



# Προοπτικές ανάπτυξης αγροβολταϊκών συστημάτων και ανάλυση των αλληλεπιδράσεών τους με το πλέγμα νερού-τροφής-ενέργειας



Κατερίνα Ρωξάνη

Επιβλέπων Καθηγητής: Ανδρέας Ευστρατιάδης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Νοέμβριος, 2022



# Σημασία αγροβολταϊκών

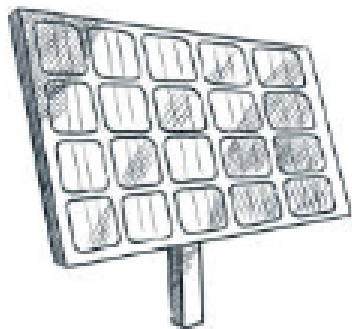
- Ανεξαρτητοποίηση της παραγωγής ενέργειας από τα ορυκτά καύσιμα
- Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) χαρακτηρίζονται από πυκνότητα ισχύος αρκετές τάξεις μεγέθους μικρότερη από τα ορυκτά καύσιμα
- Φωτοβολταϊκά πάρκα έχουν παρόμοιες εδαφικές απαιτήσεις με εδάφη για καλλιέργειες
- Αγροβολταϊκά: Λύση για ομαλή ανάπτυξη ενέργειας από φωτοβολταϊκά





## Αντικείμενο της εργασίας

- Διερεύνηση της απόδοσης αγροβολταϊκών συστημάτων ανάλογα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις καλλιέργειές τους.
- Επισκόπηση των τεχνολογιών που έχουν εφαρμοστεί σε αγροβολταϊκά.
- Παραμετρική ανάλυση συστήματος αγροβολταϊκών σε πεδιάδα της Αρτας.
- Υπολογισμός: -Μείωσης της ακτινοβολίας  
-Απόδοσης συστήματος (Φωτοβολταϊκών και καλλιεργειών)  
-Μείωσης της εξατμισοδιαπνοής και των αρδευτικών αναγκών των καλλιεργειών



# Αγροβολταϊκά

- Εκμετάλλευση μιας έκτασης γης για παραγωγή ενέργειας και καλλιεργειών ταυτόχρονα
- Βασικές τροποποιήσεις σε σχέση με τα κλασικά φωτοβολταϊκά πάρκα:
  - αύξηση του ύψους τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών
  - μείωση πυκνότητας τοποθέτησης ηλιακών πάνελ

Διατύπωση ιδέας από  
Goetzberge & Zastrow  
**1982**

Πρώτα αγροβολταϊκά  
στην Ευρώπη  
**2011**

~14GW εγκ.ισχύς  
**2021**

**2004**

Διαμόρφωση των πρώτων  
αγροβολταϊκών στην Ιαπωνία

**2015**

Πρώτο αγροβολταϊκό πάρκο  
μεγάλης κλίμακας (Κίνα)



# Ύψος

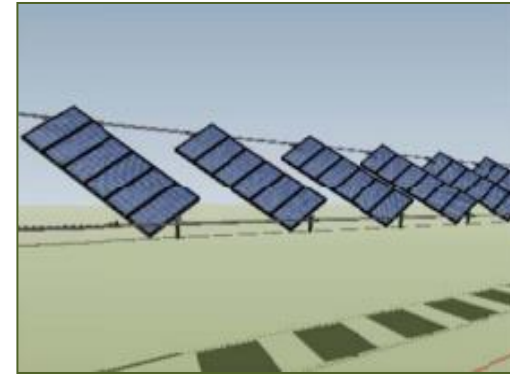
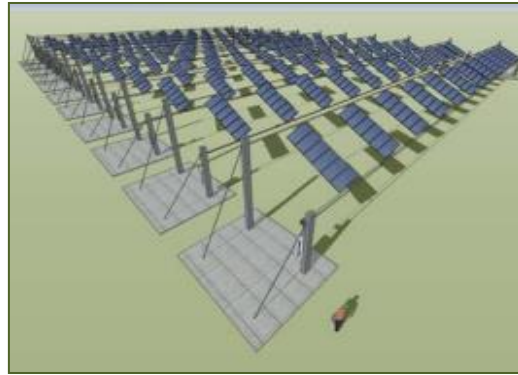
- Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών σε ύψος 4-5m.
- Επαρκές για την διέλευση των γεωργικών μηχανημάτων από κάτω.
- Κατάλληλο για καλλιέργειες μεγάλου ύψους: καλαμπόκι, σιτηρά, ζαχαροκάλαμο.
- Αύξηση ύψους → Αύξηση ομοιογένειας της ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος.





# Στύλοι στήριξης φωτοβολταϊκών

- Αραιή τοποθέτηση στύλων για διευκόλυνση των γεωργικών μηχανημάτων.
- Solar wings: Εκμετάλλευση καλωδίων για τοποθέτηση ηλιακών πάνελ. Απόσταση ενδιάμεσων θεμελίων 40m.  
(Baumgartner, 2008)
- Ειδική θεμελίωση με χαλύβδινες ράβδους μήκους 2-8m και διαμέτρου 1cm με στόχο την ελαχιστοποίηση της επέμβασης στο έδαφος.

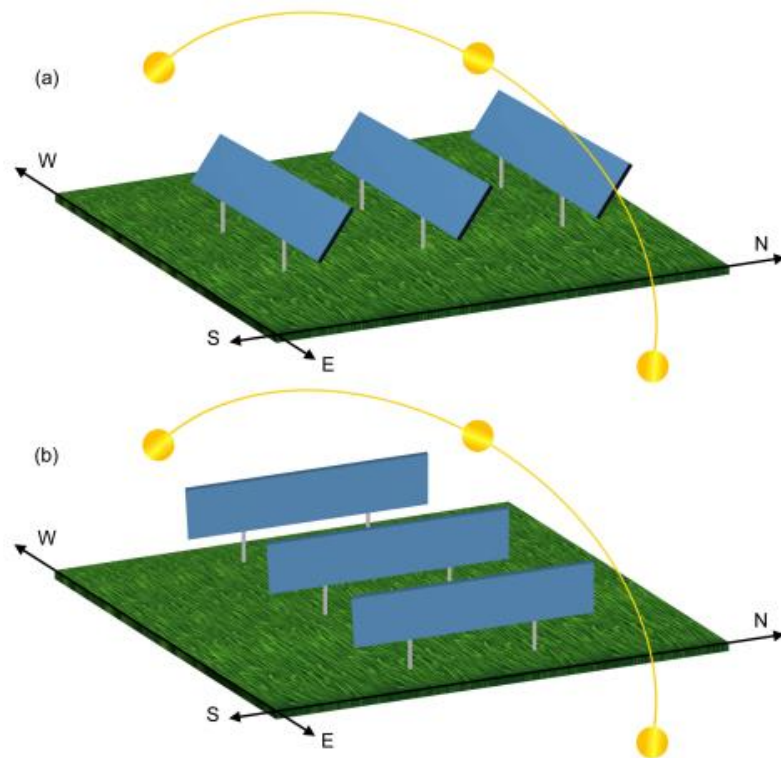






# Κλίση & Προσανατολισμός

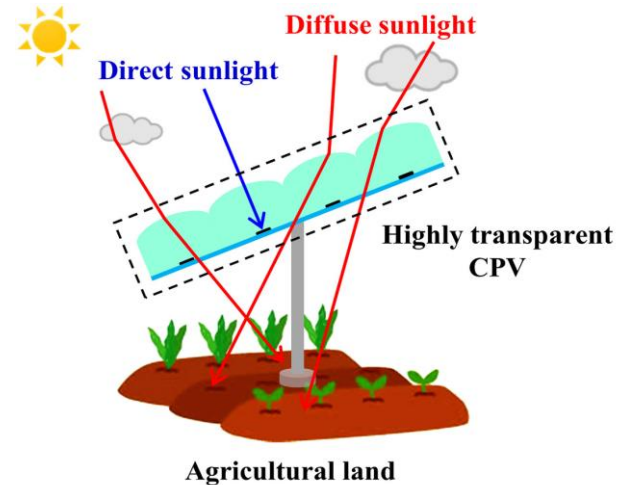
- Φωτοβολταϊκά σταθερής ή μεταβαλλόμενης κλίσης έχουν κατεύθυνση προς το Νότο. Για πιο ομοιογενή κατανομή ακτινοβολίας στο έδαφος προτείνεται στροφή 30°. (Trommsdorff, 2021)
- Κάθετα φωτοβολταϊκά, διπλής όψης έχουν προσανατολισμό Ανατολή-Δύση.
- Για αραιή τοποθέτηση των σειρών φωτοβολταϊκών πιο αποδοτικό είναι το σύστημα για κάθετα ΦΒ ενώ για πυκνή τα σταθερής κλίσης. (Younas et al., 2019)





# Εναλλακτικές τεχνολογίες φωτοβολταϊκών μονάδων

- **Ημιδιαφανή φωτοβολταϊκά πυριτίου:**  
Μέρος της ακτινοβολίας διαπερνάει το πάνελ και επομένως καταλήγει περισσότερη και πιο ομοιόμορφη ακτινοβολία στις καλλιέργειες.
- **Οργανικά φωτοβολταϊκά:**  
Επιλέγουν συγκεκριμένα μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας για να παράγουν ενέργεια και τα υπόλοιπα τα αφήνουν να τα διαπεράσουν.
- **Συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά:**  
Χρησιμοποιούν φακούς ή κάτροπτρα για την συγκέντρωση της ακτινοβολίας→μείωση επιφάνειας φωτοβολταϊκών που απαιτείται για παραγωγή δεδομένου ποσού ισχύος.







# Καλλιέργειες στα αγροβολταϊκά

## Κατάλληλες καλλιέργειες:

- Φυτά που είναι ανθεκτικά σε χαμηλή ακτινοβολία (φυλλώδη λαχανικά, ρίζες, βότανα κ.α)
- Δυνατότητα επιλογής οποιασδήποτε καλλιέργειας εφόσον το ποσοστό μείωσης της ακτινοβολίας ρυθμίζεται κατά την κατασκευή και μπορεί να είναι πολύ μικρό
- Αμπέλι
- Οπωροβολταϊκά (φωτοβολταϊκά σε οπωρόνες)

## Συμπεριφορά καλλιεργειών:

- Τεχνική προσαρμογής στη μειωμένη ακτινοβολία → αύξηση επιφάνειας των φύλλων τους
- Μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος σε κλίμα ξηρό, άνυδρο με υψηλές θερμοκρασίες
- Σταθερή απόδοση ανά τα χρόνια ανεξάρτητα από τις μεταβολές του κλίματος
- Μείωση της εξατμισοδιπνοής επομένως μείωση των αρδευτικών αναγκών





# Μελέτη περίπτωσης

Υπολογισμός μείωσης ακτινοβολίας

Διαφορετικές διαμορφώσεις του αγροβολταϊκού συστήματος

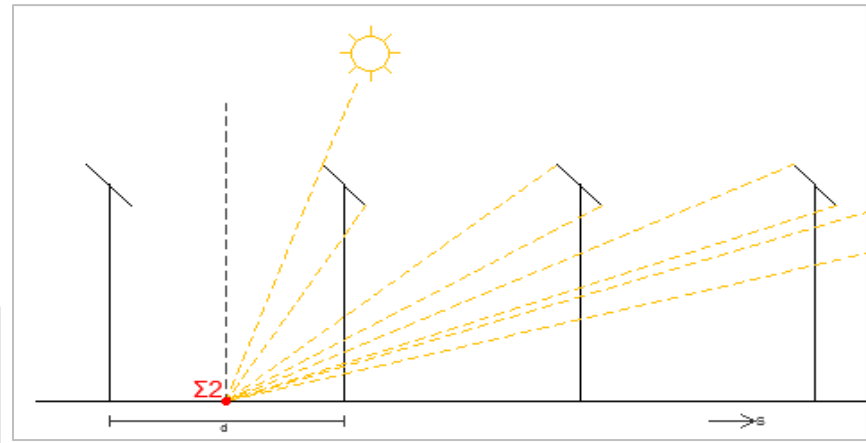
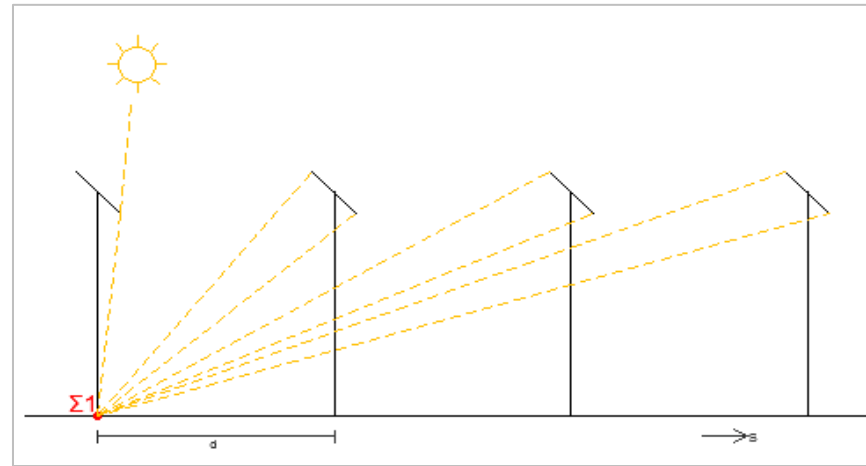
Παραγωγή ενέργειας

Απόδοση καλλιεργειών

Αρδευτικές Ανάγκες



Μελέτη σε πεδιάδα της Άρτας, δεδομένα από σταθμό της περιοχής Κωστακιοί





# Υπολογισμός μείωσης ακτινοβολίας

Για κάθε γωνία ύψους του ηλίου υπολογίζεται η ακτινοβολία που λαμβάνουν τα σημεία Σ1 και Σ2 στο αγροβολταϊκό σύστημα:

- Εάν το φωτοβολταϊκό παρεμβάλλεται ανάμεσα σε σημείο του εδάφους και τον ήλιο

$$S_{o\lambda} = S_{\Delta I A X Y T H} \quad [W/m^2]$$

- Εάν το φωτοβολταϊκό δεν παρεμβάλλεται ανάμεσα στο σημείο και τον ήλιο:

$$S_{o\lambda} = S_{A M E C H} + S_{\Delta I A X Y T H} \quad [W/m^2]$$

$$\rightarrow S_{\Delta I A X Y T H} = 0,25 * S_o \quad [W/m^2]$$

$$\rightarrow S_{A M E C H} = 0,5 * \frac{n}{N} * S_o \quad [W/m^2]$$

Εξωγήνη ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας

$$S_o = I * dr * (\sin\delta * \sin\varphi) + (\cos\delta * \cos\varphi * \cos\omega)$$

- I: Ηλιακή σταθερά 1367 W/m<sup>2</sup>
- dr: Εκκεντρότητα του ηλίου που εξαρτάται από τη μέρα του έτους
- δ,φ,ω: ηλιακή απόκλιση, γεωγραφικό πλάτος, ωριαία γωνία ηλίου

Σχετική ηλιοφάνεια (Angström, 1956)

$$\frac{n}{N} = 0,5 * \left( \frac{S_{obs}}{S_o} - 0,25 \right)$$

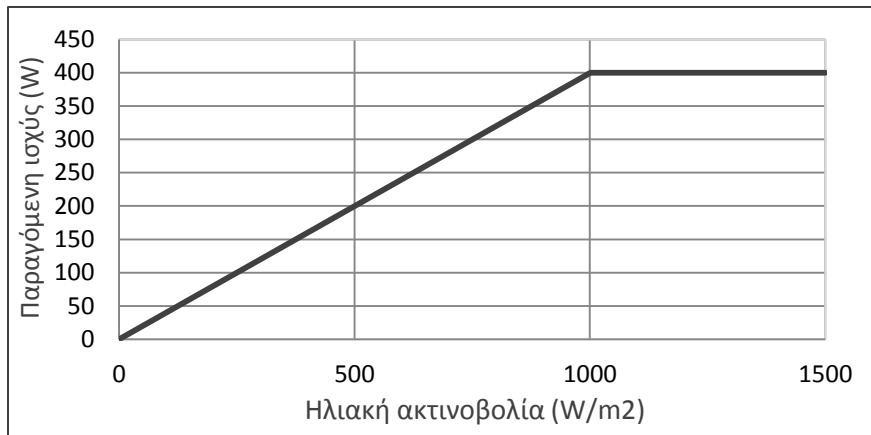
- S<sub>obs</sub>: Ωριαία τιμή ακτινοβολίας, δίνεται από τις μετρήσεις του σταθμού



# Υπολογισμός ηλεκτρικής ενέργειας

## Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκών

SunPower Maxeon 3 SPR-MAX3-400	Μονοκρυσταλλικό
Μέγιστη Ισχύς (W)	400
Βαθμός απόδοσης (%)	22,6
Διαστάσεις (m)	1,69
	1,046
Θερμοκρασίες λειτουργίας	-40°C έως +85°C
Θερμοκρασιακός συντελεστής ισχύος	-0,29%/°C
Κλίση (°)	40



Απόσταση συστοιχιών ΦΒ d(m)	Αριθμός ΦΒ/στρέμμα	Λόγος επιφάνειας πανελ ανα στρέμμα
1,345	276	0,37
3	156	0,21
4	123	0,17
5	102	0,14
6	87	0,12
8	67	0,09
10	55	0,07



# Υπολογισμός απόδοσης καλλιεργειών

## Απόδοση καλλιεργειών : (Gnosse et al, 1986)

$$DM = RUE * PAR_{\alpha}$$

- $PAR_{\alpha}$ : Ακτινοβολία για παραγωγή βιομάζας ( $MJ/m^2$ )
- DM: Ξηρή Ουσία ( $g/m^2$ )
- RUE: Αποδοτικότητα Χρήσης Ακτινοβολίας

### Φωτοσυνθετικά ενεργός ακτινοβολία

$$PAR = a * S_{o\lambda}$$

- $a \sim 0,5$  (Campillo et al., 2012)

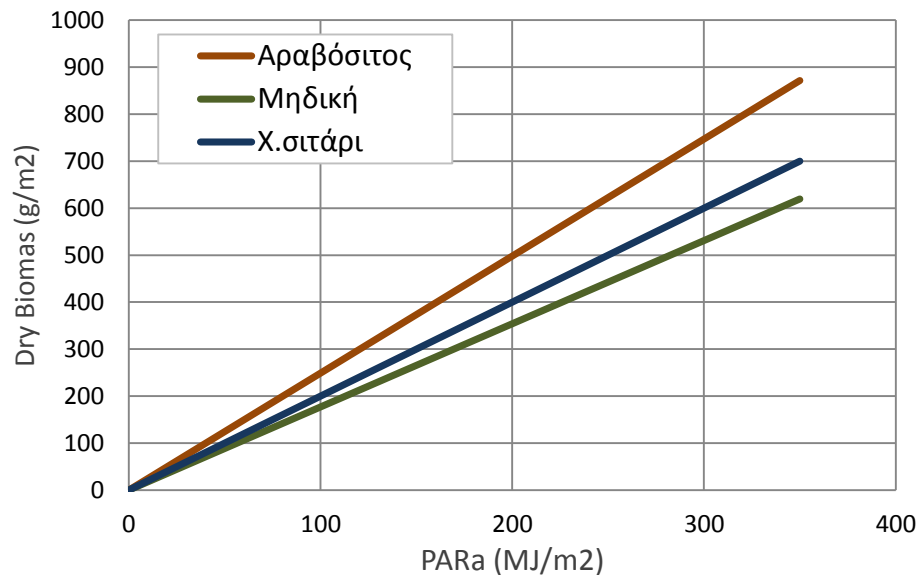
### Ακτινοβολία που αξιοποιείται για βιομάζα

$$PAR_{\alpha} = c * PAR$$

- $c \sim 0,1$  (Campillo et al., 2012)

## Καλλιέργειες που μελετήθηκαν

	RUE	Περίοδος ανάπτυξης
Αραβόσιτος	2,49	10/4-10/9
Χειμερινό σιτάρι	2	15/10 - 1/6
Μηδική	1,77	Ετήσια καλλιέργεια



# Υπολογισμός αρδευτικών αναγκών

## Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ET

$$ET = K_{\phi} * ET_r$$

- $K_{\phi}$ : Φυτικός συντελεστής
- $ET_r$ : Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς

Κφ		
Αραβόσπιος		
1ο στάδιο	25 μέρες	0,45
2ο στάδιο	40 μέρες	0,7
3ο στάδιο	60 μέρες	1,05
4ο στάδιο	25 μέρες	0,6
Μηδική		
Σταθερός καθ'ολη την ανάπτυξη		0,85

## Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς ET<sub>r</sub>

(Penman-Monteith)

$$ET_r = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma'} * \left( \frac{Rn}{\lambda} \right) + \left( \frac{\gamma}{\gamma' + \Delta} \right) * F(u) * D$$

- $\Delta$ : Κλίση καμπύλης πίεσης κορεσμού υδρατμών
- $\gamma, \gamma'$ : Ψυχομετρικοί συντελεστές
- $\lambda$ : Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης
- $F(u)$ : Συνάρτηση ανέμου
- $D$ : Έλλειμα κορεσμού
- **$Rn = L_n - S_n$**

**Ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας**

$L_n$ : Καθαρή ακτινοβολία μακρών κυμάτων

$$L_n = \varepsilon_n * f_L * \sigma * (T + 273)^4$$

- $\varepsilon_n$ : Καθαρή ικανότητα εκπομπής
- $f_L$ : Συντ. επίδρασης της νέφωσης
- $\sigma$ : Σταθ. Νόμου θερμικής εκπομπής μελανού σώματος
- $T$ : Θερμοκρασία

$S_n$ : Ακτινοβολία στο έδαφος μετά την ανάκλαση

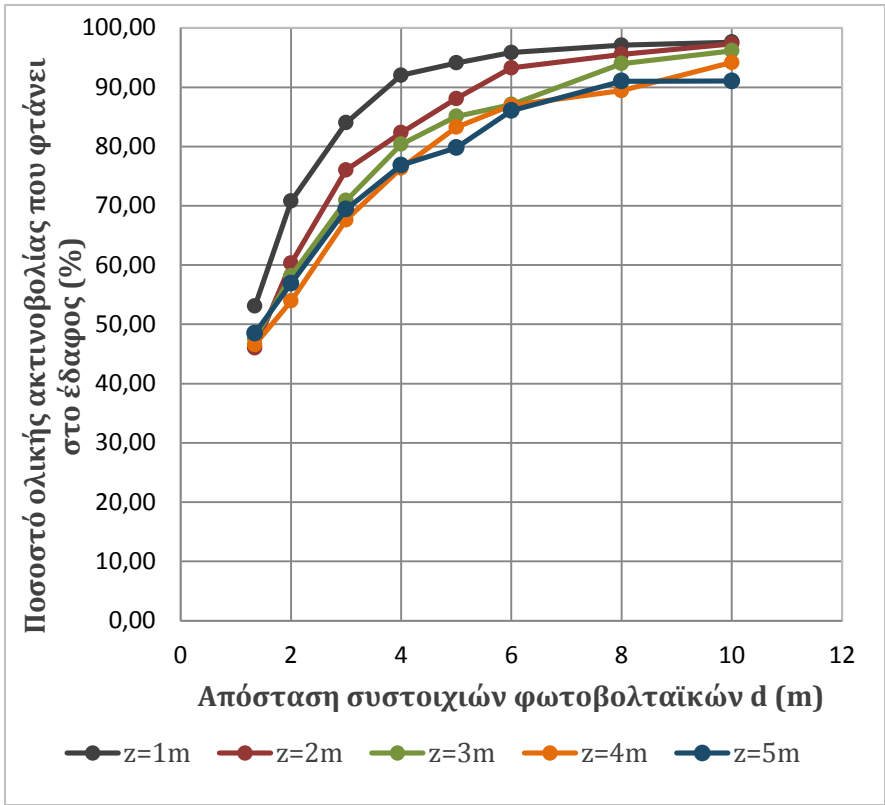
$$S_n = (1 - a) * f_s * S_o$$

- $f_s$ : Συντελεστής απορρόφησης ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα
- $a$ : Λευκαύγεια, ανακλαστικότητα του εδάφους  
Για καλλιέργειες  $a=0,25$

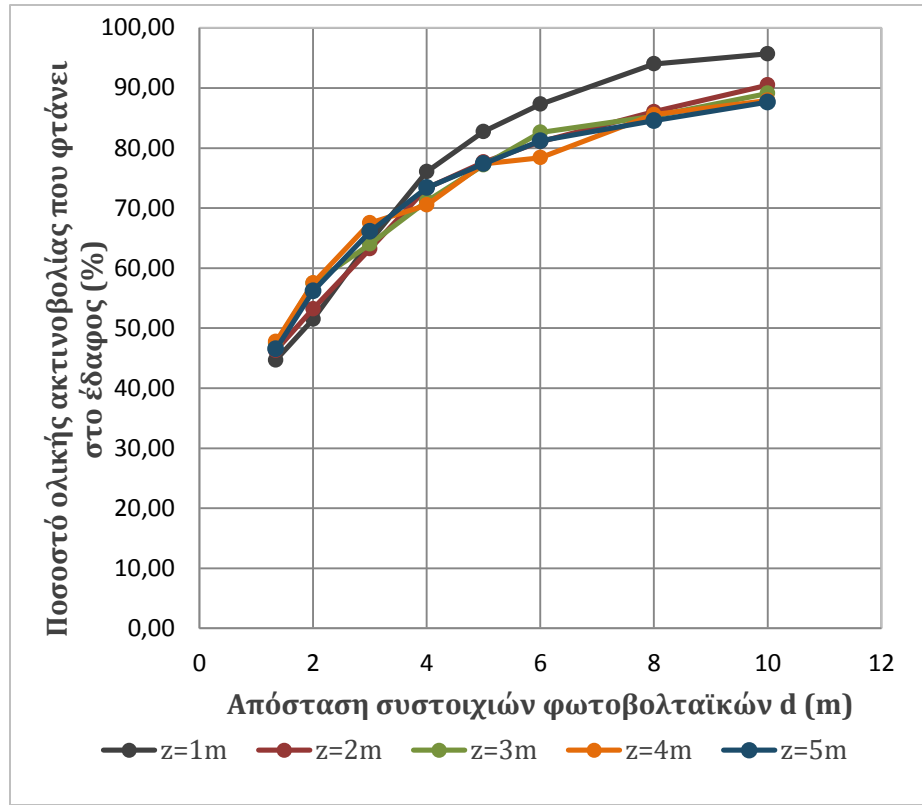




# Μείωση ακτινοβολίας: Ανάλογα με το ύψος & πυκνότητα των ΦΒ



Σημείο 1

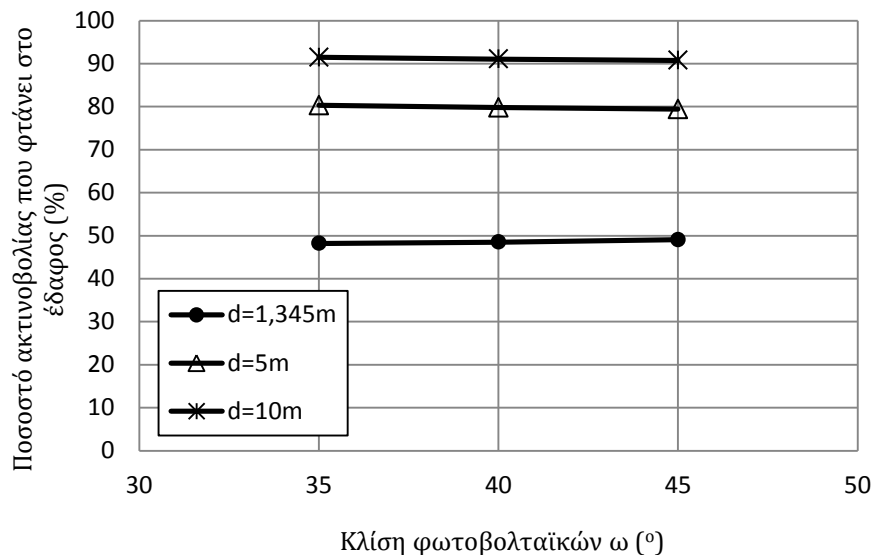


Σημείο 2

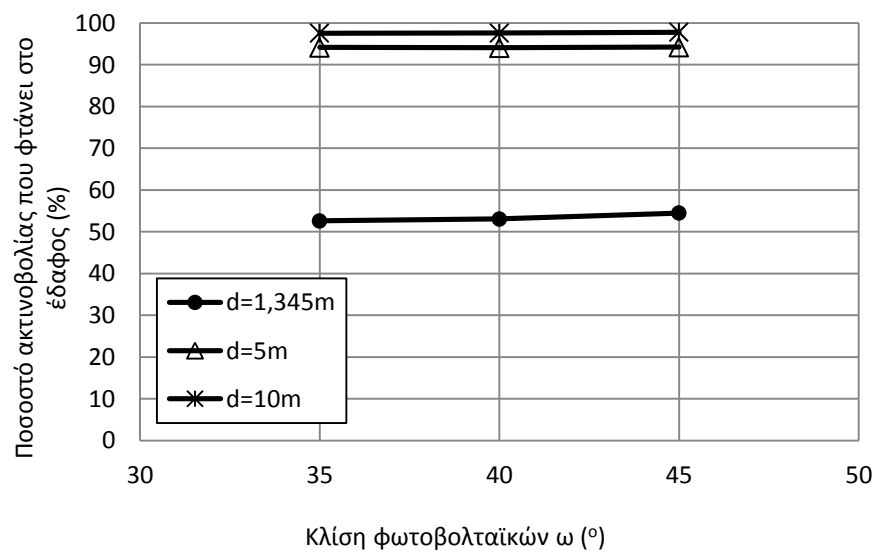


# Μείωση ακτινοβολίας: Ανάλογα με την κλίση των ΦΒ

Ύψος φωτοβολταϊκών  $z=5\text{m}$



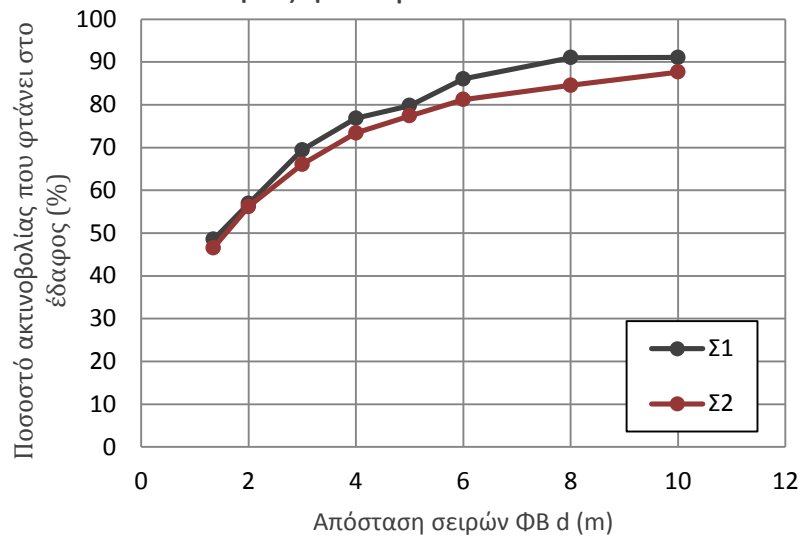
Ύψος φωτοβολταϊκών  $z=1\text{m}$



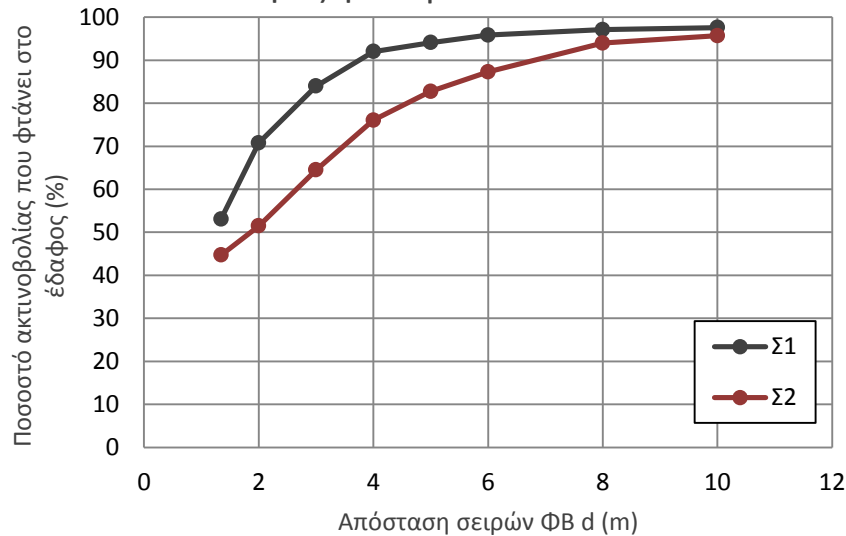


# Ομοιομορφία ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος

## Ύψος φωτοβολταϊκών z=5m



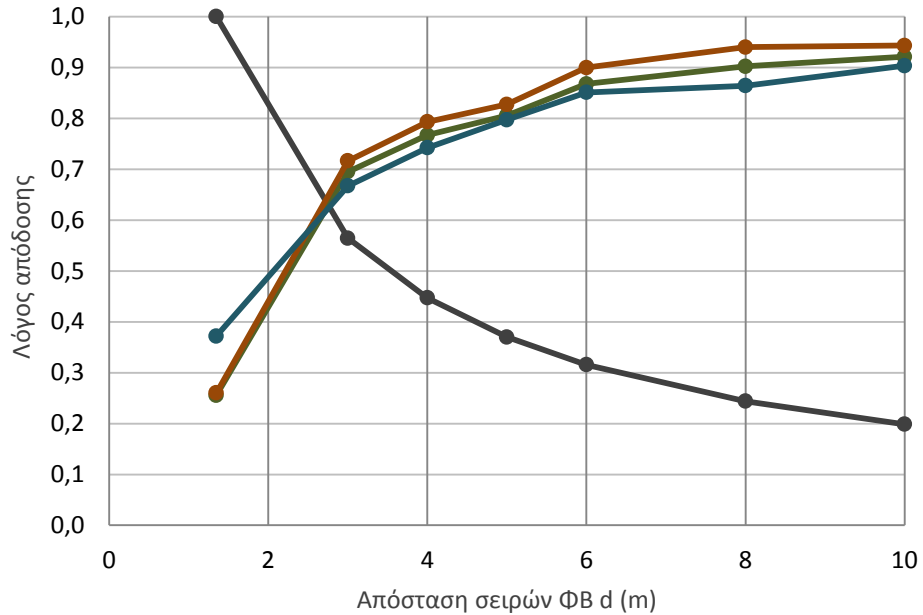
## Ύψος φωτοβολταϊκών z=1m





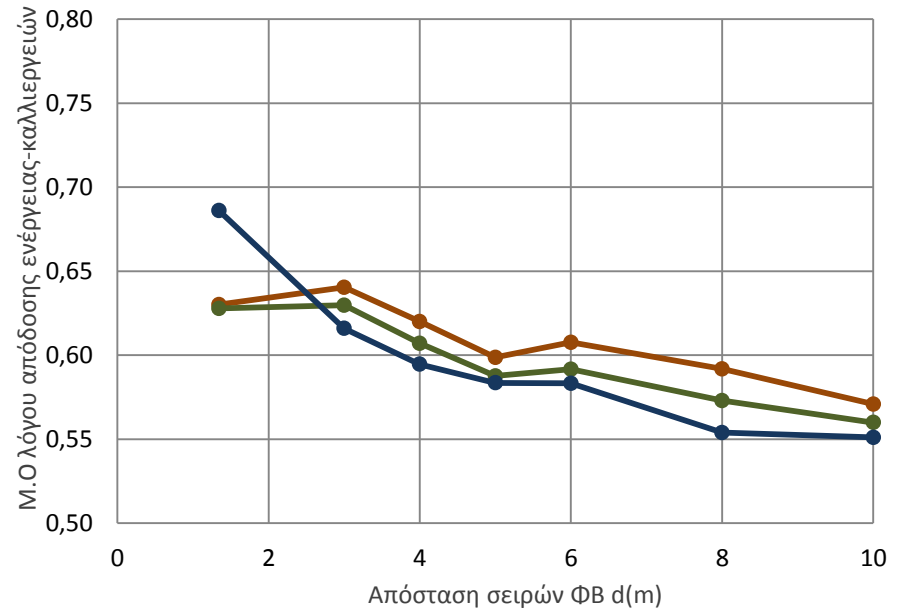
# Απόδοση αγροβολταϊκού συστήματος

## Λόγος απόδοσης φωτοβολταϊκών & καλλιεργειών



- Λόγος απόδοσης ενέργειας
- Λόγος απόδοσης μηδικής
- Λόγος απόδοσης Αραβόσιτου
- Λόγος απόδοσης Χ.σιταριού

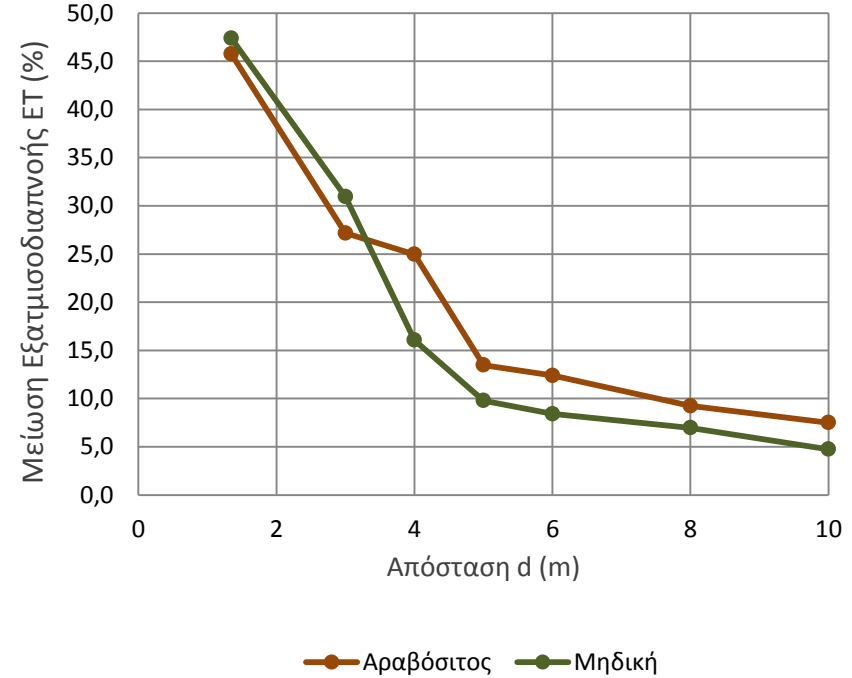
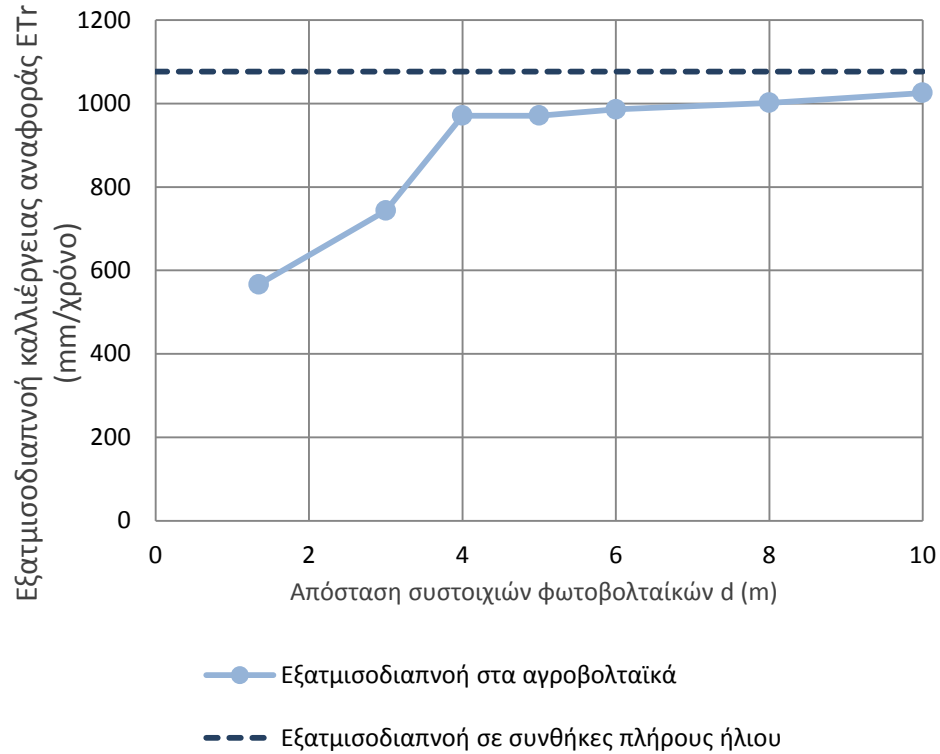
## Μ.Ο λόγων απόδοσης ΦΒ & καλλιεργειών



- Αραβόσιτος
- Μηδική
- Χειμερινό σιτάρι



# Αρδευτικές ανάγκες





## Συμπεράσματα

- Καθοριστικός παράγοντας μείωσης της ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος είναι η πυκνότητα τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών.
- Το ύψος των φωτοβολταϊκών παίζει σημαντικό ρόλο στην ομοιομορφία της ακτινοβολίας που φτάνει στις καλλιέργειες.
- Για τοποθέτηση φωτοβολταϊκών σε αποστάσεις αντίστοιχες ενός κλασικού φωτοβολταϊκού πάρκου οι καλλιέργειες χάνουν περισσότερο από το 60% της βιομάζας τους.
- Η μέγιστη απόδοση του συστήματος παρατηρείται για διαφορετική απόσταση συστοιχιών σε κάθε καλλιέργεια.





## Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

- Οικονομική ανάλυση του αγροβολταϊκού συστήματος
- Μελέτη της επίδρασης των αγροβολταϊκών και σε άλλες παραμέτρους του μικροκλίματος πέρα από την ακτινοβολία
- Δοκιμή αγροβολταϊκών για καλλιέργειες ειδικού ενδιαφέροντος για την Ελλάδα (π.χ ελιά)



Ευχαριστώ πολύ για την προσοχή σας...

