

Τεχνική έκθεση: Διερεύνηση πλημμυρικών παροχών λεκάνης απορροής Αλμωπαίου

1. Αντικείμενο της έκθεσης

Στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου «ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων» αναπτύχθηκε μια γενική μεθοδολογία εκτίμησης πλημμυρικών παροχών για μελέτες σχεδιασμού σε λεκάνες χωρίς μετρήσεις, προσανατολισμένη στις ελληνικές συνθήκες. Αντικείμενο της παρούσας συνοπτικής έκθεσης είναι η εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας για τη διερεύνηση των πλημμυρικών παροχών της λεκάνης απορροής του Αλμωπαίου, με στόχο την παραγωγή υδρογραφημάτων σχεδιασμού στη θέση υπό μελέτη φράγματος. Τα υδρογραφήματα παράγονται για πέντε περιόδους επαναφοράς (100, 1 000, 5 000, 10 000 και 60 000 έτη), με εφαρμογή της συνδυαστικής μεθόδου του αριθμού καμπύλης απορροής και του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Ειδικότερα, για την περίοδο επαναφοράς των 10 000 ετών γίνεται ανάλυση ευαισθησίας για τρία κρίσιμα δεδομένα εισόδου (υετογράφημα σχεδιασμού, αρχικές συνθήκες υγρασίας, χρόνος βάσης μοναδιαίου υδρογραφήματος), οπότε παράγεται ένα πλήθος υδρογραφημάτων σχεδιασμού, για διάφορους συνδυασμούς των παραπάνω χαρακτηριστικών.

Συντάκτες της έκθεσης είναι οι:

- Δημήτρης Κουτσογιάννης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ
- Ανδρέας Ευστρατιάδης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, MSc, ΕΔΙΠ ΕΜΠ
- Αντώνης Κουκουβίνος, Τοπογράφος Μηχανικός ΕΜΠ, DEA

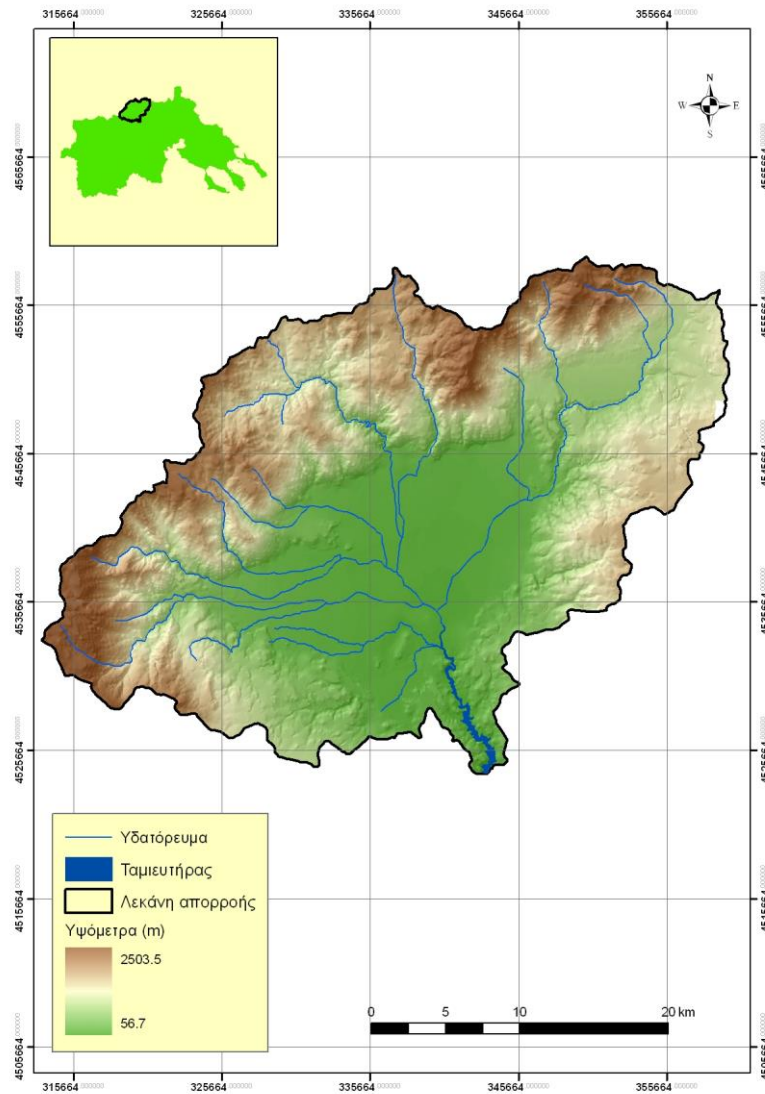
2. Περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης είναι η λεκάνη απορροής του ποταμού Αλμωπαίου, ανάντη της θέσης κατασκευής του φράγματος Καλής του Ν. Πέλλας (Εικόνα 1). Η λεκάνη έχει επίμηκες σχήμα και παρουσιάζει έντονη ανομοιομορφία ως προς το ανάγλυφο. Συγκεκριμένα, το ανάντη τμήμα περικλείεται από ορεινούς όγκους πολύ μεγάλων κλίσεων (> 30%), ενώ στα κατάντη διαμορφώνεται μια περιοχή πολύ χαμηλών κλίσεων (< 2%).

Υπολογίστηκαν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά γεωμετρικά μεγέθη της λεκάνης:

- έκταση 982 km²
- μέγιστο μήκος υδατορεύματος 39 km
- μέσο υψόμετρο 765 m
- υψόμετρο κόμβου εξόδου 57 m
- μέση κλίση 25.5%

Για τη χάραξη της λεκάνης και τον υπολογισμό των παραπάνω μεγεθών χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων ανάλυσης 25 × 25 m, που ελήφθη από τη γεωγραφική βάση δεδομένων του Υδροσκοπίου (<http://www.hydroscope.gr/>).



Εικόνα 1: Λεκάνη απορροής Αλμωπαίου.

3. Μεθοδολογία – παραδοχές

3.1 Γενικά

Σύμφωνα με τα συμπεράσματα του ερευνητικού έργου ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ (<http://deucalionproject.gr/>), η προτεινόμενη μεθοδολογία κατάρτισης των υδρογραφημάτων σχεδιασμού βασίζεται σε κατάλληλη προσαρμογή της μεθόδου SCS-CN και του μοναδιαίου υδρογραφήματος (MY). Η μέθοδος SCS-CN εφαρμόζεται για την εκτίμηση της ενεργού βροχόπτωσης, δηλαδή τον διαχωρισμό των υδρολογικών ελλειμμάτων από το συνολικό νεογράφημα, ενώ μέσω του MY υλοποιείται ο μετασχηματισμός της ενεργού βροχόπτωσης σε υδρογράφημα (πλημμυρική απορροή) στην έξοδο της λεκάνης. Η εφαρμογή της

μεθόδου έγινε σε κλίμακα λεκάνης, θεωρήθηκε δηλαδή μια αδιαμέριστη (lumped) σχηματοποίηση. Η προσέγγιση αυτή κρίνεται ικανοποιητική για τους σκοπούς μιας προκαταρκτικής διερεύνησης, όπως η παρούσα, δεν είναι όμως επαρκής για την εξαγωγή οριστικών μεγεθών σχεδιασμού. Σε μια τέτοια περίπτωση επιβάλλεται ο διαμερισμός σε υπολεκάνες, ώστε να αποτυπώνεται η σημαντική ετερογένεια των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης (κυρίως ως προς τις κλίσεις και την υδατοπερατότητα).

Στη συνέχεια περιγράφονται το υπόβαθρο και οι παραδοχές της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε.

3.2 Περίοδος επαναφοράς

Για τη μελέτη των πλημμυρών στη θέση του φράγματος εξετάστηκε η περίοδος επαναφοράς $T = 10\ 000$ έτη. Για λόγους πληρότητας, διερευνήθηκαν και μικρότερες τιμές της περιόδου επαναφοράς (100, 1 000 και 5 000 έτη). Ακόμη, εξετάστηκε η τιμή $T = 60\ 000$ έτη, που εκτιμάται ότι αντιστοιχεί στην περίοδο επαναφοράς της λεγόμενης *πιθανής μέγιστης κατακρήμνισης*. Το συμπέρασμα αυτό προέκυψε από τη στατιστική διερεύνηση βροχομετρικών δεδομένων από 2 645 σταθμούς όλου του κόσμου, τα οποία είχαν μελετηθεί παλιότερα από τον Hershfield (1961, 1965) και αποτέλεσαν τη βάση για τη διατύπωση της φερώνυμης μεθόδου (Koutsoyiannis, 1999).

3.3 Όμβριες καμπύλες

Σε όλες τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε η όμβρια καμπύλη που εκτιμήθηκε στα πλαίσια της υδρολογικής μελέτης του φράγματος Καλής, η οποία εκπονήθηκε από το Γραφείο Δοξιάδη, την περίοδο 2008-09. Η καμπύλη αυτή προέκυψε με προσαρμογή της κατανομής Gumbel στα δεδομένα ετήσιων μέγιστων βροχοπτώσεων των βροχογράφων της περιοχής, και δίνεται από τη σχέση:

$$i(T, d) = 17.657 T^{0.163} / d^{0.601} \quad (1)$$

Με εφαρμογή της σχέσης (1) εκτιμήθηκαν οι τιμές ωραίου και ημερήσιου ύψους βροχής του Πίνακα 1, για τις περιόδους επαναφοράς ενδιαφέροντος. Οι τιμές αυτές είναι χαμηλές σε σχέση με άλλες περιοχές της Ελλάδας (Koutsoyiannis *et al.*, 2012), που οφείλεται στο ηπειρωτικό κλίμα της περιοχής μελέτης, το οποίο δεν ευνοεί την ανάπτυξη εξαιρετικά ισχυρών καταιγίδων. Σε κάθε περίπτωση, η εφαρμογή της κατανομής Gumbel για μεγάλες περιόδους επαναφοράς θεωρείται επισφαλής, οδηγώντας σε σημαντικά υποεκτιμημένα μεγέθη σχεδιασμού (Koutsoyiannis, 1999· Koutsoyiannis and Baloutsos, 2000).

Πίνακας 1: Εκτίμηση σημειακών υψών βροχής στη λεκάνη του Αλμωπαίου για διάρκεια 1 και 24 h, για διάφορες περιόδους επαναφοράς.

Περίοδος επαναφοράς (έτη)	Ύψος βροχής για $d = 1\text{h}$ (mm)	Ύψος βροχής για $d = 24\text{h}$ (mm)
100	37.0	132.3
1 000	53.7	192.1
5 000	69.8	249.3
10 000	78.0	278.9
60 000	104.3	372.9

3.4 Χρόνος συγκέντρωσης

Ο χρόνος συγκέντρωσης αποτελεί την χαρακτηριστικότερη χρονική παράμετρο μιας λεκάνης, καθώς από αυτόν εξαρτώνται όλα τα βασικά χρονικά μεγέθη της μελέτης (χρονικό βήμα υπολογισμών, διάρκεια καταιγίδας σχεδιασμού, παράμετροι μοναδιαίου υδρογραφήματος). Ο χρόνος συγκέντρωσης εκτιμήθηκε μέσω της γνωστής σχέσης Giandotti:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{\Delta z}} \quad (2)$$

όπου A η επιφάνεια της λεκάνης (km^2), L το μέγιστο μήκος υδατορεύματος (km) και Δz η υψομετρική διαφορά του μέσου υψομέτρου της λεκάνης από το υψόμετρο της εξόδου της (m). Για $A = 982 \text{ km}^2$, $L = 39 \text{ km}$ και $\Delta z = 765 - 57 = 708 \text{ m}$ (βλ. ενότητα 2) προέκυψε $t_c = 8.6 \text{ h}$.

Ωστόσο, το ίδιο το θεωρητικό υπόβαθρο του χρόνου συγκέντρωσης, όπως επαληθεύεται από πρόσφατα συμπεράσματα αναλύσεων πλημμυρικών επεισοδίων (Grimaldi *et al.*, 2012), υποδηλώνει ότι η ποσότητα t_c δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται ως (σταθερή) παράμετρος της λεκάνης αλλά ως μεταβλητή. Πράγματι, ο χρόνος συγκέντρωσης μειώνεται με την αύξηση της πλημμυρικής παροχής (καθώς αυξάνει η ταχύτητα ροής τόσο στην επιφάνεια τη λεκάνης όσο και στο υδρογραφικό δίκτυο), και συνακόλουθα την ένταση βροχής και την περίοδο επαναφοράς. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη εξάρτηση t_c από τα παραπάνω μεγέθη, στο έργο ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ προτάθηκε η ακόλουθη εμπειρική σχέση αναγωγής (Ευστρατιάδης κ.ά., 2014):

$$t_c(T) = t_c \sqrt{i(5) / i(T)} \quad (3)$$

όπου $i(5)$ η κρίσιμη ένταση βροχής που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς $T = 5$ έτη, για την οποία θεωρείται αντιπροσωπευτική η εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης κατά Giandotti, και $i(T)$ η ένταση βροχής που αντιστοιχεί σε μια τυχαία περίοδο επαναφοράς, όπως εκτιμάται από την όμβρια καμπύλη της λεκάνης (σχέση 1). Συμβατικά, λαμβάνεται η ένταση που αντιστοιχεί σε βροχή ωριαίας διάρκειας. Επισημαίνεται ότι ο λόγος $i(5) / i(T)$ δεν εξαρτάται από τη διάρκεια, καθώς συνδυάζοντας τις σχέσεις (1) και (3) προκύπτει ότι ο ρυθμός μείωσης του χρόνου συγκέντρωσης εξαρτάται μόνο από την παράμετρο σχήματος (εκθέτης, 0.163) της όμβριας καμπύλης.

Πίνακας 2: Εκτίμηση χρόνου συγκέντρωσης για διάφορες περιόδους επαναφοράς, σύμφωνα με τη σχέση (3), με εκτίμηση των εντάσεων $i(T)$ από την όμβρια καμπύλη (1).

Περίοδος επαναφοράς (έτη)	Κρίσιμη ένταση βροχής για $d = 1\text{h}$ (mm/h)	Συντελεστής αναγωγής χρόνου συγκέντρωσης t_c	Τελική τιμή χρόνου συγκέντρωσης t_c (h)
5	22.8	1.00	8.6 ^(*)
100	37.0	0.78	6.8
1 000	53.7	0.65	5.6
5 000	69.8	0.57	4.9
10 000	78.0	0.54	4.7
60 000	104.3	0.47	4.0

(*) Τιμή αναφοράς που εκτιμήθηκε με τη μέθοδο Giandotti.

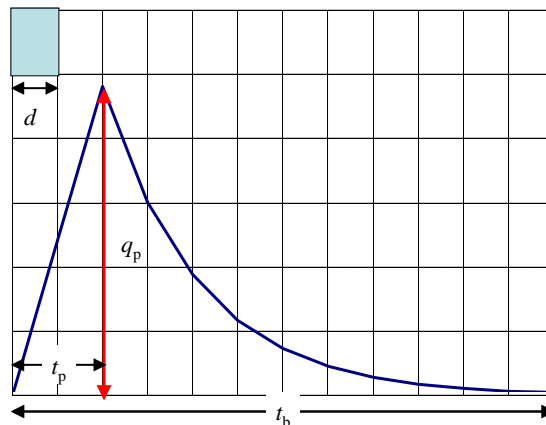
Για $T = 5$ έτη η κρίσιμη ένταση βροχής διάρκειας 1 h εκτιμάται σε 22.8 mm/h, για την οποία θεωρείται ο χρόνος συγκέντρωσης κατά Giandotti (8.6 h), ενώ για τις άλλες περιόδους επαναφοράς ενδιαφέροντος

της μελέτης ο χρόνος συγκέντρωσης μειώνεται, σύμφωνα με τα δεδομένα του Πίνακα 2. Η μείωση αυτή, όπως εξηγείται στη συνέχεια, επηρεάζει τόσο το σχήμα του μοναδιαίου υδρογραφήματος της λεκάνης όσο και το σχήμα του νετογραφήματος σχεδιασμού (εφόσον το τελευταίο εκτιμάται με τη μέθοδο της δυσμενέστερης διάταξης), τα οποία καθίστανται επίσης εξαρτώμενα από την περίοδο επαναφοράς.

3.5 Μοναδιαίο υδρογράφημα

3.5.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Η τεχνική του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος (ΣΜΥ) αποτελεί ένα κοινώς αποδεκτό εργαλείο σε λεκάνες όπου δεν διατίθενται στοιχεία από πραγματικά επεισόδια πλημμυρών. Για τη λεκάνη μελέτης διαμορφώθηκε ένα παραμετρικό ΣΜΥ που περιλαμβάνει έναν γραμμικό ανοδικό κλάδο και ένα αρνητικά εκθετικό καθοδικό κλάδο, όπως στο παράδειγμα της Εικόνας 2. Το παραμετρικό ΣΜΥ αποτελεί μια από τις βασικές καινοτομίες που προέκυψαν από τις αναλύσεις των πλημμυρικών επεισοδίων στις πιλοτικές λεκάνες του προαναφερθέντος ερευνητικού έργου (Ευστρατιάδης κ.ά., 2014· Efstratiadis *et al.*, 2014).



Εικόνα 2: Παραμετρικό συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα και χαρακτηριστικά μεγέθη.

Για δεδομένη διάρκεια βροχής d , το ΣΜΥ προσδιορίζεται με βάση τα δύο χαρακτηριστικά χρονικά του μεγέθη, δηλαδή τον χρόνο ανόδου t_p και τον χρόνο βάσης t_b , που δίνονται από τις σχέσεις:

$$t_p = d / 2 + \beta t_c \quad (4)$$

$$t_b = d + \gamma t_c \quad (5)$$

όπου t_c ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης και β, γ παράμετροι με $0 < \beta < 1$ και $\gamma \geq 1$. Οι χρόνοι t_p και t_b στρογγυλεύονται, ώστε να εκφράζονται ως ακέραια πολλαπλάσια της διάρκειας d :

$$T_p = \text{ROUND}(t_p / d) d \quad (6)$$

$$T_b = \text{ROUND}(t_b / d) d \quad (7)$$

Για $t \leq T_p$ (ανοδικός κλάδος υδρογραφήματος), οι παροχές υπολογίζονται από τη σχέση:

$$u(t) = q_p t / T_p \quad (8)$$

όπου q_p η παροχή αιχμής του ΣΜΥ.

Για $t > T_p$ (καθοδικός κλάδος υδρογραφήματος), οι παροχές υπολογίζονται από τη σχέση:

$$u(t) = q_p \exp(-5 t/T_b) \quad (9)$$

όπου k τέτοια ώστε για $t = T_b$ η παροχή να είναι ίση με μια ελάχιστη τιμή q_0 , έτσι ώστε $u(T_b) = q_0$. Από τη σχέση (9) προκύπτει ο αναλυτικός υπολογισμός του συντελεστή στείρευσης k :

$$k = -\ln(q_0/q_p) / T_b \quad (10)$$

Η παροχή αιχμής q_p προκύπτει από την εξίσωση συνέχειας, δηλαδή της εξίσωση του όγκου του ΣΜΥ με τον όγκο της μοναδιαίας βροχής $V_0 = h_0 A$, όπου A η έκταση της λεκάνης. Ο υπολογισμός της παροχής αιχμής q_p δεν γίνεται αναλυτικά, καθώς από την εξίσωση των όγκων προκύπτει μια πεπλεγμένη σχέση.

3.5.2 Διαμόρφωση ΣΜΥ λεκάνης Αλμωπαίου

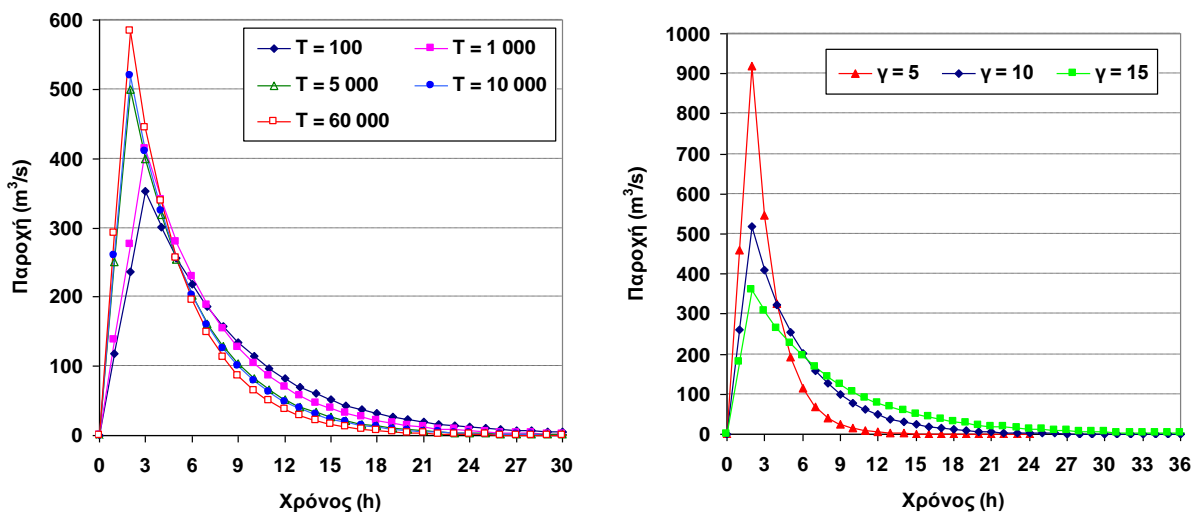
Για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών μεγεθών του ΣΜΥ έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές:

- Η διάρκεια της μοναδιαίας βροχόπτωσης, που καθορίζει και το χρονικό βήμα υπολογισμών, ελήφθη ίση με $d = 1$ h, που είναι εύλογη για τέτοια έκταση λεκάνης.
- Η ελάχιστη παροχή στο πέρας του χρόνου βάσης θεωρήθηκε, συμβατικά, ίση με $q_0 = 0.01$ m³/s.
- Για την παράμετρο του χρόνου ανόδου υιοθετήθηκε η τιμή $\beta = 0.40$ που είναι μια ενδιάμεση μεταξύ των τυπικών τιμών $\beta = 0.30$ που εφαρμόζεται για μεγάλες και μέτριες κλίσεις και $\beta = 0.50$ που συστήνεται σε περιοχές μικρές και ήπιων κλίσεων.
- Η παράμετρος γ του χρόνου βάσης παρουσιάζει την υψηλότερη αβεβαιότητα, καθώς σχετίζεται με τους μηχανισμούς απόκρισης της λεκάνης. Στην οριακή περίπτωση που η πλημμυρική απορροή είναι εξ ολοκλήρου επιφανειακή (π.χ., σε αστικές περιοχές πολύ πυκνής δόμησης), λαμβάνεται $\gamma = 1$. Σε λεκάνες χαμηλής περατότητας, με περιορισμένη παραγωγή υποδερμικής ροής σε σχέση με την επιφανειακή, συστήνεται η τιμή $\gamma = 5$. Σε λεκάνες μέτριας ως υψηλής υδατοπερατότητας λαμβάνεται $\gamma = 10$, ενώ εφόσον υπάρχει κυριαρχία της υποδερμικής ροής συστήνεται $\gamma = 20$. Στην παρούσα διερεύνηση, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά υδατοπερατότητας της λεκάνης, εξετάστηκαν τρεις εναλλακτικές τιμές της παραμέτρου ($\gamma = 5, 10, 15$), με πλέον ευλογοφανή την τιμή $\gamma = 10$.

Επιπλέον, θεωρώντας τον χρόνο συγκέντρωσης ως μεταβλητή και όχι ως σταθερά της λεκάνης, σύμφωνα με τις παραδοχές του εδαφίου 3.4, διαμορφώθηκαν διαφορετικά ΣΜΥ για κάθε περίοδο επαναφοράς που εξετάστηκε. Ειδικότερα, για την περίοδο επαναφοράς των 10 000 ετών διαμορφώθηκαν τρία ΣΜΥ, για τις αντίστοιχες τιμές της παραμέτρου γ του χρόνου βάσης. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη όλων των ΣΜΥ που διαμορφώθηκαν συνοψίζονται στον Πίνακα 3. Τα υδρογραφήματα απεικονίζονται στην Εικόνα 3.

Πίνακας 3: Εκτίμηση χαρακτηριστικών μεγεθών ΣΜΥ για διάφορες περιόδους επαναφοράς.

Περίοδος επαναφοράς (έτη)	100	1 000	5 000	10 000	10 000	10 000	60 000
Διορθωμένος χρόνος συγκέντρωσης, t_c (h)	6.8	5.6	4.9	4.7	4.7	4.7	4.0
Παράμετρος χρόνου ανόδου, β	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Παράμετρος χρόνου βάσης, γ	10.0	10.0	10.0	5.0	10.0	15.0	10.0
Χρόνος ανόδου, t_p (h)	3.2	2.7	2.5	2.4	2.4	2.4	2.1
Χρόνος βάσης, t_b (h)	68.8	57.2	50.4	24.3	47.7	71.0	41.4
Παροχή αιχμής, q_p (m ³ /s)	353.3	413.5	500.1	919.0	518.9	359.4	584.5



Εικόνα 3: ΣΜΥ διάρκειας μοναδιαίας βροχόπτωσης 1h για διάφορες περιόδους επαναφοράς, για παράμετρο χρόνου βάσης $\gamma = 10$ (αριστερά) και αντίστοιχα ΣΜΥ περιόδου επαναφοράς 10 000 ετών, για $\gamma = 5, 10$ και 15 (δεξιά).

3.4 Καταιγίδες σχεδιασμού

Για την παραγωγή του πλημμυρογραφήματος σχεδιασμού απαιτείται η κατάρτιση της αντίστοιχης καταιγίδας σχεδιασμού της λεκάνης, που θεωρείται ότι αναφέρεται στην ίδια περίοδο επαναφοράς. Στο πλαίσιο της μελέτης εφαρμόστηκαν δύο τυπικές βιβλιογραφικές προσεγγίσεις για την κατάρτιση των συνθετικών υετογραφημάτων: (α) η μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ (alternating block method), και (β) η μέθοδος της δυσμενέστερης διάταξης του υετογραφήματος σχεδιασμού (worst profile). Με τις μεθόδους αυτές προσδιορίζονται τα τμηματικά ύψη βροχής των επιμέρους διαρκειών με βάση την όμβρια καμπύλη, που αντιστοιχεί στην εκάστοτε περίοδο επαναφοράς. Η βασική παραδοχή και των δύο μεθόδων είναι ότι, σε κάθε επιμέρους διάρκεια, το ύψος βροχής έχει την ίδια περίοδο επαναφοράς με το τελικό (συνολικό) ύψος βροχής.

Ως προς τη διάταξη των τμηματικών υψών βροχής, οι δύο μέθοδοι εφαρμόζονται ως εξής:

- Στη μέθοδο των *εναλλασσόμενων μπλοκ* τα τμηματικά ύψη βροχής διατάσσονται σε χρονική ακολουθία με το μέγιστο στο μέσο της επιλεγμένης συνολικής διάρκειας βροχής και τα υπόλοιπα σε φθίνουσα σειρά εναλλακτικά αριστερά και δεξιά από το κεντρικό μπλοκ.
- Στη μέθοδο της *δυσμενέστερης διάταξης* τα τμηματικά ύψη διατάσσονται σε χρονική αντιστοιχία με τις τεταγμένες του μοναδιαίου υδρογραφήματος (MY) σε τρόπο ώστε το μέγιστο ύψος βροχής να είναι απέναντι από τη μέγιστη τεταγμένη του MY, το αμέσως μικρότερο απέναντι από την αμέσως μικρότερη τεταγμένη, κ.ο.κ. Το υετογράφημα σχεδιασμού προκύπτει με αντιστροφή της παραπάνω διάταξης.

Για την κατασκευή των υετογραφημάτων, η διάρκεια βροχής θεωρήθηκε ίση με 24 ώρες. Η διάρκεια αυτή είναι περίπου τρεις φορές μεγαλύτερη από τον αρχικό χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης (8.6 h) που εκτιμήθηκε κατά Giandotti. Όπως εξηγήθηκε στο εδάφιο 3.4, η τιμή αυτή θεωρείται αντιπροσωπευτική για πλημμυρικά επεισόδια περιόδου επαναφοράς πενταετίας. Για τις κατά πολύ μεγαλύτερες περιόδους επαναφοράς της μελέτης, θεωρήθηκαν οι μειωμένοι χρόνοι συγκέντρωσης του Πίνακα 2.

Είναι φανερό ότι η κατάρτιση του υετογραφήματος σχεδιασμού με τη μέθοδο της δυσμενέστερης διάταξης προϋποθέτει την κατάρτιση του ΜΥ, το οποίο δεν ισχύει στα εναλλασσόμενα μπλοκ. Μάλιστα, αποδεικνύεται ότι το υετογράφημα αυτό δίνει τη μέγιστη παροχή αιχμής, εφόσον συνδυαστεί με το αντίστοιχο ΜΥ της λεκάνης (Koutsoyiannis, 1994). Επισημαίνεται ότι το ΣΜΥ που εφαρμόστηκε στη μελέτη διαφοροποιείται ανάλογα με την περίοδο επαναφοράς, καθώς τα χαρακτηριστικά χρονικά του μεγέθους εκφράζονται συναρτήσει του χρόνου συγκέντρωσης. Κατ' αντιστοιχία, το υετογράφημα κάθε περιόδου επαναφοράς που εκτιμάται με τη μέθοδο της δυσμενέστερης διάταξης διαφοροποιείται όχι μόνο ως προς τις τιμές των επιμέρους υψών βροχής αλλά και ως προς το σχήμα του, δεδομένου ότι το ΜΥ της λεκάνης «συμπιέζεται» καθώς αυξάνει η περίοδος επαναφοράς (Εικόνα 3, αριστερά).

3.4 Επιφανειακή αναγωγή υετογραφημάτων σχεδιασμού

Οι όμβριες καμπύλες που προκύπτουν από τη σχέση (1) και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των τμηματικών υψών βροχής των υετογραφημάτων σχεδιασμού, αναφέρονται σε σημειακές εντάσεις βροχής, για τις οποίες απαιτείται η αναγωγή τους σε επιφανειακές μέσες εντάσεις (ή ύψη βροχής) της λεκάνης. Για τον σκοπό αυτό, εφαρμόζεται η γνωστή μέθοδος του *συντελεστή επιφανειακής αναγωγής* (areal reduction factor), που έχει τις ακόλουθες, εμπειρικά διαπιστωμένες, ιδιότητες:

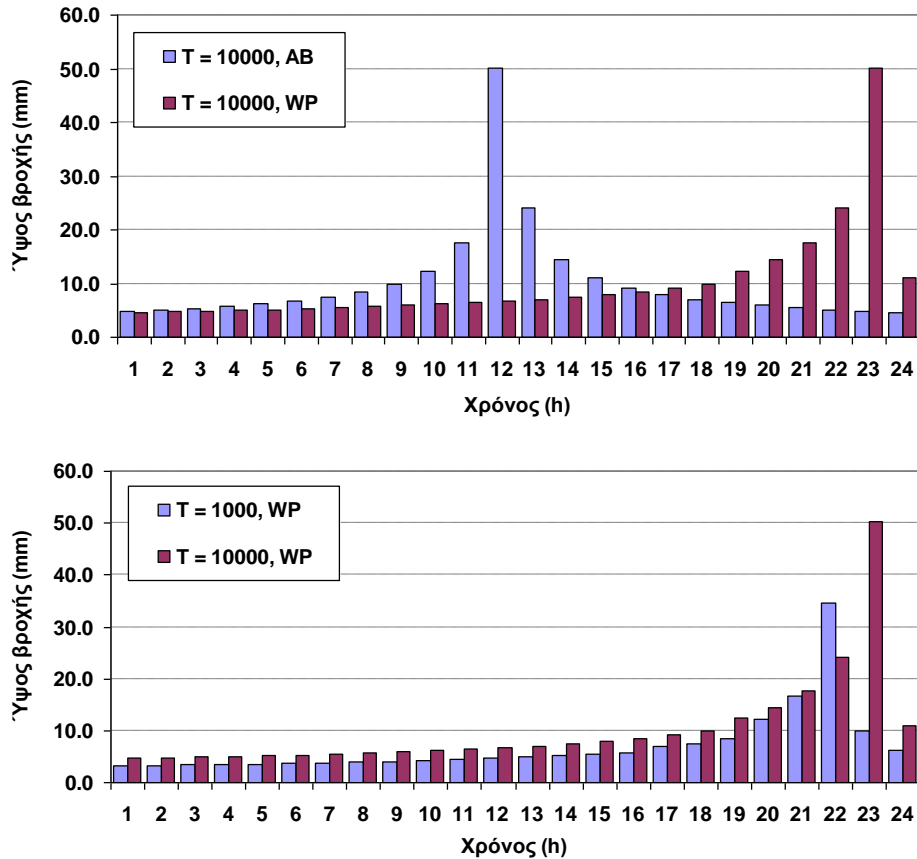
- Είναι πάντα μικρότερος της μονάδας: όταν καταγράφεται μέγιστη ένταση σε ένα σημείο της λεκάνης, είναι απίθανο την ίδια στιγμή να καταγράφεται μέγιστη ένταση σε όλη την υπόψη επιφάνεια.
- Είναι φθίνουσα συνάρτηση της έκτασης: η αύξηση της έκτασης της επιφάνειας συνεπάγεται τη μείωση του συντελεστή επιφανειακής 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· ωστόσο δεν υπάρχουν ακόμη κατηγορηματικά συμπεράσματα για αυτή την εξάρτηση, η οποία δεν έχει διερευνηθεί σε αντίστοιχο βαθμό με αυτές που αναφέρονται στη διάρκεια και την έκταση.

Ο συντελεστής αναγωγής εκτιμήθηκε μέσω της σχέσης των Κουτσογιάννη και Ξανθόπουλου (1999):

$$\varphi = \left(1 - \frac{0.048 A^{0.36 - 0.01 \ln A}}{d^{0.35}}, 0.25 \right) \quad (11)$$

όπου φ ο συντελεστής επιφανειακής αναγωγής, A η έκταση της λεκάνης σε km^2 και d η διάρκεια βροχής σε h. Η σχέση αυτή έχει προκύψει με βάση πινακοποιημένα αποτελέσματα του UK-NERC (1975).

Για την αναγωγή των υετογραφημάτων σχεδιασμού εφαρμόστηκε η σχέση (3) για κάθε διάρκεια (χρονική κλίμακα), οπότε κάθε τμηματικό ύψος βροχής, δηλαδή κάθε τεταγμένη του υετογραφήματος, μειώθηκε συναρτήσει των A ($= 982 \text{ km}^2$) και d . Στην Εικόνα 2 συγκρίνονται το τελικό (μετά την επιφανειακή αναγωγή) υετογράφημα σχεδιασμού που κατασκευάστηκε με τη μέθοδο της δυσμενέστερης διάταξης για περίοδο επαναφοράς 10 000 έτη με το αντίστοιχο υετογράφημα για $T = 1 000$ έτη, καθώς και με το υετογράφημα που προέκυψε με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ, για $T = 10 000$ έτη.



Εικόνα 4: Επιφανειακά ανηγμένα υετογραφήματα σχεδιασμού διάρκειας 24 h, που παράγονται με τη μέθοδο της δυσμενέστερης διάταξης (WP) για περιόδους επαναφοράς 1000 και 10000 έτη (άνω), και υετογραφήματα που παράγονται με τις μεθόδους δυσμενέστερης διάταξης (WP) και εναλλασσόμενων μπλοκ (AB) για $T = 10\ 000$ έτη (κάτω).

3.5 Εκτίμηση ενεργού βροχόπτωσης με τη μέθοδο SCS-CN

3.5.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Για την εκτίμηση της ενεργού βροχόπτωσης, δηλαδή τον διαχωρισμό των υδρολογικών ελλειμμάτων από το συνολικό υετογράφημα σχεδιασμού, εφαρμόστηκε η μέθοδος της Soil Conservation Service (SCS-CN). Η μέθοδος βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές (Soil Conservation Service, 1972· U.S. Department of the Interior, 1977· βλ. και Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 274-278):

- Για ένα αρχικό διάστημα t_{a0} , όλη η ποσότητα της βροχόπτωσης h_{a0} μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε έλλειμμα (αρχικό έλλειμμα), χωρίς να δίνει καθόλου ενεργό βροχόπτωση. Η ποσότητα h_{a0} αποτελεί παράμετρο της μεθόδου.
- Το επιπλέον, πέραν του αρχικού h_{a0} , ελλειμματικό ύψος κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης βροχόπτωσης δεν μπορεί να ξεπεράσει ένα άνω όριο που καλείται *μέγιστη δυναμική κατακράτηση* S , και επίσης αποτελεί παράμετρο της μεθόδου.
- Σε κάθε χρονική στιγμή $t > t_{a0}$, οι λόγοι του ενεργού ύψους βροχής h_e και του ελλειμματικού μείον το αρχικό έλλειμμα ($h_a - h_{a0}$), προς τα αντίστοιχα δυναμικά μεγέθη ($h - h_{a0}$ και S , αντίστοιχα), είναι ίσοι.

Βάσει των παραπάνω παραδοχών, και εκφράζοντας το αρχικό έλλειμμα ως ποσοστό της μέγιστης δυνητικής κατακράτησης, δηλαδή $h_{a0} = a S$, προκύπτει η ακόλουθη εμπειρική σχέση:

$$h_e = \begin{cases} 0 & h \leq a S \\ \frac{(h - a S)^2}{h + (1 - a) S} & h > a S \end{cases} \quad (12)$$

Η παραπάνω σχέση εφαρμόζεται τόσο για το συνολικό ύψος βροχής όσο και για κάθε τμηματικό ύψος, επιτρέποντας έτσι την εκτίμηση της χρονικής εξέλιξης της ενεργού βροχόπτωσης και, συνακόλουθα, των υδρολογικών ελλειμμάτων κατά τη διάρκεια της καταγίδας σχεδιασμού και μετά το πέρας αυτής.

Το ποσοστό αρχικών απωλειών εξαρτάται από τη δυνατότητα κατακράτησης της βροχόπτωσης από τη χλωρίδα και το ανάγλυφο, καθώς και τη διηθητικότητα του εδάφους. Αν και γενικά το ποσοστό αυτό παρουσιάζει μεγάλο εύρος διακύμανσης, ειθισται η εφαρμογή της τιμής $a = 20\%$, η οποία έχει προκύψει ως μέσος όρος ενός μεγάλου δείγματος παρατηρήσεων από αγροτικές, κυρίως, λεκάνες στις ΗΠΑ (Ponce and Hawkins, 1996).

Για δεδομένη τιμή του ποσοστού απωλειών a , το εννοιολογικό μοντέλο που υλοποιεί η σχέση (12) έχει μόνο μία παράμετρο, τη δυνητική μέγιστη κατακράτηση S . Εφόσον δεν υπάρχουν μετρήσεις απορροής, η τιμή της παραμέτρου S (σε mm) μπορεί να εκτιμηθεί συναρτήσει του αριθμού καμπύλης απορροής (curve number, CN) της λεκάνης, ο οποίος συμπυκνώνει τα φυσιολογικά χαρακτηριστικά της σε μια μοναδική αντιπροσωπευτική τιμή, με εύρος από 0 ως 100. Τα δύο μεγέθη συνδέονται με την εμπειρική σχέση:

$$S = 254 \left(\frac{100}{\text{CN}} - 1 \right) \quad (13)$$

Η παράμετρος CN εξαρτάται από τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά και τις χρήσεις γης στη λεκάνη, καθώς τις προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας. Σύμφωνα με την τυποποίηση της Soil Conservation Service, θεωρούνται τρεις τύποι συνθηκών υγρασίας (I: ξηρές, II: μέσες, III: υγρές) που προσδιορίζονται με βάση την αθροιστική βροχόπτωση των προηγούμενων πέντε ημερών ως εξής:

Τύπος I: Ξηρές συνθήκες (εδάφη ξηρά, αλλά πάνω από το σημείο μαρασμού), που αναφέρονται στην περίπτωση που η αθροιστική βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι < 13 mm (ή < 35 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Τύπος II: Μέσες συνθήκες, που αντιστοιχούν σε αθροιστική βροχόπτωση 5 ημερών μεταξύ 13 και 38 mm (ή μεταξύ 35 και 53 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Τύπος III: Υγρές συνθήκες (εδάφη σχεδόν κορεσμένα), που αντιστοιχούν σε αθροιστική βροχόπτωση 5 ημερών > 38 mm (ή > 53 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Για ποσοστό αρχικών απωλειών $a = 20\%$, η SCS δίνει αναλυτικές σχέσεις αναγωγής της παραμέτρου CN από συνθήκες υγρασίας τύπου II σε συνθήκες τύπου I και III. Συγκεκριμένα:

$$\text{CN}_I = \frac{4.2 \text{CN}_{II}}{10 - 0.058 \text{CN}_{II}} \quad (14)$$

$$\text{CN}_{III} = \frac{23 \text{CN}_{II}}{10 + 0.13 \text{CN}_{II}} \quad (15)$$

Στη μελέτη θεωρήθηκαν, γενικά, μέσες συνθήκες υγρασίας, εκτός από την περίοδο επαναφοράς 10 000 ετών, για την οποία παρήχθησαν υδρογραφήματα και για τους τρεις τύπους υγρασίας.

3.5.2 Εκτίμηση αριθμού καμπύλης απορροής αναφοράς

Ως τιμή αναφοράς της παραμέτρου CN θεωρείται αυτή που αντιστοιχεί σε μέσες συνθήκες αρχικής υγρασίας (συνθήκες τύπου II) και ποσοστό αρχικών απωλειών 20%. Η τιμή αυτή, που συμβολίζεται με $CN_{II,20}$, εκτιμάται με βάση τις κυρίαρχες κλάσεις υδατοπερατότητας, βλάστησης και αποστραγγιστικής ικανότητας της λεκάνης, σύμφωνα με την εμπειρική σχέση (Ευστρατιάδης κ.ά., 2014):

$$CN_{II,20} = 10 + 9 \times i_{PERM} + 6 \times i_{VEG} + 3 \times i_{SLOPE} \quad (16)$$

όπου i_{PERM} , i_{VEG} και i_{SLOPE} κωδικοί που λαμβάνουν τιμές από 1 έως 5 και υποδηλώνουν κάθε μία από τις παραπάνω κλάσεις (Πίνακας 4). Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, η ελάχιστη τιμή του CN αναφοράς είναι 28, ενώ η μέγιστη 100. Η ελάχιστη τιμή λαμβάνεται στην ακραία περίπτωση λεκανών πολύ υψηλής περατότητας, πυκνής βλάστησης και αμελητέας αποστραγγιστικής ικανότητας.

Πίνακας 4: Κωδικοποίηση φυσιογραφικών χαρακτηριστικών λεκάνης για την εκτίμηση του $CN_{II,20}$.

Κλάση περατότητας	i_{PERM}	Κλάση βλάστησης	i_{VEG}	Κλάση αποστραγγιστικής ικανότητας	i_{SLOPE}
Πολύ υψηλή	1	Πυκνή	1	Αμελητέα	1
Υψηλή	2	Μεσαία	2	Χαμηλή	2
Μέτρια	3	Χαμηλή	3	Μέτρια	3
Χαμηλή	4	Αραιή	4	Υψηλή	4
Πολύ χαμηλή	5	Μηδενική	5	Πολύ υψηλή	5

Η κατηγοριοποίηση σε κλάσεις υδατοπερατότητας αφορά στα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους και της ακόρεστης ζώνης (διηθητικότητα, οριζόντια και κατακόρυφη υδραυλική αγωγιμότητα) και επηρεάζουν τους μηχανισμούς διήθησης. Με βάση υδρολιθολογικό ή εδαφολογικό χάρτη και ανάλογα με τον κυρίαρχο τύπο εδαφών, υποκείμενων γεωλογικών σχηματισμών και δόμησης (για αστικές ή ημιαστικές λεκάνες), επιλέγεται η κλάση υδατοπερατότητας της υπολεκάνης, με βάση τον Πίνακα 5. Χρησιμοποιήθηκε υδρολιθολογικός χάρτης του ΙΓΜΕ κλίμακας 1:50 000, με βάση τον οποίο διαμορφώθηκαν οι ζητούμενες κλάσεις υδατοπερατότητας (Εικόνα 5, πάνω αριστερά).

Η κατηγοριοποίηση της βλάστησης αφορά στα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τους μηχανισμούς κατακράτησης της βροχόπτωσης, την τραχύτητα του εδάφους και της διηθητικής του ικανότητας, π.χ. λόγω ανάπτυξης του ριζοστρώματος. Με βάση χάρτη κάλυψης γης, επιλέγεται η κλάση βλάστησης της υπολεκάνης, σύμφωνα με τον Πίνακα 6. Χρησιμοποιήθηκε ο χάρτης CORINE Land Cover (CLC, 2000), με βάση τον οποίο διαμορφώθηκαν οι ζητούμενες κατηγορίες βλάστησης (Εικόνα 5, πάνω δεξιά).

Η αποστραγγιστική ικανότητα του εδάφους και συνεπώς η παραγωγή επιφανειακής απορροής εξαρτάται από τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του (ανάγλυφο, κλίση), την ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου, και την ύπαρξη σχετικών τεχνικών έργων (έργα ανάσχεσης, αποστραγγιστικά δίκτυα). Η σχετική κατηγοριοποίηση γίνεται σύμφωνα με τον Πίνακα 17. Στα πλαίσια της μελέτης ελήφθησαν υπόψη οι κλίσεις του εδάφους που προέκυψαν από επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου της λεκάνης σε περιβάλλον ΣΓΠ, οπότε προέκυψε η ζητούμενη κατηγοριοποίηση (Εικόνα 5, κάτω αριστερά).

Με εφαρμογή της σχέσης (16) υπολογίστηκαν οι τιμές του αριθμού καμπύλης αναφοράς $CN_{II,20}$ σε κάθε φαντίο της λεκάνης (Εικόνα 5, κάτω δεξιά). Παρατηρείται ότι η λεκάνη εμφανίζει έντονη ετερογένεια, καθώς η τιμή του $CN_{II,20}$ κυμαίνεται από 40 (στην περιοχή των καρστικοποιημένων ασβεστολίθων και δολομιτών) έως 95. Η μέση τιμή της παραμέτρου υπολογίστηκε σε $CN_{II,20} = 65$.

Πίνακας 5: Κλάσεις υδατοπερατότητας με βάση τα εδαφικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης.

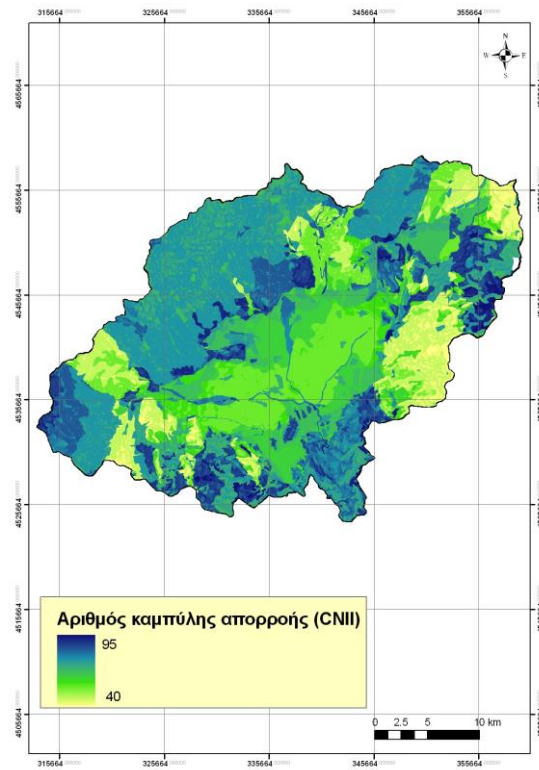
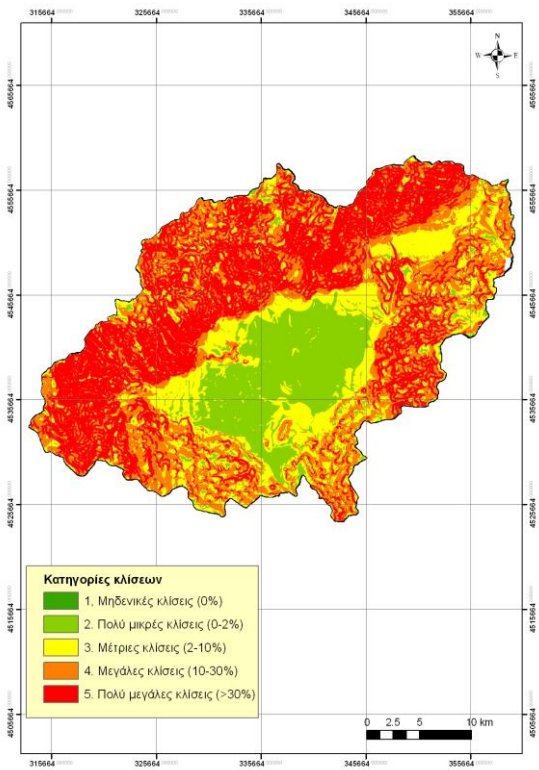
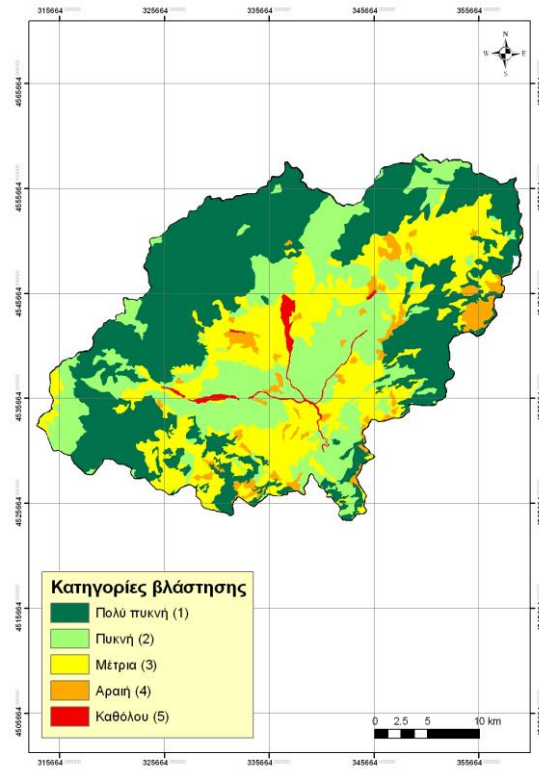
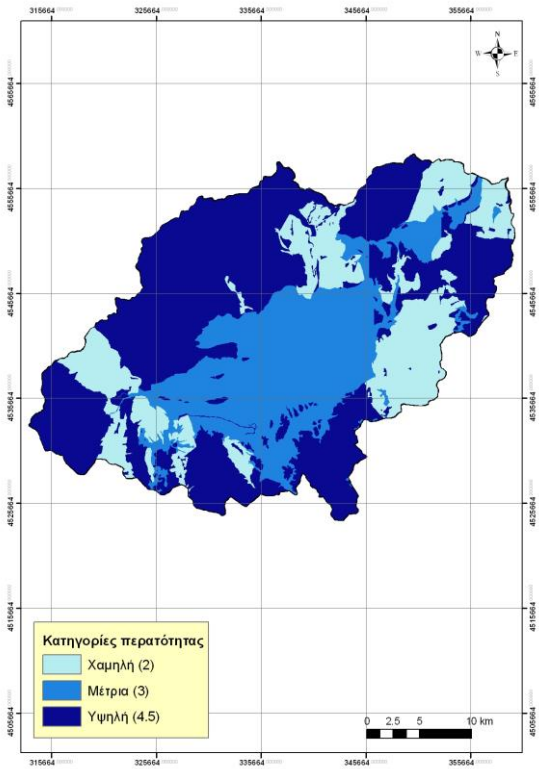
Κλάση	Εδαφικά χαρακτηριστικά	Γεωλογικά ή υδρολιθολογικά χαρακτηριστικά
Πολύ υψηλή	Πολύ ελαφριά και καλά αποστραγγιζόμενα εδάφη	Ανθρακικοί σχηματισμοί έντονα καρστικοποιημένοι, εκτεταμένης ανάπτυξης (κατακερματισμένοι ασβεστόλιθοι, δολομίτες, μάρμαρα)
Υψηλή	Αμμώδη και χαλικώδη εδάφη, με μικρό ποσοστό ιλύος και αργίλου	Ποτάμιες αποθέσεις, μη συνεκτικά κροκαλοπαγή, τριαδικά λατυποπαγή
Μέτρια	Αμμώδη παχιά εδάφη, ίλυες και ιλυώδη εδάφη, αμμώδης πηλός	Κοκκώδεις προσχωματικές αποθέσεις, σχιστόλιθοι, συνεκτικά κροκαλοπαγή, πλακώδεις ή λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθοι σε εναλλαγές με σχιστολιθικούς σχηματισμούς
Χαμηλή	Λεπτόκοκκα αργιλικά εδάφη, εδάφη από αργιλοπηλό, εδάφη φτωχά σε οργανικό υλικό	Φλύσχης, μεταμορφωμένα, πλουτώνια και ηφαιστειακά πετρώματα, κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις (εναλλαγές άμμων, μαργών, αργίλων, κροκαλοπαγών, μαργαϊκών ασβεστόλιθων, ψαμμιτών), κοκκώδεις μολασσικές αποθέσεις
Πολύ χαμηλή	Εδάφη μικρού βάθους που διογκώνονται όταν διαβραχούν, πλαστικές άργιλοι	Συμπαγείς βράχοι αμελητέας περατότητας (γρανίτες)

Πίνακας 6: Κλάσεις βλάστησης με βάση τα χαρακτηριστικά κάλυψης γης.

Κλάση	Χαρακτηριστικά κάλυψης γης
Πυκνή	Δάση (κωνοφόρα, πλατύφυλλα)
Μεσαία	Μεταβατικά δάση, οπωρώνες, ελαιώνες, παρόχθια βλάστηση
Χαμηλή	Βοσκότοποι, καλλιέργειες, αμπελώνες, χορτολιβαδικές εκτάσεις, θάμνοι,
Αραιή	Χέρσα γη, μη αρδεύσιμη-αρόσιμη γη, αμμοθίνες, υγρότοποι, διακεκομμένη αστική δόμηση
Μηδενική	Γυμνό ή βραχώδες έδαφος, τεχνητές επιφάνειες (δρόμοι, κτήρια)

Πίνακας 7: Κλάσεις αποστραγγιστικής ικανότητας με βάση τη μέση κλίση και τα συναφή χαρακτηριστικά του εδάφους.

Κλάση	Μέση κλίση εδάφους	Λοιπά χαρακτηριστικά
Αμελητέα	0%	Ανεπαρκές σύστημα αποστράγγισης, συχνές και εκτενείς κατακλύσεις, μη διαμορφωμένο υδρογραφικό δίκτυο
Χαμηλή	1-2%	Σημαντικές επιφανειακές ταπεινώσεις, περιστασιακές κατακλύσεις, όχι καλά διαμορφωμένο υδρογραφικό δίκτυο
Μέτρια	2-10%	Μικρές επιφανειακές ταπεινώσεις, σπάνιες κατακλύσεις, αβαθείς, μικροί διάδρομοι αποστράγγισης
Υψηλή	10-30%	Αμελητέες ταπεινώσεις εδάφους, πολύ καλά διαμορφωμένο υδρογραφικό δίκτυο, ύπαρξη αποστραγγιστικού δικτύου
Πολύ υψηλή	30%	Ορεινό ανάγλυφο



Εικόνα 5: Χάρτες κλάσεων υδατοπερατότητας (πάνω αριστερά), βλάστησης (πάνω δεξιά) και κλίσεων εδάφους (κάτω αριστερά) που χρησιμοποιήθηκαν για την κατηγοριοποίηση των τιμών του αριθμού καμπύλης απορροής της λεκάνης (κάτω δεξιά).

3.5.3 Εκτίμηση ποσοστού αρχικών απωλειών και αναγωγή αριθμού CN

Όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 3.5.1, η τυπική τιμή του ποσοστού $\alpha = 20\%$ που εφαρμόζεται για την εκτίμηση των αρχικών απωλειών, δηλαδή $\alpha = 20\%$, αναφέρεται, κυρίως, σε μικρού μεγέθους αγροτικές λεκάνες, που χαρακτηρίζονται από ήπιες κλίσεις. Από τις αναλύσεις ενός μεγάλου αριθμού πλημμυρικών επεισοδίων στις πιλοτικές λεκάνες του έργου Δευκαλίων, που είναι στο σύνολό τους ορεινές, το εν λόγω ποσοστό κυμάνθηκε από 5 έως 10% (Ευστρατιάδης κ.ά., 2014). Για την λεκάνη του Αλμωπαίου, στο ανάντη τμήμα της οποίας επικρατούν πολύ μεγάλες κλίσεις ενώ, αντίθετα, στο κατόντη επικρατούν ήπιες κλίσεις, θεωρήθηκε ποσοστό αρχικών απωλειών $\alpha = 15\%$.

Λόγω της μείωσης του ποσοστού α , απαιτήθηκε αντίστοιχη μείωση της παραμέτρου CN αναφοράς, και συνακόλουθα αύξηση της μέγιστης δυναμικής κατακράτησης S , μέσω της ακόλουθης διαδικασίας:

1. Από την όμβρια καμπύλη της λεκάνης εκτιμήθηκε το ολικό ύψος βροχής h για 24ωρη διάρκεια βροχής, για τη ζητούμενη περίοδο επαναφοράς T (Πίνακας 1).
2. Μέσω των σχέσεων (14) και (15) έγινε αναγωγή της τιμής αναφοράς $CN_{II,20}$ (που αναφέρεται σε ποσοστό αρχικών απωλειών 20% και συνθήκες υγρασίας τύπου II), για συνθήκες υγρασίας τύπου I και III, αντίστοιχα.
3. Μέσω της σχέσης (13) εκτιμήθηκαν οι τιμές της μέγιστης δυναμικής κατακράτησης S για συνθήκες υγρασίας τύπου I, II και III (οι τιμές αυτές αναφέρονται σε ποσοστό απωλειών 20%).
4. Με εφαρμογή της σχέσης (12) εκτιμήθηκε το ολικό ενεργό ύψος βροχής h_e συναρτήσει των h και S , για αρχικές απώλειες $\alpha = 20\%$.
5. Για το ζητούμενο ποσοστό αρχικών απωλειών α (στην προκειμένη περίπτωση 15%), επιλύθηκε η σχέση (12) με γνωστό ολικό, h , και ενεργό, h_e , ύψος βροχής 24ωρης διάρκειας, από την οποία προέκυψε η ανηγμένη τιμή της μέγιστης δυναμικής κατακράτησης S ως εξής:

$$S(\alpha) = \frac{2\alpha h + (1 - \alpha) h_e - \sqrt{[2\alpha h + (1 - \alpha) h_e]^2 - 4 \alpha^2 h (h - h_e)}}{2\alpha^2} \quad (17)$$

Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για όλες τις περιόδους επαναφοράς που εξετάστηκαν, ενώ ειδικά για την περίοδο επαναφοράς των 10 000 ετών εκτιμήθηκαν οι διορθωμένες τιμές της μέγιστης δυναμικής κατακράτησης για τους τρεις τύπους προηγούμενων συνθηκών υγρασίας.

3.6 Βασική ροή

Κατά τη διάρκεια των πλημμυρικών επεισοδίων, η βασική ροή αποτελεί μικρό μόνο ποσοστό της συνολικής παροχής, που μειώνεται περαιτέρω όσο αυξάνει η περίοδος επαναφοράς. Για την εκτίμηση της βασικής ροής θεωρήθηκε η μέση παροχή του μήνα με την υψηλότερη απορροή (στην προκειμένη περίπτωση, του Απριλίου). Με βάση δείγμα μετρημένων παροχών στον υδρομετρικό σταθμό Προφήτης Ηλίας της ΔΕΗ (ο σταθμός βρίσκεται κατόντη του φράγματος, λίγο πριν τη συμβολή του Αλμωπαίου με τον Αλιάκμονα), η μέση παροχή της περιόδου 1980-1995 ανέρχεται σε $17.3 \text{ m}^3/\text{s}$ (Κουκουβίνος κ.ά., 2013). Η τιμή αυτή είναι αμελητέα σε σύγκριση με τις πλημμυρικές παροχές που εκτιμήθηκαν για τις περιόδους επαναφοράς ενδιαφέροντος (από 100 έως 60 000 έτη).

4. Υπολογισμοί και αποτελέσματα

4.1 Υπολογιστική διαδικασία και σενάρια που εξετάστηκαν

Με βάση τη μεθοδολογία και παραδοχές της ενότητας 3 υπολογίστηκαν τα πλημμυρογραφήματα σχεδιασμού της λεκάνης για περιόδους επαναφοράς από 100 μέχρι 60 000 έτη, εφαρμόζοντας τη μέθοδο της δυσμενέστερης διάταξης της καταιγίδας σχεδιασμού και το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα με παράμετρο χρόνου βάσης $\gamma = 10$, το οποίο θεωρείται αντιπροσωπευτικό της υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης.

Ειδικότερα, για την περίοδο επαναφοράς των 10 000 ετών, που είναι και οι κρισιμότερες για την παρούσα μελέτη, αφού θεωρείται ότι παρέχουν το κατάλληλο επίπεδο ασφάλειας για τον σχεδιασμό του υπερχειλιστή του φράγματος, έγιναν λεπτομερέστερες αναλύσεις. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν και οι δύο μέθοδοι διάταξης των καταιγίδων σχεδιασμού, δηλαδή οι μέθοδοι των εναλλασσόμενων μπλοκ και της δυσμενέστερης διάταξης, διατυπώθηκαν τρία εναλλακτικά σχήματα του ΣΜΥ (για τιμές 5, 10 και 15 της παραμέτρου γ του χρόνου βάσης), και εκτιμήθηκαν τρεις τιμές του αριθμού καμπύλης απορροής, που αναφέρονται στις τρεις καταστάσεις αρχικής υγρασίας του εδάφους. Με τον τρόπο αυτό διαμορφώθηκαν $2 \times 3 \times 3 = 18$ πλημμυρογραφήματα.

Οι υπολογισμοί έγιναν με πρόγραμμα Η/Υ. Το πρόγραμμα συνθέτει το υετογράφημα σχεδιασμού, εκτιμά, μέσω της σχέσης (12), την ενεργό βροχόπτωση, και συνδυάζοντάς την με το μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης, εξάγει το αντίστοιχο πλημμυρογράφημα. Ειδικότερα, αν $h_e(t)$ είναι η ενεργός βροχόπτωση στο διακριτό χρόνο t , και $u_d(t)$ το ΣΜΥ της λεκάνης για διάρκεια βροχής d , τότε ο υπολογισμός του πλημμυρογραφήματος γίνεται με βάση την αρχή της επαλληλίας. Συγκεκριμένα, από κάθε επιμέρους τμήμα της ενεργού βροχής $h_e(t)$ στο χρονικό διάστημα $[t, t + d]$ παράγεται το επιμέρους υδρογράφημα, πολλαπλασιάζοντας το αντίστοιχο ύψος με τις τεταγμένες του ΣΜΥ. Αν D είναι η συνολική διάρκεια βροχής, τότε παράγονται $n = D / d$ υδρογραφήματα, τα οποία αθροίζονται χρονικά ώστε να προκύψει το τελικό πλημμυρογράφημα.

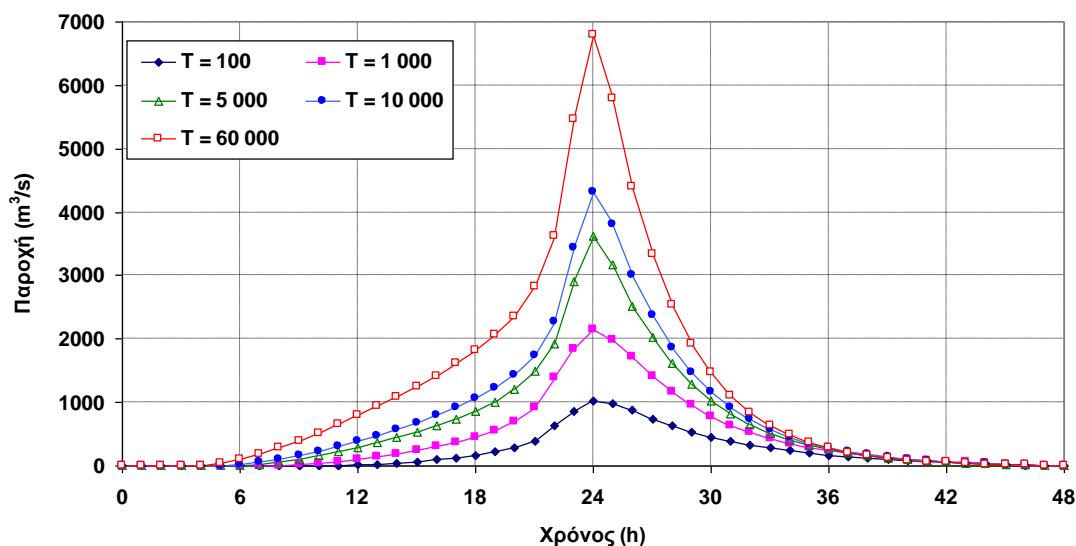
Αναλυτικά αποτελέσματα για όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν δίνονται με τη μορφή γραφημάτων στο Παράρτημα.

4.2 Πλημμυρογραφήματα σχεδιασμού για διάφορες περιόδους επαναφοράς

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των αναλύσεων για τις διάφορες περιόδους επαναφοράς δίνονται στον Πίνακα 8, ενώ στην Εικόνα 6 απεικονίζονται τα αντίστοιχα πλημμυρογραφήματα σχεδιασμού.

Πίνακας 8: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για διάφορες περιόδους επαναφοράς.

Περίοδος επαναφοράς (έτη)	100	1 000	5 000	10 000	60 000
Ανηγμένος χρόνος συγκέντρωσης (h)	6.8	5.6	4.9	4.7	4.0
Ολικό ύψος σημειακής βροχής (mm)	132.3	192.1	249.3	278.9	372.9
Ολικό ύψος επιφανειακής βροχής (mm)	116.7	169.5	220.0	246.1	329.0
Ολικό ύψος πλημμυρικής απορροής (mm)	39.7	77.7	118.3	140.4	213.7
Συντελεστής απορροής	0.340	0.458	0.538	0.571	0.650
Παροχή αιχμής (m ³ /s)	1031.1	2158.5	3621.4	4324.1	6788.8
Όγκος πλημμύρας (hm ³)	39.0	76.3	116.2	137.9	209.9



Εικόνα 6: Πλημμυρογραφήματα σχεδιασμού για διάφορες περιόδους επαναφοράς.

Υπενθυμίζεται ότι τα μεγέθη αυτά έχουν προκύψει με τις εξής παραδοχές:

- διάρκεια καταιγίδας σχεδιασμού 24 h
- αναγωγή (μείωση) χρόνου συγκέντρωσης κατά Giandotti συναρτήσει της περιόδου επαναφοράς
- διαμόρφωση ΣΜΥ διάρκειας βροχής 1 h με παραμέτρους $\beta = 0.40$ και $\gamma = 10$, οι οποίες αναφέρονται στον χρόνο ανόδου και τον χρόνο βάσης, αντίστοιχα
- διαμόρφωση υετογραφήματων σχεδιασμού με τη μέθοδο της δυσμενέστερης διάταξης
- αναγωγή σημειακών υψών βροχής συναρτήσει της έκτασης της λεκάνης και της χρονικής κλίμακας με εφαρμογή του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής
- τιμή αναφοράς αριθμού καμπύλης απορροής $CN_{II,20} = 65$
- ποσοστό αρχικών απωλειών $\alpha = 15\%$
- συνθήκες αρχικής εδαφικής υγρασίας τύπου II
- αναγωγή CN για $\alpha = 15\%$, συναρτήσει της περιόδου επαναφοράς

Επειδή σε όλες τις περιπτώσεις εφαρμόστηκε η μέθοδος της δυσμενέστερης διάταξης, η παροχή αιχμής πραγματοποιείται σε χρόνο ίσο με τη διάρκεια των καταιγίδων σχεδιασμού, δηλαδή στις 24 h.

4.3 Ανάλυση ευαισθησίας για περίοδο επαναφοράς 10 000 έτη

Στη ανάλυση αυτή επιχειρήθηκε η εκτίμηση της αβεβαιότητας που σχετίζεται με τρεις κρίσιμες πτυχές της μεθοδολογίας, οι οποίες αφορούν:

- στην κατάρτιση του υετογραφήματος σχεδιασμού
- στην εκτίμηση του χρόνου βάσης του ΣΜΥ
- στην εκτίμηση της παραμέτρου CN συναρτήσει των αρχικών συνθηκών υγρασίας

Για το σκοπό αυτό, διαμορφώθηκαν 18 σενάρια, που αναφέρονται σε όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των δύο μεθόδων κατάρτισης των υετογραφημάτων σχεδιασμού (εναλλασσόμενα μπλοκ, δυσμενέστερη διάταξη), των τριών εκτιμητριών του χρόνου βάσης του ΣΜΥ (για $\gamma = 5, 10$ και 15) και των τριών τύπων αρχικής υγρασίας (I, II, III). Για τις λοιπές συνιστώσες της μεθοδολογίας ισχύουν οι παραδοχές της ενότητας 4.2.

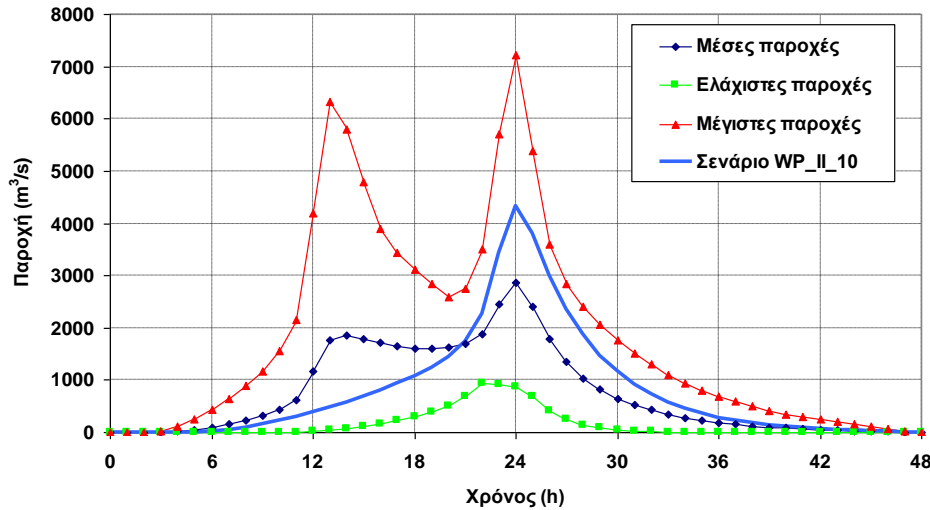
Για όλα τα σενάρια εκτιμήθηκαν τα εξής κοινά μεγέθη:

- Ανηγμένος χρόνος συγκέντρωσης 4.7 h
- Ολικό ύψος σημειακής βροχής 24ωρης διάρκειας 278.9 mm
- Ολικό ύψος επιφανειακής βροχής 246.1 mm

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των αναλύσεων για τις διάφορες περιόδους επαναφοράς δίνονται στον Πίνακα 9. Παρατηρείται ότι η παροχή αιχμής παρουσιάζει εξαιρετικά μεγάλο εύρος διακύμανσης, καθώς κυμαίνεται από περίπου $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ για το πλέον ευμενές σενάριο (υετογράφημα εναλλασσόμενων μπλοκ, παράμετρος χρόνου βάσης $\gamma = 15$, συνθήκες υγρασίας τύπου I), ενώ υπερβαίνει τα $6300 \text{ m}^3/\text{s}$ για το πλέον δυσμενές σενάριο (υετογράφημα δυσμενέστερης διάταξης, παράμετρος χρόνου βάσης $\gamma = 5$, συνθήκες υγρασίας τύπου III). Το εύρος αυτό αναδεικνύει με εμφατικό τρόπο την αβεβαιότητα που υπάρχει στην εκτίμηση των πλημμυρικών μεγεθών σχεδιασμού, ειδικά όταν αυτά αναφέρονται σε ακραίες περιόδους επαναφοράς.

Πίνακας 9: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας για $T = 10\ 000$ έτη.

Υετογράφημα σχεδιασμού	Συνθήκες υγρασίας	Παράμετρος γ χρόνου βάσης ΣΜΥ	Ολικό ύψος πλημμυρικής απορροής (mm)	Συντελεστής απορροής	Παροχή αιχμής (m^3/s)	Όγκος πλημμύρας (hm^3)
Εναλ. μπλοκ	I	5.0	74.4	0.302	2211.4	73.1
Δυσμ. διάταξη	I	5.0	74.4	0.302	3936.3	73.1
Εναλ. μπλοκ	II	5.0	140.4	0.571	4581.5	137.9
Δυσμ. διάταξη	II	5.0	140.4	0.571	6144.5	137.9
Εναλ. μπλοκ	III	5.0	189.6	0.771	6315.4	186.2
Δυσμ. διάταξη	III	5.0	189.6	0.771	7230.1	186.2
Εναλ. μπλοκ	I	10.0	74.4	0.302	1515.4	73.1
Δυσμ. διάταξη	I	10.0	74.4	0.302	2654.8	73.1
Εναλ. μπλοκ	II	10.0	140.4	0.571	3115.8	137.9
Δυσμ. διάταξη	II	10.0	140.4	0.571	4324.1	137.9
Εναλ. μπλοκ	III	10.0	189.6	0.771	4291.9	186.2
Δυσμ. διάταξη	III	10.0	189.6	0.771	5214.8	186.2
Εναλ. μπλοκ	I	15.0	74.4	0.302	1202.0	73.1
Δυσμ. διάταξη	I	15.0	74.4	0.302	2016.3	73.1
Εναλ. μπλοκ	II	15.0	140.4	0.571	2405.3	137.9
Δυσμ. διάταξη	II	15.0	140.4	0.571	3381.7	137.9
Εναλ. μπλοκ	III	15.0	189.6	0.771	3313.4	186.2
Δυσμ. διάταξη	III	15.0	189.6	0.771	4159.3	186.2



Εικόνα 7: Πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για $T = 10\ 000$ έτη και σύγκρισή του με τις μέσες, μέγιστες και ελάχιστες τιμές παροχής που προκύπτουν από τα 18 σενάρια που εξετάστηκαν.

Από τα παραπάνω σενάρια, θεωρούμε ως πλέον εύλογο αυτό που προκύπτει από το υετογράφημα δυσμενέστερης διάταξης, για παράμετρο χρόνου βάσης $\gamma = 10$ και μέσες συνθήκες υγρασίας (τύπου II). Στην Εικόνα 7 απεικονίζονται το εν λόγω πλημμυρογράφημα με τις μέσες, μέγιστες και ελάχιστες τιμές παροχής για κάθε χρονικό βήμα, που προκύπτουν από τα 18 σενάρια. Παρατηρείται ότι η παροχή αιχμής του προτεινόμενου πλημμυρογραφήματος σχεδιασμού ($4320\ \text{m}^3/\text{s}$) είναι αρκετά υψηλότερη σε σχέση με τη μέση παροχή αιχμής των 18 σεναρίων, η οποία ανέρχεται σε $3780\ \text{m}^3/\text{s}$.

5. Συμπεράσματα

Εφαρμόστηκε η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του έργου ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ, που βασίζεται σε προσαρμογή της συνδυαστικής μεθόδου SCS-CN και συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος στις γεωμορφολογικές και υδροκλιματικές συνθήκες των ελληνικών λεκανών. Η προσαρμογή αυτή έχει λάβει υπόψη τις αναλύσεις μεγάλου αριθμού πλημμυρικών επεισοδίων στις λεκάνες που εξετάστηκαν, καθώς και τις πρόσφατες εξελίξεις στη διεθνή υδρολογική έρευνα.

Η διερεύνηση που έγινε στη λεκάνη απορροής του Αλμωπαίου ανέδειξε το μεγάλο εύρος αβεβαιότητας που διέπει τις εκτιμήσεις των πλημμυρικών μεγεθών, σε σχέση με κρίσιμες πτυχές της μεθόδου SCS-CN και μοναδιαίου υδρογραφήματος. Υιοθετώντας τις κατά το δυνατόν πιο ρεαλιστικές παραδοχές, δόθηκαν κάποιες αρχικές εκτιμήσεις, που αναφέρονται στα πλημμυρικά μεγέθη ενδιαφέροντος. Ειδικότερα:

- Για περίοδο επαναφοράς **10 000 έτη**, η παροχής αιχμής εκτιμήθηκε σε **$4\ 320\ \text{m}^3/\text{s}$** και ο αντίστοιχος πλημμυρικός όγκος σε **$137.9\ \text{hm}^3$**
- Για περίοδο επαναφοράς **60 000 έτη**, η παροχής αιχμής εκτιμήθηκε σε **$6\ 789\ \text{m}^3/\text{s}$** και ο αντίστοιχος πλημμυρικός όγκος σε **$209.9\ \text{hm}^3$**

Στις παραπάνω εκτιμήσεις δεν έχει ληφθεί υπόψη η βασική ροή, η οποία αποτελεί αμελητέο ποσοστό της πλημμυρικής παροχής αιχμής για τόσο ακραίες περιόδους επαναφοράς.

Επισημαίνεται, ακόμη, ότι στην διερεύνηση δεν εξετάστηκε καθόλου η μεθοδολογία εξαγωγής των ομβρίων καμπυλών, οι οποίες ελήφθησαν αυτούσιες από υφιστάμενη υδρολογική μελέτη του φράγματος.

Τέλος, ως προς τη σχηματοποίηση της λεκάνης, υιοθετήθηκε μια αδιαμέριστη προσέγγιση, η οποία μπορεί να θεωρηθεί επαρκής για μια προκαταρκτική εκτίμηση των μεγεθών ενδιαφέροντος. Ωστόσο, σε μια μελέτη σχεδιασμού απαιτείται πιο λεπτομερής χωρική ανάλυση, αφενός λόγω του μεγέθους της λεκάνης (982 km²) και, κυρίως, λόγω της έντονης ετερογένειας των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών της, που σχετίζονται με τους μηχανισμούς παραγωγής των πλημμυρών (κλίση, υδατοπερατότητα). Κάτι τέτοιο θα απαιτούσε διαχωρισμό της συνολικής λεκάνης σε επιμέρους υπολεκάνες με ομοιόμορφα χαρακτηριστικά, και συνδυαστική χρήση υδρολογικών και υδραυλικών μοντέλων για την κατάρτιση υδρογραφημάτων σχεδιασμού στις θέσεις ενδιαφέροντος.

Για τους συντάκτες της μελέτης

Δ. Κουτσογιάννης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αναφορές

- Γραφείο Δοξιάδη κ.ά., Μελέτη υδρολογίας – Υδρολογική έρευνα πλημμυρών, *Μελέτη κατασκευής φράγματος Αλμωπαίου (Καλής) Ν. Πέλλας – Υποστηρικτικές μελέτες για τις ανάγκες της προμελέτης του φράγματος*, Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, Μάιος 2008.
- Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Α. Κούσης, Ν. Μαμάσης, Ε. Γαλιούνα, Κ. Τζούκα, Ε. Μιχαηλίδη, και Δ. Κουτσογιάννης, Τεχνική έκθεση περιγραφής περιοχικών σχέσεων εκτίμησης χαρακτηριστικών υδρολογικών μεγεθών, *ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων*, Ανάδοχοι: ΕΤΜΕ: Πέππας & Συν/τες Ε.Ε., Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, Ιούλιος 2014.
- Κουκουβίνος, Α., Α. Ευστρατιάδης, Ν. Μαμάσης, Ι. Μαρκόνης, Σ. Μπακή, και Δ. Κουτσογιάννης, Διαμόρφωση σχεδίου αντιμετώπισης φαινομένων λειψυδρίας και ξηρασίας, με βάση τις αρχές του προληπτικού σχεδιασμού – Υδατικό Διαμέρισμα Κεντρικής Μακεδονίας (GR10), *Κατάρτιση Σχεδίων Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών των Υδατικών Διαμερισμάτων Δυτικής Μακεδονίας και Κεντρικής Μακεδονίας, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ, κατ'εφαρμογή του Ν. 3199/2003 και του Π.Δ. 51/2007*, Εργοδότης: Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, Ανάδοχος: Εξάρχου Νικολόπουλος Μπενσασσών, 144 σελίδες, Φεβρουάριος 2013.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- Efstratiadis, A., A. D. Koussis, D. Koutsoyiannis, and N. Mamassis, Flood design recipes vs. reality: can predictions for ungauged basins be trusted?, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 1417–1428, doi:10.5194/nhess-14-1417-2014, 2014.
- Grimaldi, S., A. Petroseli, F. Tauro, and M. Porfiri, Time of concentration: A paradox in modern hydrology, *Hydrological Sciences Journal*, 57(2), 217–228, 2012.
- 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 probabilistic view of Hershfield's method for estimating probable maximum precipitation, *Water Resources Research*, 35(4), 1313–1322, 1999.
- Koutsoyiannis, D., A stochastic disaggregation method for design storm and flood synthesis, *Journal of Hydrology*, 156, 193-225, 1994.

- 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., N. Mamassis, A. Efstratiadis, N. Zarkadoulas, and Y. Markonis, Floods in Greece, *Changes of Flood Risk in Europe*, edited by Z. W. Kundzewicz, Chapter 12, 238–256, IAHS Press, Wallingford – International Association of Hydrological Sciences, 2012.
- Ponce V. M., and R. H. Hawkins, Runoff Curve Number: Has it reached maturity?, *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1), 11–19, 1996.
- U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, *Design of Arch Dams*, U.S. Government Printing Office, Denver, CO, 1977.
- U.K. National Environmental Research Council (UK-NERC), *Flood Studies Report*, Institute of Hydrology, Wallingford, 1975.

Παράρτημα: Αποτελέσματα με μορφή γραφημάτων

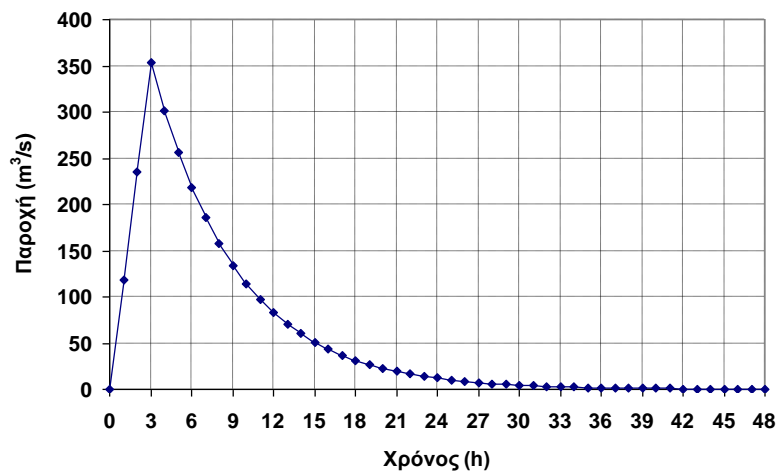
Σενάριο T100_WP_10_Π

Περίοδος επαναφοράς: 100 έτη

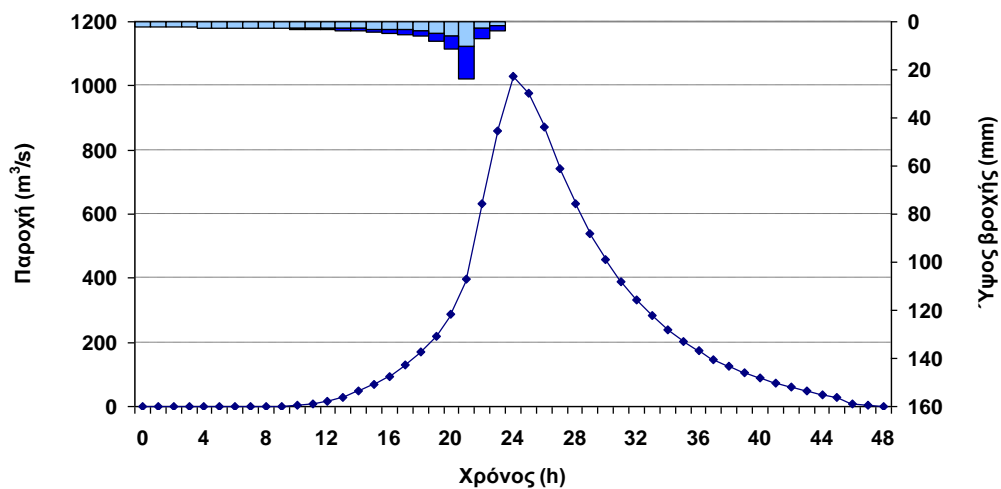
Μέθοδος κατάρτισης υετογραφήματος σχεδιασμού: δυσμενέστερη διάταξη

Παράμετρος χρόνου ανόδου ΣΜΥ: $\gamma = 10$

Αρχικές συνθήκες υγρασίας: τύπου II (μέσες)



Εικόνα Π.1: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.



Εικόνα Π.2: Υετογράφημα (ολικό και ενεργό) και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.

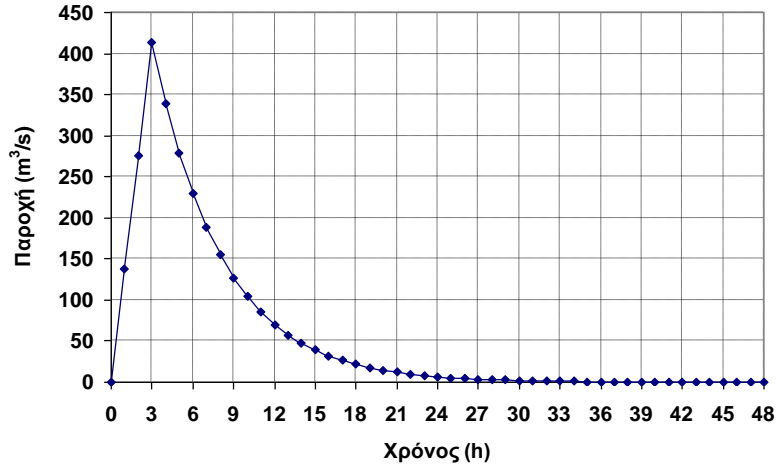
Σενάριο T1000_WP_10_II

Περίοδος επαναφοράς: 1 000 έτη

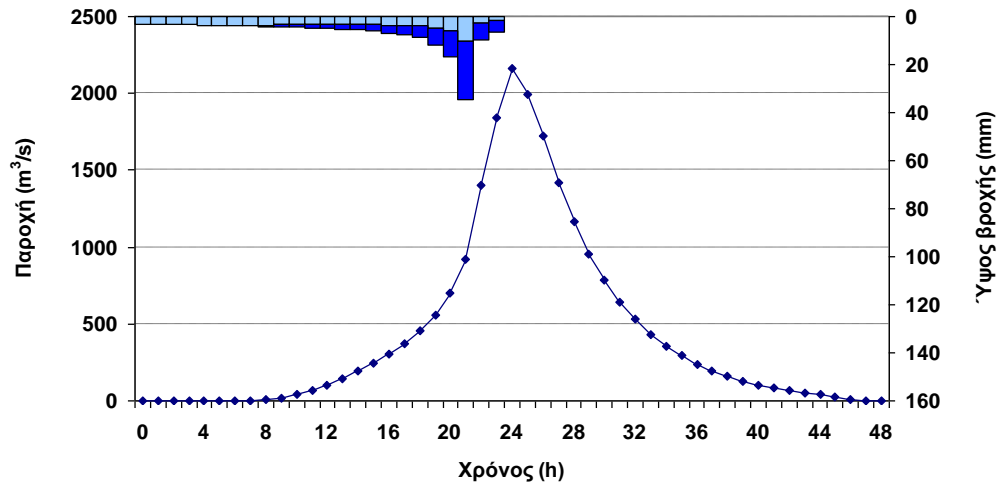
Μέθοδος κατάρτισης υετογραφήματος σχεδιασμού: δυσμενέστερη διάταξη

Παράμετρος χρόνου ανόδου ΣΜΥ: $\gamma = 10$

Αρχικές συνθήκες υγρασίας: τύπου II (μέσες)



Εικόνα Π.3: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.



Εικόνα Π.4: Υετογράφημα (ολικό και ενεργό) και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.

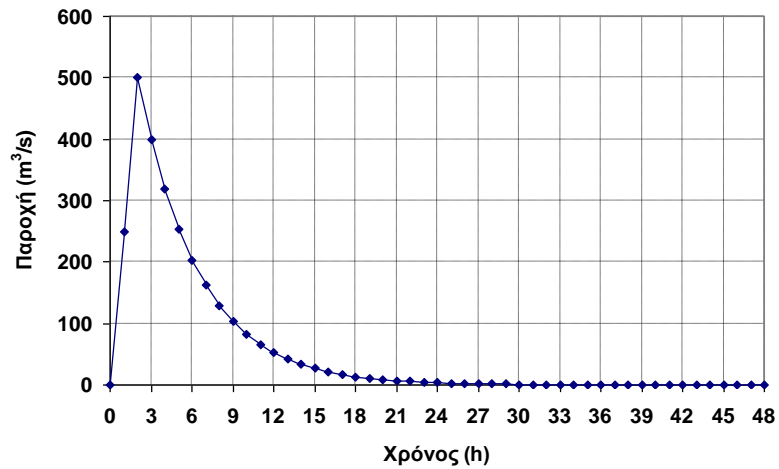
Σενάριο T5000_WP_10_II

Περίοδος επαναφοράς: 5 000 έτη

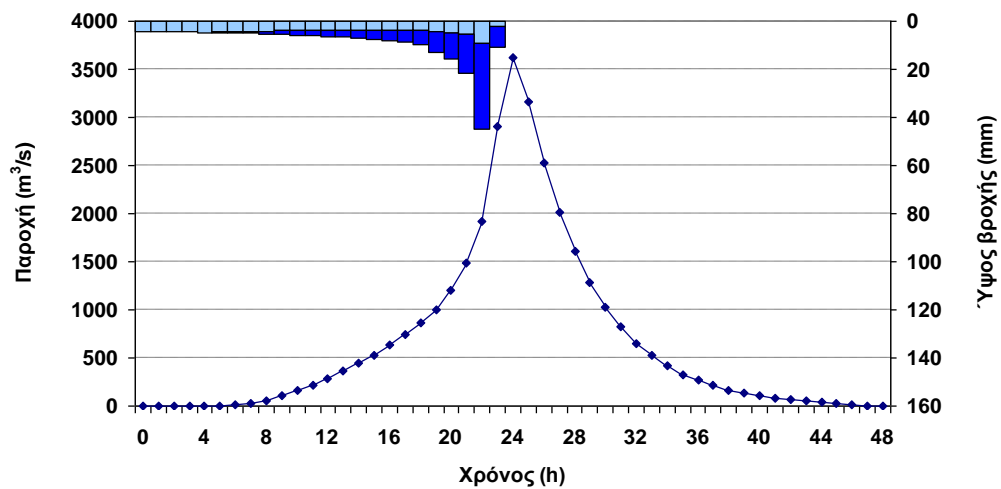
Μέθοδος κατάρτισης υετογραφήματος σχεδιασμού: δυσμενέστερη διάταξη

Παράμετρος χρόνου ανόδου ΣΜΥ: $\gamma = 10$

Αρχικές συνθήκες υγρασίας: τύπου II (μέσες)



Εικόνα Π.5: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.



Εικόνα Π.6: Υετογράφημα (ολικό και ενεργό) και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.

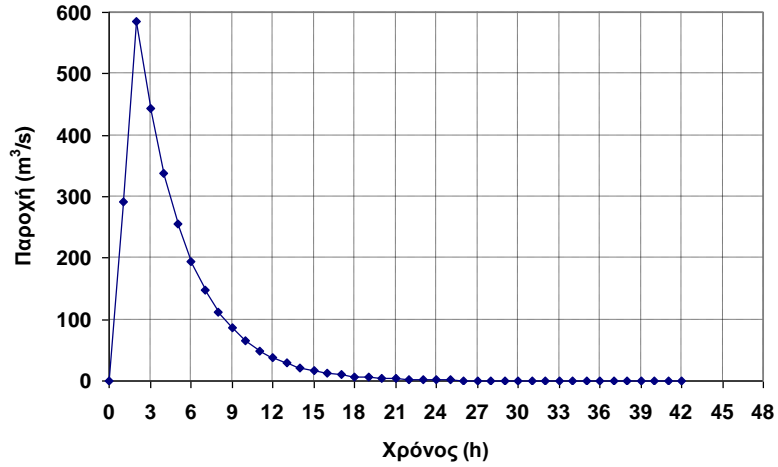
Σενάριο T60000_WP_10_II

Περίοδος επαναφοράς: 60 000 έτη

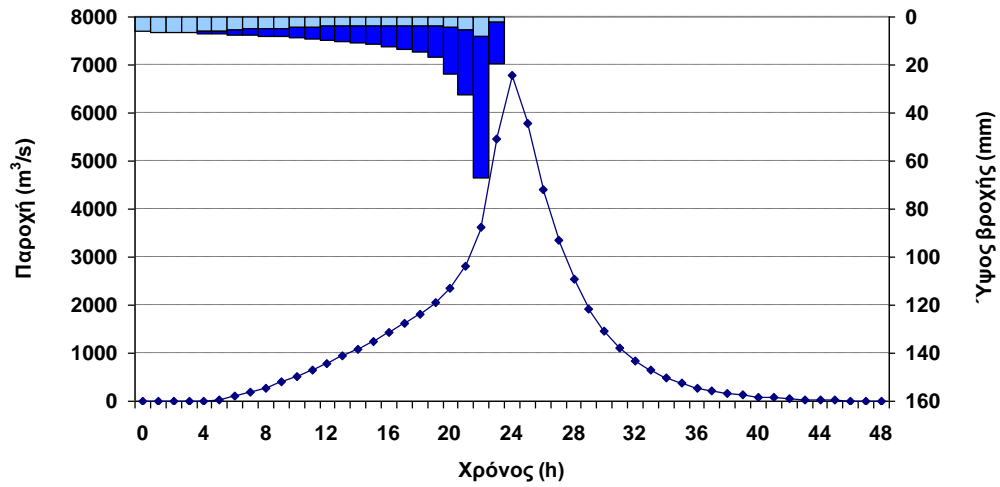
Μέθοδος κατάρτισης υετογραφήματος σχεδιασμού: δυσμενέστερη διάταξη

Παράμετρος χρόνου ανόδου ΣΜΥ: $\gamma = 10$

Αρχικές συνθήκες υγρασίας: τύπου II (μέσες)



Εικόνα Π.7: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.



Εικόνα Π.8: Υετογράφημα (ολικό και ενεργό) και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.

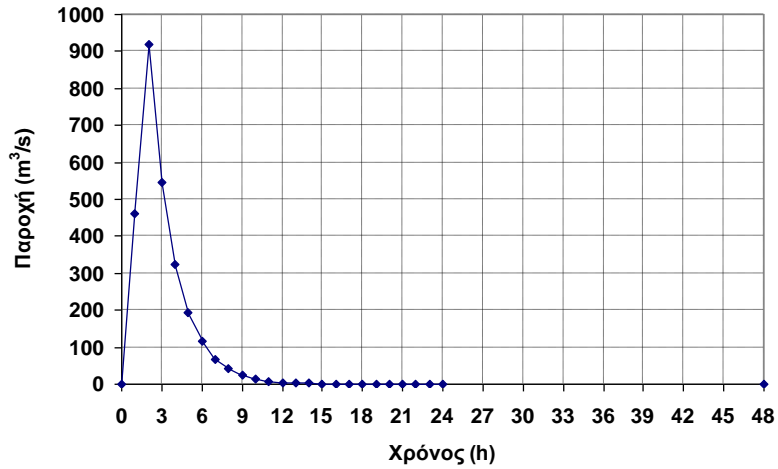
Σενάριο T10000_AB_5_I

Περίοδος επαναφοράς: 10 000 έτη

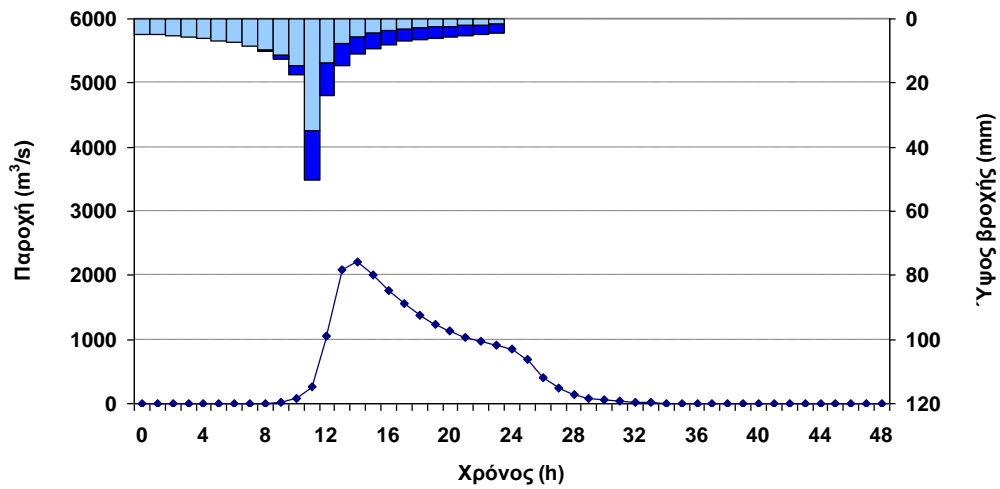
Μέθοδος κατάρτισης υετογραφήματος σχεδιασμού: εναλλασσόμενα μπλοκ

Παράμετρος χρόνου ανόδου ΣΜΥ: $\gamma = 5$

Αρχικές συνθήκες υγρασίας: τύπου I (ξηρές)



Εικόνα Π.9: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.



Εικόνα Π.10: Υετογράφημα (ολικό και ενεργό) και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.

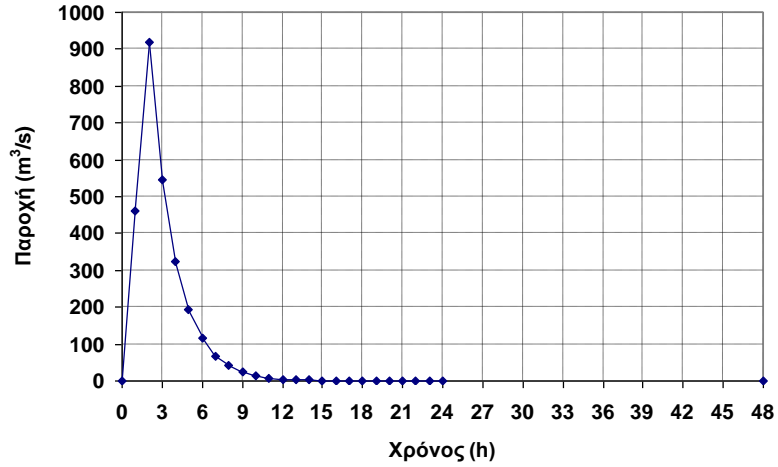
Σενάριο T10000_WP_5_I

Περίοδος επαναφοράς: 10 000 έτη

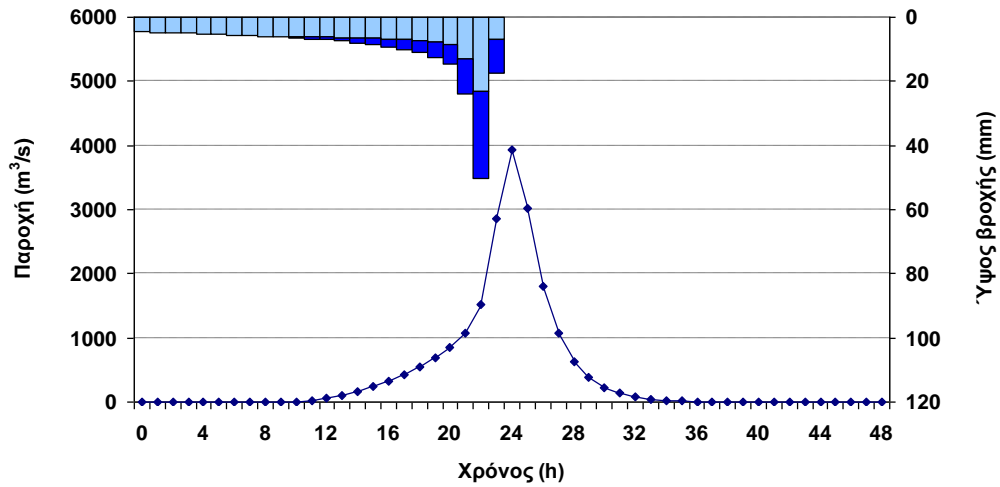
Μέθοδος κατάρτισης υετογραφήματος σχεδιασμού: δυσμενέστερη διάταξη

Παράμετρος χρόνου ανόδου ΣΜΥ: $\gamma = 5$

Αρχικές συνθήκες υγρασίας: τύπου I (ξηρές)



Εικόνα Π.11: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.



Εικόνα Π.12: Υετογράφημα (ολικό και ενεργό) και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.

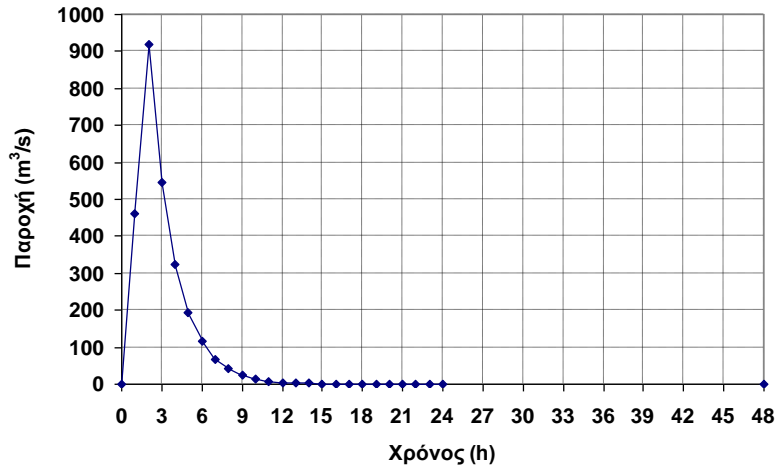
Σενάριο T10000_AB_5_II

Περίοδος επαναφοράς: 10 000 έτη

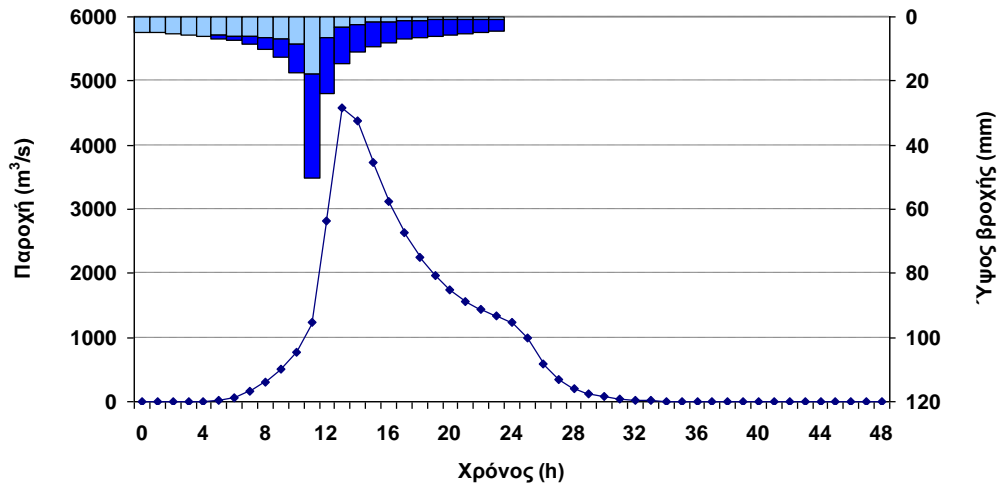
Μέθοδος κατάρτισης υετογραφήματος σχεδιασμού: εναλλασσόμενα μπλοκ

Παράμετρος χρόνου ανόδου ΣΜΥ: $\gamma = 5$

Αρχικές συνθήκες υγρασίας: τύπου II (μέσες)



Εικόνα Π.13: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.



Εικόνα Π.14: Υετογράφημα (ολικό και ενεργό) και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.

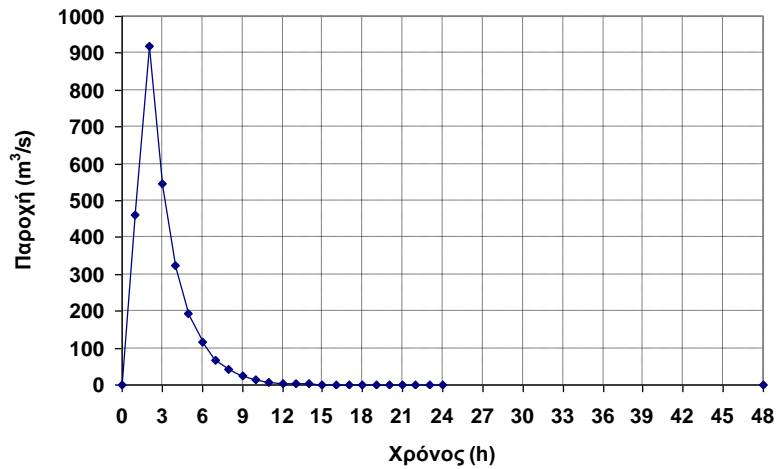
Σενάριο T10000_WP_5_II

Περίοδος επαναφοράς: 10 000 έτη

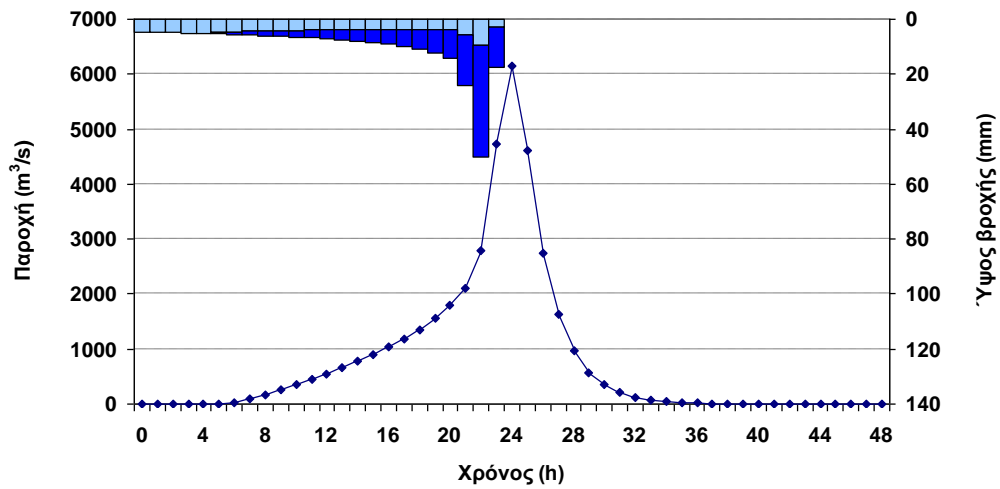
Μέθοδος κατάρτισης υετογραφήματος σχεδιασμού: δυσμενέστερη διάταξη

Παράμετρος χρόνου ανόδου ΣΜΥ: $\gamma = 5$

Αρχικές συνθήκες υγρασίας: τύπου II (μέσες)



Εικόνα Π.15: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.



Εικόνα Π.16: Υετογράφημα (ολικό και ενεργό) και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.

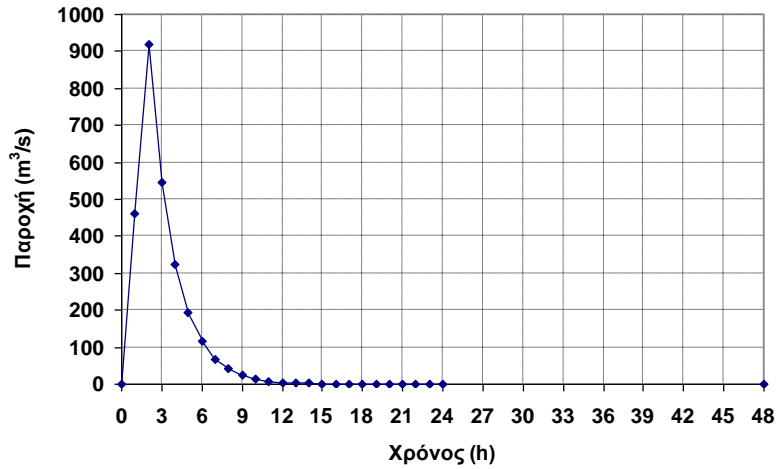
Σενάριο T10000_AB_5_III

Περίοδος επαναφοράς: 10 000 έτη

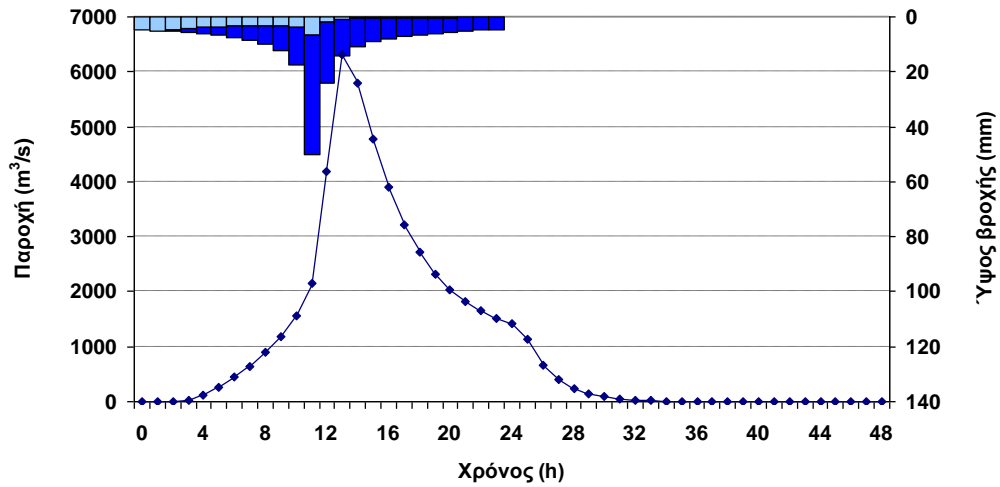
Μέθοδος κατάρτισης υετογραφήματος σχεδιασμού: εναλλασσόμενα μπλοκ

Παράμετρος χρόνου ανόδου ΣΜΥ: $\gamma = 5$

Αρχικές συνθήκες υγρασίας: τύπου III (υγρές)



Εικόνα Π.17: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.



Εικόνα Π.18: Υετογράφημα (ολικό και ενεργό) και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.

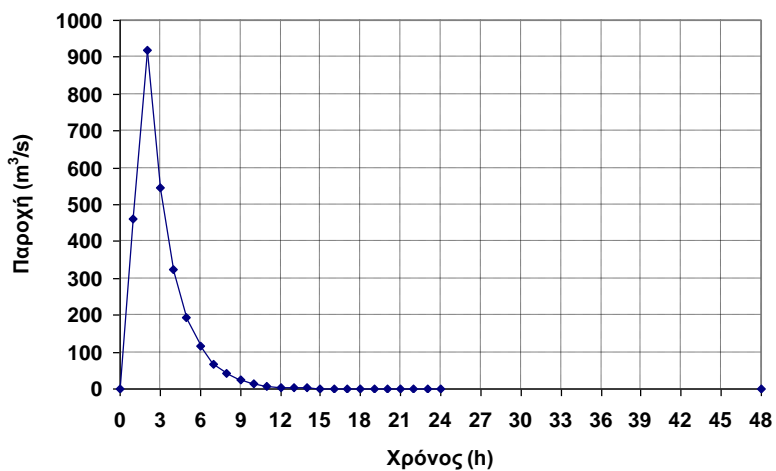
Σενάριο T10000_WP_5_III

Περίοδος επαναφοράς: 10 000 έτη

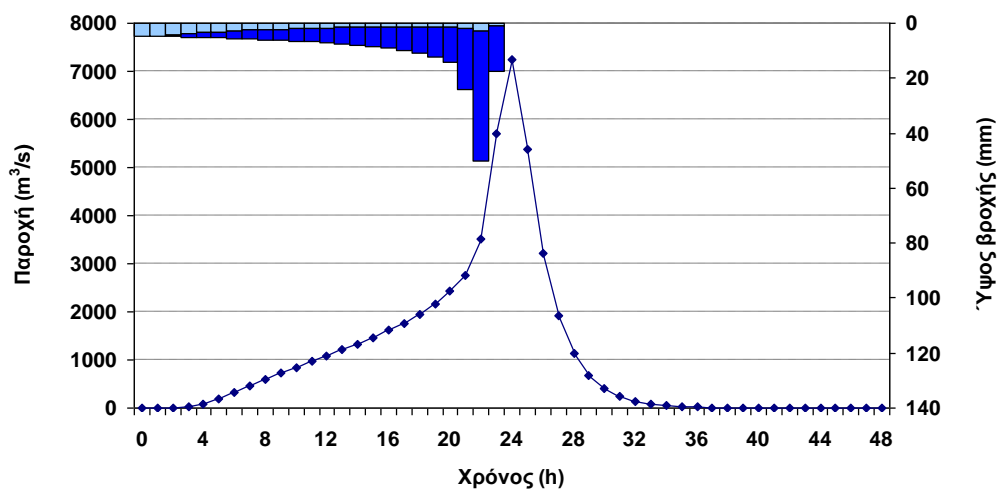
Μέθοδος κατάρτισης υετογραφήματος σχεδιασμού: δυσμενέστερη διάταξη

Παράμετρος χρόνου ανόδου ΣΜΥ: $\gamma = 5$

Αρχικές συνθήκες υγρασίας: τύπου III (υγρές)



Εικόνα Π.19: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.



Εικόνα Π.20: Υετογράφημα (ολικό και ενεργό) και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.

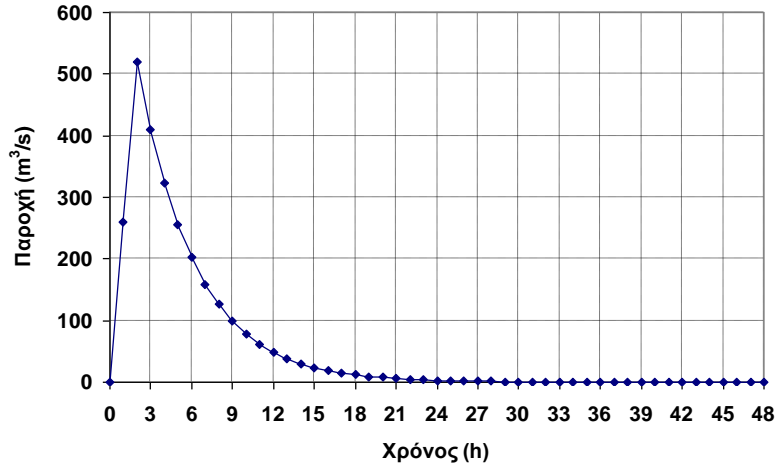
Σενάριο T10000_AB_10_I

Περίοδος επαναφοράς: 10 000 έτη

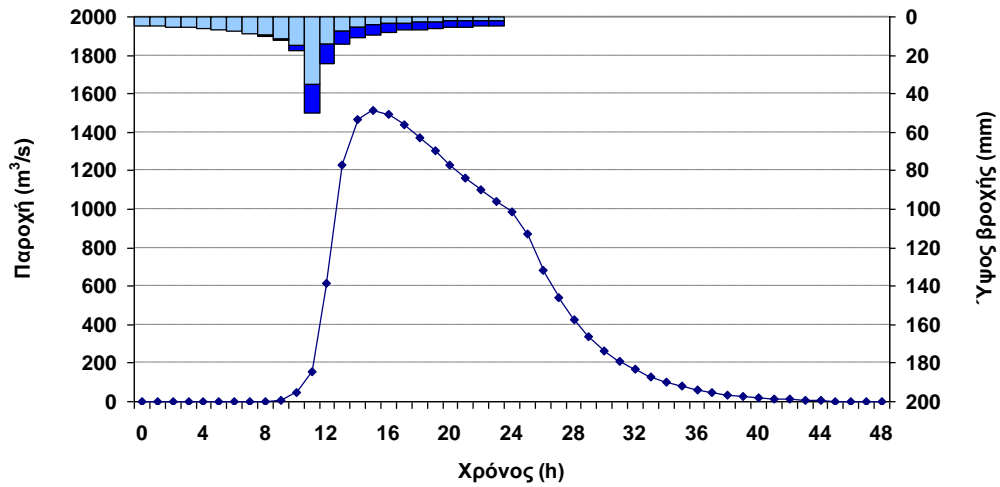
Μέθοδος κατάρτισης υετογραφήματος σχεδιασμού: εναλλασσόμενα μπλοκ

Παράμετρος χρόνου ανόδου ΣΜΥ: $\gamma = 10$

Αρχικές συνθήκες υγρασίας: τύπου I (ξηρές)



Εικόνα Π.21: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.



Εικόνα Π.22: Υετογράφημα (ολικό και ενεργό) και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.

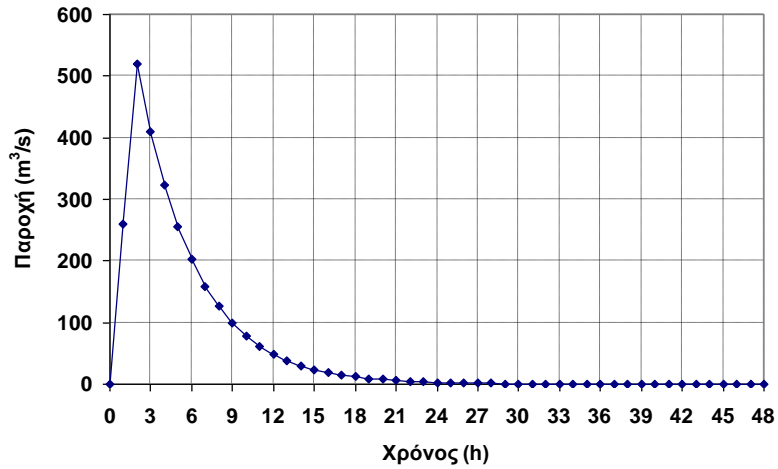
Σενάριο T10000_WP_10_I

Περίοδος επαναφοράς: 10 000 έτη

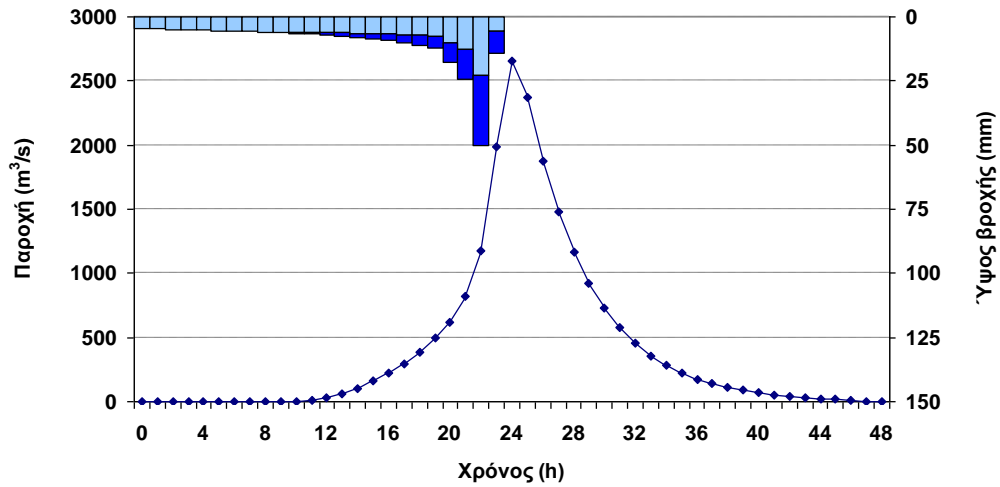
Μέθοδος κατάρτισης υετογραφήματος σχεδιασμού: δυσμενέστερη διάταξη

Παράμετρος χρόνου ανόδου ΣΜΥ: $\gamma = 10$

Αρχικές συνθήκες υγρασίας: τύπου I (ξηρές)



Εικόνα Π.23: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.



Εικόνα Π.24: Υετογράφημα (ολικό και ενεργό) και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.

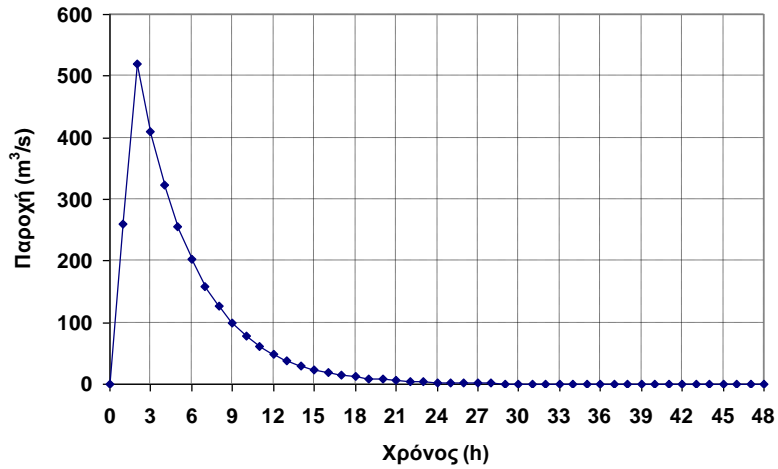
Σενάριο T10000_AB_10_II

Περίοδος επαναφοράς: 10 000 έτη

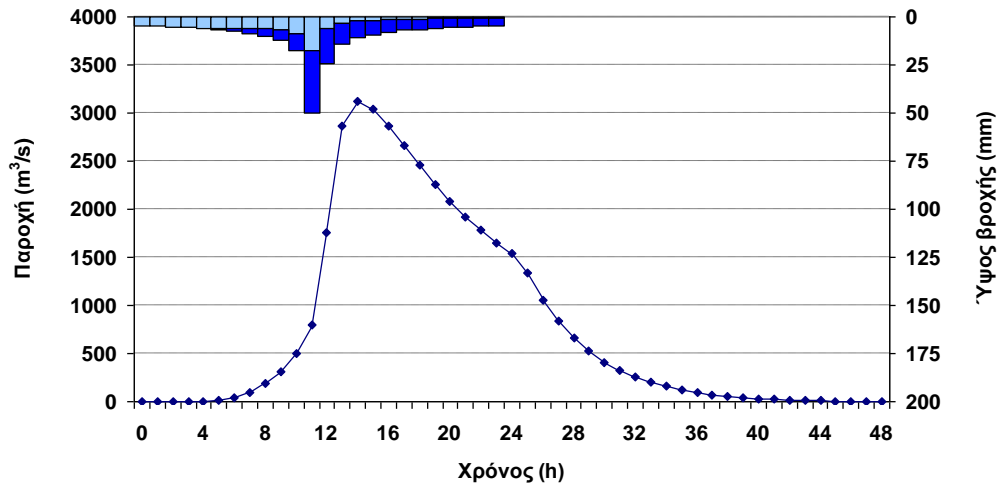
Μέθοδος κατάρτισης υετογραφήματος σχεδιασμού: εναλλασσόμενα μπλοκ

Παράμετρος χρόνου ανόδου ΣΜΥ: $\gamma = 10$

Αρχικές συνθήκες υγρασίας: τύπου II (μέσες)



Εικόνα Π.25: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.



Εικόνα Π.26: Υετογράφημα (ολικό και ενεργό) και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.

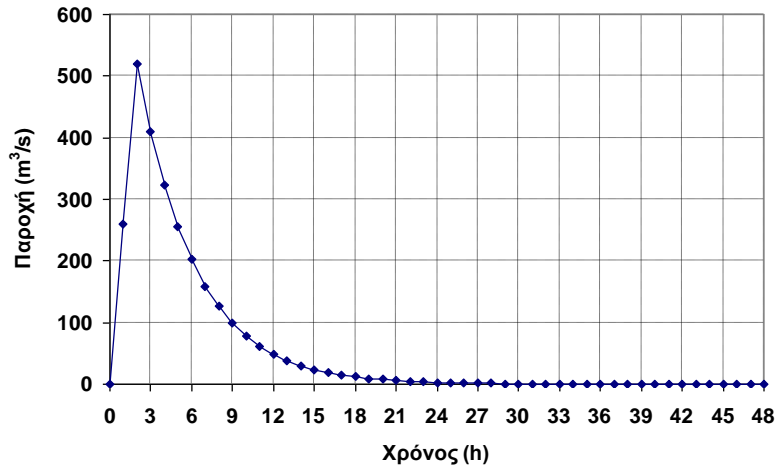
Σενάριο T10000_WP_10_II

Περίοδος επαναφοράς: 10 000 έτη

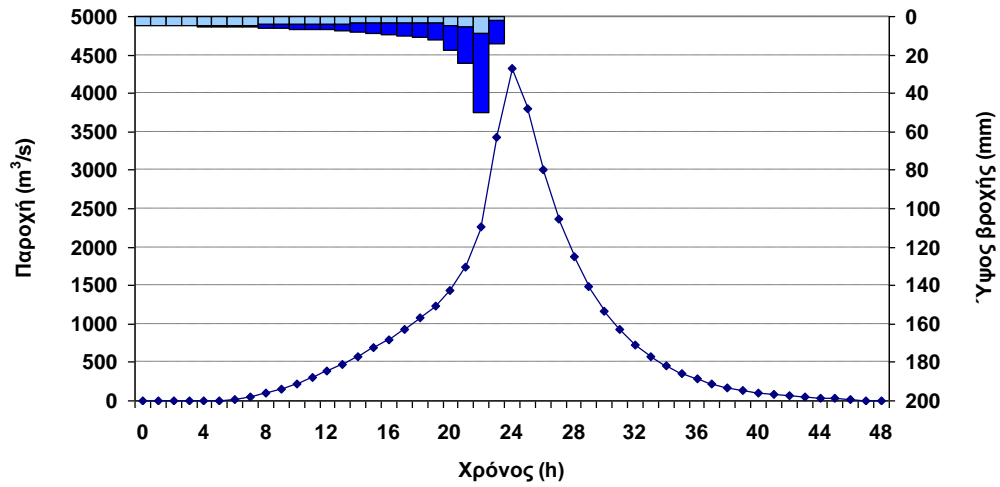
Μέθοδος κατάρτισης υετογραφήματος σχεδιασμού: δυσμενέστερη διάταξη

Παράμετρος χρόνου ανόδου ΣΜΥ: $\gamma = 10$

Αρχικές συνθήκες υγρασίας: τύπου II (μέσες)



Εικόνα Π.27: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.



Εικόνα Π.28: Υετογράφημα (ολικό και ενεργό) και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.

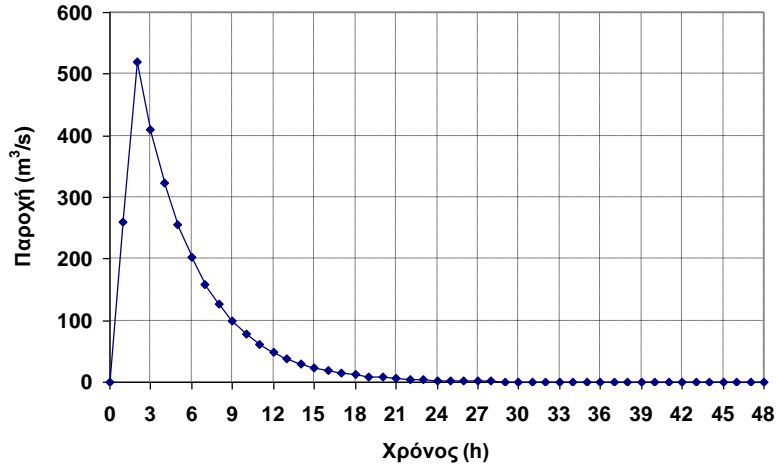
Σενάριο T10000_AB_10_III

Περίοδος επαναφοράς: 10 000 έτη

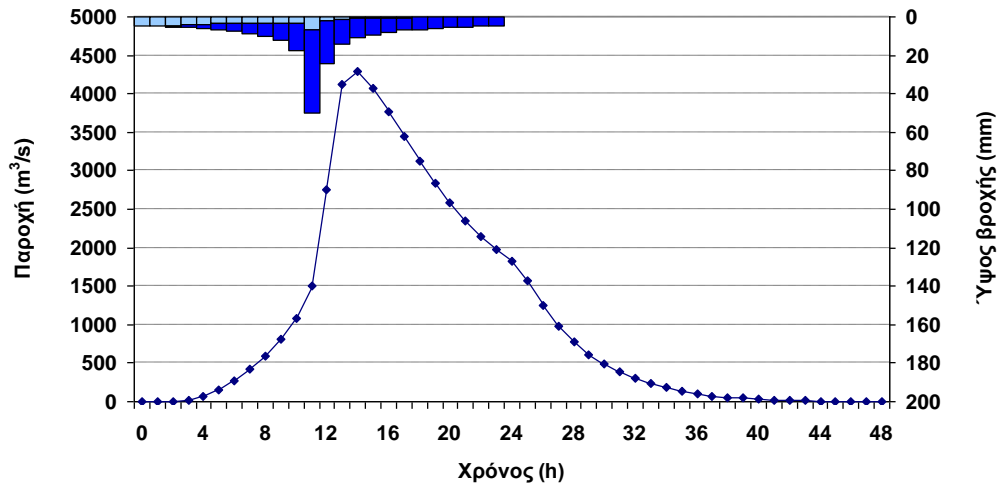
Μέθοδος κατάρτισης υετογραφήματος σχεδιασμού: εναλλασσόμενα μπλοκ

Παράμετρος χρόνου ανόδου ΣΜΥ: $\gamma = 10$

Αρχικές συνθήκες υγρασίας: τύπου III (υγρές)



Εικόνα Π.29: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.



Εικόνα Π.30: Υετογράφημα (ολικό και ενεργό) και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.

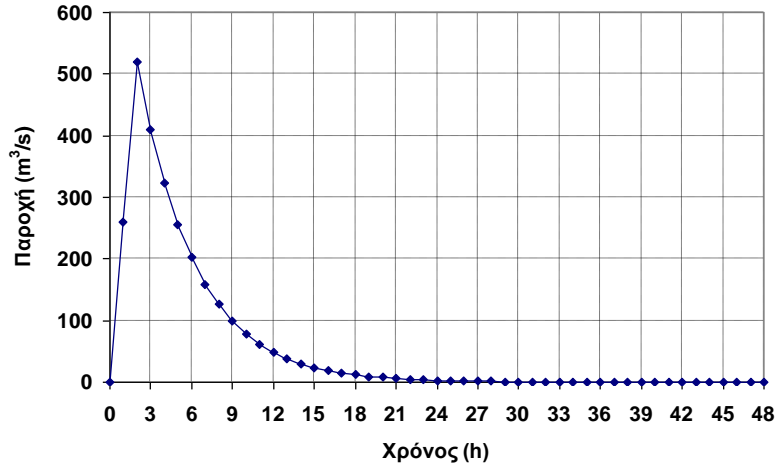
Σενάριο T10000_WP_10_III

Περίοδος επαναφοράς: 10 000 έτη

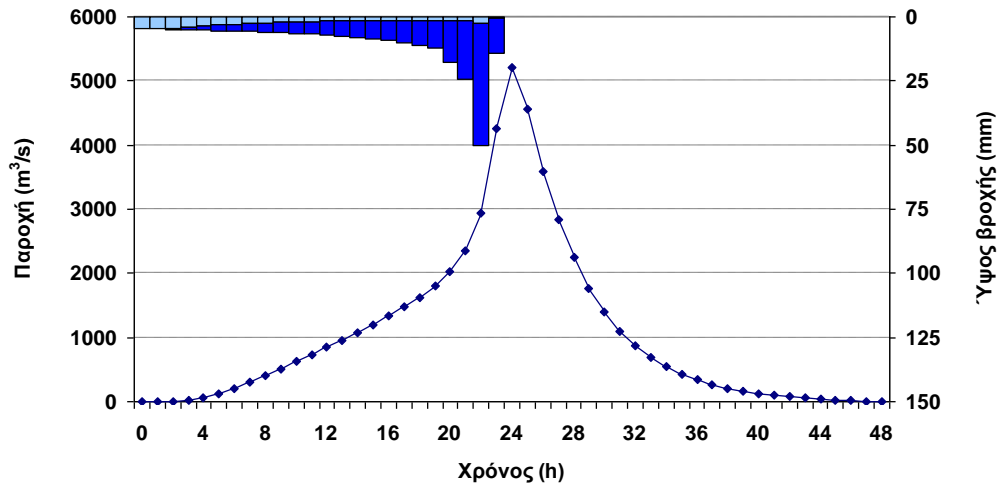
Μέθοδος κατάρτισης υετογραφήματος σχεδιασμού: δυσμενέστερη διάταξη

Παράμετρος χρόνου ανόδου ΣΜΥ: $\gamma = 10$

Αρχικές συνθήκες υγρασίας: τύπου III (υγρές)



Εικόνα Π.31: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.



Εικόνα Π.32: Υετογράφημα (ολικό και ενεργό) και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.

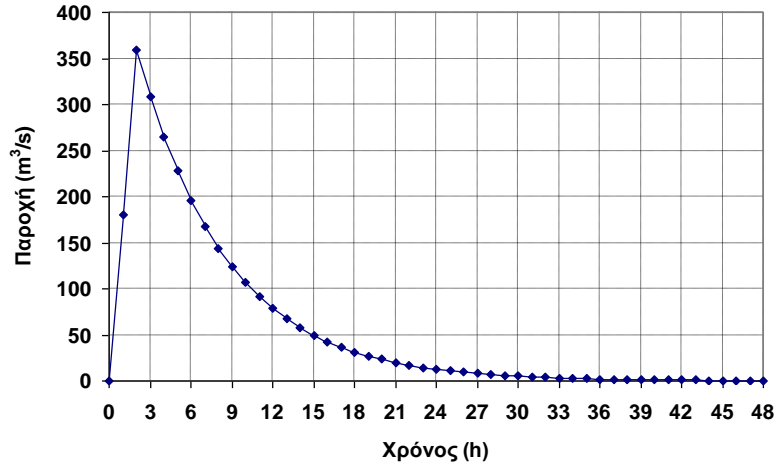
Σενάριο T10000_AB_15_I

Περίοδος επαναφοράς: 10 000 έτη

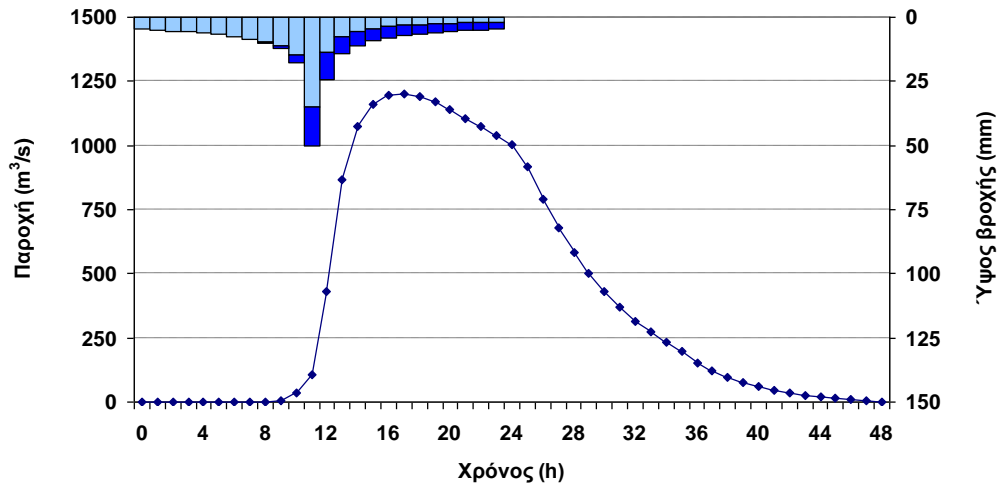
Μέθοδος κατάρτισης υετογραφήματος σχεδιασμού: εναλλασσόμενα μπλοκ

Παράμετρος χρόνου ανόδου ΣΜΥ: $\gamma = 15$

Αρχικές συνθήκες υγρασίας: τύπου I (ξηρές)



Εικόνα Π.33: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.



Εικόνα Π.34: Υετογράφημα (ολικό και ενεργό) και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.

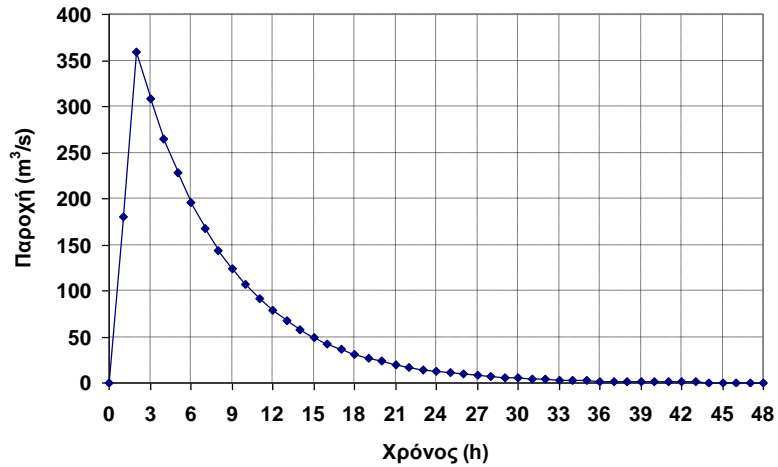
Σενάριο T10000_WP_15_I

Περίοδος επαναφοράς: 10 000 έτη

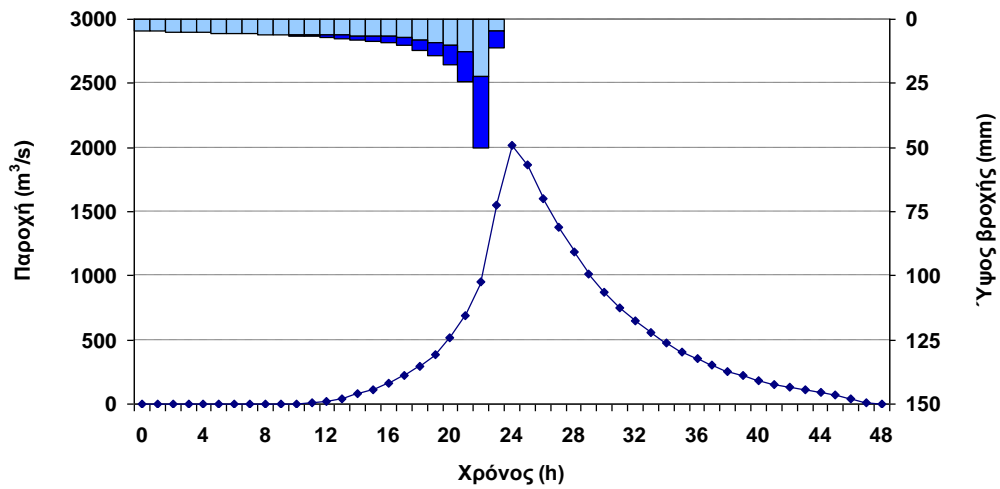
Μέθοδος κατάρτισης υετογραφήματος σχεδιασμού: δυσμενέστερη διάταξη

Παράμετρος χρόνου ανόδου ΣΜΥ: $\gamma = 15$

Αρχικές συνθήκες υγρασίας: τύπου II (μέσες)



Εικόνα Π.35: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.



Εικόνα Π.36: Υετογράφημα (ολικό και ενεργό) και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.

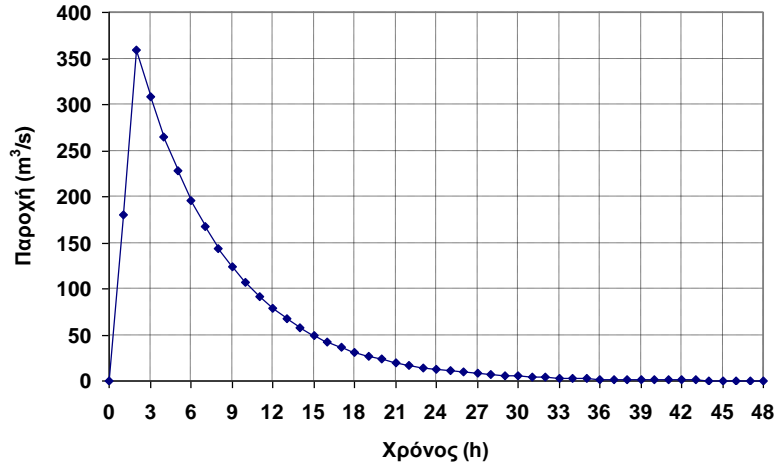
Σενάριο T10000_AB_15_II

Περίοδος επαναφοράς: 10 000 έτη

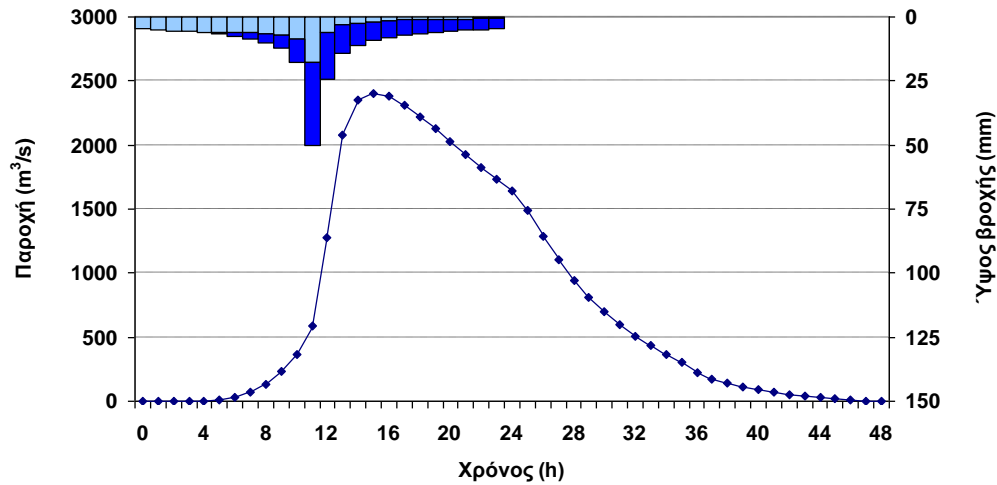
Μέθοδος κατάρτισης υετογραφήματος σχεδιασμού: εναλλασσόμενα μπλοκ

Παράμετρος χρόνου ανόδου ΣΜΥ: $\gamma = 15$

Αρχικές συνθήκες υγρασίας: τύπου II (μέσες)



Εικόνα Π.37: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.



Εικόνα Π.38: Υετογράφημα (ολικό και ενεργό) και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.

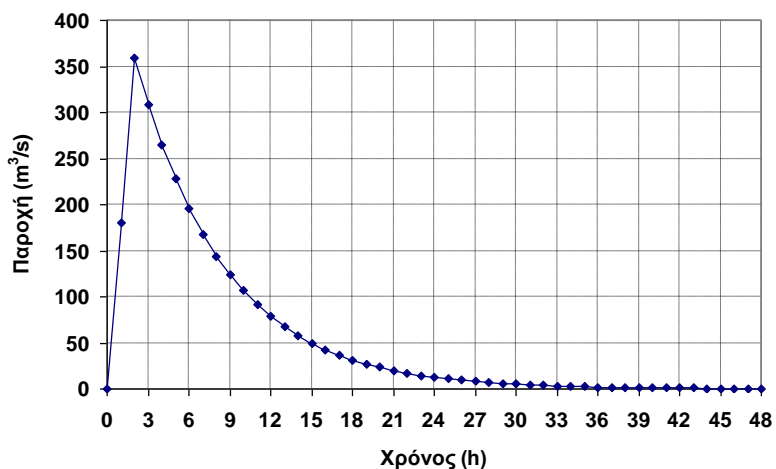
Σενάριο T10000_WP_15_II

Περίοδος επαναφοράς: 10 000 έτη

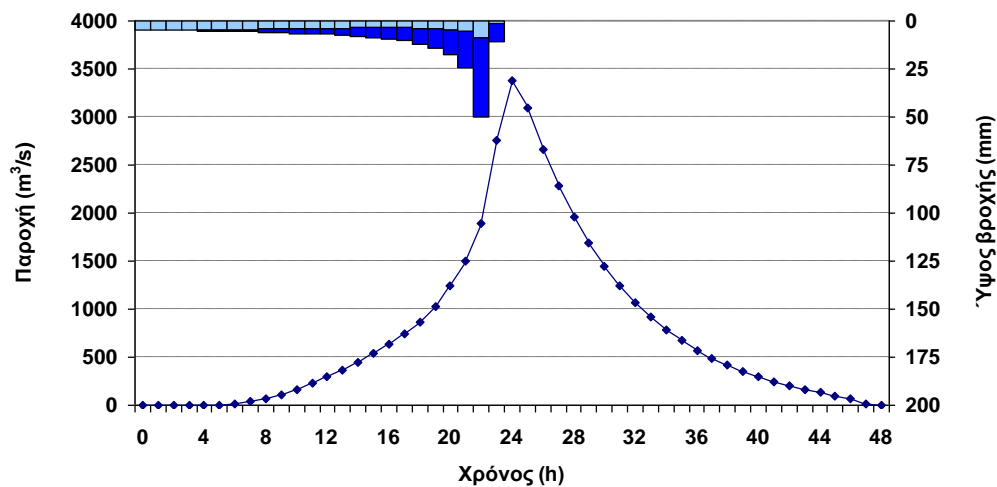
Μέθοδος κατάρτισης υετογραφήματος σχεδιασμού: δυσμενέστερη διάταξη

Παράμετρος χρόνου ανόδου ΣΜΥ: $\gamma = 15$

Αρχικές συνθήκες υγρασίας: τύπου I (ξηρές)



Εικόνα Π.39: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.



Εικόνα Π.40: Υετογράφημα (ολικό και ενεργό) και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.

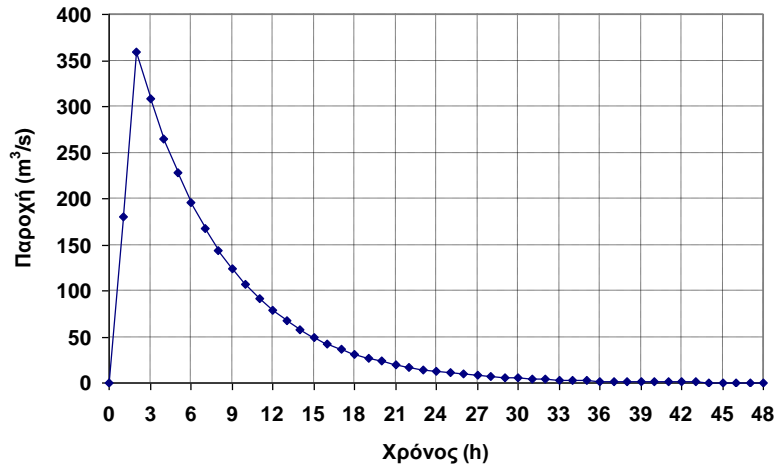
Σενάριο T10000_AB_15_III

Περίοδος επαναφοράς: 10 000 έτη

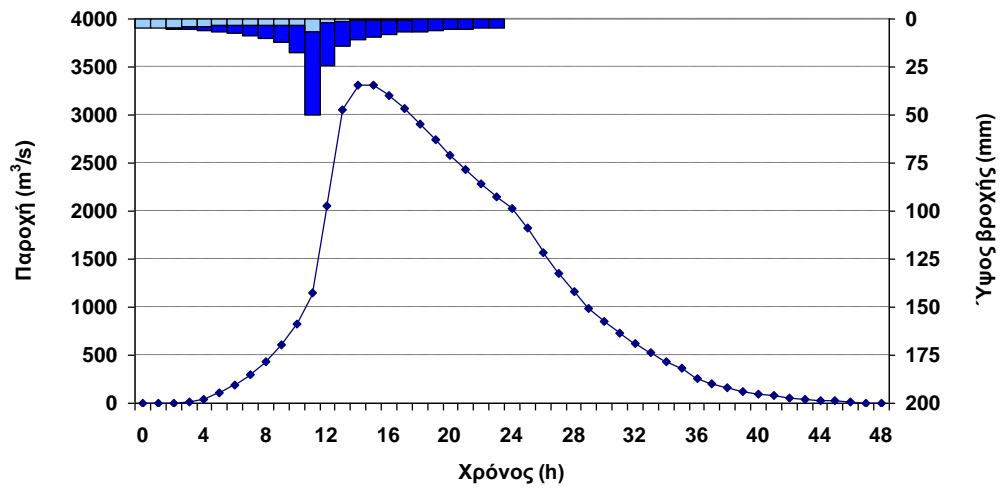
Μέθοδος κατάρτισης υετογραφήματος σχεδιασμού: εναλλασσόμενα μπλοκ

Παράμετρος χρόνου ανόδου ΣΜΥ: $\gamma = 15$

Αρχικές συνθήκες υγρασίας: τύπου III (υγρές)



Εικόνα Π.41: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.



Εικόνα Π.42: Υετογράφημα (ολικό και ενεργό) και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.

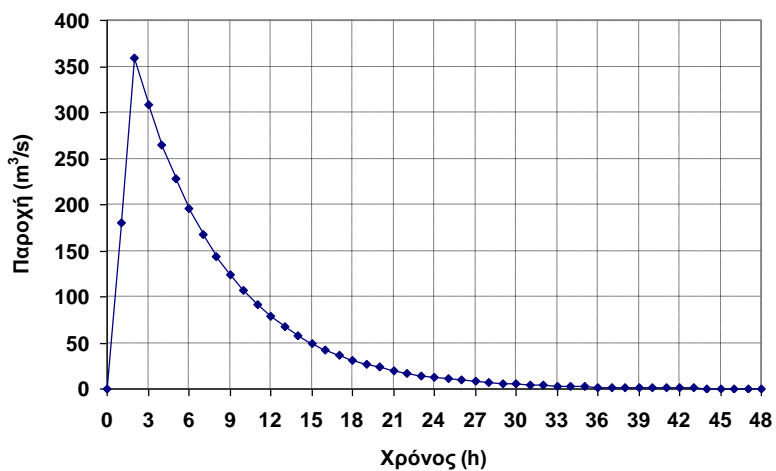
Σενάριο T10000_WP_15_III

Περίοδος επαναφοράς: 10 000 έτη

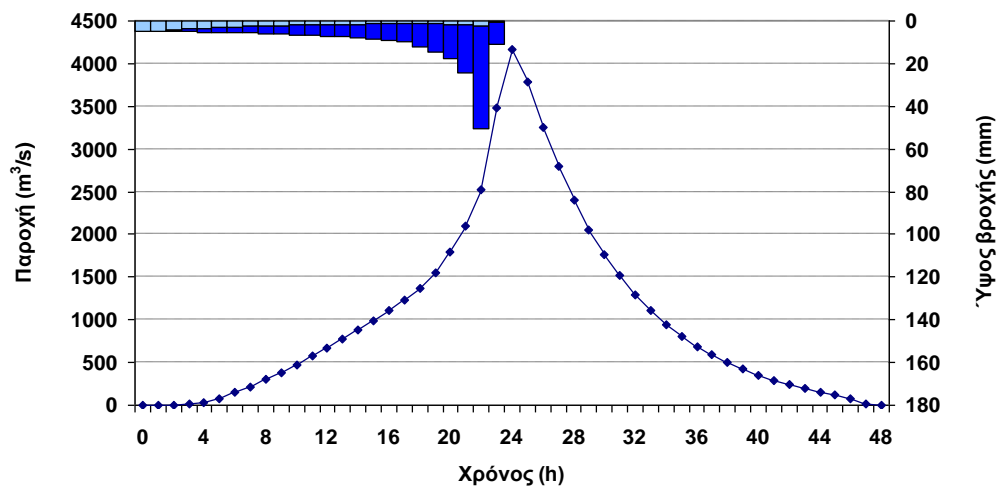
Μέθοδος κατάρτισης υετογραφήματος σχεδιασμού: δυσμενέστερη διάταξη

Παράμετρος χρόνου ανόδου ΣΜΥ: $\gamma = 15$

Αρχικές συνθήκες υγρασίας: τύπου III (υγρές)



Εικόνα Π.43: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.



Εικόνα Π.44: Υετογράφημα (ολικό και ενεργό) και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.