



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Αναθεωρημένη παραμετρική εξίσωση εκτίμησης της δυναμικής εξατμοδιαπνοής στην Ελλάδα

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΜΑΡΙΝΑΚΗΣ

Επιβλέπων: Ανδρέας Ευστρατιάδης, Καθηγητής ΕΜΠ

Μάρτιος 2026

Αντικείμενο και στόχοι

Αντικείμενο

Η επιπλέον διερεύνηση, τροποποίηση και δυνητική βελτίωση μιας ήδη υπάρχουσας παραμετρικής εξίσωσης εκτίμησης της δυνητικής εξατμοδιαπνοής.

Στόχοι

- Επανεκτίμηση αποδοτικότητας της υπάρχουσας παραμετρικής εξίσωσης
- Επαναπροσδιορισμός των παραμέτρων μετά από ανάλυση με ημερήσιο βήμα
- Διαμόρφωση αποδοτικότερης παραμετρικής εξίσωσης
- Απαλοιφή παραμέτρων

Μεθοδολογία

- Υπολογισμός τιμής εξατμοδιαπνοής με βάση την εξίσωση Penman-Monteith
- Υπολογισμός σφάλματος ανάμεσα σε παραμετρική εξίσωση και PM
- Υπολογισμός αθροίσματος των τετραγώνων των σφαλμάτων
- Χρήση του Solver για τον καθορισμό της βέλτιστης λύσης

- Εξίσωση Penman-Monteith

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

Στατιστικά κριτήρια

- Συντελεστής αποδοτικότητας:

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

- Συντελεστής μεταβλητότητας:

$$CV = \frac{\text{τυπικη αποκλιση}}{\text{μεσος ορος}}$$

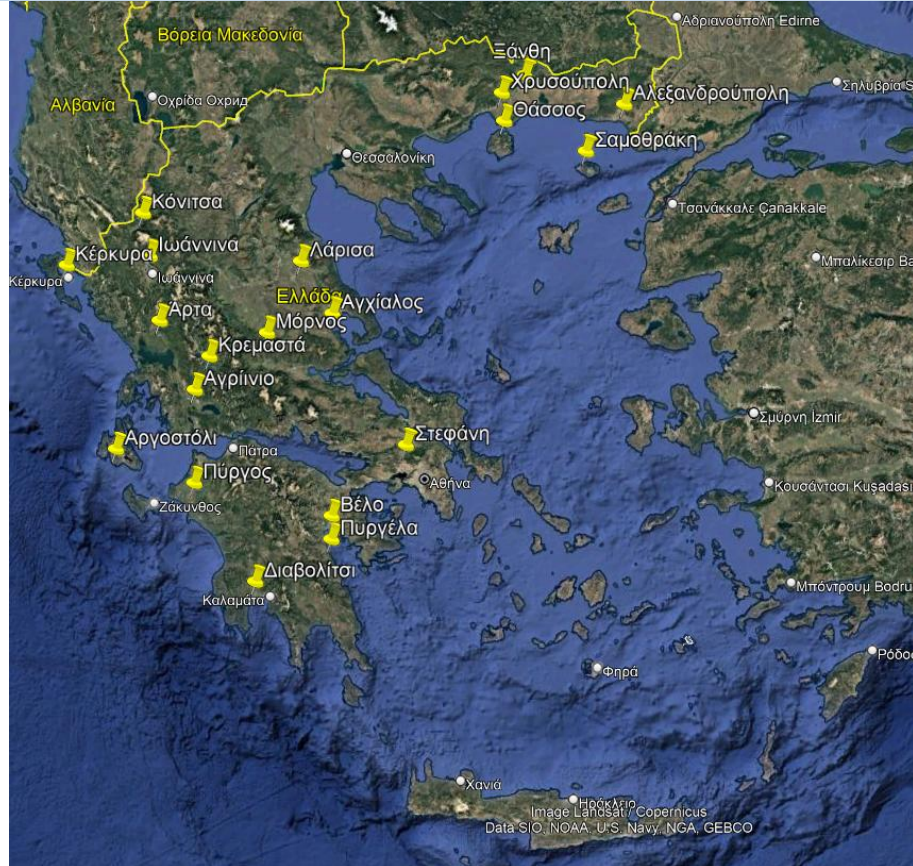
- Συντελεστής King-Gupta Efficiency:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2}$$

Λήψη δεδομένων ΕΜΥ

Χωρική κατανομή επίγειων σταθμών

- Δεδομένα σε μηνιαία βάση
- Μετετρεμμένα σε συμβατές μονάδες
- Συχνές ελλείψεις



Λήψη δορυφορικών δεδομένων

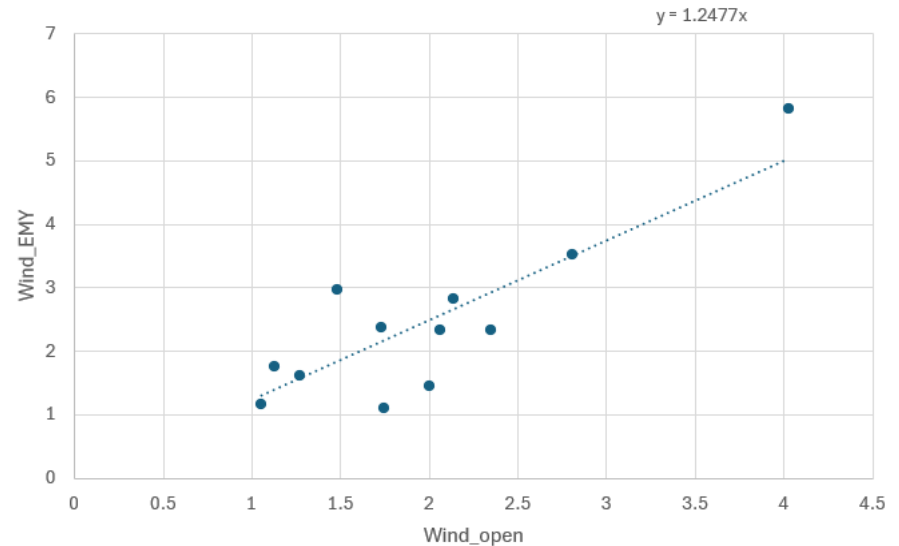
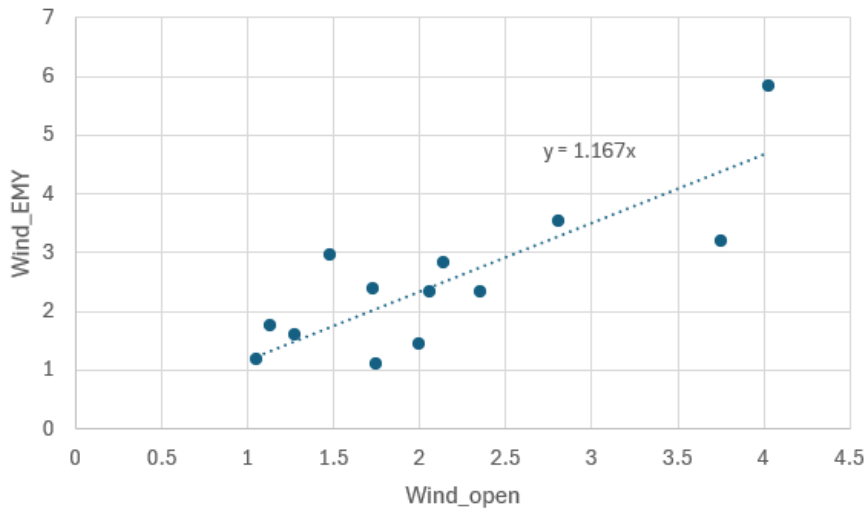
Χωρική κατανομή δορυφορικών σταθμών

- Δεδομένα σε ημερήσια βάση
- Αναπλήρωση δεδομένων
- Βαθμονόμηση δεδομένων



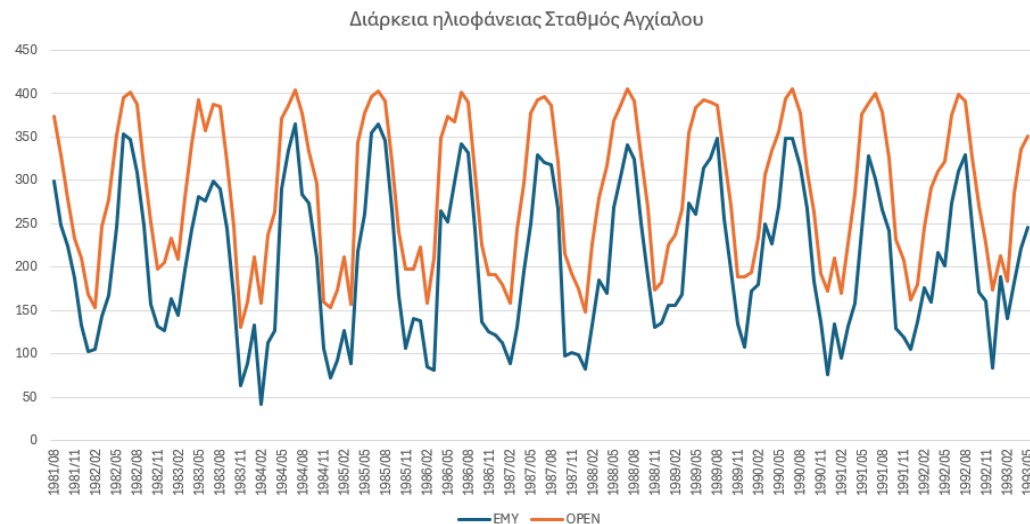
Βαθμονόμηση ταχύτητας ανέμου

- Δορυφορικά δεδομένα έχουν μικρότερες τιμές κατά πλειοψηφία
- Τιμές συντελεστή King-Gurta περίπου 0
- Επιλογή μέσου όρου των δύο περιπτώσεων $\rightarrow V'=1.2V$

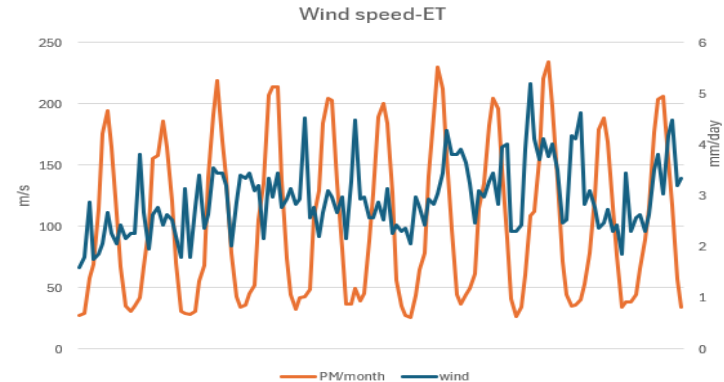
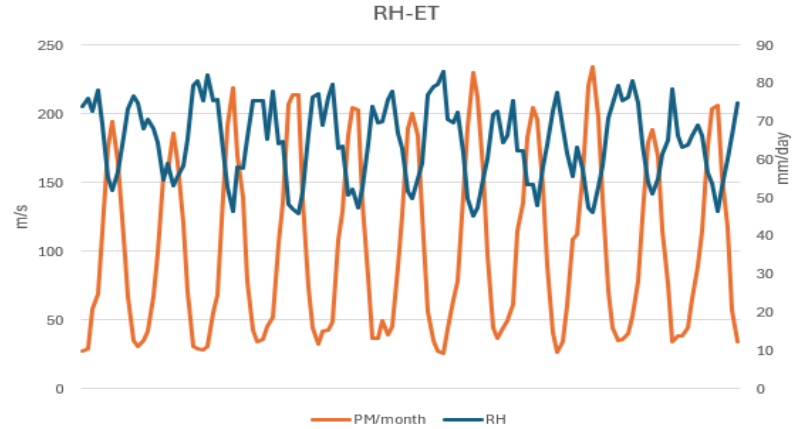
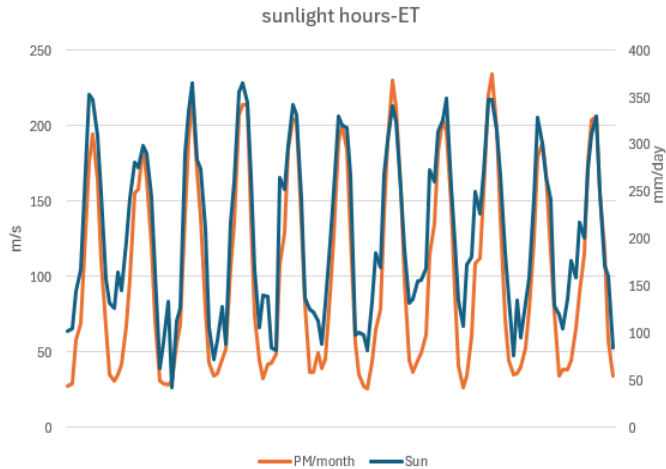
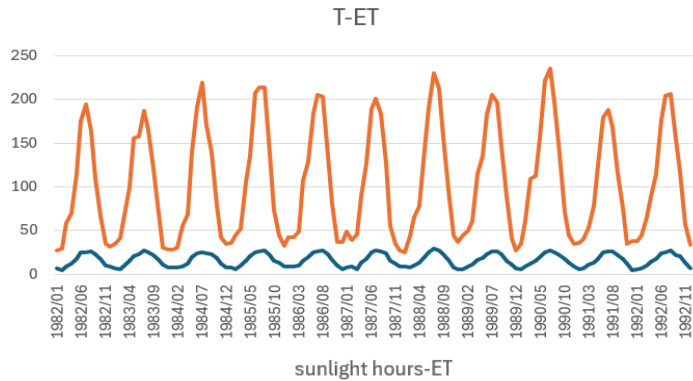


Βαθμονόμηση διάρκειας ηλιοφάνειας

- $Sun_{cal} = 0.96Sun$
KGE=0,79
- $Sun_{cal} = Sun - 1.42$
KGE=0,87
- $Sun_{cal} = 1.12Sun - 2.41$
KGE=0,95



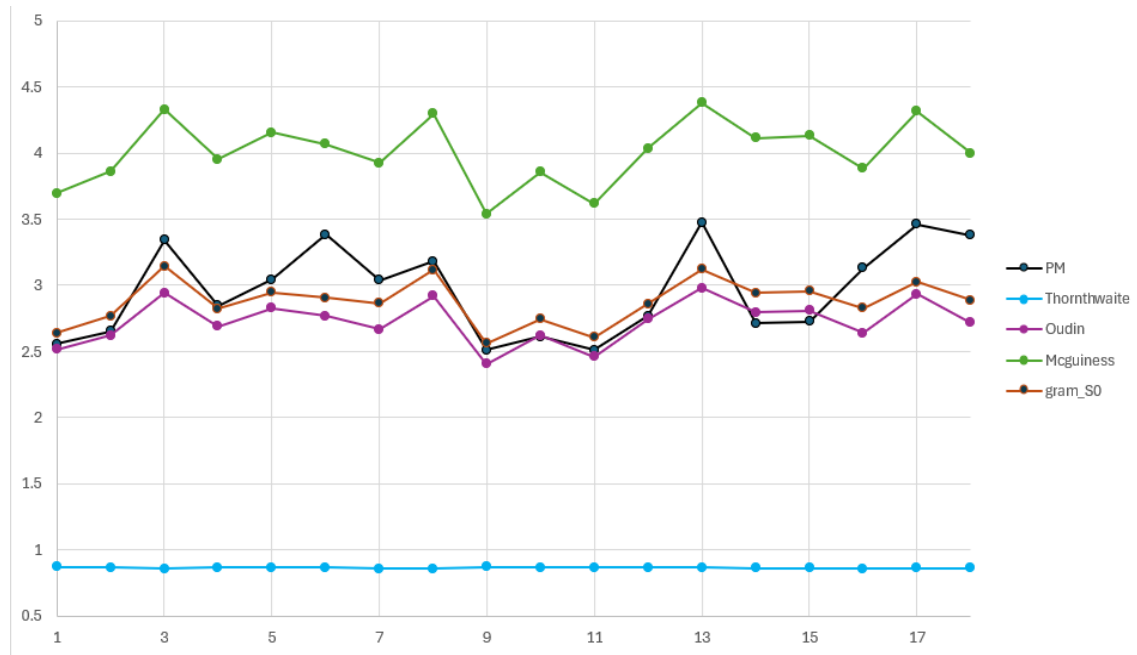
Επίδραση μεταβολής μετεωρολογικών μεταβλητών



Σύγκριση αρχικής παραμετρικής με άλλες μεθόδους

$$\frac{ASO + B}{1 - CT}$$

- Χρήση δεδομένων επίγειων σταθμών
- Μέση θερμοκρασία και εξωγήινη θερμοκρασία
- Χρήση και για τον υπολογισμό εξάτμισης αλλά και εξατμοδιαπνοής καλλιέργειας αναφοράς
- Μέση ετήσια τιμή των σταθμών



Αντικατάσταση εξωγήινης με επίγεια ακτινοβολία

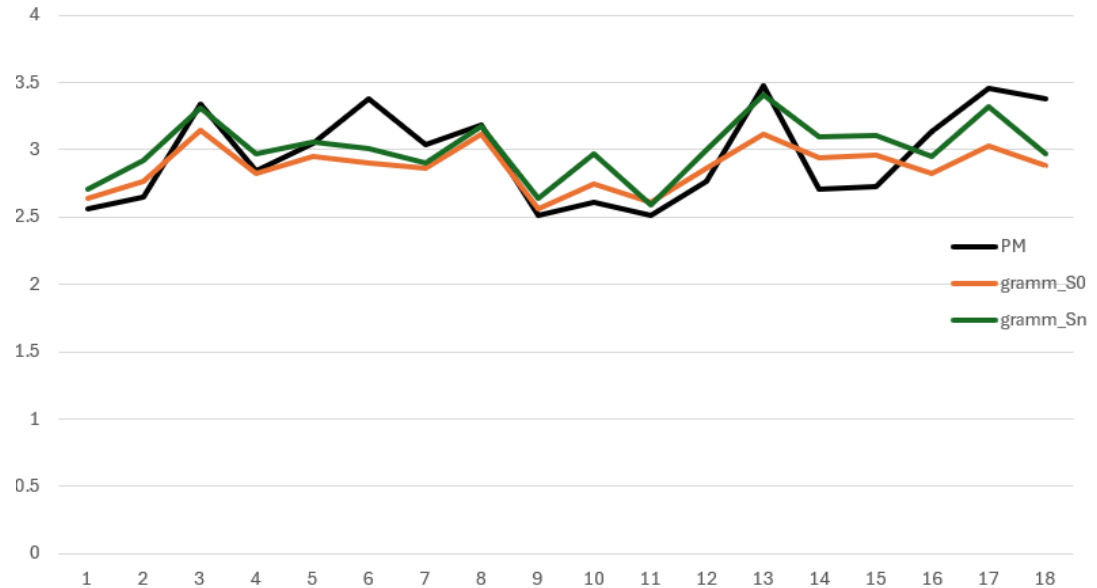
Αντικείμενο

- $\frac{AS_0+B}{1-CT}$

CE=0.965

- $\frac{AS_n+B}{1-CT}$

CE=0.975



Διερεύνηση δοκιμαστικών εξισώσεων (1)

- Διερεύνηση τριγωνομετρικών εξισώσεων
- Διερεύνηση στους σταθμούς με μικρές περιόδους χωρίς δεδομένα
- Ο σταθερός όρος βασίζεται στην ετήσια περιοδικότητα της εξάτμισης

	$(ASn+B)/(1-CT)$	$B\cos(\pi/6+\pi)+ASn/(1-CT)$	$B\cos(\pi/6+\pi)+B+ASn/(1-CT)$
CE	0.978	0.975	0.977
St.dev. A	1.99E-05	2.21E-05	2.20E-05
St.dev. B	2.53E-01	3.10E-01	2.07E+00
St.dev. C	2.99E-03	3.42E-03	3.25E-03

Διερεύνηση δοκιμαστικών εξισώσεων (2)

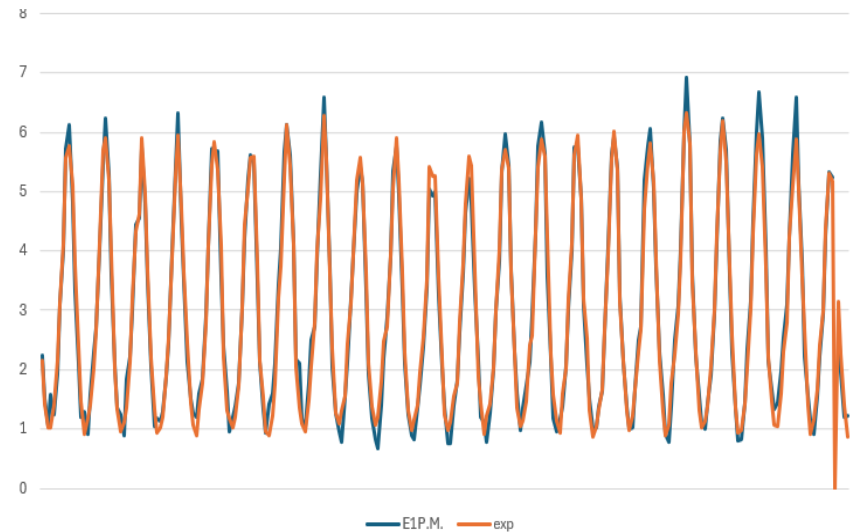
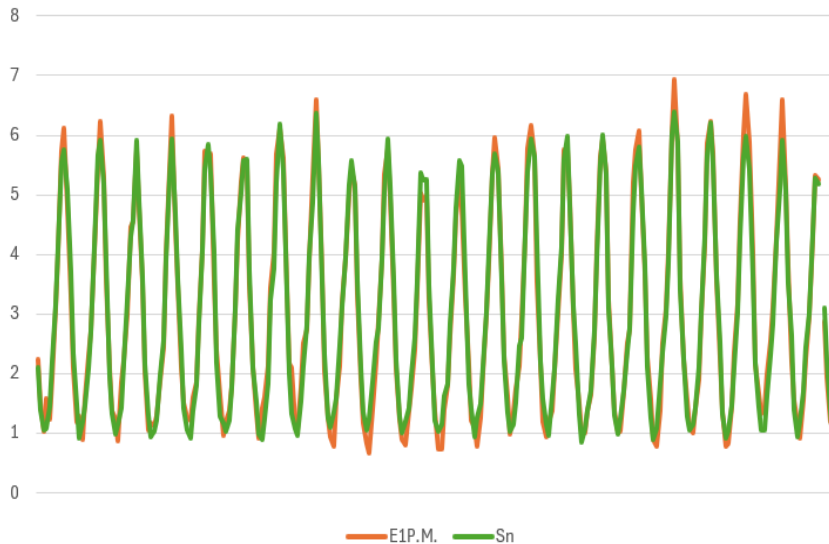
- Μη γραμμικές εξισώσεις
- Διερεύνηση στους σταθμούς με μικρές περιόδους χωρίς δεδομένα
- Η αρχική παραμετρική παραμένει η αποδοτικότερη

Τύπος	CE
$(ASn+B)/(1-CT)$	0.978
$ASn + BT^2 + C$	0.973
$ASn + T^B + C$	0.956
$ASn + BT + C$	0.964
$ASn + BT^3 + C$	0.917
$Sn^A + T^3 + C$	0.976
$(A \ln(Sn+1)+B)/(1-CT)$	0.962
$A \ln(Sn+1) + BT^2 + C$	0.948

Εισαγωγή τροποποίησης παραμετρικής εξίσωσης

- Στόχος η καλύτερη προσαρμογή στις χαμηλές τιμές
- $CE(\text{αρχικής}) = 0,975$ $CE(\text{τροποποίησης}) = 0,976$
- Χρήση και για τον υπολογισμό εξατμησης αλλά και εξατμοδιαπνοής καλλιέργειας αναφοράς
- Διαγράμματα από τον σταθμό της Κέρκυρας

$$\frac{ASn + B}{e^{-CT}}$$



Διερεύνηση νέων παραμετρικών εξισώσεων

- $\frac{ASn+B}{e^{-CT}}$ $CE=0.976$

- $\frac{ASn+B}{e^{(1-CT)}}$ $CE=0.975$

- $\frac{ASn}{e^{-CT}} + BT$ $CE=0.974$

- $\frac{ASn+BT}{e^{(1-CT)}}$ $CE=0.974$

CV	A	B	C
$\frac{ASn + B}{e^{-CT}}$	13.38	38.47	10.99
$\frac{ASn}{e^{-CT}} + BT$	12.10	125.06	11.69
$\frac{ASn + BT}{e^{(1-CT)}}$	11.63	141.01	15.38

Δημιουργία κλαδικής εξίσωσης (1)

- Διερεύνηση με χρήση δεδομένων επίγειων σταθμών
- Ανάλυση με μηναίο βήμα
- Τυχαία επιλογή θερμοκρασίας αλλαγής κλάδου
- Χρήση και για τον υπολογισμό εξάτμισης αλλά και εξατμοδιαπνοής καλλιέργειας αναφοράς

$$E(T) = \begin{cases} \frac{AS_n+B}{e^{-CT}}, & T < 15 \\ \frac{AS_n+B}{1-CT}, & T > 15 \end{cases}$$

Εξίσωση	CE
$(AS_n+B)/(1-CT)$	0.975
$(AS_n+B)/\exp(-CT)$	0.976
Κλαδική	0.978

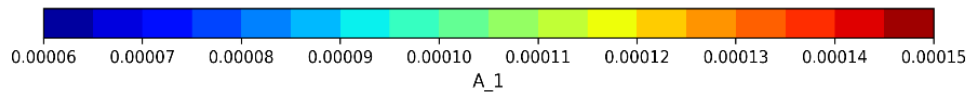
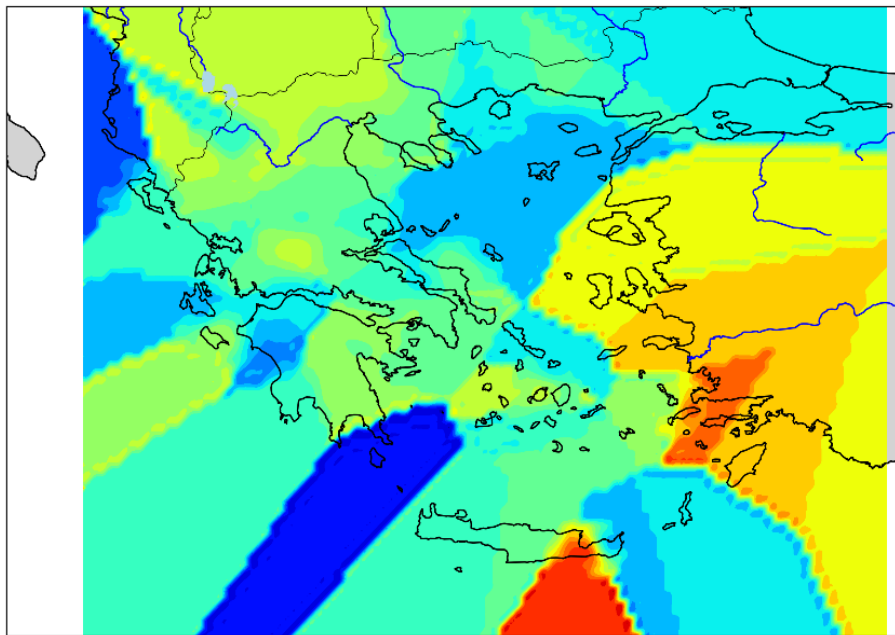
- Διερεύνηση με χρήση δορυφορικών δεδομένων
- Ανάλυση με ημερήσιο βήμα
- Βέλτιστη επιλογή θερμοκρασίας αλλαγής κλάδου
- Χρήση και για τον υπολογισμό εξάτμισης αλλά και εξατμοδιαπνοής καλλιέργειας αναφοράς

$$E = \begin{cases} \frac{AS_n+B}{e^{-CT}}, & T < 19 \\ \frac{AS_n+B}{1-CT}, & T > 19 \end{cases}$$

Εξίσωση	CE
$(AS_n+B)/(1-CT)$	0.915
$(AS_n+B)/\exp(-CT)$	0.916
Κλαδική	0.921

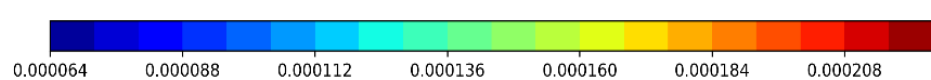
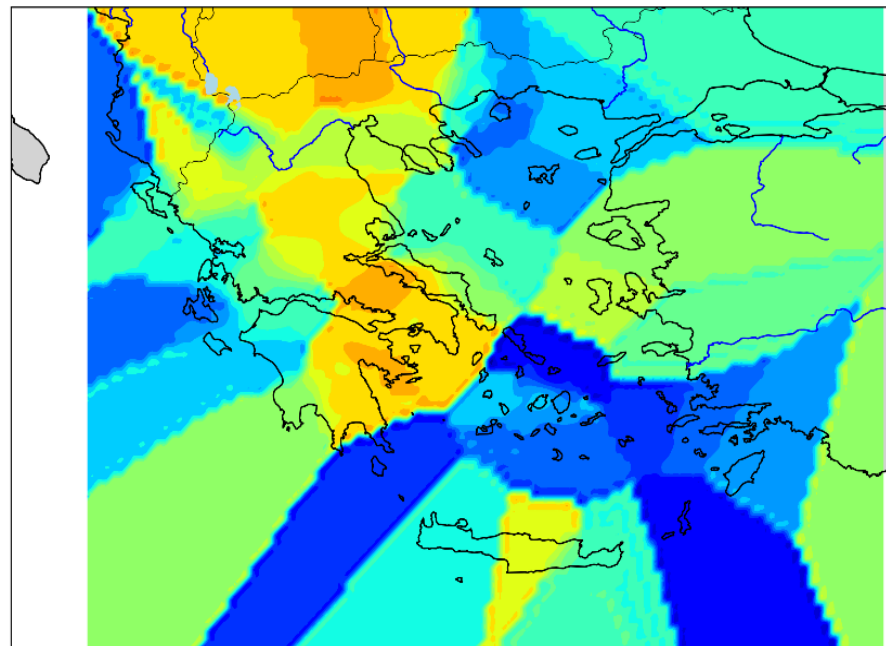
Θερμικοί χάρτες παραμέτρων κλαδικής εξίσωσης (1)

Χωρική κατανομή A_1



A_1

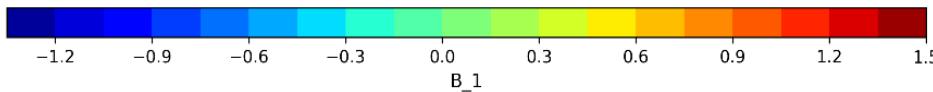
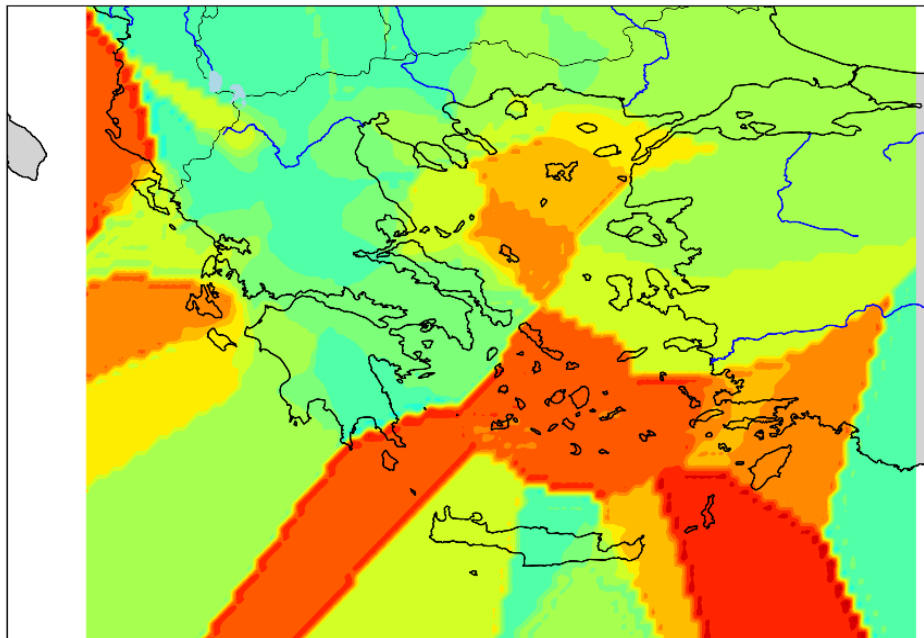
Χωρική κατανομή A_2



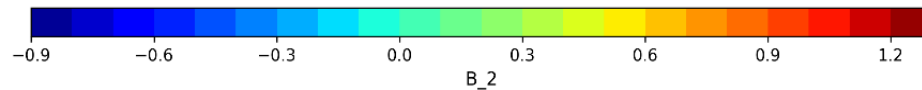
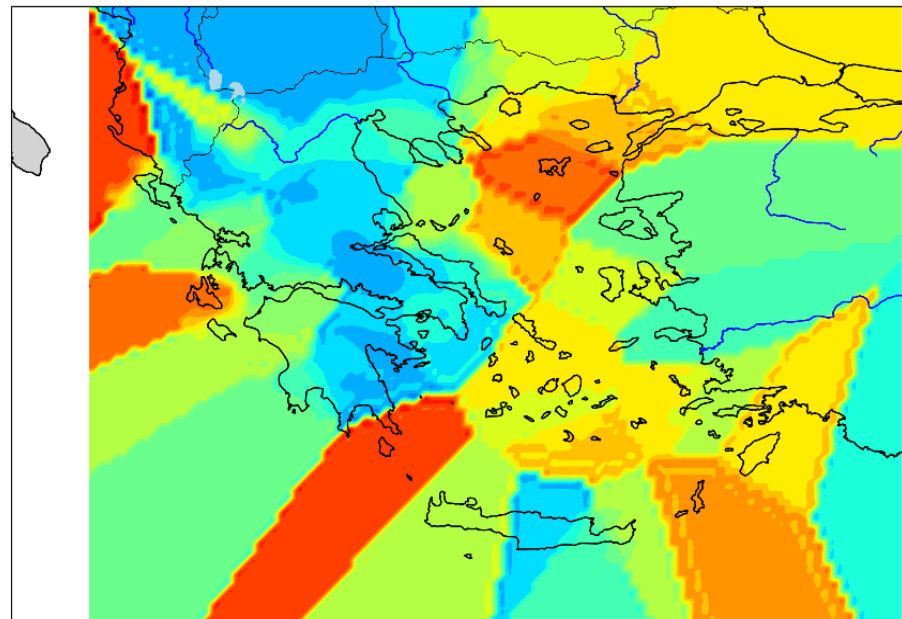
A_2

Θερμικοί χάρτες παραμέτρων κλαδικής εξίσωσης (2)

Χωρική κατανομή B_1

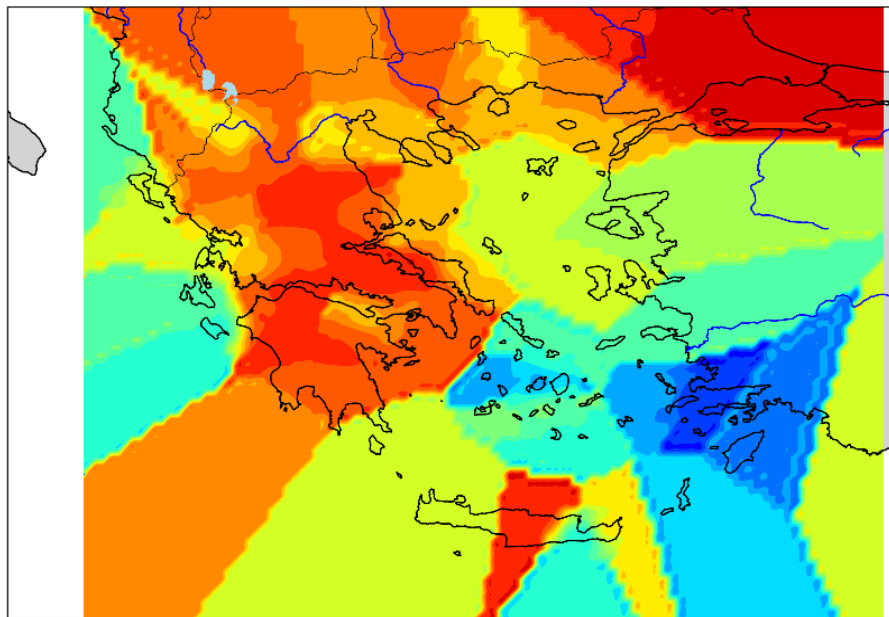


Χωρική κατανομή B_2

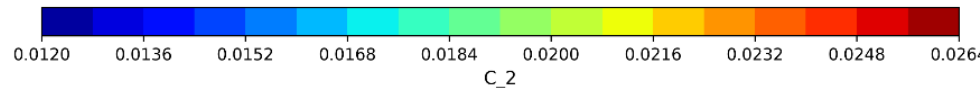
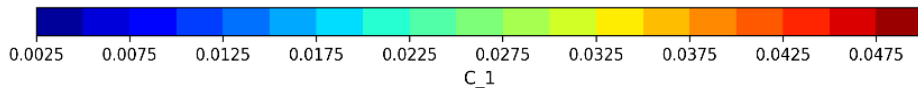
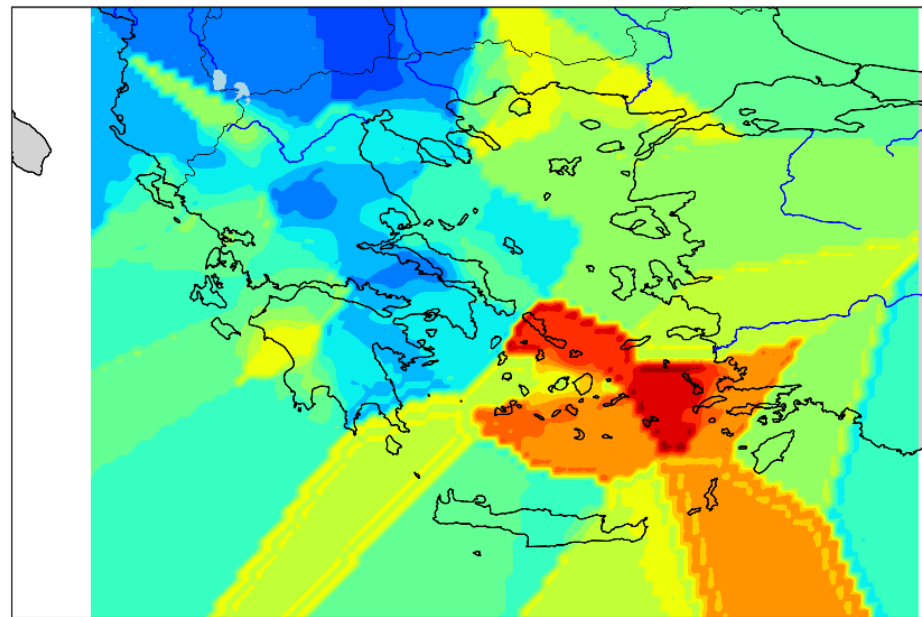


Θερμικοί χάρτες παραμέτρων κλαδικής εξίσωσης (3)

Χωρική κατανομή C₁



Χωρική κατανομή C₂



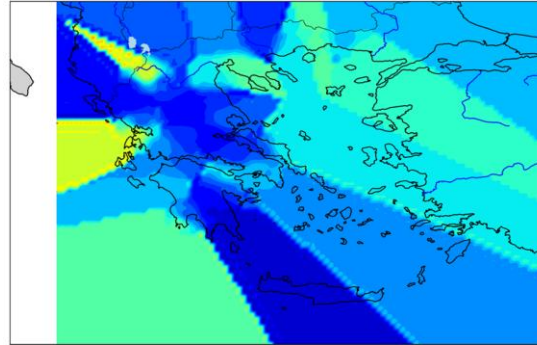
Απαλοιφή της παραμέτρου B

- Ανάλυση μόνο ηπειρωτικών σταθμών
- Απαλοιφή και από τους δύο κλάδους
- CE(αρχικής κλαδικής)=0.958
- CE(χωρίς B)=0.956

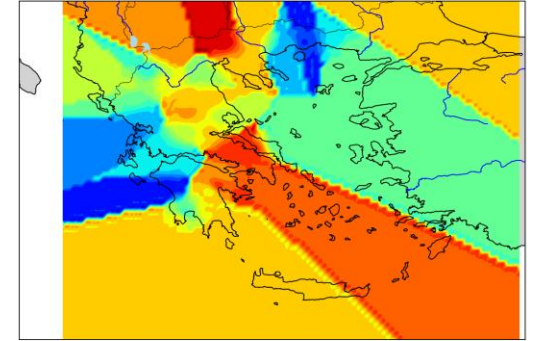
$$E = \frac{AS_n}{e^{-CT}} \quad T < 19$$

$$E = \frac{AS_n}{1 - CT} \quad T > 19$$

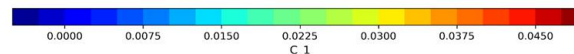
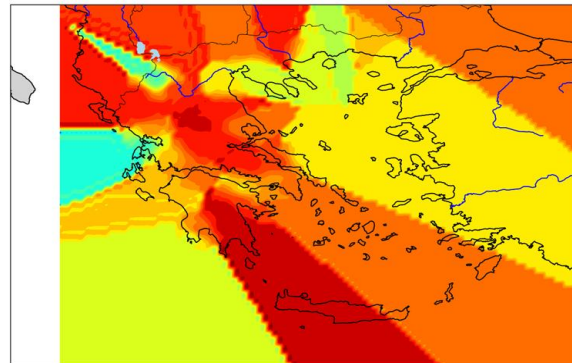
Χωρική κατανομή A_1



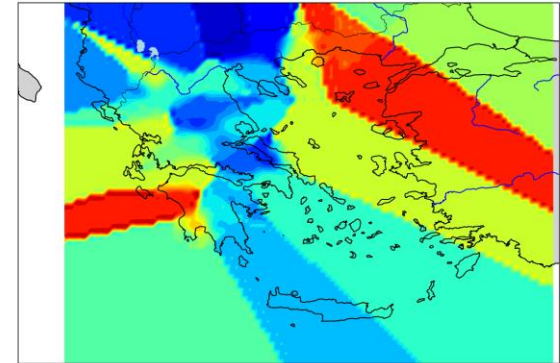
Χωρική κατανομή A_2



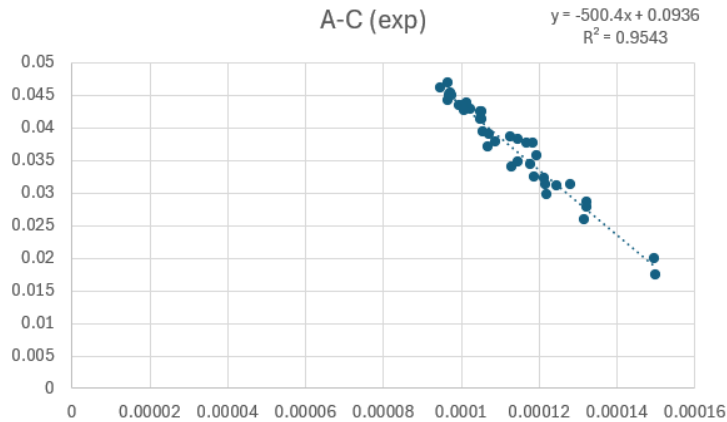
Χωρική κατανομή C_1



Χωρική κατανομή C_2



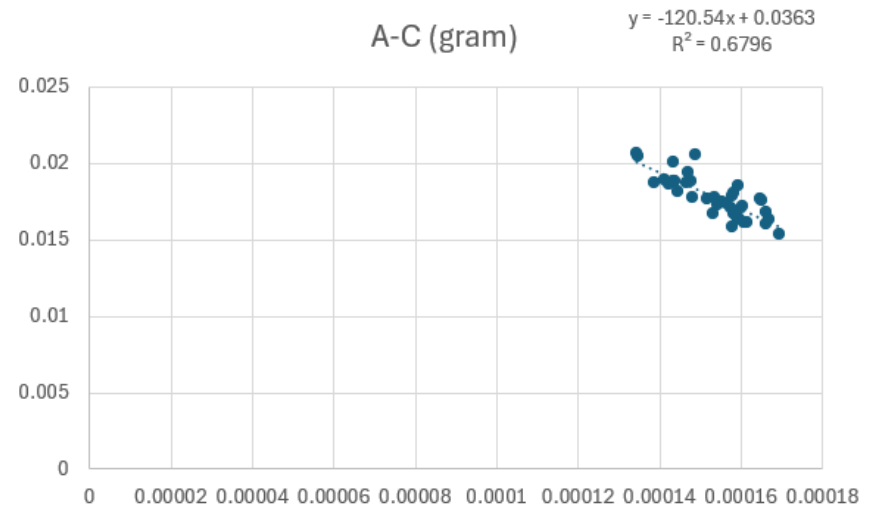
Συσχέτιση παραμέτρων A-C



$$E = \frac{A S_n}{e^{-112.4AT}} \quad T < 19$$

$$E = \frac{A S_n}{1 - 112.4T} \quad T > 19$$

- Ανάλυση μόνο ηπειρωτικών σταθμών
- Γραμμική σχέση παραμέτρων A-C
- CE(αρχικής κλαδικής)=0.958
- CE(μόνο με A)=0.863



Κώδικας υπολογισμού δυνητικής εξατμοδιαπνοής

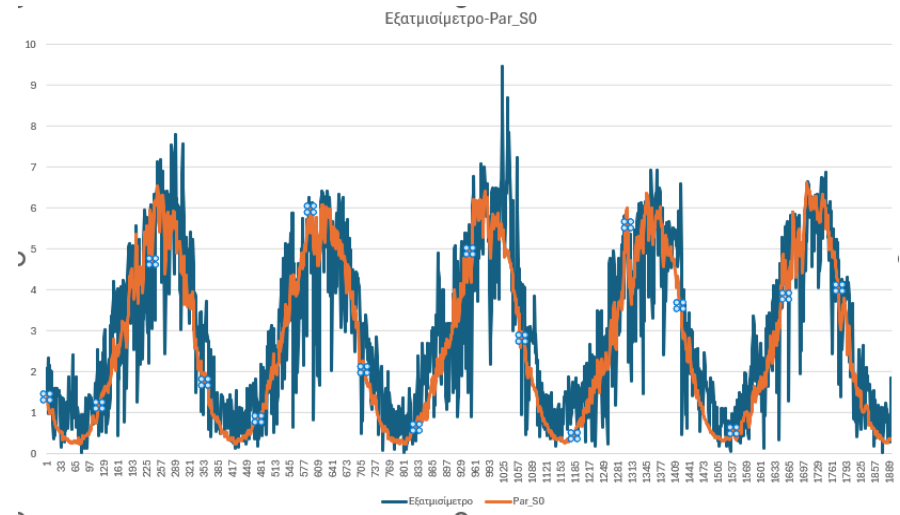
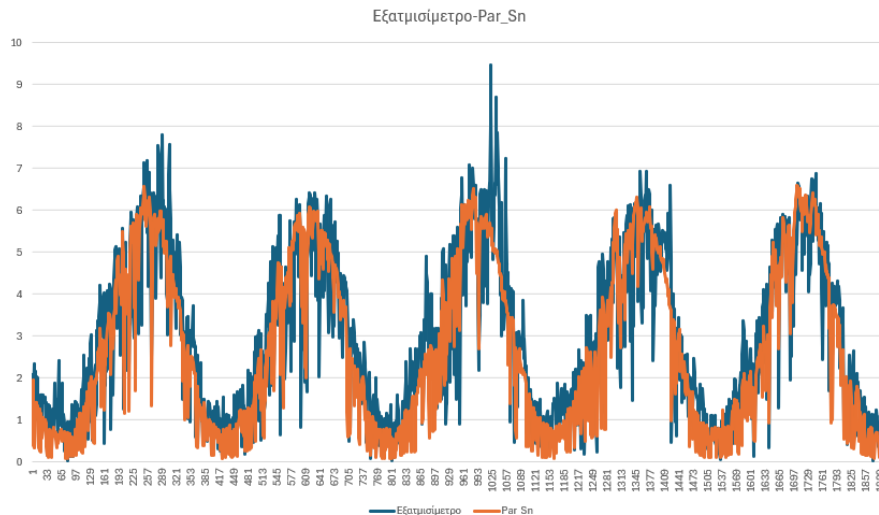
- Εισαγωγή συντεταγμένων και μετεωρολογικών δεδομένων χειροκίνητα
- Εκτίμηση παραμέτρων μέσω IDW
- Αυτόματη επιλογή κλάδου της παραμετρικής εξίσωσης
- Παράδειγμα με 25/12/2001 στον σταθμό του Καρπενησίου

Long	Lat	T	Sn	E	E(κώδικα)
38.91	21.92	16.9	21459.1	0.3	0.31

Επαλήθευση με μετρήσεις εξατμισίμετρου

Τα αποτελέσματα των μεθόδων που εξετάστηκαν συγκρίθηκαν με δεδομένα πεδίου

- Χρονοσειρές εκτίμησης εξάτμισης
- Χρήση της κλαδικής παραμετρικής εξίσωσης για τα δορυφορικά δεδομένα του Καρπενησίου
- Δεδομένα πεδίου από τον μετεωρολογικό σταθμό του Ευήνου
- Γραφική σύγκριση της σύγκλισης των εξισώσεων με χρήση επίγειας αλλά και εξωγήινης ακτινοβολίας



Συμπεράσματα

Από την διερεύνηση προέκυψαν κάποια κύρια συμπεράσματα:

- Στις νησιωτικές περιοχές παρατηρούνται οι χαμηλότερες τιμές του συντελεστή αποδοτικότητας και υψηλές τιμές του B
- Η χρήση επίγειας ακτινοβολίας βελτιώνει ελάχιστα την εκτιμητική ικανότητα της δυνητικής εξατμοδιαπνοής των παραμετρικών εξισώσεων
- Για τον υπολογισμό της εξάτμισης με την χρήση της κλαδικής παραμετρικής εξίσωσης, αποδοτικότερη είναι η χρήση της εξωγήινης ακτινοβολίας ως ανεξάρτητη μεταβλητή
- Η κλαδική παραμετρική εξίσωση πετυχαίνει υψηλότερους συντελεστές απόδοσης από τις άλλες δύο
- Η τροποποιημένη παραμετρική εξίσωση με τον εκθετικό όρο στον παρονομαστή υπερτερεί της αντίστοιχης με τον γραμμικό όρο

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Με την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας δημιουργούνται ορισμένες προοπτικές για περαιτέρω έρευνα:

- Διαφορετική προσέγγιση για την κατάστρωση μοντέλου στις νησιωτικές περιοχές. Πιθανή χρήση της ταχύτητας ανέμου λόγω των υψηλών τιμών στα νησιά
- Διαχωρισμός του ελλαδικού χώρου σε γεωγραφικά διαμερίσματα και καθορισμός κοινών παραμέτρων
- Ανάπτυξη μοντέλου υπολογισμού της δυνητικής εξατμοδιαπνοής στο επίπεδο της θάλασσας και διόρθωση των τιμών με χρήση βοηθητικής εξίσωσης που λαμβάνει υπόψη το υψόμετρο
- Υπολογισμός διαφορετικών γραμμικών εξισώσεων στους δύο κλάδους για την αντικατάσταση του συντελεστή C

ΣΑΣ ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ!

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΜΑΡΙΝΑΚΗΣ

Μάρτιος 2026