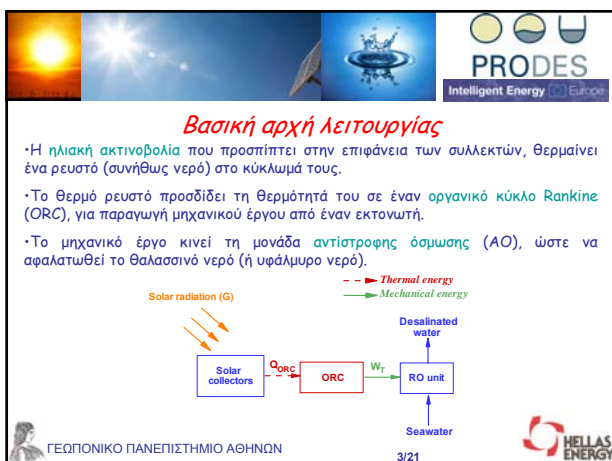
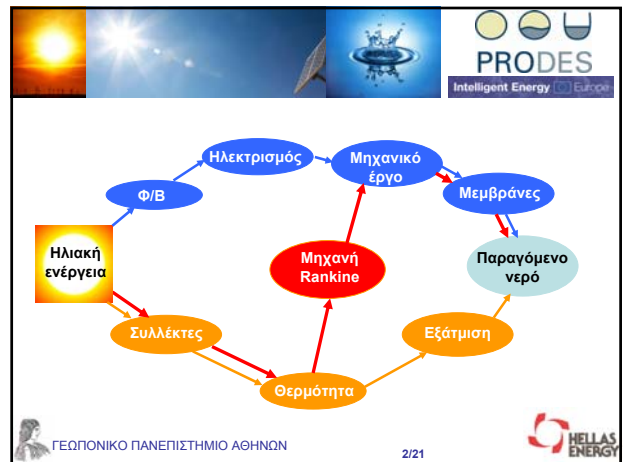


# Ηλιακός Οργανικός Κύκλος Rankine για Αφαλάτωση Νερού

Κοσμάδακης Γεώργιος  
Μηχανολόγος Μηχανικός

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ









### Ηλιακοί συλλέκτες (2)




Επίπεδοι συλλέκτες

Συγκεντρωτικοί επίπεδοι συλλέκτες



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

5/21









### Ηλιακοί συλλέκτες (3)




Συλλέκτες σωλήνων κενού




Παραβολικοί συλλέκτες




ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

6/21






### Οργανικός κύκλος Rankine (1)

• Στη μηχανή Rankine η προσδιδόμενη θερμότητα μετατρέπεται σε μηχανικό έργο.


• Ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία λειτουργίας και το οργανικό μέσο.

• Χαρακτηριστικές τιμές της απόδοσης είναι 4-20% για θερμοκρασιακά εύρη 60-160 °C.



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

7/21









### Οργανικός κύκλος Rankine (2)




Εκτονωτής τύπου scroll (scroll expander)

Αντλία οργανικού μέσου



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

8/21



**Οργανικός κύκλος Rankine (3)**





Προθερμαντήρας (preheater)
Ατμοποιητής (evaporator)
Συμπυκνωτής (condenser)

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
9/21
HELLAS ENERGY

**Μονάδα αντίστροφης όσμωσης (1)**

• Το **μηχανικό έργο** που παράγεται από τη μηχανή Rankine θέτει σε λειτουργία την **αντλία υψηλής πίεσης** της μονάδας ΑΟ. Αυτή αυξάνει την πίεση του θαλασσινού νερού, το οποίο διαπερνάει τις μεμβράνες.

• Ένα μέρος του εισερχόμενου θαλασσινού νερού αφαλατώνεται (~20%), ενώ το υπόλοιπο έχοντας υψηλή πίεση ακόμα, χρησιμοποιείται στη **μονάδα ανάκτησης ενέργειας** (energy recovery unit), με σκοπό να μειωθεί η ειδική κατανάλωση μηχανικής ενέργειας του συστήματος ( $\text{kWh/m}^3$ ).

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
10/21
HELLAS ENERGY

**Μονάδα αντίστροφης όσμωσης (2)**




Σύζευξη της μηχανής Rankine με τη μονάδα ΑΟ
Μονάδα ανάκτησης ενέργειας

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
11/21
HELLAS ENERGY

**Μονάδα αντίστροφης όσμωσης (3)**



Δεξαμενή και μονάδα ΑΟ

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
12/21
HELLAS ENERGY

### Στοιχεία σχεδίασης

- Κατάλληλη επιλογή ηλιακών συλλεκτών, ανάλογα με τη θερμοκρασία ατμοποίησης του ψυκτικού μέσου.
- Κατάλληλη επιλογή του οργανικού εργαζόμενου μέσου. Προσοχή πρέπει να δοθεί στην επικινδυνότητά του και στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του. Διαφορετικά οργανικά μέσα έχουν διαφορετική θερμοδυναμική απόδοση, ακόμα και στα ίδια θερμοκρασιακά όρια.
- Με την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας ατμοποίησης του οργανικού μέσου, αυξάνεται ο θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης, όμως μειώνεται η απόδοση των συλλεκτών  $\Rightarrow$  βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας
- Τροποποιητικός σχεδιασμός του συστήματος ελέγχου.

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
13/21

### Ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος

- Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στους συλλέκτες μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια με απόδοση ίση με περίπου 50% (εξαρτάται από τη θερμοκρασία λειτουργίας).
- Η θερμότητα αυτή διοχετεύεται στον οργανικό κύκλο Rankine (ORC) για παραγωγή μηχανικού έργου από έναν εκτονωτή με απόδοση 4-20% (στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας). Η ετήσια τιμή του όμως είναι αρκετά χαμηλότερη (2-12%), αφού το σύστημα λειτουργεί τις περισσότερες ώρες σε μερικό φορτίο.
- Το παραγόμενο μηχανικό έργο κινεί τη μονάδα ΑΟ. Με την προσθήκη του συστήματος ανάκτησης ενέργειας, η μέση ειδική κατανάλωση μηχανικής ενέργειας μειώνεται σε 2.5-3 kWh/m<sup>3</sup>.

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
14/21

### Παράδειγμα ηλιακού οργανικού κύκλου Rankine για αφαλάτωση νερού με ΑΟ

Τόπος εγκατάστασης: Μαραθίννας, Αττική  
 54 συλλέκτες κενού  
 Ψυκτικό μέσο: R-134a  
 Θερμοκρασίες σχεδιασμού κύκλου Rankine: 35/77 °C  
 Βαθμός απόδοσης: 5%

Μηχανή Rankine (δεξιά) και μονάδα ΑΟ (αριστερά)

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
15/21

### Παράδειγμα ηλιακού οργανικού κύκλου Rankine για αφαλάτωση νερού με ΑΟ

№	Description	Unit
1	Παραγωγή θερμότητας	100 kW <sub>th</sub>
2	Προθέρμανση νερού	35/73 kW <sub>th</sub>
3	Εκτονωτής	2.5 kW
4	Αντλία HFC-134a	2000 kg/h
5	Μονάδα ΑΟ	0.3 m <sup>3</sup> /h
6	Δεξαμενή νερού	1 m <sup>3</sup>
7	Μονάδα ανάκτησης ενέργειας ΑΟ	2.5 kWh/m <sup>3</sup>

- 1) Πεδίο συλλεκτών κενού, 100 kW<sub>th</sub>
- 2) Κυκλοφορητής, 12 m<sup>3</sup>/h
- 3) Προθέρμαντης/ατμοποιητής, 35/73 kW<sub>th</sub>
- 4) Συμπυκνωτής, 100 kW<sub>th</sub>
- 5) Εκτονωτής, 2.5 kW
- 6) Αντλία HFC-134a, 2000 kg/h
- 7) Μονάδα ΑΟ, 0.3 m<sup>3</sup>/h
- 8) Δεξαμενή νερού, 1 m<sup>3</sup>
- 9) Μονάδα ανάκτησης ενέργειας ΑΟ (2.5 kWh/m<sup>3</sup>)

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
16/21

**Βελτίωση απόδοσης ηλιακού οργανικού κύκλου Rankine για αφαλάτωση με ΑΟ**

- Λειτουργία σε υψηλότερη θερμοκρασία.
- Διβάθμιο σύστημα για περισσότερη ευελιξία.
- Ατμοποίηση του οργανικού ρευστού σε υπερκρίσιμες συνθήκες.
- Εκμετάλλευση θερμικών αποβλήτων (π.χ. καυσάερια).

↓

Μείωση του ειδικού κόστους νερού/αύξηση της παραγωγικότητας

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ 17/21 HELLAS ENERGY

**Οικονομική απόδοση ηλιακού οργανικού κύκλου Rankine για αφαλάτωση**

- Τεχνικο-οικονομική μελέτη είναι απαραίτητη, ώστε να διαπιστωθεί η βιωσιμότητα ενός τέτοιου συστήματος.
- Για μικρές κλίμακας συστήματα (small-scale systems) οι τιμές του ειδικού κόστους που συναντώνται είναι της τάξης 5-12 €/m<sup>3</sup>. Οι χαμηλότερες τιμές αντιστοιχούν σε διβάθμια συστήματα καθώς και σε συστήματα με αρκετά υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας του οργανικού κύκλου Rankine.
- Για μεγάλης κλίμακας συστήματα (large-scale systems) οι παραπάνω τιμές μειώνονται αρκετά και μπορούν να φτάσουν και στο μισό.

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ 18/21 HELLAS ENERGY

**Οικονομική απόδοση ηλιακού οργανικού κύκλου Rankine για αφαλάτωση**

Δυναμικότητα: 2 m<sup>3</sup>/h

↓

Κόστος εγκατάστασης: 160.000 €  
Ετήσιο λειτουργικό κόστος: 2.500 €

Ποσοστά κόστους εγκατάστασης:

- Ηλιακοί συλλέκτες: 42%
- Μονάδα αφαλάτωσης: 29%
- Μηχανή Rankine: 25%
- Άλλα: 4%
- Καταμερισμός κόστους εγκατάστασης


ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ 19/21 HELLAS ENERGY

**Οικονομική απόδοση ηλιακού οργανικού κύκλου Rankine για αφαλάτωση**

Ετήσια αποτελέσματα για μικρές κλίμακας συστήματα


	Χαμηλής θερμοκρασίας ORC (ηλιακή ενέργεια)	Διβάθμιος ORC (ηλιακή ενέργεια)	Διβάθμιος ORC (θερμικά απόβλητα)
Αφαλατωμένο νερό (m <sup>3</sup> )	1012	2684	24076
Ειδικό κόστος νερού (€/m <sup>3</sup> )	11	6.85	1.06

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ 20/21 HELLAS ENERGY



Ο σχεδιασμός και κατασκευή της πρωτότυπης μονάδας εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος [COOP-CT2003-507997](#) που συγχρηματοδοτήθηκε από την ΕΕ και με τη συμμετοχή της Ενεργειακής Ελλάδος.

Η βελτίωση του αρχικού συστήματος έγινε στα πλαίσια του προγράμματος [05NON-EU-219](#) που συγχρηματοδοτήθηκε από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ), σε συνεργασία με την Ενεργειακή Ελλάδα.



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

21/21

