



**Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας**

ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ

Ενότητα 4: Όμβριες Καμπύλες

Καθ. Αθανάσιος Λουκάς

Εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Πολυτεχνική Σχολή

Σχέσεις Έντασης – Διάρκειας – Συχνότητας Βροχών (IDF Analysis)

Σχέσεις Ύψους Βροχόπτωσης – Διάρκειας – Συχνότητας (DDF Analysis)

- Η διερεύνηση των σχέσεων που υπάρχουν ανάμεσα στην ένταση, τη διάρκεια και τη συχνότητα εμφάνισης μιας βροχής είναι μια βασική διαδικασία που χρησιμοποιείται πολύ συχνά στην υδρολογική ανάλυση (Παπαμιχαήλ, 2001). Για τη διερεύνηση των σχέσεων Έντασης – Διάρκειας – Συχνότητας των βροχών σε μία λεκάνη απορροής χρησιμοποιούνται δεδομένα από βροχογράφους όπου υπάρχουν βροχομετρικά δεδομένα (ύψη βροχόπτωσης) για διάφορες διάρκειες (π.χ. από 2 λεπτά έως 24 ώρες).
- Τα βήματα είναι:
 - Ανάλυση των Βροχομετρικών Δεδομένων (ύψη και εντάσεις βροχόπτωσης) χρησιμοποιώντας μία κατάλληλη θεωρητική κατανομή (π.χ. κατανομή EVI)
 - Διερεύνηση των Σχέσεων Ύψους-Διάρκειας-Συχνότητας Βροχόπτωσης και Έντασης-Διάρκειας-Συχνότητας Βροχόπτωσης για την εκτίμηση αναλυτικών σχέσεων



Ανάλυση των Βροχομετρικών Δεδομένων

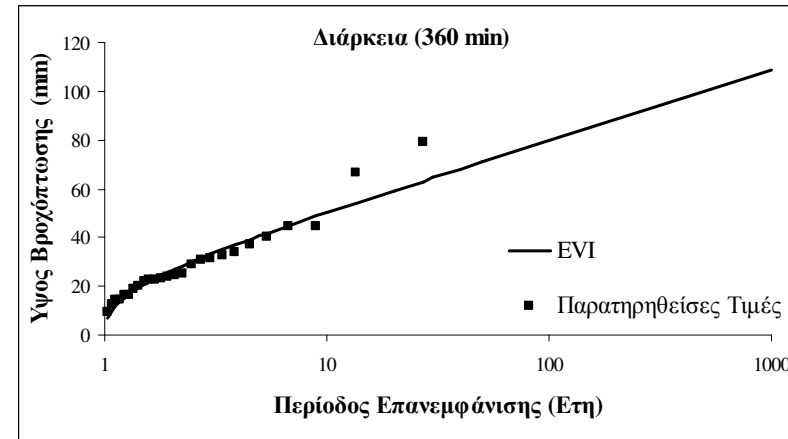
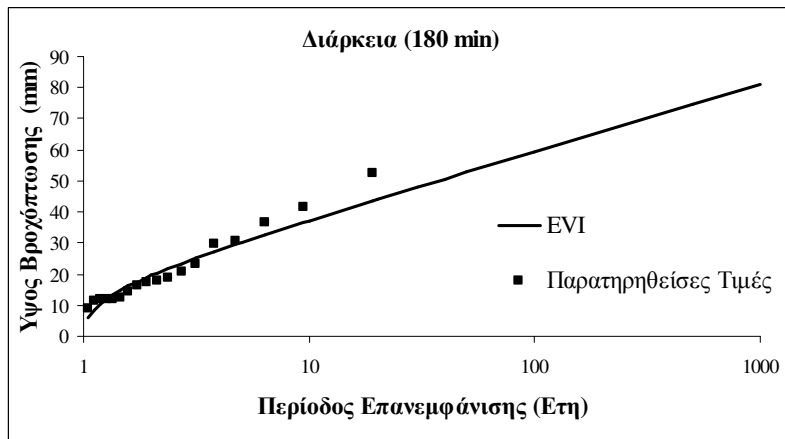
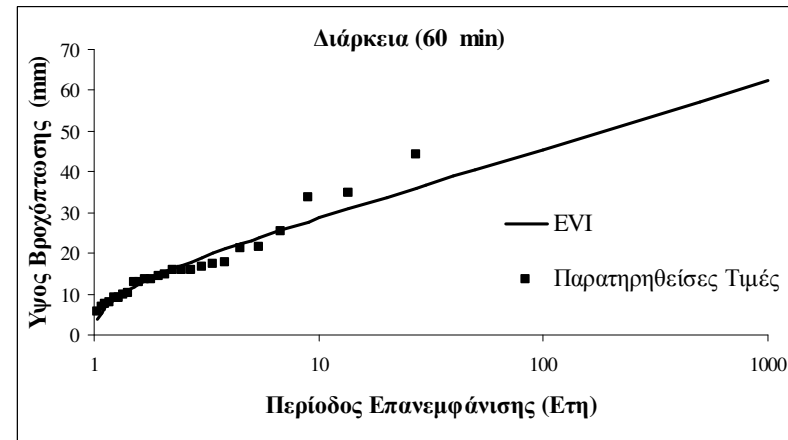
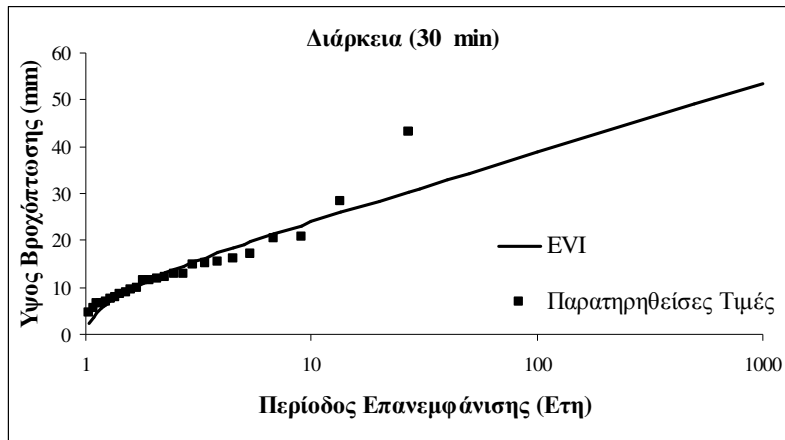
Η μέθοδος της ανάλυσης της συχνότητας, που οδηγεί στον καθορισμό της πιθανότητας εμφάνισης ενός υδρολογικού γεγονότος, στηρίζεται στον προσδιορισμό της θεωρητικής συνάρτησης κατανομής πιθανότητας, η οποία ταιριάζει καλύτερα στο πλήθος των υδρολογικών τιμών, που έχουν μετρηθεί.

- Επιλογή κατάλληλης θεωρητικής κατανομής, που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση συχνότητας βροχοπτώσεων και παροχών όπως είναι οι κατανομές:
 - Log-normal, Extreme Value I, Generalized Extreme Value, Pearson, και Log-Pearson
- Προσαρμογή της θεωρητικής κατανομής στα ύψη βροχόπτωσης και στις εντάσεις βροχόπτωσης για όλες τις επιλεγμένες διάρκειες
- Διαγράμματα Ύψους-Διάρκειας-Συχνότητας και Έντασης-Διάρκειας-Συχνότητας για επιλεγμένες περιόδους επαναφοράς (π.χ. 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 και 1000 έτη)



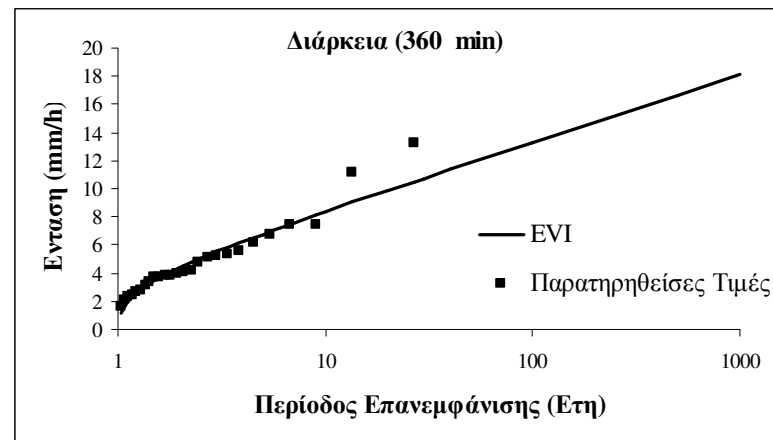
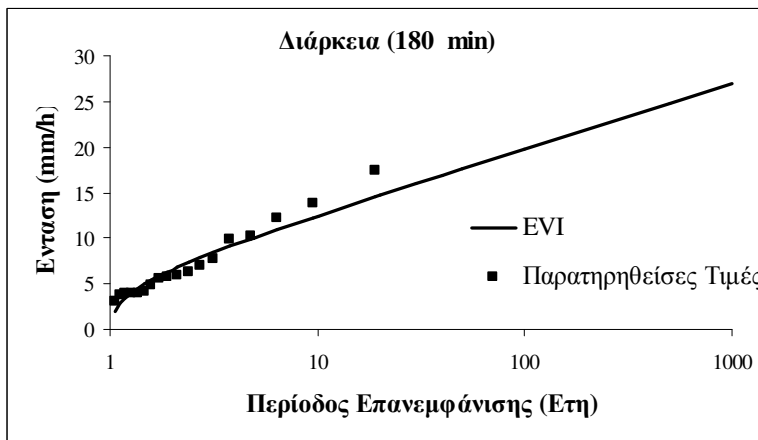
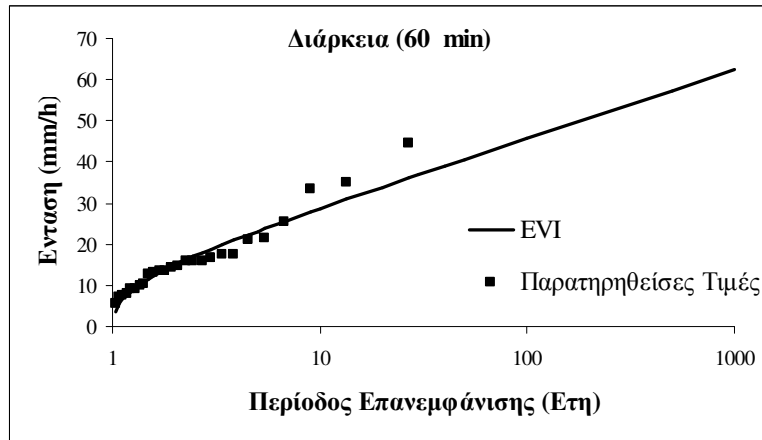
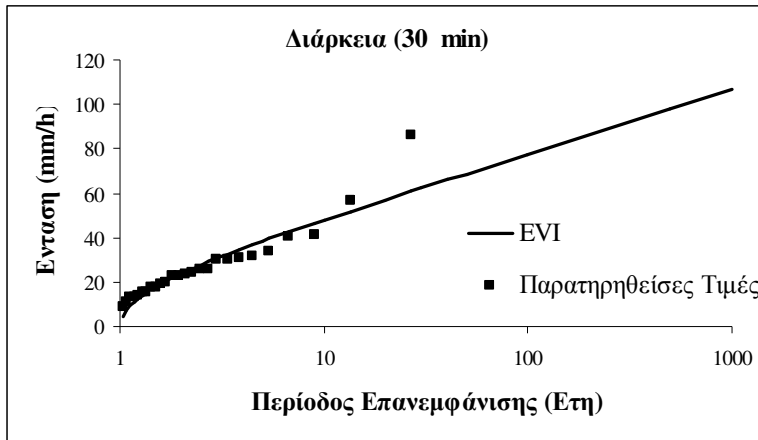
Ανάλυση των Βροχομετρικών Δεδομένων

Προσαρμογή της **θεωρητικής κατανομής EVI (Gumbel)** στα ύψη βροχόπτωσης για επιλεγμένες διάρκειες των 30, 60, 180 και 360 λεπτών.



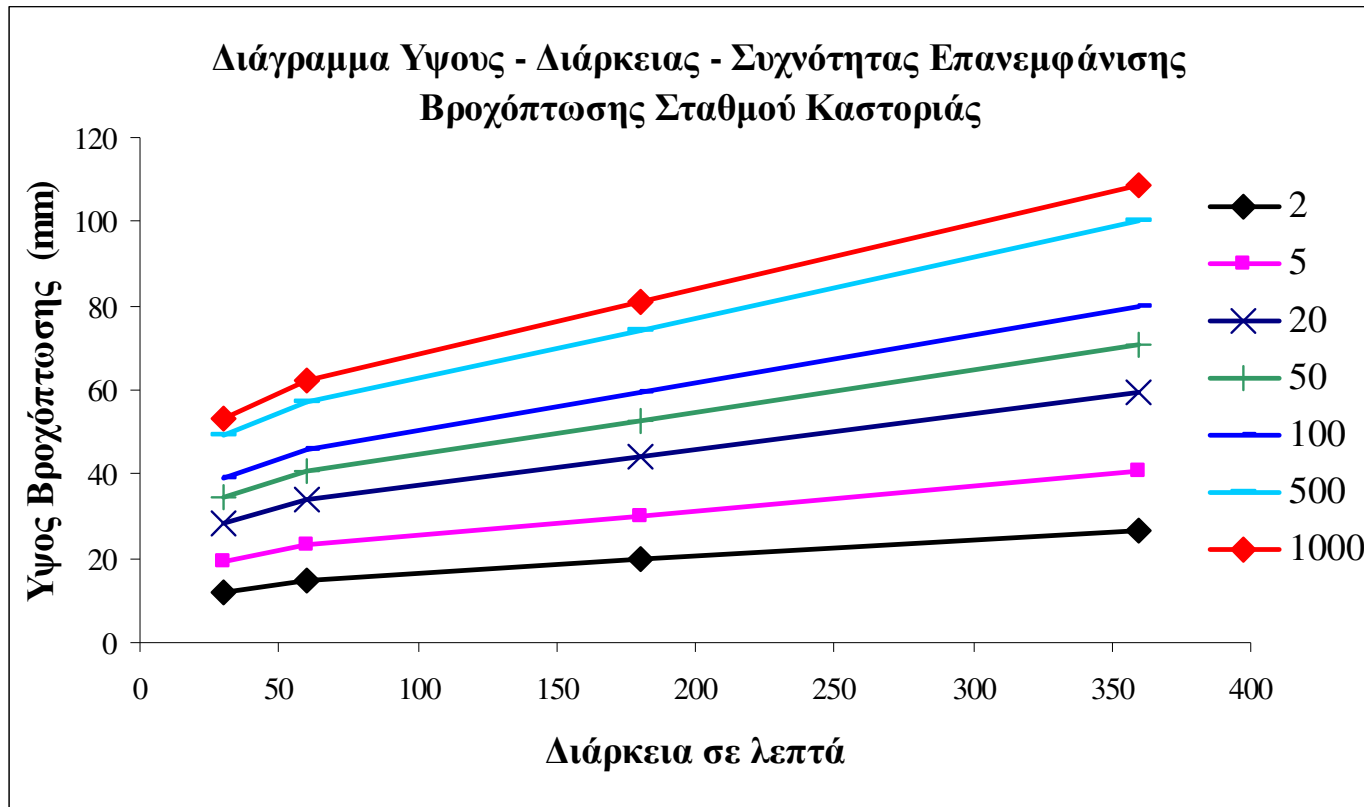
Ανάλυση των Βροχομετρικών Δεδομένων

Προσαρμογή της **θεωρητικής κατανομής EVI (Gumbel)** στις εντάσεις βροχόπτωσης για επιλεγμένες διάρκειες των 30, 60, 180 και 360 λεπτών.



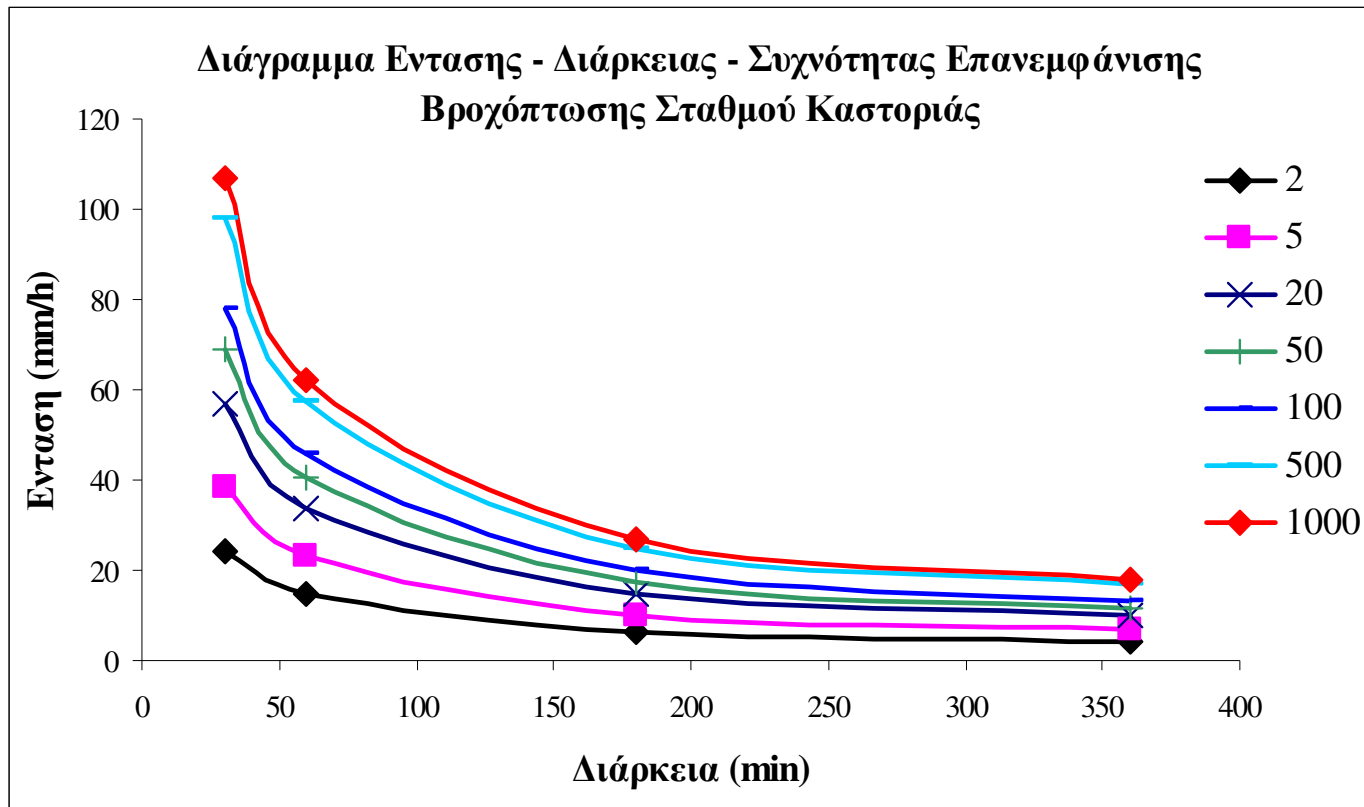
Ανάλυση των Βροχομετρικών Δεδομένων

Μετά την προσαρμογή της EVI στα ύψη της βροχόπτωσης για τις προαναφερθείσες διάρκειες οι σχέσεις **Ύψους βροχόπτωσης – Διάρκειας – Συχνότητας Βροχόπτωσης** δημιουργούνται για επιλεγμένες περιόδους επαναφοράς π.χ. 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 και 1000 ετών



Ανάλυση των Βροχομετρικών Δεδομένων

Μετά την προσαρμογή της ENI στις εντάσεις βροχόπτωσης για τις προαναφερθείσες διάρκειες οι σχέσεις Έντασης – Διάρκειας – Συχνότητας Βροχόπτωσης δημιουργούνται για επιλεγμένες περιόδους επαναφοράς π.χ. 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 και 1000 ετών



Αναλυτικές Σχέσεις Έντασης-Διάρκειας-Συχνότητας Βροχόπτωσης

$$i = \frac{kT^\alpha}{(D+b)^m}$$

$$i = \frac{kT^\alpha}{(D)^m}$$

$$i = \frac{k}{(D+b)^m} \quad i = \frac{k}{(D)^m} \quad i = \frac{k}{(D+g)}$$

όπου: i = ένταση της βροχής (mm/h), D = διάρκεια της βροχής σε ώρες (h), και α , k , b , m = σταθερές ($m > 0$).



Αναλυτικές Σχέσεις Ύψους-Διάρκειας-Συχνότητας Βροχόπτωσης

$$P = kT^\alpha (D + b)^{(1-m)}$$

$$P = kT^\alpha (D)^{(1-m)}$$

$$P = k(D + b)^{(1-m)}$$

$$P = k(D)^{(1-m)}$$

$$P = k(D + \mathcal{G})$$

όπου: P = ύψος της βροχής (mm), D = διάρκεια της βροχής σε ώρες (h), και α , k , b , m = σταθερές ($m > 0$).



Διερεύνηση των Σχέσεων Ύψους-Διάρκειας-Συχνότητας Βροχόπτωσης και Έντασης-Διάρκειας-Συχνότητας Βροχόπτωσης

$$i = \frac{kT^\alpha}{(D + b)^m}$$

όπου: i = ένταση της βροχής (mm/h), D = διάρκεια της βροχής σε ώρες (h), και α , k , b , m = σταθερές.

Η παραπάνω σχέση έχει σχετικά μεγαλύτερη ευελιξία και γενικότητα έναντι άλλων σχέσεων (π.χ. του τύπου του Montana) αφού περιλαμβάνει τη διορθωτική παράμετρο b , που διορθώνει τη χρονική κλίμακα δίνοντας τη δυνατότητα βελτιστοποίησης της σκέδασης των σημείων γύρω από την όμβρια καμπύλη. Η απόκτηση των σχέσεων (i, D) και για άλλες περιόδους επαναφοράς T οδηγεί στην απόκτηση των ομβρίων καμπυλών (i, D, T) . Οι όμβριες καμπύλες δηλαδή είναι σε διπλό λογαριθμικό χαρτί, ευθείες παράλληλες, με παράμετρο το T και άξονες i και $(D + b)$, με την εξής αναλυτική έκφραση

$$\log i = \log(kT^\alpha) - m \log(D + b)$$



Διερεύνηση των Σχέσεων Ύψους-Διάρκειας-Συχνότητας Βροχόπτωσης και Έντασης-Διάρκειας-Συχνότητας Βροχόπτωσης

$$i = \frac{kT^\alpha}{(D+b)^m}$$

όπου: i = ένταση της βροχής (mm/h), D = διάρκεια της βροχής σε ώρες (h), και α , k , b , m = σταθερές.

$$\log i = \log(kT^\alpha) - m \log(D+b)$$

Η ρύθμιση της παραπάνω εξίσωσης αρχίζει με την εκτίμηση της διορθωτικής παραμέτρου b έτσι ώστε να βελτιστοποιείται η σκέδαση των σημείων γύρω από τις όμβριες καμπύλες. Στη συνέχεια, για κάθε T της ανάλυσης και με τη βοήθεια της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων εκτιμώνται τα $A_T = \log(kT^\alpha)$ και m της παραπάνω εξίσωσης. Τέλος, και με βάση τις τιμές των ζευγών $(A_T, \log T)$, που είναι ήδη γνωστές, εκτιμώνται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων οι τιμές k & α από τη γραμμική σχέση:

$$A_T = \log(k) + \alpha \log(T)$$



Διερεύνηση των Σχέσεων Έντασης-Διάρκειας-Συχνότητας Βροχόπτωσης

$$i = \frac{kT^\alpha}{(D+b)^m}$$

Εφαρμόζοντας την παραπάνω διαδικασία στις σχέσεις έντασης διάρκειας συχνότητας βροχόπτωσης που δημιουργήθηκαν με τη προσαρμογή της θεωρητικής κατανομής EVI (Gumbel) υπολογίστηκαν οι παρακάτω παράμετροι:

$b = 0$ (σχετικά μικρή διασπορά των σημείων γύρω από τις όμβριες καμπύλες)

$m = 0.714$

$k = 16.31851$

$\alpha = 0.2155$

Σχέσεις έντασης – διάρκειας – συχνότητας βροχόπτωσης

$$i = \frac{16.31851 * T^{0.2155}}{D^{0.714}}$$

$$R^2 = 0.976$$



Διερεύνηση των Σχέσεων Ύψους-Διάρκειας-Συχνότητας Βροχόπτωσης

$$P = kT^\alpha (D + b)^{(1-m)}$$

Εφαρμόζοντας την παραπάνω διαδικασία στις σχέσεις ύψους διάρκειας συχνότητας βροχόπτωσης που δημιουργήθηκαν με τη προσαρμογή της θεωρητικής κατανομής EVI (Gumbel) υπολογίστηκαν οι παρακάτω παράμετροι:

$b = 0$ (σχετικά μικρή διασπορά των σημείων γύρω από τις όμβριες καμπύλες)

$m = 0.714$

$k = 16.31851$

$\alpha = 0.2155$

Σχέσεις ύψους – διάρκειας – συχνότητας βροχόπτωσης

$$P = 16.31851 * T^{0.2155} * D^{0.286}$$

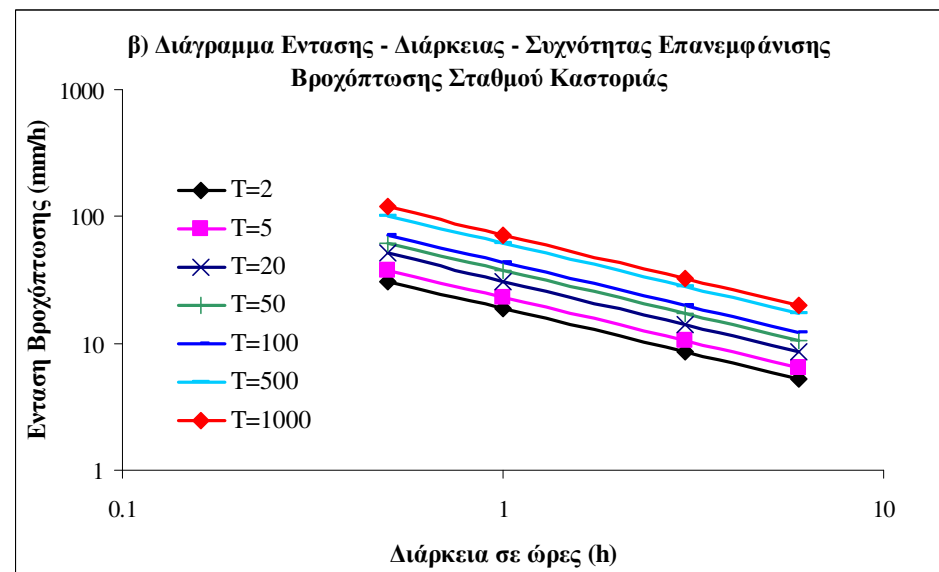
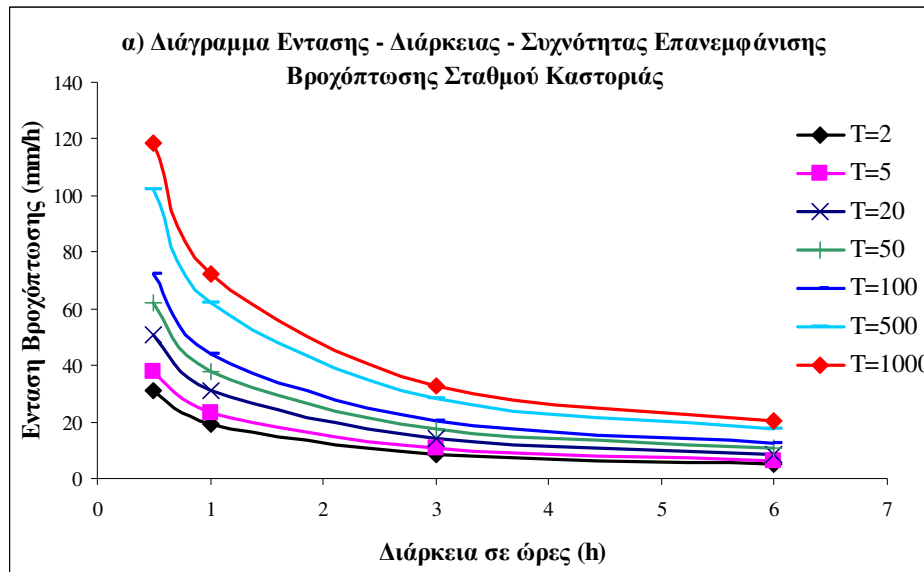
$$R^2 = 0.948$$



Όμβριες Καμπύλες

Καμπύλες έντασης – διάρκειας – συχνότητας βροχόπτωσης (Intensity-Duration-Frequency, IDF curves)

Όμβριες καμπύλες διάρκειας – έντασης βροχοπτώσεων, για διάφορες περιόδους επαναφοράς, του σταθμού Καστοριάς: α) κοινό γραμμικό διάγραμμα, και β) λογαριθμικό διάγραμμα.



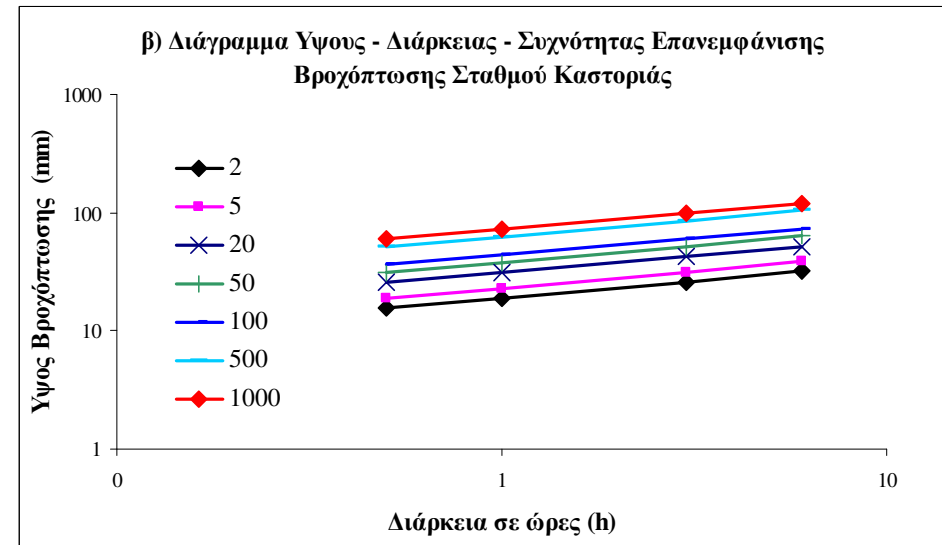
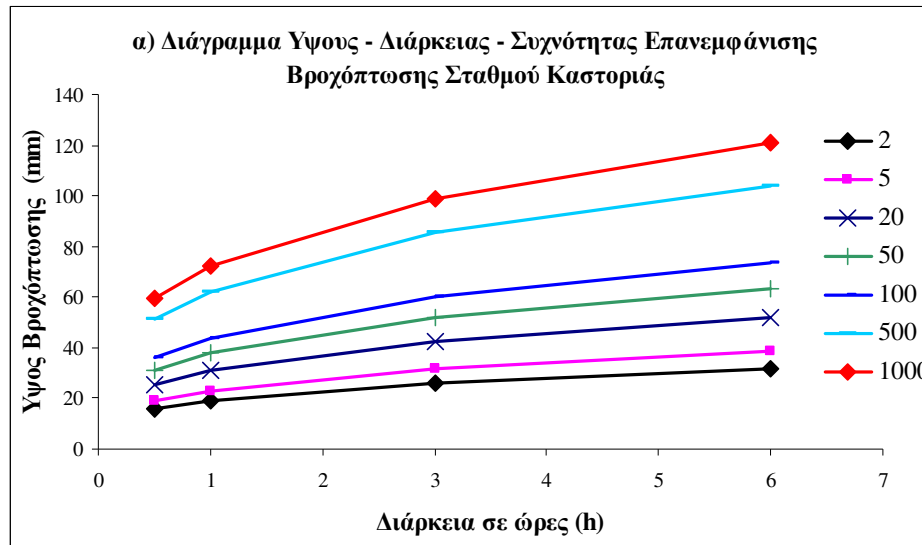
$$i = \frac{16.31851 * T^{0.2155}}{D^{0.714}}$$



Όμβριες Καμπύλες

Καμπύλες ύψους – διάρκειας – συχνότητας βροχόπτωσης (Depth-Duration-Frequency, DDF curves)

Όμβριες καμπύλες διάρκειας – ύψους βροχοπτώσεων, για διάφορες περιόδους επαναφοράς, του σταθμού Καστοριάς: α) κοινό γραμμικό διάγραμμα, και β) λογαριθμικό διάγραμμα.



$$P = 16.31851 * T^{0.2155} * D^{0.286}$$



ΟΜΒΡΙΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ

Κατάρτιση πινάκων υψών βροχής, διαρκειών βροχής περιόδων επαναφοράς

h (mm)	20	30	40	60	80	30	40	50	70	90	.....	80	100	120	140	170
t (hr)	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	.....	24	24	24	24	24
T (έτη)	2	5	10	50	100	2	5	10	50	100	.....	2	5	50	10	100

Εκτίμηση παραμέτρων όμβριων καμπυλών

Μεμονωμένες καμπύλες για συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς

$$h = a * t^b \Rightarrow \ln h = \ln a + b * \ln t$$

$$i = a * t^{b-1} \Rightarrow \ln i = \ln a + (b - 1) * \ln t$$

Ενιαίες καμπύλες για κάθε περίοδο επαναφοράς

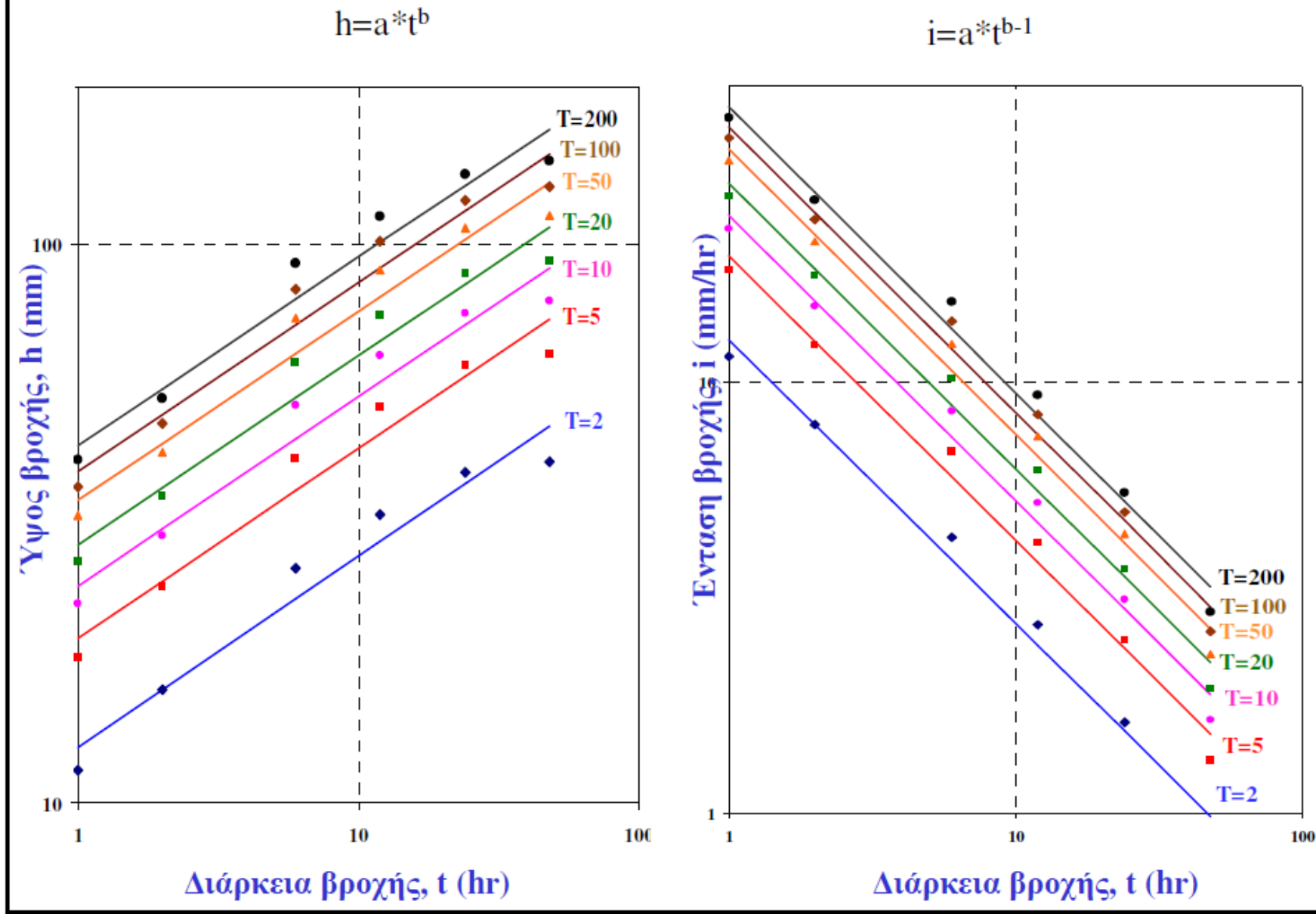
$$h = a * (t + d)^b * T^c \Rightarrow \ln h = \ln a + c * \ln T + b * \ln(t + d)$$

$$i = a * (t + d)^{-b_1} * T^c \Rightarrow \ln i = \ln a + c * \ln T - b_1 * \ln(t + d)$$

(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2012 http://users.itia.ntua.gr/nikos/hydrology/EduMaterial/ydr_ombr_12.pdf)



ΟΜΒΡΙΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ



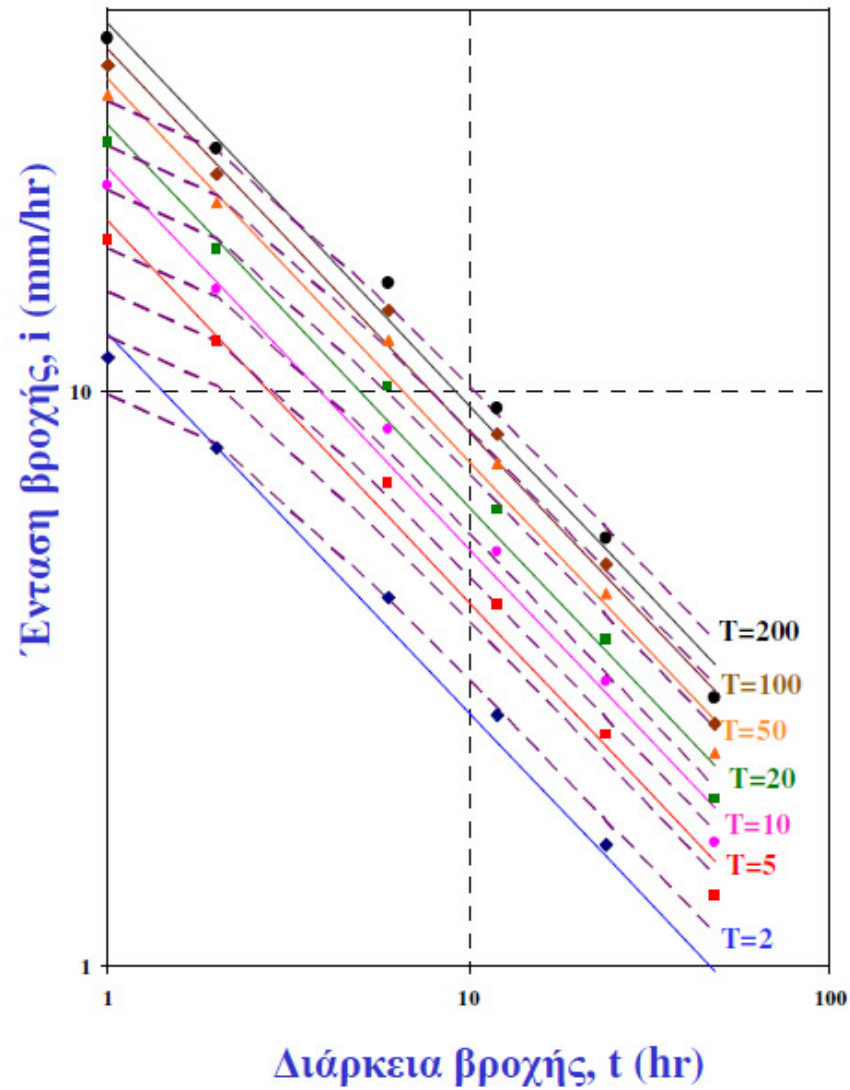
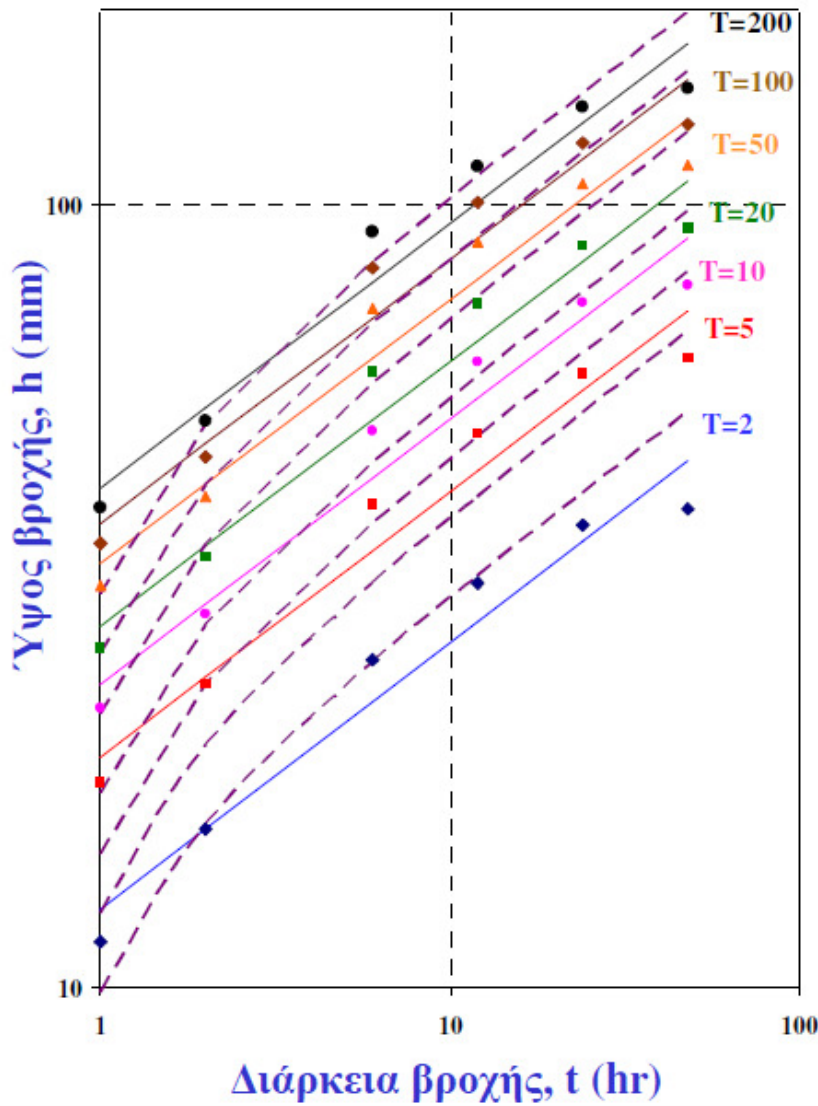
(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2012 http://users.itia.ntua.gr/nikos/hydrology/EduMaterial/ydr_ombr_12.pdf)



ΟΜΒΡΙΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ

$$h = a \cdot (t+d)^b \cdot T^c$$

$$i = a \cdot (t+d)^b \cdot T^c \cdot (1/t)$$



(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2012 http://users.itia.ntua.gr/nikos/hydrology/EduMaterial/ydr_ombr_12.pdf)



ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΑΝΑΓΩΓΗ ΟΜΒΡΙΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ

Για υδρολογικές εφαρμογές, χρειάζονται πάντα οι επιφανειακά μέσες εντάσεις για τη λεκάνη απορροής που μελετάται και όχι οι σημειακές εντάσεις. Κατά συνέπεια είναι απαραίτητη μια μεθοδολογία για την αναγωγή των σημειακών σε επιφανειακές εντάσεις βροχής

Μετά τον καταρτισμό των όμβριων καμπυλών η σημειακή ένταση που υπολογίζεται από αυτές ανάγεται κατάλληλα ώστε να αντιπροσωπεύει την επιφανειακή ένταση. Η αναγωγή γίνεται με πολλαπλασιασμό επί τον **συντελεστή επιφανειακής αναγωγής** (areal reduction factor) (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999). Ο συντελεστής της έχει της ακόλουθες, εμπειρικά διαπιστωμένες, ιδιότητες:

- Είναι πάντα μικρότερος από 1: όταν καταγράφεται μέγιστη ένταση στη θέση του βροχογραφικού σταθμού, είναι απίθανο την ίδια στιγμή να καταγράφεται μέγιστη ένταση σε όλη την υπόψη επιφάνεια.
- Είναι φθίνουσα συνάρτηση της έκτασης: η αύξηση της έκτασης της επιφάνειας συνεπάγεται τη μείωση του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής.
- Είναι αύξουσα συνάρτηση της διάρκειας: η αύξηση της διάρκειας βροχής συνοδεύεται από αύξηση του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής.
- Εξαρτάται σε κάποιο βαθμό από την περίοδο επαναφοράς και φαίνεται ότι η αύξηση της περιόδου επαναφοράς οδηγεί σε ασθενή μείωση του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής.



ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΑΝΑΓΩΓΗ ΟΜΒΡΙΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ

Στα πινακοποιημένα αποτελέσματα του National Environmental Research Council (1975), τα οποία είναι και τα πληρέστερα σε ό,τι αφορά στο εύρος μεταβολής της διάρκειας (1 min - 25 ημέρες) και της έκτασης (1 - 30 000 km²) προσαρμόστηκε η ακόλουθη αναλυτική έκφραση (Κουτσογιάννης, 1997) :

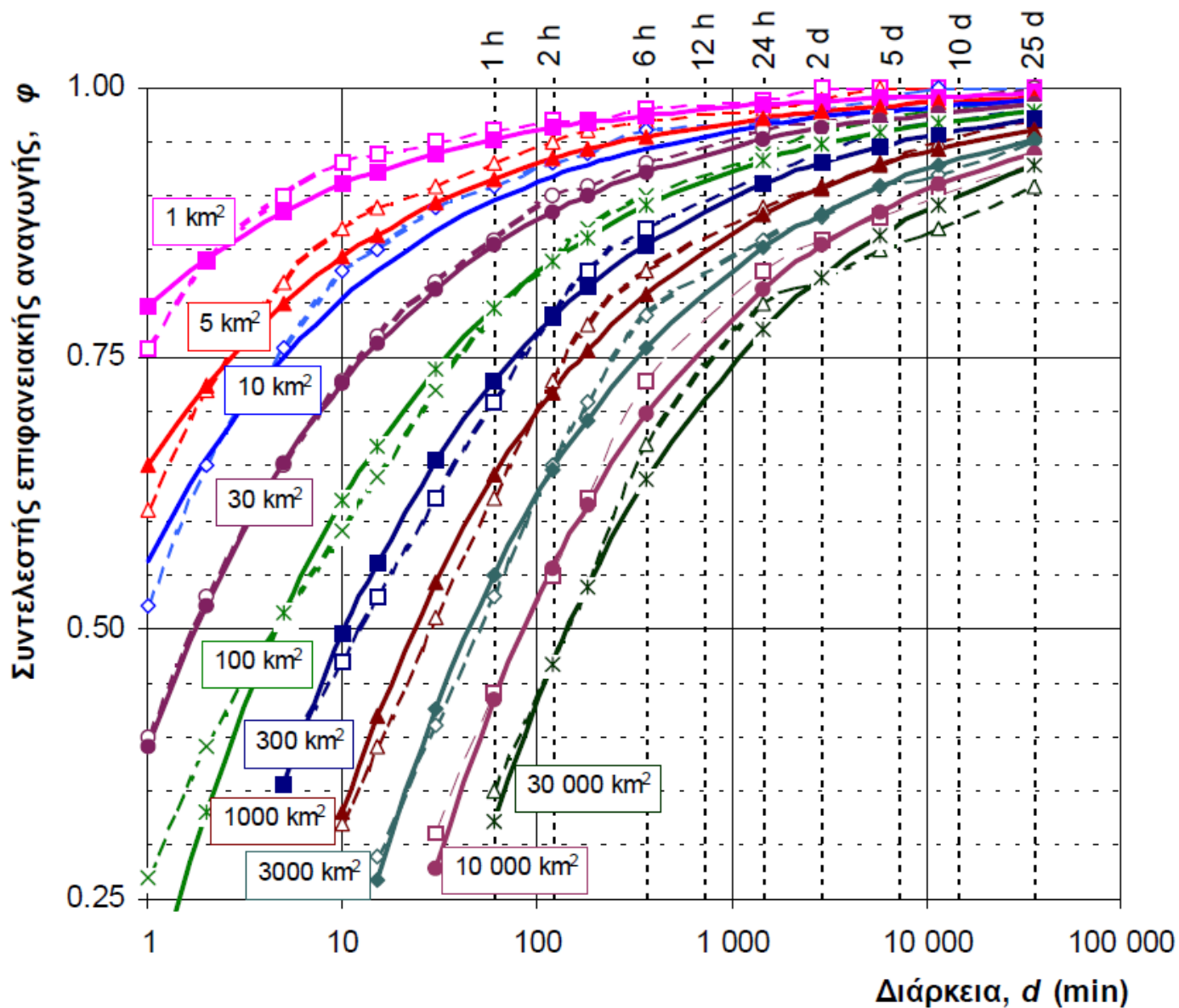
$$\phi = 1 - \frac{0.048A^{0.36-0.01\ln A}}{D^{0.35}} \geq 0.25$$

όπου ϕ ο συντελεστής επιφανειακής αναγωγής (αδιάστατος αριθμός),
 A η έκταση σε Km², και
 D η διάρκεια της βροχής σε ώρες (h).



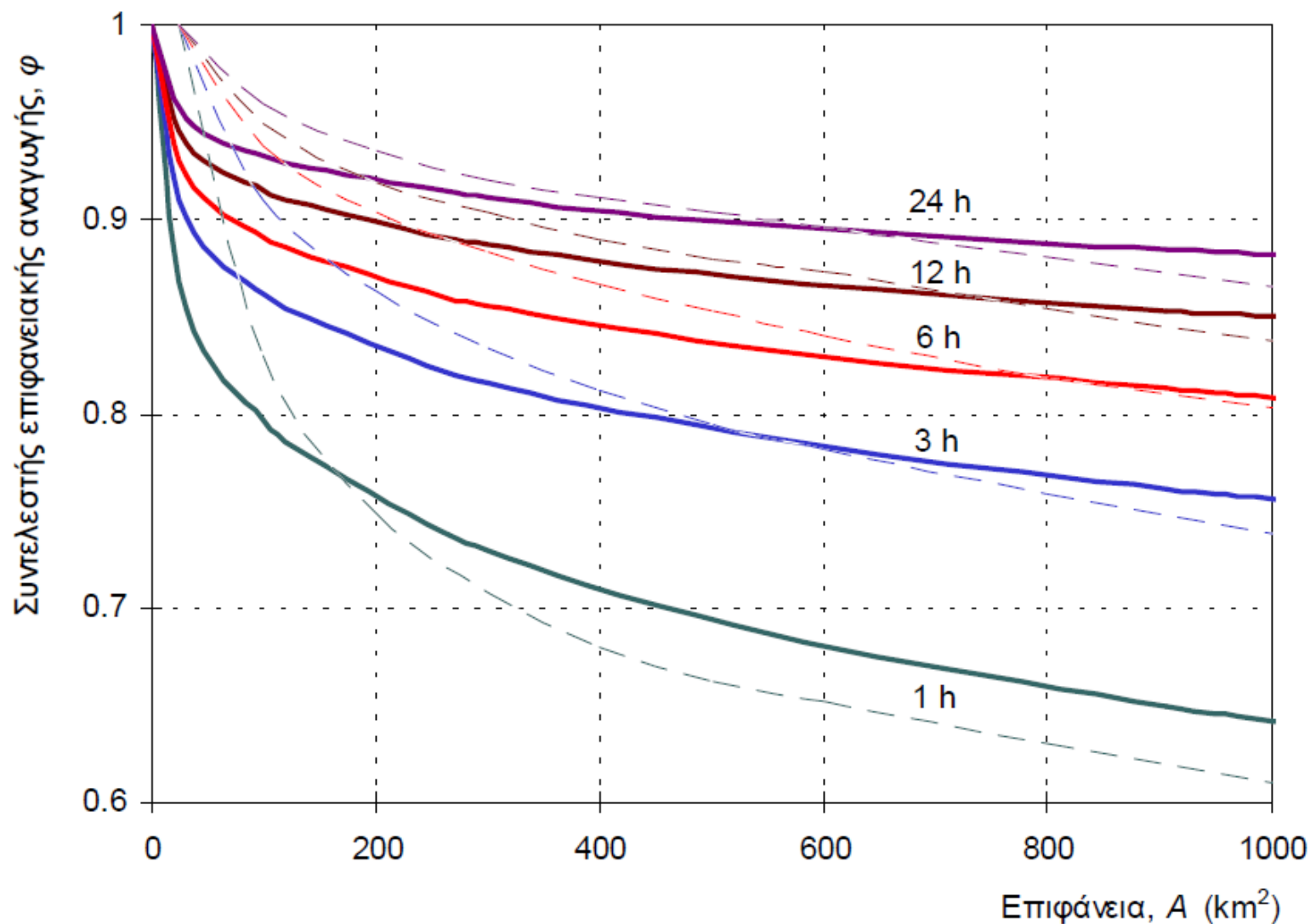
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΑΝΑΓΩΓΗ ΟΜΒΡΙΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ

Μεταβολή του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής συναρτήσει της έκτασης και της διάρκειας βροχής, σύμφωνα με την αναλυτική έκφραση (συνεχείς γραμμές), σε σύγκριση και με τις πινακοποιημένες τιμές του National Environmental Research Council (1975) (διακεκομμένες γραμμές) (Πηγή: Κουτσογιάννης, 1997)



ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΑΝΑΓΩΓΗ ΟΜΒΡΙΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ

Μεταβολή του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής συναρτήσει της έκτασης και της διάρκειας βροχής για τις ΗΠΑ, σύμφωνα με U.S. Weather Bureau (1960) (διακεκομμένες γραμμές), σε σύγκριση με την αναλυτική έκφραση που προέκυψε απ καμπύλες της Μεγάλης Βρετανίας (συνεχείς γραμμές) (Πηγή: Κουτσογιάννης, 1997)



Βιβλιογραφία

Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. 2012. «Πλημμύρες-Εκτίμηση πλημμυρικών αιχμών», Διαφάνειες του μαθήματος «Τεχνική Υδρολογία»
<http://users.itia.ntua.gr/nikos/hydrology/>

Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος. «Τεχνική Υδρολογία», Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.

Κουτσογιάννης, Δ. «Στατιστική Υδρολογία», Έκδοση 4, 312 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1997.

Μιμίκου, Μ.Α. «Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 3^η Έκδοση, 2006.

Μιμίκου, Μ.Α. και Ε.Α. Μπαλτάς. «Τεχνική Υδρολογία», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 5^η Έκδοση, 2012.

Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. «Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων», Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούδη, 2001.

Τσακίρης, Γ. «Υδατικοί Πόροι Ι. Τεχνική Υδρολογία», Εκδόσεις Συμμετρία, 1995.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

