

Παραγωγή ενέργειας σε ποτάμια εκβολικά συστήματα: Η περίπτωση του ποταμού Στρυμόνα



ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΡΑΚΗΣ

DEMOCRITUS
UNIVERSITY
OF THRACE

Κωνσταντίνος Ζαχόπουλος, Δρ. Ωκεανογραφίας,
Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων - Υγροτόπων



12 Ιουνίου 2026

Στόχος



Ολοκληρωμένη προσέγγιση για την αντιμετώπιση μιας σειράς περιβαλλοντικών προβλημάτων και διαχείρισης της αυξανόμενης ενεργειακής ζήτησης στην περιοχή των εκβολών του ποταμού Στρυμόνα



Αλμυρή
σφήνα



Μονάδα
EBA PRO



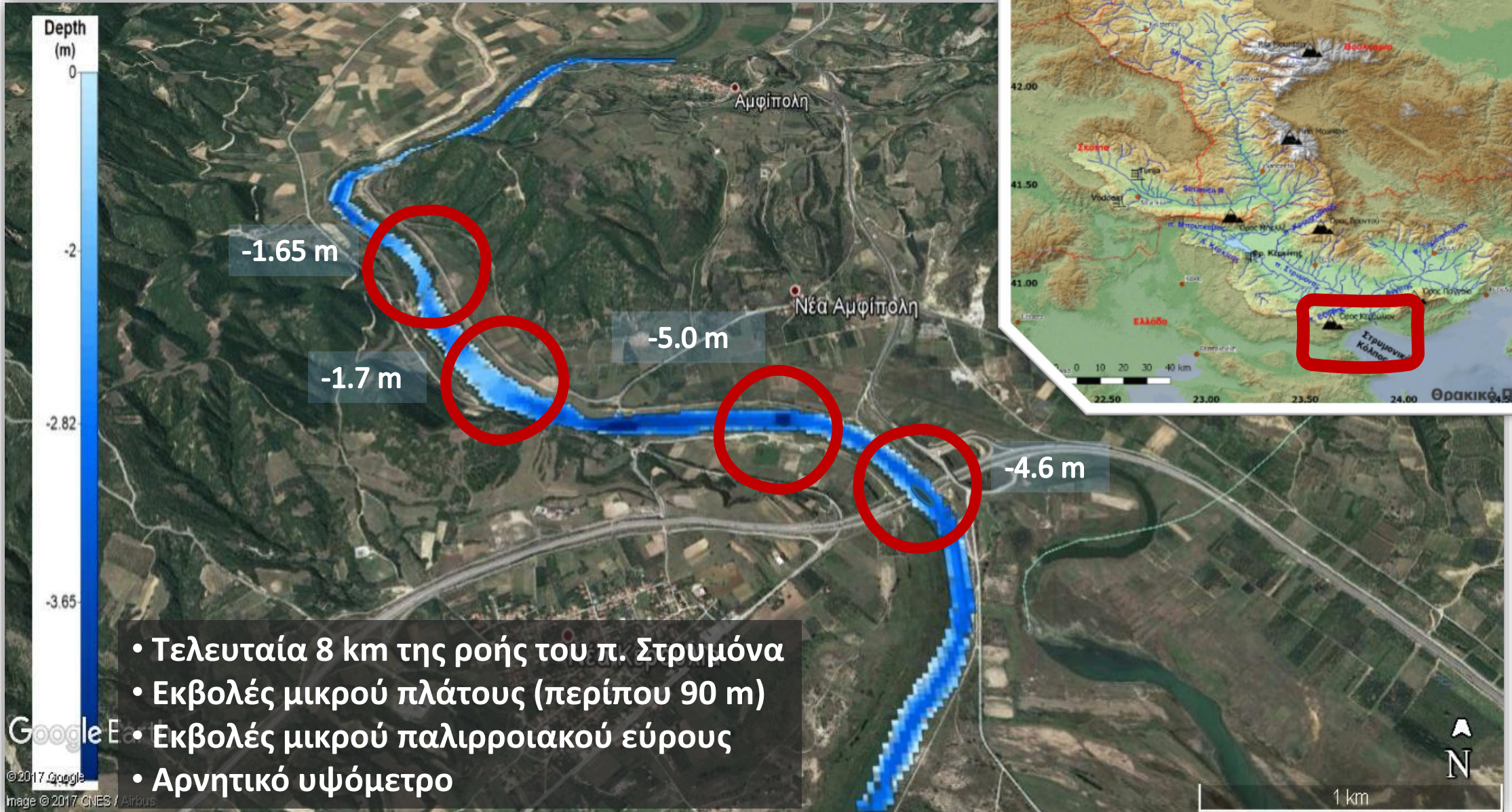
Περιορισμός διείσδυσης
αλμυρής σφήνας

Αυξημένη ζήτηση
ηλεκτρικής ενέργειας



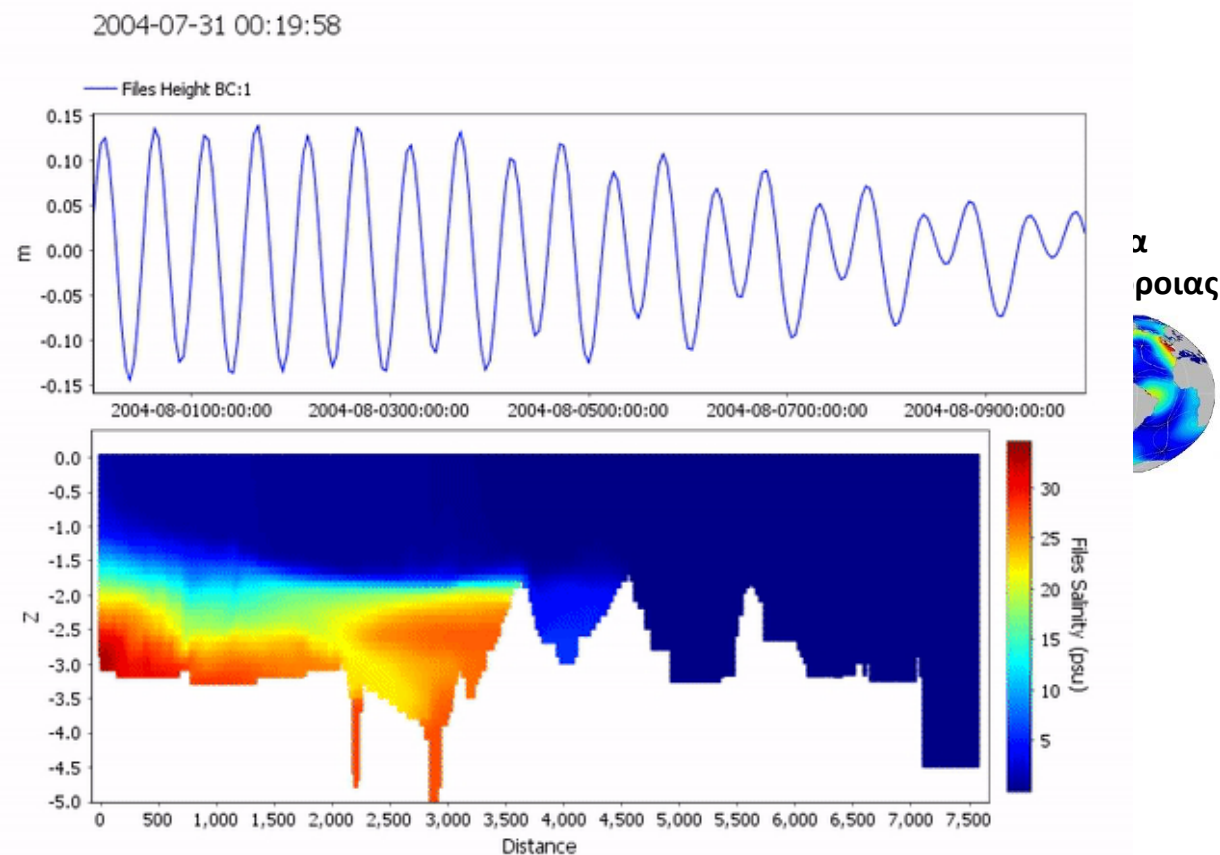
Ενίσχυση
τοπικού δικτύου

Περιοχή μελέτης



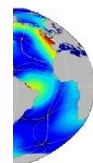
Τρισδιάστατο μαθηματικό υδροδυναμικό ομοίωμα

Αποτελέσματα
Θερμοκρασίας - Αλατότητας
Πυκνότητας - Ταχύτητας



Δεδομένα
Θερμοκρασίας
Αλατότητας

α
ροιας



Output



Input



3D hydrodynamic model
CWR AEM 3D



Ενέργεια από Βαθμίδωση Αλατότητας (EBA)

Είναι **ΑΠΕ** που εκμεταλλεύεται τη **διαφορά συγκέντρωσης αλάτων (οσμωτική διαφορά)** μεταξύ δύο υδάτινων σωμάτων

Η διαφορά αυτή δημιουργεί **οσμωτικό δυναμικό**, το οποίο μπορεί να μετατραπεί μέσω της **χημικής ή μηχανικής ενέργειας** σε χρήσιμη **ηλεκτρική ενέργεια**

01

Reverse
Electrodialysis
(RED)

02

Pressure
Retarded Osmosis
(PRO)

Ενέργεια από Βαθμίδωση Αλατότητας (EBA)

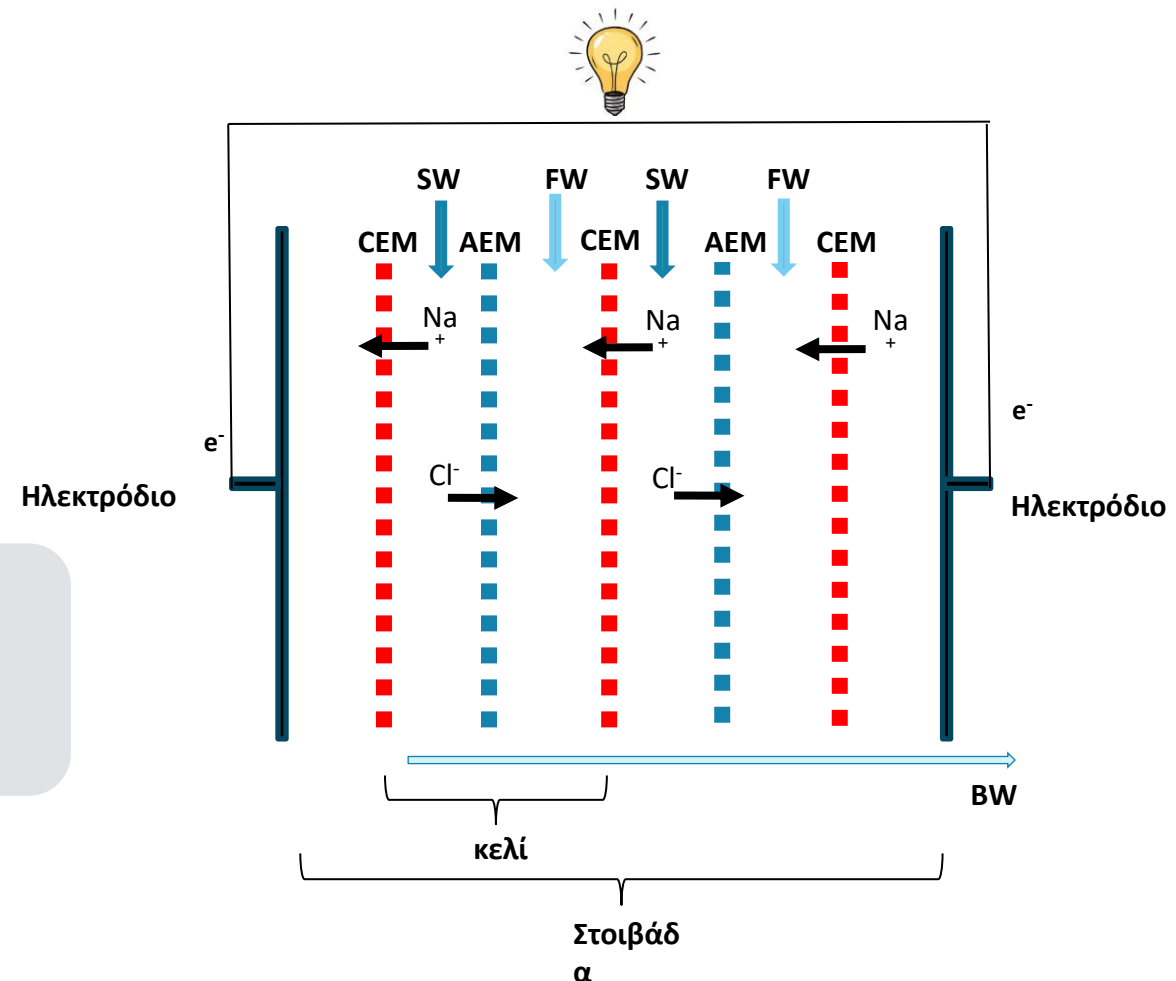
Η RED βασίζεται στη **διαφορά συγκέντρωσης ιόντων** (κυρίως Na^+ και Cl^-) μεταξύ θαλασσινού και γλυκού νερού

Μέσω ειδικών **ιοντο-επιλεκτικών μεμβρανών**, δημιουργείται **δυναμικό τάσης**, το οποίο αξιοποιείται για την παραγωγή **συνεχούς ρεύματος (DC)**

01

Reverse
Electrodialysis
(RED)

- Διαφορά αλατότητας ευνοεί τη Ροή Ιόντων
- Ροή Ιόντων → Διαφορά Δυναμικού (Τάσης)
- Ηλεκτρόδια συνδέονται με εξωτερικό κύκλωμα

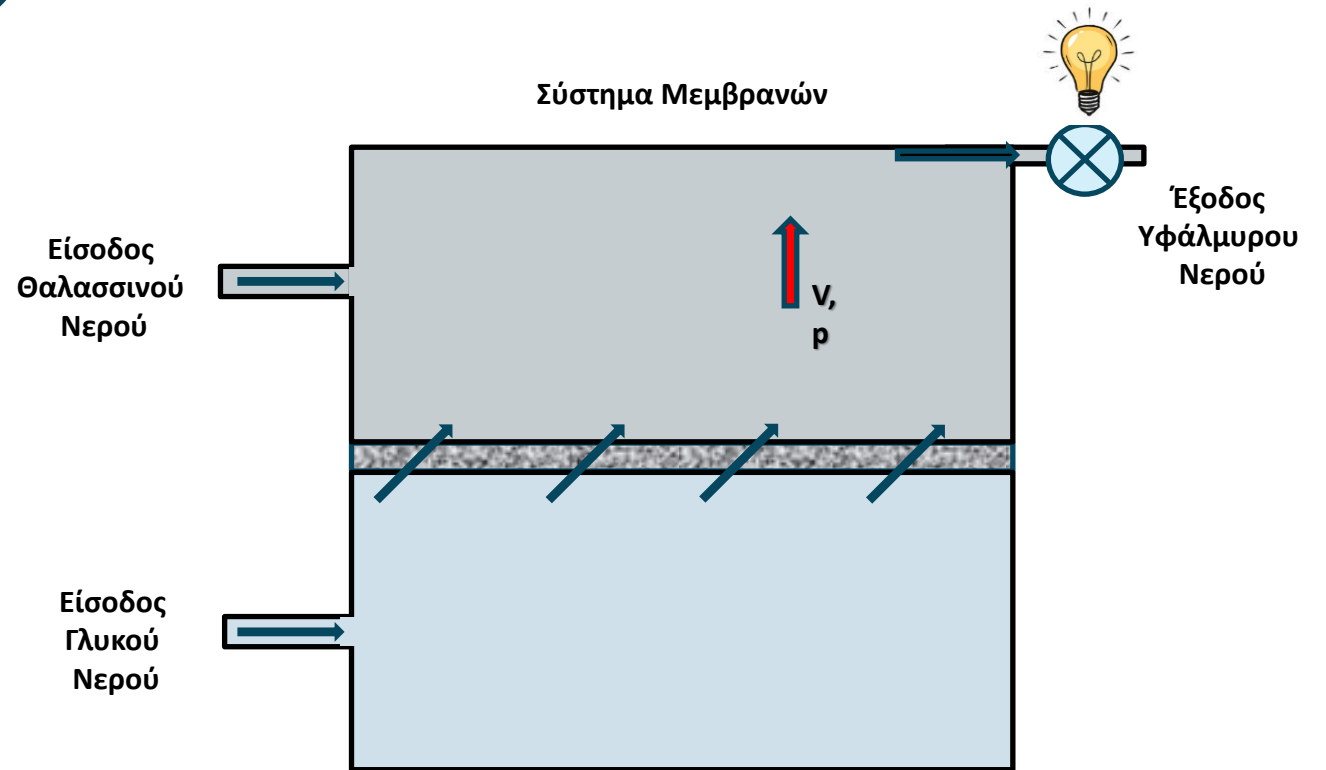


Ενέργεια από Βαθμίδωση Αλατότητας (EBA)

Η PRO, εκμεταλλεύεται τη **διαφορά αλατότητας** και με τη χρήση **ημιδιαπερατών μεμβρανών**, παράγοντας **υδραυλική πίεση** που, μέσω **στροβίλου** και **γεννήτριας** μετατρέπεται σε **ηλεκτρική ενέργεια**

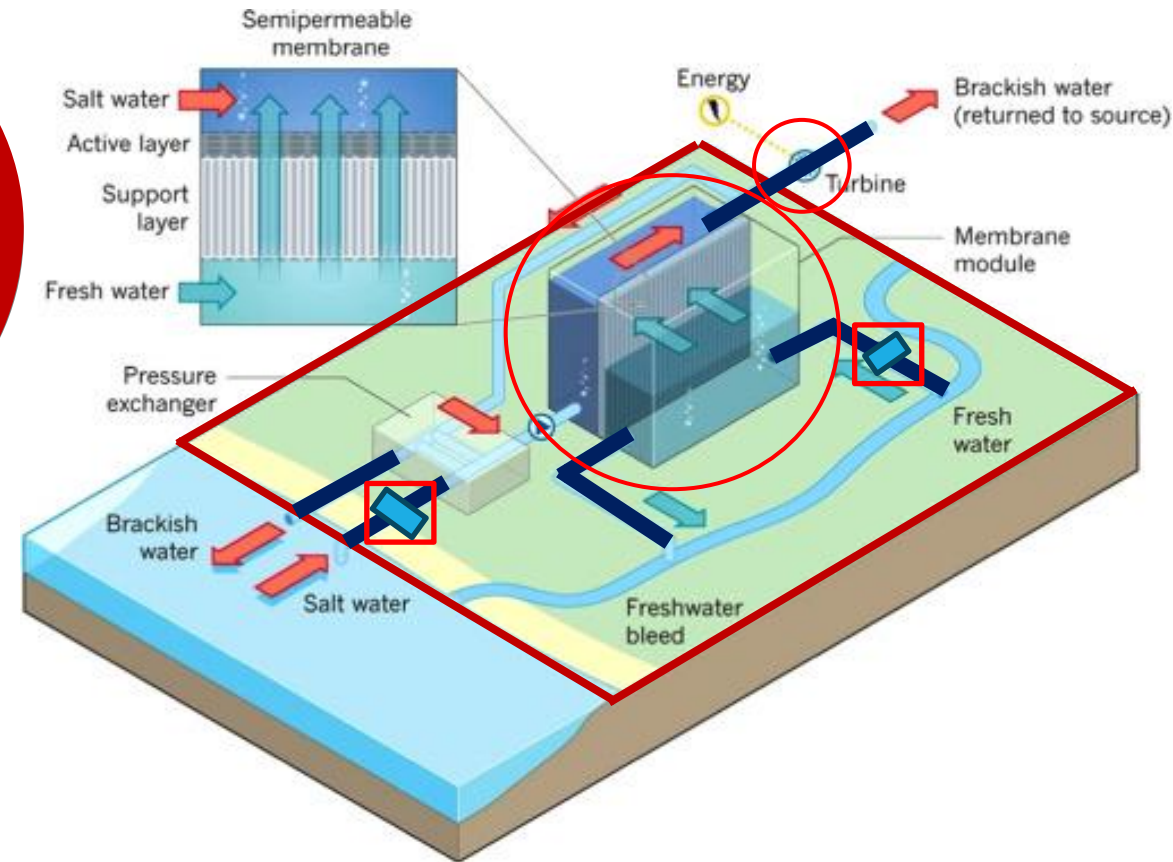
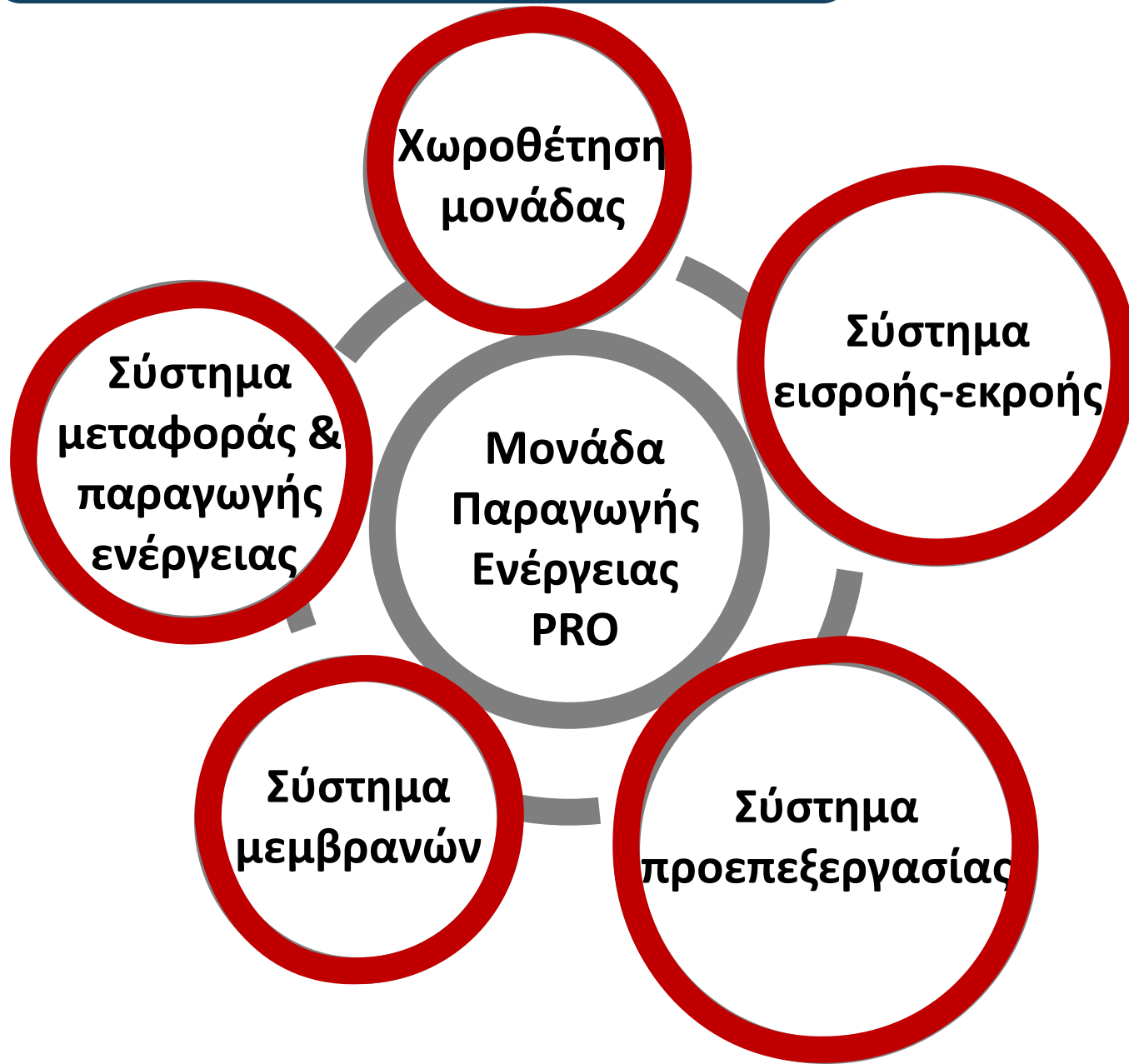
02

Pressure
Retarded Osmosis
(PRO)

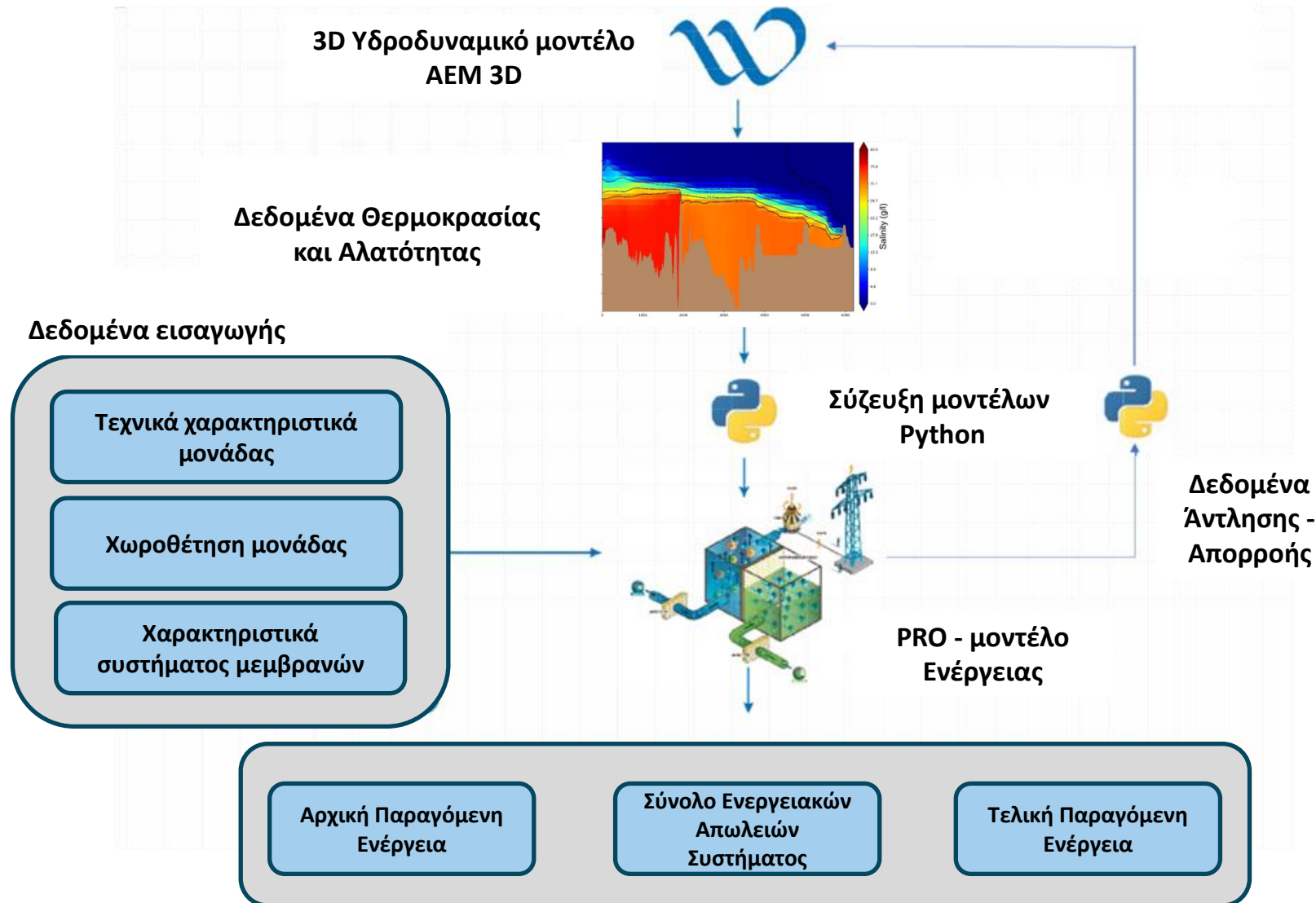


Αύξηση **όγκου** και **πίεσης** στην πλευρά του θαλασσινού νερού → **Κίνηση Στροβίλου**

Σχεδιασμός μονάδας PRO



Συνδυασμένη προσέγγιση Υδροδυναμικής Προσομοίωσης- Εκτίμησης Ενεργειακής Παραγωγής



Εφαρμογή Ενεργειακού Μοντέλου-Εκτίμηση Ενεργειακής Απόδοσης Μέγιστη δυνατή παραγόμενη ενέργεια (Optimal Scenario)

Λειτουργία μονάδας 1MW: 355 ημέρες/έτος



Ποτάμιο νερό:

- Αλατότητα : 0.1 g/l
- FW εισροή: 0.6 m³/s
- Θερμοκρασία: 15 °C

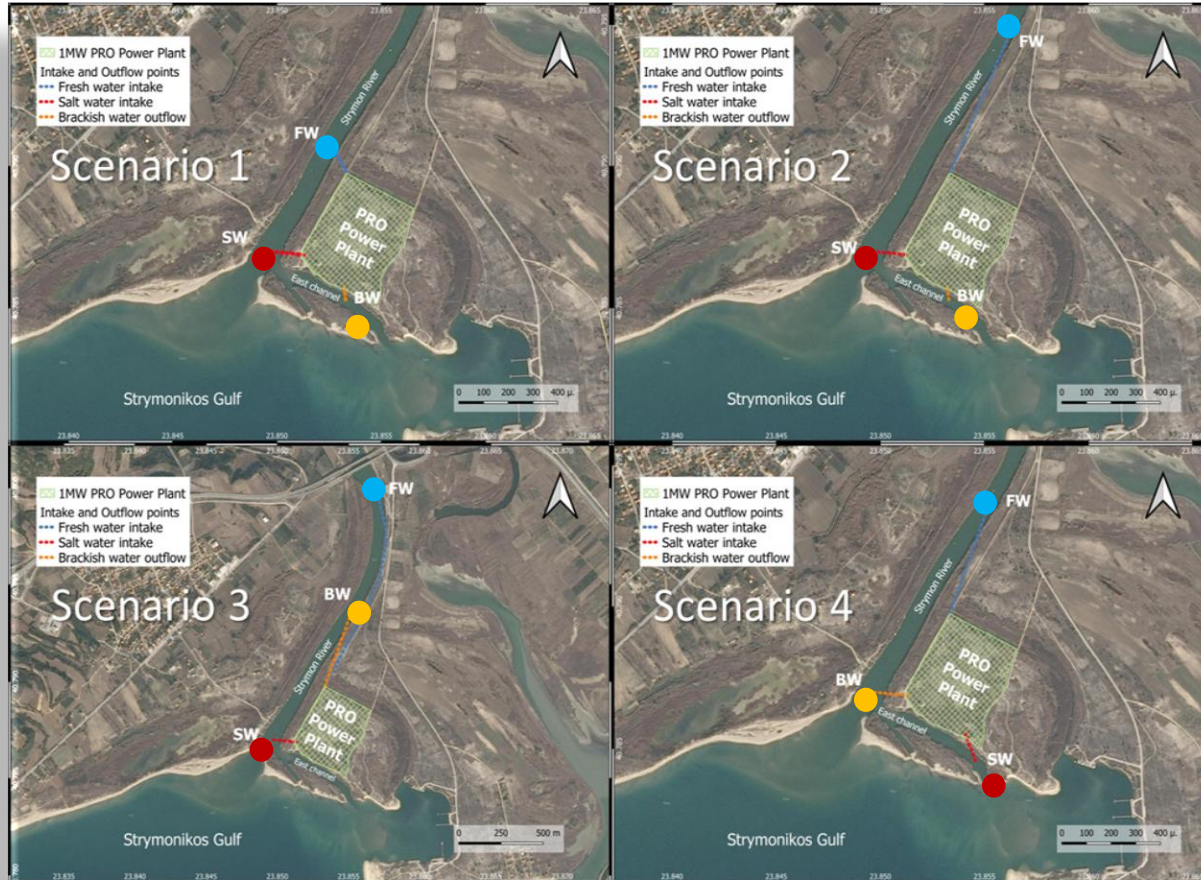
Θαλασσινό νερό:

- Αλατότητα: 38.1 g/l
- SW εισροή: 1.3 m³/s
- Θερμοκρασία: 20 °C

Σύμβολο	Περιγραφή Συστημάτων Απωλειών Ενέργειας	%	(GWh/yr)
Ep	Αρχική Παραγόμενη Ενέργεια	100%	8.76
Eios	Σύστημα Εισροών Εκροών	-1.2%	-0.11
Ecpt	Σύστημα Προεπεξεργασίας	-5.7%	-0.50
Elb	Σύστημα Μεμβρανών	-3.3%	-0.29
Eltg	Μεταφοράς και Παραγωγής	-42.4%	-3.71
Enet	Τελική Παραγόμενη Ενέργεια	47.3%	4.15

Σενάρια Παραγωγής Ενέργειας και Περιορισμού Αλμυρής Σφήνας

Περιγραφή Σεναρίων



Υδροδυναμικό ομοίωμα συνδεδεμένο με ενεργειακό μοντέλο 1 MW PRO

Σημεία άντλησης και απορροής

- **Θαλασσινό νερό:** 0.5-1 m από τον πυθμένα
- **Γλυκό νερό:** 0.5-1 m από την επιφάνεια

Σενάρια θέσεων άντλησης και απορροής

	SW - Σημείο Άντλησης	FW - Σημείο Άντλησης	BW - Σημείο Απορροής	Λειτουργία Μονάδας
Βέλτιστο	Στρυμονικός Κόλπος	2000 m	Κανάλι	Συνεχής
Σενάριο 1	Στόμιο Ποταμού	500 m	Κανάλι	Εποχιακή
Σενάριο 2	Στόμιο Ποταμού	1000 m	Κανάλι	Εποχιακή
Σενάριο 3	Στόμιο Ποταμού	2000 m	1000 m	Εποχιακή
Σενάριο 4	Κανάλι	1000 m	Στόμιο Ποταμού	Συνεχής

Σενάρια Παραγωγής Ενέργειας και Περιορισμού Αλμυρής Σφήνας

Σύγκριση σεναρίων

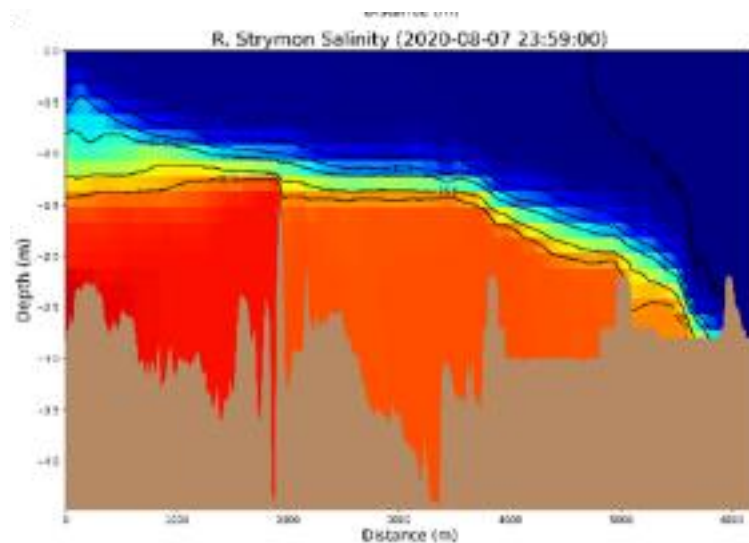
Σενάρια	Τελική Παραγόμενη Ενέργεια (GWh/year)	Λειτουργία	Αριθμός Ηλεκτοδοτούμενων Νοικοκυριών
Βέλτιστο	4.15	Συνεχής	1106
Σενάριο 1	1.03	Εποχιακή	824
Σενάριο 2	1.09	Εποχιακή	872
Σενάριο 3	1.10	Εποχιακή	880
Σενάριο 4	3.92	Συνεχής	1045

Χρήση ενέργειας:

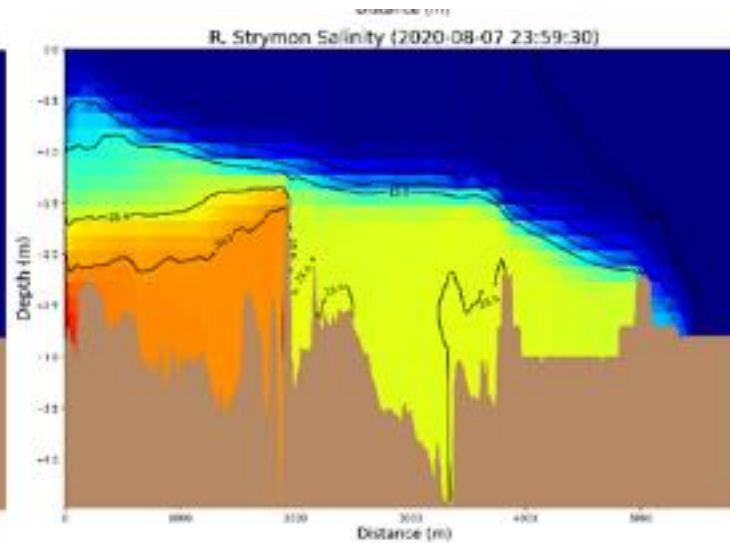
- **Sc4:** Ετήσια υποστήριξη του δικτύου
- **Sc2-Sc3:** Εποχιακή χρήση – ιδανικό για καλοκαιρινή ζήτηση λόγω τουρισμού

Σενάρια Παραγωγής Ενέργειας και Περιορισμού Αλμυρής Σφήνας

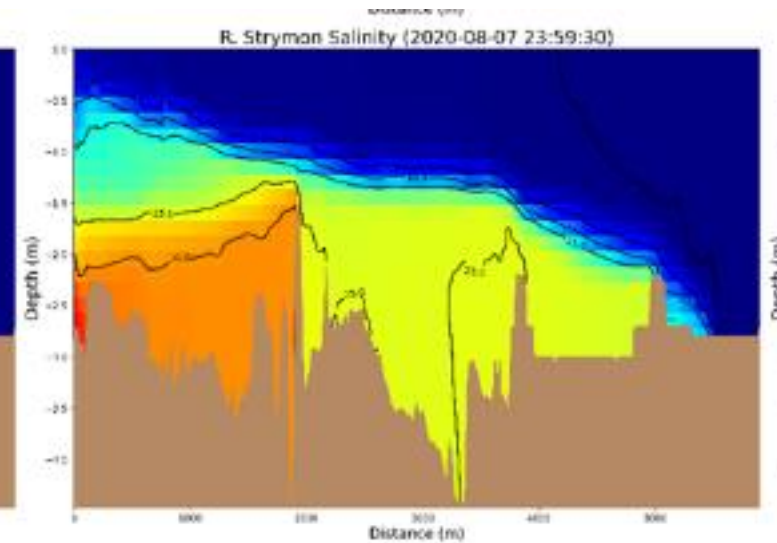
Πραγματική Προσομοίωση



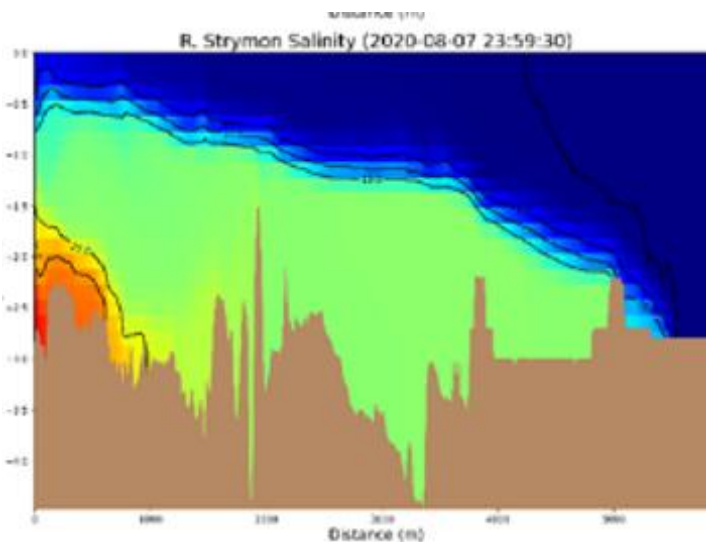
Σενάριο 1



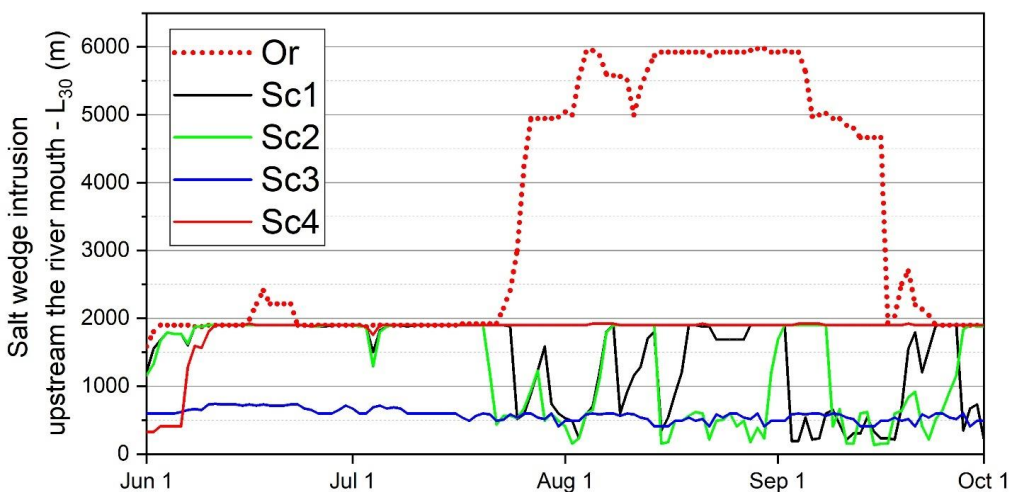
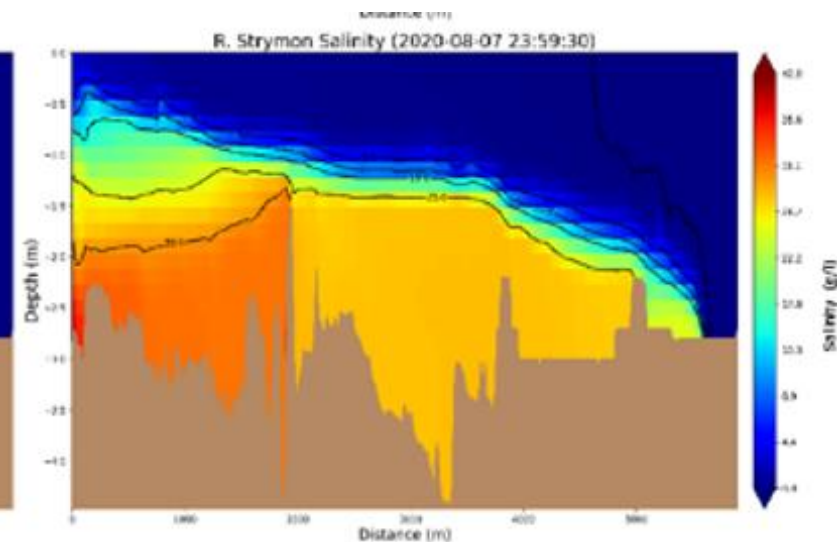
Σενάριο 2



Σενάριο 3



Σενάριο 4



Οικονομική Αξιολόγηση Σεναρίων Λειτουργίας Μονάδας PRO

Σύγκριση σεναρίων

Σενάρια	Ημέρες Λειτουργίας	Κεφαλαιακό Κόστος	LCOE	Περίοδος Αποπληρωμής
Βέλτιστο	355	10,051,049.47 €	0.25 €/kWh	13
Σενάριο 1	122	6,634,988.03 €	0.67 €/kWh	22
Σενάριο 2	122	6,495,880.39 €	0.63 €/kWh	24
Σενάριο 3	122	7,425,019.76 €	0.68 €/kWh	24
Σενάριο 4	355	9,365,718.73 €	0.28 €/kWh	15

Συμπέρασμα

Περισσότερες ημέρες λειτουργίας → μικρότερο LCOE και ταχύτερη απόσβεση

Το **Σενάριο 4** προσφέρει τη **μεγαλύτερη οικονομική απόδοση**

Οικονομική Αξιολόγηση Σεναρίων Λειτουργίας Μονάδας PRO

Σύγκριση Κόστους Ενέργειας (LCOE) – Μονάδα PRO & Άλλες ΑΠΕ

	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	LCOE (€/kWh)	Ενεργειακή Απόδοση (%)
LCOE των ΑΠΕ	Βιοενέργεια	0.07 – 0.15	20-35%
	Γεωθερμική Ενέργεια	0.04 – 0.12	10-20%
	Υπεράκτια Αιολική	0.08 – 0.15	35-50%
	Ηλιακή Φωτοβολταϊκά	0.04 – 0.10	15-22%
	Παλιρροϊκή / Κυματική	0.15 – 0.30	30-50%
	Υδροηλεκτρική Ενέργεια	0.02 – 0.07	70-90%
	Παράκτια Αιολική	0.03 – 0.08	24-54%
LCOE της PRO	Optimal	0.25	47.5%
	Scenario 1	0.67	35.4%
	Scenario 2	0.63	37.3%
	Scenario 3	0.68	37.9%
	Scenario 4	0.28	47.3%

Η PRO εμφανίζει:

- ανταγωνιστική απόδοση
- υψηλό LCOE, προς το παρόν

Συμπεράσματα - Συζήτηση

Σημαντική επίδραση του χρόνου λειτουργίας (συνεχόμενα ή εποχιακά) στη βιωσιμότητα της μονάδας

Το πιο αποδοτικό και οικονομικά βιώσιμο είναι το Σενάριο 4:

- Καλύπτει τις ανάγκες 1.045 νοικοκυριών
- Παρουσιάζει περίοδο απόσβεσης 15 έτη
- Περιορίζει σημαντικά τη διείσδυση της αλμυρής σφήνας

Για ενίσχυση της τεχνολογίας PRO έναντι των κύριων ΑΠΕ, θα πρέπει:

- Να μειωθεί η τιμή αγοράς των μεμβρανών
- Να αυξηθεί η απόδοση των μεμβρανών πάνω από 5 W/m²
- Να μειωθεί το κόστος του συστήματος προεπεξεργασίας

Interreg



Co-funded by
the European Union



NEXT Black Sea Basin
NEXT Black Sea Basin

Thank you!

