



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διπλωματική Εργασία

ΜΑΡΚΑΤΟΣ ΕΡΡΙΚΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

**Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΝΕΡΟΥ-
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΗ
ΜΟΝΑΔΑ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΤΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**



Επιβλέπων: Γ.-Φοίβος Σαργέντης,
Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό ΕΜΠ

Περίοδος εκτέλεσης: Νοέμβριος 2024 – Μάιος 2025

ΘΕΜΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

Σκοπός της εργασίας:

- Ανάλυση λειτουργίας του πλέγματος νερού – ενέργειας – τροφίμων, (WEF Nexus).
- Εφαρμογή σε πραγματική υδροπονική μονάδα θερμοκηπίου.
- Αξιολόγηση τεχνικών λύσεων για αυτάρκεια και αποδοτικότητα.

Επιμέρους στόχοι:

- Μελέτη ενεργειακών και υδατικών ροών στο θερμοκήπιο.
- Παρουσίαση τεχνολογιών υδροπονίας και έξυπνης γεωργίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ

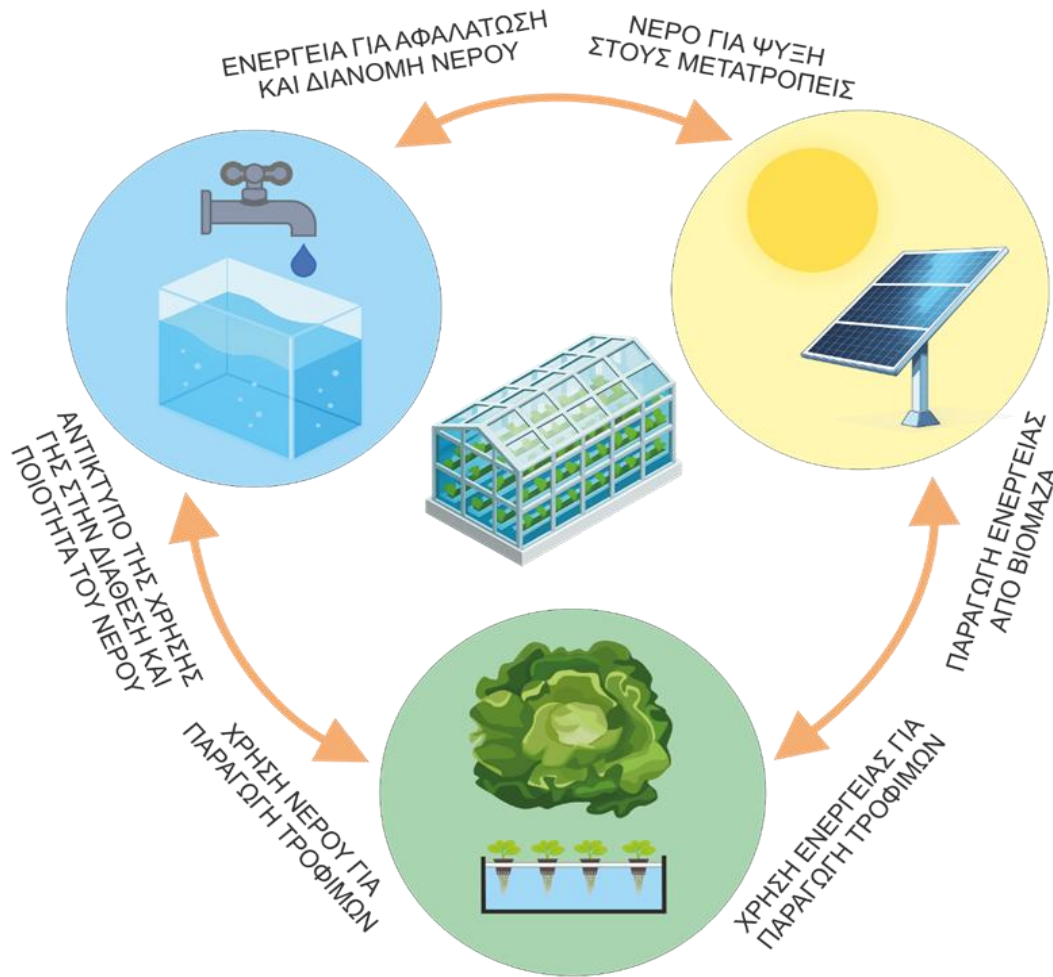
❖ Πλέγμα Νερού - Ενέργειας - Τροφίμων (WEF Nexus)

❖ Υδροπονία και Κλιματικά Έξυπνη Γεωργία (CSA)

❖ Μελέτη Περίπτωσης – Θερμοκήπιο Markatos Hydroponics

❖ Ανάλυση – Αποτελέσματα (Επίλυση Πλέγματος)

Το Πλέγμα Νερού- Ενέργειας-Τροφίμων



- Αλληλεξάρτηση πόρων
- Ολιστική προσέγγιση
- Αντιμετώπιση παγκόσμιων προκλήσεων
- Θερμοκήπιο ➡ Μικρογραφία πλέγματος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ

❖ Πλέγμα Νερού - Ενέργειας - Τροφίμων (WEF Nexus)

❖ Υδροπονία και Κλιματικά Έξυπνη Γεωργία (CSA)

❖ Μελέτη Περίπτωσης – Θερμοκήπιο Markatos Hydroponics

❖ Ανάλυση – Αποτελέσματα (Επίλυση Πλέγματος)

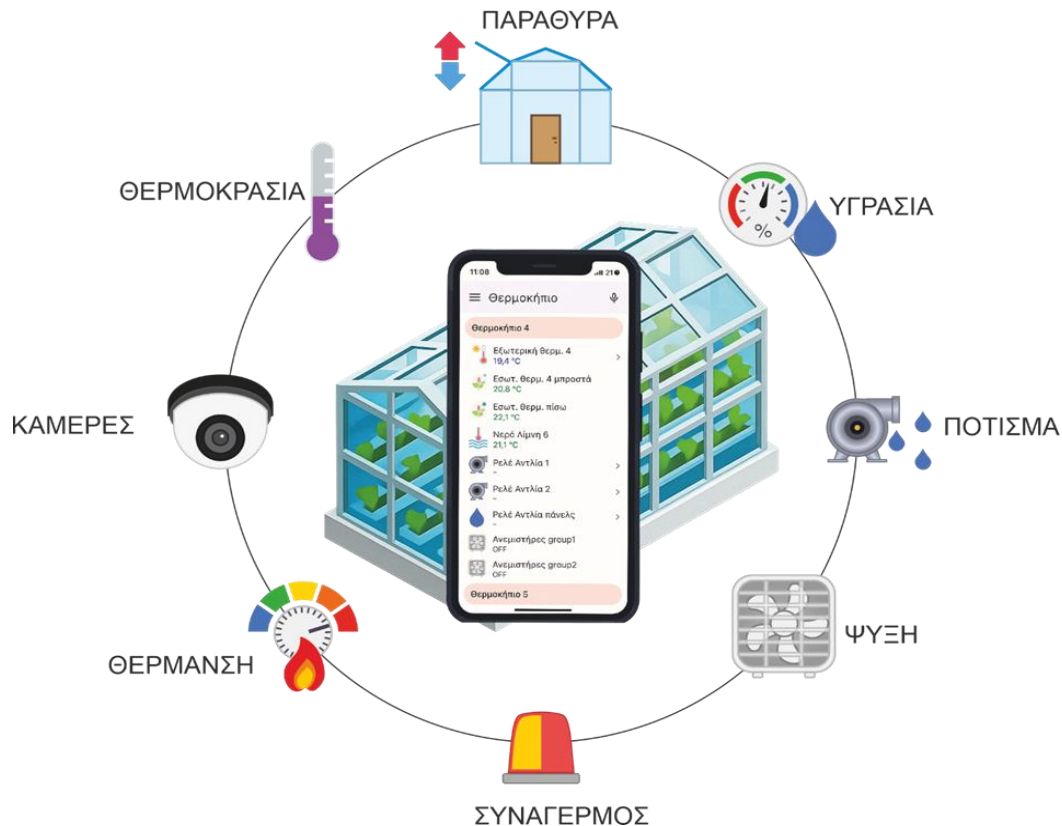
Κλιματικά Έξυπνη Γεωργία – Έννοια και Πυλώνες



- Ολοκληρωμένη διαχείριση νερού, ενέργειας και εδαφικών πόρων
- Συνδυασμός παραδοσιακής γνώσης και τεχνολογίας
- Παραγωγή και ανακύκλωση εντός του ίδιου αγροτικού συστήματος
- Παραδείγματα: αγροδασοκομία, βιοαέριο, χρήση αποβλήτων
- Στόχος: αποδοτικότητα, ανθεκτικότητα και περιβαλλοντική ισορροπία

IoT & Smart Greenhouse: Το Μέλλον της Παραγωγής

ΕΞΥΠΝΗ ΔΙΑΧΕΙΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΜΕΣΩ ΚΙΝΗΤΟΥ



- IoT: **αισθητήρες** (pH, υγρασία, φως, θερμοκρασία, CO2)
- **Αυτοματοποίηση** διαδικασιών
- **Παρακολούθηση** μέσω κινητού & cloud (openHAB)
- Smart Greenhouse: πλήρης **περιβαλλοντικός έλεγχος**



Μείωση απωλειών
Αύξηση αποδοτικότητας

Υδροπονία: Σύγχρονη Μέθοδος Γεωργικής Παραγωγής χωρίς Έδαφος

➤ «υδροπονία» = "ύδωρ" + "πόνημα"

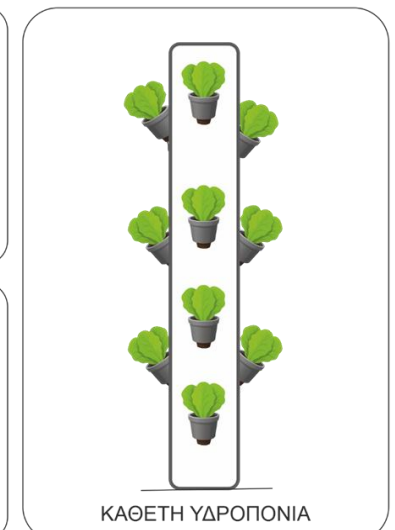
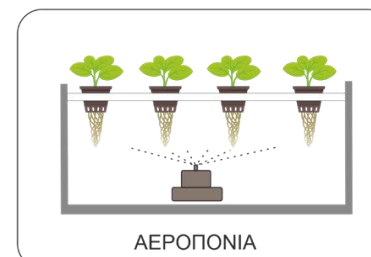
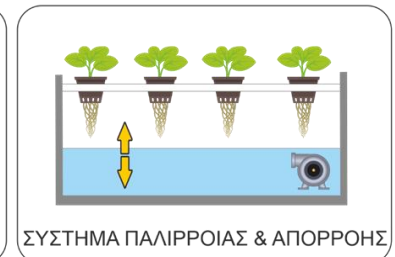
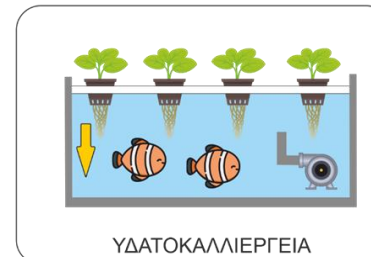
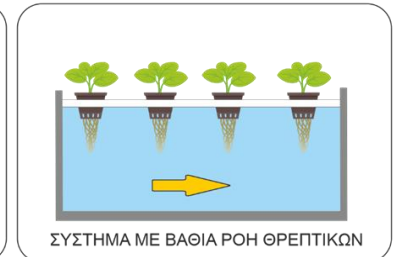
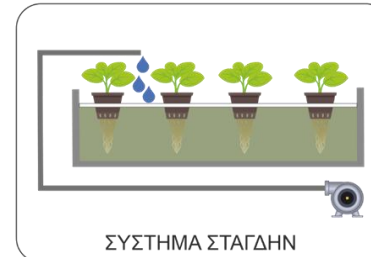
Νερό ✓ Έδαφος ✗

❑ Τα βασικά στοιχεία του συστήματος είναι:

- Υποστήριξη φυτών
- Παροχή θρεπτικών διαλυμάτων
- Έλεγχος περιβαλλοντικών συνθηκών

❑ Απαιτείται ακριβής ρύθμιση παραμέτρων όπως:

- pH, EC (ηλεκτρική αγωγιμότητα)
- Οξυγόνωση ριζών
- Σύνθεση διαλύματος



Εικόνα: Σχηματική απεικόνιση μεθόδων υδροπονίας.

Υδροπονία: Ευκαιρίες και Περιορισμοί στην Πράξη

	Παράμετρος	Υδροπονία	Εδαφική Καλλιέργεια
	Κατανάλωση νερού	Μικρή	Μεγάλη
	Ανάγκη σε φυτοφάρμακα	Ελάχιστη	Συνήθως υψηλή
	Παραγωγή ανά m ²	Υψηλή	Χαμηλότερη
	Ταχύτητα ανάπτυξης	Ταχύτερη	Πιο αργή
	Κατανάλωση ενέργειας	Μέτρια (αντλίες)	Χαμηλή (παραδοσιακή)
	Ποιότητα ελέγχου	Απόλυτος έλεγχος	Εξαρτάται από έδαφος
	Κύκλος παραγωγής	Όλο το έτος	Εξαρτάται από την εποχή
	Εφαρμογή σε αστικό περιβάλλον	Κατάλληλη	Ακατάλληλη

Μειονεκτήματα υδροπονίας:

- Υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης και εξοπλισμού.
- Τεχνική εξειδίκευση για εποπτεία λιπασμάτων, pH, EC, O₂.
- Εξάρτηση από ενέργεια → κίνδυνος σε διακοπές ρεύματος.
- Ραγδαία εξάπλωση ασθενειών σε κλειστά κυκλώματα.
- Περιορισμοί σε καλλιέργεια μεγάλων φυτών (π.χ. δέντρα)

Υδροπονία & Πλέγμα: Πρακτική Εφαρμογή της Ολοκλήρωσης/Πώς συνδέονται;



- Εξοικονόμηση νερού έως 95%
- Υψηλές αποδόσεις ανά m² χώρου
- Αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση → ανάγκη ΑΠΕ
- Ενσωμάτωση τεχνολογιών = λειτουργική ανθεκτικότητα
- Στόχος: ολιστικός σχεδιασμός & αυτονομία

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ

❖ Πλέγμα Νερού - Ενέργειας - Τροφίμων (WEF Nexus)

❖ Υδροπονία και Κλιματικά Έξυπνη Γεωργία (CSA)

❖ Μελέτη Περίπτωσης – Θερμοκήπιο Markatos Hydroponics

❖ Ανάλυση – Αποτελέσματα (Επίλυση Πλέγματος)

Παρουσίαση Υδροπονικής - Markatos Hydroponics

- Τοποθεσία: Οινόφυτα Βοιωτίας, 50 km από Αθήνα
- Έκταση: 14 στρέμματα θερμοκηπίων
- Αντικείμενο: καλλιέργεια μαρουλιών & λαχανικών
- Υποδομές: δεξαμενές, σπορεία, αποθήκες, ψυγεία



Εικόνα: Πανοραμική εξωτερική όψη μέρους των θερμοκηπίων της μονάδας Markatos Hydroponics.

Υδροπονική Τεχνολογία σε Δράση: Από το Νερό στο Μαρούλι

Σπορείο

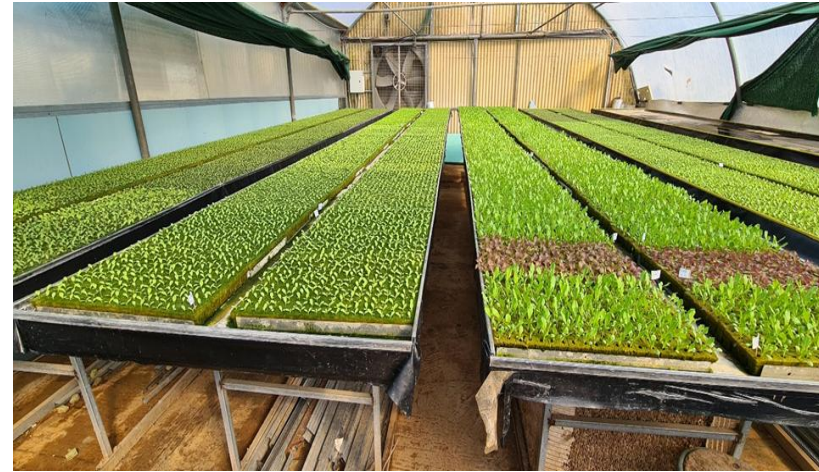
- Φύτευση σπόρων σε πετροβάμβακα

Μεταφυτεύσεις

- Σταδιακές – Πίσω μέρος λιμνοδεξαμενών

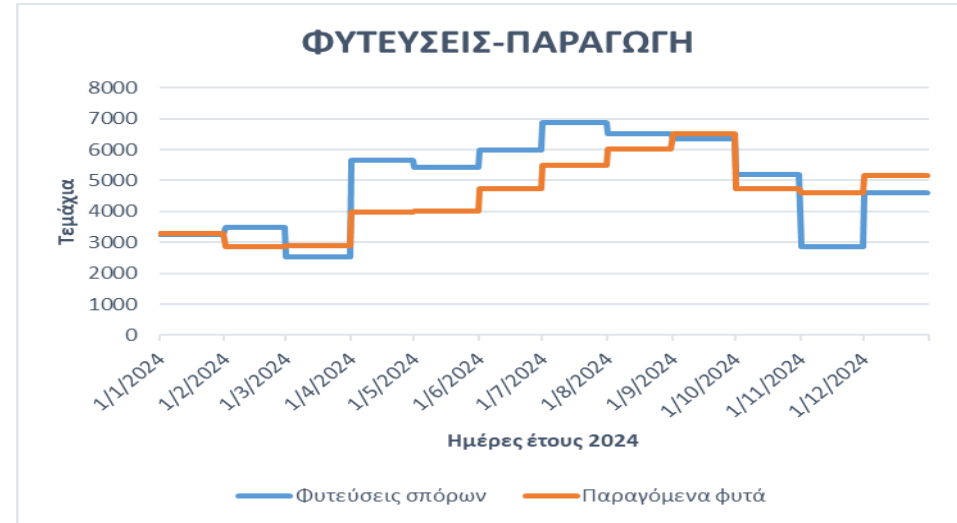
Συγκομιδή

- Συσκευασία - Αποθήκευση



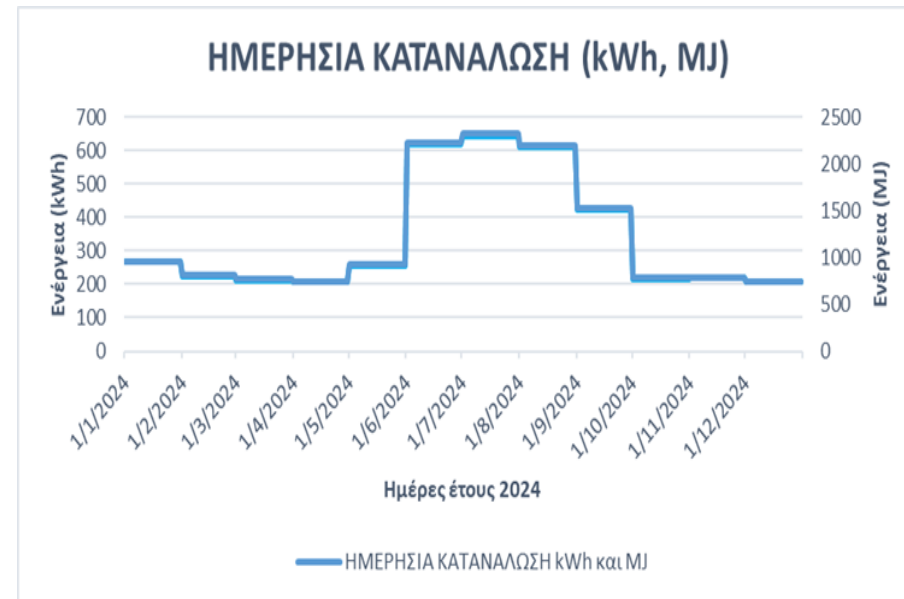
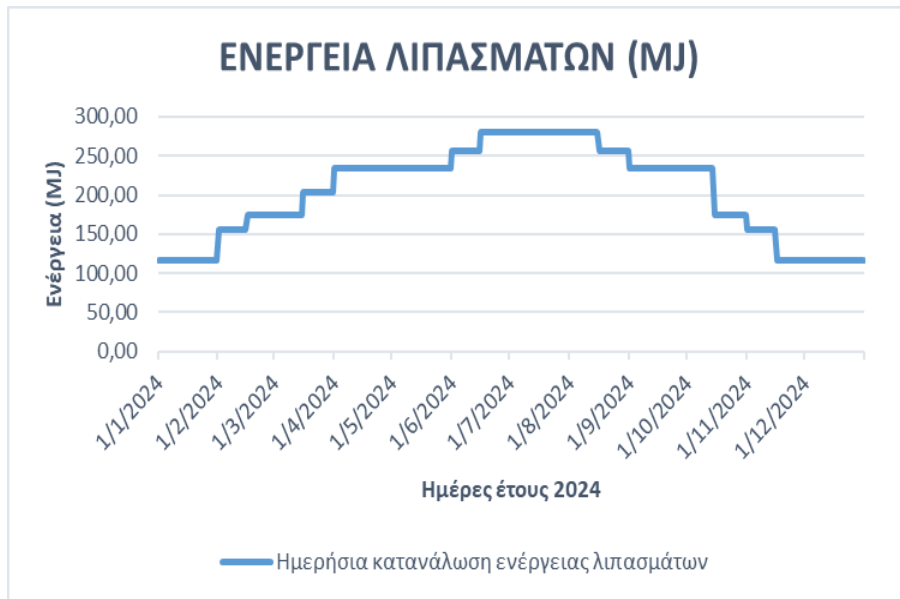
Ρυθμός Παραγωγής, Εποχικότητα & Αποδοτικότητα

- Καθημερινή καταγραφή φυτεύσεων & παραγωγής
- Εποχικές διακυμάνσεις στον αριθμό φυτών
- Απώλειες ~8% ανά έτος, λόγω σταδίων ανάπτυξης
- Συνεχής καλλιέργεια: 12μηνος κύκλος παραγωγής



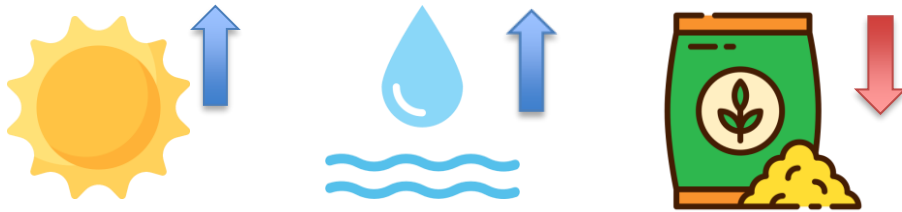
Κατανάλωση Πόρων

- Ενέργεια: 125.000 kWh/έτος
- Νερό: 13.725 m³/έτος για υδροπονία & 5.560 m³/έτος για ψύξη
- Ενεργοβόρα συστήματα: άντληση, κυκλοφορία, εξαερισμός
- Κατανάλωση μεταβάλλεται με την εποχικότητα & παραγωγή
- Ανάγκη μείωσης εξάρτησης από ηλεκτρικό δίκτυο

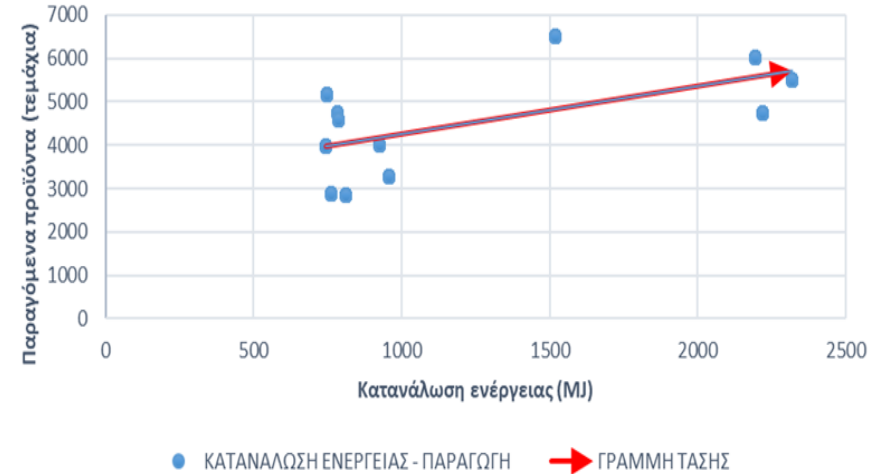


Συσχέτιση Πόρων

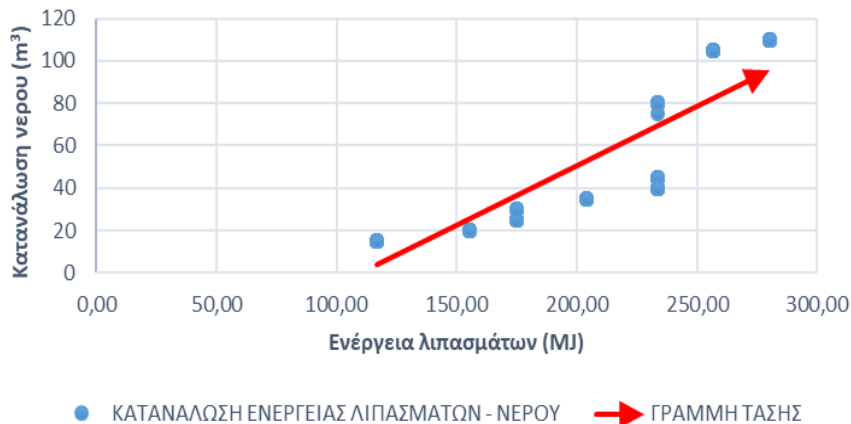
- Αλληλεξάρτηση κατανάλωσης - πόρων
- Η κόκκινη γραμμή τάσης αναδεικνύει την θετική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών
- Εποχική μεταβολή στην αναλογία



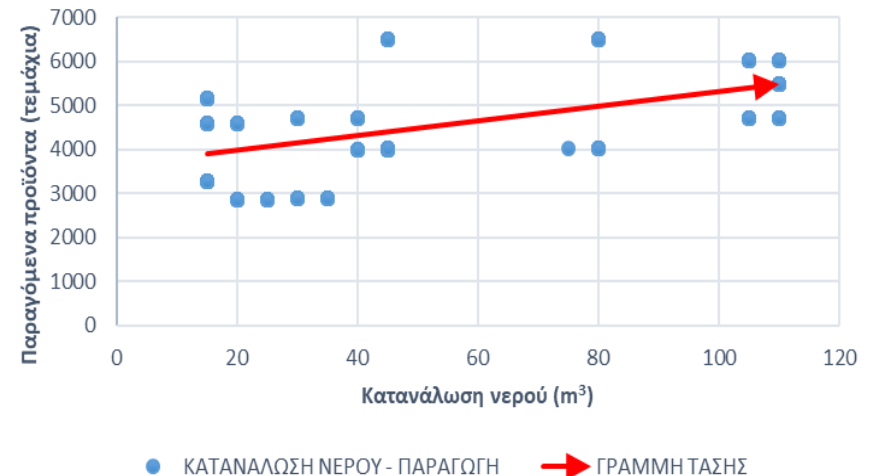
ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ - ΠΑΡΑΓΩΓΗ



ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΝΕΡΟΥ - ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΛΙΠΑΣΜΑΤΩΝ



ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΝΕΡΟΥ - ΠΑΡΑΓΩΓΗ



Προσεγγίσεις Αυτονομίας & Αξιοποίηση ΑΠΕ

- Κρίσιμη ανάγκη/Στόχος → Σταθερή ενεργειακή αυτάρκεια → μείωση κόστους - αποτυπώματος



Φωτοβολταϊκά πάνελ (οροφή θερμοκηπίου)



Συμπαγωγή Ηλεκτρισμού & Θερμότητας (ΣΗΘΥΑ)



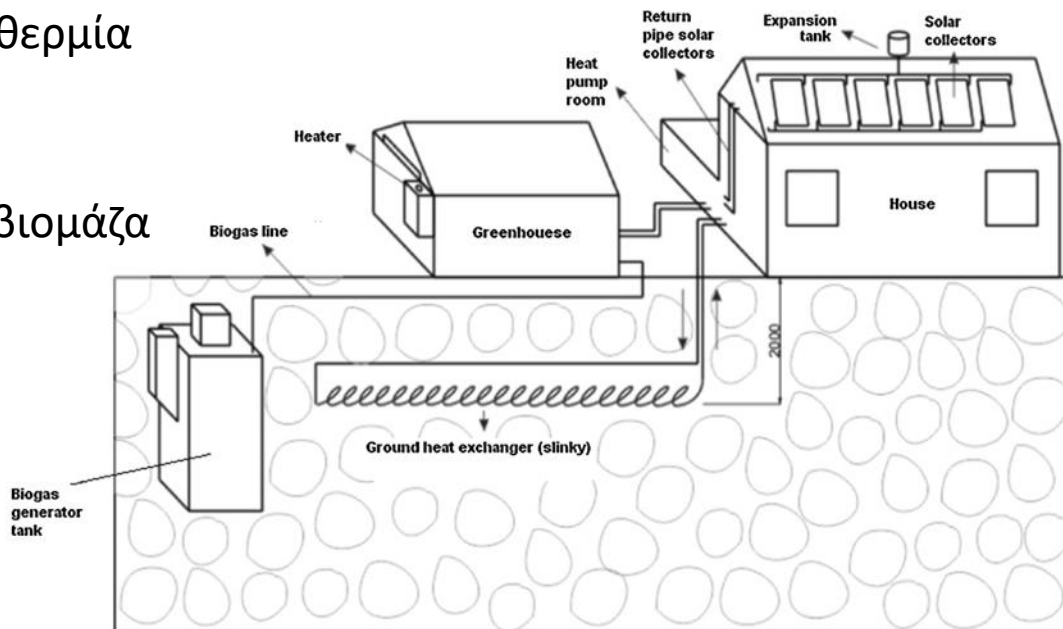
Θέρμανση/ψύξη με γεωθερμία



Παραγωγή βιοαερίου από βιομάζα



μέθοδος σωλήνων PVC



Εικόνα: Συνδυασμός τεχνολογιών

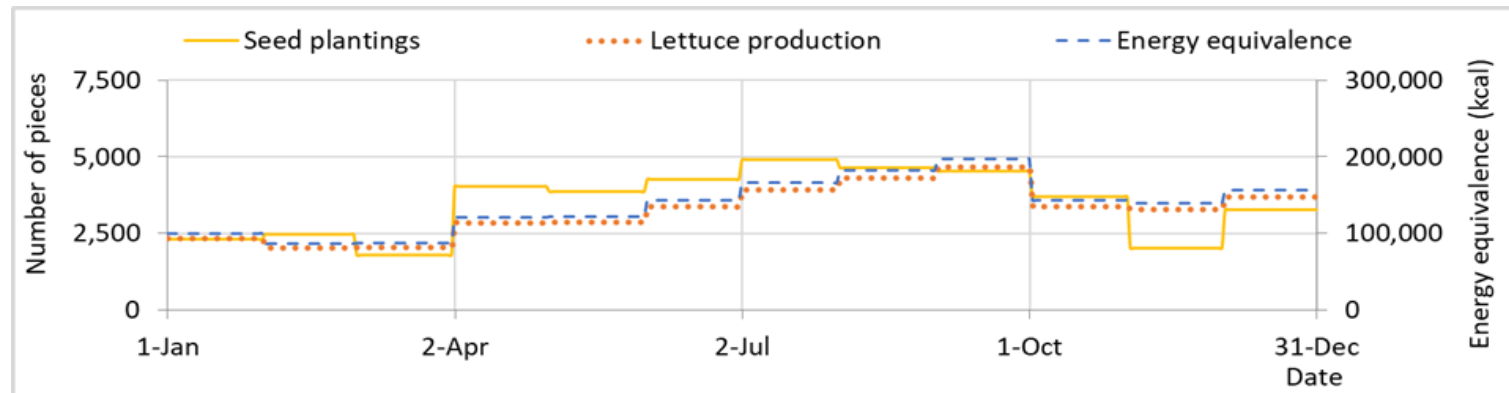
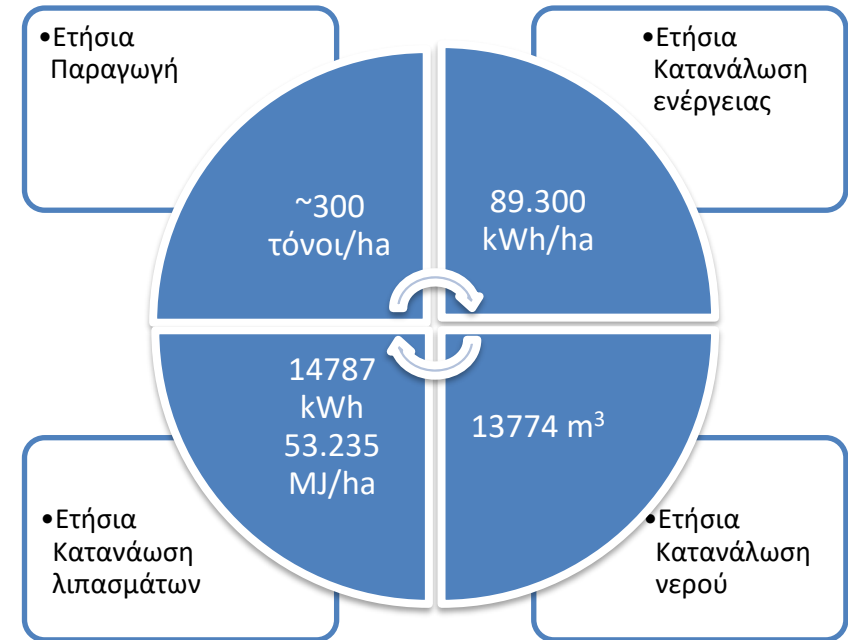
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ

- ❖ Πλέγμα Νερού - Ενέργειας - Τροφίμων (WEF Nexus)
- ❖ Υδροπονία και Κλιματικά Έξυπνη Γεωργία (CSA)
- ❖ Μελέτη Περίπτωσης – Θερμοκήπιο Markatos Hydroponics
- ❖ Ανάλυση – Αποτελέσματα (Επίλυση Πλέγματος)

Μοντελοποίηση Μονάδας Markatos:

Τρόφιμα - Ενσωματωμένη ενέργεια

- Έκταση μοντέλου: 1 ha θερμοκήπια τύπου DFT
- Μαρούλι: 0,25 kg/τεμάχιο → 42kcal → 0,18MJ
- Ενέργεια παραγωγής: ~210.000 MJ/ha
→ 58000kWh/ha
- Συγκριτικά: Σιτάρι → 49.000–56.000 MJ/ha
- Υδροπονία → υψηλή πυκνότητα και απόδοση /m²



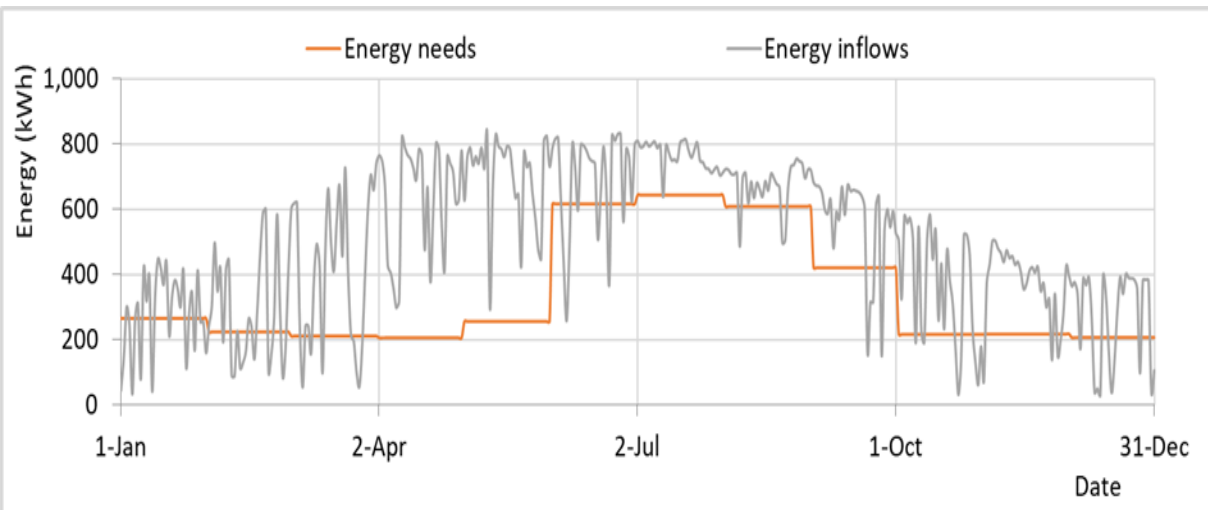
Εικόνα: Ο αριθμός των σπόρων που χρησιμοποιήθηκαν και των μαρουλιών που παράχθηκαν από την υδροπονική μονάδα σε τεμάχια και η ισοδυναμία τους σε ενέργεια (σε ημερήσια βάση).

Φωτοβολταϊκά – Εναρμόνιση Παραγωγής & Ζήτησης

PV 0.1 ha → ~183 MWh/έτος

Ενεργειακή κάλυψη:
ανθεκτικότητα R=90

- Παραγωγή ενέργειας: υψηλότερη την περίοδο Απριλίου–Σεπτεμβρίου
- Συμπίπτει με αυξημένες ανάγκες (ψύξη, άντληση νερού)
→ Ενεργειακή συμβατότητα PV με λειτουργία θερμοκηπίου
→ Κρίσιμη η εποχική αντιστοίχιση για αυτονομία
- Δεν προσαρμόζεται στο προφίλ κατανάλωσης για 40 ημέρες



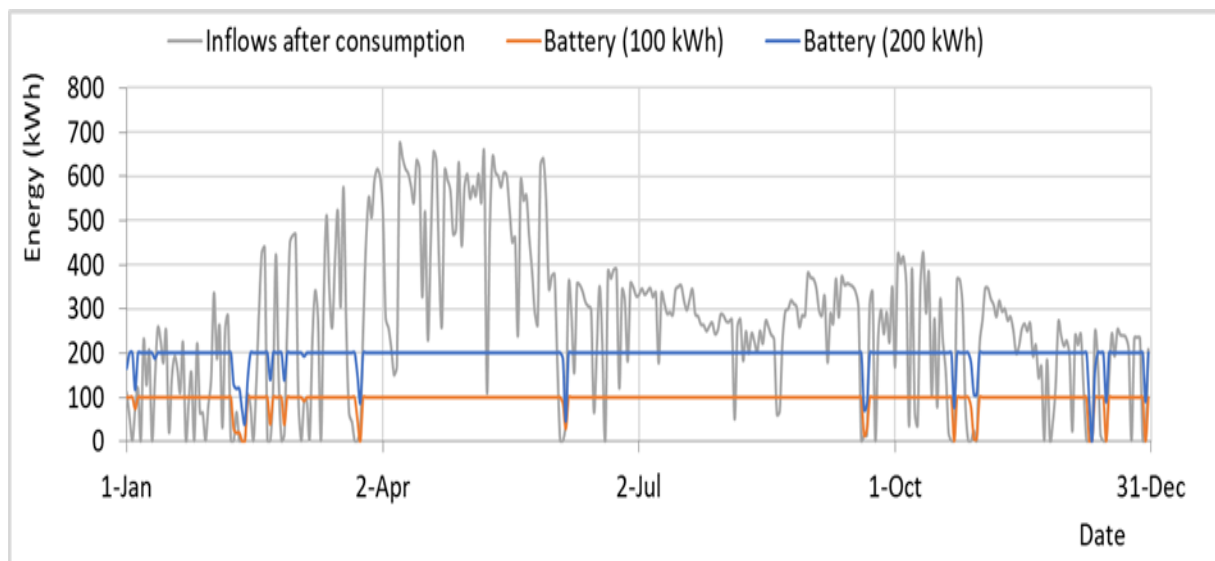
“Αρμονία παραγωγής–ζήτησης”



ευκαιρία για πλήρη ενεργειακή
επάρκεια

Εικόνα: Τα προφίλ της παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά PVs (0.1 ha) και των ενεργειακών αναγκών της υδροπονικής καλλιέργειας (1 ha) (σε ημερήσια βάση).

Φωτοβολταϊκά με Αποθήκευση Ενέργειας



Εικόνα: Η ανεκμετάλλευστη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά και η χρήση μπαταριών με αποθηκευτικό χώρο 100 kWh και 200 kWh (σε ημερήσια βάση).

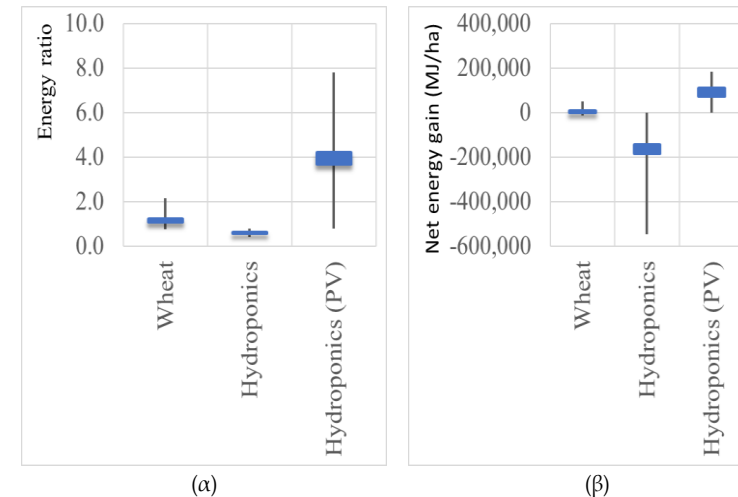
Ενεργειακοί Δείκτες – Net Energy Gain & Ratio

Χρήση φωτοβολταϊκών χωρίς αποθήκευση

✓ Ενεργειακός Λόγος (ER): → Από 0.5 σε 3.9 με χρήση φωτοβολταϊκών

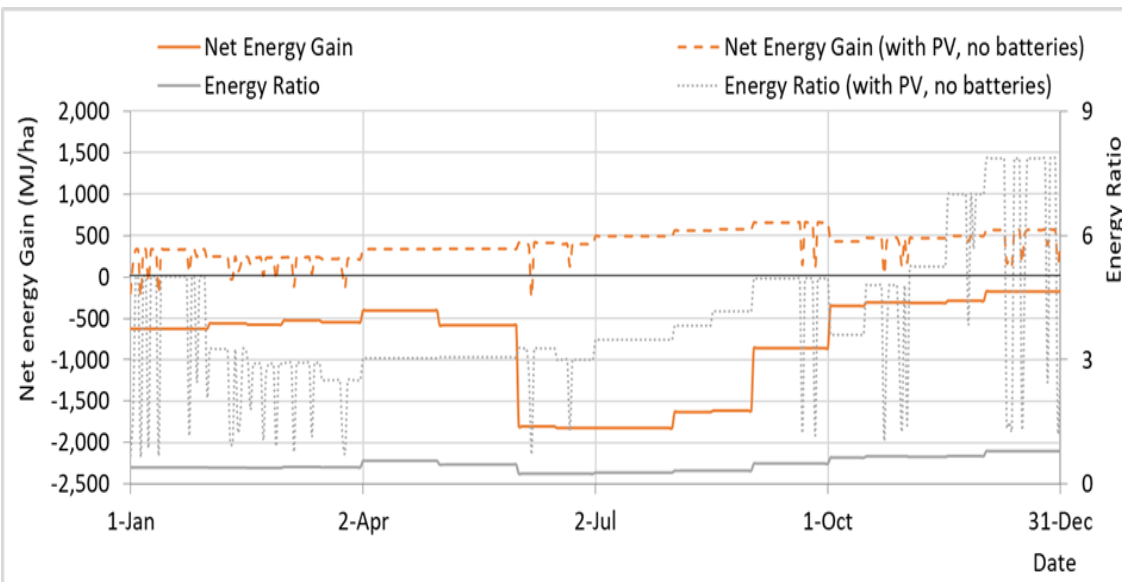
✓ Καθαρό Ενεργειακό Κέρδος (NEG): → Από -800 MJ/ha σε +400 MJ/ha μέσο όρο

💡 Η ενσωμάτωση ΑΠΕ βελτιώνει την αποδοτικότητα του WEF Nexus



Εικόνα: Ενεργειακοί δείκτες: (α) ενεργειακός λόγος· (β) καθαρό ενεργειακό κέρδος (σε ετήσια βάση).

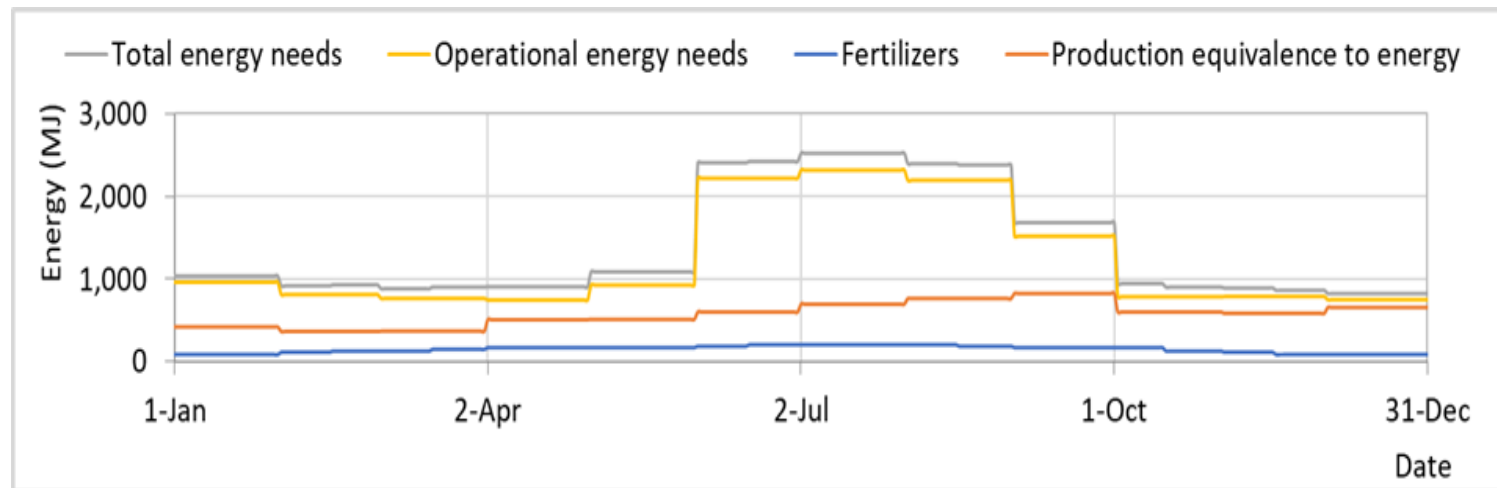
🔄 Σημαντική εποχική διακύμανση:
→ Χειμώνας → θετικό ισοζύγιο
→ Καλοκαίρι → αρνητικό λόγω αυξημένων αναγκών



Εικόνα: Ενεργειακοί δείκτες: ενεργειακός λόγος και καθαρό ενεργειακό κέρδος (ανά ημέρα).

Το Πλέγμα σε Πράξη – Συμπεράσματα & Προοπτικές

- ✓ Το Πλέγμα WEF εφαρμόστηκε επιτυχώς στη μονάδα Markatos Hydroponics
- ↻ Αλληλεξαρτήσεις μεταξύ πόρων: νερό ↔ ενέργεια ↔ τροφή
- 📊 Επιτεύχθηκε ποσοτική αποτύπωση της κατανάλωσης και παραγωγής
- ♻️ Τεχνικές λύσεις ΑΠΕ βελτιώνουν την ενεργειακή απόδοση
- 🌍 Μελλοντικές εφαρμογές σε: → αστικά θερμοκήπια
→ κλιματικά ευάλωτες περιοχές
→ κυκλική οικονομία γεωργίας



Εικόνα: Συνολικές ενεργειακές ανάγκες (λειτουργικές και λιπάσματα), λειτουργικές ενεργειακές ανάγκες, λιπάσματα και η παραγωγική ισοδυναμία σε ενέργεια (σε ημερήσια βάση).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ ΣΑΣ!

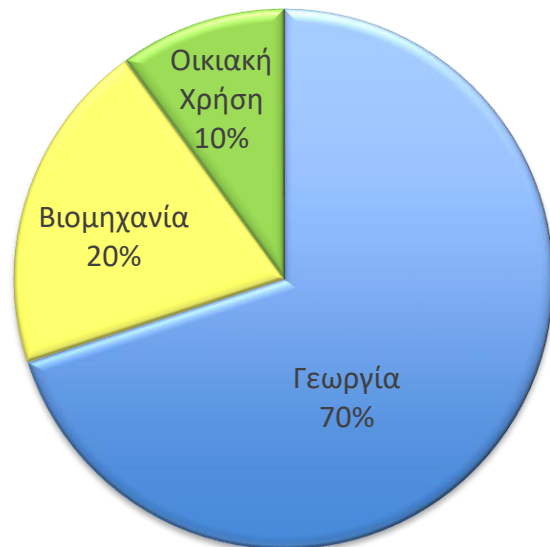
Παράρτημα

Νερό – Ο Πρώτος Πόρος

Κύριες Προκλήσεις:

- Αυξανόμενη ζήτηση
- Εποχικές διακυμάνσεις
- Ποιότητα νερού
- Ανταγωνισμός χρήσεων

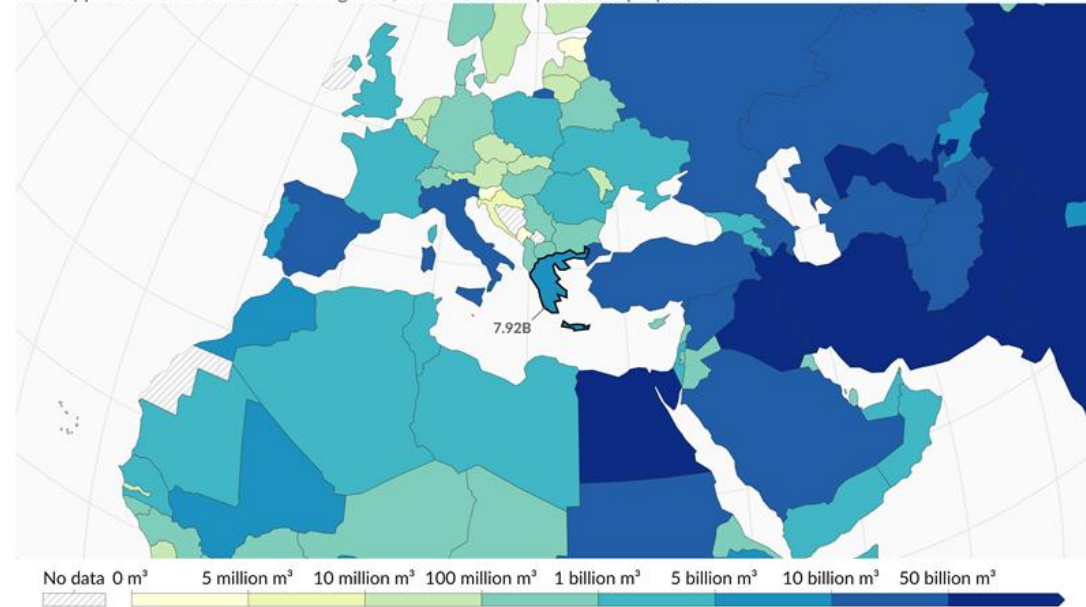
Κατανομή Παγκόσμιας Χρήσης Νερού ανά Τομέα



<1% Γλυκό νερό άμεσα προσβάσιμο

Agricultural water withdrawals, 2015

Total agricultural withdrawals, measured in m³ per year. Agricultural water is defined as the annual quantity of self-supplied water withdrawn for irrigation, livestock and aquaculture purposes.



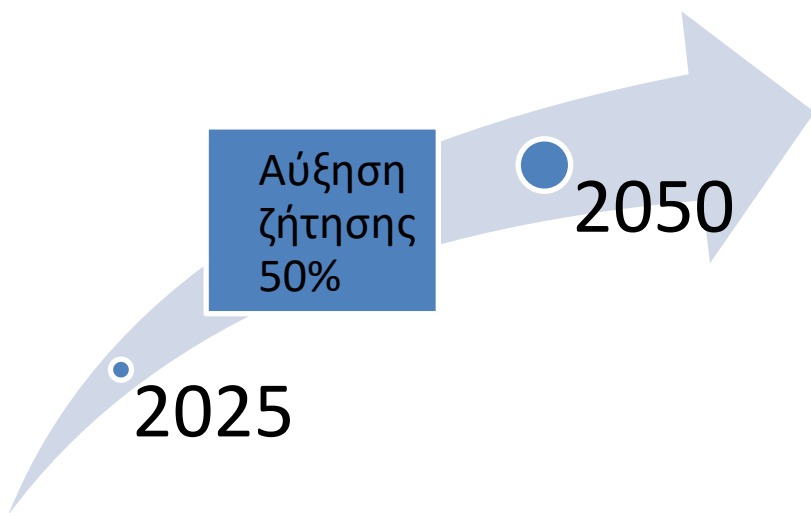
Data source: Food and Agriculture Organization of the United Nations - AQUASTAT

OurWorldinData.org/water-use-stress | CC BY

Στρατηγικές:

- Ανακύκλωση
- Επαναχρησιμοποίηση
- Εξοικονόμηση
- Συστήματα ελέγχου & έξυπνη άρδευση

Ενέργεια - Ο Δεύτερος Πόρος



Κύριες Προκλήσεις:

- Αυξανόμενη ζήτηση
- Ένταση κατανάλωσης νερού
- Ανταγωνισμός χρήσεων γη

Βιώσιμες Λύσεις:

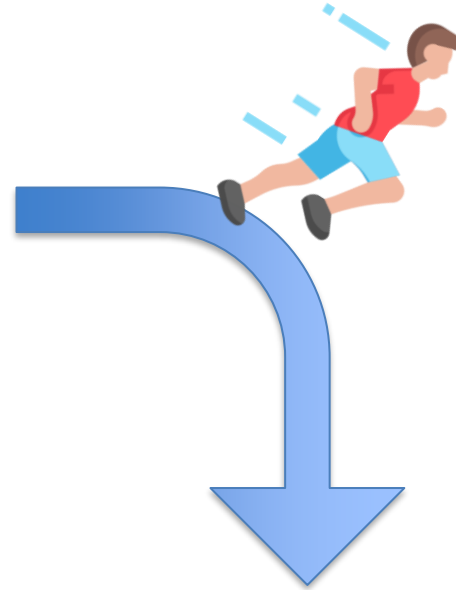
- Ανανεώσιμες πηγές
- Ενεργειακή απόδοση
- Έξυπνη Διαχείριση



Τρόφιμα - Ο Τρίτος Πόρος

Βασικές Προκλήσεις:

- Πληθυσμός έως 2050 (9.7B)
- Αύξηση παραγωγής τροφίμων (50%)
- Απώλεια τροφίμων (1/3)



Καινοτόμες λύσεις:

- Κλιματικά έξυπνη γεωργία
- Υδροπονία
- Ψηφιακή γεωργία

Αντοχή στην Αγορά & Τεχνολογική Πορεία

❑ Προκλήσεις:

- Υψηλό κόστος επένδυσης
- Δυσκολία στην εύρεση εξειδικευμένου προσωπικού
- Ανταγωνισμός από φθηνότερα υπαίθρια προϊόντα
- Διακυμάνσεις στο κόστος ενέργειας

❑ Προοπτικές & Καινοτομίες:

- Σχέδια επέκτασης κατά +15 στρέμματα σε 3 έτη
- Εισαγωγή Τεχνητής Νοημοσύνης για βελτιστοποίηση
- Καλλιέργεια νέων ειδών (ποικιλομορφία παραγωγής)
- Στόχευση αγορών εξωτερικού (Βόρεια Ευρώπη)