



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Ρευστών
Εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών

Αριθμητική προσομοίωση και εργαστηριακός έλεγχος υβριδικού ενεργειακού συστήματος αφαλάτωσης. Διαστασιολόγηση και καθορισμός παραμέτρων για βέλτιστη λειτουργία.

Εκτενής Περίληψη Διδακτορικής Διατριβής

ΕΡΙΚΑ Ν. ΝΤΑΒΟΥ

Διπλ. Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Επιβλέποντες:

Δ. Παπαντώνης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Ι. Αναγνωστόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Δ. Μαθιουλάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εξεταστική Επιτροπή:

Δ. Παπαντώνης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Ι. Αναγνωστόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Δ. Μαθιουλάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Γ. Παπαδάκης, Καθηγητής Γ.Π.Α.
Δ. Μανωλάκος, Επίκουρος Καθηγητής Γ.Π.Α.
Δ. Μπούρης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Β. Ριζιώτης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2018

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	5
Συνοπτική παρουσίαση της διατριβής	5
Περιγραφή του προβλήματος – οριοθέτηση διατριβής.....	6
Τεχνολογίες αφαλάτωσης	8
Αφαλάτωση με αντίστροφη ώσμωση και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	9
Μηχανές Οργανικού Κύκλου Rankine και εφαρμογές	12
Ανάλυση μοντέλου προσομοίωσης της μηχανής Οργανικού Κύκλου Rankine	14
Ανάλυση μοντέλου μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης	23
Σχεδιασμός και κατασκευή πρωτοτύπου.....	27
Τροποποίηση εκτονωτών μηχανής Οργανικού Κύκλου Rankine	28
Πειραματική διερεύνηση και αξιολόγηση της πολυβάθμιας μονάδας αντίστροφης ώσμωσης	32
Περίπτωση 1 ^η : έλεγχος για χαμηλή αλατότητα νερού τροφοδοσίας (15.150 ppm).....	33
Περίπτωση 2 ^η : έλεγχος για μεσαία αλατότητα νερού τροφοδοσίας (30.000 ppm)	38
Περίπτωση 3 ^η : έλεγχος για υψηλή αλατότητα νερού τροφοδοσίας (37.500 ppm).....	42
Συμπεράσματα πειραματικής αξιολόγησης της πολυβάθμιας μονάδας αντίστροφης ώσμωσης	48
Πειραματική διερεύνηση και αξιολόγηση της διβάθμιας μηχανής Οργανικού Κύκλου Rankine.....	54
Λειτουργία στους 70 °C	55
Λειτουργία στους 85 °C	57
Λειτουργία στους 95 °C	58
Λειτουργία στους 110 °C	59
Λειτουργία στους 120 °C	60
Λειτουργία στους 130 °C	61
Διερεύνηση λειτουργίας εκτονωτών για ενδεικτικές θερμοκρασίες λειτουργίας, μονοβάθμια & διβάθμια λειτουργία.....	64
Συμπεράσματα πειραματικής αξιολόγησης της διβάθμιας μηχανής Οργανικού Κύκλου Rankine.....	68
Θεωρητική διερεύνηση και αξιολόγηση του ενιαίου υβριδικού συστήματος αφαλάτωσης	69
Συμπεράσματα – προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	71

Εισαγωγή

Συνοπτική παρουσίαση της διατριβής

Ο σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η ανάπτυξη και η πειραματική αξιολόγηση ενός υβριδικού συστήματος αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με τη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης. Ως πηγή ενέργειας μπορεί να θεωρηθεί οποιαδήποτε πηγή θερμότητας με ονομαστικό φορτίο περί τους 110- 130 °C. Στο εργαστήριο η προσομοίωση της πηγής ενέργειας γίνεται με τη χρήση ενός ηλεκτρικού θερμαντήρα ονομαστικής ικανότητας 100 kW_{th}.

Το πρωτότυπο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αποτελείται από τρεις πανομοιότυπες μονάδες αντίστροφης ώσμωσης (RO) θαλασσινού νερού που τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια από μια διβάθμια μηχανή ORC που σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε, εγκαταστάθηκε και ελέγχθηκε πειραματικά στο εργαστήριο.

Τα βασικότερα σημεία έρευνας της διατριβής αποτελούν:

- Η προσομοίωση, ο σχεδιασμός και η κατασκευή μιας διβάθμιας μηχανής (όπου δηλαδή η εκτόνωση λαμβάνει χώρα σε δυο στάδια) Οργανικού Κύκλου Rankine (ORC) με σκοπό την έρευνα και αξιολόγηση της λειτουργίας της σε ένα μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος μέχρι 130°C.
- Ο έλεγχος βελτίωσης του βαθμού απόδοσής της σε σχέση με τη μονοβάθμια λειτουργία.
- Η διαστασιολόγηση της μηχανής και η επιλογή των κατάλληλων συνιστωσών εξοπλισμού (αντλία, εναλλάκτες θερμότητας, εκτονωτές κτλ.).
- Η επιλογή του κατάλληλου οργανικού ρευστού για την αποδοτικότερη λειτουργία της μηχανής ORC στις συνθήκες σχεδιασμού.
- Η μετατροπή των εκτονωτών για να ακολουθήσουν τις ανάγκες της παρούσας έρευνας.
- Η προσομοίωση, η επιλογή εξοπλισμού και η πειραματική αξιολόγηση της λειτουργίας ενός πολυβάθμιου συστήματος αφαλάτωσης RO σε διάφορες αλατότητες νερού τροφοδοσίας και σε διαφορετικές θερμοκρασίες λειτουργίας.
- Ο έλεγχος σε μεταβλητό φορτίο λειτουργίας.
- Η μελέτη περίπτωσης του επιλεγμένου συστήματος RO συνδυασμένου με ένα σύστημα φωτοβολταϊκών διαφόρων δυναμικοτήτων σε σχέση με μια συμβατική μονάδα RO, για μια τυπική καλοκαιρινή και μια τυπική χειμερινή ημέρα, σε τρία διαφορετικά μέρη του πλανήτη, με σκοπό την επιβεβαίωση του οφέλους από την επιλεγμένη διαμόρφωση RO.
- Η αξιολόγηση του ολοκληρωμένου υβριδικού συστήματος (ORC με RO).

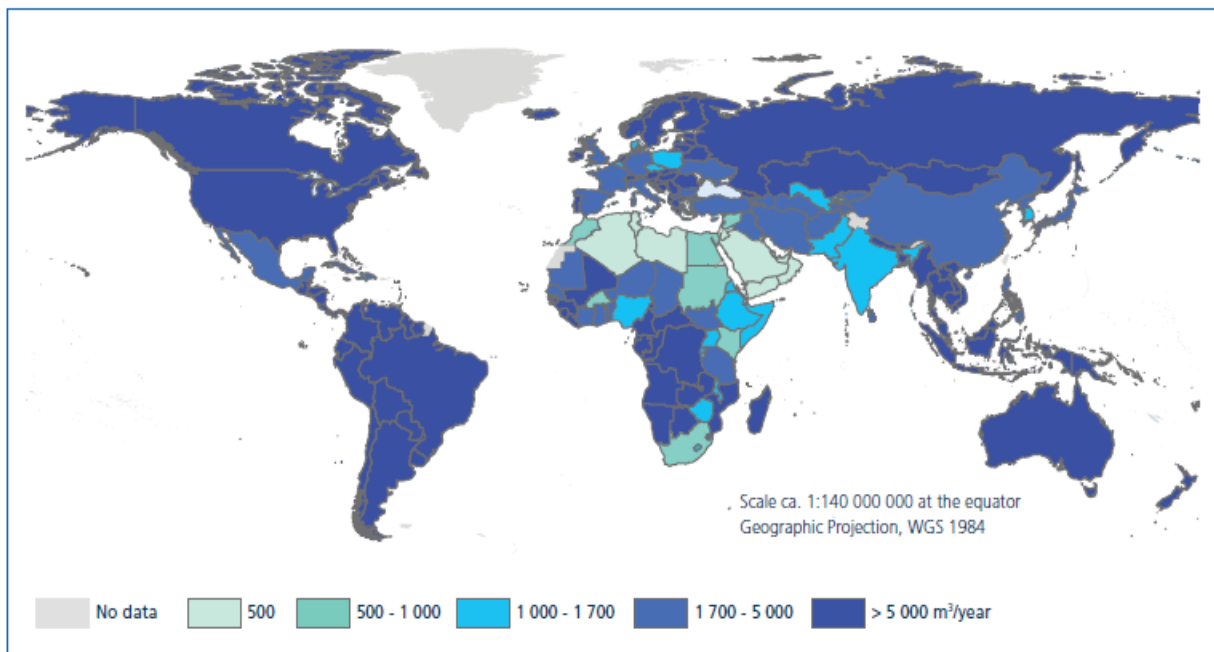
Περιγραφή του προβλήματος – οριοθέτηση διατριβής

Η αυξημένη ζήτηση σε καθαρό νερό οδηγεί σε μείωση των διαθέσιμων υδάτινων πόρων κατά 1% κάθε χρόνο. Η επιταχυνόμενη αστικοποίηση και το υψηλότερο βιωτικό επίπεδο που οδηγεί σε αύξηση της ζήτησης σε νερό, τροφή και ενέργεια από έναν διαρκώς αναπτυσσόμενο πληθυσμό οδηγεί με μαθηματική ακρίβεια σε ανισοκατανομή της διαθεσιμότητας των υδάτινων πόρων, αφήνοντας πολλές περιοχές με έλλειψη νερού για μεγάλες περιόδους.

Αποτέλεσμα αυτής της ανισοκατανομής είναι η δημιουργία περιοχών που ανήκουν σε μια από τις παρακάτω κατηγορίες:

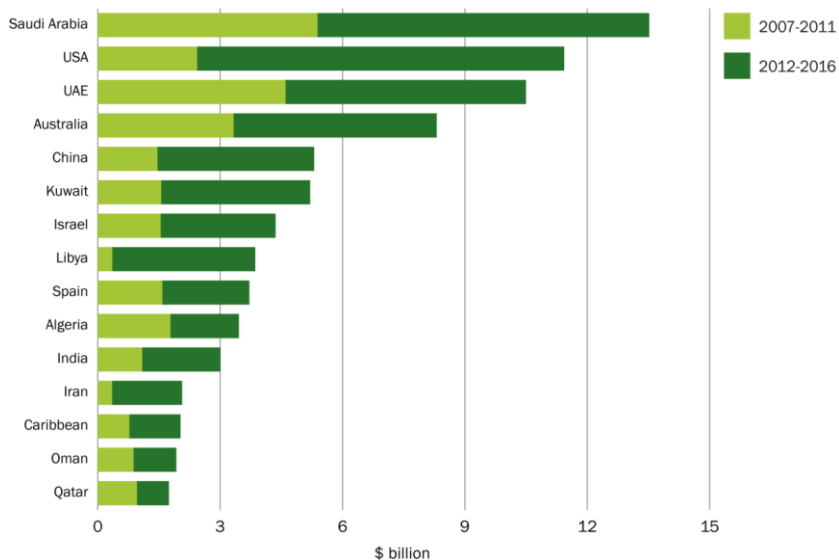
- ❑ Περιοχές με εξάντληση υδάτινων πόρων όπου η διαθεσιμότητα του νερού είναι μικρότερη από 1700 m³ κατά κεφαλήν ανά έτος
- ❑ Περιοχές με χρόνια ανομβρία όπου η διαθεσιμότητα του νερού είναι μικρότερη από 1000 m³ κατά κεφαλήν ανά έτος
- ❑ Περιοχές με απόλυτη ξηρασία όπου η διαθεσιμότητα του νερού είναι μικρότερη από 500 m³ κατά κεφαλήν ανά έτος

Το 70 % του πλανήτη καλύπτεται από νερό. Από το ποσοστό αυτό μόνο το 2.5 % είναι καθαρό νερό για ανθρώπινη κατανάλωση και χρήση και από αυτό μόνο το 1% είναι εύκολα προσβάσιμο. Συνολικά μόνο το 0.007% του συνόλου του νερού στον πλανήτη είναι ικανό να τροφοδοτήσει τα 6.8 δισεκατομμύρια του παγκόσμιου πληθυσμού και σύμφωνα με έγκυρες προβλέψεις το 2030 θα υπάρχει έλλειμμα σε πόσιμο νερό κατά 40%. Η ανάγκη για επεξεργασία και εξευγενισμό του υφάλμυρου και θαλασσινού νερού είναι προφανής και πιο σημαντική από ποτέ.



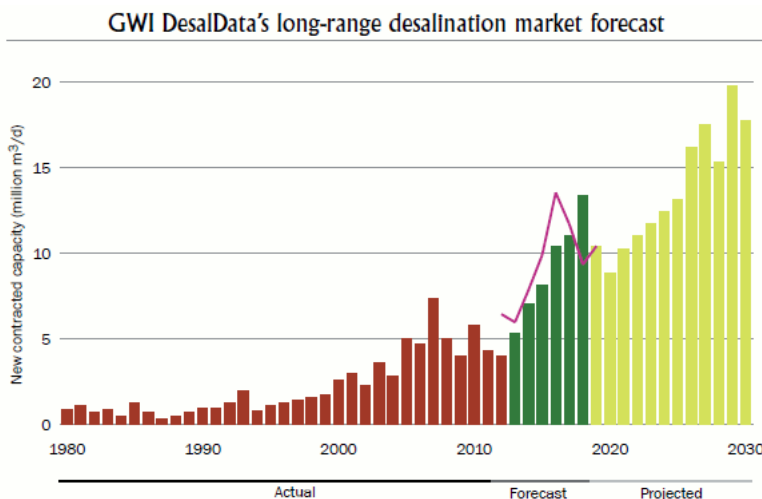
Σύνολο διαθεσιμότητας υδάτινων πόρων (m³/ κατά κεφαλήν/ έτος), 2014

Το 2015 η παραγόμενη ποσότητα νερού από αφαλάτωση ήταν 88.6 εκατομμύρια m³/ έτος και άγγιξε τα 95.6 εκατομμύρια m³/ έτος μέχρι το 2016. Στο άμεσο μέλλον η εμπιστοσύνη στην κατανάλωση αφαλατωμένου νερού θα αυξηθεί ραγδαία και η πρόοδος της τεχνολογίας αναμένεται να μειώσει το κόστος του παραγόμενου νερού κατά 20% μέσα στα επόμενα 5 έτη και κατά 60% στα επόμενα 20 έτη. Η τεχνολογία της αφαλάτωσης , ειδικότερα συνδυασμένη με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα αποτελέσει τον πλέον οικονομικά απόδοτικό ανταγωνιστή στην παραγωγή καθαρού πόσιμου νερού.



Οι 15 μεγαλύτερες αγορές αφαλάτωσης παγκοσμίως (σε δισεκατομμύρια \$ επένδυσης)

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, την τελευταία τετραετία η αγορά τεχνολογιών αφαλάτωσης έχει αυξηθεί ραγδαία σε σχέση με την προηγούμενη τετραετία και ειδικά στις χώρες της Μέσης Ανατολής που αποτελούν και πρωτοπόρους στην εφαρμογή τέτοιων τεχνολογιών παγκοσμίως. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η εξέλιξη των εγκατεστημένων αφαλατώσεων νερού και μια πρόβλεψη για το μέλλον, σε συνολικό διάστημα πενήντα ετών.



Εξέλιξη εγκαταστάσεων αφαλάτωσης νερού σε ορίζοντα 50 ετών

Τεχνολογίες αφαλάτωσης

Οι τεχνολογίες αφαλάτωσης κατηγοριοποιούνται με δυο βασικούς τρόπους: βάσει της χρησιμοποιούμενης πηγής ενέργειας και βάσει της διεργασίας της αφαλάτωσης.

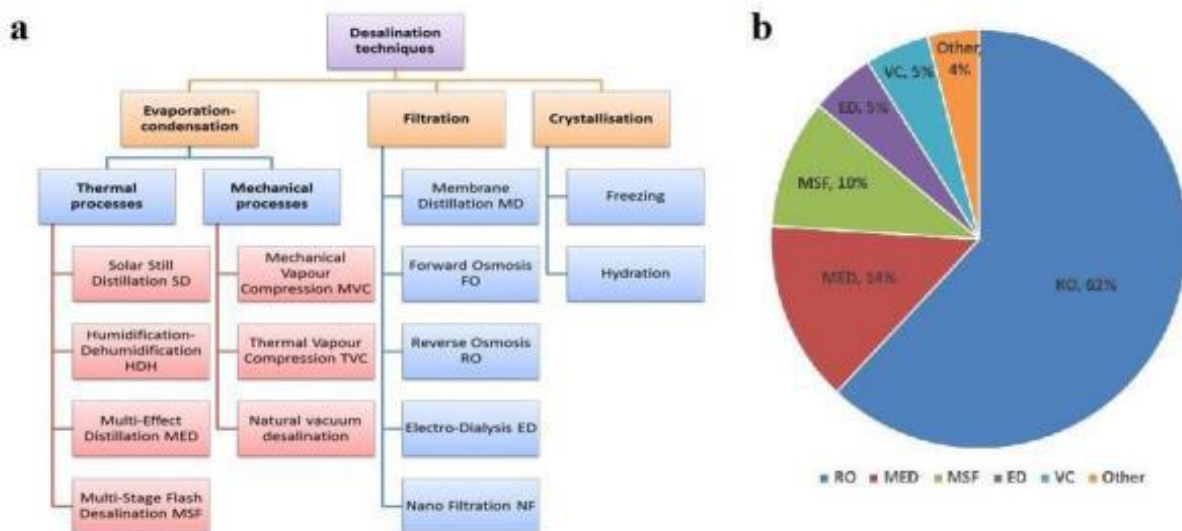
Βάσει της πηγής ενέργειας διακρίνονται τέσσερις βασικές κατηγορίες:

- **Τα θερμικά συστήματα** αφαλάτωσης νερού (όπως η πολυβάθμια απόσταξη- MED, η πολυβάθμια απόσταξη με θερμική συμπίεση ατμού- MED- TVC, η πολυβάθμια απόσταξη με μηχανική συμπίεση ατμού- MED- MVC, η πολυβάθμια εκτόνωση- MSF, η ηλιακή απόσταξη, η κρυστάλλωση με ψύξη κ.ά.)
- **Τα χημικά συστήματα** αφαλάτωσης νερού (όπως η αφαλάτωση με εξαγωγή υγρού- υγρού, η αφαλάτωση με υδρικό αέριο, η αφαλάτωση με προσρόφηση- AD κ.ά.)
- **Τα ηλεκτρικά συστήματα** αφαλάτωσης νερού, εκ των οποίων κυριότερος εκπρόσωπος είναι η μέθοδος της αφαλάτωσης με ηλεκτροδιάλυση- ED
- **Τα μηχανικά συστήματα** αφαλάτωσης νερού (όπως η ώσμωση- FO, η αντίστροφη ώσμωση- RO, η υπερδιήθηση & νανοδιήθηση)

Βάσει της διεργασίας αφαλάτωσης διακρίνονται τρεις βασικές κατηγορίες:

- Τα συστήματα αφαλάτωσης **με ατμοποίηση- συμπύκνωση**
- Τα συστήματα αφαλάτωσης **με φίλτραση**
- Τα συστήματα αφαλάτωσης **με κρυστάλλωση**

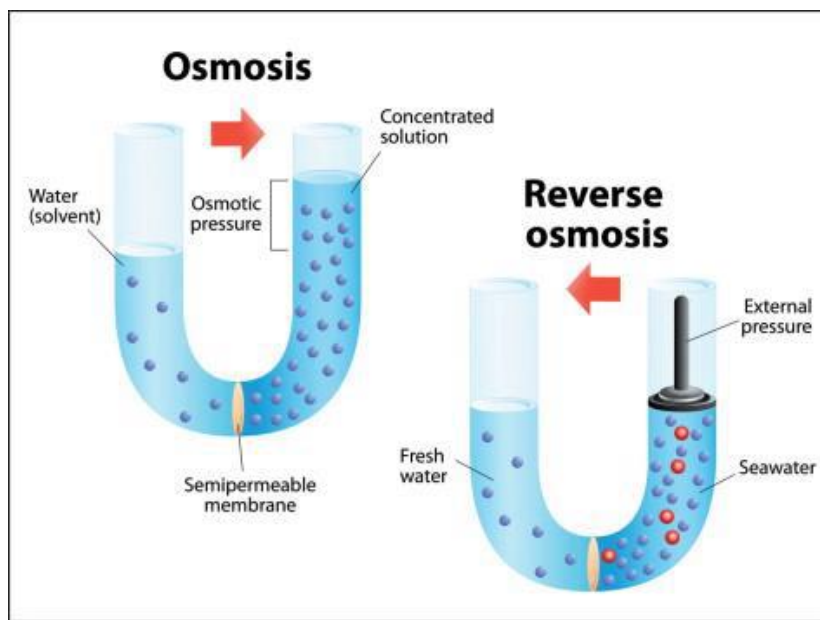
Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κατηγοριοποίηση των τεχνολογιών αφαλάτωσης και η κατανομή τους στην παγκόσμια παραγωγή νερού. Το μεγαλύτερο ποσοστό ανήκει στην τεχνολογία αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση και ο λόγος θα εξηγηθεί αμέσως παρακάτω.



Βασικές διεργασίες αφαλάτωσης και κατανομή τους στην παγκόσμια παραγωγή νερού

Αφαλάτωση με αντίστροφη ώσμωση και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Η αφαλάτωση με αντίστροφη ώσμωση πραγματοποιείται με εφαρμογή πίεσης σε μια ημιπερατή μεμβράνη υψηλότερη της ωσμωτικής, η οποία επιτρέπει τη διέλευση στα μόρια του νερού και κατακρατεί σχεδόν όλα τα διαλυμένα σωματίδια (άλατα). Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διαφορά των δυο φαινομένων: της ώσμωσης και της αντίστροφης ώσμωσης.



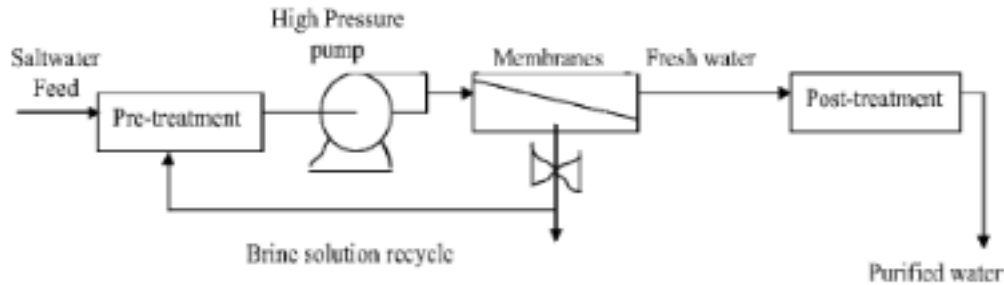
Το φαινόμενο της αντίστροφης ώσμωσης

Τα βασικότερα **πλεονεκτήματα** της μεθόδου αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση συνοψίζονται στα εξής:

- ✓ Αξιοπιστία
- ✓ Υψηλός βαθμός ανάκτησης συστήματος (~85% για υφάλμυρα συστήματα, ~50% για θαλασσινά συστήματα)
- ✓ Υψηλός βαθμός απόρριψης αλάτων (95- 99%)
- ✓ Καλύτερος έλεγχος ποιότητας του παραγόμενου νερού (π.χ. πόσιμο, για άρδευση, για αιμοδιάλυση, για νερό πύργων ψύξης, για νερό λεβήτων, για γενική χρήση κτλ.)
- ✓ Χαμηλό λειτουργικό κόστος ανά κυβικό παραγόμενου νερού (~ cents του €)
- ✓ Μεγάλο εύρος ποιότητας νερού προς επεξεργασία
- ✓ Δυνατότητα αφαλάτωσης νερού τριτοβάθμιας επεξεργασίας βιολογικού καθαρισμού

Η διεργασία περιλαμβάνει τρία διακριτά στάδια:

- το στάδιο της προκατεργασίας όπου το νερό προετοιμάζεται για την είσοδό του στις μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης (φίλτραση, χημική επεξεργασία για προστασία των μεμβρανών κ.ά.)
- το στάδιο της κυρίως κατεργασίας (αφαλάτωση με αντίστροφη ώσμωση)
- το στάδιο της μετακατεργασίας όπου προσδίδονται στο νερό όλα τα απαραίτητα χημικά στοιχεία που απαιτούνται αναλόγως της χρήσεώς του



Στάδια επεξεργασίας αφαλάτωσης νερού με τη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης

Ένα βασικό μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η υψηλή κατανάλωση ενέργειας των αντλιών του συστήματος (~3-10 kWh/ m³ παραγόμενου ποσίου νερού από θαλασσινό). Για το λόγο αυτό και σε συνδυασμό με την προστασία του περιβάλλοντος και τη στροφή στην «πράσινη ενέργεια», αυξάνονται διαρκώς οι μονάδες αφαλάτωσης συνδυασμένες με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ- RO).

Οι κύριες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που τροφοδοτούν μονάδες αφαλάτωσης είναι:

- **η ηλιακή ενέργεια:** περίπου το 70% των συστημάτων ΑΠΕ- RO τροφοδοτούνται με ενέργεια από τον Ήλιο (φωτοβολταϊκά, ηλιακούς συλλέκτες κτλ.)
- **η ενέργεια από ανεμογεννήτριες:** κυρίως σε παράκτιες περιοχές (π.χ. πρόγραμμα ARODESA I, ARODESA II, Κανάρια Νησιά, 15 kW ανεμογεννήτρια με RO δυναμικότητας 10 m³/d & 15 m³/d αντίστοιχα)
- **η ενέργεια γεωθερμίας:** διακρίνεται σε χαμηλής θερμοκρασίας (<100°C), μέσης θερμοκρασίας (100- 150 °C) και υψηλής θερμοκρασίας (>150°C). Το πρώτο σύστημα εγκαταστάθηκε στην Αμερική το 1972. Αποτελεί μια τεχνολογία ευρέως διαδεδομένη στις χώρες του Κόλπου.

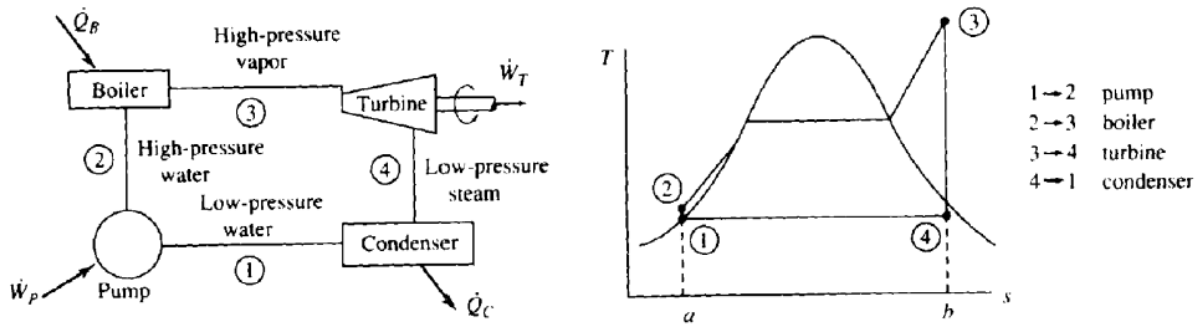
	TYPICAL CAPACITY	ENERGY DEMAND	WATER GENERATION COST	TECHNICAL DEVELOPMENT STAGE
SOLAR STILL	< 0.1 m ³ /d	solar passive	1–5 €/m ³	applications
SOLAR MEH	1–100 m ³ /d	thermal: 100 kWh/m ³ electrical: 1.5 kWh/m ³	2–5 €/m ³	applications/ advanced R&D
SOLAR MD	0.15–10 m ³ /d	thermal: 150–200 kWh/m ³	8–15 €/m ³	advanced R&D
SOLAR/CSP MED	> 5,000 m ³ /d	thermal: 60–70 kWh/m ³ electrical: 1.5–2 kWh/m ³	1.8–2.2 €/m ³ (prospective cost)	advanced R&D
PV-RO	< 100 m ³ /d	electrical: BW: 0.5–1.5 kWh/m ³ SW: 4–5 kWh/m ³	BW: 5–7 €/m ³ SW: 9–12 €/m ³	applications/ advanced R&D
PV-EDR	< 100 m ³ /d	electrical: only BW: 3–4 kWh/m ³	BW: 8–9 €/m ³	advanced R&D
WIND-RO	50–2,000 m ³ /d	electrical: BW: 0.5–1.5 kWh/m ³ SW: 4–5 kWh/m ³	units under 100 m ³ /d BW: 3–5 €/m ³ SW: 5–7 €/m ³ about 1,000 m ³ /d 1.5–4 €/m ³	applications/ advanced R&D
WIND-MVC	< 100 m ³ /d	electrical: only SW: 11–14 kWh/m ³	4–6 €/m ³	basic research
WAVE-RO	1,000–3,000 m ³ /d	pressurised water: 1.8–2.4 kWh/m ³ electrical: 2.2–2.8 kWh/m ³	0.5–1.0 €/m ³ (prospective cost)	basic research

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και αντίστροφη ώσμωση

Σχεδόν όλες οι ΑΠΕ μπορούν να συνδυαστούν με μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης και να αποτελέσουν αποδοτικά και αυτόνομα συστήματα επεξεργασίας νερού. Μια μηχανή που βασίζεται στον Οργανικό Κύκλο Rankine (ORC) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετατρέψει οποιαδήποτε πηγή θερμότητας σε ηλεκτρισμό ο οποίος στη συνέχεια θα τροφοδοτήσει ένα σύστημα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση.

Μηχανές Οργανικού Κύκλου Rankine και εφαρμογές

Η μηχανή Οργανικού Κύκλου Rankine (ORC) είναι μια θερμική μηχανή που μετατρέπει τη θερμότητα σε μηχανικό έργο. Βασίζεται στο θερμοδυναμικό κύκλο Rankine, ο οποίος παρουσιάζεται σχηματικά στην επόμενη εικόνα.



Ο θερμοδυναμικός κύκλος Rankine και οι κύριες διεργασίες του

Οι βασικές **διεργασίες** του θερμοδυναμικού κύκλου Rankine είναι:

- Ισεντροπική συμπίεση σε μια αντλία
- Ισοβαρής θέρμανση σε έναν λέβητα
- Ισεντροπική εκτόνωση σε έναν στρόβιλο
- Ισοβαρής ψύξη σε έναν συμπυκνωτή

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου ορίζεται ως η θερμική ενέργεια που απορροφά σε σχέση με το μηχανικό έργο που παράγει και πιο συγκεκριμένα, βάσει του παραπάνω

$$\eta_{th_Rankine} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2}$$

διαγράμματος ορίζεται:

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης του κύκλου:

- Με αύξηση πίεσης στο λέβητα, όπου ωστόσο δημιουργεί κίνδυνο εμφάνισης συμπυκνωμάτων στην είσοδο του στρόβιλου
- Με αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας στον κύκλο, που καθιστά επισφαλής τη χρήση ορισμένων υλικών στο λέβητα
- Με μείωση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης, η οποία οριοθετείται από τη διεργασία μεταφοράς θερμότητας στο συμπυκνωτή

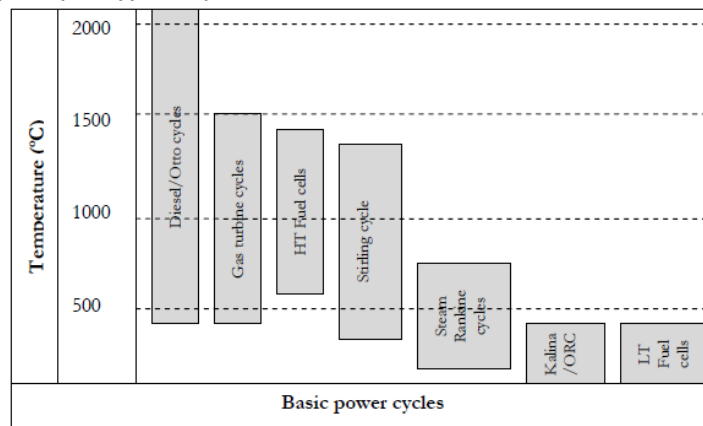
Με βάση την προσπάθεια βελτίωσης του θερμικού κύκλου απόδοσης, οι παρακάτω παραλλαγές χρησιμοποιούνται στις μηχανές κύκλου Rankine:

- **Υπερθέρμανση:** εφαρμόζεται στο ρευστό μεταφοράς θερμότητας μέσα στον λέβητα και προλαμβάνει την εμφάνιση υδρατμών στον εκτονωτή (αυξάνει το βαθμό απόδοσης όταν το εργαζόμενο μέσο ανήκει στην κατηγορία των «υγρών ρευστών»)
- **Αναθέρμανση:** για την αποφυγή δημιουργίας ατμού στον εκτονωτή, το ρευστό αναθερμαίνεται κατά τη διάρκεια της εκτόνωσης, χωρίς να δημιουργείται πρόβλημα με

τα υλικά των συνιστωσών της μηχανής (αυξάνει το παραγόμενο έργο, απαιτεί ειδικό εξοπλισμό στον εκτονωτή- διβάθμια εκτόνωση υψηλής και χαμηλής πίεσης)

- **Αναγέννηση σε ανοιχτό ή κλειστό θερμοαντήρα νερού:** γίνεται χρήση ατμού από την εκτόνωση για προθέρμανση του εργαζόμενου μέσου πριν την είσοδο στο λέβητα (ακριβότερος εξοπλισμός)
- **Ημι- υπερκρίσιμος ή υπερκρίσιμος κύκλος:** η πίεση στον λέβητα αυξάνεται πέραν του «κρίσιμου σημείου» (το τελευταίο σημείο θερμοδυναμικής ισορροπίας στην καμπύλη T-s του ρευστού). Έχει αποδειχθεί καλύτερος βαθμός απόδοσης, καλύτερη λειτουργία των εναλλακτών θερμότητας, αλλά είναι απαραίτητος επιπρόσθετος εξοπλισμός ασφαλείας εξαιτίας των υψηλών πιέσεων που αυξάνει το κόστος και καθυστερεί την εφαρμογή τους.

Ο Οργανικός Κύκλος Rankine (ORC) είναι ο κύκλος που βασίζεται στο θερμοδυναμικό κύκλο Rankine, αλλά χρησιμοποιεί ως εργαζόμενο μέσο ένα οργανικό ρευστό (ρευστό που έχει στη σύστασή του άνθρακα). Τα οργανικά ρευστά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασίες μέχρι 400 °C δεν χρειάζονται υπερθέρμανση, γεγονός που οδηγεί στην αύξηση του βαθμού απόδοσης του κύκλου. Η τεχνολογία ORC αποτελεί μια εξαιρετική λύση στη μετατροπή θερμικής ενέργειας σε μηχανικό έργο και από εκεί σε ηλεκτρική ενέργεια από πηγές θερμότητας σχετικά χαμηλών θερμοκρασιών (80- 350 °C). Όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα, σε θερμοκρασιακό εύρος μέχρι 350~ 400 °C, η τεχνολογία ORC μαζί με τις μηχανές Kalina, Robinson και τις κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας αποτελούν τους καταλληλότερους και ευρέως εφαρμοζόμενους κύκλους ισχύος. Μάλιστα, όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία και από πειραματικά αποτελέσματα, οι μηχανές ORC έχουν επιδείξει καλύτερους βαθμούς απόδοσης από τις μηχανές που βασίζονται στον κύκλο Kalina ή Robinson (οι οποίες επιπροσθέτως χρησιμοποιούν την επικίνδυνη αμμωνία ως εργαζόμενο μέσο), ενώ οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν μια περίπλοκη και ακριβή ακόμη τεχνολογία, πολλές φορές ασύμφορη σε σχέση με την τεχνολογία του ORC.



Βασικοί κύκλοι ισχύος

Οι μηχανές ORC συνδυάζονται με όλες σχεδόν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και πιο συγκεκριμένα, συναντώνται εφαρμογές:

- ORC με **συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες**
- ORC με **βιομάζα**
- ORC με **γεωθερμία**
- ORC για **ανάκτηση θερμότητας** (π.χ. θερμικά απόβλητα βιομηχανίας)

Ανάλυση μοντέλου προσομοίωσης της μηχανής Οργανικού Κύκλου Rankine

Πρώτο βήμα της παρούσας διατριβής αποτελεί η προσομοίωση και ο σχεδιασμός μιας διβάθμιας μηχανής ORC για λειτουργία σε θερμικό φορτίο θερμοκρασίας 120 ~130 °C. Η διβάθμια διαμόρφωση της μηχανής υπαγορεύεται από το γεγονός ότι για τη θερμοκρασία σχεδιασμού ~120°C ο λόγος πίεσης της εκτόνωσης του κύκλου προκύπτει πολύ υψηλός (~10). Προκύπτει επομένως ανάγκη διαμοιρασμού της εκτόνωσης, με λόγο πίεσης ~3- 4 σε κάθε στάδιο.

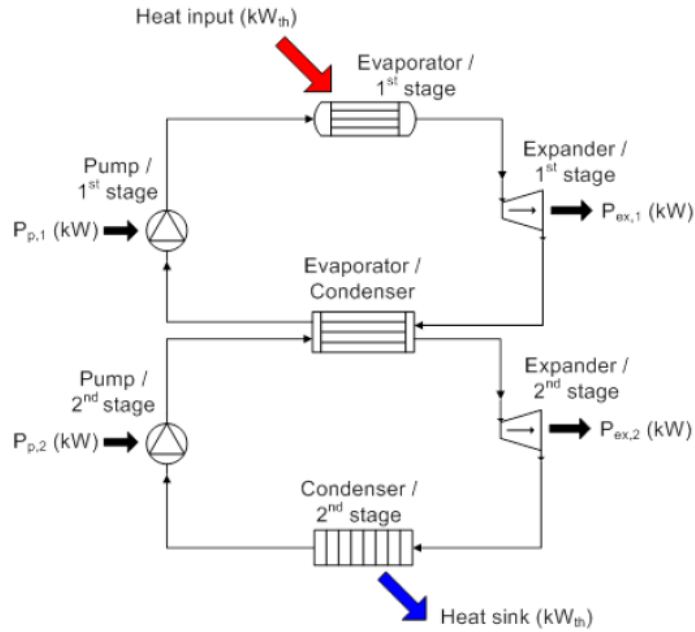
Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της διβάθμιας διαμόρφωσης είναι:

- Ο αυξημένος θερμικός βαθμός απόδοσης σε κάθε στάδιο εκτόνωσης
- Ο βελτιωμένος θερμοδυναμικός κύκλος που επιτρέπει τη χρήση διαφόρων εργαζόμενων μέσων
- Ο αυξημένος θερμικός βαθμός απόδοσης του συστήματος στη λειτουργία σε μερικό φορτίο (λειτουργία στον ονομαστικό λόγο πίεσης)
- Η δυνατότητα λειτουργίας σε χαμηλό θερμικό φορτίο με παράκαμψη του ενός σταδίου εκτόνωσης
- Ο καλύτερος έλεγχος της κατάστασης του οργανικού ρευστού κατά την εκτόνωση, για αποφυγή εκτόνωσης σε διφασική περιοχή που οδηγεί σε μείωση της παραγόμενης ισχύος

Ωστόσο υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα της διβάθμιας διαμόρφωσης, με κυριότερα:

- Το υψηλότερο κόστος κτήσης και εγκατάστασης σε σχέση με τη μονοβάθμια διαμόρφωση
- Το πιο περίπλοκο σύστημα ελέγχου

Υπάρχουν δυο πιθανές διαμορφώσεις μηχανής διβάθμιου Οργανικού Κύκλου Rankine: το βαθμωτό (cascade) σύστημα ORC και το σύστημα ORC με δυο εκτονωτές συνδεδεμένους σε σειρά. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι δυο αυτές διαμορφώσεις.



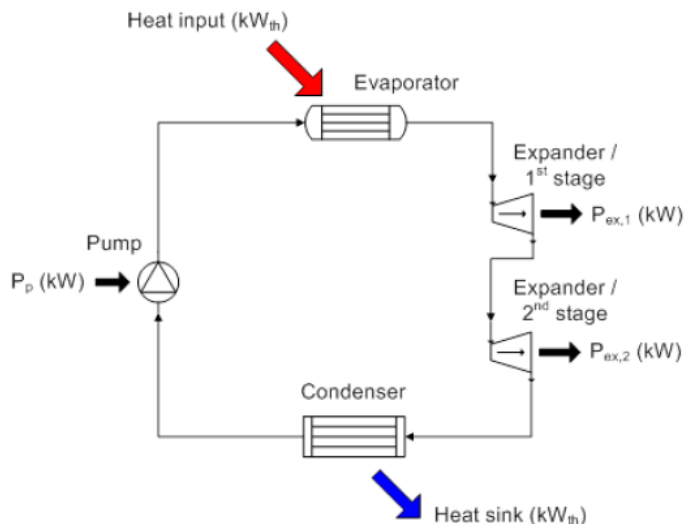
Σύστημα Cascade ORC

Το cascade σύστημα ORC αποτελείται από δυο διακριτούς κύκλους ORC οι οποίοι συνδέονται μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας που αποτελεί συμπυκνωτή της βαθμίδας υψηλής θερμοκρασίας και ατμοποιητή της βαθμίδας χαμηλής θερμοκρασίας. Στους δυο κύκλους είναι δυνατό (και σύνηθες) να χρησιμοποιούνται δυο διαφορετικά οργανικά ρευστά για επίτευξη καλύτερου βαθμού απόδοσης του συστήματος.

Τα κρίσιμα σημεία σχεδιασμού ενός τέτοιου συστήματος είναι:

- Η θερμοκρασία συμπύκνωσης της ανώτερης βαθμίδας (εξαρτάται από τη θερμοκρασία ατμοποίησης της χαμηλότερης βαθμίδας)
- Η θερμοκρασία ατμοποίησης της ανώτερης βαθμίδας
- Η ροή μάζας και στις δυο βαθμίδες (καθορίζει τη συμμετοχή κάθε βαθμίδας στην παραγωγή ισχύος)
- Η μέγιστη πίεση της κάθε βαθμίδας
- Η θερμοκρασία συμπύκνωσης της χαμηλότερης βαθμίδας

Η δεύτερη διαμόρφωση ενός ORC συστήματος με δυο εκτονωτές συνδεδεμένους σε σειρά φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Σύστημα ORC με δυο εκτονωτές σε σειρά

Το σύστημα αυτό αποτελείται από έναν και μόνο κύκλο ORC. Το οργανικό ρευστό ωθείται από την αντλία σε έναν εναλλάκτη θερμότητας (ατμοποιητή) όπου ατμοποιείται. Στη συνέχεια, το ατμοποιημένο ρευστό εκτονώνεται σε δυο εκτονωτές που είναι συνδεδεμένοι σε σειρά και οδηγείται κορεσμένο πλέον σε έναν άλλο εναλλάκτη θερμότητας (συμπυκνωτή) όπου και υγροποιείται. Έπειτα οδηγείται εκ νέου στην αντλία και ο κύκλος επαναλαμβάνεται. Από την εκτόνωση στους εκτονωτές παράγεται μηχανικό έργο που μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρισμό μέσω μιας γεννήτριας.

Τα κρίσιμα σημεία σχεδιασμού ενός τέτοιου συστήματος είναι:

- Η θερμοκρασία ατμοποίησης του οργανικού ρευστού
- Η υψηλή πίεση θερμοδυναμικού κύκλου
- Η ενδιάμεση πίεση εκτόνωσης
- Η ροή μάζας του οργανικού ρευστού
- Η θερμοκρασία συμπύκνωσης

Οι λόγοι επιλογής της δεύτερης σχεδίασης είναι η χρήση λιγότερου εξοπλισμού που μειώνει το κόστος κτήσης/ εγκατάστασης, ο πολύ πιο εύκολος έλεγχος του συστήματος και το γεγονός ότι ερευνητική προσομοίωση που διεξήχθη στα πλαίσια της παρούσας εργασίας απέδειξε ότι η δεύτερη διαμόρφωση οδηγεί σε βαθμό απόδοσης κατά 1% περίπου παραπάνω από την πρώτη.

Έπειτα από την επιλογή της βέλτιστης διβάθμιας διαμόρφωσης, ακολουθεί η επιλογή του καταλληλότερου οργανικού ρευστού για την παρούσα εφαρμογή. Το οργανικό ρευστό που θα επιλεγεί οφείλει να πληρεί ορισμένα κριτήρια, και πιο συγκεκριμένα πρέπει να διαθέτει:

- Κατάλληλα υψηλή κρίσιμη θερμοκρασία και πίεση για να παραμένει εντός υποκρίσιμων συνθηκών (θερμοδυναμική ισορροπία) σε όλες τις διεργασίες του κύκλου
- Χαμηλό ειδικό όγκο (m^3/kg) στην είσοδο των εκτονωτών και χαμηλό ειδικό λόγο όγκων στην είσοδο και έξοδο των εκτονωτών για τη χρήση μικρότερων εκτονωτών
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα για την αποδοτική μεταφορά θερμότητας στους εναλλάκτες, επιτρέποντας κατ' αυτό τον τρόπο τη χρήση μικρότερων εναλλακτών
- Υψηλή πτώση αδιαβατικής ενθαλπίας στον εκτονωτή για μέγιστη παραγωγή ισχύος
- Υψηλή ειδική θερμότητα (C_p) για μέγιστη θερμική ικανότητα
- Υψηλή χημική και θερμική ισορροπία ειδικά σε υψηλή θερμοκρασία
- Χαμηλό κόστος αγοράς και διαθεσιμότητα
- Αυτο-λίπανση για αρμονική περιστροφή στον εκτονωτή, και να είναι:
- Μη τοξικό, μη εύφλεκτο, μη διαβρωτικό, συμβατό με τα χρησιμοποιούμενα υλικά του εξοπλισμού και λιπαντικά (αν χρησιμοποιούνται)
- Ξηρό ή ισεντροπικό ρευστό (ευθεία ή αρνητική κλίση της καμπύλης ατμού) για αποφυγή κινδύνου δημιουργίας συμπυκνώματος κατά την εκτόνωση και
- Σύμφωνα με τους περιβαλλοντικούς όρους χρήσης (μηδενικό ODP, χαμηλό GWP, να μην είναι υπό απόσυρση βάσει του Πρωτοκόλλου του Κιото και του Montreal)

Τα υποψήφια οργανικά ρευστά για την παρούσα εφαρμογή φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Organic fluid	Properties			Environmental data		
	Molecular weight (kg/kmol)	Critical temperature ($^{\circ}C$)	Critical pressure (bar)	ALT ¹	GWP ² (100 years)	ODP ³
Propane (R-290)	44.10	96.68	42.47	0.04	~20	0
HFC-134a	102.03	101.06	40.59	14	1430	0
HFC-227ea	170.03	101.65	29.26	42	3220	0
HFC-236ea	152.04	139.29	35.02	8	710	0
HFC-245fa	134.05	154.05	36.40	7.6	1030	0
Butane (R-600)	58.12	151.98	37.96	0.02	~20	0

¹ALT: Atmospheric life time

²GWP: Global Warming Potential

³ODP: Ozone deployment Potential

Από αυτά, τα δύο πλέον κατάλληλα απεδείχθησαν το Βουτάνιο R- 600 και ο υδροφθοράνθρακας R245fa. Καθώς όμως το Βουτάνιο είναι εύφλεκτο και επικίνδυνο στη χρήση, το τελικά επιλεχθέν οργανικό ρευστό για το παρόν πείραμα είναι το R245fa.

Στο θερμικό κύκλωμα της ηλεκτρικής αντίστασης που προσομοιώνει τη θερμική πηγή ενέργειας επιλέγεται η γλυκόλη MEG έναντι του νερού, καθώς για τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης του πειράματος, η χρήση του νερού καθίσταται επικίνδυνη (απαιτείται υψηλή πίεση για να παραμένει υγροποιημένο σε θερμοκρασία $120 \sim 130^{\circ}C$).

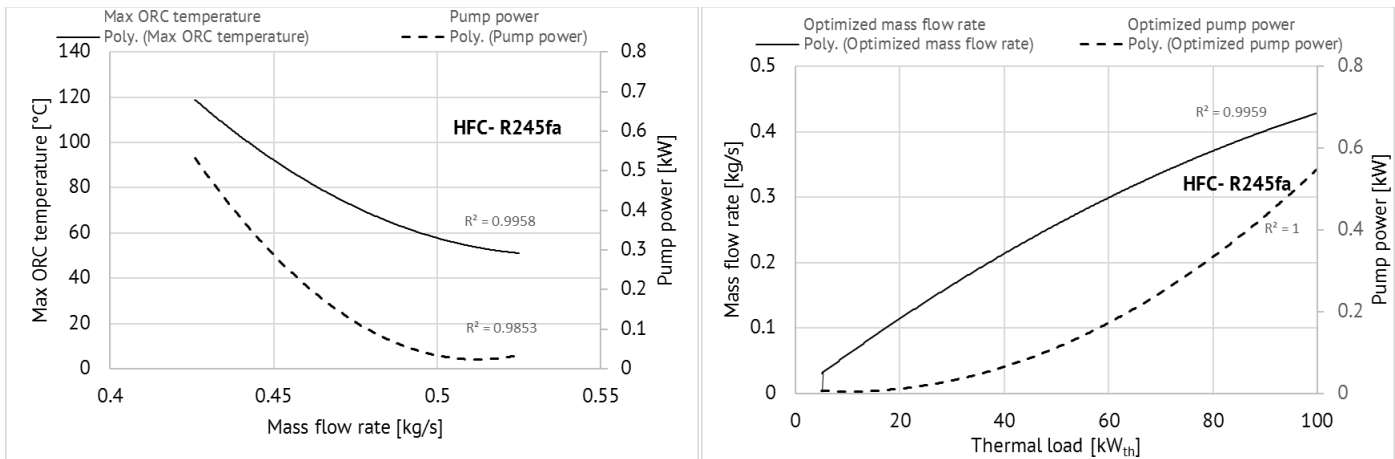
Κατά το σχεδιασμό του συστήματος του Οργανικού Κύκλου Rankine έγιναν κάποιες παραδοχές οι οποίες απετέλεσαν και τα στοιχεία εισόδου στο σύστημα προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, οι *παραδοχές σχεδιασμού* συνοψίζονται στα εξής:

- Θερμοκρασία λειτουργίας: 110- 130°C
- Μέγιστη πίεση στο θερμικό κύκλωμα: 5 bar (επιτρεπόμενο από τη χρήση MEG, όχι από νερό)
- Το θερμικό φορτίο ισούται με την ικανότητα του ηλεκτρικού θερμαντήρα (σταθερή παροχή μάζας στην αντλία του θερμικού κυκλώματος)
- Η ταχύτητα περιστροφής του εκτονωτή παραμένει σταθερή (μεταβολή μέγιστης πίεσης στο σύστημα από την αντλία)
- Μικρή υπόψυξη (~5K) και μικρή υπερθέρμανση (~5K) θεωρούνται πριν την αντλία και πριν τον εκτονωτή (αποφυγή σπηλαίωσης και εκτόνωσης στη διφασική περιοχή του ρευστού)
- Θερμοκρασία συμπύκνωσης στον κύκλο: σταθερή 40 °C (~ιση με τη θερμοκρασία ατμοποίησης του ρευστού)
- Ενδιάμεση πίεση εκτόνωσης: $\frac{P_3}{P_4} = \frac{P_4}{P_5} \Rightarrow P_4 = \sqrt{P_3 * P_5}$
- Όταν το θερμικό φορτίο πέσει κάτω από την τιμή των 5 kWth, το σύστημα θεωρητικά σταματά να λειτουργεί καθώς δεν μπορεί να καλύψει τις ιδιοκαταναλώσεις του (T~50°C)
- Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης αντλίας και εκτονωτών 85%, μηχανικός βαθμός απόδοσης αντλίας 75% και εκτονωτών 85%, απόδοση εναλλάκτη 60%

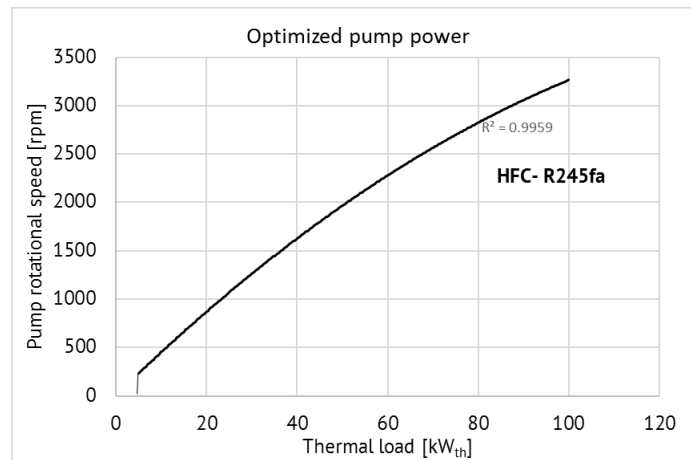
Ο σχεδιασμός του συστήματος γίνεται με το σχεδιασμό κάθε συνιστώσας ξεχωριστά. Τα κριτήρια σχεδιασμού για την αντλία του συστήματος είναι η πίεση λειτουργίας της (~10 – 35 bar) και η διαχείριση της ροής μάζας του οργανικού ρευστού που προκύπτει ~ 0.5- 1 kg/s. Βασικό στοιχείο που πρέπει να διαθέτει η αντλία είναι να μην έχει ανάγκη από επιπλέον λίπανση κατά τη λειτουργία της λόγω του μικρού ιξώδους του ρευστού. Για το λόγο αυτό επιλέγεται ο τύπος της αντλίας εμβόλου- διαφράγματος που έχει κατά το δυνατόν ελάχιστα κινούμενα μέρη. Οι σχέσεις που διέπουν τη λειτουργία της αντλίας είναι:

- Θερμικό φορτίο στην είσοδο: $Q_{ORC} = m_{ORC} \cdot (h_3 - h_2)$
- Παροχή όγκου: $\dot{V} = c * (rpm)$
- Παροχή μάζας: $\dot{m} = \frac{\dot{V}_p}{v_p} = \frac{10^{-6} * (rpm)}{v_p}$

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της αντλίας του συστήματος.



Μεταβολή μέγιστης θερμοκρασίας και ισχύος αντλίας με τη μεταβολή ροής μάζας σε 100 kW_{th} φορτίο εισόδου και βέλτιστη ροή μάζας ρευστού και ισχύος αντλίας κατά τη μεταβολή του θερμικού φορτίου



Βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής αντλίας κατά τη μεταβολή του θερμικού φορτίου

Τα κριτήρια σχεδιασμού των εκτονωτών του συστήματος είναι τα εξής:

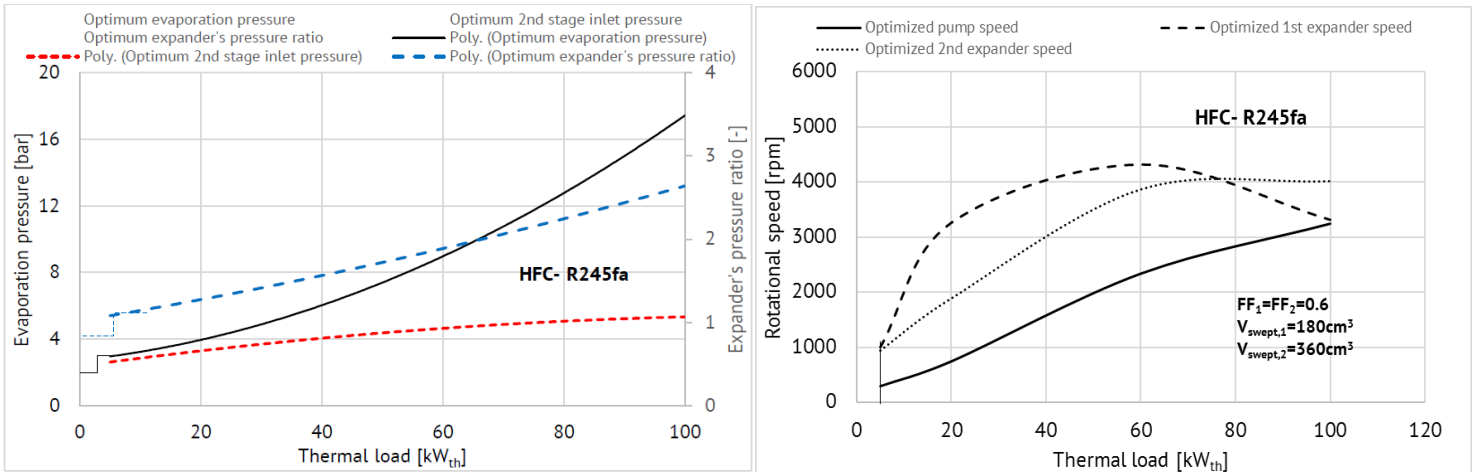
- Για βέλτιστη διβάθμια λειτουργία οι δυο εκτονωτές πρέπει να έχουν ίδιο λόγο πίεσης λειτουργίας
- Από ένα κρίσιμο φορτίο (~30 %, λόγος πίεσης <2) και κάτω, ο ένας εκτονωτής παρακάμπτεται πλήρως, ώστε πάντα να λειτουργούν με υψηλή απόδοση (~60%)

Ο καταλληλότερος τύπος εκτονωτών για τη συγκεκριμένη εφαρμογή προκύπτει ο εκτονωτής ελικοειδούς τύπου (scroll). Οι σχέσεις που διέπουν τη λειτουργία των εκτονωτών είναι:

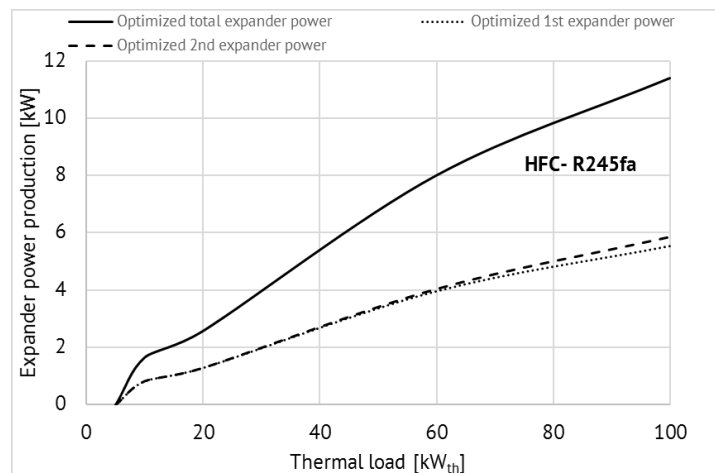
- Η πίεση εισόδου στον εκτονωτή: $p_{ex,in} = \rho_{ex,in} * R * (T_{ex,in} + 273.15)$
- Η παροχή όγκου: $V_{ex,in} = V_{swept} * FF * \frac{rpm_{ex}}{60}$ από όπου προκύπτουν:

$$p_{ex,in} = \rho_{ex,in} * R * (T_{ex,in} + 273.15) \Rightarrow p_{ex,in} = \frac{10^{-6} * (rpm_p)}{V_{swept} * FF * \frac{(rpm_{ex})}{60}} * R * (T_{ex,in} + 273.15)$$

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των ΕΚΤΟΝΩΤΩΝ:

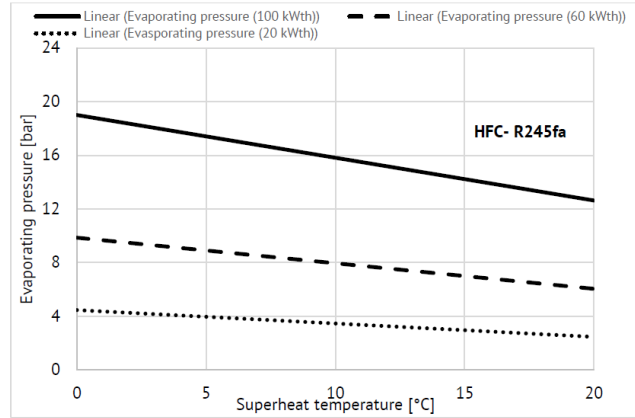
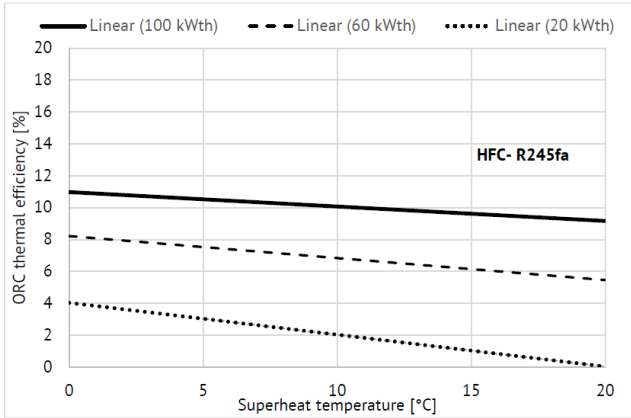


Βέλτιστη πίεση ατμοποίησης και εισόδου εκτονωτών και λόγος πίεσης εκτονωτών για βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης της μηχανής ORC και βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής της αντλίας και των δυο εκτονωτών κατά τη μεταβολή του φορτίου

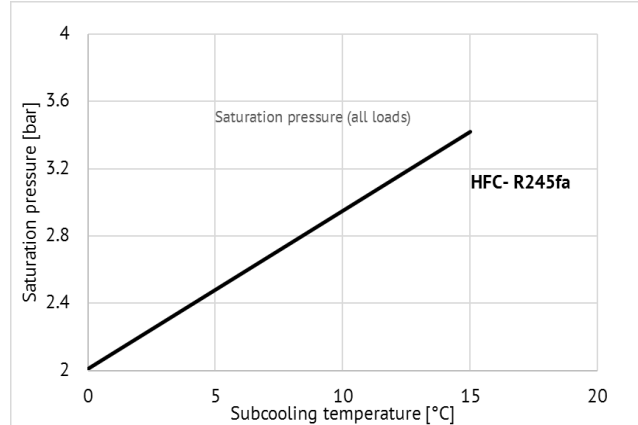
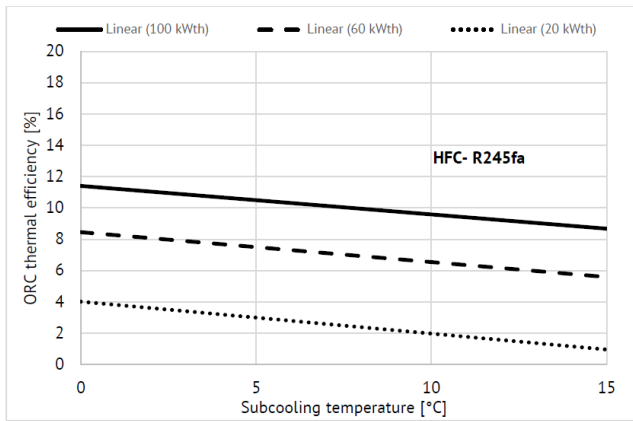


Βέλτιστη παραγωγή ισχύος από τους δυο εκτονωτές κατά τη μεταβολή του φορτίου

Ο σχεδιασμός του συστήματος συνεχίζεται με το σχεδιασμό των εναλλακτών θερμότητας, δηλαδή του ατμοποιητή και του συμπυκνωτή. Βασικά στοιχεία σχεδιασμού αποτελούν η πίεση λειτουργίας (~20 bar), η μικρότερη δυνατή επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας και το χαμηλό κόστος. Με τα κριτήρια αυτά οι εναλλάκτες που επιλέγονται είναι πλακοειδείς εναλλάκτες αντιρροής. Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η επιρροή μιας μικρής υπερθέρμανσης και μιας μικρής υπόψυξης που είναι απαραίτητη να συμβεί όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στους δυο εναλλάκτες:



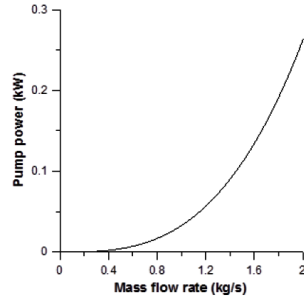
Θερμικός βαθμός απόδοσης και πίεση ατμοποίησης κατά τη μεταβολή της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης για τρία θερμικά φορτία



Θερμικός βαθμός απόδοσης και πίεση κορεσμού κατά τη μεταβολή της θερμοκρασίας υπόψυξης για τρία θερμικά φορτία

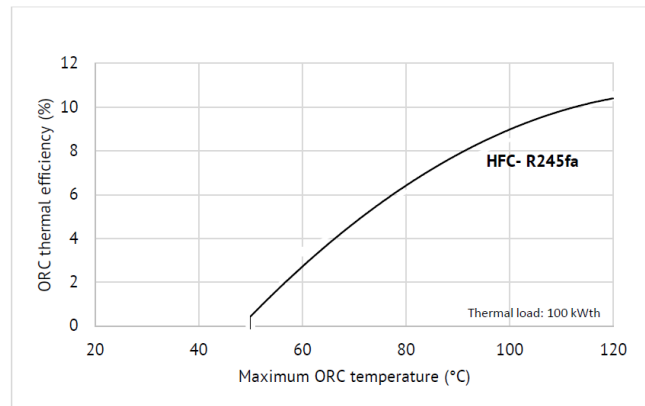
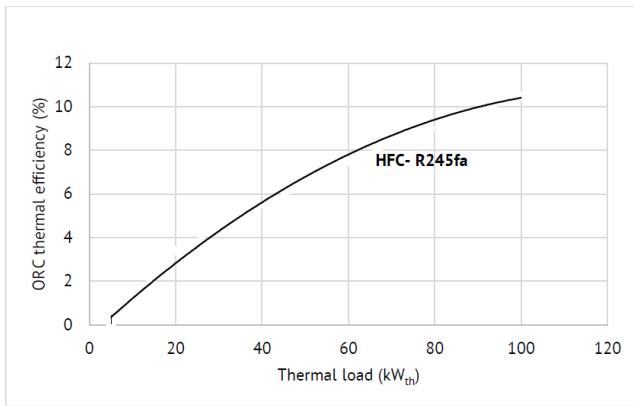
Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, όσο μεγαλύτερη είναι η υπερθέρμανση ή η υπόψυξη αντίστοιχα, τόσο μειώνεται (σχετικά) ο θερμικός βαθμός απόδοσης. Επομένως επιλέγεται η μικρότερη δυνατή υπερθέρμανση και υπόψυξη για το σύστημα (~ 5K σε κάθε περίπτωση).

Τελευταίο βήμα του σχεδιασμού της μηχανής ORC αποτελεί ο σχεδιασμός του θερμικού κυκλώματος θερμαντήρα- γλυκόλης. Τα κριτήρια σχεδιασμού του θερμικού κυκλώματος είναι η μέγιστη πίεση λειτουργίας στα 5 bar (επιτρέπεται από τη χρήση γλυκόλης), η μέγιστη παροχή ~ 7 m³/h και ο βαθμός απόδοσης της αντλίας ~ 75% (από κατασκευαστή). Η σχέση που διέπει την ισχύ λειτουργίας της αντλίας ανακυκλοφορίας είναι: $P_p = \frac{\rho * g * H * Q}{\eta_p}$ και φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Ο τελικός σχεδιασμός της μηχανής Οργανικού Κύκλου Rankine σε ό,τι αφορά στο θερμικό βαθμό απόδοσής της και τη μέγιστη παροχή είναι:

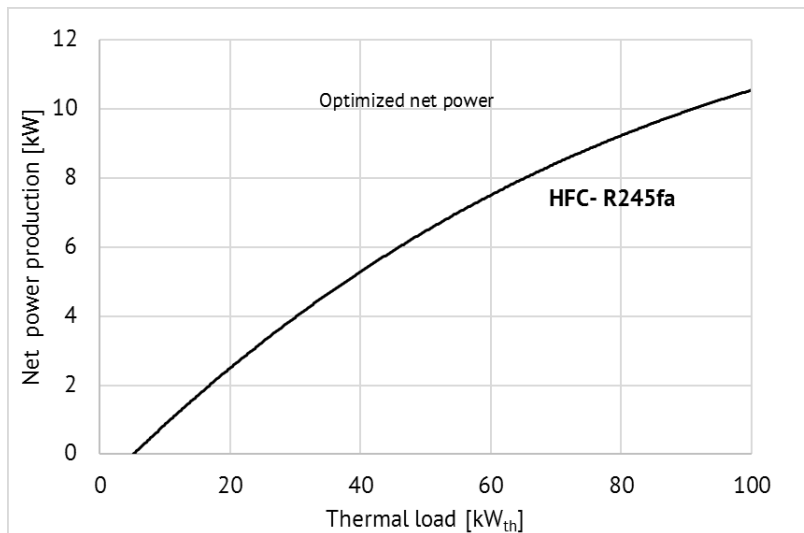
- ✓ Μέγιστη παραγόμενη ισχύς: 10 kW
- ✓ Μέγιστος θερμικός βαθμός απόδοσης: 10%



Θερμικός βαθμός απόδοσης ORC για όλο το εύρος θερμικού φορτίου και για μεταβολή της μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας

Ανάλυση μοντέλου μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης

Το επόμενο βήμα της παρούσας έρευνας είναι ο σχεδιασμός της μονάδας αφαλάτωσης με τη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης. Η παραγόμενη ενέργεια από τη μηχανή ORC που θα τροφοδοτήσει τη μονάδα αφαλάτωσης φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα όπως προέκυψε από την προηγούμενη προσομοίωση:



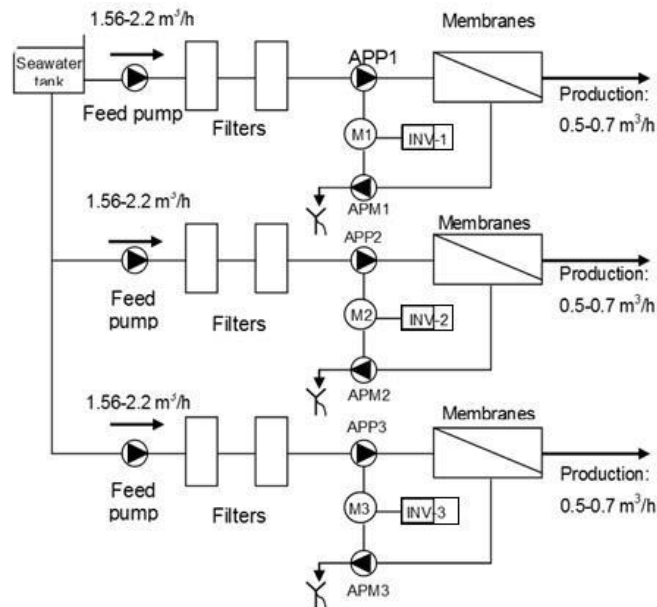
Ηλεκτρική ενέργεια λειτουργίας: η παραγόμενη από τη μηχανή ORC

Η μονάδα αφαλάτωσης είναι μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού και για το σχεδιασμό της έχει θεωρηθεί ποιότητα εισερχόμενου νερού στο σύστημα θαλασσινό νερό Μεσογείου, σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

Water type: Seawater (Open Intake) SDI<5				
Ions	mg/l	ppm CaCO ₃	meq/l	Total Conc. (mg/l)
Ammonium (NH ₄)	0	0	0	0
Potassium (K)	32.01	40.931	0.819	32.01
Sodium (Na)	12850.82	27948.72	558.974	12850.82
Magnesium (Mg)	1506.49	6196.487	123.930	1506.49
Calcium (Ca)	383.13	955.913	19.118	383.13
Strontium (Sr)	0	0	0	0
Barium (Ba)	0	0	0	0
Carbonate (CO ₃)	7.472	12.452	0.249	7.47
Bicarbonate (HCO ₃)	129.93	106.491	2.130	129.93
Nitrate (NO ₃)	0	0	0	0
Chloride (Cl)	20404.05	28776.200	575.524	20404.05
Fluoride (F)	0	0	0	0
Sulfate (SO ₄)	5997.05	6246.927	124.939	5997.05
Silica (SiO ₂)	0.2	n.a.	n.a.	0.2
Boron (B)	0	n.a.	n.a.	n.a.
Total dissolved solids: 41311.2 mg/l				
Cations: 702.84, Anions: 702.84, pH: 7.6				

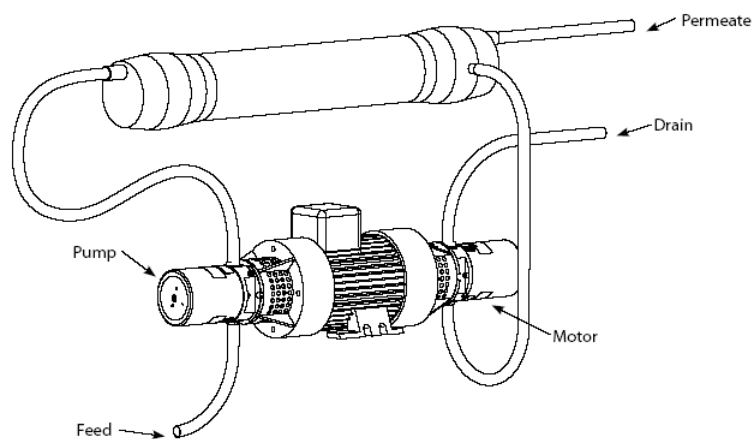
Ποιότητα νερού τροφοδοσίας: τυπική ανάλυση θαλασσινού νερού Μεσογείου

Ο τελικός σχεδιασμός της μονάδας αφαλάτωσης αποτελείται από τρεις πανομοιότυπες μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού, καθεμιά εκ των οποίων παράγει συνολικά 0.5 – 0.7 m³/h (συνολική μέγιστη παραγωγή συστήματος 2.1 m³/h), σύμφωνα με το παρακάτω σχεδιάγραμμα:



Διαμόρφωση με τρεις πανομοιότυπες υπομονάδες

Κάθε σύστημα φέρει μια διάταξη ανάκτησης ενέργειας που χρησιμοποιείται για μείωση ειδικής κατανάλωσης ενέργειας από την αντλία υψηλής πίεσης και δίνει τη δυνατότητα χρήσης μικρότερης αντλίας υψηλής πίεσης, επομένως σε μείωση του κόστους του συστήματος.



Σύστημα ανάκτησης ενέργειας αντλίας υψηλής πίεσης

Η ποιότητα του παραγόμενου νερού είναι ποιότητα ποσίμου νερού σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα (στήλη Permeate):

Pass Streams (mg/l as Ion)				
Name	Feed	Adjusted Feed	Concentrate	Permeate
NH ₄	0.00	0.00	0.00	0.00
K	32.01	32.01	46.82	0.18
Na	12850.82	16139.39	23691.91	65.93
Mg	1506.49	0.00	0.00	0.00
Ca	383.13	0.10	0.15	0.00
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00
CO ₃	7.47	7.47	10.17	0.00
HCO ₃	129.93	129.93	187.65	1.78
NO ₃	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	20404.05	20404.05	29962.26	97.78
F	0.00	0.00	0.00	0.00
SO ₄	5997.05	5997.05	8816.51	5.68
SiO ₂	0.20	0.20	0.25	0.00
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00
CO ₂	1.78	1.79	2.58	1.84
TDS	41309	42710	62697	172
pH	7.60	7.60	7.62	6.17

Ποιότητα παραγόμενου νερού αφαλάτωσης

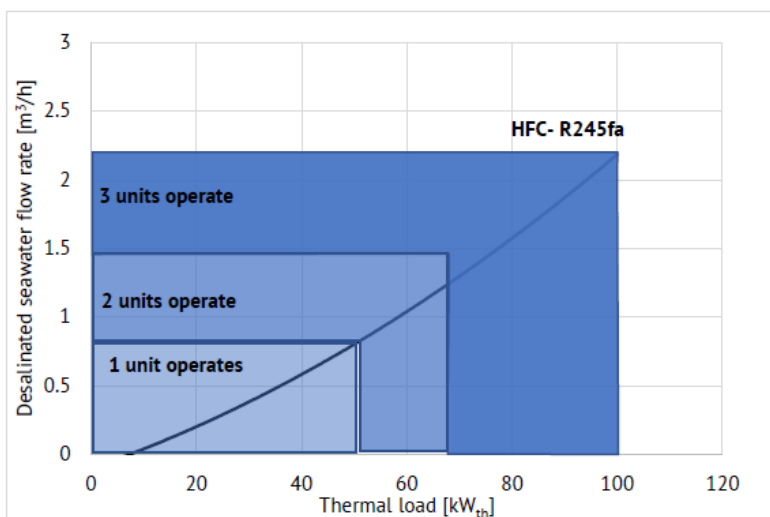
Αξίζει να σημειωθεί ότι το παραγόμενο νερό είναι μεν πόσιμο, αλλά αν προοριζόταν πράγματι για ανθρώπινη κατανάλωση (πέρα από την πειραματική εφαρμογή) θα ήταν φρόνιμο να προστεθεί κάποια μετακατεργασία με ένα φίλτρο πρόσδοσης σκληρότητας που θα εμπλούτιζε το νερό με όλα τα απαραίτητα για τον άνθρωπο στοιχεία (όπως Νάτριο, Ασβέστιο, Μαγνήσιο κτλ).

Οι λεπτομέρειες του σχεδιασμού του συστήματος αφαλάτωσης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Feed Flow, m ³ /h	6.6
Raw Water Flow to System, m ³ /h	6.6
Feed Pressure, bar	56.60
Fouling Factor	0.85
Chem. Dose	None
Total Active Area, m ²	3 x 44.03
Water Classification	Seawater (Open Intake) SDI < 5
Permeate Flow, m ³ /h	2.1
Recovery, %	32
Feed Temperature, °C	20
Feed TDS, mg/l	42710
Number of Elements	3 x 4
Average Flux, l/mh	3 x 23.98
Osmotic Feed Pressure, bar	29.88
Osmotic Concentrate Pressure, bar	44.74
Osmotic Average Pressure, bar	37.31
Average NDP, bar	18.85
Power, kW	3 x 3.84
Specific Energy, kWh/m ³	5.46

Λεπτομέρειες σχεδιασμού μονάδας RO

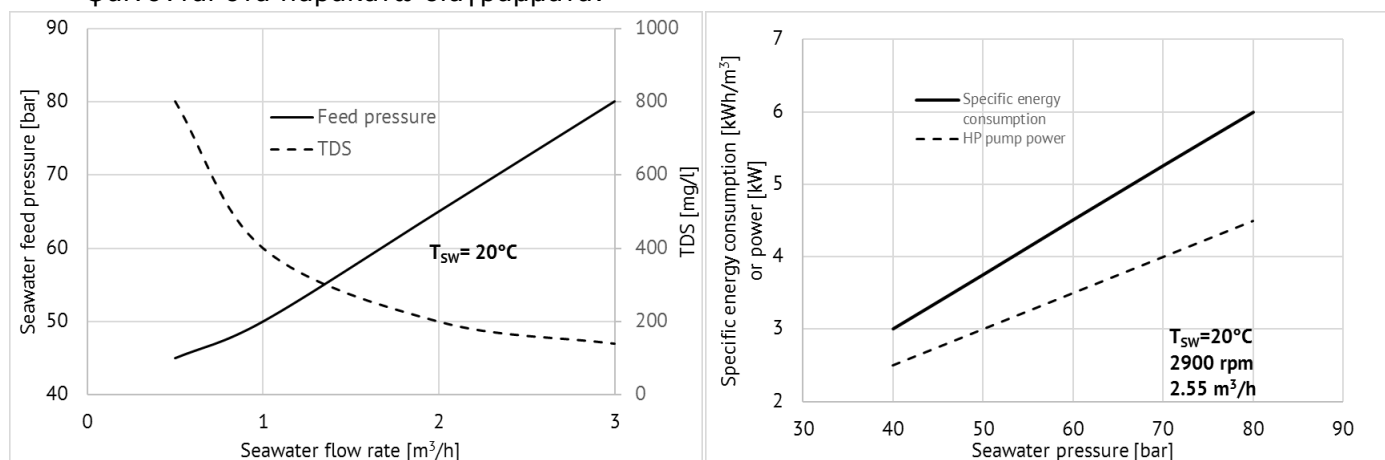
Από τον πίνακα φαίνεται ότι το σύστημα που προκύπτει λειτουργεί με ανάκτηση ~33% (λόγος παραγόμενου νερού προς το νερό τροφοδοσίας) και παράγει συνολικά 2.1 m³/h. Η παροχή εισόδου στο σύστημα είναι ~ 6.6 m³/h. Οι τρεις υπομονάδες τίθενται σε λειτουργία ανάλογα με το διαθέσιμο ηλεκτρικό φορτίο από τη μηχανή ORC, επομένως από το διαθέσιμο θερμικό φορτίο στην είσοδο της μηχανής ORC. Η λειτουργία των τριών υπομονάδων φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Παροχή καθαρού νερού κατά τη μεταβολή του θερμικού φορτίου και λειτουργία των τριών υπομονάδων

Η πρώτη υπομονάδα λειτουργεί παράγοντας ~0.7 m³/h καθαρού νερού, έπειτα μπαίνει σε λειτουργία η δεύτερη υπομονάδα παράγοντας άλλα ~0.7 m³/h και τέλος η τρίτη υπομονάδα με άλλα ~0.7 m³/h (συνολική παροχή στο μέγιστο φορτίο: 2.1 m³/h).

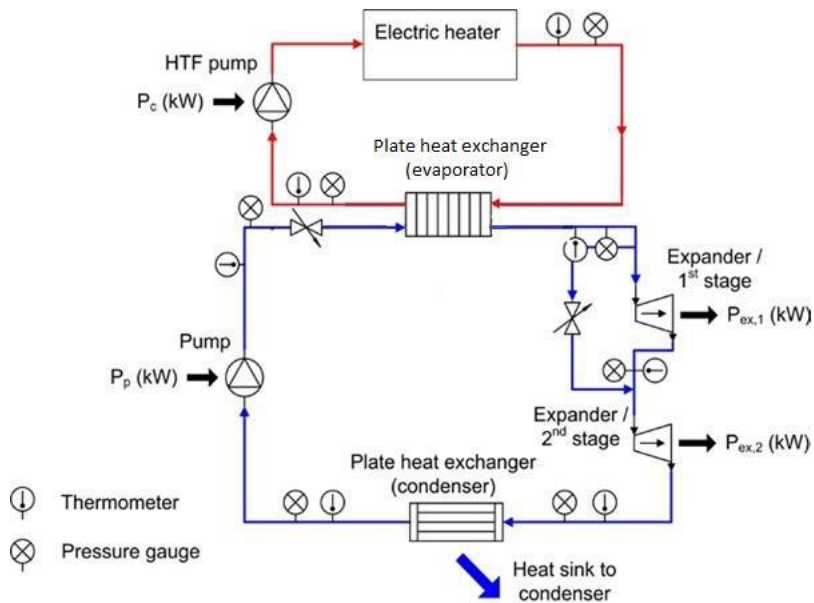
Η λειτουργία του συστήματος σε μεταβλητό φορτίο ως προς τη λειτουργία των μεμβρανών και της αντλίας υψηλής πίεσης, όπως προκύπτουν από την προσομοίωση του συστήματος, φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα:



Πίεση μεμβρανών και αλατότητα παραγόμενου νερού κατά τη μεταβολή της παροχής νερού τροφοδοσίας και ειδική κατανάλωση ενέργειας και ισχύς αντλίας υψηλής πίεσης με τη μεταβολή της πίεσης στην είσοδο της αντλίας

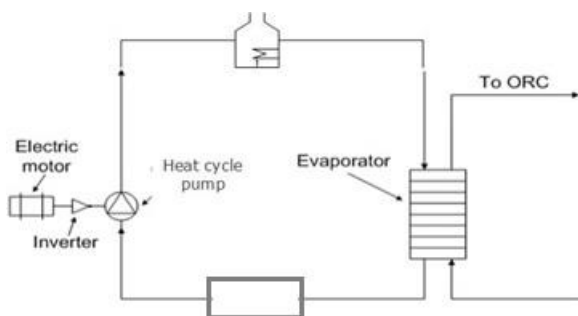
Σχεδιασμός και κατασκευή πρωτοτύπου

Βάσει της προηγούμενης προσομοίωσης των υποσυστημάτων του ολοκληρωμένου πρωτοτύπου, επιλέγονται οι συνιστώσες και κατασκευάζεται κάθε υποσύστημα ξεχωριστά. Το τελικό διάγραμμα που απεικονίζει το τελικά σχεδιασμένο σύστημα Οργανικού Κύκλου Rankine με το θερμικό κύκλωμα φαίνεται παρακάτω:



Η μηχανή Οργανικού Κύκλου Rankine

Το θερμικό κύκλωμα απομονωμένο φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα και την παρακάτω εικόνα αντίστοιχα:



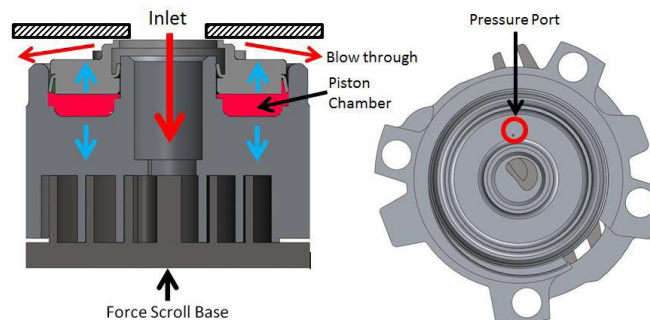
Το θερμικό κύκλωμα

Τροποποίηση εκτονωτών μηχανής Οργανικού Κύκλου Rankine

Οι επιλεγμένοι εκτονωτές για το σύστημα που παίζουν καθοριστικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας από τη μηχανή ORC είναι ελικοειδούς τύπου (scroll), καθώς προκύπτουν οι πιο αποδοτικοί για την κλίμακα συστήματος της παρούσας εργασίας. Ωστόσο, ελάχιστοι εκτονωτές τύπου scroll είναι διαθέσιμοι εμπορικά, επομένως οι χρησιμοποιούμενοι εκτονωτές προκύπτουν από την τροποποίηση στο μηχανουργείο των αντίστοιχως εμπορικά διαθέσιμων scroll συμπιεστών. Τα βήματα μετατροπής τους φαίνονται στις παρακάτω εικόνες:



Εκτονωτής τύπου Scroll, κοπή κεφαλής και πρόσβαση στο εσωτερικό



Ρύθμιση πίεσης στο εσωτερικό με διάνοιξη οπής

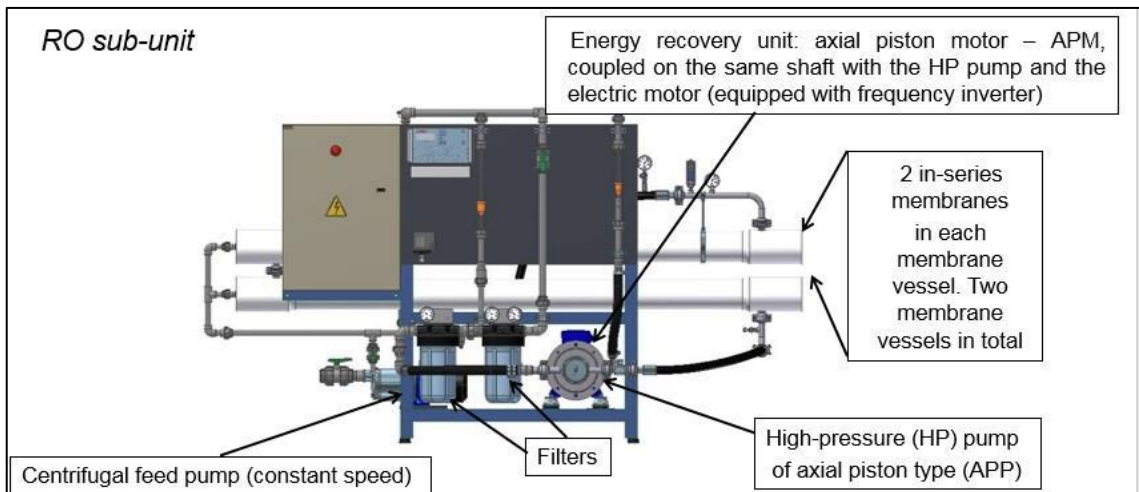
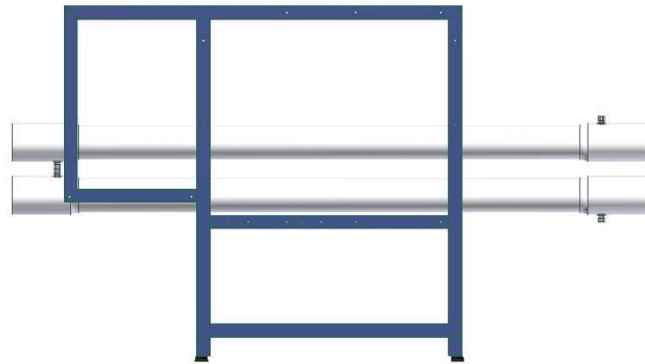
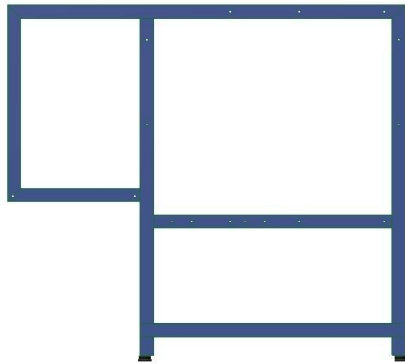


Απομάκρυνση αντεπίστροφης βαλβίδας και βαλβίδας ασφαλείας και διαμόρφωση νέας φλάντζας



Τελική διαμόρφωση εκτονωτών της μηχανής ORC

Τα στάδια συναρμολόγησης της υπομονάδας αφαλάτωσης φαίνονται στις ακόλουθες εικόνες:



Στάδια συναρμολόγησης και κατασκευής της κάθε υπομονάδας αφαλάτωσης

Το τελικά εγκατεστημένο σύστημα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης στο εργαστήριο Υδροδυναμικών μηχανών του Ε.Μ.Π. φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Το συνολικό σύστημα αφαλάτωσης εγκατεστημένο στο εργαστήριο

Τέλος, η ολοκληρωμένη πειραματική διάταξη εγκατεστημένη στο εργαστήριο φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Το εγκατεστημένο υβριδικό σύστημα αφαλάτωσης στο εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου

Πειραματική διερεύνηση και αξιολόγηση της πολυβάθμιας μονάδας αντίστροφης ώσμωσης

Η μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης εξετάστηκε πειραματικά στο εργαστήριο, για διάφορες αλατότητες νερού τροφοδοσίας (βαρύ υφάλμυρο 15.150 ppm, θαλασσινό 30.000ppm και θαλασσινό 37.500 ppm) και σε διάφορες θερμοκρασίες νερού τροφοδοσίας, με ρεύμα από το δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, τα πειράματα που εκτελέστηκαν είναι:

Test No.	Salinity [ppm]	Feed water temperature [°C]	HPP frequency [Hz]
1	15150	12.5	25, 30, 35
2	30000	12.5	25, 30, 35
3	37500	12.5	25, 30, 35
4	37500	17.0	25, 30, 35
5	37500	19.0	25, 30, 35
6	37500	23.0	25, 30, 35

Σκοπός της πειραματικής διερεύνησης της μονάδας αφαλάτωσης είναι η αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος σε μεταβλητό φορτίο. Το σύστημα εξετάζεται για λειτουργία σε μεταβλητό φορτίο (από ~ 1 kW έως το μέγιστο αναμενόμενο από τη μηχανή ORC 10 kW). Για την προσομοίωση του θαλασσινού νερού στο εργαστήριο, στη δεξαμενή διαλύονται σε 3.3 m³ νερού 50, 100 και 125 kg αλάτι αντίστοιχα για τις τρεις αλατότητες. Η αντλία τροφοδοσίας κάθε υπομονάδας θεωρείται ότι λειτουργεί σε σταθερές στροφές και καταναλώνει 0.6 kW, τα οποία περιλαμβάνονται στον υπολογισμό της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας.

Οι ιδιότητες που καταγράφονται σε κάθε πείραμα για κάθε υπομονάδα είναι:

- Το ρεύμα και η τάση εισόδου
- Η πίεση στην αντλία τροφοδοσίας
- Η πίεση στην αντλία υψηλής πίεσης
- Η πίεση εξόδου μεμβρανών
- Η παροχή απόρριψης της άλμης
- Η παροχή του παραγόμενου νερού
- Η αγωγιμότητα του παραγόμενου νερού
- Η θερμοκρασία του νερού
- Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά κάθε υπομονάδας

Οι ιδιότητες που εξετάζονται στη λειτουργία κάθε υπομονάδας είναι:

- Η κατανάλωση ισχύος
- Η ειδική κατανάλωση ενέργειας (kWh/m^3 παραγόμενου νερού)
- Η ανάκτηση ενέργειας συστήματος (32 % βάσει σχεδιασμού)
- Η ποιότητα (αλατότητα) του παραγόμενου νερού

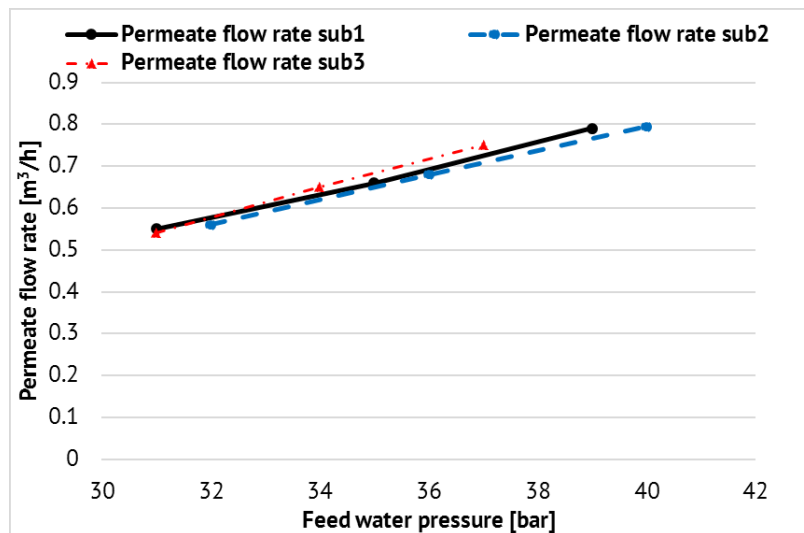
Στη συνέχεια εξετάζεται κάθε περίπτωση ξεχωριστά.

Περίπτωση 1^η: έλεγχος για χαμηλή αλατότητα νερού τροφοδοσίας (15.150 ppm)

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία των μεμβρανών της μονάδας αφαλάτωσης είναι:

- Η πίεση του νερού τροφοδοσίας
- Η θερμοκρασία του νερού
- Η συγκέντρωση αλάτων στο νερό τροφοδοσίας
- Η ανάκτηση του συστήματος
- Το pH του νερού

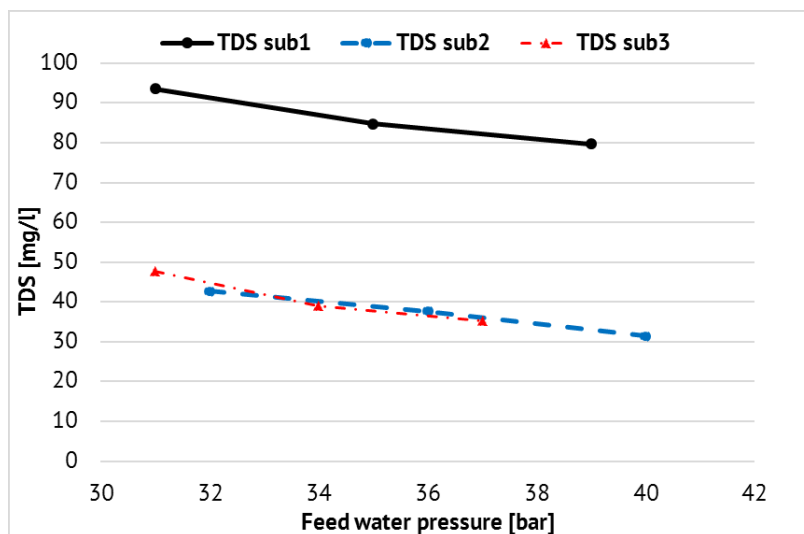
Στο συγκεκριμένο σύστημα χρησιμοποιούνται μεμβράνες τύπου spiral wound thin film οι οποίες έχουν μεγάλη ανοχή στις αλλαγές του pH του νερού χωρίς να επηρεάζεται η λειτουργία τους. Η θερμοκρασία του νερού και η ανάκτηση του συστήματος στα πρώτα αυτά πειράματα θεωρούνται σταθερές, καθώς και η συγκέντρωση αλάτων στο νερό τροφοδοσίας. Επομένως, για τον έλεγχο της λειτουργίας των μεμβρανών εξετάζεται η πίεση του νερού τροφοδοσίας στις μεμβράνες. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η επίδραση της πίεσης των μεμβρανών στην παροχή του παραγόμενου νερού για τις τρεις υπομονάδες.



Επίδραση πίεσης μεμβρανών στην παροχή παραγόμενου νερού

Η παροχή του παραγόμενου προκύπτει ανάλογη με την πίεση στις μεμβράνες, με κάποιες πολύ μικρές διαφορές στο εύρος εξαιτίας μιας μικρής διαφοράς στην πίεση λειτουργίας των τριών υπομονάδων που πιθανόν οφείλεται σε σφάλμα οργάνου μέτρησης ή διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας (π.χ. κατασκευή μεμβράνης, σωληνώσεις κτλ). Η ανάκτηση του συστήματος προκύπτει ~ 38 %, καθώς η ποιότητα του νερού τροφοδοσίας είναι καλύτερη από την ποιότητα σχεδιασμού ή η θερμοκρασία λειτουργίας είναι διαφορετική από τη θερμοκρασία σχεδιασμού.

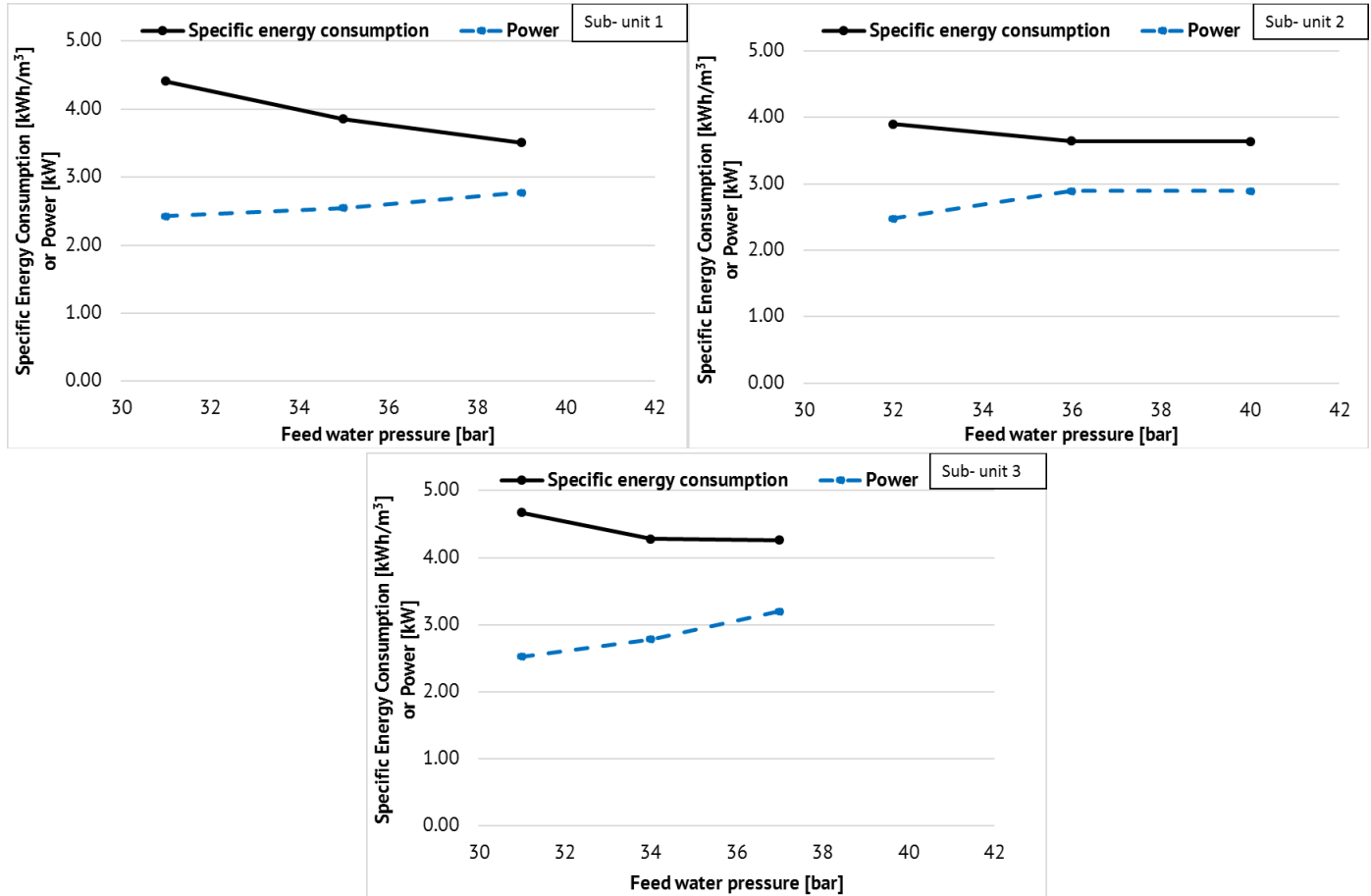
Η επίδραση της πίεσης στις μεμβράνες στην αλατότητα του παραγόμενου νερού φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Επίδραση πίεσης μεμβρανών στην αλατότητα του παραγόμενου νερού

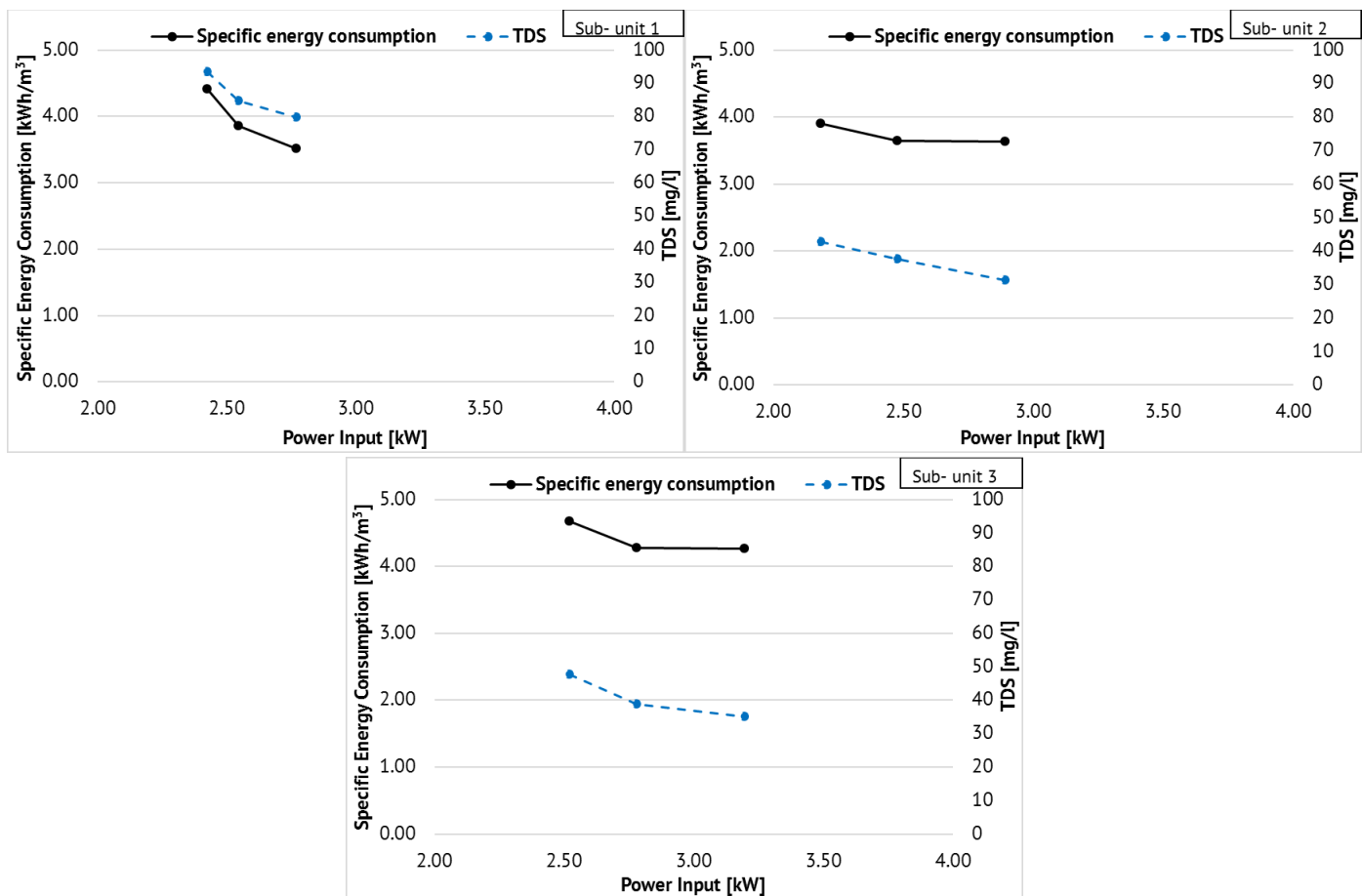
Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, με την αύξηση της πίεσης στις μεμβράνες παρατηρείται μείωση της αλατότητας του παραγόμενου νερού όπως αναμενόταν. Το παραγόμενο νερό παραμένει πολύ καλής ποιότητας σε όλο το εύρος λειτουργίας, ενώ η ελαφρώς διαφορετική λειτουργία της πρώτης υπομονάδας μπορεί να οφείλεται σε σφάλμα οργάνου μέτρησης ή διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Στη συνέχεια εξετάζεται η λειτουργία των αντλιών υψηλής πίεσης κάθε υπομονάδας και όλου του συστήματος. Αρχικά παρουσιάζεται η ειδική κατανάλωση ενέργειας και η απορροφούμενη ισχύς της κάθε υπομονάδας σε σχέση με την πίεση λειτουργίας.



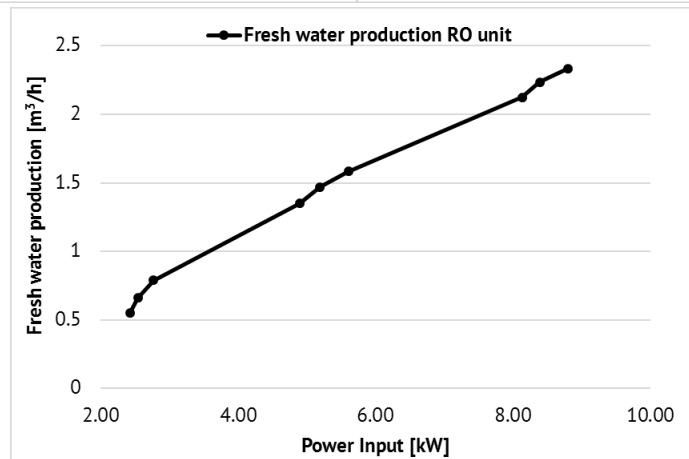
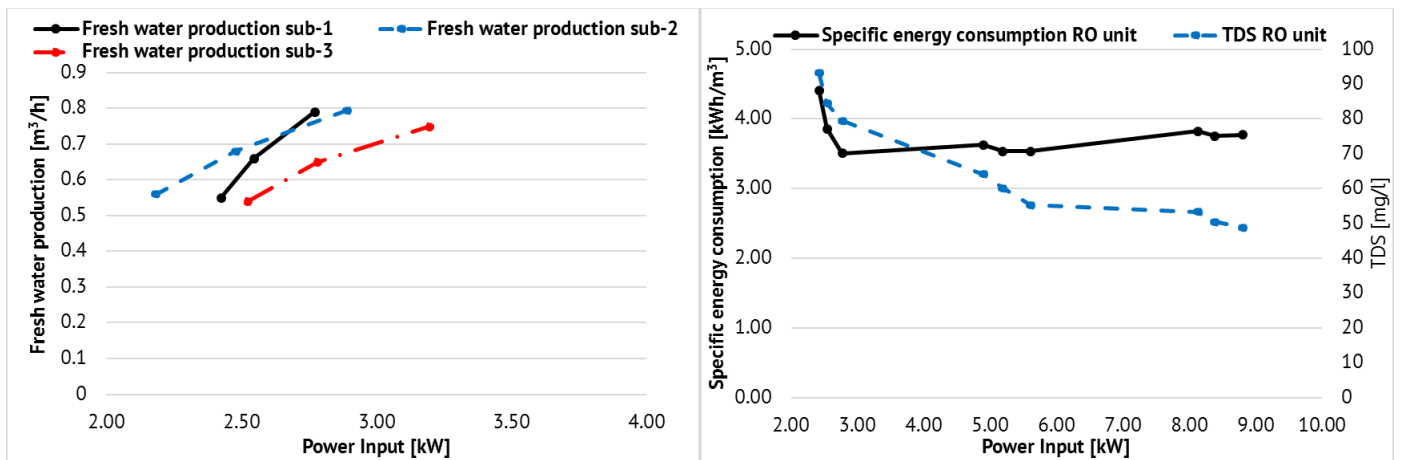
Ειδική κατανάλωση ενέργειας και απορροφούμενη ισχύς κάθε υπομονάδας, σε σχέση με την πίεση

Η ειδική κατανάλωση ενέργειας καθώς και η απορροφούμενη είναι παρόμοιες για τις τρεις υπομονάδες και μόνο στην τρίτη υπομονάδα η ειδική κατανάλωση ενέργειας είναι ελαφρώς υψηλότερη φτάνοντας τις 4.8 kWh/m³. Η ειδική κατανάλωση ενέργειας και η ποιότητα του παραγόμενου νερού σε σχέση με την ισχύ στην είσοδο των μονάδων φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα.



Ειδική κατανάλωση ενέργειας και ποιότητα παραγόμενου νερού κάθε υπομονάδας, σε σχέση με την ισχύ

Η ποιότητα του παραγόμενου νερού είναι πολύ καλής ποιότητας σε όλο το εύρος λειτουργίας. Τέλος, η λειτουργία όλης της μονάδας παρουσιάζεται παρακάτω. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται η παραγωγή καθαρού νερού από τις τρεις υπομονάδες, η ειδική κατανάλωση ενέργειας όλου του συστήματος και η παροχή παραγόμενου νερού για όλο το σύστημα.

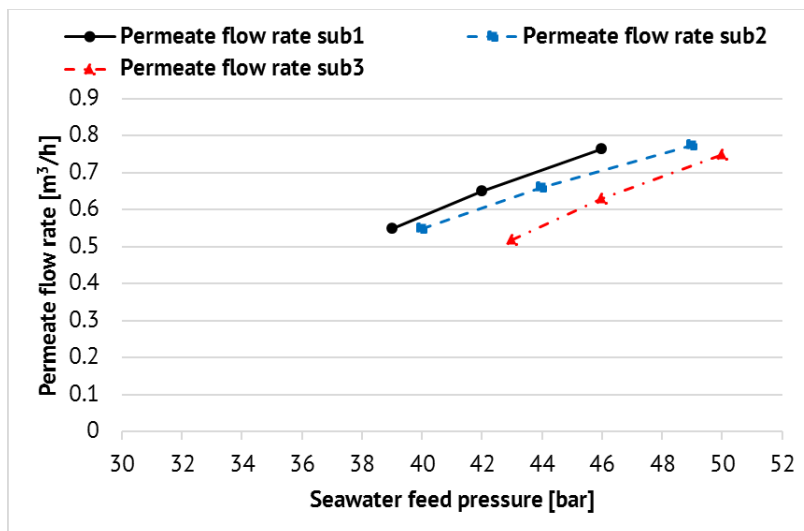


Λειτουργία του ολοκληρωμένου συστήματος

Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα, κάθε υπομονάδα παράγει $\sim 0.8 \text{ m}^3/\text{h}$ με κατανάλωση ισχύος $\sim 2 - 3 \text{ kW}$, ενώ η μονάδα RO στα 10 kW λειτουργίας παράγει $\sim 2.4 \text{ m}^3/\text{h}$ (στο 70% της ικανότητάς της). Η ποιότητα του παραγόμενου νερού παραμένει πολύ καλή σε όλο το εύρος λειτουργίας.

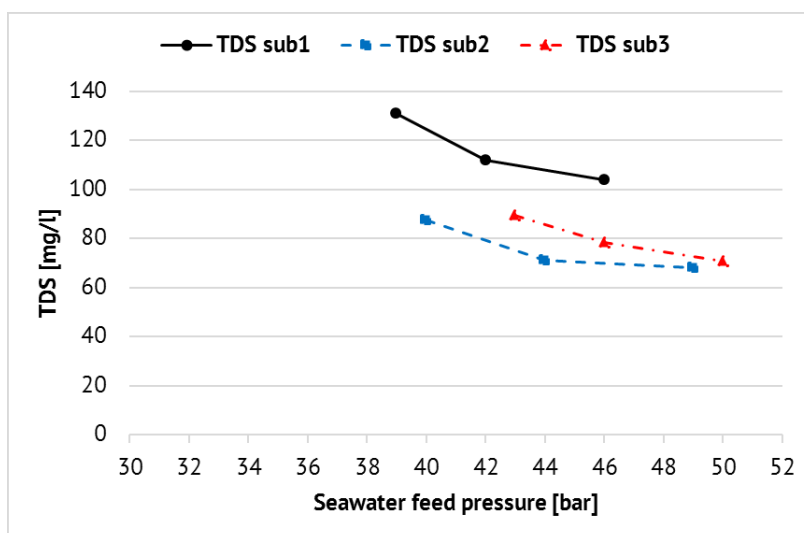
Περίπτωση 2^η: έλεγχος για μεσαία αλατότητα νερού τροφοδοσίας (30.000 ppm)

Η διερεύνηση του συστήματος συνεχίζεται με τη λειτουργία του σε μεσαία αλατότητα νερού τροφοδοσίας. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες της λειτουργίας των μεμβρανών των τριών υπομονάδων παρουσιάζονται παρακάτω.



Επίδραση πίεσης μεμβρανών στην παροχή παραγόμενου νερού

Η πίεση λειτουργίας σε αυτό το πείραμα αυξάνεται στα 39 – 50 bar. Και οι τρεις υπομονάδες παρουσιάζουν παρόμοια λειτουργία ως προς την παροχή παραγόμενου νερού, ωστόσο υπάρχουν μικρές διαφορές στο εύρος πίεσης λειτουργίας τους. Η ποιότητα του παραγόμενου νερού από τις τρεις υπομονάδες φαίνεται αμέσως παρακάτω.

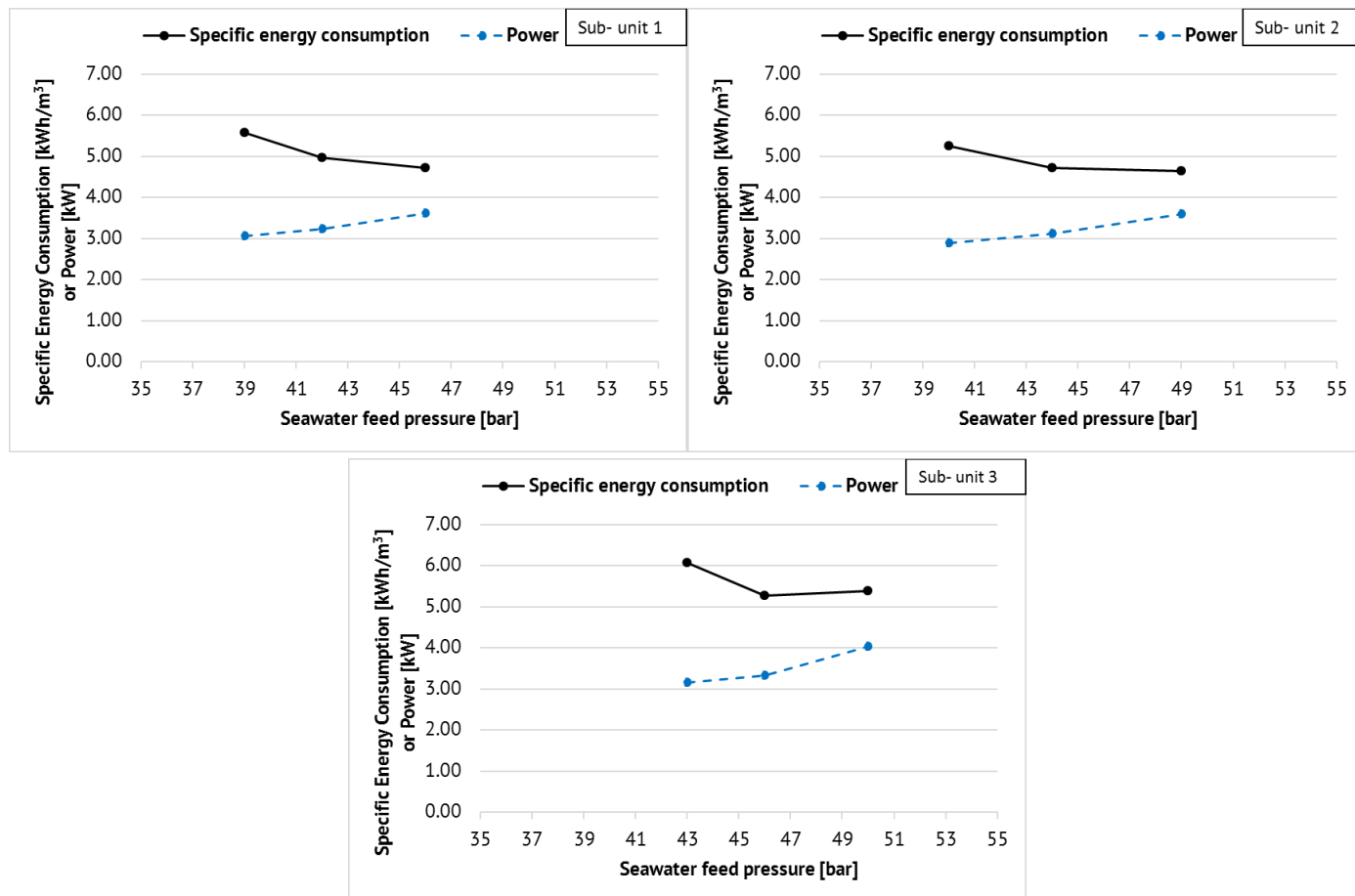


Επίδραση πίεσης μεμβρανών στην αλατότητα του παραγόμενου νερού

Η αλατότητα του παραγόμενου νερού είναι επίσης αυξημένη σε σχέση με το προηγούμενο πείραμα, ωστόσο το νερό παραμένει πολύ καλής ποιότητας σε όλο το εύρος λειτουργίας. Αν και οι τρεις υπομονάδες παρουσιάζουν παρόμοια λειτουργία, η πρώτη

υπομονάδα φαίνεται να απορρίπτει ελαφρώς λιγότερο ποσοστό αλάτων για παρόμοια πίεση λειτουργίας.

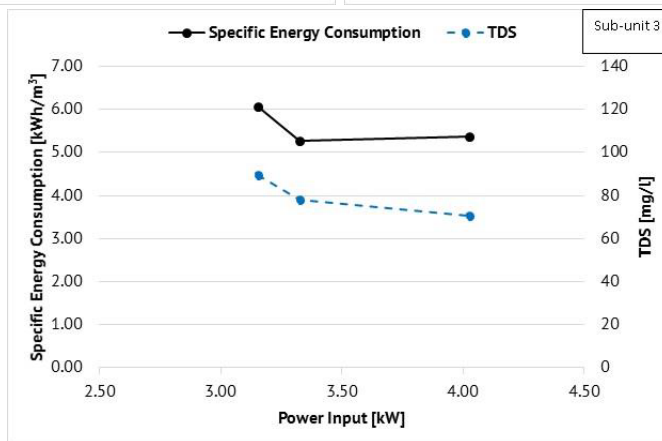
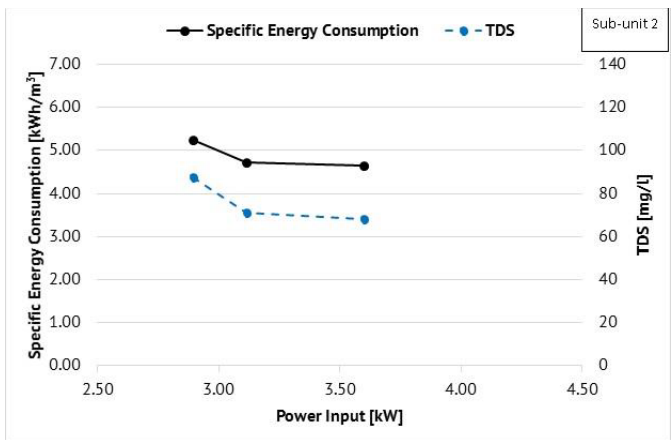
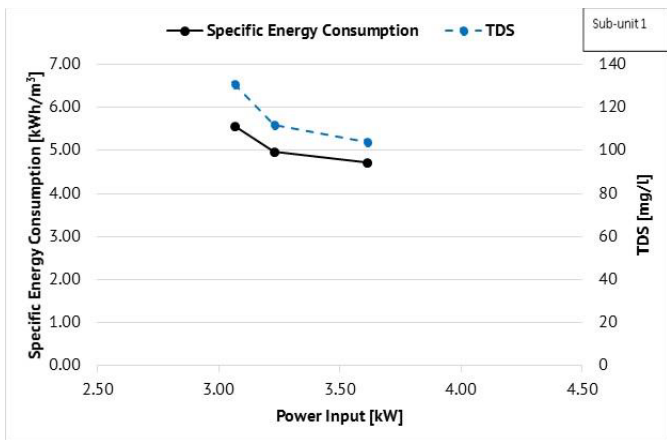
Οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας των αντλιών υψηλής πίεσης των τριών υπομονάδων φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Ειδική κατανάλωση ενέργειας και απορροφούμενη ισχύς κάθε υπομονάδας, σε σχέση με την πίεση

Η ειδική κατανάλωση ενέργειας είναι υψηλότερη σε αυτό το πείραμα με την αυξημένη αλατότητα και οι τρεις υπομονάδες παρουσιάζουν παρόμοια λειτουργία σε όλο το εύρος πίεσης. Η ειδική κατανάλωση ενέργειας παραμένει εντός των προβλεπόμενων τιμών για τις μονάδες αυτές, και η κατανάλωση ισχύος χαμηλή.

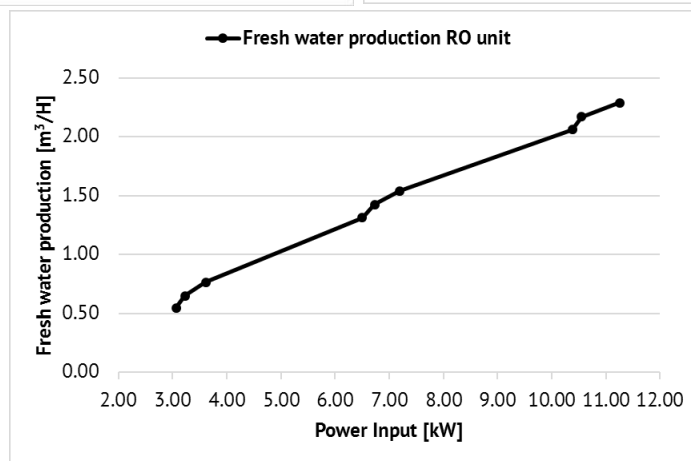
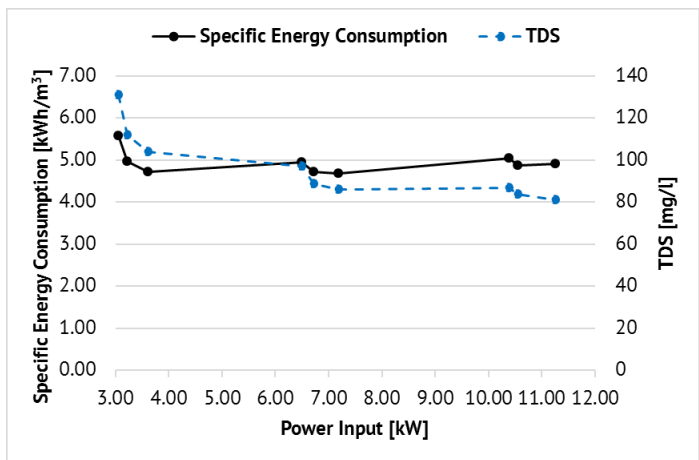
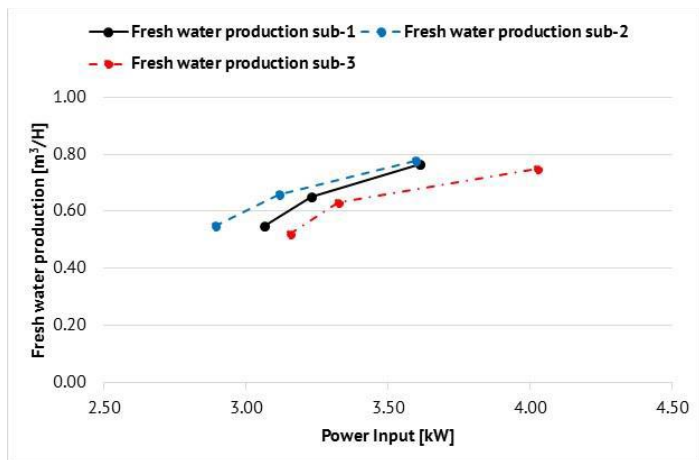
Η επίδραση της αυξημένης αλατότητας νερού τροφοδοσίας στην ποιότητα του παραγόμενου νερού σε σχέση με την ισχύ στην είσοδο του συστήματος φαίνεται αμέσως παρακάτω.



Ειδική κατανάλωση ενέργειας και ποιότητα παραγόμενου νερού κάθε υπομονάδας, σε σχέση με την ισχύ

Η ποιότητα του παραγόμενου νερού παραμένει εντός πολύ καλών ορίων, αν και είναι ελαφρώς αυξημένη από το προηγούμενο πείραμα. Εκ νέου παρατηρείται στα διαγράμματα ότι η πρώτη υπομονάδα παρουσιάζει ελαφρώς διαφορετική ποιότητα παραγωγής ποσίμου νερού από τις άλλες δυο υπομονάδες.

Τέλος, η λειτουργία όλου του συστήματος φαίνεται στα επόμενα διαγράμματα.



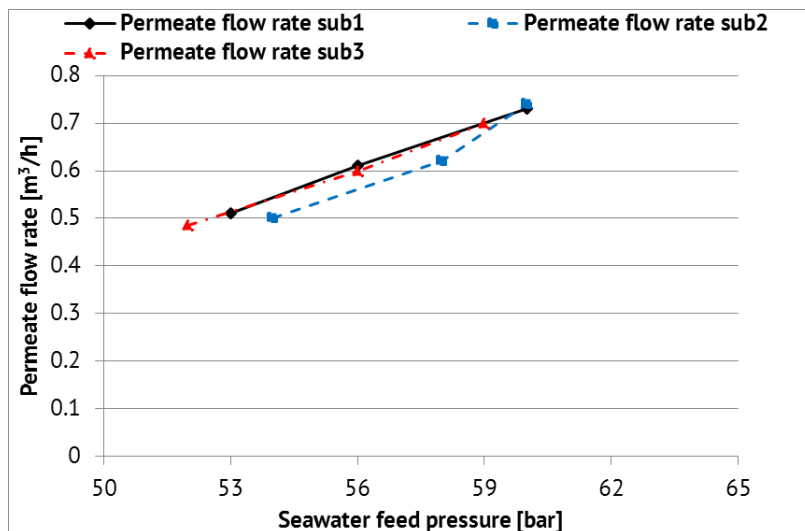
Λειτουργία του ολοκληρωμένου συστήματος

Οι δυο πρώτες υπομονάδες παράγουν ~ 0.8 m³/h με κατανάλωση ισχύος ~3.5 kW, ενώ η τρίτη με 4 kW. Η μονάδα RO στα 10 kW λειτουργίας παράγει ~ 2.3 m³/h (στο 70% της ικανότητάς της) και η ποιότητα του παραγόμενου νερού παραμένει πολύ καλή σε όλο το εύρος λειτουργίας.

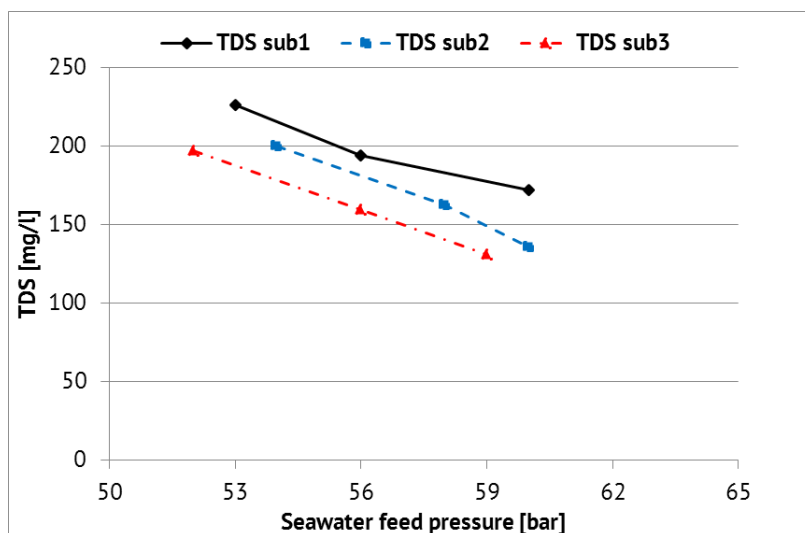
Το τρίτο πείραμα του συστήματος αφαλάτωσης γίνεται για λειτουργία σε υψηλή αλατότητα που προσομοιάζει νερό Μεσογείου, όπως αναλύεται αμέσως παρακάτω.

Περίπτωση 3^η: έλεγχος για υψηλή αλατότητα νερού τροφοδοσίας (37.500 ppm)

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας των μεμβρανών για λειτουργία σε υψηλή αλατότητα νερού τροφοδοσίας φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα.



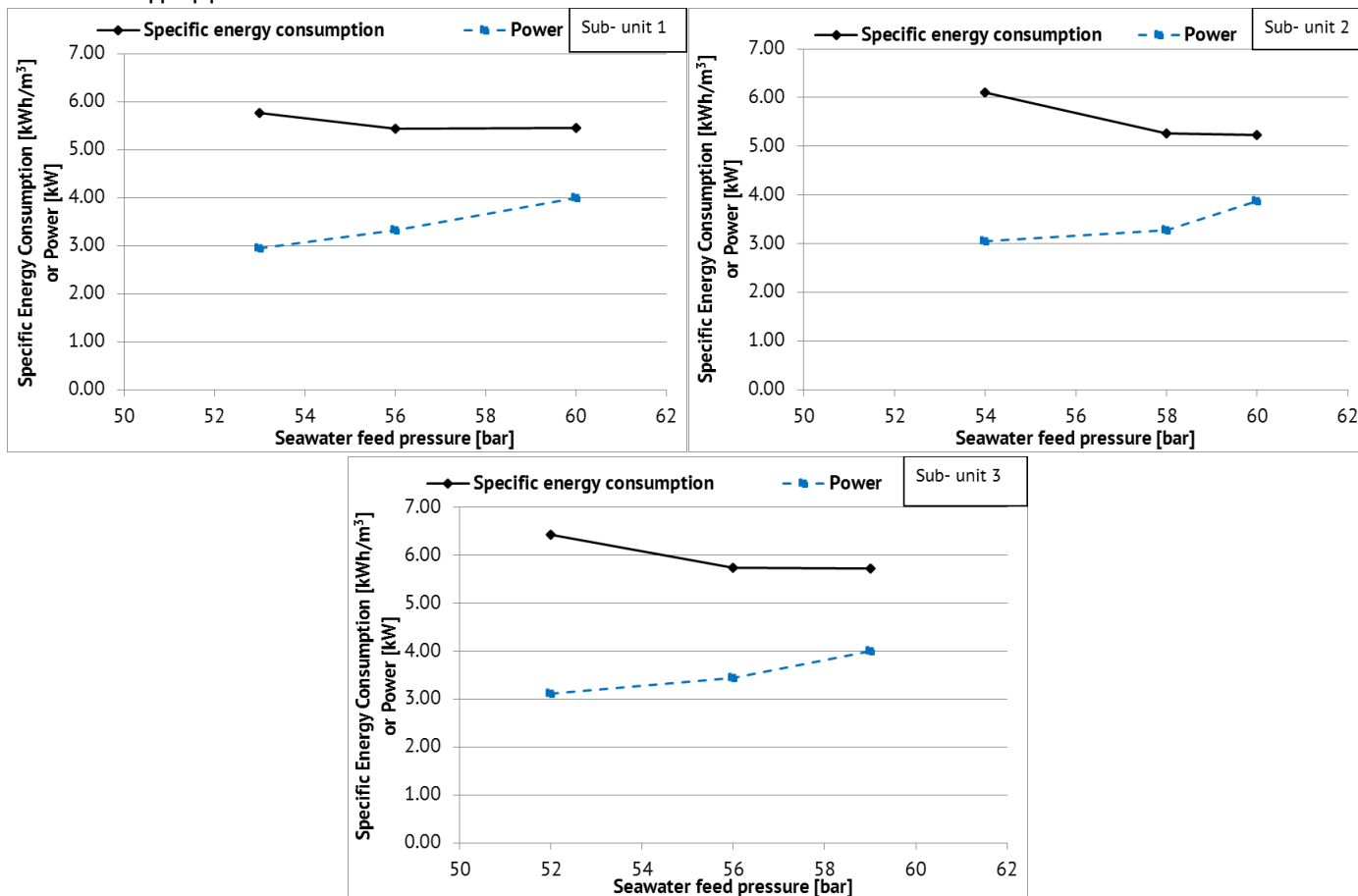
Επίδραση πίεσης μεμβρανών στην παροχή παραγόμενου νερού



Επίδραση πίεσης μεμβρανών στην αλατότητα του παραγόμενου νερού

Όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα, το εύρος πίεσης αυξήθηκε εκ νέου με την αύξηση της αλατότητας του νερού τροφοδοσίας όπως ήταν αναμενόμενο, και κυμαίνεται μεταξύ 52 και 60 bar. Οι τρεις υπομονάδες παρουσιάζουν παρόμοια λειτουργία εκτός από μικρές διαφορές στο εύρος πίεσης και στην ποιότητα παραγόμενου νερού. Η αλατότητα του παραγόμενου νερού είναι επίσης αυξημένη σε σχέση με τα προηγούμενα πειράματα, ωστόσο παραμένει εξαιρετική σε όλο το εύρος λειτουργίας.

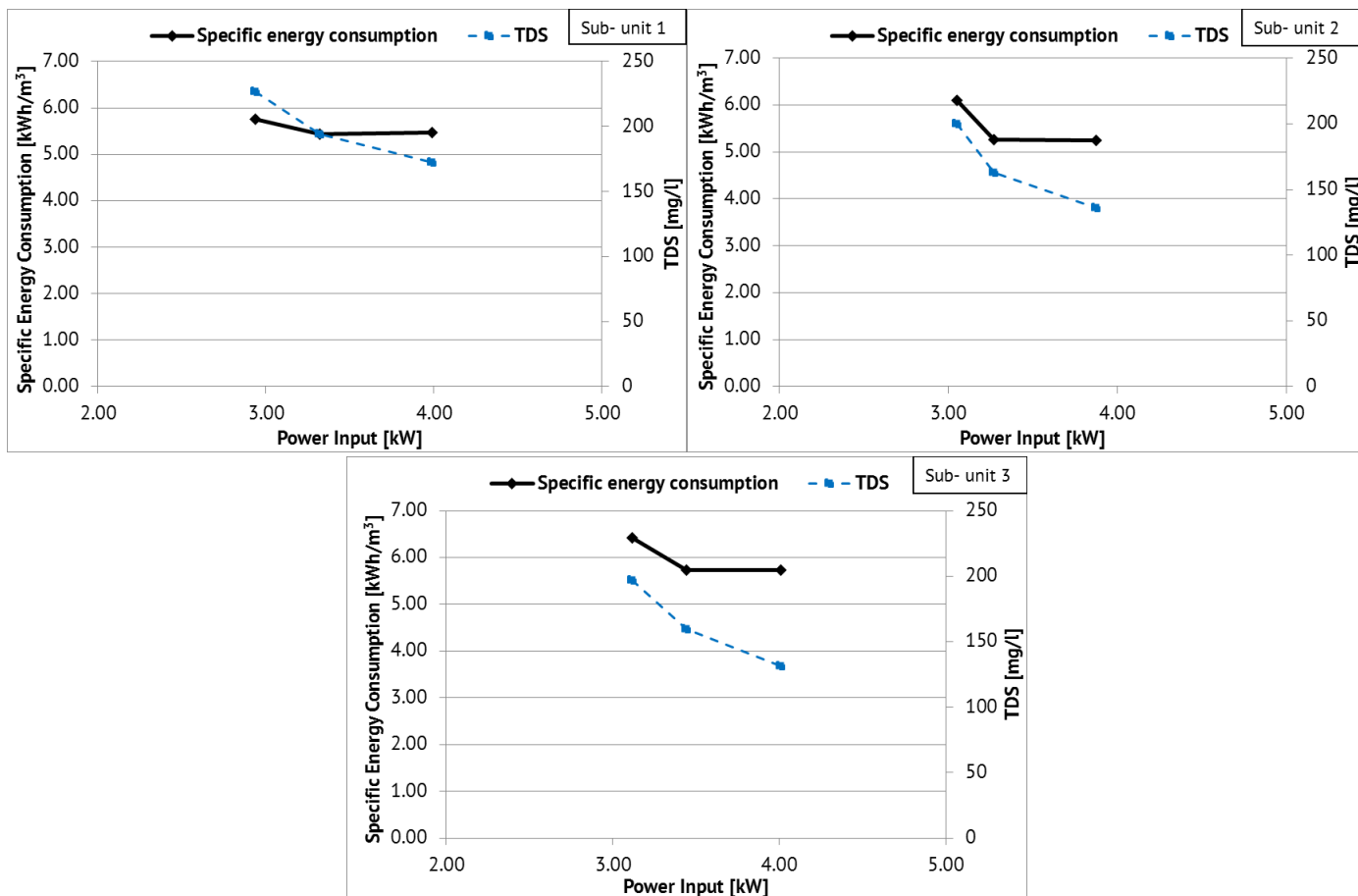
Η αξιολόγηση της λειτουργίας των αντλιών υψηλής πίεσης των τριών υπομονάδων μέσω της διερεύνησης της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας και της ισχύος γίνεται στα παρακάτω διαγράμματα.



Ειδική κατανάλωση ενέργειας και άπορροφούμενη ισχύς κάθε υπομονάδας, σε σχέση με την πίεση

Η ειδική κατανάλωση ενέργειας κυμαίνεται σε παρόμοια επίπεδα με το προηγούμενο πείραμα αν και παρουσιάζεται ελαφρώς πιο αυξημένη. Και οι τρεις υπομονάδες παρουσιάζουν παρόμοια λειτουργία σε όλο το εύρος πίεσης με παρόμοια ειδική κατανάλωση ενέργειας και κατανάλωση ισχύος, με την τρίτη υπομονάδα να παρουσιάζει ελαφρώς μεγαλύτερη ειδική κατανάλωση σε σχέση με τις δυο άλλες υπομονάδες.

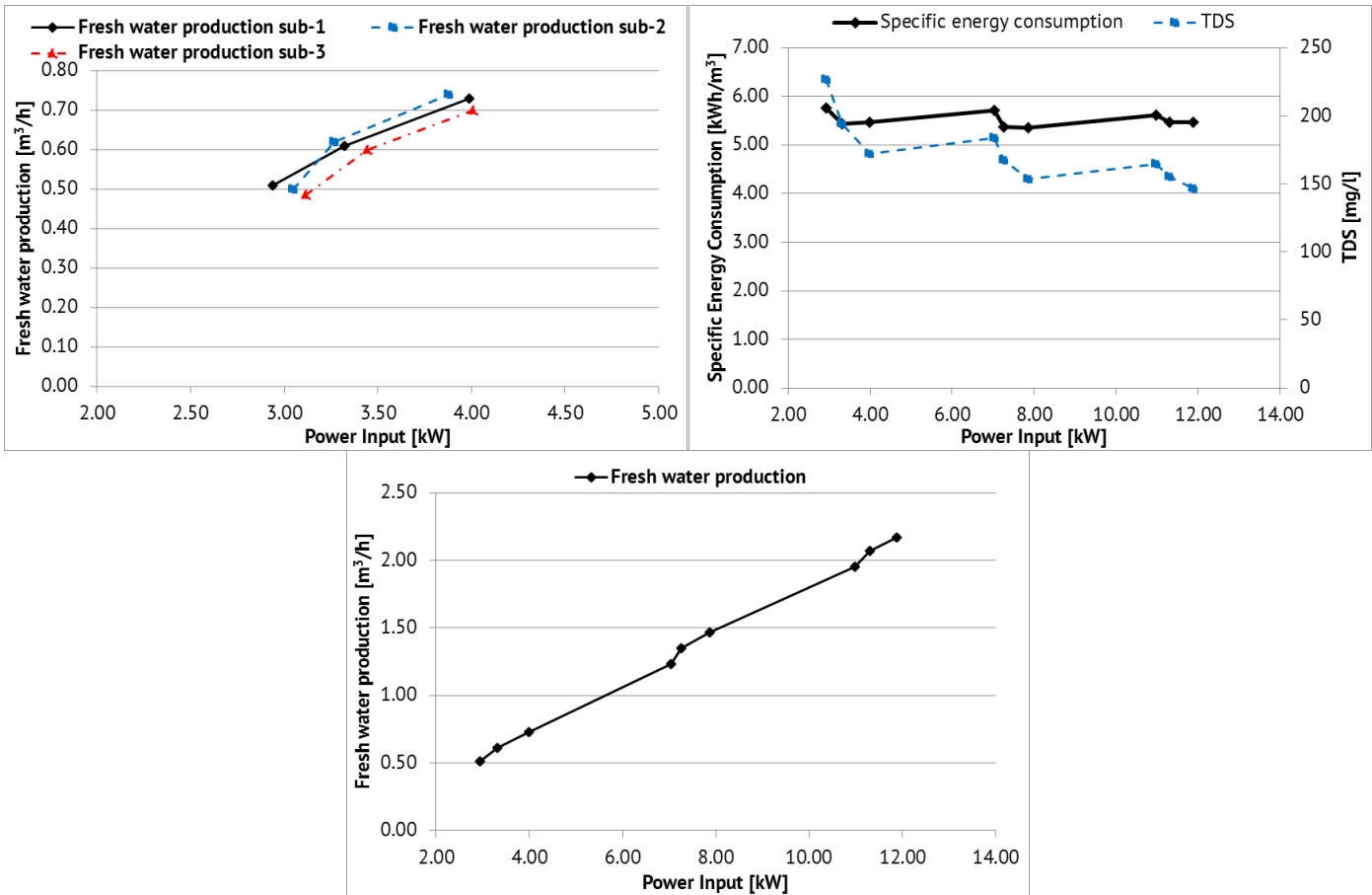
Η ποιότητα του παραγόμενου νερού σε σχέση με την ισχύ στο σύστημα για τις τρεις υπομονάδες φαίνεται αμέσως παρακάτω.



Ειδική κατανάλωση ενέργειας και ποιότητα παραγόμενου νερού κάθε υπομονάδας, σε σχέση με την ισχύ

Η ποιότητα νερού παραγωγής σε σχέση με την ισχύ στην είσοδο είναι παρόμοια για τη δεύτερη και τρίτη υπομονάδα, ενώ η πρώτη παρουσιάζει μια ελαφρά κατώτερη ποιότητα παραγόμενου νερού. Ωστόσο, σε όλο το εύρος λειτουργίας, η ποιότητα του παραγόμενου νερού κι από τις τρεις υπομονάδες παραμένει πολύ καλή και ασφαλώς εντός ορίων ποσιμότητας (<500 mg/l).

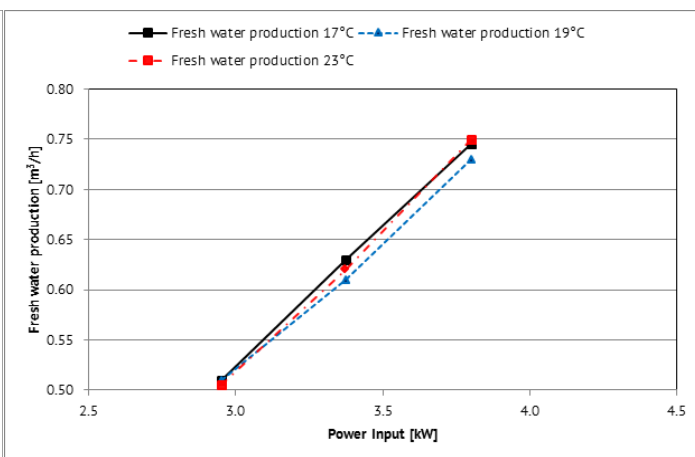
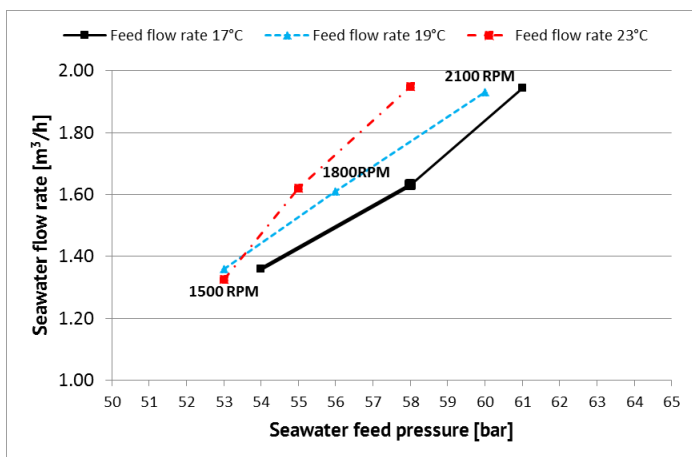
Η λειτουργία σε υψηλή αλατότητα νερού τροφοδοσίας του συστήματος σαν σύνολο παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα.



Λειτουργία του ολοκληρωμένου συστήματος

Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα, οι τρεις υπομονάδες παράγουν $\sim 0.72 \text{ m}^3/\text{h}$ με κατανάλωση ισχύος $\sim 4 \text{ kW}$. Η μονάδα RO στα 12 kW λειτουργίας παράγει $\sim 2.3 \text{ m}^3/\text{h}$ (στο 70% της ικανότητάς της) και η ποιότητα παραγόμενου νερού παραμένει πολύ καλή σε όλο το εύρος λειτουργίας.

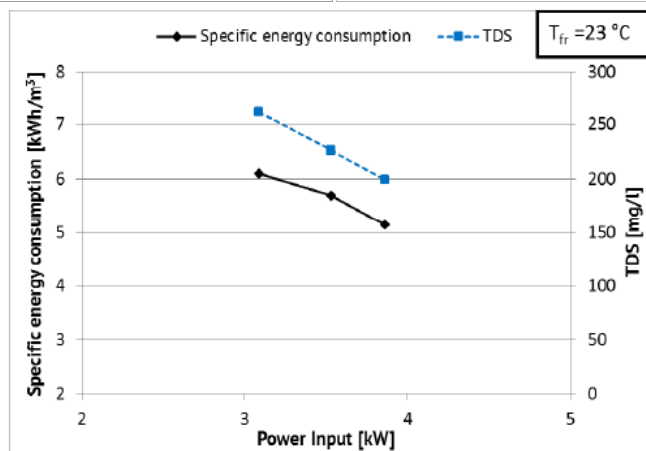
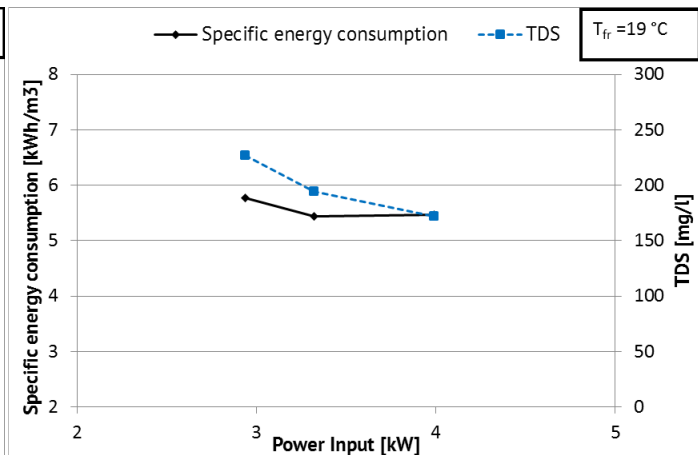
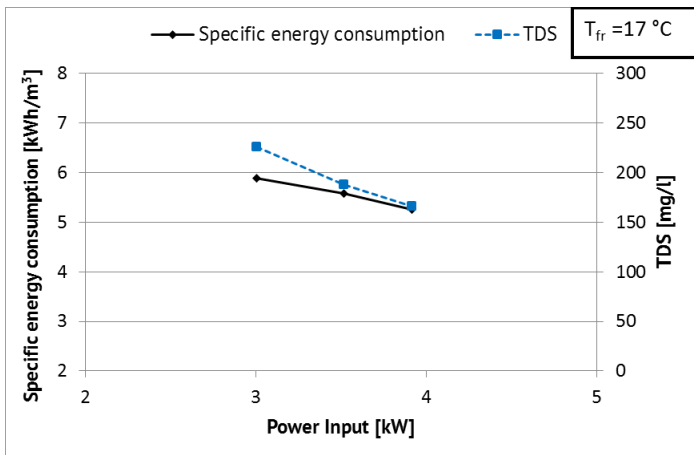
Στη συνέχεια, ερευνάται η επιρροή της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας στο σύστημα. Μελετάται η περίπτωση της υψηλής αλατότητας σε μια μόνο υπομονάδα (εφόσον και οι τρεις υπομονάδες είναι πανομοιότυπες μεταξύ τους). Τα παρακάτω διαγράμματα δείχνουν την παροχή νερού τροφοδοσίας σε σχέση με την πίεση και την ισχύ στην είσοδο του συστήματος.



Παροχή νερού τροφοδοσίας σε σχέση με την πίεση και την ισχύ στο σύστημα

Με την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας, παρατηρείται μια πτώση της πίεσης λειτουργίας. Αυτό συμβαίνει καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται η διαλυτότητα του νερού και απαιτείται μικρότερη πίεση για την αφαίρεση των αλάτων του. Επίσης, οι τρεις υπομονάδες παρουσιάζουν ίδια λειτουργία ως προς την παραγωγή ποσίου νερού σε σχέση με την ισχύ εφόσον οι καμπύλες τους σχεδόν συμπίπτουν.

Η ειδική κατανάλωση ενέργειας και η ποιότητα του παραγόμενου νερού σε σχέση με τη θερμοκρασία παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Ειδική κατανάλωση ενέργειας και ποιότητα παραγόμενου νερού σε σχέση με την κατανάλωση ισχύος

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα η ειδική κατανάλωση ενέργειας επηρεάζεται πολύ λίγο από την μεταβολή της θερμοκρασίας. Αντιθέτως, η ποιότητα του παραγόμενου νερού χειροτερεύει με την αύξηση της θερμοκρασίας αν και παραμένει εντός ορίων ποσιμότητας σε όλο το εύρος λειτουργίας.

Συμπεράσματα πειραματικής αξιολόγησης της πολυβάθμιας μονάδας αντίστροφης ώσμωσης

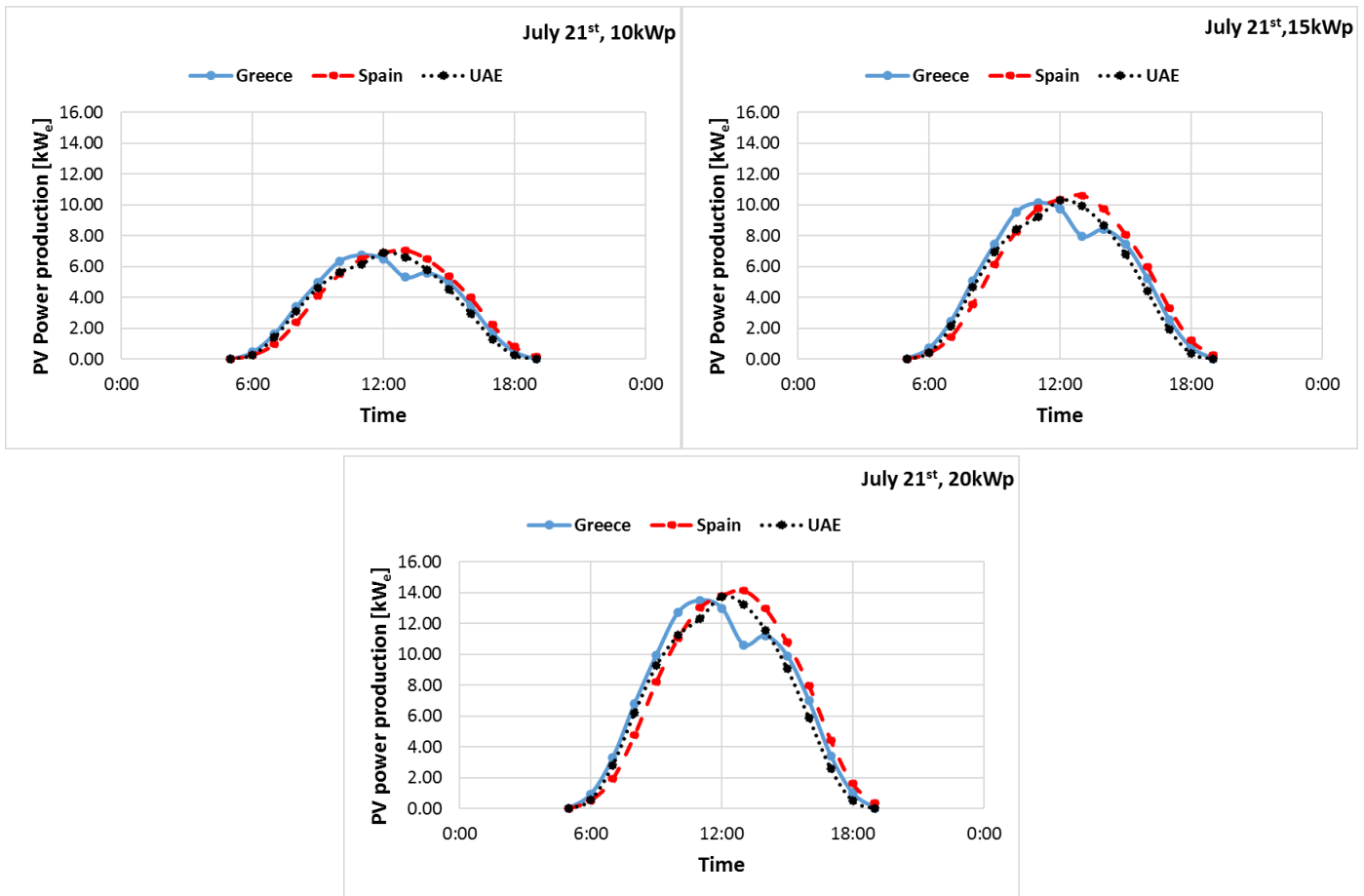
Τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την πειραματική αξιολόγηση του συστήματος αντίστροφης ώσμωσης συνοψίζονται στα εξής:

- ✓ Αποδοτική λειτουργία σε όλο το εύρος ισχύος
- ✓ Αποδοτική λειτουργία σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας
- ✓ Καλή ποιότητα παραγόμενου νερού σε όλο το εύρος λειτουργίας
- ✓ Αποδεκτή ειδική κατανάλωση ενέργειας, αν και ελαφρώς αυξημένη αν ληφθεί υπόψη και το σύστημα ανάκτησης ενέργειας (οι αντλίες υψηλής πίεσης λειτουργούσαν σε χαμηλότερο φορτίο από το ονομαστικό τους και απαιτούσαν περισσότερη ισχύ για τα ίδια κυβικά παραγόμενου νερού)
- ✓ Η μονάδα παρήγαγε πάνω από 2 m³/h για λειτουργία στο 70% της ικανότητάς της, με κατανάλωση ισχύος ~ 10 kW, φανερώνοντας μια πιο αποδοτική μονάδα από την αναμενόμενη από το σχεδιασμό και για τις συγκεκριμένες πειραματικές συνθήκες (χάρη σε κατασκευαστικούς λόγους ή λόγους που σχετίζονται με τις πειραματικές συνθήκες, όπως θερμοκρασία, αλατότητα κτλ.)

Κυριότερο συμπέρασμα ωστόσο είναι ότι η επιλεγμένη διαμόρφωση προσφέρει αδιαμφισβήτητα ευελιξία και εξασφαλίζει νερό καλής ποιότητας σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας, από πολύ χαμηλό φορτίο μέχρι υψηλό.

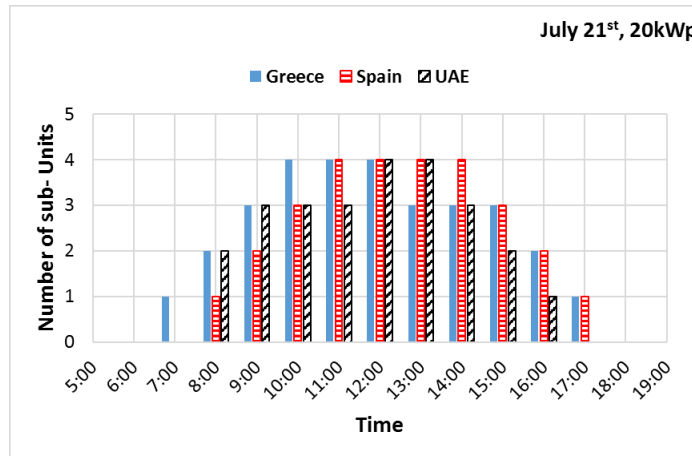
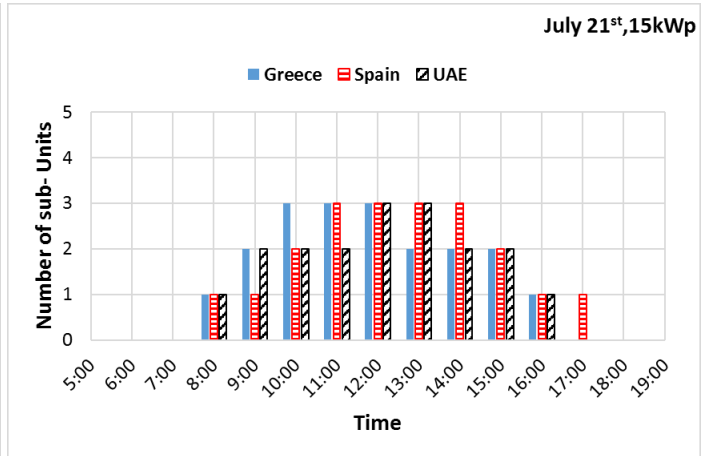
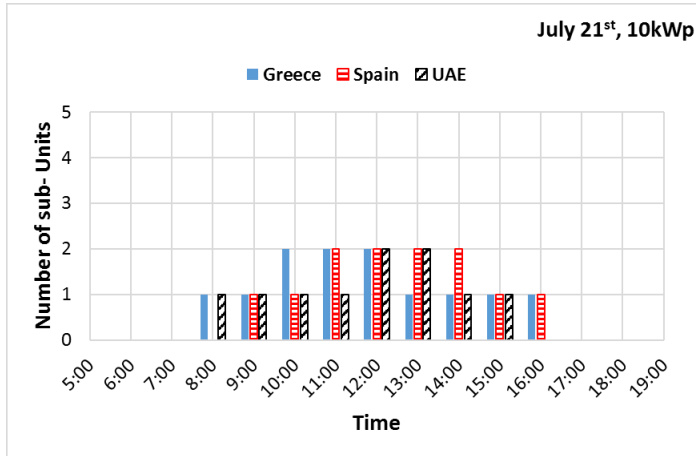
Με στόχο να επιβεβαιωθεί το πειραματικό αυτό συμπέρασμα, στα πλαίσια της διατριβής αυτής, παρουσιάζεται μια μελέτη περίπτωσης όπου το πολυβάθμιο σύστημα αφαλάτωσης σύστημα αφαλάτωσης συνδυάζεται με συστήματα φωτοβολταϊκών διαφόρων δυναμικοτήτων σε τρεις διαφορετικές περιοχές του πλανήτη (Ελλάδα, Ισπανία και Αραβικά Εμιράτα) και εξετάζεται η λειτουργία τους για μια τυπική καλοκαιρινή και μια τυπική χειμερινή ημέρα. Το πολυβάθμιο σύστημα συγκρίνεται επίσης και με την περίπτωση που θα χρησιμοποιούνταν μια μόνο μονάδα αφαλάτωσης κατάλληλης δυναμικότητας σε κάθε περίπτωση. Οι παραδοχές που έγιναν για τη μελέτη αυτή είναι ότι τα φωτοβολταϊκά σε κάθε περίπτωση είχαν νότιο προσανατολισμό και ήταν πακτωμένα σε σταθερή βάση και η κλίση τους για την Ελλάδα ήταν 32°, την Ισπανία 37° και τα Αραβικά Εμιράτα 22°. Τα αποτελέσματα της μελέτης περίπτωσης παρουσιάζονται παρακάτω.

Τυπική καλοκαιρινή ημέρα: 21 Ιουλίου



Παραγωγή ισχύος από φωτοβολταϊκά συστήματα για τρεις διαφορετικές περιοχές

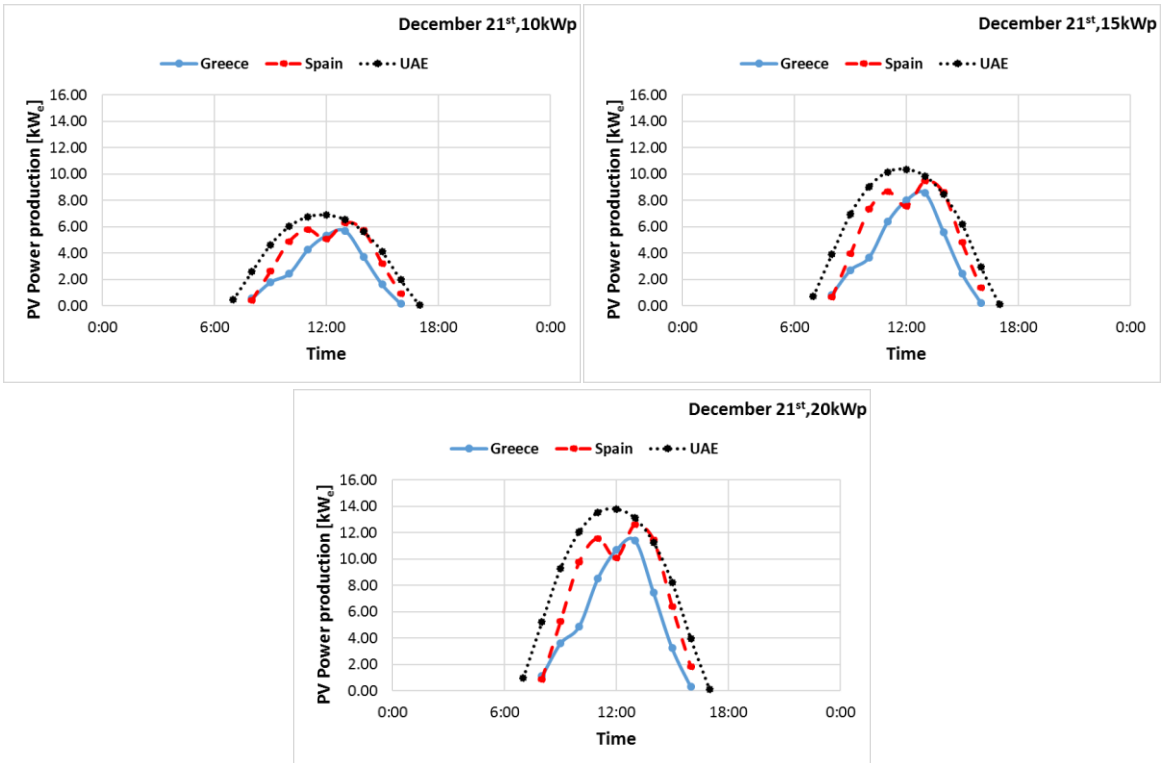
Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται το προφίλ ισχύος που παράγεται από το σύστημα των φωτοβολταϊκών σε κάθε περίπτωση. Στη συνέχεια φαίνεται ο αριθμός των υπομονάδων που θα λειτουργούσαν βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων του συστήματος.



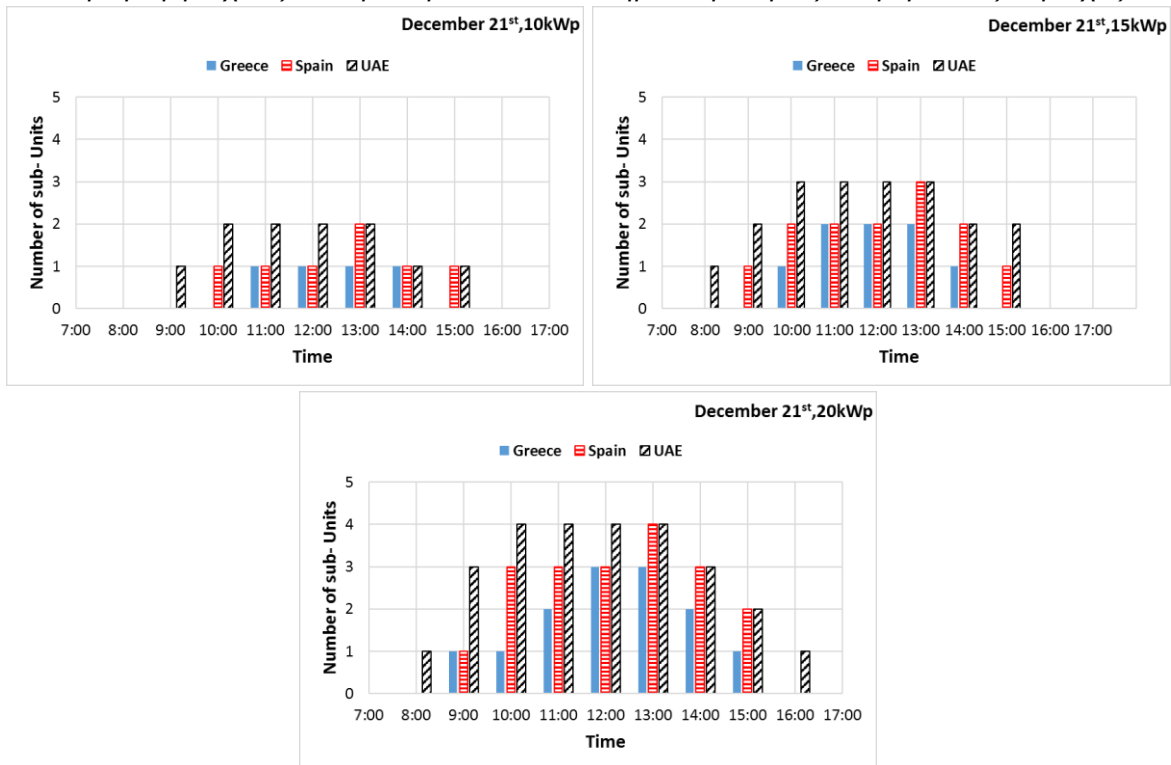
Αριθμός μονάδων του πολυβάθμιου συστήματος που θα λειτουργούν αντίστοιχα

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα, το πολυβάθμιο σύστημα αφαλάτωσης καταλήγει να λειτουργεί μέχρι και με τέσσερις υπομονάδες κατά τη διάρκεια της ημέρας σε όλες τις περιοχές. Αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται και για μια τυπική χειμερινή ημέρα.

Τυπική χειμερινή ημέρα: 21 Δεκεμβρίου



Παραγωγή ισχύος από φωτοβολταικά συστήματα για τρεις διαφορετικές περιοχές



Αριθμός μονάδων του πολυβάθμιου συστήματος που θα λειτουργούν αντίστοιχα

Ακόμη και στην περίπτωση της χειμερινής ημέρας, το πολυβάθμιο σύστημα επιτρέπει την παραγωγή νερού από μια έως και τέσσερις υπομονάδες καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η καλύτερη λειτουργία το χειμώνα διαπιστώνεται στην περιοχή των Αραβικών Εμιράτων.

Η σύγκριση του πολυβάθμιου συστήματος με μια συμβατική μονοβάθμια μονάδα σε κάθε περίπτωση διέπεται από τις παρακάτω παραδοχές:

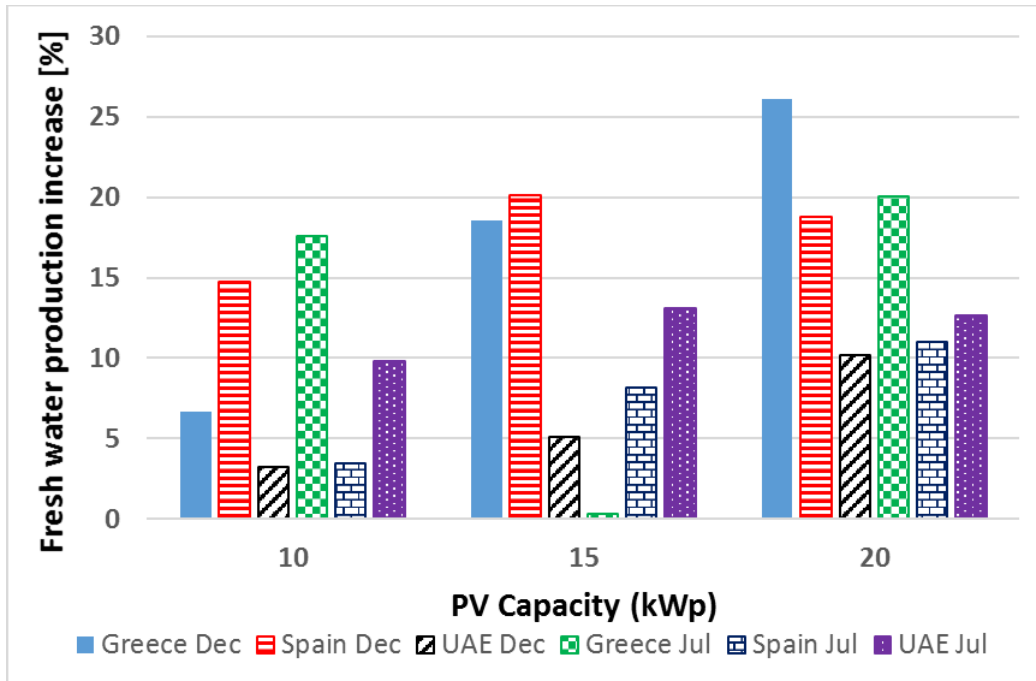
- Επιλέγεται κατά περίπτωση μονάδα αφαλάτωσης αναλόγου δυναμικότητας:
 - για το **PV** σύστημα των **10 kWp** σε όλες τις περιοχές, μια **μονάδα** δυναμικότητας **7 kW**
 - για το **PV** σύστημα των **15 kWp** στην Ελλάδα μια **μονάδα** των **8 kW** και στην Ισπανία και στα Αραβικά Εμιράτα μια **μονάδα** των **11 kW**
 - για το **PV** σύστημα των **20 kWp** στην Ελλάδα και στα Αραβικά Εμιράτα μια **μονάδα** των **14 kW** και στην Ισπανία μια **μονάδα** των **15 kW**
- Η συμβατική μονάδα σταματά να λειτουργεί όταν το φορτίο πέσει κάτω από το 50% της δυναμικότητάς της (η αντλία υψηλής πίεσης δεν λειτουργεί κάτω από 25 Hz)
- Η ειδική κατανάλωση ενέργειας της συμβατικής μονάδας λαμβάνεται ως 5 kWh στο 100% της δυναμικότητας της και ως 6 kWh στο 50%

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

	Greece			Spain			UAE		
PV capacity (kWp)	10	15	20	10	15	20	10	15	20
Fresh water production (21 st of December) – multi-skid RO (m ³ /day)	3.60	6.08	9.20	5.78	9.54	12.44	7.46	11.99	17.15
Fresh water production (21 st of December) – conventional RO (m ³ /day)	3.36	4.95	6.80	4.93	7.62	10.10	7.22	11.38	15.40
Fresh water production (21 st of July) – multi-skid RO (m ³ /day)	8.71	13.36	19.02	8.46	14.03	19.16	7.92	12.88	17.35
Fresh water production (21 st of July) – conventional RO (m ³ /day)	7.18	13.32	15.21	8.17	12.88	17.05	7.14	11.19	15.15

Σε κάθε περίπτωση το πολυβάθμιο σύστημα οδηγεί σε μεγαλύτερη συνολική παραγωγή ποσίου νερού.

Τέλος, η αύξηση της παραγωγής καθαρού νερού με την πολυβάθμια μονάδα RO για τα διάφορα συστήματα φωτοβολταϊκών σε σχέση με την αντίστοιχη συμβατική μονάδα RO φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Αύξηση της παραγωγής καθαρού νερού με την πολυβάθμια μονάδα RO για διάφορα συστήματα φωτοβολταϊκών σε σχέση με την αντίστοιχη συμβατική μονάδα RO

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, η αύξηση της παραγωγής από το πολυβάθμιο σύστημα φτάνει και μάλιστα για την Ελλάδα και το σύστημα των 20 kWp φωτοβολταϊκών πάνω από το 25% σε σχέση με μια συμβατική μονάδα RO.

Πειραματική διερεύνηση και αξιολόγηση της διβάθμιας μηχανής Οργανικού Κύκλου Rankine

Η μηχανή Οργανικού Κύκλου Rankine εξετάστηκε πειραματικά στο εργαστήριο, για διάφορες θερμοκρασίες λειτουργίας, σε μονοβάθμια και διβάθμια λειτουργία με ρεύμα από το δίκτυο, με εργαζόμενο μέσο στο θερμικό κύκλωμα νερό και MEG. Πιο συγκεκριμένα, τα πειράματα που εκτελέστηκαν είναι:

Test No.	Θερμοκρασία λειτουργίας [°C]	Μονοβάθμια λειτουργία & Διβάθμια λειτουργία	Εργαζόμενο μέσο στο θερμικό κύκλωμα
1	70	✓	Νερό
2	85	✓	Νερό
3	95	✓	Νερό- Γλυκόλη MEG
4	110	✓	Γλυκόλη MEG
5	120	✓	Γλυκόλη MEG
6	130	✓	Γλυκόλη MEG

Σκοπός της παρούσας πειραματικής διερεύνησης είναι η αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος σε μεταβλητό φορτίο. Εξετάζεται η λειτουργία σε θερμοκρασιακό εύρος από 70 έως 130 °C, με λειτουργία της αντλίας και των εκτονωτών σε διάφορους συνδυασμούς ταχυτήτων περιστροφής (διαφορετικά σημεία λειτουργίας του συστήματος) και γίνεται παρουσίαση των βέλτιστων σημείων λειτουργίας. Γίνεται επίσης ξεχωριστή αξιολόγηση της λειτουργίας των εκτονωτών, καθώς προέκυψαν από τροποποίηση συμπιεστών (σε ανάστροφη λειτουργία) και είναι απαραίτητη η χάραξη των καμπυλών λειτουργίας τους. Η μονοβάθμια λειτουργία γίνεται με παράκαμψη του πρώτου εκτονωτή που πραγματοποιείται με τη βοήθεια ηλεκτροβάνας για χαμηλό φορτίο εισόδου.

Οι ιδιότητες που καταγράφονται κατά τα πειράματα είναι:

- Η πίεση και θερμοκρασία στην είσοδο και έξοδο κάθε συνιστώσας του συστήματος (αντλία, ατμοποιητή, εκτονωτή/ ές, συμπυκνωτή)
- Η θερμοκρασία λειτουργίας του θερμικού κυκλώματος
- Η συχνότητα περιστροφής της αντλίας και των εκτονωτών
- Η παραγόμενη ισχύς εκτονωτών

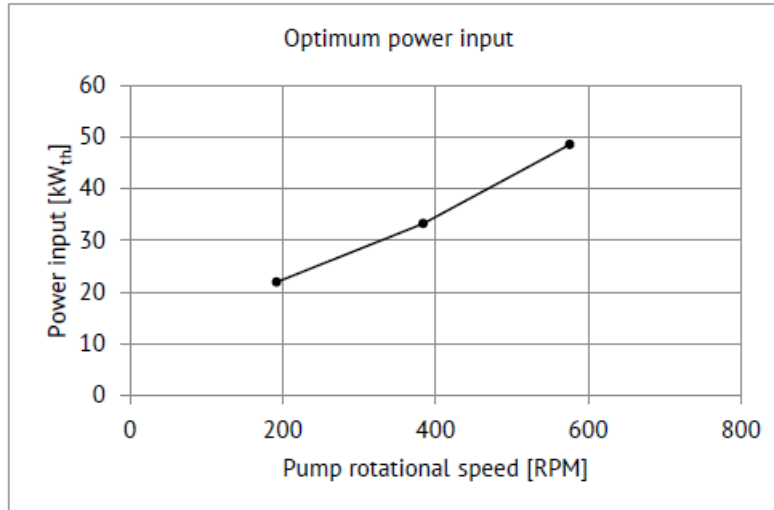
Οι ιδιότητες που εξετάζονται είναι:

- Η καθαρή παραγόμενη ισχύς εκτονωτών (παραγόμενη ισχύς μείον τις ιδιοκαταναλώσεις του συστήματος)
- Ο θερμικός βαθμός απόδοσης της μηχανής
- Το φορτίο εισόδου σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής της αντλίας
- Ο λόγος πίεσης εκτονωτών
- Ο βαθμός απόδοσης εκτονωτών

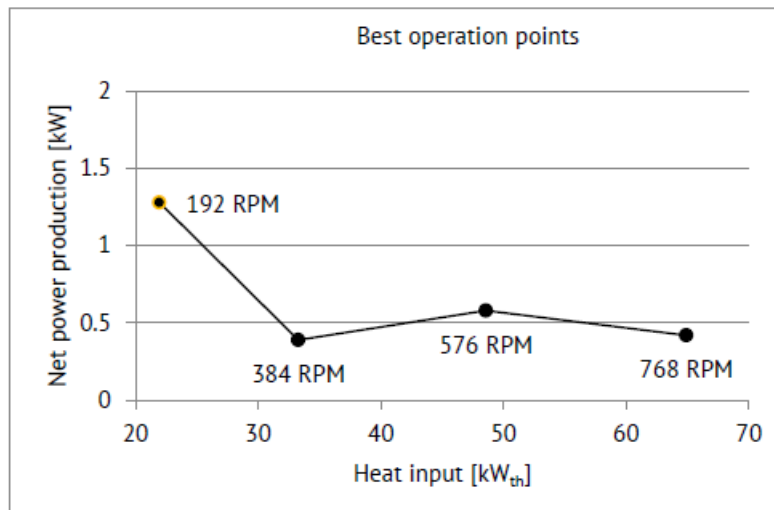
Η λειτουργία του συστήματος σε διάφορες θερμοκρασίες σε μονοβάθμια και διβάθμια λειτουργία και ειδικότερα η παραγωγή ισχύος και ο βαθός απόδοσης του συστήματος φαίνονται αμέσως παρακάτω.

Λειτουργία στους 70 °C

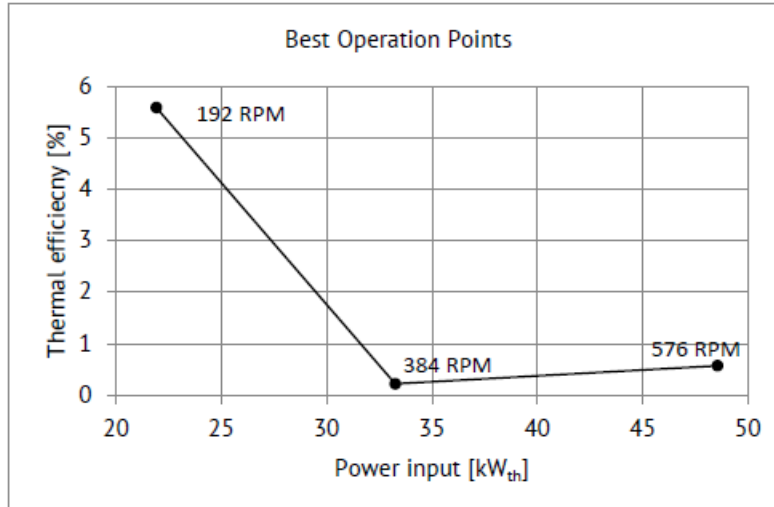
Το σύστημα λειτούργησε μόνο για μονοβάθμια λειτουργία. Το εργαζόμενο μέσο στο θερμικό κύκλωμα σε αυτή την περίπτωση είναι το νερό. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Βέλτιστα σημεία θερμικής ισχύος με τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της αντλίας



Βέλτιστα σημεία καθαρής παραγόμενης ισχύος με τη μεταβολή του θερμικού φορτίου εισόδου, μονοβάθμια λειτουργία

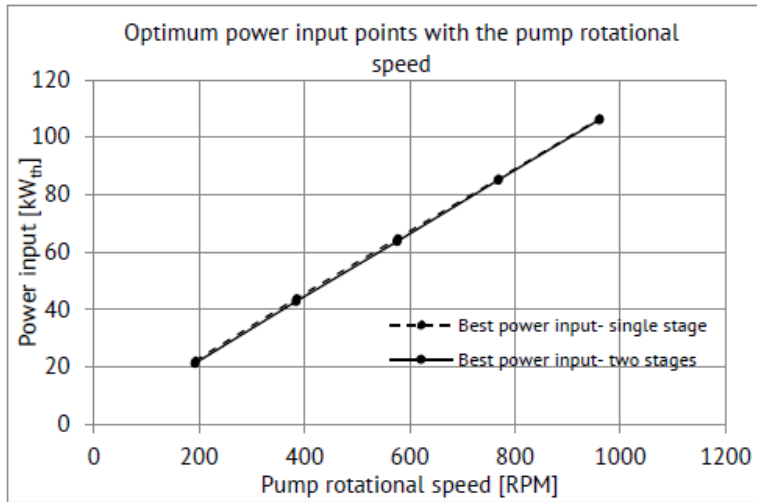


Βέλτιστα σημεία θερμικού βαθμού απόδοσης με τη μεταβολή του θερμικού φορτίου εισόδου, μονοβάθμια λειτουργία

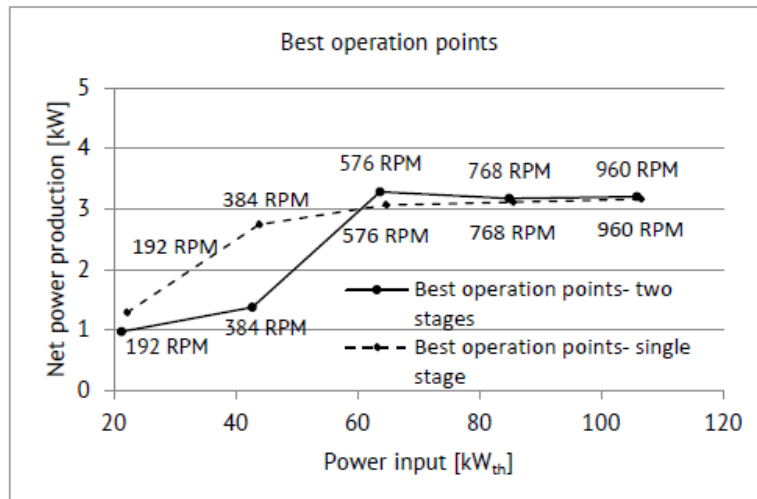
Έστω και εάν το σύστημα λειτουργήσει μόνο για μονοβάθμια λειτουργία, ωστόσο η παραγωγή ισχύος του έφτασε τα 1.3 kW και με βαθμό απόδοσης ~5.5%. λαμβάνοντας υπόψιν πόσο μακριά από τη θερμοκρασία σχεδιασμού είναι η θερμοκρασία λειτουργίας έστω και σε χαμηλό φορτίο η μηχανή παράγει ισχύ.

Στο επόμενο ερευνητικό βήμα, η θερμοκρασία λειτουργίας αυξάνεται στους 85°C και το εργαζόμενο μέσο στο θερμικό κύκλωμα παραμένει το νερό. Από τους 110 °C και πάνω, το εργαζόμενο μέσο στο θερμικό κύκλωμα είναι η γλυκόλη MEG. Για τους 95 °C το σύστημα ελέγχθηκε τόσο με νερό όσο και με γλυκόλη στο θερμικό κύκλωμα, αλλά καθώς τα αποτελέσματα ήταν πολύ παρόμοια, παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα για νερό. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αμέσως παρακάτω.

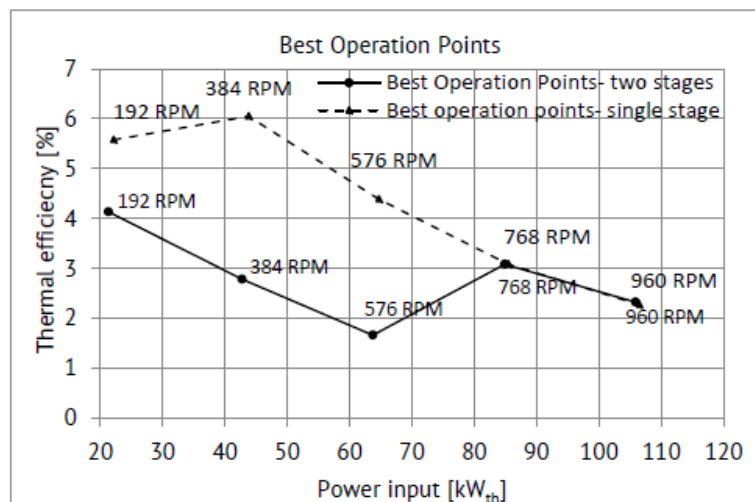
Λειτουργία στους 85 °C



Βέλτιστα σημεία θερμικής ισχύος με τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της αντλίας

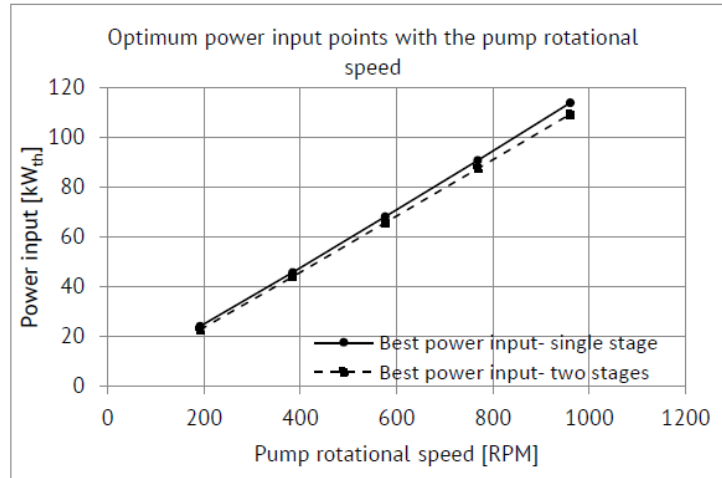


Βέλτιστα σημεία καθαρής παραγόμενης ισχύος με τη μεταβολή του θερμικού φορτίου εισόδου, μονοβάθμια & διβάθμια λειτουργία

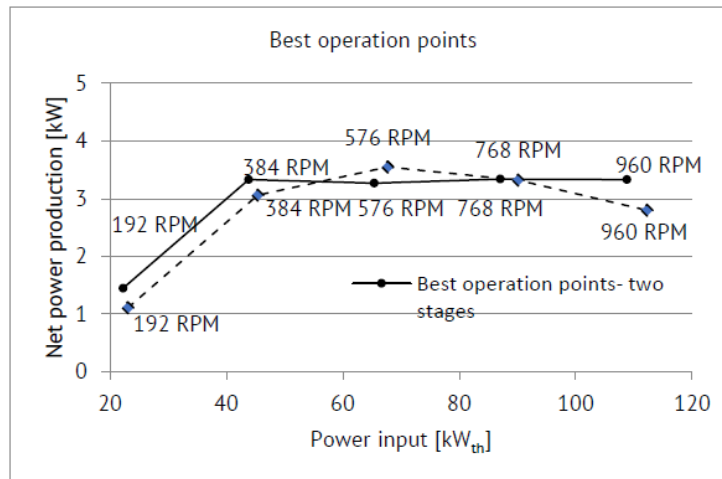


Βέλτιστα σημεία θερμικού βαθμού απόδοσης με τη μεταβολή του θερμικού φορτίου εισόδου

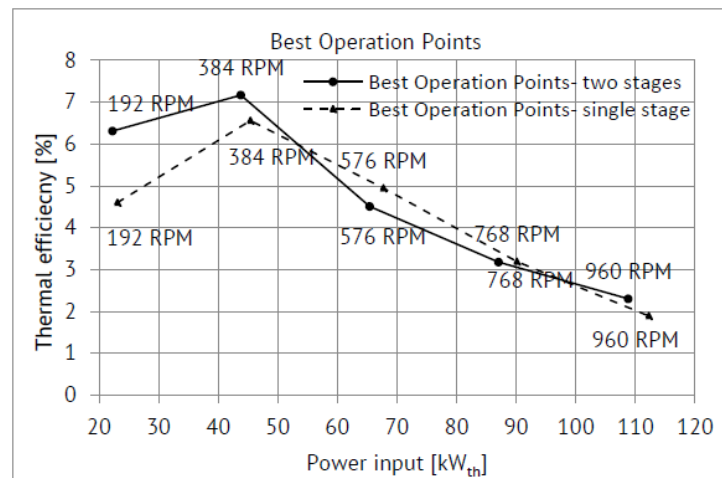
Λειτουργία στους 95 °C



Βέλτιστα σημεία θερμικής ισχύος με τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της αντλίας

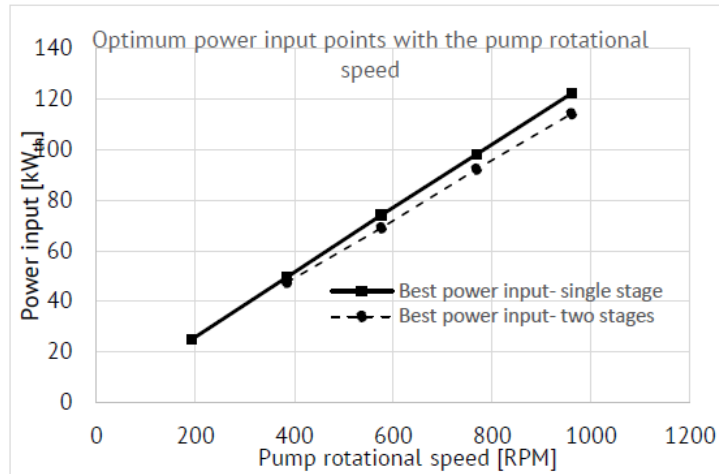


Βέλτιστα σημεία καθαρής παραγόμενης ισχύος με τη μεταβολή του θερμικού φορτίου εισόδου, μονοβάθμια και διβάθμια λειτουργία

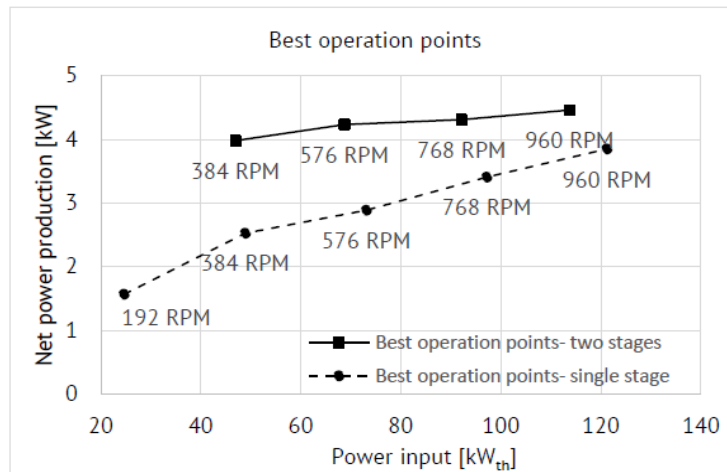


Βέλτιστα σημεία θερμικού βαθμού απόδοσης με τη μεταβολή του θερμικού φορτίου εισόδου, μονοβάθμια & διβάθμια λειτουργία

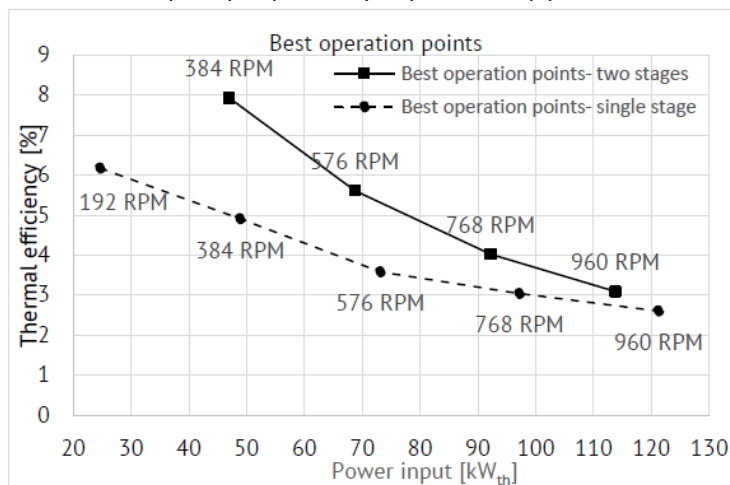
Λειτουργία στους 110 °C



Βέλτιστα σημεία θερμικής ισχύος με τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της αντλίας

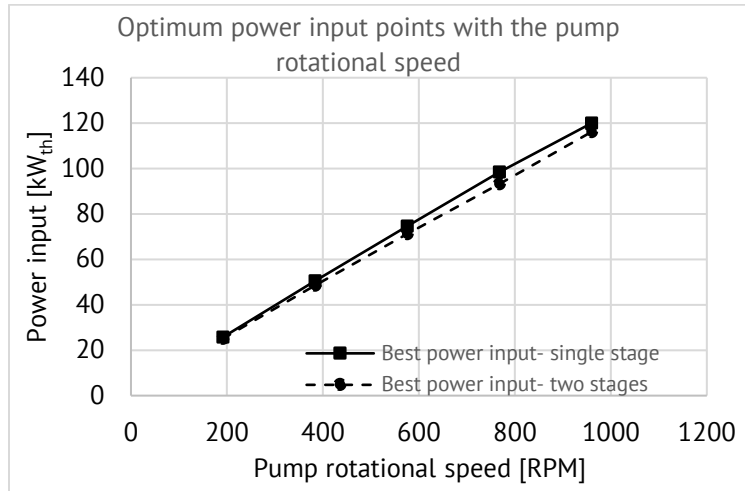


Βέλτιστα σημεία καθαρής παραγόμενης ισχύος με τη μεταβολή του θερμικού φορτίου εισόδου, μονοβάθμια & διβάθμια λειτουργία

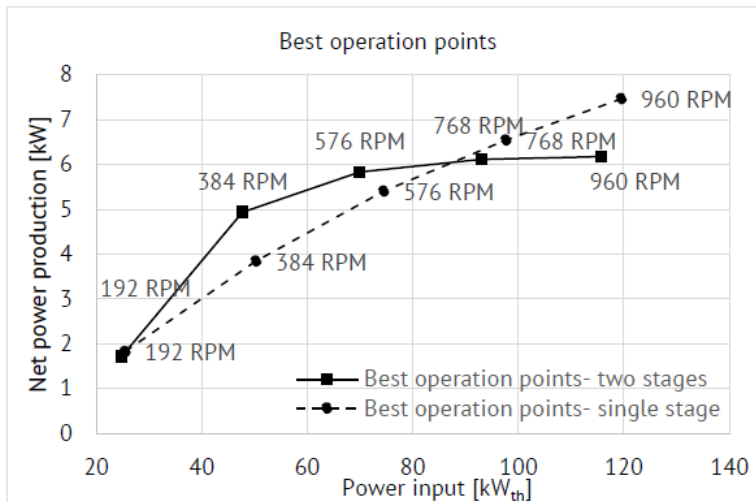


Βέλτιστα σημεία θερμικού βαθμού απόδοσης με τη μεταβολή του θερμικού φορτίου εισόδου, μονοβάθμια & διβάθμια λειτουργία

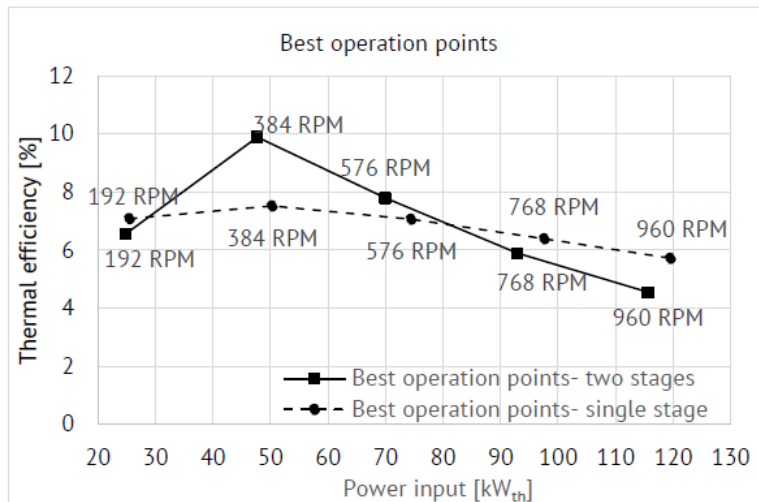
Λειτουργία στους 120 °C



Βέλτιστα σημεία θερμικής ισχύος με τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της αντλίας

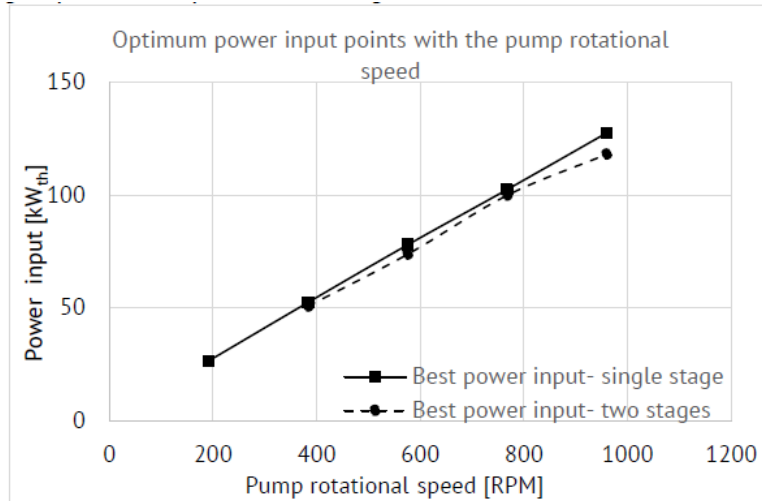


Βέλτιστα σημεία καθαρής παραγόμενης ισχύος με τη μεταβολή του θερμικού φορτίου εισόδου, μονοβάθμια και διβάθμια λειτουργία

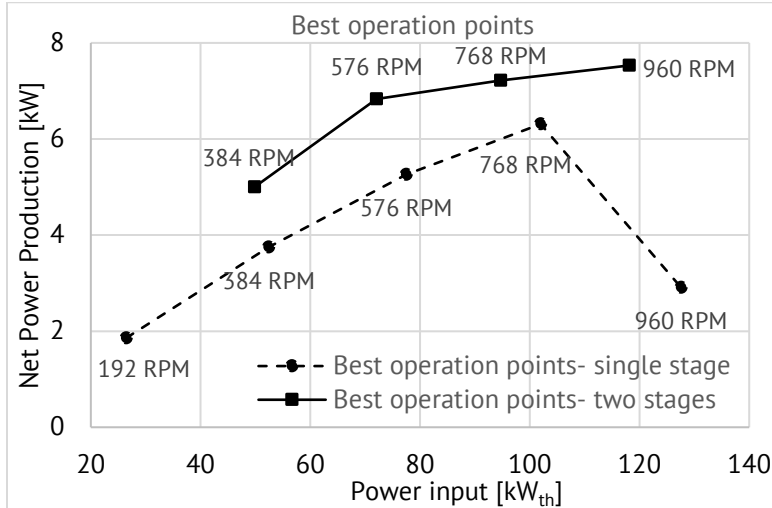


Βέλτιστα σημεία θερμικού βαθμού απόδοσης με τη μεταβολή του θερμικού φορτίου εισόδου

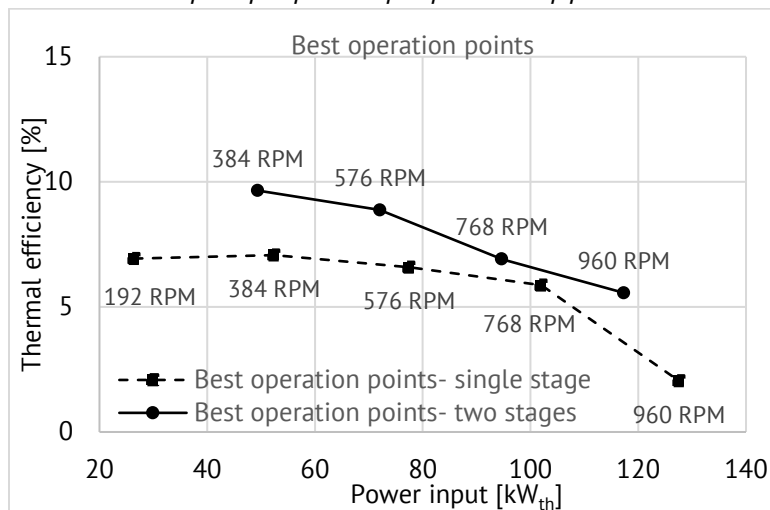
Λειτουργία στους 130 °C



Βέλτιστα σημεία θερμικής ισχύος με τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της αντλίας



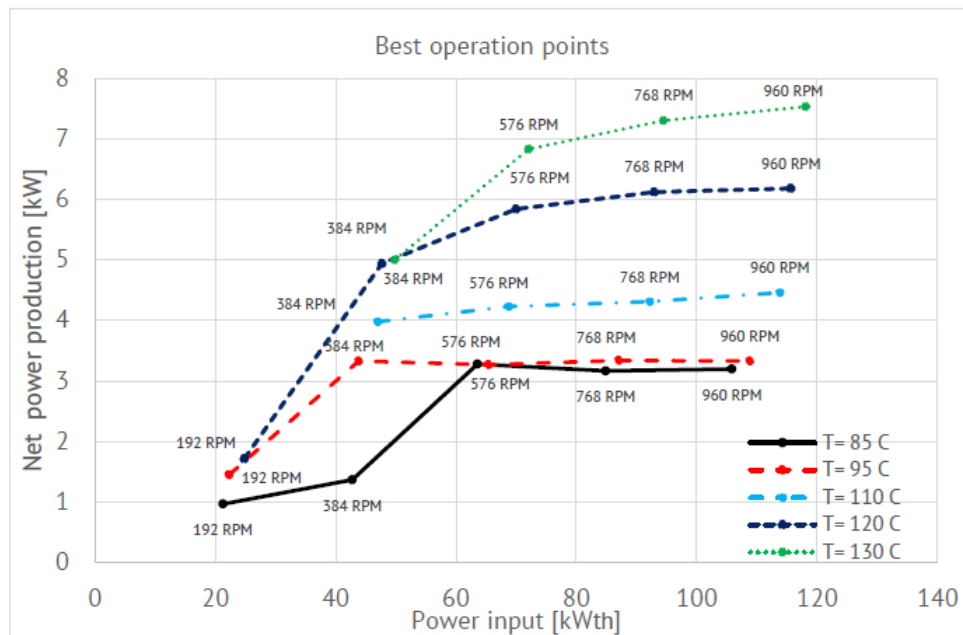
Βέλτιστα σημεία καθαρής παραγόμενης ισχύος με τη μεταβολή του θερμικού φορτίου εισόδου, μονοβάθμια & διβάθμια λειτουργία



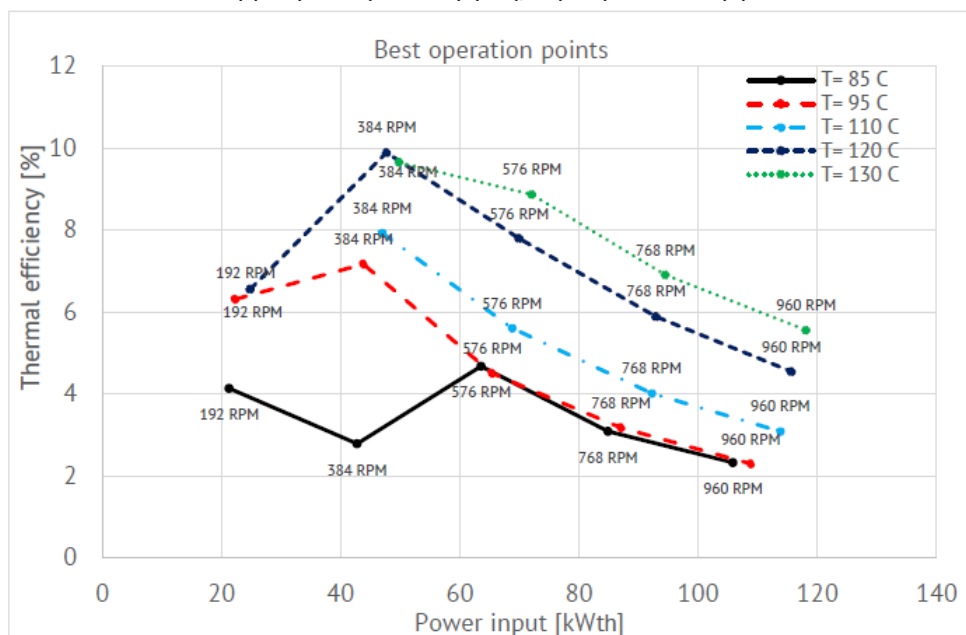
Βέλτιστα σημεία θερμικού βαθμού απόδοσης με τη μεταβολή του θερμικού φορτίου εισόδου

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω διαγράμματα, η μηχανή ORC παρουσιάζει αποδοτική λειτουργία τόσο σε μονοβάθμια όσο και σε διβάθμια λειτουργία, σε όλο το εύρος θερμοκρασιών. Ακόμη και στις χαμηλές θερμοκρασίες που βρίσκονται αρκετά μακριά από το σημείο σχεδιασμού, η παραγωγή ισχύος και ο βαθμός απόδοσης κυμαίνονται σε αρκετά υψηλές τιμές. Όσο η θερμοκρασία λειτουργίας πλησιάζει το σημείο σχεδιασμού, τόσο διαφαίνεται το προβάδισμα της διβάθμιας λειτουργίας σε σχέση με τη μονοβάθμια.

Μια άμεση σύγκριση της διβάθμιας λειτουργίας σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα:



Καθαρή παραγόμενη ισχύς για τα βέλτιστα σημεία λειτουργίας της μηχανής ORC σε όλες τις θερμοκρασίες λειτουργίας, διβάθμια λειτουργία



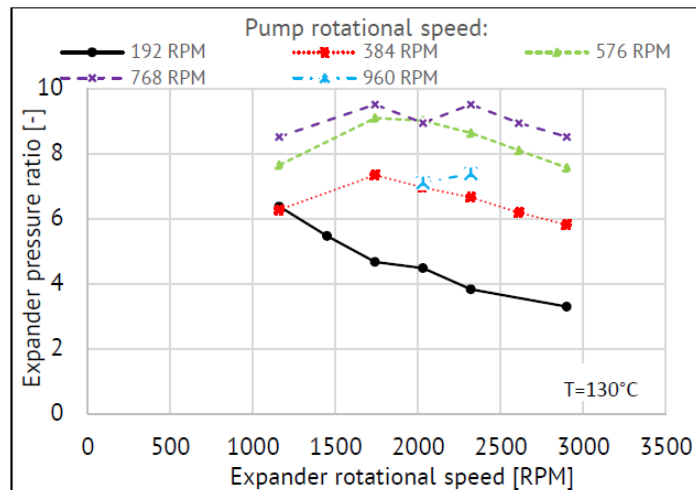
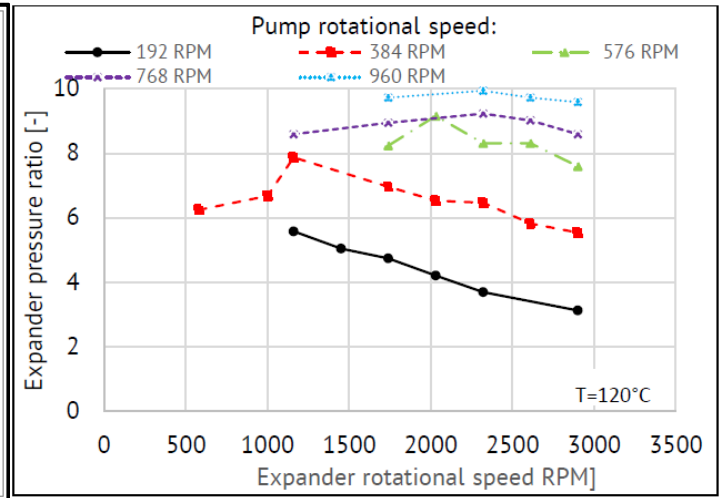
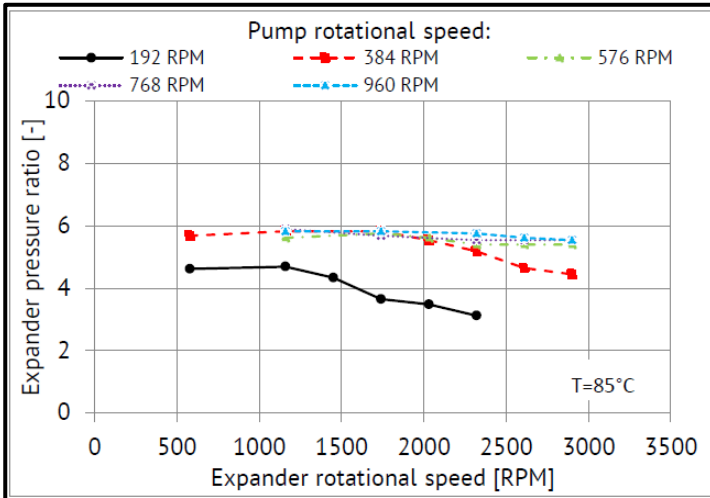
Θερμικός βαθμός απόδοσης για τα βέλτιστα σημεία λειτουργίας της μηχανής ORC σε όλες τις θερμοκρασίες λειτουργίας, διβάθμια λειτουργία

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη σύγκριση είναι ότι:

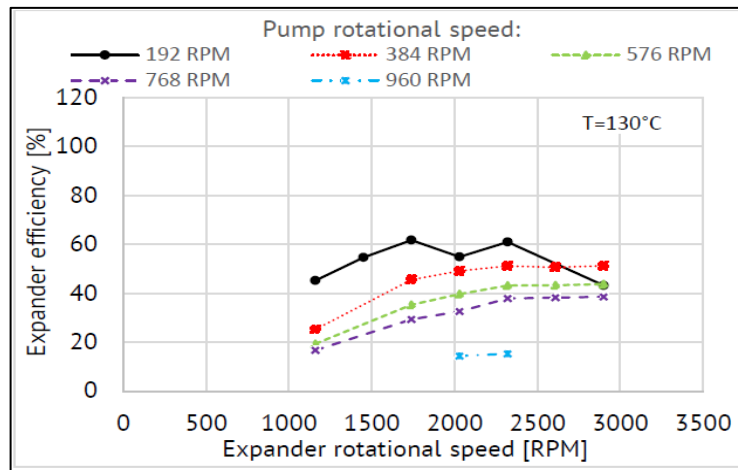
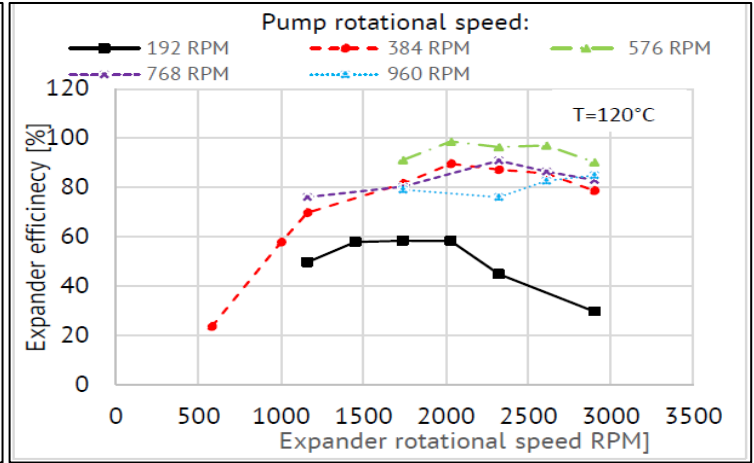
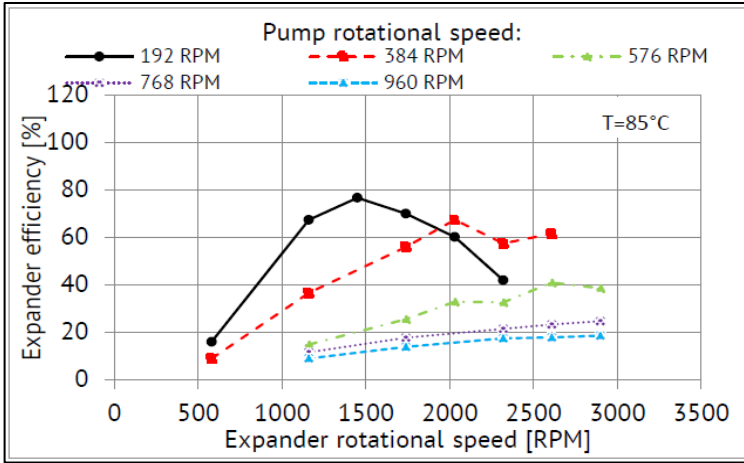
- η καθαρή παραγόμενη ισχύς αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (μεγάλη ενθαλπική πτώση στον ατμοποιητή)
- η μέγιστη παραγόμενη ισχύς είναι 7.53 kW στους 130°C (κοντά στην τιμή σχεδιασμού των 10 kW)
- το σύστημα παρουσιάζει ικανοποιητική και αποδοτική λειτουργία σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας
- ο μέγιστος θερμικός βαθμός απόδοσης είναι 9.89% στους 120°C (πολύ κοντά στην τιμή σχεδιασμού του 10%)
- η βέλτιστη λειτουργία συνολικά παρουσιάζεται στους 120°C (αποδοτική λειτουργία για το μεγαλύτερο εύρος του θερμικού φορτίου)

Διερεύνηση λειτουργίας εκτονωτών για ενδεικτικές θερμοκρασίες λειτουργίας, μονοβάθμια & διβάθμια λειτουργία

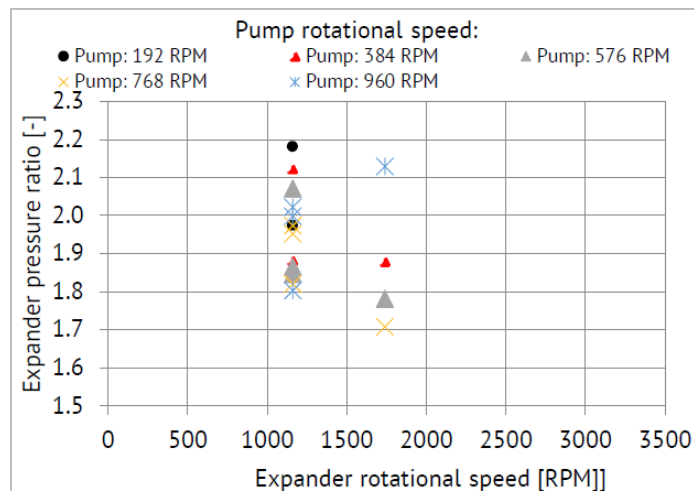
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η αξιολόγηση της λειτουργίας των εκτονωτών μέσω πειραματικής διερεύνησης γίνεται ξεχωριστά καθώς οι συνιστώσες αυτές προέκυχαν από τροποποίηση συμπιεστών και είναι απαραίτητη η χάραξη των καμπυλών λειτουργίας τους. Στα παρακάτω διαγράμματα, φαίνεται ο λόγος πίεσης και ο βαθμός απόδοσης των εκτονωτών σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής τους και την ταχύτητα περιστροφής της αντλίας για διάφορες ενδεικτικές θερμοκρασίες λειτουργίας.



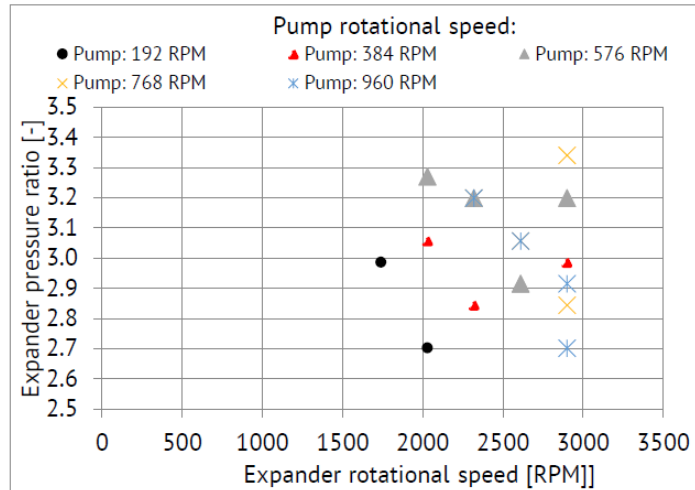
Λόγος πίεσης εκτονωτή σε συνάρτηση με την ταχύτητα περιστροφής του, σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής της αντλίας και διάφορες θερμοκρασίες λειτουργίας, μονοβάθμια λειτουργία



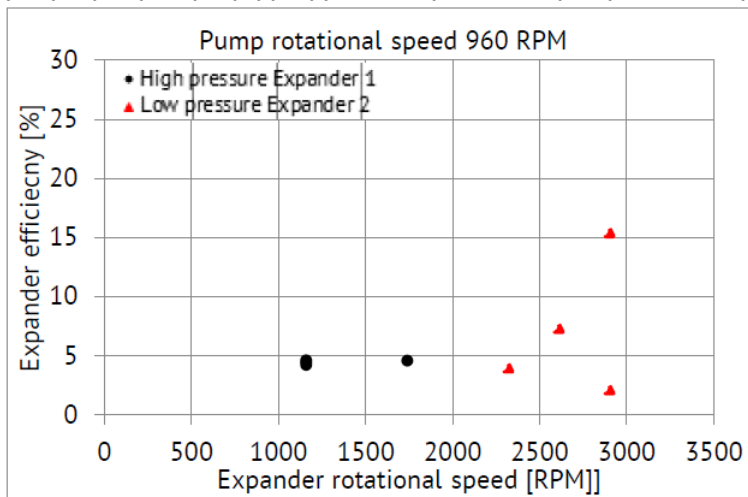
Βαθμός απόδοσης εκτονωτή σε συνάρτηση με την ταχύτητα περιστροφής του, σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής της αντλίας και διάφορες θερμοκρασίες λειτουργίας, μονοβάθμια λειτουργία



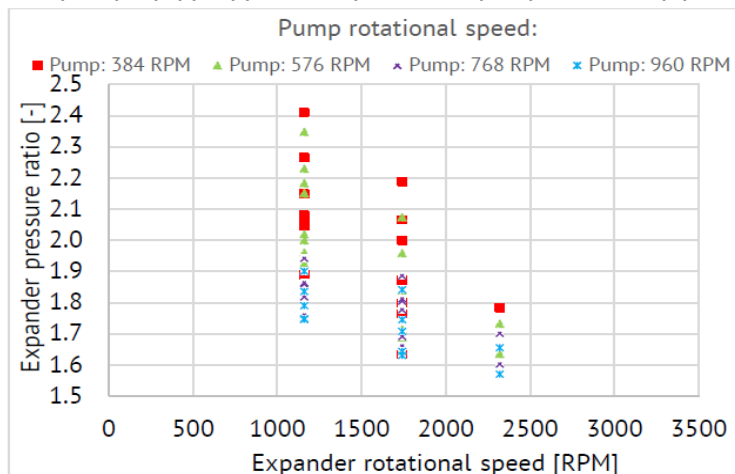
Λόγος πίεσης εκτονωτή υψηλής πίεσης με την ταχύτητα περιστροφής του, σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής της αντλίας, 85°C διβάθμια λειτουργία



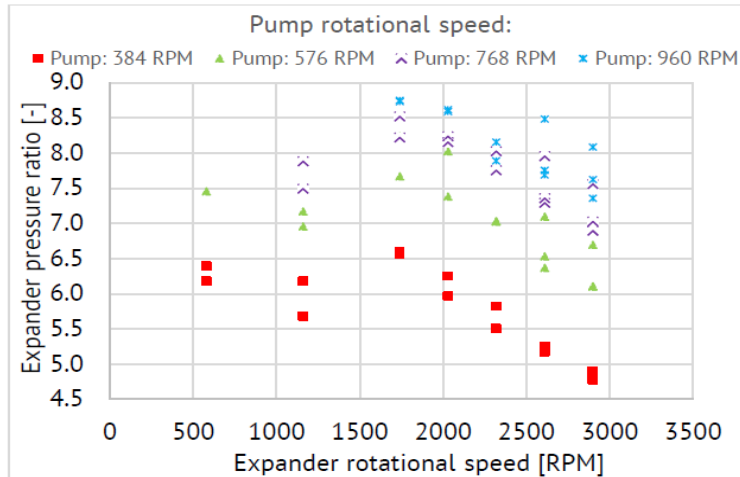
Λόγος πίεσης εκτονωτή χαμηλής πίεσης με την ταχύτητα περιστροφής του, σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής της αντλίας, 85°C διβάθμια λειτουργία



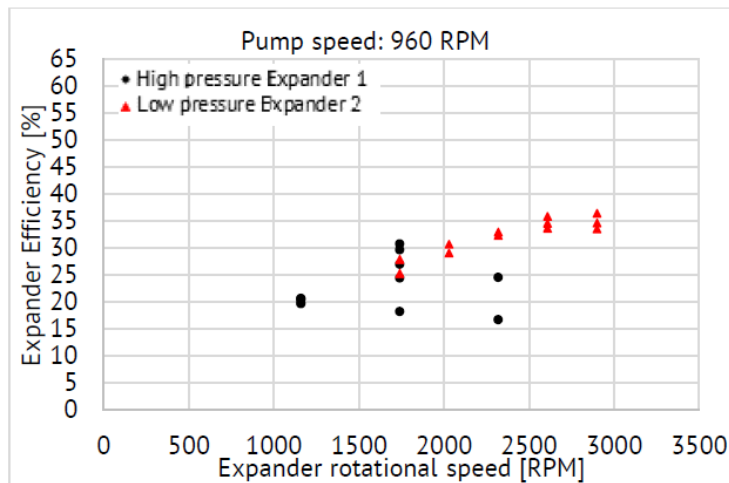
Βαθμός απόδοσης εκτονωτών με την ταχύτητα περιστροφής τους, για υψηλή ταχύτητα περιστροφής της αντλίας, 85°C διβάθμια λειτουργία



Λόγος πίεσης εκτονωτή υψηλής πίεσης με την ταχύτητα περιστροφής του, σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής της αντλίας, 130°C διβάθμια λειτουργία



Λόγος πίεσης εκτονωτή χαμηλής πίεσης με την ταχύτητα περιστροφής του, σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής της αντλίας, 130°C διβάθμια λειτουργία



Βαθμός απόδοσης εκτονωτών με την ταχύτητα περιστροφής τους, για υψηλή ταχύτητα περιστροφής της αντλίας, 130°C διβάθμια λειτουργία

Από τα παραπάνω διαγράμματα και πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι η λειτουργία των εκτονωτών είναι αποδοτική σε όλο το εύρος λειτουργίας, σε όλες τις θερμοκρασίες, σε μονοβάθμια και διβάθμια λειτουργία. Ωστόσο, σε σχέση με την προσομοίωση σχεδιασμού, ο εκτονωτής υψηλής πίεσης προέκυψε ελαφρώς μικρότερος με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται μια υποεκτόνωση του ρευστού και μια υπερεκτόνωση του ρευστού από τον εκτονωτή χαμηλής πίεσης. Παρ' όλα αυτά, για τους τροποποιημένους εκτονωτές του συστήματος προέκυψαν οι καμπύλες λειτουργίας και επιβεβαιώθηκε η αποδοτική τους λειτουργία.

Συμπεράσματα πειραματικής αξιολόγησης της διβάθμιας μηχανής Οργανικού Κύκλου Rankine

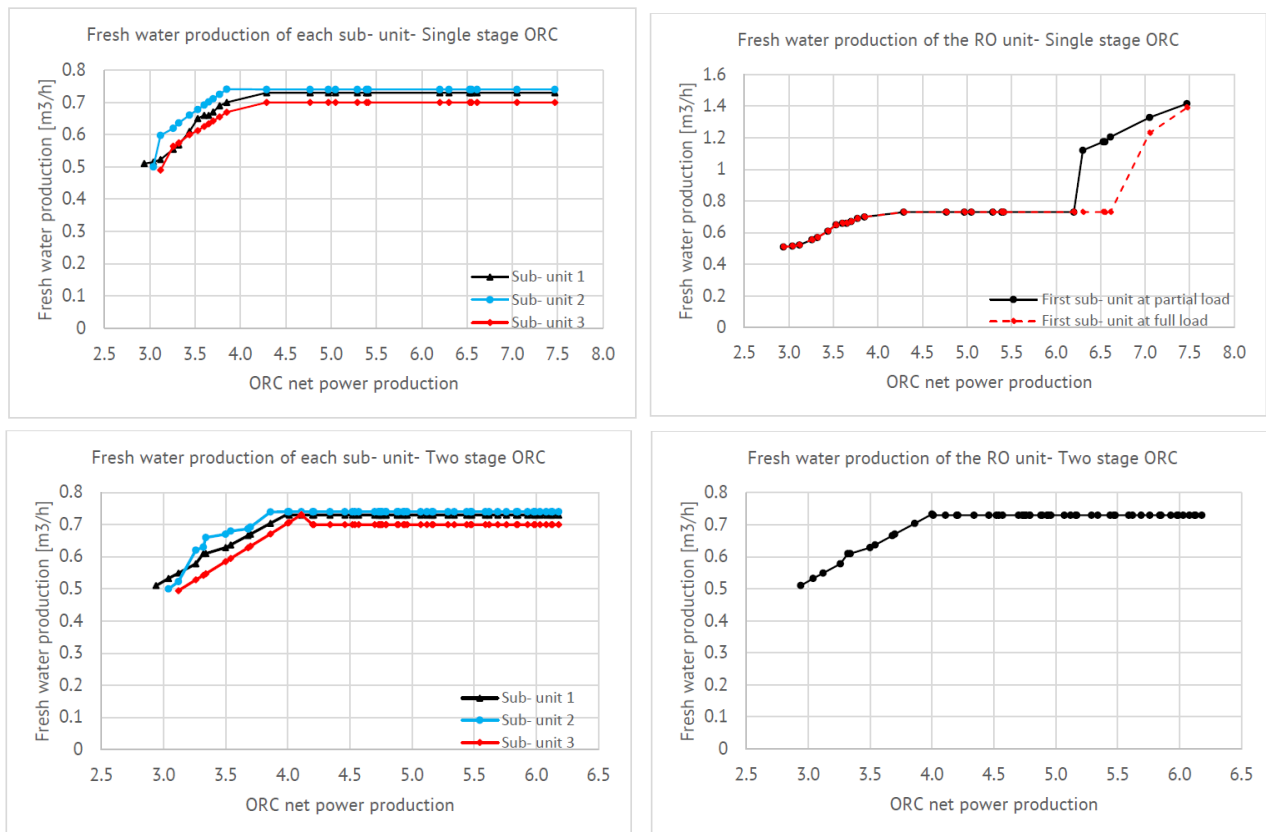
Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη πειραματική αξιολόγηση τις διβάθμιας μηχανής ORC είναι:

- ✓ Αποδοτική λειτουργία σε όλο το εύρος θερμικού φορτίου
- ✓ Βέλτιστη λειτουργία σε θερμοκρασία 120- 130°C
- ✓ Μέγιστη καθαρή παραγόμενη ισχύς: 7.5 kW
- ✓ Μέγιστος βαθμός απόδοσης μηχανής: 9.9%
- ✓ Ικανοποιητική λειτουργία σε χαμηλό φορτίο και σε μονοβάθμια λειτουργία, με βαθμούς απόδοσης που φτάνουν το 6- 7%
- ✓ Μέγιστος βαθμός απόδοσης εκτονωτών: ~62 % σε μονοβάθμια λειτουργία και 61 % σε διβάθμια λειτουργία
- ✓ Ο χαμηλός λόγος πίεσης του εκτονωτή υψηλής πίεσης σε συνδυασμό με την πτώση απόδοσης με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του απέδειξε μια ελαφρά υποδιαστασιολόγηση του εκτονωτή υψηλής πίεσης
- ✓ Η διβάθμια διαμόρφωση με δυο εκτονωτές στη σειρά που εξετάστηκε, κατέδειξε αξιοσημείωτη ευελιξία με παραγωγή ισχύος ακόμα και σε λειτουργία χαμηλού φορτίου (με παράκαμψη του πρώτου εκτονωτή)
- ✓ Η διβάθμια λειτουργία απεδείχθη σαφώς αποδοτικότερη από τη μονοβάθμια

Θεωρητική διερεύνηση και αξιολόγηση του ενιαίου υβριδικού συστήματος αφαλάτωσης

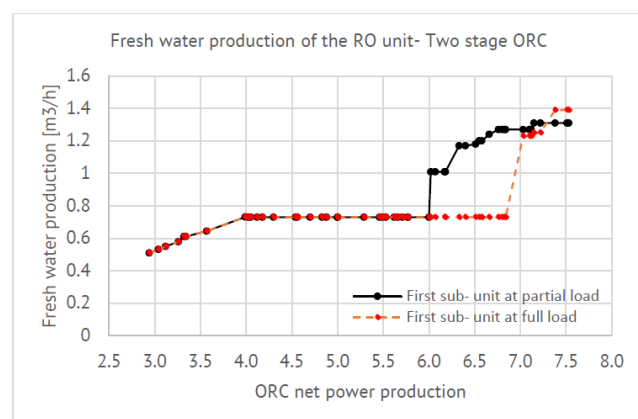
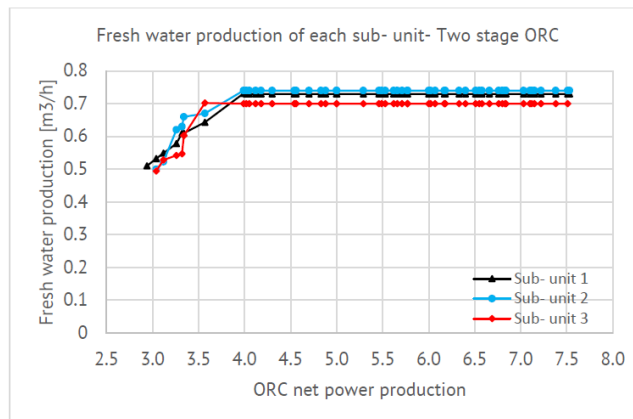
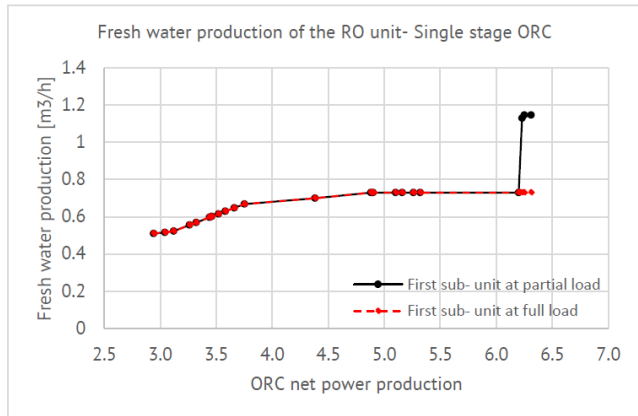
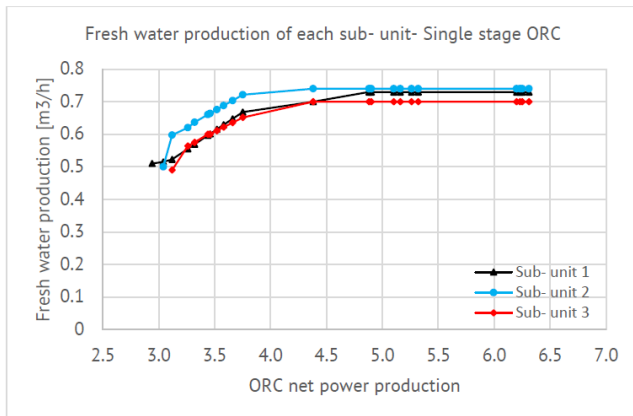
Καθώς η μηχανή ORC αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε από το μηδέν, η πειραματική της αξιολόγηση έγινε μεταγενέστερα από την πειραματική αξιολόγηση της μονάδας αφαλάτωσης. Για το λόγο αυτό και για κάποιους άλλους λόγους χρονοδιαγράμματος του προγράμματος στα πλαίσια του οποίου εκτελέστηκε το παρόν πείραμα, δεν κατέστη δυνατή η ηλεκτρική σύζευξη των δυο υποσυστημάτων. Ωστόσο, τα πειραματικά αποτελέσματα κάθε υποσυστήματος που προέκυψαν σύμφωνα με τα προηγούμενα, είναι τόσα πολλά που επιτρέπουν τη θεωρητική αξιολόγηση του ολοκληρωμένου πρωτοτύπου, εάν δηλαδή η παραγόμενη από τη μηχανή ORC ισχύς τροφοδοτούσε απευθείας τη μονάδα αφαλάτωσης. Τα αποτελέσματα αυτής της αξιολόγησης για τις θερμοκρασίες σχεδιασμού φαίνονται στα διαγράμματα αμέσως παρακάτω.

Θερμοκρασία λειτουργίας: 120°C



Παραγωγή καθαρού νερού από κάθε υπομονάδα και από τη μονάδα RO σε συνάρτηση με την προσφερόμενη ισχύ από τη μηχανή ORC για μονοβάθμια και διβάθμια λειτουργία, $T = 120^{\circ}\text{C}$

Θερμοκρασία λειτουργίας: 130°C



Παραγωγή καθαρού νερού από κάθε υπομονάδα και από τη μονάδα RO σε συνάρτηση με την προσφερόμενη ισχύ από τη μηχανή ORC για μονοβάθμια και διβάθμια λειτουργία, $T = 130^{\circ}\text{C}$

Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζεται η παραγωγή νερού από κάθε υπομονάδα και από το συνολικό σύστημα της αφαλάτωσης. Πιο συγκεκριμένα, η παραγωγή νερού από όλο το σύστημα παρουσιάζεται τόσο για την περίπτωση που η πρώτη υπομονάδα φτάνει στο μέγιστο της λειτουργίας και παραγωγής της και τότε μπαίνει η δεύτερη σε λειτουργία, όσο και για την περίπτωση που η πρώτη και η δεύτερη υπομονάδα λειτουργούν σε μερικό φορτίο. Σε κάθε περίπτωση, η λειτουργία των υπομονάδων σε μερικό φορτίο αποδειχθεί πιο αποδοτική, καθώς προκύπτει σε παραγωγή καθαρού νερού για μεγαλύτερο εύρος ισχύος.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη θεωρητική αξιολόγηση του πρωτοτύπου και επιβεβαιώνουν τα πειραματικά αποτελέσματα συνοψίζονται στα εξής:

- ✓ Η μικρή υπερδιαστασιολόγηση της μονάδας RO επιβεβαιώθηκε καθώς η τρίτη υπομονάδα δεν τίθεται σε λειτουργία (απαιτεί πάνω από 10 kW για να εκκινήσει)
- ✓ Μέγιστη παραγωγή νερού: 1.4 m³/h στους 120 και 130°C
- ✓ Η σύγκριση της λειτουργίας της πρώτης υπομονάδας σε πλήρη ισχύ ή σε μερικό φορτίο μαζί με τη δεύτερη κατέδειξε ότι η πολυβάθμια διαμόρφωση (λειτουργία σε μερικό φορτίο) χαρίζει ευελιξία στο σύστημα καθώς η παραγωγή νερού καλύπτει μεγαλύτερο μέρος του εύρους λειτουργίας και η λειτουργία του συστήματος είναι πιο ομαλή
- ✓ Το ολοκληρωμένο πρωτότυπο αποτελεί ένα σύστημα ικανοποιητικής και αποδοτικής συμπεριφοράς σε όλο το εύρος λειτουργίας.

Συμπεράσματα – προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Τα βασικότερα συμπεράσματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής συνοψίζονται στα εξής:

- ✓ Η πολυβάθμια διαμόρφωση της μονάδας αντίστροφης ώσμωσης προσέδωσε ευελιξία στο σύστημα, με παραγωγή καθαρού νερού σε όλο το εύρος λειτουργίας
- ✓ Η ειδική κατανάλωση ενέργειας της μονάδας RO διατηρήθηκε χαμηλή
- ✓ Για υψηλή αλατότητα νερού τροφοδοσίας, η μονάδα RO απαιτήσε πάνω από 10 kW ισχύος για τη λειτουργία της (σημείο σχεδιασμού της μηχανής ORC), γεγονός που καταδεικνύει είτε λειτουργία σε άλλες συνθήκες από τις συνθήκες σχεδιασμού, είτε μια ελαφρά υπερδιαστασιολόγηση της μονάδας RO
- ✓ Η μέγιστη παραγωγή νερού προέκυψε $\sim 2.4 \text{ m}^3/\text{h}$ (ελαφρά μεγαλύτερη από το σημείο σχεδιασμού των $2.1 \text{ m}^3/\text{h}$)
- ✓ Η λειτουργία των μεμβρανών και των αντλιών υψηλής πίεσης απεδείχθη αποδοτική και οι ελαφρές διαφορές μεταξύ των υπομονάδων οφείλονται σε σφάλμα μετρήσεων ή οργάνων (μέσα στα αποδεκτά όρια)
- ✓ Ο έλεγχος της μονάδας RO σε διάφορες θερμοκρασίες λειτουργίας απέδειξε αποδοτική λειτουργία σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος
- ✓ Η μελέτη περίπτωσης με χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων και η σύγκριση με συμβατική μονάδα αφαλάτωσης έδειξε το μεγάλο πλεονέκτημα της πολυβάθμιας διαμόρφωσης της RO
- ✓ Η μηχανή ORC λειτούργησε αποδοτικά τόσο σε μονοβάθμια όσο και σε διβάθμια λειτουργία για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών (από 70 έως 130 °C)
- ✓ Μέγιστη παραγόμενη ισχύς: 7.5 kW
- ✓ Βέλτιστος βαθμός απόδοσης: 9.9 %
- ✓ Αποδοτική λειτουργία της μηχανής ORC σε μερικό φορτίο με βαθμούς απόδοσης της τάξεως του 6~7 %
- ✓ Μέγιστος βαθμός απόδοσης εκτονωτών: 62% σε μονοβάθμια και 61% σε διβάθμια λειτουργία
- ✓ Ο χαμηλός λόγος πίεσης και το μικρότερο εύρος λειτουργίας σε συνδυασμό με την πτώση απόδοσης με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του έδειξε μια ελαφρά υποδιαστασιολόγηση του εκτονωτή υψηλής πίεσης σε σχέση με το σχεδιασμό του
- ✓ Η διβάθμια διαμόρφωση προσφέρει ευελιξία στο σύστημα με αποδοτική λειτουργία και σε χαμηλό φορτίο (παράκαμψη πρώτου εκτονωτή) και είναι αποδοτικότερη από τη μονοβάθμια διαμόρφωση
- ✓ Η θεωρητική αξιολόγηση του πρωτοτύπου απέδειξε τη μέγιστη παραγωγή νερού $1.4 \text{ m}^3/\text{h}$ από τη μονάδα RO στους 120- 130°C, με χρήση δύο εκ των τριών υπομονάδων, και την αποδοτική συμπεριφορά του συστήματος σε όλο το εύρος λειτουργίας

Επιπροσθέτως, τα πιο σημαντικά καινοτόμα στοιχεία της διατριβής θεωρούνται:

- ✓ Η λειτουργία διβάθμιου συστήματος Οργανικού κύκλου Rankine σε θερμοκρασία 110- 130 °C (η εργασία αποτελεί συνέχεια ενός έργου πειραματικής αξιολόγησης ενός μονοβάθμιου υποκρίσιμου ηλιακού οργανικού κύκλου Rankine με θερμοκρασία λειτουργίας 60- 80°C)
- ✓ Η τροποποίηση των ελικοειδών εκτονωτών από διαθέσιμους στην αγορά ελικοειδείς συμπιεστές (σε ανάστροφη λειτουργία)
- ✓ Ο συνδυασμός μιας πολυβάθμιας μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης με πηγές μεταβλητής ισχύος με σκοπό την αύξηση του εύρους λειτουργίας και την προσφορά ευελιξίας
- ✓ Πειραματικός έλεγχος του κάθε συστήματος σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας στο εργαστήριο, που αποτελούν εξαιρετική πηγή αναφοράς για περαιτέρω πρόβλεψη συμπεριφοράς του συστήματος με παρεκβολή των αποτελεσμάτων

Η παρούσα διδακτορική διατριβή μπορεί να αποτελέσει εφαλτήριο για μελλοντική έρευνα και πιο συγκεκριμένα μπορούν να πραγματοποιηθούν:

- ✓ Καλύτερη διαστασιολόγησης της μονάδας RO και έλεγχος
- ✓ Χρήση άλλων οργανικών ρευστών και έλεγχος συμπεριφοράς συστήματος
- ✓ Χρήση προθερμαντήρα πριν τον ατμοποιητή με άλλα οργανικά ρευστά και έλεγχος συμβολής του στην αύξηση της απόδοσης του κύκλου ORC
- ✓ Αντικατάσταση του εκτονωτή υψηλής πίεσης με έναν καταλληλότερο ως προς τη διαστασιολόγηση
- ✓ Σύνδεση του πρωτοτύπου με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και αξιολόγηση σε πραγματικές συνθήκες
- ✓ Έλεγχος διβάθμιας και πολυβάθμιας διαμόρφωσης ORC σε υψηλότερες θερμοκρασίες
- ✓ Έλεγχος μηχανών που βασίζονται σε ημι- υπερκρίσιμο και υπερκρίσιμο οργανικό κύκλο Rankine
- ✓ Έλεγχος πολυβάθμιας διαμόρφωσης μονάδας αφαλάτωσης RO με περισσότερες βαθμίδες και διαφορετικής δυναμικότητας
- ✓ Συνδυασμός μονάδων αφαλάτωσης RO με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για μεγάλο εύρος λειτουργίας

Δημοσιεύσεις – αναγνώριση

Τα πιο σημαντικά ζητήματα που διερευνήθηκαν στην παρούσα διατριβή και τα βασικά συμπεράσματα οδήγησαν σε ορισμένες δημοσιεύσεις σε δημοφιλή επιστημονικά περιοδικά στον τομέα της ενέργειας και της αφαλάτωσης νερού και στα πρακτικά σχετικών διασκέψεων:

Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά

[1] Erika Ntavou, George Kosmadakis, Dimitris Manolakos, George Papadakis, Dimitris Papantonis. Experimental evaluation of a multi- skid reverse osmosis unit operating at fluctuating power input. *Desalination* 398 (2016) 77-86.

[2] Erika Ntavou, George Kosmadakis, Dimitris Manolakos, George Papadakis, Dimitris Papantonis. Experimental testing of a small- scale two stage Organic Rankine Cycle engine operating at low temperature. *Energy* 141 (2017) 869- 879.

Συμμετοχή σε εκθέσεις:

[1] Erika Ntavou, George Kosmadakis, Dimitris Manolakos, George Papadakis, Dimitris Papantonis. Experimental investigation of a multi- skid reverse osmosis (RO) unit, operating at a wide load range, powered by a small- scale Organic Rankine Cycle (ORC) Engine. *Desalination for the Environment: Clean Water and Energy*, European Desalination Society (EDS), Limassol, Cyprus, 11-15 May 2014.

[2] Erika Ntavou, George Kosmadakis, Dimitris Manolakos, George Papadakis, Dimitris Papantonis. Experimental investigation of a small- scale two- stage Organic Rankine Cycle Engine operating at low temperature. 3rd International Seminar on ORC Power Systems (ASME), October 12-14, 2015, Brussels, Belgium.

[3] Erika Ntavou, George Kosmadakis, Dimitris Manolakos, George Papadakis, Dimitris Papantonis. Experimental investigation of a multi- skid RO unit, powered by a small- scale Organic Rankine Cycle Engine. The International Desalination Association (IDA) World Congress on Desalination and Water Reuse 2015/San Diego, CA, USA.

[4] George Kosmadakis, Dimitris Manolakos, Erika Ntavou, George Papadakis. Multiple Reverse Osmosis sub-units supplied by unsteady power sources for seawater desalination. *Desalination for the Environment: Clean Water and Energy*, European Desalination Society (EDS), Limassol, Cyprus, 11-15 May 2014.

[5] George Kosmadakis, Dimitris Manolakos, Erika Ntavou, George Papadakis. Implementation of a two- stage Organic Rankine Cycle using scroll expanders operating at variable heat input. 2nd International Seminar on ORC Power Systems (ASME), October 07 - 08, 2013, Rotterdam, The Netherlands.

[6] George Kosmadakis, Dimitris Manolakos, Erika Ntavou, George Papadakis. Design and implementation of a two-stage Organic Rankine cycle, operating under variable heat input. *Industrial Technologies 2014*, Megaron, The Athens Concert Hall. (Poster)

[7] George Kosmadakis, Dimitris Manolakos, Erika Ntavou, George Papadakis. Integrated system based on low-concentration PV/thermal units and a low-temperature supercritical Organic Rankine cycle.

[8] George Kosmadakis, Dimitris Manolakos, Olle Olsson, Erika Ntavou, Joakim Bystrom, George Papadakis. Design and implementation of a hybrid low-concentration PV/thermal system, including a bottoming supercritical ORC engine. EU PVSEC 2014, 29th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, September 22-26, Amsterdam, The Netherlands.

Acknowledgment

Η παρούσα εργασία διεξήχθη στα πλαίσια του έργου με αριθμό σύμβασης 09ΣΥΝ-32-982, μερικώς χρηματοδοτούμενο από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ).

Η έγκριση της Διδακτορικής Διατριβής από τη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. δεν σημαίνει και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα – Άρθρο 202, Νόμος 5343/1932.