

ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ Ι

Ιωάννης Δ. Τσακμάκης, Βασίλειος Μπέλλος

10 Μαρτίου, 2025



Εισαγωγή

- Παρούσα Κατάσταση
- Άρδευση Ακριβείας

Τρέχουσες Εξελίξεις

- Ο πληθυσμός στον πλανήτη εκτιμάται ότι θα φτάσει τα 10 δισεκατομμύρια έως το 2050 (Godfray et al., 2010)
- Οι απαιτήσεις για τροφή το διάστημα αυτό αναμένεται να αυξηθούν κατά 50-100% (Giannakis et al., 2017)
- Ταυτόχρονα έως το 2030 η κατανάλωση του νερού πιστεύεται ότι θα αυξηθεί έως και 30% (Beddington, 2009)
- Σήμερα ο γεωργικός τομέας είναι υπεύθυνος για το 51,4% και 30% των συνολικών αντλήσεων φρέσκου νερού σε ΗΠΑ και Ευρώπη, αντίστοιχα (Kenny et al., 2009; EEA, 2017)
- Βάση της τελευταίας αναθεώρησης του Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Θράκης, ο αγροτικός τομέας καταναλώνει ετησίως περίπου 941,4 hm³ (58,8%)



Η άρδευση στην Ελλάδα σήμερα



Υπόγεια Ύδατα

- Ιδιόκτητες γεωτρήσεις
- Κοινόχρηστες (Δημοτικές) γεωτρήσεις

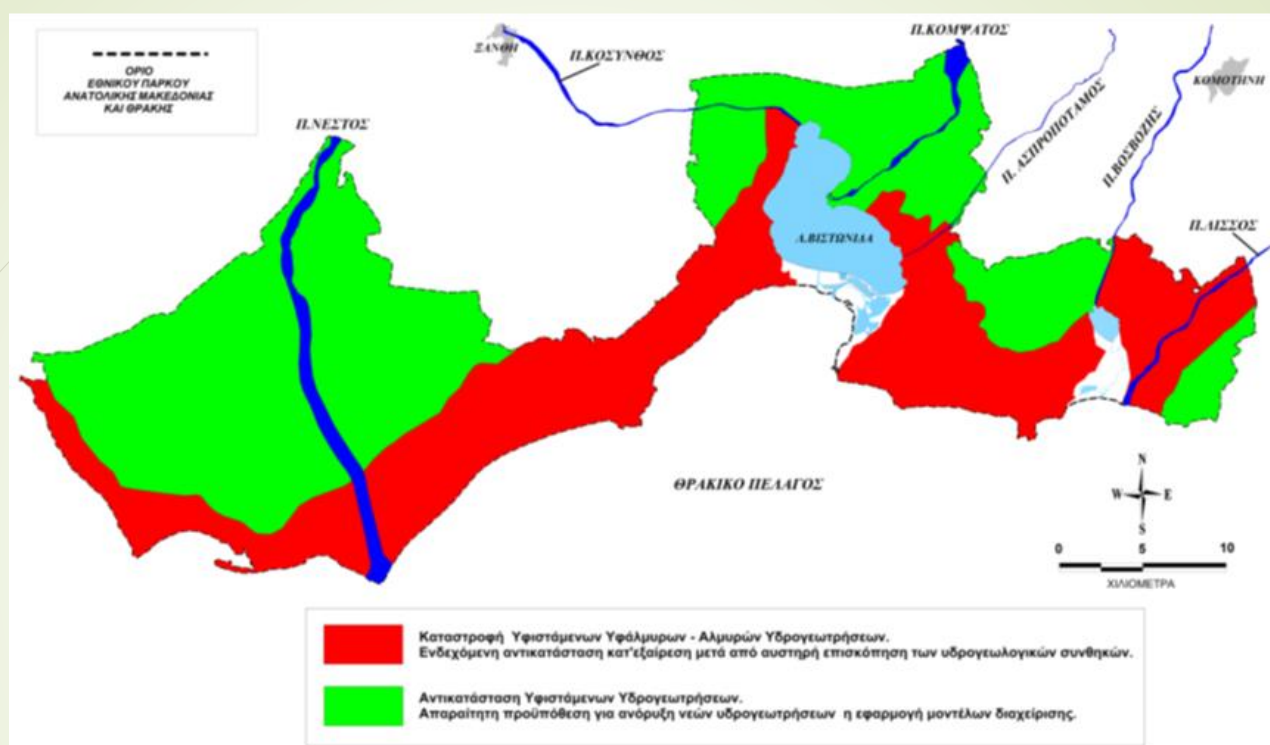
Επιφανειακά Ύδατα

- Άντληση από αρδευτικά κανάλια (π.χ., ΤΟΕΒ)
- Άντληση από εν γένει υφιστάμενα επιφανειακά ύδατα (ποτάμια, λίμνες)

Προσδιορισμός των αναγκών άρδευσης όπως ορίζονται στα Σχέδια Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών

Καθαρές ετήσιες ανάγκες καλλιεργειών

Φυτικός Συντελεστής K_c	Καλλιέργεια	Καθαρές Ετήσιες Ανάγκες (mm)
I, $k=0.55$	Ελιές, Αμπέλια	436, 264
II, $k=0.60$	Καπνός	427
III, $k=0.65$	Βαμβάκι, Όσπρια, Εσπεριδοειδή	469, 523, 480
IV, $k=0.7$	Ηλιάνθος, Πατάτες, Ζαχαρότευτλα	427, 469, 558
V, $k=0.78$	Σιτηρά, Αραβόσιπος	89, 535
VI, $k=0.80$	Τεχνητοί Υγρο-βιώτοποι	350
VII, $k=0.85$	Μηδική	741
VIII, $k=1.20$	Ρύζι	721



Ενδεικτικά αποτελέσματα της μακροχρόνιας
υπερ-άντλησης υπογείων υδάτων

Ορισμός:

η **ορθή και ακριβής** εφαρμογή νερού κατά τέτοιον τρόπο ώστε να καλύπτονται οι **ακριβείς ανάγκες** των ανεξάρτητων φυτών ή μονάδων διαχείρισης, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις αρνητικές συνέπιες προς το περιβάλλον (Raine et al., 2007)



Πότε;



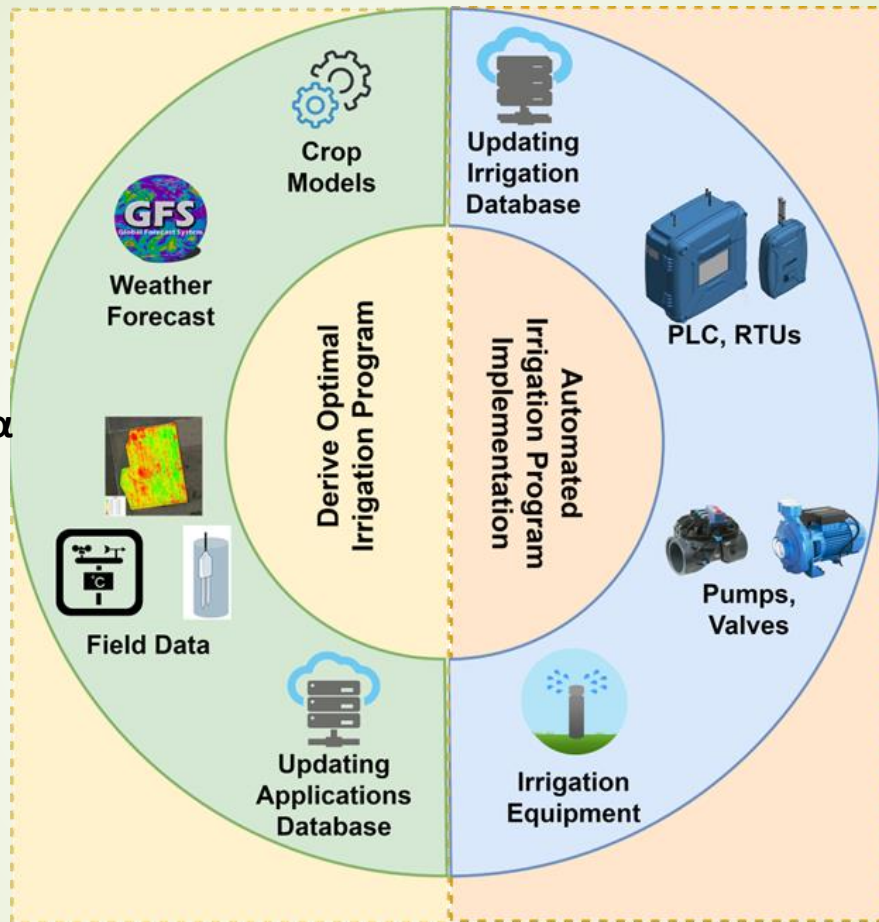
Πόσο;

Άρδευση Ακριβείας



Δημιουργία Βέλτιστου Προγράμματος

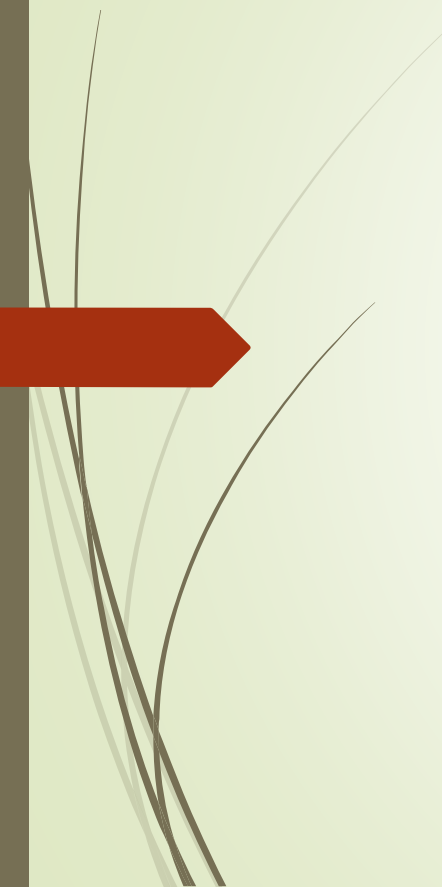
- Δεδομένα πεδίου
- Πρόβλεψη του καιρού
- Αριθμητικά – αγρονομικά μοντέλα
- Βάσεις δεδομένων



Εκτέλεση προγράμματος

- Βάσεις δεδομένων
- Προγραμματιστές άρδευσης
- Βάνες, μετρητές νερού
- Άρδευτικός εξοπλισμός

Άρδευση Ακριβείας



Ενότητα 1

Μοντελοποίηση

○ Ισοζύγιο Νερού



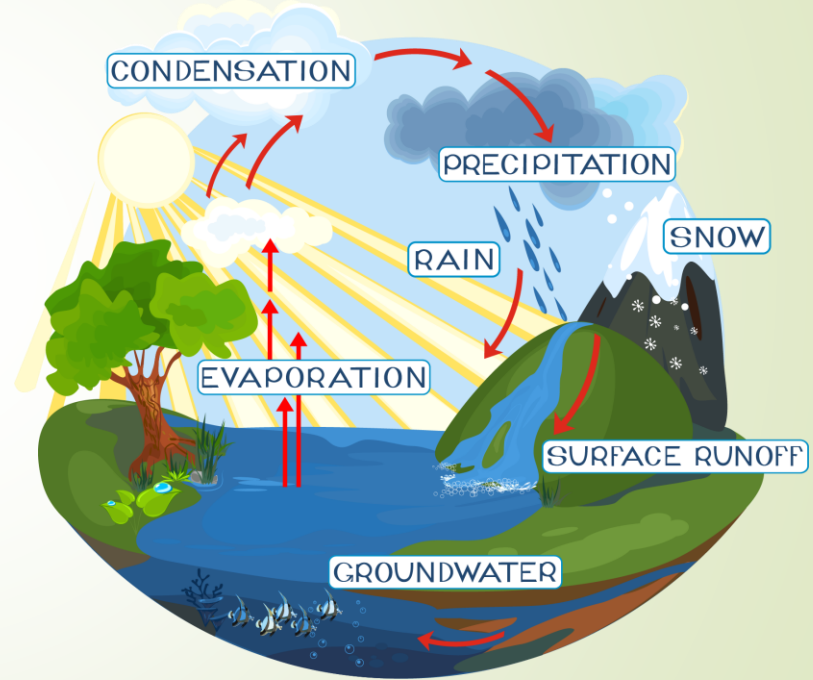
Ισοζύγιο Νερού



Υδρολογικός Κύκλος

Βασικά στοιχεία του υδατικού κύκλου:

- Εξάτμιση από το έδαφος και την επιφάνεια του εδάφους
- Διαπνοή μέσω της βλάστησης
- Συμπύκνωση Υδατμών
- Βροχές, Χιονοπτώσεις
- Διήθηση στο έδαφος
- Επιφανειακή απορροή
- Υπόγειοι και επιφανειακοί υδατικοί πόροι



Η ριζόσφαιρα ως δεξαμενή νερού

$$ET = I + P + CR - DP - RO$$

ET: Εξατμισοδιαπνοή (mm)

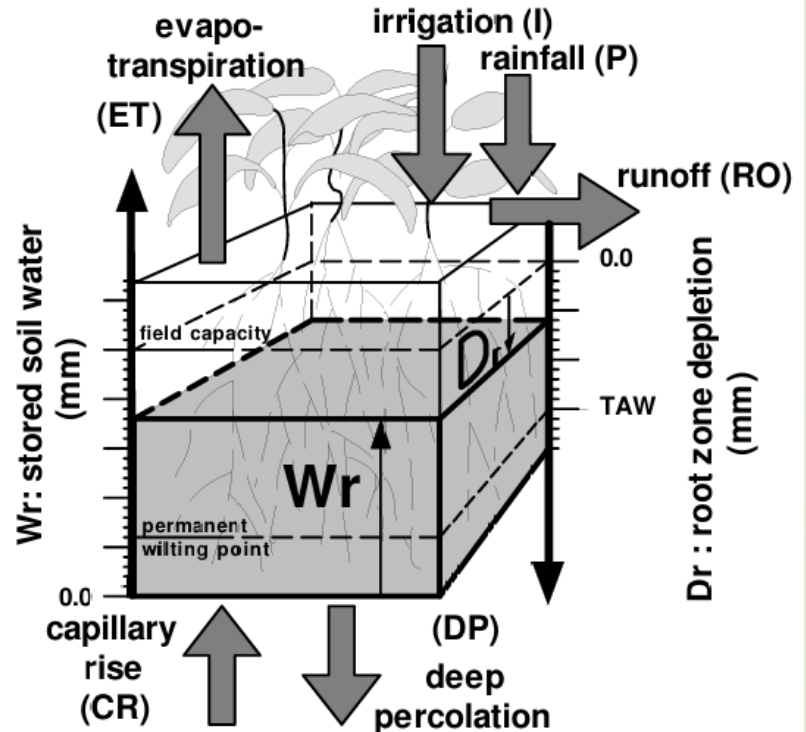
I: Άρδευση (mm)

P: Ύψος Βροχής (mm)

CR: Τριχοειδής Ανύψωση

DP: Βαθιά Κατείσδυση

RO: Επιφανειακή Απορροή

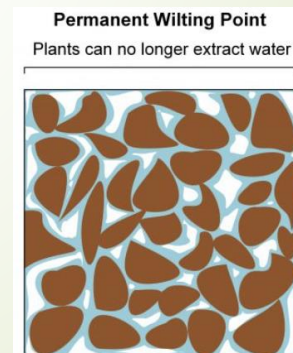
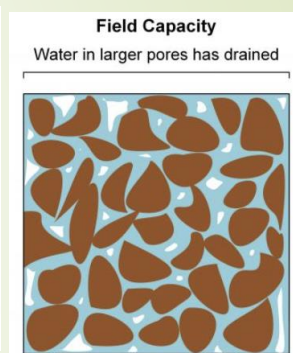
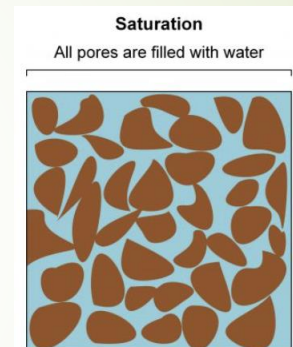


Βασικά Υδραυλικά Χαρακτηριστικά του Εδάφους

Σημείο Κορεσμού (SAT): Η κατάσταση του εδάφους όπου όλοι οι πόροι είναι πλήρως γεμάτοι με νερό, χωρίς διαθέσιμο αέρα. Ένα κορεσμένο έδαφος αποστραγγίζει λόγω βαρύτητας.

Υδατο-ικανότητα (FC): Η ποσότητα νερού που συγκρατεί το έδαφος μετά την αποστράγγιση του περίσσιου νερού, διατηρώντας αρκετή υγρασία για την ανάπτυξη των φυτών και ταυτόχρονα αερόβιους πόρους.

Σημείο Μόνιμης Μάρανσης (WP ή PWP): Το επίπεδο υγρασίας στο οποίο τα φυτά δεν μπορούν πλέον να απορροφήσουν νερό από το έδαφος, οδηγώντας σε μη αναστρέψιμη μάρανση.



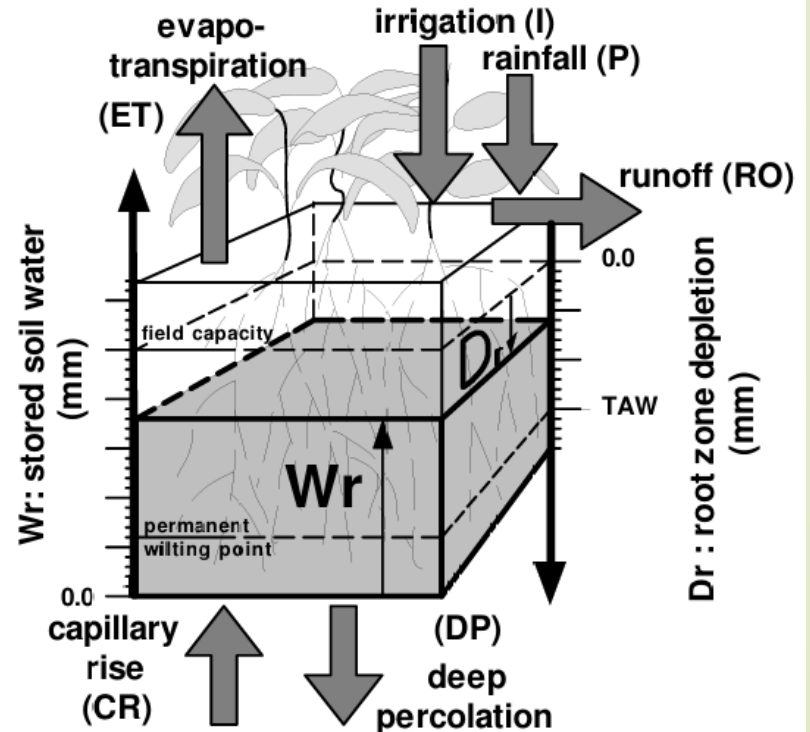
Διαθέσιμο Νερό

$$W_r = 1000\theta Z$$

W_r: διαθέσιμο νερό (mm)

θ: Ογκομετρικό περιεχόμενο υγρασίας ($\text{cm}^3_{\text{water}}/\text{cm}^3_{\text{soil}}$)

Z: ενεργό ριζικό σύστημα (m)



Απώλεια Υγρασίας στη Ριζόσφαιρα

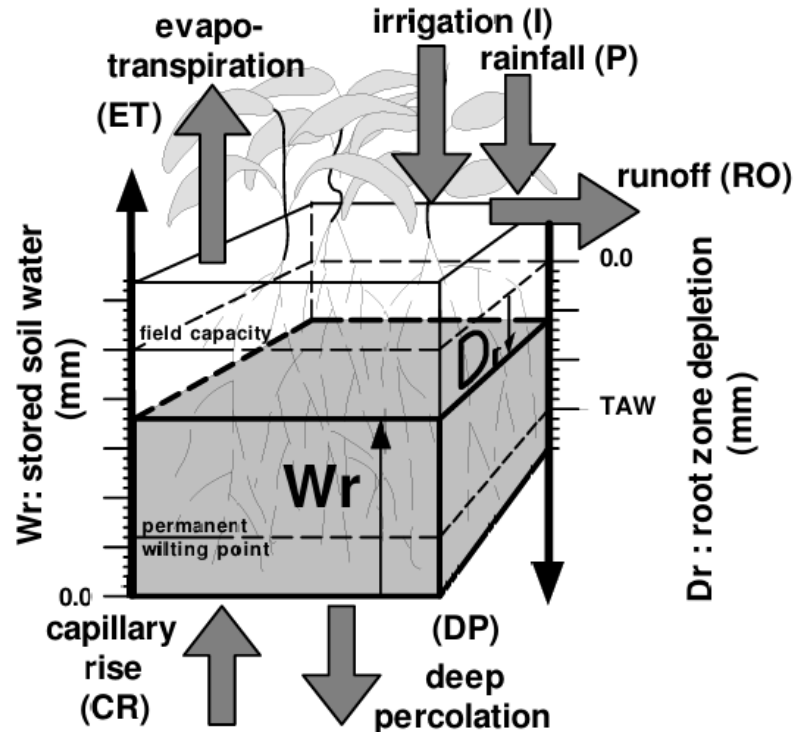
$$Dr = W_{fc} - W_r = 1000(\theta_{fc} - \theta_r)Z$$

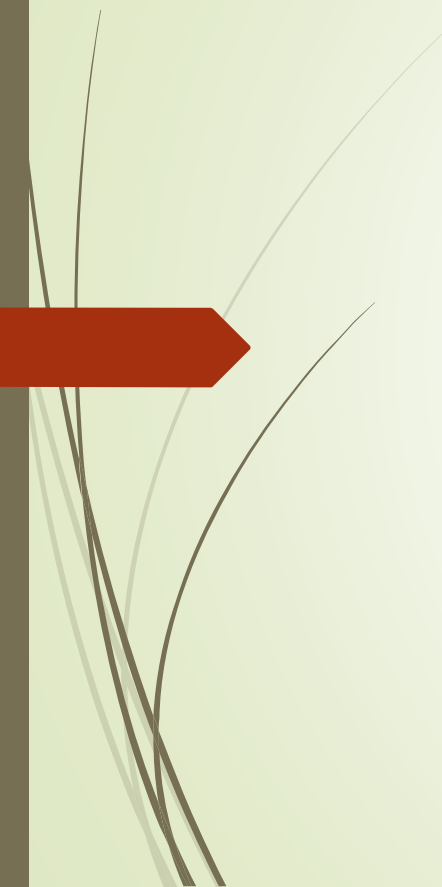
Dr: Απώλεια Υγρασίας (mm)

θ_{FC} : Ογκομετρικό περιεχόμενο
Υδατο-ικανότητας ($\text{cm}^3_{\text{water}}/\text{cm}^3_{\text{soil}}$)

θ_{PWP} : Ογκομετρικό περιεχόμενο
μόνιμης μάρανσης ($\text{cm}^3_{\text{water}}/\text{cm}^3_{\text{soil}}$)

Z: ενεργό ριζικό σύστημα (m)





Ενότητα 2

Παρακολούθηση
Φυτών μέσω
Τηλεπισκόπησης

- Βλαστικοί Δείκτες
- Δορυφορικές Εικόνες
- ΣμηΕΑ

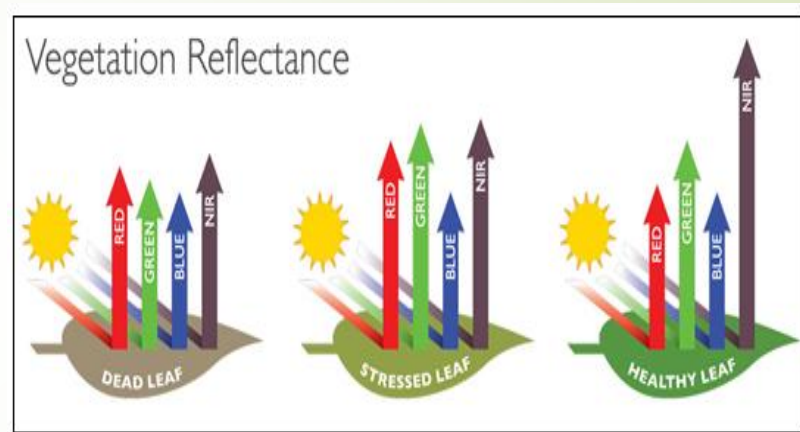


Βλαστικοί Δείκτες



Βλαστικοί Δείκτες (Vegetation Indices, VI)

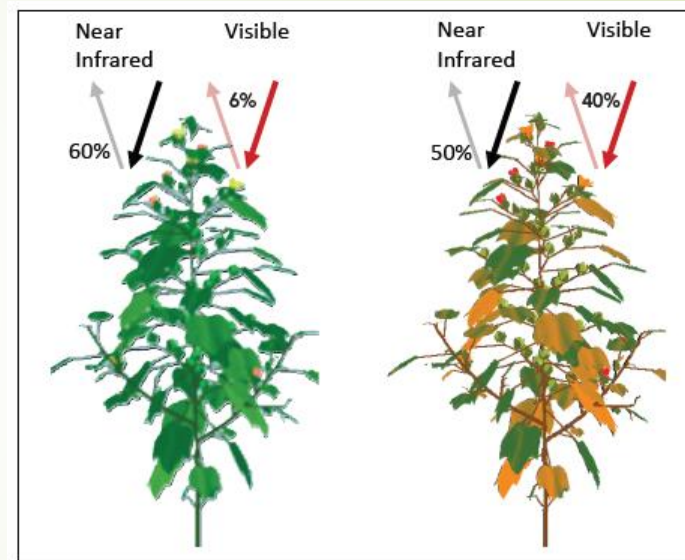
- Κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης η **χλωροφύλλη** που παράγουν τα φυτά απορροφά **κόκκινο** και **μπλε** φως από το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα ενώ αντανακλά το μεγαλύτερο μέρος του φωτός που προέρχεται από το εγγύς υπέρθυρο.
- Ως βλαστικός δείκτης ορίζεται μια συνάρτηση της ανάκλασης του φωτός σε **δύο ή περισσότερες φασματικές μπάντες**.
- Σήμερα οι βλαστικοί δείκτες χρησιμοποιούνται στη **γεωργία ακριβείας** ως μέσα για την αποτίμηση της **υγείας κατάστασης των φυτών**.



Δείκτης Βλαστικής Κανονικοποιημένης Διαφοράς Normalized Difference Vegetation Index, NDVI

- Ο δείκτης βλαστικής κανονικοποιημένης διαφοράς είναι ένας απλός γραφικός δείκτης ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εικόνες οι οποίες έχουν ληφθεί από εναέρια μέσα (π.χ., δορυφόροι, μη επανδρωμένα αεροσκάφη, κτλ.) για να εκτιμηθεί εάν σε μια περιοχή υπάρχει ζωντανή πράσινη βλάστηση.
- Ορίζεται ως:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

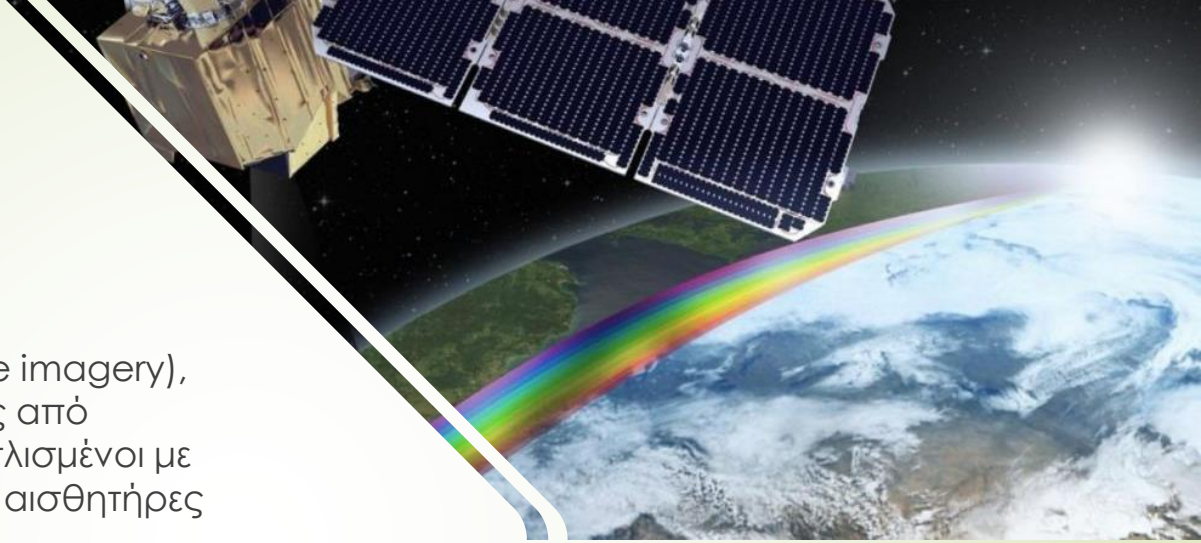


Δορυφορικές Εικόνες



Δορυφορικές Εικόνες

- Ως δορυφορικές εικόνες (satellite imagery), ορίζονται οι **απεικονίσεις** της γης από δορυφόρους οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με εξειδικευμένους τηλεπισκοπικούς αισθητήρες (remote sensors).
- Αποτελούν ένα σύνολο ψηφιακών δεδομένων τα οποία παράγονται από τους τηλεπισκοπικούς αισθητήρες, οι οποίοι καταγράφουν των αριθμό των φωτονίων τα οποία ανακλώνται ή εκπέμπονται από ένα κομμάτι εδάφους.



Δορυφορικές Εικόνες

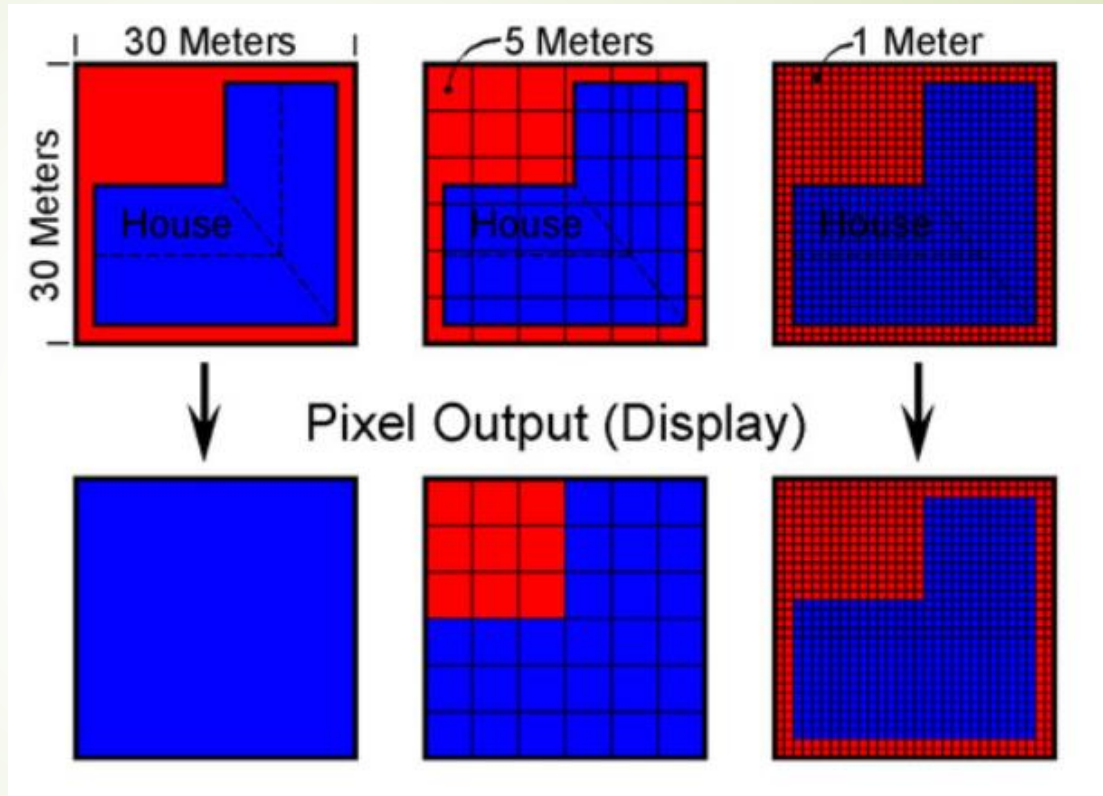
- Το κάθε κομμάτι εδάφους που ανακλά/εκπέμπει φωτόνια αντιστοιχεί σε ένα εικονοστοιχείο (pixel) και το μέγεθος του δύναται να διαφέρει σημαντικά, ανάλογα με τις δυνατότητες των οργάνων που φέρει ο ενίοτε δορυφόρος (π.χ. $10 \times 10 \mu$, 1×1 χιλ., κτλ).
- Μια δορυφορική εικόνα μπορεί να αποτελείται από ένα σύνολο εικονοστοιχείων.
- Κάθε εικονοστοιχείο αναπαριστά τη φωτεινότητα στο έδαφος, η οποία είναι καταγεγραμμένη με έναν αριθμό, διαφορετικό για κάθε μήκος κύματος (δίαυλο – band)



Χαρακτηρίστηκα δορυφορικών εικόνων

Χωρική Ανάλυση (Spatial Resolution)

Προσδιορίζει το **μέγεθος των pixels** των δορυφορικών εικόνων που καλύπτουν την επιφάνεια της γης



Χαρακτηριστικά δορυφορικών εικόνων

Συχνότητα κάλυψης (Temporal Resolution)

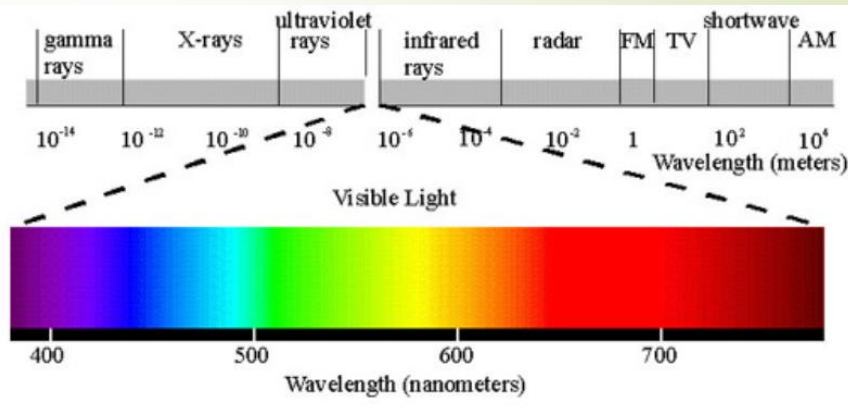
Προσδιορίζει τη συχνότητα που **καταγράφει** ένας δορυφόρος **μία συγκεκριμένη τοποθεσία**

- Υψηλή συχνότητα κάλυψης : < 24 ώρες - 3 μέρες
- Μέτρια συχνότητα κάλυψης : 4 - 16 μέρες
- Χαμηλή συχνότητα κάλυψης : > 16 μέρες

Φασματική ανάλυση (Spectral Resolution)

Προσδιορίζει τον **αριθμό των φασματικών ζωνών** στις οποίες ο αισθητήρας μπορεί να συλλέξει την **ανακλώμενη ακτινοβολία**

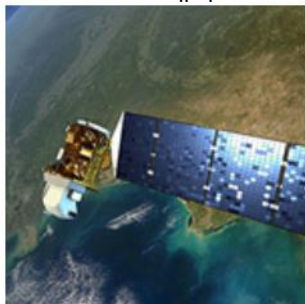
- Υψηλή φασματική ανάλυση: 15 - 220 bands
- Μέτρια φασματική ανάλυση: 3 - 15 bands
- Χαμηλή φασματική ανάλυση: 1 - 3 bands



Δορυφόροι που χρησιμοποιούνται για τη λήψη δορυφορικών εικόνων

LANDSAT 8 (15m)

1972 - Σήμερα



IKONOS (0.82m)

1999 – Σήμερα



KOMPSAT-3A (0.55m)

1999 – Σήμερα



QuickBird (0.61m)

2001 – Σήμερα



WorldView-4 (0.31m)

2007 – Σήμερα



Sentinel-2A (10m)

2015 – Σήμερα



Συστήματα Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών

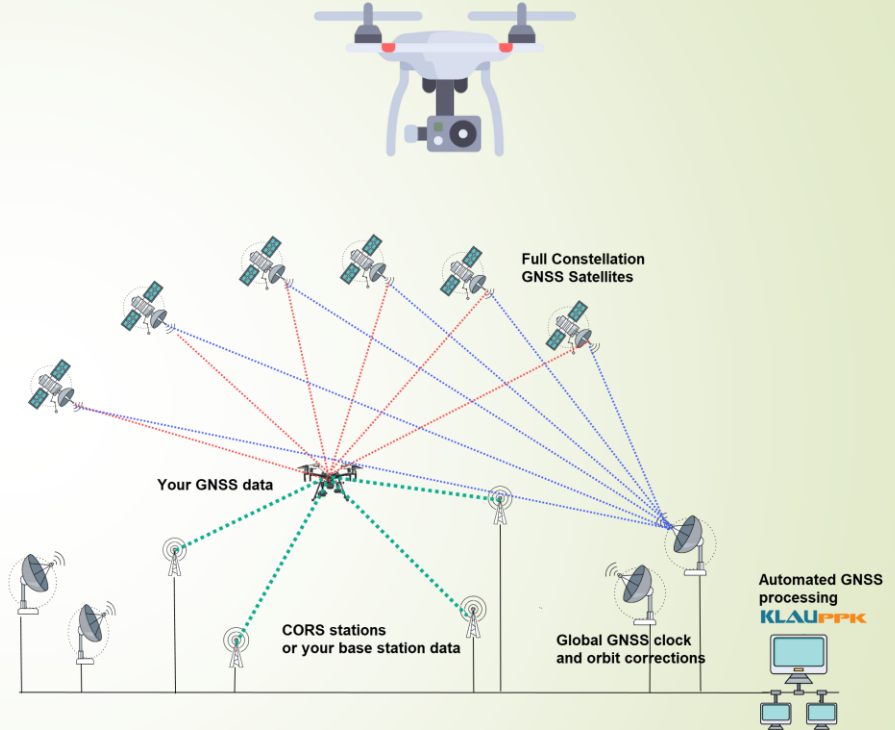


Πολυφασματικές κάμερες τοποθετημένες σε συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκάφων

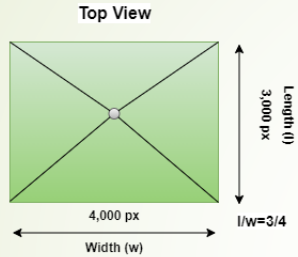
Οι πολυφασματικές κάμερες μπορούν να τραβήξουν εικόνες σε συγκεκριμένα μήκη κύματος, στο εύρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, π.χ., στην περιοχή του κόκκινου και του εγγύς υπέρυθρου.

Οι εξελίξεις στις τεχνολογίες των συστημάτων μη επανδρωμένων αεροσκαφών (ΣμηΕΑ) και πιο συγκεκριμένα η ενσωμάτωση στα ΣμηΕΑ του Global Navigation Satellite System (GNSS), κάνουν εφικτή τη δημιουργία και εκτέλεση αποστολών πτήσης υπό την επιτήρηση του χειριστή.

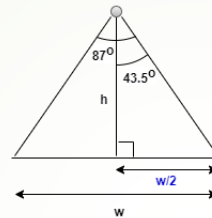
Με τη χρήση λογισμικών φωτογραμμετρίας (π.χ., Agisoft, Pix4D), οι εικόνες από την επισκόπηση των αγρών μετατρέπονται σε ορθό-χάρτες με ανάλυση εικονοστοιχείου έως και μερικά εκατοστά (εξαρτάται από το ύψος πτήσης και τον φακό της κάμερας)



Προετοιμασία πτήσης



Side View Cross Section x-x



Box 1

Calculation of width in meters

$$w/2 = h \times \tan(43.5^\circ)$$

$$w = 2 \times w/2$$

eg. for:
h=30 m w=56.9 m
h=40 m w=75.9 m
h=50 m w=94.9 m

Box 2

Calculation of length in meters

$$l = 3/4 \times w$$

eg. for:
h=30 m l=42.7 m
h=40 m l=56.9 m
h=50 m l=71.2 m

Box 3

Calculation of photo size is square meters

$$\text{Area} = w \times l$$

eg. for:
h=30 m Area=2,429.6 m²
h=40 m Area=4,322.6 m²
h=50 m Area=6,754.0 m²

Calculation of pixel size in cm

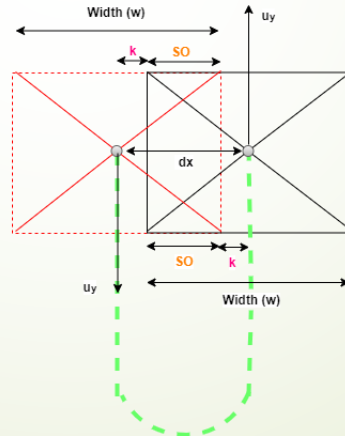
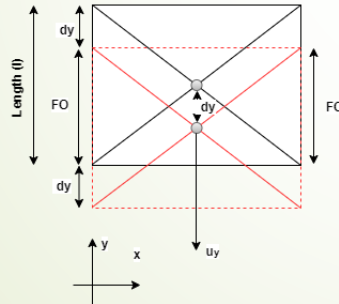
$$\text{CameraResolution} = 4,000 \times 3,000 = 12 \times 10^6 \text{ px}$$

$$\text{cm/px} = \sqrt{(\text{Area} / \text{CameraResolution})}$$

Area should be in cm²

eg. for:
h=30 m cm/px=1.42
h=40 m cm/px=1.90
h=50 m cm/px=3.37

Illustration of Drone course during a field survey



Box 4

Nomenclature

uy: Drone Cruising Speed in y axis (eg., km/h)
dy: Distance covered in y axis per second
dx: Distance between two consecutive drone courses in y axis
t: time interval between two consecutive photos (sec)

Calculations

Base Distance

$$d_y = u_y \times t$$

Frontal Overlap (FO)

$$FO = 100 \times (1 - d_y) / l$$

Side Overlap (SO)

$$w/2 = (k + SO)$$

$$dx = (k + SO) + k = (w/2) + k$$

$$k = dx - (w/2)$$

$$SO = 100 \times (w - dx) / w$$



Παραδείγματα εικόνων πολυφασματικής κάμερας



Στόχος βαθμονόμησης



Αβαθμονόμιτη εικόνα



Παραδείγματα εικόνων πολυφασματικής κάμερας

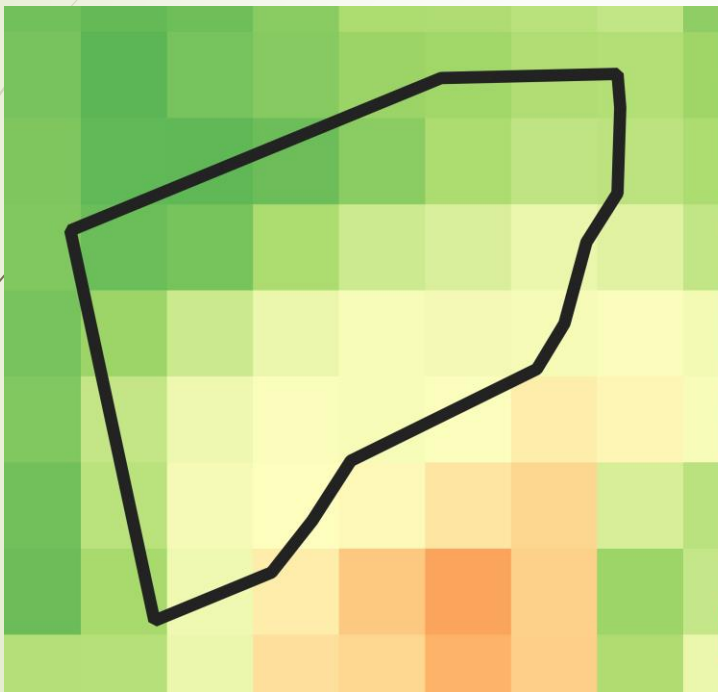


Βαθμονομιμένη εικόνα

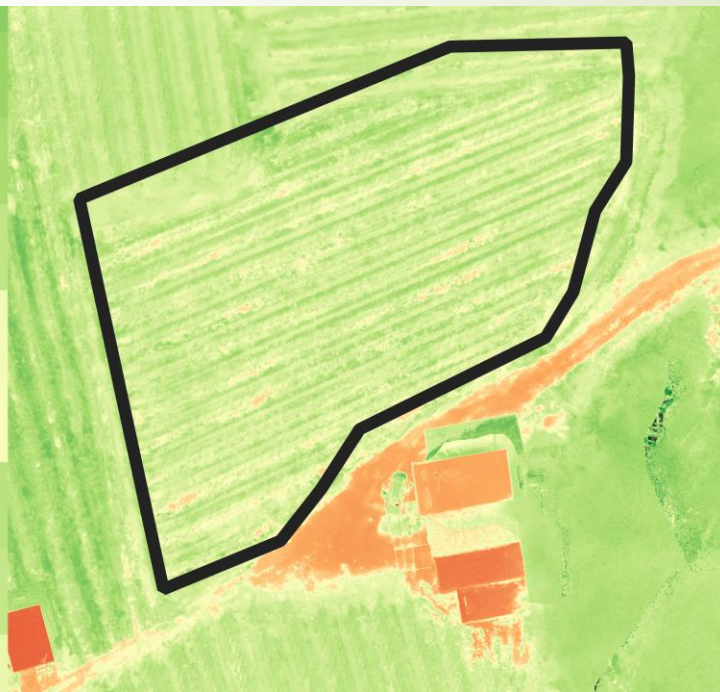


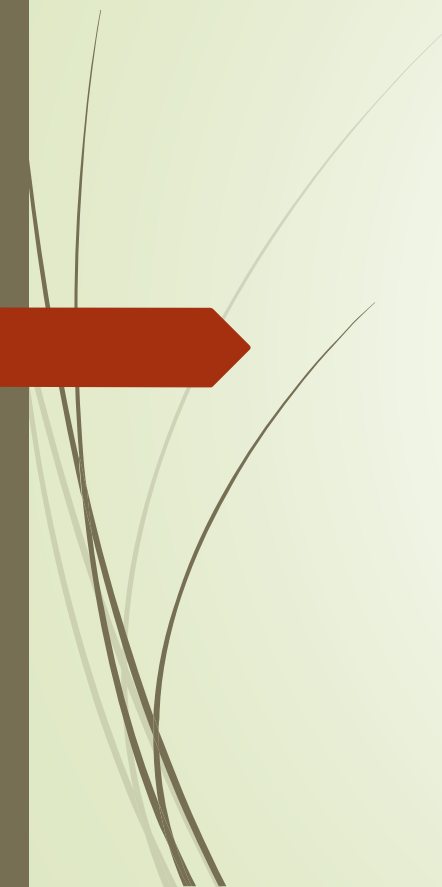
Παραδείγματα χαρτών NDVI

Sentinel 2 grid 10×10m



ΣμηΕΑ grid 7×7 cm





Ενότητα 3

Μετρήσεις Πεδίου

- Τηλεμετρία και σύννεφα αποθήκευσης δεδομένων
- Αισθητήρες υγρασίας εδάφους
- Ψηφιακοί μετρητές νερού



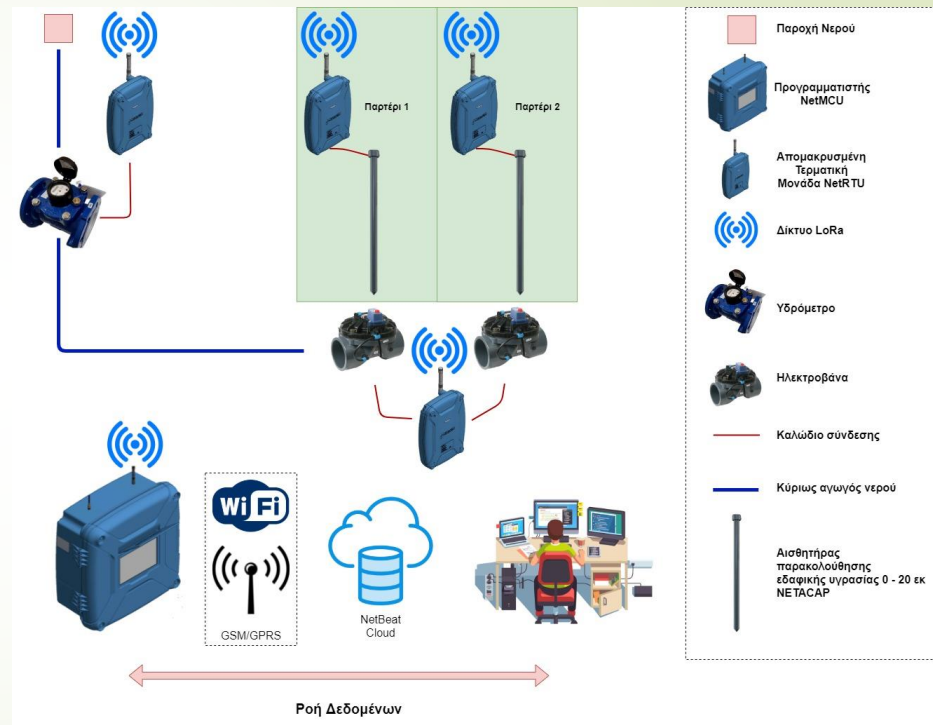


Τηλεμετρία και σύννεφα αποθήκευσης δεδομένων



Τηλεμετρία και νέφη αποθήκευσης δεδομένων (cloud)

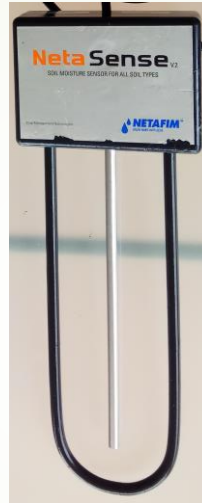
- Τα πρόσφατα επιτεύγματα στον τομέα των δικτύων επιτρέπουν σήμερα τη σχεδόν σε πραγματικό χρόνο παρακολούθηση των συνθηκών που επικρατούν στον αγρό.
- Τα συστήματα αυτά αποτελούνται συνήθως από:
- μία πύλη η οποία έχει τη δυνατότητα να αποστέλλει και να αποθηκεύει τα δεδομένα σε cloud
- τερματικές απομακρυσμένες μονάδες ελέγχου, οι οποίες επικοινωνούν με τη πύλη ασύρματα. Στις μονάδες αυτές συνδέονται ενσύρματα μια σειρά από αισθητήρες και όργανα (π.χ. αισθητήρες υγρασίας, αισθητήρες πίεσης, υδρόμετρα, ηλεκτροβάνες, κτλ.)
- νέφος δεδομένων, όπου τα δεδομένα αποθηκεύονται και είναι διαθέσιμα στους ενδιαφερόμενους μέσω έξυπνων συσκευών (H/Y, smartphones, tablets, κτλ.)
- Διαδικτυακές εφαρμογές ή εφαρμογές κινητών για την εύκολη πρόσβαση, επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων



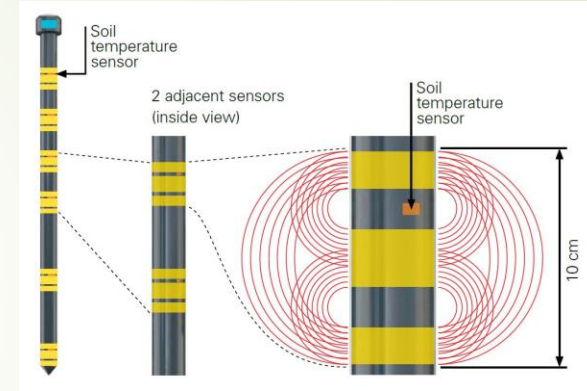
Αισθητήρες Υγρασίας Εδάφους



Αισθητήρες υγρασίας



Σημειακή Μέτρηση



Συστοιχία Αισθητήρων



Αισθητήρες υγρασίας

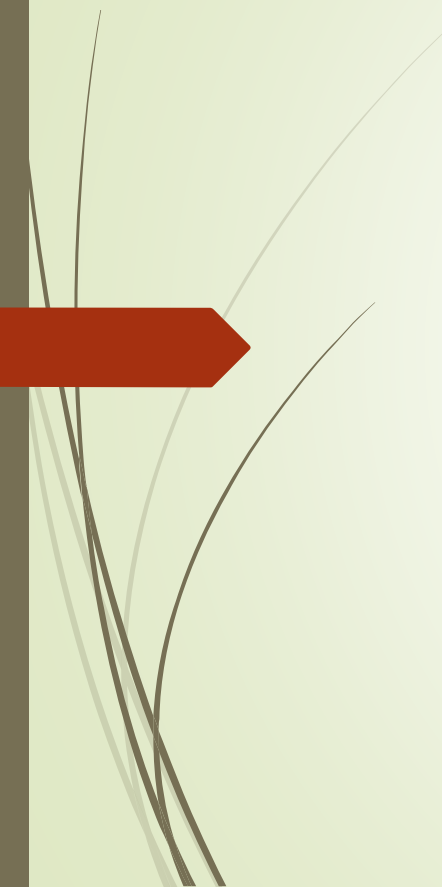


Ψηφιακοί Μετρητές Νερού



Υδρόμετρο σε αμπελώνες





Ενότητα 4

Άσκηση

- Επίλυση
ημερήσιου
ισοζυγίου



Άσκηση 1

- Σε αγρό που καλλιεργείτε με καλαμπόκι να βρεθεί η εξέλιξη της απώλειας υγρασίας στη ριζόσφαιρα για τις επόμενες 8 ημέρες.
- Έχει προηγηθεί γεγονός άρδευσης το οποίο έχει επαναφέρει **το διαθέσιμο νερό στην υδατο-ικανότητα**.
- Το **ενεργό ριζικό σύστημα** των φυτών του καλαμποκιού φτάνει τα **50 εκατοστά**.
- Το έδαφος παρουσιάζει στρωμάτωση στα **30 εκατοστά βάθος**, με το ανώτερο στρώμα να ταξινομείται ως **πηλός** και το κατώτερο ως **αμμώδης άργιλος**.
- Οι τιμές της υδατο-ικανότητας και του σημείου μάρανσης για τα δύο στρώματα είναι **FC: 25%, PWP: 11% και FC: 35%, PWP: 25%**, αντίστοιχα.
- Αντίστοιχα, οι τιμές της κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας για τον πηλό και των αμμώδη άργιλο δίνονται ίσες με **359 και 27 mm/d**



Άσκηση 1

○ Η πρόβλεψη του καιρού για τις επόμενες 8 ημέρες φαίνεται στον παρακάτω πίνακα

Ημέρες μετά την άρδευση	Ύψος Βροχής (mm)	Εξατμισοδιαπνοή (mm)
1	0	7.2
2	0	8.0
3	0	7.1
4	0	7.3
5	0	7.0
6	0	7.8
7	47.5	2.5
8	50	2.0



Ευχαριστώ πολύ!!!

