρώσεις άνω των 250 mg/L το πόσιμο νερό εμφανίζει δυσάρεστη γεύση ενώ τιμές άνω των 1000 mg/L έχουν καθαρική δράση στον οργανισμό (Ανδρεαδάκης, 2008). Επιθυμητή συγκέντρωση στο αρδευτικό νερό από την άλλη, θεωρείται έως τα 400 ppm, καθώς σε μεγαλύτερη τιμή μειώνουν το εδαφικό pH και δημιουργούν πρόβλημα στην πρόσληψη του φωσφόρου από τα φυτά (earthworksturf.com).

Δείκτες Παθογένειας: Υψίστης σημασίας, τόσο ως προς την επιμόλυνση του πόσιμου νερού όσο και των φυτικών καλλιεργειών, είναι προσδιορισμός του παθογόνου φορτίου του νερού. Λόγω της αδυναμίας συνολικού ποσοτικού και ποιοτικού προσδιορισμού, έχουν κοινώς υιοθετηθεί λίγοι εύκολα και βάσιμα μετρούμενοι (εργαστηριακά) ενδεικτικοί παθογόνοι κοινής προέλευσης ως μικροοργανισμοί δείκτες. Τέτοιοι είναι τα ολικά κολοβακτηρίδια (Total Coliforms -TCH) και ειδικότερα οι κατηγορίες κολοβακτηριδίων που προέρχονται από το πεπτικό σύστημα ανθρώπων και ζώων, όπως τα περιττωματικά κολοβακτηρίδια (Faecal coliforms - FC) και το *Escherichia coli* (*E.Coli*). Σαν συμπληρωματική μικροβιολογική παράμετρος, ελέγχονται επίσης υποχρεωτικά οι εντερόκοκκοι, λόγω της πιθανότητας υποεκτίμησης του φορτίου βάσει της σταθερής αναλογίας των δεικτών και των επιμέρους παθογόνων μ/ο (Ανδρεαδάκης, 2008). Ως μονάδα μέτρησης χρησιμοποιείται η μονάδα σχηματισμού αποικιών (Colony Forming Units – CFU/100 mL) που αφορά στα ζώντα μικροβιακά κύτταρα που μπορούν να αναπαραχθούν μέσω διχοτόμησης σε ελεγχόμενες συνθήκες. Οι επιτρεπτές τιμές *E. Coli* στο πόσιμο νερό είναι μηδενικές ενώ τα όρια σε επεξεργασμένα λύματα κυμαίνονται από 200 CFU/100 mL για περιορισμένη (Μη θρώσιμα προϊόντα ή προϊόντα που καταναλώνονται μετά από επεξεργασία) έως 5 CFU/100 mL (80% των δειγμάτων) και 50 CFU/100 mL (95% των δειγμάτων) για απεριόριστη άρδευση. Για το αρδευτικό νερό ωστόσο που προέρχεται από αφαλάτωση θαλασσινού δεν διευκρινίζονται σχετικές απαιτήσεις.

Θολερότητα: Η μέτρηση της θολότητας, αποσκοπεί έμμεσα στον προσδιορισμό των κolloειδών και αιωρούμενων (ανόργανων ή οργανικών) στερεών μεγέθους 0.45 έως 1.2 μm (Suspended Solids – SS). Αυτά, βρίσκονται στους φυσικούς αποδέκτες ως προϊόντα φυσικής αποσάθρωσης εδαφών και πετρωμάτων ή λόγω υγρών αποβλήτων. Επιφέρουν περιορισμό της διαύγειας και της αισθητικής αξίας του νερού, ενώ επιπλέον επιδρούν στην απολύμανση του νερού παρέχοντας προστασία σε παθογόνους μ/ο από τα απολυμαντικά μέσα ή ακόμα δρώντας ως ροφητές τοξικών ενώσεων (βαρέων μετάλλων, οργανικών ρύπων κλπ.), (Φυτιανός & Σαμαρά-Κωνσταντίνου, 2009). Έτσι, ο προσδιορισμός της, μας δίνει σε άμεσο χρόνο μία εκτίμηση του φορτίου παθογένειας, όπως υπολογίζεται επί τόπου με συσκευές θολομέτρων. Μετράται συνηθέστερα σε μονάδες NTU (Nephelometric Turbidity Units). όπως προσδιορίζονται μέσω της νεφελομετρικής μεθόδου. Αν και η ανώτατη τιμή τους υπόκεινται στα όρια ανοχής από τους καταναλωτές με μέγιστη τα 10 NTU, συστήνεται η διατήρησή της σε επίπεδα < 1 NTU (Ανδρεαδάκης, 2008). Σχετικά με το αρδευτικό νερό, ανώτατη τιμή ίση με 2 NTU (ως διάμεση

τιμή) τίθεται σύμφωνα με την Υ.Α. 145116/2011, για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων προς απεριόριστη άρδευση.

Ολική Σκληρότητα (Total Hardness): Η σκληρότητα αποτελεί το δείκτη παρουσίας διασθενών μεταλλικών κατιόντων στο νερό. Προκαλείται κυρίως από την παρουσία ενώσεων του ασβεστίου και του μαγνησίου, και λιγότερο από άλλα διασθενή ιόντα όπως του σιδήρου ή του μαγγανίου. Χαρακτηρίζεται ως ανθρακική ή παροδική σκληρότητα στην περίπτωση σχηματισμού ευδιάλυτων ανθρακικών αλάτων ασβεστίου του μαγνησίου [ενώσεις με διττανθρακικές (HCO_3^-) ρίζες], η οποία αίρεται με ανύψωση της θερμοκρασίας λόγω μείωσης της διαλυτότητας του CO_2 στην ένωση με παράλληλη αποδέσμευση των αλάτων ως ίζημα. Από την άλλη η μη ανθρακική ή μόνιμη σκληρότητα αφορά στην παρουσία χλωριούχων και θεικών αλάτων του ασβεστίου και του μαγνησίου και δεν αίρεται με ανύψωση της θερμοκρασίας (Δασκάλου, 2021). Το σύνολο αυτών αποτελεί την ολική σκληρότητα η οποία μετράται σε Γαλλικούς (f), Γερμανικούς (d) και οι Αγγλικούς βαθμούς (e), με συσχέτιση: $1f = 0.556d = 0.7e$, ενώ $1f = 10 \text{ mg/l CaCO}_3$. Τιμές κάτω των 60 mg/L στο πόσιμο νερό συσχετίζονται με καρδιαγγειακά προβλήματα ενώ σε τιμές $> 100 \text{ mg/L}$ δημιουργούν προβλήματα επικαθήσεων στις σωληνώσεις καθώς και αυξημένης απαίτησης απορρυπαντικών λόγω αντίδρασης με το σαπούνι (φωσφορικά) που περιορίζει τον αφρισμό του. Στο αρδευτικό νερό, αυξημένη τιμή σκληρότητας αντίστοιχα μπορεί να προκαλέσει εμφράξεις σε συστήματα στάγδην άρδευσης. Επιπλέον, μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στις καλλιέργειες λόγω ανύψωσης του pH, σχηματισμό κρούστας στο έδαφος και τις ρίζες, μείωσης της διαθεσιμότητας άλλων θρεπτικών (P, Fe, Zn) και έμφραξης των επιδερμικών κυττάρων παρεμποδίζοντας έτσι την πρόσληψη νερού και θρεπτικών από τα φυτά (researchgate.net). Σημειώνεται πως επιθυμητές συγκεντρώσεις Ca^{2+} και Mg^{2+} στο αρδευτικό νερό σύμφωνα με τον FAO (2015), θεωρούνται τα 400 mg/L και 60 mg/L αντίστοιχα.

Αλκαλικότητα (Alkalinity): Αλκαλικότητα του νερού είναι η ικανότητά του να εξουδετερώνει οξέα και να αντιστέκεται συνεπώς στην μείωση του pH. Οφείλεται στην παρουσία διττανθρακικών και ανθρακικών ιόντων που προκύπτουν από τον ιονισμό του CO_2 και από τα υδροξύλια. Το όξινο ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) και το όξινο ανθρακικό μαγνήσιο (MgCO_3) είναι τα πιο κοινά στοιχεία που συνεισφέρουν σε αυτή, ενώ συνήθως μετριέται σε ισοδύναμη συγκέντρωση CaCO_3 . Στο αρδευτικό νερό είναι επιθυμητή μία τιμή αλκαλικότητας της τάξης των 30-60 ppm καθώς μπορεί να δράσει ως πηγή εμπλουτισμού Ca^{2+} και Mg^{2+} προς τις καλλιέργειες. Ωστόσο, αναφέρεται ότι σε τιμές $> 100 \text{ ppm}$, δημιουργεί ανισορροπία ή και έκπλυση (σε περίοδο βροχοπτώσεων) αυτών των στοιχείων διαμέσου του εδάφους, ενώ σε συνδυασμό με αυξημένο pH του νερού αυξάνει αργά το εδαφικό pH και δημιουργεί ανεπάρκεια πρόσληψης ιχνοστοιχείων στα φυτά. Επιπλέον, το μαγνήσιο σε αυξημένες συγκεντρώσεις μπορεί προκαλέσει έμφραξη σταλακτών του αρδευτικού δικτύου (fao.org).

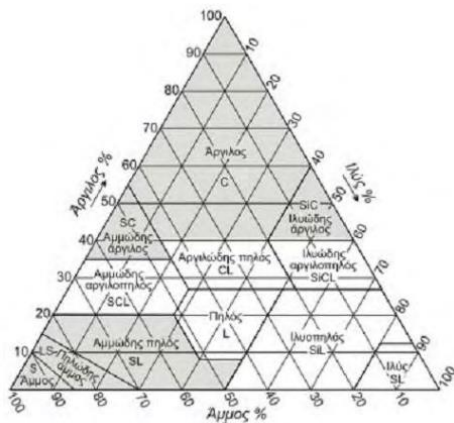
Ανόργανοι μικρορυπαντές: Οι όροι βαρέα μέταλλα και ιχνοστοιχεία που περιλαμβάνονται σε αυτή την κατηγορία, έχουν αποτελέσει πεδίο ασάφειας και συνεχούς επαναπροσδιορισμού. Ωστόσο, η βασική παραδοχή συσχετίζει τα βαρέα μέταλλα με την ομάδα εκείνη των μετάλλων και ημιμετάλλων πυκνότητας $> 5 \text{ g/cm}^3$ και ατομικού αριθμού > 20 που παρουσιάζουν οξεία τοξικότητα ακόμη και σε μικρές συγκεντρώσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως σε αντίθεση με του οργανικούς ρύπους, δεν αποικοδομούνται, έχουν την ικανότητα να μεταφέρονται σε έκταση προσροφούμενα σε αιωρούμενα στερεά και να βιοσυσσωρεύονται στους οργανισμούς ως μεταλλοκατιόντα, δημιουργώντας σύμπλοκα με μικρές αλυσίδες άνθρακα, κυρίως σε σουλφυδρομάδες λόγω της υψηλής συγγένειας τους με το θείο. Παρεμβάλλονται έτσι στη μεταβολική λειτουργία ενζύμων δημιουργώντας χρόνιες επιπλοκές. Για τους λόγους αυτούς τα ανώτερα επιτρεπτά όρια στο νερό που τίθενται από την ισχύουσα νομοθεσία αφορούν συγκεντρώσεις της τάξης των mg/L . Από τα βαρέα μέταλλα, το αρσενικό (As), το κάδμιο (Cd), ο μόλυβδος (Pb) και ο υδράργυρος (Hg) θεωρούνται υψίστης επικινδυνότητας λόγω της εκτεταμένης χρήσης τους στην βιομηχανία (Φυτιανός & Σαμαρά-Κωνσταντίνου, 2009). Η πρόσληψη από τα φυτά, και ως εκ τούτου η παρουσία τους στο αρδευτικό νερό, συνδέεται με τη μεταφορά τους στα ζώα και τον άνθρωπο μέσω της τροφικής αλυσίδας αλλά και την πρόκληση μεταβολικών δυσλειτουργιών σε αυτά καθαυτά. Από την

άλλη πλευρά, τα ιχνοστοιχεία αφορούν μέταλλα, μεταλλοειδή και κάποια αμέταλλα όπως το φθόριο (F) και το βόριο (B) που χαρακτηρίζονται ως απαραίτητα για την ανάπτυξη και την ολοκλήρωση των βιολογικών διεργασιών σε μικρές συγκεντρώσεις της τάξης, ενώ σε μεγαλύτερες καθίστανται τοξικά. Τα ωφέλιμα ή μη ανόργανα αυτά στοιχεία διαφέρουν από οργανισμό σε οργανισμό, Το βόριο συγκεκριμένα, το οποίο βρίσκεται σε νερά υπόγειας προέλευσης, αν και σημαντικό ως ιχνοστοιχείο για την ανάπτυξη των φυτών, δύναται σε αυξημένες συγκεντρώσεις να προκαλέσει φθορά στις καλλιέργειες. Συνολικά ο χαλκός (Cu), το μαγγάνιο (Mn), το μολυβδαίνιο (Mo), το νικέλιο (Ni) και ο ψευδάργυρος (Zn) θεωρούνται άκρως απαραίτητα στα ανώτερα φυτά, ενώ για ζώα και ανθρώπους απαραίτητα μικροθρεπτικά θεωρούνται το χρώμιο (Cr), ο χαλκός, το κοβάλτιο (Co), το μαγγάνιο, το μολυβδαίνιο, το σελήνιο (Se), το βανάδιο (V) και ο ψευδάργυρος (Αλεξιάδου, 2016). Τέλος, ο σίδηρος (Fe) αποτελεί απαραίτητο ιχνοστοιχείο για την ανάπτυξη τόσο των φυτικών όσο και των ζωικών οργανισμών. Σε συγκεντρώσεις ωστόσο > 0.1 mg/L στο αρδευτικό νερό επιφέρει κίνδυνο έμφραξης των σταλακτών άρδευσης, ενώ σε τιμές άνω των 5 mg/L δύναται ελαττώσει το εδαφικό pH και να παρεμποδίσει την πρόσληψη φωσφόρου και μολυβδαίνιου από τα φυτά (fao.org)

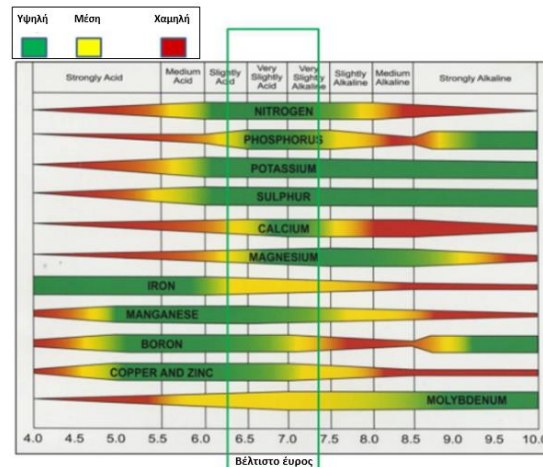
Οργανικές ενώσεις: Οι οργανικές ενώσεις στο νερό προέρχονται είτε μέσω φυσικής αποδόμησης φυτικής και ζωικής ύλης προσδίδοντας του αντιαισθητικές ιδιότητες (χρώμα, οσμή), είτε μέσω ανθρωπογενών πηγών όπως μονάδων επεξεργασίας νερού (αλογονούχες οργανικές ενώσεις) ή χημικών. Στη πλειοψηφία τους έχουν έντονη βιολογική δράση που καθορίζεται από τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες και αφορούν καρκινογόνες και μεταλλαξιογόνες επιδράσεις στους οργανισμούς (Φυτιανός & Σαμαρά-Κωνσταντίνου, 2009). Η τοξικότητά τους εκφράζεται μέσω του δείκτη LD₅₀ (Lethal dose values), που ορίζει την ποσότητα της ουσίας εκείνη που επιφέρει θάνατο σε 50% του πληθυσμού πειραματόζωνων. Ακόμη, ο δείκτης ανώτατης μη δραστικής συγκέντρωσης αφορά την μέγιστη αυτή συγκέντρωση που δεν προκαλεί βλάβη στον πληθυσμό και καθορίζει την ανώτατη ημερήσια επιτρεπτή δόση. Οι κυριότερες κατηγορίες που μετρούνται στο πόσιμο νερό είναι τα παρασιτοκτόνα, τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs), οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), οι πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες (TPHs), τα τριαλογονομεθάνια και οι φαινόλες. Για τις φαινόλες αναφέρεται πως, η υπερσυσσώρευσή τους στα φυτά επιφέρει νέκρωση φύλλων ή άλλων μερών τους.

Οι παραπάνω παράμετροι και το σύνολο των απαιτούμενων φυσικοχημικών και μικροβιολογικών παραμέτρων όπως και αυτό των ανόργανων και οργανικών ρυπαντών, προσδιορίζονται εργαστηριακά στα πλαίσια του πλάνου δειγματοληψίας, όπως ορίζει η κείμενη νομοθεσία για την επαναχρησιμοποίηση του νερού (Υ.Α. 145116/2011). Και το νερό ανθρώπινης κατανάλωσης (Οδηγία 2020/2184/ΕΕ). Τα αποτελέσματα αυτών, παρατίθενται και σχολιάζονται στο 5^ο Κεφάλαιο των αποτελεσμάτων της παρούσης.

Ομοίως προσδιορίζεται το περιεχόμενο του καλλιεργήσιμου εδάφους για την παρακολούθηση τυχόν επιπτώσεων στην καλλιεργούμενη έκταση λόγω άρδευσης με αφαλατωμένο νερό. Κατά την εδαφολογική ανάλυση ελέγχονται οι εδαφικές παράμετροι pH, ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), περιεχόμενης υγρασίας και θρεπτικών, μικροθρεπτικών και ανταλλάξιμων κατιόντων καθώς, η συνολική ιοντοαλλακτική ικανότητα (CEC) και η μηχανική σύσταση του εδάφους. Η τελευταία αποτυπώνεται στο τρίγωνο μηχανικής σύστασης εδαφών (**Εικόνα 12**), για τη κατηγοριοποίηση του ανάμεσα σε 12 διαφορετικές κλάσεις ανάλογα με το μέγεθος τα ανόργανα συστατικά του εδάφους ώστε να προσδιοριστεί η αποστραγγιστική του ικανότητα και οι συνθήκες αερισμού. Επιπλέον, βάσει της ιδανικής αναλογίας θρεπτικών (**Εικόνα 12**) της διαθεσιμότητάς τους σε σχέση με το pH (**Εικόνα 12**) και βάσει των παρατηρήσεων στην αναφορά της εδαφολογικής ανάλυσης αξιολογείται η κατάσταση της καλλιέργειας στην υπό μελέτη εγκατάσταση και οι ανάγκες αυτής, όπως προκύπτουν από την άρδυσή της με αφαλατωμένο νερό και από το σύνολο των εφαρμοζόμενων πρακτικών (**Ενότητα 5.10.1**).



Σχέση	Ιδανική Τιμή
K/Mg	5 (Ετήσιες καλλιέργειες) 3 (Κηπευτικά) 2 (Οπωροφόρα)
Ca/Mg	10 - 40
Mg/K	2
Ca/K	13
Ca/Mn	350
P/Fe	29:1



Εικόνα 12: Τρίγωνο μηχανικής σύστασης εδαφών (αριστερά), αναλογίες θρεπτικών (κέντρο), σχέση pH – διαθεσιμότητας θρεπτικών στο έδαφος (δεξιά), (D4.6 - Έκθεση αποτελεσμάτων ανάλυσης, 2023)

Τέλος, σχετικά με το ανακτώμενο αλάτι, αναλύσεις ποιότητας διενεργούνται ως προς τα αντίστοιχα όρια που θέτει η κείμενη νομοθεσία (CX STAN 150-1985, Οδηγία 2023/915/ΕΕ). Κεντρική παράμετρο ελέγχου αποτελεί η συγκέντρωση δισφαινόλης Α (BPA) λόγω της τοξικότητάς της, με όριο μετανάστευσης στα τρόφιμα από τις πλαστικές συσκευασίες περιεχομένου τα 0.05 µg/Kg (Κανονισμός 0213/2018/ΕΕ). Ακόμη μεταξύ άλλων, ελέγχεται η καθαρότητα του προϊόντος, που αφορά την περιεκτικότητά του σε NaCl, η οποία πρέπει να είναι τουλάχιστον 97%, υπολογιζόμενη επί ξηρού (Κώδικας τροφίμων και ποτών, 1987).

Εν συνεχεία παρατίθεται κωδικοποιημένα (**Πίνακας 12**), η ισχύουσα νομοθεσία και τα ποιοτικά πρότυπα που διέπουν τις αποδεκτές τιμές των προαναφερόμενων παραμέτρων, και όπως λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάλυση και αξιοποίηση του ανακτώμενου νερού και αλατιού, στο υπό μελέτη σύστημα.

Πίνακας 12: Ισχύον θεσμικό πλαίσιο και πρότυπα ποιότητας για το ανακτώμενο νερό και αλάτι.

Κωδικοποίηση	Τίτλος	Σχόλια
Υ.Α. οικ. 145116/2011 (Φ.Ε.Κ. 354/Β' 8.3.2011)	“Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις”.	Της 08-03-2020
ΟΔΗΓΙΑ 98/83/ΕΚ	“Ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης”	Αναδιατυπώθηκε με την παρακάτω
ΟΔΗΓΙΑ 2020/2184/ΕΕ	“Ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης”	Της 16-12-2020
Οργανισμός τροφίμων και γεωργίας Ηνωμένων Εθνών (Food & Agriculture Organization of the United Nations – FAO)	“Πρότυπα αρδευτικού νερού”	Τεχνικά κείμενα 1970, 1985, 2015
ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ 2023/915/ΕΕ	“Μέγιστα επιτρεπτά επίπεδα για ορισμένες ουσίες οι οποίες επιμολύνουν τα τρόφιμα”	Της 25-3-2023, προς κατάργηση του Κανονισμού 1881/2006/ΕΚ
CX STAN 150-1985	“Κώδικας προτύπων καταλληλότητας εδωδιμου αλατιού”	1-1985, όπως τροποποιήθηκε κατά σειρά τον 1-1997, 1-1999 & 2-2011
Γενικό Χημείο του Κράτους (ΦΕΚ Β' 788/31-12-1987)	“Κώδικας τροφίμων και ποτών”	Της 31-12-1987

3^ο Κεφάλαιο – Περιοχή Μελέτης

Η παρακάτω ενότητα επικεντρώνεται στο νησί της Τήνου, όπου έχει αναπτυχθεί και λειτουργεί το υπό μελέτη πιλοτικό σύστημα αφαλάτωσης. Συγκεκριμένα, περιγράφονται τα διοικητικά, γεωμορφολογικά, κλιματικά, υδρογεωλογικά και υδρολογικά στοιχεία της περιοχής μελέτης καθώς και το δίκτυο υποδομών αυτής. Έμφαση δίνεται, σε χαρακτηριστικά και περιορισμούς που συναντώνται στο νησί, ιδίως ως προς την υδροδότησή του και την επάρκεια νερού κατάλληλης ποιότητας, όπως διαμορφώνονται έως σήμερα εν μέσω των συσχετισμών οικιακής, τουριστικής και γεωργικής χρήσης του στην περιοχή.

Η Τήνος αποτελεί το τρίτο μεγαλύτερο νησί των Κυκλάδων (**Εικόνα 13**), μετά τη Νάξο και την Άνδρο, με έκταση 194 km² και υπάγεται διοικητικά στην περιφέρεια Νοτίου Αιγαίου ως περιφερειακή ενότητα Τήνου. Το σχήμα του νησιού είναι επίμηκες τριγωνικό με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ κατά την μεγαλύτερη του πλευρά, μήκος 27 km και μέγιστο εύρος 12km. Το μήκος της ακτογραμμής, φθάνει συνολικά τα 114 km (Αναγνώστου et.al. 2009), ενώ ο περίπλους των παραλίων της υπολογίζεται σε 37 nmi. Η απόσταση της από την Άνδρο, ισούται με 1/2 nmi, ενώ απέχει 9 nmi από την Μύκονο και 11 nmi από τη Σύρο (tinios360.gr).



Εικόνα 13: Η θέση της Ν. Τήνου στο σύμπλεγμα του νομού Κυκλάδων (ota24.gr)

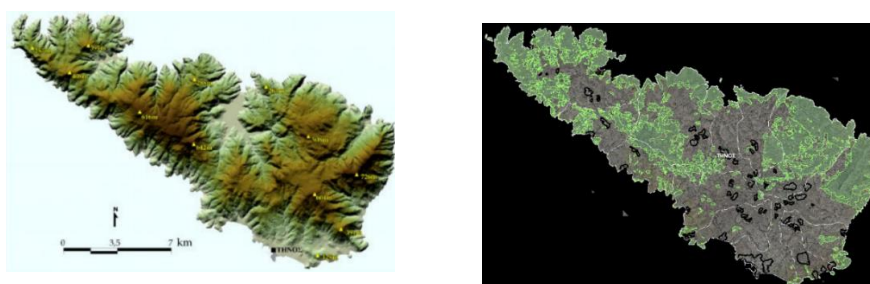
Η Τήνος σήμερα διαιρείται στις τρεις δημοτικές ενότητες Τήνου, Εξωμβούργου και Πανόρμου. Ο σημερινός πληθυσμός ανέρχεται σε 8.934 μόνιμους κατοίκους βάσει της απογραφής του 2021, ενώ υπερδιπλασιάζεται κατά τους θερινούς μήνες με την άφιξη εποχιακού πληθυσμού. Ο μισός περίπου πληθυσμός κατοικεί στη χώρα της Τήνου, όπου εδράζεται ο κεντρικός λιμένας του νησιού, ενώ οι υπόλοιποι κάτοικοι μοιράζονται στα 41 χωριά και τους 14 παραθαλάσσιους οικισμούς του νησιού.

Οι υποδομές της Τήνου θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως βασικές, χρίζοντας αναβάθμιση. Σχετικά με την ηλεκτροδότηση, το νησί έχει διασυνδεθεί από το 2020 με υποβρύχιο καλώδιο 150 KV διαμέσου της γραμμής που ξεκινάει από το Λιβιάδι της Εύβοιας, Η αιχμή της κατανάλωσης τη θερινή περίοδο αγγίζει τα 11.5MW. Ωστόσο, το δίκτυο καλύπτεται από γραμμές ΧΤ/ΜΤ μονής όδευσης και επισφαλούς τροφοδοσίας καθώς είναι μεγάλου μήκους και διέρχονται από περιοχές δύσβατες και εκτεθειμένες με αποτέλεσμα όταν επικρατούν άσχημες καιρικές συνθήκες να παρουσιάζονται διακυμάνσεις της τάσης (Επιχειρησιακό πρόγραμμα Δ.Τήνου, 2014-2019). Πλέον, δρομολογείται η κατασκευή υποσταθμού ΥΤ εντός του 2024. Ακόμη, παρά το αιολικό δυναμικό της Τήνου, εντοπίζονται μόνο εννέα ανεμογεννήτριες με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 8.9 MW (eletaen.maps.arcgis.com).

Σχετικά με τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων, στο νησί δεν λειτουργεί ΧΥΤΑ/Υ παρά μόνο μία μονάδα αποθήκευσης και μεταφόρτωσης δεματοποιημένων στερεών αποβλήτων, προς τον ΧΥΤΑ στην Ιστιαία Ευβοίας. Οι τρεις ΧΑΔΑ που προϋπήρχαν έχουν αποκατασταθεί πλήρως (Τριανταφυλλίδης, 2018). Υπό δημοπράτηση βρίσκεται ωστόσο η κατασκευή ΧΥΤΥ χωρητικότητας 84.000 m³ και μονάδας κομποστοποίησης με δυναμικότητα επεξεργασίας 300 τόνων προδιαλεγμένων οργανικών αποβλήτων, με ορίζοντα λειτουργίας 25 έτη (ΦοΔΣΑ Ν.Αιγαίου, wastefreeaegean.gr)

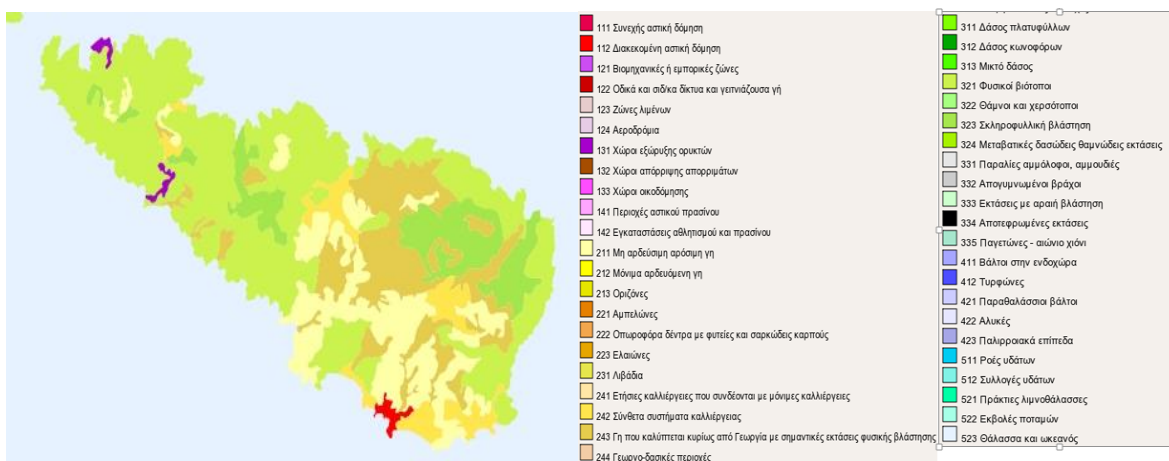
Το δίκτυο αποχέτευσης της Τήνου είναι 20-25 ετών, έκτασης 100km και εξυπηρετεί το 85% του πληθυσμού ενώ το υπόλοιπο καλύπτεται κυρίως από απορροφητικούς βόθρους. Έως το 2019, μονάδες επεξεργασίας λυμάτων υπήρχαν μόνο στη Δ.Ε. Πανόρμου, εξυπηρετώντας 3.500 ισοδύναμο πληθυσμό, μία *compact* μονάδα στην περιοχή της Καλλονής και μία ανενεργή μονάδα στον οικισμό του Κτικάδου. Παρατηρούταν έτσι, ανεξέλεγκτη διάθεση με κύριους αποδέκτες το έδαφος και τη θάλασσα. Το 2020, ολοκληρώθηκε η δοκιμαστική λειτουργία του νέου βιολογικού καθαρισμού (παρατεταμένου αερισμού) στη Χώρα, με δυναμικότητα 1.315 m³/day, όπου έπειτα διακόπηκε η λειτουργία του λόγω συχνών προβλημάτων (Επιχειρησιακό πρόγραμμα Δ.Τήνου, 2014-2019). Από το 2022 τη διαχείρισή του έχει αναλάβει νέος ανάδοχος, αλλά προβλήματα όπως υπερχειλίσεις εξακολουθούν.

Συνεχίζοντας, η Τήνος εμφανίζει μια πολυσιχιδή γεωμορφολογία και το έδαφος της είναι ορεινό, ξερό και βραχώδες (Αναγνώστου *et.al.* 2009). Συνίσταται κατά το 61% της έκτασής της σε ορεινό-ημιορεινό ανάγλυφο με εύρος υψομέτρων 100-400 m και υψηλότερες κορυφές αυτή του όρους Τσικνιά (725 m) στο ΝΑ τμήμα και του βράχου του Εξωμβούργου (641 m) κεντρικά. Το υπόλοιπο 29% του νησιού αποτελεί πεδινές εκτάσεις οι οποίες σχηματίζονται κυρίως στις εκβολές μεγάλων χειμάρρων. **(Εικόνα 14).**



Εικόνα 14: Χάρτης ανάγλυφου (αριστερά, Λεωνιδοπούλου, 2008) & Αναρτημένος δασικός χάρτης Τήνου (δεξιά, gis.ktimanet.gr)

Στον αναρτημένο δασικό χάρτη του 2021 **(Εικόνα 14)**, εντοπίζονται με πράσινη σκίαση κυρίως χορτολιβαδικές εκτάσεις και περιορισμένες δασικές εκτάσεις, ενώ το υπόλοιπο γκρι κομμάτι πλην των οικισμών, χαρακτηρίζεται ως άλλης μορφής εκτάσεις. Παρακάτω, παρουσιάζονται στο σύνολό τους, οι χρήσεις γης του νησιού μέσω χαρτογράφησης του Ευρωπαϊκού Προγράμματος *CORINE* (Επιχειρησιακό πρόγραμμα Δ.Τήνου, 2014-2019).



Εικόνα 15: Χρήσεις Γης Ν. Τήνου μέσω χαρτογράφησης CORINE

Χαρακτηριστικό είναι το τοπωνύμιο της Τήνου ως “χειροποίητο νησί”, καθώς λόγω του επικλινούς του εδάφους απαντάται πληθώρα τεχνητών αναβαθμίδων, γνωστές ως “πεζούλες”. Αυτές, στηρίζονται με τεχνητούς μαντρότοιχους κατασκευασμένους από δομές “ξερολιθιάς” **(Εικόνα 16)** ώστε να συγκρατείται το νερό και τα φερτά υλικά αποτρέποντας την επιφανειακή απορροή.

Σκοπός τους κατά την περίοδο ανάπτυξης της γεωργίας, ήταν ο εμπλουτισμός του υπόγειου υδροφόρου και η δημιουργία μικρών εκτάσεων καλλιεργήσιμης γης, οι οποίες όμως στο πέρασμα το χρόνου εγκαταλείφθηκαν και αποφιλώθηκαν από κοπάδια αιγοπροβάτων (Σαρρή, 2010).



Εικόνα 16: Οι χαρακτηριστικές δομές ξερολιθιάς στην Τήνο (tinosecret.gr)

Σήμερα, οι καλλιέργειες του νησιού περιλαμβάνουν διάφορα μελισσοκομικά και κτηνοτροφικά φυτά, βρώμη και κάππαρη, ενώ χαρακτηριστική είναι η ενασχόληση με την αμπελοργία και την ελαιουργία. Σημαντική καλλιέργεια λαχανικών, οπωροκηπευτικών και εσπεριδοειδών συναντάται στις πεδινές εκτάσεις και ιδίως στον κάμπο της Κολυμπήθρας, με την καλλιέργεια αγκινάρας να ξεχωρίζει ως τοπικό προϊόν (Λεωνιδοπούλου, 2008).

Το κλίμα των Κυκλάδων και της Τήνου χαρακτηρίζεται εύκρατο προς θαλάσσιο, αποκαλούμενο και κλίμα των Ετησίων. Τα νησιά των Κυκλάδων είναι μικρά σε έκταση και χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά χαμηλά ετήσια ύψη βροχής [Τήνος, 2022: 306 mm (meteofarm.gr)], υψηλές μέσες ετήσιες θερμοκρασίες, ενισχυμένη ηλιοφάνεια και ανέμους (Evelpidou *et.al.* 2005). Στη περίπτωση της Τήνου, το μετεωρολογικό έτος χωρίζεται στην ψυχρή εποχή (Οκτώβριος έως Μάρτιος) και την άνω των 5 μηνών θερμή εποχή (Απρίλιος έως Σεπτέμβριος). Η θερμοκρασία το χειμώνα κυμαίνεται στους 10-11°C και το καλοκαίρι στους 26°C, ενώ η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι 19°C. Κατά την ξηρή περίοδο είναι κατά 15-20 mm πιο υγρή από ότι ο ημίξηρος πυρήνας των Κυκλάδων και την υγρή περίοδο κατά \approx 100mm. Οι χιονοπτώσεις παρουσιάζουν μικρή συχνότητα στην Τήνο με πιθανότητα εμφάνισης από τον Νοέμβριο μέχρι τον Μάρτιο. Η περιοχή χαρακτηρίζεται ως η πλέον ανεμώδης της Ελλάδος καθώς παρατηρούνται έντονοι Β-ΒΑ κυρίως άνεμοι την ψυχρή περίοδο και κατά την θερμή επικρατεί το σύστημα των ετησίων ανέμων με μεγάλη συχνότητα και ένταση. Σε αυτό οφείλεται η παρατεταμένη θερινή ξηρασία καθώς δεν επιτρέπει την δημιουργία βροχών, παρά μόνο στα ορεινά τμήματα, στα οποία παρατηρούνται σημαντικές νεφώσεις και βροχές που τροφοδοτούν τους υδροφόρους ορίζοντες, δημιουργώντας πηγές με μεγάλες παροχές από το καλοκαίρι έως τις αρχές του φθινοπώρου (Σαρρή, 2010). Ο αέρας στην Τήνο είναι ξηρότερος εν συγκρίσει των υπολοίπων Κυκλάδων με τιμές σχετικής υγρασίας 65-70%. Σημειώνεται εδώ, πως τα κλιματικά και μετεωρολογικά χαρακτηριστικά του τόπου (σχετική υγρασία, άνεμοι, ποσοστό ηλιοφάνειας, ύψος βροχοπτώσεων) καθορίζουν το είδος και το βαθμό αποσάρθρωσης των πετρωμάτων και ως εκ τούτου την ικανότητα κατείσδυσης του νερού προς εμπλουτισμό, καθώς και τη τρωτότητα του υδροφόρου βάσει του βαθμού διήθησης ρυπαντών. Η ικανότητα κατείσδυσης είναι αντιστρόφως ανάλογη της έντασης των βροχοπτώσεων και αυξάνεται με το ποσοστό φυτοκάλυψης του εδάφους (Ρεντζεποπούλου, 2010).

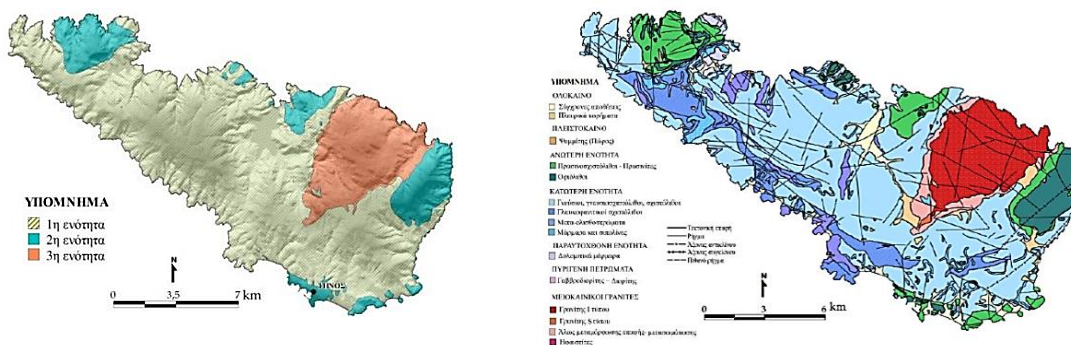
Χαρακτηριστικό της μορφολογίας της Τήνου είναι η έντονη ασυμμετρία μεταξύ του ΝΔ και ΒΑ τμήματος που διαχωρίζονται από τον κύριο υδροκρίτη (**Εικόνα 19**), ο οποίος εντοπίζεται κατά μήκος του νησιού και συγκλίνει προς τις νότιες ακτές του νησιού. Η παρουσία πλουτώνιων πετρωμάτων στο ΒΑ τμήμα προσδίδει χαρακτηριστικό ανάγλυφο ενώ ο έντονος τεκτονικός σχηματισμός του νησιού συντελεί στη δημιουργία έντονου ανάγλυφου σε σχεδόν ολόκληρο το νησί με δημιουργία απόκρημνων βραχωδών ακτών (Αναγνώστου *et.al.* 2009). Συγκεκριμένα, διακρίνονται τρεις μορφολογικές ενότητες (**Εικόνα 17**):

- Η πρώτη ενότητα στο κεντρικό τμήμα του νησιού που αναπτύσσεται πάνω στη σειρά σχιστόλιθων με εναλλαγές μαρμάρων (138.8 km²).
- Η δεύτερη ενότητα εμφανίζεται στα δύο άκρα του νησιού καθώς και στις βόρειες ακτές, που αναπτύσσεται σε ταλκικούς-χλωριτικούς σχιστόλιθους και σερπεντινωμένους υπερβασίτες (27.1 km²).
- Η τρίτη ενότητα βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα που χαρακτηρίζεται από μορφές εξαλλοίωσης των γρανιτών (28.9 km²).

Ως προς τη γεωλογική της τώρα δομή (**Εικόνα 17**), η Τήνος καταλαμβάνεται από:

- Την ομάδα ή ακολουθία μεταμορφωμένων πετρωμάτων
- Την ομάδα μαγματιτών
- Την ομάδα ή ακολουθία τεταρτογενών ιζημάτων,

όπου η πρώτη κυριαρχεί στο νησί καταλαμβάνοντας το 79% της επιφάνειας του (Λεωνιδοπούλου, 2008)



Εικόνα 17: Χάρτης μορφολογικών ενοτήτων (αριστερά) & Γεωλογικός χάρτης Ν. Τήνου του ΙΓΜΕ (δεξιά)

Ως προς το υδρογεωλογικό προφίλ της Τήνου, αυτό διαμορφώνεται συγκεντρωτικά βάσει:

- του διαπερατού χαρακτήρα των γεωλογικών σχηματισμών ο οποίος δημιουργείται από δευτερογενές πορώδες και αποτελείται κυρίως από μεταμορφωμένα και εκρηξιγενή πετρώματα,
- των εναλλαγών διαπερατών και αδιαπέρατων στρωμάτων
- του έντονου τεκτονισμού και του εις βάθος κερματισμού και αποσάθρωσης των σχηματισμών.

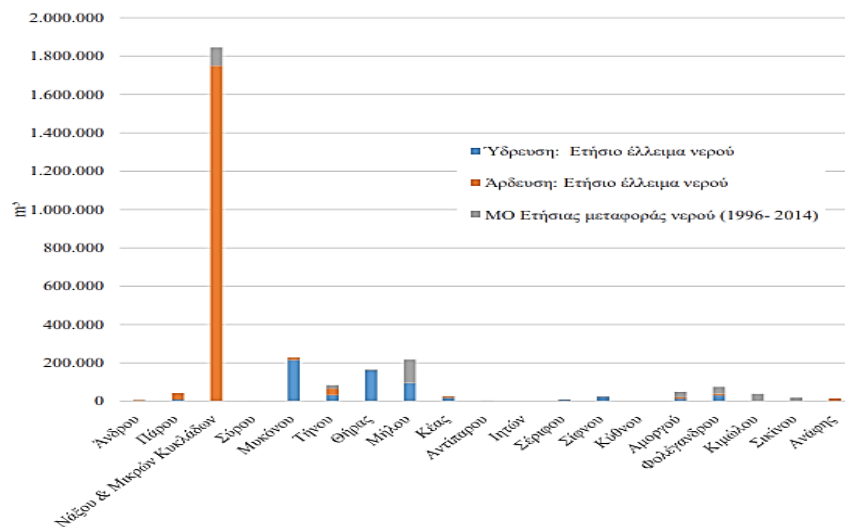
Σημαντικό ρόλο παίζει επιπροσθέτως, η μικρή έκταση των υδρολογικών λεκανών, η χαμηλή μέση ετήσια βροχόπτωση, η υψηλή μέση ετήσια θερμοκρασία με μεγάλη ηλιοφάνεια και οι μεγάλες ταχύτητες των ανέμων που επηρεάζουν τον εμπλουτισμό (Ρεντζεποπούλου, 2010).

Οι Κυκλάδες ανήκουν διοικητικά στο 14^ο υδατικό διαμέρισμα, μαζί με τα υπόλοιπα νησιά του Αιγαίου Πελάγους, εκτός της Κρήτης (hydroscope.gr). Σύμφωνα με το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Περιβάλλον - Αειφόρος Ανάπτυξη του 2007 και όπως αντλήθηκε από τη μελέτη της ομάδας Στουρνάρα (2011), το ετήσιο υδρολογικό ισοζύγιο του διαμερίσματος προσδιορίζεται ως ελλειμματικό (**Πίνακας 13**). Η περιοχή αναφέρεται ότι πρόκειται να δεχθεί τις μεγαλύτερες επιπτώσεις από την κλιματική αλλαγή, λόγω: (i) του μικρού βροχομετρικού δείκτη, (ii) των υψηλών θερμοκρασιών, (iii) της αυξημένης ηλιοφάνειας και των ισχυρών ανέμων που ευνοούν την εξάτμιση, (iv) της μικρής έκτασης και του ορεινού ανάγλυφο που δεν επιτρέπουν σημαντική υδατοσυγκέντρωση και ευνοούν την επιφανειακή απορροή, (v) του κινδύνου υφαλμύρωσης των υπόγειων νερών και (vi) του ελλιπούς προγράμματος διαχείρισης

Πίνακας 13: Γενικευμένο ετήσιο υδρολογικό ισοζύγιο, κατά υδατικό διαμέρισμα (Στουρνάρας *et.al.* 2011).

Υδατικά διαμερίσματα	Έκταση (km ²)	Όγκος Βροχής ⁵ (hm ³)	Εξάτμιση ⁵ (hm ³)	Υδατικό Δυναμικό (hm ³)	Προσφορά ⁴ (hm ³)	Ζήτηση ⁴ (hm ³)	Παρατηρήσεις ⁴
01 Δυτικής Πελοποννήσου	7301	8031	3614	4417	73	55	Πλεονασματικό
02 Βόρειας Πελοποννήσου	7310	6404	2824	3580	122	104	Πλεονασματικό
03 Ανατολικής Πελοποννήσου	8477	6563	3290	3273	56	67	Ελλειμματικό
04 Δυτικής Στερεάς Ελλάδας	10199	13973	5310	8663	415	82	Πλεονασματικό
05 Ηπείρου	10026	17046	6818	10228	193	33	Πλεονασματικό
06 Αττικής	3207	1642	1150	492	56	54	Οριακά Πλεονασματικό ²
07 Ανατ. Στερεάς Ελλάδας	12341	9516	5257	4259	128	187	Ελλειμματικό ¹
08 Θεσσαλίας	13377	10434	6260	4174	210	335	Ελλειμματικό
09 Δυτικής Μακεδονίας	13440	10470	5654	4816	159	136	Πλεονασματικό
10 Κεντρικής Μακεδονίας	10389	6068	3034	3034	137	130	Οριακά Πλεονασματικό
11 Ανατολικής Μακεδονίας	7280	4917	2722	2195	354	132	Πλεονασματικό
12 Θράκης	11177	8574	5325	3249	424	253	Πλεονασματικό
13 Κρήτης	8335	7500	4874	2626	130	133	Οριακά Ελλειμματικό ⁴
14 Νήσων Αιγαίου	9103	5192	3104	2088	7	25	Ελλειμματικό
Σύνολο χώρας	131962	116330	59236	57094	2.464	1.726	

Βάσει των διαθέσιμων στοιχείων της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων (2015) επιπλέον, η Τήνος παρουσιάζει ετήσιο έλλειμα $\approx 100,000 \text{ m}^3$ νερού, το οποίο συγκαταλέγεται ανάμεσα στα υψηλότερα των Κυκλάδων, (**Διάγραμμα 10**). Συγκεκριμένα, για το έτος 2019 η Τήνος κατέγραψε συνολική κατανάλωση νερού 683.501 m^3 μέσω των 10,429 συνολικά εγκατεστημένων υδρομετρητών στο νησί. Από αυτή, άνω του 50% αφορά την ΔΕ Τήνου (Χώρα Τήνου, και περίξ παραλιακοί οικισμοί), το οποίο με τη σειρά του επιμερίζεται χρονικά σε 40% θερινή κατανάλωση που αφορά το τρίμηνο Ιουνίου-Αυγούστου και 60% χειμερινής κατανάλωσης για το υπόλοιπο έτος. Έτσι διαμορφώνεται μέση ημερήσια κατανάλωση $1,708 \text{ m}^3$ και 896 m^3 , αντιστοίχως. (Επιχειρησιακό πρόγραμμα Δ.Τήνου, 2020-2023).



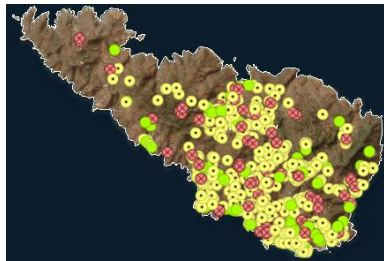
Διάγραμμα 10: Ετήσιο έλλειμα νερού Ν. Κυκλάδων (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015)

Σήμερα, οι υδρευτικές ανάγκες της περιφέρειας Ν. Αιγαίου, πλησιάζουν τα $\approx 40 \text{ hm}^3$, με πρόβλεψη να φτάσουν τα $\approx 52 \text{ hm}^3$ το 2030 βάσει του **Πίνακα 14** των δημογραφικών δεδομένων και υδρευτικών αναγκών, παρακάτω. Επιπλέον, το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού ($\approx 51\%$) εξυπηρετείται από νερό που προέρχεται από μονάδες αφαλάτωσης και δευτερευόντως από απολήψεις υπόγειων ή επιφανειακών υδάτων (Εθνικό Επιχειρησιακό Σχέδιο για το Πόσιμο Νερό, 2022).

Πίνακας 14: Δημογραφικά δεδομένα και υδρευτικές ανάγκες 2021 και 2030 Περιφέρειας Ν.Αιγαίου

Περιφέρεια	Ν. Αιγαίου (EL42)
Μόνιμος Πληθυσμός 2021 (κάτοικοι)	347.512
Εκτιμώμενος Ημερήσιος Πληθυσμός Αιχμής 2021 (κάτοικοι)	542.618
Μόνιμος Πληθυσμός 2030 (κάτοικοι)	386.647
Εκτιμώμενος Ημερήσιος Πληθυσμός Αιχμής 2030 (κάτοικοι)	742.866
Ετήσιες υδρευτικές ανάγκες (m ³) 2021	39.771.767
Ετήσιες υδρευτικές ανάγκες (m ³) 2030	52.584.072

Η Τήνος, παρότι νησί των Κυκλάδων, διαθέτει σημαντικούς υδροφόρους ορίζοντες, σε καλή ποιοτική και ποσοτική κατάσταση, όπως μαρτυρά και το τοπωνύμιο “Υδρούσα” που της αποδίδεται, (Leonidoroulou *et.al.* 2008, Εθνικό Επιχειρησιακό Σχέδιο για το Πόσιμο Νερό, 2022). Για το λόγο αυτό, σε συμφωνία με την διδακτορική διατριβή της Λεωνιδοπούλου (2008) αλλά και τον Stournaras (2003, 2008), στο νησί συναντάται εκτεταμένο δίκτυο πηγών, πηγαδιών και γεωτρήσεων που συνιστούν σημεία υδροληψίας (**Εικόνα 18**), ιδίως στο κεντρικό και ΝΑ τμήμα.

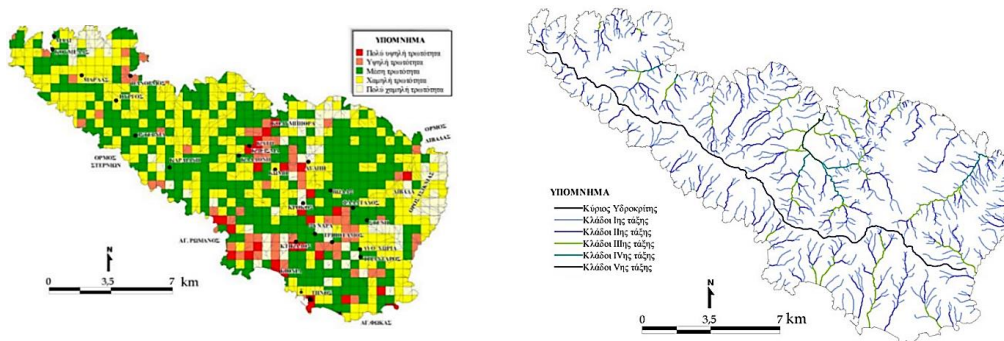


Εικόνα 18: Θέση σημείων Υδροληψίας της Ν. Τήνου (Εθνικό Μητρώο Σημείων Υδροληψίας, greka.gr)
(Γεωτρήσεις, Πηγές, Πηγάδια - Πράσινο: Ενεργά, Κόκκινο: Ανενεργά, Κίτρινο: Άγνωστο καθεστώς)

Οι σχιστόλιθοι είναι γενικά στεγανά πετρώματα όμως η αποσάθρωση και ο τεκτονισμός βελτιώνουν σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητές τους. Λόγω της έντονης παρουσίας σχιστιλιθικών σχηματισμών στο νησί που είναι αδιαπέρατοι, ευνοείται η επιφανειακή απορροή (Λεωνιδοπούλου, 2008). Όντας ευδιάβρωτοι από την άλλη πλευρά, η αποσάθρωση του σχιστολιθικού υποστρώματος στην περιοχή δημιουργεί ομογενές και ανισότροπο μέσο, κατάλληλο για οικονομικά αποδοτική αξιοποίηση των φυσικών υδατικών πόρων μέσω πηγαδιών (Stournaras, 2008). Δεν είναι λίγες οι φορές επίσης που το νερό φτάνει στην επιφάνεια ακολουθώντας τις διακλάσεις ή τα ρήγματα του κατακεραματισμένου σχιστόλιθου εκδηλώνοντας πηγές ικανοποιητικής απόδοσης όπως οι πηγές Ζωδεμένης, Βρύσης και Θεοτόκου.

Συνολικά, οι ανεπτυγμένοι υδροφορείς στην περιοχή αναφέρονται ως χαμηλής χωρητικότητας μη περιορισμένοι και ανοικτοί προς τη θάλασσα (Stournaras, 2008). Επιπλέον, οι εκτεταμένοι υδατοστεγείς γεωλογικοί σχηματισμοί δεν επιτρέπουν τη διαμόρφωση υδροφορέων ικανοποιητικής απόδοσης, ενώ ο συνδυασμός, των κλιματικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών της Τήνου σε συνάρτηση με ανθρωπογενείς επεμβάσεις όπως διευθετήσεις ροής, εγκιβωτισμοί, μπαζώματα και απομόνωση ρεμάτων, δεν επιτρέπουν επαρκώς τον εμπλουτισμό τους όπως αναφέρει ο Δανιλάκης (2012), (nomosphysis.org).

Αναφορικά με το βαθμό εσωτερικής τρωτότητας (**Εικόνα 19**), η Λεωνιδοπούλου (2008) καταλήγει πως το νησί χαρακτηρίζεται από χαμηλή έως μέτρια εσωτερική τρωτότητα, ενώ αυξημένες τιμές του δείκτη παρουσιάζονται σε περιοχές εξόδων χειμάρρων με μικρή κλίση και εκτεταμένη γεωργική εκμετάλλευση. Τέτοιες περιοχές αποτελούν η έξοδος της κεντρικής κοίτης του χειμάρρου της Κολυμπήθρας και του Πανόρμου και η επιφάνεια ισοπέδωσης του Φαλατάδου (Evelpidou *et.al.* 2008).



Εικόνα 19: Χάρτης εκτιμωμένης εσωτερικής τρωτότητα Ν. Τήνου (αριστερά, Λεωνιδοπούλου 2008) & το υδρογραφικό δίκτυο της Ν. Τήνου (δεξιά, Αναγνώστου *et.al.* 2009)

Το βασικό υδρογραφικό δίκτυο του νησιού είναι σύνθετης μορφής και δενδρικού τύπου με πολυάριθμους κλάδους μικρού μήκους και μη μόνιμης ροής (Εικόνα 19). Η μικρή μέση ετήσια βροχόπτωση δημιουργεί μικρής έντασης υδρογραφικές λεκάνες (Σαρρή 2010) στην Τήνο. Συγκεκριμένα, μετρήθηκαν 147 λεκάνες απορροής που δημιουργούνται από 235 τμήματα υδροκριτών, από τις οποίες διακρίθηκαν 52 κύριες λεκάνες, με διακριτή απορροή ποταμοχείμαρρου ή χειμάρρου (Αναγνώστου *et.al.* 2009). Τα μεγαλύτερα ποτάμια κάνουν την εμφάνισή τους στο βόρειο τμήμα του νησιού, ενώ νότια περιορίζεται ο αριθμός τους, το μήκος και ο αριθμός των τάξεων και των κλάδων τους, (Δασκάλου, 2021). Επιπροσθέτως, στο κεντρικό τμήμα του νησιού απαντώνται λιγότεροι κλάδοι απορροής μεγαλύτερου μήκους και μικρότερης κλίσης έναντι του ανατολικού και δυτικού τμήματος (Λεωνιδοπούλου, 2008). Μελέτη συσχέτισης μεταξύ των μορφολογικών κλίσεων, της απορροής και της τάσης μεταφοράς των αποσαθρωμένων υλικών, αναφέρει επιπλέον πως η ορεινή διαμόρφωση στη μεγαλύτερη έκτασή του και οι αιφνίδιες μεγάλης έντασης βροχοπτώσεις ευνοούν την μεταφορά εδαφικού υλικού προς τη θάλασσα και τη δημιουργία βραχωδών ακτών (Evelridou *et.al.* 2005).

Αναφορικά με τις φυσικές πηγές, οι οποίες συνεισφέρουν συνολικά στην υδροληψία του νησιού εντοπίζονται:

- Πηγές σημαντικής παροχής που εκδηλώνονται στο ΒΑ τμήμα (περιοχή Καρδιανής) λόγω σχηματισμών σημαντικής έκτασης μαρμάρων με υψηλής διαπερατότητας ανθρακικά πετρώματα, που παρουσιάζουν δευτερογενές πορώδες. Ωστόσο το μικρό ποσοστό ανθρακικών πετρωμάτων στην Τήνο (9%) και οι περιορισμένες βροχοπτώσεις δεν συμβάλλουν στην δημιουργία καρστ (Evelridou *et.al.* 2005).
- Μικρής παροχής και ασθενούς υδροφορίας πηγές που εκδηλώνονται στο ΝΑ τμήμα του νησιού (όρμος Λιβιάδας) με κυριότερη την πηγή κοινοτικής εκμετάλλευσης της Ξυνάρας. Αυτές δημιουργούνται λόγω αποσάθρωσης των εκεί γρανιτικών πετρωμάτων (Δασκάλου 2021).
- Ακόμη, εμφανίζονται πηγές σε περιοχές υδροπερατών σχηματισμών τεταρτοταγών αποθέσεων) με τμήματα αποσαθρωμένου σχιστόλιθου που υπόκεινται αυτών. Τέτοιες πηγές εμφανίζονται σε πεδινά και παραθαλάσσια τμήματα (Κάμπος Κολουμπήθρας) αλλά είναι ελάχιστες στο σύνολο, με μη σημαντικής και αποδοτικής τροφοδοσίας παροχές. Όπως προαναφέρθηκε ωστόσο, το εκτεταμένο δίκτυο γεωτρήσεων εκεί μαρτυρά το δυναμικό των σχηματισμών, αντίθετα με τη μη αξιόλογη φυσική τους εκφόρτιση.
- Τέλος, σημαντικές από πλευράς ποσοτικής υδροφορίας είναι οι πηγές που εκδηλώνονται σε δύο περιοχές του νησιού με μεγάλο υψόμετρο. Οι πηγές Λάζαρος, Γλυκό και Ακέρατος πολύ κοντά στην κορυφή Τσικνιάς, εκδηλώνονται λόγω κατακερματισμού των σχηματισμών πρασινοσχιστόλιθων με οφιόλιθους. Η πηγή της Ζωδεμένης στη περιοχή Κάμπος Πολέμου με 540m υψόμετρο αναπτύσσει παροχές της τάξης 12-20 m³/hr. Εκεί, λόγω της πολύ μικρή κλίσης ενθαρρύνεται η κατακόρυφη κατείδυση του νερού, μέσω κύριων ρηγμάτων σχιστολιθικών σχηματισμών (Stournaras, 2003).

Σήμερα, η εκμετάλλευση των κρηνών για την κύρια υδροληψία των περισσότερων οικισμών έχει ατονήσει καθώς στο νησί λειτουργεί δημοτικό δίκτυο ύδρευσης-αποχέτευσης. Από την μελέτη της Δασκάλου (2021),

συμπεραίνεται πως από τις 62 καταγεγραμμένες πηγές, η πλειοψηφία δεν πληροί επαρκώς τα ποιοτικά πρότυπα λόγω παροχής ελαφρώς αλμυρού νερού, αγωγιμότητας ($>750 \mu\text{S}/\text{cm}$) και συγκέντρωσης νιτρικών ($>1 \text{ mg}/\text{L}$), με εξαίρεση τις πηγές πηγή Λουτρό στα Δυο χωριά και τη πηγή Αγίου Νικολάου στην Ξυνάρα που έχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα $< 750 \mu\text{S}$.

Ωστόσο, μεγάλο κομμάτι των αναγκών ύδρευσης-άρδευσης ικανοποιείται ακόμη από το εκτεταμένο δίκτυο γεωτρήσεων, η υπεράντληση αυτών όμως, όπως στην περίπτωση της καλλιεργούμενης περιοχής του Φαλατάδου, για την κάλυψη αρδευτικών αναγκών σε συνδυασμό με ύδρευση έχουν ταπεινώσει τον υδροφόρα, αυξάνοντας μαζί την εσωτερική του τρωτότητα (Leonidorou *et.al.* 2008). Συνολικά, στην Τήνο υπάρχουν 30 περίπου δημοτικές γεωτρήσεις και πάνω από 150 ιδιωτικές. Η μεγάλη τουριστική ανάπτυξη των ακτών του νησιού ακόμη, συγκεντρώνει το μεγαλύτερο μέρος των οικονομικών δραστηριοτήτων και συντελεί στην υπερεκμετάλλευση των παράκτιων υδροφορέων με αποτέλεσμα την υφαλμύρυνσή τους (nomosphysis.org). Ενδεικτικό παράδειγμα, είναι οι επανειλημμένες διαμαρτυρίες κατοίκων, που ζητούν τη παύση λειτουργίας της δημοτικής γεώτρησης “Γύρλα”, καθώς μαζί με άλλες πλήττονται από θαλάσσια διείσδυση και στερεύουν αποθεματικά (prasinoi.gr).

Λόγω των αυξημένων αναγκών ύδρευσης σε περιόδους παρατεταμένης ξηρασίας, παλιότερα οι ανάγκες του νησιού καλύπτονταν μέσω εξωτερικής προμήθειας νερού με υδροφόρο καραβάκι με αυξημένα κόστη. Ενδεικτικά, το 1996 μεταφέρθηκαν στις Κυκλάδες 50.000 m^3 νερού, ενώ το 2006 αυξήθηκαν ραγδαία σε 568.000 m^3 με τιμή πώλησης από 5 με 10 €/m^3 φθάνοντας τον Απρίλιο του 2010 έως και 12.49 €/m^3 (nomosphysis.org). Για την Τήνο, αναφέρονται έξοδα 700.000€ μόνο το έτος 2008 για τη μεταφορά νερού (Επιστολή “Φίλοι του πρασίνου”, 2009).

Πλέον στην περιοχή το δημοτικό δίκτυο εξυπηρετείται μέσω τεχνητών λιμνοδεξαμενών και κυρίως μονάδων αφαλάτωσης. Πιο συγκεκριμένα, τα δημοτικά έργα υδροδότησης του νησιού περιλαμβάνουν:

- Τη λιμνοδεξαμενή στην περιοχή της Λιβάδας που ολοκληρώθηκε το 2005, αλλά δεν λειτούργησε έως τώρα λόγω τεχνικών αστοχιών. Σκοπός του έργου είναι να συλλέγει τα m^3 νερού που απορρέουν από χειμάρρους του όρους Τσικνιάς, τα οποία έως σήμερα χάνονται στην θάλασσα (Επιστολή “Φίλοι του πρασίνου”, 2009 & 2020).
- Το φράγμα στην περιοχή Βακέτα (πλησίον της Χώρας, **(Εικόνα 20)**, το οποίο κατασκευάστηκε και λειτουργεί από το 2007, συλλέγοντας τα νερά του ρέματος του χωριού Μπερδεμιάρως. Το έργο με συνολικό όγκο 139 km^3 ($700 \text{ m}^3/\text{d}$ δυναμικότητα), διαθέτει από το 2008 σύστημα ταχείας διύλισης για την φίλτραση του νερού δυναμικότητας $880 \text{ m}^3/\text{d}$, (Watera Ελλάς ABEE, 2020). Ωστόσο, η στάθμη του νερού στο φράγμα διαφέρει σημαντικά από εποχή σε εποχή λόγω των ασταθών βροχοπτώσεων.
- Το υπό μελέτη φράγμα ανάσχεσης και εμπλουτισμού στη θέση “Γρίζα” του χωριού Βωλάξ, όγκου 600 km^3 . Το έργο ωστόσο, πρόκειται να εγκατασταθεί στα όρια προστατευόμενης περιοχής, επιφέροντας αντιδράσεις (Διεθνές Συνέδριο LIFE+, 2013-cycladesvoice.gr).
- Την δημοτική γεώτρηση στην περιοχή “Εγκοίλο της Γύρλας”, με δυναμικότητα $600 \text{ m}^3/\text{d}$ που αξιοποιεί το σημαντικό υπόγειο υδροφόρα της περιοχής (Δίκτυο “Μεσόγειος SOS”, 2011), αλλά όπως προαναφέρθηκε έχει υποβαθμιστεί σημαντικά.
- Την εκμετάλλευση των πηγών Λάζαρος, Γλυκό Νερό και Ακέρατος που περιγράφηκαν παραπάνω, δυναμικότητας $360 \text{ m}^3/\text{day}$ (Διεθνές Συνέδριο LIFE+, 2013-cycladesvoice.gr).
- Το κεντρικό έργο ύδρευσης του νησιού που αφορά το εγκατεστημένο δίκτυο μονάδων αφαλάτωσης τεχνολογίας αντίστροφης ώσμωσης (**(Εικόνα 20)**, συνολικής δυναμικότητας σήμερα $4,800 \text{ m}^3/\text{day}$. Η πρώτη μονάδα εγκαταστάθηκε το 2001 (δυναμικότητας $500 \text{ m}^3/\text{day}$) και αναβαθμίστηκε το 2013 (δυναμικότητα $750 \text{ m}^3/\text{day}$). Τρεις ακόμη μονάδες εγκαταστάθηκαν τα έτη 2004, 2009 και 2014, με δυναμικότητα 500 , 1000 και $600 \text{ m}^3/\text{day}$ αντιστοίχως (emodnet.ec.europa.eu/geoviewer/). Λόγω των αυξανόμενων αναγκών, πρόσθετες μονάδες εγκαταστάθηκαν το 2020 και 2023, δυναμικότητας $1000 \text{ m}^3/\text{day}$ με κόστος σύμβασης $350,000 \text{ €}$ έκαστη, (Watera ABEE 2020, Μελέτη Αρ.3/2021).

Το ειδικό κόστος νερού στην περίπτωση της Τήνου, κυμαίνεται από 0.50 €/m³ για υφάλμυρο έως 0.50 - 2 €/m³ για θαλασσινό νερό με αρχικό κόστος επένδυσης 850 - 1350 €/m³, και ενεργειακή κατανάλωση μεταξύ 2.5-3 KW/m³. Σημειώνεται πως από το 2010, διευκολύνεται η εγκατάσταση μονάδων αφαλάτωσης στα νησιά του Αιγαίου, καθώς ορίζεται ότι δεν απαιτείται οικοδομική άδεια αλλά έγκριση εργασιών δόμησης μικρής κλίμακας (Άρ. 30, Νόμος 3937/11).



Εικόνα 20: Το φράγμα Βακετά (αριστερά) και μονάδα αφαλάτωσης (δεξιά) στη Χώρα Τήνου

Παρά τη δυναμική όλων των παραπάνω, τα τελευταία χρόνια η ποσοτική επάρκεια του νερού υφίσταται αυξημένη πίεση, μεταξύ άλλων προερχόμενη από τον τομέα του τουρισμού. Επιπλέον, από το συνολικό δίκτυο ύδρευσης στην Τήνο, το 40% είναι κατασκευής της τελευταίας δεκαετίας, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό είναι ηλικίας άνω των 25 ετών και εμφανίζει πολύ συχνά βλάβες και διαρροές κυρίως εντός της πόλεως της Τήνου (Επιχειρησιακό πρόγραμμα Δ.Τήνου, 2014-2019), προξενώντας απώλειες έως 30% του μεταφερόμενου νερού στα δίκτυα ύδρευσης και αλλοίωση της ποιότητάς του (Εθνικό Επιχειρησιακό Σχέδιο για το Πόσιμο Νερό, 2022). Ωστόσο όπως έχει δημοσιοποιηθεί, αναμένεται η αναβάθμιση και ο εκσυγχρονισμός του δικτύου ύδρευσης του νησιού έως το τέλος του 2023, μέσω χρηματοδότησης από ΕΣΠΑ. Συγκεκριμένα, διαμέσου του Επιχειρησιακού προγράμματος «Υποδομές Μεταφορών, Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη 2014-2020», για το έργο «Ολιστικό σύστημα παρακολούθησης και διαχείρισης δικτύων ύδρευσης Δήμου Τήνου» σχεδιάζεται η εγκατάσταση τοπικών σταθμών ελέγχου για συλλογή σε πραγματικό χρόνο και την επεξεργασία πληροφοριών με στόχο την αποτελεσματική διαχείριση και ποιοτική παρακολούθηση των υδατικών πόρων του νησιού μέσω λογισμικού τηλεμετρικής και ηλεκτρονικής αποτυπώσης. (ypodomos.com)

Η ζήτηση του νερού τετραπλασιάστηκε μεταξύ των ετών 2001-2010 ενώ το νησί καλείται ακαριαία να καλύψει μεγάλη ημερήσια ζήτηση τη μικρή χρονική περίοδο Ιουνίου-Αυγούστου όπως αναφέρθηκε παραπάνω, καθώς τότε πληθυσμός τετραπλασιάζεται και η παροχή νερού από τις φυσικές πηγές είναι περισσότερο περιορισμένες λόγω ξηρασίας. Συγκεκριμένα, τη θερινή περίοδο απαιτούνται ≈6.000 m³/day έναντι περίπου ≈4.200 m³/day τη χειμερινή. Πάνω από το μισό της κατανάλωσης αφορά την πρωτεύουσα του νησιού και τους παραλιακούς οικισμούς πέριξ αυτής. Οι 48 υπόλοιποι οικισμοί αν και παρουσιάζουν μικρότερη ζήτηση, δεν διαθέτουν ως επί το πλείστον δίκτυο με αποτέλεσμα να υπάρχει απαίτηση μεταφοράς νερού με υδροφόρες από τη Χώρα, σημαντικά αυξημένη τη θερινή περίοδο. Τέλος, οι πέντε μεγαλύτεροι οικισμοί με μόνιμο πληθυσμό μεγαλύτερο από 200 κατοίκους (Πύργος, Στενή, Κώμη, Καλλονή, Φαλατάδος) υδροδοτούνται κατά κύριο λόγο από γεωτρήσεις (Διεθνές Συνέδριο LIFE+, 2013-cycladesvoice.gr).

Μέτρα ανάσχεσης της ζήτησης, αποτελούν τα πρόστιμα υπερκατανάλωσης που προστίθενται στην ήδη αυξημένη λόγω αφαλάτωσης τιμή του νερού. Συγκεκριμένα, το κόστος του νερού για τους δημότες της Τήνου ανέρχεται σε 0.87€ έως τα πρώτα 12 m³ και 1.5€ έως τα επόμενα 28 m³. Το κόστος του νερού αυξάνει περαιτέρω σε 2.5€/m³ για τη μεταφορά με υδροφόρα στα μη υδροδοτούμενα χωριά, βάσει στοιχείων της υπηρεσίας Ύδρευσης-Αποχέτευσης του δήμου. Επιπλέον, εφαρμόζεται διακοπή υδροδότησης από τις 9μμ κατά τη θερινή περίοδο, που μάλλον δυσχεραίνει την διαχείριση παρά λύνει το πρόβλημα καθώς είναι εμφανής η εκ των προτέρων αποθήκευση νερού σε ιδιωτικές δεξαμενές σε όλη την έκταση της Χώρας. Το πρόβλημα οξύνεται περαιτέρω,

αφού βάσει των στοιχείων του λιμεναρχείου Τήνου καταγράφηκε σημαντική αύξηση στις αφίξεις της περασμένης τουριστικής σεζόν (**Πίνακας 15**). Έτσι, παρά τα έσοδα που αποφέρει ο τουρισμός στο νησί, το πρόβλημα της διαθεσιμότητας νερού εντείνεται, και σε αυτούς τους ρυθμούς θα αποτελέσει πιθανώς τροχοπέδι στην αναπτυξιακή τροχιά.

Πίνακας 15: Καταγεγραμμένες αφίξεις Λιμεναρχείου Τήνου

Χρονικό Διάστημα	Αφίξεις 2021 (άτομα)	Αφίξεις 2022 (άτομα)
<i>Ιουνίου</i>	280.396	61.690
<i>Ιουλίου</i>	81.928	94.903
<i>Σύν. Απριλίου - Αυγούστου</i>	226.818	317.714

Αξίζει τέλος να σημειωθεί, όπως αναφέρει ο Βίλλας το 2016 (grsa.prd.uth.gr), γεωπόνος του αγροτικού συνεταιρισμού του νησιού, τις τελευταίες δεκαετίες ο γεωργοκτηνοτροφικός χαρακτήρας του νησιού έχει φθίνει ως αποτέλεσμα της ραγδαίας ανοικοδόμησης στην επικράτεια της τηνιακής υπαίθρου. Εκτιμά, πως η άλλοτε ανεπτυγμένη τηνιακή γεωργία βρίσκεται στο κατώτατο σημείο της και σημαντικό μερίδιο ευθύνης ενέχει η έλλειψη νερού για την γεωργία. Ο ανταγωνισμός για αρδευτικό νερό μεταξύ άλλων χρήσεων του και η συνεχής διάνοξη γεωτρήσεων, έχει στερέψει κάθε φυσική πηγή αποθεμάτων άρδευσης. Καταγράφεται επιπλέον ανεξέλεγκτη διάθεση λυμάτων και σημαντική έλλειψη εγγειοβελτιωτικών, αποστραγγιστικών, αρδευτικών έργων και χρηματοδοτήσεων.

Όλα τα παραπάνω στοιχεία λοιπόν, συνηγορούν πως το νησί της Τήνου έχει ανάγκη πρόσθετων διαχειριστικών λύσεων και χρηματοδοτικών εργαλείων για την επίλυση του ζητήματος επάρκειας ασφαλούς νερού. Στον ορίζοντα της κλιματικής αλλαγής και της ενεργειακής κρίσης που διανύουμε, η διαθεσιμότητα ποιοτικά και ποσοτικά επαρκών υδατικών πόρων παράλληλα με τη αποδοτικότητα του αγροτοδιατροφικού τομέα, δεδομένης και της ραγδαίας εποχικής πληθυσμιακής αύξησης του τόπου, συνιστούν ζητήματα σαφούς προτεραιότητας. Αποτελεί ευκρινή ένδειξη πως σε νησιωτικές περιοχές όπως η Τήνος, υπάρχει πρόσφορο έδαφος ανάπτυξης καινοτόμων επιχειρηματικών μοντέλων. Αυτά, θα συμβάλλουν στη βιωσιμότητα του νερού και της γεωργίας και το μετριασμό της ζήτησης ενέργειας και υλικών, ενθαρρύνοντας παράλληλα την κοινωνία και προβάλλοντας την αξία του τόπου. Το υπό μελέτη καινοτόμο σύστημα αφαλάτωσης και παραγωγής αρδευτικού νερού, αποτελεί μία τέτοια εναλλακτική, με καταγεγραμμένα στην παρούσα πλέον αποτελέσματα ως προς την απόδοσή του.

4^ο Κεφάλαιο – Μέθοδοι και Υλικά

Η παρούσα διπλωματική εργασία, διενεργήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ): “Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων”, υπό την παράλληλη διεξαγωγή του ερευνητικού προγράμματος *HYDROUSA*. Αφορά σε μελέτη πεδίου του πρότυπου συστήματος ηλιακής αφαλάτωσης “*Mangrove Still System*” (MSS) και της απόδοσής του στο σύνολο της εγκατάστασης HYDRO5 όπου ανήκει. Στο παρόν κεφάλαιο, παρατίθενται τα εργαλεία και οι μέθοδοι τα οποία αξιοποιήθηκαν για την εκπόνησή της. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το ερευνητικό πρόγραμμα *HYDROISA* υπό το οποίο αναπτύχθηκε και λειτουργεί το υπό μελέτη σύστημα, καθώς και το γενικότερο εννοιολογικό πλαίσιο που διέπει το πρόγραμμα. Επιπλέον, γίνεται αναλυτική περιγραφή του μελετώμενου συστήματος αφαλάτωσης και του συνόλου της εγκατάστασης, όπως λειτουργεί στη Ν. Τήνο από το 2020. Περιγράφονται αναλυτικά, τα επιμέρους στοιχεία που την απαρτίζουν και αναλύονται τα δομικά και τεχνικά χαρακτηριστικά τους, καθώς και παράμετροι κατασκευής, λειτουργίας, ελέγχου και παρακολούθησης αυτών. Τέλος, γίνεται αναφορά στις προδιαγραφές λειτουργίας και απόδοσης της εγκατάστασης, πριν την αναλυτική τους αξιολόγηση στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων.

4.1 Παράθεση μεθόδων και εργαλείων επεξεργασίας δεδομένων

Για την εκπόνηση της μελέτης, αρχικά διενεργήθηκε ανασκόπηση της διαθέσιμης βιβλιογραφίας ως προς τις συμβατικές τεχνολογίες αφαλάτωσης με έμφαση στις ευρύτερα εφαρμοζόμενες, αυτές της αντίστροφης ώσμωσης και πολυβάθμιας εκτόνωσης, και καταλήγοντας στην εκτενή περιγραφή της παρούσας μεθόδου ηλιακής απόσταξης, ως αναδυόμενη τεχνολογία αφαλάτωσης. Οι τεχνικές και λειτουργικές παράμετροι αυτών παρουσιάζονται στο **2^ο Κεφάλαιο**.

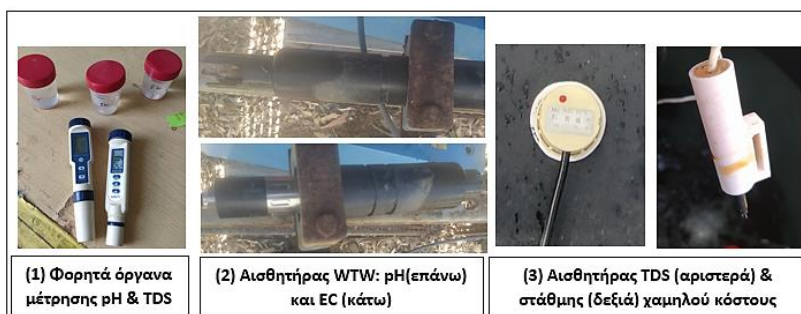
Τα ευρωπαϊκά ερευνητικά προγράμματα *HYDROUSA* και *SureNexus projects*, στα πλαίσια των οποίων αναπτύχθηκε και λειτουργεί το υπό μελέτη σύστημα, καθώς και το εννοιολογικό πλαίσιο που τα διέπει, παρουσιάστηκαν βάσει των πακέτων εργασίας τους όπως διατίθενται ηλεκτρονικά (hydrousa.org/results/, surenexus.eu/deliverables/) εμπλουτιζόμενα με σχετικά στοιχεία από τη βιβλιογραφία (**Ενότητα, 1.2 & 6.1**).

Βιβλιογραφική ανασκόπηση πραγματοποιήθηκε περαιτέρω, για την αναλυτική αποτύπωση των χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης (**3^ο Κεφάλαιο**), ενώ στοιχεία αντλήθηκαν και από πηγές του συγγραφέα ως κάτοικος της περιοχής κατά το διάστημα εκπόνησης.

Για την παράθεση των κατασκευαστικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών του παρόντος συστήματος, δεδομένα αντλήθηκαν από την παραδοτέα αναφορά (WP2 D2.3, 2019) της κατασκευάστριας εταιρείας (*Planet SAS*) καθώς και διαμέσου της συνεργασίας του συγγραφέα με αυτήν, στα πλαίσια της έρευνας κατά το ίδιο διάστημα. Για την περιγραφή του θερμοκηπίου τροπικής καλλιέργειας (PGH) ως συνοδό έργο του HYDRO5, στοιχεία συλλέχθηκαν από τις διαθέσιμες αναφορές των υπεύθυνων συνεργατών (*Alchemia-Nova, Radtke Biotechnik*), βιβλιογραφικές πηγές και επιτόπιες παρατηρήσεις. Επιπλέον, για την εγκατάσταση, τη λειτουργία και τον έλεγχο του αρδευτικού δικτύου του θερμοκηπίου, δεδομένα και πληροφορίες ελήφθησαν από τον αντίστοιχα υπεύθυνο συνεργάτη (*Agenso*) στα πλαίσια συνεργασίας στο πρόγραμμα, αλλά και μέσω του ελεύθερου λογισμικού *Ardeusis* (ardeusi.gr), όπως αναπτύσσει και εφαρμόζει η ίδια εταιρεία για τις ανάγκες άρδευσης του PGH. Το σύνολο των παραπάνω περιγράφονται εκτενώς στην **Ενότητα 4.3**.

Ως προς το κομμάτι των αποτελεσμάτων τώρα, τα ποσοτικά δεδομένα ανάκτησης γλυκού νερού μέσω του MSS, καθώς και κατανάλωσης νερού για άρδευση του θερμοκηπίου, συλλέχθηκαν μέσω των ημερήσιων καταγραφών των εγκατεστημένων ροόμετρων (**Διάγραμμα 22**), όπως ανακτώνται μέσω του προγραμματιζόμενου ελεγκτή (PLC) της εγκατάστασης.

Τα ποιοτικά δεδομένα των ροών του συστήματος, καταγράφηκαν με τη σειρά τους μέσω των εγκατεστημένων *online* αισθητήριων οργάνων βιομηχανικού τύπου (WTW) για τη μέτρηση του pH, ηλεκτρικής αγωγιμότητας και θερμοκρασίας, αλλά και αισθητήρων χαμηλού κόστους για τη μέτρηση επιπλέον των ολικών διαλυτών στερεών (TDS) και στάθμης του νερού τους οποίους παρέχουν αντίστοιχα οι συνεργάτες *Metrolab* και *Agenso*. Τα ίδια αντλήθηκαν προς επεξεργασία μέσω του PLC (**Εικόνα 48**) της μονάδας και του λογισμικού *Ardeusis* (**Εικόνα 55**), αντιστοίχως. Επιτόπιες συγκριτικές μετρήσεις ελέγχου ποιότητας εκτελέστηκαν στο πεδίο με τη χρήση φορητών αισθητηρίων, κυρίως ως προς την παράμετρο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των ροών. Η συγκεκριμένη παράμετρος αποτέλεσε κεντρικό παράγοντα ελέγχου της ποιότητας κατά την εκπόνηση της μελέτης, και η έννοιά της αναλύεται εκτενέστερα εν συνεχεία (**Ενότητα 2.5.1**). Το σύνολο δε, των εγκατεστημένων αισθητήρων περιγράφεται στον **Πίνακα 21** και **Πίνακα 23**, της **Ενότητας 4.3**. Περαιτέρω ποιοτική ανάλυση των ροών πραγματοποιήθηκε μέσω τακτικής δειγματοληψίας και εργαστηριακής ανάλυσης στο Εργαστήριο Υγειονομικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ και σε αρμόδια συνεργαζόμενα εργαστήρια. Οι αναλύσεις περιελάμβαναν τυπική φυσικοχημική ανάλυση, καθώς και ανάλυση ιχνοστοιχείων και βαρέων μετάλλων σε δείγματα άλμης, θαλασσινού και παραγόμενου νερού από το υπό μελέτη σύστημα. Επιπλέον μικροβιολογική ανάλυση και ανάλυση οργανικών ενώσεων διεξήχθη σε δείγματα του παραγόμενου νερού. Τα αποτελέσματα ελήφθησαν από τα αντίστοιχα παραδοτέα του προγράμματος (D5.1).



Εικόνα 21: Εγκατεστημένοι αισθητήρες και όργανα στο HYDRO5

Πιο συγκεκριμένα, εργαστηριακά ο προσδιορισμός του pH και της ηλεκτρική αγωγιμότητας (EC), έγινε με τη χρήση συσκευών WTW pH 3110 και WTW Multi 3410, αντίστοιχα, ενώ η θολότητα προσδιορίστηκε μέσω της νεφελομετρικής μεθόδου με τη χρήση συσκευής θολομέτρου. Οι αναλύσεις της αλκαλικότητας, νιτρικού αζώτου ($\text{NO}_3\text{-N}$), χλωριόντων (Cl^-), θειικών αλάτων (SO_4^{2-}), ολικών αιωρούμενων (TSS) και TDS, έγιναν βάσει των “*Standard Methods for the examination of water and wastewater*”. Ειδικότερα, για το $\text{NO}_3\text{-N}$ ακολουθήθηκε η μέθοδος 5807, με τη χρήση συσκευής φασματοφωτόμετρου στα 345 nm και φιαλιδίων HACH τύπου LANGE LCK 339. Αντίστοιχα για τα Cl^- και SO_4^{2-} χρησιμοποιήθηκαν φιαλίδια HACH LCK 311 (1-1000 mg Cl^-/L) και HACH SulfaVer 4. Η αλκαλικότητα τώρα προσδιορίστηκε μέσω της μεθόδου 2320 με τιτλοδότηση οξέος, ενώ τα μεταλλικά ιόντα Ca^{2+} , Mg^{2+} και Na^+ στο νερό ανιχνεύθηκαν μέσω φλογοφασματομετρίας ατομικής απορρόφησης όπου μέσω της συγκέντρωσής τους προσδιορίστηκε υπολογιστικά η ολική σκληρότητα, καθώς και ο δείκτης απορρόφησης νατρίου (SAR) βάσει της **(2)**. Ο προσδιορισμός των ολικών κολοβακτηριδίων και των *E. Coli* πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την ISO 9308-1:2014/Amd 1:2016, ενώ οι εντεροκόκκοι προσδιορίστηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO 7899.02.

Η ανάλυση οργανικών ενώσεων περιελάμβανε προσδιορισμό τριαλομεθανίων (THMs) βάσει της μεθόδου O.617, πολυκυκλικών αρωματικών υδροφονανθράκων (PAHs) βάσει της O.631 υπό το πρότυπο EN 525.3, αλογονομένων παρασιτοκτόνων με GC-ECD και οργανοφωσφορικών και αζωτούχων παρασιτοκτόνων με συσκευή GS-MS. Τέλος οι αναλύσεις βαρέων μετάλλων και κύριων ιόντων πραγματοποιήθηκαν μέσω ατομικής απορρόφησης με τεχνική φούρνου γραφίτη και την χρήση του μοντέλου Z900 Pinnaacle και με τεχνική φλόγας με την χρήση του μοντέλου

Analyst 200, του οίκου *Perkin Elmer*. Τα ανωτέρω αποτελεσμάτα περιγράφονται στο **5^ο Κεφάλαιο** συγκρινόμενα με τις απαιτήσεις της Υ.Α. οικ. 145116/2011 και Οδηγία 2020/2184/ΕΕ, για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και την ποιότητα νερού ανθρώπινης κατανάλωσης, αντιστοίχως.

Ως προς τα δείγματα του ανακτώμενου αλατιού τώρα, αυτά ελέγχθηκαν ποιοτικά στο συνεργαζόμενο εργαστήριο *Tsakalidis Analysis & Testing*, ως βρώσιμο αλάτι βάσει του Κανονισμού 2023/915/ΕΕ και του “Κώδικα προτύπων καταλληλότητας εδώδιμου αλατιού” (CX STAN 150-1985), **(Ενότητα 5.9)**. Συγκεκριμένα, ο προσδιορισμός χλωριούχων έγινε ογκομετρικά, το θειικών φωτομετρικά και της περιεχόμενης υγρασίας βάσει της μεθόδου OE-7.0-95. Οι λοιπές παράμετροι συγκέντρωσης αλουμινίου (Al), αρσενικού (As), καδμίου (Cd), χαλκού (Cu), καλίου (K), υδραργύρου (Hg), νικελίου (Ni) και μολύβδου (Pb), νατρίου (Na) μαγνησίου (Mg^{2+}) και ασβεστίου (Ca^{2+}) προσδιορίστηκαν βάσει της μεθόδου OE-7.0-93 με τη χρήση οργάνου ICP-MS. Τέλος η καθαρότητα (NaCl) προσδιορίστηκε υπολογιστικά από το Na^+ , ενώ η συγκέντρωση δισφαινόλης Α εξετάστηκε σύμφωνα με τη μέθοδο OE-7.0-225 (με LC-MS/MS).

Αναλύσεις διενεργήθηκαν επιπροσθέτως σε δείγματα εδάφους, για την αξιολόγηση της κατάστασης και των αναγκών του εδάφους καθώς και των συνθηκών ανάπτυξης της καλλιέργειας του PGH, υπό τη χρήση του παραγόμενου νερού για άρδευση αυτών **(Ενότητα 5.10.1)**. Τα δείγματα συλλέχθηκαν κατά την καλλιεργητική περίοδο από πέντε σημεία του PGH σε βάθος 30 cm και μεταφέρθηκαν αεροστεγώς στο εξωτερικά συνεργαζόμενο εργαστήριο αναλύσεων εδάφους, φυτικών ιστών και αρδευτικού νερού *AgroEco*. Εκεί ξηράθηκαν, συνθλίφθηκαν και κοσκινίστηκαν σε κόσκινο 2 mm, καθώς σωματίδια εδάφους μεγέθους ≤ 2 mm είναι αυτά που προσδιορίζουν τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, η σύσταση του εδάφους προσδιορίστηκε μέσω της μεθόδου υδρομέτρου (Bouyoucos, 1951), ενώ το εδαφικό pH υπολογίστηκε με τη χρήση πεχαμέτρου (WTW pH 3110) σε μίγμα εδάφους-νερού με αναλογία 1:2.5 (w/v). Η EC του εδάφους προσδιορίστηκε μέσω της μέτρησης της ολικής αλατότητας του εδάφους και της ηλεκτρικής αντίστασης κορεσμένης πάστας εδάφους (Rhoades, 1989). Η περιεχόμενη οργανική ύλη ελήφθη βάσει της μεθόδου Walkley-Black (Nelson & Sommers, 1982), το ποσοστό αζώτου μέσω της μεθόδου Kjeldahl (Bremner, 1960) και ο διαθέσιμος φώσφορος μέσω της μεθόδου Olsen (Olsen, 1954). Η ιοντοανταλλακτική ικανότητα εδάφους βρέθηκε μέσω της μεθόδου οξικού νατρίου ενώ τα ανταλλάξιμα κατιόντα μέσω αυτής του οξικού αμμωνίου (Rhoades, 1982). Τα μικροθρεπτικά και μέταλλα μετρήθηκαν μέσω της μεθόδου DTPA (FAO, 2022), ενώ ο λόγος άνθρακα/αζώτου (C/N) βρέθηκε έπειτα από τη διαίρεση του περιεχόμενου ποσοστού άνθρακα και αζώτου (D4.6, 2023, Έκθεση αποτελεσμάτων ανάλυσης, 2023). Επιπρόσθετη συμβουλευτική παρείχε ο αρμόδιος γεωπόνος του προγράμματος μέσω απομακρυσμένης παρακολούθησης με τακτική αποστολή φωτογραφιών των καλλιεργούμενων φυτών. Η ποσοτική απόδοση της καλλιέργειας σε kg παραγωγής για την εκτίμηση του αντιστοιχού “*Key Performance indicator*” (KPI), έγινε μέσω ίδιας ζύγισης στο πεδίο **(Ενότητα 5.10.3)**. Παρακάτω παρατίθενται στιγμιότυπα από το σύνολο των δειγματοληψιών στο HYDRO5.



Εικόνα 22: Δειγματοληψία παραγόμενου νερού (αριστερά), αλατιού (κέντρο) και εδάφους (δεξιά)

Η άρδευση του θερμοκηπίου της υπο μελέτη εγκατάστασης πραγματοποιήθηκε μέσω σταλακτών με τη χρήση πιεστικού και βάσει των αισθητηρίων εδαφικής υγρασίας οι οποίοι εγκαταστάθηκαν από την εταιρεία Agenso, όπως αναλύεται στην **Ενότητα 4.3.5**. Τα μετεωρολογικά δεδομένα τώρα των συνθηκών που επικρατούσαν κατά το διάστημα της μελέτης στην περιοχή της εγκατάστασης εξωτερικά, καθώς και εσωτερικά του θερμοκηπίου αντλήθηκαν από τις καταγραφές των αντίστοιχων εγκατεστημένων μετεωρολογικών σταθμών χαμηλού κόστους της Agenso, και ανακτήθηκαν μέσω του περιβάλλοντος της εφαρμογής *Ardeusis*.

Η θερμική απόδοση των ηλιακών αποστακτών υπολογίστηκε βάσει των **(6)** και **(7)** και των αντίστοιχων μετρήσεων στο πεδίο (**Ενότητα 5.3**). Τα οικονομικά αποτελέσματα του παραγόμενου νερού, υπολογίστηκαν βάσει των **(8), (9), (10), (11)** και **(12)**, και του οικονομικού μοντέλου που παρείχε η κατασκευάστρια εταιρεία του MSS, έπειτα από ίδια επεξεργασία βασιζόμενοι στα δεδομένα πεδίου. Τα εν λόγω ευρήματα αποτυπώνονται αντιστοίχως στην **Ενότητα 5.4** και **5.12**. Για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας και ανθρωπίνου δυναμικού έγινε σε αντιστοιχία εκτίμηση βάσει της ονομαστικής ισχύος σε συσχέτιση με την ημερήσια λειτουργία του εξοπλισμού, και του ωραρίου εργασίας ημερησίως στην εγκατάσταση (**Ενότητα 5.6**).

Για το κομμάτι των δοκιμών βελτιστοποίησης του συστήματος, τα ευρήματα παρείχε η κατασκευάστρια εταιρεία καθώς αφορούν δεδομένα κυριότητάς της όπως προέκυψαν κατά την περίοδο διενέργειας των δοκιμών (Ιούνιος-Ιούλιος 2023) από απεσταλμένη ομάδα της στην περιοχή μελέτης, με την συμμετοχή του συγγραφέα. Έπειτα από ίδια επεξεργασία και σχολιασμό παρατίθενται στο **6^ο Κεφάλαιο**.

Το σύνολο το δεδομένων, υποβλήθηκε σε επεξεργασία για τις ανάγκες εκπόνησης, μέσω υπολογιστικών φύλλων (excel) του λογισμικού Office 2013 της Microsoft. Η **Εικόνα 50** και το **Διάγραμμα 11** ωστόσο αποτελούν προϊόν του λογισμικού σχεδίασης *Autocad 2020*, της *Autodesk*. Τέλος, προβλήματα που παρουσιάστηκαν, αντιμετώπιση, συνθήκες λειτουργίας και δράσεις που διενεργήθηκαν αποτελούν προϊόν του συγγραφέα όπως προέκυψε από καθημερινή εργασία και καταγραφές στο πεδίο.

4.2 Ερευνητικό πρόγραμμα HYDROUSA

Όπως εκτενώς περιγράφηκε εισαγωγικά, ο τομέας των υδάτων αποτελεί κομβικό σημείο για μία συντονισμένη στρατηγική προς “μία κλιματικά ουδέτερη, αποδοτική από πλευράς πόρων και ανταγωνιστική οικονομία”, όπως δρομολογήθηκε στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας. Μέσω της μετάβασης στην κυκλική οικονομία επιχειρείται η αποσύνδεση της οικονομικής μεγέθυνσης από τη χρήση των φυσικών πόρων και η επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050, όπως επικυρώθηκε μέσω της Συμφωνίας του Παρισιού (ΕΚ, 2020). Στη βάση αυτών, το ερευνητικό πρόγραμμα *HYDROUSA*, υπό συγχρηματοδότηση του προγράμματος Horizon 2020 (Grant agreement ID: 776643), επαφίεται στην θεματική πρόταση “*Το νερό στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας*”, (call topic *CIRC-02-2016-2017*). Η προσέγγιση αυτή, σε συμμόρφωση με τις προτεραιότητες του πλαισίου *European Innovation Partnerships (EIP)* και τους στόχους της ΟΠΥ, από 2017 ενθαρρύνει την ανάπτυξη καινοτόμων εφαρμογών κλίμακας πεδίου που στοχεύουν στην εξέλιξη των υπηρεσιών νερού, πέραν της ποσοτικής και ποιοτικής του βιωσιμότητας. Εστιάζει έτσι, σε καινοτόμες λύσεις για την ανάπτυξη υπηρεσιών νερού με γνώμονα ολόκληρη την “αλυσίδα αξίας” του, ως πόρο, παραγωγική εισροή και ρεύμα αποβλήτων. Επικεντρώνεται στην ανάπτυξη επιχειρηματικών μοντέλων και την εφαρμογή εναλλακτικών τεχνολογιών που προωθούν την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων ή την αξιοποίηση αφαλατωμένου νερού, την εξασφάλιση υπηρεσιών ύδρευσης ουδέτερου ισοζυγίου άνθρακα και το κλείσιμο των κύκλων νερού μέσω της ανάκτησης ενέργειας, υλικών, χημικών και θρεπτικών ουσιών. Προάγει την συμμετοχή όλων των ενδιαφερόμενων μερών και αξιολογεί σχετικά κοινωνικοοικονομικά ζητήματα, Αυτά αφορούν, ιδίως ρυθμιστικά και διοικητικά εμπόδια που πρέπει να αντιμετωπιστούν μέσω καινοτόμων συμφωνιών, καθώς και θέματα κοινωνικής συμπεριφοράς και αποδοχής μέσω συμμετοχικών δράσεων και αξιολόγησης της ικανοποίησης των πολιτών. Επιπλέον, προωθείται η συμμετοχή μικρομεσαίων επιχειρήσεων και η αξιοποίηση ψηφιακών εργαλείων και

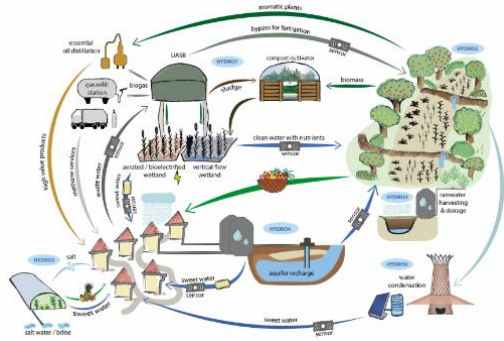
εργαλείων “Τεχνολογίας πληροφοριών και επικοινωνίας” (Information Communication Technology – ICT tools), με στόχο την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας και τη διευκόλυνση υιοθέτησης των εν λόγω λύσεων από την αγορά. Η επιτυχής εφαρμογή των προτεινόμενων συστημάτων απαιτεί ολοκληρωμένη εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων, κόστους, κινδύνου και κύκλου ζωής. Η αποτελεσματικότητα αυτών αντανακλάται στο δυναμικό επέκτασης και αναπαραγωγής τους (replicate potential) και στην επίτευξη *επιπέδου ωριμότητας* μίας επικυρωμένης τεχνολογίας (Επιπέδου TRL 5-7 – Total Readiness Level), (hydrousa.org/about/).

Υπό αυτό το πλαίσιο, το πρόγραμμα HYDROUSA (**Εικόνα 23**) συνιστά ένα έργο καινοτόμου δράσης που εισάγει και μελετά εναλλακτικές τεχνολογίες νερού χαμηλού κόστους και ενεργειακού αποτυπώματος. Οι ίδιες, εκμεταλλεύονται φυσικοχημικές μεθόδους και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) για τη διαχείριση του νερού και λυμάτων, την ανάκτηση θρεπτικών και ενέργειας και το μετριασμό της απώλειας βιοποικιλότητας. Στοχεύει συνολικά στην *“Ανάδειξη των κύκλων του νερού μέσω καινοτόμων αναγεννητικών επιχειρηματικών μοντέλων στην περιοχή της Μεσογείου”*, καθώς οραματίζεται και επανασχεδιάζει μία κοινωνία και οικονομία με υδατική ανθεκτικότητα, μετριάζοντας ταυτόχρονα τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και αναδιαμορφώνοντας το αγροδιατροφικό σύστημα. Μέσω της πιλοτικής εφαρμογής, μη παρεμβατικών συστημάτων που άπτονται στη φύση και εμπνέονται από αυτή, αξιολογεί και να εξειδικεύει λύσεις για την εκμετάλλευση μη συμβατικών υδατικών πηγών, όπως οι ροές λυμάτων, ατμοσφαιρικής υγρασίας, θαλασσινού και βρόχινου νερού. Εμπλέκει τα ενδιαφερόμενα μέρη από το πολύ αρχικό στάδιο μέσω της προμήθειας τοπικών αγαθών, της υιοθέτησης τοπικών και παραδοσιακών μεθόδων και της προσφοράς θέσεων εργασίας, και αλληλοεπιδρά με την τοπική κοινωνία επιστρέφοντας σε αυτή προϊόντα προστιθέμενης αξίας. Παράλληλα, προκρίνει την υιοθέτηση καλών πρακτικών άρδευσης και γεωργίας. Οι καινοτομίες του προγράμματος, εστιάζονται σε μεσογειακές νησιωτικές περιοχές με έξαρση περιορισμών και ζητημάτων που πρέπει να αντιμετωπίσουν οι υποδομές τους, ιδίως ως προς τις απαιτήσεις του τουριστικού και αγροτικού τομέα οι οποίοι συντελούν στη μη βιώσιμη διαχείριση του νερού. Μέσω ολοκληρωμένων επιχειρηματικών πλάνων και ρεαλιστικών εκτιμήσεων αξιολογείται τελικά το δυναμικό εφαρμογής τους υπό το υπάρχον θεσμικό πλαίσιο με στόχο την προώθησή τους σε ευρύτερη κλίμακα. Απώτερο σκοπό του προγράμματος, αποτελεί η συνεισφορά στην πρόοδο των στόχων βιωσιμότητας, ιδίως των *SDG 6* και *SDG 12*, και στην εγκαθίδρυση του Άξονα *WEFE* (WP9 D9.2, 2018).



Εικόνα 23: Το κεντρικό σύμβολο του προγράμματος HYDROUSA

Το πρόγραμμα στην πράξη αποτελείται από 6 πιλοτικά συστήματα (**Εικόνα 24**), εγκατεστημένα και εν λειτουργία σε τρία νησιά του Αιγαίου Πελάγους. Αυτά, χαρακτηρίζονται από υψηλή θερινή τουριστική κίνηση, ανεπτυγμένο αγροτικό-κτηνοτροφικό τομέα και ελλειψείς υπηρεσίες νερού, αφού ασκείται αυξημένη πίεση στους περιορισμένους υδατικούς πόρους που διαθέτουν. Συγκεκριμένα στις νησιωτικές περιοχές της Τήνου, Λέσβου και Μυκόνου έχουν αναπτυχθεί υπό την οργάνωση του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) της Αθήνας, και σε συνεργασία με 29 υψηλά εμπλεκόμενους συνεργάτες και ιδρύματα (hydrousa.org/partners/), τα εξής συστήματα:



Εικόνα 24: Γραφική επισκόπηση των συστημάτων του προγράμματος HYDROUSA

▪ **HYDRO 1 & 2 (Λέσβος, ΒΑ Αιγαίο)**

Τα HYDRO1 και HYDRO2 (**Εικόνα 25**), λειτουργούν σε δημοτική-κοινοτική κλίμακα όπως εδράζονται πλησίον της υφιστάμενης Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) στο χωριό Άντισσα της Λέσβου, συνδυάζοντας γκρίζες υποδομές με συστήματα NBS. Συγκεκριμένα, το HYDRO1 αποτελεί ένα σύστημα επεξεργασίας λυμάτων μέγιστης δυναμικότητας 100 m³/day, όπου μέσω αναερόβιων διεργασιών (Αντιδραστήρας Upflow Anaerobic Sludge Blanket - UASB) σε συνδυασμό με εν σειρά τεχνητούς υγροβιότοπους και στάδιο απολύμανσης επιτυγχάνεται εκροή που καλύπτει τις απαιτήσεις της ισχύουσας νομοθεσίας για την επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων προς απεριόριστη άρδευση. Παράλληλα ανακτάται ενέργεια από τη συλλογή του παραγόμενου βιοαερίου στον UASB, ενώ ποσότητα ιλύος επεξεργάζεται σε μονάδα συν-κομποστοποίησης κλειστού τύπου μαζί με βιομάζα. Η εκροή του HYDRO1 αξιοποιείται για την ανάκτηση γεωργικής γης σε εδάφη χαμηλής αξίας πλησίον της ΕΕΛ που αποτελούν το HYDRO2. Αυτό καλύπτει μια έκταση 1 ha και περιλαμβάνει δασικά δέντρα, σπυρώνες/θάμνους, αρωματικά φυτά και ετήσιες καλλιέργειες. Το HYDRO2 λιπαίνεται μέσω υγρής λίπανσης με το εμπλουτισμένο σε θρεπτικά νερό από το HYDRO1, ενώ μία φορά το χρόνο εφαρμόζεται και το παραγόμενο κομποστ. Η υψηλής αξίας παραγωγή όπως π.χ. *goji berries*, πωλούνται στην τοπική αγορά, ενώ τα αρωματικά φυτά μεταποιούνται για την παραγωγή αιθέριων ελαίων. (Nika *et.al.* 2022, WP7 D7.1 2019, hydrousa.org/hydro1&2). Όπως προκύπτει από πρόσφατη “Πολυτομεακή αξιολόγηση της κυκλικότητας του νερού” [Multi-Sectoral Water Circularity Assessment], τα συστήματα HYDRO 1 & 2 επιφέρουν 75% αύξηση της κυκλικότητας του νερού η οποία δύναται να φτάσει το 94% με την υιοθέτηση πρόσθετων λειτουργικών μέτρων. Επιτυγχάνεται ταυτόχρονα, 76-80% αύξηση της κυκλικότητας των θρεπτικών ουσιών και 14% μείωση του αποτυπώματος άνθρακα σε σύγκριση με το σενάριο βάσης που αφορά στην επεξεργασία των λυμάτων της περιοχής εξ ολοκλήρου από την υφιστάμενη ΕΕΛ (Nika *et.al.* 2022).



Εικόνα 25: Γραφική αναπαράσταση των HYDRO 1(αριστερά) & 2(δεξιά)

▪ **HYDRO 3 & 4 (Μύκονος, ΝΑ Αιγαίο)**

Τα πιλοτικά HYDRO 3 & 4 (**Εικόνα 26**), λειτουργούν στη περιοχή Λυία και το χωριό Άνω Μεριά της Μυκόνου αντίστοιχα, και αφορούν την εκμετάλλευση του βρόχινου νερού (Rainwater harvesting). Αναλυτικότερα, το HYDRO3 αφορά σε ένα αποκεντρωμένο NBS σύστημα ιδιωτικής εκμετάλλευσης. Εκεί, το νερό της βροχής συλλέγεται σε ένα ρηχό υποεπιφανειακό συλλέκτη επιφάνειας 280 m², παροχετεύεται σε 2 μικρές δεξαμενές συνολικής χωρητικότητας 60 m³ από όπου αρδεύεται η παρακείμενη καλλιέργεια ρίγανης, έκτασης 0.4 ha. (WP7 D7.1 2019, hydrousa.org/hydro3).

Το HYDRO 4 βρίσκεται σε κατοικήσιμη έκταση του νησιού, και αποτελεί ένα πιλοτικό μικρής κλίμακας όπου το βρόχινο νερό από ταράτσες έκτασης 400 m², οι πλημμυρικές ροές μέσω ενός υβριδικού βιο-καναλιού (hybrid bioswale system) και οι επιφανειακές απορροές από τις αυλές κατοικιών έκτασης 350 m² συλλέγονται σε δεξαμενές. Από εκεί αξιοποιούνται αρχικά για εμπλουτισμό του επιβαρυμένου υδροφόρου ορίζοντα κατά την υγρή περίοδο, την άρδευση έκτασης 0.2 ha λεβάντας κατά την ξηρή περίοδο και ως νερό σε καζανάκια. Ποσότητα αυτού δύναται να ανακτηθεί ως πόσιμο νερό έπειτα από επεξεργασία αργής διήθησης και απολύμανσης

Και σε αυτή την περίπτωση, λίπασμα από την κομποστοποίηση πρασίνων αξιοποιείται για τις ανάγκες των καλλιεργειών σε θρεπτικά ενώ οι παραγόμενες ποσότητες ρίγανης και λεβάντας μεταποιούνται για την παραγωγή αιθέριων ελαίων. (WP7 D7.1 2019, hydrousa.org/hydro4).



Εικόνα 26: Γραφική αναπαράσταση των HYDRO 3(αριστερά) & 4(δεξιά)

▪ **HYDRO 5 & 6 (Τήνος, ΝΑ Αιγαίο)**

Τα συστήματα HYDRO 5 & 6 (**Εικόνα 27**), αφορούν καινοτόμες εγκαταστάσεις διαχείρισης νερού που βρίσκονται στο νησί της Τήνου. Το HYDRO5 όπως θα περιγραφεί εκτενώς ακολούθως, αποτελεί ένα πρότυπο σύστημα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού, αποκεντρωμένης κλίμακας, που αξιοποιεί της αρχές της εξάτμισης και της συμπύκνωσης του νερού μέσω ηλιακών πάνελ για την άρδευση τροπικής οργανικής καλλιέργειας θερμοκηπίου. Τα παραγόμενα υψηλής αξίας προϊόντας παρέχονται στην τοπική αγορά. Επιπλέον, από το ρεύμα της άλμης ανακτάται βρώσιμο αλάτι, ενώ μέσω διατάξεων συλλέγεται και αξιοποιείται το βρόχινο νερό.

Τέλος, το HYDRO6 αποτελεί μία ιδιωτική αυτόνομη και αυτοτροφοδοτούμενη μονάδα οικουρισμού που λειτουργεί σε μη οικιστική ορεινή περιοχή, υπό την ονομασία *Tinos Ecolodge*. Εμπλέκει διαφόρους κύκλους του νερού για την ικανοποίηση των αναγκών της μονάδας. Μέσω επεξεργασίας των λυμάτων της σε μικρούς υγροβιότοπους και της χρήση παθητικών και μη μονάδων συμπύκνωσης της ατμοσφαιρικής υγρασίας ανακτάται νερό για την άρδευση οργανικής καλλιέργειας, έκτασης 0.15 ha. Ακόμη, μικρή ποσότητα της ανακτώμενης υγρασίας δύναται να αξιοποιηθεί ως πόσιμο νερό μετά από την απολύμανση της. Εφαρμόζεται επιπλέον, το παραγόμενο από οργανικά απορρίμματα κομποστ για λίπανση, ενώ η μονάδα τροφοδοτείται εξ ολοκλήρου μέσω ΑΠΕ (WP7 D7.1 2019, hydrousa.org/hydro6, tinosecolodge.gr)



Εικόνα 27: Γραφική αναπαράσταση των HYDRO 5(αριστερά) & 6(δεξιά)

Κλείνοντας, περεταίρω επιδίωξη αποτελεί η εξάπλωση των λύσεων σε νησιωτικές, παράκτιες, αγροτικές ή περιαστικές περιοχές ταυτόσημων υδρευτικών συνθηκών και περιορισμών, αξιοποιώντας πρόσθετα χρηματοδοτικά εργαλεία. Η εφαρμογή τους ωστόσο εκτός των τεχνικών ζητημάτων, σχετίζεται στενά με το εκάστοτε θεσμικό πλαίσιο, τη θεσμική υποστήριξη, τη χρηματοδότηση και τη διαχείριση περιουσιακών στοιχείων. Συνολικά, δεν εντοπίζονται σημαντικά εμπόδια στο ευρωπαϊκό νομοθετικό πλαίσιο που να μπορούν να αποτρέψουν πλήρως τη διάδοση των εναλλακτικών του προγράμματος. Ωστόσο, παρατηρείται κατακερματισμός και αλληλεπικαλυπτόμενες αρμοδιότητες σε εθνικό, περιφερειακό και τοπικό επίπεδο, μεταξύ των αρμόδιων για της υπηρεσίες νερού φορέων. Σε πολλές περιπτώσεις, αρμόδιες τοπικές κυβερνήσεις, στερούνται επαρκούς εξειδίκευσης, υποδομών και οικονομικών πόρων. Απαιτούνται ως εκ τούτου, καινοτόμες και διαφανείς συμφωνίες για τη δημιουργία ενός περιβάλλοντος ρυθμιστικής και θεσμικής σαφήνειας, ώστε τελικά να

αναγνωριστεί η συνεισφορά μικρών και αποκεντρωμένων υπηρεσιών νερού στην υλοποίηση της ευρωπαϊκής πράσινης ατζέντας. Καθώς το ολιστικό κόστος δεν λαμβάνεται δεόντως υπόψη, αναγνωρίζεται η δυσκολία εκτίμησης της οικονομικής αποδοτικότητας τέτοιων συστημάτων, αφού θεωρείται απίθανο η αξία του νερού που προκύπτει από την εκάστοτε παραγωγική διαδικασία για την οποία προσφέρεται, να καλύψει το σταθερό και λειτουργικό κόστος χωρίς ενισχυτική παρέμβαση. Οι τεχνικές προδιαγραφές των προτεινόμενων συστημάτων, τα καθιστούν επιπλέον κατάλληλα κυρίως ως συμπληρωματικά έργα των μεγαλύτερων εγκαταστάσεων ύδρευσης. Ως εκ τούτου, αναγνωρίζεται η ανάγκη προσέλευσης δημόσιων ή και ιδιωτικών επενδύσεων ώστε περιοχές με φαινόμενα λειψυδρίας να επωφεληθούν από καινοτόμες λύσεις όπως η παρουσιαζόμενη εδώ, και βάσει των τοπικών τους συνθηκών να ικανοποιήσουν συγκεκριμένες ανάγκες που επαφίονται στη διαχείριση του νερού.

4.3 Αναλυτική περιγραφή εγκατάστασης HYDRO5

Οι εγκαταστάσεις του HYDRO5 σε σύνολο με τους βοηθητικούς και περιμετρικούς χώρους καλύπτουν έκταση \approx 500 m², την οποία παραχώρησε ο Δήμος Τήνου, στο χώρο των μονάδων δημοτικής μονάδας αφαλάτωσης, συνολικής έκτασης 5 στρεμμάτων (**Εικόνα 28**). Ο λόγος που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη τοποθεσία του έργου ήταν η ελαχιστοποίηση του κόστους άντλησης και προεπεξεργασίας του εισερχόμενου θαλασσινού νερού μέσω της εκμετάλλευσης των υφιστάμενων δημοτικών υποδομών.

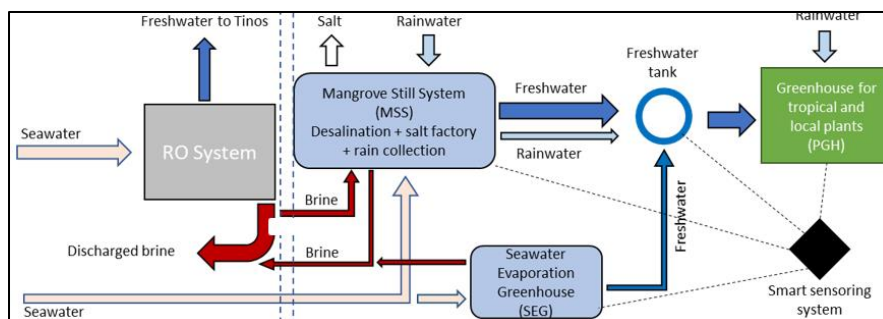


Εικόνα 28: Τοποθεσία εγκαταστάσεων Δημοτικής αφαλάτωσης Τήνου και του HYDRO5

Το HYDRO5 συνιστά ένα πρότυπο σύστημα αφαλάτωσης χαμηλού κόστους, υλικών και ενέργειας για την παραγωγή αρδευτικού νερού και εδώδιμου αλατιού από την εισροή θαλασσινού νερού. Η τεχνολογία του βασίζεται σε φυσικές μεθόδους και μηχανισμούς χαρακτηρίζοντάς το ως ένα *βιο-εμπνευσμένο* σύστημα. Το παραγόμενο νερό αξιοποιείται για την καλλιέργεια τροπικού θερμοκηπίου και την παραγωγή οργανικών προϊόντων υψηλής αξίας. Κύριος σκοπός του είναι το να κλείσει τους κύκλους του νερού προσθέτοντάς του ταυτόχρονα αξία. Αξιοποιεί τις εκροές του για καλλιέργεια θερμοκηπίου και την παραγωγή εμπορικά εκμεταλλεύσιμων διατροφικών προϊόντων. Οι τεχνολογίες που το απαρτίζουν είναι:

- ❖ Το σύστημα αφαλάτωσης ηλιακών πάνελ, καλούμενο *Mangrove Still System (MSS)*, έκτασης 150 m² (**Εικόνα 30**).
- ❖ Το σύστημα παραγωγής εδώδιμου αλατιού, καλούμενο *Salt Factory (SF)* που αποτελεί συνοδό έργο του MSS (**Εικόνα 51**).
- ❖ Το θερμοκήπιο οργανικής καλλιέργειας τροπικών φυτών και φρούτων, καλούμενο *Productive Greenhouse (PGH)*, έκτασης 201.6 m² (**Εικόνα 53**).
- ❖ Η συμπληρωματική του MSS και του PGH διάταξη συλλογής βρόχινου νερού, καλούμενη *Rainwater Collector (RC)* (**Εικόνα 52**).
- ❖ Το ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου και διαχείρισης, χαμηλού κόστους και κατανάλωσης ενέργειας σύγχρονης ICT – διασυνδεδεμένων έξυπνων αισθητήρων και εργαλείων δεδομένων και επικοινωνίας, καλούμενο *Smart Sensing System*.

Στο παρακάτω ροϊκό διάγραμμα (**Εικόνα 29**) αποτυπώνεται συνοπτικά το γενικό σχήμα λειτουργίας.



Εικόνα 29: Ροϊκό διάγραμμα ενοποιημένων συστημάτων του HYDRO5.

Ακολούθως περιγράφεται αναλυτικά η κατασκευή και λειτουργία των επιμέρους τεχνολογιών.

4.3.1 Περιγραφή συστήματος αφαλάτωσης - *Mangrove Still System (MSS)*

Πυρήνα όλης της εγκατάστασης του HYDRO5 αποτελεί το MSS, (**Εικόνα 30**). Αφορά σε ένα πρότυπο παθητικό σύστημα αφαλάτωσης, 80 κεκλιμένων ηλιακών αποστακτών (solar stills) μονής επίδρασης (single effect) με κάλυμμα μονής κλίσης (single slope), (**Εικόνα 31**). Το MSS σχεδιάστηκε από την ιταλική εταιρεία *Planet SAS*, υπεύθυνη για την εποπτεία και διαχείρισή του. Το σύστημα κάνει χρήση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας για την παραγωγή καθαρού νερού υπό τις αρχές της εξάτμισης και της συμπύκνωσης, εκμεταλλεύομενο την είσοδο ακατέργαστου θαλασσινού νερού της παρακείμενης δημοτικής μονάδας αντίστροφης ώσμωσης που εξυπηρετεί το νησί. Ως προς το σχεδιασμό και τη λειτουργία του χαρακτηρίζεται ως εμπνευσμένο από τη φύση, αφού ακολουθεί τις αρχές του βιομιμιτισμού. Πηγή έμπνευσης για το MSS αποτέλεσαν τα Μαγγρόβια φυτά και τα αλλόφυτα τα οποία είναι είδη ικανά να αναπτύσσονται σε περιβάλλον αλμυρού νερού μέσω μιας αυτοσυντηρούμενης διαδικασίας δέσμευσης θρεπτικών συστατικών και νερού. Παγιδεύοντας νερό από τις σπάνιες βροχοπτώσεις, αυξάνοντας την ατμοσφαιρική υγρασία, συλλέγοντας την αλλά και μειώνοντας την εξάτμισοδιαπνοή τους μέσω σκίασης, δημιουργούν προοδευτικά ευνοϊκές συνθήκες σχηματισμού οργανικά πλούσιων εδαφών που επιτρέπει την εμφάνιση και άλλων ειδών, όπου τελικά θα οδηγήσουν σε ένα σταθερό οικοσύστημα. Έτσι και το εξεταζόμενο σύστημα, έχει σκοπό την αναγέννηση των εδαφών προς γεωργική εκμετάλλευση σε ξηρές, ημι-άνυδρες παράκτιες περιοχές που στερούνται επαρκών αποθεμάτων νερού, όπως το νησί της Τήνου και την δημιουργία ενός πιο σταθερού περιβάλλοντος. Μέσω της αξιοποίησης της μη συμβατικής πηγής θαλασσινού νερού, κλείνει ο κύκλος παρέχοντας στην κοινωνία διατροφικά αγαθά και ικανοποιείται μέρος της ζήτησης για αρδευτικό νερού αξιοποιώντας την ελεύθερη ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας.

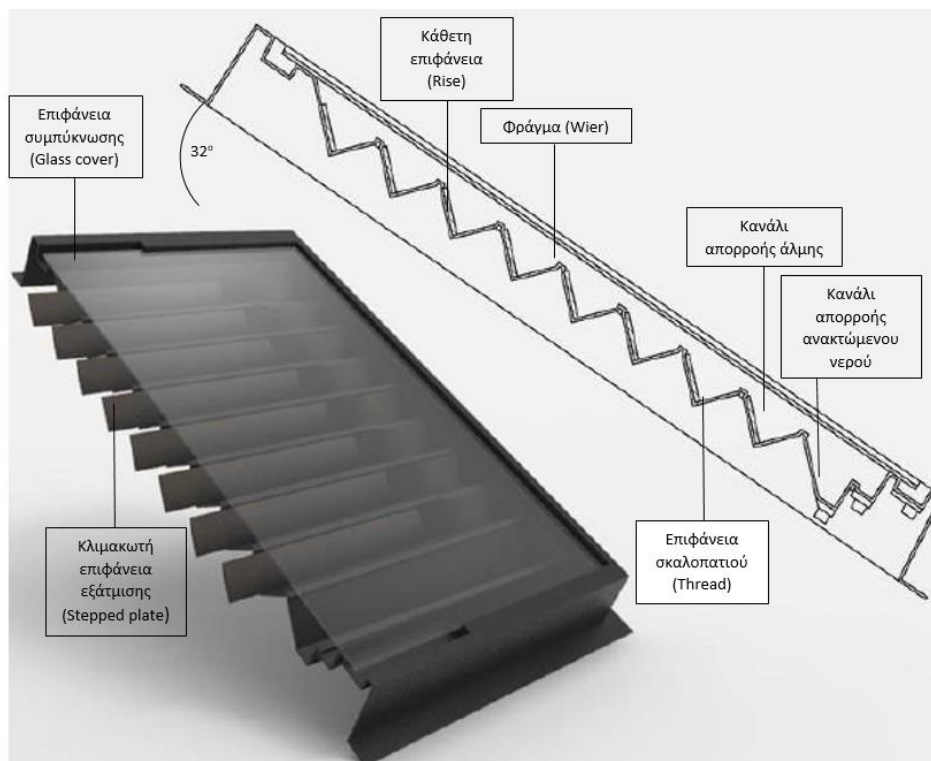


Εικόνα 30: Το σύστημα Mangrove Still στο νησί της Τήνου

Το MSS σχεδιάστηκε ώστε να είναι δυνατή η εμπορική του αξιοποίηση σε ευρύτερη και αποκεντρωμένη κλίμακα μελλοντικά, βάσει βελτιστοποίησης των παρακάτω παραμέτρων:

- Λόγος κόστους/οφέλους
- Λόγος επιφάνειας/όγκου παραγόμενου νερού
- Απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας
- Θερμική απόδοση (ελαχιστοποίηση απωλειών)
- Μετακίνηση/διανομή των ροών – Μείωση κόστους άντλησης
- Εκμετάλλευση ελεύθερης ενέργειας (ήλιος, βαρύτητα) – Μείωση ενεργειακής κατανάλωσης
- Διάρθρωση (Αύξηση προσαρμοστικότητας και ανθεκτικότητας βάσει των τοπικών ιδιαιτεροτήτων)
- Ανθεκτικότητα των δομών – Μείωση κόστους επισκευών
- Εκμετάλλευση τοπικά διαθέσιμων υλικών χαμηλού κόστους και υψηλής ποιότητας
- Περιορισμός των εκροών – Αυξημένη κυκλικότητα

Πιο συγκεκριμένα τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ηλιακών αποστακτήρων του MSS αφορούν σε συνδυασμό της σχεδιαστικής φιλοσοφίας “*cascade and wick solar stills*” (Εικόνα 31). Κάθε πάνελ εξωτερικών διαστάσεων 1x1, κατασκευάστηκε με πολυμερές υλικό (PC) μέσω θερμοδιαμόρφωσης της ρητίνης σε καλούπια αξιοποιώντας την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D printing). Η κατασκευή τους από ανοξείδωτο ασάλι αν και αποτελεί βέλτιστη επιλογή λόγω της αντιδιαβρωτικής του προστασίας από τα άλατα, απορρίφθηκε λόγω υψηλού κόστους και αυξημένου βάρους. Οι αποστακτήρες του MSS σχεδιάστηκαν με ολική διαθέσιμη επιφάνεια εξάτμισης 0.7 m², προβαλλόμενη επιφάνεια 0.58 m² και ποσοστό αύξησης της επιφάνειας εξάτμισης ανά προβαλλόμενη επιφάνεια 22.8%. Η θερμομόνωση των πάνελ επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση στρώματος υαλοβάμβακα στο πίσω μέρος, σε συνδυασμό με αεροστεγές σφράγισμα με χρήση αφρώδους λάστιχου και σιλικόνης.



Εικόνα 31: 3D αποτύπωση ηλιακού αποστακτήρα του MSS

Οι κύριες παράμετροι που μελετήθηκαν ως προς το σχεδιασμό κάθε μονάδας αποστακτήρα είναι οι εξής:

- Το υλικό κατασκευής του “φυτιλιού” (Wick material)
- Η επιφάνεια συμπύκνωσης (Condensing surface)
- Η κλιμακωτή εσωτερική επιφάνεια εξάτμισης (Evaporation surface/Stepped plate)

Διάφορα είδη υλικών “φυτιλιού” με βέλτιστες ιδιότητες αναφέρονται όπως, το βαμβάκι, το λινό και οι ίνες γιούτα (Shrivastava *et al.* 2014). Συνθετικά υλικά απορρίφθηκαν ως επιλογή, λόγω τις προέλευσής τους καθώς στα πλαίσια του προγράμματος απαιτείται η εναρμόνιση με τις αρχές της κυκλικής οικονομία. Έτσι μεταξύ ζωικών και φυτικών ινών, επιλέχθηκαν οι τελευταίες λόγω του βέλτιστου πορώδους και καταλληλότητας ως προς τις απαιτήσεις σχεδιασμού των αποστακτήρων. Από τους ελέγχους του υλικού, βρέθηκε ικανό να απορροφά νερό έως 50 mm τριχοειδούς ανύψωσης, τιμή που τέθηκε ως εκ τούτου ως μέγεθος της κάθετης πλευράς κάθε σκαλοπατιού. Οι απαιτήσεις που θα πρέπει να πληρεί το υλικό “φυτιλιού” συνολικά, παρουσιάζονται παρακάτω.

- Ελαφρύ και Ανθεκτικό στη διάβρωση λόγω υψηλής συγκέντρωσης αλάτων (περίπου 55 gr/kg)
- Υψηλό πορώδες
- Υψηλός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας
- Υψηλή απορροφητικότητα μέσω τριχοειδούς ανύψωσης
- Εύκολη απελευθέρωση νερού μέσω εξάτμισης
- Αντοχή στη θερμοκρασία λειτουργίας ($\approx 70^{\circ}\text{C}$)
- Αντοχή στις τοπικές καιρικές συνθήκες (υψηλή και παρατεταμένη ηλιακή ακτινοβολία)
- Μαύρο φυσικό ή οργανικό χρώμα χρώμα (ενισχυμένη απορρόφηση ακτινοβολίας)
- Ευκολία μετεπεξεργασίας (άλεση)
- Τοπικά διαθέσιμο ή εύκολα μεταφερόμενο και ανακυκλώσιμο υλικό κατασκευής
- Χαμηλής/μέτριας βιομηχανικής επεξεργασίας

Αξίζει σε αυτό το σημείο να αναφερθεί, πως το όλο εγχείρημα της ενσωμάτωσης στα πάνελ καθώς και το ακριβές υλικό του “φυτιλιού”, αποτελεί καινοτομία της εταιρείας κατασκευής. Ωστόσο η εν λόγω έκδοση έχει διερευνηθεί μόνο πειραματικά μέχρι στιγμής. Τα μελετώμενα πάνελ του MMS λειτουργούν σήμερα στο HYDRO5 ως “*cascade solar stills*”, ενώ η επέκτασή τους σε “*cascade-wick solar stills*” βρίσκεται ερευνάται ώστε να γίνει πλήρης ενσωμάτωση της μελλοντικά. Τα αποτελέσματα απόδοσης της εν λόγω έρευνας παρατίθενται στο **6^ο Κεφάλαιο**.

Ως προς την επιφάνεια συμπύκνωσης τώρα, επιλέχθηκε γυαλί πάχους 3 mm (**Εικόνα 32**). Παρά το ότι χαρακτηρίζεται ως εύθραυστο και έχει αυξημένο βάρος, διατηρεί το πλεονέκτημα αντίστασης στη UV ακτινοβολία, σε αντίθεση με διάφορα πολυμερή που λόγω της ευαισθησίας τους έχουν τη τάση να ραγίζουν και να κιτρινίζουν (μειώνοντας την διαπερατότητα του φωτός) στη πάροδο του χρόνου.



Εικόνα 32: Γυάλινο κάλυμμα – επιφάνεια συμπύκνωσης ηλιακού αποστακτήρα MSS

Οι απαιτήσεις που θα πρέπει να πληρούνται από το επιλεγόμενο υλικό καλύμματος αφορούν τα εξής:

- Ανθεκτικότητα στη διάβρωση λόγω υψηλής συγκέντρωσης αλάτων (55 gr/kg)
- Διαπερατότητα ορατού και υπεριώδους φωτός
- Αντοχή στη θερμοκρασία λειτουργίας ($\approx 70^{\circ}\text{C}$)
- Αντοχή στις τοπικές συνθήκες (υψηλή και παρατεταμένη ηλιακή ακτινοβολία με ισχυρό άνεμο)
- Χαμηλή υγροσκοπικότητα
- Διαφανής στο υπεριώδες φως
- Συμπύκνωση με μορφή φιλμ
- Θερμομόνωση
- Υψηλή εσωτερική αλλά και χαμηλή εξωτερική ανάκλαση φωτός
- Τοπικά διαθέσιμο ή εύκολα μεταφερόμενο και ανακυκλώσιμο υλικό

Όσον αφορά το σχεδιασμό του εσωτερικής κλιμακωτής επιφάνειας των πάνελ (stepped plate) (**Εικόνα 31**), μελετήθηκαν από τον κατασκευαστή (D.2.3, WP2, 2019) οι παρακάτω παράμετροι με γνώμονα την βέλτιστη απόδοση και εργονομία και επιλέχθηκαν οι αντίστοιχες τιμές:

- Μήκος επιφάνειας εξάτμισης
Τυπικές τιμές σχεδιασμού αναφέρονται στο εύρος 500 -1000 mm. Στα πλαίσια της εργονομίας και της βέλτιστης κλίσης για το MSS επιλέχθηκε μήκος 800 mm. Επιπλέον, το ψηλότερο σημείο κάθε μονάδας τέθηκε σε ύψος 800 mm ώστε να είναι δυνατός ο απρόσκοπτος χειρισμός από τον τεχνικό λειτουργίας.
- Πλάτος επιφάνεια εξάτμισης
Τυπικές τιμές σχεδιασμού αναφέρονται στο εύρος 250 -2000 mm. Στα πλαίσια της εργονομίας επιλέχθηκε πλάτος 873 mm.
- Ύψος βάσης στήριξης (απόσταση από το έδαφος)
Τυπικές τιμές σχεδιασμού αναφέρονται στο εύρος 860 -1000 mm. Ωστόσο, καθώς το μέγιστο ύψος της δομής του συστήματος τέθηκε κατά το σχεδιασμό στα 3m, η απόσταση από το έδαφος περιορίστηκε στα 500 mm, όσο και το ύψος του αλουμινένιου πλέγματος έδρασης των αποστακτάρων στήριξης.
- Ύψος και πλάτος φράγματος (wier) κάθε σκαλοπατιού
Επιλέχθηκε το ελάχιστο τυπικό ύψος φράγματος ίσο με 5 mm, καθώς ευνοεί την μεταφορά θερμότητας στο νερό μέσω ακτινοβολίας μειώνοντας κατά το δυνατό τη σκίαση του υποκείμενου καναλιού. Το πλάτος του ορίστηκε στα 10 mm βάσει κατασκευαστικών περιορισμών.
- Βάθος νερού
Ο γενικός κανόνας αναφέρει πως όσο μικρότερο είναι το βάθος ροής του νερού μέσα στον αποστακτήρα τόσο υψηλότερη η απόδοση αυτού λόγω υψηλότερου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (μέσω συναγωγής από το υλικό της επιφάνειας εξάτμισης) (Hammoodi *et.al.* 2023). Τυπικές τιμές σχεδιασμού αναφέρονται στο εύρος 5 -100 mm. Καθώς η λειτουργία του συστήματος είναι συνεχής το ελάχιστο όριο βάθους τέθηκε στα 5 mm, σε αντίθεση με πειραματικά δεδομένα παρτίδας (batch mode) που απαιτούν μεγαλύτερη ποσότητα νερού για να μην στερέψει εσωτερικά η μονάδα. Ωστόσο, επιλέχθηκε βάθος 20 mm, λαμβάνοντας υπόψη τυχόν αβεβαιότητες και δυσλειτουργίες κατά την λειτουργία.
- Βέλτιστη κλίση
Η βέλτιστη απόδοση του αποστακτήρα απαιτεί τον κατά το δυνατό μεγαλύτερο σε διάρκεια προσανατολισμό των πάνελ κάθετα απέναντι από τον ήλιο. Ωστόσο, αυτό επηρεάζεται από την περίοδο του χρόνου καθώς το καλοκαίρι ο ήλιος είναι πιο ψηλά από το χειμώνα. Ο γενικός κανόνας αναφέρει βέλτιστη γωνία κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας, το οποίο στην περίπτωση της Τήνου είναι 37.58° . Ωστόσο, για το MSS επιλέχθηκε από τον κατασκευαστή ως βέλτιστη η γωνία κλίσης οι 32° , λαμβάνοντας υπόψη τη μέση μέγιστη προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια/μονάδα επιφάνειας, ετησίως.
- Μέγεθος κάθετης επιφάνειας σκαλοπατιού (rise)
Το μέγεθος της κάθετης επιφάνειας κάθε σκαλοπατιού προσδιορίστηκε στα 50 mm βάσει της τριχοειδούς ανύψωσης του νερού στο επιλεγμένο υλικό “φυτιλιού”.

- Μέγεθος οριζόντιας επιφάνειας σκαλοπατιού (thread)

Τυπικές τιμές σχεδιασμού αναφέρονται στο εύρος 30 – 100 mm. Με δεδομένο το ορισμένο βάθος του νερού και την κλίση των αποστακτήρων το πλάτος του σκαλοπατιού στο MSS δεν μπορεί να υπερβεί τα 50 mm, καθώς σε αντίθετη περίπτωση δεν θα περιέχει νερό. Επιπλέον, με γνώμονα την μεγιστοποίηση του ποσοστού αύξησης της επιφάνειας εξάτμισης προς την προβαλλόμενη επιφάνεια των πάνελ, για γωνία κλίσης 32° επιλέχθηκε τιμή οριζόντιας επιφάνειας ίση με 50 mm, η οποία επιφέρει 22.8% αύξησης της διαθέσιμης επιφάνειας εξάτμισης, όπως υπολογίστηκε βάσει των παρακάτω:

- Διαστάσεις σκαλοπατιού= 50×50 mm
- Γωνία κλίσης= 32°
- Μέσο βάθος νερού= 12 mm
- Αριθμός σκαλοπατιών (Ns)= 8
- Ολική επιφάνεια ανά σκαλοπάτι (At)= 303.3 mm²
- Όγκος νερού ανά σκαλοπάτι (Vs) = At × πλάτος πάνελ= 303.3×873= 0.26 L
- Ολικός όγκος (Vt) = Vs×Ns = 0.26×8 = 2.08 L
- Προβαλλόμενη επιφάνεια (A-Proj.)= 0.582 m²
- Επιφάνεια εξάτμισης (A -Evar.)= [(50×8) + (50×8)]×873= 800×873 = 0.6984 m²
- Ποσοστό αύξησης= [A -Evar. - A-Proj.]/ A-Proj]×100 = +22.8 %

Παρακάτω, παρατίθενται συγκεντρωτικά τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του ηλιακού αποστακτήρα MSS.

Πίνακας 16: Παράμετροι σχεδιασμού ηλιακού αποστακτήρα MSS

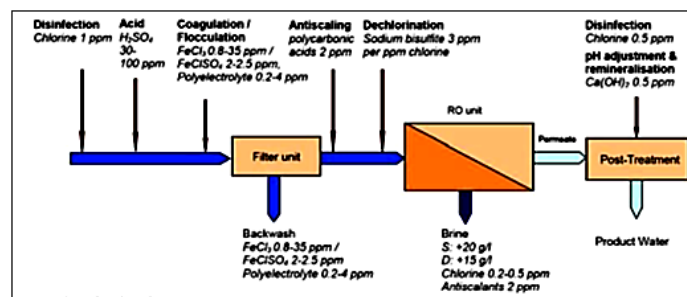
Παράμετρος	Τιμή
Υλικό επιφάνειας εξάτμισης	Πολυμερές (PC)
Μήκος	800 mm
Πλάτος	873 mm
Επιφάνεια Εξάτμισης	0.7 m ²
Αριθμός σκαλοπατιών ανά αποστακτήρα	8
Πλάτος σκαλοπατιού	50 mm
Πλάτος κάθετης επιφάνειας ανά σκαλοπάτι	50 mm
Διαστάσεις φράγματος ανά σκαλοπάτι	5 x 10 mm
Βάθος νερού	20 mm
Όγκος νερού ανά σκαλοπάτι	0.26 L
Ολικός όγκος νερού ανά αποστακτήρα	2.08 L
Υλικό πλέγματος στήριξης (Βάση πάνελ)	Αλουμίνιο
Ύψος πλέγματος στήριξης	500 mm
Κλίση αποστακτήρα	32°
Ολική επιφάνεια αποστακτήρα	1 m ²
Ολικό εμβαδό κάλυψης ανά αποστακτήρα	1.875 m ²
Υλικό καλύμματος	Γυαλί (3mm)
Υλικό μόνωσης	Υαλοβάμβακας (πίσω όψη), Αφρώδες λάστιχο & Σιλικόνη (Σφράγισμα καλύμματος)

Με “καρδιά” του συστήματος λοιπόν τους ηλιακούς αποστακτήρες όπως περιγράφηκαν, το MSS δέχεται ως εισροή θαλασσίνο νερό από την γείτονα δημοτική μονάδα αφαλάτωσης έπειτα από φυσική φίλτρανση, καθώς αντλείται μέσω παραθαλάσσιων πηγαδιών (**Εικόνα 33**) και χωρίς περαιτέρω προεπεξεργασία.



Εικόνα 33: Πηγάρια διήθησης και άντλησης του θαλασσινού νερού προς αφαλάτωση

Συγκριτικά, αξίζει να σημειωθεί, πως πριν την είσοδό του νερού στη δημοτική μονάδα RO, απαιτείται εκτεταμένη προεπεξεργασία και χρήση χημικών όπως φαίνεται στο παρακάτω ροϊκό διάγραμμα της εγκατάστασης.



Εικόνα 34: Ροϊκό διάγραμμα επεξεργασίας θαλασσινού νερού στη δημοτική αφαλάτωση

Το θαλασσινό νερό λοιπόν, με ποιοτικά χαρακτηριστικά όπως παρουσιάζονται στον **Πίνακα 7**, αντλείται στο HYDRO5 μέσω της αντλίας θαλασσινού νερού (SW pump), (**Εικόνα 35**) με παροχή 0.2 m³/hr και σε θερμοκρασία όμοια με αυτή της θάλασσας, εύρους 14.0 -28.2°C (M.O. 20°C).



Εικόνα 35: Άντληση θαλασσινού νερού στο HYDRO5

Η εισροή συγκεντρώνεται στην κύρια δεξαμενή θαλασσινού νερού (SWa tank), όγκου 0.5 m³, στην οποία διατηρείται ένα περιθώριο 10% της στάθμης για αποφυγή υπερχειλίσεων. Επιπλέον, στην δεξαμενή υπάρχει εγκατεστημένο ηλεκτρικό φλοτέρ υπεύθυνο για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση της αντλίας SW, βάσει της μέγιστης και ελάχιστης στάθμης της δεξαμενής SW, όπως αυτή παρακολουθείται μέσω αντιστοιχων αισθητήρων. Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί πως επικουρικά υπάρχει μία βοηθητική δεξαμενή (SWb – backup tank), συγκοινωνούσα της δεξαμενής SWa (**Εικόνα 36**), όγκου 1.5 m³, που αξιοποιείται σε έκτακτη περίπτωση, όπως π.χ. σε περίπτωση βλάβης της αντλίας SW, για την παροχή νερού στο σύστημα διατηρώντας την απρόσκοπτη λειτουργία του.



Εικόνα 36: Οι δεξαμενές θαλασσινού νερού του HYDROS

Στο σύστημα υπάρχει δυνατότητα τροφοδοσίας και της παραγόμενης ως υποπροϊόν άλμης από τη μονάδα αντίστροφης ώσμωσης, για την αξιοποίηση της προς παραγωγή επιπλέον νερού και εδώδιμου αλατιού, συνεισφέροντας στη μείωση της απόρριψης άλμης στη θάλασσα. Ωστόσο, έως σήμερα το MSS δέχεται στην είσοδό του μόνο θαλασσινό νερό μέσω του πρώτου τμήματος υδραυλικού δικτύου (**Πίνακας 17**) με τα παρακάτω χαρακτηριστικά.

Πίνακας 17: Χαρακτηριστικά πρώτου τμήματος υδραυλικού δικτύου του MSS

Μήκος	≈ 50 m
Διάμετρος	≈ 2 - 4 in
Υλικό	PE

Εν συνεχεία, μέσω των “δίδυμων” αντλιών θαλασσινού νερού (SW1 & SW2 pumps), το θαλασσινό νερό παροχετεύεται μέσω του δεύτερου τμήματος του υδραυλικού δικτύου αγωγών (**Πίνακας 18**) στα πάνελ ηλιακής αφαλάτωσης του συστήματος MS. Οι αντλίες είναι εγκατεστημένες παράλληλα (**Εικόνα 37**), μετά τις δεξαμενές SW και λειτουργούν εναλλάξ ανά ημέρα χάρη του αυτοματισμού του συστήματος. Η ημερήσια εναλλαγή εξασφαλίζει την αποφυγή μηχανολογικής καταπόνησης των αντλιών καθώς το σύστημα λειτουργεί επί 10ώρου καθημερινά και αδιαλείπτως.



Εικόνα 37: Οι “δίδυμες” αντλίες θαλασσινού νερού του HYDROS

Η λειτουργία του ξεκινά δύο ώρες μετά την ανατολή και έως την δύση του ηλίου, όπως έχει τεθεί υπό τον αυτοματισμό του που ακολουθεί το αστρονομικό ρολόι των γεωγραφικών συντεταγμένων της περιοχής. Επιπλέον, σε περίπτωση βλάβης της μίας εκ των δύο αντλιών, ενεργοποιείται αυτομάτως η άλλη ώστε να μην διακοπεί η ομαλή λειτουργία του MSS. Σημειώνεται πως, οι δύο αυτές αντλίες, η αντλία της άλμης όπως και η κεντρική αντλία SW, δεν είναι κατάλληλες για αλμυρό νερό (λόγω υψηλού κόστους) και σε περίοδο 6-12 μηνών απαιτούν συντήρηση ή και αντικατάσταση. Ωστόσο διαθέτουν προστασία έναντι της διάβρωσης από τα άλατα.

Πίνακας 18: Χαρακτηριστικά δεύτερου τμήματος υδραυλικού δικτύου του MSS

<i>Μήκος</i>	≈ 25 m x 2
<i>Διάμετρος</i>	≈ 1/8 - 1/2 in
<i>Υλικό</i>	PVC

Οι “δίδυμες” αντλίες λειτουργώντας με πίεση δικτύου 0.8 – 1 bar, η οποία ρυθμίζεται χειροκίνητα επιστρέφοντας νερό από το δεύτερο τμήμα του υδραυλικού δικτύου στη δεξαμενή SWa (**Εικόνα 38**).



Εικόνα 38: Ρύθμιση της πίεσης στο δίκτυο των αποστακτήρων

Οι ίδιες παροχετεύουν νερό στους 80 ηλιακούς αποστακτήρες που βρίσκονται εγκατεστημένοι εκατέρωθεν τους, χωρισμένοι σε 4 τομείς, στα αριστερά A_B και στα δεξιά C_D (**Εικόνα 39**), ανά 2 σειρές 10 αποστακτήρων η καθεμία.



Εικόνα 39: Οι τομείς A_B (αριστερά) και C_D (δεξιά), των αποστακτήρων MS

Η τροφοδοσία των πάνελ ηλιακής αφαλάτωσης, ρυθμίζεται με στάγδην παροχή 2L/hr από τους μικρο-σταλάκτες (**Εικόνα 40**) οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στον αγωγό εισόδου θαλασσινού νερού πριν από κάθε αποστακτήρα, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής χρόνος παραμονής του νερού σε αυτούς, κατά μ.ο. 52 min, και να επιτυγχάνεται αποτελεσματικά η απόσταξη του νερού.



Εικόνα 40: Οι μικρο-σταλάκτες στην είσοδο των αποστακτήρων MSS

Δύο ρεύματα ροών αποτελούν την έξοδο από τα πάνελ, αυτό του καθαρού νερού και αυτό της παραγόμενης άλμης (υπεράλμυρο νερό). Τα δύο ρεύματα εξέρχονται από κάθε αποστακτήρα και παροχετεύονται υπό βαρύτητα μέσω του τρίτου τμήματος του υδραυλικού δικτύου (**Πίνακας 19**) που απαρτίζεται από αγωγούς ελεύθερης ροής, στις δεξαμενές ρύθμισης γλυκού νερού και άλμης (**Εικόνα 41**), αντίστοιχα, που υπάρχουν σε κάθε τομέα των πάνελ. Αναφέρεται εδώ πως τμήμα της άλμης δύναται να παροχετευθεί στο SF, για την παραγωγή αλατιού όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω.

Πίνακας 19: Χαρακτηριστικά τρίτου τμήματος υδραυλικού δικτύου του MSS

Μήκος	≈ 30-70 m
Διάμετρος	≈ 1/8 - 1/2 in
Υλικό	PVC



Εικόνα 41: Δεξαμενές ρύθμισης ανακτώμενου νερού (αριστερά) και άλμης (δεξιά) του MSS

Το γλυκό νερό του τομέα A, συγκεντρώνεται τώρα μέσω βαρύτητας μαζί με αυτό του τομέα B στην δεξαμενή ρύθμισης του τομέα B, από όπου παροχετεύεται μέσω της πρώτης αντλίας γλυκού νερού (FWa pump) στην κεντρική δεξαμενή συλλογής γλυκού νερού (FW tank), συνολικού όγκου 0.5 m³, (**Εικόνα 42**).

Ομοίως, παροχετεύεται το παραγόμενο νερό των τομέων C και D μέσω της δεύτερης αντλίας/πιεστικού γλυκού νερού (FWb pump). Οι εν λόγω αντλίες μικρότερης δυναμικότητας ενεργοποιούνται αυτοματοποιημένα όταν η στάθμη τους φτάσει στο μέγιστο, βάσει των αντίστοιχων αισθητήρων στάθμης σε αυτές. Υπάρχουν τέσσερις εγκατεστημένες δεξαμενές ρύθμισης του παραγόμενου νερού (μία για κάθε τομέα), όγκου 0.065 m³(65 L) η καθεμία, κατασκευασμένες από LDPE.



Εικόνα 42: Κεντρική δεξαμενή του παραγώμενου γλυκού νερού στο HYDRO5

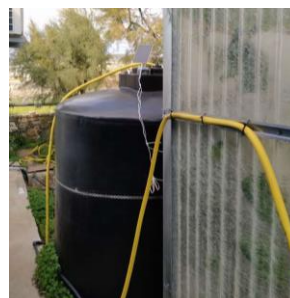
Η απορριπτόμενη άλμη όλων των τομέων ρέει πάλι μέσω βαρύτητας από την δεξαμενή ρύθμισης της άλμης κάθε τομέα και συγκεντρώνεται στην δεξαμενή ρύθμισης του τομέα A, η οποία μόλις φθάσει στην μέγιστη στάθμη της ομοίως παροχετεύει μέσω της αντλίας άλμης (**Εικόνα 43**) τις ροές άλμης στο σύνολό τους, πίσω στο πηγάδι άλμης

της δημοτικής μονάδας, από όπου απορρίπτονται πίσω στη θάλασσα. Υπάρχουν τέσσερις εγκατεστημένες δεξαμενές ρύθμισης της παραγόμενης άλμης (μία για κάθε τομέα), όγκου 0.125 m³ η καθεμία.



Εικόνα 43: Η αντλία απόρριψης της άλμης από το HYDRO5

Το ανακτώμενο νερό τέλος, από τη δεξαμενή FW, παροχετεύεται μέσω της αντλίας άρδευσης (irrigation pump), στην δεξαμενή άρδευσης (irrigation tank) όγκου 3 m³ (**Εικόνα 44**), που βρίσκεται πριν την είσοδο του θερμοκηπίου της μονάδας, η οποία λειτουργεί σαν μία δεξαμενή εξισορρόπησης, και από όπου μεταβιβάζεται το νερό προς άρδευση του PGH ανάλογα με τις ανάγκες της καλλιέργειας σε νερό. Το πότισμα του θερμοκηπίου γίνεται αυτοματοποιημένα βάσει αισθητήρων υγρασίας εδάφους που βρίσκονται σε κάθε τμήμα του, όπως θα περιγραφεί στην αντίστοιχη ενότητα. Σημειώνεται πως στη δεξαμενή άρδευσης, υπάρχει εγκατεστημένη τροφοδοσία νερού του δικτύου για την αντιμετώπιση εκτάκτων αναγκών, όπως περιπτώσεις μη ικανοποιητικής ποιότητας (αυξημένη αγωγιμότητα FW) ή μη επαρκούς ποσότητας του νερού από το MSS.



Εικόνα 44: Παροχέτευση παραγόμενου νερού από το MSS στη δεξαμενή άρδευσης

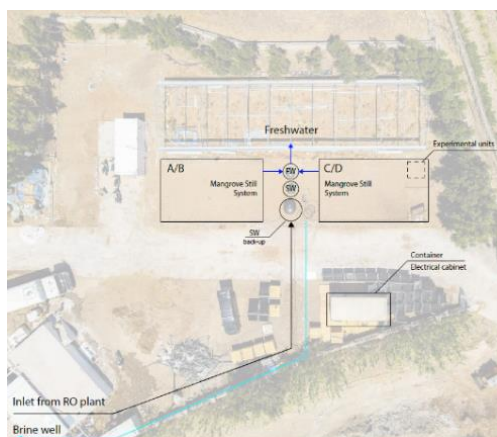
Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα λειτουργικά στοιχεία του MSS.

Πίνακας 20.: Λειτουργικά μέρη εγκατάστασης του MSS

Όργανο	Τύπος – Μοντέλο -Χαρακτηριστικά	Κόστος
Δεξαμενή SW	0.5 m ³ , Ύψος 80 cm, Διάμετρος 100 cm, Υλικό: ανακυκλώσιμο πολυαιθυλένιο (LLDPE)	100 €
Δεξαμενή SW (Backup)	1.5 m ³ , Ύψος 110 cm, Διάμετρος 135 cm, Υλικό: ανακυκλώσιμο πολυαιθυλένιο (LLDPE)	2600€
Δεξαμενή FW	0.5 m ³ , Ύψος 80 cm, Διάμετρος 100 cm, Υλικό: ανακυκλώσιμο πολυαιθυλένιο (LLDPE)	100 €
4 πλαστικές δεξαμενές QUBI 125 (Brine)	Όγκος 125 L, Μ 40 x Π 54 x Υ 32, Υλικό: πλαστικό (LDPE)	90 €/μονάδα
4 πλαστικές δεξαμενές QUBI 65 (FW)	Όγκος 65 L, Μ 50 x Π 88 x Υ 30, Υλικό: πλαστικό (LDPE)	50 €/μονάδα
2 Αντλίες SW	LEO APm75 ALU Ισχύς 1 HP, Μανομετρικό (Hmax) 75m Παροχή (Qmax) 40L/min	70 €/μονάδα
2 Αντλίες FW	Pedrollo Cpm 100–ST.4, Ισχύς 0.33 HP, Hmax 15.5 m, Qmax 90 L/min	98 €

2 Αντιστροφείς αντλιών (inverter)	MAC 3HCA - MM Standard 1~230V 1.5HP 8A	410 €/μονάδα
Αντλία Irrigation	Pedrollo Cpm 100-ST6, Ισχύς 0.33 HP, Hmax 15.5 m, Qmax 90 L/min	98 €
Αντλία Brine	Pedrollo Cpm 158 -ST6, Ισχύς 1 HP, Hmax 35.5 m, Qmax 120 L/min	175 €
Υδραυλικό δίκτυο	Ø 20, πλαστικός σωλήνας	0.3 €/m
Σταλάκτες 2 L/hr	Irritec, idrop CELESTE, 155 mesh, Q 2 L/hr	0.2 €/μονάδα
1 Ροόμετρο	MADDALENA - CD ONE TRP, R160	40 €
2 Μανόμετρα	4 bar, 50 mm	10 €/μονάδα
4 Μονάδες Καταγραφής με ενσωματωμένο GPS* (Τροφοδοσίας μέσω Φ/Β)	Διαστάσεις: 11.5cm x 9cm x 5.5cm	950 €/μονάδα (σύνολο με 2 αισθητήρες στάθμης & 1 Φ/Β πάνελ)
1 Μετεωρολογικός Σταθμός*	Misol weather station with RS485i Διαστάσεις: 49cm x 33cm	123 €
*Δωρεάν προσφορά από την συνεργαζόμενη εταιρεία AGENSO στα πλαίσια του προγράμματος		

Η τελική διαμόρφωση χωροθέτησης του MSS αφορά στην ενός επιπέδου διάταξη των αποστακτήρων εκατέρωθεν των κεντρικών δεξαμενών, υποστηριζόμενοι από αλουμινένιο πλέγμα ως βάση έδρασης. Η εν λόγω διάταξη αποτυπώνεται στο γενικό γράφημα χωροθέτησης (**Εικόνα 45**), όπου διακρίνονται και οι ροές του συστήματος.



Εικόνα 45: Γενικό γράφημα χωροθέτησης και ροών του HYDRO5

Στην **Εικόνα 46**, δίνεται επιπλέον η παρούσα γενική άποψη του συστήματος όπως είναι σήμερα εγκατεστημένο στο νησί της Τήνου.



Εικόνα 46: Γενική Άποψη της εγκατάστασης MSS στην Τήνο.

Παρακολούθηση, έλεγχος και προδιαγραφές του MSS

Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των ροών εισόδου από τη δημοτική μονάδα RO καθώς και εξόδου του παραγόμενου νερού και άλμης παρακολουθούνται σε πραγματικό χρόνο (online), μέσω του εγκατεστημένου συστήματος αισθητήρων, βιομηχανικού τύπου (WTW) στις αντίστοιχες δεξαμενές, ενώ σε αντιδιαστολή υπάρχουν αντίστοιχοι εγκατεστημένοι αισθητήρες χαμηλού κόστους. Όπως έχει προαναφερθεί το πρόγραμμα *HYDROUSA* αξιοποιεί ολοκληρωμένες τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνίας (ICT), ανοικτού κώδικα για την ανάπτυξη και τη διαχείριση ενός διαλειτουργικού δικτύου. Λειτουργεί επιπροσθέτως, πλατφόρμα διαχείρισης και επεκτασιμότητας των δεδομένων καθώς και ενσωμάτωσης αλγορίθμων ανάλυσης κόστους και κύκλου ζωής (LCC & LCA analysis). Τα εξαρτήματα χαμηλού κόστους που δοκιμάζονται, επικοινωνούν με τη χρήση δικτύου χαμηλής ισχύος (LoRaWAN), και η τροφοδοσία τους επιτυγχάνεται από μικρής κλίμακας ηλιακούς συλλέκτες (**Εικόνα 47**).



Εικόνα 47: Χαμηλού κόστους Φ/Β για την τροφοδοσία των αισθητήρων στη δεξαμενή άρδευσης

Ημερησίως, καταγράφεται το ισοζύγιο του παραγόμενου καθαρού νερού και του καταναλισκόμενου αρδευτικού νερού με τα αντίστοιχα εγκατεστημένα ροόμετρα. Η αγωγιμότητα, το pH, τα TDS, η αλατότητα και η θερμοκρασία των ροών επαληθεύεται ακόμη με την χρήση φορητών μετρητών, ενώ οι ποιοτικές παράμετροι ελέγχονται και εργαστηριακά, βάσει τακτικών δειγματοληψιών. Στον παρακάτω πίνακα περιγράφεται το σύνολο των οργάνων.

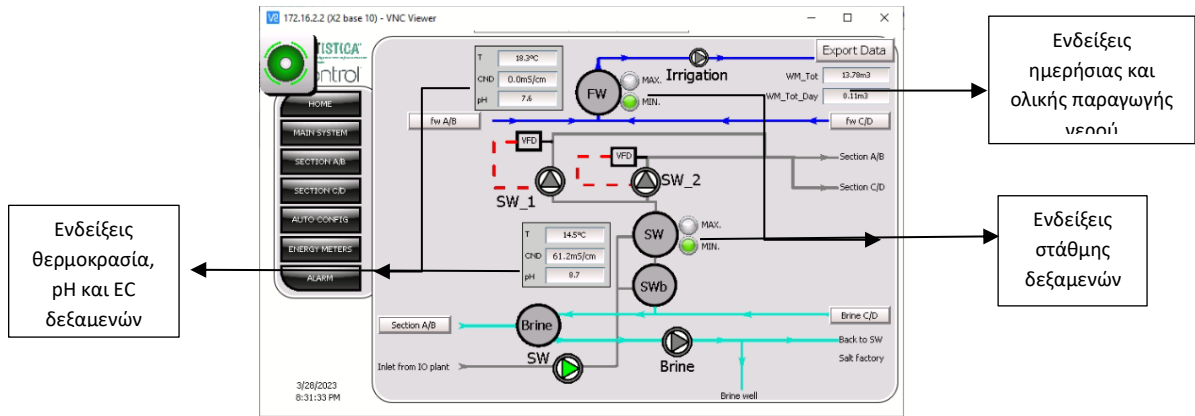
Πίνακας 21: Εγκατεστημένοι αισθητήρες & όργανα στο MSS

Όργανο	Τύπος – Μοντέλο -Χαρακτηριστικά	Κόστος
12 Αισθητήρες στάθμης*	ΧΚC-Y25 5-12V NPN Intelligent Non-Contact Liquid Level Sensor	11.5 €/μονάδα
2 Αισθητήρες TDS & Θερμοκρασίας*	Μοντέλο AGIoT-0070 Συνδεσιμότητα 2G/4G/GPRS/EDGE/NB-IoT	≈ 20 €/μονάδα
2 Αισθητήρες pH*	Μοντέλο AGIoT-1030, Συνδεσιμότητα 2G/4G/GPRS/EDGE/NB-IoT	≈ 20 €/μονάδα
Φορητός μετρητής TDS, EC, pH, αλατότητας, θερμοκρασίας	Multifunction Water quality meter, EZ – 9909SP	30 €
3 Αισθητήρες pH** (online/βιομηχανικού τύπου)	WTW SensoLyt® SEA	293 €/μονάδα
3 Αισθητήρες EC**	WTW SensoLyt® 700 IQ SW	1303 €/μονάδα
1 Μονάδα ελεγκτή**	WTW MIQ/MC3	1512 €
*Δωρεάν προσφορά από την συνεργαζόμενη εταιρεία AGENSO στα πλαίσια του προγράμματος		
**Δωρεάν προσφορά από την εταιρεία METROLAB στα πλαίσια του προγράμματος		

Το σύστημα παρακολούθησης των μονάδων του HYDROUSA στο σύνολό τους, απαρτίζεται από τις εξής φιλικές προς το χρήστη τεχνολογίες: (i) *Arduino based boards* που είναι υπεύθυνη για την επικοινωνία και τον χειρισμό των αισθητήρων και εξαρτημάτων, (ii) τη βιβλιοθήκη ανοικτού κώδικα *Apache Hadoop* η οποία συνιστά τη πλατφόρμα αποθήκευσης και παρακολούθησης των δεδομένων και (iii) την διαδικτυακή εφαρμογή *Grafana* που αφορά σε μία πολυπλατφόρμα διαδραστικής ανάλυσης και οπτικοποίησης δεδομένων.

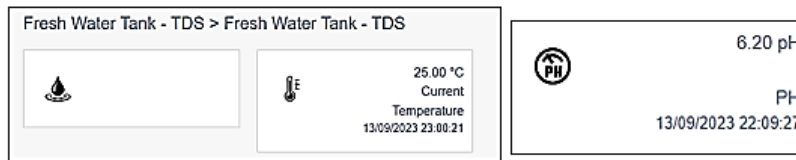
Στο HYDRO5 βρίσκεται εγκατεστημένος συμπαγής προγραμματιζόμενος ελεγκτής (Programmable Logic Controller - PLC), οποίος μέσω του τοπικού υπολογιστή που λειτουργεί ως μονάδα επεξεργασίας και προγραμματιστής του,

είναι υπεύθυνος για τον αυτοματισμό του συστήματος (**Εικόνα 48**). Μέσω του PLC δίνονται οι εντολές για τη λειτουργία των αντλιών και την ενεργοποίηση του συστήματος. Παράλληλα, καταγράφονται και αποτυπώνονται ενδείξεις και δεδομένα, και προειδοποιείται ο χειριστής για τυχόν ανωμαλίες στις μονάδες εισόδου του.



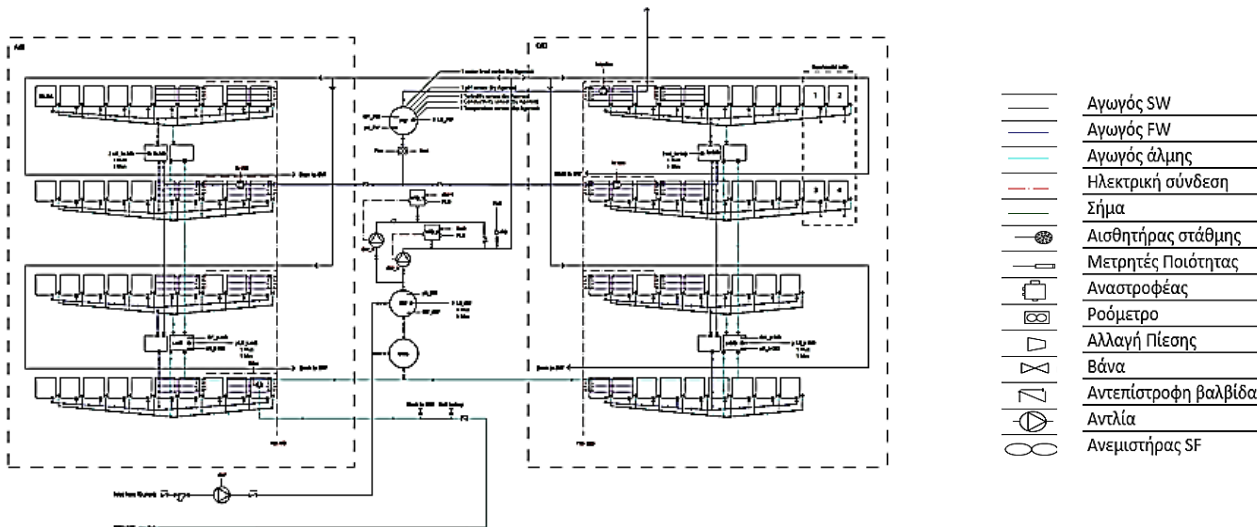
Εικόνα 48: Αποτύπωση ενδείξεων κεντρικής οθόνης του PLC του HYDRO5

Η λειτουργία και οι ενδείξεις των αισθητήρων χαμηλού κόστους του MSS, από την άλλη πλευρά, ελέγχονται μέσω της εφαρμογής Ardeusis, της Agenso, η οποία περιγράφεται εκτενέστερα στη συνέχεια (**Εικόνα 49**).



Εικόνα 49: Αποτύπωση ενδείξεων των αισθητήρων χαμηλού κόστους στη δεξαμενή FW μέσω Ardeusis

Συγκεντρωτικά στο παρακάτω σκαρίφημα της εγκατάστασης, παρουσιάζονται οι θέσεις των εγκατεστημένων αισθητήρων και η διασύνδεση αυτών, καθώς και οι ροές του MSS.



Εικόνα 50: Γενική αποτύπωση ροών και εγκατεστημένων αισθητήρων στο MSS

Τελικά, βάσει των δεδομένων του κατασκευαστή, από το MSS εξασφαλίζεται μέση ημερήσια παραγωγή 210 L καθαρού νερού που θεωρείται κατάλληλο και επαρκές για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών του θερμοκηπίου. Στον **Πίνακα 22** αποτυπώνονται συνολικά οι προδιαγραφές λειτουργίας και απόδοσης του συστήματος όπως εκτιμώνται από τον κατασκευαστή. Περαιτέρω, ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος όπως καταγράφηκε στο πεδίο, γίνεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

Πίνακας 22: Εκτιμώμενη απόδοση και προδιαγραφές του MSS

Μονάδες	Ηλιακή Ακτινοβολία ανά Πάnel	Βέλτιστη Απόδοση	Ειδική Παραγωγή	Παραγωγή FW ανά Πάnel	Ώρες Λειτουργίας συστήματος	Χρόνος Παραμονής	Παραγωγή εισόδου SW ανά Πάnel		Χρόνος Παραμονής	Παραγωγή Εισόδου SW	Απόδοση Συστήματος	Παραγωγή συστήματος	Παραγωγή άλμης	Αλατότητα άλμης
	Wh/m ² d	L/m ² d	L/m ² d	L/d unit	hr/d	min/unit	L/h unit	L/d unit	hr	L/d	%	L/d	L/d	g/L
Μέση Ετήσια	5070	4.1-4.6	3.3-3.7	2.2-2.4	9	52	2.88	26.0	2.9	709	28	200	509	49
Ελάχιστη	1970	1.7-1.8	1.3-1.4	0.9-0.9	8	60	2.50	20.0	3.1	546	14	77	469	41
Μέγιστη	8030	6.5-7.2	5.2-5.7	3.5-3.9	10	43	3.49	34.9	2.4	953	33	317	636	52

Τέλος, είναι αναγκαίο να σημειωθεί πως η απόδοση του συστήματος λόγω της φύσης της μελετώμενης τεχνολογίας δεν είναι δεδομένη. Εξαρτάται άμεσα από τις καιρικές συνθήκες και δει από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή όπως αποτυπώνεται και στο κομμάτι των αποτελεσμάτων.

4.3.2 Περιγραφή συστήματος ανάκτησης εδώδιμου αλατιού - Salt Factory (SF)

Στα πλαίσια της φιλοσοφίας “μηδαμινών απορρίψεων” (Zero Liquid Discharge – ZLD) και της κυκλικής οικονομίας το μελετώμενο σύστημα ηλιακής αφαλάτωσης σχεδιάστηκε, ώστε να επιτυγχάνεται ταυτόχρονα ανάκτηση εδώδιμου αλατιού. Το MSS, λοιπόν δύναται να παράγει 2 kg αλατιού ανά ημέρα (700 kg/year), μέσω της περαιτέρω επεξεργασίας του 8% της παραγόμενης άλμης. Συγκεκριμένα, ημερησίως 40 L του παραπροϊόντος της άλμης με συγκέντρωση 49 gr/L, εκτρέπονται από το υδραυλικό δίκτυο της μέσω παρακαμπτήριων βανών προς το σύστημα παραγωγής εδώδιμου αλατιού του MSS. Το SF αποτελείται από 10 πλατό εγκατεστημένα κάτω από τη διάταξη των πάνελ αφαλάτωσης ώστε να επιτυγχάνεται εξοικονόμηση χώρου. Στην ειδική τροχήλατη διάταξη των πλατό τοποθετούνται τα αντίστοιχα αλουμινένια πλαίσια, επιφάνειας 2 m² και βάθους 25 mm έκαστο, όπου μοιράζεται η ποσότητα της προς επεξεργασία άλμης. Εκεί λαμβάνει χώρα η διεργασία εξάτμισης της ξεκινώντας κατά τις θερμότερες ώρες της ημέρας. Σε κάθε πλατό του SF βρίσκονται εγκατεστημένοι ένας ή δύο αξονικοί ανεμιστήρες ονομαστικής ισχύος 0.04 kW, οι οποίοι ενεργοποιούνται χειροκίνητα μέσω του PLC ώστε να ενισχύουν τον ρυθμό εξάτμισης της άλμης (**Εικόνα 51**).



Εικόνα 51: Συνολική απεικόνιση του συστήματος παραγωγής εδώδιμου αλατιού

Βιβλιογραφικά αναφέρεται, πως ο ρυθμός εξάτμισης συναρτάται των εξής παραμέτρων:

- Αλατότητα
- Βάθος ανοικτής επιφάνειας εξάτμισης
- Διάμετρος ανοικτής επιφάνειας εξάτμισης
- Καθεστώς μεταγωγής (ελεύθερο ή εξαναγκασμένο)
- Ταχύτητα του αέρα
- Θερμοκρασία άλμης και υπερκείμενου αέρα

Αναλυτικότερα, σε συνθήκες ελεύθερης συναγωγής (ταχύτητα του αέρα < 0.15 m/s) η εξάτμιση πραγματοποιείται λόγω διαφοράς της μερικής πίεσης ατμών μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας και του περιβαλλόμενου αέρα (Inan & Atayilmaz, 2017). Στην περίπτωση εξαναγκασμένης όμως μεταγωγής εφαρμόζεται ροή πρόσθετου αέρα στην επιφάνεια του νερού και το κορεσμένο στρώμα αερίου απομακρύνεται και αντικαθίσταται από ξηρότερο, επιταχύνοντας έτσι τον ρυθμό εξάτμισης. Ως εκ τούτου, σε καθεστώς ελεύθερης συναγωγής περιοριστικό παράγοντα στη διεργασία αποτελεί η θερμοκρασία του νερού και του αέρα, αλλά και η σχετική υγρασία περιβάλλοντος. Ο ρυθμός εξάτμισης αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού και του υπερκείμενου αέρα, λόγω αύξησης της τάσης ατμών της ελεύθερης επιφάνειας του νερού και μείωσης της πυκνότητας του αέρα αντιστοίχως. Ωστόσο, με την αύξηση της σχετικής υγρασίας μειώνεται δραματικά ο ρυθμός εξάτμισης καθώς ο κορεσμός του αέρα επιτυγχάνεται γρηγορότερα. Από την άλλη πλευρά, κατά την εξαναγκασμένη μεταγωγή μεγαλύτερη επίδραση στο ρυθμό εξάτμισης ασκεί η ταχύτητα ροής του αέρα στην επιφάνεια του νερού (Ροός & Varju, 2020). Στη βάση των παραπάνω, οι Inan και Atayilmaz (2017) αναφέρουν ως αποτέλεσμα των δοκιμών τους πως ο μέγιστος ρυθμός εξάτμισης του νερού 117.4 g/m²h επιτεύχθηκε όταν η θερμοκρασία του αέρα ήταν 26 °C, η θερμοκρασία της επιφάνειας του νερού ήταν 23°C, η σχετική υγρασία ήταν 50% και η ταχύτητα ροής του αέρα πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια ήταν 0.38 m/s. Αντίθετα ένας ελάχιστος ρυθμός εξάτμισης 41.5 g/m²h βρέθηκε σε αντίστοιχες τιμές 16 °C, 15 °C, 72 % και 0.20 m/s.

Βασικό ρόλο επιπλέον στη διεργασία παίζει και η αλατότητα του νερού, καθώς όσο αυξάνουν τα διαλυμένα άλατα στο νερό μειώνει η πίεση ατμών κορεσμού λόγω του μειωμένο χημικού δυναμικού του νερού, και συνεπώς ελαττώνεται σημαντικά ο ρυθμός εξάτμισής του. Πιο αναλυτικά αναφέρεται, πως οι αυξημένες δυνάμεις συνοχής μεταξύ διαλυμένων ιόντων και νερού όπως και η χαμηλή τάση ατμών του αλμυρού νερού, περιορίζουν τον ρυθμό εξάτμισής του. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα αντιληπτό σε υψηλές θερμοκρασίες νερού, όπου ο ρυθμός εξάτμισης του αλμυρού έναντι του καθαρού νερού είναι σημαντικά μειωμένος (Al-Shammiri, 2002). Από πειράματα, βρέθηκε πως ρυθμός εξάτμισης του θαλασσινού νερού και της άλμης (συγκέντρωσης 70 g/L) για ταχύτητα αέρα 2 m/s, στους 18°C ήταν 0.5 kg/m²h και 0.15 kg/m²h, αντίστοιχα. Με την αύξηση της θερμοκρασίας νερού σε 30°C, ο ρυθμός εξάτμισης αυξάνεται σε 0.9 kg/m²h και 0.25 kg/m²h αντιστοίχως, ενώ για να επιτευχθεί για την άλμη ρυθμός εξάτμισης 0.45 kg/m²h απαιτήθηκε αύξηση της θερμοκρασία σε 50°C.

Βάσει όσων προαναφέρθηκαν, το SF του συστήματος MSS σχεδιάστηκε ώστε να επιτυγχάνει μέσο ρυθμό εξάτμισης 0.24 kg/m²h, που κυμαίνεται από 0.7 kg/m²h για αλατότητα 49 g/L έως 0.2 kg/m²h για αλατότητα 70 g/L και με θερμοκρασία 30°C, σε καθεστώς εξαναγκασμένης μεταγωγής. Με παροχή αέρα από τους ανεμιστήρες ταχύτητας 2 m/s το σύστημα ανά 10 ημέρες ανακτά 20 kg χρησιμοποιώντας 410 kg της παραγόμενης άλμης στα 10 πλατό του SF, με 165 ώρες λειτουργίας του SF (16 ώρες ημερησίως). Συνεπώς η όλη διεργασία πραγματοποιείται σε κύκλους των 10 ημερών κατά μέσο όρο, οι οποίοι γίνονται συντομότεροι το μεγάλο κομμάτι των ημερών που επικρατούν ισχυροί άνεμοι και υψηλές θερμοκρασίες στην περιοχή (D.2.3, WP2, 2019).

Τα ποιοτικά αποτελέσματα του παραγόμενου αλατιού παρουσιάζονται στην **Ενότητα 5.9**. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί εδώ πως η λειτουργία του πλέον πραγματοποιείται περιστασιακά λόγω ελλιπούς ενδιαφέροντος για εμπορική εκμετάλλευση του αλατιού από την τοπική αγορά. Παρόλα ταύτα, η αναζήτηση νέων ενδιαφερόμενων

μερών ώστε να προσφερθεί το ανακτώμενο προϊόν είναι συνεχής. Τέλος, ζητήματα παρουσίας σκουριάς στο τελικό προϊόν, λόγω της διάβρωσης των αντλιών συμβάλλουν στο γεγονός αυτό και πρέπει να επιλυθούν.

4.3.3 Περιγραφή διάταξης συλλογής βρόχινου νερού - *Rainwater (RC)*

Η διάταξη συλλογής βρόχινου νερού αποτελεί συμπληρωματικό έργο του όλου πιλοτικού, σκοπεύοντας στην ενίσχυση της ανάκτησης γλυκού νερού, ιδίως κατά τους φθινοπωρινούς-χειμερινούς μήνες του έτους όπου η απόδοση του MSS είναι μειωμένη λόγω περιορισμένης ηλιοφάνειας και χαμηλότερων θερμοκρασιών.

Η εν λόγω διάταξη αποτελείται από δύο σκέλη αυτό του MSS και εκείνου του PGH (**Εικόνα 52**). Πρακτικά, αφορά σε αλουμινένια ρείθρα μήκους 10-28 m και τα οποία βρίσκονται εγκατεστημένα κατάντη των ηλιακών πάνελ και της οροφής του θερμοκηπίου. Εκμεταλλευόμενα, την κεκλιμένη επιφάνεια των αποστακτήρων και της οροφής αντίστοιχα, οδηγούν το νερό της βροχής μέσω βαρύτητας στο υδραυλικό δίκτυο του καθαρού νερού. Το βρόχινο νερό πριν την είσοδό του στο δίκτυο φιλτράρεται μέσω πλεγμάτων στην είσοδό του, από τα φερτά αντικείμενα και τις ακαθαρσίες της πρώτης απορροής των επιφανειών (*first flush*) που μπορεί να αλλοιώσουν τη ποιότητα του καθαρού νερού του συστήματος. Από εκεί οδηγείται βαρυτικά στην δεξαμενή FW και έπειτα στη δεξαμενή άρδευσης, με εκτιμώμενη από τον κατασκευαστή του MSS, ποσότητα ανάκτησης 20 m³ ετησίως (55 L/day).

Ενδεικτικά αναφέρεται από τη διαθέσιμη βιβλιογραφία, πως η χρήση τεχνικών συλλογής βρόχινου νερού αποτελεί μία διαδεδομένη εναλλακτική για περιοχές που στερούνται επαρκών αποθεμάτων επιφανειακού ή και υπογείου νερού και δύναται να αυξήσουν έως και 30% το ποσοστό εδαφικής υγρασίας. Σε συνδυασμό με κατάλληλη λίπανση δύναται να αυξήσουν έως και έξι φορές την απόδοση των καλλιεργειών (Biazin *et.al.* 2012). Ακόμη αναφέρεται, πως δεν περιορίζεται η χρήση του βρόχινου για την άρδευση καλλιεργειών, η οποία επιπλέον μέσω κατάλληλων διατάξεων και απολύμανσης (Shofiul Islam Molla Jamal *et.al.* 2023) και τρόπων συλλογής και αποθήκευσης (Zhu *et.al.* 2004) μπορεί να πληροί ακόμη και τα όρια καταλληλότητας για πόσιμο νερό που θέτει ο ΠΟΥ. Ωστόσο κλείνοντας, πρέπει να σημειωθεί πως την τρέχουσα περίοδο, ο RC στο εξεταζόμενο πιλοτικό δεν λειτουργεί καθώς παρουσίασε εκτεταμένη φθορά λόγω των τοπικών καιρικών συνθηκών και διάβρωσης (κηλίδες σκουριάς), ενώ η επαναφορά του βρίσκεται υπό εξέταση.



Εικόνα 52: Η διάταξη του RC στο PGH (*αριστερά*) και το MSS (*δεξιά*)

4.3.4 Περιγραφή παραγωγικού θερμοκηπίου - *Productive Greenhouse (PGH)*

Σε έκταση 7 m x 28.8 m (201.6 m²), όπισθεν του συστήματος ηλιακής αφαλάτωσης αναπτύσσεται το έτερο σκέλος του HYDRO5. Αυτό αφορά, στο θερμοκήπιο καλλιέργειας τροπικών και υποτροπικών φυτών, ωφέλιμης επιφάνειας 145 m². Το έργο αυτό σκοπεύει μέσω της εκμετάλλευσης των τοπικών ιδιοτεροτήτων, τον έλεγχο των αβιοτικών παραμέτρων και την αξιοποίηση του παραγόμενου νερού, να μεγιστοποιήσει δυνητικά τα οικονομικά οφέλη του HYDRO5.

Το PGH (**Εικόνα 53**) είναι τύπου τροποποιημένου τοξωτού θερμοκηπίου αποτελούμενο από 13 τόξα πλάτους 7 m, τοποθετημένα σε διαστήματα 2.4 m. Η όλη δομή του είναι κατασκευασμένη από γαλβανισμένους χαλύβδινους σωλήνες (ορθοστάτες), με πλευρικό ύψος 2.6 m και μέγιστο ύψος 3.6 m. Το υλικό κάλυψης της οροφής του είναι εύκαμπτο πλαστικό (PE), ενώ πλευρικά στηρίζεται σε σκληρές πλάκες πλαστικών με υαλοβάμβακα για την επίτευξη θερμομόνωσης και σκίασης. Λόγω των τοπικών συνθηκών μακράς θερμής περιόδου και ήπιου χειμώνα, το PGH δεν έχει ανάγκη πρόσθετης θέρμανσης, ενώ οι κλιματικές παράμετροι εντός (θερμοκρασία και σχετική υγρασία), ρυθμίζονται αυτόματα μέσου του εγκατεστημένου συστήματος κινητής οροφής.



Εικόνα 53: Η κατασκευή του PGH

Κατά την εγκατάσταση του PGH και για να αποφευχθεί η είσοδος των ριζών του γειτονικού Ευκαλύπτου στην περιοχή του θερμοκηπίου και η “κλοπή” νερού και θρεπτικών από τις καλλιέργειες, τοποθετήθηκε στην αντίστοιχη πλευρά πλαστική μεμβράνη (PP) σε βάθος 120 cm. Σε περιόδους έντονης ηλιοφάνειας (Μάιος – Οκτώβριος) πραγματοποιείται σκίαση της οροφής με το ψεκασμό κατάλληλου υλικού με βάση τον ασβέστη και το στόκο, για την αποφυγή υπερθέρμανσης και πρόκλησης εγκαυμάτων στα φυτά. Η κατασκευή του τροπικού θερμοκηπίου της μονάδας πληροί τα εγκεκριμένα ελληνικά και ευρωπαϊκά πρότυπα όπως εναρμονίζονται στο θεσμικό μας δίκαιο μέσω της σχετικής ΥΑ του 2020 (ΦΕΚ Β΄ 5432/2020).

Προγενέστερα της εγκατάστασης του θερμοκηπίου, η περιοχή χαρακτηριζόταν ως ελαφρά βιομηχανική ζώνη λόγω των εγκαταστάσεων της δημοτικής αφαλάτωσης και των οχημάτων βαρέων τύπου που λειτουργούν εκεί. Επιπλέον, στο χώρο στοιβάζονταν βιομηχανικά απορρίμματα σωληνώσεων και λοιπών ειδών, ενώ φύονταν αυξημένης έκτασης αγριόχορτα και διαφόρων ειδών ζιζάνια. Σήμερα, το έδαφος συνίσταται από μίγμα του εγγενούς εδάφους με χώμα κατάλληλο για καλλιέργεια που εφαρμόστηκε κατά την κατασκευή του PGH, ενισχυμένο με κομποστ. Στο σύνολό του χαρακτηρίζεται ως αμμο-πηλώδες με μέσο pH 7.04, όπως εκτενώς θα παρουσιαστεί στην ενότητα των ποιοτικών παραμέτρων.

Περιγραφή καλλιέργειας του θερμοκηπίου στο HYDRO5

Εν συνεχεία, παραθέτονται στοιχεία για τα καλλιεργούμενα είδη στο PGH, όπου περιλαμβάνουν τα εξής:

Μπανάνα (*Musa x paradisiaca* L.)

Η μπανάνα συνιστά τον καρπό του αιθαλούς μονοκοτυλήδονου, πολυετούς, γιγάντιου βότανου που φτάνει τα 2-9 m ύψους. Είναι αποκλειστικά υποτροπικό φυτό που ανήκει στο γένος *Musa* της οικογένειας Musaceae (Singh *et. al.* 2016). Αναφέρεται ως “ψευδο-δέντρο” καθώς αναπτύσσει ψευδο-βλαστό που αποτελείται από έναν μαλακό ινώδη εσωτερικό πυρήνα τυλιγμένο με πολλά στρώματα περιβλήματος που συνήθως μετατρέπονται σε φύλλα στο ανώτερο τμήμα κατά την ωρίμανση (Akatwijuka *et.al.* 2022). Η κομοστέγη του φυτού αποτελείται από 6-20 φύλλα, ενώ το ριζικό του σύστημα συνίσταται σε πολυάριθμες ρίζες που φτάνουν τα 1.5-4.9 m βάθους (Nelson *et. al.* 2006). Πάνω από 300 είδη και 1000 ποικιλίες καλλιεργούνται σε περισσότερες από 130 χώρες, κυρίως σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές, ενώ έχει κέντρο προέλευσης τη ΝΑ Ασία. Η μπανάνα είναι το πιο δημοφιλές φυτικό προϊόν στην παγκόσμια αγορά μετά το ρύζι, το σιτάρι και τον αραβόσιτο (Singh *et.al.* 2016). Αποτελεί πλούσια πηγή υδατανθράκων, πρωτεϊνών, ανόργανων συστατικών (Justine *et.al.* 2022). Από οικονομικής άποψης, είναι η πέμπτη σημαντικότερη γεωργική καλλιέργεια σε παγκόσμιο επίπεδο, με παγκόσμια ετήσια παραγωγή άνω των 50 εκ. τόνων (Singh *et.al.* 2016). Η μπανανιά αναπτύσσεται όλο το χρόνο με διάρκεια ωρίμανσης 11-12 μήνες. Ευδοκμεί καλύτερα σε βαθιά και καλά αποστραγγιζόμενα εδάφη υψηλής υγρασίας, φτωχά σε οργανική ύλη και αερισμό και βέλτιστου εύρους pH 5.5-7.5, με προτιμότερα τα αμμο-πηλώδη εδάφη. Το φυτό επιπλέον απαιτεί πλήρη έκθεση στον ήλιο, αλλά αναπτύσσεται και με ποσοστό σκίασης έως και 80%, σε βέλτιστες θερμοκρασίες 26-30 °C, ενώ έχει ανάγκες ποτίσματος της τάξης των 38 L/m² εβδομαδιαίως (Nelson *et.al.* 2006).

Η φύτευση σε νέους αγρούς γίνεται κυρίως βλαστικά με τη μεταφύτευση παραφυάδων από ήδη εγκατεστημένες καλλιέργειες. Ενδεικνύεται η χρήση οργανικών λιπασμάτων από κτηνοτροφικά απόβλητα, λιπασμάτων με βάση το άζωτο και εδαφοβελτιωτικών ώστε να αυξηθεί η απόδοση της καλλιέργειας (Akatwijuka *et.al.* 2022). Η μπανάνα είναι ευάλωτη σε πλήθος ασθενειών όπως π.χ. η μαύρη κηλίδωση και η ανθράκωση, αλλά και εντόμων-παρασίτων όπως οι αφίδες, ο αλευρώδης, τα σκαθάρια και οι νηματώδεις. Η κυριότερη θανάσιμη ασθένεια προέρχεται από το μύκητα *Fusarium oxysporum f. sp. Cubense*. Πλήθος χημικών ή οργανικών σκευασμάτων και μεθόδων διατίθενται για την αντιμετώπιση κάθε ξενιστή, ωστόσο προτείνεται η επιλογή ανθεκτικών καλλιεργειών κατά τη φύτευση σε καλά αποστειρωμένα εδάφη με τις βέλτιστες συνθήκες καλλιέργειας και φυτοπροστασίας και η άμεση απομάκρυνση τυχόν μολυσμένων στελεχών (Nelson *et.al.* 2006). Στο PGH λόγω περιορισμένης έκτασης φύονται 25 φυτά σε 60 m² έκτασης και ως εκ τούτου αποδίδονται 2.5 m² ανά φυτό, έναντι των 4 m² ανά φυτό που απαιτούνται ως ιδανική χωροθέτηση (**Εικόνα 54-1**). Η παραγωγή υπολογίζεται σε 2.5 kg ανά m², η οποία εκτιμάται ως υψηλής ποιότητας καθώς είναι αποτέλεσμα οργανικής καλλιέργειας.

Ανανάς (*Ananas comosus*)

Ο ανανάς θεωρείται ποώδες, τροπικό και μονοκοτυλήδονο πολυετές φυτό που ανήκει στην οικογένεια Bromeliaceae με καταγωγή από τη ΝΔ Βραζιλία. Το μέγεθος του φυτού κυμαίνεται από περίπου 1-2 μέτρα σε ύψος και πλάτος. Ο καρπός παράγεται στο κέντρο της σπειροειδούς διάταξης των μακρόστενων αγκαθωτών φύλλων του. Ο βλαστός στο κέντρο του έχει μήκος περίπου 25-50 cm. Ένα ώριμο φυτό ανανά έχει περίπου 60-80 φύλλα, καθένα από τα οποία έχει σχήμα λόγχης (Wali, 2019). Μετά τις μπανάνες και τα εσπεριδοειδή, ο ανανάς είναι το τρίτο φρούτο που παράγεται περισσότερο στον κόσμο. Αποτελεί σημαντική πηγή βιταμινών, ενζύμων, αντιοξειδωτικών καθώς και ανόργανων συστατικών, ενώ η κατανάλωσή του παρέχει αντιφλεγμονώδη και αντικαρκινική δράση (Butu & Rodino, 2019). Το φυτό διαθέτει ριζικό σύστημα που φτάνει τα 0.8-1.5 m κάτω από το έδαφος και σε όλα τα στάδια του απαιτεί υψηλή υγρασία της τάξης του 94%, ενώ μπορεί να προσαρμόζεται σε περιβάλλοντα χαμηλών βροχοπτώσεων και ξηρασίας. Αναφέρεται ωστόσο ότι κατά το στάδιο ανάπτυξης και άνθησης απαιτεί 50-100 L/m² μηνιαίως, ενώ η βέλτιστη θερμοκρασία ανάπτυξης θεωρούνται οι 26.5 °C (Azevedo *et.al.* 2007). Η φύτευση γενικά γίνεται κατά τις περιόδους υψηλής βροχοπτώσεως αφού απομακρυνθούν τυχόν παλαιά φυτά ανανά για την αποφυγή μόλυνσης με νηματώδεις, ανά διαστήματα 30 cm σε διπλές σειρές

απόστασης των 50 cm. Για την αποτελεσματική ανάπτυξη απαιτείται η χρήση εδαφικού επιστρώματος όπως άχυρο ή χλόη και ο σχολαστικός περιορισμός των ζιζανίων καθώς ανταγωνίζονται το φυτό σε νερό, φως και θρεπτικά στοιχεία, αλλά φιλοξενούν και νηματώδεις, μύκητες και έντομα. Βασικός εχθρός του ανανά είναι ο αλευρώδης (*Trialeurodes vaporariorum*), που προσβάλλει κυρίως την κάτω επιφάνεια των φύλλων του. Έχει μεγάλες ανάγκες σε άζωτο και κάλιο, λιγότερες σε ασβέστιο και μαγνήσιο και πολύ μικρές σε φώσφορο και η λίπανση του παρέχεται είτε σε στερεά μορφή στο έδαφος, είτε σε υγρή μορφή στις μασχάλες των φύλλων. Κάθε φυτό καρποφορεί μόνο μια φορά, όπου μετά τη συλλογή των καρπών αφήνεται να αναπτυχθούν 1-2 παραφυάδες από το μητρικό φυτό οι οποίες θα καρποφορήσουν σε ένα έτος. Το βάρος του καρπού συνήθως κυμαίνεται από 1.4-2.7 kg με απόδοση 4-7 τόνους ανά στρέμμα. Στο PGH σήμερα φύονται 10 ανανάδες σε έκταση περίπου 5m², ενώ στο παρελθόν καλλιεργήθηκαν ακόμη 24 φυτά. **(Εικόνα 54-2).**

Κάρδαμο (*Elettaria cardamomum*)

Το κάρδαμο είναι ένα πολυετές βότανο της οικογένειας Zingiberaceae, με υπόγεια ριζώματα που βγάζουν φυλλώδεις βλαστούς (ψευδοστελέχη) και καρπούς. Καλλιεργείται αυξημένα στην Ινδία και τη Γουατεμάλα η οποία είναι ο μεγαλύτερος εξαγωγέας του (Bhattacharya, 2016). Αναπτύσσεται ιδανικά σε τροπικές συνθήκες με συνεχείς βροχοπτώσεις, που παρεμβάλλονται από περιόδους ηλιοφάνειας (Sengottuvelu *et.al.* 2011). Η σοδιά πρέπει να γίνεται υπό σκιά κατά τους καλοκαιρινούς μήνες σε γραμμές με απόσταση 15-20 cm και ανά 5-10 cm. Το ύψος των ώριμων φυτών κυμαίνεται από 1.5 έως 3.0 m, ενώ η ταξιανθία τους είναι πυκνή με κοντό μίσχο που φέρει 40-50 ανθοφόρους οφθαλμούς. Ο καρπός είναι μια τριπλοειδής κάψα με πολλούς σπόρους και με καστανέρυθρο έως σκούρο ροζ τοίχωμα. Το κάρδαμο πολλαπλασιάζεται είτε με σπόρους είτε με βλαστούς και αναπτύσσεται καλά κάτω από τη σκιά δέντρων σε υψόμετρο που κυμαίνεται από 1000 έως 2000 m. Για την επιτυχή καλλιέργεια ενδείκνυται μέση θερμοκρασία 6 °C κατά τους χειμερινούς και 25 °C κατά τους θερινούς μήνες. Τα καλά στραγγιζόμενα αργιλώδη εδάφη, πλούσια σε οργανική ουσία και άζωτο, χαμηλά σε φώσφορο και μέτρια σε κάλιο με pH εύρους 4.5-6.0 είναι ιδανικά για την καλλιέργειά του σε μεγάλες εκτάσεις, ενώ συνιστάται η εφαρμογή εδαφοβελτιωτικού. Είναι ένα εύκολα καλλιεργούμενο φυτό που ωστόσο απαιτεί τακτικό πότισμα. Για την ανθοφορία του απαιτούνται περίπου 2 χρόνια από τη φύτευσή του, ενώ η ωρίμανση των καρπών διαρκεί περίπου 4 μήνες και η συγκομιδή γίνεται μία φορά το χρόνο (Sarma *et al.* 2014). Το κάρδαμο αποκαλείται ως “ο βασιλιάς των μπαχαρικών”, καθώς οι αποξηραμένοι καρποί του διατίθενται στο εμπόριο ως ένα από τα πιο ακριβά και πολυτίμα μπαχαρικά (Anwar *et al.* 2016). Συνιστά σημαντική πηγή σιδήρου, ασβεστίου και βιταμινών Α και C, ενώ ακόμη περιέχει 2-3% αιθέριο έλαιο γνωστό για τις φαρμακευτικές του ιδιότητες ως αναλγητικό για το στομάχι, διουρητικό, καρδιοτονωτικό και αντιεμετικό. (Sarma *et.al.* 2014). Στο PGH καλλιεργούνται 30 φυτά κάρδαμου σε περίπου 10 m², τα οποία δεν έχουν έως τώρα αποδώσει καρπό αλλά έχουν αξιοποιηθεί για την παραγωγή αφεψήματος μετά από ξήρανση των φύλλων **τους (Εικόνα 54-3).**

Παπάγια (*Carica papaya*)

Το φυτό Παπάγια κατάγεται από την Τροπική Αμερική και θεωρείται δύσκολο στην καλλιέργειά του με απαιτήσεις σε υγρασία τους ζεστούς μήνες και ξηρασία τους χειμερινούς (Νάνος, 2019). Είναι πολυετές ποώδες φυτό ύψους 2-10 m, με ενιαίο, ημιξυλώδες, κοίλο, όρθιο βλαστό, ο οποίος καταλήγει σε ένα σύμπλεγμα μεγάλων, φοινικοειδών φύλλων με μίσχους μήκους 25-100 cm και αγγεία λατέξ σε όλους τους ιστούς του. Παράγει καρπούς με πράσινη επιδερμίδα και πρασινωπή έως λευκή σάρκα πλούσιους σε γαλακτώδες λατέξ, οι οποίοι καθώς ωριμάζουν παίρνουν βαθύ κίτρινο ή κόκκινο-πορτοκαλί. Η σάρκα του ώριμου καρπού είναι αρωματική, χυμώδης με πολυάριθμους μικρούς, ωσειδείς σπόρους συγκεντρωμένους στην κεντρική κοιλότητα (Singh *et.al.* 2011). Η Παπάγια ανήκει στην οικογένεια Caricaceae, όπου το είδος *Carica papaya* είναι το μόνο μεταξύ των 48 ειδών που παράγει εδώδιμους καρπούς. Καλλιεργείται σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές και αναγνωρίζεται ως είδος υψηλής διατροφικής, οικονομικής και φαρμακευτικής αξίας. Αναπτύσσεται καλά σε ηλιόλουστα, ζεστά και υγρά κλίματα σε υψόμετρο 1000m από την επιφάνεια της θάλασσας, και με βέλτιστο

εύρος θερμοκρασίας 25-30°C. Αναπτύσσεται από σπόρους οι οποίοι φυτεύονται σε αποστάσεις 2x2m, κατά την περίοδο του Σεπτεμβρίου-Οκτωβρίου, όπου επικρατούν υψηλές βροχοπτώσεις. Απαιτεί αμμο-πηλώδη εδάφη υψηλής γονιμότητας με καλή αποστράγγιση και βέλτιστο εύρος pH 6.5-7. Οι ανάγκες ποτίσματος του φυτού περιορίζονται σε μία φορά ανά μία και δύο εβδομάδες, το καλοκαίρι και το χειμώνα αντιστοίχως (Horti. Research complex, 2015). Το φυτό έχει υψηλές ανάγκες μικτής λίπανσης 20-20-15 με εφαρμογή 50 gr ανά δέντρο μηνιαίως, ενώ συνίσταται η εφαρμογή εδαφοβελτιωτικού και κοπριάς ετησίως. Απαραίτητος κρίνεται ο έλεγχος ζιζανίων και η απομάκρυνση των ξερών φύλλων που μπορεί να δράσουν ως φορείς παρασίτων και ασθενειών. Το δέντρο βλαστάνει σε διάστημα 4 μηνών από τη φύτευσή του ενώ οι καρποί απαιτούν διάστημα 130-165 ημερών για να ωριμάσουν. Χαρακτηρίζεται από τη γρήγορη απόδοση καρπών με σημαντική οικονομική αξία αλλά θεωρείται ευάλωτο σε ασθένειες και ξενιστές. Ένα μέσο φυτό αποδίδει 20-40 καρπούς βάρους 40-75 kg ανά περίοδο καρποφορίας, ενώ φυτεύονται 2500 φυτά ανά εκτάριο τα οποία είναι αποδοτικά για διάστημα 3 ετών (Horti. Research complex, 2015). Ο ώριμος καρπός είναι χαμηλός σε θερμίδες με υψηλό περιεχόμενο βιταμινών και μετάλλων. Το λευκού λατέξ συλλογείται και ξηραίνεται, βρίσκοντας εφαρμογές στη βιομηχανία επεξεργασίας τροφίμων και την φαρμακοβιομηχανία (Singh *et.al.* 2011). Στο PGH καλλιεργούνται συνολικά 6 δέντρα Παπάγιας σε έκταση 10 m², τα οποία στη πλειοψηφία του αποδίδουν αποτελεσματικά ώριμους καρπούς (**Εικόνα 54-4**).

Τζίντζερ (*Zingiber officinale*)

Το τζίντζερ αποτελεί το υπόγειο στέλεχος ή ρίζωμα του ποώδους τροπικού πολυετούς φυτού *Zingiber officinale*, που ανήκει στην οικογένεια Zingiberaceae και χρησιμοποιείται ιδιαίτερα ως μπαχαρικό (Vasala *et.al.* 2012). Αποτελεί ένα φυτό με ιδιαίτερη φαρμακευτική αξία με ευρεία χρήση στα κινέζικα φυτικά φάρμακα. (Ramadan *et al.* 2020). Καλλιεργείται σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές με καταγωγή από ΝΑ Ασία, ενώ η Ινδία αναφέρεται ως ο μεγαλύτερος εξαγωγέας του. Η φύτευσή πραγματοποιείται ιδανικά στις αρχές του Μαΐου ή εναλλακτικά κατά τον Φεβρουάριο-Μάρτιο με απόδοση 2000 kg/ha. Ο πολλαπλασιασμός του γίνεται από τα ώριμα ριζώματά του αφού κοπούν σε κομμάτια το 2-5 cm και ξηραθούν υπό σκιά, στη συνέχεια φυτεύονται σε σειρές με απόσταση 20-25 cm. Απαιτεί εδάφη με καλή αποστράγγιση, απαλλαγμένα από νηματώδεις στα οποία προστίθεται κομποστ ή κοπριά ως βασική λίπανση καθώς και εδαφοβελτιωτικό το οποίο προσθέτει οργανική ύλη, διατηρεί την υγρασία και περιορίζει τα ζιζάνια στο έδαφος. Απαιτεί μεγάλες ποσότητες νερού της τάξης των 1500 mm ανά κύκλο φύτευσης. Ωστόσο, τα στάσιμα νερά μπορούν να του προκαλέσουν σάπισμα των ριζών του λόγω ανάπτυξης μυκήτων με καταστρεπτικότερο το *Rhizium spp.* Τόσο ως μπαχαρικό όσο και το αιθέριο έλαιο που εξάγεται περιέχεται σε φαρμακευτικά και διατροφικά προϊόντα υψηλής αξίας καθώς παρουσιάζει, αντικαρκινικές-αντιοξειδωτικές, αντιυπερτασικές, αντιμικροβιακές και αντιφλεγμονώδεις ιδιότητες (Ramadan *et. al.* 2020). Στο PGH έως τώρα έχουν καλλιεργηθεί και συγκομιστεί 9 φυτά, των οποίων τα ριζώματα τεμαχίστηκαν και ξαναφυτεύτηκαν σε έκταση 8 m², ώστε να πολλαπλασιαστεί η καλλιέργειά τους (**Εικόνα 54-5**).

Πασιφλόρα (*Passiflora edulis*)

Το γένος των φυτών *Passiflora* περιλαμβάνει περίπου 520 είδη δικοτυλήδων φυτών της οικογένειας Passifloraceae (Taïwe & Kuete, 2017). Ανάμεσά του το είδος *Passiflora edulis* που κατάγεται από την τροπική Αμερική, αποτελεί μία πολυετή και ευρύτερα δημοφιλή ποικιλία, με εδωδιμους καρπούς που αξιοποιούνται ιδιαίτερα. Το φυτό φέρει ερμαφρόδιτα, μοναχικά μωβ άνθη που βρίσκονται στις μασχάλες των φύλλων, ενώ ο καρπός του είναι στρογγυλός ή ωοειδής, με σκληρό και λείο φλοιό, πορφυρού ή κίτρινου χρώματος. Η Πασιφλόρα είναι τροπικό-υποτροπικό φυτό, που αναπτύσσεται καλά σε υψόμετρο έως 2000 m με ετήσια βροχόπτωση 1000-2500 mm και βέλτιστη θερμοκρασία 20-30°C. Μπορεί να αντέξει περιορισμένα φαινόμενα παγετού το χειμώνα αλλά καταστρέφεται σε ακραίες συνθήκες. Προτιμά σχεδόν ουδέτερα εδάφη, με pH 6.0-7.0, καλή αποστράγγιση και υψηλή περιεκτικότητα σε οργανική ουσία. Η μέση απαίτηση σε θρεπτικά συστατικά του φυτού αναφέρεται ως N 150, P 100 και K 200 kg/ha και εξαρτάται από το στάδιο ανάπτυξής του. Τα φρούτα του πάθους πολλαπλασιάζονται με σπόρους, μοσχεύματα ή εμβολιασμό και φυτεύονται με πυκνότητα 1100 έως 1666

φυτά ανά εκτάριο, ενώ ένα υγιές φυτό αποδίδει 150-180 καρπούς/έτος σε διάστημα 1-2 έτη μετά τη φύτευσή. Το φυτό επίσης μπορεί να αναπτυχθεί επάνω σε πέργκολες φτάνοντας τα 2 m σε ύψος (Thokchom & Mandal, 2017). Τέλος έχει σημαντικό ρόλο στο τομέα τις φαρμακευτικής καθώς διαθέτει αναγνωρισμένα αγχολυτικές, αντιφλεγμονώδεις, ηρεμιστικές, αντιοξειδωτικές, αντισπασμωδικές, αντιοξειδωτικές και νευροπροστατευτικές ιδιότητες (Taiwe & Kuete, 2017). Στο PGH παλαιότερα αναπτύχθηκαν 46 φυτά *Passiflora edulis*, ενώ πλέον υπάρχουν μόνο δύο φυτά του συγκεκριμένου είδους. Ωστόσο σήμερα καλλιεργείται σε πέργκολα περίπου 8 m² το είδος *Passiflora Alata*, το οποίο δεν έχει αποδώσει εδωδιμους καρπούς αλλά τα άνθη του είναι ιδιαίτερης καλλωπιστικής αξίας (**Εικόνα 54-2**).

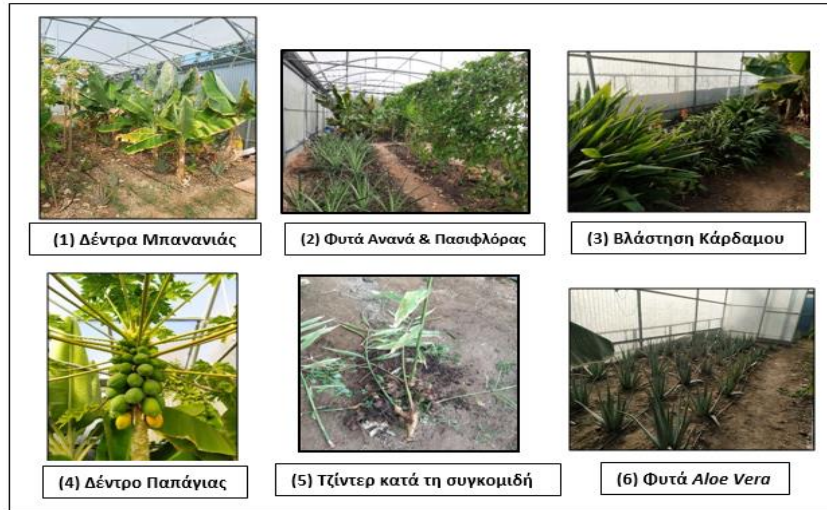
Αλόη (*Aloe Vera*)

Το γένος Αλόη ανήκει στην οικογένεια Asphodelaceae που περιλαμβάνει πάνω από 600 είδη ανθοφόρων παχύφυτων. Αναπτύσσεται σε θερμά, ξηρά κλίματα και καλλιεργείται σε τροπικές, υποτροπικές και ξηρές περιοχές ανά τον κόσμο. Μεταξύ όλων των ειδών της η *Aloe Vera* ("Αλόη η γνήσια"), είναι το πιο γνωστό είδος, κυρίως λόγω των φαρμακευτικών ιδιοτήτων της. Είναι αυτοφυές αειθαλές πολυετές φυτό με καταγωγή από την Αραβική χερσόνησο.

Αναπτύσσεται καλά σε αμμώδη εδάφη φτωχά σε θρεπτικά συστατικά, βέλτιστου εύρους pH 7.0-7.6 και με καλή αποστράγγιση, ενώ απαιτεί συνεχή ηλιακή φως. Η βέλτιστη θερμοκρασία ανάπτυξης της είναι 20-25°C, ενώ δεν ευδοκιμεί σε περιβάλλοντα ακραία χαμηλών θερμοκρασιών, καθώς είναι σαρκώδες και αποτελείται κατά 95% από νερό, γεγονός που το καθιστά ευάλωτο στον παγετό. Έχει περιορισμένες ανάγκες άρδευσης και φροντίδας και είναι ανθεκτικό στις ασθένειες και τα παράσιτα.

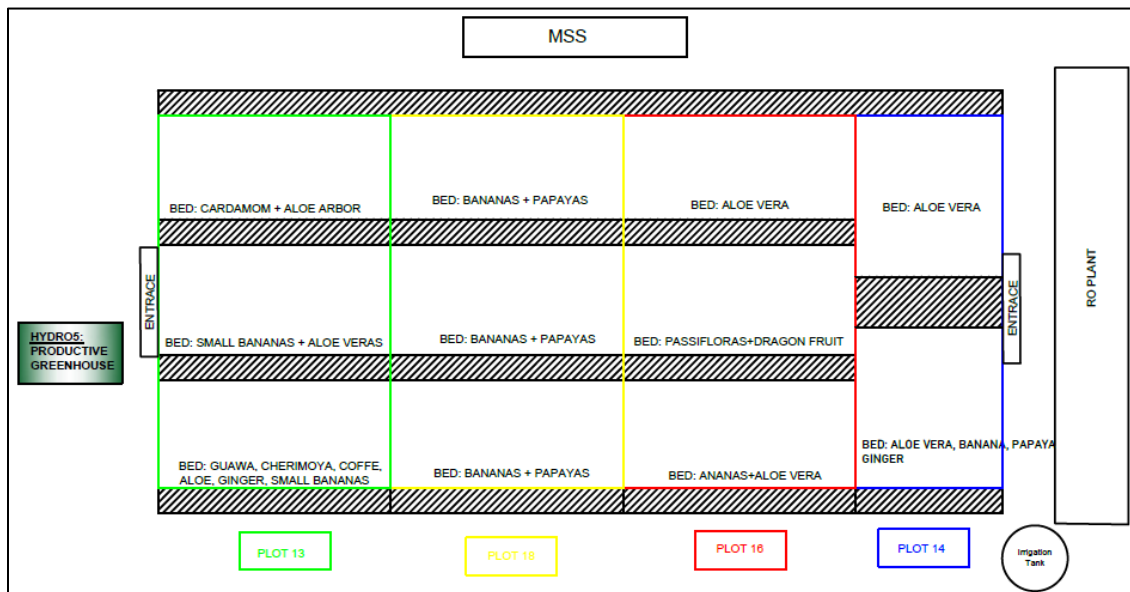
Απαιτεί επίσης λίγη ή καθόλου λίπανση, κυρίως με οργανικά λιπάσματα χαμηλής περιεκτικότητας σε άζωτο, όπως ξηρή ζωική κοπριά ή κομπόστ. Η φύτευση της αλόης πραγματοποιείται τον Μάρτιο έως τον Οκτώβριο, με παραφυάδες μήκους 20 έως 25 cm σε πυκνότητα 2.000 φυτά/ha. Απαιτεί περίπου 2.5 έως 3 χρόνια για την πλήρη ανάπτυξη της και η συγκομιδή των φύλλων της γίνεται όταν είναι έτοιμα, κατά προτίμηση την άνοιξη για την αποφυγή μυκητολογικών μολύνσεων (aloevera-hellas.gr). Το φυτό χαρακτηρίζεται από τριγωνικά, σαρκώδη οδοντωτά φύλλα με χρώμα γκριζοπράσινο έως έντονο πράσινο, ενώ δεν αναπτύσσει βλαστό. Τα φύλλα αποτελούνται από τρία στρώματα: το εσωτερικό τζελ, το κίτρινο εκχύλισμα και το εξωτερικό παχύ στρώμα 15-20 κυττάρων (Christaki & Florou, 2010). Το φυτό φτάνει σε ύψος περίπου 60 έως 100 cm, ενώ το καλοκαίρι αναπτύσσει κίτρινα άνθη ύψους έως 90 cm. Εκτός από καλλωπιστικούς σκοπούς, η *Aloe Vera* καλλιεργείται ευρέως για την εμπορική εκμετάλλευση των φύλλων της. Η κολλώδης ουσία που περιέχεται στα φύλλα του φυτού, γνωστή ως *Aloe gel*, χρησιμοποιείται για φαρμακευτικούς και καλλυντικούς σκοπούς, λόγω της περιεκτικότητάς της σε πολυσακχαρίτες, ένζυμα, αμινοξέα, λιπαρά οξέα, μέταλλα, σαπωνίνες, βιταμίνη A, C, E, ολόκληρη την ομάδα των βιταμινών B κ.λπ. (Surjushe *et.al.* 2008). Επιπλέον, το κίτρινο-καφέ εκχύλισμά που προέρχεται από τη σύνθλιψη των φύλλων του φυτού, γνωστό ως *Aloe latex*, περιέχει φαινολικές ενώσεις, όπως η Αλοΐνη, η Εμοδίνη και η Αλοεσίνη, που αποτελούν ένα πολύ ισχυρό καθαρτικό. Ωστόσο, η υψηλή κατανάλωση αυτών δεν θεωρείται ασφαλής λόγω δυσμενών παρενεργειών στην υγεία (Javed & Rahman, 2014). Οι ενεργές ιδιότητες του φυτού παρέχουν πολλαπλά οφέλη, και έτσι χρησιμοποιείται ευρέως σε σαμπουάν, τζελ και αλοιφές. (Christaki & Florou, 2010). Το τζελ Αλόης χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα σε προϊόντα περιποίησης και συνδυάζεται με γλυκερίνη για την παραγωγή σαπουνιού. Στο PGH καλλιεργούνται σήμερα περίπου 180 φυτά *Aloe Vera* σε έκταση 55 m² (**Εικόνα 54-6**), τα οποία αξιοποιούνται επιτυχημένα για την παραγωγή σαπουνιού, μαρμελάδας και αλοιφών στην τοπική αγορά. Επιπλέον φύονται 10 φυτά του είδους *Aloe Arborescens*, που χαρακτηρίζεται από πολλά μικρότερα και κατσαρά φύλλα με όμοιες ιδιότητες και καλλιεργητικές απαιτήσεις.

Παρακάτω αποτυπώνεται η καλλιέργεια των φυτών που περιγράφηκαν, όπως αναπτύσσονται σήμερα στο PGH, μέσω αξιοποίησης του παραγόμενου FW από το MSS.



Εικόνα 54: Η καλλιέργεια στο θερμοκήπιο του HYDROS

Το τροπικό θερμοκήπιο της μονάδας είναι χωρισμένο σε τέσσερα πεδία (plots), στα οποία μοιράζονται τα είδη της καλλιέργειας που προαναφέρθηκαν. Στο **Διάγραμμα 11**, παρουσιάζονται τα ακριβή πεδία του και τα καλλιεργούμενα φυτά σήμερα. Σημειώνεται, πως καλλιεργούνται επιπροσθέτως τα είδη *Hylocereus undatus* (Dragon Fruit), *Annona cherimola* (Cherrimoya tree), *Psidium guajava* (Guava), *Colocasia esculenta* και *Coffea Arabica* (Arabian Coffee) σε μικρό αριθμό ατόμων ως πειραματική καλλιέργεια και χωρίς να αποφέρουν συγκομιδή έως τώρα. Ακόμη κατά το παρελθόν αναπτύχθηκαν και συγκομίστηκαν επιτυχώς 15 φυτά φυσαλίδας (*Physalis peruviana*).



Διάγραμμα 11: Σχέδιο κάτοψης PGH με αναφορά των πεδίων και των αντίστοιχων καλλιεργειών.

Ανοχή στην αλατότητα του αρδευτικού νερού

Τα κύρια φυτά που καλλιεργούνται σήμερα στο PGH, χαρακτηρίζονται ως επί το πλείστον ως μετρίως ανθεκτικά στην αλατότητα του νερού άρδευσης. Ωστόσο, οι μπανανιές και οι παπάγιες αποτελούν τα πιο ευάλωτα φυτά της καλλιέργειας του HYDRO5, τα οποία χαρακτηρίζονται ως ευαίσθητα και ελαφρώς ευαίσθητα, αντίστοιχα (anrcatalog.ucanr.edu). Ιδανικές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας του νερού αποτελούν σε αντιστοιχία τα 1 mS/cm και 1.5 mS/cm για την μπανάνα και την παπάγια. Ο ρυθμός ανάπτυξης της παπάγιας μειώνει σημαντικά σε τιμές > 2 mS/cm (De Lima-Neto *et.al.* 2016) και επέρχεται νέκρωση στα φυτά μπανάνας σε τιμές > 3 mS/cm (Harthy *et.al.* 2016). Η αλόη αν και ανθεκτική στην ξηρασία και τις προσβολές, τα όρια ανθεκτικότητάς της στην αλατότητα δεν ξεπερνούν το εύρος EC των 3.5 – 4 mS/cm. Τα μορφολογικά της χαρακτηριστικά (ύψος, βάρος, βάρος φύλλων, περιεχόμενο τζελ) επηρεάζονται δυσμενώς αναλογικά με την αύξηση της EC του αρδευτικού νερού και το διάστημα χρήσης αυτού. (Moghbeli *et.al.* 2012, Souguir *et.al.* 2015). Ο ανανάς χαρακτηρίζεται ως μετρίως ανθεκτικός στην αλατότητα καθώς έδειξε ότι μπορεί να επιβιώσει σε EC έως 3 mS/cm και η ανθεκτικότητα του αυξάνεται με σταδιακή αύξηση της αλατότητας έως αυτή την τιμή. Ωστόσο σε υψηλότερα επίπεδα το φυτό καταστρέφεται πλήρως (Hamed & Ali, 2007). Το είδος *P. edulis*, το τζίντερ και το κάρδαμο τέλος έδειξαν ανοχή σε επίπεδα EC έως και 2.14 mS/cm (Moura *et.al.* 2016), 4 mS/cm (Chourasia *et.al.* 2020) και 5.5 mS/cm (Στιβακτάκης, 2016).

4.3.5 Περιγραφή αρδευτικού δικτύου του PGH

Η ανάπτυξη της καλλιέργειας πραγματοποιείται υπό τους άξονες της οργανικής γεωργίας και της γεωργίας ακριβείας με σκοπό τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την έκπλυση χημικών ουσιών, την παραγωγή υψηλής διατροφικής αξίας αγαθών και την ελαχιστοποίηση της χρήσης αρδευτικού νερού.

Το αρδευτικό δίκτυο του PGH βασίζεται σε τεχνολογία χαμηλού κόστους που αναπτύσσει η εταιρεία *Agenso*. Συνιστά μία τεχνολογία απομακρυσμένης διαχείρισης και ελέγχου, για την επιτυχή άρδευση των καλλιεργειών βάσει των αναγκών τους, και την παρακολούθηση των κλιματικών και φυσικοχημικών παραμέτρων που αφορούν τα φυτά. Η όλη διεργασία συντονίζεται από την εφαρμογή *Ardeusis* (**Εικόνα 55**).

Το σύστημα λειτουργεί αδιάκοπα με ελαχιστοποιημένες ενεργειακές απαιτήσεις, καθώς βασίζεται σε ασύρματο δίκτυο internet, ενώ οι κόμβοι των αισθητήρων φορτίζονται από τα μικρά εγκατεστημένα σε αυτούς ηλιακά πάνελ. Αποτελεί λοιπόν, ένα εύχρηστο και αποτελεσματικό μη ενεργοβόρο εργαλείο “ευφυούς” γεωργίας, που δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να διαχειρίζεται δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, απομακρυσμένα, καθώς και να επεξεργάζεται χρονοσειρές των μετρήσεων κάθε αισθητήρα.



Εικόνα 55: Αποτύπωση του κεντρικού μενού του λογισμικού *Ardeusis* για το PGH (ardeusi.gr)

Η άρδευση του PGH, επιτυγχάνεται χάρη το εγκατεστημένο σύστημα αισθητήρων υγρασίας εδάφους σε κάθε πεδίο του. Οι αισθητήρες εγκαταστάθηκαν σε καθένα από τα 4 πεδία του PGH, σε συνέχεια μετρήσεων με τη χρήση тенσιόμετρου ώστε να οριστεί το εύρος βέλτιστης υγρασίας με βάση την υδατοχωρητικότητα (FC) , την υδατοϊκανότητα (MAD) και το σημείο μόνιμης μάρανσης του εδάφους (PWP). Έπειτα και σε συνδυασμό με δοκιμές αποστράγγισης δημιουργήθηκε στο *Ardeusis*, ενότητα για κάθε πεδίο του PGH όπου τέθηκε το επιθυμητό εύρος εδαφικής υγρασίας (**Εικόνα 56**), λαμβάνοντας πάντα υπόψη και τις ανάγκες της εκάστοτε καλλιέργειας.

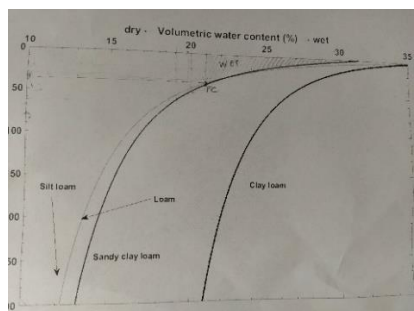


Εικόνα 56: Αποτύπωση μέσω άρδευσης των παραμέτρων εδαφικής υγρασίας για κάθε πεδίο του PGH

Αναλυτικότερα, τα σημεία (%) FC, TAW, MAD και PWP, όπως προσδιορίστηκαν αφορούν συνοπτικά:

- Το σημείο FC (Field Capacity) αναφέρεται στη μέγιστη ποσότητα υγρασίας (νερού) που μπορεί να συγκρατήσει το έδαφος 2-3 ημέρες έπειτα από πλήρες πότισμα (κατάσταση κορεσμού) και αφού ολοκληρωθεί η αποστράγγιση των μεγάλων πόρων του εδάφους λόγω βαρύτητας. Θεωρείται το ιδανικό περιεχόμενο νερού για την ανάπτυξη το φυτών, και καλείται τριχοειδές νερό γιατί συγκρατείται στους τριχοειδείς πόρους του εδάφους όπου είναι διαθέσιμο για τα φυτά. Πάνω από το FC, το νερό είναι διαθέσιμο στα φυτά μόνο για σύντομο χρονικό διάστημα (1-3 ημέρες) και στη συνέχεια χάνεται με την αποστράγγιση.
- Το σημείο TAW (Total available water) αναφέρεται στην συνολική ποσότητα νερού που είναι διαθέσιμη στα φυτά, η οποία εκτιμάται ως η διαφορά της υγρασίας του εδάφους μεταξύ FC και PWP.
- Το σημείο MAD (Management allowable depletion) αναφέρεται στο κλάσμα του διαθέσιμου νερού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα φυτά χωρίς “κόστος”, προτού αρχίσουν να βιώνουν στρες. Είναι ωστόσο αποδεκτό να διατηρείται το νερό του εδάφους κάτω από το σημείο MAD, αλλά σε κάποιο εμπειρικό όριο όπου δεν υπάρχουν ενδείξεις καταπόνησης στα φυτά.
- Το σημείο PWP (Permanent wilting point) αναφέρεται στο όριο όπου τα φυτά αδυνατούν να αντλήσουν το νερό με ρυθμό αρκετά γρήγορο, λόγω ισχυρών δυνάμεων συνοχής (νερό-νερό) και συνάφειας (νερό-έδαφος), με αποτέλεσμα να μη μπορούν να συμβαδίζουν με τη ζήτηση λόγω διαπνοής. Αν το σημείο διατηρηθεί για αρκετές ημέρες και δεν γίνει άρδευση το φυτό τελικά θα πεθάνει. (Datta *et.al.* 2017)

Με τη χρήση λοιπόν тенσιόμετρου για την μέτρηση του εδαφικού δυναμικού και τη βοήθεια τις αντιπροσωπευτικής καμπύλης για άμμο-πηλώδους έδαφος (**Εικόνα 57**), ορίστηκαν τα συγκεκριμένα σημεία για τη ρύθμιση της άρδευσης κάθε πεδίου.



Εικόνα 57: Χρήση тенσιόμετρου (αριστερά) και της αντιπροσωπευτικής καμπύλης εδαφών (δεξιά) για τον προσδιορισμό του βέλτιστου εύρους εδαφικής υγρασίας στα πεδία του PGH

Το тенσιόμετρο ως όργανο, μετράει την αρνητική τάση που πρέπει να ασκήσει το φυτό ώστε να προσλάβει το νερό υπερνικώντας τη μυζητική δύναμη του εδάφους. Η μυζητική δύναμη του εδάφους εκφράζει τη δύναμη συγκράτησης του νερού στο έδαφος και ως εκ τούτου την αρνητική πίεση που πρέπει να εφαρμόσουν τα φυτά για να προσλάβουν το νερό. Με άλλα λόγια το тенσιόμετρο μετρά τη διαφορά υδατικού δυναμικού, σε centibars (cbs), μεταξύ του εδάφους και αυτού, αντιπροσωπεύοντας τη ρίζα του φυτού. Το νερό ρέει από το υψηλό στο χαμηλό δυναμικό έως ότου να επιτευχθεί ισορροπία. Όταν το έδαφος είναι πλήρως ποτισμένο και κορεσμένο σε νερό η ένδειξη του μανομέτρου που φέρει είναι 0 cbs (κατάσταση ισορροπίας). Καθώς το έδαφος ξηραίνεται λόγω αποστράγγισης ή δέσμευσης νερού από τα φυτά, το νερό από τον αεροστεγή σωλήνα του тенσιόμετρου αρχίζει να ρέει προς το έδαφος και δημιουργείται κενό μέσα σε αυτόν αυξάνοντας την ένδειξη του μανομέτρου. Εάν το χώμα ποτιστεί, νερό θα επιτρέψει μειώνοντας και πάλι την ένδειξη του μανομέτρου. Τυπικές τιμές για το σημείο FC, μετά από 1-3 στράγγισης του κορεσμένου εδάφους αναφέρονται τα (-)10 με (-)25 cbs. Η χαμηλότερη τιμή αφορά αμμώδη εδάφη όπου δεν συγκρατείται μεγάλη ποσότητα νερού, ενώ αντίθετα η υψηλότερη αφορά εδάφη με κοκκώδη δομή. Στο σημείο PWP το μανόμετρο λαμβάνει τυπικά τιμές \geq (-)80 cbs (lawr.ucdavis.edu). Κατά τη διαδικασία, το тенσιόμετρο πληρώθηκε με νερό και τοποθετήθηκε σε βάθος των 20-30 cm στη θέση όπου επρόκειτο να εγκατασταθεί ο αισθητήρας σε κάθε πεδίο, καθώς στο βάθος αυτό βρίσκεται η ζώνη πυκνού ριζώματος των φυτών του PGH που απορροφά το 50% του διαθέσιμου νερού. Το χώμα ποτίστηκε πλήρως και αφέθηκε για 3 μέρες ώστε να πραγματοποιηθεί πλήρης στράγγιση. Έπειτα και βάσει της ένδειξης του тенσιόμετρου και τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους ορίστηκε το σημείο FC για κάθε πεδίο. Στη συνέχεια το όργανο αφέθηκε έως πλήρους ξήρανσης όπου η ένδειξη εκεί αντιστοιχήθηκε στο σημείο PWP και ορίστηκε η αντίστοιχη τιμή εδαφικής υγρασίας βάσει της καμπύλης. Από τη διαφορά των δύο βρέθηκε το ποσοστό διαθέσιμου νερού (TAW), στο 50% του οποίου ορίστηκε το σημείο MAD, με εξαίρεση το πεδίο του θερμοκηπίου που καλλιεργούνται μόνο δέντρα για τα οποία ορίστηκε στο 80% καθώς διαθέτουν βαθύτερο ριζικό σύστημα. Η δόση άρδευσης (απαιτούμενα mm νερού ανά πότισμα) επίσης υπολογίστηκε από τον εξής τύπο (soilsensor.com):

$$(FC - PWP/100) * RD * MAD * 0.9 \quad (3),$$

λαμβάνοντας υπόψη 90% απόδοση για στάγδην άρδευση και όπου RD το βάθος ριζώματος κάθε καλλιέργειας το οποίο ελήφθη ίσο με τα 250 mm, βάσει του βάθους όπου τοποθετήθηκε το αισθητήριο εδαφικής υγρασίας. Το ελάχιστο όριο τώρα βάσει του οποίου θα ενεργοποιείται η ηλεκτροβάννα για το πότισμα τέθηκε μετά από παρατηρήσεις στο σημείο εκείνο που το ποσοστό της εδαφικής υγρασίας κάθε πεδίου σταθεροποιείται, καθώς εκεί το φυτό φαίνεται να μην “τραβάει” άλλο νερό από το έδαφος. Η εν λόγω τάση όπως είναι αναμενόμενο εξαρτάται από την εποχή του έτους. Επιπλέον η διάρκεια της άρδευσης υπολογίστηκε από το λόγο της δόσης άρδευσης προς την ταχύτητα διήθησης του νερού στο έδαφος, η οποία μετρήθηκε στο πεδίο.

Βάσει λοιπόν, του εύρους εδαφικής υγρασίας κάθε πεδίου και των συνεχών (ανά 10-30 min) μετρήσεων που στέλνουν οι αισθητήρες, όταν αυτή πέσει κάτω από το ελάχιστο όριο που τέθηκε ενεργοποιείται το σύστημα άρδευσης και παρέχεται νερό από τις αντίστοιχες εγκατεστημένες ηλεκτροβάνες σε κάθε πεδίο. Οι εν λόγω ηλεκτροβάνες είναι κοινού τύπου αυτόματου ποτίσματος (**Εικόνα 58**).

Το πότισμα γίνεται σε παρτίδες του ενός λεπτού έως ότου η εδαφική υγρασία ανέλθει εντός του ορισμένου εύρους. Το νερό παρέχεται μέσω δικτύου σταλακτών διαμέτρου 16 m από άκρη σε άκρη με την βοήθεια του πιεστικού μηχανήματος (**Εικόνα 58**), που “πρεσάρει” νερό από τη δεξαμενή άρδευσης όταν καταλάβει πως η πίεση του δικτύου έχει πέσει κάτω από 3 bar, λόγω του ανοίγματος της εκάστοτε ηλεκτροβάνας.



Εικόνα 58: Το πιεστικό μηχάνημα άρδευσης με το ενσωματωμένο ροόμετρο στο PGH (αριστερά) και Εγκατεστημένη ηλεκτροβάνη άρδευσης πεδίου του PGH (δεξιά)

Η στάθμη του διαθέσιμου νερού στη δεξαμενή άρδευσης όπως και τα ποιοτικά του χαρακτηριστικά συμπεριλαμβανομένων της θερμοκρασίας, διαλυτών στερεών και pH παρακολουθείται ομοίως μέσω της εφαρμογής *Ardeusis*, χάρης των αισθητήρων που βρίσκονται εγκατεστημένοι στη δεξαμενή. Σε περίπτωση που το διαθέσιμο νερό, προερχόμενο από το σύστημα αφαλάτωσης, πέσει κάτω από την ελάχιστη στάθμη στη δεξαμενή, συμπληρώνεται νερό από το δίκτυο με τη βοήθεια της ηλεκτροβάνας που είναι εγκατεστημένη στην βρύση, εξωτερικά. Επιπλέον, το *Ardeusis* σε περίπτωση μη επιθυμητής ποιότητας νερού, λ.χ. αύξηση της αλατότητας, ειδοποιεί το χρήστη για την διακοπή παροχής νερού βάσει των μετρήσεων TDS από τη δεξαμενή άρδευσης καθώς και νωρίτερα από τη δεξαμενή FW όπου υπάρχει αντίστοιχος αισθητήρας. Η ποσότητα τώρα αρδευτικού νερού που καταναλώνεται στο σύνολό του καταγράφεται μέσω του εγκατεστημένου ροόμετρου. Οι παράμετροι θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ανέμου, έντασης ηλιακής ακτινοβολίας παρακολουθούνται χάρης του εσωτερικού μετεωρολογικού σταθμού, ομοίως χαμηλού κόστους (**Εικόνα 59**).



Εικόνα 59: Ο μετεωρολογικός σταθμός του PGH

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα μέρη που απαρτίζουν το αρδευτικό δίκτυο του PGH.

Όργανο	Τύπος – Μοντέλο -Χαρακτηριστικά	Κόστος
Δεξαμενή Άρδευσης	3m ³ , Ύψος 200 cm, Διάμετρος 145 cm, Υλικό: ανακυκλώσιμο πολυαιθυλένιο (LLDPE)	500 €
2 αισθητήρες στάθμης*	XKC-Y25 5-12V NPN Intelligent Non-Contact Liquid Level Sensor	11.5 €/μονάδα
Αισθητήρας TDS & Θερμοκρασίας*	Μοντέλο AGIoT-0070 Συνδεσιμότητα 2G/4G/GPRS/EDGE/NB-IoT	≈ 20 €
Αισθητήρας pH*	Μοντέλο AGIoT-1030, Συνδεσιμότητα 2G/4G/GPRS/EDGE/NB-IoT	≈ 20 €
Τενσιόμετρο	IRROMETER Tensiometer SR 212	≈ 150 €
Πιεστικό Μηχάνημα	Aquastrong EP m37, 0.5 hp, Hmax 38.5 m, Qmax 35 L/min	60 €
Αρδευτικό δίκτυο σταλακτών	Ø 16, διάτρητος πλαστικός (PE) σταλακτηφόρος σωλήνας, Απόσταση σταλακτη 20cm	0.3 €/m
5 Ηλεκτροβάνες ποτίσματος	Hunter Industries PGV-100G, 1" 24V (Σύστημα ARDEUSI-002SMEV)	18 €
5 Φ/Β Πάνελ *	Διαστάσεις: 17cm x 11,5cm, Απόδοση: 1000W/m ² Τάση: 5V DC (Σύστημα ARDEUSI-002SMEV)	950 € (x 5 πακέτα του Μοντέλου AGIoT-1560)
5 Αισθητήρες εδαφικής υγρασίας*	Ακρίβεια μετρήσεων ±0,03m ³ /m ³ (Σύστημα ARDEUSI-002SMEV)	
5 Μονάδες Καταγραφής* (Τροφοδοσίας μέσω Φ/Β)	Διαστάσεις: 11,5cm x 9cm x 5,5cm (Σύστημα ARDEUSI-002SMEV)	
1 Μετεωρολογικός Σταθμός*	Misol weather station with RS485i Διαστάσεις: 49cm x 33cm	123 €

*Δωρεάν προσφορά από την συνεργαζόμενη εταιρεία AGENSO στα πλαίσια του προγράμματος

Πίνακας 23: Εξοπλισμός αρδευτικού συστήματος PGH

Ως προς το κομμάτι απόδοσης της καλλιέργειας τώρα, στα πλαίσια της οργανικής γεωργίας οι ανάγκες των φυτών σε θρεπτικά καλύπτονται με την εφαρμογή βασικής λίπανσης με την χρήση χωνεμένης ζωικής κοπριάς και κομποστ, καθώς και μέσω επιφανειακής λίπανσης με εδαφικά ή υδατοδιαλυτά οργανικά σκευάσματα και βιοενισχυτές. Μυκητολογικές και λοιπές παρασιτικές παθήσεις προλαμβάνονται μέσω του ψεκασμού χαλκούχων σκευασμάτων στα φυτά, ενώ σε περιπτώσεις παρασίτων εφαρμόζονται σκευάσματα όπως φυσική πυρεθρίνη, παραφινέλαιο, Βάκιλος Θουριγγίας ή άλατα καλίου. Στο σύνολο τους οι συγκεκριμένες ενέργειες παραγματοποιούνται βάσει της καθημερινής παρατήρησης, των εδαφολογικών αναγκών και μέσω κατευθυντήριων από τον υπεύθυνο γεωπόνο.

Στον **Πίνακα 41**, σχετικά με το πλάνο εργασιών και αντιμετώπισης των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν, αναφέρονται αναλυτικά τα έως σήμερα εφαρμοσμένα σκευάσματα, το πεδίο και τη συχνότητα αυτών. Η απόδοση της καλλιέργειας του τροπικού θερμοκηπίου της μονάδας, παρουσιάζεται επίσης αναλυτικά στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Απώτερος στόχος του όλου εγχειρήματος είναι η ανάδειξη του πεδίου εφαρμογής και της αποτελεσματικότητας ως προς την αξιοποίηση μη συμβατικών πόρων νερού για άρδευση. Τέλος, υπό το πρίσμα του άξονα *WEFE*, στοχεύεται η ενίσχυση της τοπικής κοινωνίας και αγοράς, μέσω διατροφικών αγαθών ή πρώτων υλών τα οποία παρήχθησαν στα πλαίσια της βιωσιμότητας και της περιβαλλοντικής προστασίας. Συγκεκριμένα, τα KPIs που αφορούν την παραγωγή τροπικών φρούτων και αξιοποιήσιμης φυτικής βιομάζας από το θερμοκήπιο της εγκατάστασης ανέρχονται σε 500kg. Παράλληλη δέσμευση προς την κοινωνία αποτελεί η αφιλοκερδής προσφοράς τους σε τοπικές υπηρεσίες, φορείς, οργανώσεις, σχολεία, καταστήματα και κατοίκους της Τήνου κατά τη διάρκεια του προγράμματος, κλείνοντας έτσι το κύκλο ανάκτησης αρδευτικού νερού και προβάλλοντας το έργο του HYDRO5.

5^ο Κεφάλαιο - Παράθεση και ανάλυση αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται και συζητούνται τα αποτελέσματα λειτουργίας και απόδοσης της εγκατάστασης HYDRO5, όπως προέκυψαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσης. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά του παραγόμενου νερού και εδάδιμου αλατιού, από το σύστημα ηλιακής αφαλάτωσης, όπως συλλέχθηκαν στο πεδίο και αναλύθηκαν εργαστηριακά. Αξιολογούνται επιπλέον τα αποτελέσματα ανάπτυξης και απόδοσης της καλλιέργειας του HYDRO5 ως προς την επάρκεια και την καταλληλότητα του παραγόμενου νερού, αλλά και η κατάσταση του εδάφους του PGH βάσει βιβλιογραφικών και εργαστηριακών δεδομένων. Τέλος, αποτυπώνεται το πλάνο ελέγχου και συντήρησης της εγκατάστασης, αναγνωρίζονται τα προβλήματα και οι τρόποι που αντιμετωπίστηκαν και γίνεται προσπάθεια οικονομικής αξιολόγησης για το σύνολο της εγκατάστασης με σκοπό την τελική αναγνώριση της αποτελεσματικότητας του υπό μελέτη συστήματος.

5.1 Ποιοτικά χαρακτηριστικά παραγόμενου νερού

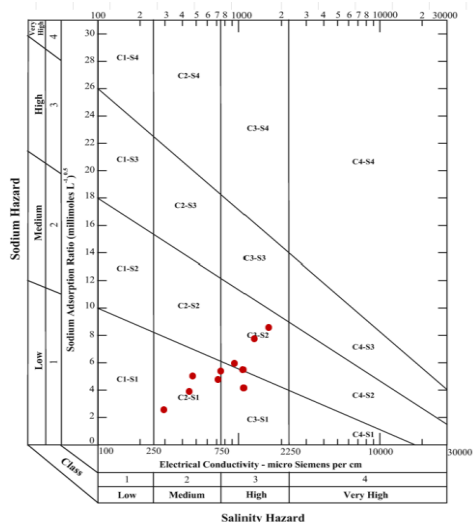
Για την εργαστηριακή ανάλυση του παραγόμενου νερού από το MSS, συνολικά διενεργήθηκαν 21 δειγματοληψίες ανά τρεις διακριτές περιόδους λειτουργίας κατά τα διαστήματα 6/2021-9/2021, 9/2022-12/2022 και 1/2023-6/2023. Έως τον Δεκέμβριο του 2022, λόγω τεχνικών προβλημάτων που σχετιζονταν με κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, φθορά και συντήρηση των αποστακτήρων (**Ενότητα 5.8**) επιβαρύνθηκε κατά περιόδους η ομαλή λειτουργία του συστήματος και επηρεάστηκε ως εκ τούτου η ποιότητα του ανακτώμενου νερού. Στον **Πίνακα 24** παρατίθενται τα εργαστηριακά αποτελέσματα της φυσικοχημικής και μικροβιολογικής ανάλυσης του FW, για τις δύο εκείνες περιόδους, συγκρινόμενα με αυτά της τελευταίας δειγματοληπτικής περιόδου και τα όρια της νομοθεσίας. Επιπλέον παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το θαλασσινό νερό και την άλμη, όπως παρακολουθούνταν για τη διασφάλιση της ορθής λειτουργίας του MSS.

Πίνακας 24: Αποτελέσματα φ/χ και μικροβιολογικών αναλύσεων των ροών του MSS (Μέση τιμή), (D5.1, 2023)

Παράμετρος	FW: 06/2021 – 09/2021	FW: 09/2022 – 12/2022	FW: 01/2023 – 06/2023	SW: 06/2021 – 09/2021	SW: 09/2022 – 06/2023 2023	Άλμη: 06/2021 – 09/2021	Άλμη: 09/2022 – 06/2023	Όρια οδηγίας 2020/2184 (Πόσιμο νερό)	Όρια Υ.Α. 145116/2011 & Πρότυπα FAO (Αρδευτικό νερό)			
	Κανένας Περιορισμός	Ελαφρύς έως μέσος Περιορισμός	Αυστηρός Περιορισμός									
Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά												
pH	7.25 (±0.41)	7.1 (±0.7)	7.32 (±0.6)	7.93 (±0.03)	8.0 (±0.07)	7.81 (±0.06)	8.14 (±0.01)	≥ 6,5 & ≤ 9,5	6.5 – 8.5			
EC (mS/cm)	0.716 (±0.338)	1.236 (±0.731)	0.01 (±0.005)	59.36 (±0.49)	58.78 (±1)	71.78 (±3.75)	63.25 (±4.0)	2.5	< 0.7	0.7 -3.0	> 3.0	
Θολότητα (NTU)	0.61 (±0.14)	0.65 (±0.21)	0.42 (±0.17)	0.77 (±0.49)	0.97 (±0.6)	1.05 (±0.54)	1.2 (±0.6)	Αποδεκτή από τους καταναλωτές	≤ 2 (διάμεση τιμή) Μόνο για την χρήση του νερού προς απεριόριστη άρδευση			
NO₃-N (mg/L)	<0.23	<0.23	<0.23	-	-	-	-	11.3	<5	5-30	>30	
Cl⁻ (mg/L)	268 (±159)	362 (±213)	12(±9)	23780 (±1111)	24975 (±248)	28840 (±844)	25400 (±950)	250	<140	140-350	>350	
Na⁺(mg/L)	72 (±30)	138 (±65.8)	1.1 (± 0.7)	-	-	-	-	-	-			

SO_4^{2-} (mg/L)	17 (± 12)	23 (± 12)	<4	2766 (± 189)	2820 (± 170)	3900 (± 1039)	4100 (± 700)	250	-
TN (mg/L)	<0.23	<0.23	<0.23	-	-	-	-	-	-
Αλκαλικότητα (mgCaCO ₃ /L)	18 (± 7)	15 (± 6)	<0.5	145 (± 4)	142 (± 3)	145 (± 46)	170 (± 56)	-	-
Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS,mg/L)	<0.5	<0.5	<0.5	-	-	-	-	-	-
Ολική Σκληρότητα (mg CaCO ₃ /L)	63.5 (± 34)	75 (± 31)	1.9 (± 0.9)	-	-	-	-	-	-
SAR	4.8 (± 1.3)	6.7 (± 1.8)	0.3 (± 0.2)	-	-	-	-	-	Σε συσχέτιση με την τιμή EC (Πίνακας 11)
Φαινόλες (mg/L)	0.12 (± 0.04)	0.14 (± 0.01)	0.09 (± 0.01)	-	-	-	-	-	-
Μικροβιολογικά χαρακτηριστικά									
TC (CFU/100ml)	152	2720	324	-	-	-	-	-	-
E.Coli (CFU/100ml)	2	207	0	-	-	-	-	0	Περιορισμένη άρδευση: ≤ 200 (διάμεση τιμή) Απεριορίστη άρδευση: ≤ 5 (85% των δειγμάτων) και ≤ 50 (95% των δειγμάτων)
Εντερόκοκκοι (CFU/100ml)	1	0	0	-	-	-	-	0	-

Σχετικά με την εκτίμηση του κινδύνου αλατότητας και νατρίου, βάσει του συσχετισμού EC 0.72 με SAR 4.8 κατά το διάστημα 6/21-9/21 και αντίστοιχα EC 1.2 με SAR 6.7 για το διάστημα 9/22-12/22, το παραγόμενο αρδευτικό νερό ανταποκρίνεται στα πρότυπα της νομοθεσίας (Πίνακας 24). Ειδικότερα και βάσει το παρακάτω διάγραμμα USSL που κατασκευάστηκε, το νερό βρέθηκε κλάσης C2S1-C3S1, που χαρακτηρίζει το παραγόμενο νερό ως μέσου προς υψηλού κινδύνου αλατότητας και στα όρια του ασφαλούς με ελαφρύ κινδύνου αλκαλίωσης. Έτσι, μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για άρδευση με κάποιους περιορισμούς.

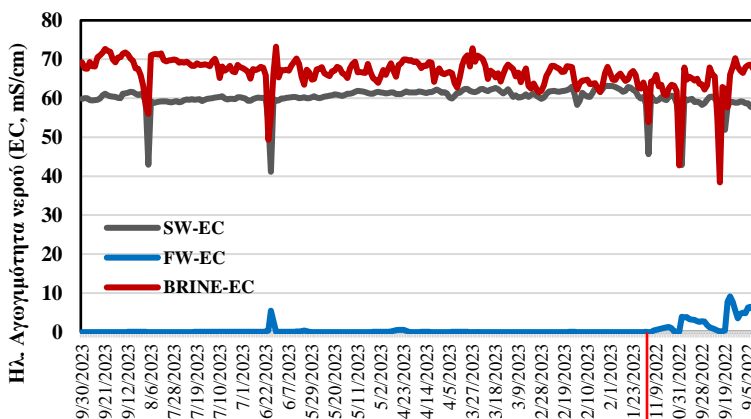


Διάγραμμα 12: Διάγραμμα USSL απεικόνισης του κινδύνου αλατότητας και νατρίου από το παραγόμενο νερό στο MSS (6/2021 – 12/2022), (D5.1, 2023).

Βάσει των προτύπων EC του αρδευτικού νερού (**Πίνακας 9**), το FW κατά τις περιόδους 6/21-9/21 και 9/22-12/22, χαρακτηρίζεται ως καλής (<750 $\mu\text{S}/\text{cm}$) και αμφίβολης ποιότητας (750 – 2250 $\mu\text{S}/\text{cm}$) για άρδευση, αντιστοίχως. Επιπλέον, η συγκέντρωση Cl^- , βρέθηκε στο εύρος ελαφρού έως μέσου περιορισμού (<350 mg/L) για την περίοδο 6/21-9/21, ενώ ήταν στο εύρος αυστηρού περιορισμού (>350 mg/L) κατά την περίοδο 9/22-12/22. Για τους παραπάνω λόγους, κατά την πρώτη περίοδο το νερό χρησιμοποιούταν για άρδευση έπειτα από ανάμειξη με νερό δικτύου, ενώ στο δεύτερο διάστημα χρησιμοποιήθηκε κατά κύριο λόγο μόνο νερό δικτύου για το πότισμα. Το διάστημα εκείνο αποτέλεσε μία μεταβατική περίοδο βελτιστοποίησης της λειτουργίας του συστήματος, όπως εμφανώς διακρίνεται από τα μετέπειτα αποτελέσματα. Και στις δύο όμως περιόδους, το νερό δεν πληρούσε τα ποιοτικά πρότυπα για πόσιμο νερό αφού η συγκέντρωση ιόντων Cl^- είναι >250 mg/L., που τίθεται ως παραμετρική τιμή.

Καμία άλλη φ/χ παράμετρος δεν παρουσιάζει υπέρβαση ως προς τα ποιοτικά πρότυπα, κατά τις δύο αυτές περιόδους. Από την άλλη πλευρά, το φορτίο παθογένειας (TC, *E.Coli*) του FW κατά το διάστημα 9/2022-12/2022 εμφανίζεται αυξημένο. Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε το νερό του συστήματος δεν χρησιμοποιήθηκε για άρδευση εκείνη την περίοδο και δεν χρησιμοποιείται για πόση συνολικά. Αντίθετα σημειώνεται πως, το διάστημα 6/21-9/21 το μικροβιακό φορτίο ήταν εντός των ορίων που θέτει η οδηγία για τη χρήση επεξεργασμένων λυμάτων προς απεριόριστη άρδευση.

Τον Οκτώβριο του 2022 σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε πλάνο βελτιστοποίησης και συντήρησης του συστήματος για την αποκατάσταση της ποιότητας του παραγόμενου νερού. Έτσι από τον Ιανουάριο του 2023 και έως σήμερα, η ομαλή και αποτελεσματική λειτουργία του έχει σταθεροποιηθεί. Το σύστημα πλέον παράγει σε σταθερή βάση σχεδόν απιονισμένο νερό, όπου λόγω των χαμηλών τιμών του δεν δύναται να κατασκευαστεί αντίστοιχο διάγραμμα USSL.



Διάγραμμα 13: Ημερήσια μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του παραγόμενου νερού, της εισόδου θαλασσινού νερού και της εξόδου άλμης, όπως καταγράφονται από τους εγκατεστημένους αισθητήρες.

Όπως ωστόσο μαρτυρά το , οι μέγιστες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας του νερού έπεσαν από 10 mS/cm σε περίπου 0.05 mS/cm, συγκριτικά με τις προγενέστερες περιόδους, και πλέον διατηρούνται σταθερά στα επίπεδα αυτά. Εξαιρέση αποτέλεσε μία περίοδος σύντομης αύξησης της EC του FW τον Ιούνιο του 2023, η οποία αποδίδεται σε έμφραξη της εξόδου άλμης εσωτερικά ενός αποστακτήρα και την υπερχειλίση SW στο κανάλι απόσταξης. Σημειώνεται ακόμη, πως κατά τις περιόδους Χριστουγέννων (12/2022) και θέρους (8/2023), η λειτουργία του MSS διακόπηκε για γενική τακτική συντήρηση. Σε αυτό αποδίδεται η πτώση της EC του θαλασσινού νερού και της άλμης τις αντίστοιχες περιόδους (οι μέρες μη λειτουργίας έχουν εξαιρεθεί από το διάγραμμα).

Σύμφωνα με τους πίνακες που εισαγωγικά παρατέθηκαν (**Πίνακας 9**), το νερό του συστήματος χαρακτηρίζεται ως εξαιρετικής ποιότητας (EC < 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$) ως προς τον παράγοντα EC και συνίσταται για άρδευση χωρίς

περιορισμούς. Έτσι πλέον, το νερό χρησιμοποιείται ανεμπόδιστα για το πότισμα των φυτών της μονάδας, καθώς δεν διακρίνεται περαιτέρω κάποιος άλλος περιοριστικός παράγοντας και το σύνολο των απαιτούμενων φ/χ παραμέτρων παρουσιάζει τιμές χαμηλότερες των μέγιστων επιτρεπτών ορίων, ενώ και το pH του νερού είναι εντός του επιθυμητού εύρους.

Ωστόσο, λόγω της μικρή τιμής SAR= 0.3, εμπίπτει στην κλίμακα αυξημένου περιορισμού, καθώς η μακροχρόνια χρήση του για άρδευση ενδέχεται να επιφέρει προβλήματα στη διαπερατότητα του εδάφους. Αναφέρεται πως μακροχρόνια χρήση αρδευτικού νερού με EC < 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ παράλληλα με μία χαμηλή τιμή του δείκτη SAR, μπορεί να αλλοιώσει τη δομή του εδάφους καθώς προάγει τη δημιουργία εδαφικής κρούστας μειώνοντας τη διείσδυση του νερού. Τέτοιο παράδειγμα αποτελούν οι βροχοπτώσεις που συνιστούν νερό χαμηλής αλατότητας (Zaman *et.al.* 2018). Για το λόγο αυτό το νερό αναμιγνύεται με νερό δικτύου πριν τη χρήση του για άρδευση. Σε περίπτωση όμως, αυτούσιας χρήσης του παραγόμενου νερού, η EC του μπορεί εύκολα να διατηρηθεί σε λίγο αυξημένο επίπεδο ώστε να εμπίπτει στα πλαίσια μηδαμινού περιορισμού.

Ωστόσο. Ο κύριος λόγος χρήσης συμπληρώματος νερού από το δίκτυο για την άρδευση του PGH είναι η ανεπαρκής ημερήσια παραγόμενη ποσότητα από το σύστημα. Αυτή, καταγράφει έλλειμμα μέσης τιμής $\approx 30 \text{ L/day}$, όπως περιγράφεται στην αντίστοιχη ενότητα (**Διάγραμμα 22**).

Ποιοτικά όμως, η ανάμιξη των δύο ροών βάσει τόσο της EC και των TDS τους, κρίνεται εξίσου ασφαλής για την άρδευση του PGH. Συγκριμένα, κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εν λόγω μελέτης το νερό του δικτύου παρουσίασε μέση τιμή TDS ίση με 389.1 ppm (22°C). Η εν λόγω τιμή προέκυψε από τη μέση τιμή των καταγραφών του εγκατεστημένου αισθητήρα TDS στη δεξαμενή άρδευσης για το διάστημα Οκτωβρίου-Δεκεμβρίου και Αυγούστου, όπου χρησιμοποιούταν ως επί το πλείστον νερό δικτύου για την άρδευση του PGH. Βάσει της **(1)** και σε συμφωνία με αντίστοιχες μετρήσεις στο πεδίο, η EC του νερού για το ίδιο διάστημα ισούταν περίπου με 0.75 (± 1) mS/cm. Ως εκ τούτου, το νερό δικτύου αξιολογούταν ως οριακά καλής ποιότητας ως προς τη χρήση του για άρδευση. Το νερό του συστήματος τώρα, βάσει των καταγραφών αγωγιμότητας το διάστημα Φεβρουαρίου έως και σήμερα, όπου χρησιμοποιείται σε σταθερή βάση για την άρδευση του θερμοκηπίου, παρουσίασε μέση EC της τάξης των 0.09 mS/cm. Λαμβάνοντας έτσι υπόψη, το ημερήσιο έλλειμμα $\approx 30 \text{ L/day}$ όπως διαμορφώνεται για το παραγόμενο νερό συγκριτικά με τη ζήτηση του θερμοκηπίου (160 L/day), και εφαρμόζοντας το νόμο της αραιώσης, ισχύει ηλεκτρική αγωγιμότητα αρδευτικού νερού (C2):

$$\text{Παραγόμενο νερό} + \text{Νερό δικτύου} = \text{Αρδευτικό νερό} \Rightarrow C1 * V1 = C2 * V2 \quad (4)$$

$$\Rightarrow C2 = \frac{\left[\left(120 \text{ L} * 0.1 \frac{\text{mS}}{\text{cm}} \right) + \left(30 \text{ L} * 0.8 \frac{\text{mS}}{\text{cm}} \right) \right]}{160 \text{ L}} \Rightarrow C2 = 0.23 \text{ mS/cm}$$

Συμπεραίνεται λοιπόν, πως η ανάμιξη του νερό δικτύου για την κάλυψη των ολικών αναγκών άρδευσης του PGH, δεν συνιστά επιβάρυνση ως προς τον κίνδυνο αλατότητας για τα φυτά, αντιθέτως αραιώνει προς υψηλότερη ποιότητα το νερό του δικτύου. Επιπλέον, διατηρώντας την EC του μίγματος FW-νερού δικτύου σε επίπεδο της τάξης των 0.25 mS/cm., επιτυγχάνεται τελικά αποδεκτή συσχέτιση μεταξύ SAR και EC όπως ορίζουν τα ισχύοντα πρότυπα ως προς την διαπερατότητα του εδάφους. Τα εν λόγω στοιχεία από τη χρήση αυτού για άρδευση, αντικατοπτρίζονται στην επιτυχή ανάπτυξη της καλλιέργειας έως σήμερα και τα αποτελέσματα της εδαφολογικής ανάλυσης του PGH, όπως αναλύονται στις αντίστοιχες ενότητες.

Ως προς το περιεχόμενο βαρέων μετάλλων τα αποτελέσματα της ανάλυσης (**Πίνακας 25**) για το παραγόμενο νερό αφορούν τη μέση τιμή στο σύνολο της λειτουργίας του MSS, όπως παρουσιάζονται παρακάτω σε σύγκριση με τα αντίστοιχα θεσμικά όρια. Επιπλέον αποτυπώνονται, τα αποτελέσματα για τις ροές θαλασσινού νερού και άλμης από ανάλυση που διενεργήθηκε στις 7/12/2022.

Πίνακας 25: Αποτελέσματα ανάλυσης βαρέων μετάλλων των ροών του MSS (Μέση τιμή περιόδου) σε σύγκριση με τις παραμετρικές τιμές τους (D5.1, 2023).

Παράμετρος	FW (Μέση τιμή των περιόδων)	Όρια Υ.Α. 145116/2011	Πρότυπα FAO			Όρια οδηγίας (EE) 2020/2184	SW (7/12/2022)	Άλλη (7/12/2022)
<i>Cd</i> (μg/l)	<0.25	10	10			5	<0.3	<0.3
<i>Mn</i> (μg/l)	3.9 (±3.1)	200	200			50	2.0	2.4
<i>Pb</i> (μg/l)	<3.0	100	500			5	<1	2.1
<i>Ni</i> (μg/l)	<5.0	200	200			20	<0.3	<0.3
<i>Fe</i> (μg/l)	<20	3000	5000			200	<50	170
<i>Cu</i> (μg/l)	2.5 (±2.1)	200	200			2000	34	46
<i>Cr</i> (μg/l)	<1.6	100	100			50	<1	<1
<i>Zn</i> (μg/l)	<0.10	2	2			-	<50	63
<i>Sb</i> (μg/l)	<0.03	-	-			10	<1	<1
<i>As</i> (μg/l)	<0.1	-	-			10	1.7	1.6
<i>Co</i> (μg/l)	<0.03	-	-			-	<0.3	<0.3
<i>Mo</i> (μg/l)	<0.03	-	-			-	11	12
<i>Hg</i> (μg/l)	<0.03	2				1	<0.3	<0.3
<i>Al</i> (mg/L)	<0.07	5	5			0.20	-	-
<i>F</i> (mg/L)	<0.06	1	1			1.5	-	-
<i>CN</i> (μg/L)	<3					50	-	-
<i>B</i> (mg/L)	0.21 (±0.03)	2	Ασφαλές	Αποδεκτό	Ακατάλληλο	1.5	-	-
			<0.7	0.7-3.0	>3.0			

Συνολικά, δεν παρατηρείται κάποιος επιβλαβής παράγοντας αφού οι συγκεντρώσεις των μετάλλων στο παραγόμενο νερό είναι εντός των ορίων που τίθενται από την σχετική νομοθεσία. Η κάπως υψηλή συγκέντρωση Fe, που παρατηρείται το εν λόγω διάστημα οφείλεται κυρίως στην διάβρωση των εσωτερικών μερών των αντλιών από το αλάτι και την εναπόθεση σκουριάς λόγω οξείδωσης. Ωστόσο το επίπεδο Fe < 20 μg/L, πληροί τα ποιοτικά πρότυπα και ως εκ τούτου δεν δύναται να επηρεάσει την ποιότητα του παραγόμενου αρδευτικού νερού. Αξίζει να τονιστεί επίσης πως με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων το νερό πληροί και τις ποιοτικές απαιτήσεις πόσιμου νερού, ως προς τα όρια συγκέντρωσης μετάλλων που τίθενται στην Οδηγία (EE) 2020/2184. Ωστόσο, λόγω της πολύ χαμηλής αγωγιμότητας και των χαμηλών συγκεντρώσεων Ca²⁺ και Mg²⁺ δεν θεωρείται επαρκές για κατανάλωση, καθώς δύναται να επιφέρει καρδιαγγειακά προβλήματα, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει διαβρωτική επίδραση. Έτσι, θα πρέπει να προστεθούν άλατα ασβεστίου και μαγνησίου για τη βελτίωση της γεύσης και της ποιότητάς του. Ομοίως, κατά τη χρήση του για άρδευση το νερό από το MSS, στερεί τα εν λόγω θρεπτικά από την καλλιέργεια. Ωστόσο, λόγω της χρήσης του έπειτα από ανάμιξη με νερό δικτύου, δεν θεωρείται επιβλαβές, όπως αντικατοπτρίζεται στην εδαφολογική μελέτη (Πίνακας 39) και λαμβάνοντας ομοίως υπόψη την επιτυχημένη ανάπτυξη καλλιεργούμενων φυτών στο PGH. Επιπλέον, σε περιόδους λίπανσης, πραγματοποιείται εμπλουτισμός του μέσου κατάλληλων υδατοδιαλυτών λιπασμάτων, εγκεκριμένα για οργανική γεωργία, και σύμφωνα με τις ανάγκες των φυτών.

Τέλος, σχετικά με τις περιεχόμενες οργανικές ενώσεις στο FW, και εδώ δεν παρατηρείται καμία υπέρβαση των μέγιστων ορίων που θέτει η νομοθεσία για το πόσιμο νερό (Πίνακας 26). Κάποιες συγκεντρώσεις πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων που εντοπίζονται, και συγκεκριμένα βενζο[b]φθορανθένιου, βενζο[g,h,i]περυλενίου και ινδενο(1,2,3-cd)πυρενίου, πιθανώς να οφείλονται στον αποχρωματισμό της εσωτερικής επιφάνειας των αποστακτήρων λόγω υψηλών θερμοκρασιών. Ωστόσο δεν αποτελούν κίνδυνο, αφού είναι εντός των επιτρεπτών τιμών.

Πίνακας 26: Αποτελέσματα ανάλυσης οργανικών ενώσεων στο FW συγκριτικά με τις παραμετρικές τιμές τους, (D5.1, 2023).

Παράμετρος	Μέση Τιμή	Όρια Οδηγίας 2020/2184	Παράμετρος	Μέση Τιμή	Όρια Οδηγίας 2020/2184
Ολική πετρελαϊκή υδρογονάνθρακες (TPH) (mg/L)	0.18		Quintozene	<0.003	0.1
Βρωμικά (μgBrO ₃ /L)	<0.1	10	Tetrachlorvinphos	<0.003	0.1
Τριαλογονομεθάνια (THM) (μg/L)	.		Tetradifon	<0.003	0.1
Χλωροφόρμιο	<0.5	100	Triadimefon	<0.003	0.1
Βρωμοδιχλωρομεθάνιο.	<0.5		Trifluralin	<0.003	0.1
Διβρωμοχλωρομεθάνιο	<0.5		Vinchlazole	<0.003	0.1
Βρωμοφόρμιο	<0.5		Οργανοφωσφωρικά παρασιτοκτόνα [Δραστική ουσία-μεταβολίτης] (OPPs) (μg/L)		
Ολικά Τριαλογονομεθάνια	<2.0	100	Azinphos-Et	<0.003	0.1
Ακρυλαμίδιο	<0.01	0.1	Azinphos-Me	<0.003	0.1
Επιχλωρυδρίνη	<0.01	-	Bromophos-Et	<0.003	0.1
Πολυκυκλική αρωματική υδρογονάνθρακες (PAH) (μg/L)	.	0.1	Bromophos-Me	<0.003	0.1
Ναφθαλίνο	<0.05	-	Chlorfenvinphos	<0.003	0.1
Ακεναφθυλένιο	<0.005	-	Cadusaphos	<0.003	0.1
Ακεναφθένιο	<0.005	-	Chlorpyrifos-Et	<0.003	0.1
Φλουορένιο	<0.01	-	Chlorpyrifos-Me	<0.003	0.1
Φαινανθρένιο	<0.005		Diazinon	<0.003	0.1
Ανθρακένιο	<0.01		Ethion	<0.003	0.1
Φλουορανθένιο	0.084		Ethoprophos	<0.003	0.1
Πυρένιο	<0.005		Etrimfos	<0.003	0.1
Βενζο[α]ανθρακένιο	0.04		Fenamiphos	<0.003	0.1
Χρυσένιο	0.035		Fenthion	<0.003	0.1
Βενζο[β]φλουρανθένιο	0.046	0.1	Heptenophos	<0.003	0.1
Βενζο[κ]φλουρανθένιο	<0.002		Malathion	<0.003	0.1
Βενζο[γ,η,ι]περυλένιο	0.013		Methidathion	<0.003	0.1
Ινδενο(1,2,3-cd) πυρένιο	0.014		Parathion-Et	<0.003	0.1
Βενζο[α]πυρένιο	<0.001	0.01	Paraoxon-Me	<0.003	0.1
Διβενζο[α,η]ανθρακένιο	<0.005		Phorate	<0.003	0.1
Αλογονωμένα παρασιτοκτόνα [Δραστική ουσία-μεταβολίτης] (μg/L)			Phosalone	<0.003	0.1
Aldrin & Dieldrin	<0.003	0.03	Phosmet	<0.003	0.1
Bromopropylate	<0.003	0.1	Phosphamidon	<0.003	0.1
Chlordane cis & trans	<0.003	0.1	Pirimiphos-Et	<0.003	0.1
Chlorothalonil	<0.003	0.1	Pirimiphos-Me	<0.003	0.1
Cyfluthrin	<0.003	0.1	Prothiophos	<0.003	0.1
Cyhalothrin-λ	<0.003	0.1	Pyrazophos	<0.003	0.1
Cypermethrin	<0.003	0.1	Quinalphos	<0.003	0.1
DDT/DDD/DDE	<0.003	0.1	Triazophos	<0.003	0.1
Deltamethrin	<0.003	0.1	Οργανοχλωριωμένα παρασιτοκτόνα [Δραστική ουσία-μεταβολίτης] (μg/L)		
Dinitramine	<0.003	0.1	Atrazine	<0.01	0.1
Diniconazole	<0.003	0.1	Bitertanol	<0.01	0.1
Endosulfan (sum of isomers α-, β- & sulfate)	<0.003	0.1	Benfuracarb	<0.01	0.1
Endrin	<0.003	0.1	Carbaryl	<0.01	0.1
Ethalfuralin	<0.003	0.1	Carbofuran	<0.01	0.1
Fenarimol	<0.003	0.1	Cyanazine	<0.01	0.1

<i>HCH -α</i>	<0.003	0.1	<i>Cyproconazole</i>	<0.01	0.1
<i>HCH -β</i>	<0.003	0.1	<i>Cyprodinil</i>	<0.01	0.1
<i>HCH -γ (lindane)</i>	<0.003	0.1	<i>Fenoxycarb</i>	<0.01	0.1
<i>Heptachlor</i>	<0.003	0.03	<i>Fludioxonil</i>	<0.01	0.1
<i>Heptachlor epoxide endo</i>	<0.003	0.03	<i>Metalaxyl</i>	<0.01	0.1
<i>Hexachlorobenzene (HCB)</i>	<0.003	0.1	<i>Metribuzin</i>	<0.01	0.1
<i>Iprodione</i>	<0.003	0.1	<i>Myclobutanil</i>	<0.01	0.1
<i>Penconazole</i>	<0.003	0.1	<i>Pirimicarb</i>	<0.01	0.1
<i>Profenofos</i>	<0.003	0.1	<i>Prometryn</i>	<0.01	0.1
<i>Procymidone</i>	<0.003	0.1	<i>Simazine</i>	<0.01	0.1
<i>Pyrifenoxy</i>	<0.003	0.1	<i>Terbuthylazine</i>	<0.01	0.1
<i>Quinoxyfen</i>	<0.003	0.1	<i>Tebuconazole</i>	<0.01	0.1

Συνολικά, το παραγόμενο νερό την τρέχουσα περίοδο όπου το MSS λειτουργεί ανεμπόδιστα υπό σταθερές συνθήκες, πληροί της προδιαγραφές και ως πόσιμο νερό, με μόνη απαίτηση τον εμπλουτισμό του σε Ca²⁺ και Mg²⁺, όπως σημειώθηκε. Σε αντίθεση με τις δύο προγενέστερες περιόδους το σύνολο των φ/χ παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένων των Cl⁻ που εμφανίζονται πλέον < 250 mg/L, όπως και η συγκέντρωση μετάλλων και οργανικών ουσιών, είναι εντός των ποιοτικών προτύπων κατανάλωσης του νερού που υπαγορεύει η Οδηγία 2020/2184/ΕΕ.

Αξίζει τέλος να σχολιαστεί η ποιότητα του βρόχινου νερού που ανακτάται μέσω του RC του συστήματος. Λόγω έλλειψης αποτελεσμάτων εργαστηριακής ανάλυσης, αφού κατά το διάστημα εκπόνησης της παρούσης η εν λόγω διάταξη ήταν εκτός λειτουργίας λόγω φθοράς, δεδομένα αντλήθηκαν από τη μελέτη του Μάντζιου (2022), όπου καταγράφονται τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά από τη διάταξη ομβροσυλλογής κλειστής δεξαμενής στην παραπλήσια εγκατάσταση του HYDRO6 στην Τήνο. Εκεί βρέθηκε μέση τιμή EC ίση με 465 μS/cm και SAR 1.3, χαρακτηρίζοντας το νερό ως κλάσης C2-S1, κατάλληλο για άρδευση με εξαίρεση ευαίσθητα φυτά στα άλατα ή εδάφη με κακή αποστράγγιση. Συνολικά, οι ποιοτικές παράμετροι ήταν εντός των μέγιστων επιτρεπτών ορίων για τη χρήση του προς απεριόριστη άρδευση με εξαίρεση τη θολότητα που βρέθηκε ίση με 3 NTU, μεγαλύτερη του ορίου των 2 NTU. Αναφέρεται ωστόσο πως η χρήση ενός φίλτρου ανάντη της εισόδου της δεξαμενής συλλογής μπορεί να καταστήσει το νερό κατάλληλο, με τιμή θολρότητας της τάξης των 1-2 NTU. Όπως έχει αναφερθεί, στην εγκατάσταση HYDRO5 πραγματοποιείται φίλτρανση πριν την εισροή του βρόχινου νερού στο υδραυλικό δίκτυο του MSS και τελικά στην δεξαμενή άρδευσης. Έτσι, η επαναφορά του συστήματος, προς μετριασμό της πρόσθετης απαίτησης νερού από το δίκτυο όπως αναμένεται (**Ενότητα 5.10.2**) πιθανότερα δεν θα αλλοίωνε την ποιότητα του αρδευτικού νερού στο HYDRO5. Ωστόσο, προτείνεται αντίστοιχη εργαστηριακή εξέταση πριν την πλήρη επαναφορά του.

5.2 Ποσοτικά χαρακτηριστικά παραγόμενου νερού

Όπως έχει προαναφερθεί (**Πίνακας 22**) ο κατασκευαστής του συστήματος εγγυάται μέση ημερήσια ανάκτηση καθαρού νερού της τάξης των 200-220 L/day, με μέγιστη τιμή τα 317 L/day και ελάχιστη τα 77 L/day.

Ως εκ τούτου προκύπτει αντίστοιχα μέση ειδική παραγωγή 3.3 έως 3.7 L/m²/day, με μέγιστη 5.2 έως 5.7 L/m²/day και ελάχιστη 1.3 έως 1.4 L/m²/day. Από τα παραπάνω και συνυπολογίζοντας 709 L/day μέση, 953 L/day μέγιστη και 546 L/day ελάχιστη ποσότητα εισερχόμενου προς επεξεργασία θαλασσινού νερού, προκύπτει αντίστοιχη απόδοση του MSS της τάξης του 28%, 33% και 14%.

Στα πλαίσια ωστόσο της παρούσας μελέτης πεδίου και βάσει των ημερήσιων καταγραφών παραγωγής νερού, όπως προέκυψαν για διάστημα ενός έτους (Σεπτέμβριος 2022 έως Σεπτέμβριος 2023), τα πράγματα δείχνουν να είναι διαφορετικά. Καταγράφηκε λοιπόν, μέση ημερήσια παραγωγή FW 105.4 L/day με μέγιστη ημερήσια τιμή τα 280 L/day, μέση μέγιστη (θέρος) 123.3 L/day και μέση ελάχιστη (χειμώνα) τα 87.5 L/day. Έτσι, προκύπτει αντίστοιχα μέση ειδική παραγωγή 1.9 L/m²/day, με μέγιστη 5 L/m²/day, μέση μέγιστη 2.2 L/m²/day και μέση

ελάχιστη 1.6 L/m²/day. Ως εκ τούτου, η αντίστοιχη μέση ποσοστιαία απόδοση του συστήματος υπολογίζεται σε 14.8%, μέγιστη 29.38%, μέση μέγιστη 13.0% και μέση ελάχιστη 13.8%, απέχοντας από την εκτιμώμενη.

Πρέπει ωστόσο να υπογραμμιστεί, πως 7 μονάδες ηλιακών αποστακτών του MSS, βρίσκονται εκτός λειτουργίας λόγω φθοράς, γεγονός που συνεισφέρει στην μειωμένη απόδοση του συστήματος συγκριτικά με την προβλεπόμενη. Στην περίπτωση που λάβουμε υπόψη μία μέση ημερήσια παραγωγή ανά αποστακτήρα ίση με 2.6 L/day, όπως υπολογίστηκε από τα διαθέσιμα δεδομένα, η αντίστοιχη μέση, μέση μέγιστη και μέση ελάχιστη τιμή διαμορφώνεται ως 123.6 L/day, 141.5 L/day, και 105.7 L/day. Βάσει αυτών υπολογίζεται αντίστοιχη τιμή ειδικής παραγωγής ίση με 2.2 L/m²/day, 2.5 L/m²/day και 1.9 L/m²/day και ποσοστιαία απόδοση ίση με 17.4%, 14.9% και 12.4%, αντιστοίχως.

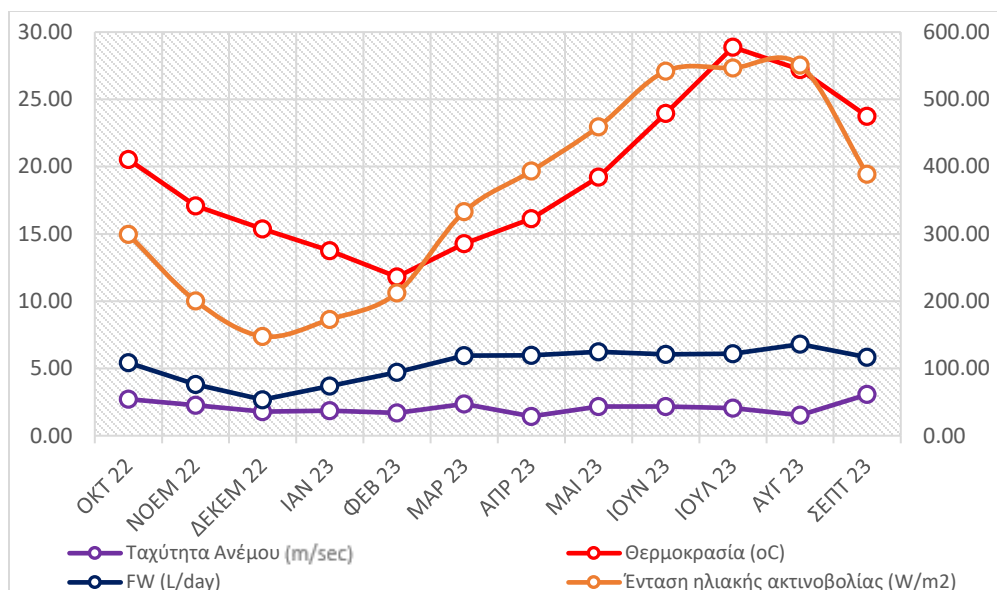
Και πάλι λοιπόν, το σύστημα δεν επιτυγχάνει την εκτιμώμενη από το κατασκευαστή απόδοση. Ωστόσο, αξίζει να τονιστεί πως τα παραπάνω δεδομένα αποτελούν πληροφορία που πηγάζει από τη λειτουργία του συστήματος σε κλίμακα πεδίου και υπό συνεχή καθημερινή βάση. Η εκτίμηση από το κατασκευαστή έγινε σε κατασκευαστικό επίπεδο υπό βέλτιστες συνθήκες καθώς και αργότερα με την αξιοποίηση αισθητήρων *IoT* (Internet of Things) χωρίς να λαμβάνονται υπόψη έκτατα περιστατικά (βλάβες αντλιών, έμφραξη μικροσταλακτών, αύξηση EC, διακυμάνσεις τάσης), ανάγκες συντήρησης κ.ά. που απαιτούν διακοπή της ομαλής λειτουργίας του MSS. Ως εκ τούτου, η εν λόγω εκτίμηση δεν συνιστά πρωτογενή καταγραφή υπό πραγματικές συνθήκες και δεν μπορεί να θεωρηθεί πλήρως ασφαλής, αφού και πρακτικά διαφέρει με τα αποτελέσματα κανονικής λειτουργίας. Επιπλέον στην μειωμένη απόδοση του MSS, εκτός από τις μονάδες που δεν λειτουργούν πιθανώς συνεισφέρονται και οι απώλειες νερού λόγω διαρροών από του αποστακτήρες που οφείλονται σε φθορά (**Πίνακας 35**), οι οποίες δε δύναται να υπολογιστούν επί της παρούσης. Περαιτέρω αξιολόγηση της ημερήσιας παραγωγής νερού ως προς την επάρκεια του, γίνεται στην **Ενότητα 5.10.2**.

Προχωρώντας, όπως αναμενόταν κατά το μελετώμενο διάστημα προέκυψε πως η απόδοση του συστήματος είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή μελέτης και ιδίως με την εισερχόμενη και προσπίπτουσα στους αποστακτήρες ηλιακή ακτινοβολία. Στον **Πίνακα 27** και το

, παρουσιάζεται η συσχέτιση της μέσης ημερήσια ανακτώμενης ποσότητας νερού με την μέση ημερήσια ένταση του ηλιακού φωτός, τη θερμοκρασία και την ταχύτητα ανέμου για κάθε μήνα στην περιοχή, όπως καταγράφονται από τον εξωτερικό μετεωρολογικό σταθμό στο *Ardeusis*.

Πίνακας 27: Δεδομένα μέσης ημερήσιας παραγωγής νερού, ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας και ταχύτητας ανέμου για κάθε μήνα του έτους.

Μήνας	FW (L/day)	Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (W/m ²)	Θερμοκρασία (°C)	Ταχύτητα Ανέμου (km/h)	Ταχύτητα Ανέμου (m/sec)
ΣΕΠΤ 22	132.42	181.32	22.43	11.02	3.06
ΟΚΤ 22	108.46	299.20	20.53	9.82	2.73
ΝΟΕΜ 22	76.20	200.54	17.07	8.12	2.26
ΔΕΚΕΜ 22	53.61	147.72	15.37	6.41	1.78
ΙΑΝ 23	73.68	172.93	13.75	6.71	1.86
ΦΕΒ 23	94.35	212.43	11.80	6.08	1.69
ΜΑΡ 23	118.85	332.99	14.27	8.46	2.35
ΑΠΡ 23	119.33	393.51	16.12	5.18	1.44
ΜΑΙ 23	124.67	459.39	19.23	7.84	2.18
ΙΟΥΝ 23	121.00	541.94	23.96	7.81	2.17
ΙΟΥΛ 23	121.94	546.72	28.88	7.42	2.06
ΑΥΓ 23	136.00	551.08	27.22	5.53	1.54
ΣΕΠΤ 23	116.80	388.62	23.74	11.02	3.06
Ετήσιο Μ.Ο.	105.41	353.92	19.33	7.53	2.09
Συσχέτιση FW	<i>f=</i> CORREL	0.89	0.61	0.12	



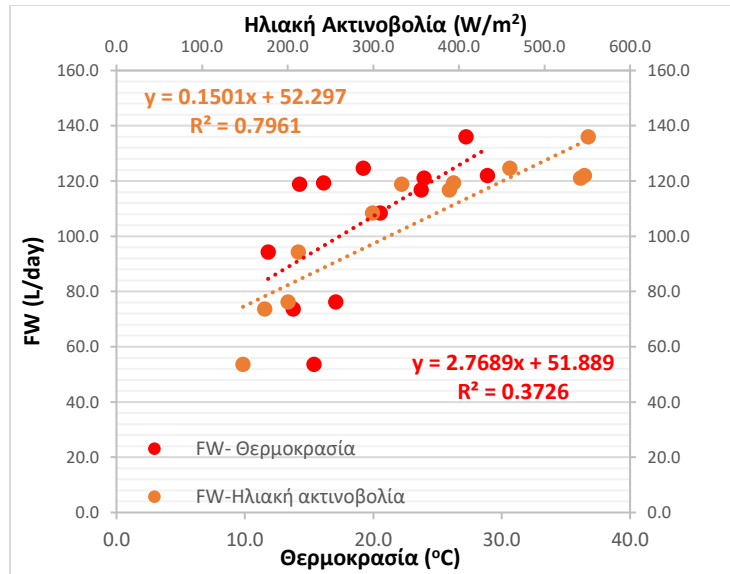
Διάγραμμα 14: Συσχέτιση μέσης ημερήσια παραγωγής FW κάθε μήνα με την μέση ημερήσια ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασία περιβάλλοντος και ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή του MSS.

Ακριβέστερα, βάσει του συντελεστή συσχέτισης (r) όπως προέκυψε μέσω της **(5)** στο *excel*, αποδεικνύεται πως η συσχέτιση παραγόμενου FW με την ένταση της ηλιακή ακτινοβολίας είναι ισχυρότερη από εκείνη με τον παράγοντα της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, καθώς η τιμή της πρώτης τείνει περισσότερο προς τη μονάδα. Και οι δύο επίσης είναι ισχυρότερης από τη συσχέτιση παραγωγής FW με την ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή.

$$Correl(X, Y) = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (5), \text{ όπου } \bar{x} \text{ και } \bar{y} \text{ οι μέσες τιμές του δείγματος προς συσχέτιση.}$$

Ακριβέστερα, ο συντελεστής για την ηλιακή ακτινοβολία υπολογίστηκε σε 0.9 έναντι 0.6 για τη συσχέτιση του παραγόμενου FW με θερμοκρασία και 0.1 με την ταχύτητα ανέμου. Συμπεραίνεται λοιπόν, πως της ημέρες και ώρες αυξημένης ηλιοφάνειας, η απόδοση του συστήματος ενισχύεται, γεγονός που χαρακτηρίζει την τεχνολογία ηλιακής αφαλάτωσης βιβλιογραφικά. Επιπλέον η θερμοκρασία, φαίνεται να παίζει λιγότερο σημαντικό ρόλο, ενώ αντίθετα η ταχύτητα του ανέμου δεν επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του συστήματος, τείνοντας μάλλον προς μία αρνητική συσχέτιση.

Παρόμοιο συμπέρασμα προκύπτει και μέσω του συντελεστή προσδιορισμού (r^2) όπως προέκυψε μέσω γραμμικής συσχέτισης στο *excel*, των δεδομένων παραγωγής νερού εν συγκρίσει της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας (**Διάγραμμα 15**). Ο $r^2 = 0.8$ για τη συσχέτιση παραγωγής-ακτινοβολίας είναι εμφανώς μεγαλύτερος του $r^2 = 0.4$ της σχέσης παραγωγής-θερμοκρασίας. Ο τελευταίος μάλιστα εμφανίζεται μειωμένος συγκριτικά τον αντίστοιχο συντελεστή συσχέτισης, υποδηλώνοντας μία αμφίβολη σχέση των δύο μεταβλητών. Η ίδια, πιθανώς οφείλεται στο γεγονός πως με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει από τη μία η θερμοκρασία όλων των μερών του αποστακτήρα αλλά λόγω της υψηλής θερμοχωρητικότητας του υλικού της επιφάνειας εξάτμισης αυξάνει η διαφορά θερμοκρασίας νερού και καλύμματος. Από την άλλη πλευρά, μειώνεται ο ρυθμός απωλειών του καλύμματος προς το περιβάλλον γεγονός που συντελεί στη μείωση της διαφοράς θερμοκρασίας νερού και καλύμματος με αποτέλεσμα ο ρυθμός απόσταξης να φθίνει.

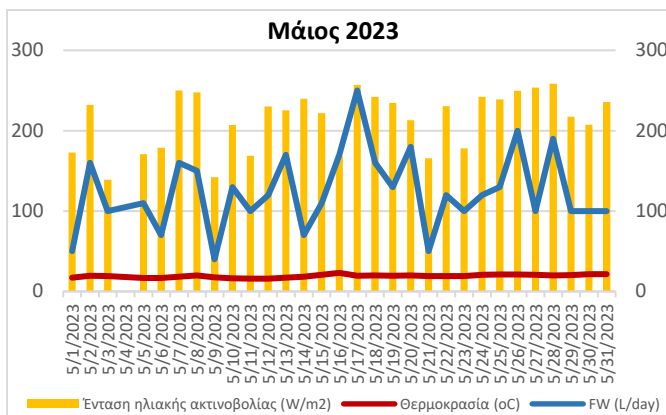


Διάγραμμα 15: Γραμμική συσχέτισης μέσης ημερήσια παραγωγής FW κάθε μήνα με την αντίστοιχη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασία περιβάλλοντος στην περιοχή του MSS.

Σημειώνεται ακόμη, πως από τον **Πίνακα 27** αποδεικνύεται πως η μέση μέγιστη (136 L/day) και ελάχιστη (53.61 L/day) παραγωγή FW σημειώθηκε τους μήνες Αύγουστο και Δεκέμβριο, σε αντιστοιχία με τη μέση μέγιστη (551.1 W/m²) και ελάχιστη (147.7 W/m²) ένταση ηλιακής ακτινοβολίας.

Πρέπει να υπογραμμιστεί εδώ, πως το διάστημα 12/8/2023 έως 1/9/23, το σύστημα παρέμεινε κλειστό για συντήρηση και ως εκ τούτου τα δεδομένα του Αυγούστου, στηρίζονται στις μετρήσεις για το υπόλοιπο διάστημα του μήνα. Λαμβάνοντας έτσι υπόψη, το μήνα με τη δεύτερη κατά σειρά μεγαλύτερη παραγωγή FW από το σύστημα, διακρίνουμε πως πιθανώς η θερμοκρασία να επιδρά αρνητικά στην παραγωγή νερού. Αυτό διαπιστώνεται καθώς τους μήνες Ιούλιο (541.94 W/m²) και Ιούνιο (546.72 W/m²), ενώ η μέση τιμή ακτινοβολίας είναι υψηλότερη συγκριτικά με τον επόμενο κατά φθίνουσα σειρά Μάιο (459.39 W/m²), η μέση θερμοκρασία αυτών με 23.9°C και 28.9°C είναι υψηλότερη από του Μαΐου με 19.2°C. Αυτό πιθανώς να συντελεί στην αυξημένη παραγωγή νερού το Μαΐου (124.67 L/day) συγκριτικά με τους άλλου δύο μήνες (121 και 121.94 L/day, αντίστοιχα). Και τους τρεις αυτούς μήνες, δεν παύει ωστόσο η παραγωγή να είναι υψηλή λόγω της αυξημένης έντασης ηλιακής ακτινοβολίας.

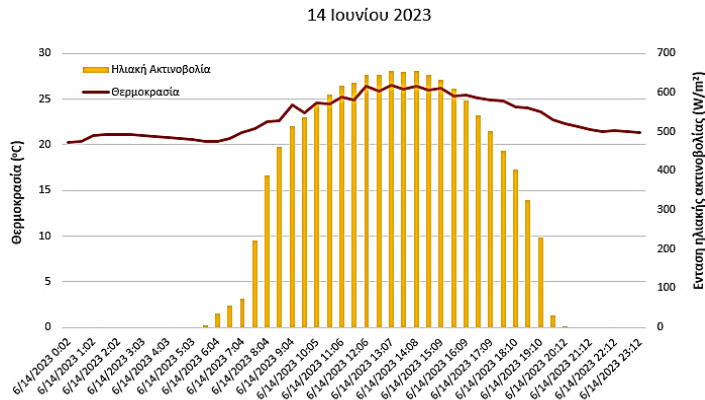
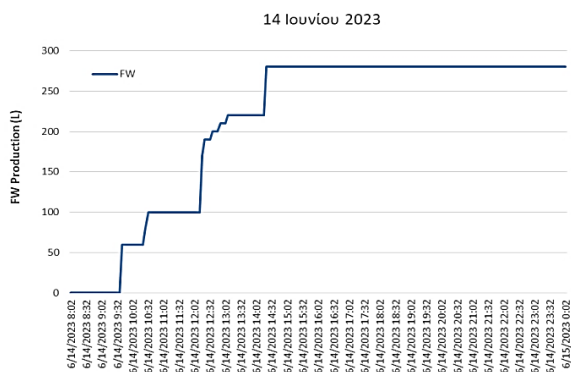
Τα Διάγραμματα 16 και 17 παρακάτω, αποτυπώνουν την ημερήσια εξέλιξη παραγωγής νερού από το σύστημα κατά τη διάρκεια των μηνών Μαΐου και Δεκεμβρίου, όπου επιβεβαιώνεται η συσχέτιση παραγωγής νερού με τη ηλιακή ακτινοβολία, για το κάθε μήνα ξεχωριστά αλλά και συγκριτικά αυτών. Παράλληλα φαίνεται και η ημερήσια εξέλιξη της θερμοκρασίας.



Διάγραμμα 16 και 17: Συσχέτιση της ημερήσιας παραγωγής FW με την μέση ημερήσια ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασία και ταχύτητα του ανέμου τους μήνες Μάιο (αριστερά) και Δεκέμβριο (δεξιά).

Όπως ήταν αναμενόμενο, το Μάιο που επικρατεί εντονότερα ηλιοφάνεια, και λόγω της θέσης του ηλίου τα πάνελ δέχονται αμεσότερα την ηλιακή ακτινοβολία, η παραγωγή νερού από το σύστημα είναι αυξημένη συγκριτικά με το Δεκέμβριο, όπου δεν ξεπερνά τα 100 L/day. Και στους δύο μήνες επίσης, είναι διακριτό πως η τάση παραγωγής νερού από το σύστημα ακολουθεί την εξέλιξη της ηλιακής ακτινοβολίας.

Σε επίπεδο ημέρας τώρα, όπως επιπλέον διακρίνεται από την ωριαία καταγραφή των δεδομένων, την 14^η Ιουνίου (**Διάγραμμα 18, Διάγραμμα 19**) όπου το MSS παρουσίασε τη μέγιστη ημερήσια παραγωγή (280 L), η παραγωγή ξεκινάει τις πρωινές ώρες με μία υστέρηση 2 ωρών (10.00 π.μ.) από την έναρξη λειτουργίας του συστήματος (8.00 π.μ.). Το γεγονός αυτό αποδίδεται όπως αναφέρεται και βιβλιογραφικά στην υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού και τη χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία νωρίς το πρωί. Επιπλέον, φαίνεται πως η παραγωγή αυξάνει όσο αρχίζει να αυξάνει η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία περιβάλλοντος φτάνοντας τη μέγιστη τιμή της τις μεσημεριανές ώρες όπου η έντασης του ηλιακού φωτός και η θερμοκρασία κορυφώνονται. Έπειτα δεν παρατηρείται περαιτέρω παραγωγή.



Διάγραμμα 18 και 19: Συσχέτιση της ωριαίας παραγωγής FW με την αντίστοιχη τιμή ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας την ημέρα μέγιστης παραγωγής

5.3 Εκτίμηση θερμικής απόδοσης αποστακτήρα MSS

Η θερμική απόδοση ενός ηλιακού αποστακτήρα εκφράζει το ποσοστό της εισερχόμενης ηλιακής ενέργειας που απαιτείται για την εξάτμιση μίας μονάδας νερού στον αποστακτήρα. Με απλά λόγια, όσο υψηλότερη είναι η

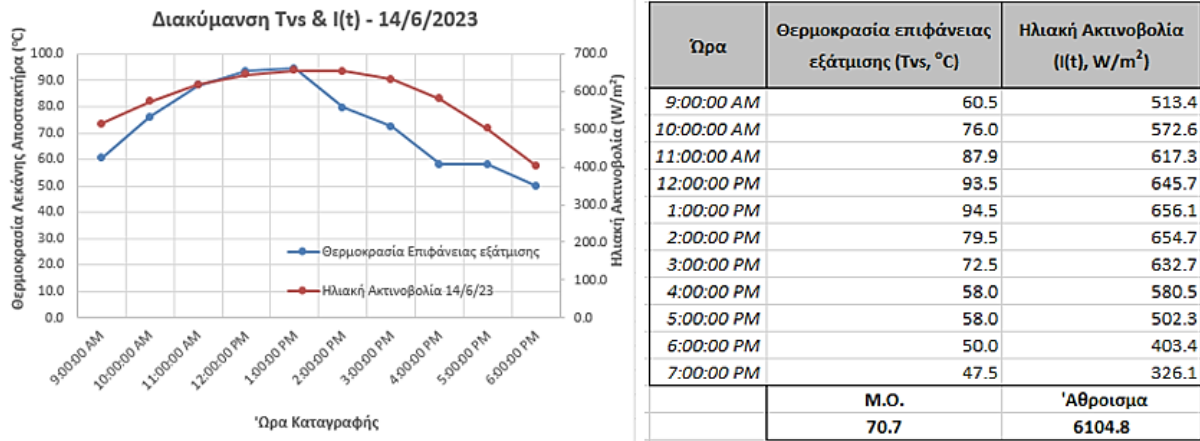
Θερμική απόδοση ενός αποστακτήρα τόσο λιγότερες απώλειες θερμότητας έχει που συνιστούν αυξημένη παραγωγή νερού. Η μέγιστη ημερήσια θερμική απόδοση του αποστακτήρα MSS (η_d), υπολογίστηκε βάσει της ολικής ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας για το σύνολο των ωρών λειτουργίας (ως εισροή θερμότητας σε αυτόν) και τη μέγιστη ημερήσια παραγωγή νερό (ως εκροή). Η εκτίμησή της βασίστηκε σε όσα αναφέρουν οι Sharshir *et.al.* (2022), ως εξής:

$$\eta_d = \frac{\sum(\dot{m} + L_{hg})^n}{\sum(I(t) * A_s) * 3600} \quad (6),$$

όπου το L_{hg} (J/kg) αναφέρεται στη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης δηλαδή στη θερμότητα που απαιτείται για την εξάτμιση ενός κιλού νερού σε δεδομένη θερμοκρασία, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$L_{hg} = 2.5019 * 10^6 - 2,40706 * 10^3 * T_{vs} + 1.192217 * T_{vs}^2 - 15.863 * 10^{-3} * T_{vs}^3 \quad (7)$$

Όπου \dot{m} η μάζα του συνολικά ημερήσια παραγόμενου νερού (L/day), $I(t)$ η ωριαία ηλιακή ακτινοβολία ανά m^2 (W/m^2), A_s η ενεργή επιφάνεια του αποστακτήρα (m^2) και T_{vs} η μέση ημερήσια θερμοκρασία νερού εσωτερικά του αποστακτήρα. Η τελευταία αντικαταστάθηκε κατά τον υπολογισμό με την μέση ημερήσια θερμοκρασία της επιφάνειας εξάτμισης του αποστακτήρα, λόγω μη καταγραφής δεδομένων θερμοκρασίας του νερού. Στο παρακάτω **Διάγραμμα 20** αποτυπώνεται η ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας της επιφάνειας εξάτμισης του αποστακτήρα σε συσχέτιση με την μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας, την ημέρα που καταγράφηκε η μέγιστη παραγωγή του MSS. Επιβεβαιώνεται έτσι, η κορύφωση της παραγωγής κατά τις μεσημεριανές ώρες όπως ειπώθηκε παραπάνω, αφού έπειτα με την μείωση της ακτινοβολίας καταγράφεται απότομη πτώση της θερμοκρασίας της επιφάνεια εξάτμισης.



Διάγραμμα 20: Συσχέτιση ημερήσιας διακύμανσης θερμοκρασίας επιφάνειας εξάτμισης -ηλιακής ακτινοβολίας

Βάσει των παραπάνω υπολογίστηκε λοιπόν η μέγιστη θερμική απόδοση και συγκρίθηκε με την αντίστοιχη τιμή της μέσης θερμικής απόδοσης που αφορά το διάστημα Ιουνίου-Ιουλίου. Η συγκεκριμένη περίοδος επιλέχθηκε καθώς μόνο για εκείνο το διάστημα υπήρχε από τον κατασκευαστή εγκατεστημένος αισθητήρας καταγραφής της θερμοκρασίας εσωτερικής επιφάνειας.

Στον παρακάτω πίνακα, παρατίθενται τα εν λόγω δεδομένα όπως καταγράφηκαν, και εξάγονται οι αντίστοιχες τιμές συντελεστή θερμικής απόδοσης, καθώς και η μέση τιμή αυτού σύμφωνα με τα δεδομένα του κατασκευαστή για μέση ημερήσια παραγωγή FW 210 L/day με το σύνολο των πάνελ ενεργό.

Πίνακας 28: Εκτίμηση θερμικής απόδοσης αποστακτήρα MSS

MSS		Μονάδα	Τιμή
Ενεργά πάνελ		nr	73
Ώρες λειτουργίας ημερησίως		h/day	10.00
Επιφάνεια εξάτμισης	A_s	m ²	0.70
Ημέρα μέγιστης παραγωγής (14/6/2023)			
Μέγιστη ημερήσια παραγωγή νερού		L/day	280.00
Μάζα ωριαία παραγόμενου νερού ανά αποστακτήρα	\dot{m}_{dw}	Kg/hr-unit	3.84
Συνολική ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία	$I(t)$	W/m ²	6104.80
Μέση ημερήσια θερμοκρασία νερού στην επιφάνεια εξάτμισης	T_{vs}	C°	70.72
Λανθάνουσα θερμότητα	L_{hg}	J/kg	2320418.45
Μέγιστη ημερήσια θερμική απόδοση MSS	η_d		0.58
	%		58.14
Ιούνιος-Ιούλιος 2023			
Μέση ημερήσια παραγωγή νερού		L/day	121.47
Μάζα ωριαία παραγόμενου νερού ανά αποστακτήρα	\dot{m}_{dw}	Kg/hr-unit	1.66
Συνολική ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία	$I(t)$	W/m ²	7528.81
Μέση ημερήσια θερμοκρασία νερού στην επιφάνεια εξάτμισης	T_{vs}	C°	75.39
Λανθάνουσα θερμότητα	L_{hg}	J/kg	2320418.60
Μέση ημερήσια ημερήσια θερμική απόδοση MSS (Ιουνίου & Ιουλίου)	η_d		0.20
	%		20.35
Μέση ημερήσια ημερήσια θερμική απόδοση MSS (Ιουνίου & Ιουλίου)	η_d		0.32
<i>Βάσει των προδιαγραφών του κατασκευαστή ($\dot{m}_{dw}=210$ L/day, nr =80)</i>	%		32.10

Όπως λοιπόν παρατηρείται, επιτυγχάνεται μέγιστη θερμική απόδοση 58.1%, με μέση τιμή για του μήνες Ιούλιο-Ιούνιο 20.4%, χαμηλότερη της αντίστοιχης μέσης τιμής 32.1 % που προκύπτει βάσει των προδιαγραφών του κατασκευαστή. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη χαμηλότερη από την εκτιμώμενη παραγωγή FW. Οι εν λόγω τιμές είναι εντός του εύρους που δίνεται βιβλιογραφικά (Πίνακας 30). Σχολιάζεται πως, η μέση θερμική απόδοση που καταγράφεται στο πεδίο βρίσκεται οριακά ωστόσο εντός του εύρους, μαρτυρώντας πιθανώς την απαίτηση βελτιστοποίησης της μόνωσης των αποστακτών για τη μείωση των απωλειών ενέργειας.

5.4 Εκτίμηση ειδικού κόστους παραγόμενου νερού

Για τον θεωρητικό υπολογισμό του κόστους του παραγόμενου νερού ανά m² του συστήματος αποστακτών ακολουθήθηκε η παρακάτω μεθοδολογία (Younes *et.al.* 2021), ώστε να είναι δυνατή μία συγκριτική αξιολόγηση στα βιβλιογραφικά πλαίσια της τεχνολογίας ηλιακών αποστακτών. Το οικονομικό μοντέλο για το σύνολο της εγκατάστασης παρατίθεται και σχολιάζεται σε επιμέρους ενότητα.

Το συνολικό ετήσιο κόστος (Total cost – TC) υπολογίστηκε από το άθροισμα του ετήσιου σταθερού κόστους (Fixed annual cost – FAC) και του ετήσιου κόστους συντήρησης (Annual maintenance cost – AMC) αφαιρώντας την ετήσια αξία εκκαθάρισης (Annual salvage value – ASV), η οποία αναφέρεται στην αξία των περιουσιακών στοιχείων (εδώ του ηλιακού αποστακτήρα MSS) που παραμένουν εάν η εταιρεία βγει εκτός λειτουργίας:

$$TC = AFC + AMC - ASV \quad (8)$$

Το ετήσιο σταθερό κόστος, το ετήσιο κόστος συντήρησης και η ετήσια αξία εκκαθάρισης υπολογίστηκαν από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$FAC = P \left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) \quad (9)$$

$$AMC = 0.15 P \left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) \quad (10)$$

$$ASV = 0.2 P \left(\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right) \quad (11)$$

Όπου, το ετήσιο επιτόκιο i είναι 1.5%, ο χρόνος απόσβεσης του δανείου n είναι 20 έτη καθώς το πρόγραμμα εξελίσσεται στο πλαίσιο ερευνητικού προγράμματος, ενώ από τον κατασκευαστή εκτιμάται πως τα ετήσια κόστη συντήρησης ισούνται στο 1% του κόστους κεφαλαίου P . Ωστόσο εδώ και σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, έγινε η παραδοχή πως ο χρόνος απόσβεσης του δανείου n είναι 10 έτη, το επιτόκιο $i = 15\%$ και τα ετήσια κόστη συντήρησης (AMC) διαμορφώνονται στο 15% του P , για να είναι δυνατή μία ρεαλιστική σύγκριση. Η συνολική αξία εκκαθάρισης ορίζεται στο 20% του P , το οποίο συνιστά το κόστος κατασκευής κάθε μονάδας αποστακτήρα. Τελικά η τιμή του παραγόμενου σε νερού ανά λίτρο και m^2 αποστακτήρα του MSS (Cost per Litre – CL), υπολογίστηκε ως:

$$CL = \frac{TC}{Y} \quad (12)$$

Όπου το Y αφορά την ετήσια παραγωγή FW του συστήματος σε λίτρα, λαμβάνοντας υπόψη ότι το σύστημα λειτουργεί αδιαλείπτως σε ετήσια βάση. Βάσει των παραπάνω παράχθηκε ο ακόλουθος **Πίνακας 29** που εν τέλει εκτιμά το κόστος νερού ανά λίτρο και m^2 αποστακτήρα του μελετώμενου συστήματος (σε ευρώ και δολάρια, ισοτιμία 1:1.12).

Πίνακας 29: Οικονομικής εκτίμηση αποστακτήρα MSS

Παράμετρος	€	\$
Κόστος μονάδας αποστακτήρα (P , € ή \$ /unit)	475	532
Επιφάνεια κάλυψης ανά αποστακτήρα (A , m^2)	1.875	
Κόστος μονάδας ανά m^2 επιφάνειας (€ ή \$ / m^2)	253.33	283.73
Ετήσιο επιτόκιο (i , %)	15% (0.15)	
Χρόνος ζωής αποστακτήρα (n , έτη)	10	
Συνολικό ποσοστό εκκαθάρισης αποστακτήρα (%)	20% (0.2)	
FAC	50.48	56.54
AMC ($0.15 * P$)	7.58	8.48
ASV	2.5	2.8
TC	55.55	62.22
Y (L/ m^2 -d)	511	
Κόστος παραγόμενου νερού (CL, € ή \$ /L/m^2)	0.109	0.121
Κόστος παραγόμενου νερού, για $i = 1.5\%$ (CL, € ή \$ /L/ m^2)	0.0526	0.059
Κόστος παραγόμενου νερού, για $i = 1.5\%$ & $AMC = 1\% P$ (CL, € ή \$ /L/ m^2)	0.045	0.05
Κόστος παραγόμενου νερού, για $i = 1.5\%$, $AMC = 1\% P$ & $n = 20$ έτη (CL, € ή \$ /L/ m^2)	0.025	0.028

Είναι σημαντικό να τονιστεί πως, η παραπάνω τιμή αφορά το κόστος νερού βάσει των προδιαγραφών του MSS από τον κατασκευαστή, όπου ορίζεται μέση ημερήσια παραγωγή νερού 210 L/day. Στην περίπτωση που ληφθεί υπόψη η μέση ημερήσια τιμή όπως υπολογίστηκε στην παρούσα εργασία, ίση με 105.41 L/day, προσαυξημένη κατά 18.2 L/day για τους 7 αποστακτήρες που δεν λειτουργούν, το κόστος διαμορφώνεται στα 0.19 €/L/ m^2 .

5.5 Συγκριτική αξιολόγηση διαφόρων τύπων ηλιακών αποστακτήρων

Στον **Πίνακα 30** παρακάτω, γίνεται προσπάθεια μίας σύντομης βιβλιογραφικής ανασκόπησης ως προς την ειδική παραγωγή, το ειδικό κόστος νερού και τη θερμική απόδοση μεταξύ διαφορετικών ηλιακών αποστακτήρων. Παρουσιάζονται και συγκρίνονται διαφορετικοί τύποι παθητικών (Π) και ενεργητικών (Ε), πιο απλών αλλά και πολύπλοκων συστημάτων ηλιακής απόσταξης όπως αντλήθηκαν από τη διαθέσιμη βιβλιογραφία. Σχολιάζονται επίσης, τα κυρίως ευρήματα που προέκυψαν στην εκάστοτε μελέτη ως προς το κόστος κατασκευής κάθε συσκευής αλλά και την βελτιστοποίηση της μελετώμενης τεχνολογίας.

Πίνακας 30: Συγκριτική αξιολόγηση ειδικής παραγωγής και απόδοσης ηλιακών αποστακτήρων

Τύπος Αποστακτήρα	Μέγιστη Ημερήσια Ειδική Παραγωγή ($L_{FW}/m^2/d$)	Θερμική Απόδοση (%)	Ειδικό Κόστος Νερού (\$/L)	Σχόλια – Κόστος κατασκευής	Βιβλιογραφία
Τύπου “Καταρράκτη” – Τροποποιημένος με φράγματα (Π)	6.7	–	–	<u>Φράγματα</u> : Αύξηση του χρόνου παραμονής του νερού & αποφυγή ξηρών σημείων	Ziabari <i>et.al.</i> 2013
Μονής κλίσης (κ)/επιφάνειας (ε) τροποπ. με απορροφητή τύπου “ <i>pin fins</i> ” και εξωτερικό συμπυκνωτή (Π)	3.5	32.5	–	<u>Pin fins</u> : αύξηση συνολικής επιφ. απορρόφησης θερμότητας <u>Συμπυκνωτής</u> : Ενίσχυση φαινομένου συναγωγής	Rabhi <i>et.al.</i> 2017
Μονής κ/ε τριγωνικού καλύμματος και επιφάνειας (Π)	3.9	31	–	Βέλτιστη απόδοση σε μικρό βάθους νερού (1.5cm)	Siddula <i>et.al.</i> 2022
Κλιμακωτός αποστακτήρας με εγκατεστημένο Φ/Β θερμικό συλλέκτη (Π)	5.7	19.5	–	20% αύξηση παραγωγής FW vs χωρίς Φ/Β συλλέκτη & Ανάκτηση 1.06 kW/day ηλ. ενέργειας	Naroei <i>et.al.</i> 2018
Διπλής κ/ε με εξαναγκασμένη μεταγωγή (Ε)	3.0	62.3	–	Έως 36.84% αύξηση παραγωγής FW με αύξηση ταχύτητας ανέμου έως 5.5 m/s (οριακή τιμή)	Castillo-Téllez <i>et.al.</i> 2015
Διπλής επίδρασης αδιάφανος αποστακτήρας με ηλεκτρική μονάδα θέρμανσης (Ε)	4.5 (Άνω επιφάνεια) 3.8 (Κάτω επιφάνεια)	–	–	Εκμετάλλευση λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης & Αύξηση απόδοσης 240% με 150% αύξηση παροχής ισχύος	Kalbasi <i>et.al.</i> 2018
Κυλινδρικός με εσωτερική ημικυλινδρική γούρνα και ενσωματωμένο παραβολικό ανακλαστήρα με σύστημα ανίχνευσης ηλ. ακτινοβολίας (Ε)	3.53	28.6	0.024	676% αύξηση παραγωγής FW vs απλού κυλινδρικού ίδιας επιφάνειας – κόστος 199/m ²	Elashmawy <i>et.al.</i> 2017
Συνδυασμός τριγωνικής πυραμίδας και κεκλιμένου αποστακτήρα με διαφράγματα (Π)	7.2	–	0.0062	Κόστος FW 0.0058 \$/L για μόνο τύπου τριγ. πυραμίδας (με 5.04 L/m ² /day)	Panchal <i>et.al.</i> 2017
Πολλαπλής επίδρασης-Πυραμίδας με ενσωματωμένο PCM παραφίνης, εξωτερική μονάδα θέρμανσης νερού και ψήκτρα καλύμματος, με PV (Ε)	12.9	–	–	<u>Θέρμανση νερού</u> : 167% αύξηση παραγωγής FW <u>Ψύξη καλύμματος</u> : 15% μείωση παραγωγής FW	Al-Hamadani & Yaseen, 2019
Συμβατικού τύπου υπό καθεστώς κλειστού κύκλου τροφοδοσίας SW και με αναπλήρωση εισροής (Π)	8	73	–	57.2% αύξηση παραγωγής FW vs συμβατικού τύπου υπό ανοικτό κύκλο τροφοδοσίας	El-Agouz <i>et.al.</i> 2015
Διπλής κ/ε επιφάνειας με ενσωματωμένες θερμοηλεκτρικές (Θ/Η) μονάδες (Ε)	2.9	35	0.1422 (Ημέρα) - 0.237 (Νύχτα)	<u>Θ/Η μονάδες</u> : Ενίσχυση της νυχτερινής παραγωγής FW – Κόστος \$482.5 (CAPEX), \$129.75 (OPEX)	Rahbar <i>et.al.</i> 2017
Τύπου Πυραμίδας με ενσωματωμένο “φυτίλι” ινών γιούτας, εξωτερ. ανακλαστήρες, ψύξη καλύμματος με διαβροχή και νανοϋλικό TiO ₂ (Ε)	7	83.8	0.021	127.27%. υψηλότερη απόδοση από συμβατικό αποστακτήρα – Κόστος \$456	Sharshir <i>et.al.</i> 2022
Κεκλιμένος αποστακτήρας τύπου “Φυτιλιού” με ενσωματωμένο ηλ. συλλέκτης επίπεδης πλάκας (Π)	4.0	22.1	–	28.4% υψηλότερη απόδοση από συμβατικό αποστακτήρα	Negi <i>et.al.</i> 2023
Τύπου “Καταρράκτη” με κοίλα επίπεδα και ενσωματωμένο εσωτερικό ανακλαστήρα (Π)	2.07	28	0.028	Vs 1.55 L/m ² /day και 20%, όμοιος τύπος με λεία επίπεδα – Κόστος \$ 80	Mosahebi <i>et.al.</i> 2023
Τύπου “Καταρράκτη” με φράγματα (Π)	7.4	63.3	–	Μείωση σε 1.55 L/m ² /day και 20%, με αύξηση ρυθμού ροής από 0.065 σε 0.2L/hr	Tabrizi <i>et.al.</i> 2010

Κλιμακωτός νέου τύπου, με πολλαπλά κάθετα επίπεδα (Π)	3.3	55.8	0.01	Αύξηση διαθέσιμης επιφάνειας εξάτμισης – Αύξηση απόδοσης έως 104.73% vs συμβατικού – Κόστος 85.5 \$	Saadi <i>et.al</i> 2018
Ημισφαιρικός με: (i) επίπεδα V-σχήματος, (ii) και “φυτίλι” από βαμβάκι, (iii) και PCM παραφίνης (iv) ή PCM λίπους προβάτου (Π)	(i) 3.8 (ii) 4.1 (iii) 4.5 (iv) 4.7	(i) 36.1 (ii) 38 (iii) 45.3 (iv) 46.2	0.137	(iv) μείωση 17.5% & Αύξηση 39.8% θερμικής απόδοσης & 39.6% παραγωγής FW vs συμβατικού ημισφαιρικού – Κόστος (iv) \$105	Sharshir <i>et.al.</i> 2023
Μονής κ/ε με: (i) ημικυλινδρικά επίπεδα κανάλια (ii) και “φυτίλι”, (iii) και PCM παραφίνης και νανοϋλικών (CuO) (Π)	(i) 3.5 (ii) 5.8 (iii) 7.1	(i) 41.5 (ii) 52.5 (iii) 57	0.021	Αύξηση επιφάνειας εξάτμισης και ποσότητας PCM λόγω σχήματος – Αύξηση απόδοσης vs συμβατικού: (i) 43% (ii) 123% (iii) 154% – Κόστος \$185	Younes <i>et.al.</i> 2021
Μονής κ/ε με ενσωματωμένο “φυτίλι” από βαμβάκι υπό συνεχή ροή SW κλειστού κύκλου (Π)	3.03	50.55	0.0118	Αύξηση απόδοσης 21.1% με την ενσωμάτωση “φυτιλιού” – Κόστος \$ 85	Ahmed <i>et.al.</i> 2021
Μονής κ/ε με ενσωματωμένη σπειροειδή διάταξη προθέρμανσης νερού (Π)	8.3	–	–	Αύξηση απόδοσης 7% vs συμβατικού & Ισοδύναμη ανάκτηση ισχύος 150 W – Κόστος \$ 289.2	Taamneh <i>et.al.</i> 2020
Τύπου “Καταρράκτη” με ενσωματ. σύστημα ύγρυνσης-αφύγρυνσης (E)	5.4	39	–	Αύξηση παραγωγής FW 28-141% και απόδοσης 9-20% vs τύπου “Καταρράκτη”	Tabrizi <i>et.al</i> 2016
Διπλής κ/Μονής ε με σύστημα ψύξης καλύμματος (E)	1.04	37.9	0.193	Αύξηση απόδοσης 28.9% vs συμβατικού – Κόστος \$ 275.2	Sibagariang <i>et.al.</i> 2022
(i) Μονής κ/ε (ii) Μονής κ/Διπλής ε χωρίς και (iii) με εξωτερικό σύστημα ηλεκτρικής θέρμανσης στην κατώτερη επιφάνεια (E)	(i) 2.74 (ii) 5.78 (iii) 6.72	–	–	(iii) Επιπλέον θέρμανση της άνω επιφάνειας λόγω συμπύκνωσης στο κάλυμμα της κατώτερης & Αύξηση παραγωγής FW 15.57%	Kamal <i>et.al.</i> 2021
Μονής κ/ε με ημισφαιρικά διαστήματα με “Φυτίλι” ινών γιούτας (Π)	6.83	–	–	Αύξηση διαθέσιμης επιφάνειας εξάτμισης & Γρήγορη αύξηση διαφοράς θερμοκρασίας με το κάλυμμα- 23% υψηλότερη απόδοση vs συμβατικού	Darbari & Rashidi 2022
Μονής κ/ε με ενσωματ. ανόργανο νάνο-PCM (Π)	2.89	–	–	Αύξηση της θερμοκρασίας νερού έως 14°C (ημέρα-νύχτα) – Αύξηση απόδοσης 45.2% vs συμβατικού	Kumar <i>et.al.</i> 2023
Χαμηλού κόστους μονής κ/ε ενσωματ. “φυτίλι” και εξωτερικό συμπυκνωτή (i) χωρίς και (ii) με ανακλαστήρα (E)	(i) 1.1 (ii) 1.7	(i) 30.1 (ii) 46.1	(i) 0.04 (ii) 0.05	(ii) Αύξηση παραγωγής FW 56.4% – Κόστος FW: (i) \$143, (ii) \$193	Darabi <i>et.al.</i> 2022
Μονής κ/ε με ενσωματ. “φυτίλι σε συνδυασμό με ηλιακή λίμνη (Π)	3.9 (ημέρα) 2.3 (νύχτα)	–	–	55% Ενίσχυση νυχτερινής παραγωγής FW- 53.5% Ενίσχυση ημερήσιας παραγωγής FW	Bisht <i>et.al.</i> 2022
Μονής κ/ε με ενσωματ. συλλέκτη τύπου σωλήνα κενού (E)	5.2	–	–	147.4% Αύξηση απόδοσης vs συμβατικού λόγω υψηλότερης προσπίπτουσας ηλ. ακτινοβολίας (κυλινδρικό σχήμα) & ελαχιστοποίησης απωλειών (κενό)	Dsouza & Mallikappa, 2023
Κλιμακωτός με ενσωματωμένο παθητικό συμπυκνωτή (Π)	3.96	36	0.11	32% πιο ακριβός & 150% αποδοτικότερο vs συμβατικού κλιμακωτού – Κόστος 540\$	Amiri 2022
Μονής κ/ε κλιμακωτός αποστακτήρα με δυνατότητα εισαγωγής “φυτιλιού” (Π)	2.2 (μέση) 5 (μέγιστη)	32.1 (μέση) 58.1 (μέγιστη)	0.116	Δεδομένα συνεχούς ημερήσιας λειτουργίας – Κόστος μονάδας 475 €	Παρούσα Μελέτη

Βάσει όσων παρουσιάστηκαν παραπάνω, παρατηρείται πως η συσκευή αποστακτήρα που μελετάται εδώ υστερεί κατά πλειοψηφία στην ειδική παραγωγή καθαρού νερού (2.2 L/m²/d) όπως υπολογίστηκε με τα δεδομένα πεδίου, ενώ χαρακτηρίζεται ως μέσης απόδοσης σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή (3.5 L/m²/d). Επιπλέον, έχει υψηλότερο συγκριτικά κόστος κατασκευής (475€/unit) και κόστος παραγόμενου νερού (0.1 €/L).

Ωστόσο, το κόστος νερού βάσει του οικονομικού μοντέλου της εταιρείας κατασκευής (**Ενότητα 5.12**) όπου λαμβάνονται υπόψη διάφορα χρηματοδοτικά εργαλεία που προσφέρθηκαν στα πλαίσια της έρευνας, διαμορφώνεται στην πράξη αρκετά χαμηλότερα (0.02 €/L). Επιπλέον, ο αποστακτήρας MSS αποτελεί μία απλή τεχνολογία με χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης, ενέργειας (**Πίνακας 31**), εξειδίκευσης και εργατικού δυναμικού (**Πίνακας 32**).

Διαπιστώνεται εδώ, πως βάσει των δεδομένων που αφορούν συνεχή ημερήσια λειτουργία του συστήματος σε κλίμακα πεδίου για την περίοδο των τριών τελευταίων χρόνων, συνολικά η μονάδα του MSS είναι άμεσα συγκρινόμενη σε απόδοση, κόστος και κόστος παραγόμενου νερού έναντι παρόμοιων συσκευών που μελετώνται στη βιβλιογραφία υπό πειραματικές συνθήκες ορισμένου χρόνου.

Τέλος, το σύστημα δύναται να βελτιστοποιηθεί παθητικά καθώς έχει την δυνατότητα να δεχτεί υλικό “φυτιλιού”, τροποποίηση που είναι υπό μελέτη επί του παρόντος με στόχο της ενίσχυση της απόδοσής του (**6^ο Κεφάλαιο**). Αποτελεί πρότυπο σύστημα καθώς δύναται να επεκταθεί, προσθέτοντας στο ήδη υπάρχον επιπλέον μονάδες MSS χωρίς περαιτέρω τροποποίηση, ενώ η ανάκτηση εδώδιμου αλατιού από την προκύπτουσα άλμη αποτελεί πλεονέκτημα που δυνητικά αποφέρει οικονομικά κέρδη, μειώνοντας ως εκ τούτου τα ετήσια κόστη του (**Πίνακας 43**) και συμβάλλοντας στην επίτευξη μηδαμινών εκροών.

5.6 Απαιτήσεις του MSS σε ενέργεια και ανθρώπινο δυναμικό

Ο προσδιορισμός της ημερήσιας κατανάλωσης ενέργειας βασίστηκε στην ημερήσια λειτουργία και στο 65% της ονομαστικής ισχύος των τροφοδοτούμενων μερών του συστήματος, καθώς δεν λειτουργούν στη μέγιστη τιμή τους συνεχώς, αφού δεν γίνεται κατάθλιψη του νερού. Η καταναλισκόμενη ενέργεια αφορά κυρίως τη λειτουργία των αντλιών, καθώς μόνο εκεί γίνεται χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο. Ο **Πίνακας 31** συνοψίζει τα επιμέρους στοιχεία.

Πίνακας 31: Ημερήσια κατανάλωση ενέργειας του MSS

Όργανο	Ονομαστική Ισχύς (kW)	Ημερήσια λειτουργία (Ωρες)	Ημερήσια Κατανάλωση E (kWh/day)
1 Αντλία SW	0.49	0.08	0.04
1 Αντλία SW1 ή SW2 ("Δίδυμες", εναλλάξ λειτουργίας)	0.49	10.00	4.88
2 Αντλίες FW2	0.33	0.25	0.08
1 Αντλία Άρδευσης	0.16	0.17	0.03
1 Αντλία Άλμης	0.49	0.33	0.16
1 Αντιστροφέας αντλίας (Inverter)	1.2	1.00	1.20
Σύνολο	3.15	11.83	6.39
MSS	Παραγωγή FW (L/day)	kWh/L	kWh/m ³
Ειδική κατανάλωση E (Κατασκευαστή)	210.0	0.03	30.41
Ειδική κατανάλωση E (Πεδίου)	123.6	0.05	51.66

Παρατηρείται λοιπόν, πως το MSS είναι μία τεχνολογία χαμηλής ενεργειακής απαίτησης με ημερήσια συνολικά κατανάλωση ενέργειας 6.4 kWh. Ωστόσο, η ειδική κατανάλωση ενέργειας του συστήματος είναι υψηλότερη έναντι αυτής των συμβατικών τεχνολογιών αφαλάτωσης. Το γεγονός αυτό αποδίδεται όπως είναι προφανές, στη χαμηλή παραγωγή νερού ημερησίως. Η ειδική κατανάλωση σχεδόν διπλασιάζεται λαμβάνοντας υπόψη την απόδοση όπως καταγράφηκε στο πεδίο έναντι αυτή υπό τις προδιαγραφές του συστήματος.

Σημειώνεται πως το ενεργειακό αυτό κόστος αφορά μόνο την παραγωγή νερού. Τα δεδομένα της ανάκτησης αλατιού από το σύστημα δίνονται στη συνέχεια.

Σχετικά με το ανθρώπινο δυναμικό τώρα, που απαιτείται για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος. Αυτό απαρτίζεται από δύο (2) άτομα περιλαμβάνοντας τον λειτουργό του συστήματος και έναν βοηθό για ζητήματα

τεχνικής φύσης και συντήρηση του χώρου. Οι σχετικές εργατοώρες που αφορούν λοιπόν έναν εργαζόμενο σταθερής και έναν περιστασιακής εργασίας, αντίστοιχα, αναφέρονται ως εξής:

Πίνακας 32: Απαιτήσεις Εργατικού δυναμικού MSS

Υπάλληλος MSS	Εβδομαδιαίες Εργατοώρες MSS (hrs/week)	Ετήσιες Εργατοώρες MSS (hrs/year)	Ισοδύναμο ετήσιας πλήρους απασχόλησης (8ώρου) (days/year)
Λειτουργός (Full time)	14	672	84
Βοηθός (Part time)	1.5	72	9
Σύνολα	11	744	93

Τέλος, στον ακόλουθο **Πίνακας 33**, συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά απόδοσης και λειτουργίας του MSS, όπως αντλήθηκαν στα πλαίσια της παρούσης εργασίας από τις ημερήσιες καταγραφές στο πεδίο για διάστημα ενός έτους.

Πίνακας 33: Χαρακτηριστικά απόδοσης αποστακτήρα MSS

Παράμετρος	Τιμή
Συνολικό κόστος MSS (P_v , €)	38000
Κόστος αποστακτήρα MSS (P , €/unit)	475
Πλήθος αποστακτών συστήματος	80
Πλήθος ενεργών αποστακτών συστήματος	73
Ώρες λειτουργίας ημερησίως (hrs)	10
Ημέρες λειτουργίας ετησίως (days)	365
Απαιτούμενες εργατοώρες ετησίως (hrs)	744
Επιφάνεια εξάτμισης αποστακτήρα (A_s , m ²)	0.7
Επιφάνεια κάλυψης αποστακτήρα (A , m ²)	1.875
Συνολική επιφάνεια κάλυψης (A , m ²)	150
Έτη λειτουργίας	4
Μέγιστη μάζα ημερήσια μάζα παραγόμενου νερού ($\sum \dot{m}$, L/day)	280.0
Μέση ημερήσια παραγωγή νερού - Κατασκευαστή ($\sum \dot{m}$, L/day)	210.0
Μέση ημερήσια παραγωγή νερού - Πεδίου ($\sum \dot{m}$, L/day)	123.6
Μέγιστη ειδική παραγωγή MSS ($\dot{m}_{sp}/L/m^2$)	5.0
Μέση ειδική παραγωγή MSS - Κατασκευαστή ($\dot{m}_{spA}/L/m^2$)	3.5
Μέση ειδική παραγωγή MSS ($\dot{m}_{spA}/L/m^2$)	2.2
Μέγιστη ημερήσια απόδοση MSS - Κατασκευαστή (η_{Wv} , %)	33.0
Μέγιστη ημερήσια απόδοση MSS - Πεδίου (η_{Wv} , %)	29.38
Μέση ημερήσια απόδοση MSS - Κατασκευαστή (η_{WA} , %)	28.0
Μέση ημερήσια απόδοση MSS - Πεδίου (η_{WA} , %)	17.4
Μέγιστη ημερήσια θερμική απόδοση MSS (η_d , %)	58.1
Μέση ημερήσια θερμική απόδοση - Κατασκευαστή (η_d , %)	32.1
Μέση ημερήσια θερμική απόδοση MSS - Πεδίου (η_d , %)	20.4
Κόστος παραγόμενου νερού - Κατασκευαστή (CL, €/L/m ²)	0.11
Κόστος παραγόμενου νερού - Πεδίου (CL, €/L/m ²)	0.19
Ημερήσια καταναλισκόμενη ενέργεια (E, kWh/d)	6.4
Ειδική κατανάλωση E - Κατασκευαστή (kWh/L)	0.03
Ειδική κατανάλωση E - Πεδίου (kWh/L)	0.05

5.7 Συντήρηση & Έλεγχος MSS

Για την απρόσκοπτη λειτουργία και απόδοση του μελετώμενου συστήματος, ως προς τις βέλτιστες ποιοτικές και ποσοτικές παραμέτρους απαιτήθηκε η τακτική παρακολούθηση και συντήρηση του. Στον παρακάτω **Πίνακας 34**, αποτυπώνεται το συνολικό πλάνο εργασιών.

Πίνακας 34: Πλάνο εργασιών συντήρησης και ελέγχου MSS

Εργασία	Συχνότητα	Διάρκεια	Σχόλια
Γενικός έλεγχος για τυχόν διαρροές (πάνελ MSS, SF, υδραυλικό δίκτυο)	2/εβδομάδα	30 λεπτά	-
Γενικός έλεγχος μονάδων	2/εβδομάδα	1 ώρα	Έλεγχος για συσσώρευση αλάτων, αντικατάσταση σταλακτών, μόνωση, αντικατάσταση μπουλονιών σφράγισης
Γενικός έλεγχος δεξαμενών και σωληνώσεων	2/εβδομάδα	10 λεπτά	Διαρροές, πληρότητα, αισθητήρες, αντλίες
Γενικός έλεγχος & συντήρηση αντλιών	Ανά 2 εβδομάδες	30 λεπτά	Διαρροές, σχηματισμός σκουριάς, λειτουργίας, καθαρισμός φίλτρων
Γενικός έλεγχος πλέγματος στήριξης αποσταστακτήρων	Κάθε μήνα	1 ώρα	Συσσώρευση σκουριάς και αλάτων, στήριξη
Εφαρμογή αντισκωριακή προστασίας	Ετησίως	10+ ώρες	Απομάκρυνση σκουριάς & αντισκωριακή επίστρωση
Εφαρμογή <i>by-pass</i> σε κάθε αποστακτήρα με ταυτόχρονο καθαρισμό του εσωτερικού καναλιού συλλογής FW και των εξόδων ροών -	1-2/εβδομάδα	2 ώρες	Απομάκρυνση συσσωρευμένων αλάτων & διάσπαση επιφανειακού μικροφίλμ Κύρια εργασία για την διατήρηση της ποιότητας εξόδου του FW. Προσεκτική διενέργεια για την αποφυγή επιμόλυνσης του καθαρού νερού.
Καθάρισμα γυάλινων καλυμμάτων αποστακτήρων	Εβδομαδιαίως	0.5-1 ώρα	Προσεκτική απομάκρυνση σκόνης και ακαθαρσιών
Αφαίρεση αγριόχορτων από τον περιβάλλοντα χώρο	Κάθε μήνα	1 ημέρα	-
Παύση λειτουργίας και πλήρης & Ενδεδειγμένος καθαρισμός του συστήματος	Σε έκτακτες μη αναστρέψιμης ανόδου της EC του παραγόμενου FW.	7-10 ημέρες	Πλήρης εσωτερικός και εξωτερικός καθαρισμός των αποστακτήρων – Αποφράξεις μερών - Λειτουργία συστήματος με νερό δικτύου για την απορροή αλάτων (υδρ. δίκτυο, αντλίες, πάνελ).
Έλεγχος ροόμετρων και καταγραφή δεδομένων	2/εβδομάδα	5 λεπτά	
Έλεγχος συστήματος παρακολούθησης (PLC, H/Y, απομακρυσμένος έλεγχος)	Καθημερινά	5 λεπτά	Έλεγχος συνδεσιμότητας δικτύου, διασύνδεσης - Αναβαθμίσεις, εξαγωγή δεδομένων
Έλεγχος & επανεκκίνηση αισθητήρων	Καθημερινά	5 λεπτά	Έλεγχος διασύνδεσης & ανταπόκρισης
Γενική φροντίδα χώρου εγκατάστασης	Εβδομαδιαίως	15 λεπτά	Διατήρηση υγιεινής & αισθητικής

Διαπιστώνεται λοιπόν, πως το MSS χαρακτηρίζεται από απλότητα λειτουργίας, χωρίς να απαιτείται χρονοβόρες και εξειδικευμένες εργασίες ελέγχου και συντήρησης. Είναι ως εκ τούτου, χρηστικό για γεωργούς που διατηρούν αποκεντρωμένα, καλλιέργειες μικρής κλίμακας χωρίς παροχή αρδευτικού νερού.

5.8 Προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν

Στον ακόλουθο **Πίνακας 35** περιγράφονται τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν ως προς τη λειτουργία του συστήματος MS κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσης. Αποτυπώνεται ακολούθως, η αιτία αυτών και οι ενέργειες αντιμετώπισης και συντήρησης που έλαβαν χώρα. Τέλος, παρατίθενται προτάσεις βελτιστοποίησης για την αποφυγή παρόμοιων συμβάντων μελλοντικά.

Πίνακας 35: Περιγραφή προβλημάτων κατά τη λειτουργία του MSS

Πρόβλημα	Αιτία	Αντιμετώπιση	Βελτιστοποίηση
Έμφραξη της εξόδου άλμης εσωτερικά του αποστακτήρα – Υπερχείλιση στο κανάλι ανακτώμενου νερού & Αύξηση EC	Δημιουργία επιφανειακού μικροφίλμ εσωτερικά των πάνελ– Κρυστάλλωση λόγω χαμηλής διαλυτότητας ή υψηλής συγκέντρωσης ανόργανων ιόντων (υπέρβαση του ορίου ισορροπίας της διαλυτότητάς τους) που καθιστούν το διάλυμα υπερκορεσμένο (Εικόνα 61) .	i) Τακτικός χειρωνακτικός καθαρισμός καναλιού & απόφραξη της εξόδου ii) Εφαρμογή περιοδικού by-pass για τη διάλυση των αλάτων iii) Γενικός καθαρισμός MSS	i) Επανασχεδιασμός των πάνελ εφαρμόζοντας κλίση στον αγωγό εξόδου άλμης ii) Εγκατάσταση συστήματος νυχτερινής έκπλυσης με καθαρό νερό
Έμφραξη αντλιών SW και εμφάνιση σκουριάς εσωτερικά των πάνελ (Εικόνα 60-1)	Μακροχρόνια & συνεχής λειτουργία με θαλασσινό νερό - Ακατάλληλος τύπος αντλίας (γλυκού νερού)	Περιοδική συντήρηση και εφαρμογή αντιδιαβρωτικής προστασίας-Αντικατάσταση στο τέλος ζωής (6-12 μήνες)	Εγκατάσταση κατάλληλου τύπου αντλιών (Αυξημένο κόστος)
Εμφάνιση σκουριάς στο παραγόμενο νερό (Εικόνα 60-2)	Όμοια με τις παραπάνω	i) Τακτικός χειρωνακτικός καθαρισμός αποστακτήρων ii) Δειγματοληψία & Ανάλυση δειγμάτων	i) Επανασχεδιασμός των αποστακτήρων ii) Εγκατάσταση κατάλληλου τύπου αντλιών
Άδειασμα αντλίας SW κατά τις ώρες μη λειτουργίας – Αδυναμία εκκίνησης	Βλάβη στην αντεπιστροφή βαλβίδα της αντλίας (Εικόνα 60-3)	i) Πλήρωση αντλίας με νερό ii) Αντικατάσταση βαλβίδας	–
Έμφραξη μικρο-σταλακτών στα πάνελ	Κρυστάλλωση αλάτων – Φερτά υλικά	Αντικατάσταση (Εικόνα 60-4)	–
Έμφραξη σημείων υδραυλικού δικτύου – Υπερχείλιση δεξαμενών ή εσωτερικών καναλιών των πάνελ	Φερτά υλικά	Εντοπισμός και απόφραξη Καθαρισμός φίλτρων & δεξαμενών	Εγκατάσταση βελτιστοποιημένων φίλτρων & συστήματος έγκαιρης ενημέρωσης
Αδυναμία απόκρισης των ενδείξεων στάθμης – Παρεμπόδιση αυτοματισμού – Υπερχείλιση δεξαμενών	Πρόβλημα αυτοματισμού και επικοινωνίας των αισθητήρων με το PLC	i) Επανεκκίνηση του κόμβου ii) Εγκατάσταση φλοτέρ στις δεξαμενές SW & Irrigation (Εικόνα 60-5)	Βελτιστοποίηση του αυτοματισμού – Προσθήκη λειτουργίας αυτόματος επανεκκίνησης του κόμβου
Διαρροές μονάδων αποστακτήρων (Εικόνα 60,-6)	i) Αποσυναρμολόγηση των μερών ii) Ράγισμα της επιφάνειας εξάτμισης κατά τον γενικό καθαρισμό με πιεστικό μηχανήμα	i) Πλήρης αποσυναρμολόγηση & σφίξιμο εφραπτόμενων επιφανειών ii) Σφράγιση με σιλικόνη (Εικόνα 60-7) iii) Αποφυγή χρήσης πιεστικού iv) Αποκλεισμός λειτουργίας	Ορθή αντικατάσταση των φθαρμένων αποστακτήρων
Αποχρωματισμός επιφάνειας εξάτμισης των αποστακτήρων (Εικόνα 60-8)	Μακροχρόνια λειτουργία υπό υψηλή ηλιακή ακτινοβολία	Εργαστηριακές αναλύσεις ποιότητας του γλυκού νερού	Αντικατάσταση φθαρμένων αποστακτήρων – Επανασχεδιασμός
Διακοπή ηλεκτροδότησης – Αυξομειώσεις τάσης	Παλαιότητα και σχεδιασμός τοπικών υποδομών δικτύου	–	Εγκατάσταση εξωτερικής συσκευής τροφοδοσίας ρεύματος π.χ. UPS

Εν συνεχεία αποτυπώνονται τα προαναφερόμενα συμβάντα:



Εικόνα 60: Προβλήματα κατά το διάστημα λειτουργίας του MSS

Όπως έχει προαναφερθεί, έως και το διάστημα Οκτωβρίου-Δεκεμβρίου του 2022 παρουσιάζονταν συμβάντα ξαφνικής ανόδου της EC του παραγόμενου FW. Το πρόβλημα αναγνωρίστηκε και αποδόθηκε στην δημιουργία επιφανειακού μικροφίλμ σε τμήματα ροής των καναλιών του αποστακτήρα και την επακόλουθη έμφραξη της εξόδου απορροής της άλμης, όπως περιεγράφηκε παραπάνω (**Εικόνα 61**). Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, άλμη να υπερχειλίζει στο κατάντη κανάλι απόσταξης του πάνελ. Το πρόβλημα επιλύθηκε με την κατάρτιση και εφαρμογή πλάνου τακτικού καθαρισμού και ελέγχου των καναλιών. Παράλληλη εφαρμόζεται σε εβδομαδιαία βάση *by-pass* νερού, όπου παρέχεται στιγμιαία αλμυρό και πάλι νερό με μεγαλύτερο ρυθμό ροής σε κάθε αποστακτήρα με σκοπό τη διάσπαση του φιλμ και την απομάκρυνση των αλάτων. Έτσι, όπως φάνηκε στο η τιμή της EC του FW, έχει πλέον σταθεροποιηθεί σε πολύ χαμηλά επίπεδα.



Εικόνα 61: Δημιουργία μικροφίλμ στη ροή εσωτερικά του αποστακτήρα (*αριστερά*) και παρεμπόδιση απορροής της άλμης (*δεξιά*).

Όπως προέκυψε εμπειρικά κατά την εκπόνηση της παρούσης σχετικά με το παραπάνω ζήτημα, προτείνεται η εφαρμογή μικρής κλίσης (2-4%) στον αγωγό εξόδου της άλμης, όπου φάνηκε να βοηθά την απορροή αυξάνοντας την ταχύτητά της, αφού η παροχέτευση εκεί γίνεται με βαρύτητα ως αγωγός ελεύθερης επιφάνειας. Εφαρμογή ωστόσο μεγαλύτερης του επιθυμητού κλίσης θα επέφερε μείωση της διατομής με αποτέλεσμα ο αγωγός να μπει υπό πίεση. Τέλος, ως αντικατάσταση του περιοδικού *by-pass* που επιδρά στην κανονική λειτουργία του MSS, προτείνεται η υιοθέτηση ενός αυτοματισμού, νυκτερινής έκπλυσης των πάνελ με παροχή σε αυτά γλυκού νερού για μικρό χρονικό διάστημα της τάξης 1-2 ωρών ανά 2-3 ημέρες. Οι εν λόγω προτάσεις χρίζουν περαιτέρω μελλοντικής και σαφέστερης διατύπωσης για την υιοθέτησή τους.

5.9 Ανάκτηση εδώδιμου αλατιού

Κατά τη διάρκεια της μελέτης, το σύστημα ανάκτησης εδώδιμου αλατιού από το παραπροϊόν της άλμης παρέμεινε ανενεργό. Βασικός λόγος αυτού ήταν η ελλιπής εύρεση ενδιαφερόμενων μερών τοπικά, για την προσφορά του προϊόντος προς εμπορική αξιοποίηση. Ωστόσο, στα πλαίσια δειγματοληψίας που διενεργήθηκαν για τις ανάγκες του ερευνητικού προγράμματος, οι ποιοτικές παράμετροι βρέθηκαν εντός των ποιοτικών ορίων που τίθενται από την κείμενη νομοθεσία (Κανονισμός 2023/915/ΕΕ, CX STAN 150-1985). Συγκεκριμένα, η μέση καθαρότητα του προϊόντος βρέθηκε 97.2%, ενώ καμία άλλη παράμετρος δεν υπερβαίνει τα προτεινόμενα όρια. Σημειώνεται πως η συγκέντρωση του αργιλίου βρέθηκε ανεβασμένη λόγω της χρήσης αλουμινένιων ταμπλό για την εξάτμιση και ξήρανση της άλμης. Ωστόσο η συγκεκριμένη παράμετρος δεν διέπεται από περιορισμό βάσει νομοθεσίας. Στον **Πίνακα 36**, παρουσιάζονται τα σχετικά ποιοτικά αποτελέσματα των αναλύσεων σε σύγκριση με τις αντίστοιχες οριακές τιμές που τίθενται ως πρότυπα ποιότητας για το αλάτι.

Πίνακας 36: Ποιοτικά αποτελέσματα ανακτώμενου αλατιού από το MSS

Συγκέντρωση παραμέτρου ανά βάρος ξηράς ουσίας	Τιμή	Όρια Κανονισμού (ΕΕ) 2023/915	Πρότυπα κώδικα προτύπων CX STAN 150-1985
<i>Al (mg/KgDS)</i>	187	-	-
<i>As (mg/KgDS)</i>	<0.1	0.5	0.5
<i>Ca (mg/KgDS)</i>	2150	-	-
<i>Cu (mg/KgDS)</i>	<1	-	2
<i>Mg (mg/KgDS)</i>	6620	-	-
<i>Ni (mg/KgDS)</i>	<0.5	-	-
<i>K (mg/KgDS)</i>	6529	-	-
<i>Cl (g/100gDS)</i>	59	-	-
<i>SO₄ (mg/100gDS)</i>	11500	-	-
<i>Ιώδιο (mg/KgDS)</i>	2.2	-	-
<i>Υγρασία και πτητικές ουσίες</i>	14.3	-	-
<i>NaCl (gNaCl/100gDS)</i>	97.2	-	97
<i>Na (g/KgDS)</i>	38	-	-
<i>Cd (mg/KgDS)</i>	<0.1	0.5	0.5
<i>Pb (mg/KgDS)</i>	<0.2	1	1
<i>Hg (mg/KgDS)</i>	<0.05	0.1	0.1
<i>Αδιάλυτες ουσίες (g/100gDS)</i>	0.7	-	-
<i>Δισφαινόλη Α (mg/KgDS)</i>	<0.02	-	-

Σχετικά τώρα με την ημερήσια ενεργειακή κατανάλωση του εν λόγω υποσυστήματος, έγινε θεωρητική εκτίμηση λαμβάνοντας υπόψη την ονομαστική ισχύ των 17 ανεμιστήρων που περιλαμβάνει το SF, και δεδομένης της λειτουργίας τους 165 ωρών μηνιαίως για την παραγωγή 2kg αλατιού ημερησίως. Τα εν λόγω στοιχεία αποτυπώνονται στον **Πίνακας 37**, ακολούθως.

Πίνακας 37: Ημερήσια κατανάλωση ενέργειας του SF

Salt Factory	Ονομαστική Ισχύς (kW)	Ημερήσια Λειτουργία (Ωρες)	Ημερήσια Κατανάλωση Ε (kWh/day)
17 Ανεμιστήρες	0.68	5.5	3.74
Σύνολο με MSS			10.13
Ημερήσια Παραγωγή Αλατιού (kg)	2		
Ειδική Κατανάλωση Ε (kWh/kg)	1.87		

Η ενέργεια που απαιτείται όπως συμπεραίνεται, συνεισφέρει ελάχιστα στην συνολική κατανάλωση του MSS. Για το λόγο αυτό σήμερα, αναζητούνται ενδιαφερόμενοι φορείς και καταστήματα για την εμπορική αξιοποίησή του ανακτώμενου αλατιού. Η επαναφορά πλήρους λειτουργίας του συστήματος, κρίνεται σημαντική καθώς αποτελεί ένα από τα πλεονεκτικά χαρακτηριστικά της πρότυπης τεχνολογίας που μελετάται. Το SF σε θεωρητική βάση, μπορεί να αποφέρει κέρδη στον φορέα διαχείρισης ενός συστήματος MSS καθιστώντας το οικονομικά πιο βιώσιμο. Παράλληλα συνδράμει στην εξάλειψη των περιβαλλοντικών εκροών. Τέλος, σχετικά με τις εργατώρες που απαιτούνται για την ανάκτηση 1 Kg αλατιού ανά ημέρα απαιτήθηκε πρόσθετη συνολική εργασία περίπου μιάμισης ώρας συμπεριλαμβανομένης της συντήρησής του SF. Ως εκ τούτου, οι ημερήσιες εργατώρες για την παραγωγή 2 kg αλατιού ανά ημέρα υπολογίζονται ως εξής:

Πίνακας 38: Εργατικό δυναμικό SF

Παράμετρος	Τιμή
Ημερήσια παραγόμενη ποσότητα αλατιού (kg/day)	2
Ετήσια παραγόμενη ποσότητα αλατιού (kg/yr)	700
Απαιτούμενες ημέρες λειτουργίας ετησίως	350
Εβδομαδιαίες εργατώρες (hrs/week)	4.5
Ετήσιες εργατώρες (hrs/yr)	216
Ισοδύναμο ετήσιας πλήρους απασχόλησης (8ώρου) (days/year)	27

5.10 Χαρακτηριστικά καλλιέργειας του PGH

Ο κύκλος ανάκτησης αρδευτικού νερού μέσω του MSS, κλείνει με την αξιοποίησή του για την ανάπτυξη της καλλιέργειας που φύτευται στο θερμοκήπιο της εγκατάστασης. Στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος, ορίστηκαν ως KPIs, 500 kg παραγωγής υψηλής αξίας τροπικών φρούτων και αξιοποιησιμής φυτικής βιομάζας έως τον Ιούνιο του 2023. Δέσμευση προς την τοπική κοινωνία αποτελούσε παράλληλα, η δωρεά αυτών σε τοπικούς φορείς, υπηρεσίες, οργανώσεις, σχολεία και κατοίκους καθώς και η δυνητική εμπορική τους εκμετάλλευση μέσω της αφιλοκερδούς προσφοράς τους στην τοπική αγορά. Απώτερος σκοπός ήταν η ανάδειξη του έργου του MSS και η συνεισφορά του στη βιώσιμη διαχείριση του νερού και τον αγροτοδιατροφικό τομέα.

Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εδαφολογικής ανάλυσης και σχολιάζεται η καταλληλότητα του καλλιεργούμενου εδάφους. Αποτυπώνεται έτσι, η ποσοτική και ποιοτική επάρκεια του παραγόμενου νερού για την άρδευση του PGH και περιγράφεται σύντομα η απόκριση κάθε είδους και οι ανάγκες της καλλιέργειας που προέκυψαν. Γίνεται επιπλέον αναφορά στην αποτελεσματικότητα του αρδευτικού συστήματός του, το πλάνο εργασιών, συντήρησης και ελέγχου καθώς και προβλήματα που εμφανίστηκαν συνολικά. Αποτυπώνονται τέλος, η συνολική συγκομιδή και οι δράσεις που εκπονήθηκαν στα πλαίσια των δεσμεύσεων του HYDRO5.

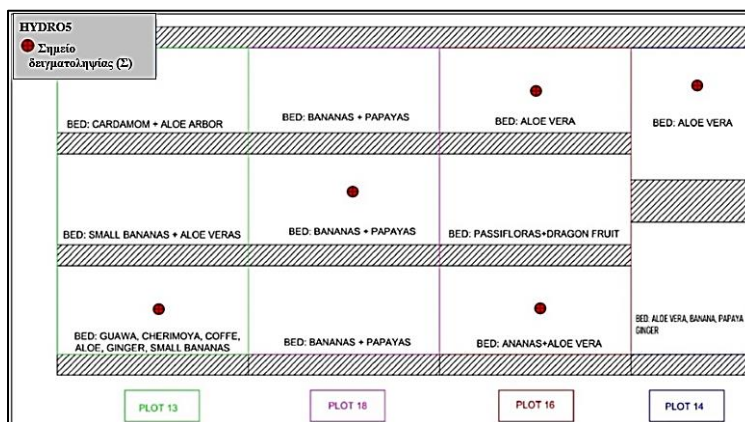
5.10.1 Καταλληλότητα καλλιεργήσιμου εδάφους

Το έδαφος της περιοχής που επιλέχθηκε για την ανάπτυξη του PGH αναγνωρίστηκε ως πετρώδες με επιπλέον αμμώδη σύσταση και χαμηλό περιεχόμενο οργανικής ουσίας, ακατάλληλο ως επί το πλείστον για κάθε μορφής καλλιέργειας. Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί, πως η ανάπτυξη τροπικής καλλιέργειας πλεονεκτεί στο να προσαρμόζεται σε φτωχά εδάφη καθώς η παρουσία υψηλών θερμοκρασιών και υψηλής υγρασίας επιταχύνει την αποδόμηση της οργανικής ουσίας και μόνο ένα επιφανειακό στρώμα αυτής μένει διαθέσιμο στα φυτά. Έτσι, κατά την εγκατάσταση του θερμοκηπίου, 30 cm από την επιφάνεια της εν λόγω έκτασης απομακρύνθηκαν και αντικαταστάθηκαν με φρέσκο χώμα για καλλιέργεια σε ανάμιξη με κομπόστ.

Καθώς το pH εδάφους αναμενόταν υψηλό λόγω αλάτων στην περιοχή (pH 7.5-8.5), για τη διατήρησή του σε επίπεδο της τάξης του pH 6.4 που απαιτεί η πλειοψηφία της τροπικής καλλιέργειας επίπεδα εφαρμόστηκε στοιχειακό θείο καθώς και ανά περιόδους εμπλουτισμός του αρδευτικού νερού με κιτρικό οξύ, το οποίο ταυτόχρονα συνέβαλλε στην αποσυσώρευση των αλάτων από τους αρδευτικούς αγωγούς.

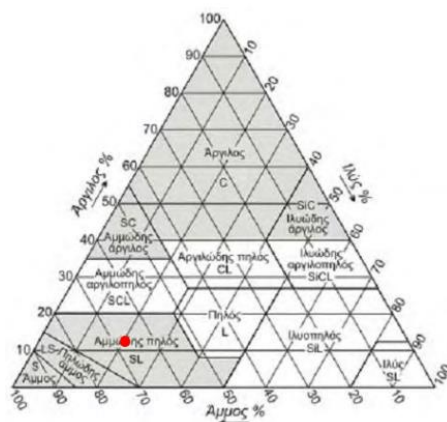
Κατά τη καλλιεργητική περίοδο επίσης, περιοδική λίπανση με χωνεμένη κοπριά κοτόπουλου και ισορροπημένη υδρολίπανση με οργανικά σκευάσματα εφαρμοζόταν σύμφωνα με τις ανάγκες τις καλλιέργειας. Επιφανειακή επίστρωση με τσιπς ξύλου ή άχυρο, εναποτέθηκε περιστασιακά για τη διατήρηση της εδαφικής υγρασίας και την ελάττωση της εξατμισοδιαπνοής κατά τις περιόδους υψηλών θερμοκρασιών αλλά και την διατήρηση της θερμοκρασίας εδάφους για την προστασία των ριζών κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Τον Ιούνιο του 2022, κρίθηκε αναγκαία η αντικατάσταση 20 m³ χώματος του θερμοκηπίου λόγω έντονης παρουσίας ζιζανίων, με φρέσκο και καθαρό χώμα από τοπική εκσκαφή, όπου επανεφαρμόστηκε στοιχειακό θείο πριν τη νέα καλλιέργεια.

Ως προς την ποιότητα, η κατάσταση του εδάφους του θερμοκηπίου ελέγχθηκε μέσω συνολικά δύο εδαφολογικών αναλύσεων, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν το 2021 και το 2023. Οι θέσεις δειγματοληψίας του PGH απεικονίζονται στο **Διάγραμμα 21**.



Διάγραμμα 21: Απεικόνιση σημείων δειγματοληψίας εδάφους του PGH.

Το έδαφος του θερμοκηπίου βρέθηκε αμμοπηλώδους (Sandy Loam –SL) σύστασης, με μέση περιεκτικότητα 68.1% άμμου, 20.5% ιλύος και 11.4% αργίλου (**Εικόνα 62**). Έτσι χαρακτηρίζεται ως ελαφρύ, με μειωμένη ικανότητα συγκράτησης νερού και θρεπτικών στοιχείων. Λόγω της μεγάλης ταχύτητας διάχυσης του νερού μέσα στην άμμο δημιουργούνται καλές συνθήκες αερισμού και στράγγισης για την ανάπτυξη των φυτών, ενώ απαιτείται τακτική και επαρκής άρδευση. Το αποτέλεσμα αποτυπώνεται στο τρίγωνο μηχανικής σύστασης του εδάφους παρακάτω.



Εικόνα 62: Αποτύπωση μηχανικής σύστασης του εδάφους του PGH.

Αναλυτικότερα, βάσει του **Πίνακα 39** των αποτελεσμάτων της εδαφολογικής ανάλυσης, η εδαφική υγρασία ήταν υψηλότερη στο κομμάτι με την καλλιέργεια *Aloe Vera* (Σ1). Δεδομένου ότι η ανάλυση αφορά σε έδαφος θερμοκηπίου η επίδραση της βροχόπτωσης δεν μπορεί γενικά να επηρεάζει την εδαφική υγρασία. Επίσης, η οργανική ουσία δεν φαίνεται να επηρεάζει την υγρασία του εδάφους στο συγκεκριμένο τμήμα, διότι η οργανική ουσία, που φέρει σημαντικά ποσά υγρασίας, βρέθηκε χαμηλή. Το γεγονός λοιπόν αποδόθηκε, στο ότι η Αλόη δεν έχει υψηλές απαιτήσεις σε νερό, και ως εκ τούτου το έδαφος στα Σ1 και Σ2 διατηρεί περισσότερη υγρασία. Καθώς ωστόσο, το σύστημα άρδευσης ποτίζει συνολικά κάθε πεδίο του PGH, που περιέχονται διάφορα είδη με διαφορετικές απαιτήσεις σε νερό, γίνεται ένας συμβιβασμός με τακτική παρατήρηση για τυχόν επιπτώσεις.

Πίνακας 39: Αποτελέσματα εδαφολογικής ανάλυσης PGH

Παράμετρος Ανάλυσης Εδάφους PGH	Δείγμα				
	Σ1	Σ2	Σ3	Σ4	Σ5
	<i>Aloe vera</i>	<i>Aloe vera</i>	<i>Aloe Vera & Ανανάς</i>	<i>Μπανάνα & Παπάγια</i>	Διάφορα είδη
Εδαφική Υγρασία (%)	3.5	3.3	1.7	1.5	1.3
Εδαφικό pH	6.3	6.6	7.4	7.5	7.4
EC εδάφους (μS/cm)	793	795	257	231	222
Οργανική Ύλη (%)	0.7	0.6	3.2	2.6	2.8
N (%)	0.08	0.02	0.12	0.07	0.12
P (mg/kg)	18.9	7.3	23.9	11.2	28.3
K (αντ.κατιόντα, ppm)	35.8	70.7	149.9	68.64	212.8
Na (αντ.κατιόντα, ppm)	491.8	773.9	547.8	413.3	387.4
Ca (αντ.κατιόντα, ppm)	666.8	2132.1	3664.2	3911.2	3020
Mg (αντ.κατιόντα, ppm)	314.7	814.0	195.2	97.48	89.15
Συνολική ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC, cmol _c /kg)	16.43	26.0	22.65	22.28	18.04
Fe (ppm)	30	6.9	8.9	9.9	7.6
Zn (ppm)	5.4	2.3	3.5	3.3	3.7
Mn (ppm)	36.1	13.0	4.7	6.2	4.5
Cu (ppm)	1.4	0.6	1.2	1.41	1.3
B (ppm)	2.2	1.1	4.2	2.3	4.5
Λόγος C/N	4.5	15.0	13.5	17.2	11.5

Το εδαφικό pH βρέθηκε υψηλότερο τμήμα της μπανάνας και της παπάγιας (Σ4), ακολουθούμενο από το αυτό της αλόης και του ανανά (Σ3) και αυτό με τα διάφορα είδη (Σ5). Τα τμήματα Σ1 και Σ2 με την Αλόη, παρουσίασαν τις χαμηλότερες τιμές pH χωρίς να επιβαρύνουν το φυτό, καθώς η Αλόη μπορεί να αναπτυχθεί σε ένα ευρύ φάσμα τιμών pH. Αξίζει να σημειωθεί, πως το pH ≈ 6.5, το πεδίων της Αλόης θεωρείται καταλληλότερο για την ανάπτυξη τροπικής καλλιέργειας. Η ευνοϊκότερη τιμή του, πιθανώς αποδίδεται στο γεγονός αντικατάστασης του χώματος σε αυτά τα δύο πεδία και την απομάκρυνση του αρχικού που ήταν πιθανώς επιβαρυνμένο από το πρότερο διάστημα, λόγω της θέσης και του τύπου εδάφους ή πιθανής χρήσης ακατάλληλου νερού. Έτσι εκτός των δύο αυτών πεδίων, ως επί το πλείστον το pH θεωρήθηκε υψηλό με πιθανότητα να δημιουργήσει προβλήματα τροφωπενιών μικροθρεπτικών και ιδιαίτερα του σιδήρου. Το νερό από το MSS δε φαίνεται να επηρεάζει αυτόν τον παράγοντα καθώς είναι εντός των απαιτούμενων ορίων pH για αρδευτική χρήση. Έτσι λοιπόν, κατά περιόδους εφαρμόστηκε κομπόστ, διορθωτικοί παράγοντες pH και λίπανση αζώτου υπό όξινη μορφή και σε γενικές γραμμές τα φυτά παρουσίασαν τυπική ανάπτυξη και υγεία.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα τώρα, ήταν υψηλότερη και στα τμήματα με *Aloe Vera*. Συνολικά, η EC επηρεάζεται από την περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ουσία, άλατα, υγρασία και τον τύπο του εδάφους. Στην περίπτωση αυτή, και όπως φαίνεται στον **Πίνακας 39**, ισχυρότερη συσχέτιση παρουσιάζει η σχέση EC και εδαφικής υγρασίας, καθώς είναι εμφανές πως όπου η EC είναι υψηλότερη, η εδαφική υγρασία είναι επίσης υψηλή. Βάσει της αναφοράς στην ανάλυση, στα Σ1 και Σ2 η αλατότητα βρέθηκε σε επίπεδο μη ανησυχητικό και κανονικό για την ανάπτυξη των εγκατεστημένων φυτών. Στα υπόλοιπα τμήματα η EC θεωρείται χαμηλή που ενδέχεται να επιφέρει τροφωπενίες, λόγω του χαμηλού περιεχομένου υγρασίας και ως εκ τούτου ενδείκνυται η αύξησή της.

Η οργανική ουσία, ήταν υψηλότερη στα πεδία που δεν καλλιεργείται Αλόη, κάτι που μπορεί να αποδοθεί στην προσθήκη κομπόστ, γεωργικού επιφανειακού εδάφους και κοπριάς κοτόπουλου. Υπεύθυνη επίσης, πιθανώς να είναι η βιομάζα των καρπών αυτών των ειδών, που δεν συλλέχθηκαν έγκαιρα κατά τη συγκομιδή. Η έλλειψη οργανικής ύλης, δρα ευνοϊκά προς τα φυτά Αλόης, καθώς η οργανική ύλη τείνει να συγκρατεί περισσότερο νερό, το οποίο θα είχε αρνητική επίδραση σε αυτά. Αντίθετα στα υπόλοιπα πεδία, η παρουσία οργανικής ύλης, βοηθά μεταξύ άλλων στην ορθολογική χρήση του νερού.

Συνεχίζοντας, το ποσοστό του εδαφικού αζώτου (N) που μετρήθηκε ήταν γενικά υψηλό, εκτός από το δεύτερο Σ2 της Αλόης. Παρόλο που το N είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη των φυτών, όταν η συγκέντρωσή του είναι πολύ υψηλή μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην απορρόφηση άλλων θρεπτικών συστατικών, όπως K, Zn, Fe, Ca και B. Ωστόσο αυτό, δεν αντικατοπτρίζεται στην πράξη, λαμβάνοντας υπόψη πως η ανάπτυξη των φυτών ήταν συνολικά επιτυχημένη (**Πίνακας 42**). Συνολικά, οι υψηλές συγκεντρώσεις μπορούν να αποδοθούν στην προσθήκη κοπριάς και κομπόστ.

Ο φώσφορος (P) βρέθηκε σε επαρκή επίπεδα σε όλα τα τμήματα που ελέγχθηκαν, χωρίς να απαιτείται λίπανση. Εξαιρέση αποτέλεσαν τα Σ2 και Σ4 όπου η περιεκτικότητά του ήταν χαμηλή και συμβουλευτήκε λίπανση με τριπλό υπερφωσφορικό (0-46-0) στα τέλη χειμώνα.

Τα ανταλλάξιμα κατιόντα καλίου (K) ήταν υψηλότερα στο κομμάτι που καλλιεργείται ποικιλία τροπικών φυτών (Σ5), γεγονός που αποδίδεται στην αυξημένη συγκέντρωση N που επηρεάζει την απορρόφηση αυτών από τα φυτά. Όπως φαίνεται στον **Πίνακας 39**, τα δύο τμήματα με υψηλότερο ποσοστά N (0.12 %) παρουσιάζουν αντίστοιχα τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις K. Στα υπόλοιπα σημεία χαμηλότερης περιεκτικότητας, σύμφωνα με την ανάλυση ενδείκνυται λίπανση με θειικό κάλιο στο τέλος του χειμώνα, ώστε να μη επηρεαστεί η αποτελεσματικότητα της αζωτούχου λίπανσης.

Τα ανταλλάξιμα κατιόντα νατρίου (Na) ήταν υψηλότερα στο Σ2 της Αλόης, κάτι που δικαιολογείται από τη χρήση αφαλατωμένου νερού όπου μπορεί να περιέχονται συγκεντρώσεις αυτού του στοιχείου. Τα ανταλλάξιμα κατιόντα ασβεστίου (Ca) ήταν σε χαμηλά επίπεδα στο τμήμα καλλιέργειας Αλόης (Σ1), ενώ στα υπόλοιπα σημεία δεν απαιτήθηκε διόρθωση. Αντίθετα τα ανταλλάξιμα κατιόντα μαγνησίου (Mg) βρέθηκαν σε υψηλότερες συγκεντρώσεις Σ1. Το Mg επηρεάζει γενικά τη διαθεσιμότητα του K και του Ca για τα φυτά, αλλά στην προκειμένη περίπτωση δεν φαίνεται να υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ αυτών των παραμέτρων, και ως εκ τούτου οι τιμές αποδίδονται στην οργανική ύλη που προστέθηκε εκεί. Στο Σ4 και Σ5 το Mg βρέθηκε οριακά χαμηλό, το οποίο διορθώθηκε με την προσθήκη θειικού μαγνησίου κατά την περίοδο βασικής λίπανσης. Ως σύνολο, σε όλα τα πεδία η τιμή ικανότητας συγκράτησης κατιόντων (CEC), ορίζει το έδαφος ως κανονικό για τη γεωργία.

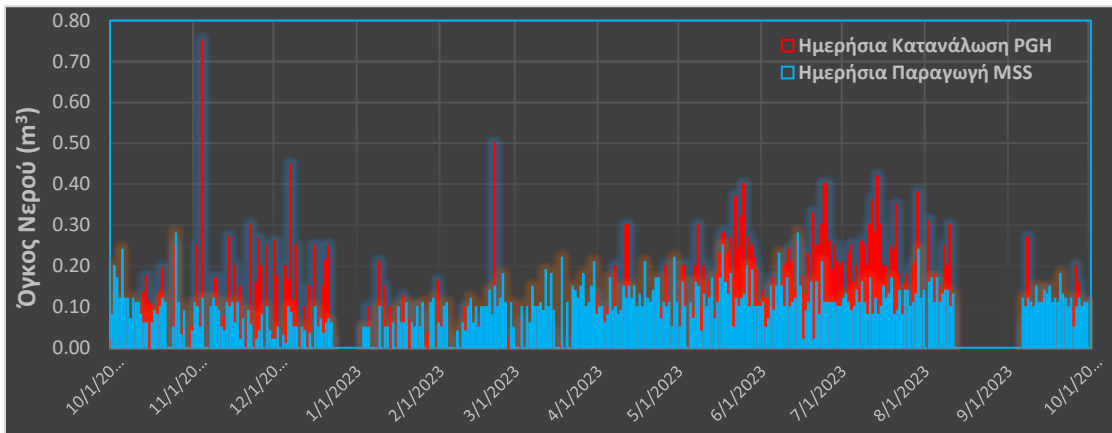
Όσον αφορά την ανάλυση των μικροθρεπτικών του εδάφους, τα επίπεδα σιδήρου (Fe), ψευδαργύρου (Zn) και μαγγανίου (Mn) ήταν υψηλότερα στο δείγμα Σ1 της *Aloe Vera*, ενώ τα άλλα τεμάχια περιείχαν παρόμοιες συγκεντρώσεις αυτών των μικροθρεπτικών συστατικών. Το έδαφος στο αγροτεμάχιο Σ4, περιείχε την υψηλότερη συγκέντρωση χαλκού (Cu) και το Σ5 την υψηλότερη συγκέντρωση βορίου (B). Ο Cu όπως και ο Zn, κρίθηκαν συνολικά επαρκούς επιπέδου σε όλα τα πεδία και ως εκ τούτου δεν προτάθηκε λίπανση. Η συγκέντρωση σιδήρου στο Σ1 θεωρείται υψηλή, ενώ η συγκέντρωση στα υπόλοιπα θεωρείται χαμηλή γεγονός που αποδόθηκε πιθανότερα στην αυξημένη τιμή pH, και ως εκ τούτου προτάθηκε ενσωμάτωση στη βασική λίπανση κοκκώδους θειικού σιδήρου. Η συγκέντρωση Zn ήταν φυσιολογική στο Σ2, ενώ στα υπόλοιπα ήταν υψηλότερη και επομένως επαρκής για τις μελλοντικές ανάγκες τους. Η συγκέντρωση Mn κρίθηκε συνολικά χαμηλή και προτάθηκε λίπανση με ενσωμάτωση στη γραμμή φύτεψης κοκκώδους θειικού μαγγανίου. Ακόμη η περιεκτικότητα σε B, βρέθηκε σε κανονικές συγκεντρώσεις στο έδαφος του Σ2, και υψηλότερη στα υπόλοιπα, γεγονός που αποδίδεται στην υψηλή ποσότητα N εδάφους ή και στην προσθήκη οργανικής ύλης σε διαφορετικές ποσότητες. Ως εκ τούτου σε αυτά τα πεδία πρέπει να αποφευχθεί αντίστοιχη λίπανση μελλοντικά.

Τέλος, ο λόγος C/N δείχνει ότι στον Σ1 της αλόης η αποσύνθεση οργανικής ύλης είναι γρήγορη, γεγονός που επιτρέπει στο έδαφος να έχει περισσότερο διαθέσιμο N για τα φυτά, ενώ στα άλλα τέσσερα αγροτεμάχια η αποσύνθεση της οργανικής ύλης είναι πιο αργή, με αποτέλεσμα την ταχύτερη απομάκρυνση του N.

Βάσει των όσο αναφέρθηκαν και σε συσχέτιση με την τελική απόδοση της καλλιέργειας του PGH στο HYDRO5, η αξιοποίηση του παραγόμενου νερού από το υπό μελέτη σύστημα για την άρδευση αυτού σε συνδυασμό με τις γεωργικές πρακτικές που ακολουθήθηκαν είχαν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία συνολικά κατάλληλων συνθηκών χωρίς σημαντικά προβλήματα, για την επιτυχή ανάπτυξη των τροπικών φυτών και την επίτευξη της αναμενόμενης φυτικής παραγωγής (D4.6, 2023, Έκθεση αποτελεσμάτων ανάλυσης, 2023).

5.10.2 Επάρκεια αρδευτικού νερού & αρδευτικού συστήματος

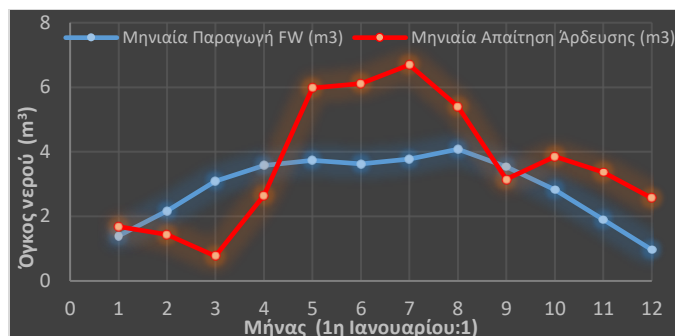
Όπως προαναφέρθηκε, κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσης, η άρδευση της καλλιέργειας του θερμοκηπίου πραγματοποιήθηκε στη πλειονότητάς της με τη χρήση μίγματος του παραγόμενου νερού από το MSS και νερού του τοπικού υδρευτικού δικτύου. Εξάιρεση αποτέλεσαν, η μεταβατική περίοδος που απαιτήθηκε για τη σταθεροποίηση της EC του παραγόμενου νερού, περίοδοι συντήρησης και γενικού καθαρισμού των αποστακτήρων (Αύγουστος 2023) καθώς και κάποιες σύντομες περιόδους όπου παρουσιάστηκε αυξημένη EC στο νερό του συστήματος. Στις εν λόγω περιπτώσεις η άρδευση πραγματοποιούνταν αποκλειστικά με νερό δικτύου. Οι ποιοτικές παράμετροι του νερού αναλύθηκαν συνολικά στην **Ενότητα 5.1**. Ωστόσο, κεντρικό ρόλο στη χρήση μίγματος FW-νερού δικτύου για το πότισμα της καλλιέργειας αποτέλεσε η ποσοτική του ανεπάρκεια, όπως αποδεικνύεται από τις συγκριτικές ημερήσιες καταγραφές των ροόμετρων παραγωγής νερού και άρδευσης, για το διάστημα ενός έτους (**Διάγραμμα 22**).



Διάγραμμα 22: Ημερήσια κατανάλωση αρδευτικού νερού στο PGH vs παραγωγής MSS (1/10/22 - 1/10/23).

Βάσει των δεδομένων, προκύπτει μέση ημερήσια τιμή ζήτησης αρδευτικού νερού ≈ 154 L/day έναντι της μέσης ημερήσια παραγωγής FW των 123.6 L/day (συμπεριλαμβανομένων των 7 πάνελ εκτός λειτουργίας). Επιβεβαιώνεται έτσι, πως η παραγόμενη ποσότητα δε δύναται να καλύψει τις συνολικές ανάγκες των φυτών και απαιτείται πρόσθετη ποσότητα μέσης τιμής ≈ 40 L/day ώστε να είναι επαρκής.

Παρατηρείται δε, όπως είναι αναμενόμενο πως κατά τη παρατεταμένη θερμή περίοδο που βιώνει η Τήνος (Μάιος-Αρχές Οκτωβρίου) αν και η παραγωγή του FW είναι αυξημένη συγκριτικά, η ζήτηση νερού από την καλλιέργεια υπερβαίνει την παραγωγή σε αντίθεση με την υπόλοιπη, ψυχρή περίοδο, όπου ως επί το πλείστον η παραγωγή νερού από σύστημα υπερβαίνει τη ζήτηση του θερμοκηπίου. Για το λόγο αυτό κρίνεται σκόπιμο να τοποθετηθεί μία επιπλέον δεξαμενή αποθήκευσης, επί της υπάρχουσας δεξαμενής άρδευσης ως συγκοινωνούντα, ώστε να είναι δυνατή η διατήρηση του νερού για τους ημέρες που ζήτηση υπερβαίνει την παραγωγή. Έτσι, το αρδευτικό σύστημα θα λαμβάνει νερό από το δίκτυο μόνο σε περίπτωση ανεπάρκειας νερού στις δύο αυτές δεξαμενές κατά προτεραιότητα, ελαχιστοποιώντας έτσι την προμήθεια από το ήδη επιβαρυνόμενο δίκτυο. Για τον απαιτούμενο όγκο της δεξαμενής αποθήκευσης, υπολογίστηκε μέσω *excel*, η μέγιστη συνολική περίσσεια παραγόμενου νερού, η οποία όπως αποτυπώνεται και στο **Διάγραμμα 23** παρουσιάζεται έως το μήνα Απρίλιο.



Διάγραμμα 23: Συνολική μηνιαία παραγωγή νερού σε συσχέτιση με την αντίστοιχη ζήτηση για άρδευση.

Κατά τον υπολογισμό του απαιτούμενου όγκου (**Πίνακας 40**), αρχικά υπολογίστηκε η ημερήσια περίσσεια νερού βάση του ημερήσιου υδατικού ισοζυγίου άρδευσης-παραγωγής νερού. Εν συνεχεία και κατά ημερήσια ακολουθία, αθροίστηκε η ημερήσια περίσσεια με αυτή της προηγούμενης ημέρας ώστε να προκύψει ο συνολικός ημερήσιος όγκος υποθηκευμένου νερού. Σε περίπτωση, που από το ημερήσιο υδατικό ισοζύγιο προέκυπτε έλλειμα και δει μεγαλύτερο του αποθηκευμένου νερού έως εκείνη την ημέρα, ο όγκος αποθήκευσης μηδενιζόταν και η διαδικασία συνεχιζόταν εκ νέου. Αν το έλλειμα ήταν μικρότερο του αποθηκευμένου νερού, διατηρούταν ως ημερήσιος όγκος αποθήκευσης η διαφορά αυτών. Για συντομία, παρακάτω παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού μόνο για το μήνα Απρίλιο. Το μήνα αυτό, όπως διακρίνεται και στο **Διάγραμμα 23**, η συγκεντρωτική περίσσεια παραγόμενου νερού κορυφώνεται, ενώ έπειτα φθίνει. Ως εκ τούτου δεν προκύπτει μεγαλύτερος συνολικός όγκος αποθήκευσης μετά τον Απρίλιο, και η μέγιστη τιμή σε αυτόν ελήφθη ως ο απαιτούμενος όγκος της δεξαμενής αποθήκευσης. Η διαδικασία υπολογισμού παρακάτω, ξεκινά από όγκο υποθηκευμένου νερού 3.12 m³ που είχε προκύψει από του προηγούμενους μήνες.

Πίνακας 40: Υπολογισμός απαιτούμενου όγκου δεξαμενής αποθήκευσης βάσει του μήνα επίτευξης της μέγιστης συνολικής περισσειας παραγόμενου νερού.

Ημ/νία	Ζήτηση ΡGH	Παραγωγή MSS	Ημερήσιο Υδατικό Ισοζύγιο	Συνολικός ημερήσιος όγκος αποθήκευσης
4/1/2023	0.10	0.10	0.00	3.12
4/2/2023	0.02	0.10	0.08	3.20
4/3/2023	0.10	0.06	-0.04	3.16
4/4/2023	0.03	0.08	0.05	3.21
4/5/2023	0.10	0.17	0.07	3.28
4/6/2023	0.05	0.09	0.04	3.32
4/7/2023	0.20	0.10	-0.10	3.22
4/8/2023	0.03	0.08	0.05	3.27
4/9/2023	0.05	0.09	0.04	3.31
4/10/2023	0.15	0.15	0.00	3.31
4/11/2023	0.30	0.12	-0.18	3.13
4/12/2023	0.30	0.15	-0.15	2.98
4/13/2023	0.00	0.12	0.12	3.10
4/14/2023	0.00	0.15	0.15	3.25
4/15/2023	0.02	0.10	0.08	3.33
4/16/2023	0.05	0.13	0.08	3.41
4/17/2023	0.07	0.10	0.03	3.44
4/18/2023	0.05	0.21	0.16	3.60
4/19/2023	0.08	0.12	0.04	3.64
4/20/2023	0.10	0.11	0.01	3.65
4/21/2023	0.11	0.14	0.03	3.68
4/22/2023	0.06	0.17	0.11	3.79

4/23/2023	0.09	0.17	0.08	3.87
4/24/2023	0.10	0.07	-0.03	3.84
4/25/2023	0.10	0.11	0.01	3.85
4/26/2023	0.20	0.10	-0.10	3.75
4/27/2023	0.06	0.11	0.05	3.80
4/28/2023	0.03	0.05	0.02	3.82
4/29/2023	0.04	0.22	0.18	4.00
4/30/2023	0.06	0.11	0.05	4.05
Μέγιστος ημερήσιος όγκος αποθήκευσης				4.05

Προκύπτει λοιπόν, απαιτούμενος όγκος της δεξαμενής αποθήκευσης $\approx 4 \text{ m}^3$. Λαμβάνοντας υπόψη, την ήδη υπάρχουσα δεξαμενή άρδευσης 3 m^3 και μία ανώτατη και κατώτατη στάθμη ασφαλείας των 0.2 m^3 , θα μπορούσε να τοποθετηθεί μία επιπλέον δεξαμενή $\approx 2.5 \text{ m}^3$. Έως τότε το ημερήσιο έλλειμα καλύπτεται μόνο με νερό του δικτύου. Η οικονομική επιβάρυνση που αποφέρει στην εγκατάσταση, η πρόσθετη αυτή απαίτηση νερού παρατίθενται στην **Ενότητα 5.12** του συγκεντρωτικού οικονομικού μοντέλου.

Για την ελαχιστοποίηση του ελλείματος, κρίνεται σημαντική η επιδιόρθωση ατελειών και φθορών του συστήματος, ενώ βελτιστοποίηση της απόδοσής του απαιτείται με σκοπό την πλήρη κάλυψη των αρδευτικών αναγκών του PGH. Στη βάση αυτή, αναβαθμίσεις όπως η προθέρμανση της εισροής, η βελτιστοποίηση του ρυθμού ροής νερού στους αποστακτήρες ή και η αναβάθμιση αυτών με την εφαρμογή του υλικού “φυτιλιού”, βρίσκονται υπό μελέτη από την εταιρεία παραγωγής, στα πλαίσια του εν εξελίξει πλέον νέου ερευνητικού προγράμματος *SureNexus* που συμμετέχει το σύστημα. Σχετική αναφορά γίνεται στο **(6^ο Κεφάλαιο)**.

Μία ακόμη εναλλακτική για την κάλυψη της ζήτησης θα ήταν η επαναφορά της διάταξης συλλογής βρόχινου νερού και η αξιοποίηση αυτού για άρδευση των φυτών. Η εν λόγω εναλλακτική βρίσκεται ομοίως υπό μελέτη ώστε να εφαρμοστεί στο άμεσο μέλλον. Η εκτιμώμενη δυναμικότητά της των 55 L/day , βάσει τον κατασκευαστή του συστήματος, υπερκαλύπτει το έλλειμα αρδευτικού νερού όπως υπολογίστηκε παραπάνω. Παράλληλα, το έργο καταστάται μία πιο “πράσινη” και βιώσιμη υποδομή μειώνοντας τις απώλειες νερού.

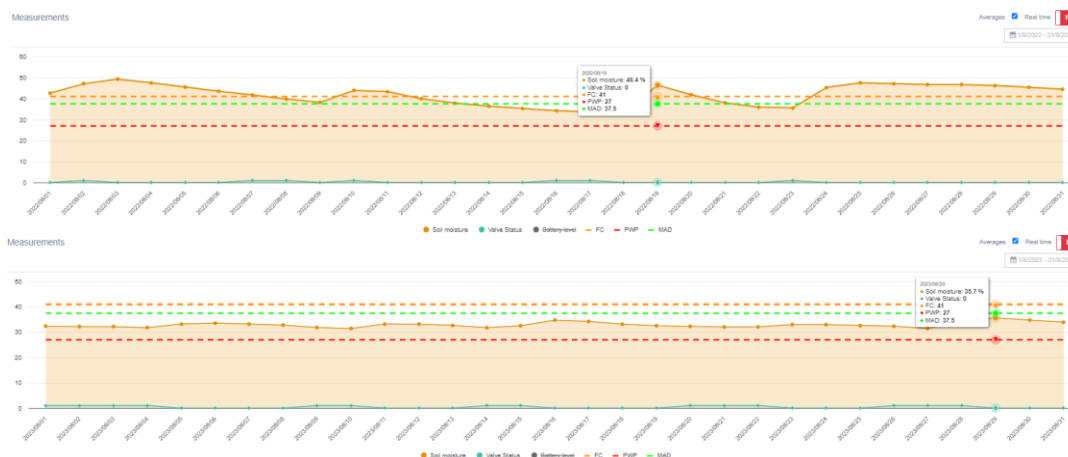
Περνώντας στο κομμάτι του αρδευτικού συστήματος του PGH, του οποίου η λειτουργία περιγράφηκε αναλυτικά, αξίζει να σημειωθεί πως με την εφαρμογή στάγδην άρδευσης σε συνδυασμό με την εδαφοκάλυψη με οργανικό υλικό, το έλλειμα ζήτησης-παραγωγής αρδευτικού νερού περιορίζεται στο ελάχιστο **(Εικόνα 64)**. Όπως αναφέρουν στην μελέτη τους οι Nouri *et.al.* (2019), ο συνδυασμός αυτός δύναται να περιορίσει το “μπλε” υδατικό αποτύπωμα (λόγος άρδευσης/εξατμισοδιαπνοής) έως και 5% ετησίως, ανάλογα το τύπο εδάφους, την κλιματική ζώνη και τις γεωργικές πρακτικές.



Εικόνα 63: Συνδυασμός στάγδην άρδευσης και εδαφοκάλυψης στο PGH.

Κατά το παρελθόν, στο θερμοκηπίου πραγματοποιούνταν στάγδην άρδευση με χρήση προγραμματιστή με χρονοδιακόπτη (τύπου Gardena) αντί των αισθητήρων εδαφικής υγρασίας. Στην **Εικόνα 64** παρακάτω, συγκρίνεται ενδεικτικά η άρδευση του πεδίου 14 του θερμοκηπίου και η μέση ημερήσια εδαφική υγρασία αυτού κατά τον μήνα Αύγουστο το 2022, όπου η άρδευση γινόταν βάσει του προγραμματιστή έναντι των τιμών του ίδιου πεδίου τον Αύγουστο του 2023, όπου η άρδευση γινόταν με το τωρινό σύστημα επιπέδου εδαφικής υγρασίας.

Το πεδίο αυτό επιλέχθηκε ενδεικτικά καθώς περιέχει σχεδόν όλα τα καλλιεργούμενα είδη και η κατάστασή του παρέμεινε αναλλοίωτη. Τα δεδομένα εξήχθησαν από την εφαρμογή *Ardeusis*.



Εικόνα 64: Συγκριτικό ημερήσιο διάγραμμα άρδευσης και εδαφικής υγρασίας Αυγούστου 2022 (επάνω) vs Αυγούστου 2023 (κάτω). (πεδίο 14, PGH, Ardeusi.gr)

Παρατηρείται λοιπόν ευκρινώς πως πριν την εφαρμογή άρδευσης με βάση την εδαφική υγρασία, η ποσότητα που χρησιμοποιούταν για το πότισμα του εν λόγω πεδίου, ήταν σημαντικά περισσότερη από την απαιτούμενη, ξεπερνώντας ακόμη και την φέρουσα ικανότητα (FC) του εδάφους. Συνεπώς, το έλλειμα παραγωγής-ζήτησης νερού για εκείνη την περίοδο θα ήταν σημαντικά αυξημένο αφού ίδια εικόνα υφίσταται για το σύνολο των πεδίων του PGH.

Εν κατακλείδι, επιλέγοντας πρακτικές “έξυπνης γεωργίας” και συστημάτων χαμηλού κόστους όπως το *Ardeusis* επιτυγχάνεται ο περιορισμός της σπατάλης νερού παράλληλα με την διευκόλυνση ελέγχου και παρακολούθησης των καλλιεργητικών παραμέτρων. Υπογραμμίζεται, πως καθόλη τη διάρκεια της μελέτης και υπό συνεχή λειτουργία το σύστημα δεν παρουσίασε ιδιαίτερη αστοχία ή βλάβη και η χρήση του ήταν αξιόπιστη ακόμη και υπό ακραίες καιρικές συνθήκες ισχυρού ανέμου, βροχοπτώσεων και ακραίων θερμοκρασιών. Τέλος, οι απαιτήσεις του σε ενέργεια όπως έχει αναφερθεί, ήταν μηδαμινές λόγω τροφοδοσίας μέσω μικρών ηλιακών συλλεκτών στους αντίστοιχους κόμβους.

5.10.3 Απόδοση καλλιέργειας

Μπανάνα:

Η καλλιέργεια της μπανάνας φάνηκε ανθεκτική και ευδοκίμησε, αποδίδοντας τα πρώτα τσαμπιά καρπών της μετά από περίπου 20 μήνες από τη φύτευση των δέντρων (**Εικόνα 65-1**), ενώ η πρώτη συγκομιδή έγινε μετά από 28 έως 30 μήνες. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα παρουσιάστηκαν περιστατικά χλώρωσης στα ανεπτυγμένα φύλλα, ενώ τα νεαρά εμφανίστηκαν περιστασιακά σκούρα αποχρωματισμένα ως αντίδραση στις χαμηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο, με την επαναφορά φυσιολογικών θερμοκρασιών και την αύξηση του ποτίσματος επανερχόταν η υγιής κατάστασή τους. Από την άλλη πλευρά, λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών εσωτερικά του PGH κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού παρουσιάστηκαν περιπτώσεις θερμικού στρες και εγκαυμάτων στα φύλλα (πλατιές καφέ κηλίδες). Ωστόσο, οι καρποί ήταν ανθεκτικοί χωρίς να παρουσιάσουν επιπτώσεις. Η περίοδος ωρίμανσης των καρπών διήρκησε περίπου 2-3 μήνες, η οποία θεωρείται μεγαλύτερη από ό,τι στις τροπικές περιοχές, πολύ πιθανόν λόγω των επιπτώσεων των χαμηλών θερμοκρασιών του χειμώνα που μείωσαν τη φυσιολογική δραστηριότητα των φυτών. Μετά τη συγκομιδή, τα αντίστοιχα δέντρα απομακρύνθηκαν καθώς επέρχεται ο φυσικός τους θάνατος. Το φυτό αναπαράχθηκε όμως με φυσικό τρόπο μέσω παραφυάδων που φύτρωσαν δίπλα στο μητρικό επεκτείνοντας την καλλιέργεια έως σήμερα. Δυστυχώς, μετά την ολοκλήρωση του προγράμματος η

καλλιέργεια στο σύνολό της αντιμετωπίζει σοβαρό πρόβλημα προερχόμενο κατά κύριο λόγο από το μύκητα φουζάριο. Το πρόβλημα πιθανώς αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια του χειμώνα, ενώ η παρουσία μελολόνης στο έδαφος που προήλθε από την εφαρμογή κοπριάς ως λίπασμα, διευκόλυνε την επιμόλυνση λόγω τραυματισμού το ριζών υπό υγρές συνθήκες. Αποτέλεσμα αυτού ήταν η απώλεια κάποιων φυτών και καρπών, οι οποίοι ωστόσο προσφέρθηκαν σε τοπικού κτηνοτρόφους ως ζωτροφή. Σήμερα, γίνεται συντονισμένη προσπάθεια ανάκαμψης ακολουθώντας κατάλληλη θεραπεία. Σημειώνεται πως τέτοια προβλήματα είναι δύσκολο να αποφευχθούν αλλά και να περιοριστούν στα πλαίσια της οργανικής γεωργίας που επιδιώκεται στο PGH.

Συνολικά θεωρείται μία επιτυχημένη καλλιέργεια, καθώς συγκομίστηκαν 138.4 kg μπανάνας όπου δεδομένου του μεγέθους της καλλιέργειας με 25 φυτά σε 60 m² έκτασης του θερμοκηπίου (≈2,5 m² /φυτό) , η παραγωγή ανήλθε στα 2.4 kg/m², τιμή αντιπροσωπευτική για την καλλιέργεια (iniar.gob.ec).

Παπάγια:

Η καλλιέργεια της παπάγιας παρουσίασε χαμηλής σημαντικότητας προβλήματα που σχετίζονται με:

- Χλώρωση κάποιων φύλλων κατά τη διάρκεια του χειμώνα.
- Μικρής έκτασης παρουσίας παρασίτων όπως αραχνοειδή (spider mites) και μελίγκρα (aphis) στην εσωτερική επιφάνεια των φύλλων που απομύζησαν το φυτό. Αυτά αντιμετωπίστηκαν με απομάκρυνση των μολυσμένων φύλλων ψεκάσμο με σαπουνόνερο ή βάκιλο του άνθρακα.
- Παρουσία μυρμηγκιών τα οποία ευνόησαν την εμφάνιση μελίγκρας και κατέστρεψαν μεμονομένους καρπούς. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με παγίδες.

Τα δέντρα έφτασαν το ύψος της οροφής του θερμοκηπίου και προς αποφυγή της φθοράς της κλαδεύτηκαν στο ψηλότερο σημείο του δίνοντας χώρο σε νέα πλευρικά βλαστήματα του ψευδο-κορμού να αναπτυχθούν.

Η καλλιέργεια μετά την προσαρμογή της, ευδοκίμησε στο PGH (**Εικόνα 65-2**), και χαρακτηρίστηκε ως μετρίως αποτελεσματική με απόδοση 15-33 kg/φυτό. Η συνολική συγκομιδή της άγγιξε 45.5 kg (4.5/m²), αποδίδοντας καρπούς όλο το χρόνο. Το φτωχό σε οργανική ουσία έδαφος, η χαμηλές θερμοκρασίες του χειμώνα και η έλλειψη επικονιαστών, πιθανώς να συνέβαλλαν στον περιορισμό της απόδοσης παραγωγής. Ωστόσο, το φυτό δεν παρουσίασε κάποιο σημαντικό πρόβλημα ανάπτυξης έως και σήμερα.

Ανανάς:

Η καλλιέργεια του ανανά προσέφερε έως σήμερα 16 kg καρπών με απόδοση 3.2 kg/m². Το είδος έδειξε να είναι ανθεκτικό σε ακραίες μεταβολές της θερμοκρασίας (**Εικόνα 65-3**). Ωστόσο, πλέον στο PGH φύονται περίπου 10 μόνο φυτά του είδους. Όπως δείχνει το κωνικό σχήμα της κόμης του που στοχεύει να κατευθύνει το βρόχινο νερό προς αυτό, το φυτό δεν είναι κατάλληλο για στάγδην άρδευση, ενώ το μικρό ριζικό του σύστημα αδυνατεί να λάβει τα θρεπτικά που παρέχονται με τη λίπανση. Για το λόγο αυτό και δεδομένου της σημαντικής απαίτησης καλλιεργούμενης επιφάνειας ανά φυτό, καθώς και της υψηλής απαίτησης νερού η καλλιέργεια του περιορίστηκε ώστε να δώσει χώρο σε άλλα είδη.

Αλόη:

Τα φυτά αλόης αποδείχθηκαν στην πράξη πολύ ανθεκτικά υπό οριακές συνθήκες και η ανάπτυξη τους δε περιορίστηκε από μεταβολές τις θερμοκρασίας. Ως παχύφυτα, ευδοκίμησαν σε περιπτώσεις υψηλών θερμοκρασιών και δεν παρουσίασαν υψηλή απαίτηση νερού. Περιορισμένες περιπτώσεις σηψιρριζίας εμφανίστηκαν κατά διαστήματα κυρίως κατά τη διάρκεια του χειμώνα λόγω πλεονάζουσας άρδευσης, καθώς φύονται ως συνοδευτικά φυτά σε πεδία του θερμοκηπίου όπου καλλιεργούνται μπανάνες και παπάγιες οι οποίες απαιτούν περισσότερο πότισμα. Αποχρωματισμός παρουσιάστηκε σε μερικά φυτά (καφέ φύλλα), με πιθανές αιτίες τις χαμηλές θερμοκρασίας, την έλλειψη νερού, καλίου ή φωσφόρου, που επανήλθε με την άνοδο την θερμοκρασίας, την αύξηση του ποτίσματος τους ή την εφαρμογή λίπανσης. Περιστατικά παρουσίας μυρμηγκιών με επακόλουθη παρουσία αλευρωδών και αφιδών αντιμετωπίστηκαν αποτελεσματικά με οργανικά σκευάσματα

πυρεθρίνης, θερινού πολτού, σαπουνόνερου ή σταχτόνερου. Το φυτό ευδοκίμησε πιο αποτελεσματικά από κάθε είδος της καλλιέργειας (**Εικόνα 65-4**) και η συνολική συγκομιδή του ήταν 285.6 kg (Σύνολο *Aloe Vera* και *Aloe Arborescens*) που προσφέρθηκαν σε τοπικά καταστήματα για την παρασκευή προϊόντων καλλωπισμού και διατροφικών αγαθών. Η απόδοση της συγκεκριμένης καλλιέργειας υπολογίστηκε ως 8 kg/m². Ο πολλαπλασιασμός του ήταν ιδιαίτερα αυξημένος μέσω του μεγάλου αριθμού παραφυάδων ανά φυτό που μεταφυτεύονται στις αρχές του φθινοπώρου ή της άνοιξης. Η καλλιέργεια ανήλθε τελικά σε 2.5 φυτά/m².

Πασιφλόρα:

Το συγκεκριμένο είδος διακρίνεται για την υψηλή απαίτηση άρδευσης και θρεπτικών συστατικών. Η ποικιλία *Passiflora edulis* που φύτευται στο θερμοκήπιο του πιλοτικού λόγω έλλειψης επαρκούς και αποτελεσματικής επικονίασης στο κλειστό χώρο δεν απέδωσε εδώδιμους καρπούς. Ωστόσο η ανάπτυξη της ήταν πλούσια με συχνή ανάγκη για κλάδεμα, ενώ ανέπτυξε γρήγορα και σταθερά ιδίως κατά την περίοδο της άνοιξης άνθη με ιδιαίτερη καλλωπιστική αξία. Παλαιότερα, καλλιεργήθηκε και το είδος *Passiflora alata* από το οποίο συγκομίστηκαν καρποί 8 kg (0.3 kg/m²) ιδιαίτερης και υψηλής διατροφικής αξίας (**Εικόνα 65-5**). Έπειτα από ένα συμβάν υπερχειλίσσης θαλασσινού νερού από το σύστημα στο PGH (**Πίνακας 35**) απέμειναν μόνο δύο φυτά από το συγκεκριμένο είδος που αναμένονται να καρποφορήσουν.

Κάρδαμο:

Η καλλιέργεια του κάρδαμου αποδείχθηκε η πιο ανθεκτική του θερμοκηπίου σε όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Ωστόσο μέχρι σήμερα δεν έχει αποδώσει αποδώσει σπόρους ώστε να αξιοποιηθούν σαν μπαχαρικό, πιθανώς λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών το χειμώνα που επιβραδύνουν την ανάπτυξή τους ή λόγω της πυκνής φύτεψής του. Ωστόσο, η συγκομιδή 27.4 kg (2.7 kg/m²) των φύλλων του αξιοποιήθηκε για την παρασκευή αφεψήματος έπειτα από ξήρανση (**Εικόνα 65-6**). Το καλοκαίρι του 2023, παρουσίασε παρασιτική μόλυνση από κροκοειδές και πολλά φύλλα του κόπηκαν και δόθηκαν ως ζωοτροφή σε τοπικούς κτηνοτρόφους. Ακολούθησε εφαρμογή πυρεθρίνης και θερινού πολτού για την καταπολέμηση της μόλυνσης.

Τζίντζερ:

Και η καλλιέργεια του τζίντζερ επηρεάστηκε με τη σειρά της από εισροή θαλασσινού νερού με αποτέλεσμα μόνο 9 φυτά να καταφέρουν να αναπτυχθούν αποδίδοντας ποσότητα βολβών συνολικού βάρους 0.6 kg (0.4 kg/m²), (**Εικόνα 65-7**). Οι συγκεκριμένοι μετά από το τεμαχισμό και τη ξήρανσή τους, επαναφυτεύθηκαν με στόχο το πολλαπλασιασμό της καλλιέργειάς του. Η βλάστησή τους έχει ξεκινήσει με αργό ρυθμό, και οι πρώτοι βλαστοί των νέων φυτών σήμερα έχουν αρχίσει να εμφανίζονται. Το χαμηλό περιεχόμενο σε οργανική ουσία του εδάφους που έχει ως αποτέλεσμα την υψηλή απαίτηση λίπανσης πιθανώς επηρεάζει το ρυθμό ανάπτυξής του.

Παρακάτω απεικονίζονται η αντίστοιχη συγκομιδή των καλλιεργούμενων φυτών.



Εικόνα 65: Η συγκομιδή του PGH

Τα λοιπά είδη που αναπτύχθηκαν κατά καιρούς στο τροπικό θερμοκήπιο του HYDRO5, κυρίως σε περιορισμένα άτομα πειραματικά, δεν απέδωσαν τα αναμενόμενα αποτελέσματα και έτσι δεν επεκτάθηκε ο πληθυσμός τους. Συνοπτικά, το είδος *Cucumis melo* (Perino), αν και αρχικά φάνηκε να αποδίδει, η ανάπτυξή του περιορίστηκε γρήγορα λόγω χαμηλών θερμοκρασιών το χειμώνα. Τα φυτά *Hylocereus undatus* (Dragon Fruit), καλλιεργούνται ακόμη αλλά με αργή ανάπτυξη καθώς υστερούν στον ανταγωνισμό υπό τη συγκαλλιέργεια τους με το είδος *Passiflora edulis* και επηρεάζονται από τις χαμηλές θερμοκρασίες. Το είδος *Colocasia esculenta* δεν δείχνει να ευδοκμεί έως σήμερα σε συνθήκες στάγδην άρδευσης και φτωχού σε οργανική ουσία εδάφους ενώ τα φύλλα του καταστρέφονται κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Τέλος τα μοναδικά φυτά των ειδών *Annona cherimola* (δέντρο Cherrimoya), *Psidium guajava* (Guava), και *Coffea Arabica* (Arabian Coffee) που καλλιεργούνται στο PGH αν και δείχνουν κάποιου βαθμού ανθεκτικότητα έως σήμερα δεν παρουσιάζουν αποτελεσματική ανάπτυξη στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης καθώς δεν απέδωσαν καρπούς έως σήμερα. Εξάιρεση αποτέλεσε το φυτό Φυσαλίσ, όπου ευδοκίμησε στο θερμοκήπιο προστευόμενο από τις τοπικές καιρικές συνθήκες και αποδίδοντας συγκομιδή 2.14 kg. Πλέον όμως δεν καλλιεργείται, καθώς καταστράφηκε ολοκληρωτικά έπειτα από την υπερχειλίση θαλασσινού νερού.

Σε γενικές γραμμές, τα αποτελέσματα φυτικής παραγωγής στο PGH μέσω αξιοποίησης του αφαλατωμένου νερού κρίθηκαν επιτυχημένα, παρά τις δυσκολίες που εμπειριέχει η μέθοδος οργανική γεωργίας ως προς τον γρήγορο και αποτελεσματικό περιορισμό ξενιστών και φυτικών ασθενειών. Η μη χρήση χημικών για την αντιμετώπιση προσβολών και η χρονοβόρα χειρωνακτική απομάκρυνση των ζιζανίων σε κάποιες περιπτώσεις φάνηκαν επιζήμια προς την κατάσταση του εδάφους και της καλλιέργειας. Η απουσία συμβαλλόμενου φυτώριου στο νησί κατέστησε επίσης δύσκολη και κοστοβόρα την αναπλήρωση της καλλιέργειας με νέα φυτά, καθώς έπρεπε να προμηθευτούν από την ενδοχώρα. Η απλή κατασκευή του θερμοκηπίου ήταν ικανή για τη διατήρηση των ειδών όμως λόγω των δυνατών ανέμων που επικρατούν για μεγάλο διάστημα στην Τήνο παρουσιάστηκε φθορά στο σύστημα της αυτόματης οροφής με αποτέλεσμα το άνοιγμα της για το έλεγχο θερμοκρασίας και υγρασίας να γίνεται χειροκίνητα. Αυτό είχε ως επόμενο τη μη συνεχή επίτευξη βέλτιστων για την καλλιέργεια συνθηκών, όπως με περιπτώσεις δυσμενών επιπτώσεων π.χ. επιπτώσεις θερμικού στρες στα φυτά λόγω υψηλών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου. Η συνύπαρξη φυτών διαφορετικών απαιτήσεων σε τμήματα του PGH, όπως π.χ. μπανανιάς με φυτά αλόης, είχε αρνητικά αποτελέσματα και στα δύο είδη λόγω υπό ή υπεράρδευσης αυτών, αντιστοίχως.

Στον παρακάτω **Πίνακας 41** περιγράφονται συγκεντρωτικά τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν ως προς την άρδευση, την καλλιέργεια και την κατάσταση των φυτών, του εδάφους και του αρδευτικού συστήματος. Παράλληλα αποτυπώνονται και οι ενέργειες αντιμετώπισης αυτών στα πλαίσια του πλάνου εργασιών.

Πίνακας 41: Πλάνο εργασιών και αντιμετώπισης προβλημάτων τροπικού θερμοκηπίου του HYDRO5

Κατάσταση	Συχνότητα	Ενέργεια
Απομάκρυνση ζιζανίων	Μηνιαίως	Χειρωνακτικά
Φυτοπροστασία	Ανά 2 μήνες	Διαφυλλικός ψεκασμός οξυχλωριούχου χαλκού
Γενική πρόληψη και αντιμετώπιση ασθενειών, εντόμων & παρασίτων	Έναρξη θερινής/χειμερινής περιόδου - Εκτάκτως	Διαφυλλικός ψεκασμός πυρεθρίνης, σαπουνόνεου, θερινού πολτού (παραφινέλαιο)
Ενίσχυση ανάπτυξης και αντοχής καλλιεργειών	Έναρξη θερινής/χειμερινής περιόδου - Εκτάκτως	Υγρολίπανση με βιοδιεγέρτη εκχυλίσματος φυκιών ελεύθερων αμινοξέων, P,K και ιχνοστοιχείων (Idai Engorde, Algaliv)
Βασική λίπανση	Έναρξη θερμής περιόδου	Εδαφική εφαρμογή κοπριάς κοτόπουλου, Super Eco-Vas (5-8-17)
Επιφανειακή λίπανση (αναπλήρωση θρεπτικών στα φυτά)	Θερινή περίοδο - ανά 1-2 μήνες	Υγρολίπανση με υδατοδιαλυτά σκευάσματα N,K κλπ.
Αντιμετώπιση αλευρώδων & αφίδων	Εκτάκτως	Διαφυλλικός ψεκασμός αλάτων καλίου
Αντιμετώπιση μυρμηγκιών	Εκτάκτως	Εδαφική εφαρμογή διατομικής γης - Παγίδες
Ρύθμιση pH εδάφους	2 φορές	Εδαφική εφαρμογή στοιχειακού θείου, κιτρικού οξέος

Αντιμετώπιση φουζαρίου και μελολόνης (Ασθένειες καλλιέργειας μπανάνας)	Εκτάκτως (Περίοδος Μαΐου – Σεπτεμβρίου 2023)	Ριζοπότισμα και διαφυλλικός ψεκασμός με Ιοντικό χαλκό και Ψευδάργυρο, βιοδιεγέρτη φυκιών, πύρεθρο, οργανικό λίπασμα Fish-fert – Απομάκρυνση προσβεβλημένων μερών
Εδαφική επίστρωση για προστασία από παγετό(χειμώνα) και διατήρηση εδαφικής υγρασίας (καλοκαίρι)	Ετησίως	Επίστρωση από άχυρο και τσιπς ξύλου (mulch)
Αύξηση γονιμότητας εδάφους	1 φορά	Εφαρμογή διαλύματος ευεργετικών μ/ο εδάφους
Αερισμός εδάφους	2-4 ανά έτος	Σκάλισμα πεδίων (χειρωνακτικά)
Σκίαση θερμοκηπίου	Ετησίως (θερινή περίοδος)	Ψεκασμός εξωτερικών επιφανειών με Sunblock (ασβεστούχο διάλυμα)
Έλεγχος αρδευτικού δικτύου (Ηλεκτροβάνες, αισθητήρες, σταλάκτες, πιεστικό)	Καθημερινώς	Αντιμετώπιση τυχόν βλαβών – Συντήρηση – Αντικατάσταση λόγω φθορών, εμφράξεων

Τελικά, και παρά τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν, η καλλιέργεια του PGH υπό την εφαρμογή άρδευσης με το ανακτώμενο νερό από το MSS, κρίθηκε επιτυχημένη και δεν παρουσιάστηκαν σημαντικά προβλήματα που να σχετίζονται με την ποιότητά του. Η παραγωγή τροπικών φρούτων και αξιοποιήσιμης φυτικής βιομάζας απέδωσε συνολικά μεγαλύτερη της επιθυμητής ποσότητας συγκομιδή (> 500 kg) υψηλής ποιότητας προϊόντων. Στον **Πίνακα 42** παρουσιάζεται η συγκεντρωτική συγκομιδή του θερμοκηπίου.

Πίνακας 42: Συγκεντρωτική απόδοση παραγωγής της μελετώμενης τροπικής καλλιέργειας στο HYDRO5

Συγκομιζόμενο Είδος	Αριθμός	kg/μονάδα (Μέση τιμή)	Συνολική συγκομιδή ανά είδος (kg)
Ανανάς	32	0.5	16
Πασιφλόρα	46	0.035	1.61
Παπάγια	142	0.32	45.44
Φυσαλίσ	214	0.01	2.14
Μπανάνα (Τσαμπιά)	17	8.1	138.38
<i>Aloe Vera</i> (Φύλλα)	1.109 (144 Φυτά)	0.22	250.1
<i>Aloe Arborescens</i> (Φύλλα)	494 (13 Φυτά)	0.072	35.48
Κάρδαμο (Φύλλα)	50	0.52	27.41
Τζίντζερ (Βολβοί)	6	0.105	0.63
Σύνολο		517.19	

5.11. Δράσεις που εκπονήθηκαν στα πλαίσια της κοινωνικής δέσμευσης

Η πλειονότητα της συγκομιδής από το PGH δωρίστηκε στην τοπική κοινωνία αλλά και ως πρώτη ύλη στην τοπική αγορά, στα πλαίσια της κοινωνικής δέσμευσης του πιλοτικού HYDRO5. Δράσεις όπως ενημέρωση σχολείων, ημερίδες, προσφορά των καρπών στη κοινωνική κουζίνα, το δήμο και πολίτες αλλά και παρασκευή σαπουνιού και μαρμελάδας από αλόη σε τοπικά μαγαζιά, εκπονήθηκαν στα πλαίσια του προγράμματος *HYDROUSA* (**Εικόνα 66**). Οι εν λόγω δράσεις, με αφετηρία το ανακτώμενο νερό στο MSS προήγαγαν το τρίπτυχο Οικονομία-Κοινωνία-Περιβάλλον, ενώ υπό το πρίσμα του άξονα *WEFE*, υποστήριξαν τον τομέα της διατροφής (Παροχή φρούτων και πρώτων υλών) αλλά και το τομέα του περιβάλλοντος (Αναγέννηση εδαφών, Περιβαλλοντική εκπαίδευση).



Εικόνα 66: Δράσεις κοινωνικής δέσμησης του HYDRO5

5.12 Τελικό οικονομικό μοντέλο της εγκατάστασης HYDRO5

Στον **Πίνακα 43**, παρατίθεται το συγκεντρωτικό τελικό οικονομικό μοντέλο της μελετώμενης εγκατάστασης, όπως παρέχεται από τον κατασκευαστή του MSS και έπειτα από επικαιροποίηση με τα δεδομένα πεδίου. Αποτιμάται το ετήσιο κατασκευαστικό κόστος (yearly CAPEX) προβαλλόμενο στο μέλλον (χρόνο ζωής του έργου) με επιτόκιο δανεισμού 1.5%, χρόνο ζωής του έργου 20 έτη και δεδομένης της κρατικής επένδυσης κεφαλαίου που έλαβε χώρα ίση με 50% του κατασκευαστικού κόστους. Για το παραπάνω υπολογισμό χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση *PMT* του *excel*, η οποία ουσιαστικά ταυτίζεται με την συνάρτηση **(9)**.

Επιπλέον, παρουσιάζονται τα ετήσια λειτουργικά κόστη (OPEX), συμπεριλαμβανομένης της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας, της πρόσθετης απαίτησης νερού για την καλλιέργεια του ΡGH, τις απολαβές του απαιτούμενου ανθρωπίνου δυναμικού, το ετήσιο κόστος συντήρησης και λοιπών αναλώσιμων που στο παρόν μοντέλο διαμορφώνονται στο 1% του κατασκευαστικού κόστους ετησίως. Διευκρινίζεται εδώ, πως λαμβάνεται υπόψη πλήρης και ομαλή λειτουργία του συστήματος ανάκτησης αλατιού.

Εν συνεχεία εκτιμώνται τα ετήσια έσοδα λαμβάνοντας υπόψη τα δυνητικά κέρδη από την εξοικονόμηση λόγω ίδιας παραγωγής αρδευτικού νερού καθώς και τα έσοδα από την παραγωγή αλατιού. Επιπλέον, συνυπολογίζεται η αξία από την εμπορική εκμετάλλευση τροπικών φρούτων και φυτών, όπως προκύπτουν από την αξιοποίηση του αφαλατωμένου νερού στο HYDRO5. Τα παραπάνω υπολογίζονται βάσει της εγχώριας λιανικής τιμής τους.

Τέλος αποτιμάται η απαιτούμενη περίοδος απόσβεσης λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, ενώ υπολογίζεται και το κόστος ανά m^3 νερού ετησίως, για το χρόνο ζωής του έργου και βάσει των προδιαγραφών του συστήματος (μέση ημερήσια παραγωγή 210L). Το τελευταίο, συγκρίνεται έπειτα με το κόστος που προκύπτει βάσει των δεδομένων πεδίου όπως καταγράφηκαν στη παρούσα μελέτη (**Πίνακας 44**).

Υπογραμμίζεται πως το εν λόγω οικονομικό μοντέλο, εν αντιθέσει με τη μεθοδολογία της **Ενότητας 5.4 Εκτίμηση ειδικού κόστους παραγόμενου νερού**, για τον υπολογισμό του ειδικού κόστους νερού και μόνο δεν λαμβάνει υπόψη τα ετήσια κόστη συντήρησης (AMC) και την ετήσια αξία εκκαθάρισης (ASV) του έργου. Τα εν λόγω μεγέθη αποτυπώνονται ωστόσο στον προκύπτοντα χρόνο απόσβεσης του έργου. Επιπλέον, ο χρόνος αποπληρωμής και το επιτόκιο δανεισμού εδώ διαφέρουν, λόγω της φύσης του έργου έναντι των $n=10$ έτη και $i=15\%$, που ελήφθησαν βιβλιογραφικά, ενώ όπως προαναφέρθηκε λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος ζωής του έργου ίσος και η κρατική χρηματοδότηση.

Πίνακας 43: Οικονομικό μοντέλο συνολικής εγκατάστασης HYDRO5

Σύστημα Αφαλάτωσης (MSS)				Σχόλια
Εισροή SW	709 L/day			
Εκροή FW	2.625 L/day	80 μονάδες	0.21 m^3 /day	
Εκροή Αλατιού	1 kg/τομέα/day	2 τομείς	2 kg/day	
Ηλιακος Αποστακτήρας MSS	1.875 m^2 /μονάδα	80 μονάδες	150 m^2 συν.Επιφάνεια	Επιπλέον 50 m^2 διάδρομοι και 18 m^2 δεξαμενές

Κόστος MSS & SF	475 €/μονάδα	<i>P</i>	38,000 € συνολικό κόστος	Συμπεριλ. Εγκατάστασης
Κατανάλωση Ενέργειας	10.1 kWh/day	365 d λειτουργίας/yr	3,697 kWh/year	Άντληση και <i>online</i> αισθητήρες
Συντήρηση & αναλώσιμα	1%	AMC	380 €/year	1% επί του συν. Κόστους
Κόστος προσωπικού	40.5 €/day	93 days/year	3,767 €/year	14 hr/week (λειτουργός) & 1.5 hr/week (βοηθός)
Ετήσια Εκροή FW	0.21 m ³ /day	365 d λειτουργίας/yr	> 70 m ³ /year	
Τροπικό Θερμοκήπιο (PGH)				Σχόλια
Επιφάνεια PGH	200 m ²	Καλλιεργούμενη	141 m ²	
Αρχικό Κόστος Εγκατάστασης			16,616 €	Συμπεριλ. Σύστημα άρδευσης, προετοιμασία εδάφους, αισθητήρες
Αρχικό κόστος σπόρων & φυτών			1,833 €	
Ετήσια λίπανση	0.85 €/m ²	Συνολικά	120 €/year	
Κατανάλωση Ενέργειας			92 kWh/year	Για άντληση FW από MSS & πότισμα
Αναλώσιμα & Συντήρηση			360 €/year	
Κόστος προσωπικού	40.5 €/day	42 days/year	1,701 €/year	4.5 (λειτουργός) & 2.5 hrs/week (βοηθός)
CAPEX Εγκατάστασης				Σχόλια
Κόστος Αγοράς & Εγκατάστασης	MSS (& SF)		38,000 €	
	PGH		18,449 €	
Κρατική Επένδυση	50%	Απομείωση	-19,000 €	
Τελικό CAPEX			37,449 €	
Επιτόκιο δανεισμού		<i>i</i>	1.50%	
Διάρκεια δανεισμού			20 έτη	
Ετήσιο CAPEX			1,982 €/year	
OPEX Εγκατάστασης				Σχόλια
Συνολ. Κατανάλωση Ενέργειας	3814.9 kWh/year	τιμή μονάδος 0.103 €/kwh	676 €/year	
Απαίτηση νερού δικτύου	0 m ³ /year		0 €/year	
Λιπάσματα			119.9 €/year	
Αναλώσιμα			1,040 €/year	
Προσωπικό			0 €/year	
Product packaging			5,467.5 €/year	
Ετήσιο OPEX			7,303.04 €/year	
Ετήσια κέρδη			Απολαβές	Σχόλια
Παραγωγή φρούτων & φυτών	504.43 kg/year	10.02 €/φυτό	5,053 €/year	
Εξοικονόμηση νερού	76.65 m ³ /year	0.87 €/m ³	67 €/year	
Παραγωγή αλατιού	700 kg/year		4,200 €/year	
Συνολ. Ετήσιες απολαβές			9,319 €/year	
Δείκτες				Σχόλια
Χρόνος ζωής εγκατάστασης			20 έτη	
Κόστος παραγόμενου νερού		10.95 €/m ³	0.01 €/L	Κέρδη ανά μονάδα και έτος στα 20 χρόνια λειτουργίας του έργου
Χρόνος Απόσβεσης			8.3 έτη	CAPEX MSS/(ετήσια κέρδη + OPEX)
Χρόνος Απόσβεσης			16.3 έτη	CAPEX MSS & PGH/(ετήσια κέρδη + OPEX)
Άμεση προσφορά εργασίας		135 εργάσιμες ημέρες	0.7 άτομα	Ισοδύναμο 8ωρου

Από το παραπάνω οικονομικό μοντέλο παρατηρείται λοιπόν, πως το παραγόμενο νερό για τα 20 χρόνια λειτουργίας του συστήματος, αποφέρει κέρδη στην εγκατάσταση της τάξης των 0.01 €/L. Στην περίπτωση που η εγκατάσταση προορίζεται για ήδη υπάρχουσα καλλιέργεια (εξαιρείται το CAPEX του PGH) το έργο αποσβένει το κόστος κεφαλαίου του και καθίσταται προσοδοφόρο κατά τα μισά περίπου έτη λειτουργίας του (8.3 έτη), ενώ συμπεριλαμβανομένου του κόστους κεφαλαίου μίας καλλιέργειας θερμοκηπίου της τάξης του PGH το έργο κάνει απόσβεση στα 16.27 έτη. Στο σενάριο, όπου το κράτος δε θα επενδύσει στο έργο, το έργο θα έκανε απόσβεση στα 24.5 έτη και θα ήταν ως εκ του καταστάται ζημιολόγο.

Επιπλέον, παρατηρείται πως όσο παρατείνεται η διάρκεια ζωής, μειώνει το επιτόκιο δανεισμού και ο χρόνος αποπληρωμής και αυξάνει η απόδοση της παραγωγής καθαρού νερού, τόσο μειώνει το κόστος του νερού και ο χρόνος απόσβεσης. Συγκεκριμένα, για την μέγιστη ημερήσια παραγωγή του συστήματος (280 L/day), το κόστος νερού πέφτει στα 0.008 €/L και ο χρόνος απόσβεσης στα 16.1 και 8.2 έτη, συμπεριλαμβανομένου και όχι του CAPEX του PGH, αντίστοιχως. Συμπεραίνεται λοιπόν, πως η κρατική παρέμβαση και η βέλτιστη απόδοση του συστήματος συνεισφέρουν ώστε να μην μετακυλιέται υψηλό κόστος επιβαρύνοντας τον καταναλωτή και συμβάλλουν άρα ώστε το έργο να είναι επικερδές.

Από τα οικονομικά στοιχεία επιβεβαιώνεται πως το κόστος νερού του συστήματος MS είναι εντός του εύρους κόστους που αναφέρουν μελετητές ηλιακών αποστακτήρων στη βιβλιογραφία (Πίνακας 30). Επιβεβαιώνεται επίσης, πως το κόστος είναι υψηλότερο συγκριτικά με το κόστος νερού συμβατικών μεθόδων αφαλάτωσης, όπως αναλύθηκε στο 2^ο Κεφάλαιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης (Πίνακας 4, Πίνακας 5). Ο προφανής λόγος αυτού είναι η μικρότερη και ασταθής ημερήσια απόδοση παραγωγής. Η κατάσταση δυσχεραίνει λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα πεδίου όπως καταγράφηκαν εδώ (συνυπολογίζοντας τους 7 προσωρινά μη ενεργούς αποστακτήρες λόγω φθοράς). Σε αυτή την περίπτωση, για τη μέση (123.6 L/day), τη μέση μέγιστη (141.5 L/day), και τη μέση ελάχιστη (105.7 L/day) ημερήσια παραγωγή νερού και συνυπολογίζοντας την πρόσθετη απαίτηση νερού έναντι των 154 L/day που ζητά κατά μ.ο. το PGH, το κόστος νερού διαμορφώνεται στα 0.019 €/L, 0.016 €/L και 0.022 €/L, αντίστοιχα. Ο Πίνακας 44 συνοψίζει αναλυτικότερα τα εν λόγω δεδομένα.

Πίνακας 44: Εκτίμηση κόστους νερού και λοιπών παραμέτρων βάσει της ημερήσιας παραγωγής του MSS

Ημερήσια παραγωγή (L/day)	Μέση Κατασκευαστή	Μέγιστη Κατασκευαστή	Ελάχιστη Κατασκευαστή	Μέγιστη ημερήσια	Μέση Πεδίου	Μέση Μέγιστη	Μέση Ελάχιστη
		210	317	77.67	280	123.61	141.49
CL (€/L)	0.011	0.007	0.03	0.008	0.019	0.016	0.022
Πρόσθετη Απαίτηση Νερού (m ³ /year)	0	0	30	0	13	7	19
Χρόνος απόσβεσης (έτη, MSS)	8.3	8.1	8.5	8.2	8.4	8.3	8.5
Χρόνος απόσβεσης (έτη, MSS & PGH)	16.3	16.0	17.8	16.3	16.5	16.4	16.63

Κλείνοντας αξίζει συγκεντρωτικά να επισημανθεί, πως το μελετώμενο σύστημα αποτελεί μία μη ώριμη και αναδυόμενη τεχνολογία αφαλάτωσης που λόγω της απλότητας του, της αξιοπιστίας, της μηδαμινής ημερήσιας κατανάλωσης ενέργειας, το χαμηλό κόστος υλικών και συντήρησης και τη μικρή απαίτηση ανθρωπίνου δυναμικού, αποτελεί μία βέλτιστη εναλλακτική για την ανάκτηση αρδευτικού νερού σε εκτάσεις με έλλειψη παροχής κατάλληλου νερού. Μικροί παραγωγοί, χωρίς ιδιαίτερη εξειδίκευση, θα μπορούσαν εφαρμόζοντας το, να μειώσουν τα κόστη άρδευσης και να συνεισφέρουν αποκεντρωμένα στην ελαχιστοποίηση της ζήτησης νερού, ιδίως σε περιοχές υψηλών πιέσεων όπως η περιοχή μελέτης. Ως “αρθρωτό” σύστημα είναι επιπλέον εύκολα επεκτάσιμο, χωρίς σημαντική απαίτηση τροποποιήσεων και κατασκευών. Καθώς η ανάγκη εγγύτητας με τη θάλασσα που συνεπάγεται υψηλό κόστος παράκτιων εκτάσεων, θεωρείται δεδομένη για συστήματα αφαλάτωσης, ιδανικές εκτάσεις εγκατάστασης για το MSS θεωρούνται τα μη οικοδομήσιμα αγροτεμάχια. Τέτοια συστήματα ωστόσο όπως έχει προαναφερθεί, θεωρούνται συμπληρωματικά των κεντρικών υδρευτικών έργων. Όπως διαπιστώνεται η προσέλκυση δημόσιων ή ιδιωτικών επενδύσεων σε αυτά κρίνεται απαραίτητη στην παρούσα φάση για να καταστούν οικονομικά αποτελεσματικά, αφού το ολιστικό κόστος του νερού και των οικοσυστημικών υπηρεσιών που εμπλέκονται δεν λαμβάνεται δεόντως υπόψη.

Περαιτέρω, μελέτη ως προς τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του MSS και τη συνεπαγόμενη μείωση του ειδικού κόστους νερού, γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο.

6^ο Κεφάλαιο – Δοκιμές βελτιστοποίησης του συστήματος MSS

Με την ολοκλήρωση του ερευνητικού προγράμματος *HYDROUSA* τον Ιούνιο του 2023, το μελετώμενο σύστημα ηλιακής απόσταξης και το σύνολο της εγκατάστασης συνεχίζει την έως τώρα λειτουργία του, καθώς εισάγεται στο νέο ερευνητικό πρόγραμμα *SureNexus*. Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται μικρή αναφορά στο πλαίσιο που διέπει το εν λόγω πρόγραμμα. Επικεντρώνεται δε, σε δοκιμές βελτιστοποίησης του συστήματος, όπως διενεργήθηκαν στο πλαίσιο του νέου προγράμματος από την απεσταλμένη ομάδα της εταιρείας παραγωγής του MSS (*Planet SAS*) το διάστημα Ιουνίου-Ιουλίου 2023 στην Τήνο. Υπενθυμίζεται ότι, τα αποτελέσματα των δοκιμών αποτελούν έργο της εν λόγω εταιρείας και παρατίθενται έπειτα από ίδια επεξεργασία.

6.1 Ερευνητικό πρόγραμμα *SureNexus*

Το πρόγραμμα *SureNexus* έχει ως άξονα την “*Δίκαιη μετάβαση και προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή και τη βιώσιμη ανάπτυξη*” και διενεργείται υπό την “ομπρέλα” του ευρωπαϊκού προγράμματος “*Συνεργασίας για την έρευνα και καινοτομία στην περιοχή της Μεσογείου*” (*Partnership for Research & Innovation in the Mediterranean region – PRIMA*), από όπου και συγχρηματοδοτείται (Grant Agreement number: 2142).

Το *PRIMA*, ως οργανισμός μη κερδοσκοπικού χαρακτήρα με έδρα τη Βαρκελώνη της Ισπανίας και υποστηριζόμενος από την Ε.Ε., “*Χρηματοδοτεί έργα που συμβάλλουν στη βιώσιμη χρήση των φυσικών πόρων, την οικονομική ανάπτυξη και τη σταθερότητα στη Μεσόγειο*”. Μέσω αυτών μεταξύ άλλων, στοχεύει στην ανάπτυξη συνεργειών, την αναγνώριση οφελών και αντισταθμίσεων και την προώθηση μέτρων και τεχνικών που θα συμβάλουν στην ολοκληρωμένη διαχείριση νερού-ενέργειας-τροφίμων-οικοσυστημάτων (*WEFE*), τη μετάβαση στην “πράσινη” οικονομία και την επίτευξη των *SDGs*. Απώτερο σκοπό αυτών, αποτελεί η διαμόρφωση πολιτικής, οικονομικής, περιβαλλοντικής και κλιματικής ασφάλειας και δικαιοσύνης (*prima-med.org*).

Το έργο του *SureNexus* πιο συγκεκριμένα, μέσω τεσσάρων “ζωντανών εργαστηρίων”, πρόκειται να εφαρμόσει διαφορετικά κοινωνικο-οικολογικά και τεχνικά συστήματα χρησιμοποιώντας λύσεις που βασίζονται στη φύση και τη βιοοικονομία. Πυρήνα του αποτελεί η πρακτική εφαρμογή του εννοιολογικού πλαισίου που διέπει τον άξονα *WEFE* στα τέσσερα καινοτόμα πιλοτικά του προγράμματος. Ενσωματώνει παράλληλα, εργαλεία συμμετοχικής αξιολόγησης, διεπιστημονικής προσέγγισης, ανταλλαγής γνώσεων και τεχνικών, και εκτεταμένης αξιοποίησης τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης. Διαμέσου αυτών, στοχεύεται ο περιορισμός της κατανάλωσης νερού και ενέργειας για την επίτευξη επισιτιστικής ασφάλειας με γνώμονα τη διατήρηση της βιοποικιλότητας και τον μετριασμό υποβάθμισης του εδάφους. Απώτερο σκοπό, αποτελεί ο εντοπισμός τεχνικών και πολιτικών περιορισμών για την ανάπτυξη ενός προσαρμοσμένου εργαλείου διάδοσης που θα συμβάλλει τελικά στην προώθηση και εγκαθίδρυση του άξονα *WEFE* στις περιοχές της Μεσογείου (*surenexus.eu*).

Τα τέσσερα πιλοτικά που αποτελούν το κορμό του έργου, περιλαμβάνουν:

- Το πιλοτικό Οινοποιείο με τους Αμπελώνες στην Καταλονία (Ισπανία), όπου εφαρμόζεται ανάκτηση και αξιοποίηση αρδευτικού νερού από τα λύματα της εγκατάστασης και μέθοδοι επαναχρησιμοποίησης των αποβλήτων [Υπεύθυνοι: Ινστιτούτο Αγροδιατροφικής Έρευνας και Τεχνολογίας (INRA) & Πολυτεχνείο Καταλονίας (UPC)]
- Το πιλοτικό “ψηφιακής” καλλιέργειας εσπεριδοειδών στη Κενίτρα (Μαρόκο), όπου εφαρμόζονται μέθοδοι “ευφυούς” γεωργίας και γεωργίας ακριβείας μέσω στάγδην άρδευσης τροφοδοτούμενης από ηλιακή ενέργεια, διαχείριση νερού και θρεπτικών, λύσεις βιοοικονομίας & επαναχρησιμοποίησης πλαστικών αποβλήτων, [Υπεύθυνος: INRA-Morocco].
- Το πιλοτικό “Αγρο-βολταϊκής” καλλιέργειας στο Ισραήλ, όπου εφαρμόζεται χρήση ΑΠΕ για την παραγωγή τροφίμων, μέσω ταυτόχρονης αξιοποίησης εδαφών για την ανάκτηση ενέργειας και τη γεωργία, [Υπεύθυνοι: KKL-JNF].

- Την ομάδα πιλοτικών μονάδων της Τήνου (Ελλάδα), που περιλαμβάνει τις αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις του μελετώμενου συστήματος ηλιακής αφαλάτωσης (HYDRO5) και της μονάδας βιώσιμου αγροτουρισμού (HYDRO6), όπως περιεγράφηκαν προγενέστερα [Υπεύθυνος: PLANET & ELT].

Κλείνοντας, στην **Εικόνα 67** παρακάτω, αποτυπώνεται το πως “μεταφράζεται” εννοιολογικά αλλά και λειτουργικά η μελετώμενη εγκατάσταση υπό το πρίσμα του άξονα *WEFE*.

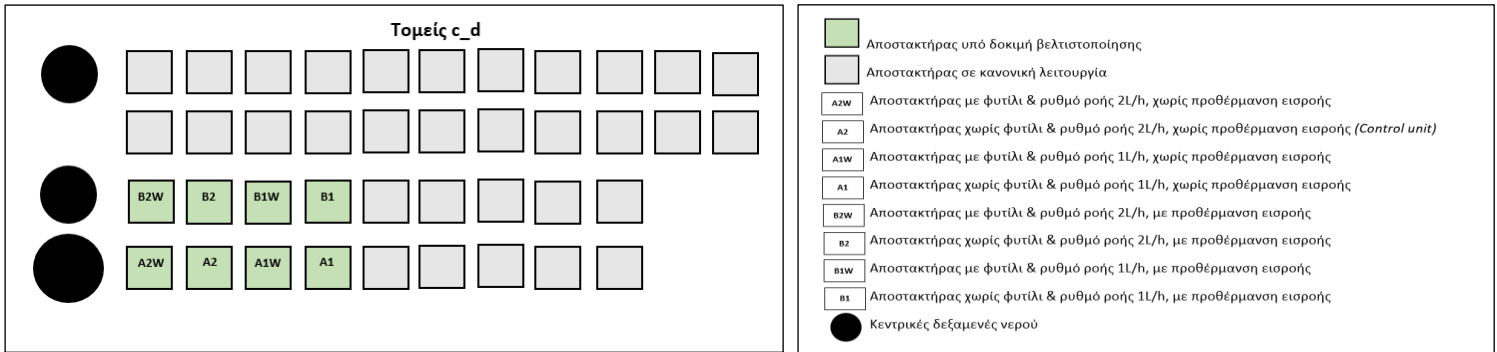


Εικόνα 67: Αποτύπωση του HYDRO5 υπό τον άξονα *WEFE*

Στη βάση αυτή λοιπόν στο HYDRO5, το νερό αποκτά προστιθέμενη αξία καθώς ανακτάται καλλιεργήσιμη γη και παράγονται μη εγχώρια διατροφικά προϊόντα. Αυτά, αξιοποιώντας το ανακτώμενο νερό από το MSS ως πηγή άρδευσης, με τη σειρά τους συνεισφέρουν δυναμικά στη μείωση των εκπομπών CO₂ που θα εκλύονταν αν εισάγονταν. Παράλληλα μετριάζεται η σπατάλη αυτού και της ενέργειας που απαιτείται για τη διατήρηση του θερμοκηπίου.

6.2 Περιγραφή δοκιμών βελτιστοποίησης

Επανεστιάζοντας στο μελετώμενο σύστημα, όπως προαναφέρθηκε το διάστημα Ιουνίου-Ιουλίου 2023, απεσταλμένη ομάδα από τον κατασκευαστή επιχείρησε μία σειρά δοκιμών με σκοπό την βελτιστοποίηση της απόδοσής του. Δεσμεύτηκαν έτσι, 8 αποστακτήρες στους οποίους εφαρμόστηκε συνδυασμός τροποποιήσεων των λειτουργικών και κατασκευαστικών παραμέτρων τους (**Διάγραμμα 24**). Στόχο είχαν την αύξηση της ημερήσιας παραγωγής νερού συγκριτικά με τους συμβατικούς αποστακτήρες του συστήματος.



Διάγραμμα 24: Γραφική απεικόνιση & ερμηνεία των αποστακτήρων MSS υπό δοκιμή βελτιστοποίησης.

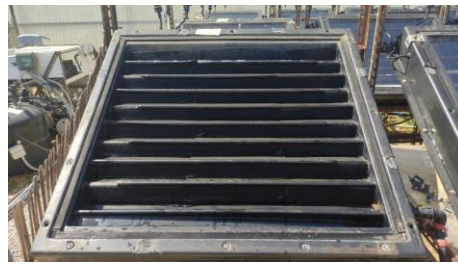
Συγκεκριμένα, οι τροποποιήσεις που εφαρμόστηκαν αφορούσαν τα εξής:

- Προθέρμανση της εισόδου θαλασσινού νερού στους αποστακτήρες [Πάνελ: B1, B1W, B2, B2W], όπου παρεμβάλλοντας στο σύστημα μία δεξαμενή προθέρμανσης (**Εικόνα 68**) και παροχετεύοντας μέρος της εισροής θαλασσινού νερού αυξήθηκε η θερμοκρασία του με τη χρήση ηλεκτρικών αντιστάσεων, στους (i) 35°C [20/6 έως 23/6], (ii) 40-45°C [26/6 έως 30/6], (iii) 45-50 °C 3/7 έως 6/7] και (iv) 50-55°C [18/7 έως 20/7] πριν την είσοδό του στους αποστακτήρες. Στόχος αυτού ήταν η αύξηση του ρυθμού εξάτμισης στον αποστακτήρα.



Εικόνα 68: Δεξαμενή προθέρμανσης της εισόδου SW στο MSS

- Εισαγωγή “φυτιλιού” στην κάθετη επιφάνεια κάθε επιπέδου του αποστακτήρα [Πάνελ: A1W, A2W, B1W, B2W]. Ως υλικό κατασκευής του επιλέχθηκαν οι φυτικές ίνες (**Εικόνα 69**). Στόχο αυτής της τροποποίησης αποτέλεσε η αύξηση της ενεργής επιφάνειας εξάτμισης και του χρόνου παραμονής αξιοποιώντας το πορώδες του υλικού και την τριχοειδή ανύψωση του νερού. Σημειώνεται πως δεν μπορεί να αναφερθεί επακριβώς η σύνθεση του εν λόγω υλικού, καθώς αποτελεί “πατέντα” της κατασκευάστριας εταιρείας, *Planet SAS*.



Εικόνα 69: Το υλικό φυτιλιού” (αριστερά) και η εγκατάστασή του στον αποστακτήρα (δεξιά).

- Μείωση του ρυθμού ροής του νερού από 2 L/h σε 1 L/h [Πάνελ: A1, A1W, B1, B1W], με την εισαγωγή αντίστοιχων μικροσταλακτών (**Εικόνα 70**). Στόχος εδώ ήταν η αύξηση του χρόνου παραμονής του SW στους αποστακτήρες για την επίτευξη υψηλότερης ποσοστιαίας απόδοσης παραγωγής.



Εικόνα 70: Μικροσταλάκτες ρυθμού ροής 2 L/h (αριστερά) και 1 L/h (δεξιά).

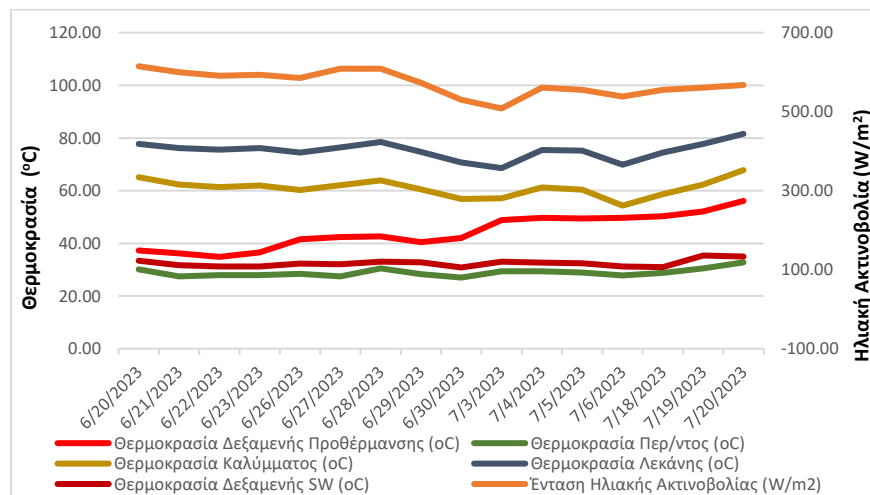
Εν συνεχεία, παρατίθενται και συζητούνται τα ευρήματα των δοκιμών βελτιστοποίησης, ως προς την αύξηση της ημερήσια παραγωγής FW ανά μονάδα αποστακτήρα και την προκύπτουσα απόδοσή του.

6.3 Παράθεση και ανάλυση αποτελεσμάτων δοκιμών βελτιστοποίησης

Ξεκινώντας, βλέπουμε πως διαμορφώθηκε η θερμοκρασία των μερών του αποστακτήρα (Επιφάνεια συμπύκνωσης και εξάτμισης) στα υπό βελτιστοποίηση πάνελ, της δεξαμενής SW (εισροή χωρίς προθέρμανση), της δεξαμενής προθέρμανσης νερού και του περιβάλλοντος σε συσχέτιση με την αύξηση της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας (**Πίνακας 45, Διάγραμμα 25**).

Πίνακας 45: Συσχέτιση θερμοκρασίας διαφόρων μερών ως προς την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας

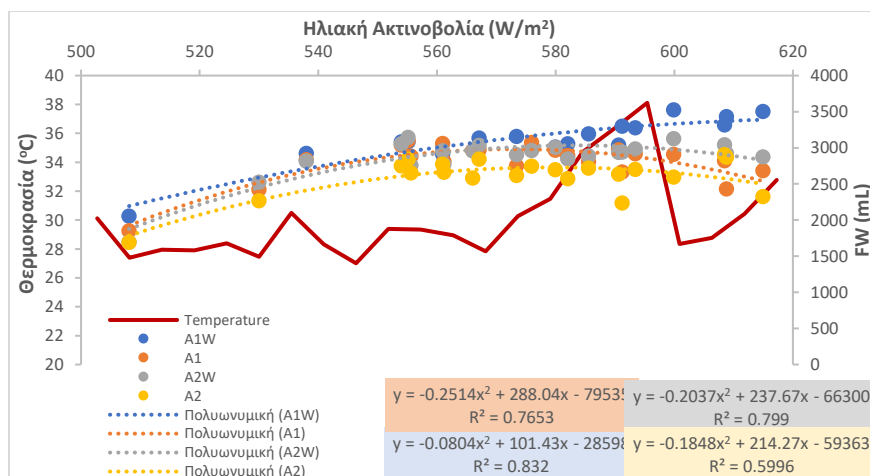
Ημ/νία	Ένταση Ηλιακής Ακτινοβολίας (W/m ²)	Θερμοκρασία Δεξαμενής SW (°C)	Θερμοκρασία Δεξαμενής Προθέρμανσης (°C)	Θερμοκρασία Περ/ντος (°C)	Θερμοκρασία Επιφάνειας Συμπύκνωσης (°C)	Θερμοκρασία Επιφάνειας Εξάτμισης (°C)
6/20/2023	614.97	33.35	37.25	30.11	65.11	77.81
6/21/2023	599.89	31.74	36.25	27.39	62.33	76.16
6/22/2023	591.26	31.26	34.85	27.94	61.35	75.52
6/23/2023	593.43	31.27	36.54	27.91	62.02	76.12
6/26/2023	585.58	32.32	41.49	28.40	60.28	74.53
6/27/2023	608.82	32.08	42.38	27.47	62.04	76.45
6/28/2023	608.48	32.98	42.64	30.49	63.91	78.43
6/29/2023	573.46	32.82	40.44	28.32	60.56	74.70
6/30/2023	530.03	30.84	42.07	27.01	56.86	70.66
7/3/2023	508.10	32.99	48.81	29.38	57.08	68.57
7/4/2023	561.17	32.69	49.70	29.34	61.26	75.45
7/5/2023	555.63	32.46	49.45	28.94	60.44	75.23
7/6/2023	537.98	31.17	49.70	27.83	54.33	69.91
7/18/2023	555.15	31.01	50.32	28.78	58.71	74.43
7/19/2023	560.97	35.37	52.10	30.44	62.30	77.70
7/20/2023	567.11	35.04	56.11	32.78	67.81	81.57
Συσχέτιση Correl					0.67	0.7



Διάγραμμα 25: Συσχέτιση θερμοκρασίας διαφόρων μερών ως προς την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας

Σύμφωνα με το συντελεστή συσχέτισης (εξίσωση Correl) εδώ, παρατηρείται, αν και οριακά, πως η θερμοκρασία της επιφάνειας εξάτμισης επηρεάζεται περισσότερο από την αύξηση της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας (0.7), συγκριτικά με αυτή του καλύμματος (0.67), γεγονός που συντελεί στην αύξηση της παραγωγής απεσταγμένου νερού λόγω διαφοράς θερμοκρασίας νερού και επιφάνειας συμπύκνωσης.

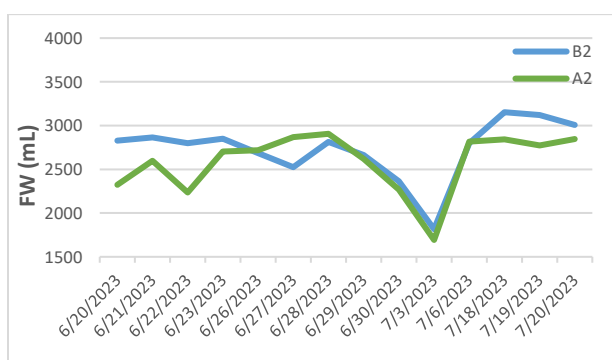
Συγκεκριμένα, παρατηρώντας την μεταβολή της ημερήσιας παραγωγής FW σε συσχέτιση με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (Διάγραμμα 26), επιβεβαιώνεται η υψηλή συσχέτιση ανάκτησης νερού στους ηλιακούς αποστακτήρες με την ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, όπως είχε καταγραφεί και στο **Διάγραμμα 14**.



Διάγραμμα 26: Συσχέτιση παραγωγής FW από τους υπό βελτιστοποίηση αποστακτήρες ως προς την μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας

Αντίθετα, από τη συσχέτιση της παραγωγής νερού με τη θερμοκρασία δεν μπορούμε να βγάλουμε ασφαλή συμπεράσματα. Διακρίνεται ωστόσο μία τάση αρνητικής συσχέτισης, καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος παρατηρείται μία τάση μείωσης της παραγωγής από το σύνολο των υπό εξέταση αποστακτήρων. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί και την μείωση της παραγωγής νερού παρά την κορύφωση της ηλιακής ακτινοβολίας, με εξαίρεση τον αποστακτήρα ρυθμού ροής 1 L/h, με “φυτίλι” και χωρίς προθέρμανση (A1W). Ο πιθανός λόγος στον οποίο οφείλεται αυτή η παρατήρηση, είναι και εδώ πως με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει ο ρυθμός απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον, μειώνοντας έτσι τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας εξάτμισης και της επιφάνειας συμπύκνωσης, με αποτέλεσμα τη μείωση του ρυθμού απόσταξης.

Συνεχίζοντας, και συγκρίνοντας τον αποστακτήρα χωρίς “φυτίλι”, όπου εφαρμόστηκε προθέρμανση νερού (B2) με τον αντίστοιχο που δεν εφαρμόστηκε (A2) παρατηρείται (I), μέση αύξηση της παραγωγής 15.01% κατά την προθέρμανση του νερού στους 35°C, ακολουθούμενη από αυτήν στους 50-55°C με 9.77%. Η μέση και μέγιστη ημερήσια παραγωγή FW του B2, βρέθηκε ίση με 2834.8 mL και 2864 mL στους 35°C και 3095 mL και 3153 mL στους 50-55°C, έναντι των αντίστοιχων τιμών του A2 με 2464.8 mL και 2702 mL (35°C) και με 2819.3 mL και 2845 mL (65°C).

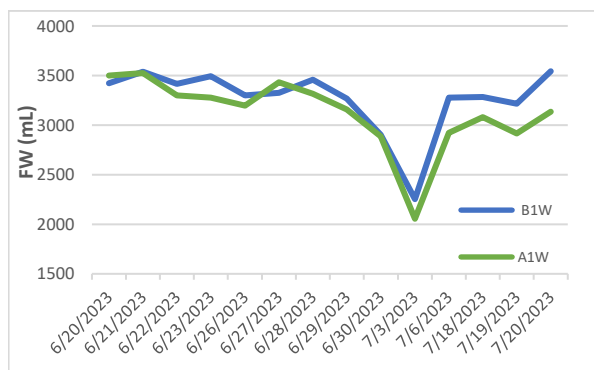


Ημ/νία (Προθέρμανση SW)	B2 (mL)	A2 (mL)
6/20/2023 (37.3°C)	2827	2324
6/21/2023 (36.3°C)	2864	2597
6/22/2023 (34.9°C)	2797	2236
6/23/2023 (36.6°C)	2851	2702
6/26/2023 (41.5°C)	2687	2719
6/27/2023 (42.4°C)	2524	2870
6/28/2023 (42.7°C)	2814	2906
6/29/2023 (40.4°C)	2662	2619
6/30/2023 (42.1°C)	2362	2269
7/3/2023 (48.8°C)	1816	1693
7/6/2023 (49.7°C)	2797	2818
7/18/2023 (50.3°C)	3153	2841
7/19/2023 (52.1°C)	3122	2772
7/20/2023 (56.1°C)	3009	2845

Διάγραμμα 27: Επίδραση της προθέρμανσης του SW στην παραγωγή FW (B2 vs A2)

Συγκρίνοντας τώρα, τον αποστακτήρα με “φυτίλι”, όπου εφαρμόστηκε προθέρμανση νερού (B1W) με τον αντίστοιχο που δεν εφαρμόστηκε (A1W), παρατηρείται (I) μέση αύξηση της παραγωγής 10.01% κατά την προθέρμανση του νερού στους 50-55°C, αρκετά υψηλότερα από την επόμενη τιμή στους 35°C με 1.96%.

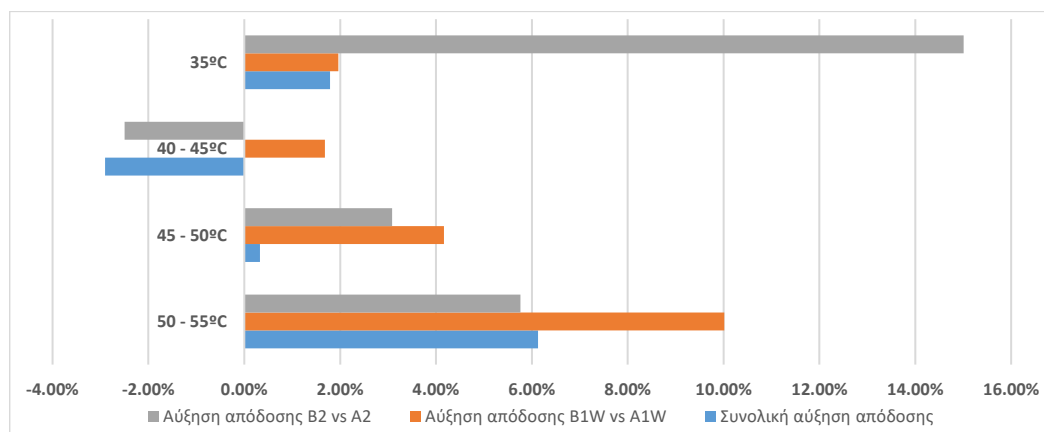
Ωστόσο, η μέση αύξηση της απόδοσης του B1W ως προς το μη τροποποιημένο σύστημα (A2) ήταν υπερδιπλάσια κατά την προθέρμανση του SW στους 35°C με ποσοστό 40.65% έναντι 18.74% στους 65°C. Η μέση ημερήσια παραγωγή ανά αποστακτήρα βρέθηκε ίση 3467 mL και 3348 mL, ενώ οι μέγιστες τιμές ήταν ελάχιστα μακριά με 3537 mL και 3543 mL, αντίστοιχα. Στο γεγονός αυτό όμως, δεν μπορεί να μην συνυπολογιστεί ο παράγοντας της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας που όπως φαίνεται στο **Διάγραμμα 25** παραπάνω, ήταν χαμηλότερη τις ημέρες του πειράματος στους 50-55°C. Ο ίδιος παράγοντας πολύ πιθανώς συμβάλλει και στην πτώση της παραγωγής κατά τις δοκιμές με προθέρμανσης στους 40-50°C (29/6 – 3/7) όπου παρουσιάζεται απότομη πτώση της παραγωγής. Επιβεβαιώνεται έτσι και πάλι η ισχυρή επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στην απόδοση των αποστακτών. Περαιτέρω, παρατηρείται πως η τροποποίηση του αποστακτήρα εισάγοντας “φυτίλι” και τροποποιώντας το ρυθμό ροής σε 1L/h δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη προθέρμανση ή μη του SW καθώς η ημερήσια παραγωγή των B1W και A1W είναι παρόμοια. Μάλιστα η απόδοση του A1W συγκριτικά με το μη τροποποιημένο αποστακτήρα A2 αυξήθηκε κατά 37.95%. Συμπεραίνεται ως εκ τούτου, πως η επίδραση αυτών των τροποποιήσεων είναι ισχυρότερη ως προς την απόδοση του αποστακτήρα συγκριτικά με την προθέρμανση. Το γεγονός αυτό, μπορεί να συμβάλει στην αποφυγή κατανάλωσης ενέργειας και την αύξηση της απόδοσης των αποστακτών με εφαρμογή μη κοστοβόρων τροποποιήσεων.



Ημ/νία (Προθέρμανση SW)	B1W (mL)	A1W (mL)
6/20/2023 (37.3°C)	3423	3501
6/21/2023 (36.3°C)	3537	3525
6/22/2023 (34.9°C)	3415	3298
6/23/2023 (36.6°C)	3492	3276
6/26/2023 (41.5°C)	3300	3195
6/27/2023 (42.4°C)	3327	3432
6/28/2023 (42.7°C)	3458	3316
6/29/2023 (40.4°C)	3268	3158
6/30/2023 (42.1°C)	2903	2886
7/3/2023 (48.8°C)	2253	2055
7/6/2023 (49.7°C)	3278	2921
7/18/2023 (50.3°C)	3284	3081
7/19/2023 (52.1°C)	3216	2914
7/20/2023 (56.1°C)	3543	3134

Διάγραμμα 28: Επίδραση της προθέρμανσης του SW στην παραγωγή FW (B1W vs A1W)

Συνολικά λοιπόν ως προς την επίδραση της προθέρμανσης του θαλασσινού νερού και συγκρίνοντας τη μέση συνολική παραγωγή FW (I), βρέθηκε μέγιστη αύξηση απόδοσης 15.01% με προθέρμανση του νερού στους 35°C, για τους αποστακτήρες χωρίς κάποια άλλη τροποποίηση (B2 vs A2). Ωστόσο, εν συγκρίσει όλων των αποστακτών και το σύνολο το τροποποιήσεων (B vs A), η μέγιστη αύξηση απόδοσης 10% επιτεύχθηκε με την προθέρμανση του SW στο μέγιστο εύρος θερμοκρασιών, 50-55°C.



Διάγραμμα 29: Συγκριτική αξιολόγηση απόδοσης των δοκιμών προθέρμανσης της εισροής θαλασσινού νερού στους υπό βελτιστοποίηση αποστακτήρες

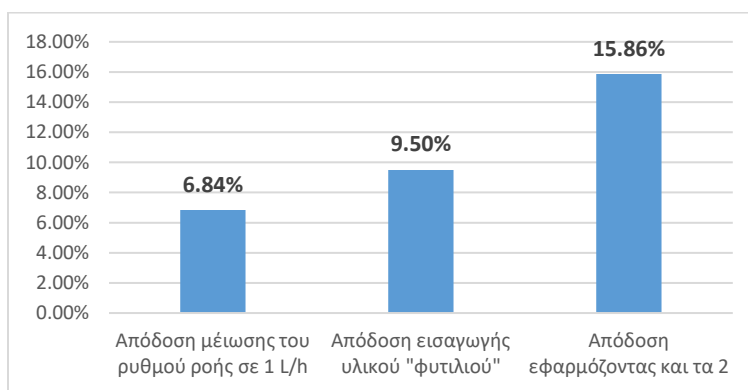
Για την εκτίμηση της επίδρασης των τροποποιήσεων που αφορούν την εισαγωγή “φυτιλιού” και την αλλαγή ρυθμού ροής χωρίς την επίδραση προθέρμανσης του SW, συγκρίθηκε η μέση συνολική παραγωγή όπως προέκυψε κατά τη διάρκεια των δοκιμών, για τους αποστακτήρες A2W έναντι του A2 και A1 έναντι του A2, αντίστοιχα. Στον παρακάτω Πίνακας 46, παρατίθενται οι εν λόγω τιμές.

Πίνακας 46: Μέση συνολική παραγωγή FW ανά αποστακτήρα:

Αποστακτήρας υπό δοκιμή	A1W	A1	A2W	A2
Μέση συνολική παραγωγή FW (mL)	3114.78	2813.11	2895.89	2620.67

Αξίζει στο σημείο αυτό να σχολιαστεί, πως η μέση ημερήσια παραγωγή του μη τροποποιημένου πάνελ (A2), κατά τη διάρκεια των εν λόγω δοκιμών βρέθηκε ίση με 2.6 L/d. Με μία τέτοια τιμή, η ημερήσια απόδοση για το σύνολο του συστήματος (80 πάνελ) διαμορφώνεται στα 208 L/d, που συνάδει με την εκτίμηση απόδοσης του κατασκευαστή. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί πως η εν λόγω εκτίμηση έγινε σε αποστακτήρα χωρίς φθορές και κατά τη διάρκεια των θερμότερων ημερών και χωρίς διακοπή για συντήρηση ή έκτακτα περιστατικά. Καθώς όμως στην παρούσα μελέτη υπολογίστηκε σχεδόν η μισή ημερήσια απόδοση συμπεραίνεται πως οι συνθήκες πεδίου υπό ετήσια βάση επηρεάζουν σημαντικά την ετήσια απόδοση, ενώ υπενθυμίζεται πως κατά τη μελέτη 7 αποστακτήρες ήταν εκτός λειτουργίας.

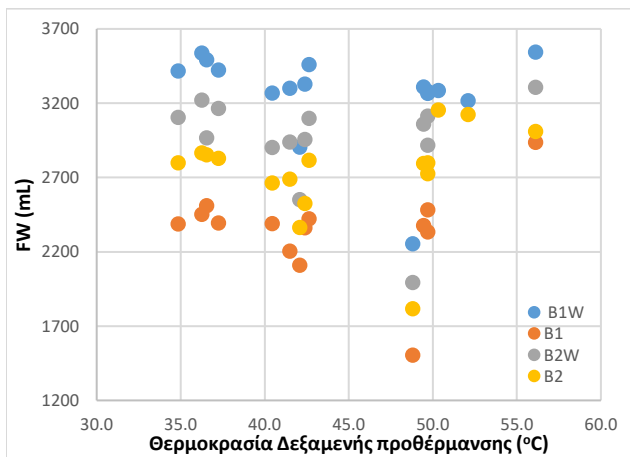
Προχωρώντας, εκτιμήθηκε η μεταβολή της ποσοστιαία απόδοσης για κάθε τροποποίηση αλλά και για το συνδυασμό των δύο τροποποιήσεων ως το υπάρχων μη τροποποιημένο σύστημα. Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 30: Αύξηση απόδοσης των αποστακτήρων MSS ανά τροποποίηση (Χωρίς προθέρμανση SW).

Παρατηρείται λοιπόν, πως η επίδραση του υλικού “φυτιλιού” είναι ισχυρότερη από την τη μείωση του ρυθμού ροής, ενισχύοντας περισσότερο την παραγωγή νερού. Ωστόσο, η παράλληλη εφαρμογή και των δύο τροποποιήσεων έχει το μεγαλύτερο αντίκτυπο αφού αυξάνει σημαντικά την ανάκτηση νερού στους αποστακτήρες του MSS. Αξίζει να τονιστεί πως η ενίσχυση της απόδοσης σε ποσοστό 15.86% με το συνδυασμό αυτό, είναι υψηλότερη και από τη μέγιστη αύξηση απόδοσης που καταγράφηκε με εισροή προθερμασμένου νερού, 15.01% (35°C), δείχνοντάς μας και πάλι πως σημαντική βελτιστοποίηση μπορεί να επιτευχθεί χωρίς την άμεση κατανάλωση επιπλέον ενέργειας.

Βλέποντας τώρα, πως συμπεριφέρθηκαν και οι δύο αυτές τροποποιήσεις παράλληλα με την εφαρμογή προθέρμανσης, επιβεβαιώνεται πως ο αποστακτήρας όπου εφαρμόστηκαν όλες οι τροποποιήσεις (B1W), έδειξε την υψηλότερη απόδοση συγκριτικά των υπολοίπων σε όλο το φάσμα θερμοκρασιών της δεξαμενής προθέρμανσης, με μέση ημερήσια παραγωγή FW 3266.8 mL/d για το σύνολο των ημερών των δοκιμών. Στο **Διάγραμμα 31** και τον **Πίνακα 47**, αποτυπώνονται τα εν λόγω ευρήματα.



Διάγραμμα 31: Απόδοση των αποστακτήρων MSS ανά τροποποίηση (Με προθέρμανση SW)

Από τις παραπάνω καταγραφές, επιβεβαιώνεται ακόμη πως η τροποποίηση με τη χρήση “φυτιλιού” συμβάλει υψηλότερα στην αύξηση της ημερήσιας παραγωγής καθώς ο αποστακτήρα B2W παρουσίασε την δεύτερη κατά σειρά υψηλότερη μέση τιμή, με 2949 mL/d. Επιπλέον διαπιστώνεται πως χωρίς τη χρήση “φυτιλιού”, η προθέρμανση της εισροής συνιστά καλύτερη επιλογή διατηρώντας το ρυθμό ροής στα 2L/h, αφού ο αποστακτήρας B2 έχει υψηλότερη μέση παραγωγή από τον B1, γεγονός που πιθανώς σχετίζεται με τη δημιουργία ξηρών σημείων στον αποστακτήρα σε χαμηλότερο ρυθμό ροής και με προθερμασμένο νερό. Έτσι, η μείωση του ρυθμού ροής σε 1 L/h με συνδυασμό προθέρμανσης συνιστά μείωση της παραγωγής συγκριτικά με τη μη εφαρμογή τροποποιήσεων αφού η μέση τιμή 2346.4 mL του B1 είναι χαμηλότερη εκείνης του μη τροποποιημένου αποστακτήρα (A2) με 2620.7 mL/d (**Πίνακας 46**). Επιβεβαιώνεται ως εκ τούτου πως ένας μειωμένος ρυθμός ροής δρα αντισταθμιστικά στην η αύξηση του ρυθμού εξάτμισης μέσω της προθέρμανσης.

Τέλος, εστιάζοντας στον αποστακτήρα B1W ο οποίος παρουσίασε την υψηλότερη βελτιστοποίηση απόδοσης στο σύνολο των δοκιμών, αξίζει να σχολιαστεί ξανά ο βαθμός επίδρασης της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας. Παρατηρώντας τα εν λόγω αποτελέσματα παρακάτω (**Πίνακας 48, Διάγραμμα 32**), διαπιστώνεται εκ νέου η ισχυρή συσχέτιση παραγωγής με την ένταση της ακτινοβολίας, με συντελεστή συσχέτισης 0.76.

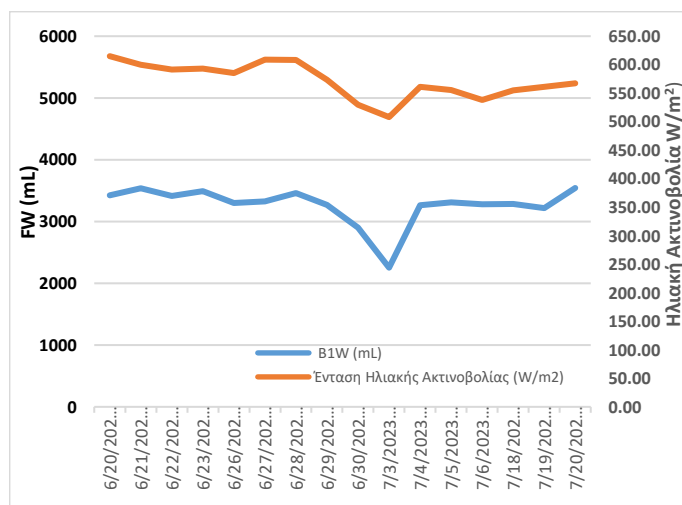
Ημ/νία (Προθέρμανση SW)	B1W	Ένταση Ηλιακής Ακτινοβολίας (W/m ²)
6/20/2023 (37.3°C)	3423	614.97
6/21/2023 (36.3°C)	3537	599.89
6/22/2023 (34.9°C)	3415	591.26
6/23/2023 (36.6°C)	3492	593.43
6/26/2023 (41.5°C)	3300	585.58
6/27/2023 (42.4°C)	3327	608.82
6/28/2023 (42.7°C)	3458	608.48
6/29/2023 (40.4°C)	3268	573.46
6/30/2023 (42.1°C)	2903	530.03
7/3/2023 (48.8°C)	2253	508.10
7/4/2023 (48.8°C)	3264	561.17
7/5/2023 (49.7°C)	3308	555.63
7/6/2023 (49.5°C)	3278	537.98
7/18/2023 (50.3°C)	3284	555.15
7/19/2023 (52.1°C)	3216	560.97
7/20/2023 (56.1°C)	3543	567.11
Συσχέτιση Correl		0.76
Αύξηση απόδοσης 4/7 vs 3/7		44.87%

Πίνακας 48: Συσχέτιση απόδοσης B1W με την ηλιακή ακτινοβολία

Ημ/νία	Θερμοκρασία Δεξαμενής Προθέρμανσης (°C)	B1W	B1	B2W	B2
6/20/2023	37.2	3423	2392	3164	2827
6/21/2023	36.3	3537	2450	3219	2864
6/22/2023	34.9	3415	2386	3104	2797
6/23/2023	36.5	3492	2509	2965	2851
6/26/2023	41.5	3300	2204	2938	2687
6/27/2023	42.4	3327	2361	2954	2524
6/28/2023	42.6	3458	2421	3098	2814
6/29/2023	40.4	3268	2389	2902	2662
6/30/2023	42.1	2903	2108	2550	2362
7/3/2023	48.8	2253	1504	1992	1816
7/4/2023	49.7	3264	2333	2916	2725
7/5/2023	49.5	3308	2376	3058	2793
7/6/2023	49.7	3278	2481	3113	2797
7/18/2023	50.3	3284	Δ/Κ*	Δ/Κ*	3153
7/19/2023	52.1	3216	Δ/Κ*	Δ/Κ*	3122
7/20/2023	56.1	3543	2936	3306	3009
Μέση παραγωγή FW (συν. Ημερών)		3266.8	2346.4	2948.5	2737.7

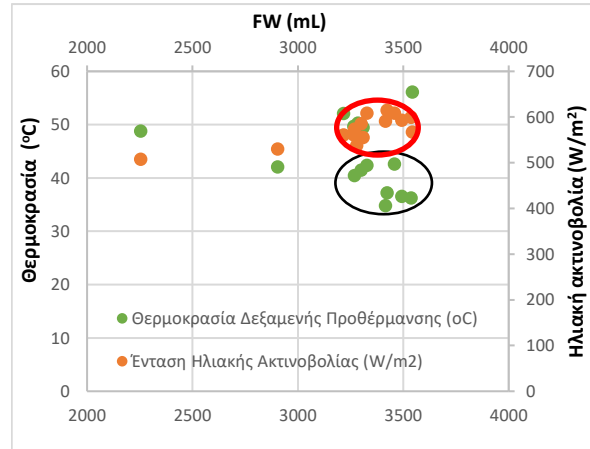
*Δεν καταγράφηκε λόγω προβλήματος τροφοδοσίας των αποστακτήρων.

Πίνακας 47: Απόδοση των αποστακτήρων MSS ανά τροποποίηση (Με προθέρμανση SW)



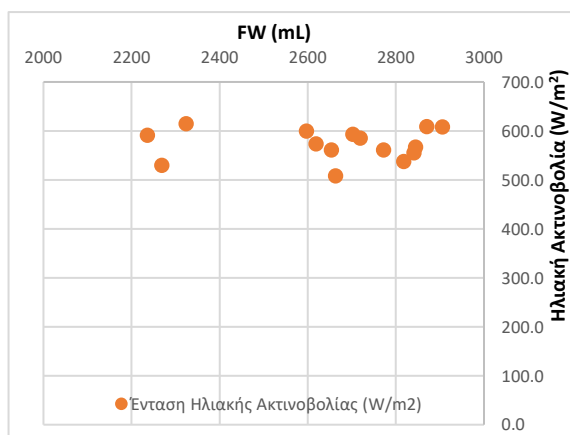
Διάγραμμα 32: Συσχέτιση απόδοσης B1W με την ηλιακή ακτινοβολία

Από τις καταγραφές των τιμών παραγωγής στον **Πίνακας 48** υπολογίζεται, πως ανάμεσα σε δύο συνεχόμενες ημέρες με σχεδόν ίδια θερμοκρασία περιβάλλοντος, 3/7 (29.38°C) και 4/7 (29.34°C) (**Πίνακας 45**), η αύξηση της απόδοσης του B1W με την αύξηση της ακτινοβολίας από 508.1 W/m² σε 561.2 W/m², αντιστοίχως, έφτασε το 44.87%. Τις ίδιες ημέρες, η μέγιστη ποσοστιαία αύξηση παραγωγής του B1W συγκριτικά του μη τροποποιημένου αποστακτήρα A2 ήταν 18.7%, συμπεραίνοντας έτσι, πως η αύξηση της ακτινοβολίας επιδρά σημαντικότερα από την εφαρμογή τροποποιήσεων. Αν και ο παράγοντας της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μη ελεγχόμενος, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης.

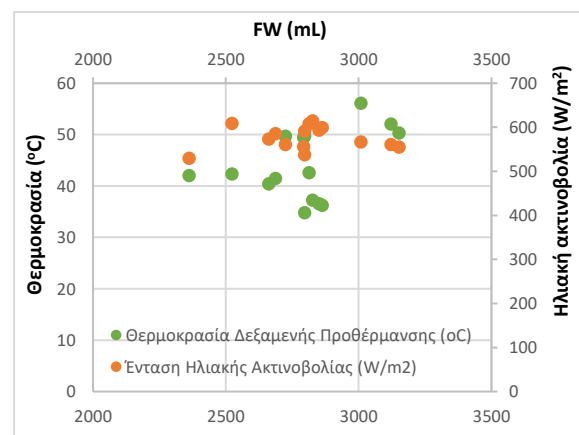


Διάγραμμα 33: Διασπορά ημερήσιων καταγραφών παραγωγής FW από τον B1W, ως προς την ηλιακή ακτινοβολία και την θερμοκρασία προθέρμανσης εισερχόμενου SW.

Επιπρόσθετα, παρατηρώντας τις δύο διακριτές περιοχές διασποράς στο , φαίνεται πως η βέλτιστη απόδοση παραγωγής για τον αποστακτήρα B1W καταγράφεται ως διασπορά, στο εύρος ακτινοβολίας 500-600 W/m² καθώς και το εύρος θερμοκρασίας νερού στον αποστακτήρα 35-43°C, με μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος 28.9°C. Αντίστοιχα για τον μη τροποποιημένο αποστακτήρα A2 (**Διάγραμμα 34**), η βέλτιστη απόδοση παρουσιάστηκε ομοίως στο εύρος ηλιακής ακτινοβολίας 500-600 W/m². Ωστόσο για τον αποστακτήρα που εφαρμόστηκε προθέρμανση χωρίς καμία άλλη τροποποίηση (B2), ενώ το βέλτιστο εύρος ακτινοβολίας παραμένει σταθερό, η απαίτηση προθέρμανσης είναι υψηλότερη. Ειδικότερα, η βέλτιστη απόδοση παραγωγής FW του B2, παρουσίασε μεγαλύτερη διασπορά σε τιμές θερμοκρασίας εισροής κυρίως άνω των 42°C (**Διάγραμμα 35**). Επιβεβαιώνεται έτσι πως η χρήση “φυτυλιού” και μειωμένου ρυθμού ροής μειώνει την απαίτηση προθέρμανσης του εισερχόμενου θαλασσινού νερού στους ηλιακούς αποστακτήρες.



Διάγραμμα 34: Διασπορά ημερήσιων καταγραφών παραγωγής FW από τον A2, ως προς την ηλιακή ακτινοβολία.



Διάγραμμα 35: Διασπορά ημερήσιων καταγραφών παραγωγής FW από τον B2, ως προς την ηλιακή ακτινοβολία και την θερμοκρασία προθέρμανσης εισερχόμενου SW.

Κλείνοντας, σημασία έχει και το πως διαμορφώνεται το ειδικό κόστος του παραγόμενου νερού εφαρμόζοντας τις τροποποιήσεις και συγκριτικά με την απόδοση που δίνει ο κατασκευαστής για τον συμβατικό αποστακτήρα του υπάρχοντος συστήματος. Βάσει του Πίνακα 49 παρακάτω λοιπόν, είναι εμφανές πως για το σύνολο των τροποποιήσεων το κόστος νερού μειώνεται, με χαμηλότερη τιμή 0.087 €/L/m² για τον τροποποιημένο αποστακτήρα B1W αφού παρουσίασε και τη βέλτιστη απόδοση των 3.3 L/day. Εξάιρεση αποτελεί ο αποστακτήρα B1 όπως ήταν αναμενόμενο, καθώς κατέγραψε μειωμένη απόδοση, με μέση ημερήσια παραγωγή 2.3 L/day έναντι 2.6 L/day για τον συμβατικό τύπο του MSS. Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τα αποτελέσματα, όπως υπολογίστηκαν βάσει των (8), (9), (10), (11) και (12).

Πίνακας 49: Διαμόρφωση του ειδικού κόστους νερού επί των δοκιμασμένων τροποποιήσεων στο MSS

Αποστακτήρας MSS	Μέση Ημερήσια παραγωγή ανά αποστακτήρα L/day	Ειδική Παραγωγή L/m ² /day	Ημερήσια παραγωγή MSS L/day	Ειδικό κόστος νερού	
				€/L/m ²	\$/L/m ²
B1W	3.3	4.6	261.3	0.087	0.093
A1W	3.1	4.5	249.2	0.092	0.098
B1	2.3	3.4	187.7	0.122	0.130
A1	2.8	4.0	225.0	0.101	0.108
A2W	2.9	4.1	231.7	0.099	0.105
B2W	2.9	4.2	235.9	0.097	0.103
B2	2.7	4.3	219.2	0.104	0.111
Συμβατικός	2.6	3.8	210.0	0.109	0.116

Παρά τη βέλτιστη απόδοση του αποστακτήρα B1W όπου εφαρμόστηκε το σύνολο των τροποποιήσεων, συμπερασματικά διαπιστώνεται πως καλύτερη επιλογή βελτιστοποίησης αποτελεί η εφαρμογή “φυτιλιού” και μείωσης του ρυθμού ροής χωρίς προθέρμανση του νερού. Αυτό καθώς, ο αποστακτήρας A1W εμφανίζει το δεύτερο κατά σειρά ειδικό κόστος (0.092 €/L/m²) με μικρή απόκλιση από το βέλτιστο λόγω της σχεδόν εξίσου υψηλής απόδοσης (3.1 L/day) με τον B1W (3.3 L/day), και χωρίς την απαίτηση πρόσθετης ενέργειας για προθέρμανση που έμμεσα θα αυξήσει το τελικό κόστος παραγόμενου νερού.

Συμπερασματικά, κρίνεται σημαντικό να υιοθετηθεί η εγκατάσταση “φυτιλιού” στο σύνολο του συστήματος σε συνδυασμό με τη μείωση του ρυθμού ροής, καθώς είναι εμφανής η ενίσχυση της απόδοσής του μέσω αυτών των απλών και μη κοστοβόρων εφαρμογών. Περαιτέρω μελλοντικές δοκιμές, περιλαμβάνουν την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των αποστακτών, για την αύξηση της απόδοσής τους και την πλήρη επίλυση δυσλειτουργιών όπως η έμφραξη της εξόδου απορροής της άλμης. Επιπλέον, η εταιρεία κατασκευής προγραμματίζει την επαναφορά σε πλήρη λειτουργία της ανάκτησης αλατιού, και την εγκατάσταση διάταξης επανεπεξεργασίας της άλμης προς ανάκτηση καθαρού νερού. Οι συγκεκριμένες τροποποιήσεις θα συνεισφέρουν στον εκμηδενισμό των απορροών του MSS, υπό την προοπτική μηδαμινών απορρίψεων και κυκλικότητας του νερού. Τέλος, δοκιμές πρόκειται να πραγματοποιηθούν το προσεχές διάστημα, προς την αξιοποίηση φ/β πάνελ για την απομείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του συστήματος με παράλληλη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των αισθητήρων του, σκοπεύοντας στην πλήρως αξιόπιστη και απρόσκοπτη λειτουργία του MSS (D5.1, 2023).

7^ο Κεφάλαιο – Συμπεράσματα

Στην παρούσα μελέτη πεδίου διερευνήθηκε η απόδοση ενός καινοτόμου συστήματος αφαλάτωσης που λειτουργεί υπό τις αρχές της εξάτμισης και συμπύκνωσης του νερού. Το εν λόγω σύστημα, καλούμενο *Mangrove Still System (MSS)*, βρίσκεται εγκατεστημένο και εν λειτουργία στο νησί της Τήνου, όπως αναπτύχθηκε από το 2020 στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος *HYDROUSA*. Η συγκεκριμένη περιοχή επιλέχθηκε λόγω ελλειμματικού υδατικού ισοζυγίου, καθώς τα υδατικά της αποθέματα υφίστανται σημαντικές πιέσεις που πηγάζουν από τις κλιματικές, υδρογεωλογικές και μορφολογικές της ιδιαιτερότητες και τον αναπτυσσόμενο τουρισμό του νησιού. Τα παραπάνω συνιστούν σημαντική επίδραση στη γεωργία του νησιού καθώς η διαθεσιμότητα νερού για άρδευση καλλιεργειών φθίνει.

Το σύστημα που μελετήθηκε αποτελεί πυρήνα της εγκατάστασης HYDRO5. Σχεδιάστηκε ως ένα πρότυπο παθητικό σύστημα αφαλάτωσης από την ιταλική εταιρεία *Planet SAS*. Λειτουργεί αξιοποιώντας ως πηγή ενέργειας την ηλιακή ακτινοβολία σε 80 κλιμακωτούς ηλιακούς αποστακτήρες, οι οποίοι δέχονται θαλασσινό νερό έπειτα από διήθηση, για την ανάκτηση αρδευτικού νερού από αυτό. Το παραγόμενο νερό αξιοποιείται για την καλλιέργεια τροπικών και υποτροπικών φυτών στο συνοδό θερμοκήπιο (PGH) της εγκατάστασης. Ταυτόχρονα, το σύστημα δύναται να ανακτά βρώσιμο αλάτι μέσω περαιτέρω επεξεργασίας της άλμης, η οποία προκύπτει ως εκροή της διεργασίας, συμβάλλοντας έτσι στην πλήρη κυκλικότητα του νερού και στην ελαχιστοποίηση των απορρίψεων. Τέλος, μέσω της διάταξης συλλογής βρόχινου νερού (RC), αξιοποιείται το νερό των βροχοπτώσεων συνεισφέροντας στις ανάγκες άρδευσης. Η συνολική έκταση που καταλαμβάνει η εγκατάσταση ισούται με $\approx 500 \text{ m}^2$, επιμεριζόμενη σε 150 m^2 για το MSS, 200 m^2 για το PGH και 150 m^2 για βοηθητικούς χώρους περιμετρικά.

Η απόδοσή του MSS ελέγχθηκε πιλοτικά σε αποκεντρωμένο επίπεδο και υπό συνεχή λειτουργία, 10 ωρών ημερησίως για διάστημα ενός έτους. Καθώς αντίστοιχα δεδομένα πλήρους λειτουργίας δεν είναι ευρέως διαθέσιμα στην σύγχρονη βιβλιογραφία, η παρούσα εργασία στοχεύει στην προώθηση της γνώσης και τεχνογνωσίας της εν λόγω τεχνολογίας αφαλάτωσης. Εν συνεχεία λοιπόν, παρατίθενται τα τελικά συμπεράσματα που εξήχθησαν μέσω της εκπόνησής της, σχετικά με την απόδοση του υπό μελέτη συστήματος και τη συνολική λειτουργία της εγκατάστασης.

- ✚ Συνολικά το σύστημα, στο σύνολο των ετών λειτουργίας χαρακτηρίζεται ως αξιόπιστο καθώς δεν προέκυψαν μη αναστρέψιμα προβλήματα και δυσλειτουργίες τόσο ως προς την αναμενόμενη ποιότητα όσο και την ποσότητα του παραγόμενου νερού. Κρίνεται ωστόσο απαραίτητη η αποκατάσταση φθορών και η υιοθέτηση σχεδιαστικών τροποποιήσεων και παρεμβάσεων για τη διασφάλιση της ποιότητας και την βελτιστοποίηση της απόδοσής του. Εκ νέου μελέτη προτείνεται στη βάση αυτών.
- ✚ Πιο συγκεκριμένα, βάσει της εκτίμησης της εταιρείας κατασκευής, αναφέρεται μέση ημερήσια παραγωγή νερού στο MSS 200-220 L/day, με μέγιστη τα 317 L/day και ελάχιστη τα 77 L/day. Η ειδική παραγωγή νερού υπολογίζεται αντιστοίχως 3.3 έως 3.7 L/m²/day, 5.2 έως 5.7 L/m²/day και 1.3 έως 1.4 L/m²/day. Η προκύπτουσα μέση απόδοση του συστήματος ανέρχεται σε 28%, με μέγιστη 33% και ελάχιστη 14%, για επεξεργασία 709 L/day, 953 L/day και 546 L/day θαλασσινού νερού, αντιστοίχως.
- ✚ Βάσει των αποτελεσμάτων της παρούσης προκύπτει ωστόσο διαφορετική εικόνα. Από τις καταγραφές κατά το διάστημα Οκτώβριος 2022 - Οκτώβριος 2023 υπολογίστηκε μέση ημερήσια παραγωγή νερού 123.6 L/day, με μέγιστη τα 280 L/day, μέση μέγιστη (θέρους) 141.5 L/day και μέση ελάχιστη (χειμώνια) τα 105.7 L/day. Η ειδική παραγωγή νερού διαμορφώνεται αντιστοίχως σε 2.2 L/m²/day, 5 L/m²/day, 2.5 L/m²/day και 1.9 L/m²/day. Η προκύπτουσα μέση απόδοση του συστήματος ανέρχεται έτσι σε 17.4%, με μέγιστη 29.4%, μέση μέγιστη 14.9% και μέση ελάχιστη 12.4%.
- ✚ Η παραπάνω απόκλιση αποδόθηκε στη φθορά αρκετών πάνελ που συνεπάγεται διαρροή νερού από τους αποστακτήρες και μείωση της απόδοσής τους. Επιπλέον τα δεδομένα πεδίου συλλέχθηκαν μέσω καταγραφών από το εγκατεστημένο ροόμετρο σε πραγματικές συνθήκες συνεχούς λειτουργίας, ενώ

αντίθετα η εκτίμηση του κατασκευαστή έγινε μέσω αισθητήρων *IoT* χωρίς να λαμβάνεται πλήρως υπόψη το σύνολο των παραγόντων που επιδρούν στη λειτουργία του MSS, όπως έκτακτα περιστατικά και ανάγκες συντήρησης και μη συνιστώντας ως εκ τούτου πλήρως ασφαλές αποτέλεσμα.

- ✚ Η υπολογιζόμενη θερμική απόδοση του συστήματος που αφορά την εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας προς παραγωγή νερού, ήταν τυπική της εν λόγω τεχνολογίας με μέση τιμή συντελεστή 32.1% και μέγιστη 58.1%, ενώ με τα δεδομένα πεδίου φθίνει σε 20.4%.
- ✚ Το ειδικό κόστος νερού που προκύπτει για το MSS ανέρχεται στα 0.11 €/L/m² βάσει των κατασκευαστικών προδιαγραφών του MSS. Στο πεδίο ωστόσο, η τιμή του διαμορφώνεται στα 0.19 €/L/m². Βάσει της συγκριτικής αξιολόγησης έναντι έτερων μελετώμενων αποστακτών στη βιβλιογραφία, η προκύπτουσα τιμή για το MSS χαρακτηρίζεται ως μέσο κόστος του εύρους που εντοπίζεται. Συγκριτικά με τις συμβατικές τεχνολογίες αφαλάτωσης RO και MSF, βρέθηκε σημαντικά υψηλότερο, γεγονός που σχετίζεται με την χαμηλότερη απόδοση της εν λόγω αναδυόμενης τεχνολογίας. Με βάση ωστόσο το τελικό οικονομικό μοντέλο της εγκατάστασης όπου λαμβάνεται υπόψη χαμηλότερο επιτόκιο δανεισμού καθώς και κρατική χρηματοδότηση επί του αρχικού κόστους κεφαλαίου, το τελικό κόστος διαμορφώνεται στα 0.01 . Το γεγονός αυτό αντικατοπτρίζει το ρόλο που διαδραματίζουν τα διάφορα χρηματοδοτικά εργαλεία για την εξέλιξη αναδυόμενων τεχνολογιών.
- ✚ Ως παθητικό σύστημα χαρακτηρίζεται από χαμηλή ενεργειακή απαίτηση, που αφορά κυρίως την άντληση και μεταφορά των ροών. Η ημερήσια κατανάλωση ενέργειας υπολογίστηκε ως 6.3 kWh, ενώ μαζί με την λειτουργία ανάκτησης αλατιού φτάνει τις 10.1 kWh/day. Ωστόσο, ως μη ώριμη τεχνολογία και λόγω χαμηλότερης απόδοσης από τις συμβατικές η ειδική κατανάλωση ενέργειας βρέθηκε συγκριτικά υψηλότερη με τιμή 0.03 kWh/L (30.4 kWh/m³) βάσει του κατασκευαστή και 0.05 kWh/L (51.7 kWh/m³) βάσει της παρούσης.
- ✚ Το μοναδιαίο κόστος κάθε συσκευής αποστακτήρα ήταν 475€, ενώ ως σύνολο το σύστημα θεωρείται αξιόπιστο καθώς δεν παρουσίασε σημαντικά προβλήματα λειτουργίας στο διάστημα 4 ετών που υφίσταται. Λαμβάνοντας υπόψη ταυτόχρονα, την αξιοπιστία των αισθητήρων χαμηλού κόστους που χρησιμοποιεί οι οποίοι τροφοδοτούνται μέσω ΑΠΕ, το MSS μπορεί συνολικά να χαρακτηριστεί ως χαμηλού κόστους έργο. Επιπλέον συνιστά ένα “αρθρωτό” σύστημα αφού δεν απαιτεί σημαντική τροποποίηση και νέες κατασκευές για την επέκτασή του.
- ✚ Ωστόσο, σαν τεχνολογία η ηλιακή απόσταξη απαιτεί σημαντική έκταση με χαμηλότερη δυναμικότητα συγκριτικά με τις συμβατικές τεχνολογίες αφαλάτωσης. Επιπλέον, η απαίτηση εγγύτητας με θαλασσινό νερό συνεπάγεται πιθανώς αυξημένο κόστος γης λόγω της υψηλής αξίας των παράκτιων εκτάσεων γης.
- ✚ Ως προς την απαίτηση εργατικού δυναμικού, οι ανάγκες του συστήματος χαρακτηρίζονται σημαντικά χαμηλές με ισοδύναμο πλήρους εργασίας (8ώρου) 66 ημερών ετησίως. Το MSS είναι ένα απλό σύστημα που δεν απαιτεί ιδιαίτερη εμπλοκή στη διεργασία πέραν της τακτικής συντήρησης και χαρακτηρίζεται από χαμηλή απαίτηση εξειδίκευσης και ευκολία χειρισμού μέσω ασφαλούς απομακρυσμένου ελέγχου.
- ✚ Ως προς τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του παραγόμενου νερού, μέσω τακτικών δειγματοληψιών και αναλύσεων βρέθηκε να πληροί τα όρια των παραμέτρων που θέτει η Υ.Α. 145116/2011 για την επαναχρησιμοποίηση του νερού προς απεριόριστη άρδευση. Το σύστημα λόγω της φύσης της διεργασίας παράγει σταθερά υψηλής ποιότητας απεσταγμένο νερό, καθώς έπειτα από τη βελτιστοποίησή του, η μέγιστη τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) που παρατηρήθηκε κατά το διάστημα μελέτης ήταν 0.05 mS/cm. Το παραγόμενο νερό από το MSS χαρακτηρίζεται ως εξαιρετικής ποιότητας ωστόσο λόγω της συσχέτισης της χαμηλής αγωγιμότητας του με το χαμηλό SAR=0.3, η οποία εγείρει την πιθανότητα να επιφέρει προβλήματα διαπερατότητας του αρδευόμενου εδάφους στο μέλλον, επιλέχθηκε ως επί το πλείστον η ανάμιξη του με μικρότερη ποσότητα νερού δικτύου για την ασφαλή άρδευση του PGH. Η επιλογή αυτή έγινε κατά κύριο λόγο για ποσοτικούς λόγους ενώ σε περίπτωση πλήρους άρδευσης με το παραγόμενο νερό, η EC του δύναται να διατηρηθεί στα απαραίτητα επίπεδα. Καμία άλλη φ/χ και μικροβιολογική παράμετρος δεν υπερέβη τα ποιοτικά πρότυπα αρδευτικού νερού,

και η χρήση του για την άρδευση των καλλιεργούμενων φυτών ήταν επιτυχής, όπως μαρτυρά η απόδοσή τους και τα αποτελέσματα της εδαφολογικής ανάλυσης.

- ✚ Το νερό που ανακτάται στο MSS, βρέθηκε επιπλέον να τηρεί τα ποιοτικά πρότυπα που θέτει η Οδηγία 2020/2184/ΕΕ, σχετικά με την κατανάλωση του νερού. Μέσω σειράς εργαστηριακών φ/χ και μικροβιολογικών αναλύσεων καθώς και αναλύσεων βαρέων μετάλλων, κύριων ιόντων και οργανικών ενώσεων, το νερό του συστήματος θεωρείται ασφαλές ως πόσιμο. Έχει ωστόσο, ανάγκη εμπλουτισμού σε Ca^{2+} και Mg^{2+} πριν την κατανάλωσή του, καθώς στερείται αυτών λόγω της φύσης της διεργασίας και σε αντίθετη περίπτωση δύναται να επιφέρει επιπτώσεις στην υγεία.
- ✚ Η αξιοποίηση του νερού από το MSS για την άρδευση της καλλιεργούμενης έκτασης του PGH κρίθηκε επιτυχής αφού η παραγωγή καρπών και αξιοποιήσιμης βιομάζας υπερέβη τα 500 kg, όπως είχε τεθεί ως στόχος του προγράμματος. Ο συνδυασμός πρακτικών οργανικής, “ευφυούς” γεωργίας και στάθμην άρδευσης εκτός της ελαχιστοποίησης απαίτησης νερού, επέφερε μειωμένη ενεργειακή απαίτηση και ευκολία απομακρυσμένου χειρισμού χωρίς να προκύψουν προβλήματα τόσο στο αρδευτικό σύστημα όσο και στα φυτά και αποδίδοντας υψηλής ποιότητας προϊόντα.
- ✚ Ωστόσο, με μέση ημερήσια απαίτηση νερού 160 L/day από την καλλιέργεια, το νερό δεν βρέθηκε να επαρκεί για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών, συντελώντας σε πρόσθετη μέση απαίτηση 40 L/day που καλύφθηκε από το νερό του δικτύου ύδρευσης. Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η επαναφορά της διάταξης συλλογής βρόχινου νερού η οποία ήταν εκτός λειτουργίας λόγω φθοράς κατά το διάστημα εκπόνησης της παρούσης. Η εκτιμώμενη δυναμικότητα αυτής υπολογίζεται από τον κατασκευαστή σε 55 L/day, ποσότητα που υπερκαλύπτει την ημερήσια απαίτηση για άρδευση, ενώ η ποιότητα του έχει προσδιοριστεί σε παλαιότερη μελέτη ως κλάσης C2-S1, ασφαλής για τη χρήση του στο PGH. Επιπλέον προτείνεται η εγκατάσταση μίας επιπλέον δεξαμενής νερού ίση 2.5 m³, για την αποθήκευση του νερού σε περιόδους χαμηλότερης ζήτησης έναντι της παραγωγής του, προς μελλοντική χρήση.
- ✚ Σχετικά με τις κλιματικές παραμέτρους που επιδρούν στην απόδοση λειτουργίας, βρέθηκε υψηλή συσχέτιση της παραγωγής νερού με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Το γεγονός αυτό χαρακτηρίζει τη μελετώμενη τεχνολογία σε συμφωνία και με τα βιβλιογραφικά δεδομένα, αφού με την αύξηση της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνεται ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μέσω συναγωγής στο νερό από την επιφάνεια εξάτμισης του αποστακτήρα αυξάνοντας με τη σειρά του το ρυθμό εξάτμισής του. Ο συντελεστής συσχέτισης των δύο μεταβλητών υπολογίστηκε ίσος με 0.9 ενώ ο συντελεστής προσδιορισμού βρέθηκε ίσος με 0.8, αποτυπώνοντας την παραπάνω εξάρτηση. Ως εκ τούτου, αν και μη ελεγχόμενος παράγοντας, η ηλιακή ακτινοβολία πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή εγκατάστασης ενός αντίστοιχου συστήματος αφαλάτωσης.
- ✚ Από την άλλη πλευρά, ο παράγοντας της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος φάνηκε να παίζει αμφίβολο ρόλο στην παραγωγή του συστήματος, καθώς οι συντελεστές συσχέτισης και προσδιορισμού υπολογίστηκαν ως 0.6 και 0.4 αντίστοιχα. Η σχέση αυτή αποδόθηκε, βάσει και των διαθέσιμων βιβλιογραφικών αναφορών, στο γεγονός πως με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνονται οι απώλειες ενέργειας από την επιφάνεια συμπύκνωσης στο περιβάλλον, μειώνοντας έτσι και τη διαφορά θερμοκρασίας του με το περιεχόμενο νερό, παράγοντας που δρα ανασταλτικά στη διεργασία.
- ✚ Κατά το διάστημα εκπόνησης της παρούσας μελέτης, διεξήχθησαν δοκιμές βελτιστοποίησης της απόδοσης του MSS με σκοπό την αύξηση του ρυθμού εξάτμισης στον αποστακτήρα και της ημερήσιας παραγωγής νερού. Ελέγχθηκαν τροποποιήσεις που αφορούσαν (i) την προθέρμανση του θαλασσινού νερού πριν την είσοδό του στα πάνελ, (ii) την εισαγωγή υλικού “φυτιλιού” (*wick material*) στην κάθετη επιφάνεια κάθε επιπέδου της επιφάνειας εξάτμισης και (iii) την μείωση του ρυθμού εισροής του νερού στον αποστακτήρα από 2L/hr σε 1 L/hr. Η μέγιστη ποσοστιαία αύξηση της απόδοσης στην περίπτωση (i) βρέθηκε ίση 15%, με προθέρμανση του νερού στους 35°C. Η αντίστοιχη ενίσχυση απόδοσης για την περίπτωση (ii) και (iii) υπολογίστηκε ως 9.5% και 6.8% αντίστοιχα, ενώ με το συνδυασμό “φυτιλιού” και μειωμένου ρυθμού ροής επετεύχθη ποσοστιαία αύξηση 15.9%, υποδηλώνοντας πως υψηλότερη

συγκριτικά παραγωγή νερού στο MSS, μπορεί να επιτευχθεί χωρίς πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας και με απλές μη κοστοβόρες τροποποιήσεις.

- ✚ Η μέγιστη παραγωγή νερού επετεύχθη εφαρμόζοντας το σύνολο των παραπάνω τροποποιήσεων με μέση τιμή ανά τροποποιημένο αποστακτήρα 3.3 L/day (4.6 L/m²/day) έναντι των 2.6 L/day (3.8 L/m²/day), του συμβατικού αποστακτήρα. Η αντίστοιχη μέση ημερήσια απόδοση συστήματος υπολογίστηκε σε 261.3 L/day, διαμορφώνοντας έτσι το ειδικό κόστος νερού σε 0.087 €/L/m². Ωστόσο, από τα αποτελέσματα συστήνεται η υιοθέτηση των τροποποιήσεων εισαγωγής “φυτιλιού” σε συνδυασμό με την μείωση του ρυθμού εισροής και χωρίς της προθέρμανση του εισερχόμενου νερού. Αυτό καθώς η αντίστοιχη τιμή παραγωγής νερού στο εν λόγω πάνελ βρέθηκε ίση με 3.1 L/day (4.5 L/m²/day), με ημερήσια παραγωγή συστήματος 249.2 L/day και ειδικό κόστος νερού 0.092 €/L/m². Λόγω της μικρής απόκλισης, θεωρείται ως εκ τούτου η πλέον βέλτιστη τροποποίηση λαμβάνοντας υπόψη την αποφυγή του ενεργειακού κόστους για τη προθέρμανση νερού που τελικά θα μετακυλιόταν στην τελικό κόστος.
- ✚ Ακόμη στην περίπτωση εφαρμογής του συνόλου των τροποποιήσεων βρέθηκε βέλτιστη θερμοκρασία προθέρμανσης του νερού σε εύρος 35°C έως 43°C, με βέλτιστο εύρος έντασης ηλιακής ακτινοβολίας 500-600 W/m² και μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος 28.9°C. Αντίθετα παρατηρήθηκε πως υπό τις ίδιες συνθήκες, η εφαρμογή προθέρμανσης νερού χωρίς κάποια άλλη τροποποίηση απαιτεί θερμοκρασία προθέρμανσης άνω των 42°C, γεγονός που επιβεβαιώνει την επίδραση των δύο άλλων τροποποιήσεων.
- ✚ Επιπλέον παρατηρήθηκε πως η εφαρμογή προθέρμανσης με μειωμένο ρυθμό ροής και χωρίς “φυτίλι” παρουσιάζει μικρότερη απόδοση συγκριτικά με τη διατήρηση του ρυθμού των 2 L/hr γεγονός που πιθανώς αποδίδεται στη δημιουργία ξηρών σημείων στον αποστακτήρα λόγω αυξημένου ρυθμού εξάτμισης και μειωμένης ποσότητας εισερχόμενου νερού.
- ✚ Από τις παραπάνω δοκιμές τέλος, επιβεβαιώθηκε η ισχυρή συσχέτιση παραγωγής νερού στο σύστημα με την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς υπολογίστηκε 44.9% αύξηση της απόδοσης με την αύξηση της έντασης από 508.1 W/m² σε 561.2 W/m², υπό σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος, όπου ο συντελεστής συσχέτισης των δύο βρέθηκε εδώ ίσος με 0.8.
- ✚ Πέραν της πρότασης εφαρμογής των τροποποιήσεων σύμφωνα με τα ανωτέρω, εμπειρικά προτάθηκε επιπλέον η εφαρμογή μερικής κλίσης (2-4%) στον αγωγό εξόδου της άλμης από κάθε αποστακτήρα, όπου φάνηκε να διευκολύνει την απορροή της αυξάνοντας την ταχύτητά της. Εκεί ως ροή με ελεύθερη επιφάνεια το αίτιο που την προκαλεί είναι η βαρύτητα και συνδυάζεται ως εκ τούτου με την κλίση του αγωγού. Κλίση ωστόσο μεγαλύτερη της επιθυμητής θα μείωνε τη διατομή με αποτέλεσμα ο αγωγός να μπει υπό πίεση, γεγονός που θα έφερνε αντίθετα αποτελέσματα από τα επιθυμητά. Τέλος προτείνεται η υιοθέτηση ενός αυτοματισμού νυχτερινής λειτουργίας με καθαρό νερό για μικρό χρονικό διάστημα (1-2 ώρες/3 ημέρες). Σκοπός αυτής θα είναι η διάλυση και έκπλυση των συσσωρευμένων αλάτων, έναντι του εφαρμοζόμενου έως τώρα περιοδικού *by-rass*.
- ✚ Οι παραπάνω προτάσεις αντλήθηκαν εμπειρικά και απαιτούν περαιτέρω και σαφή μελέτη για την εφαρμογή τους. Αποσκοπούν δε, στο μετριασμό και την αποφυγή προβλημάτων που δύναται να επηρεάσουν την ποιότητα του παραγόμενου νερού (αύξηση EC του FW) καθώς και των απαιτήσεων συντήρησης που επιφέρουν προσωρινή διακοπή λειτουργίας του συστήματος (πτώση της απόδοσης του MSS). Ταυτόχρονα προτείνεται εργονομικότερος σχεδιασμός για ευκολότερο άνοιγμα των αποστακτών κατά τη συντήρησή τους και η βελτιστοποίηση της θερμομόνωσής τους για την αύξηση της θερμικής τους απόδοσης.
- ✚ Τέλος κρίνεται σημαντική η πλήρης επαναφορά της ανάκτησης αλατιού, το οποίο αποτελεί καινοτομία του εν λόγω συστήματος. Το εν λόγω σύστημα παρέμεινε κλειστό ως επί το πλείστον, λόγω μη εύρεσης ενδιαφερόμενων μερών για την εκμετάλλευσή του. Ωστόσο, σύμφωνα με τον κατασκευαστή δύναται να ανακτά 700 kg βρώσιμου αλατιού ετησίως και μπορεί δυνητικά να επιφέρει μείωση του τελικού κόστους

νερού. Δειγματοληπτικοί έλεγχοι του προϊόντος κατά την παρούσα μελέτη, έδειξαν καθαρότητα 97.2% και συμμόρφωση με το σύνολο των ποιοτικών προτύπων καταλληλότητας.

Εν κατακλείδι, το παρών σύστημα ηλιακής αφαλάτωσης, όπως μελετήθηκε στην εν λόγω εργασία αποτελεί βέλτιστη εναλλακτική για την παραγωγή νερού ασφαλούς ποιότητας προς αρδευτική χρήση σε εκτάσεις μη εντατικής καλλιέργειας που υφίστανται έλλειψη ή πλήρη απουσία υδροδότησης. Ιδανικό κοινό, κρίνονται μικρής κλίμακας αγρότες χωρίς υψηλή απαίτηση εξειδίκευσης με την τεχνολογία. Σε περιπτώσεις εκτεταμένων καλλιεργειών, επεκτείνεται εύκολα μέσω απλής εγκατάστασης πρόσθετων αποστακτήρων στο ήδη υπάρχων σύστημα. Ως ιδανικό πεδίο ακόμη, κρίνονται αποκεντρωμένες παραθαλάσσιες περιοχές που χαρακτηρίζονται από μακρές ξηρές περιόδους με αυξημένη και παρατεταμένη ηλιοφάνεια και που υφίστανται υψηλές πιέσεις λόγω περιόδων υψηλής ζήτησης και ανεπάρκειας υδατικών αποθεμάτων.

Βάσει της δυναμικότητας και λόγω της σημαντικής απαίτησης κυρίως παραθαλάσσιων εκτάσεων, τα συστήματα ηλιακής απόσταξης συνολικά συνεπάγονται υψηλότερο κόστος γης. Ως εκ τούτου, κρίνεται απαραίτητη η υψηλή διαθεσιμότητα εδαφών, ενώ μη οικοδομήσιμα αγροτεμάχια θεωρούνται συμβατά με την εγκατάστασή τους. Ως αναδυόμενη τεχνολογία, η εγκατάσταση ενός συστήματος MSS θεωρείται συμπληρωματικό έργο των κύριων εγκαταστάσεων ύδρευσης. Μπορεί ωστόσο να συνεισφέρει σημαντικά στο μετριασμό της λειψυδρίας, με περιορισμένη ενεργειακή απαίτηση προάγοντας την κυκλικότητα του νερού για την αναγέννηση εδαφών και την ανάπτυξη της γεωργίας, υπό το πρίσμα εγκαθίδρυσης του άξονα *WEFE* και της βιώσιμης διαχείρισης. Καθώς ωστόσο το ολιστικό αυτό κόστος δεν λαμβάνεται επαρκώς υπόψη, θεωρείται επιβεβλημένη η σύναψη καινοτόμων συμφωνιών και η προσέλκυση κρατικών ή και ιδιωτικών επενδύσεων ώστε να εξελιχθούν περαιτέρω και να καταστούν οικονομικά αποτελεσματικά. Ταυτόχρονα κρίνεται απαραίτητη η ενημέρωση του ενδιαφερόμενου κοινού και η μετάδοση της επιστημονικής γνώσης και νοοτροπίας προς όλα τα επίπεδα.

Στη βάση αυτή, η παρούσα εργασία, μέσω των ερευνητικών προγραμμάτων στα πλαίσια των οποίων εκπονήθηκε, αποσκοπεί να συνεισφέρει στην ωρίμανση της τεχνολογίας ηλιακής αφαλάτωσης, τον εντοπισμό περιορισμών και περιθωρίων βελτιστοποίησής της και την ανάδειξη των βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας, μέσω πρακτικής εφαρμογής. Στοχεύει έτσι να συνδράμει στην μελλοντική έρευνα των εν λόγω συστημάτων, η οποία απαιτείται για να καταστεί δυνατή η αξιοποίηση και εφαρμογή τους σε ευρύτερη κλίμακα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής Βιβλιογραφία

- Abdullah, A. S., Alawee, W. H., Mohammed, S. A., Majdi, A., Omara, Z. M., & Younes, M. M. (2023). Utilizing a single slope solar still with copper heating coil, external condenser, phase change material, along with internal and external reflectors — Experimental study. *Journal of Energy Storage*, 63. doi.org/10.1016/j.est.2023.106899
- 'About IUCN' (2020). Guidance of using the IUCN global standard for Nature-based solutions. doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.09.en
- Abujazar M., S., S., Fatihah S., Rakmi A., R. & Shahrom, M., Z (2016). The effects of design parameters on productivity performance of a solar still for seawater desalination: A review. *Desalination*, 385, 178-193. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.02.025>
- Adam, A., Saffaj, N., & Mamouni, R. (2023). Sustainable solar still system coupled with renewable power for industrial wastewater recycling: A review. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.416>
- Ahmed, M. M. Z., Alshammari, F., Abdullah, A. S., & Elashmawy, M. (2021). Experimental investigation of a low cost inclined wick solar still with forced continuous flow. *Renewable Energy*, 179, 319–326. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.059>
- Al-Hamadani Altaf Hameed Yaseen, A. A. (2019). Experimental Study of Multi Effect stages PV Panels Solar Still to Enhance the Productivity by Utilizing Water Heater and Cooling Fan. In *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, 27.
- Ai-Shammiri, M. (2002). *Evaporation rate as a function of water salinity*. www.elsevier.com/locate/desal
- Ajayi, T. O. (2023). Biomimicry: the nexus for achieving sustainability in the people-process-planet relationship. In *Heliyon*, 9(5). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16180>
- Akatwijuka, O., Gepreel, M. A. H., Abdel-Mawgood, A., Yamamoto, M., Saito, Y., & Hassanin, A. H. (2022). Overview of banana cellulosic fibers: agro-biomass potential, fiber extraction, properties, and sustainable applications. In *Biomass Conversion and Biorefinery*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02819-0>
- Alatawi, I., Khaliq, A., Ahmed Heniegal, A. M., Abdelaziz, G. B., & Elashmawy, M. (2022). Tubular solar stills: Recent developments and future. In *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 242. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111785>
- Alawad, S. M., Mansour, R. Ben, Al-Sulaiman, F. A., & Rehman, S. (2023). Renewable energy systems for water desalination applications: A comprehensive review. In *Energy Conversion and Management*, 286. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117035>
- Alexandridis, T. K., Cherif, I., Chemin, Y., Silleos, G. N., Stavrinou, E., & Zalidis, G. C. (2009). Integrated methodology for estimating water use in mediterranean agricultural areas. *Remote Sensing*, 1(3), 445–465. <https://doi.org/10.3390/rs1030445>
- Al-hassan, G. A., & Algarni, S. A. (2013). Exploring of Water Distillation by Single Solar Still Basins. *American Journal of Climate Change*, 02(01), 57–61. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2013.21006>
- Al-Hinai, H., Al-Nassri, M. S., & Jubran, B. A. (2002). Effect of climatic, design and operational parameters on the yield of a simple solar still. *Energy Conversion and Management*, 43(13), 1639–1650. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00120-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00120-0)
- Ali, A., Tufa, R. A., Macedonio, F., Curcio, E., & Drioli, E. (2018). Membrane technology in renewable-energy-driven desalination. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1–21. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.047>
- Al-Karaghoul, A., & Kazmerski, L. L. (2013). Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24, 343–356. doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.064
- Al-Karaghoul, A., Renne, D., & Kazmerski, L. L. (2009). Solar and wind opportunities for water desalination in the Arab regions. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2397–2407. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.05.007>
- Al-Saidi, M. (2017). Conflicts and security in integrated water resources management. In *Environmental Science and Policy* 73, 38–44. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.03.015>
- Amiri, H. (2022). Enhancing the stepped solar still performance using a built-in passive condenser. *Solar Energy*, 248, 88–102. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.11.006>
- Amy, G., Ghaffour, N., Li, Z., Francis, L., Linares, R. V., Missimer, T., & Lattemann, S. (2017). Membrane-based seawater desalination: Present and future prospects. *Desalination*, 401, 16–21. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.002>
- Anwar, F., Abbas, A, Alkharfy, K., M & Gilani, A. (2016). Chapter 33 - Cardamom (Elettaria cardamomum Maton) Oils. *Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety*, 295-301. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416641-7.00033-X>
- Associates Africa, G. (2010). The effect of salinity on evaporation rates of brines resulting from the treatment of mine water. *Priyal Dama-Fakir, Annalien Toerien*. wisa.org.za

- Atekwana, E. A., Atekwana, E. A., Rowe, R. S., Werkema, D. D., & Legall, F. D. (2004). The relationship of total dissolved solids measurements to bulk electrical conductivity in an aquifer contaminated with hydrocarbon. *Journal of Applied Geophysics*, 56(4), 281–294. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2004.08.003>
- Azevedo, P., V., Souza C., B., Silva B., B., da Silva V., P., R. (2007). Water requirements of pineapple crop grown in a tropical environment, *Agricultural Water Management* 88 (1–3), 201-208. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.10.021>
- Balzan, M. V., Geneletti, D., Grace, M., De Santis, L., Tomaskinova, J., Reddington, H., Sapundzhieva, A., Dicks, L. V, & Collier, M. (2022). Assessing nature-based solutions uptake in a Mediterranean climate: insights from the case-study of Malta. *Nature-Based Solutions*, 2, 100029. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100029>
- Belessiotis, V., & Delyannis, E. (2001a). Water shortage and renewable energies (RE) desalination w possible technological applications. In *Desalinationm* 139.
- Bhattacharya, S. (2016). Chapter 3 - Cultivation of Essential Oils. *Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety*, 19-29. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416641-7.00003-1>
- Belessiotis, V., & Delyannis, E. (2001b). Water shortage and renewable energies (RE) desalination w possible technological applications. In *Desalination*, 139. www.elsevier.com/locate/desal
- Bennett, A., (2013). 50th Anniversary: Desalination: 50 years of progress. *Filtration + Separation*, 50(13), 32 – 34. [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(13\)70128-9](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(13)70128-9)
- Benson, D., Gain, A. K., & Giupponi, C. (2020). Moving beyond water centrality? Conceptualizing integrated water resources management for implementing sustainable development goals. *Sustainability Science*, 15(2), 671–681. doi.org/10.1007/s11625-019-00733-5
- Biazin, B., Sterk, G., Temesgen, M., Abdulkedir, A., & Stroosnijder, L. (2012). Rainwater harvesting and management in rainfed agricultural systems in sub-Saharan Africa - A review. *Physics and Chemistry of the Earth*, 47–48, 139–151. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.08.015>
- Bisht, S., Dhindsa, G. S., & Sehgal, S. S. (2019). Augmentation of diurnal and nocturnal distillate of solar still having wicks in the basin and integrated with solar pond. *Materials Today: Proceedings*, 33, 1615–1619. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.732>
- Biswas, A., Mailapalliand, D., R. & Raghuvanshi N., S. (2021). Treated municipal wastewater to fulfil crop waterfootprints and irrigation demand –a review. *Water Science & Technology Water Supply*, 21(1). DOI:10.2166/ws.2021.031
- Butu, M., & Rodino S., (2019). 11 - Fruit and Vegetable-Based Beverages-Nutritional Properties and Health Benefits. *Natural Beverages*, 13, 303-338. doi.org/10.1016/B978-0-12-816689-5.00011-0
- Castillo-Télez, M., Pilatowsky-Figueroa, I., Sánchez-Juárez, Á., & Fernández-Zayas, J. L. (2015). Experimental study on the air velocity effect on the efficiency and fresh water production in a forced convective double slope solar still. *Applied Thermal Engineering*, 75, 1192–1200. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.10.032>
- Chourasia, K.N., More, S.J., Kumar, A. Kumar, D., Singh, B., Bhardwaj V., Kumar, A., Kumar D., S., Singh, R., K., Zinta, G., Tiwari, R., K. & Kumar Lal M., K. (2022). Salinity responses and tolerance mechanisms in underground vegetable crops: an integrative review. *Planta* 255, 68. doi.org/10.1007/s00425-022-03845
- Christaki, E, & Florou-Paneri, P. (2010). Aloe vera: A plant for many uses. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 8(2)
- Darbari, B., & Rashidi, S. (2022). Performance analysis for single slope solar still enhanced with multi-shaped floating porous absorber. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101854>
- Datta, S., Taghvaeian, S., & Stivers, J. W. (2017). Understanding Soil Water Content and Thresholds for Irrigation Management Promoting the use of soil moisture sensors for effective irrigation scheduling, *View project NDSU Dust Research View project*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35535.89765>
- Dawoud, M. A. (2012). Environmental Impacts of Seawater Desalination: Arabian Gulf Case Study. *International Journal of Environment and Sustainability*, 1(3). <https://doi.org/10.24102/ijes.v1i3.96>
- De Lima-Neto, A. J., Cavalcante, L. F., de Mesquita, F. O., Antônio, A. G., dos Santos, G. P., dos Santos, J. Z., & de Mesquita, E. F. (2016). Papaya seedlings irrigation with saline water in soil with bovine biofertilizer. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 76(2), 236–242. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392016000200014>
- Delion, N., Mauguin, G., & Corsin, R. (2004). *Importance and impact of post treatments on design and operation of SWRO plants*. <https://doi.org/10.1016/j>
- Dhiman, N. K. (1988). Transient Analysis of a Spherical Solar Still. *Desalination*, 69.
- Dubey, A., Singh, S. K., & Tyagi, S. K. (2022). Advances in design and performance of dual slope solar still: A review. In *Solar Energy*, 244, 189–217). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.08.050>
- Eke, J., Yusuf, A., Giwa, A., & Sodiq, A. (2020). The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity. *Desalination*, 495. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114633>
- El-Agouz, S. A., El-Samadony, Y. A. F., & Kabeel, A. E. (2015). Performance evaluation of a continuous flow inclined solar still desalination system. *Energy Conversion and Management*, 101, 606–615. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.069>
- Elashmawy, M. (2017). An experimental investigation of a parabolic concentrator solar tracking system integrated with a tubular solar still. *Desalination*, 411, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.02.003>
- Eiblin, J., A., Talbert, S., G. and Lof, G., O, G. (1971). Solar stills for community use—digest of technology, *Solar Energy*, 13, 263-276. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(71\)90007-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(71)90007-7)

- El-Sebaï, A. A. (2005). Thermal performance of a triple-basin solar still. *Desalination*, 174(1), 23–37. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.08.038>
- Evelpidou, N. (2008). *Geomorphologic factors affecting intrinsic vulnerability in fissured media. Application on Falatados-Livada area, SE Tinos island (Cyclades-Greece)*. <https://www.researchgate.net/publication/339272023>
- Evelpidou, N. (2005). *Procedures concluded to erosion geomorphological characteristics of Naxos, Mykonos, Tinos islands (Aegean Sea) McAgenda Erasmus+ View project EnvStories Erasmus+ View project PROCEDURES CONCLUDED TO EROSION GEOMORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF NAXOS, MYKONOS, TINOS ISLANDS (AEGEAN SEA)*.
- Farshchi Tabrizi, F., Khosravi, M., & Shirzaei Sani, I. (2016). Experimental study of a cascade solar still coupled with a humidification-dehumidification system. *Energy Conversion and Management*, 115, 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.006>
- Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., & Melin, T. (2007). State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination*, 216(1–3), 1–76. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.12.009>
- Feilizadeh, M., Soltanieh, M., Karimi Estahbanati, M. R., Jafarpur, K., & Ashrafmansouri, S. S. (2017). Optimization of geometrical dimensions of single-slope basin-type solar stills. *Desalination*, 424, 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.08.005>
- Food and Agriculture Organization of United Nations (2014). The Water-Energy-Food Nexus A new approach in support of food security and sustainable agriculture.
- Food and Agriculture Organization of United Nations. CODEX STANDARD FOR FOOD GRADE SALT, STAN 150-1985, Rev. 1-1997, Amend. 1-1999, Amend. 2-2001. <https://www.fao.org>
- Ghafourian, M., Nika, C. E., Mousavi, A., Mino, E., Al-Salehi, M., & Katsou, E. (2022). Economic impact assessment indicators of circular economy in a decentralised circular water system-Case of eco-touristic facility. *Science of the Total Environment*, 822. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153602>
- Gheyi, H., Antonio, M., Filho, C., Nunes De Jesus, O., Dos, R., Moura, S., Gheyi, H. R., Antonio, M., Vanies, F., Sá, S., Kennedy, L., & Lima, S. (2016). TOLERANCE OF PASSION FRUIT SPECIES UNDER SALT STRESS. In *Article in International Journal of Current Research*. <https://www.researchgate.net/publication/308343069>
- Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33(8). <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>
- Grace, M., Balzan, M., Collier, M., Geneletti, D., Tomaskinova, J., Abela, R., Borg, D., Buhagiar, G., Camilleri, L., Cardona, M., Cassar, N., Cassar, R., Cattafi, I., Cauchi, D., Galea, C., La Rosa, D., Malekkidou, E., Masini, M., Portelli, P., ... Dicks, L. V. (2021). Priority knowledge needs for implementing nature-based solutions in the Mediterranean islands. *Environmental Science & Policy*, 116, 56–68. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.10.003>
- Hamed A., M. & Ali E., A., M. (2007). *J of Applied Sciences Research*, 3(8), 713-722
- Hamed, O. A. (2015). Evolutionary developments of thermal desalination plants in the Arab Gulf region. <https://www.researchgate.net/publication/228945604>
- Hammoodi, K. A., Dhahad, H. A., Alawee, W. H., & Omara, Z. M. (2023). A detailed review of the factors impacting pyramid type solar still performance. In *Alexandria Engineering Journal* 66, 123–154. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.12.006>
- Harthy, A., Aishah, S., & Yahyai, A. (2018). Effects of saline irrigation water on morphological characteristics of banana (*Musa spp.*). In *International Food Research Journal*, 25.
- ‘Horti. Research Complex (2015). *Government of Tripura: Cultivation techniques of Papaya*. <https://horti.tripura.gov.in/>
- Hussen, H. M., Younes, M. M., Alawee, W. H., Abdullah, A. S., Mohammed, S. A., Atteya, T. E. M., Abbas, F., & Omara, Z. M. (2023). An experimental comparison study between four different designs of solar stills. *Case Studies in Thermal Engineering*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102841>
- Hydrousa D2.3 (2019). *Design of Mangrove Still upgrade. Freshwater production, collection, storage and supply*, WP2, HYDROUSA Consortium.
- Hydrousa D4.5 (2023). *Report on yields, health of crops and derived products. Agricultural Innovations*, WP4, HYDROUSA Consortium.
- Hydrousa D4.6 (2023). *Report on food safety issues and pest control. Agricultural Innovations*, WP4, HYDROUSA Consortium.
- Hydrousa D5.1 (2023). *Pilot Assessment Report. Monitoring of the demonstration sites and ICT integration*, WP5, HYDROUSA Consortium.
- Hydrousa D7.1 (2019). *HYDROUSA water loops in the context of the EU and international policy (including Innovation Deal). Transferability and replication of HYDROUSA services*, WP7, HYDROUSA Consortium.
- Hydrousa D9.2 (2018). *Brand Identity. Communication, community building, dissemination*, WP9, HYDROUSA Consortium
- Islam, M., Kashem, S., Momtaz, Z., & Hasan, M. M. (2023). An application of the participatory approach to develop an integrated water resources management (IWRM) system for the drought-affected region of Bangladesh. *Heliyon*, 9(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14260>
- Ithape, P. K., Barve, S. B., & Nadgire, A. R. (2017). *CLIMATIC AND DESIGN PARAMETERS EFFECTS ON THE PRODUCTIVITY OF SOLAR STILL: A REVIEW* (Issue 4). [researchgate.net/publication/318258832](https://www.researchgate.net/publication/318258832)
- Jairo Feria-Díaz, J., Cristina López-Méndez, M., & Ortiz-Monterde, L. (2023a). *Correlation between Solar Intensity and Relative Humidity and its Influence on the Performance of Solar Stills*. 7(1), 293–310.
- Jairo Feria-Díaz, J., Cristina López-Méndez, M., & Ortiz-Monterde, L. (2023b). *Correlation between Solar Intensity and Relative Humidity and its Influence on the Performance of Solar Stills*. 7(1), 293–310.

- Jamal, A. H. M. S. I. M., Tarek, Y. A., Siddique, M. A. B., Shaikh, M. A. A., Debnath, S. C., Uddin, M. R., Ahmed, S., Akbor, M. A., Al-Mansur, M. A., Islam, A. R. M. T., Khan, R., Moniruzzaman, M., & Sultana, S. (2023). Development of a fabricated first-flush rainwater harvested technology to meet up the freshwater scarcity in a South Asian megacity, Dhaka, Bangladesh. *Heliyon*, 9(1). doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13027
- Javed, S. & Rahman A., U. (2014). Chapter 9 - Aloe Vera Gel in Food, Health Products, and Cosmetics Industry. *Studies in Natural Products Chemistry*, 41, 261-285.
- Jiang, S., Li, Y., & Ladewig, B. P. (2017). A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies. In *Science of the Total Environment* 595, 567–583. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.235
- Jobrane, M., Kopmeier, A., Kahn, A., Cauchie, H. M., Kharroubi, A., & Penny, C. (2021). Internal and external improvements of wick type solar stills in different configurations for drinking water production– A review. In *Groundwater for Sustainable Development*, 12. Elsevier B.V. doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100519
- Justine, A. K., Kaur, N., Savita, & Pati, P. K. (2022). Biotechnological interventions in banana: current knowledge and future prospects. *Heliyon*, 8(11). doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11636
- Kalbasi, R., Alemrajabi, A. A., & Afrand, M. (2018). Thermal modeling and analysis of single and double effect solar stills: An experimental validation. *Applied Thermal Engineering*, 129, 1455–1465. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.012
- Karagiannis, I. C., & Soldatos, P. G. (2008). Water desalination cost literature: review and assessment. *Desalination*, 223(1–3), 448–456. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.02.071>
- Khalifa, A. J. N., & Hamood, A. M. (2009). Effect of insulation thickness on the productivity of basin type solar stills: An experimental verification under local climate. *Energy Conversion and Management*, 50(9), 2457–2461. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.06.007>
- Koffi, B., Konan, D., Nguessan, R., Saraka, J., Tanoh, A., Kouacou, M., Yeo, Z., Koffi, M., & Koua, A. (2009). ‘Modelling of Solar Still for Production of Pure Water in the Abidjan Zones’, *Research Journal of Physics*, 3(1), 5-13. www.academicjournals.com.
- Kourgialas, N. N., & Dokou, Z. (2021). Water management and salinity adaptation approaches of Avocado trees: A review for hot-summer Mediterranean climate. In *Agricultural Water Management*, 252. doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106923
- Kourgialas, N. N., Karatzas, G. P., Dokou, Z., & Kokorogiannis, A. (2018). Groundwater footprint methodology as policy tool for balancing water needs (agriculture & tourism) in water scarce islands - The case of Crete, Greece. *Science of the Total Environment*, 615, 381–389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.308>
- Kumar Nougriaya, S., Chopra, M. K., Gupta, B., & Baredar, P. (2020). Stepped solar still: A review on designs analysis. *Materials Today: Proceedings*, 46, 5647–5660. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.598>
- Lawrence, M., G. (2005). The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air: A Simple Conversion and Applications. *Bulletin of the American Meteorological Society* 86(2), 225-233.
- Lee, G. R., Park, C. D., Lim, H., Cho, S. H., Choi, S. M., & Lim, B. J. (2023). Performance enhancement of a diffusion-type solar still: Wettability and flowability of condensation surface. *Renewable Energy*, 209, 277–285. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.134>
- Lee, K. P., Arnot, T. C., & Mattia, D. (2011). A review of reverse osmosis membrane materials for desalination-Development to date and future potential. In *Journal of Membrane Science*, 370(1–2), 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.12.036>
- Leonidopoulou D., Evelpidou, N., Vasilopoulos, A. & Stournaras., G. (2008). Planation surfaces and their characteristics on Tinos Island (Cyclades – Greece). Conference: 3rd Meeting of Greek Geomorphologists, Athens.
- Linish Dsouza, V., & Mallikappa, D. N. (2023). Performance analysis of step type solar still and comparison of the performance with evacuated tube collector coupled with single slope step type solar still. *Materials Today: Proceedings*. doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.347
- Lurie-Luke, E. (2014). Product and technology innovation: What can biomimicry inspire? In *Biotechnology Advances*, 32(8), 1494–1505. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2014.10.002>
- Malagó, A., Comero, S., Bouraoui, F., Kazezyilmaz-Alhan, C. M., Gawlik, B. M., Easton, P., & Lapidou, C. (2021). An analytical framework to assess SDG targets within the context of WEFE nexus in the Mediterranean region. *Resources, Conservation and Recycling*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105205>
- Mancuso, G., Lavrić, S., & Toscano, A. (2020). Reclaimed water to face agricultural water scarcity in the Mediterranean area: An overview using Sustainable Development Goals preliminary data. In *Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection*, 5, 113–143. doi.org/10.1016/bs.apmp.2020.07.007
- Mandal, G., & Thokchom, R. (2017). Production Preference and Importance of Passion Fruit (*Passiflora Edulis*): A Review. *J of Agricultural Engineering and Food Technology*, 4(1), 27-30.
- Manoj Kumar, P., Saravanakumar, P. T., Sarojwal, A., Saminathan, R., Harikrishna, D., Jeevan Prasanth, S., & Aravinth Pranav, R. (2022). Experimental investigations on the performance of a single slope solar still with thermal energy storage. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.221>
- Mehmet, I. and Özgür, Ş. (2017). Experimental investigation of evaporation from a horizontal free water surface. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 35 (1), 119-131. <https://eds.yildiz.edu.trF>

- European Commission, Directorate-General for Environment, Margat, J., Detoc, S., Carmi, N. et al., Mediterranean water scarcity and drought report – Technical report on water scarcity and drought management in the Mediterranean and the water framework directive, European Commission, 2007
- Mejjad, N., Rossi, A., & Pavel, A. B. (2022). The coastal tourism industry in the Mediterranean: A critical review of the socio-economic and environmental pressures & impacts. *Tourism Management Perspectives*, 44. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.tmp.2022.101007>
- Mezher, T., Fath, H., Abbas, Z., & Khaled, A. (2011). Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies. *Desalination*, 266(1–3), 263–273. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.08.035>
- Minasian, A. N., & Al-Karaghoul A., A. (1995). An improved solar still: The wick-basin type. *Energy Convers.*, 36(3), 213–217.
- Moghbeli, I., Fathollahi, S., Salari, H., Ahmadi, G., Saliqehdar, F., Safari, A. & Sadat-Hosseini, M. (2012). Effects of salinity stress on growth and yield of Aloe vera L. *J of Medicinal Plants Research*, 6(16), 3272–3277. DOI: 10.5897/JMPR11.1698
- Mohsenzadeh, M., Aye, L., & Christopher, P. (2021). A review on various designs for performance improvement of passive solar stills for remote areas. In *Solar Energy* 228, 594–611). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.09.086>
- Mohsenzadeh, M., Aye, L., & Christopher, P. (2023). Effect of humidity level and aspect ratio on convective heat transfer coefficient and water productivity of a solar still: Experimental and theoretical analysis. *Applied Thermal Engineering*, 228. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120547>
- Moreno, C. (2021). *About IUCN Centre for Mediterranean Cooperation*. iucn.org/mediterraneanwww.iucn.org/resources
- Muhammad, T., Zhou, B., Liu, Z., Chen, X., & Li, Y. (2021). Effects of phosphorus-fertigation on emitter clogging in drip irrigation system with saline water. *Agricultural Water Management*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106392>
- Naroei, M., Sarhaddi, F., & Sobhnamayan, F. (2018). Efficiency of a photovoltaic thermal stepped solar still: Experimental and numerical analysis. *Desalination*, 441, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.04.014>
- Nayagam, V. S., Geetha, K., Vallikannu, R., Muthuvel, S. K., Ram, G. C., Gupta, P., Sudhakar, M., Mohanavel, V., & Sathyamurthy, R. (2022). Energy efficient tubular solar still for augmented yield using electrical heater. *Energy Reports*, 8, 959–964. doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.283
- Negi, A., Dhindsa, G. S., & Sehgal, S. S. (2021). Experimental investigation on single basin tilted wick solar still integrated with flat plate collector. *Materials Today: Proceedings*, 48, 1439–1446. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.210>
- Nelson, S. C., Ploetz, R. C., & Kepler, A. K. (2006). Musa species (banana and plantain) *In brlef*. www.traditionaltree.org
- Nika, C. E., Vasilaki, V., Renfrew, D., Danishvar, M., Echchel, A., & Katsou, E. (2022). Assessing circularity of multi-sectoral systems under the Water-Energy-Food-Ecosystems (WEFE) nexus. *Water Research*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118842>
- Nouri, H., Stokvis, B., Galindo, A., Blatchford, M., & Hoekstra, A. Y. (2019). Water scarcity alleviation through water footprint reduction in agriculture: The effect of soil mulching and drip irrigation. *Science of the Total Environment*, 653, 241–252. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.311
- Othmani, N. I., Sahak, N. M., & Yunos, M. Y. M. (2021). Biomimicry in agrotechnology: Future solution of water problem for the agriculture industry? *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 756(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/756/1/012051>
- Panagopoulos, A., Haralambous, K. J., & Loizidou, M. (2019). Desalination brine disposal methods and treatment technologies - A review. *Science of the Total Environment*, 693. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.351>
- Panchal, H., Taamneh, Y., Sathyamurthy, R., Kabeel, A. E., El-Agouz, S. A., Naveen Kumar, P., Manokar, A. M., Arunkumar, T., Mageshbabu, D., & Bharathwaaj, R. (2019). Economic and exergy investigation of triangular pyramid solar still integrated to inclined solar still with baffles. *International Journal of Ambient Energy*, 40(6), 571–576. <https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1422143>
- Pearson, J. L., Michael, P. R., Ghaffour, N., & Missimer, T. M. (2021). *Membranes Economics and Energy Consumption of Brackish Water Reverse Osmosis Desalination: Innovations and Impacts of Feedwater Quality*. <https://doi.org/10.3390/membranes>
- Petretto, G. L., Urgeghe, P. P., Massa, D., & Melito, S. (2019). Effect of salinity (NaCl) on plant growth, nutrient content, and glucosinolate hydrolysis products trends in rocket genotypes. *Plant Physiology and Biochemistry*, 141, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.05.012>
- Poós, T., & Varju, E. (2020). Mass transfer coefficient for water evaporation by theoretical and empirical correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119500>
- Qasim, M., Badrelzaman, M., Darwish, N. N., Darwish, N. A., & Hilal, N. (2019). Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review. In *Desalination*, 459, 59–104. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.02.008>
- Rabhi, K., Nciri, R., Nasri, F., Ali, C., & Ben Bacha, H. (2017). Experimental performance analysis of a modified single-basin single-slope solar still with pin fins absorber and condenser. *Desalination*, 416, 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.04.023>
- Rahbar, N., & Esfahani, J. A. (2013). Productivity estimation of a single-slope solar still: Theoretical and numerical analysis. *Energy*, 49(1), 289–297. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.10.023>

- Rahbar, N., Gharaiian, A., & Rashidi, S. (2017). Exergy and economic analysis for a double slope solar still equipped by thermoelectric heating modules - an experimental investigation. *Desalination*, 420, 106–113.
- Ramadan M., F. (2020). Cold pressed ginger (*Zingiber officinale*) oil. *Green Technology, Bioactive Compounds, Functionality, and Applications, Chapter 59*, 677-682. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818188-1.00059-1>
- Rajaseenivasan, T., & Kalidasa Murugavel, K. (2013). Theoretical and experimental investigation on double basin double slope solar still. *Desalination*, 319, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.03.029>
- Raj Kamal, M. D., Parandhaman, B., Madhu, B., Magesh Babu, D., & Sathyamurthy, R. (2021). Experimental analysis on single and double basin single slope solar still with energy storage material and external heater. *Materials Today: Proceedings*, 46, 10288–10292. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.444>
- Saadi, Z., Rahmani, A., Lachtar, S., & Soualmi, H. (2018). Performance evaluation of a new stepped solar still under the desert climatic conditions. *Energy Conversion and Management*, 171, 1749–1760. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.114>
- Saleem, H., Abounahia, N., Siddiqui, H. R., & Zaidi, S. J. (2023). Qatar desalination research: An overview. In *Desalination*, 564. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116802>
- Sarai Atab, M., Smallbone, A. J., & Roskilly, A. P. (2016). An operational and economic study of a reverse osmosis desalination system for potable water and land irrigation. *Desalination*, 397, 174–184. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.06.020>
- Sarma, Y., R., Babu, K. N. & Aziz., S. (2014). Spices and Aromatics. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, 211-234. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00153-4>
- Saxena, A., Cuce, E., Kabeel, A. E., Abdelgaied, M., & Goel, V. (2022). A thermodynamic review on solar stills. In *Solar Energy*, 237, 377–413. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.04.001>
- Sengar, S., H., Khandetod, Y., P. and Mohod A., G. (2012). New Innovation of low cost solar still. *European Journal of Sustainable Development*, 1 (2), 315-352. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2012.v1n2p315>.
- Sharshir, S. W., Omara, M. A., Elsisy, G., Joseph, A., Kandeal, A. W., Ali, A., & Bedair, G. (2023). Thermo-economic performance improvement of hemispherical solar still using wick material with V-corrugated basin and two different energy storage materials. *Solar Energy*, 249, 336–352. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.11.038>
- Sharshir, S. W., Rozza, M. A., Elsharkawy, M., Youns, M. M., Abou-Taleb, F., & Kabeel, A. E. (2022). Performance evaluation of a modified pyramid solar still employing wick, reflectors, glass cooling and TiO₂ nanomaterial. *Desalination*, 539. doi.org/10.1016/j.desal.2022.115939.
- Shatar, N. M., Sabri, M. F. M., Salleh, M. F. M., & Ani, M. H. (2023). Energy, exergy, economic, environmental analysis for solar still using partially coated condensing cover with thermoelectric cover cooling. *Journal of Cleaner Production*, 387. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135833>.
- Shenvi, S. S., Isloor, A. M., & Ismail, A. F. (2015). A review on RO membrane technology: Developments and challenges. *Desalination* 368, 10–26. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.042>.
- Shokri, A., & Sanavi Fard, M. (2023). Techno-economic assessment of water desalination: Future outlooks and challenges. In *Process Safety and Environmental Protection* 169, 564–578. Institution of Chemical Engineers. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.007>.
- Siddula, S., Stalin, N., Mahesha, C. R., Dattu, V. S. N. C. H., S, H., Singh, D. P., Mohanavel, V., & Sathyamurthy, R. (2022). Triangular and single slope solar stills: Performance and yield studies with different water mass. *Energy Reports*, 8, 480–488. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.225>
- Singh, N., Singh, S., Maurya, P., Arya, M., Khan, F., Dwivedi, D. H., & Saraf, S. A. (2019). An updated review on *Physalis peruviana* fruit: Cultivational, nutraceutical and pharmaceutical aspects. *Indian Journal of Natural Products and Resources*, 10 (2).
- Singh, S., P. & Sudhakar Rao, D., V. (2011). 6 - Papaya (*Carica papaya* L.). *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical*, 86-124, 125e-126. <https://doi.org/10.1533/9780857092618.86>
- Singh, B., Singh, J. P., Kaur, A., & Singh, N. (2016). Bioactive compounds in banana and their associated health benefits - A review. In *Food Chemistry*, 206, 1–11. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.03.033>
- Singh, S. K., Kaushik, S. C., Tyagi, V. V., & Tyagi, S. K. (2021). Comparative Performance and parametric study of solar still: A review. In *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101541>
- Soares, P. M. M., & Lima, D. C. A. (2022). Water scarcity down to earth surface in a Mediterranean climate: The extreme future of soil moisture in Portugal. *Journal of Hydrology*, 615. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128731>
- Souguir, D., Howaida I., A., Ferjani, E., E., Khouja, M., L. & Mohamed Hachicha, M. (2015). Aloe vera long-term saline irrigation increases contents of hydrogen peroxide, lipid peroxidation and phenolic compounds. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 65(8), 688-696. doi.org/10.1080/09064710.2015.1049653
- Sowińska-Świerkosz, B., & García, J. (2022). What are Nature-based solutions (NBS)? Setting core ideas for concept clarification. *Nature-Based Solutions*, 2, 100009. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100009>

- Stournaras, G. C. (2008). Hydrogeology and vulnerability of limited extension fissured rocks islands. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 8(2–4), 391–399. <https://doi.org/10.2478/v10104-009-0031-y>
- Sun, J., Li, Y. P., Suo, C., & Liu, J. (2020). Development of an uncertain water-food-energy nexus model for pursuing sustainable agricultural and electric productions. *Agricultural Water Management*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106384>
- Surjushe, A., Vasani, R., & Saple D.S. (2010). ALOE VERA: A SHORT REVIEW. *Indian J Dermatol*, 53(4), 163–166. PMID: 19882025
- Taamneh, Y., Manokar, A. M., Thalib, M. M., Kabeel, A. E., Sathyamurthy, R., & Chamkha, A. J. (2020). Extraction of drinking water from modified inclined solar still incorporated with spiral tube solar water heater. *Journal of Water Process Engineering*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101613>
- Tabrizi, F. F., Dashtban, M., Moghaddam, H., & Razzaghi, K. (2010). Effect of water flow rate on internal heat and mass transfer and daily productivity of a weir-type cascade solar still. *Desalination*, 260(1–3), 239–247. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.03.037>
- Tan, N. P. B., Ucab, P. M. L., Dadol, G. C., Jabile, L. M., Talili, I. N., & Cabaraban, M. T. I. (2022). A review of desalination technologies and its impact in the Philippines. *Desalination*, 534. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115805>
- Taiwe, G., S. & Kuete, V. (2017). Chapter 24 - Passiflora edulis. *Medicinal Spices and Vegetables from Africa*, 513-526. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809286-6.00024-8>
- Tiwari, G. N. (1998). PERFORMANCE EVALUATION OF AN INVERTED ABSORBER SOLAR STILL. In *Energy Convers. Mgmt*, 39(4).
- Vasala, P., A. (2012) Handbook of Herbs and Spices (Second edition). Food Science, Technology and Nutrition, 1, 319-335. <https://doi.org/10.1533/9780857095671.319>
- Voutchkov, N. (2018). Energy use for membrane seawater desalination – current status and trends. *Desalination*, 431, 2–14. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.033>
- Wali, N. (2019). Chapter 3.34 - Pineapple (Ananas comosus). *Nonvitamin and Nonmineral Nutritional Supplements*, 367-373. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812491-8.00050-3>
- Wenten, I., Aryanti, P., & Hakim, A. (2016). Scale-up Strategies for Membrane-Based Desalination Processes: A Review. *Journal of Membrane Science and Research*, 2. www.msjournal.com
- Younes, M. M., Abdullah, A. S., Essa, F. A., & Omara, Z. M. (2021). Half barrel and corrugated wick solar stills – Comprehensive study. *Journal of Energy Storage*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103117>
- Younos, T. (2005). Environmental Issues Environmental Issues of Desalination. In *UNIVERSITIES COUNCIL ON WATER RESOURCES JOURNAL OF CONTEMPORARY WATER RESEARCH & EDUCATION ISSUE*, 132.
- Youssef, P. G., Al-Dadah, R. K., & Mahmoud, S. M. (2014). Comparative analysis of desalination technologies. *Energy Procedia*, 61, 2604–2607. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.258>
- Zaman, M., Shahid A., S., & Heng, L. (2018). Irrigation Water Quality. *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques, Chapter 5*, 113–131. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3_5.
- Zhao, J., Wang, M., Lababidi, H. M. S., Al-Adwani, H., & Gleason, K. K. (2018). A review of heterogeneous nucleation of calcium carbonate and control strategies for scale formation in multi-stage flash (MSF) desalination plants. In *Desalination*, 442, 75–88. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.05.008>
- Zhu, K., Zhang, L., Hart, W., Liu, M., & Chen, H. (2004). Quality issues in harvested rainwater in arid and semi-arid Loess Plateau of northern China. *Journal of Arid Environments*, 57(4), 487–505. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(03\)00118-6](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(03)00118-6)
- Ziabari, F. B., Sharak, A. Z., Moghadam, H., & Tabrizi, F. F. (2013). Theoretical and experimental study of cascade solar stills. *Solar Energy*, 90, 205–211. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.12.019>

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αλεξιάδου, Α. & Αλεξιάδου, Ι. (2016). *Βαρέα μέταλλα σε βότανα και στα αφεψήματά τους*. Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Λέσβος.
- Αναγνώστου, Β., Κυριακίδου, Χ., Δρακοπούλου, Π. *Η Μορφοδυναμική της νήσου Τήνου (Κυκλάδες) ως μηχανισμός διαμόρφωσης των ακτών της*. 9^ο Πανελλήνιο Συμπόσιο Ωκεανογραφίας & Αλιείας, *Πρακτικά, Τόμος Ι*, Πάτρα.
- Βαρελίδης, Π. (2022). *Εθνικό Επιχειρησιακό Σχέδιο για το Πόσιμο Νερό*. ΥΠΕΝ, Αθήνα. ΑΔΑ: ΨΩΛΘ4653Π8-9ΝΚ.
- Βουτσά-Ρεντζοπούλου, Σ., Μ. (2010). *Γεωλογική χαρτογράφηση και τεκτονική επεξεργασία δεδομένων από το νησί της Τήνου*. Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Χανιά.
- Δασκάλου, Μ. (2021). «Εντοπισμός και καταγραφή πηγών νερού στη νήσο Τήνο». Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο, Αθήνα.
- Δημοτικό Συμβούλιο Τήνου (2016), Επιχειρησιακό πρόγραμμα Δήμου Τήνου 2014-2019, Τήνος, ΑΔΑ: Ω3ΖΘΩΗ6-ΘΖΖ.
- Δημοτικό Συμβούλιο Τήνου (2021), Επιχειρησιακό πρόγραμμα Δήμου Τήνου 2020-2023, Τήνος, ΑΔΑ: ΨΔΨΙΩΗ6-ΝΗΔ.
- Κώδικας Τροφίμων και ποτών (1987). Γενικό Χημείο Κράτους Ανώτατο Χημικό Συμβούλιο. Τράπεζα Νομικών Πληροφοριών ΔΣΑ, Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας.
- Λεωνιδοπούλου, Δ. (2008). *Γεωλογικοί και γεωμορφολογικοί παράγοντες διαμόρφωσης της εσωτερικής τρωτότητας σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων: Εφαρμογή στη νήσο Τήνο*. Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο, Αθήνα.
- Μάντζιος, Κ., (2022). *Διερεύνηση της ποιότητας βρόχινου νερού και ομβρίων υδάτων για αγροτική χρήση σε αποκεντρωμένες περιοχές*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Μαργέλου, Σ. (2013). *Ανάλυση συστημάτων ηλιακής αφαλάτωσης και εφαρμογή ηλιακού αποστακτήρα στην περιοχή της Αθήνας*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- ΜΕΛΕΤΗ Αρ.3/2021 (2022). «*ΠΡΟΜΗΘΕΙΑ ΜΙΑΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΥΔΑΤΟΣ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΟΣΜΩΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤΑΣ 1.000 m³/day*». Διεύθυνση Τεχνικών Υπηρεσιών Δόμησης και Περιβάλλοντος, Τμήμα Η/Μ Έργων και Συγκοινωνιών, Τήνος.
- Μπακογιάννη, Δ., Η. (2016). *Χωρική κατανομή μονάδων αφαλάτωσης στην Ελλάδα. Διερεύνηση δυνατοτήτων αξιοποίησης της άλμης από τη βιομηχανία*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Ξεύγενος, Δ. (2022). *Αφαλάτωση & Αειφορία στα Ελληνικά νησιά*. Clean energy for EU islands, Energy Academy, Ηράκλειο Κρήτης.
- Νάνος, Γ. (2019). *Διδακτικές σημειώσεις για το μάθημα της δενδροκομίας*, Παν. Θεσσαλίας
- Πεπονάκης, Κ. (2012). *Ερμηνεία ανάλυσης αρδευτικού νερού*, Ηράκλειο.
- Σαρή, Σ., Γ. (2010). *Γεωμορφολογικά και Τεκτονικά δεδομένα για το νησί της Τήνου*. Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Χανιά.
- Στουρνάρας, Γ., Νάστος, Π., Γιόξας, Γ., Ευελπίδου, Ν., Βασιλάκης, Εμ., Παρτσινεβέδου, Σ., Α. & Ηλιόπουλος, Β. (2011). *Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα επιφανειακά και υπόγεια υδατικά σώματα του ελλαδικού χώρου*. Επιτροπή μελέτης επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής, Αθήνα.
- Στιβακτάκης, Σ., Ι. (2016) *Επίδραση της αλατότητας και της συγκέντρωσης του θρεπτικού διαλύματος επίπλευσης στην απόδοση και ποιότητα νεαρών φύλλων ρόκας*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσ/κη.
- Τριανταφυλλίδης Ι., (2018). *Χωροθέτηση χερσαίων αιολικών πάρκων με τη χρήση πολυκριτηριακής ανάλυση και συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών: Η περίπτωση της Τήνου*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη.

Βιβλία

- Ανδρεαδάκης, Δ., Α. (2008). *Επεξεργασία νερού: Βασικές αρχές και διεργασίες*. Αθήνα: Συμμετρία. ISBN:978-960-266-207-6.
- Ποντίκης, Κ. (2001). *Ειδική δενδροκομία Τόμος V "Τροπικά φυτά"*. Αθήνα: Σταμούλη, 2001. ISBN: 9603513792
- Φυτιανός, Κ. & Σαμαρά-Κωνσταντίνου, Κ. (2009). *Χημεία Περιβάλλοντος*. Θεσσαλονίκη: University Studio Press. ISBN: 978-960-12-1808-3

Δικτυογραφία

- <https://www.un.org/en/global-issues/water#:~:text=Water%20is%20at%20the%20core,between%20society%20and%20the%20environment.>
- <https://unescoyouth.gr>
- <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- http://www.emwis.net/topics/WaterScarcity/PDF/MedWSD_FINAL_Edition
- https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Chapter04.pdf
- <https://www.hydrousa.org/about/>
- [hydrousa.org/hydro1](https://www.hydrousa.org/hydro1)
- [hydrousa.org/hydro2](https://www.hydrousa.org/hydro2)
- [hydrousa.org/hydro3](https://www.hydrousa.org/hydro3)
- [hydrousa.org/hydro4](https://www.hydrousa.org/hydro4)
- [hydrousa.org/hydro5](https://www.hydrousa.org/hydro5)
- [hydrousa.org/hydro6](https://www.hydrousa.org/hydro6)
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128236949000086>
- <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-006-9039-x>
- <https://www.gwp.org/en/About/why/the-need-for-an-integrated-approach/>
- <https://doi.org/10.3030/776643>
- <https://www.hydrousa.org/about-the-project/#1542971153971-15e86414-3619>
- https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020_CIRC-02-2016-2017
- <https://anrcatalog.ucanr.edu/pdf/8562.pdf>
- <https://www.tinosecolodge.gr>
- http://gis.ktimanet.gr/gis/forestsuspension?fbclid=IwAR0bFnXPq7cYVwv1_uGm9R-Q5OpTxga02eI7P4-5Pt0eUjXibJbb8VqP_2f4
- <https://prasinoi.gr/water-tinos/>
- <https://www.economix.gr/2020/02/08/se-litourgia-i-nea-monada-afalatoxis-stin-tino-apo-tin-watera-ellas/>
- <https://www.cycladesvoice.gr/index.php?aid=33471>
- <https://www.fifo.gr>
- <https://www.newsbeast.gr/environment/arthro/132696/suzitisi-gia-tous-udatikous-porous-stin-tino>
- <https://www.tinos.biz/09may/epistoli.html>
- <https://tinostoday.gr/idreysi-ardeusi-tinos/>
- <https://tinostoday.gr/tinos-afxisi-arithmou-afixeon-kai-esodon-tin-touristiki-periodo/>
- https://tinostoday.gr/deltio_tipou153.html
- <https://web.archive.org/web/20120131140545/http://www.kathimerini.gr/kath/7days/1993/08/15081993.pdf>
- <http://www.tinos360.gr/>
- <https://www.ota24.gr/dimoi-nomoy-kykladon/>
- <https://tinosecret.gr>
- <https://emodnet.ec.europa.eu/geoviewer/>
- http://grsa.prd.uth.gr/conf2013/3_vidali_ersagr13.pdf
- https://wastefreeaegean.gr/wp-content/uploads/2022/10/01-%CE%94%CE%99%CE%91%CE%9A%CE%97%CE%A1%CE%A5%CE%9E%CE%97-%CE%A7%CE%A5%CE%A4%CE%A5-%CE%A4%CE%97%CE%9D%CE%9F%CE%A5_08-2022_KHMDHS.pdf
- <https://www.cambridge.org/core/journals/experimental-agriculture/article/water-relations-and-irrigation-requirements-of-pineapple-ananas-comosus-var-comosus-a-review/FA93040349101A9465F55ADA1C7BC826>
- http://www.hydroscope.gr/-http://thyamis.itia.ntua.gr/Hydro_Base/
- <https://nomosphysis.org.gr/14226/kyklades-kai-nero-pros-mia-viosimi-diaxeirisi-ton-ydatikon-poron-i-oxi/>
- <https://www.yumpu.com/xx/document/read/18725285/t->
- <https://thesis.ekt.gr/thesisBookReader/id/16786?lang=el#page/33/mode/1up>
- <https://vikaspedia.in/agriculture/crop-production/package-of-practices/spices/ginger>
- <https://www.aloevera-hellas.gr/el/aloee-cultivationn>
- http://lmt.ypeka.gr/public_view.html
- <https://gis.ktimanet.gr/gis/forestsuspension>
- <https://wastefreeaegean.gr/oristiki-lysi-sto-thema-ton-aporrimmaton-tis-tinou-egkrithike-ki-entachthike-sto-epicheirisiako-programma-ymeperaa-tou-espas-2014-2020-i-kataskevi-ch-y-t-y-kai-monadas-kobostopoiisis-stin-tino/>
- <https://www.koinignomi.gr/news/politiki/politiki-kyklades/2022/11/15/xekinoy-n-oi-ypiresies-leitoyrgias-kai-diaheirisis-toy-vioka-tinoy.html>
- <https://eletaen.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=875b7ea838cf4fe6a937c4be90fa8edd&extent=2070592.4486%2C4027438.181%2C3489263.6936%2C5196618.9657%2C102100>
- https://watereuse.org/salinity-management/le/le_5.html
- <https://www.fao.org/3/x5871e/x5871e04.htm#:~:text=The%20primary%20effect%20of%20excess,as%20the%20salt%20concentration%20increases>
- <https://extension.colostate.edu/topic-areas/agriculture/irrigation-water-quality-criteria-0-506/>
- <https://www.iniap.gov.ec/banano-platano-y-otras-musaceas/>
- <https://www.cfn.fin.ec/wp-content/uploads/downloads/biblioteca/2020/ficha-sectorial-4-trimestre-2020/FS-Banano-4T2020.pdf>
- <https://lawr.ucdavis.edu/cooperative-extension/irrigation/drought-tips/field-use-tensiometers>
- <https://prima-med.org/>
- <https://surenexus.eu/deliverables/>
- <https://www.advisian.com/en/global-perspectives/the-cost-of-desalination>
- https://www.researchgate.net/post/Can_hard_water_affect_crops
- <https://ag.umass.edu/greenhouse-floriculture/fact-sheets/water-quality-ph-alkalinity>
- https://www.earthworksturf.com/pdf/soiltest/Irrigation%20Water_Guidelines.pdf
- <https://www.fao.org/3/T0234e/T0234E06.htm#19note1>
- <https://www.meteofarm.gr/%CE%BF-%CE%BA%CE%B1%CE%B9%CF%81%CF%8C%CF%82-%CF%84%CF%8E%CF%81%CE%B1/%CF%84%CE%AE%CE%BD%CE%BF%CF%82?historical=lastyear>
- <https://ypodomes.com/entachthike-sto-espas-i-anavathmisi-toy-diktyoy-ydreysis-tis-tinoy/>