Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

Η Έννοια της Αποκεντρωμένης Παραγωγής Φωτοβολταϊκής Ενέργειας στην Ελλάδα και η Επίδραση της Θερμοκρασίας: Διερεύνηση με Χρήση της Βάσης Δεδομένων PVGIS

Δημήτριος Χατζόπουλος

Επιβλέπων: Ανδρέας Ευστρατιάδης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2024

Εισαγωγή – Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας

- Η εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας οδηγούν σε ένα καλύτερο και πιο βιώσιμο μέλλον.

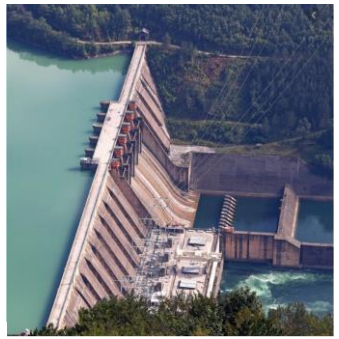
Μορφές Ανανεώσιμης Ενέργειας:

- Αιολική Ενέργεια

- Βιομάζα

- Γεωθερμική Ενέργεια

- Υδροηλεκτρική Ενέργεια



- Ενέργεια από τη Θάλασσα

- Ηλιακή Ενέργεια

Εισαγωγή – Ηλιακή Ενέργεια

Η Ελλάδα είναι ανάγκη να αξιοποιήσει την ηλιακή ενέργεια διότι:

- Είναι η αφθονότερη σε σύγκριση με όλες τις υπόλοιπες μορφές ενέργειας
- Το κόστος κατασκευής των φωτοβολταϊκών πάνελ έχει πέσει δραματικά την τελευταία δεκαετία.
- Η Ελλάδα είναι μια χώρα με άφθονη ηλιοφάνεια

Ωστόσο η παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας χαρακτηρίζεται από **αβεβαιότητα** λόγω παραγόντων με έντονη χωρική μεταβλητότητα όπως:

Μετεωρολογικές συνθήκες

Τοπογραφία

Αιωρούμενα σωματίδια

Υγρασία

Εισαγωγή – Στόχος της Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι:

- Να αποδειχθεί ότι τα αποκεντρωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα, σε αντίθεση με τα συγκεντρωτικά, είναι ικανά να μειώσουν αυτή την αβεβαιότητα.

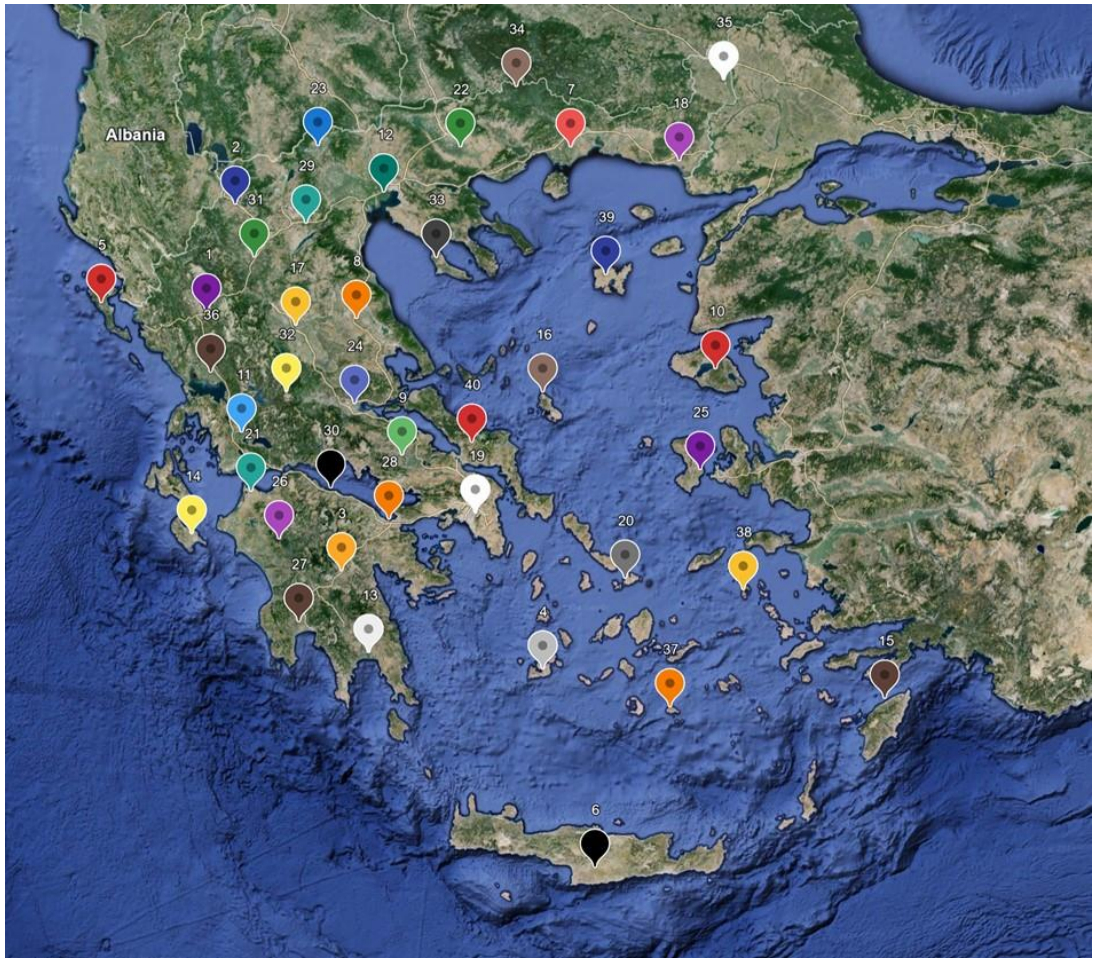
Απαραίτητη προϋπόθεση

Διερεύνηση της επίδρασης της χωρικής μεταβλητότητας της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας στη παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας στη χώρα.

Συλλογή Δεδομένων

Για την επίτευξη των στόχων

Συλλέχθηκαν δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας για 40 αντιπροσωπευτικές τοποθεσίες από όλη την Ελλάδα.



<u>Γεωγραφικά διαμερίσματα της Ελλάδας</u>

Θράκη: 2 σημεία
Μακεδονία: 9 σημεία
Ήπειρος: 2 σημεία
Θεσσαλία: 2 σημεία
Στερεά Ελλάδα: 6 σημεία
Πελοπόννησος: 7 σημεία
Νησιά Αιγαίου Πελάγους: 9 σημεία
Επτάνησα: 2 σημεία
Κρήτη: 1 σημείο

Μελέτη Δεδομένων

- Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από την διαδικτυακή βάση δεδομένων **PVGIS**
- Αποτελούν **δορυφορικά** δεδομένα
- Συλλέχθηκαν σε **ωριαία κλίμακα**
- Περίοδος στην οποία αναφέρονται ⟶ **2005-2020**
- Δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας ⟶ σε **W/m²**
- Δεδομένα θερμοκρασίας ⟶ σε **°C**

Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία

Γεωγραφικό Διαμέρισμα	Μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία (W/m^2)
Μακεδονία	181.90
Θράκη	183.35
Ήπειρος	189.04
Θεσσαλία	188.40
Στερεά Ελλάδα	191.74
Επτάνησα	199.05
Πελοπόννησος	202.92
Νήσοι Αιγαίου Πελάγους	206.91
Κρήτη	219.50

Θερμοκρασία

Γεωγραφικό Διαμέρισμα	Μέση ετήσια θερμοκρασία (°C)
Μακεδονία	14.41
Θράκη	14.72
Ήπειρος	14.37
Θεσσαλία	16.18
Στερεά Ελλάδα	16.02
Επτάνησα	17.83
Πελοπόννησος	15.77
Νήσοι Αιγαίου Πελάγους	18.03
Κρήτη	18.28

Επικύρωση Δεδομένων – Οι 3 Επίγειοι Σταθμοί

Απαραίτητη διαδικασία για την αξιοπιστία της εργασίας → Επικύρωση των δεδομένων από την βάση δεδομένων PVGIS

- Η επικύρωση των δεδομένων θα γίνει αξιοποιώντας 3 επίγειους σταθμούς της χώρας

1) <u>Ζωγράφου</u>

Μέσα στον χώρο του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

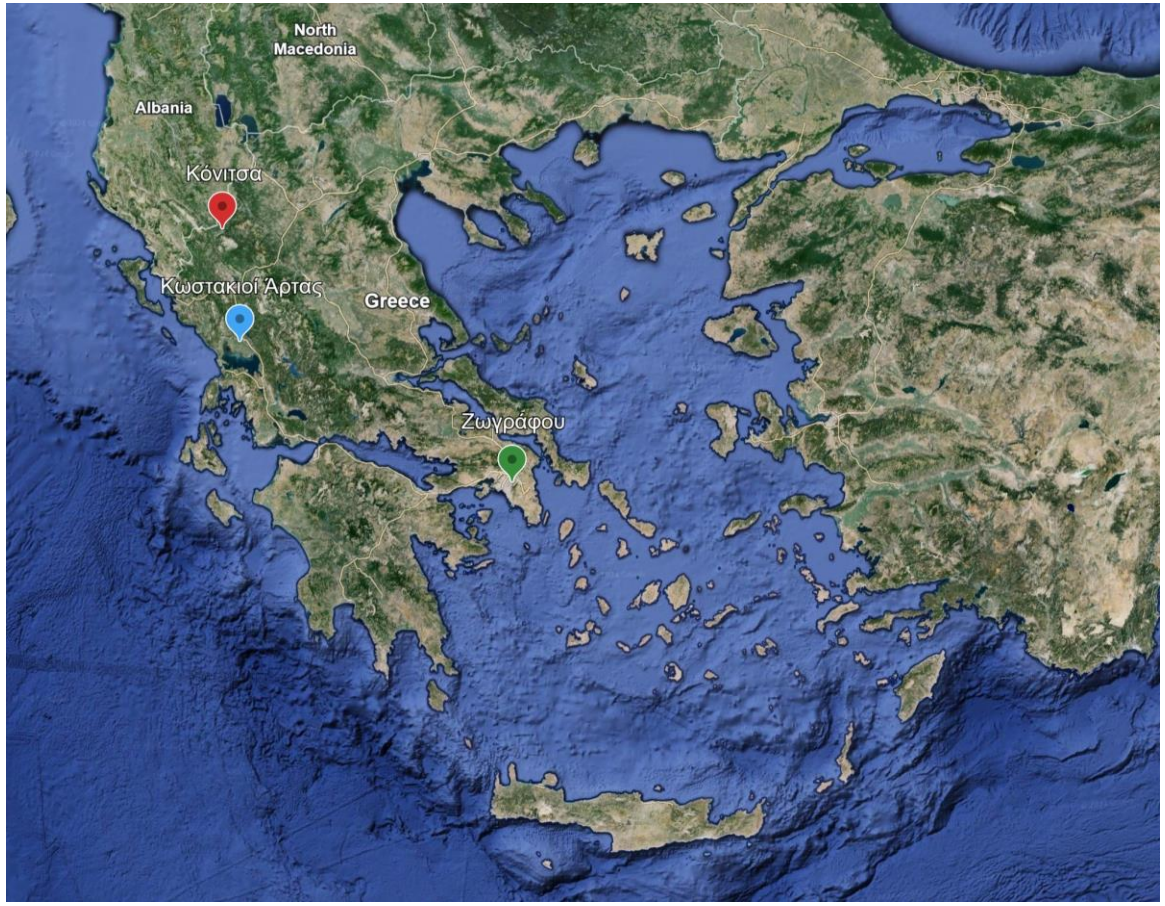
2) <u>Κόνιτσα</u>

Κοντά στην Κωμόπολη της Κόνιτσας της Ηπείρου

3) <u>Κωστακιοί Άρτας</u>

Μέσα στον χώρο του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων (στο τμήμα Γεωπονίας)

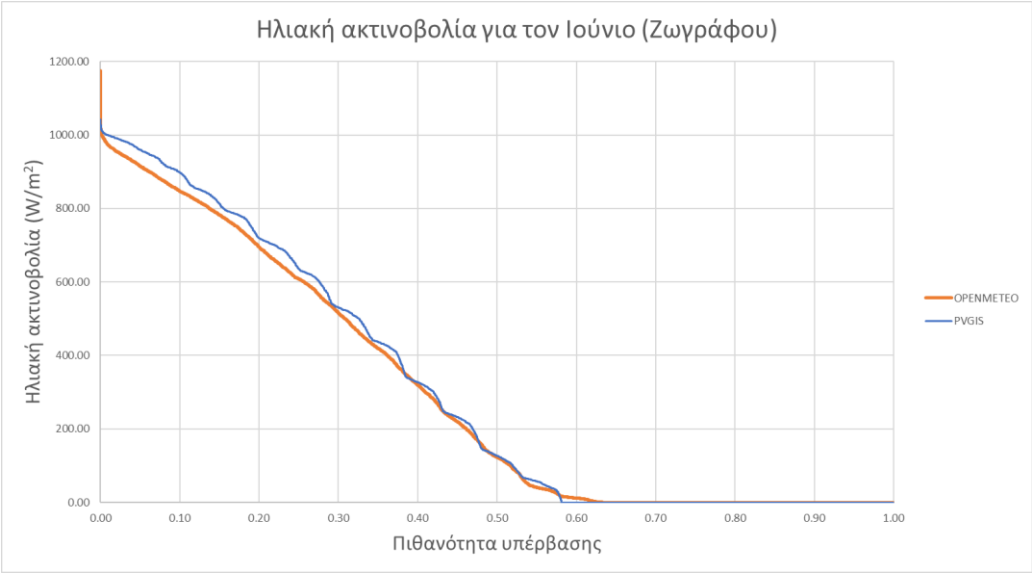
- Η συλλογή των δεδομένων από τους σταθμούς έγινε μέσω της ιστοσελίδας openmeteo.org

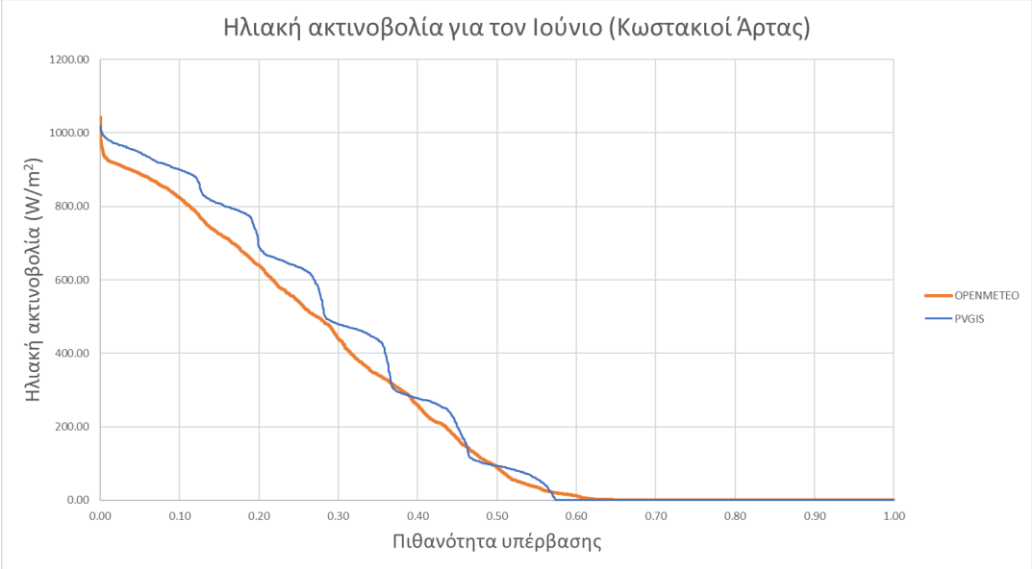


Επικύρωση Δεδομένων Ηλιακής Ακτινοβολίας (1)

Τα δεδομένα από την βάση δεδομένων PVGIS ακολουθούν την ίδια στατιστική συμπεριφορά με τα δεδομένα των επίγειων σταθμών;

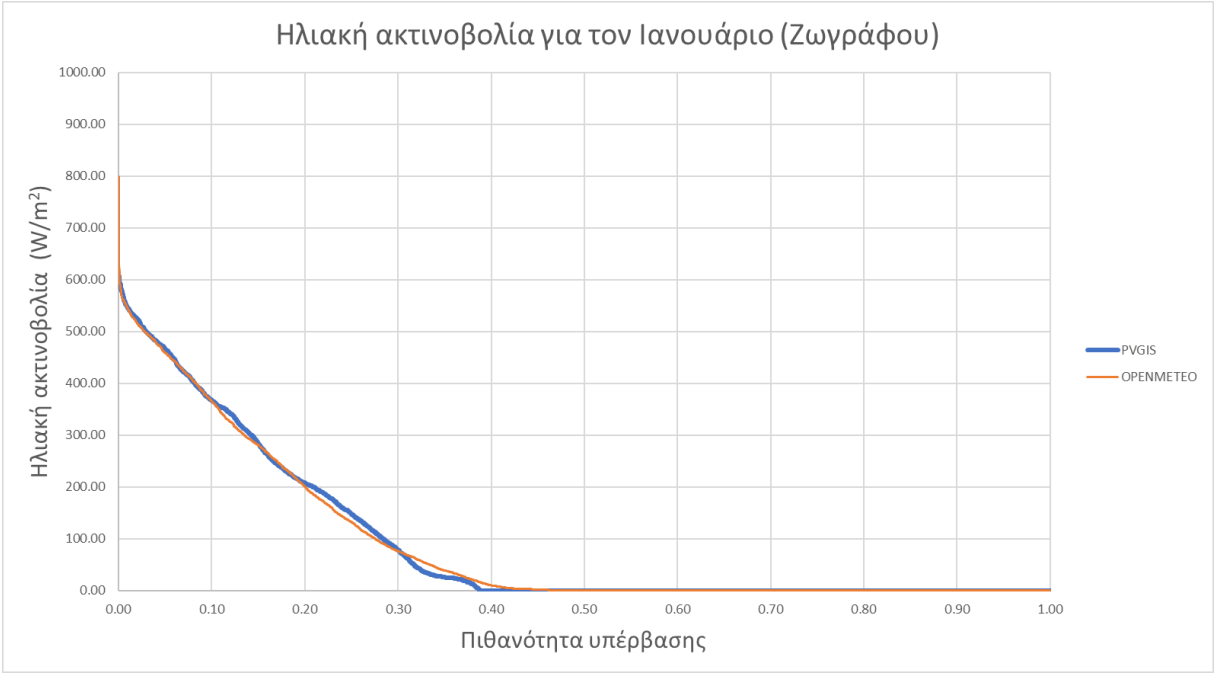
Μέσα σε έναν αντιπροσωπευτικό μήνα του καλοκαιριού:

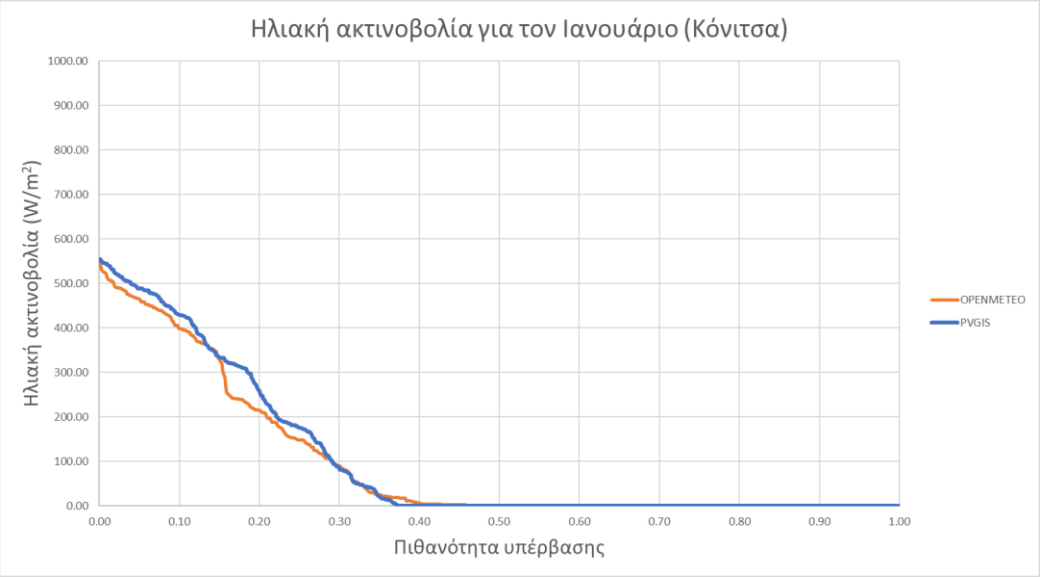


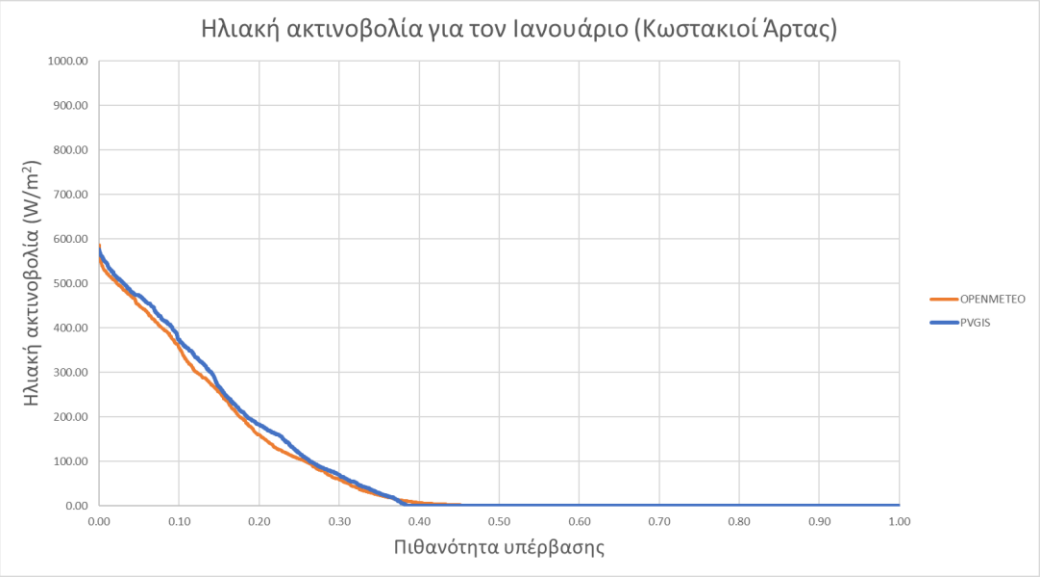


Επικύρωση Δεδομένων Ηλιακής Ακτινοβολίας (2)

Μέσα σε έναν αντιπροσωπευτικό μήνα του χειμώνα:







Επικύρωση Δεδομένων Ηλιακής Ακτινοβολίας (3)

Η πλατφόρμα PVGIS δεν παρέχει δεδομένα για **μεμονωμένα σημεία** αλλά για συγκεκριμένα **κελία πλέγματος**.

Άρα, αν αποδειχθεί πως υπάρχει ένας **γραμμικός συνδυασμός** που συνδέει τις 4 γειτονικές χρονοσειρές δεδομένων του σημείου ενδιαφέροντος με στόχο τη παραγωγή μιας ξεχωριστής χρονοσειράς με παρόμοιο στατιστικό «προφίλ» με αυτό των πραγματικών δεδομένων;

Σχέση:

$$X_i = X_{1i}W_1 + X_{2i}W_2 + X_{3i}W_3 + X_{4i}W_4$$

Σταθμισμένα βάρη

Τιμές γειτονικών χρονοσειρών

Τιμές βελτιωμένης χρονοσειράς

Επικύρωση Δεδομένων Ηλιακής Ακτινοβολίας (4)

Κόνιτσα

W1	0.28
W2	0.09
W3	0.63
W4	0.00

Δείκτης προσαρμογής (KGE): 0.947

W1	0.00
W2	0.00
W3	1.00
W4	0.00

Δείκτης προσαρμογής (KGE): 0.892

Αν παίρναμε τη χρονοσειρά για το σημείο που βρίσκεται ο σταθμός;

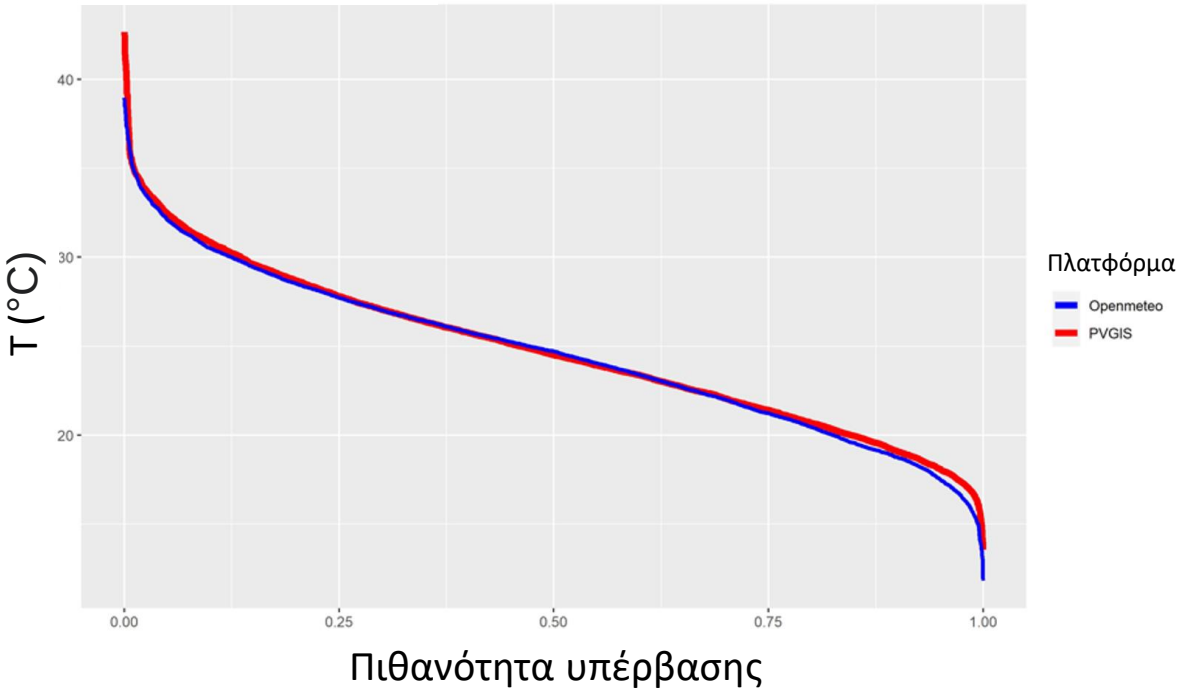
Δείκτης προσαρμογής (KGE): 0.879

Σε κάθε περίπτωση τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας από τη πλατφόρμα PVGIS είναι έγκυρα και καλύπτουν ένα μεγάλο κενό τέτοιου τύπου δεδομένων στην Ελλάδα.

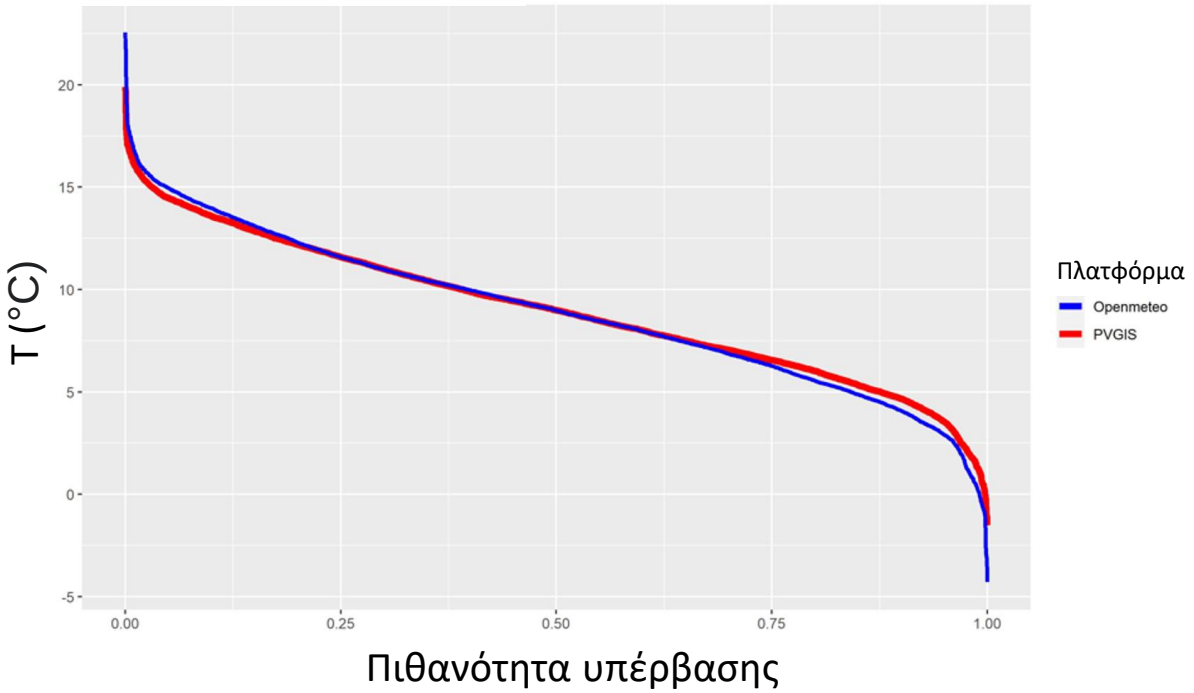
Επικύρωση Δεδομένων Θερμοκρασίας

Σύγκριση των δεδομένων **θερμοκρασίας** από τη πλατφόρμα PVGIS με τα δεδομένα από τον σταθμό στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο:

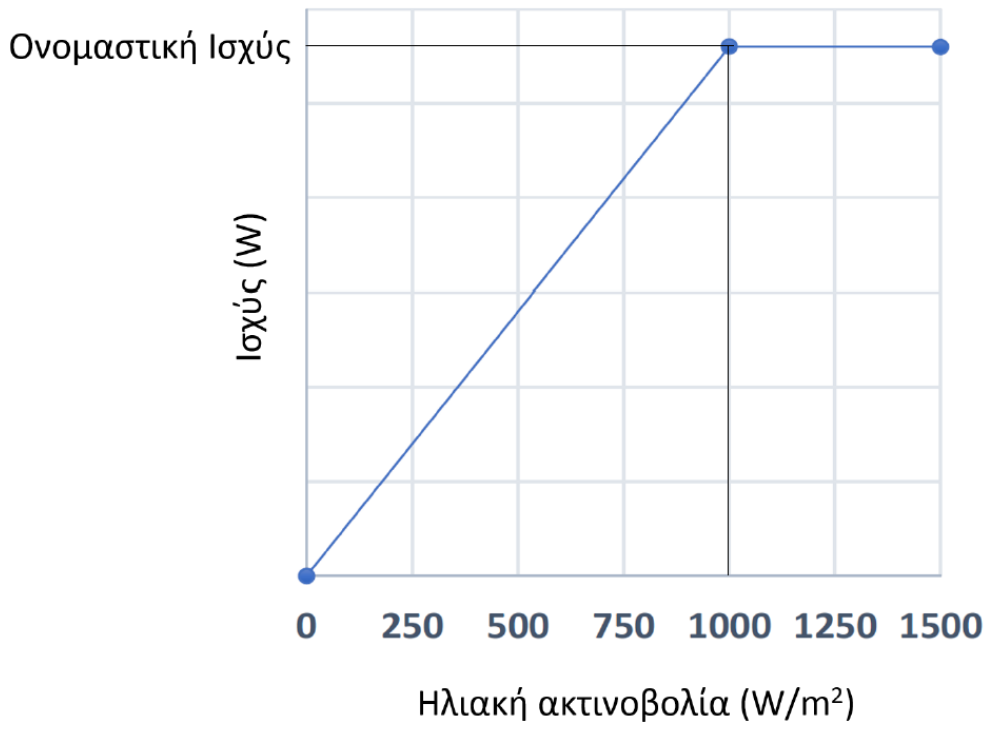
Μήνας: Ιούνιος



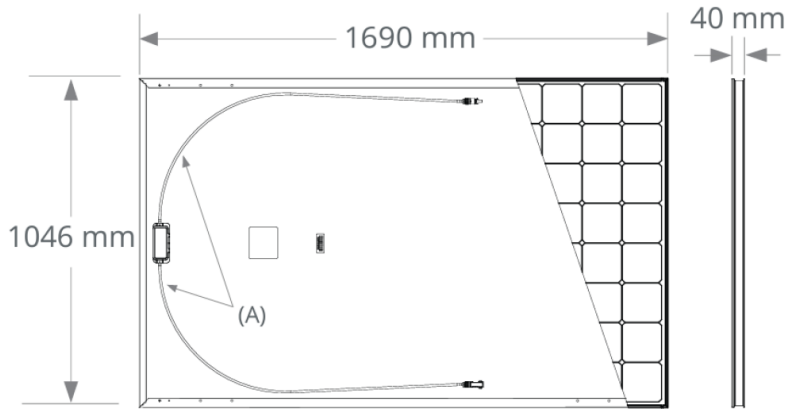
Μήνας: Ιανουάριος



Παραγωγή Ενέργειας από ένα Σύγχρονο Φωτοβολταϊκό Πάνελ



Το πάνελ SunPower Maxeon 3



Τα χαρακτηριστικά του πάνελ

Εμβαδόν (m^2)	1.77
Ονομαστική Ισχύς P_{nom} (W)	400
Ονομαστικός Βαθμός Απόδοσης n_{nom}	22.6%

Παραγόμενη ισχύς = Προσφερόμενη ισχύς x Βαθμός απόδοσης

Όμως

Ο βαθμός απόδοσης μειώνεται όταν η θερμοκρασία είναι πάνω από 25 °C

Το Μοντέλο στην R για τον Υπολογισμό της Παραγωγής

Υποθέτοντας την ύπαρξη ενός πάνελ SunPower Maxeon 3 σε κάθε τοποθεσία, θα υπολογιστεί η παραγωγής ενέργειας σε κάθε μια από αυτές. Η διαδικασία θα πραγματοποιηθεί για 3 θερμοκρασιακούς συντελεστές: **0, -0.2%/ °C και -0.4%/°C**.

```r
file_names<-c("shmeio_1_iwannina_hourly_data.xlsx","shmeio_2_kastoria_hourly_data.xlsx",
    "shmeio_3_tripolh_hourly_data.xlsx",
    "shmeio_4_mhlos_hourly_data.xlsx","shmeio_5_kerkura_hourly_data.xlsx","shmeio_6_krhth_hourly_data.xlsx",
    "shmeio_7_kabala-januh_hourly_data.xlsx","shmeio_8_larisa_hourly_data.xlsx","shmeio_9_leibadia_hourly_data.xlsx",
    "shmeio_10_lesbos_hourly_data.xlsx","shmeio_11_agrinio_hourly_data.xlsx","shmeio_12_uessalonikh_hourly_data.xlsx",
    "shmeio_13_guueio_hourly_data.xlsx","shmeio_14_zakunuos_hourly_data.xlsx","shmeio_15_rodos_hourly_data.xlsx",
    "shmeio_16_skuros_hourly_data.xlsx","shmeio_17_trikala_hourly_data.xlsx","shmeio_18_ebros_hourly_data.xlsx",
    "shmeio_19_auhna_hourly_data.xlsx","shmeio_20_mukonos_hourly_data.xlsx","shmeio_21_patra_hourly_data.xlsx",
    "shmeio_22_serres_hourly_data.xlsx","shmeio_23_aridaia_hourly_data.xlsx","shmeio_24_lamia_hourly_data.xlsx",
    "shmeio_25_xios_hourly_data.xlsx","shmeio_26_olumpia_hourly_data.xlsx","shmeio_27_kalamata_hourly_data.xlsx",
    "shmeio_28_korinuos_hourly_data.xlsx","shmeio_29_kozanh_hourly_data.xlsx","shmeio_30_diakopto_hourly_data.xlsx",
    "shmeio_31_grebena_hourly_data.xlsx","shmeio_32_karpenhsi_hourly_data.xlsx",
    "shmeio_33_xalkidikh_hourly_data.xlsx",
    "shmeio_34_sunora_boulgarias_hourly_data.xlsx","shmeio_35_orestiada_hourly_data.xlsx",
    "shmeio_36_arta_hourly_data.xlsx",
    "shmeio_37_anafh_hourly_data.xlsx","shmeio_38_patmos_hourly_data.xlsx","shmeio_39_lhmnos_hourly_data.xlsx",
    "shmeio_40_euboia_hourly_data.xlsx")
data<-list()
for (file in file_names) {
  data[[file]] <- read_excel(file)
}
shmeia<-40
n<-matrix(0,nrow=nrow(data[[1]]),ncol=shmeia)
area<-1.69*1.046 #(1690X1046 mm)
onomastikh_isxys<-400 #(W)
onomastikh_apodosh<-onomastikh_isxys/(1000*area)
temp.coeff<-0.4/100
Energeia<-matrix(0,nrow=nrow(data[[1]]),ncol=shmeia)
for (i in 1:shmeia){
for (k in 1:nrow(data[[1]])){
n[k,i]<-min(onomastikh_apodosh,onomastikh_apodosh-temp.coeff*(data[[i]]$T2m[k]-25))
Energeia[k,i]=n[k,i]/onomastikh_apodosh*min(data[[i]]$`G(i)`[k]*area*onomastikh_apodosh,onomastikh_isxys)
}
}
```

Διαδικασία ανάγνωσης δεδομένων

Τεχνικά χαρακτηριστικά του πάνελ

Υπολογισμός πραγματικού βαθμού απόδοσης και ωριαίας παραγόμενης ενέργειας

Αποτελέσματα Παραγωγής Φωτοβολταϊκής ενέργειας

Στη Παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας παρατηρείται το ίδιο μοτίβο με τη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία:

Ετήσια Παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας (KWh)			
	a=0	a=0.2%	a=0.4%
Μακεδονία	637.80	630.63	623.45
Θράκη	642.91	633.04	623.18
Ήπειρος	662.84	654.45	646.05
Θεσσαλία	660.60	646.45	632.31
Στερεά Ελλάδα	672.28	661.14	650.01
Επτάνησα	697.96	695.92	693.88
Πελοπόννησος	711.46	701.25	691.04
Νήσοι Αιγαίου Πελάγους	725.47	722.52	719.58
Κρήτη	769.45	756.14	742.82

Η Επίδραση της Θερμοκρασίας (1)

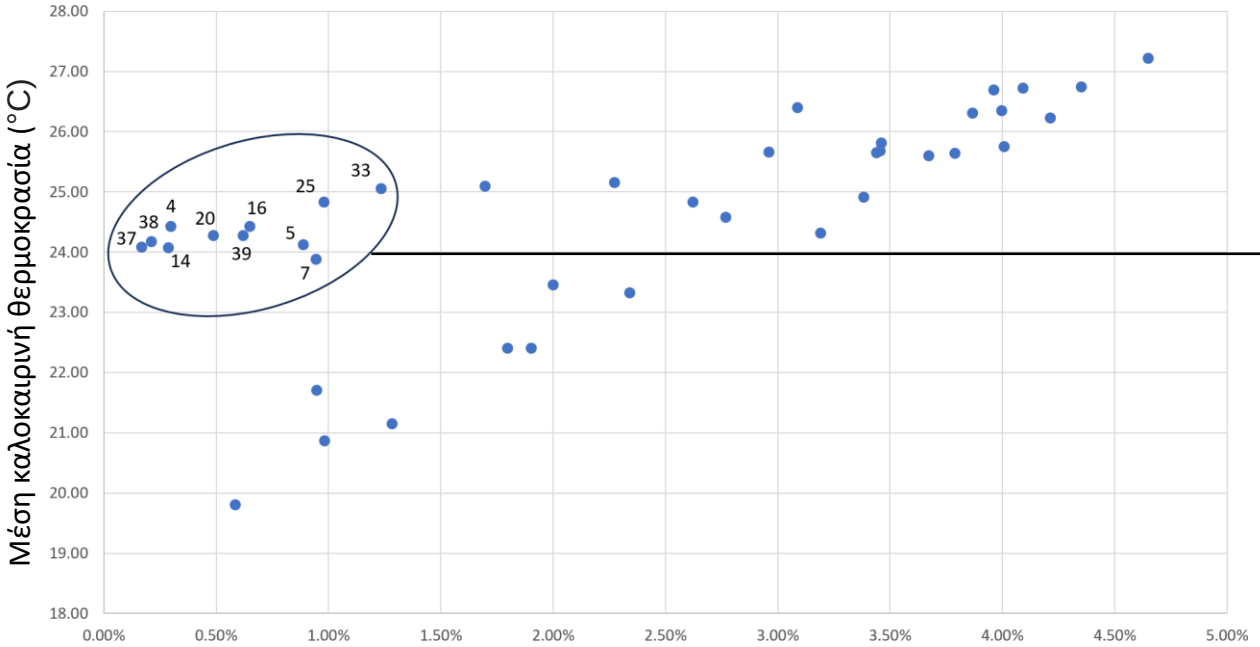
Το λογικό είναι η περισσότερη ενέργεια να παράγεται στη Κρήτη όπου προσπίπτει και η περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία σωστά;

Όντως, για θερμοκρασιακούς συντελεστές **0 και -0.2%/ °C** η **περισσότερη ενέργεια** κατά μέσο όρο ετησίως παράγεται στην **ενδοχώρα της Κρήτης** (769.45 KWh και 756.14 KWh αντίστοιχα)

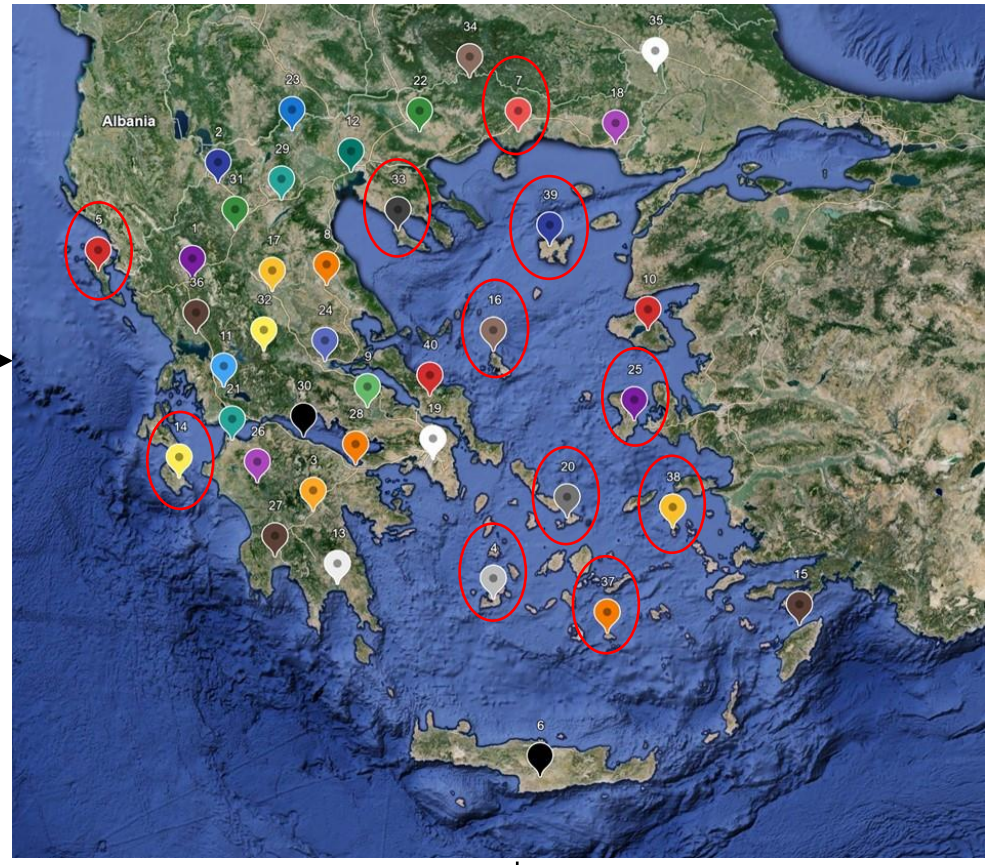
Όμως με αύξηση του θερμοκρασιακού συντελεστή στο **-0.4%/ °C** η **περισσότερη ενέργεια** παράγεται πλέον στην **Ανάφη** (751.06 KWh παράγονται στην Ανάφη έναντι 742.82 KWh που παράγονται πλέον στην Κρήτη). Γιατί συμβαίνει αυτό;

Τοποθεσία	Μέση Καλοκαιρινή θερμοκρασία (°C)
Ιωάννινα	21.15
Καστοριά	22.40
Τρίπολη	22.40
Μήλος	24.43
Κέρκυρα	24.12
Κρήτη	25.81
Καβάλα	23.88
Λάρισα	26.74
Λειβαδιά	25.75
Λέσβος	25.16
Αγρίνιο	25.68
Θεσσαλονίκη	26.39
Γύθειο	25.64
Ζάκυνθος	24.07
Ρόδος	25.10
Σκύρος	24.43
Τρίκαλα	26.22
Έβρος	24.58
Αθήνα	26.69
Μύκονος	24.28
Πάτρα	25.65
Σέρρες	26.72
Αριδαία	26.35
Λαμία	27.22
Χίος	24.83
Ολυμπία	24.32
Καλαμάτα	26.31
Κόρινθος	25.66
Κοζάνη	23.45
Διακοπτό	21.71
Γρεβενά	23.32
Καρπενήσι	20.87
Χαλκιδική	25.06
Σύνορα Βουλγαρίας	19.80
Ορεστιάδα	24.91
Άρτα	25.59
Ανάφη	24.08
Πάτμος	24.17
Λήμνος	24.27
Εύβοια	24.83

Η Επίδραση της Θερμοκρασίας (2)



Ποσοστό μείωσης της παραγωγής λόγω αύξησης του θερμοκρασιακού συντελεστή από 0 σε -0.4%



Η Αξία των Αποκεντρωμένων Φωτοβολταϊκών Συστημάτων – Η Μέθοδος Monte Carlo

Τελικά τα αποκεντρωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα μειώνουν την αβεβαιότητα στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας;

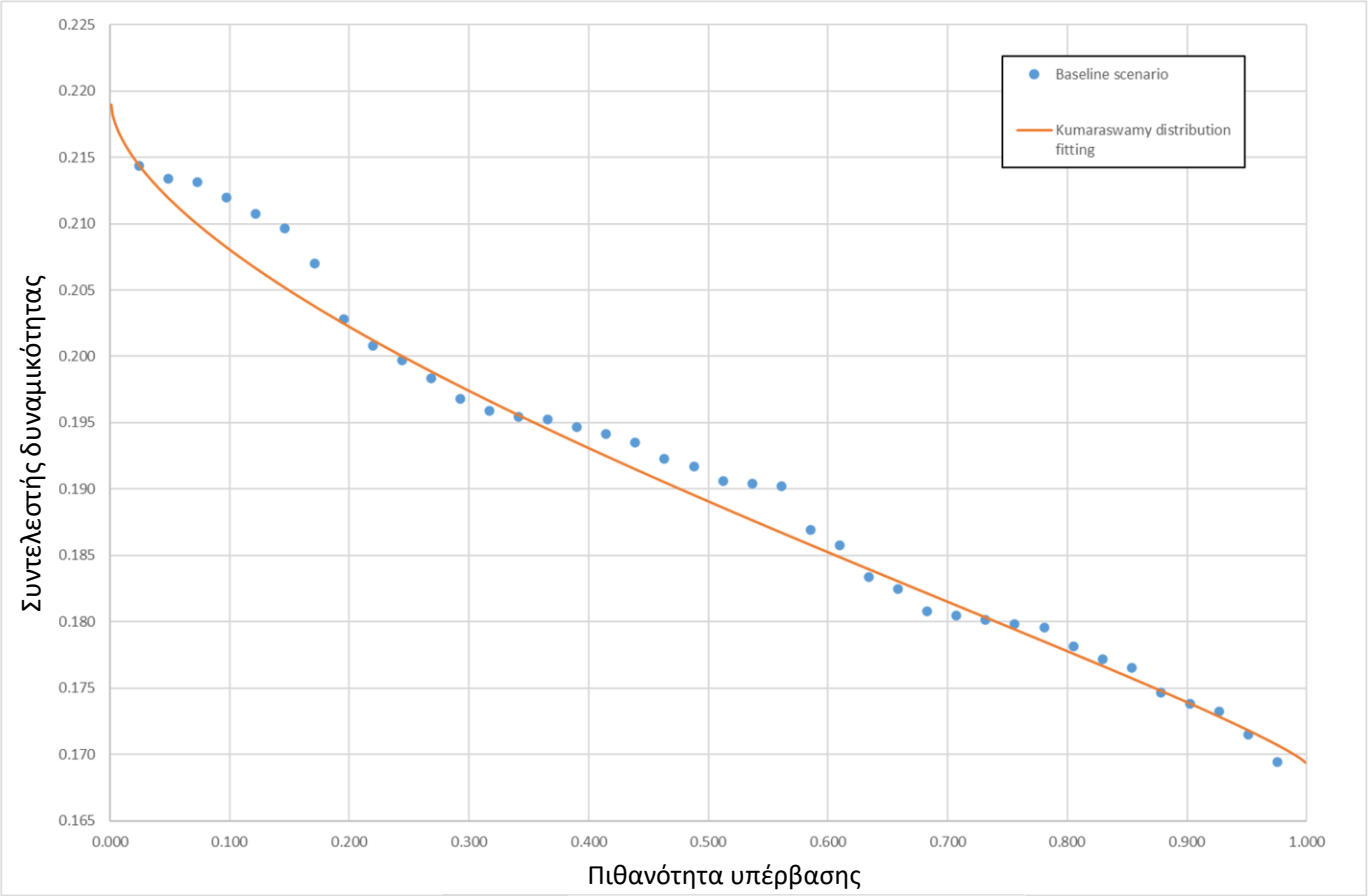
Το πρόβλημα προσεγγίστηκε μέσω μίας ανάλυσης τύπου Monte Carlo :

Εξετάστηκαν 40 σενάρια:

- **Στο πρώτο σενάριο** (Βασικό σενάριο) μελετήθηκαν **συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά συστήματα** και υπολογίστηκε ο συντελεστής δυναμικότητας τους.
- **Στα επόμενα 38 σενάρια** μελετήθηκαν **αποκεντρωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα** που εκτείνονται σε τυχαίους συνδυασμούς τοποθεσιών.
- **Στο τελευταίο σενάριο** (40ο σενάριο) μελετήθηκε το **αποκεντρωμένο φωτοβολταϊκό** σύστημα που εκτείνεται και στις 40 τοποθεσίες

```
sunolikh_mesh_ethsia_paragwgh_energeias<-0
cf2<-matrix(0,nrow = 1000,ncol=shmeia-2)
for (k in 2:shmeia-1){
  for (n in 1:1000){
  i <- sample(1:shmeia, k)
  for (r in 1:k){
  sunolikh_mesh_ethsia_paragwgh_energeias<-mesh_ethsia_paragwgh_energeias[i[r]]+sunolikh_mesh_ethsia_paragwgh_energeias
  }
 cf2[n,k-1]<-sunolikh_mesh_ethsia_paragwgh_energeias/(k*onomastikh_isxys*24*365)
 sunolikh_mesh_ethsia_paragwgh_energeias<-0
  }
}
```

Το Βασικό Σενάριο

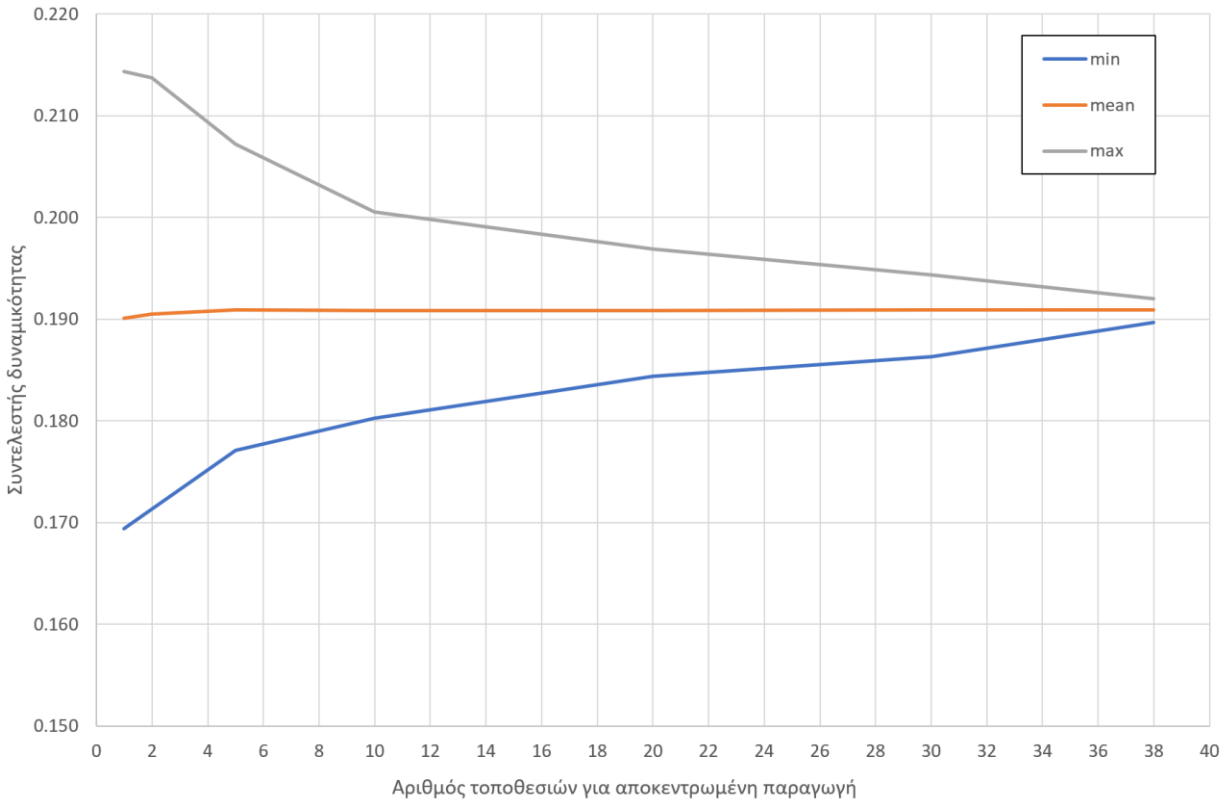


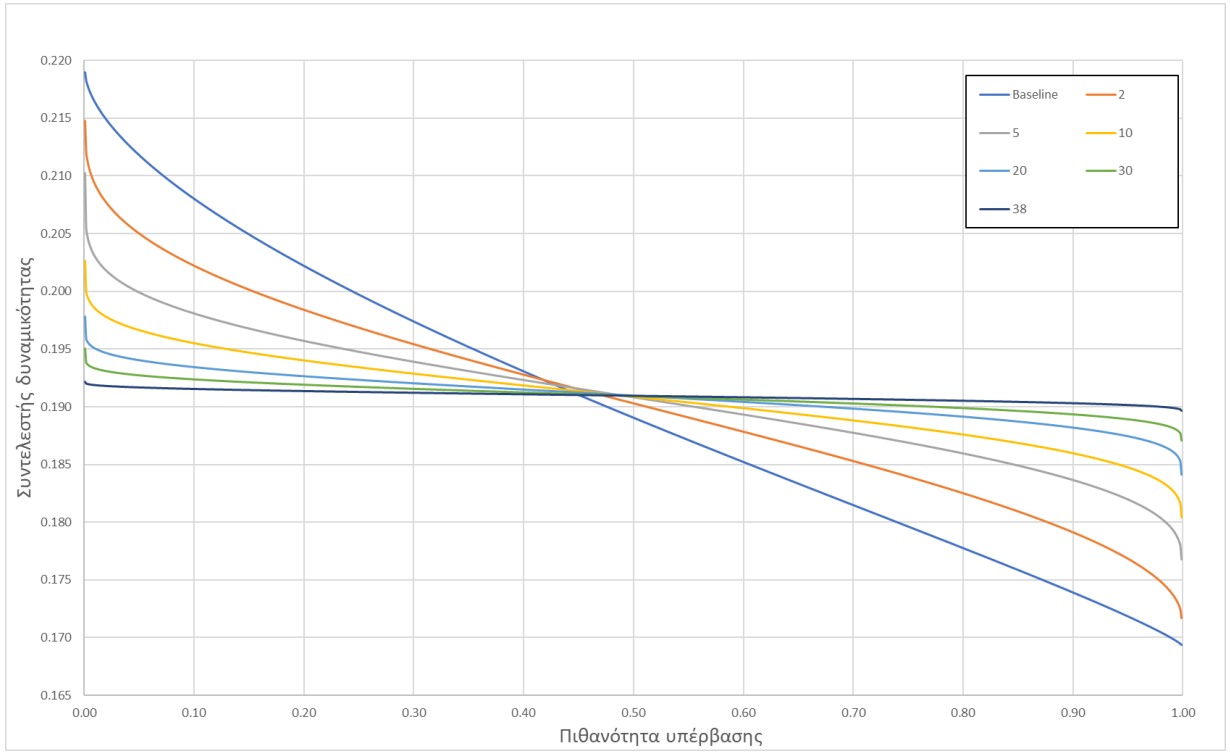
Για να παραχθεί ένα συνεχές μοντέλο χωρικής μεταβλητότητας αξιοποιήθηκε η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας Kumaraswamy. Μέσω της συνάρτησης αυτής παρήχθη η σχέση:

$$C_f = C_{\text{fmin}} + \left(1 - (1 - p^a)^b\right)(C_{\text{fmax}} - C_{\text{fmin}})$$

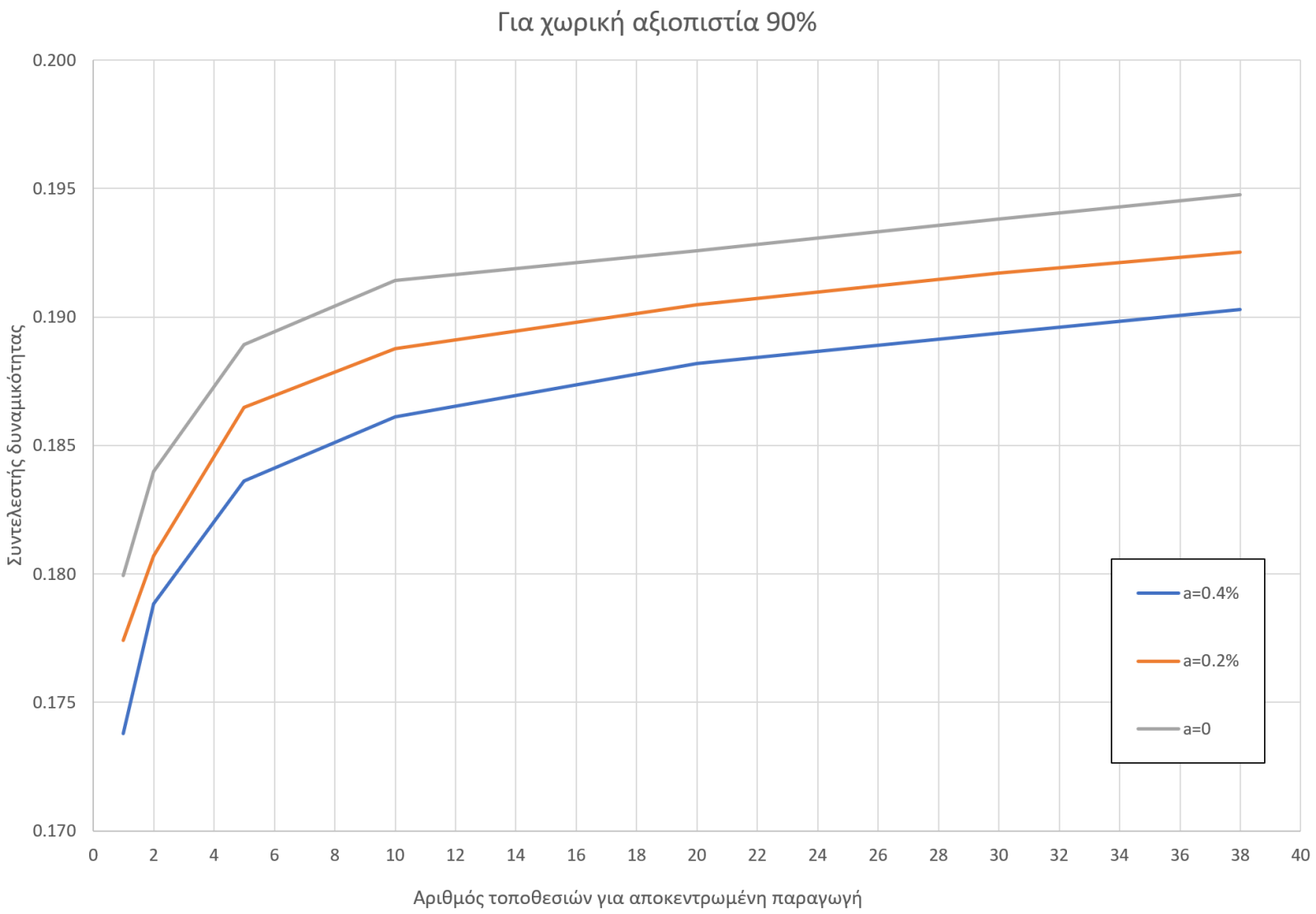
Η Αξία των Αποκεντρωμένων Φωτοβολταϊκών Συστημάτων – Η Μείωση της Αβεβαιότητας στην Παραγωγή

Θερμοκρασιακός Συντελεστής a= -0.4%/ °C





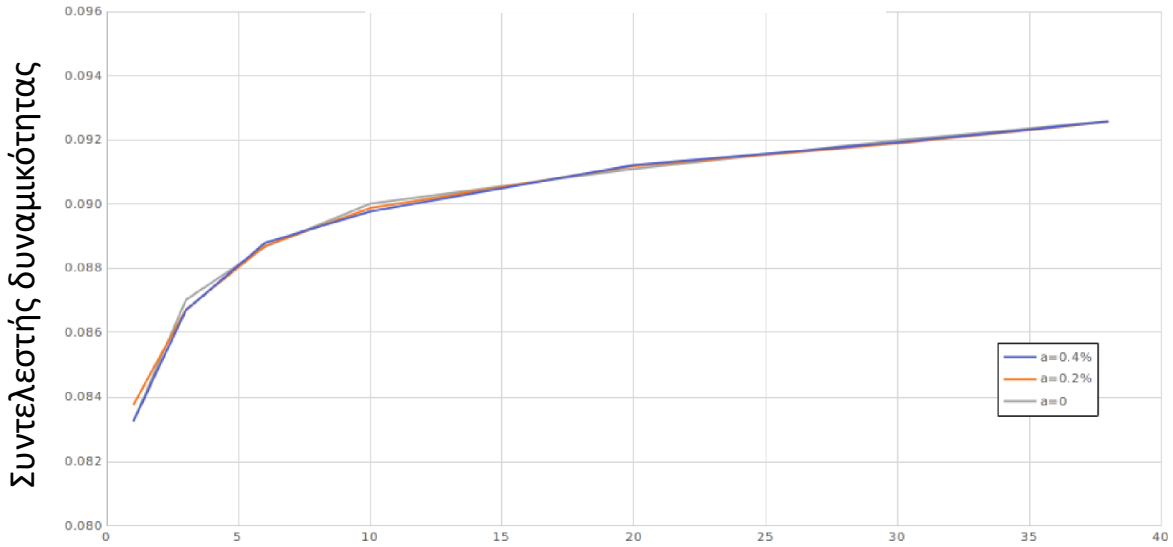
Η Επίδραση της Θερμοκρασίας στη Παραγωγή Ενέργειας από Αποκεντρωμένα φωτοβολταϊκά Συστήματα (1)



Η Επίδραση της Θερμοκρασίας στη Παραγωγή Ενέργειας από Αποκεντρωμένα φωτοβολταϊκά Συστήματα (2)

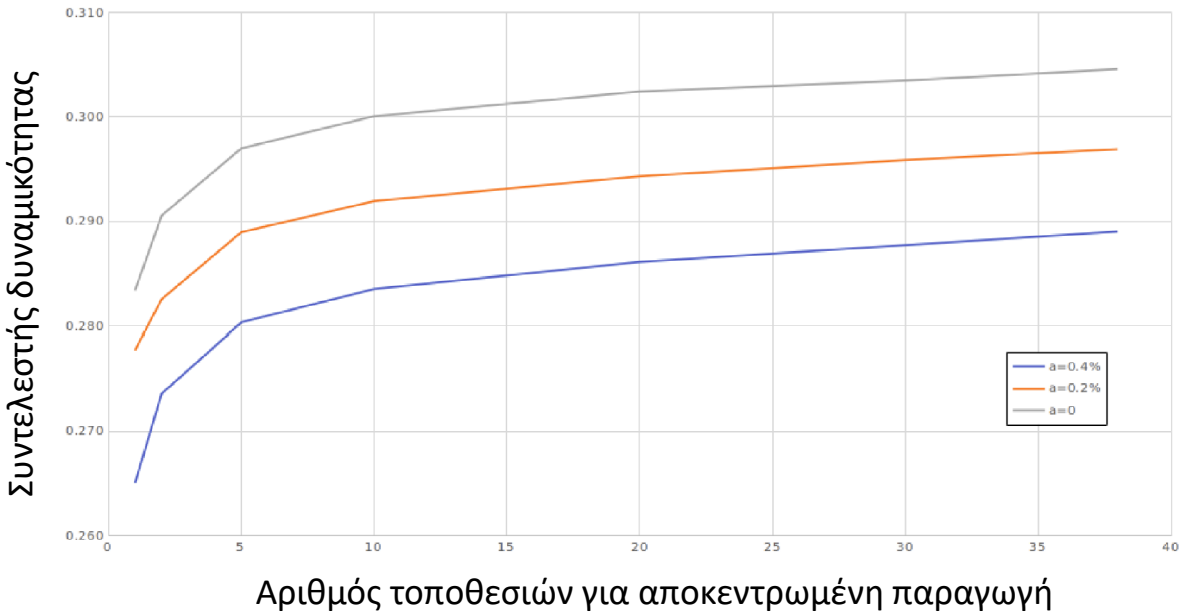
Χειμώνας

Για χωρική αξιοπιστία 90%



Καλοκαίρι

Για χωρική αξιοπιστία 90%



Συμπεράσματα

- Η διαδικτυακή βάση δεδομένων PVGIS είναι αρκετά έγκυρη και καλύπτει ένα μεγάλο κενό δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας στην Ελλάδα.
- Τα βόρεια γεωγραφικά διαμερίσματα της χώρας (Μακεδονία, Θράκη, Ήπειρος) δέχονται αρκετά λιγότερη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε σύγκριση με τα νότια (Πελοπόννησος, Νήσοι Αιγαίου Πελάγους, Κρήτη) και κατ' επέκταση παράγουν λιγότερη φωτοβολταϊκή ενέργεια.
- Τα νησιά του Αιγαίου Πελάγους αποτελούν τις λιγότερο ευαίσθητες τοποθεσίες στη χώρα, ως προς την επίδρασης της θερμοκρασίας στην παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας
- Όσο πιο διασκορπισμένο είναι ένα σύστημα φωτοβολταϊκών πάνελ σε περισσότερες γεωγραφικές τοποθεσίες, τόσο πιο προβλέψιμη είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα.
- Όσο πιο διασκορπισμένο είναι ένα αποκεντρωμένο φωτοβολταϊκό σύστημα παράγει περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια με υψηλή **χωρική αξιοπιστία**.

Το Μέλλον του Θέματος

<u>Προτάσεις για μελλοντική έρευνα:</u>

- Όσο πιο διασκορπισμένο είναι ένα αποκεντρωμένο φωτοβολταϊκό σύστημα παράγει περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια με υψηλή **χρονική αξιοπιστία**;
- Να πραγματοποιηθεί η ίδια έρευνα με περισσότερα σημεία για καλύτερη αντιπροσώπευση της Ελλάδας.
- Να πραγματοποιηθεί η ίδια έρευνα σε κάποια άλλη περιοχή με διαφορετικό ανάγλυφο και διαφορετικά κλιματικά χαρακτηριστικά.

Ευχαριστώ για την προσοχή σας!