

Ερευνητικό έργο:

**Διερεύνηση και αντιμετώπιση προβλημάτων ευστάθειας των πρανών
και του πυθμένα του ρέματος Φιλοθέης
με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων
και σύγχρονων περιβαλλοντικών τεχνικών**

Ανάθεση:

Δήμος Φιλοθέης

Εκπόνηση:

**Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**

Επιστημονικός Υπεύθυνος:

Αναστάσιος Στάμου

Υδρολογική Μελέτη Πλημμυρών

Σύνταξη:

Δημήτρης Κουτσογιάννης

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2004

Ερευνητικό έργο: Διερεύνηση και αντιμετώπιση προβλημάτων ευστάθειας των πρανών και του πυθμένα του ρέματος Φιλοθέης με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων και σύγχρονων περιβαλλοντικών τεχνικών

Υδρολογική Μελέτη Πλημμυρών

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή	1
1.1	Αντικείμενο και διάρθρωση της μελέτης	1
1.2	Περιγραφή λεκάνης απορροής	1
1.3	Προγενέστερες μελέτες	4
2.	Όμβριες καμπύλες	5
2.1	Γενική μεθοδολογία	5
3.	Μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης	9
4.	Πλημμύρες σχεδιασμού	14
4.1	Καταιγίδες σχεδιασμού	14
4.2	Απώλειες - Ωφέλιμη βροχή	15
4.3	Βασική ροή - Τήξη χιονιού	16
4.4	Περίοδοι επαναφοράς	16
4.5	Υπολογισμοί και αποτελέσματα	17
	Αναφορές	21

Ερευνητικό έργο: Διερεύνηση και αντιμετώπιση προβλημάτων ευστάθειας των πρανών και του πυθμένα του ρέματος Φιλοθέης με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων και σύγχρονων περιβαλλοντικών τεχνικών

Υδρολογική Μελέτη Πλημμυρών

Δημήτρης Κουτσογιάννης
Τομέας Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο και διάρθρωση της μελέτης

Το ερευνητικό έργο αναφέρεται στο ρέμα Ποδονίφτη και ειδικότερα στο ακάλυπτο τμήμα του στην περιοχή της Φιλοθέης (γνωστό και ως ρέμα Φιλοθέης) και έχει αντικείμενο:

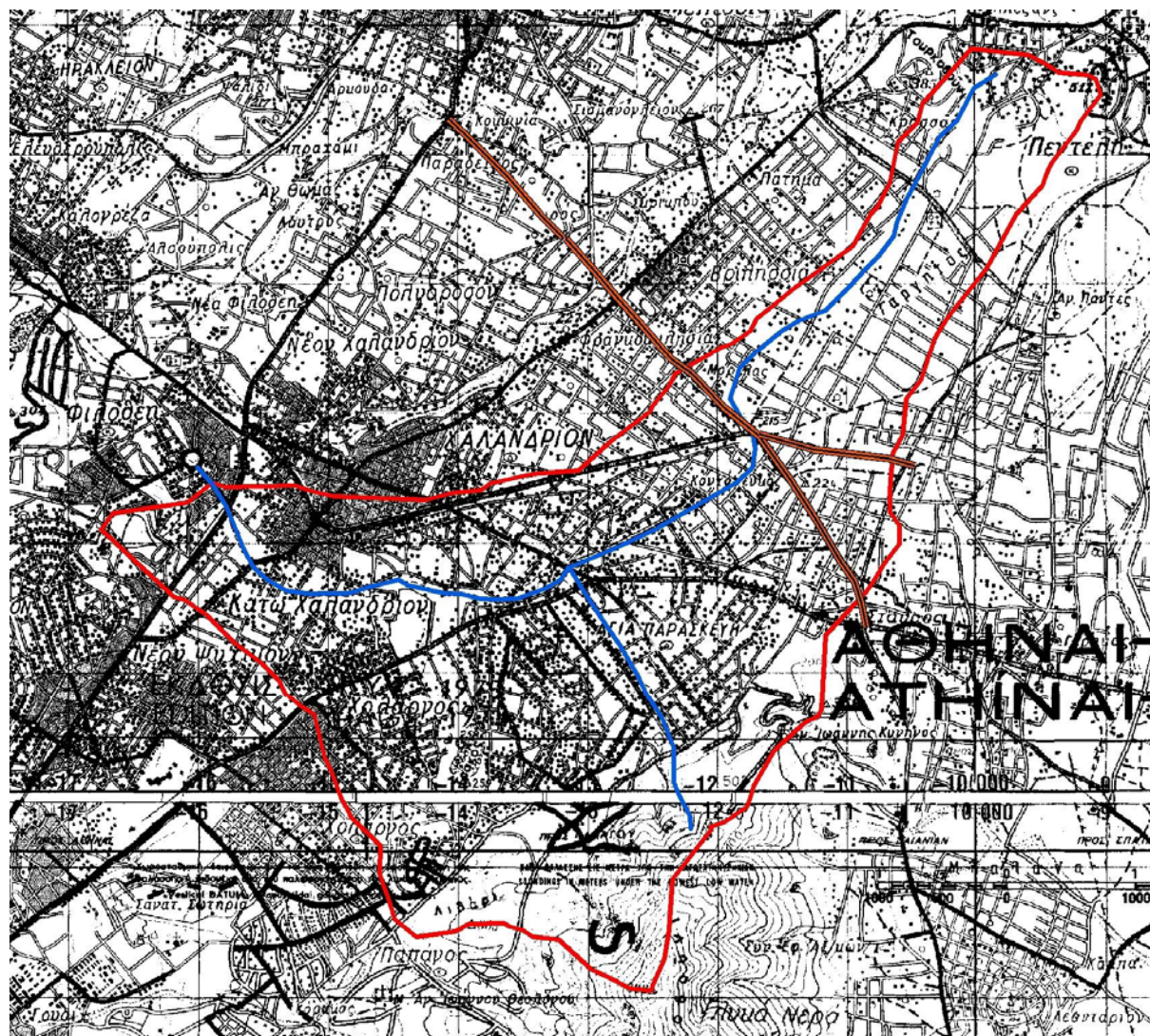
- Να ερευνηθούν οι μεταβολές που αφορούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ρέματος, τα οποία φαίνεται ότι έχουν μεταβληθεί σημαντικά σε σχέση με την αποτύπωση του 1984.
- Να διατυπωθούν εναλλακτικές φιλοπεριβαλλοντικές προτάσεις έργων σε επιλεγμένες θέσεις του ρέματος με σκοπό την εξασφάλιση της ευστάθειας των πρανών και του επιπέδου του πυθμένα.
- Να εκτιμηθούν οι παροχές σχεδιασμού του ρέματος.
- Να εξεταστούν εναλλακτικές προτάσεις έργων από υδραυλικής πλευράς.
- Να διατυπωθούν και να κοστολογηθούν τελικές προτάσεις για επεμβάσεις σε επιλεγμένες θέσεις του ρέματος με σκοπό την εξασφάλιση της ευστάθειας των πρανών και του επιπέδου του πυθμένα.

Η παρούσα υδρολογική μελέτη αναφέρεται στην εκτίμηση των παροχών σχεδιασμού του ρέματος για εναλλακτικές περιόδους επαναφοράς σχεδιασμού. Η μελέτη στηρίζεται κατά βάση στην κατάρτιση καταιγίδων σχεδιασμού και το μετασχηματισμό τους σε πλημμύρες σχεδιασμού, δεδομένου δεν υπάρχουν μετρήσεις παροχής στο ρέμα. Υδρολογική περιγραφή της λεκάνης απορροής δίνεται στην συνέχεια του κεφαλαίου 1. Οι όμβριες καμπύλες που χρησιμοποιούνται στη μελέτη περιγράφονται στο κεφάλαιο 2. Στο κεφάλαιο 3 καταρτίζεται συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης και, με βάση αυτό και τις όμβριες καμπύλες, στο κεφάλαιο 4 εκτιμώνται οι πλημμύρες σχεδιασμού για διάφορες περιόδους επαναφοράς.

1.2 Περιγραφή λεκάνης απορροής

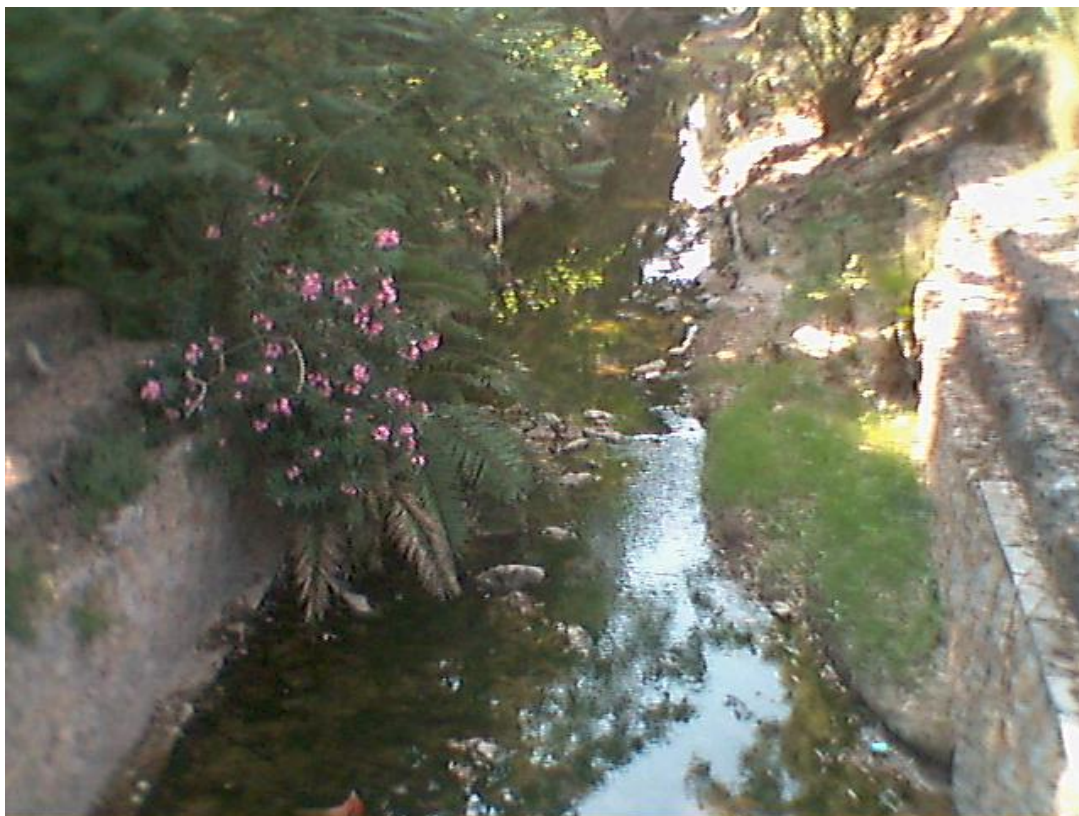
Η υδρολογική λεκάνη του Ποδονίφτη ανάντη της Φιλοθέης απεικονίζεται στο Σχ. 1. Στο γεωλογικό υπόβαθρο της λεκάνης κυριαρχούν τα ανθρακικά πετρώματα και μαρμαρυγικοί ασβεστόλιθοι που πλαισιώνονται από πλειστοκαινικές ποτάμιες προσχώσεις και πρόσφατες αλλουβιακές αποθέσεις. Ο φυσικός υδροκρίτης της λεκάνης, όπως καθορίζεται από το φυσικό

ανάγλυφο που αποδόθηκε ψηφιακά σε σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας, ορίζει έκταση λεκάνης στη διατομή εξόδου που φαίνεται στο Σχ. 1 (λίγο κατάντη της Λεωφόρου Κηφισίας), ίση με 19.0 km^2 . Ωστόσο, με την πρόσφατη κατασκευή των αντιπλημμυρικών έργων της Αττικής Οδού (βλ. Σχ. 1) σημαντικό μέρος της φυσικής λεκάνης και συγκεκριμένα το τμήμα ανάντη της Αττικής Οδού αποχετεύεται πλέον μέσω της Σήραγγας Εκτροπής του Ποδονίφτη προς το ρέμα Παναγίτσας που αποτελεί κλάδο του ρέματος Ραφήνας. Έτσι, απομένει έκταση λεκάνης απορροής ίση με 14.3 km^2 , η απορροή της οποίας ακολουθεί τη φυσική πορεία του ρέματος Ποδονίφτη.



Σχ. 1 Υδρολογική λεκάνη Ποδονίφτη ανάντη Φιλοθέης.

Το σημαντικότερο μέρος της λεκάνης (ποσοστό της τάξης του 80%) είναι αστικοποιημένο. Εξ άλλου, η κοίτη του Ποδονίφτη ανάντη της Λεωφόρου Κηφισίας και μέχρι το τέλος της στην Αττική Οδό είναι διευθετημένη υπό μορφή κλειστού οχετού, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται στον Πίν. 1. Μόνο στην περιοχή της Φιλοθέης έχει μείνει σε σημαντικό μήκος ανοιχτή η κοίτη με ήπια διευθέτηση (Σχ. 2) για να καταλήξει λίγο πιο κάτω και πάλι σε κλειστό οχετό (Σχ. 3).



Σχ. 2 Χαρακτηριστική φωτογραφία της ήπιας διεύθετης του ρέματος Φιλοθέης.

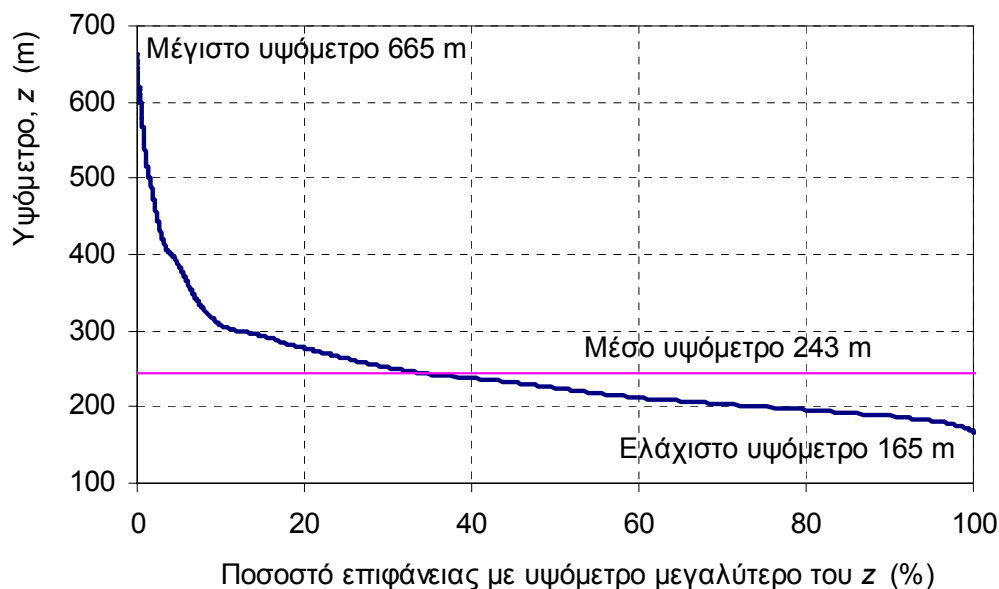


Σχ. 3 Φωτογραφία του κατάντη πέρατος της ανοιχτής κοίτης του ρέματος Φιλοθέης.

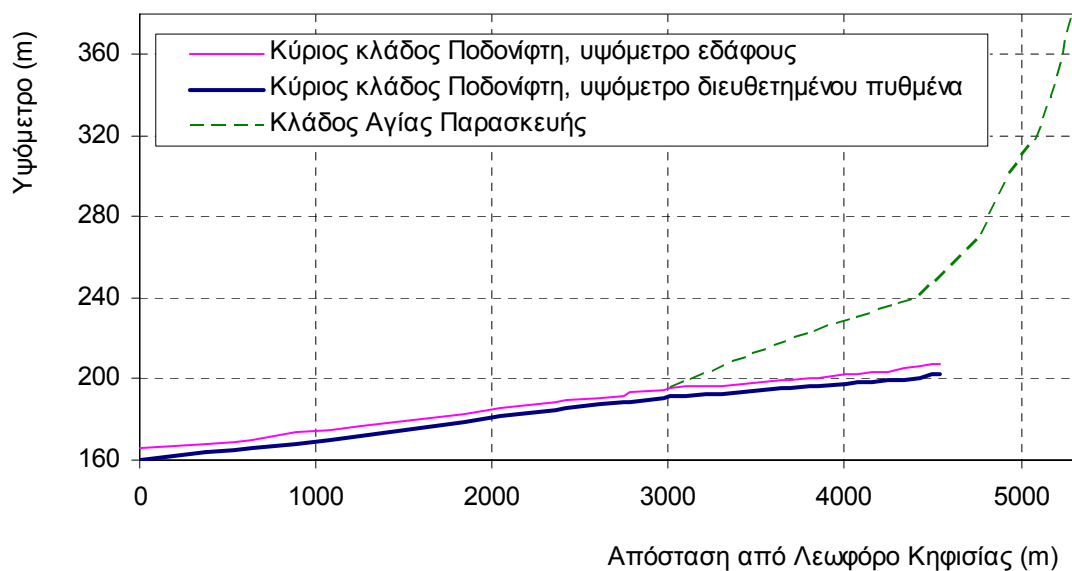
Το γενικό σχήμα του υδρογραφικού δικτύου χαρακτηρίζεται από ένα κύριο κλάδο που ξεκινά από την Πεντέλη και ένα δευτερεύοντα που ξεκινά τον Υμηττό (κλάδος Αγίας

Παρασκευής). Όπως προαναφέρθηκε, το μέρος του κύριου κλάδου ανάντη της Αττικής Οδού έχει εκτραπεί και δεν υπολογίζεται στις εκτιμήσεις παροχών που ακολουθούν.

Η κατανομή υψομέτρων της λεκάνης δίνεται στο Σχ. 4, ενώ υδρολογικές μηκοτομές του κύριου και του δευτερεύοντα κλάδου του χειμάρρου δίνονται στο Σχ. 5.



Σχ. 4 Κατανομή υψομέτρων της λεκάνης.



Σχ. 5 Υδρολογική μηκοτομή του κύριου και δευτερεύοντα κλάδου του Ποδονίφτη.

1.3 Προγενέστερες μελέτες

Η μελέτη για την εκτροπή του Ποδονίφτη έγινε από τα Γραφείο Μαχαίρα & Υδροεξυγιαντική (1998) και το Γραφείο Σωτηρόπουλου (1998). Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η παροχή

σχεδιασμού της εκτροπής του Ποδονίφτη ήταν $142 \text{ m}^3/\text{s}$ (περίοδος επαναφοράς 50 ετών). Εκτιμήσεις των παροχών του Ποδονίφτη σε διάφορες θέσεις έγιναν στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος του ΕΜΠ (Τσακίρης, 1996). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η παροχή του Ποδονίφτη στη Φιλοθέη εκτιμήθηκε στα 98 και $121 \text{ m}^3/\text{s}$ για περιόδους επαναφοράς 25 και 50 ετών, αντίστοιχα. Σε αυτές τις εκτιμήσεις στηρίχτηκαν μεταγενέστερες μελέτες έργων αναδιευθέτησης του ρέματος Φιλοθέης (Οριο κ.ά., 1997).

2. Όμβριες καμπύλες

2.1 Γενική μεθοδολογία

Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν όμβριες καμπύλες που έχουν δημοσιευτεί από τους Koutsoyiannis and Baloutsos (2000). Η γενική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την κατάρτιση των όμβριων καμπυλών περιγράφεται λεπτομερώς αλλού (Κουτσογιάννης, 1997, Koutsoyiannis et. al., 1998, Koutsoyiannis, 1999, Koutsoyiannis and Baloutsos, 2000), ενώ έχει επιβεβαιωθεί σε πρόσφατη εκτεταμένη μελέτη που περιλαμβάνει βροχομετρικά δεδομένα από όλο τον κόσμο (Koutsoyiannis, 2004a, b). Τα γενικά χαρακτηριστικά της συνοψίζονται στα ακόλουθα σημεία:

1. Η γενική συναρτησιακή σχέση όμβριων καμπυλών είναι της μορφής

$$i = \frac{a(T)}{b(d)} \quad (1)$$

όπου i η μέγιστη ένταση βροχής διάρκειας d για περίοδο επαναφοράς T , και $a(T)$ και $b(d)$ κατάλληλες συναρτήσεις της περιόδου επαναφοράς και της διάρκειας, αντίστοιχα (Κουτσογιάννης, 1997).

2. Η συνάρτηση $b(d)$ είναι της ακόλουθης, εμπειρικά διαπιστωμένης, γενικής μορφής

$$b(d) = (d + \theta)^\eta \quad (2)$$

όπου θ και η αποτελούν παραμέτρους προς εκτίμηση ($\theta > 0$, $0 < \eta < 1$) (Κουτσογιάννης, 1997).

3. Η συνάρτηση $a(T)$ προκύπτει αναλυτικά από τη συνάρτηση κατανομής που ισχύει για την μέγιστη ένταση βροχής της υπό εξέταση περιοχής, όπως αυτή προκύπτει από την επεξεργασία των διαθέσιμων δεδομένων, ενώ αποφεύγεται η χρήση εμπειρικών συναρτήσεων (Κουτσογιάννης, 1997).
4. Μια συνάρτηση κατανομής κατάλληλη για τη μέγιστη ένταση βροχής σε μεγάλο εύρος περιπτώσεων είναι η κατανομή Γενική Ακραίων Τιμών (ΓΑΤ· διεθνώς General Extreme Value – GEV – distribution). Αυτή η κατανομή ενσωματώνει τις κατανομές ακραίων τιμών τύπου I, II, και III και έχει την έκφραση

$$F(x) = \exp\left\{-\left[1 + \kappa\left(\frac{x}{\lambda} - \psi\right)\right]^{-1/\kappa}\right\} \quad x \geq \lambda(\psi - 1/\kappa) \quad (3)$$

όπου $F(x)$ η συνάρτηση κατανομής για τιμές της μεταβλητής x , και κ , $\lambda > 0$ και ψ οι παράμετροι σχήματος, κλίμακας και θέσης, αντίστοιχα. Η μεταβλητή x αντιπροσωπεύει είτε την ένταση βροχής i είτε, ισοδύναμα, το γινόμενο $i b(d)$ (για δεδομένη έκφραση της $b(d)$). στην τελευταία περίπτωση η επίλυση της (3) ως προς x δίνει αμέσως τη συνάρτηση $a(T)$ και, στη συνέχεια, η επίλυση ως προς i δίνει αμέσως την έκφραση της όμβριας καμπύλης χωρίς να απαιτείται καμιά πρόσθετη, εμπειρική ή όχι, παραδοχή (Κουτσογιάννης, 1997, Koutsoyiannis et. al., 1998).

5. Η (3) επιλύεται άμεσα ως προς x , οπότε με την προϋπόθεση ότι $F(x) = 1 - 1/T$ (προϋπόθεση που ισχύει για σειρές ετήσιων μέγιστων) προκύπτει

$$x_T = \lambda \left\{ \psi + \frac{\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right]^{-\kappa} - 1}{\kappa} \right\} = \lambda' \left\{ \psi' + \left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right]^{-\kappa} \right\} \quad (4)$$

όπου για απλοποίηση έχει τεθεί $\lambda' = \lambda / \kappa$ and $\psi' = \kappa \psi - 1$ (Koutsoyiannis et. al., 1998).

6. Για $\kappa = 0$ η κατανομή ΓΑΤ μεταπίπτει στην κατανομή μεγίστων τύπου I (Gumbel), οπότε η (3) παίρνει τη ειδική μορφή

$$F(x) = \exp(-e^{-x/\lambda + \psi}) \quad (5)$$

όπου λ και ψ είναι οι παράμετροι κλίμακας και θέσης, αντίστοιχα, της κατανομής. Αντίστοιχα, η (4) παίρνει τη μορφή (Κουτσογιάννης, 1997, Koutsoyiannis et. al., 1998)

$$x_T = \lambda \left\{ \psi - \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

7. Για $\kappa > 0$ προκύπτει η τριπαραμετρική κατανομή τύπου II. Η περίπτωση $\kappa < 0$ είναι μαθηματικά δυνατή και αντιστοιχεί στην κατανομή μεγίστων τύπου III, αλλά δεν είναι κατάλληλη για μέγιστες εντάσεις βροχής, γιατί συνεπάγεται άνω φραγμένη τιμή της έντασης, γεγονός που αντίκειται στη φυσική πραγματικότητα. Η ειδική περίπτωση $\kappa = 1/\psi$ (ή ισοδύναμα $\psi' = 0$) αντιστοιχεί στην κατανομή Fréchet (ειδική περίπτωση της κατανομής μεγίστων τύπου II), η οποία, ωστόσο, δεν έχει πρακτικό ενδιαφέρον.
8. Η κατανομή Gumbel έχει γίνει αποδεκτή ευρύτατα στην Ελλάδα και διεθνώς για την περιγραφή μεγίστων εντάσεων βροχής, χρησιμοποιώντας συνήθως δείγματα μήκους λίγων δεκάδων ετών. Ωστόσο, πρόσφατη μελέτη μεγάλου αριθμού δειγμάτων ετήσιων μεγίστων βροχοπτώσεων απ' όλο τον κόσμο (163 σταθμοί, 18 000 σταθμοί-έτη) με μεγάλο μήκος (≥ 100 ετών) κατέδειξε ότι η κατανομή Gumbel είναι ακατάλληλη και πρέπει να αποφεύγεται γιατί οδηγεί σε υπεκτίμηση των μεγάλων βροχοπτώσεων. Αντίθετα, η τριπαραμετρική κατανομή μεγίστων τύπου II με παράμετρο σχήματος $\kappa \approx 0.15$ φαίνεται να είναι

κατάλληλη για όλα τα δείγματα που μελετήθηκαν (Koutsoyiannis and Baloutsos, 2000· Koutsoyiannis, 2004a, b).

9. Επίσης, από πρόσφατη στατιστική διερεύνηση (Koutsoyiannis, 1999) των δεδομένων από 2645 σταθμούς διεσπαρμένους σε όλο τον κόσμο, με συνολικό πλήθος μετρήσεων 95 000 σταθμών-ετών, τα οποία είχαν μελετηθεί παλιότερα από τον Hershfield (1961, 1965) και αποτέλεσαν τη βάση για τη διατύπωση της φερώνυμης μεθόδου εκτίμησης της πιθανής μέγιστης κατακρήμνισης (ΠΜΚ· probable maximum precipitation – PMP) διαπιστώθηκε ότι (α) η κατανομή ΓΑΤ είναι γενικά κατάλληλη για ετήσιες σειρές μέγιστων βροχοπτώσεων, (β) η τιμή που υπολογίζεται τη μέθοδο Hershfield (1961, 1965) ως ΠΜΚ, αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς περίπου 60 000 ετών, και (γ) η τιμή της παραμέτρου σχήματος της κατανομής ΓΑΤ είναι κατά μέσο όρο $\kappa = 0.13$.
10. Τα παραπάνω συνηγορούν στην αποδοχή της τριπαραμετρικής κατανομής μεγίστων τύπου II ως κατάλληλης κατανομής για μέγιστες βροχοπτώσεις. Αντίθετα, η χρήση της κατανομής Gumbel (μεγίστων τύπου I) θα πρέπει να αποφεύγεται, δεδομένου ότι οδηγεί σε σοβαρή υπεκτίμηση των εντάσεων βροχής για μεγάλες περιόδους επαναφοράς. Σε περίπτωση που υπάρχει μεγάλο μήκος δείγμα, η παράμετρος σχήματος της κατανομής ΓΑΤ μπορεί να εκτιμάται άμεσα από το δείγμα. Σε αντίθετη περίπτωση είναι προτιμότερο να υιοθετείται η τιμή 0.15.
11. Η αποδοχή της κατανομής ΓΑΤ σε συνδυασμό με τις (1) και (2) οδηγεί στην ακόλουθη γενικευμένη έκφραση όμβριων καμπυλών

$$i(d, T) = \frac{\lambda' \left\{ \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]^{-\kappa} + \psi' \right\}}{(d + \theta)^\eta} \quad (\kappa \neq 0) \quad (7)$$

12. Στην εξίσωση (7) η περίοδος επαναφοράς αναφέρεται σε σειρές ετήσιων μεγίστων και κατά συνέπεια παίρνει τιμές μεγαλύτερες από 1 έτος. Αν η περίοδος επαναφοράς οριστεί με αναφορά σε σειρές υπεράνω κατωφλίου, οπότε μπορεί να πάρει και τιμές μικρότερες από 1 έτος, η αντίστοιχη εξίσωση προκύπτει θεωρητικά ότι έχει την ακόλουθη απλούστερη έκφραση (Koutsoyiannis et al., 1998)

$$i(d, T) = \frac{\lambda' (T^\kappa + \psi')}{(d + \theta)^\eta} \quad (\kappa \neq 0) \quad (8)$$

Για μικρές περιόδους επαναφοράς, η εξίσωση (8) είναι προφανώς δυσμενέστερη από την αντίστοιχη της (7), ενώ για μεγαλύτερες περιόδους επαναφοράς ($T > 10$ χρόνια) πρακτικώς η πρώτη ταυτίζεται με τη δεύτερη, δεδομένου ότι για μικρές τιμές του $1/T$ ισχύει $\ln [1 - (1/T)] = -(1/T) - (1/T)^2 - \dots \approx -1/T$.

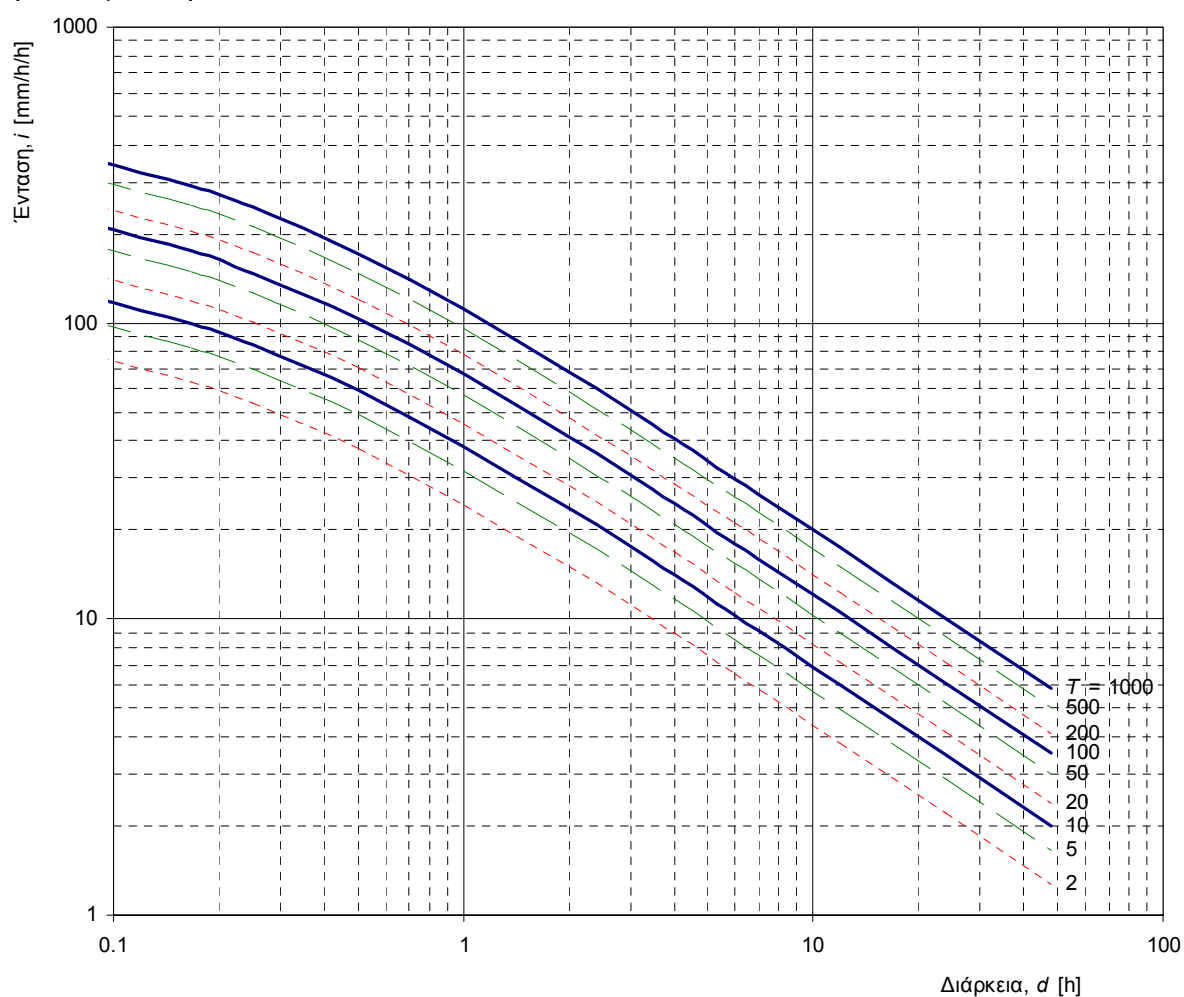
13. Για την εκτίμηση των παραμέτρων λ , ψ (ή ισοδύναμα λ' , ψ'), θ και η των παραπάνω εκφράσεων όμβριων καμπυλών έχουν διατυπωθεί από τον Κουτσογιάννη (1997· βλ. και

Koutsoyiannis et al., 1998) δύο συνεπείς στατιστικές μέθοδοι, οι οποίες αποφεύγουν τη χρήση εμπειρικών τεχνικών που χρησιμοποιούνταν παλιότερα.

Η ανάπτυξη της παραπάνω μεθοδολογίας βασίστηκε, μεταξύ άλλων, και σε δείγμα μέγιστων βροχοπτώσεων της Αθήνας. Πρόκειται για το δείγμα των ετήσιων μέγιστων ημερήσιων βροχοπτώσεων του σταθμού του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών στο λόφο Νυμφών της Αθήνας, μήκους 143 ετών, το μεγαλύτερο της χώρας και ένα από τα μεγαλύτερα παγκοσμίως. Χρησιμοποιώντας αυτό το δείγμα σε συνδυασμό με ετήσια μέγιστα ύψη βροχοπτώσεων για μικρότερες διάρκειες από του σταθμό της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας στο Ελληνικό, μήκους 30 ετών, κατασκευάστηκε η ακόλουθη έκφραση όμβριων καμπυλών για την περιοχή της Αθήνας (Koutsoyiannis and Baloutsos, 2000)

$$i(d, T) = \frac{40.6 (T^{0.185} - 0.45)}{(d + 0.189)^{0.796}} \quad (d \text{ σε h, } T \text{ σε έτη, } i \text{ σε mm/h}) \quad (9)$$

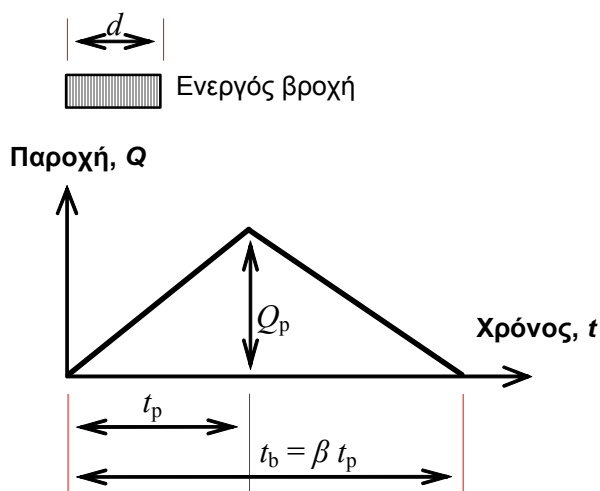
Αυτή η έκφραση, γραφική απεικόνισή της οποίας δίνεται στο Σχ. 6, χρησιμοποιείται και στην παρούσα μελέτη.



Σχ. 6 Γραφική απεικόνιση όμβριων καμπυλών της Αθήνας (Koutsoyiannis and Baloutsos, 2000).

3. Μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης

Για την εκτίμηση των πλημμυρών σχεδιασμού υιοθετήσαμε τη μέθοδο του μοναδιαίου υδρογραφήματος αντί της συνηθέστερης αλλά λιγότερο αξιόπιστης ορθολογικής μεθόδου. Η άμεση κατάρτιση μοναδιαίων υδρογραφημάτων, από υδρομετρικά/σταθμηγραφικά και βροχογραφικά δεδομένα δεν είναι δυνατή, επειδή σε καμιά θέση δεν έχουν υπάρξει υδρομετρήσεις. Έτσι, καταφύγαμε στην κατάρτιση συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος, το οποίο για απλοποίηση των υπολογισμών θεωρήσαμε τριγωνικό.



Σχ. 7 Τριγωνικό μοναδιαίο υδρογράφημα και χαρακτηριστικά μεγέθη του.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 7, για δεδομένη διάρκεια βροχής d , το τριγωνικό μοναδιαίο υδρογράφημα ορίζεται πλήρως από δύο χρονικές παραμέτρους: το χρόνο ανόδου t_p και την ολική διάρκεια πλημμύρας t_b . Η τελευταία, ορίζεται συνήθως ως

$$t_b = \beta t_p \quad (10)$$

όπου β σταθερά με συνήθη τιμή $\beta \approx 2.5$. Η πλημμυρική παροχή αιχμής προκύπτει από την εξίσωση συνέχειας: $h_0 A = \frac{1}{2} t_b Q_p$, όπου $h_0 = 10$ mm το μοναδιαίο ύψος βροχής και A η έκταση της λεκάνης, ή ισοδύναμα

$$Q_p = \frac{2 h_0 A}{t_b} = \frac{2 h_0 A}{\beta t_p} \quad (11)$$

Σύμφωνα με τη γραμμική θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος (που βασίζεται σε γενικές ιδιότητες των συνελίξεων) η απόσταση μεταξύ των κέντρων βάρους του ενεργού βροχογραφήματος και του πλημμυρογραφήματος είναι αναλλοίωτη. Εν προκειμένω, η τεταμένη του κέντρου βάρους του βροχογραφήματος είναι $d/2$ και αυτή του πλημμυρογραφήματος $(t_b + t_p)/3$, οπότε

$$(t_b + t_p)/3 - d/2 = ct \quad (12)$$

Αν θεωρήσουμε προσεγγιστικά ότι για διάρκεια $d' \neq d$ παραμένει το τριγωνικό σχήμα του μοναδιαίου υδρογραφήματος, τότε από τις (12) και (10) προκύπτει ότι ο χρόνος ανόδου για αυτή τη διάρκεια είναι

$$t'_p = t_p + \frac{d' - d}{2} \frac{3}{1 + \beta} \quad (13)$$

Προφανώς το τριγωνικό σχήμα παύει να θεωρείται εύλογο όταν η διάρκεια βροχής d' ξεπεράσει το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης t_c . Στην οριακή περίπτωση $d' = t'_p = t_c$, η εξίσωση (13) μπορεί να δώσει τη σχέση του χρόνου συγκέντρωσης t_c και του χρόνου ανόδου t_p για διάρκεια βροχής d , ήτοι

$$t_c = \frac{(2 + 2\beta) t_p - 3d}{2\beta - 1} \quad (14)$$

ή ισοδύναμα

$$t_p = \left(1 - \frac{3}{2 + 2\beta}\right) t_c + \frac{3}{2 + 2\beta} d \quad (15)$$

Για $\beta = 2.5$ η (15) γράφεται $t_p = 0.57 t_c + 0.43 d$, η οποία δεν απέχει από την συχνά χρησιμοποιούμενη εμπειρική εξίσωση

$$t_p \approx 0.6 t_c + d/2 \quad (16)$$

Στην περίπτωση του Ποδονίφτη που έχει κοίτη διευθετημένη σε κλειστό αγωγό η εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης μπορεί να γίνει με σχετική ευκολία και ακρίβεια, μέσω υδραυλικών υπολογισμών. Οι σχετικοί υδραυλικοί υπολογισμοί με την υπόθεση ολικής πλήρωσης του αγωγού και κλίσης ενέργειας ίσης με την κλίση πυθμένα (όπως στην ομοιόμορφη ροή) δίνονται στον Πίν. 1. Γενικώς παρατηρούνται υψηλές ταχύτητες ροής, από περίπου 4 m/s μέχρι πάνω από 9 m/s, με αποτέλεσμα ο συνολικός χρόνος ροής μέσα στον μήκους 4.5 km αγωγό να είναι μόλις 13.5 min. Προσθέτοντας κατ' εκτίμηση χρόνο εισόδου 15 min καταλήγουμε σε ένα χρόνο συγκέντρωσης $t_c = 28.5$ min, οπότε, υποθέτοντας διάρκεια βροχής $d = 0.2$ h και $\beta = 2.5$, από την (15) προκύπτει $t_p = 0.37 \approx 0.4$ h. Εξ άλλου, από τις (10) και (11) προκύπτουν, αντίστοιχα, $t_b = 1$ h και $Q_p = 79.4$ m³/s. Το τελικό μοναδιαίο υδρογράφημα με αυτά τα χαρακτηριστικά φαίνεται στο Σχ. 8.

Εξ άλλου, από τον Πίν. 1 προκύπτει ότι η διευθετημένη διατομή του Ποδονίφτη στο κύριο τμήμα της ανάμεσα στις θέσεις 529 m και 2968 m μπορεί να παροχετεύσει από 91 μέχρι 114 m³/s. Στο τελικό τμήμα, κατάντη της θέσης 529 m αυξάνεται η παροχετευτικότητα στα 180 m³/s, αλλά αυτό λίγο επηρεάζει την εξέλιξη ενός μείζονος πλημμυρικού φαινομένου. Έτσι, μπορεί να θεωρηθεί ότι σε γενικές γραμμές, όταν η παροχή κατά τη διάρκεια ενός

πλημμυρικού φαινομένου ξεπεράσει τα $114 \text{ m}^3/\text{s}$ στην υπό μελέτη διατομή, τότε στην ανάντη λεκάνη θα έχει εμφανιστεί επιφανειακή πλημμυρική ροή κατά μήκος των χαμηλών σημείων του οδικού δικτύου, δηλαδή πλησίον της κοίτης του Ποδονίφτη, επειδή δεν θα μπορεί να παροχετευτεί από τον οχετό το σύνολο της απορροής ομβρίων. Στο επιφανειακό πλημμυρικό φαινόμενο οι ταχύτητες ροής θα είναι μικρότερες σε σχέση με αυτές του οχετού και έτσι θα προκύψει ένα μοναδιαίο υδρογράφημα με μεγαλύτερο χρόνο ανόδου και διάρκεια πλημμύρας.

Πίν. 1 Γεωμετρικά και υδραυλικά στοιχεία κλειστής διατομής Ποδονίφτη ανάντη της Λεωφόρου Κηφισίας. (Η θέση $x = 0$ αντιστοιχεί στη διατομή εξόδου).

Θέση, x [m]	Πλάτος, b [m]	Κλίση πρανών, $1:z$ (κατ.:ορ.)	Ύψος, h [m]	Κατά μήκος κλίση, J	Ταχύτητα πλήρωσης , V_0 [m/s]	Παροχή πλήρωσης , Q_0 [m^3/s]	Χρόνος διαδρομής Δt [min]
372	7.6	0.2	3.1	1.11%	7.1	180.9	0.87
529	6.6	0.2	3.3	0.52%	4.8	114.2	0.54
638	5.0	0.0	3.2	0.99%	6.1	97.9	0.30
882	5.0	0.0	3.2	0.89%	5.8	92.8	0.70
1080	5.0	0.0	3.2	0.94%	6.0	95.4	0.55
1251	5.0	0.0	3.2	1.16%	6.6	105.9	0.43
1837	5.0	0.0	3.2	1.17%	6.7	106.4	1.47
1972	5.0	0.0	3.2	1.13%	6.5	104.6	0.34
2044	5.0	0.0	3.2	0.92%	5.9	94.4	0.20
2148	5.0	0.0	3.2	1.04%	6.3	100.3	0.28
2363	5.0	0.0	3.2	0.91%	5.9	93.8	0.61
2423	5.0	0.0	3.2	2.18%	9.1	145.2	0.11
2615	5.0	0.0	3.2	0.87%	5.7	91.8	0.56
2746	5.0	0.0	3.2	0.86%	5.7	91.2	0.38
2777	5.0	0.0	3.2	0.87%	5.7	91.8	0.09
2968	5.0	0.0	3.2	0.86%	5.7	91.2	0.56
3011	5.0	0.0	3.2	1.98%	8.7	138.4	0.08
3093	5.0	0.0	3.2	0.78%	5.4	86.9	0.25
3209	5.0	0.0	3.2	0.30%	3.4	53.9	0.57
3300	3.6	0.2	3.3	0.40%	3.7	51.4	0.41
3642	3.6	0.2	3.3	0.95%	5.7	79.2	0.99
3694	4.8	0.2	3.1	0.40%	3.9	63.8	0.22
3802	4.8	0.2	3.1	0.41%	3.9	64.6	0.46
3852	4.8	0.2	3.1	0.40%	3.9	63.8	0.22
4001	4.8	0.2	3.1	0.42%	4.0	65.4	0.63
4078	4.5	0.2	3.1	1.10%	6.3	98.6	0.20
4156	4.5	0.2	3.1	0.88%	5.7	88.2	0.23
4248	4.5	0.2	3.1	0.39%	3.8	58.7	0.41
4336	4.5	0.2	3.1	0.75%	5.2	81.4	0.28
4422	4.5	0.2	3.1	1.24%	6.7	104.7	0.21
4498	4.5	0.2	3.1	1.61%	7.7	119.3	0.17
4545	4.5	0.2	3.1	0.81%	5.4	84.6	0.14
Συνολικός χρόνος							13.5

Για την κατάρτιση του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος για το επιφανειακό πλημμυρικό φαινόμενο, χρησιμοποιήσαμε τη μέθοδο του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας και συμπληρωματικά τις μεθόδους Snyder και Giandotti.

Η μέθοδος του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας χρησιμοποιεί τοπογραφικά, υδρολογικά και άλλα δεδομένα της λεκάνης, τα οποία φαίνονται μαζί με τους σχετικούς υπολογισμούς στον Πίν. 2. Τα δεδομένα κλίσεων προέκυψαν από τη μηκοτομή που φαίνεται στο Σχ. 5. Η μέθοδος Snyder χρησιμοποιεί δεδομένα μόνο από την οριζοντιογραφία της λεκάνης, τα οποία φαίνονται, μαζί με τους σχετικούς υπολογισμούς στον Πίν. 2. Η μέθοδος Giandotti χρησιμοποιεί οριζοντιογραφικά και υψομετρικά δεδομένα.

Πιο συγκεκριμένα, το Βρετανικό Ινστιτούτο Υδρολογίας (Sutcliffe, 1978) συνιστά τη σύνθεση μοναδιαίου υδρογραφήματος (για διάρκεια βροχής $d = 1$ h) τριγωνικής μορφής, όπως φαίνεται στο Σχ. 7, με χρόνο ανόδου (σε h)

$$t_p = \frac{46.6 L^{0.14}}{S_{1085}^{0.38} (1 + \text{URBAN})^{1.99} \text{RSMD}^{0.4}} \quad (17)$$

και διάρκεια πλημμύρας σύμφωνα με την εξίσωση (10) με $\beta = 2.52$. Στην (17), L είναι το μήκος της κύριας μισγάγκειας σε km και S_{1085} είναι η μέση κλίση υδατορεύματος σε m/km που υπολογίζεται μεταξύ των σημείων 10% και 85% του μήκους του. Η παράμετρος URBAN είναι η αναλογία των αστικών περιοχών μέσα στη λεκάνη απορροής και η RSMD είναι παράμετρος μεγέθους βροχοπτώσεων, που πρακτικά μπορεί να θεωρηθεί ίση με το ύψος της μέγιστης 24ωρης βροχής για περίοδο επαναφοράς 5 ετών (σε mm).

Εξ άλλου, το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα του Snyder βασίζεται στις σχέσεις

$$t_p = C_t (L L_c)^{0.3} \quad (18)$$

$$Q_p = C_Q \frac{A}{t_p} \quad (19)$$

όπου L_c το μήκος υδατορεύματος από την έξοδο της λεκάνης μέχρι την προβολή του κέντρου βάρους της λεκάνης (km), και C_t και C_Q συντελεστές που βρέθηκε να έχουν μέσες τιμές 1.5 και 1.72 (στο μετρικό σύστημα μονάδων), αντίστοιχα, σε λεκάνες απορροής των Αππαλαχίων. Όμως ο ίδιος ο Snyder στην Ελλάδα (Άραχθος, Πουρνάρι) έχει υιοθετήσει πολύ δυσμενέστερες τιμές $C_t = 0.76$ και $C_Q = 2.0$, τιμές τις οποίες δεχτήκαμε και στην παρούσα μελέτη. Τα παραπάνω μεγέθη αναφέρονται σε μοναδιαίο υδρογράφημα με διάρκεια βροχής $t_p / 5.5$.

Ως μια περαιτέρω εναλλακτική προσέγγιση χρησιμοποιήσαμε τον τύπο του Giandotti, ο οποίος έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα στην Ελλάδα. Ο τύπος αυτός δίνει το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης και γράφεται

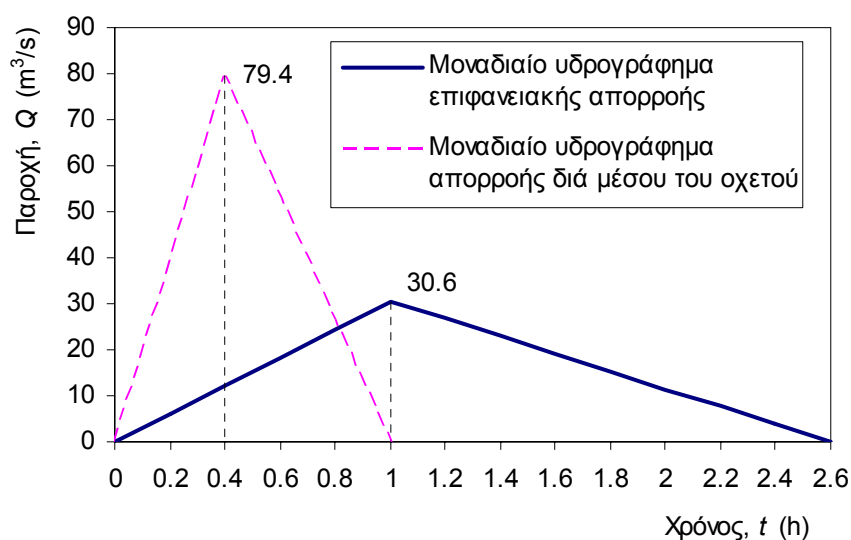
$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{\Delta H}} \quad (20)$$

όπου ΔH η διαφορά του μέσου υψόμετρου της λεκάνης από το υψόμετρο της εξόδου, σε m.

Τα απαιτούμενα δεδομένα και οι σχετικοί υπολογισμοί για τη σύνθεση του μοναδιαίου υδρογραφήματος για διάρκεια βροχής $d = 0.2$ h δίνονται στον Πίν. 2. Παρατηρούμε ότι ο χρόνος ανόδου t_p που υπολογίζεται με τη μέθοδο του Ινστιτούτου Υδρολογίας (0.8 h) είναι μικρότερος από αυτούς των μεθόδων Snyder (1.7 h) και Giandotti (1.2 h). Αυτό οφείλεται πρωτίστως στο γεγονός ότι οι δύο τελευταίες μέθοδοι δε λαμβάνουν υπόψη τον αστικοποιημένο χαρακτήρα της λεκάνης. Τελικώς υιοθετήσαμε την τιμή της μεθόδου του Ινστιτούτου Υδρολογίας, προσαυξάνοντάς τη κατά 0.2 h για να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι η ροή θα επιβραδυνθεί από την επιφανειακή διασπορά της πλημμύρας στους δρόμους. Το τελικό τριγωνικό μοναδιαίο υδρογράφημα που συνθέσαμε φαίνεται στο Σχ. 8 μαζί με το αντίστοιχο της ροής στον οχετό.

Πίν. 2 Φυσιογραφικά δεδομένα λεκάνης απορροής και εκτίμηση συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος της λεκάνης

Ιδιότητα	Τιμή
Έκταση, A (km ²)	14.3
Μήκος υδατορεύματος, L (km)	5.3
Μήκος υδατορεύματος από την έξοδο της λεκάνης μέχρι την προβολή του κ.β. της λεκάνης, L_c (km)	2.8
Υψόμετρο υδατορεύματος στην έξοδο της λεκάνης, z_E (m)	165
Υψόμετρο υδατορεύματος στην αρχή του, z_A (m)	380
Υψόμετρο υδατορεύματος στο 10% του μήκους του, z_{10} (m)	169
Υψόμετρο υδατορεύματος στο 85% του μήκους του, z_{85} (m)	247.4
Κλίση υδατορεύματος μεταξύ των σημείων 10% και 85% του μήκους του, S_{1085} (m/km)	19.7
Παράμετρος μεγέθους βροχοπτώσεων, RSMD (mm)	69
Παράμετρος αστικοποίησης, URBAN	0.8
Χρόνος ανόδου σύμφωνα με τον τύπο του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας για $d = 1$ h, t_p (h)	1.1
Προσαρμογή του χρόνου ανόδου σύμφωνα με τον τύπο του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας για $d = 0.2$ h, t_p (h)	0.8
Χρόνος ανόδου σύμφωνα με τον τύπο του Snyder, Αρχική τιμή t_{p0} (h)	1.7
Τελική τιμή κατά Snyder για βροχή $d = 0.2$ h, t_p (h)	1.7
Χρόνος συγκέντρωσης κατά Giandotti, t_c (h)	2.0
Εκτίμηση χρόνου ανόδου κατά Giandotti για $d = 0.5$ h, t_p (h)	1.2
Τελική τιμή χρόνου ανόδου για βροχή $d = 0.5$ h, t_p (h)	1.0
Διάρκεια πλημμύρας, T_b (h)	2.5
Τελική διάρκεια πλημμύρας (στρογγ.), T_b (h)	2.6
Παροχή αιχμής, Q_p (m ³ /s)	30.6



Σχ. 8 Τριγωνικά συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα του Ποδονίφτη στη διατομή ελέγχου (κατάντη Λεωφόρου Κηφισίας).

4. Πλημμύρες σχεδιασμού

4.1 Καταιγίδες σχεδιασμού

Η βασικότερη παραδοχή στην κατάρτιση της καταιγίδας σχεδιασμού στις λεκάνες αφορά στη χρονική κατανομή του συνολικού ύψους βροχής. Στην πράξη χρησιμοποιούνται διάφορες απλοποιημένες μέθοδοι, μια κατάταξη των οποίων δίνεται στην εργασία Koutsoyiannis (1994), όπου εισάγεται και μια συνθετότερη στοχαστική μέθοδος. Από τις απλοποιημένες μεθόδους της πράξης θεωρείται ως πλέον δόκιμη αυτή της δυσμενέστερης διάταξης του υετογραφήματος σχεδιασμού (ή worst profile· US Department of the Interior, 1977, σ. 817· Koutsoyiannis, 1994) και η παραλλαγή της, γνωστή ως μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ (alternating block method· Sutcliffe, 1978, σσ. 31-35, Chow et al., 1988, σ. 466). Άλλες μέθοδοι που στηρίζονται σε αδιάστατες χρονικές κατανομές είναι περισσότερο ή λιγότερο αυθαίρετες και αδόκιμες.

Η μέθοδος της δυσμενέστερης διάταξης παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι άλλων συνήθων μεθόδων της πράξης, τα οποία μεταφέρονται και στην παραλλαγή των εναλλασσόμενων μπλοκ. Πρώτο, βασίζεται αποκλειστικά σε δεδομένα που έχουν μετρηθεί στην περιοχή μελέτης (όμβριες καμπύλες) και όχι σε διαγράμματα της βιβλιογραφίας. Δεύτερο, οδηγεί σε ένα μοναδικό υετογράφημα σχεδιασμού χωρίς να απαιτεί καμιά πρόσθετη παραδοχή. Τρίτο, έχει δειχτεί μέσω σύγκρισης με πληρέστερα στοχαστικά μοντέλα (Koutsoyiannis, 1994) ότι τα αποτελέσματά της είναι σαφώς πιο εύλογα και συνεπή, σε σχέση με αυτά άλλων μεθόδων.

Η βασική παραδοχή της μεθόδου του δυσμενέστερου συνδυασμού είναι ότι σε κάθε επιμέρους διάρκεια το ύψος βροχής έχει την ίδια περίοδο επαναφοράς με το τελικό (συνολικό) ύψος βροχής. Βεβαίως, η παραδοχή αυτή δεν είναι ρεαλιστική, πράγμα που αποτελεί και το σημαντικότερο μειονέκτημα της μεθόδου. Ο δυσμενέστερος συνδυασμός των τμηματικών υψών προκύπτει με την εξής μεθοδολογία: Τα τμηματικά ύψη βροχής διατάσσονται σε χρονική αντιστοιχία με τις τεταγμένες του μοναδιαίου υδρογραφήματος σε τρόπο ώστε το μέγιστο ύψος βροχής να είναι απέναντι από τη μέγιστη τεταγμένη του μοναδιαίου υδρογραφήματος, το αμέσως μικρότερο απέναντι από την αμέσως μικρότερη τεταγμένη κ.ο.κ. Η διάταξη αυτή στη συνέχεια αντιστρέφεται και έτσι προκύπτει το τελικό υετογράφημα. Η τεχνική αυτή αποδεικνύεται θεωρητικά ότι πράγματι δίνει τη μέγιστη παροχή αιχμής όταν συνδυαστεί με το μοναδιαίο υδρογράφημα. Στην παραλλαγή των εναλλασσόμενων μπλοκ δεν χρησιμοποιείται το μοναδιαίο υδρογράφημα για τη χρονική διάταξη των τμηματικών υψών βροχής, αλλά αυτά διατάσσονται κατά το δυνατόν συμμετρικά και ταυτόχρονα σε φθίνουσα σειρά γύρω από την κεντρική τιμή, η οποία συμπίπτει με το μέγιστο τμηματικό ύψος βροχής.

Όταν υιοθετείται αυτή η μέθοδος κατάρτισης της καταιγίδας σχεδιασμού, η διάρκεια βροχής θεωρείται σημαντικό πολλαπλάσιο (αρκετά μεγαλύτερο του διπλάσιου) του χρόνου υστέρησης της λεκάνης. Για την παρούσα μελέτη υιοθετήσαμε ολική διάρκεια βροχής 9 ωρών και χρησιμοποιήσαμε τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ για την κατάρτιση της καταιγίδας σχεδιασμού.

4.2 Απώλειες - Ωφέλιμη βροχή

Για το διαχωρισμό υδρολογικών απωλειών και καθαρού υετογραφήματος στο ολικό υετογράφημα χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη εμπειρική σχέση του U.S. Soil Conservation Service (1972), γνωστή ως μέθοδος SCS:

$$h_e = \frac{[\max(0, h - h_{a0})]^2}{h - h_{a0} + S} \quad (21)$$

όπου h το ολικό και h_e το αντίστοιχο ενεργό ύψος βροχής σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή, h_{a0} το αρχικό έλλειμμα, δηλαδή μια αρχική ποσότητα βροχής που μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε έλλειμμα, και S η δυνητικά μέγιστη κατακράτηση (potential maximum retention), δηλαδή το επιπλέον, πέραν του αρχικού h_{a0} , ελλειμματικό ύψος που μπορεί κατά μέγιστο να πραγματοποιηθεί σε μια βροχόπτωση με μεγάλο ολικό ύψος h . Για περαιτέρω απλοποίηση, υιοθετείται η επιπλέον παραδοχή ότι $h_{a0} = 0.2 S$, η οποία θεωρείται ως η βέλτιστη προσέγγιση από δεδομένα παρατηρήσεων, οπότε η μέθοδος χρησιμοποιεί τελικώς μία μόνο παράμετρο, την S . Με αυτή την επιπλέον παραδοχή, η (21) τελικώς γράφεται

$$h_e = \frac{[\max(0, h - 0.2 S)]^2}{h + 0.8 S} \quad (22)$$

Η σχέση (22) εφαρμόζεται και για το τελικό ύψος βροχής της καταιγίδας αλλά και για ενδιάμεσες τιμές του, και έτσι προκύπτει η χρονική εξέλιξη του φαινομένου. Το τελικό ύψος ελλειμμάτων μπορεί να φτάσει ασυμπτωτικά (για βροχόπτωση μεγάλου ύψους) την τιμή $0.2 S + S = 1.2 S$.

Αν δεν υπάρχουν μετρήσεις απορροής, ακολουθείται η ακόλουθη εμπειρική μεθοδολογία εκτίμησης της S . Συγκεκριμένα, η παράμετρος S συνδέεται με μια άλλη χαρακτηριστική παράμετρο, την CN, η οποία είναι γνωστή ως αριθμός καμπύλης απορροής (runoff curve number), με τη σχέση:

$$S [\text{mm}] = 254 \left(\frac{100}{\text{CN}} - 1 \right) \quad (23)$$

Η παράμετρος CN παίρνει τιμές από 0 μέχρι 100, και επηρεάζεται από τις συνθήκες εδάφους και χρήσης γης στη λεκάνη απορροής, καθώς τις προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας: οι τελευταίες συναρτώνται με τη χρονική απόσταση της υπό μελέτη καταιγίδας από προηγούμενες. Η SCS κατατάσσει τα εδάφη σε τέσσερις ομάδες, ανάλογα με τη διαπερατότητά τους και ορίζει τρεις τύπους προηγούμενων συνθηκών υγρασίας, I, II, και III. Για τις συνθήκες υγρασίας τύπου II, η SCS δίνει αναλυτικούς πίνακες με τιμές του CN για κάθε ομάδα εδαφών και για διάφορες χρήσεις γης, ενώ για τις άλλες συνθήκες δίνει τύπους αναγωγής των συνθηκών τύπου II (βλ. και Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Στην παρούσα μελέτη, ακολουθώντας αναλύσεις που είχαν γίνει στη μελέτη του Τσακίρη (1996), στην οποία είχε εκτιμηθεί ότι για την υπόψη λεκάνη CN = 89, και παίρνοντας υπόψη τις μεταβολές που επήλθαν από την «αφαίρεση» ενός τμήματος της λεκάνης (βλ. ενότητα 1.2) καταλήξαμε στην τιμή CN = 87.

4.3 Βασική ροή - Τήξη χιονιού

Λόγω της χειμαρρικής διάιτας του Ποδονίφτη θεωρήσαμε μηδενική βασική ροή. Επίσης, αγνοήσαμε τη συνεισφορά από τήξη χιονιού, επειδή οι χιονοπτώσεις στη λεκάνη δεν είναι συχνές.

4.4 Περίοδοι επαναφοράς

Για την πληρότητα της μελέτης εξετάσαμε ένα εύρος περιόδων επαναφοράς, από 10 μέχρι 100 χρόνια. Δεν υποθέσαμε διαφοροποίηση των περιόδων επαναφοράς βροχής και παροχής. Αν και κατά μία άποψη (π.χ. Sutcliffe, 1978) χρειάζεται να γίνεται διάκριση των περιόδων επαναφοράς βροχής και πλημμύρας, η εμπειριστατωμένη μελέτη των Larson and Reich (1973) έδειξε ότι αυτή η διαφοροποίηση δεν είναι ορθή, δεδομένου ότι κατά μέσο όρο οι δύο περίοδοι επαναφοράς συμπίπτουν (πράγμα που άλλωστε είναι σχεδόν προφανές). Έτσι, στην παρούσα μελέτη δεν έγινε τέτοια διάκριση.

4.5 Υπολογισμοί και αποτελέσματα

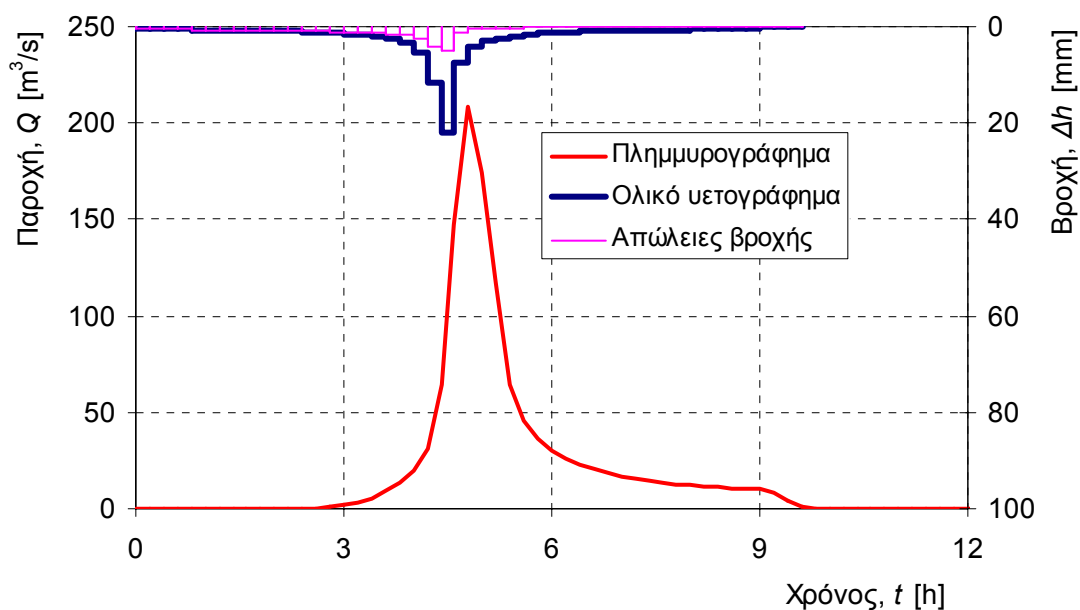
Οι υπολογισμοί, έγιναν με κατάλληλο πρόγραμμα υπολογιστή που έχει αναπτύξει ο συγγραφέας. Το πρόγραμμα συνθέτει το υετογράφημα σχεδιασμού, υπολογίζει το ωφέλιμο υετογράφημα και συνδυάζοντας το τελευταίο με το μοναδιαίο υδρογράφημα εξάγει το πλημμυρογράφημα. Ειδική πρόνοια λήφθηκε για τον επιμερισμό της απορροής σε επιφανειακή και διά μέσου του οχετού, στην περίπτωση που η παροχτετευτικότητα του τελευταίου δεν επαρκεί για την παροχέτευση του συνόλου της απορροής.

Ενδεικτικά, για περίοδο επαναφοράς 50 ετών έγιναν υπολογισμοί θεωρώντας ότι το σύνολο της απορροής πραγματοποιείται εναλλακτικά είτε διά μέσου του οχετού είτε επιφανειακά. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών έχουν απεικονιστεί στα Σχ. 9 και 10, όπου χαρακτηριστικά φαίνεται η μεγάλη διαφοροποίηση των παροχών αιχμής στις δύο περιπτώσεις (209 και 112 m³/s, αντίστοιχα).

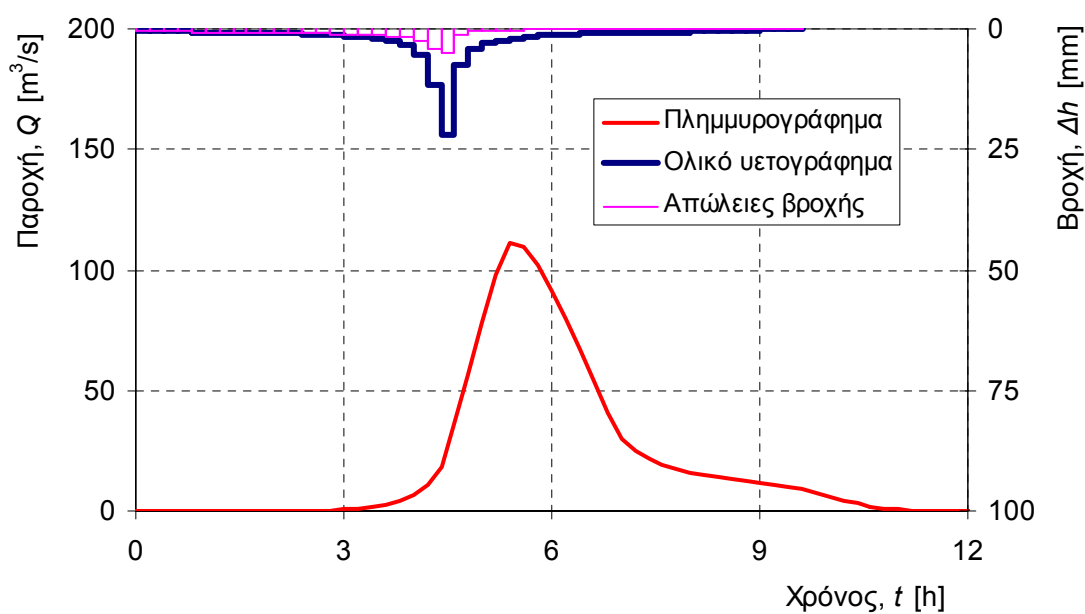
Τα αποτελέσματα των υπολογισμών σε μικτές συνθήκες έχουν απεικονιστεί στα Σχ. 11-14 και συγκριτικά στο Σχ. 15 για τις διάφορες θέσεις και περιόδους επαναφοράς που ελέγχθηκαν, από 10 έως 100 χρόνια. Παρατηρούμε ότι για περίοδο επαναφοράς 10 ετών η ροή πραγματοποιείται μόνο διά μέσου του οχετού, ενώ για μεγαλύτερες περιόδους επαναφοράς παρουσιάζεται και επιφανειακή ροή. Τα συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά των πλημμυρών σχεδιασμού φαίνονται επίσης και στον Πίν. 3.

Πίν. 3 Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά πλημμυρών σχεδιασμού για διάφορες περιόδους επαναφοράς

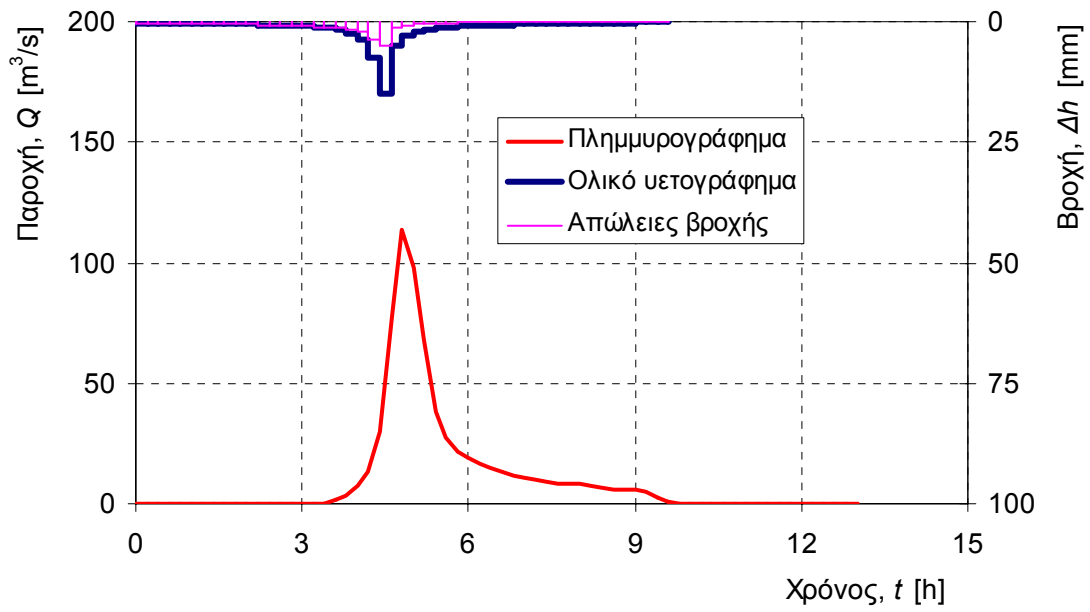
Μέγεθος	Περίοδος επαναφοράς, T [έτη]			
	10	20	50	100
Διάρκεια βροχής [h]:	9	9	9	9
Ολικό επιφανειακό ύψος βροχής [mm]:	63.9	76.3	95.3	112.0
Ωφέλιμο ύψος βροχής [mm]:	33.7	44.3	61.3	76.6
Ολικές απώλειες:	50%	45%	39%	35%
Παροχή αιχμής [m ³ /s]:	114.1	119.3	133.3	149.3
Χρόνος πραγματοποίησης αιχμής [h]:	4.8	4.8	5.0	5.0
Καθαρός όγκος πλημμύρας διά μέσου του οχετού [hm ³]:	0.48	0.56	0.70	0.82
Καθαρός όγκος πλημμύρας από επιφανειακή ροή [hm ³]:	0.00	0.07	0.17	0.28
Συνολικός όγκος πλημμύρας [hm ³]:	0.48	0.63	0.88	1.09



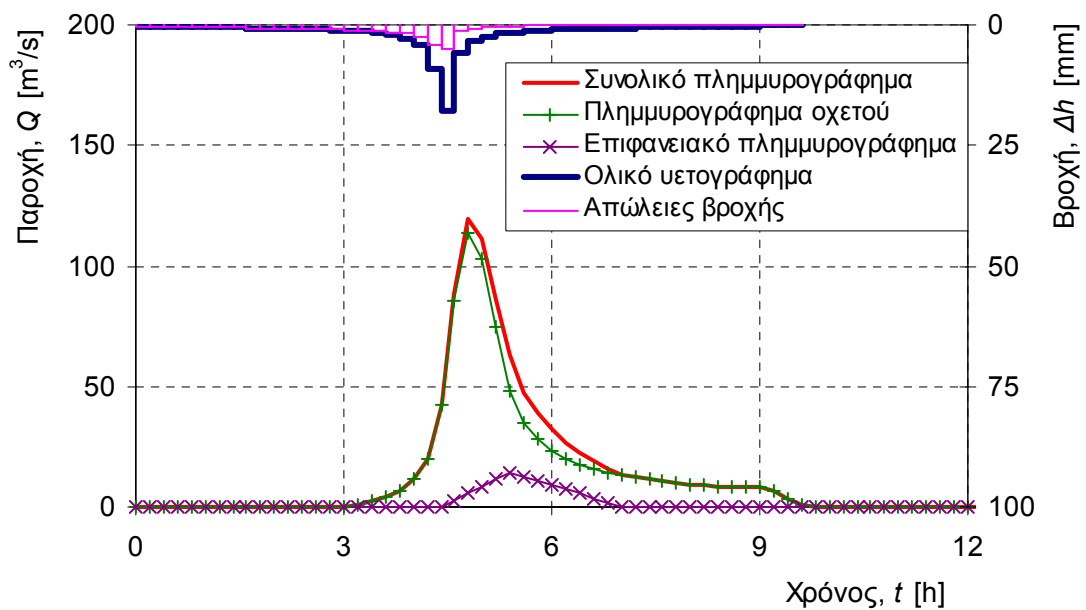
Σχ. 9 Υετογράφημα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για $T = 50$ χρόνια θεωρώντας ότι το σύνολο της απορροής πραγματοποιείται αποκλειστικά διά μέσου του οχετού.



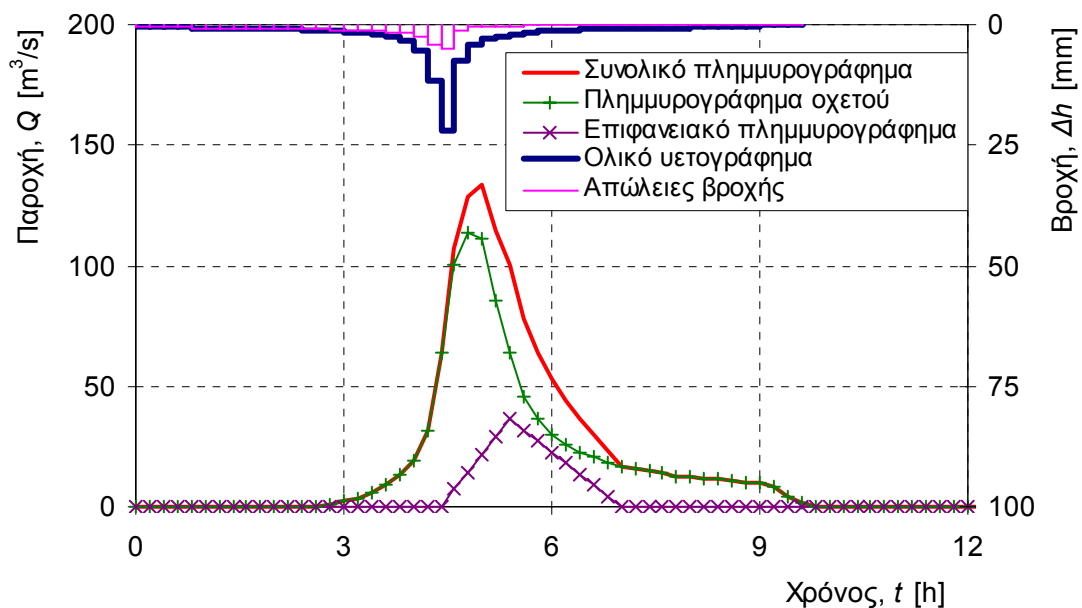
Σχ. 10 Υετογράφημα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για $T = 50$ χρόνια θεωρώντας ότι το σύνολο της απορροής πραγματοποιείται αποκλειστικά επιφανειακά (κάτω).



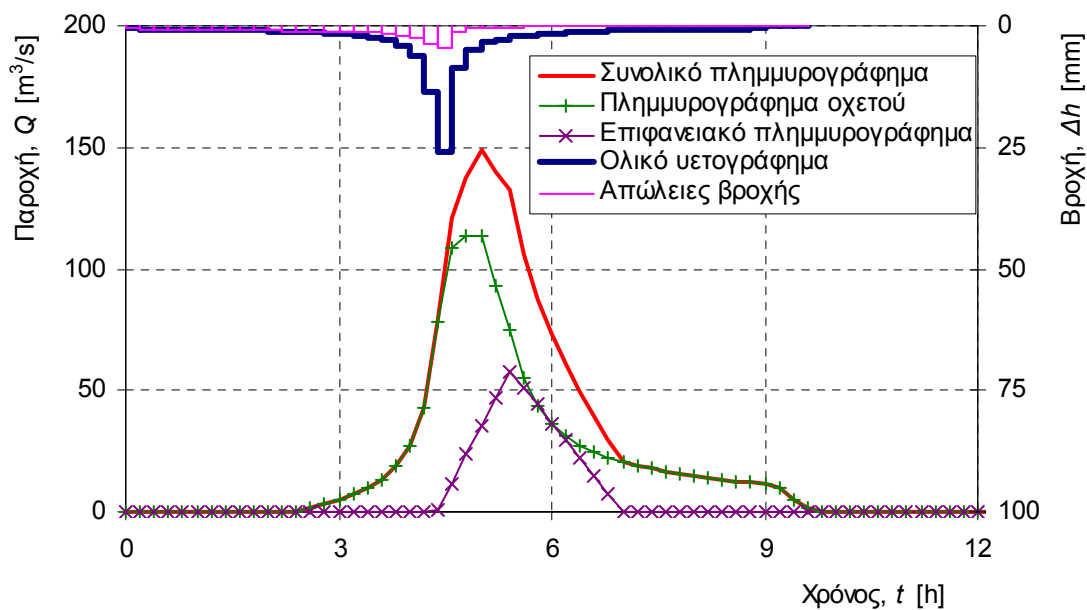
Σχ. 11 Υετογράφημα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για $T = 10$ χρόνια.



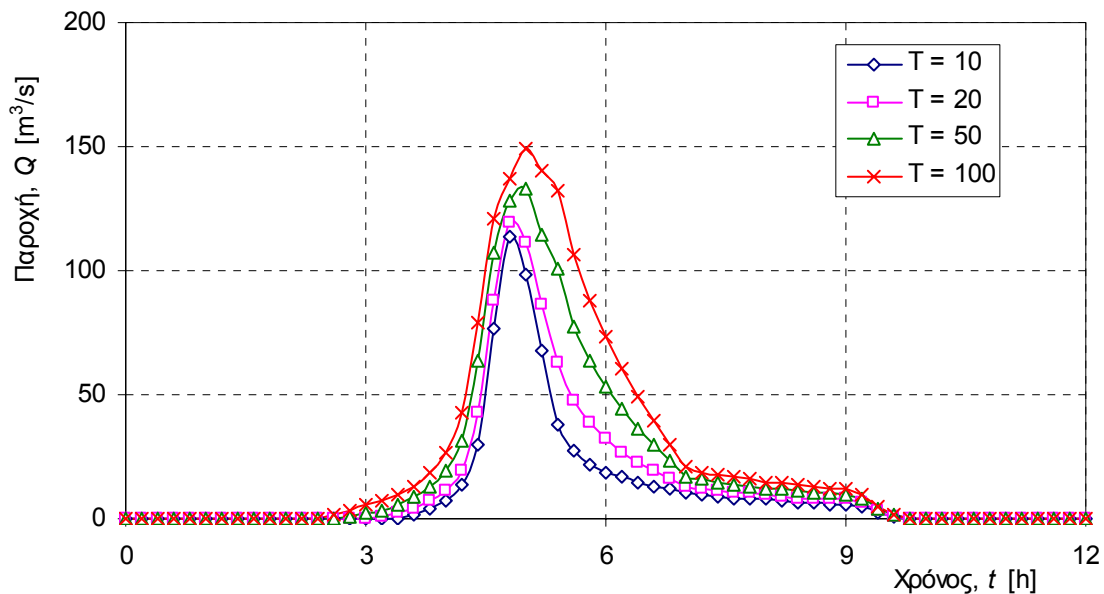
Σχ. 12 Υετογράφημα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για $T = 20$ χρόνια.



Σχ. 13 Υετογράφημα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για $T = 50$ χρόνια.



Σχ. 14 Υετογράφημα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για $T = 100$ χρόνια.



Σχ. 15 Σύγκριση πλημμυρογραφημάτων σχεδιασμού του Ποδονίφτη για διάφορες περιόδους επαναφοράς.

Αναφορές

Γραφείο Μαχαίρα & Υδροεξυγιαντική – Λ. Λαζαρίδης, Έκθεση Ελέγχου Επάρκειας Υφιστάμενου Αγωγού Ρέμ. Ποδονίφτη Ανάντη Λεωφόρου Κηφισίας και Διερεύνησης Δυνατότητας Κατασκευής Ανακουφιστικού Αγωγού, Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημόσιων Έργων, Αθήνα, 1998.

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

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

Όριο – Σύμβουλοι Μηχανικοί, Κ. Γεωργιάδης & Κ. Σιώζος, Μελέτη Προστασίας και Περιβαλλοντικής Αναβάθμισης του Ρέματος Ποδονίφτη στην Περιοχή Φιλοθέης, Δήμος Φιλοθέης, Φιλοθέη, 1997.

Τσακίρης, Γ., Τελική Έκθεση, Τεύχος Β, Ρέμα Ποδονίφτη Ν. Αττικής, Πλαίσιο Περιβαλλοντικής Διευθέτησης Ποδονίφτη και Πικροδάφνης Ν. Αττικής, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων & Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1996.

Chow, V. T., D. R. Maidment, and L. W. Mays, *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, 1988.

Hershfield, D. M., Estimating the probable maximum precipitation, *Proc. ASCE, J. Hydraul. Div.*, 87(HY5), 99-106, 1961

- Hershfield, D. M., Method for estimating probable maximum precipitation, *J. American Waterworks Association*, 57, 965-972, 1965.
- Koutsoyiannis, D., A stochastic disaggregation method for design storm and flood synthesis, *Journal of Hydrology*, 156, 193-225, 1994.
- Koutsoyiannis, D., A probabilistic view of Hershfield's method for estimating probable maximum precipitation, *Water Resources Research*, 35(4), 1313-1322, 1999.
- Koutsoyiannis, D., Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall, 1, Theoretical investigation, *Hydrological Sciences Journal*, 49(4), 575-590, 2004.
- Koutsoyiannis, D., Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall, 2, Empirical investigation of long rainfall records, *Hydrological Sciences Journal*, 49(4), 591-610, 2004.
- Koutsoyiannis, D., and G. Baloutsos, Analysis of a long record of annual maximum rainfall in Athens, Greece, and design rainfall inferences, *Natural Hazards*, 22(1), 31-51, 2000.
- Koutsoyiannis, D., D. Kozonis, and A. Manetas, A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships, *Journal of Hydrology*, 206(1-2), 118-135, 1998.
- Larson, C. L., and B. M. Reich, Relationship of observed rainfall and runoff recurrence intervals, in *Floods and Droughts*, Proc. 2nd Intern. Symp. in Hydrology, Water Resources Publications, Fort Collins, CO, 1973.
- Sutcliffe J.V., *Methods of Flood Estimation, A Guide to Flood Studies Report*, Report No 49, Institute of Hydrology, UK, 1978.
- U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, *Design of Arch Dams*, US Government Printing Office, Denver, CO, 1977.
- U.S. Soil Conservation Service, *National Engineering Handbook*, section 4, Hydrology, U.S. Dept. of Agriculture, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1972.