

4^ο

Συνέδριο

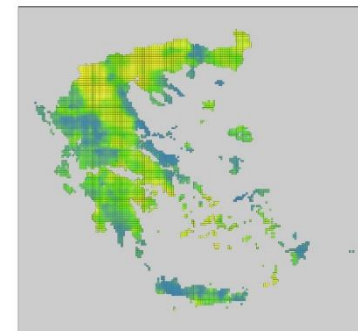
ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ

10-11 Σεπτεμβρίου 2024 | Αθήνα Πολεμικό Μουσείο



Ελληνική Επιτροπή
Μεγάλων Φραγμάτων

Μοντελοποίηση ακραίων βροχοπτώσεων για τον σχεδιασμό υδραυλικών έργων και φραγμάτων: Η νέα μεθοδολογία και η εφαρμογή της στην ελληνική επικράτεια



Δημήτρης Κουτσογιάννης, Θεανώ Ηλιοπούλου, Αντώνης Κουκουβίνος, Νικόλαος Μαλάμος, Νίκος Μαμάσης, Παναγιώτης Δημητριάδης, Νίκος Τεπετίδης & Δαυίδ Μαρκαντώνης

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Παρουσίαση διαθέσιμη στο διαδίκτυο:
<https://www.itia.ntua.gr/en/docinfo/2479/>

Προσεγγίσεις στον υδρολογικό σχεδιασμό υδραυλικών έργων

- Η εκτίμηση της βροχόπτωσης σχεδιασμού ή ελέγχου έργων βασίζεται κατά κανόνα στην πιθανοτική ανάλυση παρατηρημένων υψών (h) ή (χρονικά μέσων) εντάσεων (x) βροχής, η οποία οδηγεί στην κατάρτιση σχέσεων έντασης – χρονικής κλίμακας αναφοράς (k) – περιόδου επαναφοράς (T) της βροχής, ή αλλιώς των όμβριων καμπυλών.
- Για έργα μεγάλης κλίμακας, κυρίως φράγματα, κυριαρχούσε στο παρελθόν η μέθοδος της Πιθανής Μέγιστης Κατακρήμνισης (ΠΜΚ / Probable Maximum Precipitation / PMP).
- Εδώ και 25 χρόνια έχει υποστηριχθεί ότι η έννοια της ΠΜΚ είναι αντεπιστημονική και ότι μόνο οι πιθανοτικές μέθοδοι έχουν επιστημονική βάση (π.χ. Koutsoyiannis, 1999, 2007).
- Ουσιαστικά η πρόσφατη έκθεση της Αμερικανικής «Committee on Modernizing Probable Maximum Precipitation Estimation» (National Academies of Sciences, 2024) έχει καταργήσει την ΠΜΚ, κρατώντας μόνο το όνομα. Αυτό αντανakλάται στον νέο ορισμό που δίνει:

Πιθανή μέγιστη κατακρήμνιση—το ύψος της κατακρήμνισης για μια συγκεκριμένη διάρκεια, θέση και εδαφική έκταση, όπως μια λεκάνη απορροής, **με εξαιρετικά χαμηλή ετήσια πιθανότητα υπέρβασης**, για μια συγκεκριμένη κλιματική περίοδο.

- Ο ορισμός ακολουθείται από «μοντέρνα» και «δημιουργική» ασάφεια:
Οι εξαιρετικά χαμηλές ετήσιες πιθανότητες κυμαίνονται από 10^{-4} έως 10^{-7} .
- Με λίγο παραπάνω θάρρος και γνώση, ο όρος θα είχε διαγραφεί απ' το επιστημονικό λεξιλόγιο και θα είχε επιτευχθεί σαφήνεια.

Σημασία όμβριων καμπυλών σε κλίμακα περιοχής

- Η εκτίμηση της βροχόπτωσης σχεδιασμού με αναφορά σε κλίμακα περιοχής είναι κρίσιμη για τον υδρολογικό σχεδιασμό έναντι πλημμυρών, ιδιαίτερα:
 - για περιοχές χωρίς δεδομένα — αλλά ακόμη και για περιοχές με σταθμούς.
 - για υδρολογικές αναλύσεις σε μεγάλες γεωγραφικές ενότητες, π.χ. μελέτες και κατασκευή έργων αντιπλημμυρικής προστασίας μεγάλης κλίμακας — αλλά ακόμη και για μικρές χωρικές κλίμακες, π.χ. αστικά δίκτυα όμβριων υδάτων.

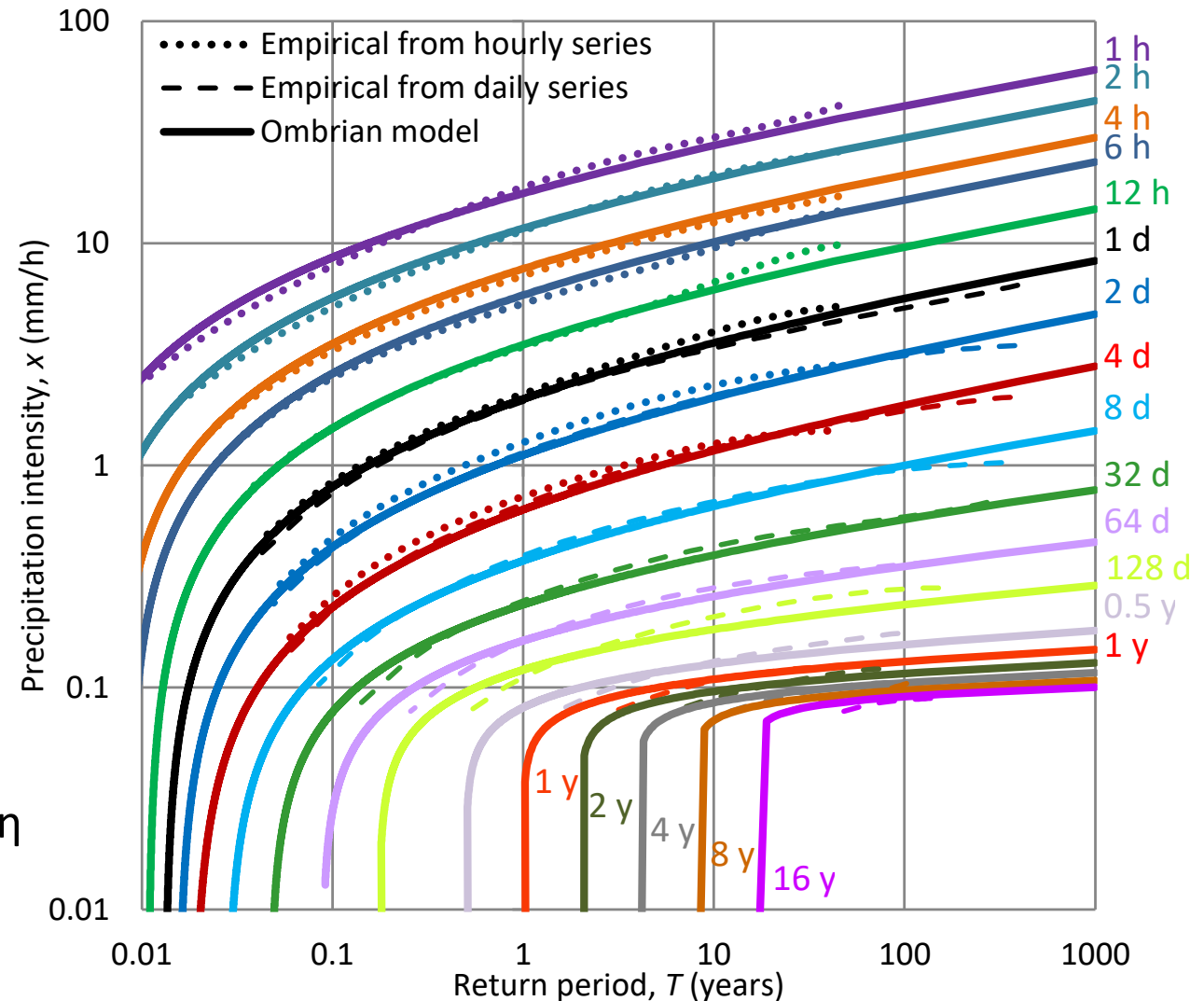
Βασικός στόχος του νέου μεθοδολογικού πλαισίου είναι η χωρική γενίκευση των όμβριων καμπυλών στο σύνολο των ΥΔ της Ελλάδας διασφαλίζοντας τη **χωρική συνέπεια** των εκτιμήσεων και αυξάνοντας κατά το δυνατόν την **αξιοπιστία** τους:

- επωφελούμενοι από νέες προόδους στον τομέα της χωρικής εκτίμησης των όμβριων καμπυλών (Koutsoyiannis, 2023).
- αξιοποιώντας νέα δεδομένα που καταγράφηκαν την τελευταία δεκαετία.

Για πρώτη φορά προκύπτει ένα γεωγραφικά κατανεμημένο μοντέλο για όλη την ελληνική επικράτεια.

Νέο θεωρητικά συνεπές πλαίσιο για τη μοντελοποίηση όμβριων καμπυλών για οποιαδήποτε χρονική κλίμακα

- Πρόσφατα, αναπτύχθηκε ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για την κατάρτιση όμβριων καμπυλών για οποιαδήποτε χρονική κλίμακα, οσοδήποτε μεγάλη ή μικρή (Koutsoyiannis, 2023), με θεωρητική συνέπεια.
- Το παράδειγμα που εμφανίζεται είναι για τη Μπολόνια, Ιταλία (σταθμός με δεδομένα 206 ετών), για χρονικές κλίμακες από 1 ώρα έως 16 χρόνια.
- Η εκτίμηση απαιτεί να υπάρχουν πρωτογενή δεδομένα σε λεπτή χρονική κλίμακα, ενώ ο υπολογισμός καθίσταται δυσχερέστερος όταν είναι επιθυμητή η χρονική γενίκευση.
- Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκε και ένα απλοποιημένο πλαίσιο για ευχερέστερη εκτίμηση και μαθηματική έκφραση, που όμως λειτουργεί σε περιορισμένο εύρος χρονικών κλιμάκων, λεπτών έως ημερών.



Επισκόπηση του απλοποιημένου θεωρητικού πλαισίου

- Υπό μερικές απλοποιητικές υποθέσεις, η ένταση της βροχόπτωσης x για μικρές χρονικές κλίμακες k (της τάξης των λεπτών έως λίγων ημερών) και περίοδο επαναφοράς T , δίνεται από τις ακόλουθες σχέσεις, που προκύπτουν από το μοντέλο ομβρίων πλήρους κλίμακας, μετά από εύλογες απλουστευτικές παραδοχές:

- ο για περίοδο επαναφοράς που ορίζεται για σειρές άνω κατωφλίου:

$$x = \frac{b(T)}{a(k)} = \lambda \frac{(T/\beta)^\xi - 1}{(1 + k/\alpha)^\eta}, \quad \xi > 0$$

- ο για περίοδο επαναφοράς που ορίζεται για σειρές ετήσιων μεγίστων:

$$x = \lambda \frac{(-(\beta/\Delta) \ln(1 - \Delta/T))^{-\xi} - 1}{(1 + k/\alpha)^\eta}, \quad \xi > 0$$

όπου $\Delta = 1$ έτος.

- Οι παράμετροι του απλοποιημένου μοντέλου είναι:

- λ παράμετρος κλίμακας έντασης βροχής (μονάδες όπως το x , π.χ. mm/h)·
- β παράμετρος χρονικής κλίμακας που σχετίζεται με τη μέση απόσταση των υγρών περιόδων (μονάδες όπως στην περίοδο επαναφοράς, π.χ. έτη)·
- α παράμετρος χρονικής κλίμακας (μονάδες χρονικής κλίμακας, π.χ. h)·
- η παράμετρος, που εκφράζει την εμμονή (αδιάστατη, $0 < \eta < 1$)·
- ξ παράμετρος σχήματος (δείκτης ουράς) της κατανομής (αδιάστατη, $0 < \xi < 1$).

Θεωρητικά ισοδύναμες για τις ίδιες τιμές παραμέτρων, δίνοντας πρακτικά τις ίδιες εκτιμήσεις για $T > 10$ χρόνια

Πέντε παράμετροι με φυσική ή μαθηματική σημασία (όλες > 0)

Πλεονεκτήματα του απλοποιημένου θεωρητικού πλαισίου

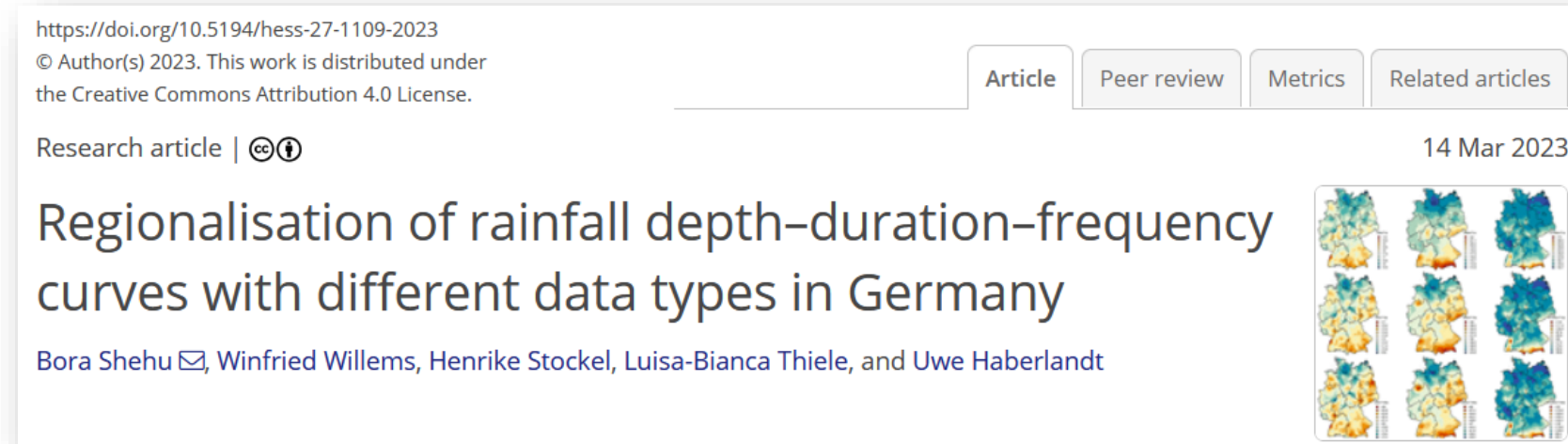
- Το σημαντικό πλεονέκτημα του απλοποιημένου πλαισίου σχετίζεται με τη δυνατότητα διαχωρισμού των συναρτήσεων της χρονικής κλίμακας και της συνάρτησης κατανομής:

$$x = \frac{b(T)}{a(k)}$$

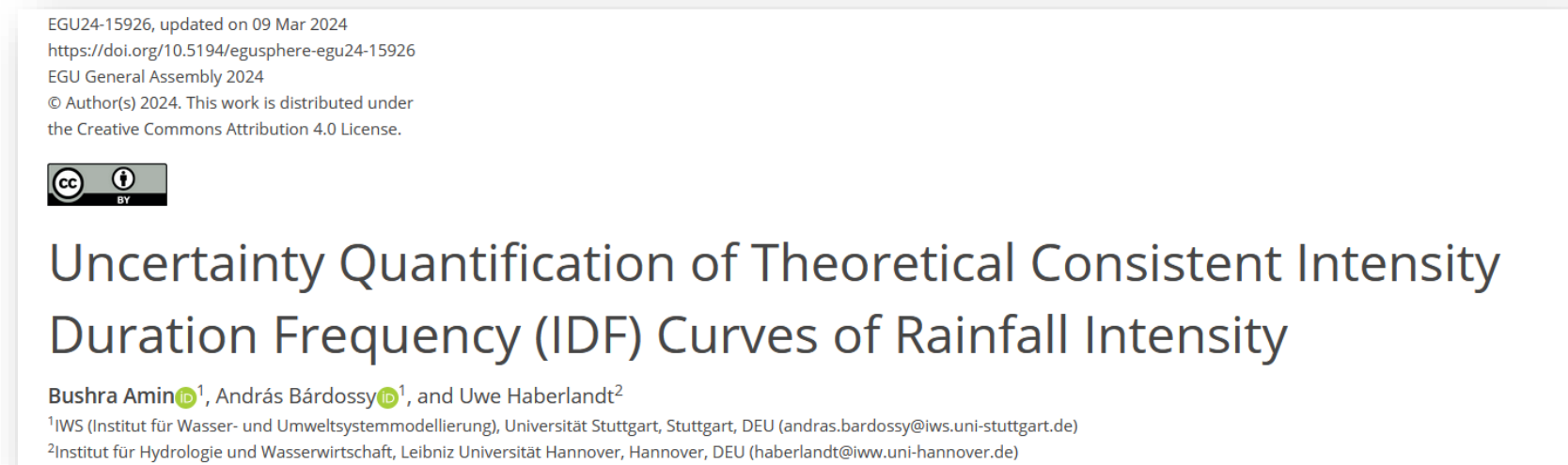
- Αυτό επιτρέπει την απλούστερη **εκτίμηση σε δύο βήματα**:
 - Οι παράμετροι χρονικής κλίμακας (της έκφρασης $a(k)$) μπορούν να υπολογιστούν στο πρώτο βήμα από δεδομένα βροχογράφων με βάση κατάλληλη διαδικασία βελτιστοποίησης (Koutsoyiannis et al., 1998).
 - Οι παράμετροι κατανομής (της έκφρασης $b(T)$) μπορούν να εκτιμηθούν σε δεύτερο βήμα με την **πρόσφατα εισαχθείσα μέθοδο των K-ροπών** (Koutsoyiannis, 2019), η οποία έχει αυξημένη αξιοπιστία για την εκτίμηση ροπών μεγάλης τάξης.
- Η προσαρμογή των παραμέτρων κατανομής (της έκφρασης $b(T)$) μπορεί να γίνει αξιοποιώντας κατά προτεραιότητα τα δεδομένα βροχομέτρων, που είναι πλεονεκτικότερα λόγω:
 - μεγαλύτερης χωρικής πυκνότητας του δικτύου βροχομέτρων σε σύγκριση με των βροχογράφων·
 - μεγαλύτερης διάρκειας παρατηρήσεων σε σύγκριση με των βροχογράφων· και
 - μεγαλύτερης αξιοπιστίας της μέτρησης της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια καταιγίδων.

Αξιοποίηση πλαισίου στη Γερμανία

- Η **απλουστευμένη** έκδοση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε πρόσφατα για την εκτίμηση όμβριων καμπυλών και την χωρική γενίκευσή τους στη Γερμανία (Shehu et al. 2023).

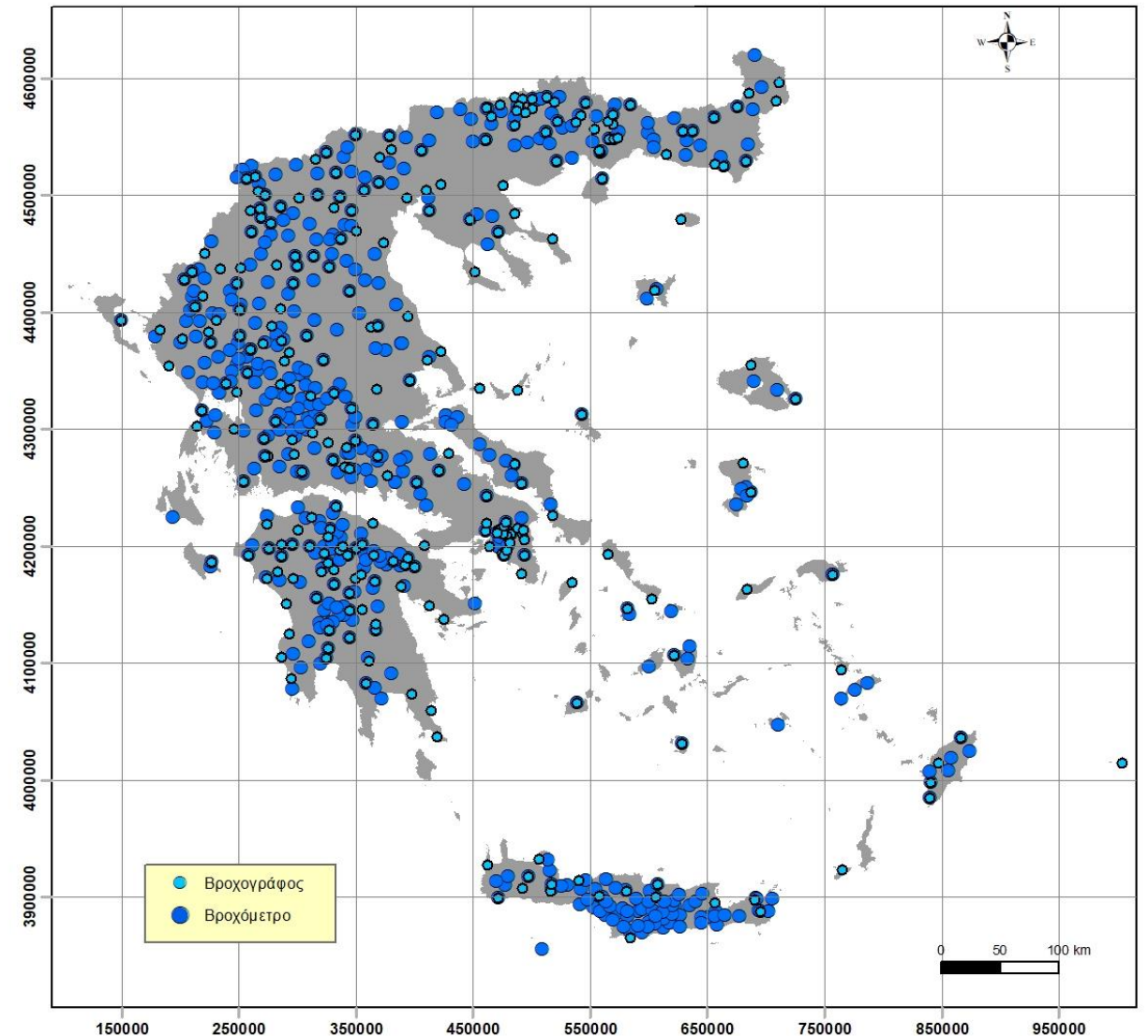


- Η **πλήρης** έκδοση του μοντέλου αξιοποιείται επίσης για ερευνητικούς, προς το παρόν, σκοπούς (Amin et al. 2024).

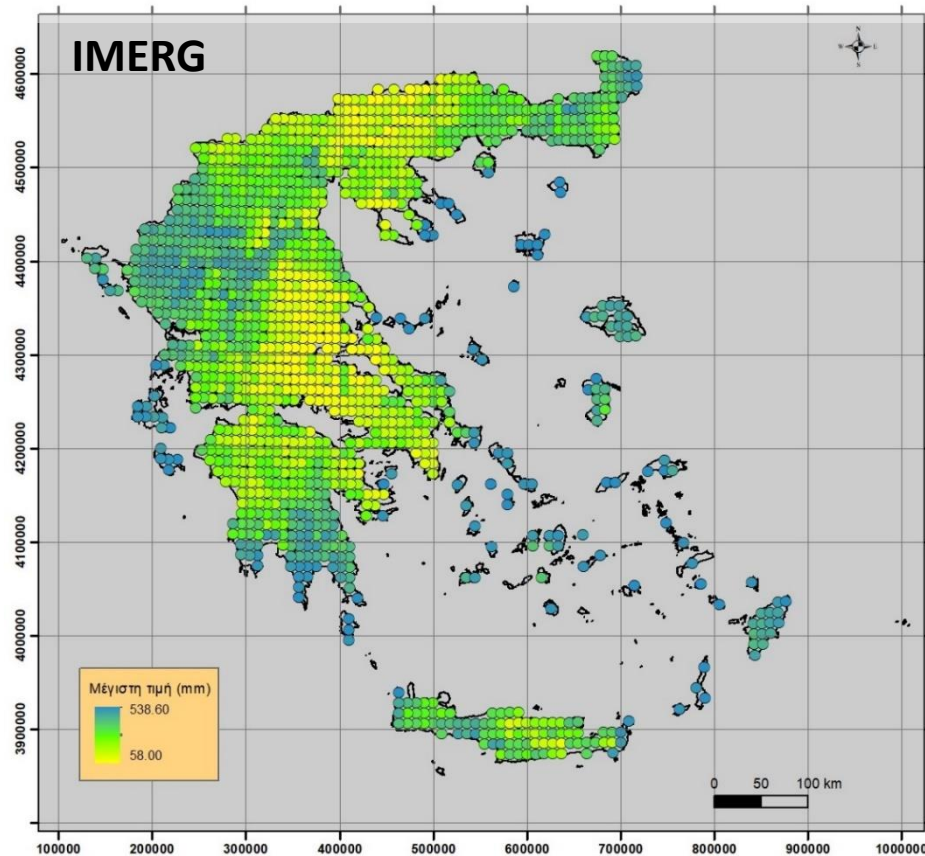


Δίκτυο βροχομετρικών σταθμών της Ελλάδας

- Από το αρχικό σύνολο των 940 σταθμών και μετά από σχολαστική επεξεργασία ποιοτικού ελέγχου, συντάξαμε ένα τελικό σύνολο δεδομένων 783 σταθμών, που περιλαμβάνει:
 - 503 βροχόμετρα ημερήσιων καταγραφών, 130 εκ των οποίων σε τοποθεσίες όπου υπάρχει επίσης και βροχογράφος.
 - 280 βροχογράφοι με καταγραφές σε κλίμακα πυκνότερη της ημερήσιας.
- Οι σταθμοί κατανέμονται γεωγραφικά σε 651 τοποθεσίες.
- Το μεγαλύτερο διαθέσιμο δείγμα (Λόφος Νυμφών στην Αθήνα) καλύπτει την περίοδο από το 1860 έως το 2022.

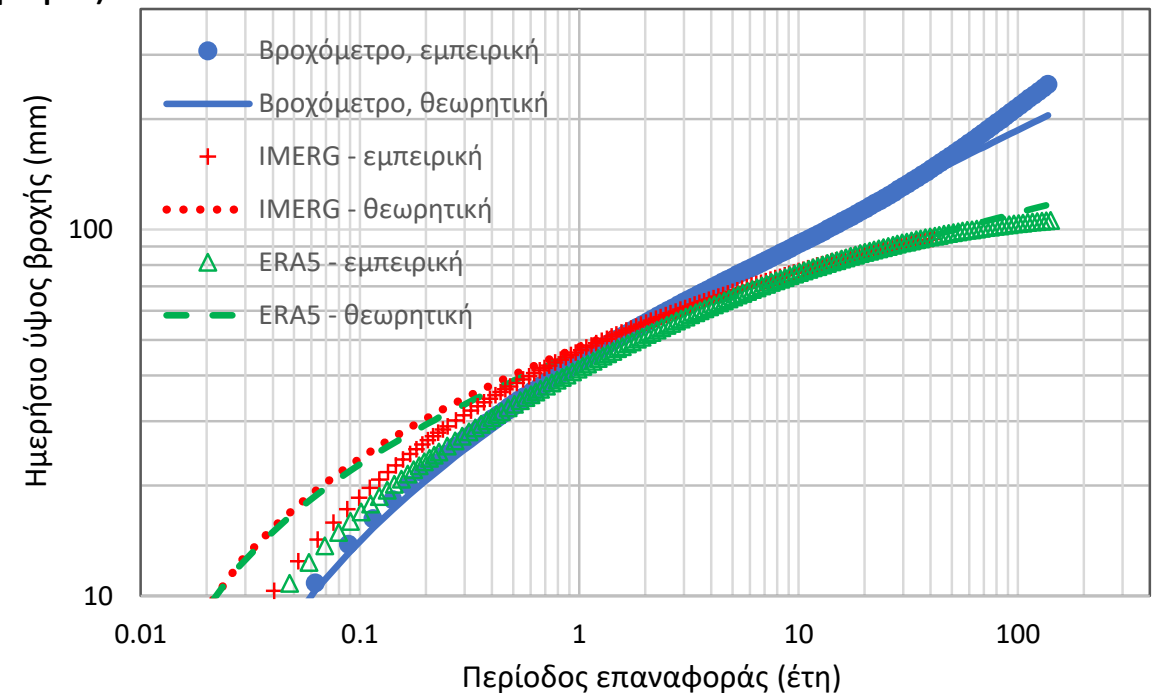


Μη συμβατικά δεδομένα βροχοπτώσεων



- Και τα δύο σύνολα δεδομένων (ειδικά το IMERG) υπεκτιμούν τα υψηλότερα ύψη βροχής (όπως φαίνεται στο παράδειγμα για τον σταθμό Καρδίτσας) και αποδείχθηκαν ακατάλληλα για την κατασκευή όμβριων καμπυλών.

- Από τα διαθέσιμα δορυφορικά δεδομένα, διερευνήσαμε τη χρησιμότητα του συνόλου δεδομένων IMERG της NASA (ημίωρο χρονικό βήμα σε χωρική ανάλυση 0.1° , περίοδος 2000-σήμερα).
- Από τα δεδομένα επανανάλυσης, διερευνήσαμε τη χρησιμότητα του συνόλου δεδομένων ERA5 του ευρωπαϊκού κέντρου μεσοπρόθεσμων προγνώσεων καιρού (ημερήσιο χρονικό βήμα σε χωρική ανάλυση 0.25° , περίοδος 1950-σήμερα).



Μεθοδολογία μοντελοποίησης χωρικής μεταβλητότητας

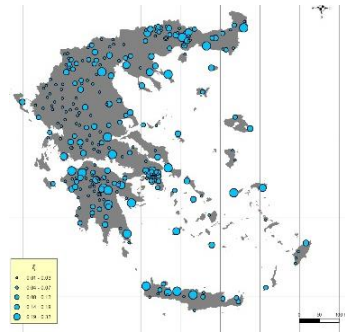
1

Αρχικά, εκτελείται ανεξάρτητη προ-εκτίμηση των παραμέτρων με βάση τα δεδομένα κάθε σταθμού.

2

Στη συνέχεια, αξιολογείται η χωρική μεταβλητότητα των παραμέτρων ως προς την ύπαρξη:

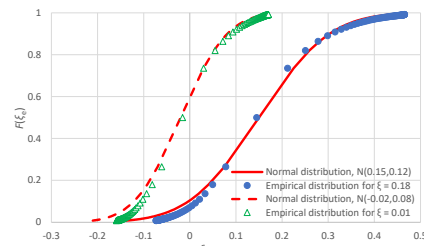
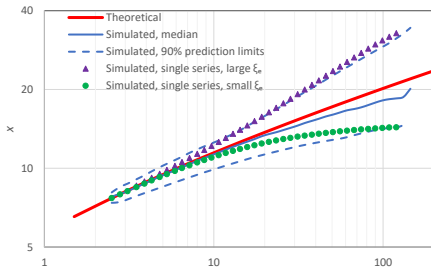
- κυρίως **τυχαίων** μοτίβων



3

Ταυτοποιούνται **κοινές** τιμές παραμέτρων

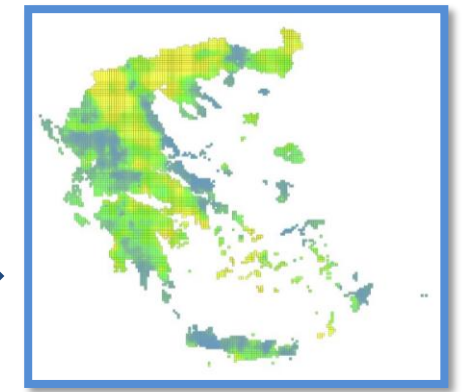
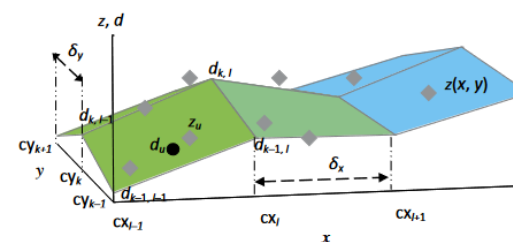
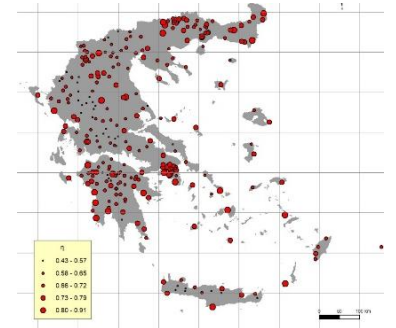
- χρησιμοποιώντας ταυτόχρονη βελτιστοποίηση,
- και στοχαστικές προσομοιώσεις.



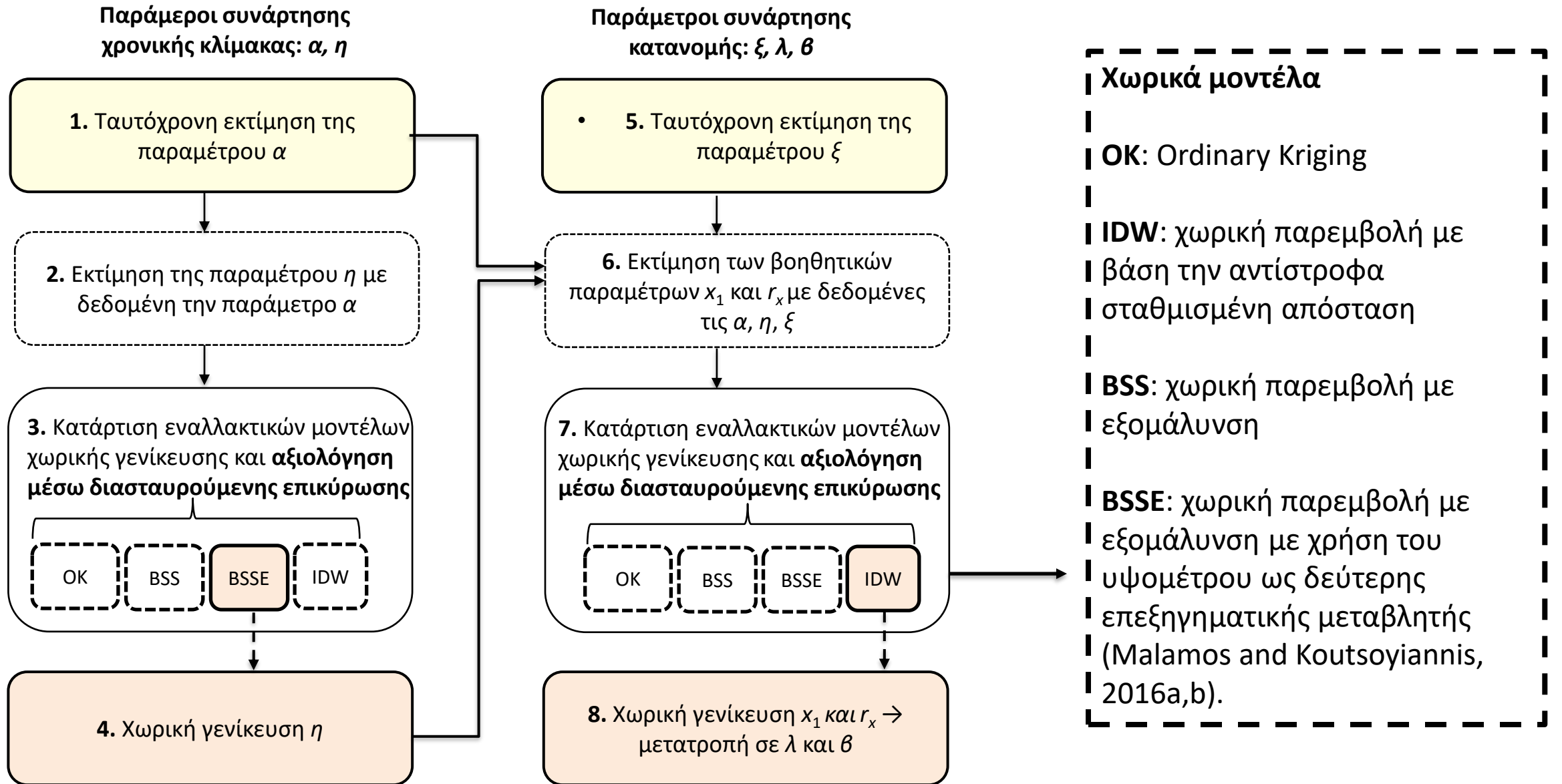
4

Μοντελοποιείται η χωρική μεταβολή μέσω **χωρικών μοντέλων**.

- κυρίως **συστηματικών** μοτίβων

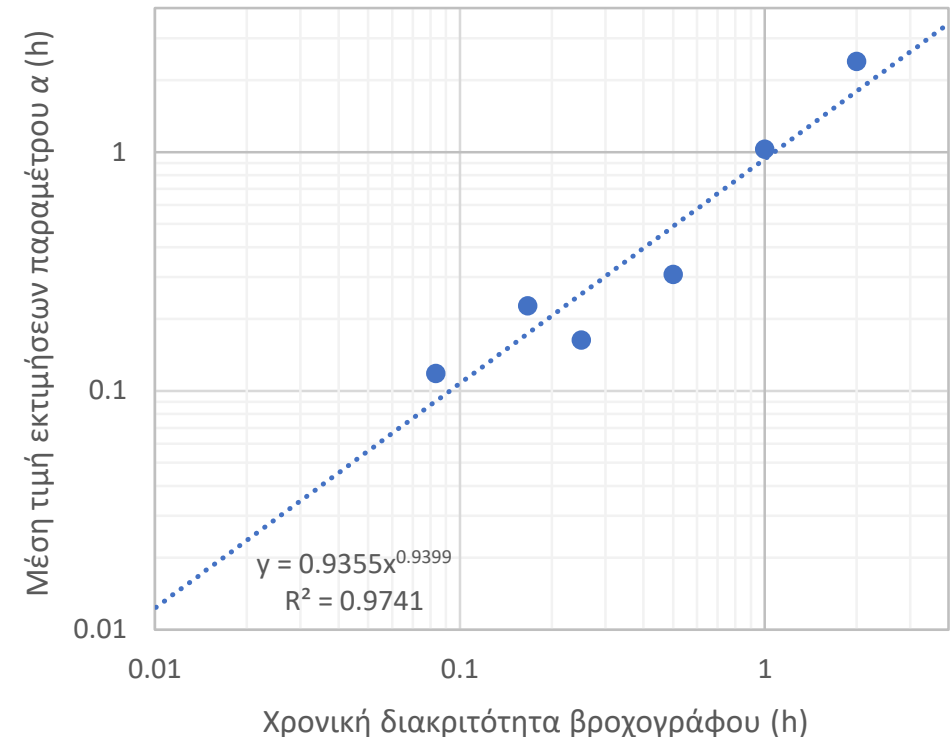
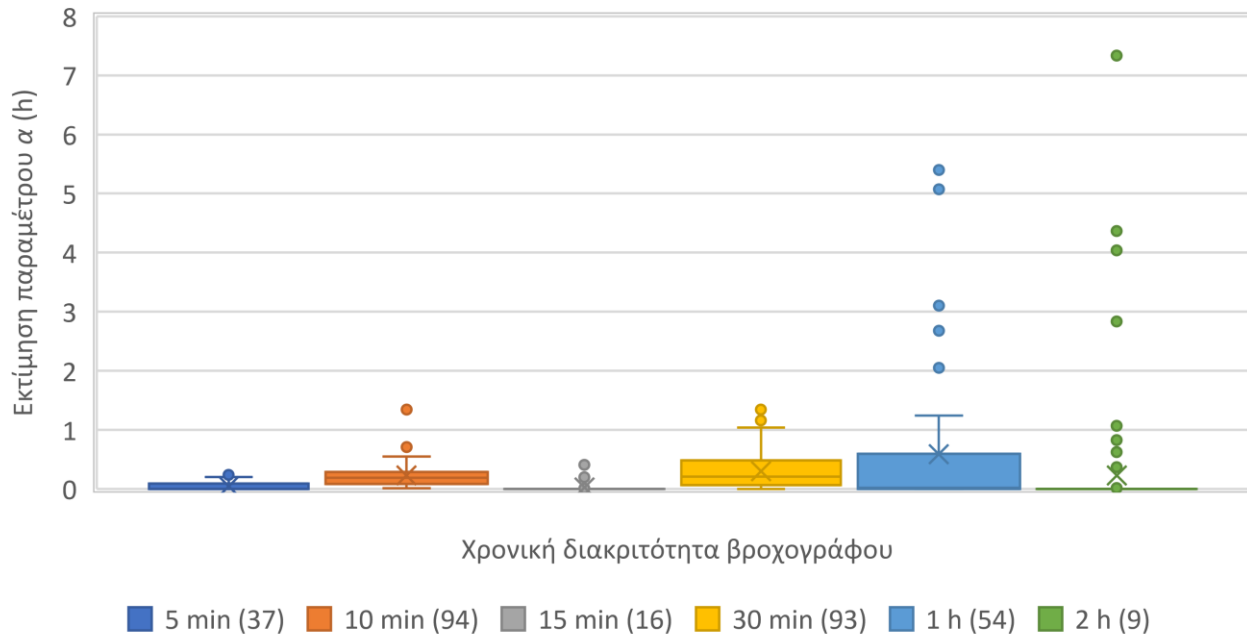


Βήματα χωρικής εκτίμησης και γενίκευσης



Χωρική γενίκευση της παραμέτρου χρονικής κλίμακας – α (I)

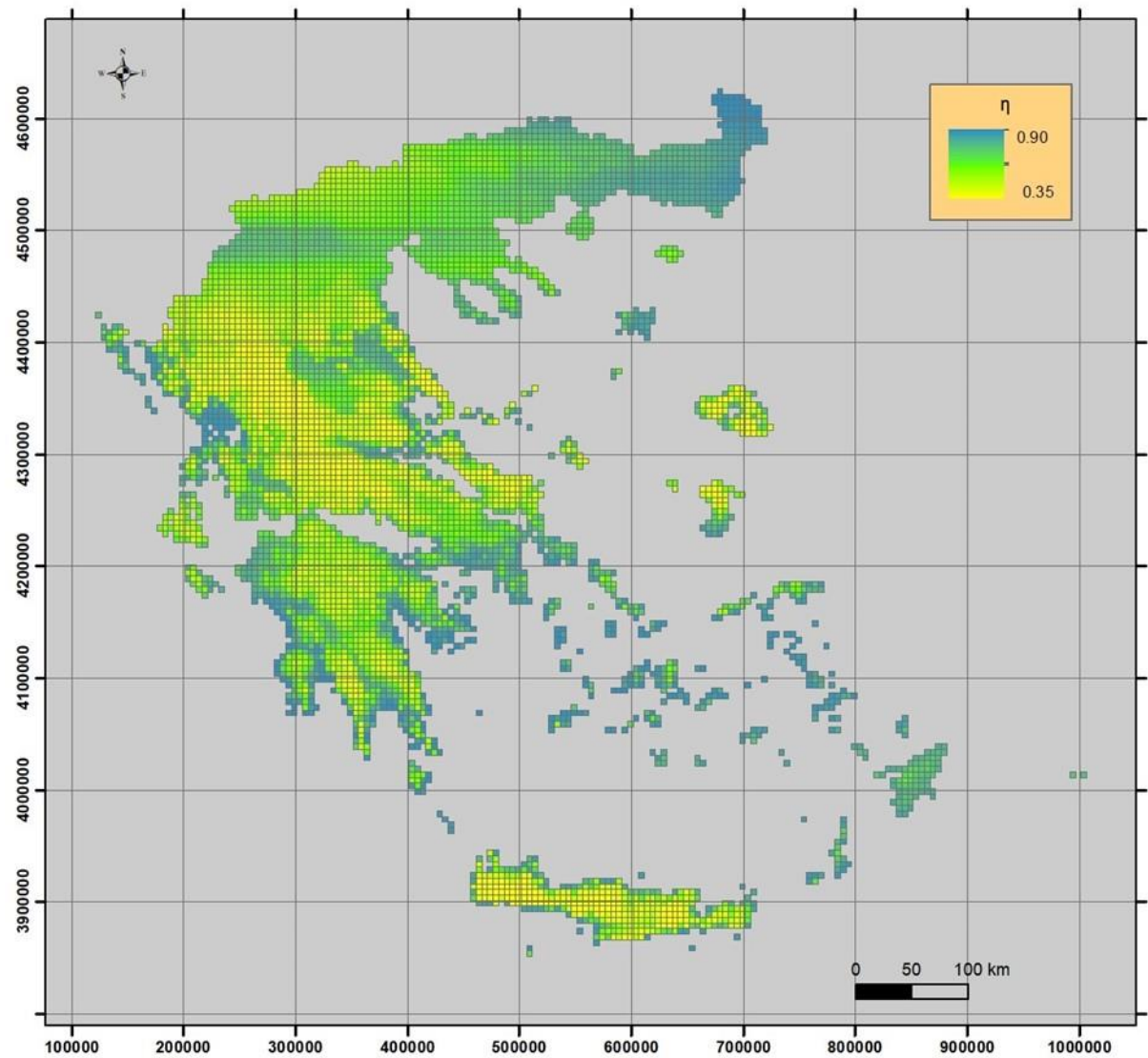
- Η εκτίμηση της παραμέτρου α εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη χρονική ανάλυση του οργάνου μέτρησης. Συγκεκριμένα, σε σταθμούς με λεπτή χρονική διακριτότητα (5 ή 10 λεπτά) προκύπτουν μικρές τιμές της παραμέτρου α — και αντιστρόφως.
- Αυτό ερμηνεύεται ως τεχνητό στατιστικό αποτέλεσμα παρά ως ένδειξη ότι αντιπροσωπεύει τη φυσική πραγματικότητα (η διακριτότητα ενός οργάνου δεν έχει σχέση με φυσικές διεργασίες).



Χωρική γενίκευση παραμέτρων χρονικής κλίμακας – α (II)

- Δεδομένης της μεγάλης ευαισθησίας της παραμέτρου α ως προς τη χρονική διακριτότητα των δεδομένων, τελικώς προσδιορίζουμε μια ενιαία τιμή αυτής της παραμέτρου για όλη την Ελλάδα, με την εξής διαδικασία:
 - Επιλέγουμε τους 53 σταθμούς με τις μεγαλύτερου μήκους καταγραφές με χρονική διακριτότητα 30 λεπτών ή μικρότερη, κατανεμημένους σε όλα τα υδατικά διαμερίσματα.
 - Επανεκτιμούμε τις παραμέτρους της εξίσωσης $a(k)$, α και η , μέσω βελτιστοποίησης στην οποία τίθεται ως περιορισμός η τιμή της α παραμέτρου να είναι ίδια σε όλους τους σταθμούς.
- Ως αποτέλεσμα αυτής της μεθοδολογίας, εκτιμήθηκε η κοινή τιμή $\alpha = 0.18$ h, η οποία χρησιμοποιείται σε όλες τις περαιτέρω αναλύσεις.

Χωρική γενίκευση της παραμέτρου η

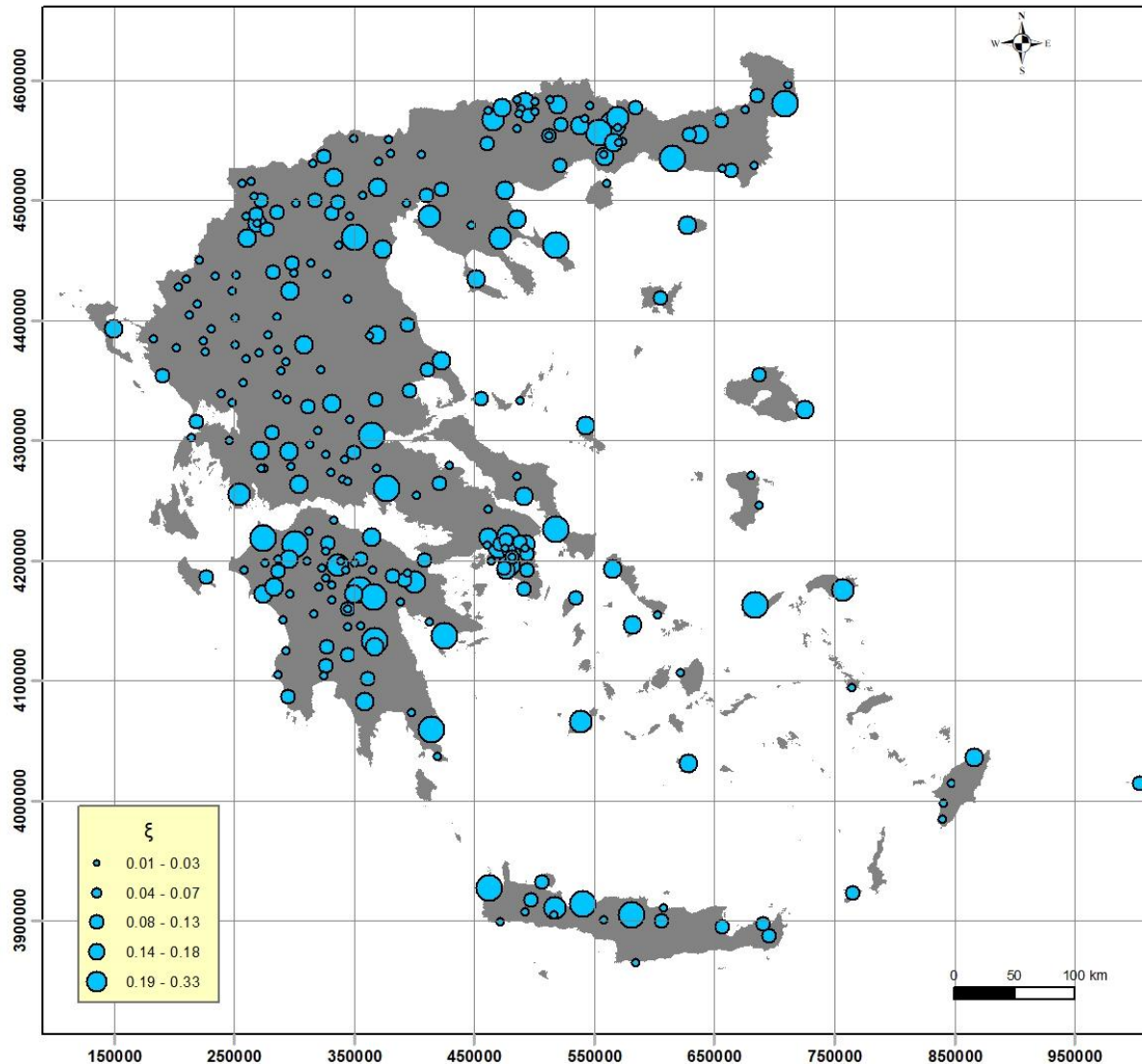


- Προκύπτει ως βέλτιστο το μοντέλο εξομάλυνσης BSSE με το υψόμετρο (που προέρχεται από το SRTM της NASA) ως πρόσθετη επεξηγηματική μεταβλητή.

	Σφάλματα στο σύνολο των βροχογράφων	Διασταυρούμενη επικύρωση (Leave-one-out cross validation, LOOCV)
Μεροληψία (MBE)	0.00	0.00
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	0.05	0.06
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	0.06	0.07
Αποτελεσματικότητα Nash-Sutcliffe (EF)	0.57	0.40
Συντελεστής Προσδιορισμού (R^2)	0.57	0.40

- Εντοπίζεται αντίστροφη σχέση της παραμέτρου η με το υψόμετρο (δηλαδή οι χαμηλότερες τιμές της παραμέτρου είναι πιο πιθανές σε μεγάλα υψόμετρα).

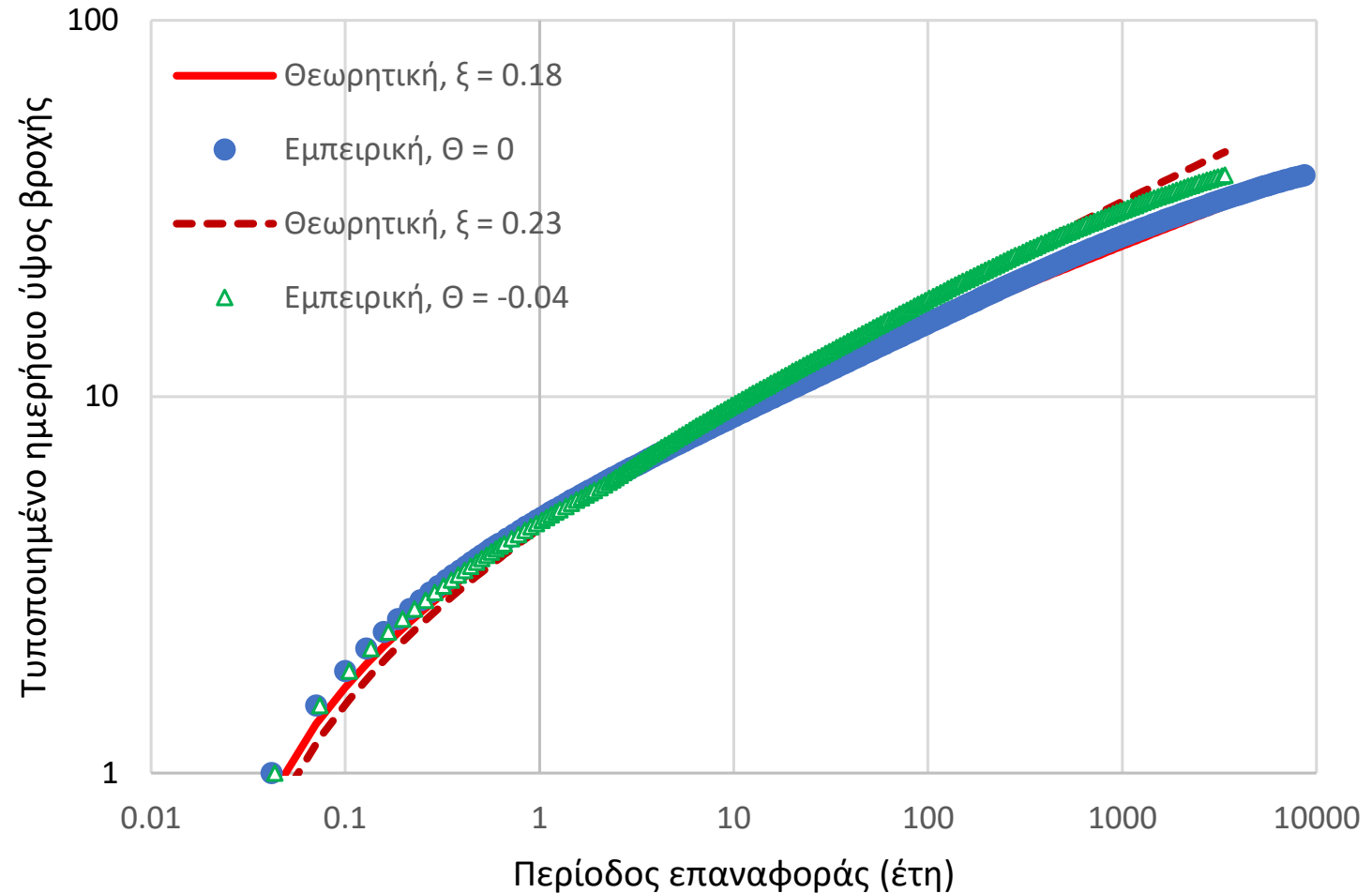
Χωρική γενίκευση των παραμέτρων κατανομής – ξ



- Αρχικά η παράμετρος ξ (δείκτης ουράς της κατανομής) υπολογίστηκε μεμονωμένα ανά σταθμό και ανά όργανο, και ταυτόχρονα με τη βελτιστοποίηση των υπόλοιπων παραμέτρων των όμβριων καμπυλών.
- Διαπιστώνουμε:
 - Τη μεγάλη χωρική μεταβλητότητα των εκτιμήσεων της παραμέτρου, η οποία αντικατοπτρίζει την αβεβαιότητα μέτρησης της μέγιστης βροχόπτωσης και εκτίμησης της παραμέτρου από δείγματα μικρού μήκους.
 - Την απουσία συστηματικών γεωγραφικών μοτίβων στις εκτιμήσεις της παραμέτρου.

Χωρική γενίκευση των παραμέτρων κατανομής – ξ (II)

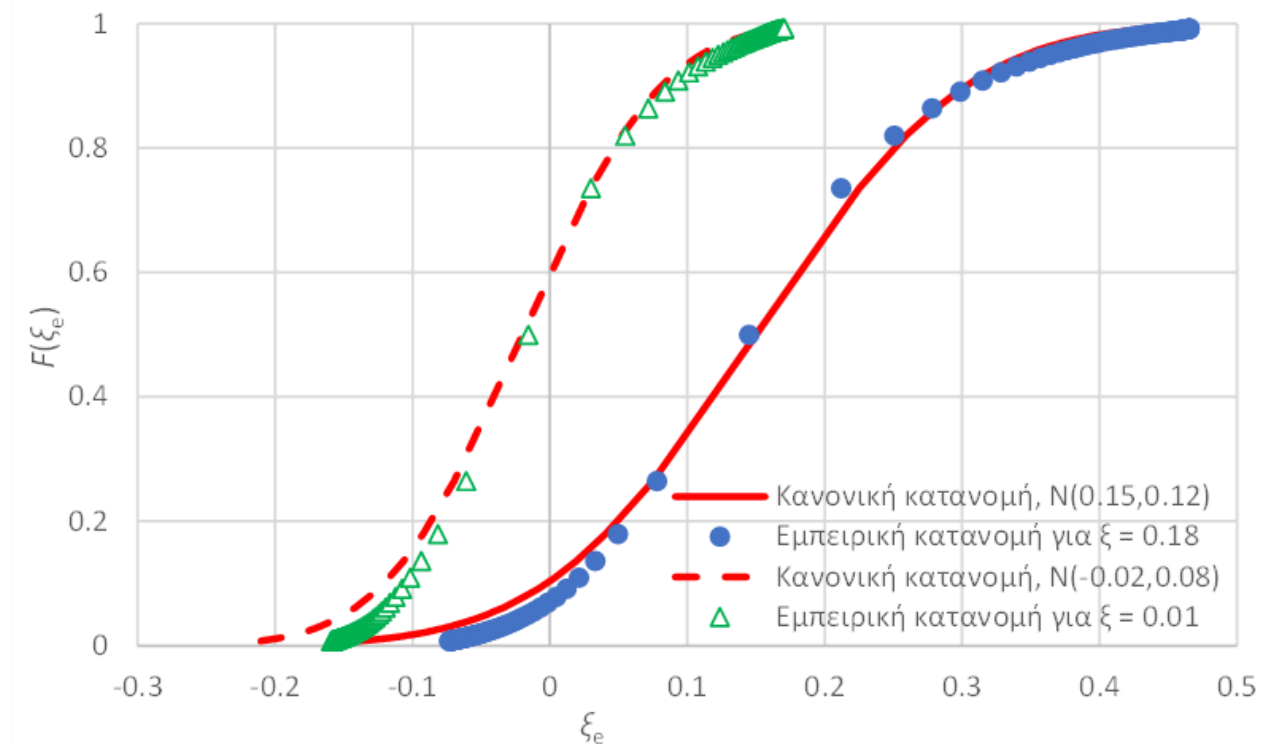
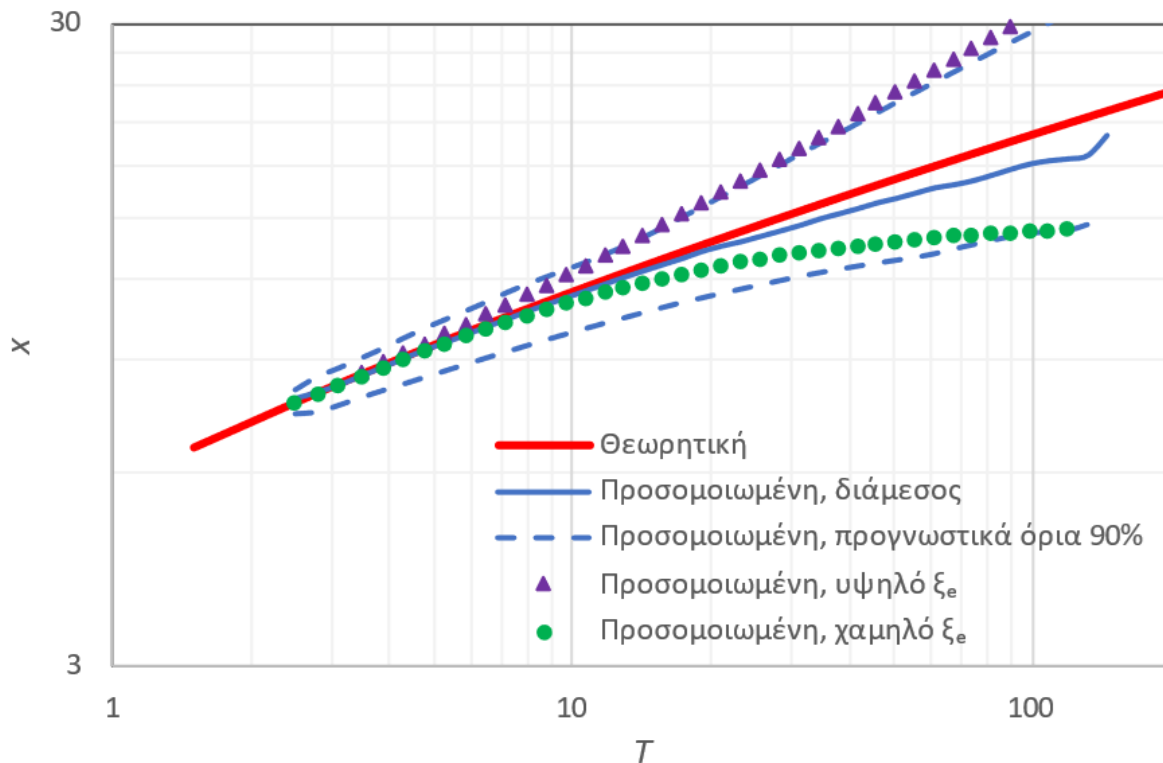
- Υποθέτουμε ότι η μεταβλητότητα είναι στατιστικό αποτέλεσμα, και επιπλέον:
 - Ενοποιούμε όλα τα αξιόπιστα δείγματα σε μια συγκεκριμένη χρονική κλίμακα μετά από τυποποίηση με τον μέσο όρο.
 - Υπολογίζουμε μια μοναδική τιμή του ξ από το ενοποιημένο δείγμα.
- Ειδικότερα, χρησιμοποιούμε 61 σταθμούς σε όλη την ελληνική επικράτεια που έχουν τουλάχιστον 60 χρόνια πλήρεις ημερήσιες χρονοσειρές και με βάση αυτές:
 - Το ξ υπολογίζεται σε 0.18 εάν οι διαφορετικοί σταθμοί θεωρηθούν ανεξάρτητοι ($\Theta = 0$) ή μεγαλύτερο αν υποθεθεί ότι υπάρχει εξάρτηση ($\xi = 0.23$ για $\Theta = -0.04$, όπου Θ υποδηλώνει μεροληψία (βλ. Koutsoyiannis, 2023 για λεπτομέρειες).
 - Η ελάχιστη τιμή $\xi = 0.18$ αποτελεί την τελική επιλογή.



Χωρική γενίκευση των παραμέτρων κατανομής – ξ (III)

Μέσω προσομοίωσης Monte Carlo (70 προσομοιώσεις με κατανομή Pareto και μήκος 70 χρόνια καθεμιά) προκύπτει ότι:

- Υπάρχει μεγάλη μεταβλητότητα της εκτιμώμενης τιμής του ξ , σε εύρος από ~ -0.1 έως ~ 0.5 , όταν η πραγματική τιμή είναι $\xi = 0.18$.
- Ενισχύεται η υπόθεση ενός ενιαίου $\xi = 0.18$ για όλη την Ελλάδα.



Διερεύνηση εναλλακτικών επιλογών χωρικής γενίκευσης παραμέτρων β και λ

- Εκτός από την άμεση χωρική γενίκευση των παραμέτρων β και λ , διερευνήσαμε τη χρήση εναλλακτικών ποσοτήτων που συνδέονται με χαρακτηριστικές εντάσεις βροχής, καθώς η στατιστική συμπεριφορά τους στο χώρο είναι πιο εύρωστη και καταλληλότερη για χωρική γενίκευση (καλύτερη χωρική συνοχή).
- Συγκεκριμένα, εκφράζουμε τις παραμέτρους β και λ ως συναρτήσεις είτε των εντάσεων βροχοπτώσεων x_1 και x_2 που αντιστοιχούν σε περιόδους επαναφοράς $T_1 = 2$ χρόνια και $T_2 = 100$ χρόνια, αντίστοιχα, ή ισοδύναμα, του x_1 και του λόγου $r_x := x_2/x_1$, ως εξής:

$$\beta = \left(\frac{r_x - r_T}{r_x - 1} \right)^{1/\xi} T_1, \quad r_T := \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^\xi, \quad r_x := \frac{x_2}{x_1}$$
$$\lambda = b \frac{r_x - r_T}{r_T - 1} x_1, \quad b := \left(1 + \frac{k}{\alpha} \right)^\eta$$

- Αφού εξετάσαμε τις συσχετίσεις μεταξύ των εναλλακτικών συνόλων παραμέτρων, επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε το ζεύγος παραμέτρων x_1 και r_x , δεδομένου ότι τα δύο μεγέθη είναι ασυσχέτιστα μεταξύ τους και επομένως το περιεχόμενο πληροφοριών του ζεύγους δεν εμπεριέχει πλεονασμό.
- Οι εντάσεις x_1 και x_2 μοντελοποιούνται στην κλίμακα 24 ωρών ($\kappa = 24$ ώρες).

Χωρική γενίκευση του x_1 και r_x

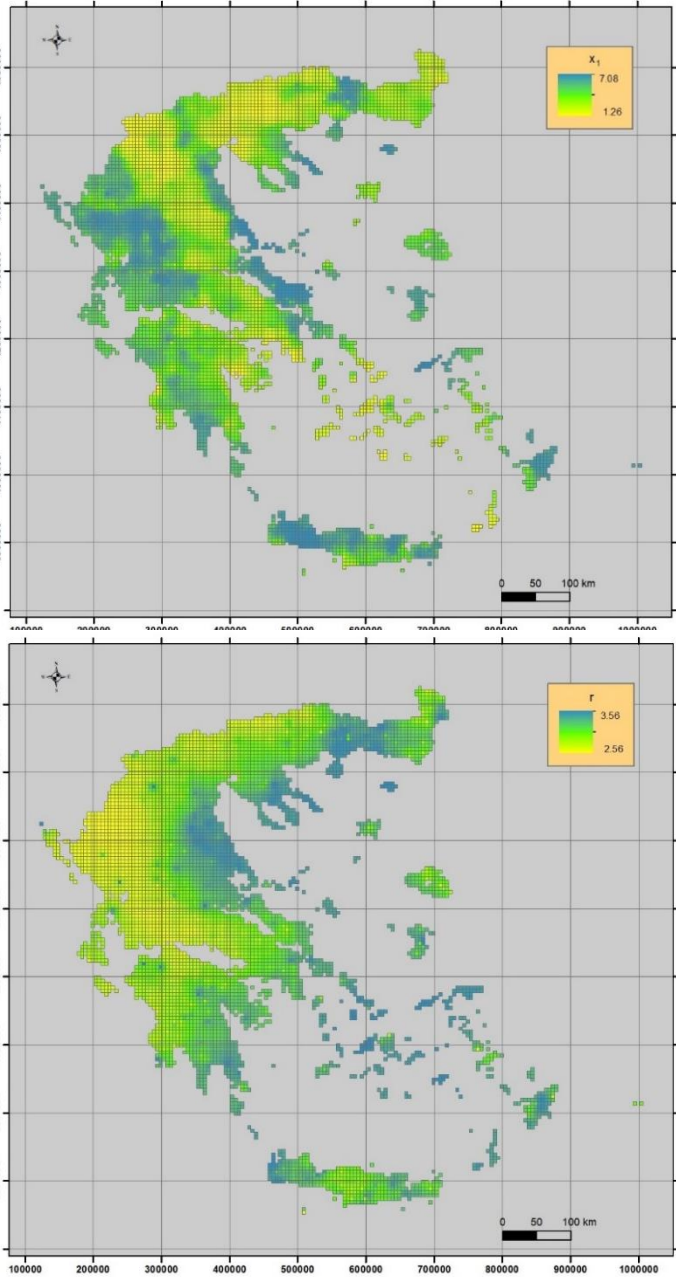
Στην περίπτωση των παραμέτρων x_1 και r_x , τα καλύτερα στατιστικά χαρακτηριστικά με βάση τη διασταυρούμενη επικύρωση (Leave-one-out cross validation) προέκυψαν από την εφαρμογή του χωρικού μοντέλου της μεθόδου IDW.

Στατιστικά χαρακτηριστικά σφαλμάτων προσαρμογής IDW για το x_1 :

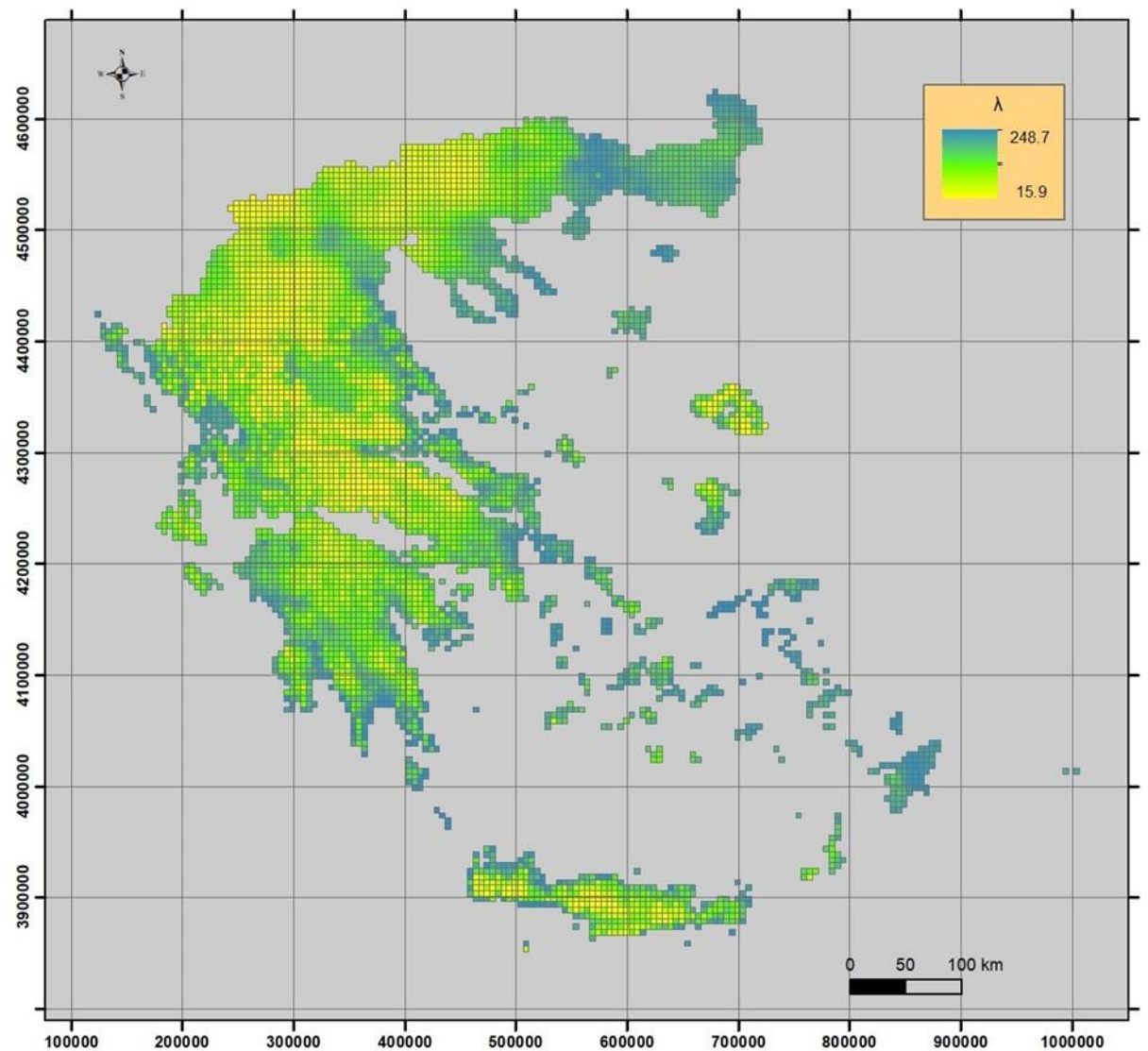
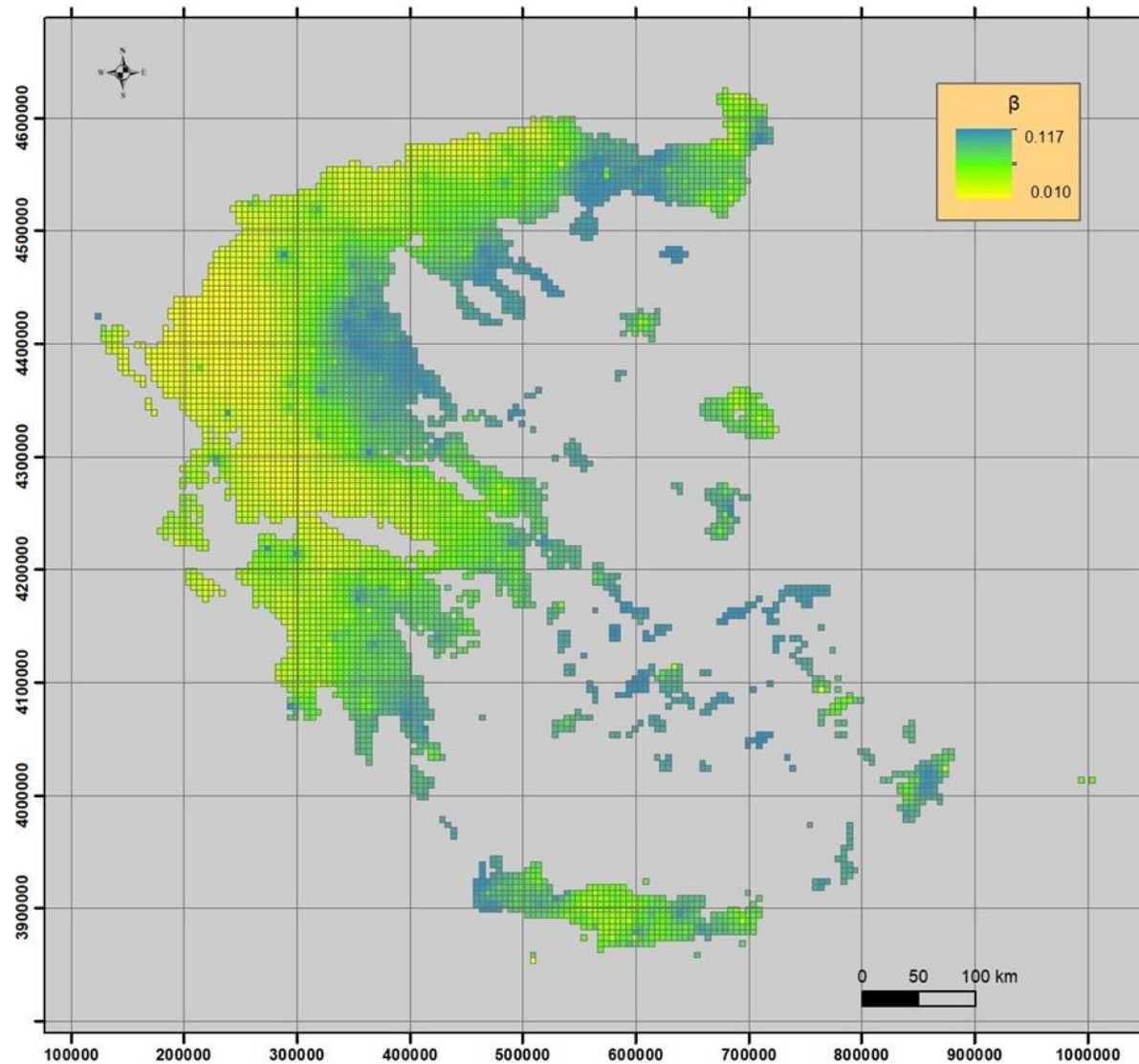
	Σφάλματα στο σύνολο των σταθμών	Σφάλματα επικύρωσης (Leave-one-out-cross-validation, LOOCV)
Μεροληψία (MBE, mm/h)	0.01	0.01
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE, mm/h)	0.13	0.46
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE, mm/h)		0.67
Nash-Sutcliffe efficiency (EF)	0.24	0.42
Συντελεστής προσδιορισμού (R^2)	0.92	0.44

Στατιστικά χαρακτηριστικά σφαλμάτων προσαρμογής IDW για το r_x :

	Σφάλματα στο σύνολο των σταθμών	Σφάλματα επικύρωσης (Leave-one-out-cross-validation, LOOCV)
Μεροληψία (MBE)	0.00	-0.01
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	0.12	0.17
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	0.19	0.29
Nash-Sutcliffe efficiency (EF)	0.56	0.28
Συντελεστής προσδιορισμού (R^2)	0.72	0.32



Τελική χωρική γενίκευση των παραμέτρων κατανομής – β & λ



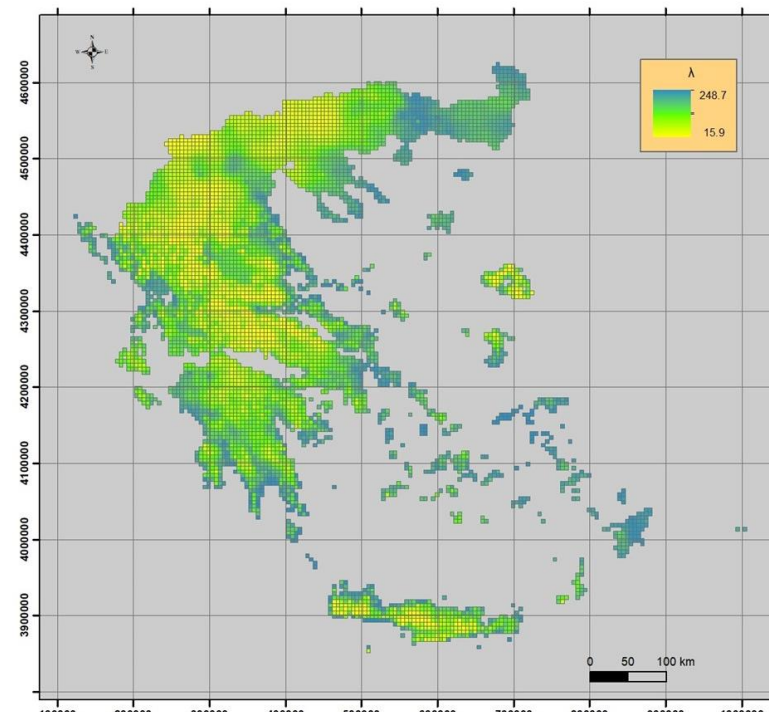
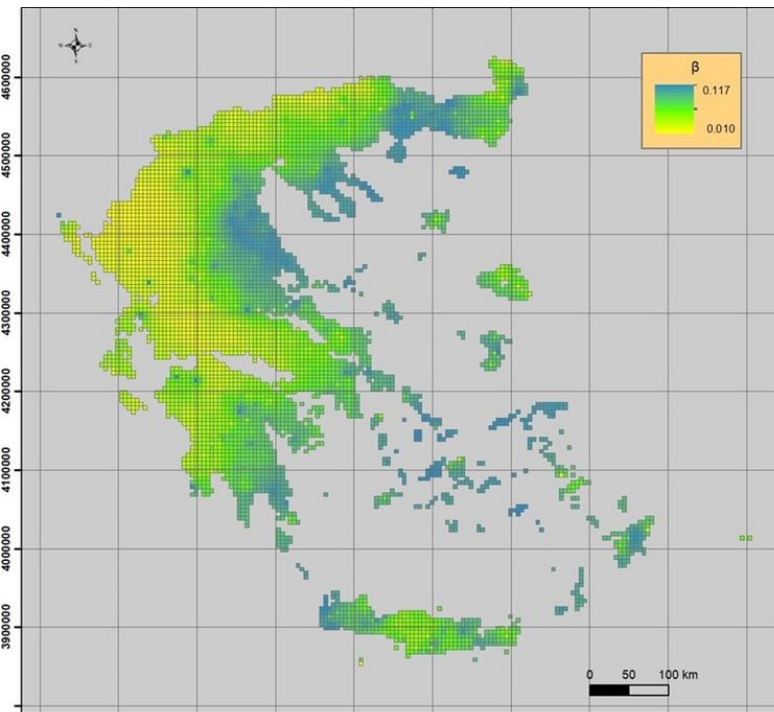
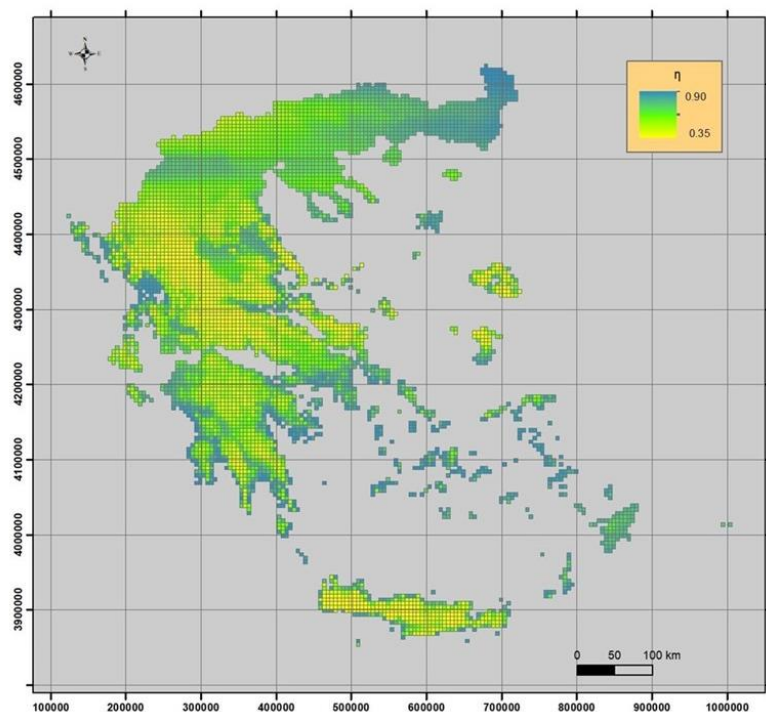
Τελική παραμετροποίηση

Η τελική γενικευμένη σχέση όμβριων καμπυλών για την ένταση της βροχόπτωσης x (mm/h), περίοδο επαναφοράς T (έτη) και χρονική κλίμακα κ (h) προκύπτει ως:

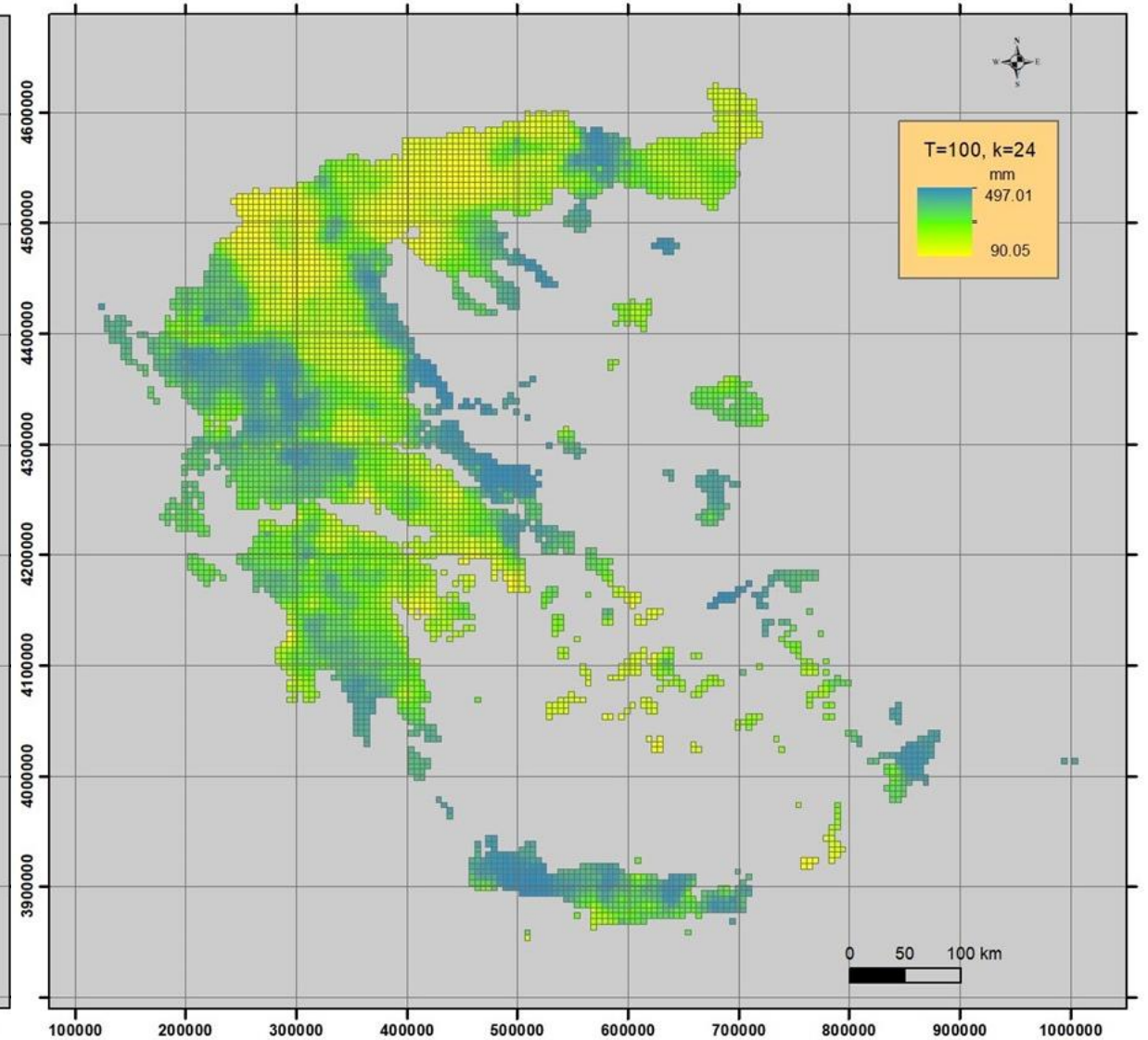
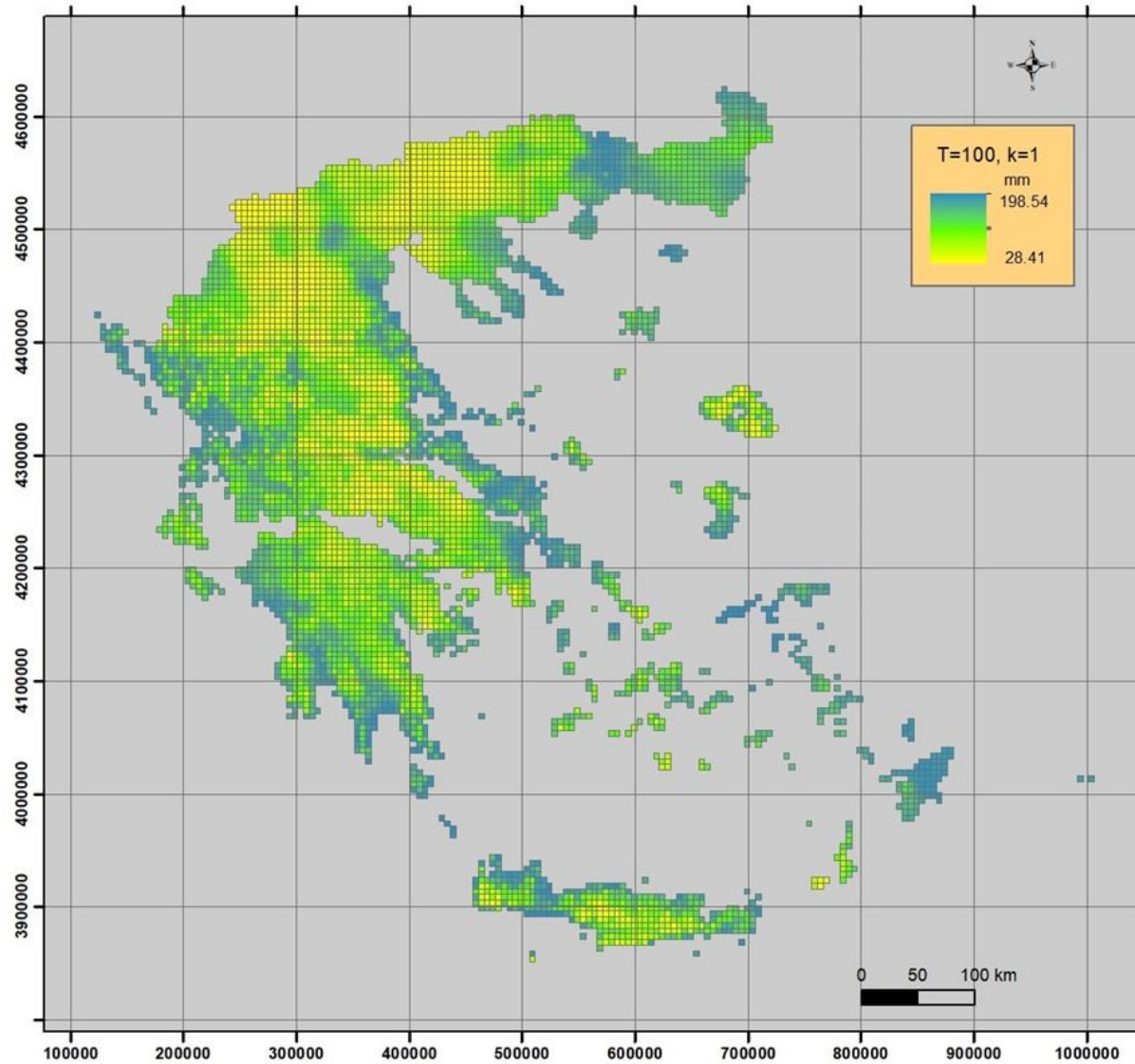
$$x = \lambda_* \frac{(T/\beta_*)^\xi - 1}{(1 + \kappa/\alpha)^{\eta_*}}$$

με τις ακόλουθες πέντε παραμέτρους

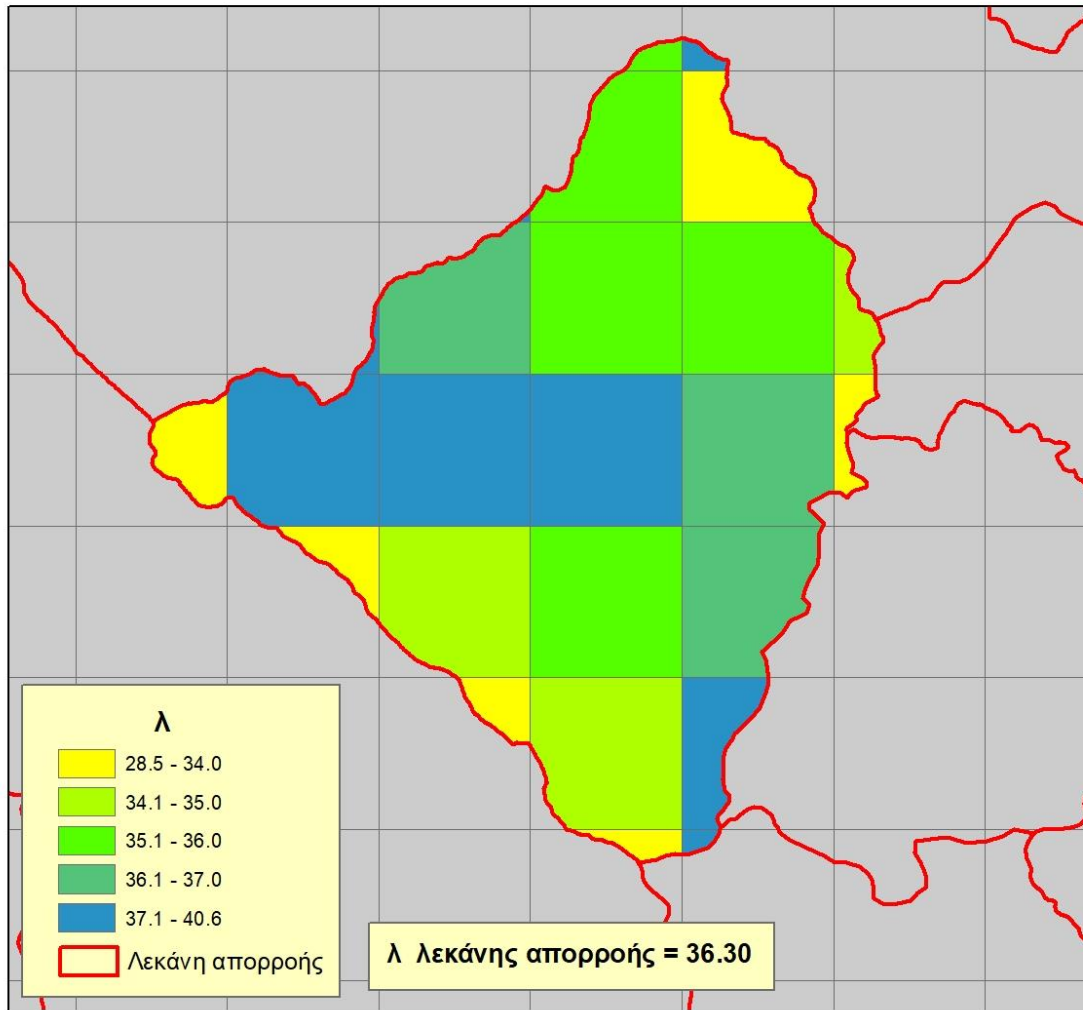
- ο παράμετρο χρονικής κλίμακας $\alpha = 0.18$ h
- ο δείκτη ουράς $\xi = 0.18$,
- οι τρεις χωρικά μεταβαλλόμενες παραμέτρους $\eta_* [-]$, β_* (έτη) και λ_* (mm/h) :



Χάρτες ύψους βροχής σχεδιασμού



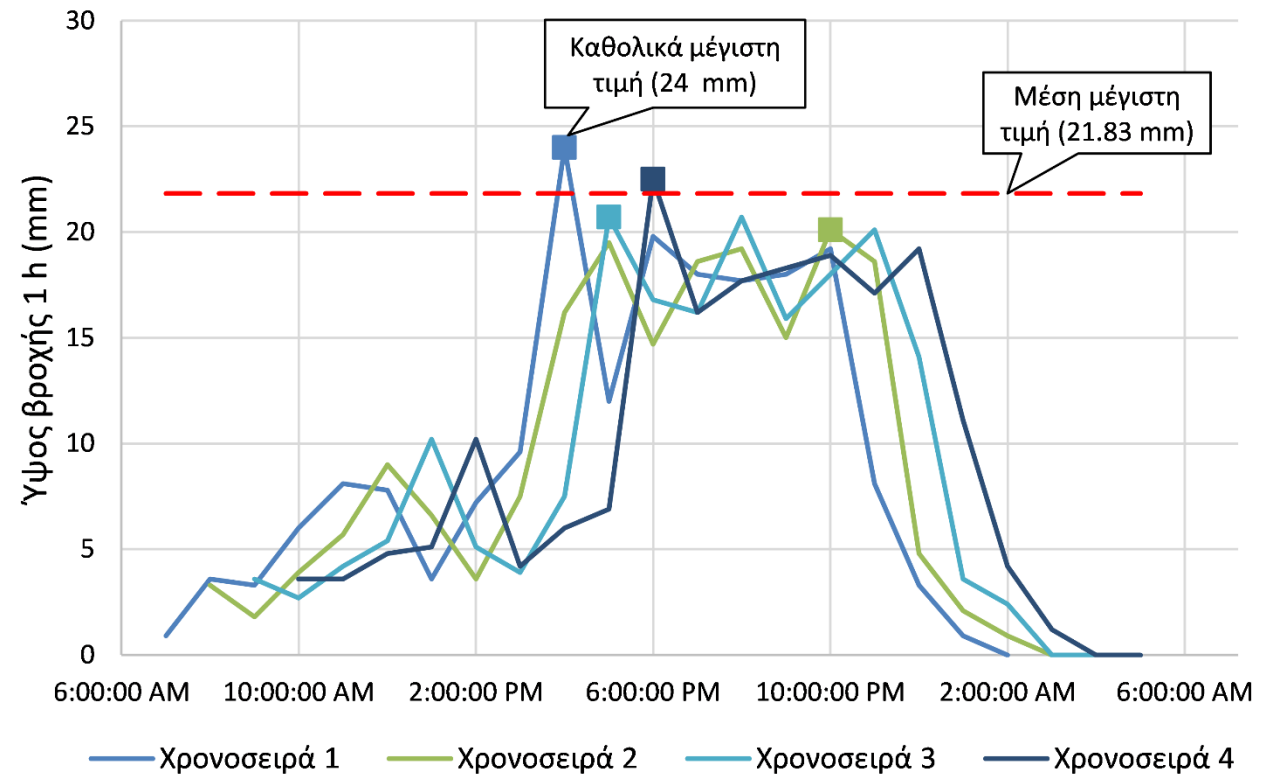
Όμβριες καμπύλες σε επίπεδο λεκάνης απορροής



Οι όμβριες καμπύλες για οποιαδήποτε περιοχή εντός της ελληνικής επικράτειας εκτιμώνται με βάση τις κοινές παραμέτρους, ενώ για τις χωρικά μεταβαλλόμενες παραμέτρους λαμβάνεται ο σταθμισμένος μέσος όρος των τιμών του πλέγματος που εμπίπτουν στην περιοχή.

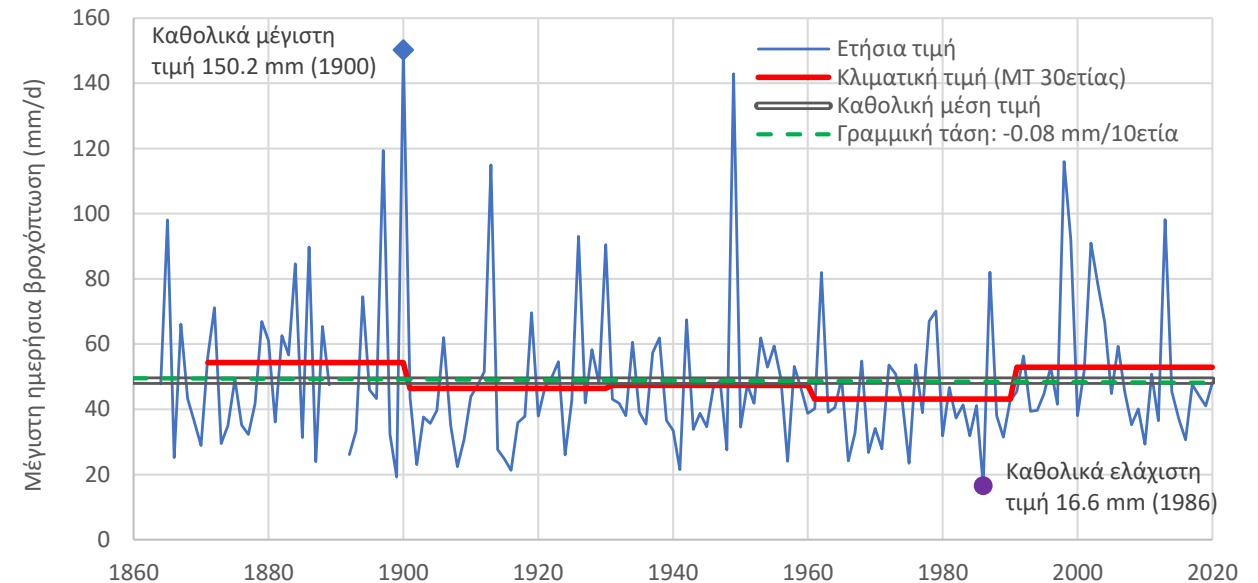
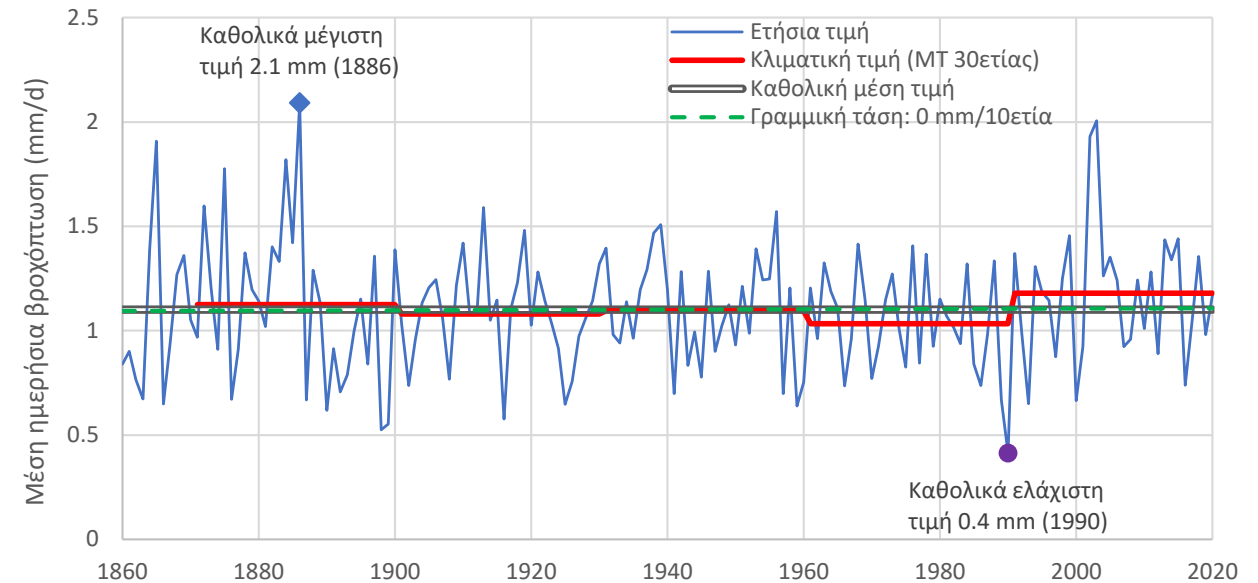
Όμβριες καμπύλες – εκτίμηση περιόδου επαναφοράς επεισοδίου

Για την εκτίμηση της περιόδου επαναφοράς T , για δεδομένη χρονική κλίμακα k , ενός συγκεκριμένου επεισοδίου βροχής με βάση τις όμβριες καμπύλες προτείνεται **να λαμβάνεται η μέση μέγιστη τιμή του επεισοδίου**, η οποία είναι συνεπής με τον τρόπο κατάρτισης των όμβριων καμπυλών (μη χρήση κινούμενου παραθύρου – συντελεστή Hershfield), και όχι η καθολικά μέγιστη.



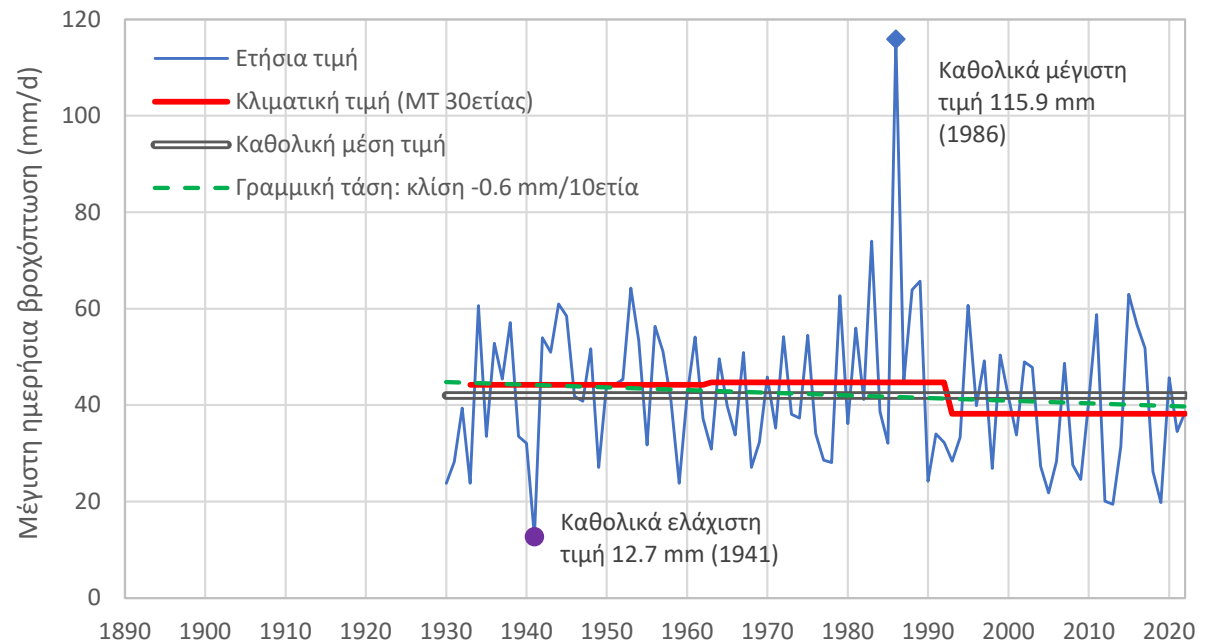
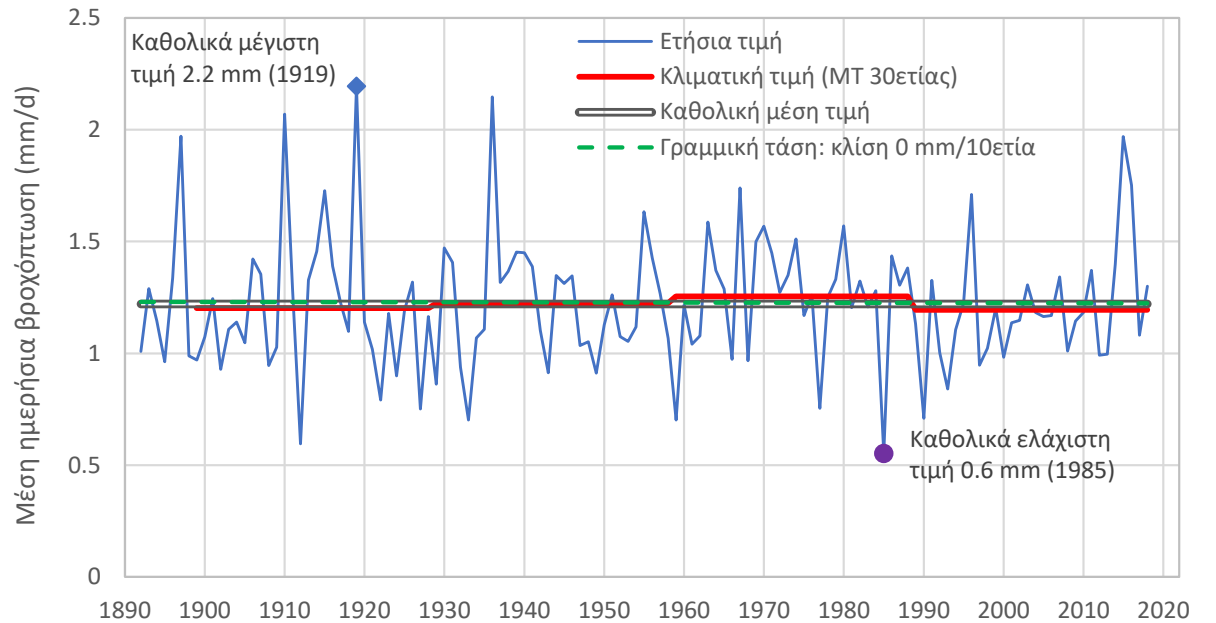
Χρονοσειρές βροχής άνω του αιώνα στην Ελλάδα: Αθήνα

- Η Αθήνα παρουσιάζει κλιματική σταθερότητα. Τα τελευταία 30 χρόνια δεν υπήρξε κανένα αξιόλογο κλιματικό γεγονός.
- Η μεγαλύτερη ετήσια βροχόπτωση στην ιστορία καταγράφηκε το υδρολογικό έτος 1885-86 και η μικρότερη το 1989-90.
- Το υψηλό ρεκόρ ύψους βροχής για όλη την περίοδο δεδομένων, 150.2 mm/d, σημειώθηκε στα τέλη του 19ου αιώνα (1899-90).



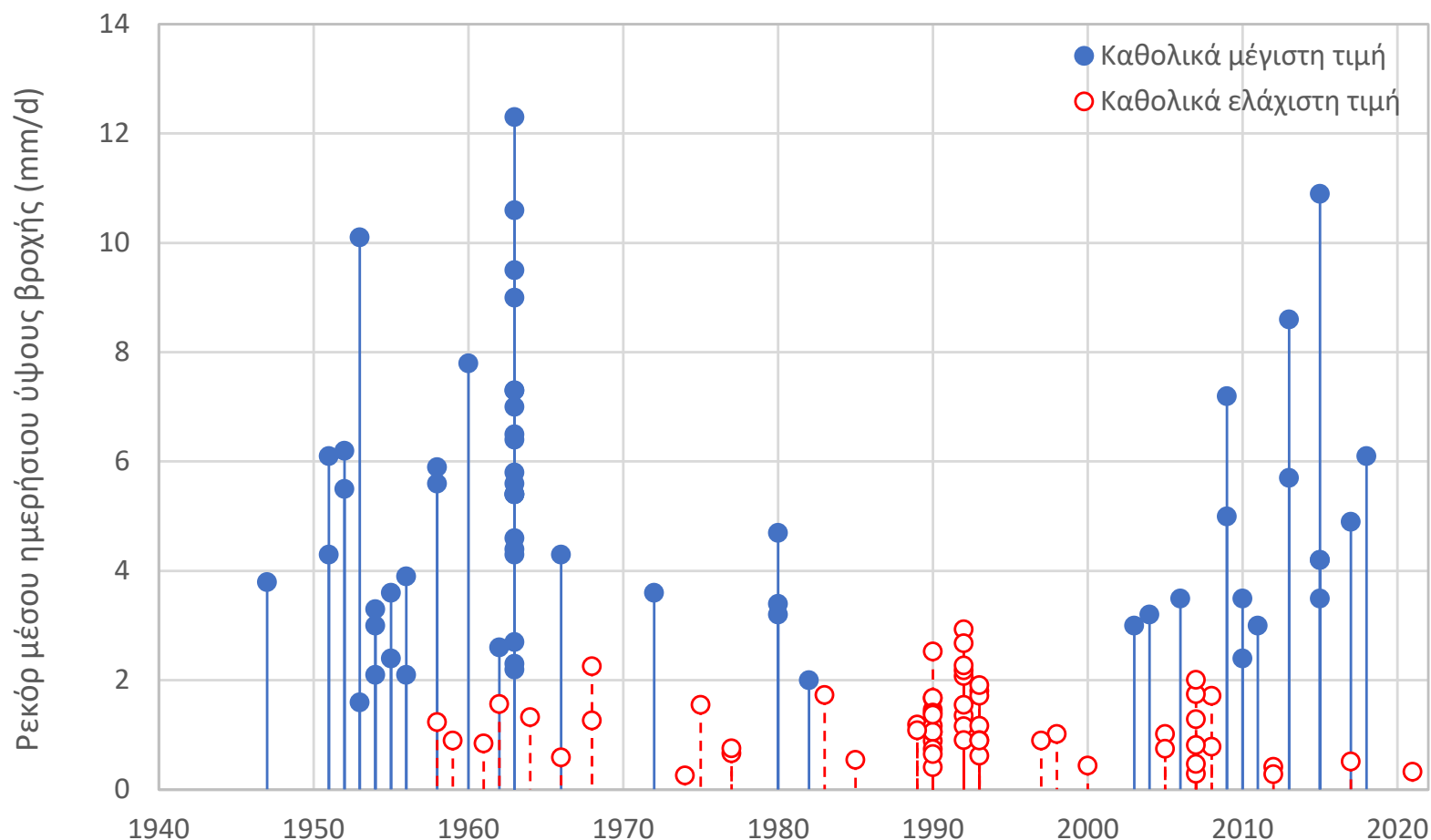
Χρονοσειρές βροχής άνω του αιώνα στην Ελλάδα: Θεσσαλονίκη

- Η Θεσσαλονίκη παρουσιάζει κλιματική σταθερότητα, παρόμοια με την Αθήνα. Τα τελευταία τριάντα χρόνια δεν υπήρξε κανένα αξιόλογο κλιματικό γεγονός.
- Η μεγαλύτερη ετήσια βροχόπτωση στην ιστορία καταγράφηκε το υδρολογικό έτος 1918-19, και η μικρότερη το 1984-85.
- Το υψηλό ρεκόρ ύψους βροχής για όλη την περίοδο δεδομένων, 115.9 mm/d, σημειώθηκε το υδρολογικό έτος 1985-86.



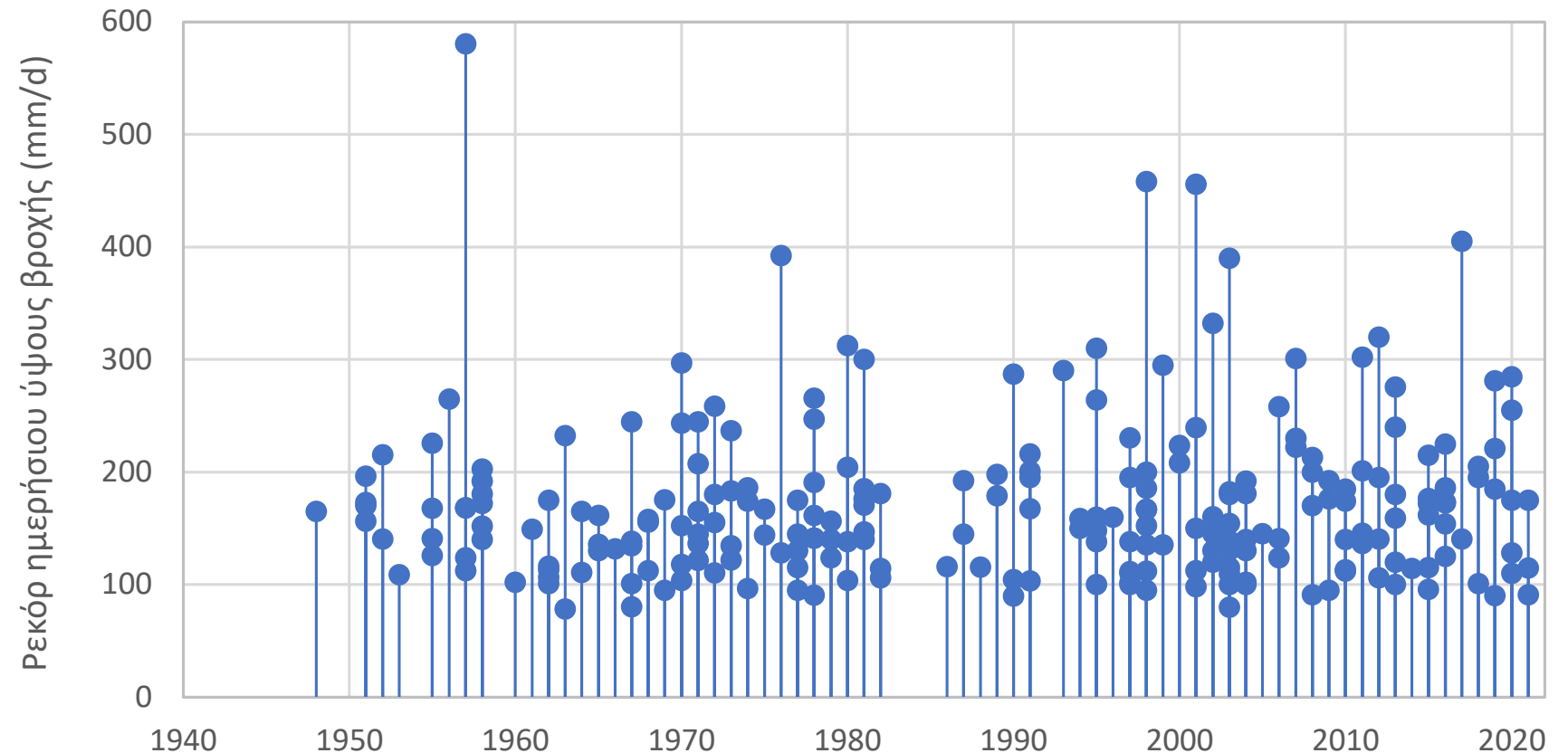
Χρονική κατανομή των ρεκόρ μέσης ημερήσιας βροχόπτωσης σε 62 σταθμούς της χώρας

- Η δεκαετία του 1950 και οι αρχές της δεκαετίας του 1960 είχαν πολλές αξιοσημείωτες βροχοπτώσεις. Περίπου το 1/3 των υψηλών ρεκόρ ετήσιων βροχοπτώσεων σημειώθηκε σε ένα μόνο έτος, το υδρολογικό έτος 1962-63.
- Η 20ετής περίοδος γύρω από το 1990 είναι εντυπωσιακά ξηρή. Συγκεκριμένα, περίπου το ήμισυ των χαμηλών καταγραφών ετήσιων βροχοπτώσεων σημειώθηκαν την 5ετία με κέντρο το 1990.
- Οι άλλες περιόδους, συμπεριλαμβανομένης της τρέχουσας, είναι κλιματικά ουδέτερες.
- Ολόκληρη η εικόνα υποδηλώνει την παρουσία της δυναμικής Hurst-Kolmogorov στο χρόνο και στο χώρο.



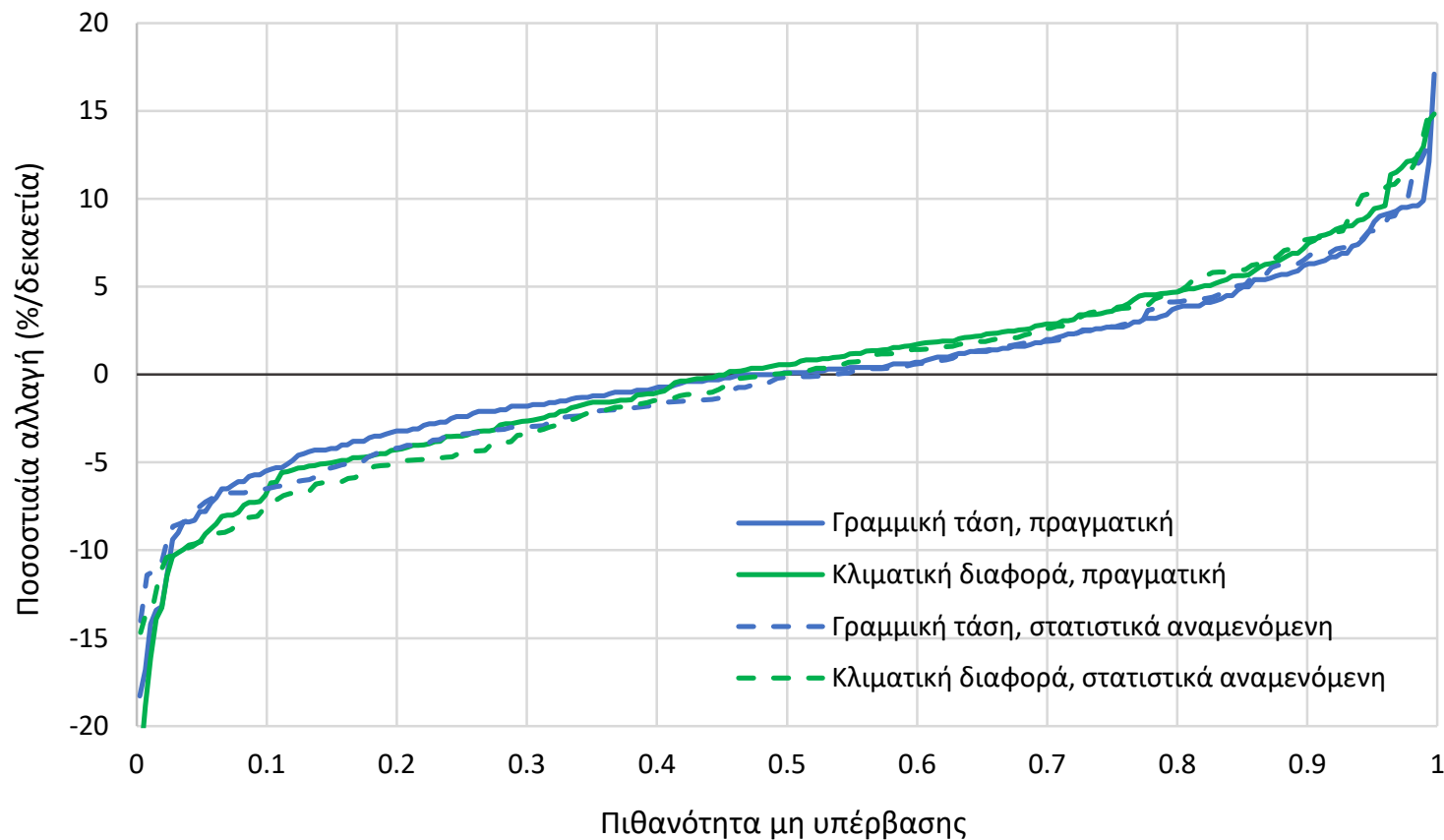
Χρονική κατανομή των ρεκόρ μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης σε 238 σταθμούς της χώρας

- Η κατανομή είναι η στατιστικά αναμενόμενη.
- Εξαίρεση αποτελεί η έλλειψη ρεκόρ την τριετία 1982-83 έως 1984-85.
- Δεν υπάρχουν αξιοσημείωτα κλιματικά φαινόμενα.



Γραμμικές τάσεις και διαφορές δύο διαδοχικών κλιματικών περιόδων 30 ετών

Πιθανοτική κατανομή των αλλαγών της ετήσιας μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης (ως ποσοστών της καθολικής μέσης τιμής των μέγιστων υψών βροχής) για τους σταθμούς με χρονοσειρές ετήσιων μεγίστων με μεγάλο μήκος, στο σύνολο της ελληνικής επικράτειας (238 σταθμοί συνολικά).



Παρατηρείται ισορροπία θετικών και αρνητικών τάσεων, καθώς και εντυπωσιακή συμφωνία των εμπειρικών διακυμάνσεων με τις θεωρητικά αναμενόμενες.

Συμπεράσματα (I)

- Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε:
 - Βασίζεται στο νέο μεθοδολογικό πλαίσιο όμβριων καμπυλών (Koutsoyiannis, 2023), το οποίο αποτελεί αναθεώρηση του παλιότερου (Koutsoyiannis et al., 1998) (το παλιότερο πλαίσιο αποτέλεσε τη βάση κατάρτισης όμβριων καμπυλών σε πολλές χώρες, συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας—πρώτη Εφαρμογή της Οδηγίας ΕΕ 2007/60/ΕΚ).
 - Ενσωματώνει νέες και πιο αξιόπιστες μεθοδολογίες για την εκτίμηση περιόδων επαναφοράς με αξιοποίηση όλου του συνόλου των δεδομένων (*K*-ροπές).
 - Αξιοποιεί μεθοδολογίες χωρικής ενοποίησης και παρεμβολής οι οποίες επιτρέπουν την εύρωστη μοντελοποίηση παραμέτρων στο χώρο.
 - Διαμορφώνει ένα ευρύτερο μεθοδολογικό πλαίσιο λήψης αποφάσεων στην κατάρτιση των όμβριων καμπυλών, με στόχο τον περιορισμό της αβεβαιότητας εκτίμησης και των χωρικών ασυνεπειών.
- Το τελικό εργαλείο σχεδιασμού είναι ένας κάρναβος ανάλυσης 5 km με τιμές των όμβριων καμπυλών (παραμέτρων και εντάσεων βροχής) που καλύπτουν το σύνολο της ελληνικής επικράτειας.

Συμπεράσματα (II)

- ❑ Η ενδεδεχής **κλιματολογική** ανάλυση που πραγματοποιήθηκε:
 - δεν εντόπισε κανένα στοιχείο που θα δικαιολογούσε κάποιο είδος μη στάσιμης ανάλυσης,
 - ωστόσο υποδηλώνει την παρουσία αλλαγών που μπορεί να μοντελοποιηθούν με την υπόθεση στασιμότητας βάσει της **Δυναμικής Hurst-Kolmogorov**.
- ❑ Η εφαρμοζόμενη μεθοδολογία είναι κατάλληλη για την περιγραφή της τυπικής κλιματικής συμπεριφοράς, στην οποία οι αλλαγές σε μεγάλες χρονικές κλίμακες είναι αναμενόμενες.
- ❑ Ειδικότερα, τα στοιχεία της μεθοδολογίας που ανταποκρίνονται στον κανόνα της αλλαγής είναι:
 - η υιοθέτηση θετικού δείκτη ουράς (και εν προκειμένω αρκετά υψηλού, $\xi = 0.18$) και
 - η χρήση της στοχαστικής δυναμικής Hurst-Kolmogorov σε περιπτώσεις όπου πραγματοποιούνται στοχαστικές προσομοιώσεις, ή όπου τα στατιστικά αποτελέσματα επηρεάζονται από τη συμπεριφορά εμμονής.

Συναφείς δημοσιεύσεις

HYDROLOGICAL SCIENCES JOURNAL
2024, VOL. 69, NO. 8, 1082–1091
<https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2345813>



A stochastic framework for rainfall intensity–time scale–return period relationships. Part I: theory and estimation strategies

Demetris Koutsoyiannis , Theano Iliopoulou , Antonis Koukouvinos^a and Nikolaos Malamos

^aDepartment of Water Resources and Environmental Engineering, School of Civil Engineering, National Technical University of Athens, Zographou, Greece; ^bDepartment of Agriculture, University of Patras, Messolonghi, Greece

HYDROLOGICAL SCIENCES JOURNAL
2024, VOL. 69, NO. 8, 1092–1112
<https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2345814>



FEATURED ARTICLE

A stochastic framework for rainfall intensity–time scale–return period relationships. Part II: point modelling and regionalization over Greece

Theano Iliopoulou , Demetris Koutsoyiannis , Nikolaos Malamos , Antonis Koukouvinos^a, Panayiotis Dimitriadis , Nikos Mamassis^a, Nikos Tepetidis^a and David Markantonis^a

^aDepartment of Water Resources and Environmental Engineering, School of Civil Engineering, National Technical University of Athens, Zographou, Greece; ^bDepartment of Agriculture, University of Patras, Messolonghi, Greece



Article

In Search of Climate Crisis in Greece Using Hydrological Data: 404 Not Found

Demetris Koutsoyiannis ^{1,*} , Theano Iliopoulou ¹ , Antonis Koukouvinos ¹, Nikolaos Malamos ² , Nikos Mamassis ¹, Panayiotis Dimitriadis ¹ , Nikos Tepetidis ¹ and David Markantonis ¹

¹ Department of Water Resources and Environmental Engineering, School of Civil Engineering, National Technical University of Athens, 15780 Zographou, Greece; tiliopoulou@hydro.ntua.gr (T.I.); anton@itia.ntua.gr (A.K.); pandim@itia.ntua.gr (P.D.); nikostepe191201@gmail.com (N.T.)

² Department of Agriculture, University of Patras, 30200 Messolonghi, Greece; nmalamos@upatras.gr

* Correspondence: dk@itia.ntua.gr

Abstract: In the context of implementing the European Flood Directive in Greece, a large set of rainfall data was compiled with the principal aim of constructing rainfall intensity–timescale–return period relationships for the entire country. This set included ground rainfall data as well as non-conventional data from reanalyses and satellites. Given the European declaration of climate emergency, along with the establishment of a ministry of climate crisis in Greece, this dataset was also investigated from a climatic perspective using the longest of the data records to assess whether or not they support the climate crisis doctrine. Monte Carlo simulations, along with stationary Hurst–Kolmogorov (HK) stochastic dynamics, were also employed to compare data with theoretical expectations. Rainfall extremes are proven to conform with the statistical expectations under stationarity. The only notable climatic events found are the clustering (reflecting HK dynamics) of water abundance in the 1960s and dry years around 1990, followed by a recovery from drought conditions in recent years.

Βιβλιογραφικές αναφορές

- Amin, B., Bárdossy, A. and Haberlandt, U., 2024. Uncertainty Quantification of Theoretical Consistent Intensity Duration Frequency (IDF) Curves of Rainfall Intensity (No. EGU24-15926). Copernicus Meetingσ, doi: 10.5194/egusphere-egu24-15926
- Iliopoulou, T., Koutsoyiannis, D., Malamos, N., Koukouvinos, A., Dimitriadis, P., Mamassis, N., Tepetidis, N., Markantonis, D. 2023. A stochastic framework for rainfall intensity-timescale-return period relationships. Part II. Point modelling and regionalization over Greece. *Hydrological Sciences Journal*, doi: 10.1080/02626667.2024.2345814.
- Koutsoyiannis, D. 1999. A probabilistic view of Hershfield's method for estimating probable maximum precipitation. *Water Resources Research*, 35 (4), 1313–1322, doi: 10.1029/1999WR900002.
- Koutsoyiannis, D., 2007. A critical review of probability of extreme rainfall: principles and models. *Advances in Urban Flood Management*, edited by R. Ashley, S. Garvin, E. Pasche, A. Vassilopoulos, and C. Zevenbergen, 139–166, Taylor and Francis, London, doi: 10.1201/9780203945988.ch7.
- Koutsoyiannis, D., 2019. Knowable moments for high-order stochastic characterization and modelling of hydrological processes. *Hydrological Sciences Journal*, 64 (1), 19–33, doi: 10.1080/02626667.2018.1556794.
- Koutsoyiannis, D., 2023. *Stochastics of Hydroclimatic Extremes - A Cool Look at Risk*. Edition 3, ISBN: 978-618-85370-0-2, 391 pages, Kallipos Open Academic Editions, Athens, doi: 10.57713/kallipos-1.
- Koutsoyiannis, D., Kozonis, D. and Manetas, A., 1998. A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology*, 206 (1-2), 118–135, doi: 10.1016/S0022-1694(98)00097-3.
- Koutsoyiannis, D., Iliopoulou, T., Koukouvinos, A., Malamos, N., 2023a. A stochastic framework for rainfall intensity-timescale-return period relationships. Part I. Theory and estimation strategies. *Hydrological Sciences Journal*, doi: 10.1080/02626667.2024.2345813.
- Koutsoyiannis D, Iliopoulou T, Koukouvinos A, Malamos N, Mamassis N, Dimitriadis P, Tepetidis N, Markantonis D., 2023b. In Search of Climate Crisis in Greece Using Hydrological Data: 404 Not Found. *Water*, 15 (9), 1711, doi: 10.3390/w15091711.
- Malamos, N. and Koutsoyiannis, D., 2016a. Bilinear surface smoothing for spatial interpolation with optional incorporation of an explanatory variable. Part 1: Theory. *Hydrological Sciences Journal*, 61 (3), 519–526, doi: 10.1080/02626667.2015.1051980.
- Malamos, N. and Koutsoyiannis, D., 2016b. Bilinear surface smoothing for spatial interpolation with optional incorporation of an explanatory variable. Part 2: Application to synthesized and rainfall data. *Hydrological Sciences Journal*, 61(3), pp.527-540.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2024. *Modernizing Probable Maximum Precipitation Estimation*. The National Academies Press, Washington, DC., doi: 10.17226/27460.
- Shehu, B., Willems, W., Stockel, H., Thiele, L.-B., and Haberlandt, U., 2023 Regionalisation of rainfall depth–duration–frequency curves with different data types in Germany. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 27, 1109–1132, doi: 10.5194/hess-27-1109-2023.
- Κουτσογιάννης, Δ. Ηλιοπούλου, Θ. Κουκουβίνος, Α. Μαλάμος, Ν. Μαμάσης, Ν. Δημητριάδης, Π. Τεπετίδης, Ν. και Μαρκαντώνης, Δ., 2023. Τεχνική Έκθεση. Παραγωγή χαρτών με τις επικαιροποιημένες παραμέτρους των όμβριων καμπυλών σε επίπεδο χώρας (Εφαρμογή της Οδηγίας ΕΕ 2007/60/ΕΚ στην Ελλάδα), Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, <https://www.itia.ntua.gr/2273/>.

Λεπτομέρειες
για τη
μεθοδολογία
στο βιβλίο
(Έκδοση 3)

Δωρεάν σε
ανοιχτή
πρόσβαση

<https://www.itia.ntua.gr/2000/>

Stochastics of Hydroclimatic Extremes is a real monument in stochastics! It is a summary of the lifetime dedication by Demetris Koutsoyiannis to the science of environmental extremes, it is a demonstration of the value of stochastics itself to gain a better understanding of why and how extremes happen. The perspective adopted in the book is that of a scientist who is able to cross and transform disciplines by proposing an innovative synthesis of knowledge. This book is indeed presenting new concepts, new theoretical interpretations and new opportunities for engineering design, for the sake of mitigating the impact of extremes and adapting modern society to environmental variability.

It is fascinating that the book is self-produced and openly available to readers. Like any self-produced creation of the humankind, this book has a unique and independent history that is rooted in the intimate personality of the author. It is a creation that does not require to adhere to any format other than those suggested by the author's vision and creativity. For this reason, its value is incommensurably high, it is a real *Cool Look at Risk* as Demetris says.

I believe time will highlight *Stochastics of Hydroclimatic Extremes* as a transforming masterpiece which will bring illuminating ideas to the reader.

Alberto Montanari
Head of the Dept. of Civil, Chemical, Environmental, and Materials Engineering, University of Bologna
President of the European Geosciences Union

This is a book that could not only transform your career, but also the entire fields of environmental statistics and stochastic hydrology. This seminal contribution is not like other books you have read which tend to summarize existing knowledge. Rather, it condenses existing knowledge in short order and spends nearly all its time on new knowledge, much of it never before published, communicating effectively both the theoretical and practical aspects of analysis of a wide range of hydroclimatic extremes. The style of presentation itself is novel and compelling, so that I could not resist reading it from cover to cover.

If you think you understand how to apply probability and statistics to predict future extreme events, think again, because very quickly you will be convinced that extremes arise from spatial and temporal stochastic processes, and are neither independent nor identically distributed (iid) events, nor do most of our common probability distributions used for flood and drought frequency analysis capture the type of thick tails which are so convincingly documented in this book.

I predict that many of the novel concepts, examples and techniques introduced here, many for the first time, will find their way into widespread acceptance in hydroclimatology, over time. Foremost, the reader will appreciate the value of viewing extreme events as realizations of stochastic processes rather than a series of iid annual maxima/minima. The climacogram provides a new window into the structure of stochastic processes and may be more fundamental than the correlogram. I can't wait to test out the so-called Pareto-Burr-Feller distribution and the novel knowable moments (K-moments) which appear to have clear advantages over ordinary moments for describing distribution tails.

It is remarkable that after a long career in hydrology, after reading this book, I gained many new insights into common statistical methods as well as new methods documented here for the first time. How I wish my career were just beginning, and thus could have applied all the wonderful ideas and methods in this book during my career. This is literally a treasure for young scholars interested in the probabilistic behaviour of hydroclimatic extremes.

Richard M. Vogel
Professor Emeritus and Research Professor, Dept. Civil and Environmental Engineering, Tufts University



ISBN: 978-618-85370-0-2

Stochastics of Hydroclimatic Extremes



Demetris Koutsoyiannis

Stochastics of Hydroclimatic Extremes A Cool Look at Risk

Demetris Koutsoyiannis
National Technical University of Athens

3rd Edition

Kallipos
Open Academic Editions
Athens 2023

