



ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΡΑΚΗΣ

Πολυτεχνική Σχολή
Τομέας Υδραυλικών Έργων
Εργαστήριο Υδρολογίας και Υδραυλικών Έργων

Τεχνική Υδρολογία



Κεφάλαιο 5^ο : Απορροή

ΦΩΤΙΟΣ Π. ΜΑΡΗΣ

Αναπλ. Καθηγητής

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Από το νερό που φθάνει στην επιφάνεια της γης ως κατακρήμνισμα, ένα μέρος του συγκρατείται από το φύλλωμα των φυτών που καλύπτει το έδαφος. Η ποσότητα του νερού που συγκρατείται με τον τρόπο αυτό, δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από το είδος και το ποσοστό της φυτοκάλυψης και τα χαρακτηριστικά του κατακρημνίσματος.

Ένα άλλο μέρος του νερού συγκρατείται από τις εδαφικές κοιλότητες, ποσότητα του οποίου επιστρέφει πάλι πίσω στην ατμόσφαιρα με τη διαδικασία της εξάτμισης και της διαπνοής. Το υπόλοιπο κινείται στην επιφάνεια του εδάφους ή διηθείται μέσα σ' αυτό. Από το διηθούμενο νερό ένα μέρος κινείται πλευρικά, αμέσως κάτω απ' την επιφάνεια του εδάφους, και ξαναεμφανίζεται στην επιφάνεια του εδάφους ή τις κοίτες των ρευμάτων.

Το υπόλοιπο πηγαίνει σε βαθύτερα στρώματα κι εμπλουτίζει τους υπόγειους υδροφορείς από τους οποίους, πάλι κινούμενο πλευρικά, μπορεί να φθάσει στην κοίτη κάποιου ρεύματος ή ακόμα και να φύγει έξω απ' τα όρια της υδρολογικής λεκάνης.

Το νερό που κινείται πάνω και κάτω από την επιφάνεια του εδάφους με κάποιον απ' τους παραπάνω τρόπους αποτελεί την απορροή. Ειδικότερα το μέρος εκείνο του νερού που κινείται πάνω στην επιφάνεια του εδάφους αποτελεί την **επιφανειακή απορροή**, η οποία μαζί με την απορροή που κινείται αμέσως κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, αποτελούν την **άμεση απορροή**. Το νερό που κινείται υπογείως και συμβάλλει στις κοίτες των ρευμάτων, αποτελεί τη **βασική απορροή**.

5.2 Η ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Το σύνολο των σημείων της επιφάνειας που τροφοδοτεί με νερό απορροής ένα ρεύμα αποτελεί τη λεκάνη απορροής του ρεύματος αυτού.

Στη φύση, τα όρια της περιοχής που συνεισφέρει υπόγειο νερό σ' ένα ρεύμα μπορεί να μην ταυτίζονται με αυτά της περιοχής που συνεισφέρει επιφανειακή απορροή.

Στην περίπτωση μικρών λεκανών είναι δυνατό υπόγειο νερό να μετακινηθεί από μια λεκάνη στη γειτονική της ή και πολύ μακρύτερα. Αυτό προκαλεί ορισμένες ασάφειες κατά τον καθορισμό των ορίων των λεκανών. **Για να ξεπεραστούν οι ασάφειες αυτές έχει επικρατήσει να ορίζεται ως υδρολογική λεκάνη η έκταση που συνεισφέρει νερό άμεσης απορροής σ' ένα ρεύμα.**

Το όριο που χωρίζει μια υδρολογική λεκάνη απ' τις γειτονικές της λέγεται **υδροκρίτης**. Ο υδροκρίτης ακολουθεί την κορυφογραμμή γύρω απ' τη λεκάνη και διασταυρώνει το ρεύμα μόνο στο σημείο εξόδου του.

Συχνά, είναι αναγκαίο για πρακτικούς λόγους να χωριστεί μια μεγάλη λεκάνη σε μικρότερες. Οι μικρότερες αυτές λεκάνες λέγονται **υπολεκάνες** και ορίζονται από εσωτερικούς υδροκρίτες (Bedient and Huber, 1992).

Στο Σχήμα 5.1, φαίνεται ο τρόπος χάραξης του υδρογραφικού δικτύου πάνω σε ένα τοπογραφικό χάρτη.



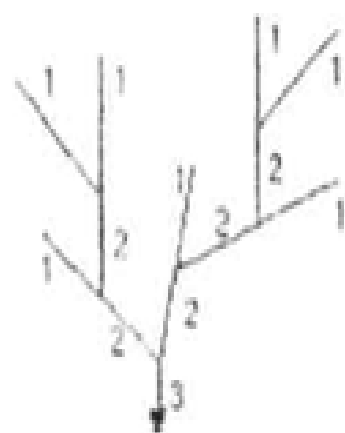
Σχήμα 5.1 Τρόπος χάραξης του υδρογραφικού δικτύου σε τοπογραφικό χάρτη.

Οι υδρολογικές λεκάνες έχουν ορισμένα χαρακτηριστικά που διαμορφώνουν σε μεγάλο βαθμό την υδρολογική συμπεριφορά τους.

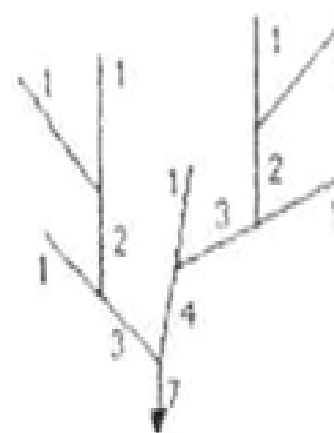
Τα χαρακτηριστικά αυτά σε γενικές γραμμές είναι:

1. **Η επιφάνεια απορροής της λεκάνης.** Αυτή είναι η οριζόντια προβολή της περιοχής που περικλείεται από τον υδροκρίτη και προσδιορίζεται με εμβαδομέτρηση από τοπογραφικούς χάρτες, εκφράζεται δε συνήθως σε τετραγωνικά χιλιόμετρα.
2. **Η τάξη των ρευμάτων.** Η τάξη των ρευμάτων είναι ένα χαρακτηριστικό που αντανακλά το βαθμό διακλαδώσεως αυτών μέσα στη λεκάνη. Ο Horton (1945) χαρακτηρίζει σαν ρεύματα 1^{ης} τάξεως αυτά που είναι μικρά και δεν έχουν καμία διακλάδωση, σαν 2^{ης} τάξεως αυτά που έχουν κλάδους 1^{ης} τάξεως, σαν 3^{ης} τάξεως αυτά που έχουν κλάδους 2^{ης} τάξεως κ.ο.κ. Έτσι, η τάξη του κύριου ρεύματος δείχνει την έκταση των διακλαδώσεων των ρευμάτων μέσα σε μια υδρολογική λεκάνη.

Άλλες γνωστές κατατάξεις ρευμάτων είναι κατά Shreve και κατά Strahler. Η κατάταξη κατά Strahler είναι παρόμοια με τη Horton, ενώ στην κατάταξη κατά Shreve τα ρεύματα κάθε φορά αθροίζονται φθάνοντας το τελικό κυρίως ρεύμα να έχει μεγάλο αριθμό τάξης. Στο Σχήμα 5.2 φαίνεται η κατάταξη των ρευμάτων κατά Shreve και κατά Strahler.



(α)



(β)

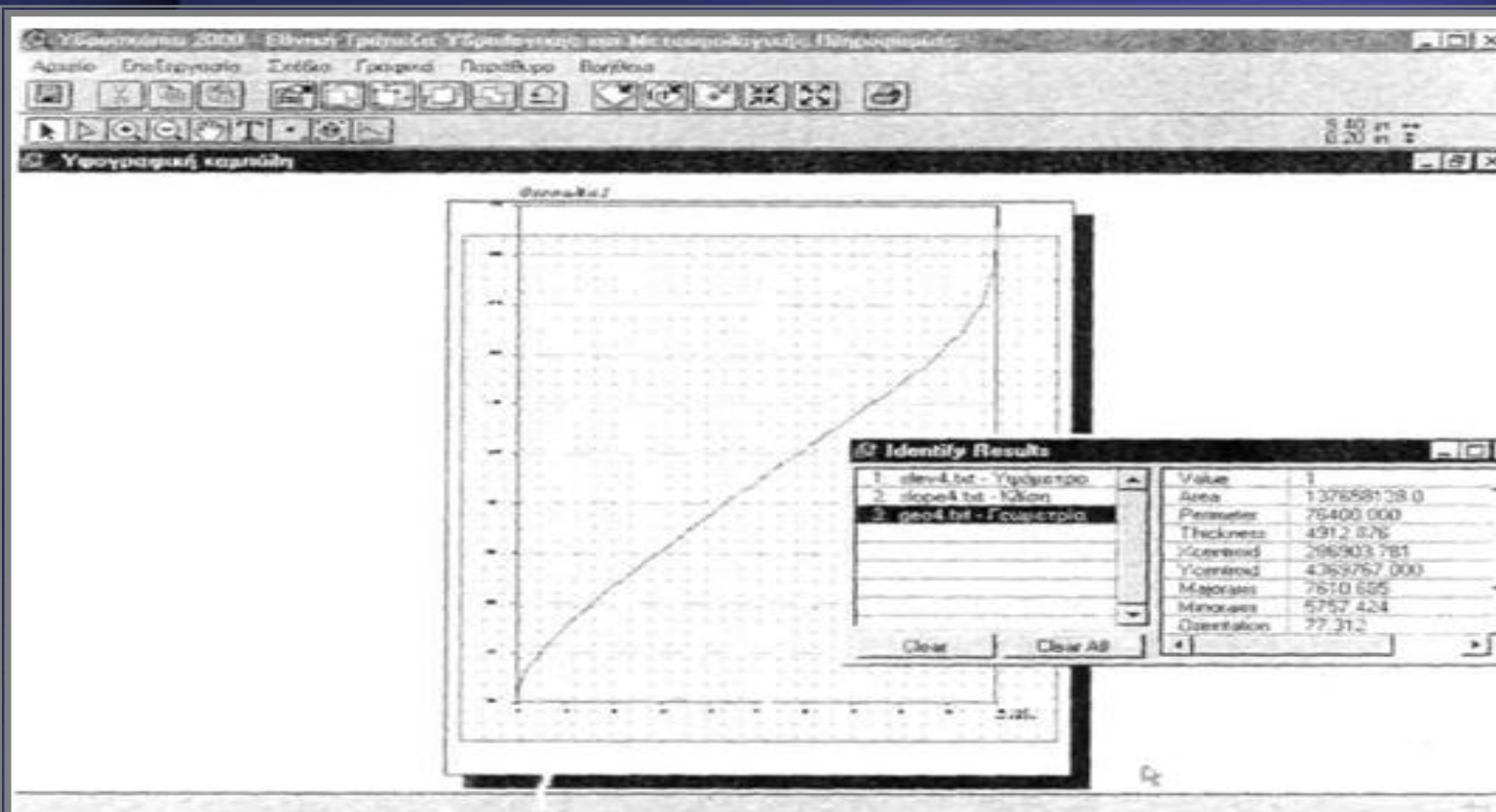
Σχήμα 5.2 Βαθμονόμηση υδατορευμάτων κατά (α) Horton και Strahler και (β) Shreve.

3. **Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου.** Αυτή είναι μια παράμετρος της υδρολογικής λεκάνης, που προκύπτει εάν διαιρέσουμε το συνολικό μήκος των ρευμάτων με την έκταση, βρίσκεται δηλαδή με μια σχέση της μορφής:

$$D_d = \frac{\sum L}{A_d}$$

όπου συνήθως το L εκφράζεται σε χιλιόμετρα και το A_d σε τετραγωνικά χιλιόμετρα. Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου δείχνει το μήκος που πρέπει να διανύσει το νερό στην επιφάνεια του εδάφους μέχρι να φτάσει σε κάποιο ρεύμα. Γενικά, μια υδρολογική λεκάνη θεωρείται ότι έχει μικρό συντελεστή υδρογραφικού δικτύου, που είναι ανάλογος της αποστράγγισης της λεκάνης, αν $D_d \leq 0.5$, ενώ θεωρείται ότι έχει υψηλό συντελεστή υδρογραφικού δικτύου δηλαδή πολύ καλή αποστράγγιση αν $D_d \geq 3$.

4. **Η υψογραφική καμπύλη.** Υψογραφική καμπύλη είναι η κατανομή επιφάνειας-υψομέτρου μιας λεκάνης. Αφορά στη σχέση που υπάρχει ανάμεσα σε κάποιο υψόμετρο και το ποσοστό της επιφάνειας της λεκάνης που έχει υψόμετρο πάνω ή κάτω απ' αυτό, δίνεται δε συνήθως με τη μορφή διαγραμμάτων με χρήση μεθόδων των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3 (Heywood and Carver, 1998). Τα διαγράμματα αυτά είναι χρήσιμα γιατί δίνουν μια εικόνα της μέσης κλίσεως του εδάφους της λεκάνης και μπορεί να αποτελέσουν τη βάση για σύγκριση ανάμεσα σε υδρολογικές λεκάνες. Επίσης η υψογραφική καμπύλη αποτελεί σημαντικό οδηγό στο σχεδιασμό και εγκατάσταση του δικτύου υδρομετεωρολογικών σταθμών.



Σχήμα 5.3 Υψογραφική καμπύλη με χρήση μεθόδων GIS (Πηγή: ΕΤΥΜΠ).

Ο υπολογισμός του μέσου υψομέτρου της λεκάνης γίνεται με βάση την υπογραφική καμπύλη χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$Z_s = \sum_r \frac{Z_r + Z_{r+1}}{2} \Delta L_r$$

όπου το πεδίο μεταβολής της υψομετρικής καμπύλης έχει υποδιαιρεθεί σε υποδιαστήματα μήκους ΔL_r και οι τιμές του Z που αντιστοιχούν στα άκρα του υποδιαστήματος ΔL_r είναι Z_r και Z_{r+1} .

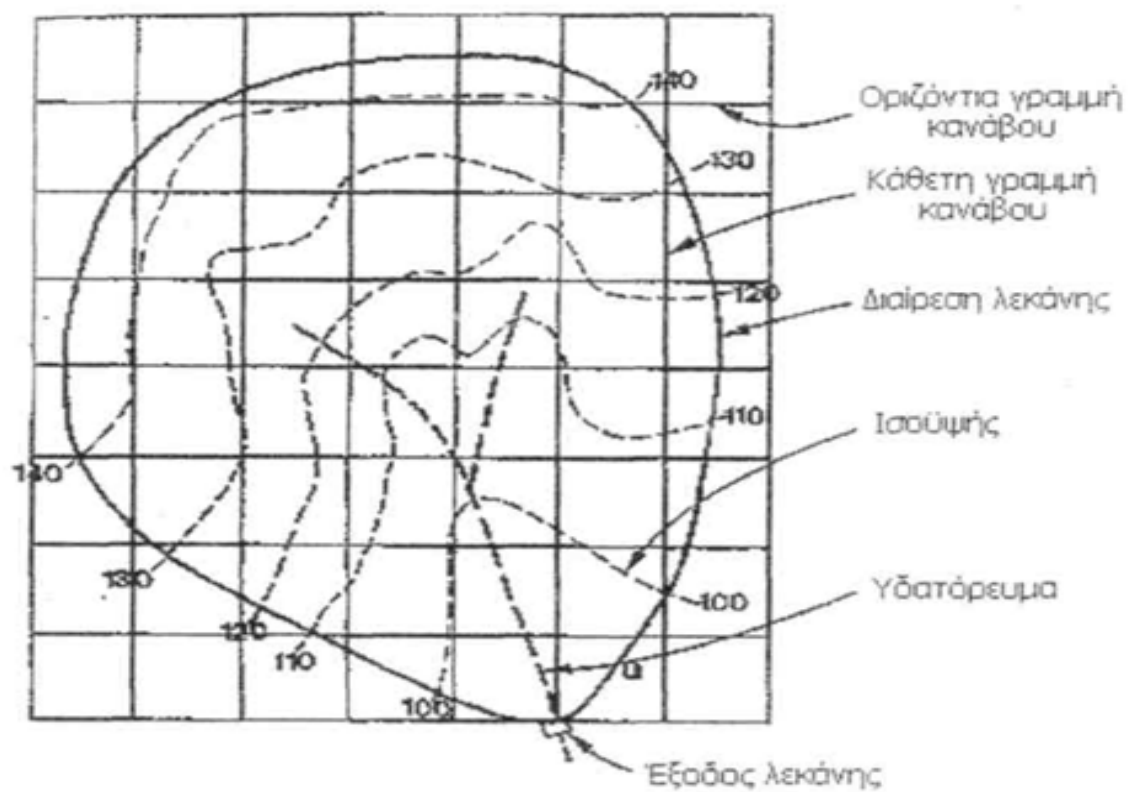
5. Η μηκοτομή του ρεύματος. Μηκοτομή του ρεύματος είναι η κατά μήκος τομή του κύριως ρεύματος της υδρολογικής λεκάνης. Με αυτή ως βάση, η κλίση του κύριου ρεύματος μπορεί να ορισθεί με διάφορους τρόπους.

Ένας απ' αυτούς είναι να διαιρεθεί η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στο χαμηλότερο και υψηλότερο σημείο του ρεύματος με το ολικό μήκος του. Η κλίση αυτή κατά κανόνα δεν είναι πολύ αντιπροσωπευτική. Πιο ρεαλιστική είναι η κλίση που προκύπτει όταν, με βάση την κατά μήκος τομή, το ρεύμα χωρισθεί σε περισσότερα από ένα τμήματα με ομοιόμορφη κλίση.

6. **Μέση κλίση της υδρολογικής λεκάνης.** Η παράμετρος αυτή βρίσκεται με μια διαδικασία που αρχίζει με την κατασκευή ενός καννάβου πάνω στην υδρολογική λεκάνη. Στη συνέχεια βρίσκεται ο αριθμός των ισοϋψών καμπυλών που τέμνει κάθε γραμμή του καννάβου προς μια κατεύθυνση και ο αριθμός που βρίσκεται διαιρείται με το συνολικό μήκος των γραμμών προς την κατεύθυνση αυτή (Σχήμα 5.4).

Αν h είναι η ισοδιάσταση των ισοϋψών, N είναι ο αριθμός των διασταυρώσεων των ισοϋψών με τις γραμμές του κάνναβου προς τη μια κατεύθυνση και L είναι το μήκος όλων των γραμμών προς την κατεύθυνση αυτή, η κλίση S δίνεται από τη σχέση:

$$S = \frac{hN}{L}$$



Σχήμα 5.4 Κάναβος πάνω στη λεκάνη απορροής για τον προσδιορισμό της κλίσης της λεκάνης.

7. Η επιφάνεια των ρευμάτων της υδρολογικής λεκάνης. Είναι φανερό ότι ένας τέτοιος υπολογισμός είναι πολύ δύσκολος και γι' αυτό είναι απαραίτητες ορισμένες απλοποιήσεις. Αν κάνουμε την παραδοχή ότι το πλάτος του κύριου ρεύματος στην έξοδο της λεκάνης ή το πλάτος ενός οποιουδήποτε ρεύματος στο σημείο της συμβολής του με ρεύμα ανώτερης τάξεως είναι b και το πλάτος στην αρχή των ρευμάτων είναι πρακτικά μηδέν, τότε η υγρή επιφάνεια A_w κάθε ρεύματος μπορεί να εκτιμηθεί με μια σχέση της μορφής:

$$A_w = \frac{bL}{2}$$

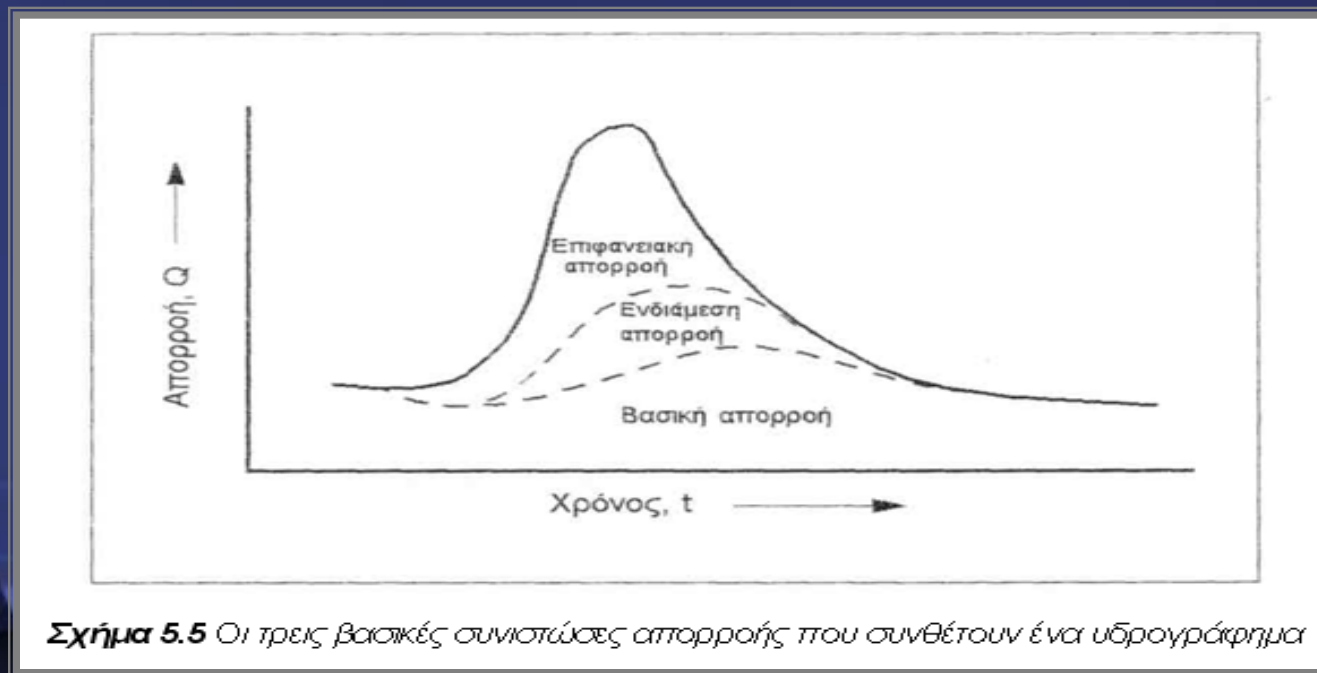
όπου L είναι το μήκος του ρεύματος. Έχει παρατηρηθεί ότι στην πλειονότητα των υδρολογικών λεκανών, η συνολική επιφάνεια των ρευμάτων δεν ξεπερνά σε ποσοστό το 5% της εκτάσεως τους.

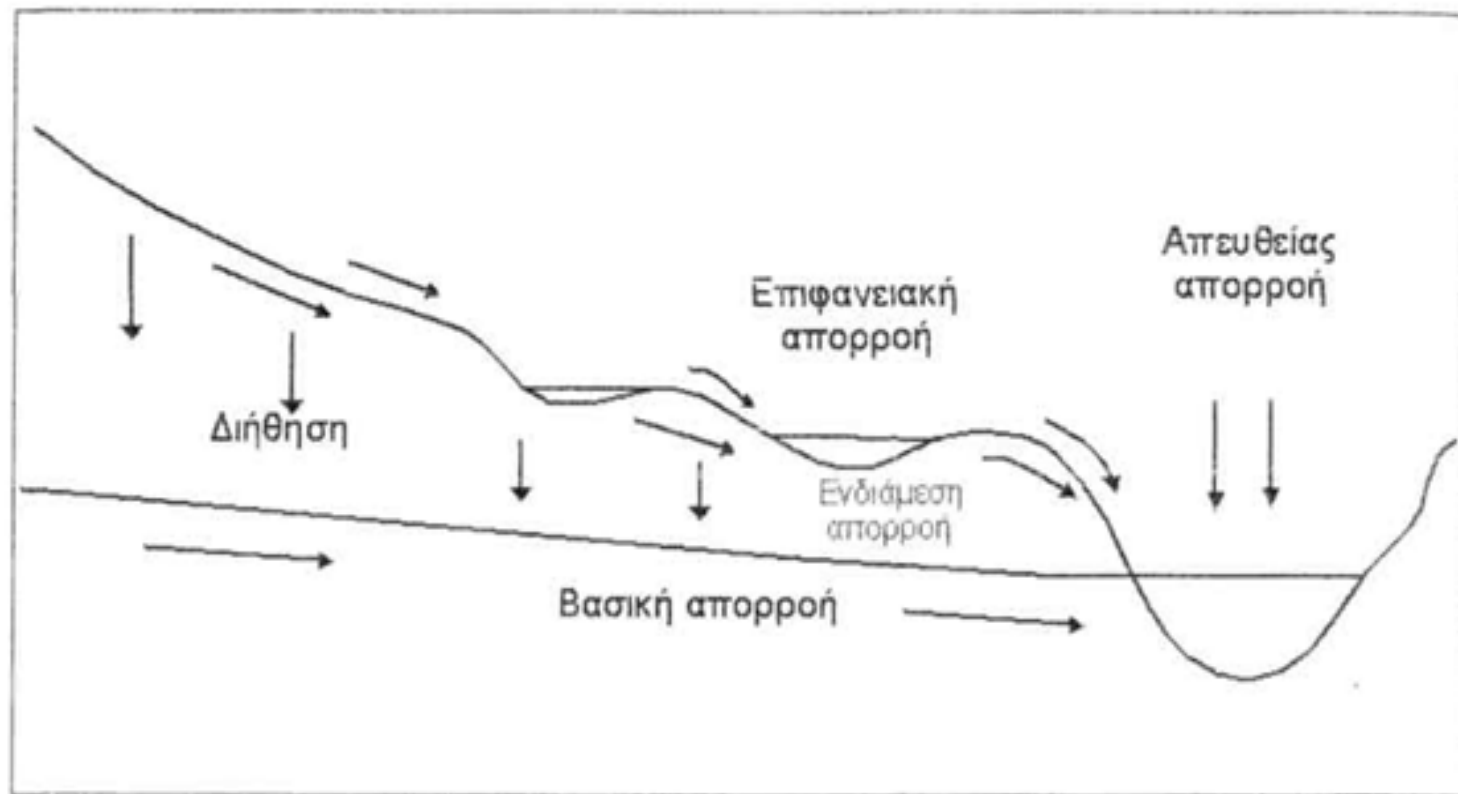
5.3 ΤΑ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ

Ως **παροχή υδατορεύματος** σε μία συγκεκριμένη θέση, ορίζεται η μεταβολή της ποσότητας του νερού στη μονάδα του χρόνου και μετριέται σε m^3/sec . Η μεταβολή της παροχής ενός ρεύματος (που είναι προϊόν της απορροής της υδρολογικής λεκάνης του) σε σχέση με το χρόνο αποτελεί το **υδρογράφημα**.

Οι βασικές συνιστώσες (μέρη) ενός υδρογραφήματος είναι η **επιφανειακή απορροή**, η **ενδιάμεση απορροή** και η **βασική απορροή**. Στο Σχήμα 5.5 φαίνονται οι τρεις βασικές συνιστώσες που συνθέτουν ένα τυπικό υδρογράφημα. Η συνιστώσα της επιφανειακής απορροής περιλαμβάνει το νερό που ρέει πάνω στην επιφάνεια του εδάφους, Η συνιστώσα της ενδιάμεσης απορροής περιλαμβάνει το νερό που κινείται πλευρικά κάτω από την επιφάνεια του εδάφους στην ακόρεστη ζώνη και εκδηλώνεται μετά κάποια απόσταση πάλι στην επιφάνεια ή απευθείας στην κοίτη του ρεύματος.

Η συνιστώσα της βασικής απορροής περιλαμβάνει το νερό που προέρχεται από υπόγεια ροή απ' την κορεσμένη ζώνη. Η συνιστώσα της ενδιάμεσης απορροής και της επιφανειακής απαρτίζουν την άμεση απορροή. Το απλό σκαρίφημα που δίνεται στο Σχήμα 5.6 δείχνει τους παράγοντες που διαμορφώνουν την παροχή ενός ρεύματος.





Σχήμα 5.6 Σκαρίφημα που δείχνει τους παράγοντες που διαμορφώνουν την παροχή του ρεύματος

5.3.1 Τα χαρακτηριστικό του υδρογραφήματος

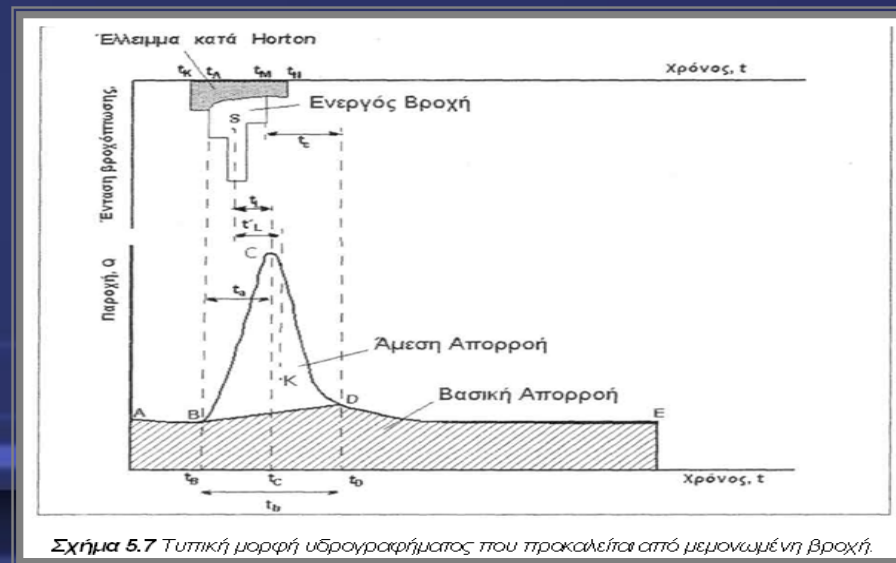
Το σχήμα ενός υδρογραφήματος, που προκαλείται από μια βροχή με σχετικά μικρή διάρκεια και καλύπτει όλη την υδρολογική λεκάνη, ακολουθεί κατά κανόνα ένα γενικό πρότυπο.

Το πρότυπο αυτό είναι κωδωνοειδούς σχήματος, εμφανίζει στην αρχή μια περίοδο ανόδου, που σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια της η παροχή του ρεύματος αυξάνει μέχρι τη μέγιστη τιμή της απορροής και κατόπιν ακολουθεί μια περίοδος που η παροχή συνέχεια μειώνεται και μπορεί να φθάσει και στο μηδέν, εξαρτώμενη από την ύπαρξη ή μη βασικής απορροής.

Σε μικρές υδρολογικές λεκάνες, που η συμβολή της απευθείας απορροής, της ενδιάμεσης απορροής και της βασικής απορροής στην παροχή του ρεύματος είναι κατά κανόνα περιορισμένες, το υδρογράφημα διαμορφώνεται ουσιαστικά απ' την επιφανειακή και μόνο απορροή.

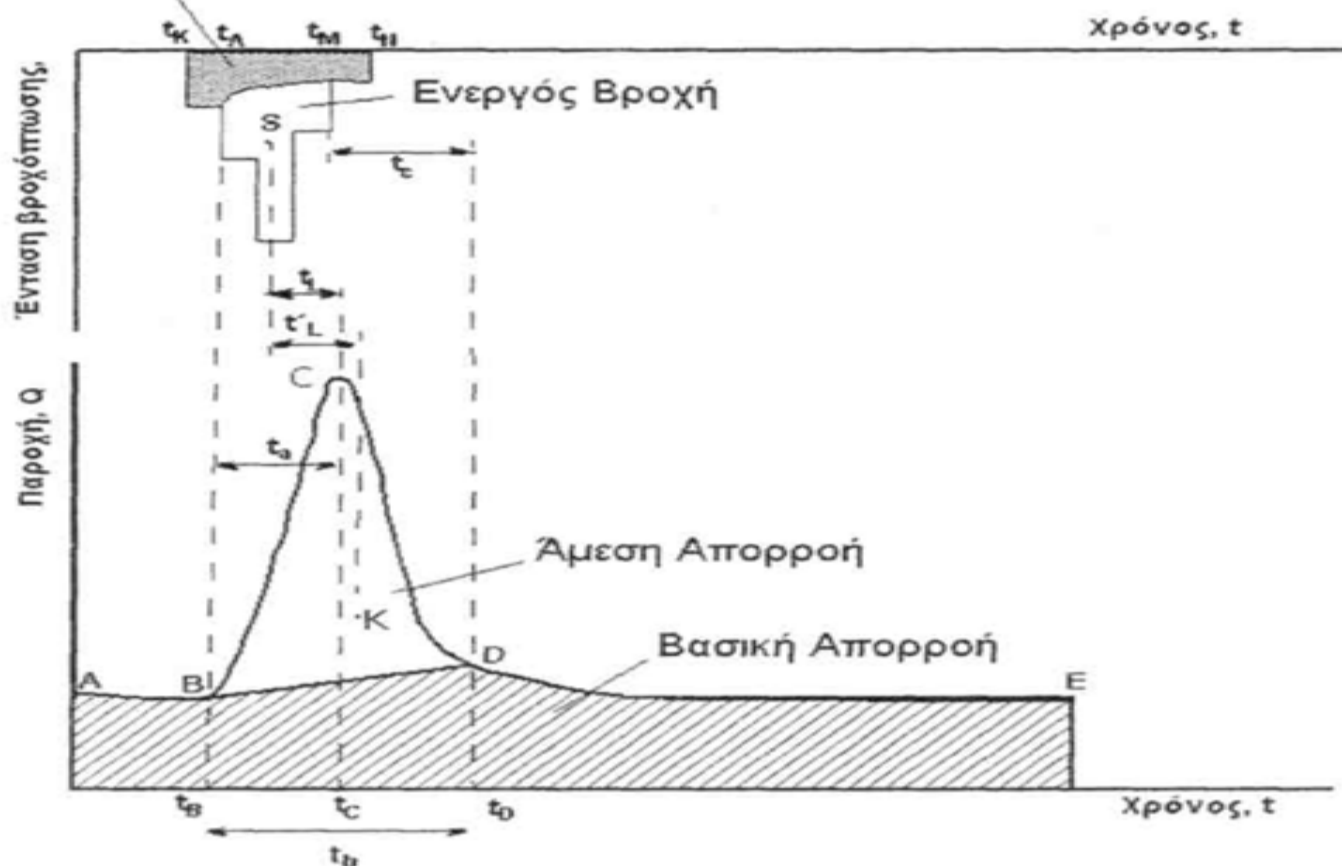
Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται ένα τυπικό υδρογράφημα (παροχής υδατορεύματος συναρτήσει του χρόνου) ενός πλημμυρικού επεισοδίου, μαζί με το βροχογράφημα της βροχής που προκάλεσε την πλημμύρα (ένταση βροχής συναρτήσει του χρόνου - έχει καθιερωθεί να σχεδιάζεται με ανεστραμμένη τη φορά των τεταγμένων, όπως ακριβώς φαίνεται στο σχήμα).

Το βροχογράφημα δείχνει ότι στο χρόνο t_K ξεκινά ένα επεισόδιο βροχής, και σύντομα, στο χρόνο t_A , μετά από ένα αρχικό έλλειμμα, ξεκινά η ενεργός βροχή, η οποία μετατρέπεται σε άμεση απορροή. Η βροχή λήγει στο χρόνο t_N . Η ενεργός βροχή μπορεί να λήγει και αυτή στον ίδιο χρόνο t_N ή σε προηγούμενο χρόνο t_M , αν η ένταση στο τέλος του επεισοδίου είναι αρκετά μικρή.



Σχήμα 5.7 Τυπική μορφή υδρογραφήματος που προκαλείται από μεμονωμένη βροχή.

Έλασμα κατά Horton



Σχήμα 5.7 Τυπική μορφή υδρογραφήματος που προκαλείται από μεμονωμένη βροχή.

Στο χρόνο $t_A = t_B$ που ξεκινά η ενεργός βροχόπτωση, η παροχή του υδατορεύματος αρχίζει να αυξάνεται με έντονο ρυθμό, μέχρι που η παροχή φτάνει στη μέγιστη τιμή της στο χρόνο t_c . Ο κλάδος BC του υδρογραφήματος ονομάζεται ανοδικός κλάδος, το σημείο C ονομάζεται αιχμή του υδρογραφήματος και η παροχή στο χρόνο t_c παροχή αιχμής.

Η καμπύλη ανόδου ενός υδρογραφήματος αρχίζει με την εμφάνιση της επιφανειακής απορροής και τελειώνει σε κάποιο σημείο όπου ο ρυθμός ανόδου του υδρογραφήματος μειώνεται δραστικά. Η μορφή της καμπύλης αυτής εξαρτάται απ' τα χαρακτηριστικά της λεκάνης, που διαμορφώνουν την αναλογία των χρόνων διαδρομής του νερού πάνω στην επιφάνεια του εδάφους και τα ρεύματα, καθώς και από τη διάρκεια, ένταση και ομοιομορφία της βροχής.

Το αρχικό της τμήμα είναι κοίλο γιατί στην αρχή μέρος μόνο της λεκάνης συνεισφέρει νερό κι ακόμη γιατί, στο στάδιο αυτό η διηθητικότητα, η συγκράτηση του νερού στις κοιλότητες του εδάφους, η εξάτμιση και η συγκράτηση νερού από τη φυτοκάλυψη είναι αναλογικά μεγαλύτερα απ' ότι στα επόμενα στάδια.

Η μέγιστη αιχμή, που προκαλείται από μια βροχή δεδομένης εντάσεως και διάρκειας, εμφανίζεται όταν όλα τα τμήματα της υδρολογικής λεκάνης συνεισφέρουν νερό, όταν δηλαδή το μέρος της λεκάνης που βρίσκεται κοντά στην έξοδο της εξακολουθεί να συνεισφέρει νερό όταν και το νερό από το πιο απομακρυσμένο σημείο της έχει φθάσει στην έξοδο. Για να γίνει αυτό, η διάρκεια της βροχής πρέπει να είναι ίση ή μεγαλύτερη απ' το χρόνο συγκεντρώσεως της λεκάνης.

Κατόπιν ακολουθεί η μείωση της παροχής που απεικονίζεται στον καθοδικό κλάδο CD . Στο χρόνο t_D παύει η άμεση απορροή, συνεχίζει όμως η βασική απορροή, σχηματίζοντας τον κλάδο DE .

Η καμπύλη καθόδου περιλαμβάνει το υπόλοιπο μέρος του υδρογραφήματος, αντιπροσωπεύει δε την αποχώρηση του νερού που έχει αποθηκευθεί στην επιφάνεια της λεκάνης μετά την ουσιαστική διακοπή της βροχής.

Το σχήμα της καμπύλης αυτής είναι ανεξάρτητο από τις διακυμάνσεις της εντάσεως της βροχής που προκάλεσε την απορροή και της διηθητικότητας του εδάφους, εξαρτάται δε σχεδόν αποκλειστικά από τα χαρακτηριστικά της κοίτης των ρευμάτων.

Η άμεση απορροή πραγματοποιείται μόνο στο χρονικό διάστημα (t_B, t_D) ενώ η βασική απορροή είναι διαρκής.

Η διάρκεια $t_b := t_D - t_B$ είναι γνωστή ως διάρκεια πλημμύρας ή χρόνος βάσης. Άλλες χαρακτηριστικές διάρκειες του υδρογραφήματος είναι ο χρόνος ανόδου, $t_a := t_c - t_B$ και ο χρόνος υστέρησης

(ακριβέστερα: χρόνος υστέρησης αιχμής) $t_L := t_c - t_s$ όπου t_s ο χρόνος που αντιστοιχεί στο κέντρο βάρους S του ενεργού βροχογραφήματος.

Αυστηρότερα, ο χρόνος υστέρησης ορίζεται ως η χρονική διαφορά ανάμεσα στα κέντρα βάρους του υδρογραφήματος άμεσης απορροής και του ενεργού βροχογραφήματος,

δηλαδή $t_L := t_K - t_s$, όπου t_K ο χρόνος που αντιστοιχεί στο κέντρο βάρους K του υδρογραφήματος άμεσης απορροής.

Για διάκριση ο χρόνος αναφέρεται και ως κεντροβαρικός χρόνος υστέρησης. Για λόγους ευκολίας, έχει επικρατήσει αντί του να χρησιμοποιείται το μέγεθος t_L το τελευταίο όμως δε μπορεί να θεωρηθεί ως χαρακτηριστικό της λεκάνης, αφού εξαρτάται και από τη μορφή του βροχογραφήματος.

Μια άλλη κατά προσέγγιση αναλλοίωτη διάρκεια, η οποία αποτελεί επίσης χαρακτηριστικό της λεκάνης, είναι ο χρόνος συγκέντρωσης ή χρόνος συρροής.

Ως χρόνος συγκέντρωσης ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το νερό που συμβάλλει στην άμεση απορροή, από το υδραυλικά πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης στη διατομή εξόδου.

Ο χρόνος συγκέντρωσης εμφανίζεται στο σχήμα ως η χρονική απόσταση από τη λήξη της ενεργού βροχής μέχρι τη λήξη της άμεσης απορροής, δηλαδή

$$t_C = t_D - t_M$$

Προκειμένου να εκτιμηθούν οι παραπάνω χαρακτηριστικοί χρόνοι είναι απαραίτητο να διαχωριστούν πάνω στο δεδομένο υδρογράφημα, οι δύο συνιστώσες της απορροής, δηλαδή η βασική απορροή και η άμεση απορροή. Για να γίνει αυτό χρειάζεται να προσδιοριστούν: (α) ο χρόνος έναρξης της άμεσης απορροής, δηλαδή το σημείο B (β) ο χρόνος λήξης της άμεσης απορροής, δηλαδή το σημείο O και (γ) ο τρόπος μεταβολής της βασικής απορροής στη διάρκεια του χρόνου.

Ο διαχωρισμός της ενεργού βροχόπτωσης και των απωλειών στο έδαφος στο δεδομένο συνολικό βροχογράφημα, έπεται του διαχωρισμού άμεσης και βασικής απορροής στο υδρογράφημα της πλημμύρας. Μετά το διαχωρισμό της άμεσης απορροής από τη βασική, ο όγκος της άμεσης απορροής μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$V_d = \int_{t_B}^{t_D} Q_d(t) dt$$

όπου $Q_d(t)$ η άμεση απορροή στο χρόνο t η οποία προκύπτει ως η διαφορά της συνολικής παροχής $Q(t)$ μείον την παροχή της βασικής απορροής $Q_b(t)$. Όπως προαναφέρθηκε, το υδρογράφημα άμεσης απορροής αποτελεί μετασχηματισμό του ενεργού βροχογραφήματος. Ο όγκος νερού του ενεργού βροχογραφήματος είναι:

$$V_e = \int_{t_\Lambda}^{t_M} i_e(t) dt S = h_e S$$

όπου $i_e(t)$ η ένταση της ενεργού βροχής, h_e το αθροιστικό ενεργό ύψος βροχής και S η έκταση της λεκάνης. Η διατήρηση όγκου σημαίνει ότι:

$$V_d = V_e$$

απ' όπου προκύπτει ότι:

$$h_e = \frac{V_d}{S}$$

Άρα αφού προσδιοριστεί το μέγεθος h_e μπορεί στη συνέχεια να καταρτιστεί το ενεργό βροχογράφημα.

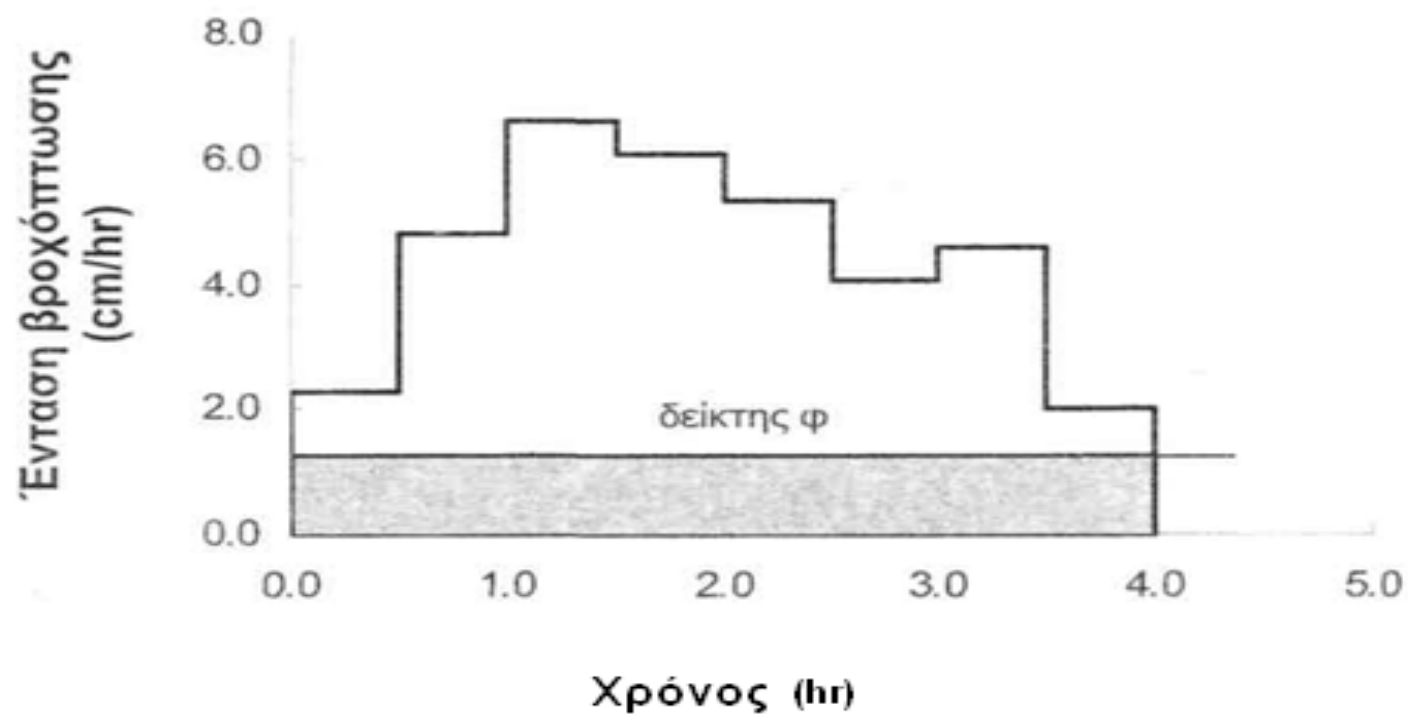
Δείκτης φ

Οι δείκτες διήθησης γενικά υποθέτουν ότι η διήθηση πραγματοποιείται με σταθερό ή μέσο ρυθμό κατά τη διάρκεια της καταιγίδας. Συνήθως αυτές οι μέθοδοι τείνουν να υποεκτιμούν τους αρχικούς ρυθμούς διήθησης και να υπερεκτιμούν τους τελικούς. Η καλύτερη εφαρμογή είναι σε μεγάλες καταιγίδες και υγρά εδάφη ή σε καταιγίδες όπου οι ρυθμοί διήθησης μπορούν να θεωρηθούν ως σχετικά ομοιόμορφοι.

Ο πιο γνωστός δείκτης, είναι ο δείκτης φ , σύμφωνα με τον οποίο ο συνολικός όγκος απωλειών κατά της διάρκεια της καταιγίδας, κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το δείγμα του επεισοδίου. Συνεπώς, ο όγκος της κατακρήμνισης πάνω από τη γραμμή του δείκτη είναι ίσος με την απορροή. Μια παραλλαγή του δείκτη φ , που αποκλείει την εδαφική αποθήκευση και κατακράτηση, είναι ο δείκτης W . Αρχικές ποσότητες συχνά αφαιρούνται από τα πρώτα στάδια της καταιγίδας, έτσι ώστε να αποκλειστεί αρχική κατακράτηση και διαβροχή.

Για τον προσδιορισμό του δείκτη φ για μια δεδομένη καταιγίδα, η ποσότητα της παρατηρημένης απορροής προσδιορίζεται από το υδρογράφημα και υπολογίζεται η διαφορά μεταξύ αυτής της ποσότητας και της συνολικά καταμετρημένης κατακρήμνισης. Ο όγκος των απωλειών (συμπεριλαμβανομένων των αποτελεσμάτων της παρεμπόδισης, κατακράτησης και διήθησης) κατανέμεται ομοιόμορφα κατά μήκος του προφίλ της καταιγίδας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.8.

Η χρήση του δείκτη φ για τον υπολογισμό του όγκου της άμεσης απορροής, από ένα δεδομένο προφίλ καταιγίδας, είναι στην ουσία η αντίστροφη διαδικασία. Δυστυχώς ο δείκτης φ που προσδιορίζεται από μια καταιγίδα δεν είναι γενικά εφαρμόσιμος σε άλλες καταιγίδες και αν δεν συσχετιστεί με τις παραμέτρους της λεκάνης απορροής, έχει μικρή αξία.



Σχήμα 5.8 Αναπαράσταση του δείκτη ϕ .

5.3.2 Διαχωρισμός του υδρογραφήματος

Κατά τη διαδικασία μιας υδρολογικής ανάλυσης, είναι πολλές φορές αναγκαίο να χωρισθεί ένα υδρογράφημα στα μέρη που το απαρτίζουν. Στην πράξη ένας τέτοιος διαχωρισμός παρουσιάζει πολλά προβλήματα γιατί είναι δύσκολο να εντοπισθούν και να διαχωριστούν με ακρίβεια οι ποσότητες νερού που προέρχονται από τις παραπάνω διαδικασίες, ιδιαίτερα η επιφανειακή απορροή από την ενδιάμεση απορροή. Για το διαχωρισμό του υδρογραφήματος έχουν επινοηθεί διάφορες μέθοδοι, που είναι όλες τους λίγο ή πολύ αυθαίρετες.

Μέθοδοι διαχωρισμού του υδρογραφήματος σε δυο μέρη

Με τους τρόπους αυτούς χωρίζεται το υδρογράφημα σε άμεση (πλημμυρική) και βασική απορροή, η δε διαδικασία διαχωρισμού στηρίζεται στην επισήμανση πάνω στην καμπύλη καθόδου του υδρογραφήματος του σημείου εκείνου που τελειώνει η άμεση απορροή. Η καμπύλη καθόδου μετά το σημείο αυτό διαμορφώνεται μόνο από τη βασική απορροή. Έτσι, σύμφωνα με τη συλλογιστική της μεθόδου, η καμπύλη καθόδου στο τμήμα αυτό είναι στην ουσία καμπύλη της βασικής απορροής.

Με αυτό σαν βάση, γίνεται η παραδοχή ότι η καμπύλη της βασικής απορροής έχει την ίδια κλίση και προς τα ανάντη, μέχρι ένα σημείο που βρίσκεται ακριβώς κάτω από την αιχμή του υδρογραφήματος. Έτσι, αν επεκταθεί η καμπύλη αυτή νοερά προς τα πίσω από το σημείο που τελειώνει η άμεση απορροή (σημείο *B*) μέχρι ένα σημείο κάτω από την αιχμή (σημείο *Γ*), η προέκταση αυτή (ευθεία *BΓ*) θα χωρίσει σε άμεση και βασική απορροή το μέρος του υδρογραφήματος από την αιχμή του και μετά.

Στη συνέχεια, το σημείο Γ ενώνεται με μια ευθεία με το σημείο που αρχίζει η άμεση απορροή στην αρχή του υδρογραφήματος (σημείο Α), οπότε ολοκληρώνεται ο διαχωρισμός. Η διαδικασία αυτή δίνεται σχηματικά στο Σχήμα 5.9 και αντιπροσωπεύεται από τη γραμμή ΑΓΒ.

Η δυσκολία στον τρόπο αυτό, όπως και στους δύο άλλους που ακολουθούν, βρίσκεται στον προσδιορισμό του σημείου που τελειώνει η άμεση απορροή, δηλαδή του σημείου Β. Ένας τρόπος προσδιορισμού γίνεται με βάση την εξέταση αρκετών υδρογραφημάτων της υδρολογικής λεκάνης, από την οποία μπορεί να εντοπισθεί το σημείο αυτό ως το σημείο αλλαγής της κλίσεως της καμπύλης καθόδου.

Ο εντοπισμός του σημείου B με τον τρόπο αυτό, στηρίζεται ουσιαστικά στη διαπίστωση ότι η χρονική βάση της άμεσης απορροής είναι περιορισμένη και το μέγεθος της βασικής απορροής δεν είναι συγκριτικά μεγάλο. Ο εντοπισμός μπορεί ακόμη να υποβοηθηθεί και από την εξέταση των τοπογραφικών και γεωλογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης. Πέρα από τον τρόπο αυτό, κατά καιρούς έχουν διατυπωθεί διάφορες εμπειρικές σχέσεις για τον εντοπισμό του σημείου B (Linsley et al., 1982). Μια από αυτές που δόθηκε από τους Linsley et al (1958) έχει την μορφή:

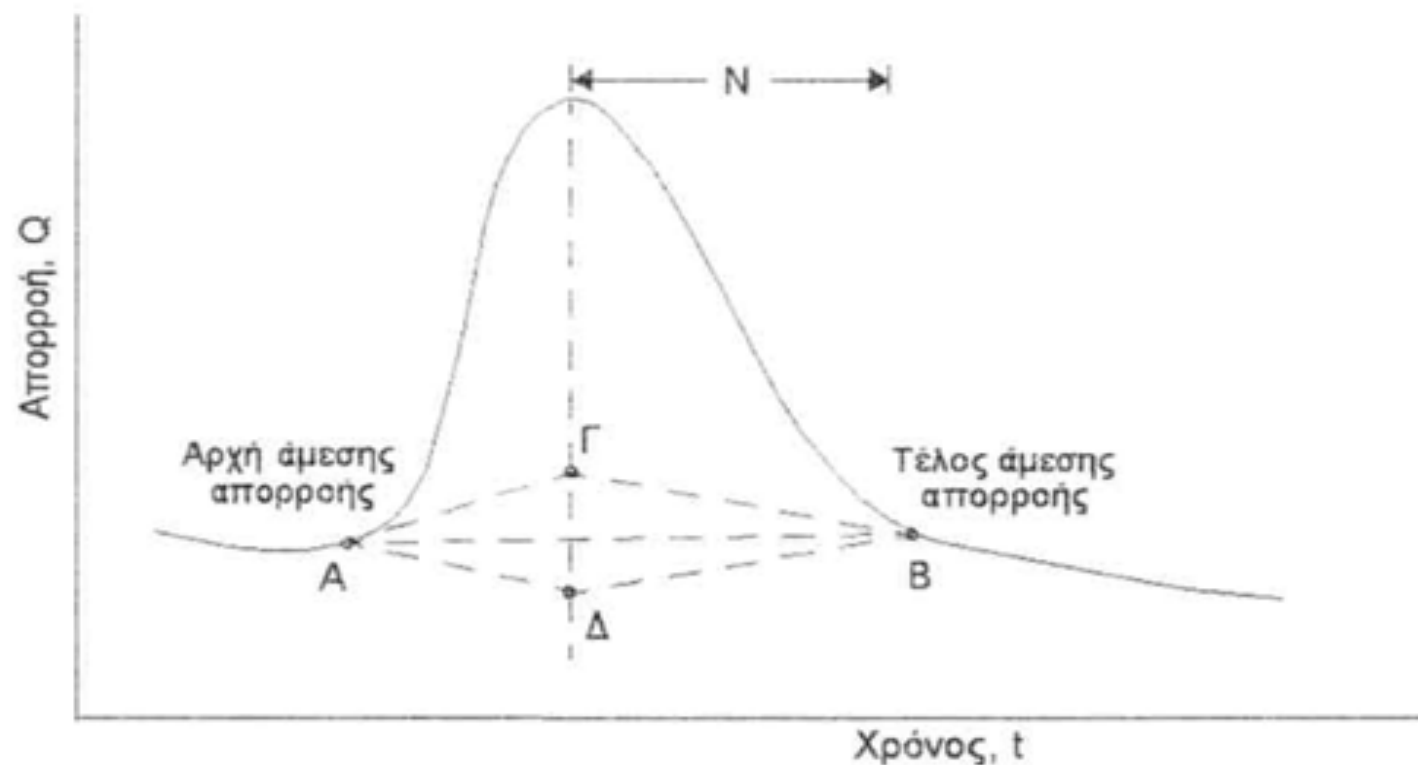
$$N = 0.8A^{0.2}$$

όπου N είναι ο αριθμός των ημερών μετά την αιχμή, που σταματά ή άμεση απορροή και A είναι η επιφάνεια της υδρολογικής λεκάνης σε km^2 .

Ένας άλλος τρόπος διαχωρισμού του υδρογραφήματος σε δύο μέρη, βασίζεται απλώς στην ένωση με μία ευθεία γραμμή των σημείων A και B , των σημείων δηλαδή που δηλώνουν την αρχή και το τέλος της άμεσης απορροής. Η διαδικασία αυτή αντιπροσωπεύεται στο Σχήμα 5.9 από την ευθεία AB .

Με τον τρίτο τρόπο διαχωρισμού επεκτείνεται η καμπύλη πριν από την έναρξη της απορροής από το σημείο A μέχρι ένα σημείο που βρίσκεται κάτω από την αιχμή (σημείο Δ) και μετά το σημείο αυτό ενώνεται με το σημείο B . Η διαδικασία αυτή αντιπροσωπεύεται στο Σχήμα 5.9 από τη γραμμή $A\Delta B$.

Τέλος, να σημειωθεί ότι και οι τρεις παραπάνω μέθοδοι είναι αυθαίρετες, χωρίς να μπορεί να διακριθεί αν κάποια πλεονεκτεί ή όχι. Εκείνο που πρέπει να διευκρινισθεί, είναι ότι κατά τη διάρκεια μιας υδρολογικής ανάλυσης, όλα τα υδρογραφήματα πρέπει να χωρίζονται με την ίδια μέθοδο, ανεξάρτητα από το ποια θα είναι αυτή, για να είναι στη συνέχεια δυνατή η σύγκρισή τους.



Σχήμα 5.9 Διαχωρισμός υδρογραφήματος σε άμεση και βασική απορροή με τρεις διαφορετικές γραφικές μεθόδους.

Διαχωρισμός υδρογραφήματος με τη μέθοδο Λογαρίθμων

Η καμπύλη καθόδου, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αντιπροσωπεύει την αποχώρηση του νερού που έχει αποθηκευθεί στην επιφάνεια της λεκάνης μετά την ουσιαστική διακοπή της βροχής.

Το σχήμα της καμπύλης αυτής είναι ανεξάρτητο από τις διακυμάνσεις της εντάσεως της βροχής που προκάλεσε την απορροή και της διηθητικότητας του εδάφους, εξαρτάται δε σχεδόν αποκλειστικά από τα χαρακτηριστικά της κοίτης των ρευμάτων.

Από πολύ νωρίς οι Horner και Flynt (1936) και Barnes (1939) βρήκαν ότι η καμπύλη καθόδου μπορεί να περιγραφεί από μια σχέση της μορφής (Παπαζαφειρίου, 1983):

$$Q_2 = Q_1 K^{-\Delta t}$$

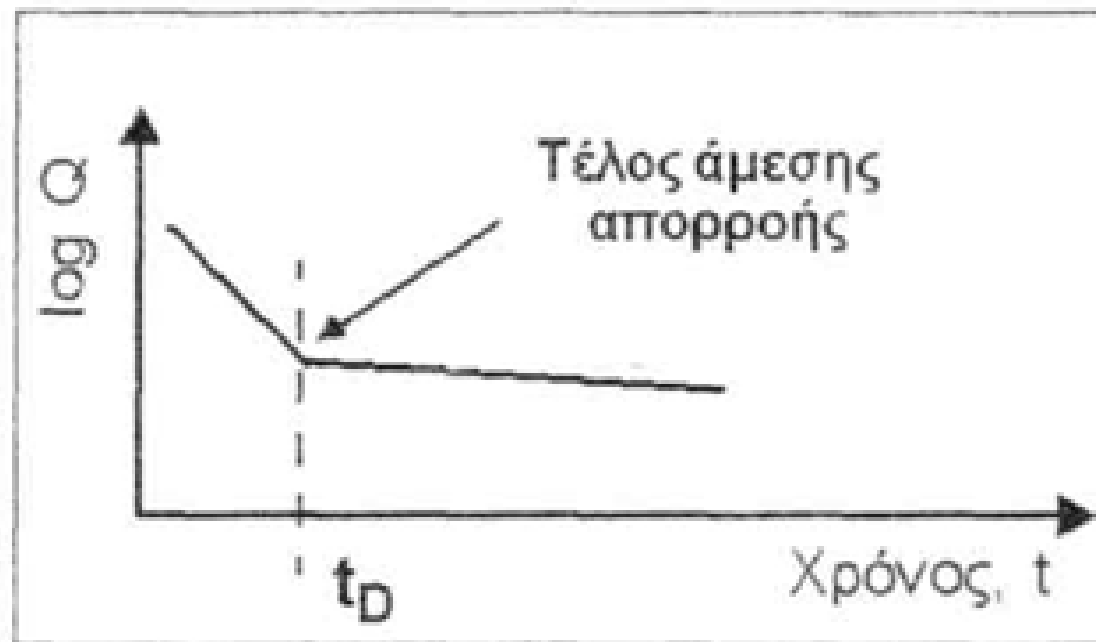
όπου Q_1 και Q_2 είναι αντίστοιχα οι παροχές σε χρόνους t_1 και t_2 , K είναι μία σταθερά και Δt είναι το διάστημα ανάμεσα στους χρόνους t_1 και t_2 . Η σχέση αυτή, αν σχεδιαστεί σε ημιλογαριθμικό χαρτί για σταθερό K , δίνει μια ευθεία γραμμή.

Παρατηρήθηκε όμως ότι η τιμή του K δεν είναι σταθερή για όλο το μήκος της καθόδου και η καμπύλη αυτή αν σχεδιαστεί σε ημιλογαριθμικό χαρτί, προκύπτει μια τεθλασμένη γραμμή με ένα διακεκριμένο σημείο αλλαγής της κλίσεως. Η αλλαγή αυτή της κλίσης, αποδίδεται στη διακοπή της συμβολής της άμεσης απορροής.

Να σημειωθεί ότι προσεγγίσεις τέτοιες επιχειρήθηκαν πολλές και σχεδόν όλες οδηγούν στο συμπέρασμα ότι μια και μόνη σχέση δεν είναι ικανή να περιγράψει ολόκληρη την καμπύλη.

Η διαδικασία που ακολουθείται για το διαχωρισμό με τον τρόπο αυτό είναι η ακόλουθη:

Αρχικά, η καμπύλη καθόδου από την αιχμή και κάτω, σχεδιάζεται σε ημιλογαριθμικό χαρτί όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.10. Κατόπιν ξεχωρίζονται δύο ευθύγραμμα τμήματα. Το σημείο αλλαγής αποτελεί το σημείο όπου παύει να συμβάλλει η άμεση απορροή. Συνεπώς το εμβαδόν που δημιουργείται από την αρχή του ανοδικού κλάδου, το σημείο αλλαγής (ευθεία γραμμή) και το σχήμα του υδρογραφήματος αποτελεί τον όγκο της άμεσης απορροής. Το υπολειπόμενο εμβαδόν αποτελεί τον όγκο της βασικής απορροής (βλέπε και Σχήμα 5.7).



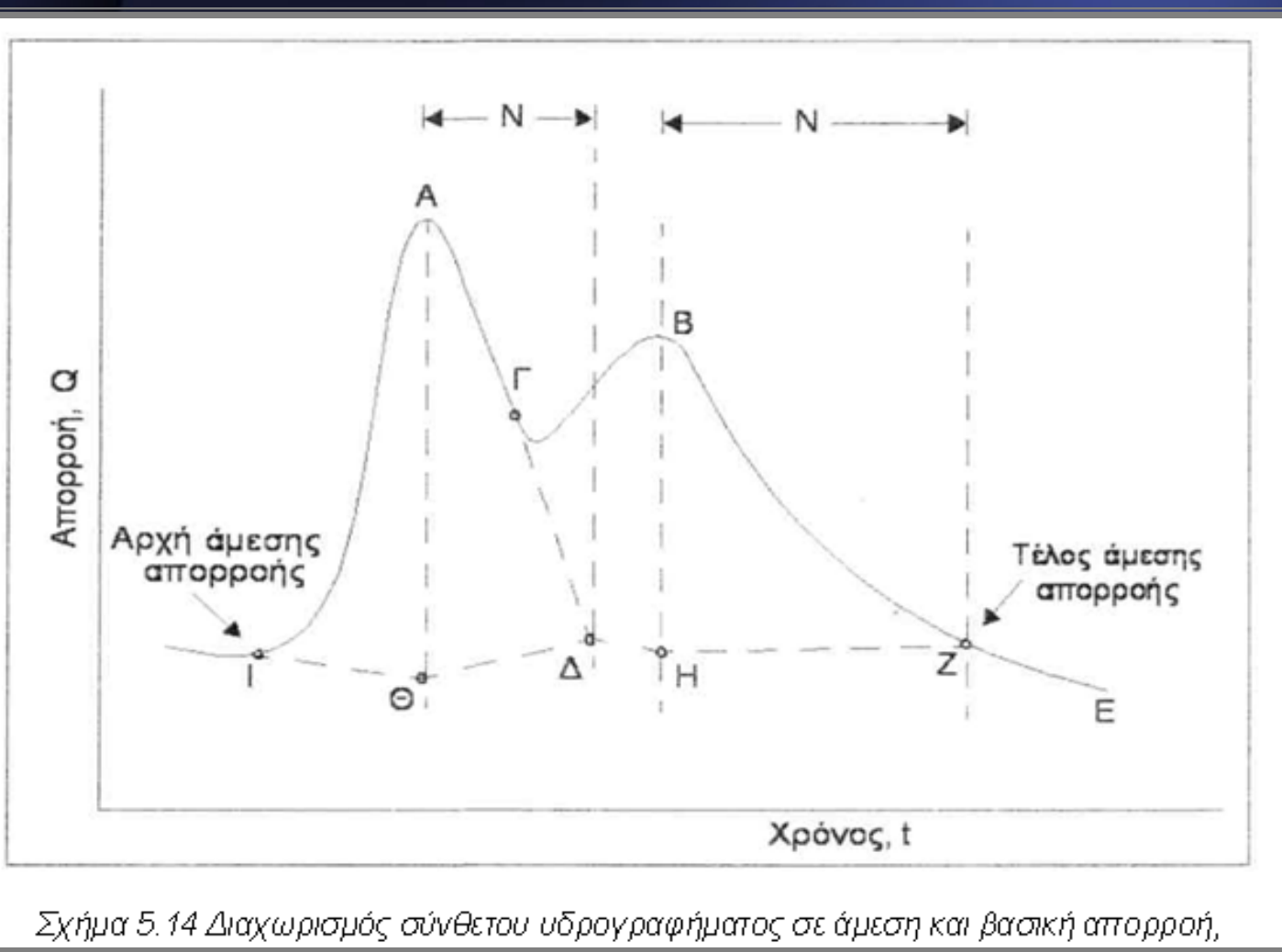
Σχήμα 5.10 Καμπύλη καθόδου υδρογραφήματος, σχεδιασμένη σε ημιλογαριθμικό χαρτί.

Ο τρόπος αυτός διαχωρισμού του υδρογραφήματος, αν και απόλυτα εμπειρικός, είναι πιο εδραιωμένος και συνεπής, πρέπει δε να προτιμάται απ' τις προαναφερθείσες μεθόδους διαχωρισμού σε δύο μέρη όταν απαιτείται λεπτομερέστερη ανάλυση. Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί ότι μερικές φορές η καμπύλη αυτή σχεδιασμένη με τον παραπάνω τρόπο δε δίνει μια και μόνη ευθεία, αλλά μια τεθλασμένη γραμμή με δύο συνήθως θλάσεις που αντιπροσωπεύουν την επιφανειακή, ενδιάμεση και βασική απορροή.

Διαχωρισμός σύνθετων υδρογραφημάτων.

Όσα αναφέρθηκαν παραπάνω αφορούν το διαχωρισμό υδρογραφημάτων που προκλήθηκαν από μεμονωμένες βροχές, υδρογραφήματα δηλαδή, που έχουν μια αιχμή και τις αντίστοιχες καμπύλες ανόδου και καθόδου.

Αν όμως, κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου πέσουν περισσότερες από μια βροχές, που χωρίζονται μεταξύ τους με μικρά άβροχα χρονικά διαστήματα, προκαλούνται σύνθετα υδρογραφήματα με δύο ή και περισσότερες αιχμές και ενδιάμεσες ατελείς καμπύλες ανόδου και καθόδου. Ένα τέτοιο υδρογράφημα που προκλήθηκε από δύο κοντινές μεταξύ τους βροχές φαίνεται στο Σχήμα 5.14.



Ο διαχωρισμός ενός σύνθετου υδρογραφήματος σε άμεση και βασική απορροή είναι πιο πολύπλοκος απ' ό,τι του απλού, το πρώτο δε που πρέπει να βρεθεί είναι ο χρόνος που διαρκεί η άμεση απορροή μετά την αιχμή.

Ο χρόνος αυτός μπορεί να εκτιμηθεί με έναν απ' τους τρόπους που αναφέρθηκαν ήδη, ανάμεσα στους οποίους είναι και η σχέση (5.9). Μια γενικευμένη διαδικασία διαχωρισμού τέτοιων υδρογραφημάτων δεν έχει νόημα, γιατί το καθένα είναι και ξεχωριστή περίπτωση. Αντ' αυτής, θα επεξηγήσουμε το χωρισμό του υδρογραφήματος του Σχήματος 5.14.

Μετά την εκτίμηση του χρόνου N απ' την αιχμή μέχρι την παύση της άμεσης απορροής, που γίνεται με τη σχέση (5.9), η καμπύλη καθόδου ΑΓ μετά την πρώτη αιχμή προεκτείνεται μέχρι το σημείο Δ που απέχει χρόνο N απ' την αιχμή Α. Με τον τρόπο αυτό, το σύνθετο υδρογράφημα αναλύθηκε σε δύο απλά που μπορούν να διαχωριστούν με κάποιον απ' τους τρόπους που αναφέρθηκαν, έχοντας υπόψη ότι θα υπάρξει μια επικάλυψη στο διάστημα ανάμεσα στις δύο αιχμές. Για το διάστημα αυτό, ο διαχωρισμός θα γίνει ανάλογα με την περίπτωση όπως καλύτερα ταιριάζει.

Στην περίπτωση του Σχήματος 5.14 που εξετάζουμε, ο διαχωρισμός των δύο απλών υδρογραφημάτων έγινε με την τρίτη μέθοδο που αναλύθηκε προηγουμένως και σαν διαχωριστική γραμμή ανάμεσα στην άμεση και τη βασική απορροή του σύνθετου υδρογραφήματος προέκυψε η ΙΘΔΗΖ.

Αντί βέβαια για τη μέθοδο αυτή, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε άλλη απ' αυτές που αναφέρθηκαν, με καλύτερη αυτή που βασίζεται στο σχεδιασμό της καμπύλης καθόδου σε ημιλογαριθμικό χαρτί. Εδώ, η καμπύλη καθόδου BE σχεδιάζεται σε λογαριθμικό χαρτί και επισημαίνεται το σημείο Z που δείχνει το τέλος της άμεσης απορροής (το σημείο αυτό είναι το δεύτερο απ' τη μεριά της αιχμής B σημείο αλλαγής κλίσεως της ημιλογαριθμικής γραμμής).

Με τη διαδικασία αυτή προσδιορίζουμε τόσο τη μορφή της καμπύλης καθόδου όσο και το χρόνο N σε μέρες που διαρκεί η άμεση απορροή (χρόνος ανάμεσα στα σημεία B και Z) χωρίς τη βοήθεια της σχέσεως (5.9). Στη συνέχεια κατασκευάζεται η καμπύλη καθόδου μετά την πρώτη αιχμή A , με βάση τη μορφή που βρέθηκε από την ανάλυση της καμπύλης BE , οπότε καταλήγουμε σε δύο απλά υδρογραφήματα. Από δω και πέρα ακολουθείται η διαδικασία της προηγούμενης παραγράφου.

5.3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν το σχήμα του υδρογραφήματος

Η χρονική κατανομή της απορροής, που εκφράζεται από το σχήμα του υδρογραφήματος, επηρεάζεται από κλιματικούς παράγοντες καθώς επίσης και από τα τοπογραφικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (Παπαζαφειρίου, 1983).

Γενικά, μπορεί να λεχθεί ότι η καμπύλη ανόδου του υδρογραφήματος διαμορφώνεται κατά κύριο λόγο από τα χαρακτηριστικά της βροχής που προκαλεί την απορροή, ενώ η καμπύλη καθόδου είναι σχεδόν ανεξάρτητη από τα χαρακτηριστικά της βροχής.

Κλιματικοί παράγοντες

Οι βασικότεροι κλιματικοί παράγοντες που επηρεάζουν τον όγκο και την κατανομή της απορροής, δηλαδή το σχήμα του υδρογραφήματος είναι οι εξής:

- α. η ένταση, η διάρκεια και η χρονική κατανομή της βροχής,
- β. η κατανομή της βροχής πάνω στην υδρολογική λεκάνη,
- γ. η διεύθυνση που κινείται η βροχή,
- δ. η μορφή του κατακρημνίσματος και
- ε. ο τύπος της βροχής.

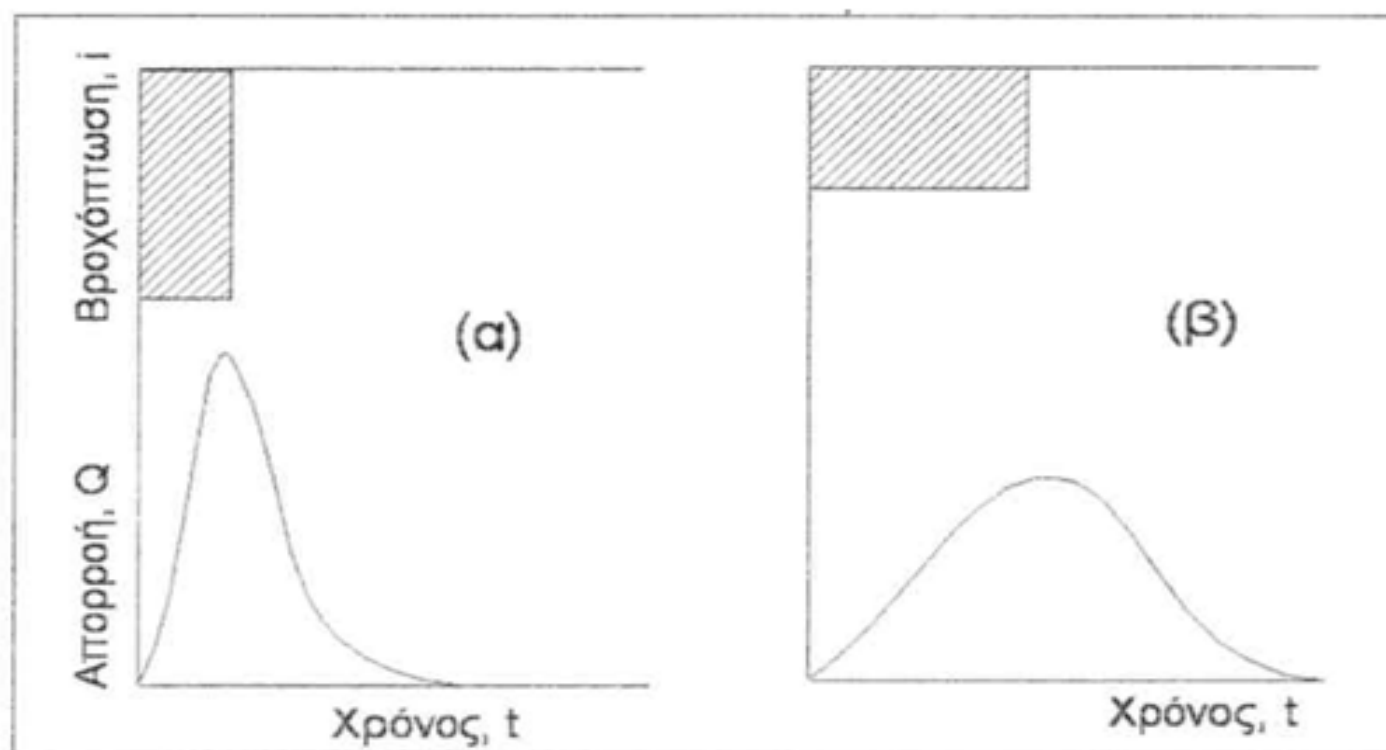
α. Ένταση, διάρκεια και χρονική κατανομή της βροχής

Τα τρία αυτά χαρακτηριστικά της βροχής καθορίζουν τον όγκο της απορροής, τη χρονική διάρκεια της επιφανειακής απορροής και το ύψος της αιχμής του υδρογραφήματος.

Για μια βροχή με σταθερή ένταση, η διάρκεια της καθορίζει σε ένα βαθμό το ύψος της αιχμής και τη χρονική διάρκεια της επιφανειακής απορροής. Για σταθερή διάρκεια βροχής, μια αύξηση της έντασης της θα προκαλούσε άνοδο της αιχμής και αύξηση του όγκου της απορροής, με την προϋπόθεση βέβαια ότι η ένταση της βροχής ξεπερνά τη διηθητικότητα του εδάφους. Η επίδραση μιας τέτοιας αυξήσεως της έντασης δε φαίνεται να επηρεάζει ουσιαστικά τη διάρκεια της επιφανειακής απορροής.

Τέλος, αυξομείωση της έντασης της βροχής μπορεί να επηρεάσει το σχήμα του υδρογραφήματος μικρών υδρολογικών λεκανών, ενώ σε μεγαλύτερες λεκάνες η επίδραση αυτή είναι πολύ περιορισμένη.

Γενικά, μια βροχή με μεγάλη ένταση και μικρή διάρκεια προκαλεί υψηλή αιχμή, καμπύλες ανόδου και καθόδου με σχετικά απότομες κλίσεις και περιορισμένη διάρκεια επιφανειακής απορροής. Βροχή του ίδιου συνολικά ύψους αλλά με μικρή ένταση και μεγάλη διάρκεια προκαλεί υδρογράφημα με χαμηλή αιχμή, καμπύλες ανόδου και καθόδου με μικρές κλίσεις και μεγαλύτερη διάρκεια επιφανειακής απορροής. Οι περιπτώσεις αυτές φαίνονται γραφικά στο Σχήμα 5.15.

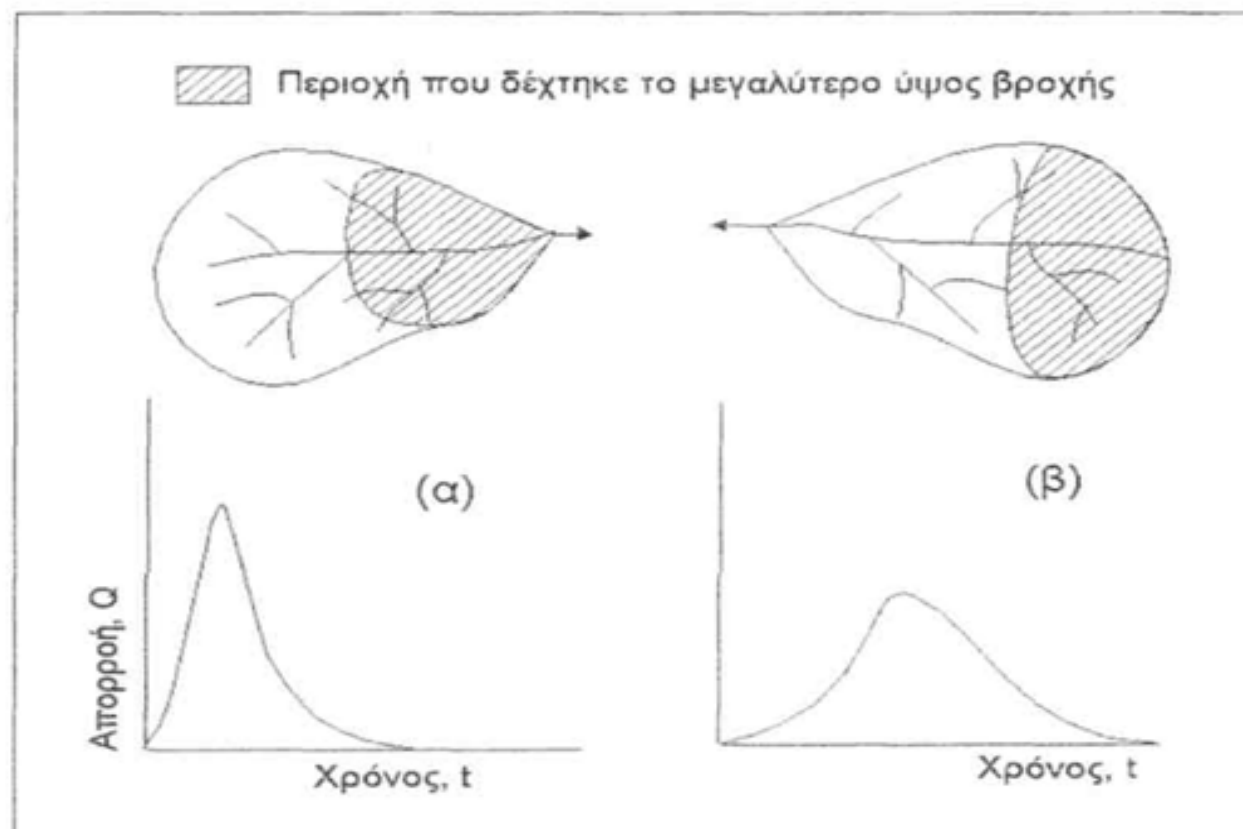


Σχήμα 5.15 Υδρογραφήματα που προκαλούνται από βροχές ίσου ύψους αλλά διαφορετικής εντάσεως και διάρκειας.

β. Κατανομή της βροχής στην υδρολογική λεκάνη

Αν η έκταση της υδρολογικής λεκάνης είναι αρκετά μεγάλη, η κατανομή μιας βροχής που πέφτει πάνω της μπορεί να μην είναι ομοιόμορφη. Με άλλα λόγια, μπορεί να πέσει περισσότερη βροχή σε ένα μέρος της λεκάνης από ότι σε ένα άλλο. Αν συμβεί κάτι τέτοιο, αυτό θα έχει επιπτώσεις πάνω στο σχήμα του υδρογραφήματος.

Ειδικότερα, εάν το μεγαλύτερο ύψος βροχής πέσει στο μέρος της λεκάνης που είναι κοντά στην έξοδο της, το υδρογράφημα κατά κανόνα θα έχει έντονη αιχμή και απότομες καμπύλες ανόδου και καθόδου, ενώ εάν πέσει σε απομακρυσμένο μέρος της λεκάνης, τότε η αιχμή του υδρογραφήματος θα είναι χαμηλότερη και πιο πεπλατυσμένη, θα παρουσιασθεί καθυστέρηση στο ανέβασμα της καμπύλης ανόδου και η καμπύλη καθόδου θα είναι σχετικά ομαλότερη. Οι περιπτώσεις αυτές φαίνονται στο Σχήμα 5.16.

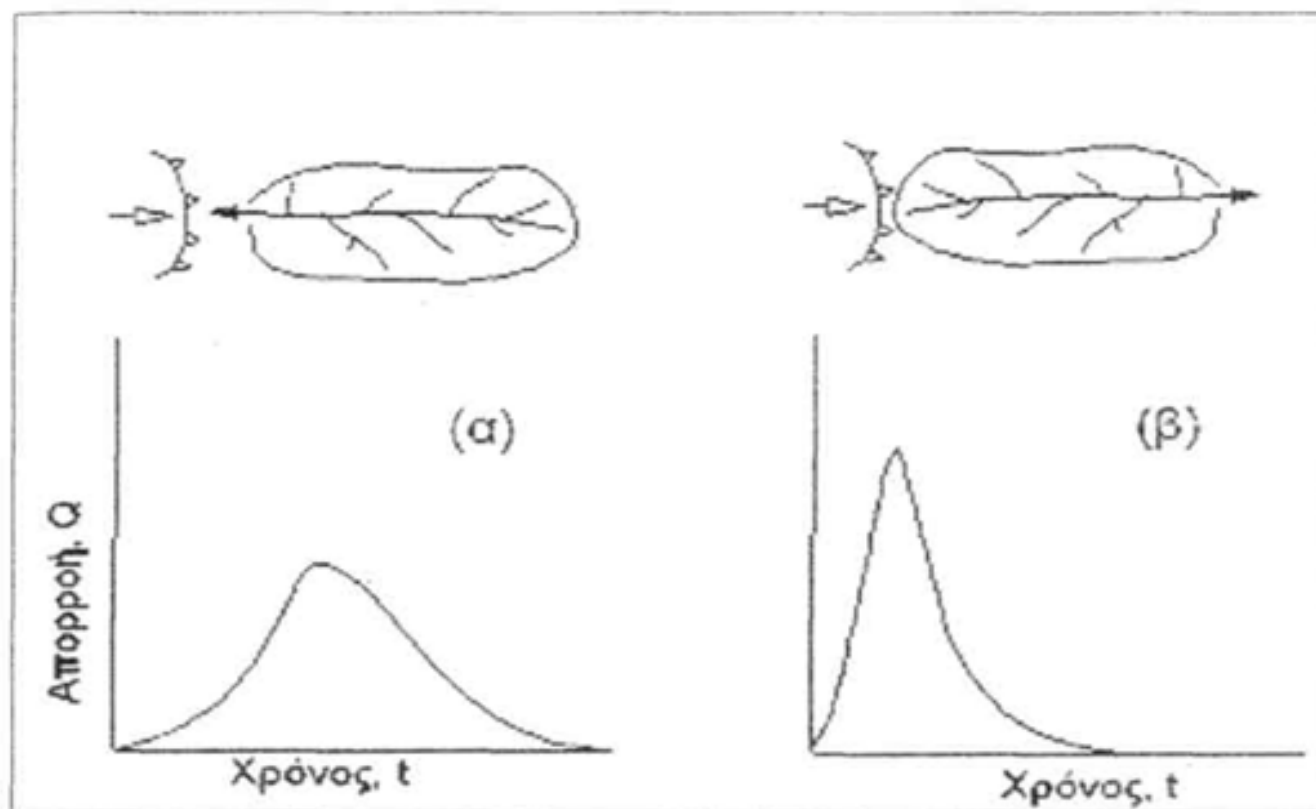


Σχήμα 5.16 Επίδραση της κατανομής της βροχής στο σχήμα του υδρογραφήματος.

γ. Διεύθυνση της βροχής

Η διεύθυνση προς την οποία κινείται η βροχή σε σχέση με τον κύριο προσανατολισμό του δικτύου των ρευμάτων της υδρολογικής λεκάνης, μπορεί να επηρεάσει και το ύψος της αιχμής του υδρογραφήματος και τη διάρκεια της επιφανειακής απορροής. Η επίδραση του παράγοντα αυτού είναι πιο έντονη σε λεκάνες με μακρόστενο σχήμα.

Σε τέτοιες λεκάνες, αν η διεύθυνση της βροχής είναι από την έξοδο τους προς τα ανάντη θα έχουμε υδρογράφημα με χαμηλότερη αιχμή και μεγαλύτερη διάρκεια επιφανειακής απορροής απ' ότι στην περίπτωση που η βροχή έχει διεύθυνση από το πιο απομακρυσμένο άκρο της λεκάνης προς την έξοδο. Οι περιπτώσεις αυτές δίνονται γραφικά στο Σχήμα 5.17.



Σχήμα 5.17 Επίδραση της διεύθυνσεως της βροχής στο σχήμα του υδρογραφήματος.

δ. Μορφή του κατακρημνίσματος

Σε αντίθεση με τη βροχή, που έχει άμεσο αποτέλεσμα στη διαμόρφωση του υδρογραφήματος, η επίδραση του χιονιού δεν σχετίζεται με το ύψος και τη διάρκεια πτώσης του, αλλά με το χρόνο και το ρυθμό τήξεως του χιονοστρώματος που καλύπτει την υδρολογική λεκάνη.

Η πρόκληση απορροής από την τήξη του χιονιού είναι μια σχετικό αργή διαδικασία. Αυτό οφείλεται στην ανομοιόμορφη κατανομή του χιονοστρώματος πάνω στη λεκάνη και τις ημερήσιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας που έχουν ως αποτέλεσμα ο μέσος ρυθμός τήξεως να μην ξεπερνά στις περισσότερες περιπτώσεις τη διηθητικότητα του εδάφους. Έτσι, στις περιπτώσεις αυτές το μεγαλύτερο μέρος της άμεσης απορροής προέρχεται από ενδιάμεση απορροή, με αποτέλεσμα το υδρογράφημα να έχει χαμηλή αιχμή αλλά πολύ μεγάλη χρονική διάρκεια.

Αυτά βέβαια αναφέρονται σε λεκάνες που έχουν διαμορφωμένο χιονόστρωμα και συνήθη περίοδο τήξεως την άνοιξη. Αν το χιόνι πέσει σε μια υδρολογική λεκάνη μάλλον περιστασιακά και λιώσει γρήγορα, περίπτωση που είναι συνηθισμένη στον τόπο μας, το σχήμα του υδρογραφήματος είναι πολύ διαφορετικό από το παραπάνω και μοιάζει περισσότερο με αυτό που προκαλείται από βροχή. Η δε τελική του μορφή θα είναι συνάρτηση του πάχους του χιονιού και του ρυθμού τήξεως.

Τέλος, σε μερικές περιπτώσεις η τήξη του χιονιού οφείλεται στην πτώση σχετικά θερμής βροχής, οπότε προκαλείται υψηλή και αρκετά παρατεταμένη απορροή. Τέτοια περιστατικά προκαλούν μερικές φορές πολύ μεγάλες πλημμύρες.

ε. Τύπος της βροχής

Ο τύπος της βροχής παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της αιχμής του υδρογραφήματος, σε σχέση με το μέγεθος της υδρολογικής λεκάνης.

Οι βροχές που προκαλούνται από έντονα ανοδικά ρεύματα (ανοιξιάτικες και καλοκαιρινές καταιγίδες) δίνουν τις υψηλότερες αιχμές απορροής σε μικρές υδρολογικές λεκάνες, ενώ η επίδραση τους δεν είναι σημαντική σε μεγάλες λεκάνες γιατί οι ανοδικές βροχές είναι περιορισμένες σε έκταση.

Αντίθετα, βροχές που προκαλούνται από εκτεταμένα μετωπικά συστήματα σε συνδυασμό με ορογραφικούς παράγοντες δίνουν υψηλές και παρατεταμένες αιχμές.

Τοπογραφικοί παράγοντες

Το υδρογράφημα της άμεσης απορροής μιας υδρολογικής λεκάνης αντικατοπτρίζει το συνδυασμένο αποτέλεσμα όλων των φυσικών χαρακτηριστικών της λεκάνης. **Μερικά από τα κύρια χαρακτηριστικά που ασκούν ουσιαστική επίδραση στη διαμόρφωση της άμεσης απορροής μιας λεκάνης μπορεί να θεωρηθούν ότι είναι:**

- α. το μέγεθος και το σχήμα της λεκάνης,
- β. η κατανομή και η πυκνότητα του δικτύου των ρευμάτων,
- γ. η κλίση των πρηνών της λεκάνης,
- δ. η κλίση του κύριου υδατορεύματος,
- ε. το ανάγλυφο του εδάφους και
- στ. το ποσοστό και το είδος της φυτοκάλυψης.

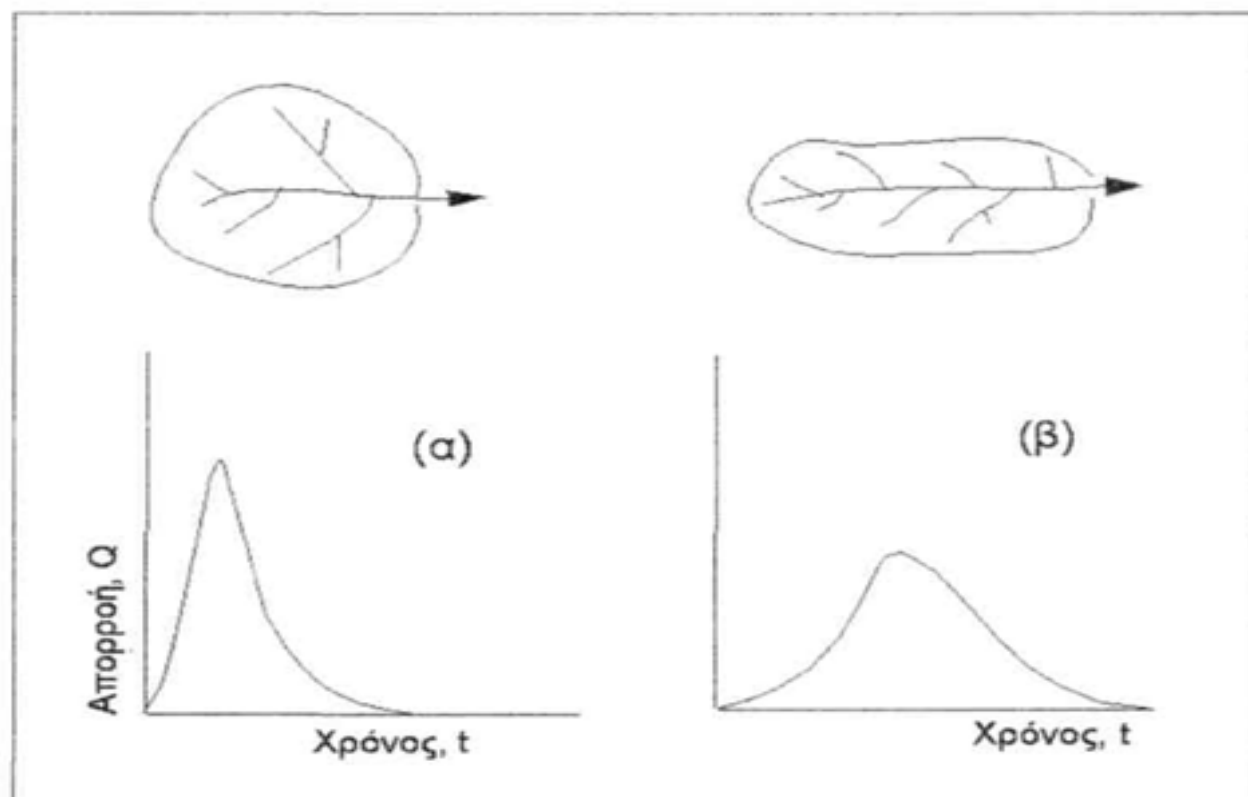
α. Μέγεθος και σχήμα της υδρολογικής λεκάνης

Η κύρια επίδραση του μεγέθους της λεκάνης στο σχήμα του υδρογραφήματος της άμεσης απορροής έχει σχέση με τη χρονική διάρκεια του υδρογραφήματος.

Έτσι, ανεξάρτητα από άλλους παράγοντες, μια συγκεκριμένη βροχή που πέφτει σε μεγάλη λεκάνη θα δώσει υδρογράφημα μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας, ενώ η απορροή ανά μονάδα επιφάνειας στην περίοδο της αιχμής θα είναι μικρότερη.

Το σχήμα της λεκάνης απορροής διαμορφώνει το ρυθμό με τον οποίο το νερό φτάνει στο κύριο υδατορεύμα. Το σχήμα της λεκάνης είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την καμπύλη ανόδου του υδρογραφήματος και το μέγεθος της αιχμής του.

Έτσι, αν το σχήμα μιας λεκάνης είναι τέτοιο, που τα ρεύματα της έχουν μικρό μήκος και συγκλίνουν προς την έξοδο, η καμπύλη ανόδου του υδρογραφήματος που παράγουν είναι πιο απότομη και η αιχμή φτάνει σε μεγαλύτερο ύψος, απ' ότι όταν το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης είναι σχετικό απομακρυσμένο από την έξοδο της. Στη δεύτερη περίπτωση ανήκουν λεκάνες με σχήμα στενόμακρο. Στο Σχήμα 5.18 δίνεται γραφικά η επίδραση του σχήματος της λεκάνης στην άμεση απορροή.



Σχήμα 5.18 Υδρογραφήματα που δίνουν δύο λεκάνες με την ίδια έκταση αλλά διαφορετικό σχήμα.

β. Κατανομή και πυκνότητα του δικτύου των ρευμάτων

Όσο πυκνότερο και πιο ομοιόμορφα κατανεμημένο είναι το δίκτυο των ρευμάτων μιας υδρολογικής λεκάνης, τόσο μικρότερες είναι οι διαδρομές που κάνει το νερό πάνω στην επιφάνεια του εδάφους και τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος που κάνει το νερό για να φτάσει στην έξοδο της λεκάνης, ενώ στην περίπτωση λεκάνης με αραιό δίκτυο ρευμάτων συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο.

Ως εκ τούτου στην πρώτη περίπτωση η καμπύλη ανόδου του υδρογραφήματος θα είναι πιο απότομη, το ύψος της αιχμής μεγαλύτερο και γενικά η άμεση απορροή μεγαλύτερη, γιατί ο χρόνος επαφής του νερού με το έδαφος είναι μικρότερος και κατά συνέπεια μικρότερες ποσότητες νερού διηθούνται μέσα σ' αυτό.

γ. Κλίση των πρανών της υδρολογικής λεκάνης

Η κλίση των πρανών της λεκάνης ασκεί ουσιαστική επίδραση στην επιφανειακή απορροή, επειδή καθορίζει το χρόνο επαφής του νερού της βροχής με την επιφάνεια του εδάφους, δηλαδή καθορίζει τη διάρκεια της διηθήσεως.

Η κλίση είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας του χρόνου συγκεντρώσεως γιατί ρυθμίζει την ταχύτητα που το νερό κινείται πάνω στην επιφάνεια. Ακριβής υπολογισμός της ταχύτητας αυτής δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί, λόγω των πολλών παραγόντων που την επηρεάζουν.

Γενικά όμως, μπορεί να λεχθεί ότι η ροή του νερού στην επιφάνεια μπορεί να εκφρασθεί από μια σχέση σαν αυτή που διαμόρφωσε ο Butler (1957). Η σχέση αυτή έχει τη μορφή (Παπαζαφειρίου, 1983):

$$q = aD^b S^c$$

Όπου:

- q είναι η ροή (παροχή) ανά εδαφική ζώνη πλάτους ίσου με τη μονάδα,
- D είναι η κλίση του εδάφους και
- a , b , c είναι σταθερές που εξαρτώνται από τον αριθμό του Reynolds, την ορμή των βροχοσταγονιδίων και την τραχύτητα της εδαφικής επιφάνειας.

Η σχέση αυτή δείχνει ότι η ταχύτητα ροής μεγαλώνει ανάλογα με την κλίση και κατά συνέπεια ελαττώνεται ο χρόνος επαφής του νερού με το έδαφος. Έτσι, όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση τόσο περιορίζεται η χρονική βάση του υδρογραφήματος, η αιχμή φτάνει σε μεγαλύτερα ύψη κι οι καμπύλες ανόδου και καθόδου γίνονται πιο απότομες.

δ. Κλίση του κυρίου υδατορεύματος

Όταν το νερό φτάσει στον κύριο κλάδο του ρεύματος μιας υδρολογικής λεκάνης, ο χρόνος που θα χρειασθεί να φτάσει μέχρι την έξοδο της εξαρτάται από το μήκος και την κλίση του ρεύματος. Γενικά, η ταχύτητα ροής σε ανοικτά κανάλια μπορεί να υπολογισθεί με μια σχέση της μορφής:

$$V = CR^m S^n$$

Όπου:

- V είναι η ταχύτητα ροής,
- C είναι μια σταθερά που η τιμή της εξαρτάται από την τραχύτητα των τοιχωμάτων του καναλιού,
- R είναι η υδραυλική ακτίνα,
- S είναι η κλίση του καναλιού και
- m και n είναι εκθέτες που κατά τον Manning έχουν τιμές $2/3$ και $1/2$ αντίστοιχα.

Επειδή ο χρόνος t για μια διαδρομή L είναι:

$$t = L \div V$$

τούτο σημαίνει ότι εδώ όπως και στην περίπτωση της κλίσεως των πρανών της λεκάνης, ο χρόνος διαδρομής είναι αντίστροφα ανάλογος κάποιας δυνάμεως της κλίσεως του ρεύματος, δηλαδή ο χρόνος αυτός μικραίνει όσο μεγαλώνει η κλίση. Η επίδραση στο υδρογράφημα του παράγοντα αυτού σχετίζεται με τη χρονική βάση του υδρογραφήματος και τη μορφή της καμπύλης καθόδου, που γίνεται πιο απότομη όσο η κλίση μεγαλώνει.

ε. Η ανάγλυφη όψη της υδρολογικής Λεκάνης

Το νερό της βροχής που συγκεντρώνεται στην επιφάνεια του εδάφους, πριν αρχίσει να κινείται επιφανειακά προς τα ρεύματα, πρέπει πρώτα να γεμίσει τις κάθε είδους εδαφικές κοιλότητες.

Είναι λοιπόν φυσικό, ότι ο αριθμός και η μορφή των εδαφικών κοιλοτήτων, σε συνδυασμό με την κλίση της λεκάνης, θα επηρεάζουν το σχήμα του υδρογραφήματος. Συμπερασματικά, μπορεί να λεχθεί ότι οι λεκάνες με λίγες εδαφικές κοιλότητες και μεγάλες κλίσεις πρανών δίνουν υδρογράφημα με μικρή χρονική βάση, απότομες καμπύλες ανόδου και καθόδου και μεγάλη αιχμή.

Αντίθετα, οι λεκάνες με μεγάλο αριθμό εδαφικών κοιλοτήτων και μικρή κλίση δίνουν υδρογράφημα με χαμηλή αιχμή και μεγάλη χρονική βάση.

στ. Ποσοστό και είδος φυτοκάλυψης

Η φυτοκάλυψη επηρεάζει την απορροή με δύο τρόπους, απ' τους οποίους ο ένας είναι άμεσος κι αναφέρεται στη συγκράτηση του νερού της βροχής από τη φυτοκάλυψη, που στη συνέχεια εξατμίζεται πίσω στην ατμόσφαιρα και ο άλλος είναι μακρόχρονος και οφείλεται στη διαπνοή.

Οι υδρολογικές λεκάνες που έχουν μεγάλο ποσοστό φυτοκάλυψης από δέντρα με πυκνό φύλλωμα, δίνουν ομαλό υδρογράφημα με μεγάλη χρονική βάση και χαμηλή αιχμή.

Γεωλογικοί παράγοντες

Γεωλογικοί παράγοντες που επηρεάζουν το σχήμα του υδρογραφήματος είναι εκείνοι που ρυθμίζουν τη ροή του νερού προς τα ρεύματα, είτε με τη μορφή ενδιάμεσης απορροής, είτε με τη μορφή υπόγειας ροής (βασικής απορροής).

Οι παράγοντες αυτοί αναφέρονται στα χαρακτηριστικά:

- α. των επιφανειακών εδαφικών στρώσεων και
- β. των βαθύτερων γεωλογικών σχηματισμών.

α. Επιφανειακές εδαφικές στρώσεις.

Η κατάσταση της επιφάνειας του εδάφους, σε συνδυασμό με την υφή και τη δομή των υποκείμενων στρώσεων, καθορίζει το ρυθμό διηθήσεως του νερού επηρεάζοντας άμεσα τον όγκο της επιφανειακής απορροής. Επίσης, η διάταξη των εδαφικών στρώσεων επιδρά στο ρυθμό της κατακόρυφης και πλευρικής κινήσεως του νερού που έχει διηθηθεί στο έδαφος.

Έτσι, αν η επιφανειακή στρώση του εδάφους, που επικάθεται σε μια αδιαπέρατη στρώση, είναι αρκετά διαπερατή, ένα σημαντικό ποσοστό του νερού που διηθήθηκε θα κινηθεί πλευρικά, καθιστώντας έτσι την ενδιάμεση απορροή ένα σημαντικό παράγοντα στην τελική διαμόρφωση του υδρογραφήματος.

Το διαμορφωθέν υδρογράφημα θα έχει χαμηλή αιχμή και μεγάλη χρονική διάρκεια.

Αν η επιφανειακή στρώση της λεκάνης αποτελείται από συνεκτικό έδαφος (μικρή διηθητικότητα), το μεγαλύτερο μέρος της βροχής θα κινηθεί επιφανειακά προς τα ρεύματα με συνέπεια το υδρογράφημα να έχει υψηλή αιχμή και μικρή χρονική βάση.

Τέλος, αν όλες οι εδαφικές στρώσεις είναι σχετικά διαπερατές, το μεγαλύτερο μέρος του νερού, θα διηθηθεί βαθιά, με αποτέλεσμα πολύ χαμηλή αιχμή και γενικά μικρό όγκο άμεσης απορροής.

β. Βαθύτεροι γεωλογικοί σχηματισμοί

Το είδος και η διάταξη των γεωλογικών σχηματισμών που βρίσκονται κάτω από μια υδρολογική λεκάνη, επιδρά στη βασική απορροή. Ανάλογα με τη διάταξη των σχηματισμών αυτών, η περιοχή που συνεισφέρει νερό στα ρεύματα μιας λεκάνης μπορεί να είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την επιφανειακή έκταση της λεκάνης, όπως αυτή καθορίζεται από τον υδροκρίτη.

Ακόμη, η διάταξη αυτή μπορεί να διαμορφώσει τη θέση της υπόγειας στάθμης του νερού, με τέτοιον τρόπο ώστε να εφοδιάζει τα ρεύματα συνέχεια με νερό, οπότε η βασική απορροή θα είναι συνεχής και σημαντική, ή να την κρατά μόνιμα κάτω από τον πυθμένα των ρευμάτων, οπότε τα ρεύματα θα εμπλουτίζονται με νερό τα υπόγεια στρώματα χωρίς να δέχονται τίποτε από αυτά, με αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της βασικής απορροής.

Παραπάνω εξετάστηκε μεμονωμένα η επίδραση των παραγόντων στο σχήμα του υδρογραφήματος. Στη φύση είναι σύνηθες ένας παράγοντας να αναιρεί τα αποτελέσματα κάποιου άλλου έτσι που το τελικό υδρογράφημα να εξαρτάται από το αθροιστικό αποτέλεσμα όλων των παραγόντων, καθώς αυτοί δρουν μεμονωμένα ή σε συνδυασμό μεταξύ τους.

5.4 ΥΔΡΟΜΕΤΡΙΑ

Αντικείμενο της υδρομετρίας είναι η μέτρηση και εκτίμηση των παραμέτρων ροής, δηλαδή της στάθμης του νερού, της ταχύτητας και της παροχής του ποταμού.

Η υδρομετρία είναι μία ιδιαίτερα πολύπλοκη και πολυδάπανη διαδικασία και απαιτεί ειδικευμένο προσωπικό, τόσο για τις διαδικασίες υπαίθρου όσο και για τις εργασίες γραφείου. Οι διαδικασίες υπαίθρου αφορούν κυρίως στη μέτρηση της στάθμης του νερού και στην εκτέλεση υδρομετρήσεων με στόχο την εκτίμηση της παροχής του ποταμού.

Τα στοιχεία αυτά, μετά από έλεγχο και τη σχετική προεπεξεργασία, συλλέγονται στο αρχεία των υπηρεσιών (π.χ. ΔΕΗ, ΥΠΕΧΩΔΕ, ΥΠΓΕ) στις οποίες ανήκουν οι μετρητικές θέσεις και εκεί επεξεργάζονται τελικά για την εκτίμηση της μέγιστης ή μέσης παροχής του ποταμού σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

5.4.1 Κριτήρια εγκατάστασης υδρομετρικού σταθμού

Η εγκατάσταση ενός πλήρους υδρομετρικού σταθμού θα πρέπει να γίνεται σε κατάλληλη διατομή υδατορεύματος και η σύνθεση του περιλαμβάνει όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της στάθμης και για την εκτίμηση της παροχής.

Τα όργανα που υποχρεωτικά περιλαμβάνει ο σταθμός είναι κατ' αρχήν το σταθμήμετρο για τη μέτρηση της στάθμης του υδατορεύματος. Πολλές φορές ο σταθμός περιλαμβάνει περισσότερα από ένα σταθμήμετρα. Καλές θέσεις για εγκαταστάσεις σταθμημέτρων αποτελούν τα διαφορά τεχνικά έργα που τυχόν διασταυρώνουν τα ρεύματα, ωστόσο θα πρέπει να ελέγχονται συχνά για τυχόν μετακίνηση ή απόκλιση από τη σωστή τους θέση.

Σε θέσεις όπου ενδιαφέρει η συνεχής καταγραφή της στάθμης, ο σταθμός περιλαμβάνει και σταθμηγράφο, ο οποίος παρακολουθεί συνεχώς την αυξομείωση της στάθμης στο χρόνο, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα για λεπτομερέστερη χρονική αποτύπωση της εξέλιξης.

Επίσης περιλαμβάνει υδρομετρικά όργανα για τη μέτρηση της ταχύτητας ροής του ποταμού και την εκτίμηση της παροχής ενός φαινομένου π.χ. πλημμυρικού.

Τα κριτήρια εγκατάστασης ενός υδρομετρικού σταθμού σε μία θέση είναι τα παρακάτω:

- Συγκέντρωση της ροής σε ένα μόνο κλάδο
- Σταθερή και ομοιόμορφη γεωμετρία της κοίτης
- Επιλογή ευθύγραμμου τμήματος του ποταμού και αποφυγή επηρεασμού της ροής από κατάντη εμπόδια
- Περιορισμένη δραστηριότητα διάβρωσης και εναπόθεσης φερτών
- Ευαισθησία στη μεταβολή της παροχής για όλο το πεδίο μεταβολής της στάθμης
- Εύκολη πρόσβαση των συνεργείων συντήρησης και μέτρησης ακόμα και σε περιπτώσεις πλημμύρων
- Ευνοϊκές θέσεις για κατασκευή ταμιευτήρων, γεφυρών κλπ.

Σύμφωνα προς τις συστάσεις του Παγκοσμίου Οργανισμού Μετεωρολογίας ελάχιστη πυκνότητα των υδρομετρικών σταθμών για τις μεσογειακές χώρες πρέπει να είναι:

- Σε πεδινή περιοχή: 1 σταθμός ανά 1.000-2.500 km²
- Σε ορεινή περιοχή: 1 σταθμός ανά 300-1.000 km².

Οι υδρολογικοί σταθμοί πρέπει να κατανέμονται σε υψομετρικές ζώνες με υψομετρική διαφορά 500 m περίπου κατά ζώνη.

5.4.2 Μέτρηση της στάθμης

Τα πλέον γνωστά όργανα μέτρησης της στάθμης, όπως προηγούμενα αναφέρθηκε, είναι το **σταθμήμετρο** και ο **σταθμηγράφος**.

Το σταθμήμετρο είναι μία απλή σταδία, όπου είναι αποτυπωμένη εκατοστομετρική κλίμακα, της οποίας το μηδέν έχει εξαρτηθεί υψομετρικά από ένα σταθερό υψόμετρο αναφοράς. Στην περίπτωση που η συνολική παροχή του ποταμού δε μπορεί να περιγραφεί από ένα μόνο σταθμήμετρο, τότε εγκαθίστανται περισσότερα στην ίδια διατομή (δεξιά, αριστερά, μέσον) ή ακόμα ανάντη και κατόντη.

Η μέτρηση της στάθμης γίνεται από παρατηρητή κάθε μέρα στις 8:00 το πρωί, ενώ σε περιπτώσεις πλημμύρων η μέτρηση της στάθμης συνήθως γίνεται συχνότερα και κατά τη διάρκεια του πλημμυρικού επεισοδίου. Πολλές φορές η χρήση του σταθμημέτρου συνεπάγεται τον κίνδυνο να παραληφθούν σημαντικές μεταβολές της στάθμης που μπορεί να συμβούν στο χρονικό διάστημα ανάμεσα σε δύο διαδοχικές παρατηρήσεις.

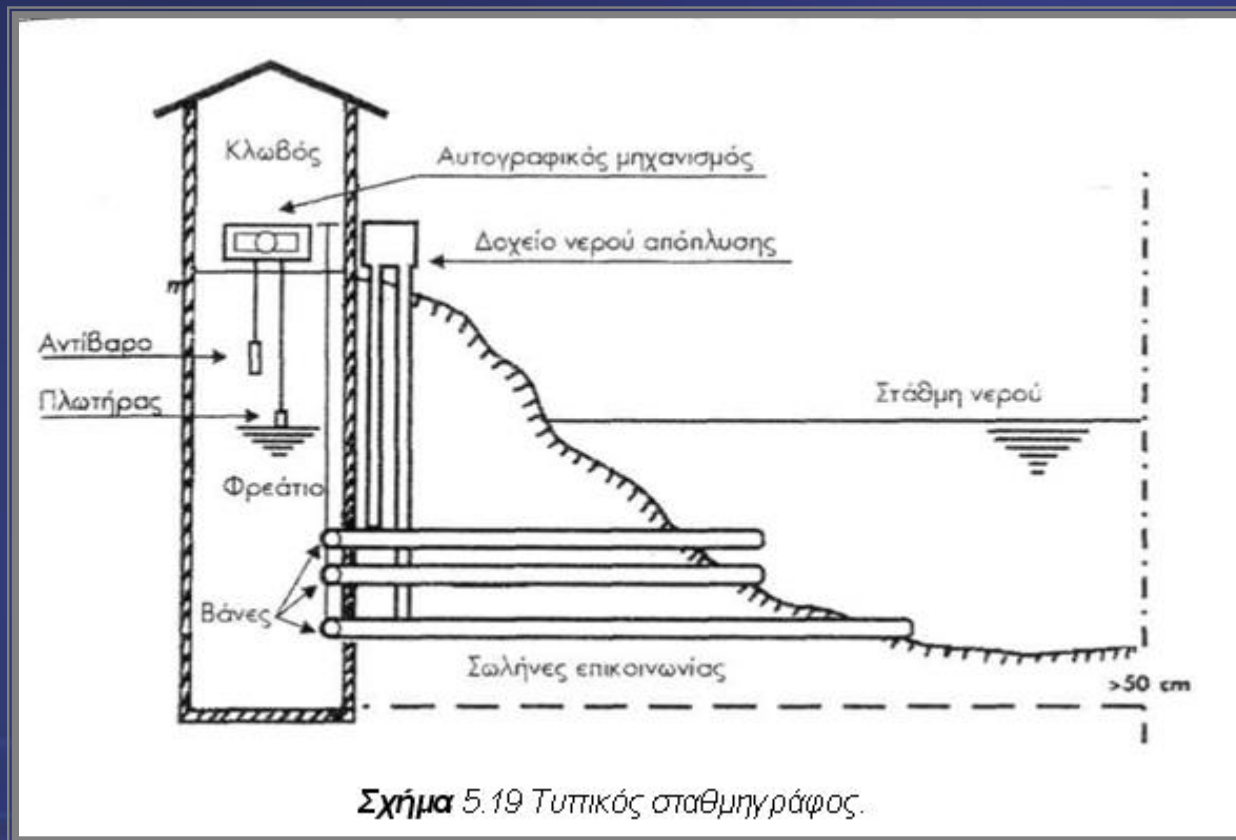
Ακόμη, ορισμένες φορές είναι επιβεβλημένο να γίνουν παρατηρήσεις σε θέσεις της κοίτης που δεν είναι εύκολα προσπελάσιμες από τον παρατηρητή. Για να ξεπεραστούν οι δυσκολίες αυτές, χρησιμοποιούνται αυτογραφικά όργανα που λέγονται σταθμηγράφοι. Μια τυπική διάταξη σταθμηγράφου αποτελείται (Παπαζαφειρίου, 1983):

- Από ένα κατακόρυφο φρεάτιο κυκλικής ή ορθογώνιας διατομής, μεταλλικό ή από οπλισμένο σκυρόδεμα, που ο πυθμένας του κατασκευάζεται τουλάχιστον 50 cm κάτω από τον πυθμένα της κοίτης και βρίσκεται κοντά στην όχθη του ρεύματος.

- Από δύο ή τρεις σωλήνες μικρής διαμέτρου, οριζόντια τοποθετημένους, που ενώνουν το μέσο περίπου του ρεύματος με το φρεάτιο. Οι σωλήνες αυτοί κατασκευάζονται με μικρή διάμετρο για να μη μεταφέρουν στο φρεάτιο τις στιγμιαίες μεταβολές της στάθμης του νερού του ρεύματος που οφείλονται σε κυματισμό. Αν το απαιτούμενο μήκος των σωλήνων είναι ίσο ή μικρότερο από 5 m, η σχέση ανάμεσα στις διαμέτρους των σωλήνων και του φρεατίου πρέπει να είναι 1:50, ενώ αν το μήκος είναι μεγαλύτερο από 5 η σχέση αυτή πρέπει να είναι 1:25.
- Επειδή οι σωλήνες μπορεί να αποφραχθούν από τα αιωρούμενα στο νερό του ρεύματος λεπτόκοκκα υλικά, κατασκευάζεται συνήθως ένα σύστημα καθαρισμού που αποτελείται από μια μικρή δεξαμενή νερού τοποθετημένη πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, η οποία συνδέεται με σωληνώσεις με τους οριζόντιους σωλήνες. Η δεξαμενή, κατά διαστήματα, γεμίζεται με νερό με τη βοήθεια χειροκίνητης αντλίας και αφήνεται μετά να αδειάσει απότομα. Η διαδικασία αυτή είναι συνήθως αρκετή για τον καθαρισμό.

- Πάνω ακριβώς από το φρεάτιο κατασκευάζεται ο σταθμηγραφικός μηχανισμός. Ο σταθμηγραφικός μηχανισμός αποτελείται από έναν πλωτήρα που επιπλέει στην επιφάνεια του νερού μέσα στο φρεάτιο και είναι συνδεδεμένος με καλώδιο που στο άλλο άκρο του φέρει αντίβαρο και με κατάλληλη διάταξη μεταφέρει τις μεταβολές της στάθμης στο σύστημα καταγραφής. Το σύστημα αυτό αποτελείται συνήθως από ένα περιστρεφόμενο, με ελατήριο ή συσσωρευτή, τύμπανο, στο οποίο προσαρμόζεται το καταγραφικό χαρτί και μια ακίδα που η θέση της στο χαρτί καθορίζεται από τη στάθμη του νερού στο φρεάτιο. Αργότερα, χρησιμοποιήθηκε και ένας άλλος τύπος σταθμηγράφου, που αντί για περιστρεφόμενο τύμπανο έχει ένα διατρητικό μηχανισμό που μεταφέρει τις μεταβολές της στάθμης σε ειδική χαρτοταινία, για απ' ευθείας τροφοδότηση σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Μια τυπική εγκατάσταση σταθμηγράφου παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.19.

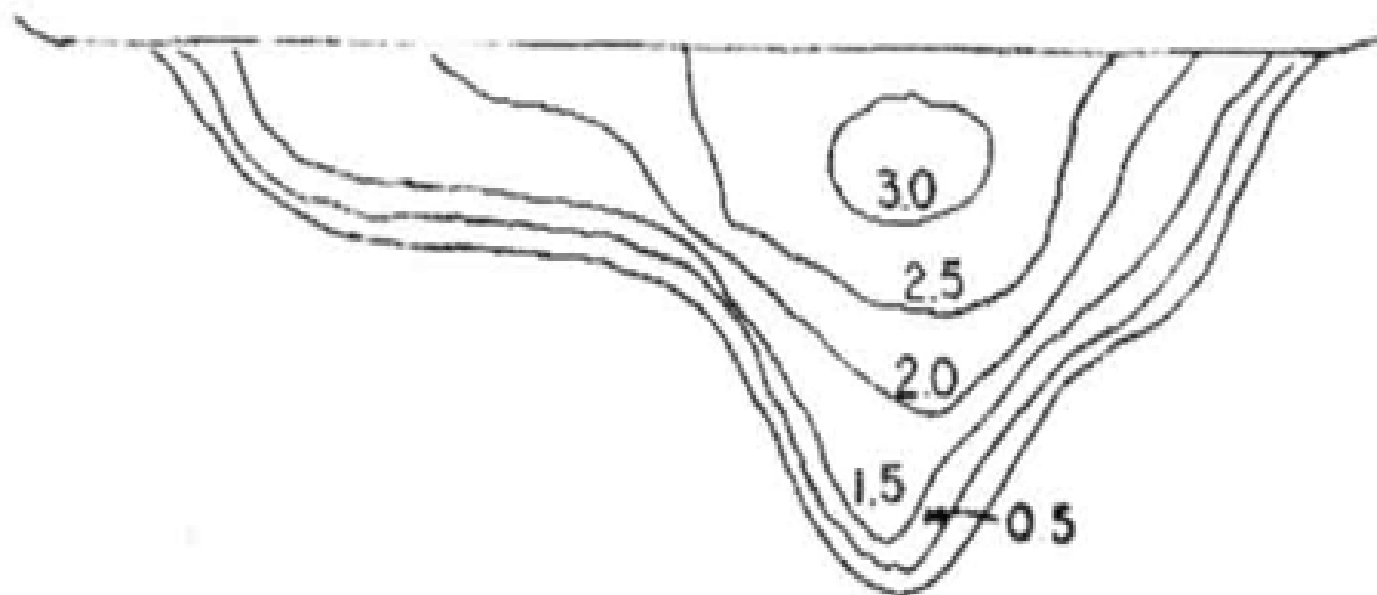


5.4.3 Μέτρηση της παροχής με τη μέθοδο του πεδίου ταχυτήτων

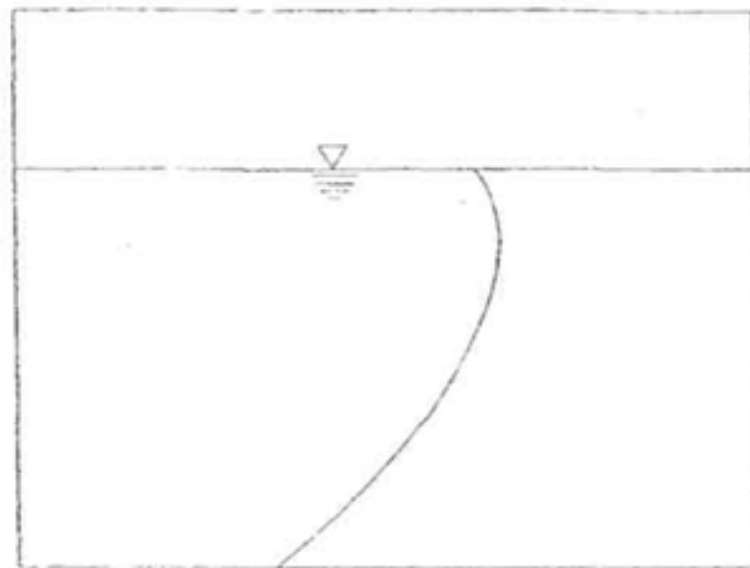
Για τη μέτρηση της παροχής ενός υδατορεύματος χρησιμοποιούνται αρκετές μέθοδοι, όπως η μέτρηση με παρεμβολή μετρητών παροχής, η μέτρηση πεδίου ταχυτήτων, η μέτρηση με τη μέθοδο διαλυμάτων, η εκτίμηση με πλωτήρες, η εκτίμηση με υδραυλικές σχέσεις ροής κλπ.

Η πλέον γνωστή μέθοδος που χρησιμοποιείται και στην Ελλάδα είναι η μέθοδος του πεδίου ταχυτήτων με τη χρήση μιλίσκου. Να σημειωθεί ότι η κατανομή της ταχύτητας σε ένα ποτάμι είναι μη ομοιόμορφη, με τη μεγαλύτερη τιμή της να εμφανίζεται στο μέγιστο βάθος και τη μηδενική στα όρια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.20.

Η μεγαλύτερη ταχύτητα σημειώνεται λίγο κάτω από την επιφάνεια του νερού. Το προφίλ της κατακόρυφης ταχύτητας φαίνεται στο Σχήμα 5.21.



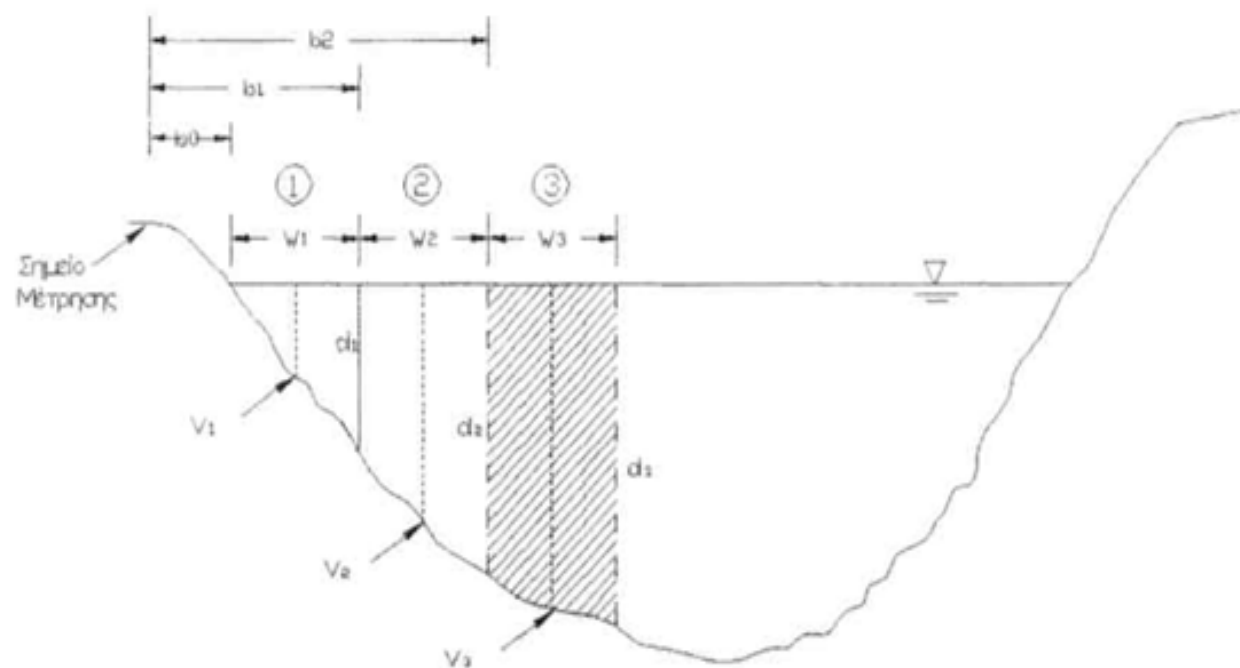
Σχήμα 5.20 Κατανομή ταχύτητας σε ένα ποτάμι.



Ταχύτητα

Σχήμα 5.21 Κατακόρυφο προφίλ της ταχύτητας στο μέγιστο βάθος της εγκάρσιας διατομής.

Για τον υπολογισμό της παροχής σε μια συγκεκριμένη θέση του ποταμού με τη μέθοδο του πεδίου ταχυτήτων, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η γνώση της γεωμετρίας της υγρής διατομής. Αυτή προσδιορίζεται χωρίζοντας νοητά τη διατομή σε N τμήματα, συνήθως ανά 1 ως 2 μέτρα, ανάλογα με το πλάτος του υδατορεύματος και την επιθυμητή ακρίβεια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.22. Ένας εμπειρικός κανόνας διαχωρισμού του ποταμού, είναι το πλήθος των τμημάτων να είναι τέτοιο, ώστε να μην διέρχεται παροχή μεγαλύτερη από το 10% της συνολικής σε καθένα από αυτά.



Σχήμα 5.22 Η διατομή ενός υδατορεύματος.

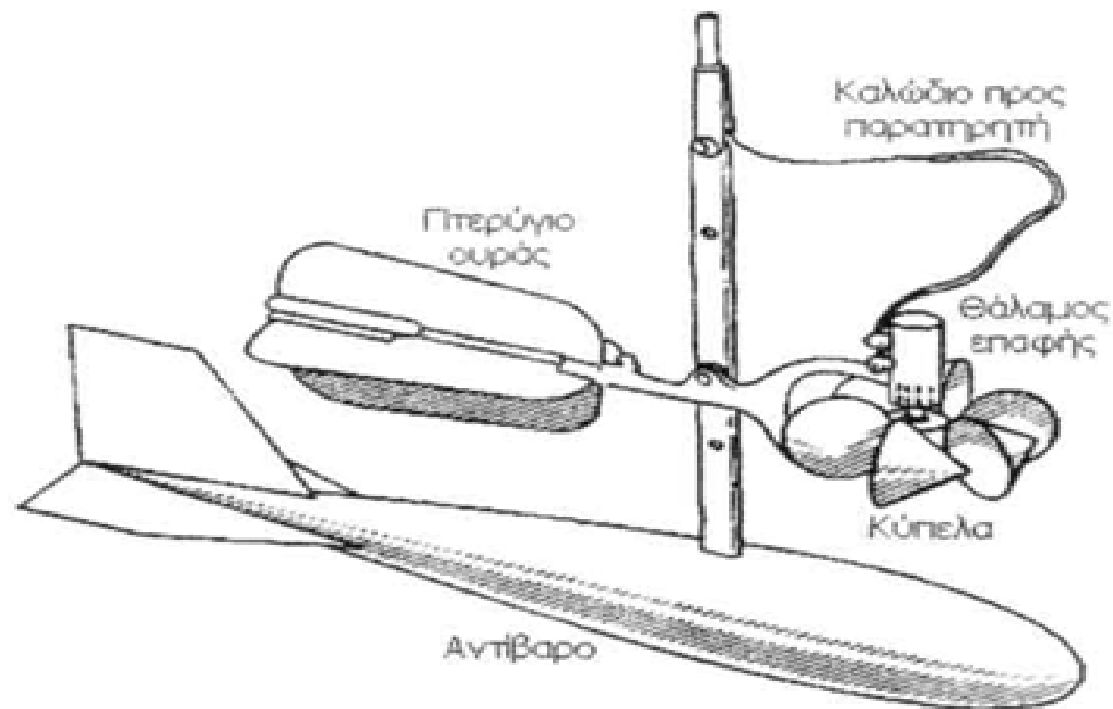
Για να οριστεί πλήρως η γεωμετρία κάθε τμήματος i , μετράται το ύψος των δύο κατακόρυφων πλευρών του (d_{i-1} και d_i), καθώς και η μεταξύ τους απόσταση, που προκύπτει ως η διαφορά των οριζόντιων αποστάσεων των κατακόρυφων ($b_i - b_{i-1}$), από ένα σταθερό σημείο της εκτίμησης των μετρήσεων στην όχθη.

Με τη βοήθεια μυλίσκου, εκτιμάται η μέση ταχύτητα $\overline{V_i}$ του υδατορεύματος για το κάθε τμήμα i , κατακόρυφα, στο μέσο του διαστήματος ($b_i - b_{i-1}$).

Ο μυλίσκος είναι μία έλικα που εμβαπτίζεται στη διατομή του υδατορεύματος στο συγκεκριμένο σημείο και περιστρέφεται υπό την επίδραση της ροής, με τυπική διάταξη που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.23.

Η προσπέλαση και μέτρηση μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους ανάλογα με τις συνθήκες ροής. Σε αβαθή ρεύματα με μικρή ταχύτητα ροής η όλη διαδικασία γίνεται με υδροβασία και η ανόρθωση του μυλίσκου γίνεται με το χέρι, ενώ σε βαθιά πλωτά ρεύματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί βάρκα κατάλληλα εξοπλισμένη.

Σε περιπτώσεις όπου αναπτύσσονται μεγάλες ταχύτητες ροής επιβάλλεται η μόνιμη εγκατάσταση εναέριας καλωδίωσης η οποία προσφέρει τη δυνατότητα προσπέλασης σε οποιοδήποτε σημείο της διατομής. Αναγκαία προϋπόθεση για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων είναι ο σωστός προσανατολισμός, οριζόντιος και παράλληλος με τη διεύθυνση ροής, του άξονα περιστροφής του μυλίσκου.



Σχήμα 5.23 Τυπική διάταξη μυλίσκου.

Η ταχύτητα σε κάθε σημείο της κατακόρυφου προκύπτει ως γραμμική συνάρτηση της συχνότητας περιστροφής της έλικας στο σημείο αυτό. Ένα θέμα που προκύπτει σε αυτό το σημείο, είναι σε ποιο βάθος πρέπει να βυθιστεί ο μυλίσκος, έτσι ώστε η σημειακή ταχύτητα u_i που θα μετρηθεί, να είναι αντιπροσωπευτική για τη συγκεκριμένη κατακόρυφο και άρα για το αντίστοιχο τμήμα και διατομή, αφού είναι γνωστό ότι η τιμή της ταχύτητας αυξάνεται με την απόσταση από το οριακό στρώμα.

Σύμφωνα με το λογαριθμικό νόμο, προκύπτει ότι η μετρούμενη σημειακή ταχύτητα, είναι πιο αντιπροσωπευτική της μέσης, σε απόσταση από την επιφάνεια ίση με το 60% του ύψους. Συνεπώς, αν λαμβάνεται μόνο μια μέτρηση σε κάθε κατακόρυφο, ο μυλίσκος βυθίζεται σε βάθος ίσο με το 60% του συνολικού.

Στην πράξη, για μεγάλα βάθη υδατορεύματος, είναι επιθυμητό να παίρνονται περισσότερες της μιας μετρήσεις σε κάθε κατακόρυφο, συνήθως δύο. Αυτές λαμβάνονται σε απόσταση από την επιφάνεια ίση με το 20% και 80% του βάθους αντίστοιχα.

Η δε μέση ταχύτητα σε κάθε κατακόρυφο (και άρα σε κάθε τμήμα), προσεγγίζεται ικανοποιητικά από το μέσο όρο αυτών των δύο τιμών και δίνεται από την εξίσωση:

$$v_i = \frac{u_{0.2} + u_{0.8}}{2}$$

Στην περίπτωση που το βάθος του ποταμού είναι αρκετά μεγάλο και στην ίδια κατακόρυφο γίνονται τρεις σημειακές μετρήσεις, αυτές επιτελούνται σε απόσταση από την επιφάνεια ίση με 20%, 60% και 80% και η μέση ταχύτητα δίνεται από την εξίσωση:

$$\bar{v} = \frac{u_{0.6}}{2} + \frac{u_{0.2} + u_{0.8}}{4}$$

Κατόπιν συμπληρώνεται δελτίο επί τόπου από τον παρατηρητή με τα στοιχεία της υδρομέτρησης και της συνολικής παροχής του ποταμού, την ημερομηνία και ώρα της μετρήσεως, όπως επίσης και την αντίστοιχη στάθμη του ποταμού που πιθανόν να κυμαίνεται κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Ένα τέτοιο έντυπο παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.24. Ο παρατηρητής θα πρέπει να φροντίσει έτσι ώστε η μέτρηση να κρατήσει το μικρότερο δυνατό διάστημα και να μην υπάρξει μεγάλη διακύμανση της στάθμης.

Πρὸς

ΥΠΕΧΟΔΕ

①

Τὴν Ὑπηρεσίαν Ὑδρολογικῶν Ἐρευνῶν/Δ2, Υ.Δ.Ε.

Ἀθῆναι

Ἀντικείμενον: Καταμέτρησης παροχῆς πηγῆς διὰ μιλίσκου.

1. ΠΟΤΑΜΟΣ, ΧΕΙΜΑΡΡΟΣ, ΠΗΓΗ ΣΠΕΡΧΑΙΟΣ
2. Λοκὸς Σπέρχειον
3. Ὑδατικὸν διαμέρισμα Ἰνστιτούτου Σπέρχειος Ἐλπίδος
4. ΘΕΣΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΣ Κέντρον Κελύφα
5. Χρονολογία 13-10-81
6. Ὅρα μετρήσεως: ἀπὸ 10³⁰ ἕως 11⁴⁰
7. Ἐνδείξεις σταθμημέτρου: κατὰ τὴν ἐναρξιν 1,23 κατὰ τὴν λήξιν 1,23
8. Τύπος καὶ ἀριθμὸς μιλίσκου SIAP 600319
9. Τρόπος μετρήσεως Μετ. ὑνάρτησης
10. Χρησιμοποιηθέν προσωπικόν Παρατηρητὴς Ματ. Βογδάνης
11. Πλάτος διατομῆς ὕδατος, τρεχ. μέτρα 22,80
12. Μέγιστον βάθος ὕδατος μ. 0,54
13. ΥΓΡΑ ΔΙΑΤΟΜΗ, τετρ. μετρ. 11,088
14. ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΣ, μέτρα/δευτ. 0,94
15. ΠΑΡΟΧΗ, κυβικά μέτρα/δευτ. 10,487
16. Ἀριθμὸς βιβλίου μετρήσεως 1^η Σελὶς 155.16

Ὁ Ἐνέγκας

Ὁ Ἐνεργήσας τὴν μέτρησην

Ἀρχεῖον

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΛΑΖΟΣ

1. Ἀριθμ. Μετρήσεως εἰς τὴν ὡς ἄνω θῆσιν.
2. Στοιχεῖα φακέλλου

2952/12-74/6.000

Σχῆμα 5.24 Δελτίο παρατηρήσεων υδρομέτρησης.

Η μέση παροχή q_i κάθε νοητού τμήματος, προκύπτει από την εξίσωση της συνέχειας, ως γινόμενο της μέσης ταχύτητας $\overline{v_i}$ του τμήματος και της διατομής A_i δηλαδή:

$$q_i = \overline{v_i} \cdot A_i$$

ενώ η συνολική παροχή στη θέση της διατομής, δίνεται από τη σχέση:

$$Q = \sum_{i=1}^N q_i$$

5.5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΟΧΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΔΡΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Για την εκτίμηση της μέσης παροχής του ποταμού σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, απαιτείται κατ' αρχήν η εκτέλεση υδρομετρήσεων σε τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. εβδομάδας ή δεκαπενθημέρου). Όμως ποτέ η χρονική πυκνότητα των υδρομετρήσεων δεν είναι η απαιτούμενη, λόγω των ιδιαίτερων δυσκολιών και του σημαντικού κόστους τους.

Τα στάδια που ακολουθούνται για την εκτίμηση της μέσης παροχής για συγκεκριμένο χρονικό βήμα (π.χ. ωριαίο, εβδομαδιαίο) είναι:

- Κατάρτιση των καμπυλών στάθμης - παροχής στη συγκεκριμένη διατομή του ποταμού.
- Εκτίμηση της μέσης στάθμης του ποταμού στο σημείο αυτό για το ίδιο χρονικό διάστημα (π.χ. ωριαίο, ημερήσιο).

- **Επέκταση της καμπύλης στάθμης - παροχής.**
- **Σύνδεση μεταξύ των καμπυλών στάθμης-παροχής και της επέκτασης.**

Είναι φανερό ότι για να εκτιμηθεί σωστά η μέση στάθμη (ιδιαίτερα μάλιστα όταν το χρονικό βήμα είναι μικρότερο της ημέρας) ο σταθμός πρέπει να έχει απαραίτητα σταθμηγράφο.

5.5.1 Κατάρτιση της καμπύλης στάθμης-παροχής

Τα ζεύγη της παροχής και της στάθμης που αναγράφονται στο δελτίο της υδρομέτρησης (όπως αυτό που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 5.24) σε κάθε σταθμό, σχεδιάζονται και σχηματίζουν την **καμπύλη στάθμης-παροχής στη θέση**.

Η καμπύλη αυτή είναι συνήθως παραβολικής μορφής και πολλές φορές παρουσιάζει ανωμαλίες ανάλογα με τη μορφή και τη μεταβλητότητα της διατομής. Στα περισσότερα υδατορεύματα η σχέση στάθμης - παροχής υπόκειται σε αλλαγές με την πάροδο του χρόνου.

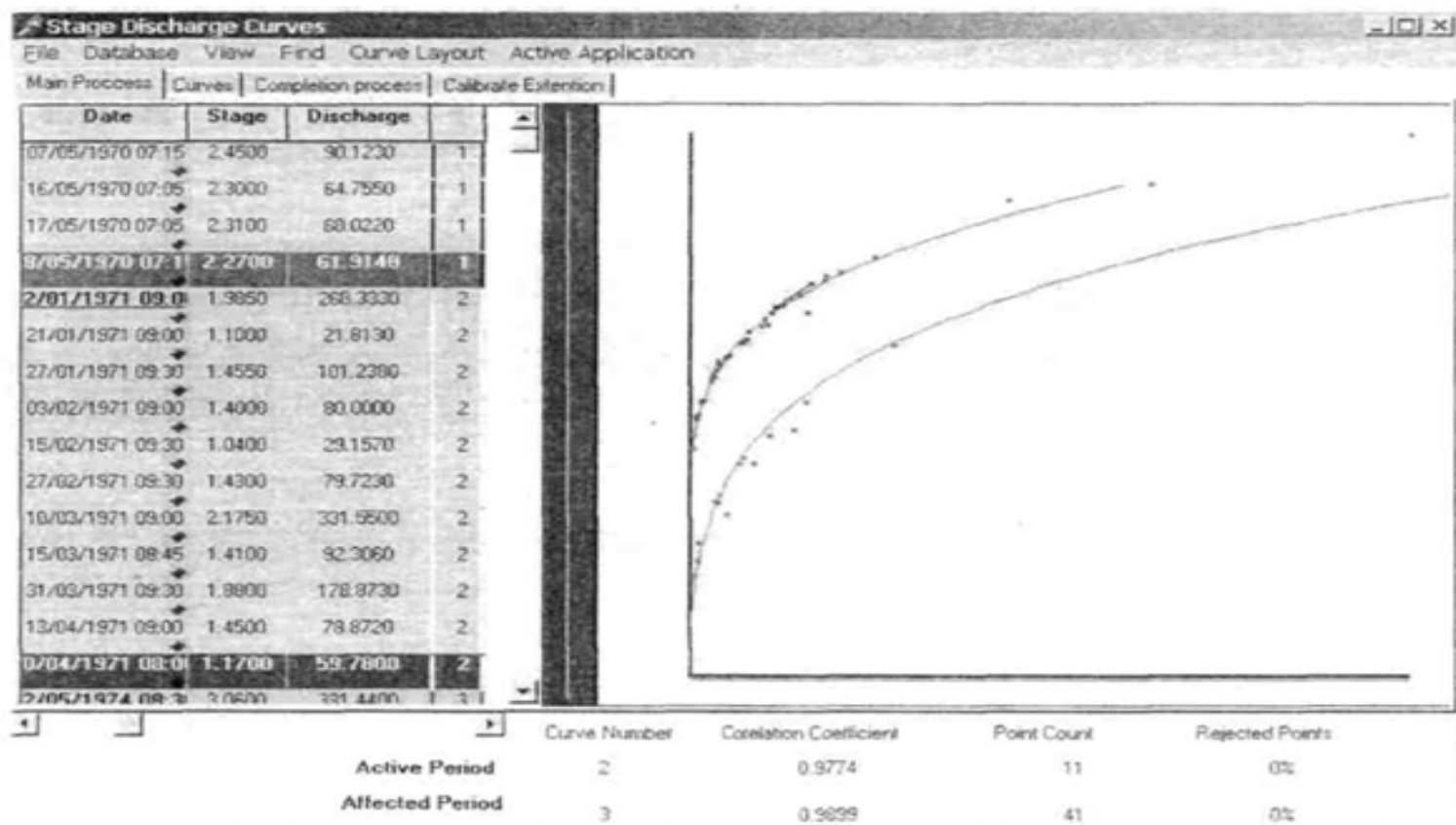
Οι αλλαγές αυτές προκαλούνται από τη μεταβολή της διατομής και της κλίσης, λόγω διάβρωσης ή πρόσχωσης της κοίτης από τη μεταβολή των χαρακτηριστικών των φερτών της κοίτης. Οι αλλαγές αυτές περιπλέκουν αρκετά το πρόβλημα της καμπύλης, αφού δεν υπάρχει μία διαχρονική καμπύλη αλλά ένα σύνολο καμπυλών, όπου κάθε μία ισχύει για ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα (μερικούς μήνες ή έτη).

Αναγκαίο πρώτο βήμα για την κατάρτιση των καμπυλών στάθμης-παροχής αποτελεί η ομογενοποίηση των μετρήσεων στάθμης, που πραγματοποιούνται από διάφορα σταθμήμετρα, τις περισσότερες φορές σχετιζόμενα μεταξύ τους.

Ακόμη, αναγκαίο βήμα είναι η ομαδοποίηση των μετρήσεων σε υποσύνολα, με τρόπο ώστε η κάθε ομάδα σημείων να περιγράφεται από μία καμπύλη στάθμης παροχής. Αυτό αποτελεί μία ιδιαίτερα επίπονη διαδικασία που προϋποθέτει σημαντική εμπειρία.

Μετά την ομαδοποίηση δύναται να ακολουθήσει ο προσδιορισμός των καμπυλών (μία για κάθε υποσύνολο). Το θεωρητικό μοντέλο κάθε φορά περιγράφει μία συγκεκριμένη καμπύλη που η ισχύς της ορίζεται από την έναρξη και λήξη των χρονικών ορίων.

Στο Σχήμα 5.25 δίνονται οι καμπύλες στάθμης - παροχής που προέκυψαν για μια συγκεκριμένη θέση υδατορεύματος.



Σχήμα 5.25 Απεικόνιση των καμπυλών στάθμης παροχής σε κανονικό διάγραμμα (Πηγή: ΕΥΥΜΠ).

Για κάθε ομάδα σημείων που δημιουργείται από το χρήστη μπορεί να χρησιμοποιείται και διαφορετικό μοντέλο υπολογισμού της κάθε καμπύλης. Η γενική μορφή της καμπύλης είναι η εξής:

$$Q = k(h - a)^b$$

όπου: Q είναι η παροχή, k και b σταθερές της θέσης και a η απόσταση μεταξύ του υψομέτρου του μηδενός του σταθμημέτρου και του υψομέτρου της μηδενικής ροής της διατομής. Άλλες σχέσεις που μπορούν να περιγράψουν την καμπύλη στάθμης - παροχής είναι:

- το πολυώνυμο δευτέρου βαθμού:

$$Q = A_0 + A_1 H + A_2 H^2$$

- το πολυώνυμο λογαρίθμων δευτέρου βαθμού:

$$\ln(Q) = A_0 + A_1 \ln(H) + A_2 \ln(H^2)$$

όπου: Q = η παροχή,
 H = η στάθμη και
 A_0, A_1, A_2 οι συντελεστές των μοντέλων.

5.5.2 Επέκταση της καμπύλης στάθμης-παροχής

Ένα σημαντικό πρόβλημα που συχνά συναντάται, είναι όταν δεν υπάρχουν υδρομετρήσεις στην περιοχή των υψηλών τιμών της στάθμης και παροχής, ενώ υπάρχουν καταγραφές του σταθμημέτρου ή του σταθμηγράφου κατά τη διάρκεια σημαντικών πλημμυρικών επεισοδίων. Για την εκτίμηση λοιπόν της παροχής κατά τη διάρκεια αυτών των επεισοδίων απαιτείται η επέκταση της καμπύλης στάθμης - παροχής.

Η επέκταση της καμπύλης γίνεται συνήθως με βάση την εξίσωση **Manning**:

$$Q = \frac{\overline{J}}{n} AR^{\frac{2}{3}}$$

όπου: Q = η παροχή
 A = το εμβαδόν της διατομής
 R = η υδραυλική ακτίνα
 J = η κλίση τριβών και
 η = ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning

Για τον προσδιορισμό του σταθερού όρου $J^{1/2}/\eta$ χρησιμοποιούνται δεδομένα παροχής από τις υψηλότερες διαθέσιμες υδρομετρήσεις. Ο σταθερός αυτός όρος υπολογίζεται με παλινδρόμηση ανάμεσα στην παροχή και στον όρο $(AR^{2/3})$, όπου μπορεί να υπολογισθεί από τη γεωμετρία της συνολικής διατομής του ποταμού στη θέση αυτή, η οποία θα πρέπει προφανώς να είναι διαθέσιμη. Άλλος τρόπος επέκτασης της καμπύλης γίνεται με χρήση της φόρμουλας Chezy:

όπου Q η παροχή και C μια σταθερά. Με βάση τις υψηλές υδρομετρήσεις μπορεί να προκύψουν και να σχεδιαστούν τα ζεύγη $(Q, AR^{0.5})$ που με γραμμική παλινδρόμηση βοηθούν στον προσδιορισμό του όρου $CJ^{0.5}$.

Ο τρόπος σύνδεσης μεταξύ των καμπυλών της στάθμης - παροχής στα χαμηλά σημεία και της επέκτασης της αφορά στη συναρμογή. Η συναρμογή της καμπύλης είναι μία ευθεία γραμμή που συνδέει την άκρη κάθε καμπύλης της ομάδας με ένα σημείο της επέκτασης ώστε να ικανοποιείται πάντοτε η σχέση $DQ/DH > 0$.

5.5.3 Παρατηρήσεις για την καμπύλη στάθμης-παροχής

Η μεταβλητότητα των καμπυλών επιβάλλει τη συστηματική εκτέλεση μετρήσεων παροχής σε όλη τη διάρκεια που λειτουργεί ο σταθμός χωρίς διακοπή. Διαφορετικά, δεν είναι δυνατό να εντοπιστούν οι μεταβολές της καμπύλης στάθμης-παροχής.

Ωστόσο, η παραδοχή ότι η αλλαγή της καμπύλης γίνεται κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης πλημμύρας (λόγω της διαβρωτικής δύναμης του νερού), συμβάλλει στη θεώρηση ότι η μετάβαση από μια καμπύλη στην επόμενη συμπίπτει χρονικά με τη μέγιστη στάθμη που έχει καταγραφεί από το σταθμήμετρο του σταθμού, στην περίοδο μεταξύ των δύο μετρήσεων παροχής που ανήκουν σε δύο διαδοχικά υποσύνολα.

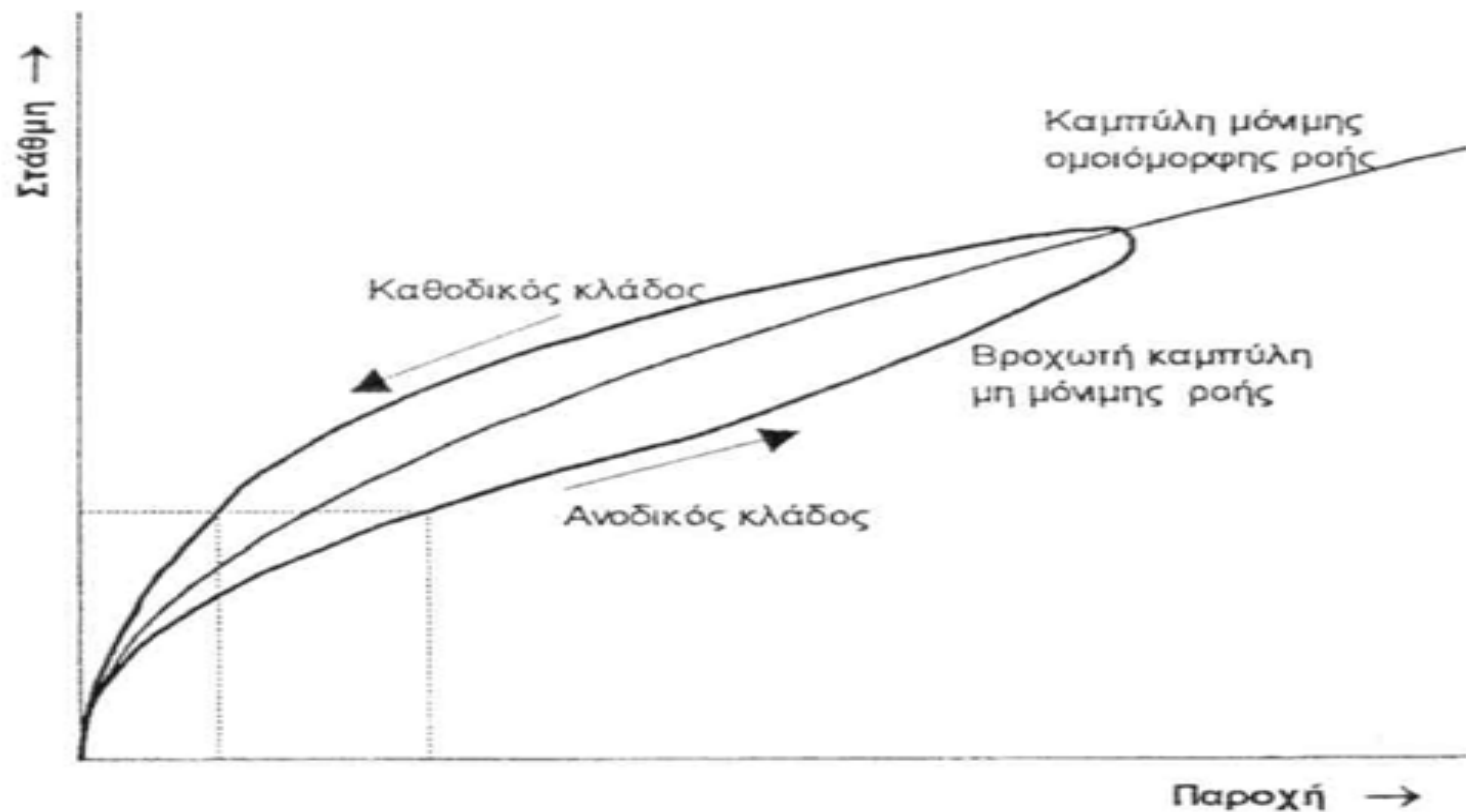
Για μια συγκεκριμένη διατομή υδατορεύματος και μια δεδομένη χρονική περίοδο, στην οποία δεν μεταβάλλεται η διατομή και τα χαρακτηριστικά του υδατορεύματος, υπάρχει μια αμφιμονοσήμαντη αντιστοιχία στάθμης και παροχής.

Όμως, η λεπτομερέστερη μελέτη του θέματος με βάση τις αρχές της υδραυλικής, δείχνει ότι αυτό είναι σωστό μόνο υπό την προϋπόθεση ότι η ροή είναι μόνιμη, προϋπόθεση που δεν ισχύει κατά τη διάρκεια πλημμυρικών επεισοδίων, που χαρακτηρίζονται από έντονες μεταβολές των χαρακτηριστικών ροής στο χρόνο.

Σε περίπτωση μη μόνιμης ροής, η καμπύλη στάθμης-παροχής έχει διαφορετικούς κλάδους ανόδου και καθόδου, κανένας από τους οποίους δε συμπίπτει με την καμπύλη μόνιμης ομοιόμορφης ροής, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο Σχήμα 5.26.

Παρατηρείται, λοιπόν, ότι στο αρχικό στάδιο του πλημμυρικού επεισοδίου, η παροχή αυξάνεται αισθητά, χωρίς η στάθμη να αυξηθεί σε αντίστοιχο βαθμό, ενώ παρόμοια, στο τελικό στάδιο του επεισοδίου, η παροχή μειώνεται με ρυθμό εντονότερο από τον αντίστοιχο ρυθμό μείωσης της στάθμης. Μπορούμε έτσι να πούμε ότι η στάθμη δεν παρακολουθεί επακριβώς τη μεταβολή της παροχής, αλλά όπως φαίνεται και στο σχήμα, για την ίδια τιμή τη στάθμης, η παροχή είναι μεγαλύτερη στην ανοδική φάση της πλημμύρας και μικρότερη στην καθοδική.

Συνήθως, κατά τον υπολογισμό της χρονοσειράς της παροχής από την αντίστοιχη χρονοσειρά της στάθμης, αμελείται η επίδραση αυτού του φαινομένου λόγω της πολυπλοκότητας και της έλλειψης δεδομένων. Έτσι, και στην περίπτωση των πλημμυρικών επεισοδίων εφαρμόζεται μια αμφιμονοσήμαντη σχέση στάθμης - παροχής, γεγονός που αποτελεί μια ακόμη πηγή σφάλματος στην εκτίμηση των πλημμυρικών υδρογραφημάτων. Το σφάλμα είναι σημαντικό όταν η κλίση του υδατορεύματος είναι ήπια.



Σχήμα 5.26 Καμπύλη στάθμης παροχής σε συνθήκες μη μόνιμης ροής.

5.5.4 Εκτίμηση μέσης στάθμης για συγκεκριμένο χρονικό βήμα

Ένα σημαντικό μέρος της επεξεργασίας της σταθμημετρικής πληροφορίας αφορά στην ενοποίηση των σειρών μετρήσεων από το σταθμήμετρο και το σταθμηγράφο, σε περίπτωση φυσικά που υπάρχουν και τα δύο όργανα στον υδρομετρικό σταθμό. Συμβαίνει πολύ συχνά να υπάρχουν ταυτόχρονες μετρήσεις από το σταθμηγράφο και το σταθμήμετρο και να είναι διαφορετικές.

Γενικά τα δεδομένα του σταθμημέτρου αποτελούν μία χρονοσειρά με ημερήσιο βήμα η οποία καταγράφεται σε κατάλληλο έντυπο από τον παρατηρητή, ενώ τα δεδομένα του σταθμηγράφου προκύπτουν από αποκωδικοποίηση της ταινίας με βήμα μισής ώρας ή μίας ώρας.

Κανονικά οι ταυτόχρονες μετρήσεις σταθμημέτρου και σταθμηγράφου θα έπρεπε να συμπίπτουν. Εάν αυτό συνέβαινε τότε τα δεδομένα του σταθμημέτρου θα ήταν πρακτικώς άχρηστα για τις περιόδους που τα δύο όργανα λειτουργούν παράλληλα, γιατί η χρονοσειρά του σταθμηγράφου θα ήταν εξίσου ακριβής και μεγαλύτερης χρονικής διακριτότητας.

Όμως αυτό δεν συμβαίνει γιατί οι θέσεις των δύο οργάνων δεν συμπίπτουν και εξαιτίας των σφαλμάτων που υπεισέρχονται στις μετρήσεις. Στην περίπτωση του σταθμημέτρου υπάρχει μόνο το σφάλμα στην ανάγνωση της στάθμης πάνω στη σταδία, ενώ στην περίπτωση του σταθμηγράφου οι πηγές σφάλματος είναι περισσότερες (π.χ. ελαττώματα στον αισθητήρα, καταγραφικό μηχανισμό, ωρολογιακό μηχανισμό, κακή τοποθέτηση της ταινίας κλπ.).

Για τους λόγους αυτούς θεωρείται ως ορθή η στάθμη του σταθμημέτρου, ενώ για τη χρονοσειρά του σταθμηγράφου απαιτούνται διορθώσεις με βάση τις μετρήσεις του σταθμημέτρου. Ένας επιπλέον λόγος που οι μετρήσεις του σταθμημέτρου λαμβάνονται ως σωστές, είναι ότι για την κατάρτιση της καμπύλης στάθμης-παροχής χρησιμοποιούνται οι μετρήσεις του σταθμημέτρου και όχι του σταθμηγράφου.

Η διόρθωση των μετρήσεων του σταθμηγράφου είναι μία απλή διαδικασία. Συγκεκριμένα στις χρονικές στιγμές t_i όπου υπάρχουν ταυτόχρονες μετρήσεις σταθμημέτρου και σταθμηγράφου λαμβάνονται οι μετρήσεις του σταθμημέτρου, ενώ για τις ενδιάμεσες τιμές στις οποίες υπάρχουν τιμές του σταθμηγράφου διορθώνονται ακολουθώντας μία γραμμική σχέση με το χρόνο.

Για την εκτίμηση της μέσης στάθμης για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα είναι απαραίτητη η λειτουργία σταθμηγράφου. Αρχικά γίνεται η αναγωγή των μετρήσεων του σταθμηγράφου με βάση τις μετρήσεις του σταθμημέτρου και κατόπιν λαμβάνεται η μέση τιμή των μετρήσεων της στάθμης.

Για παράδειγμα, εάν η ψηφιοποίηση έγινε με χρονικό βήμα μισής ώρας, τότε η μέση ημερήσια στάθμη προκύπτει ως η μέση τιμή των 48 τιμών, ενώ εάν η ψηφιοποίηση έγινε με χρονικό βήμα μίας ώρας τότε η μέση ημερήσια στάθμη προκύπτει ως η μέση τιμή των 24 τιμών. Για την εκτίμηση της εβδομαδιαίας, μηνιαίας κλπ. μέσης στάθμης, αυτή προκύπτει ως η μέση τιμή των αντίστοιχων ημερησίων τιμών.

5.5.5 Εκτίμηση παροχών από στάθμες σταθμημέτρου / σταθμηγράφου

Μετά την ανάκτηση και επεξεργασία όλων των σταθμημετρικών/σταθμηγραφικών δεδομένων και την κατάρτιση της ομάδας των καμπυλών στάθμης - παροχής, ακολουθεί ο υπολογισμός των παροχών σε χρονικά βήματα ανάλογα με τα βήματα της εκτιμημένης μέσης στάθμης (ημίωρο, ωριαίο, ημερήσιο κλπ.).

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η κατάλληλη καμπύλη στάθμης - παροχής. Εάν $h_{\sigma}(t)$ η στάθμη που έχει καταγραφεί στη χρονική στιγμή t από το σταθμήμετρο ή το σταθμηγράφο, τότε θα πρέπει από το σύνολο των καμπυλών στάθμης - παροχής που έχουν καταρτιστεί να επιλεγεί αυτή που ισχύει στο χρόνο t για την μετατροπή της στάθμης σε αντίστοιχη παροχή. Εάν όμως στον ίδιο χρόνο t έχει πραγματοποιηθεί μέτρηση της παροχής, κατά την οποία καταγράφηκε στάθμη $h_{\Pi}(t)$ και παροχή $Q_{\Pi}(t)$, τότε η εφαρμογή της σχέσης στάθμης - παροχής δε θα δώσει τη μετρημένη παροχή $Q_{\Pi}(t)$, αλλά μία διαφορετική παροχή, δεδομένου ότι η καμπύλη δεν περνά ακριβώς από τα σημεία (h_{Π}, Q_{Π}) αλλά τα προσεγγίζει.

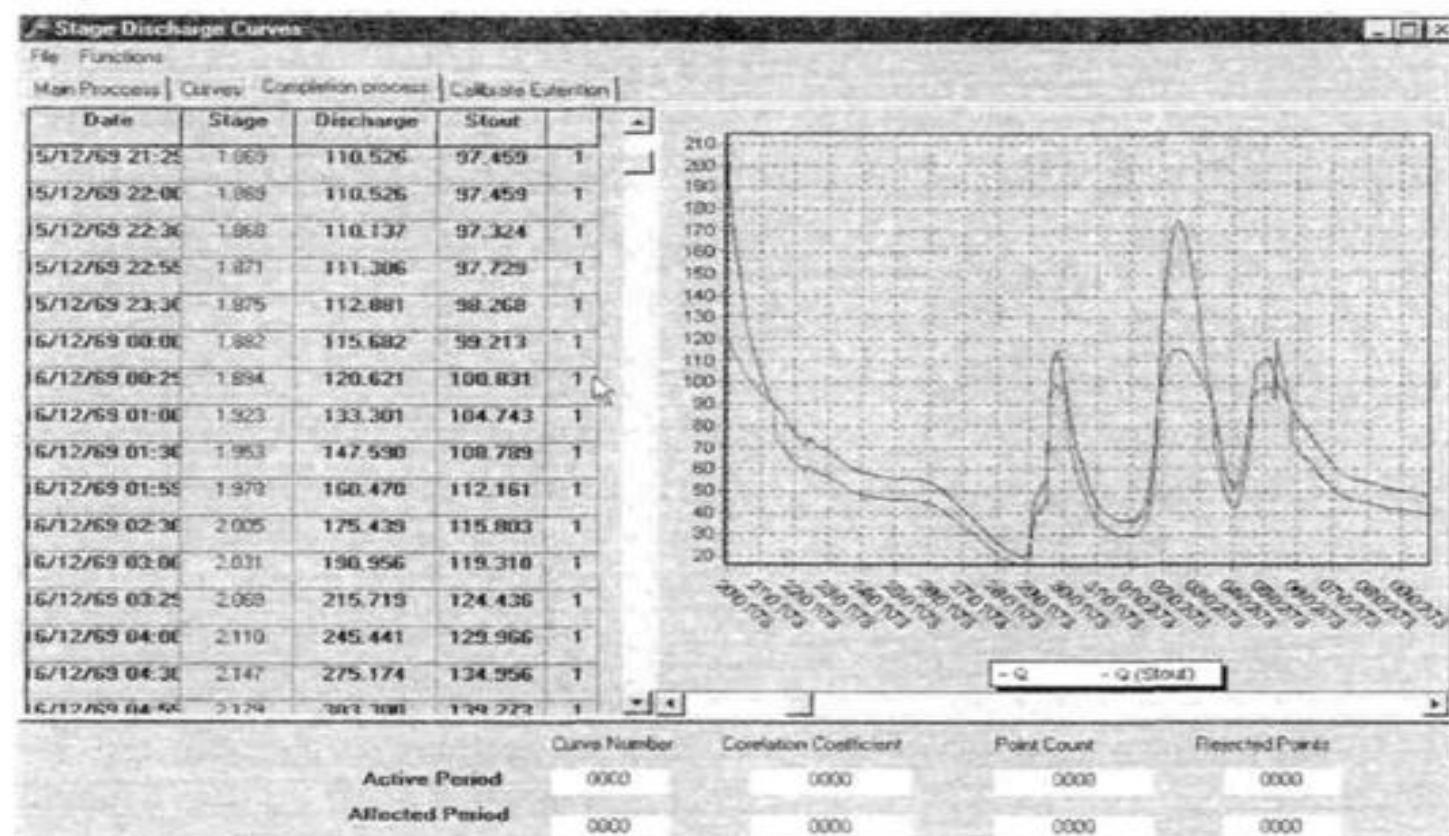
Για την άρση αυτού του μειονεκτήματος χρησιμοποιείται η διόρθωση Stout ή διόρθωση στάθμης. Η διόρθωση αυτή γίνεται εφαρμόζοντας την όλη διαδικασία αντίστροφα, δηλαδή για όλους τους χρόνους που έγιναν μετρήσεις παροχής υπολογίζεται η εκτιμημένη στάθμη μέσω της καμπύλης στάθμης -παροχής, η οποία διαφέρει από τη μετρημένη από το σταθμήμετρο στάθμη. Με αυτόν τον τρόπο αποκτάται μία σειρά διαφοράς στάθμης Δh μη μηδενική όπου γίνεται η παραδοχή ότι το μέγεθος Δh ανάμεσα στις χρονικές στιγμές t_i και t_{i+1} μεταβάλλεται γραμμικά.

Έχοντας πλέον δεδομένες τις διορθώσεις στάθμης σε κάθε χρόνο t , για τον οποίο υπάρχει μέτρηση στάθμης, σχηματίζουμε τη διορθωμένη σειρά στάθμης h_δ ($h_\delta = h_\sigma - \Delta h$) και έτσι εφαρμόζοντας την καμπύλη στάθμης -παροχής αποκτούμε τη διορθωμένη σειρά εκτιμήσεων παροχής.

Στο Σχήμα 5.27 φαίνεται η χρονοσειρά παροχών με βήμα μισής ώρας χωρίς και με διόρθωση της στάθμης (διόρθωση Stout).

Για την εκτίμηση των μέσων ημερησίων παροχών γίνεται μετατροπή της στάθμης, υψηλής χρονικής ανάλυσης (π.χ. ανά μισή ώρα) σε αντίστοιχες παροχές και κατόπιν μετατροπή αυτών των τιμών σε ημερήσιες, εβδομαδιαίες, μηνιαίες, ετήσιες κλπ.

Η υπολογιστική διαδικασία εκτίμησης της παροχής με διόρθωση και χωρίς διόρθωση στάθμης δίνεται στο παρακάτω παράδειγμα.



Σχήμα 5.27 Εκτίμηση της χρονοσειράς παροχών με βήμα μισής ώρας χωρίς και με διόρθωση της στάθμης (Πηγή: ΕΤΥΜΠ).

5.6 ΣΧΕΣΕΙΣ ΒΡΟΧΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ - ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία όσον αφορά στην ανάλυση πλημμυρογραφημάτων είναι η εκτίμηση της πλημμυρικής αιχμής. Οι πρώτες μέθοδοι που διερευνήθηκαν για το σκοπό αυτό ήταν εμπειρικές, ενώ σήμερα χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο εξελιγμένες μέθοδοι που σχετίζονται με τη θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος και της ανάλυσης συχνότητας.

Άλλα βασικά στοιχεία στην ανάλυση βροχής - απορροής είναι ο πλημμυρικός όγκος για ένα μεμονωμένο επεισόδιο ή για μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο, καθώς και ο χρόνος ανόδου και η διάρκεια βάσης του πλημμυρογραφήματος.

Η επιλογή της μεθόδου που σε κάθε περίπτωση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για μια τέτοιου είδους ανάλυση γίνεται με βάση ορισμένα κριτήρια, τα βασικότερα από τα οποία είναι (Παπαζαφειρίου, 1983):

- **Τα διαθέσιμα δεδομένα**

Αν υπάρχουν μακρόχρονες υδρολογικές παρατηρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν στατιστικές διαδικασίες αναλύσεως, ενώ η επιτυχία τέτοιων μεθόδων είναι περιορισμένη όταν τα διαθέσιμα δεδομένα είναι περιορισμένα.

- **Η έκταση και τα άλλα χαρακτηριστικά της υδρολογικής λεκάνης**

Τα χαρακτηριστικά αυτά διαμορφώνουν το σχήμα του υδρογραφήματος γενικά και ειδικότερα το μέγεθος και το χρόνο εμφάνισης της αιχμής. Στο μέρος αυτό αναλύονται μερικές αντιπροσωπευτικές εμπειρικές μέθοδοι εκτιμήσεως των πλημμυρικών αιχμών.

- **Ο επιδιωκόμενος σκοπός**

Αν ένα υδραυλικό έργο πρέπει να σχεδιαστεί με βάση την πλημμυρική αιχμή ή το συνολικό πλημμυρικό όγκο.

Στην παράγραφο αυτή γίνεται αναφορά στην εκτίμηση πλημμυρικών αιχμών με χρήση εμπειρικών μεθόδων που περιγράφονται παρακάτω.

5.6.1 Η ορθολογική μέθοδος εκτίμησης των πλημμυρικών αιχμών

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της αιχμής της απορροής μικρών σχετικά υδρολογικών λεκανών (<35 km²) και βασίζεται στην αρχή ότι, για βροχές με ομοιόμορφη ένταση και κατανομή πάνω στη λεκάνη, η μέγιστη απορροή εμφανίζεται όταν το νερό από όλα τα σημεία της λεκάνης φτάνει στην έξοδο της. Η απορροή αυτή αποτελεί ένα συγκεκριμένο ποσοστό της εντάσεως της βροχής που την προκαλεί, Η ορθολογική μέθοδος εκφράζεται με τη σχέση:

$$Q_p = 0.278CIA$$

Όπου:

Q_p είναι η αιχμή της απορροής σε m³/sec,

C είναι μια αδιάστατη παράμετρος γνωστή ως συντελεστής απορροής,

I είναι η ένταση της βροχής σε mm/hr και

A είναι η επιφάνεια της υδρολογικής λεκάνης σε km².

Για τη σωστή χρήση της μεθόδου είναι επιβεβλημένο να ξεκαθαριστούν τα όρια εφαρμογής της. Καταρχήν η εφαρμογή της μεθόδου προϋποθέτει ότι η ένταση της βροχής σε όλη τη διάρκεια της είναι ομοιόμορφη, με ομοιόμορφη επίσης χωρική κατανομή πάνω στην υδρολογική λεκάνη. Η συνθήκη αυτή σπανίως ικανοποιείται στη φύση. Επειδή η παραπάνω ομοιομορφία προσεγγίζεται όταν οι υδρολογικές λεκάνες είναι μικρές, ανάλογη θα είναι και η επιτυχία της μεθόδου.

Ένα άλλο στοιχείο που πρέπει να προσεχθεί είναι η εκτίμηση της εντάσεως της βροχής. Για να φτάσουμε στη μέγιστη αιχμή, το νερό πρέπει να φθάσει στην έξοδο της λεκάνης από όλα τα σημεία της, δηλαδή η διάρκεια της βροχής με την ομοιόμορφη ένταση πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με το χρόνο συγκεντρώσεως t_c της υδρολογικής λεκάνης. Τούτο υποδηλώνει ότι η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί για διάρκεια βροχής μικρότερης του t_c . Αλλά και στην περίπτωση που η διάρκεια βροχής είναι μεγαλύτερη του t_c αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσια στη σχέση.

Σύμφωνα με τη συλλογιστική της μεθόδου, η αιχμή της απορροής ανά μονάδα επιφανείας μιας λεκάνης που προκαλείται από βροχή ομοιόμορφης εντάσεως και έχει απεριόριστη διάρκεια, θα είναι:

$$q_p = Q_p / A = Ci$$

που υποδηλώνει ότι ο συντελεστής απορροής C αντιπροσωπεύει την αναλογία q_p/i . Ο συντελεστής απορροής C πρέπει να επιλέγεται με βάση τους ακόλουθους παράγοντες: (1) Το ανάγλυφο της επιφάνειας της λεκάνης (2) την έκταση και την πυκνότητα της φυτοκάλυψης (3) την κλίση των πρανών της λεκάνης (4) την περιεχόμενη στο έδαφος υγρασία κατά την έναρξη της βροχής.

Τα παραπάνω συνιστούν ότι ο συντελεστής απορροής δεν είναι σταθερός ούτε για την ίδια υδρολογική λεκάνη, αφού είναι συνάρτηση της περιεχόμενης στο έδαφος υγρασίας και της εντάσεως της βροχής. Επειδή οι παράγοντες αυτοί είναι αδύνατο να εκτιμηθούν, το C επιλέγεται συνήθως από πίνακες που παίρνουν υπόψη όλους τους άλλους παράγοντες, εκτός από τους δύο παραπάνω. Τέτοιες τιμές που δίνονται από τη U. S. Army Corps of Engineers (1948) παρατίθενται στον Πίνακα 5.10.

Όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω, η ορθολογική μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για βροχές που η διάρκεια τους είναι ίση ή μεγαλύτερη από το χρόνο συγκεντρώσεως. Είναι κατά συνέπεια απαραίτητο να υπάρχει κάποιος τρόπος υπολογισμού του χρόνου αυτού.

Πίνακας 5.10 Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή *C* (για βροχές περιόδου επαναφοράς 5 -10 ετών).

Τύπος Λεκάνης απορροής	Συντελεστής απορροής <i>C</i>
Διαπερατά εδάφη (αμμώδη)	0.10-0.20*
Εδάφη μέσης διαπερατότητας	0.30 - 0.40*
Εδάφη μικρής διαπερατότητας	0.40 - 0.50*
Αστικές περιοχές	0.70 - 0.90*
Βιομηχανικές περιοχές	0.50 - 0.90*
Άλση	0.10-0.25
Οδοστρώματα (ασφαλτικά, σκυρόδεμα)	0.70 - 0.95
Στέγες σπιτιών	0.75-0.95
* Οι μικρότερες τιμές αφορούν δασώδεις περιοχές, οι μεγαλύτερες τιμές αγροτικές περιοχές	

Για την περίπτωση υδρολογικών λεκανών, που τα μήκη διαδρομής είναι σχετικά μεγάλα και οι επιφάνειες τους παρουσιάζουν ανομοιομορφία, έχουν επινοηθεί διάφορες εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό του χρόνου συγκεντρώσεως. Ενδεικτικά αναφέρονται οι σχέσεις που επινόησε ο Kirpich (1940), ο Giandotti και η Soil Conservation Service (SCS).

Η σχέση του **Kirpich** είναι:

$$t_c = 0.1947 L^{0.77} S^{-0.385}$$

όπου t_c είναι ο χρόνος συγκεντρώσεως σε min, L είναι το μέγιστο μήκος διαδρομής του νερού πάνω στην υδρολογική λεκάνη σε m και S είναι η κλίση που ισούται με το λόγο H/L , όπου H είναι η υψομετρική διαφορά σε m ανάμεσα στο πιο ψηλό σημείο της λεκάνης και την έξοδο της.

Η σχέση του Giandotti είναι:

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

όπου: A = η έκταση της λεκάνης απορροής σε km^2 ,
 L = η απόσταση του κυρίως ρεύματος μέχρι την έξοδο της λεκάνης σε km και
 ΔH = η διαφορά του μέσου υψόμετρου της λεκάνης από το υψόμετρο στην έξοδο της λεκάνης

Η σχέση της SCS είναι:

$$t_c = \frac{L^{1.15}}{7700H^{0.38}}$$

όπου: t_c = ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης σε ώρες,
L = το μήκος του κυρίως ρεύματος σε ft και
H = η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στο πλέον
απομακρυσμένο σημείο και στην έξοδο της λεκάνης.

5.6.2 Άλλες εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού αιχμών απορροής.

Εκτός από την ορθολογική μέθοδο, διάφορες άλλες εμπειρικές σχέσεις έχουν διερευνηθεί για την εκτίμηση αιχμών πλημμύρων, που χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που τα υδρολογικά δεδομένα για μια περιοχή είναι ανεπαρκή. Οι δυσκολίες που παρουσιάζονται κατά την εφαρμογή των μεθόδων αυτών δεν οφείλονται στο γεγονός ότι αυτές είναι εμπειρικές, αλλά στην έλλειψη της γνώσεως των ειδικών συνθηκών κάτω από τις οποίες η κάθε μια μπορεί να εφαρμοσθεί.

Οι πιο συνηθισμένες και πιο απλές από τις μεθόδους αυτές χρησιμοποιούν σαν παράμετρο την έκταση της υδρολογικής λεκάνης και έχουν τις γενικές μορφές (Παπαζαφειρίου, 1983):

$$Q_m = CA^n$$

$$Q_m = \frac{CA}{(a + bA)^m} dA$$

όπου Q_m είναι η παροχή κατά την αιχμή, A είναι η έκταση της λεκάνης απορροής και C, a, b, d, n, m , είναι συντελεστές που πρέπει να εκτιμηθούν για κάθε δεδομένη περίπτωση. Μια σχέση που διερευνήθηκε από τη U.S. Soil Conservation Service (1957) χρησιμοποιεί, εκτός από την έκταση της λεκάνης A , το ύψος της ενεργού βροχής P_r και το χρόνο ανόδου t_p . Η σχέση έχει τη μορφή:

$$Q_p = 0.210AP_r t_p^{-1}$$

Όπου Q_p είναι σε m^3/sec όταν A είναι σε km^2 , P_r σε mm και t_p σε ώρες.

Τέλος, ο Kinnison (1945) διερεύνησε μια σχέση που, πέρα από την επιφάνεια της λεκάνης απορροής A , χρησιμοποιεί το μέσο υψόμετρο της λεκάνης πάνω από το σημείο εξόδου της h , τη μέση διαδρομή που χρειάζεται να κάνει το νερό για να φθάσει στην έξοδο L_m και το ποσοστό της λεκάνης a που καλύπτεται από φυσικές ή τεχνητές λίμνες. Η σχέση αυτή έχει τη μορφή:

$$Q_p = \frac{(0.000107h^{2.4} + 2.122) A^{0.9}}{a^{0.04} L_m^{0.7}}$$

όπου το Q_p είναι σε m^3/sec όταν το A είναι σε km^2 , το L_m σε km και το a είναι ποσοστό στα εκατό. Η σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε περιπτώσεις που μέρος της λεκάνης καταλαμβάνεται από λίμνες γιατί στην αντίθετη περίπτωση $a = 0$ και το Q_p θα πάρει τιμή άπειρο. Ακόμη πρέπει να διευκρινισθεί ότι η σχέση δίνει την απολύτως μέγιστη αιχμή της λεκάνης.

5.7 ΣΧΕΣΕΙΣ ΒΡΟΧΗΣ - ΑΠΟΡΡΟΗΣ - ΤΟ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑ

Η διαδικασία εκτίμησης τόσο της πλημμυρικής αιχμής όσο και της εν γένει κατανομής της πλημμύρας που προκαλείται από μια βροχή, μπορεί να βασιστεί στο μοναδιαίο υδρογράφημα που πρώτο εισήχθηκε στην υδρολογική ανάλυση απ' τον Sherman (1932).

Κατά τον Sherman, μοναδιαίο υδρογράφημα είναι το υδρογράφημα που προκαλείται από ενεργό βροχή ύψους ίσου με τη μονάδα (στο μετρικό σύστημα ίσης με ένα cm), που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σ' όλη την έκταση της υδρολογικής λεκάνης κι έχει ομοιόμορφη ένταση. Δηλαδή το μοναδιαίο υδρογράφημα είναι ένα υδρογράφημα απορροής που προκαλείται από ενεργό βροχή ίση με 10 mm συγκεκριμένης διάρκειας.

5.7.1 Παραδοχές του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος

Η θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

- Σε μια συγκεκριμένη υδρολογική λεκάνη, βροχές ίσης διάρκειας που προκαλούν απορροή, δίνουν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με την ίδια περίπου χρονική βάση ανεξάρτητα από την ένταση της βροχής.
- Σε μια δεδομένη υδρολογική λεκάνη, η άμεση απορροή που προκαλείται από μια συγκεκριμένη βροχή είναι ανεξάρτητη από τις προηγούμενες βροχές ή τις επόμενες.
- Η κατάσταση της υδρολογικής λεκάνης παραμένει αμετάβλητη σε σχέση με το χρόνο.

Οι παραπάνω προϋποθέσεις μόνο κατά προσέγγιση ικανοποιούνται απ' τις φυσικές υδρολογικές λεκάνες (Wilson, 1990).

Όσον αφορά στο **πρώτο κριτήριο**, είναι εύκολο να παρατηρήσει κανείς ότι η αποθηκευτική ικανότητα των ρευμάτων μεγαλώνει όσο η στάθμη του νερού ανέρχεται. Έτσι, για βροχές της ίδιας διάρκειας, περισσότερο νερό αποθηκεύεται στα ρεύματα όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της βροχής. Το αποθηκευμένο αυτό νερό θα απορρεύσει μετά την παύση της βροχής, με αποτέλεσμα την επιμήκυνση του χρόνου της άμεσης απορροής.

Αναμένεται κατά συνέπεια ότι θα υπάρχει κάποια διακύμανση του χρόνου απορροής ανάλογα με την ένταση της βροχής κι ο καθορισμός ενιαίας χρονικής βάσεως σ' αυτήν την περίπτωση θα πρέπει να είναι αποτέλεσμα παραδοχής.

Η **δεύτερη προϋπόθεση**, η περίπτωση της μη επιρροής στη διαμόρφωση της παρούσας απορροής μιας λεκάνης από μελλοντικές βροχές, είναι από μόνη της αβάσιμη. Αντίθετα, οι βροχές που προηγήθηκαν της απορροής την επηρεάζουν και στο σύνολο της και στα επί μέρους στοιχεία της. Οι προηγούμενες βροχές επηρεάζουν πάντοτε κατά τρόπο ουσιαστικό τη βασική απορροή, έστω κι αν έπεσαν αρκετό χρόνο πριν.

Για το λόγο αυτό, το μοναδιαίο υδρογράφημα δεν μπορεί να εφαρμοσθεί στο σύνολο της απορροής αλλά μόνο στην άμεση απορροή, δηλαδή στο μέρος του υδρογραφήματος που μένει μετά την αφαίρεση της βασικής απορροής. Αλλά και για την περίπτωση αυτή το κριτήριο έχει σχετική μόνο εφαρμογή, μια και η άμεση απορροή εξαρτάται απ' το επίπεδο της υγρασίας του εδάφους και το ποσοστό πληρώσεως των κοιλοτήτων του εδάφους πριν απ' τη βροχή.

Τέλος, **η τρίτη προϋπόθεση** μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει, αφού κανείς δεν περιμένει ουσιαστικές μεταβολές στην κατάσταση των υδρολογικών λεκανών μέσα σε λογικά χρονικά διαστήματα, εκτός κι αν έχουμε επέμβαση του ανθρώπου με κατασκευές έργων ή μεταβολή της φυτοκάλυψης της λεκάνης.

Μετά από μια τέτοια επέμβαση είναι επόμενο ότι η υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης θα διαφοροποιηθεί ανάλογα, οπότε τα μοναδιαία υδρογραφήματα που θα διερευνηθούν θα είναι διαφορετικά απ' αυτά που διερευνήθηκαν πριν απ' την επέμβαση.

Θεωρητικά, ένας απεριόριστος αριθμός μοναδιαίων υδρογραφημάτων θα μπορούσε να διερευνηθεί εξαιτίας των διακυμάνσεων που παρουσιάζει η διάρκεια και η κατανομή των βροχών. Για πρακτικούς όμως λόγους, είναι αναγκαίο να καθοριστεί για κάθε υδρολογική λεκάνη η διάρκεια μιας τυπικής βροχής, για την οποία το μοναδιαίο υδρογράφημα που θα διερευνηθεί σε συνδυασμό με την άμεση απορροή που προκαλεί, να είναι αντιπροσωπευτικό για την υδρολογική αυτή λεκάνη.

Κατά καιρούς έχουν γίνει διάφορες προτάσεις για την εκτίμηση της διάρκειας της τυπικής βροχής. Ο Sherman (1949) συνιστά για λεκάνες με έκταση από 2500 Km² και πάνω διάρκεια τυπικής βροχής από 12 μέχρι 24 ώρες, για λεκάνες από 250 μέχρι 2500 Km² διάρκεια από 6 μέχρι 12 ώρες, για λεκάνες από 50 μέχρι 250 Km² διάρκεια από 2 μέχρι 6 ώρες και για μικρότερες λεκάνες η διάρκεια πρέπει να επιλέγεται σαν το 1/3 ή 1/4 του χρόνου συγκεντρώσεως της υδρολογικής λεκάνης.

Οι Linsley et al.(1949) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η διάρκεια της τυπικής βροχής πρέπει να είναι περίπου το $1/4$ του χρόνου υστέρησης της λεκάνης που, όπως έχει ήδη ορισθεί, είναι ο χρόνος που μεσολαβεί ανάμεσα στο κέντρο βάρους της ενεργού βροχής και της αιχμής του υδρογραφήματος. Πάνω στο ίδιο αντικείμενο το U.S. Army Corps of Engineers (1948), βρήκε ότι για υδρολογικές λεκάνες με έκταση μικρότερη από 250 Km^2 , η διάρκεια της τυπικής βροχής πρέπει να είναι το μισό του χρόνου υστέρησης.

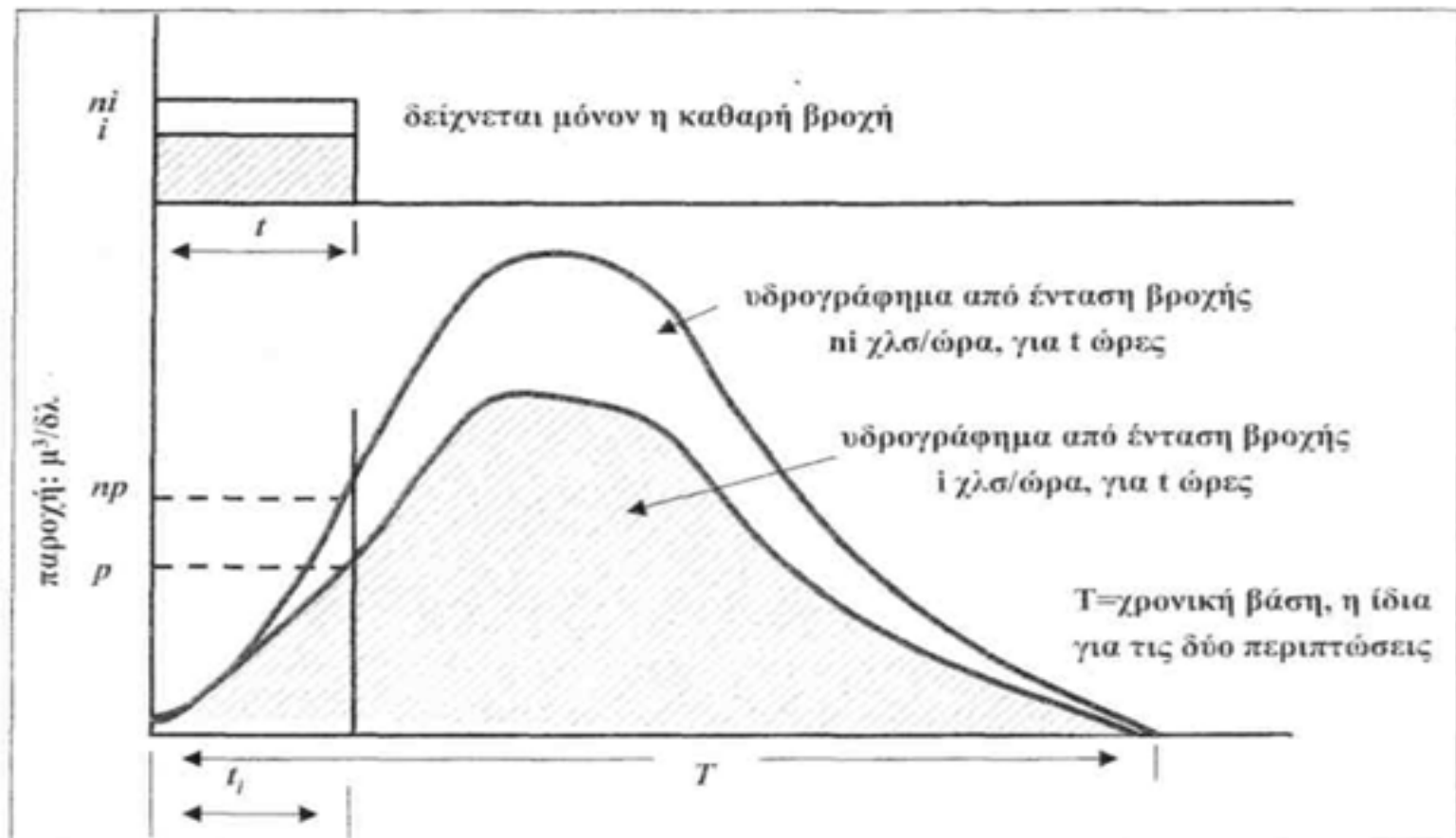
Πέρα απ' την επιλογή της πιο πρόσφορης διάρκειας βροχής για κάθε λεκάνη, καλό είναι να διερευνώνται μοναδιαία υδρογραφήματα και για άλλες διάρκειες μικρότερες ή μεγαλύτερες απ' την επιλεγείσα τυπική. Για λόγους ταξινόμησης, τα διερευνούμενα μοναδιαία υδρογραφήματα χαρακτηρίζονται από τη διάρκεια της ενεργού βροχής απ' την οποία προέρχονται. Έτσι χαρακτηρίζεται ως μοναδιαίο υδρογράφημα διάρκειας 6 ωρών, αυτό που προέκυψε από την άμεση απορροή που έδωσε ενεργός βροχή διάρκειας 6 ωρών κλπ.

Οι δύο βασικές αρχές του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι η αρχή της αναλογίας και η αρχή της επαλληλίας.

Αρχή της αναλογίας

Σύμφωνα με την αρχή της αναλογίας δύο ενεργές βροχές της ίδιας διάρκειας αλλά με διαφορετικές εντάσεις δημιουργούν υδρογραφήματα με την ίδια χρονική βάση αλλά με τεταγμένες σε κάθε χρονική στιγμή που έχουν λόγο μεταξύ τους ίσο με το λόγο των εντάσεων.

Η αρχή της αναλογίας απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 5.28. Η αρχή αυτή είναι άμεσα εξαρτώμενη από τη γραμμικότητα της λεκάνης όπου δηλαδή οι όγκοι απορροής είναι ευθέως ανάλογοι των όγκων βροχής (διπλάσιες βροχές δίνουν διπλάσιους όγκους απορροής). Όσον αφορά στη γραμμικότητα ή μη μιας λεκάνης απορροής αναλυτική περιγραφή γίνεται στο βιβλίο Τεχνολογία Υδατικών Πόρων (Μιμίκου, 1990).

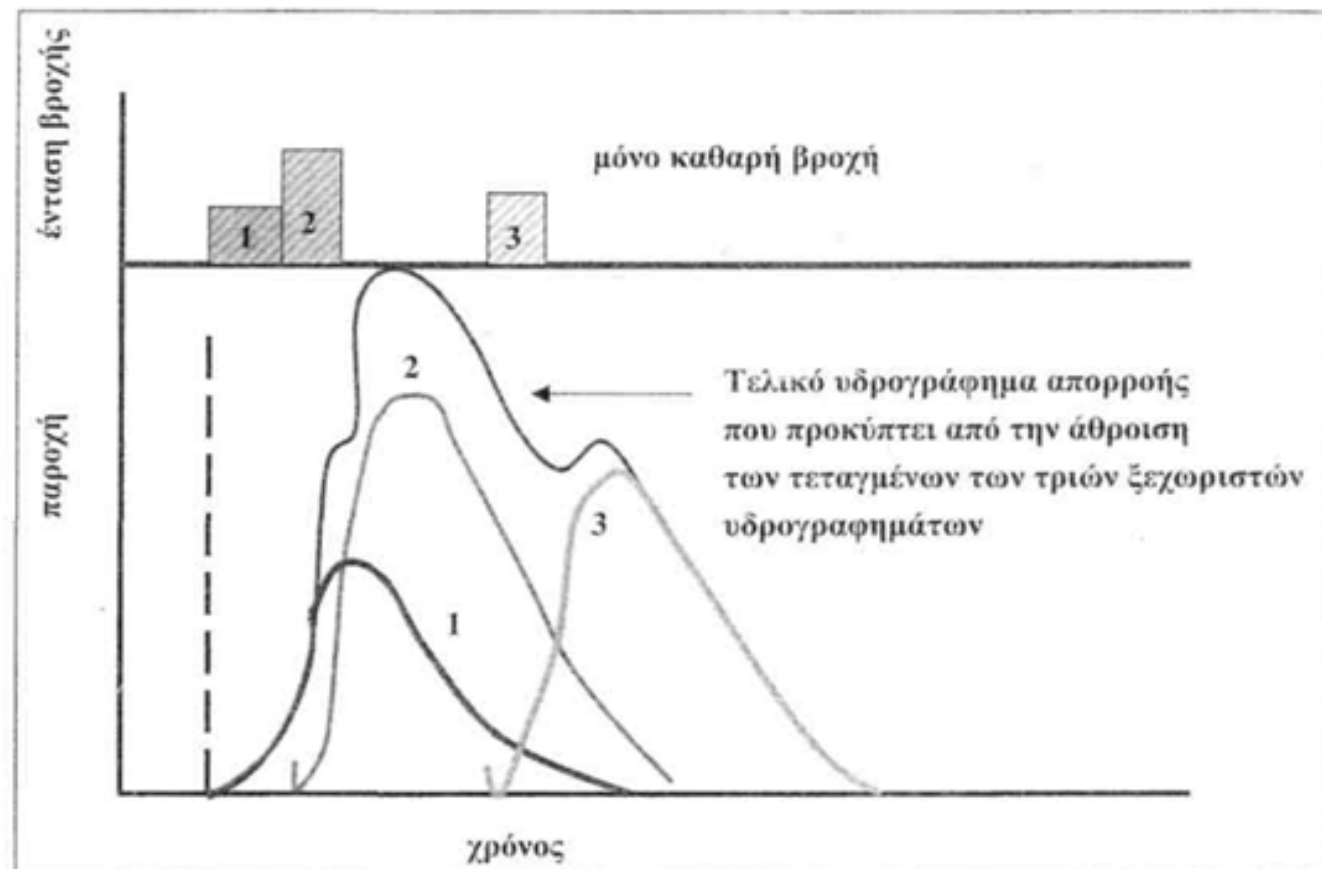


Σχήμα 5.28 Η αρχή της αναλογίας του μοναδιαίου υδρογραφήματος.

Αρχή της επαλληλίας

Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας το συνολικό υδρογράφημα που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις είναι το υδρογράφημα με τεταγμένες το άθροισμα των τεταγμένων των επιμέρους υδρογραφημάτων.

Η αρχή της επαλληλίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.29, όπου το συνολικό πλημμυρογράφημα προκύπτει ως άθροισμα των επιμέρους υδρογραφημάτων που αντιστοιχούν σε τρία επεισόδια ενεργού βροχόπτωσης. Η χρονική αρχή των επιμέρους υδρογραφημάτων που αθροίζονται, ταυτίζεται με την αρχή των αντίστοιχων επεισοδίων ενεργού βροχόπτωσης.



Σχήμα 5.29 Η αρχή της επαλληλίας όπως εφαρμόζεται στο μοναδιαίο υδρογράφημα.

5.7.2 Προσδιορισμός μοναδιαίου υδρογραφήματος από μεμονωμένη βροχή

Τα δεδομένα που χρειάζονται για την εξαγωγή του μοναδιαίου υδρογραφήματος υδρολογικής λεκάνης είναι ταυτόχρονες παρατηρήσεις βροχής και απορροής για ένα χρονικό διάστημα, κατά κανόνα μερικών ετών.

Από τις παρατηρήσεις αυτές επιλέγονται 4-5 βροχές με την ίδια περίπου διάρκεια, ομοιόμορφη κατά το δυνατό κατανομή πάνω στην υδρολογική λεκάνη και σημαντική ένταση.

Τα υδρογραφήματα των βροχών αυτών ανάγονται σε μοναδιαία, από τα οποία στη συνέχεια εξάγεται ένα μέσο μοναδιαίο υδρογράφημα αντιπροσωπευτικό της λεκάνης.

Με την παραδοχή ότι διαλέξαμε μια βροχή με σημαντική ένταση, ομοιόμορφα κατανεμημένη πάνω στην υδρολογική λεκάνη και με διάρκεια αντιπροσωπευτική για τη λεκάνη σύμφωνα μ' αυτά που ελέχθησαν προηγούμενα, η διαδικασία για την κατασκευή του μοναδιαίου υδρογραφήματος ακολουθεί τα παρακάτω στάδια:

- Το συνολικό υδρογράφημα που έδωσε η βροχή χωρίζεται σε άμεση και βασική απορροή
- Σχεδιάζεται το υδρογράφημα της άμεσης απορροής
- Υπολογίζεται ο συνολικός όγκος της άμεσης απορροής και στη συνέχεια εκφράζεται σε μονάδες πάχους υδατίνου στρώματος διαιρώντας με την έκταση της υδρολογικής λεκάνης. Ως μονάδα πάχους λαμβάνεται το ένα cm.

- Διαιρούνται οι τεταγμένες του υδρογραφήματος της άμεσης απορροής με το αντίστοιχο ισοδύναμο πάχος της, όπως υπολογίστηκε στο προηγούμενο στάδιο. Τα μεγέθη που θα προκύψουν από τη διαδικασία αυτή αποτελούν τις τεταγμένες του μοναδιαίου υδρογραφήματος το οποίο και σχεδιάζεται.
- Προσδιορίζεται η διάρκεια της ενεργού βροχής, που σε μέγεθος, είναι κατά τα γνωστά ίση με την άμεση απορροή.

5.7.3 Μαθηματικός προσδιορισμός του μοναδιαίου υδρογραφήματος από σύνθετη βροχή

Η απόκριση μιας γραμμικής λεκάνης σε οποιαδήποτε βροχόπτωση, είναι ανάλογη με το μοναδιαίο υδρογράφημα, όπως προαναφέρθηκε. Η αναλογία αυτή, μπορεί να γενικευτεί και σε σύνθετες καταιγίδες και όχι μόνο σε ένα μεμονωμένο ομοιόμορφο επεισόδιο (Jones, 1997).

Το Σχήμα 5.30, δείχνει μια σύνθετη καταιγίδα, που εκτείνεται για παράδειγμα σε τρεις χρονικές περιόδους. Το μοναδιαίο υδρογράφημα που αντιστοιχεί σε μια χρονική περίοδο ενεργού βροχής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποκτηθεί η απόκριση της σύνθετης καταιγίδας. Με βάση τις τεταγμένες του Σχήματος 5.30, είναι προφανές ότι ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$i_1 h_1 = Q_1$$

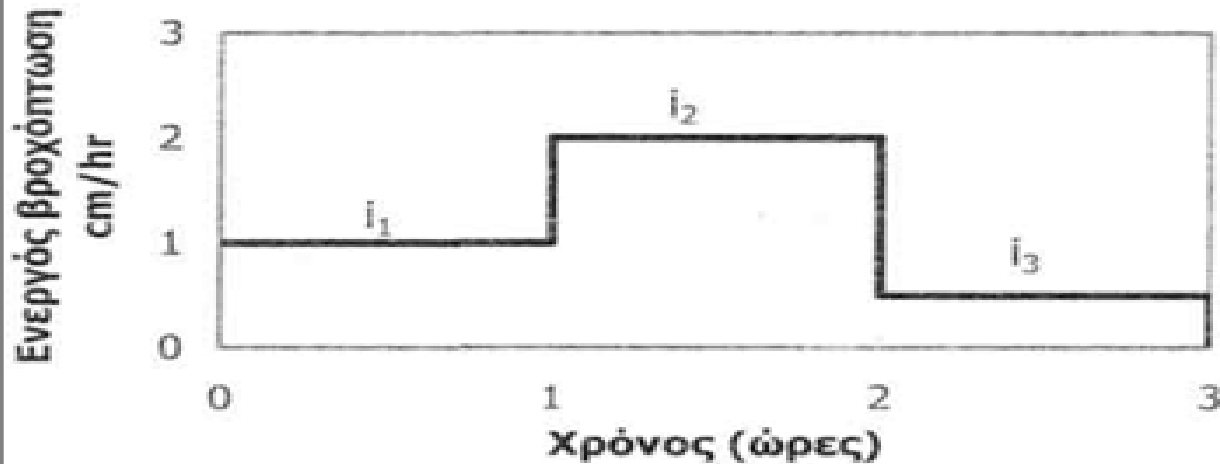
$$i_2 h_1 + i_1 h_2 = Q_2$$

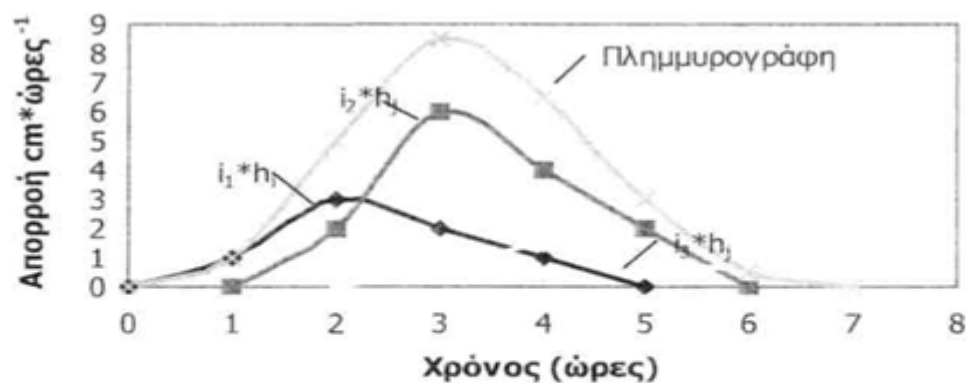
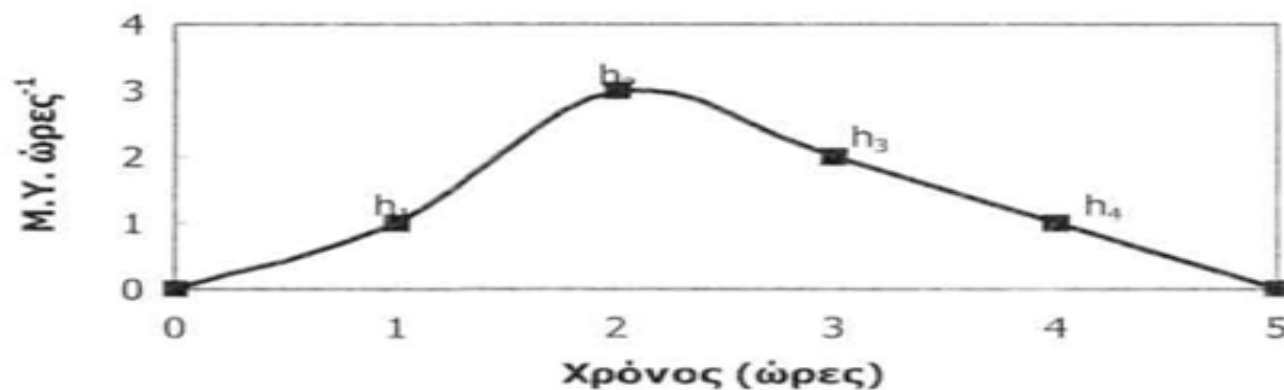
$$i_3 h_1 + i_2 h_2 + i_1 h_3 = Q_3$$

$$i_3 h_2 + i_2 h_3 + i_1 h_4 = Q_4$$

$$i_3 h_3 + i_2 h_4 + 0 = Q_5$$

$$i_3 h_4 + 0 + 0 = Q_6$$





Σχήμα 5.30 Υδρογράφημα από σύνθετη καταιγίδα, όπως αποκτάται με τη βοήθεια του Μ. Υ. (α) Ενεργός βροχόπτωση, (β) μοναδιαίο υδρογράφημα και (γ) πλημμυρογράφημα.

Το παραπάνω σύστημα εξισώσεων θα πρέπει κάθε φορά να επιλύεται για την εκτίμηση των τεταγμένων του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Η γενική μορφή των εξισώσεων μπορεί να εκφραστεί με μορφή πινάκων ως ακολούθως (Bras, 1990):

$$I \cdot H = Q$$

όπου:

$$I = \begin{bmatrix} i_1 & 0 & 0 & 0 \\ i_2 & i_1 & 0 & 0 \\ i_3 & i_2 & i_1 & 0 \\ 0 & i_3 & i_2 & i_1 \\ 0 & 0 & i_3 & i_2 \\ 0 & 0 & 0 & i_3 \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad Q = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \end{bmatrix}$$

Να σημειωθεί ότι ο αριθμός των τεταγμένων k του πλημμυρογραφήματος δίνεται από τη σχέση:

$$k = n + j - 1$$

οπού n είναι ο αριθμός των τεταγμένων του Μ.Υ., και j ο αριθμός των τεταγμένων της ενεργού βροχόπτωσης.

Η γενική μορφή της εξίσωσης που περιγράφει τον τρόπο υπολογισμού του υδρογραφήματος είναι:

$$Q_i = \sum_{j=1}^i i_j h_{i-j+1}$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι γνωστή και ως ολοκλήρωμα ανέλιξης (convolution integral).

5.7.4 Προσδιορισμός Μ.Υ. ορισμένης διάρκειας από γνωστό Μ.Υ. διαφορετικής διάρκειας - Καμπύλη S.

Ο προσδιορισμός ενός μοναδιαίου υδρογραφήματος, με διάρκεια που είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της διάρκειας ενός γνωστού μοναδιαίου υδρογραφήματος, είναι σχετικά απλή.

Αν π.χ. από ένα μοναδιαίο υδρογράφημα διάρκειας 6 ωρών πρέπει να εξαχθεί άλλο διάρκειας 12 ωρών, στο μοναδιαίο υδρογράφημα των 6 ωρών προστίθεται ο εαυτός του με καθυστέρηση 6 ωρών. Το υδρογράφημα που θα προκύψει θα είναι διάρκειας 12 ωρών αλλά θα έχει όγκο ισοδύναμο με δύο cm πάχους υδατίνου στρώματος, αφού κάθε μοναδιαίο υδρογράφημα διάρκειας 6 ωρών έχει όγκο ισοδύναμο με ένα cm πάχους υδατίνου στρώματος. Αν οι τεταγμένες του υδρογραφήματος αυτού διαιρεθούν με το 2, το υδρογράφημα που θα προκύψει θα έχει ισοδύναμο όγκο ενός cm και θα είναι το μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης διάρκειας 12 ωρών. Ο τρόπος αυτός διερευνήσεως είναι γνωστός ως μέθοδος μετατοπίσεως του υδρογραφήματος.

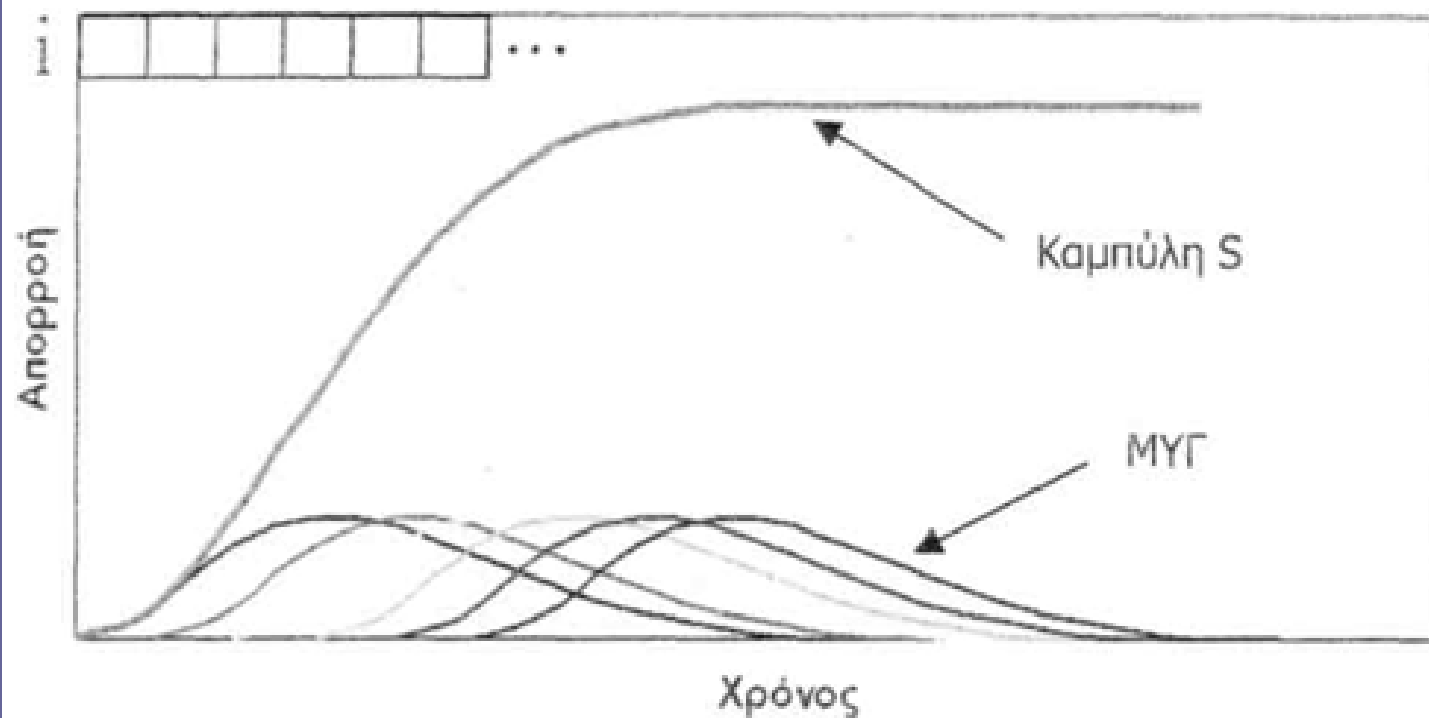
Ενώ, όπως φάνηκε από τα προηγούμενα, είναι πολύ απλό να κατασκευαστούν μοναδιαία υδρογραφήματα με διάρκεια ακέραια πολλαπλάσια άλλων γνωστών, εμφανίζονται δυσκολίες όταν θέλουμε να μικρύνουμε ή να μεγαλώσουμε τη χρονική διάρκεια κατά ένα κλάσμα της. Για την περίπτωση αυτή ακολουθείται συνήθως μια διαδικασία που είναι γνωστή ως καμπύλη S .

Η καμπύλη S είναι η αναμενόμενη απόκριση της λεκάνης σε μια απεριόριστη διαδοχική σειρά καταιγίδων συγκεκριμένης διάρκειας. Σύμφωνα με τη θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος, η απόκριση αυτή είναι το άθροισμα των τεταγμένων των άπειρων σε πλήθος ίδιων μοναδιαίων υδρογραφημάτων γνωστής διάρκειας.

Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 5.31. Η καμπύλη S διάρκειας D -ωρών, αποκτάται προσθέτοντας τα αντίστοιχα μοναδιαία υδρογραφήματα D -ωρών, το καθένα μετατοπισμένο κατά D .

Η καμπύλη σχήματος S που δημιουργείται, λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της και σταθεροποιείται σε αυτήν, μετά από την πρόσθεση T/D μοναδιαίων υδρογραφημάτων, όπου T είναι η χρονική διάρκεια της βάσης του αρχικού μοναδιαίου υδρογραφήματος D -ωρών.

Αφού η ενεργός ένταση της υποτιθέμενης καταιγίδας ομοιόμορφου όγκου πρέπει να είναι $1/D$, η καμπύλη S μεγιστοποιείται και σταθεροποιείται στην τιμή $Q=1/D$, σε μονάδες όγκου ανά επιφάνεια και χρόνο ή A/D σε μονάδες όγκου ανά χρόνο, όπου A η επιφάνεια της λεκάνης απορροής.

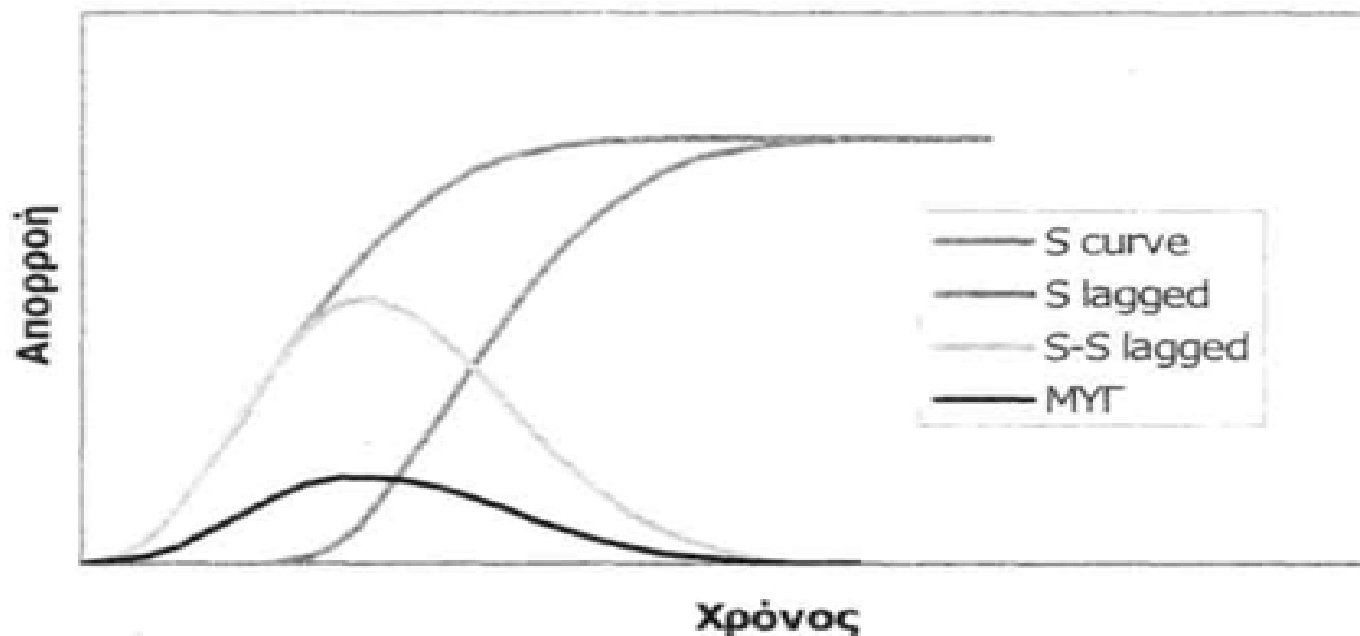


Σχήμα 5.31 Υπολογισμός καμπύλης S από ΜΥΓ.

Η καμπύλη S διάρκειας D -ωρών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση του μοναδιαίου υδρογραφήματος οποιασδήποτε άλλης διάρκειας t . Χρησιμοποιώντας την ιδιότητα της γραμμικότητας, η διαδικασία είναι η εξής:

- Μετατοπίζουμε την καμπύλη S κατά t ώρες.
- Αφαιρούμε τις τεταγμένες της μετατοπισμένης καμπύλης. Το αποτέλεσμα είναι ένα υδρογράφημα όγκου t/D .
- Ανάγουμε το προκύπτον υδρογράφημα σε μοναδιαίο όγκο, πολλαπλασιάζοντας επί D/t .

Η διαδικασία αυτή όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.32, καταλήγει στο Μ.Υ. t ωρών.



Σχήμα 5.32 Κατασκευή ΜΥΓ από καμπύλη S.

Κατά τη διαδικασία κατασκευής μιας καμπύλης S από ένα δεδομένο μοναδιαίο υδρογράφημα, πολλές φορές παρατηρείται μια, συμμετρική κατά κανόνα, διακύμανση των τιμών της γύρω από μια μέση τιμή, που γίνεται πιο έντονη καθώς πλησιάζουμε προς το τέλος της.

Η διακύμανση αυτή οφείλεται κατά κύριο λόγο στην έλλειψη ακρίβειας κατά την επιλογή της διάρκειας του μοναδιαίου υδρογραφήματος, στο ότι δηλαδή η πραγματική διάρκεια του μοναδιαίου υδρογραφήματος διαφέρει κάπως από αυτή που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς. Στην περίπτωση αυτή χρειάζεται να γίνει μια εξομάλυνση της καμπύλης S για την σωστή προσαρμογή της στις κανονικές τιμές.

5.7.5 Εκτίμηση του πλημμυρογραφήματος με τη βοήθεια του μοναδιαίου υδρογραφήματος.

Όταν έχει υπολογιστεί το μοναδιαίο υδρογράφημα μιας υδρολογικής λεκάνης (από ταυτόχρονες παρατηρήσεις βροχής και απορροής), μπορεί τούτο να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή υδρογραφημάτων άμεσης απορροής μόνο από βροχομετρικά δεδομένα.

Με τον τρόπο αυτό τα υπάρχοντα δεδομένα απορροής μιας υδρολογικής λεκάνης μπορεί να επεκταθούν και να καλύψουν περιόδους για τις οποίες υπάρχουν μεν παρατηρήσεις βροχής όχι όμως και απορροής.

Είναι όμως απαραίτητο, στο σημείο αυτό, να τονισθούν και οι περιορισμοί στους οποίους υπόκειται η υδρολογική ανάλυση που βασίζεται το μοναδιαίο υδρογράφημα.

Το μοναδιαίο υδρογράφημα, όπως τονίστηκε σε αρκετά σημεία παραπάνω, προκύπτει με βάση κάποια συγκεκριμένη βροχή. Η κατανομή της βροχής αυτής πάνω στην υδρολογική λεκάνη είναι φυσικό να έχει επιπτώσεις στο σχήμα του υδρογραφήματος.

Έτσι, η ομοιομορφία κατανομής της βροχής επιβάλλει ένα ανώτερο όριο στο μέγεθος της υδρολογικής λεκάνης, μέχρι το οποίο η μέθοδος αυτή θα μπορούσε να εφαρμοσθεί με αποδεκτή αξιοπιστία. Το ποιο πρέπει να είναι αυτό το ανώτερο όριο μεγέθους αποτελεί ένα πρόβλημα που μέχρι τώρα δεν έχει λυθεί.

Γενικά μπορεί να λεχθεί ότι, για μια σωστή επιλογή πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σοβαρά ο τύπος του κατακρημνίσματος, όπως και το ανάγλυφο, η μέση κλίση και το σχήμα της υδρολογικής λεκάνης. Έτσι, αν σε μια περιοχή επικρατούν ανοδικές ή ορογραφικές βροχές, η μέγιστη έκταση των λεκανών θα πρέπει να είναι μικρότερη απ' ό,τι σε μια άλλη περιοχή που επικρατούν μετωπικές ή κυκλωνικές βροχές.

Ενδεικτικά μπορεί να λεχθεί ότι στην πρώτη περίπτωση η έκταση των λεκανών δεν πρέπει να ξεπερνά τα 5000 Km², ενώ στη δεύτερη το όριο φτάνει στα 10000 με 12000 Km².

Όσον αφορά στο κάτω όριο του μεγέθους μιας λεκάνης, αυτό έχει σχέση κατά κύριο λόγο με τα χρονικά διαστήματα που μεσολαβούν ανάμεσα στις διαδοχικές υδρολογικές παρατηρήσεις. Αν οι παρατηρήσεις βροχής γίνονται μια φορά στο 24ωρο, η έκταση της λεκάνης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε ο χρόνος συγκεντρώσεως του νερού να είναι μεγαλύτερος από 24 ώρες.

Στην περίπτωση αυτή η έκταση της λεκάνης, κατά μέσο όρο, πρέπει να είναι τουλάχιστο της τάξεως των 2000 Km², υπό ορισμένες δε προϋποθέσεις (σχήμα λεκάνης μακρόστενο, μικρές κλίσεις πρανών και ρευμάτων κλπ), το όριο μπορεί να κατέβει στα 1000 Km².

Η υδρολογική ανάλυση με βάση το μοναδιαίο υδρογράφημα μπορεί να εφαρμοσθεί μόνο όταν τα χαρακτηριστικά των ρευμάτων της υδρολογικής λεκάνης παραμένουν αμετάβλητα με το χρόνο.

Ακόμη, αυτή μπορεί να εφαρμοσθεί σε περιοχές που δεν έχουν σημαντική δυνατότητα συγκρατήσεως νερού στην επιφάνεια τους, γιατί η αναλογία ανάμεσα στο ρυθμό και τον όγκο απορροής που προϋποθέτει η θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος, συνεπάγεται γραμμική σχέση ανάμεσα στην παροχή του ρεύματος και του αποθηκευμένου στην επιφάνεια της λεκάνης νερού.

Η συνθήκη αυτή παραβιάζεται όταν στη λεκάνη υπάρχουν τεχνητές ή φυσικές λίμνες που μπορεί να συγκρατήσουν σημαντικό όγκο νερού ή όταν, στις πεδινές περιοχές των λεκανών, γίνεται υπερχείλιση του νερού του κύριου ρεύματος προς τις εκατέρωθεν εκτάσεις, οπότε το αποτέλεσμα είναι το ίδιο με την περίπτωση υπάρξεως τεχνητής λίμνης.

Τέλος, αρκετά προβλήματα δημιουργούνται όταν μέρος ή το σύνολο του νερού της απορροής προέρχεται από τήξη χιονιού. Σε τέτοιες περιπτώσεις χρειάζεται μεγάλη προσοχή, και πριν εφαρμοσθεί η μέθοδος, πρέπει να επιλυθούν ορισμένα ειδικά προβλήματα σχετικά με την έκταση και το ρυθμό τήξεως, την κατανομή των ποσοστών της απορροής που προέρχονται από βροχή και τήξη κ.ο.κ.

Εφόσον συντρέχουν οι προϋποθέσεις εφαρμογής της μεθόδου του μοναδιαίου υδρογραφήματος, όταν ένα τέτοιο υδρογράφημα διερευνηθεί για μια υδρολογική λεκάνη, τούτο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή υδρογραφημάτων άμεσης απορροής της λεκάνης αυτής για οποιαδήποτε βροχή.

Η κατασκευή τέτοιων υδρογραφημάτων μπορεί να γίνει με την ακόλουθη διαδικασία:

1. Υπολογίζεται η ενεργός βροχή με μια από τις γνωστές μεθόδους (Φ, W κλπ.).
2. Υπολογίζεται το υδρογράφημα της άμεσης απορροής για κάθε περίοδο που έχει ενεργό βροχή, πολλαπλασιάζοντας με το ύψος της ενεργού βροχής της περιόδου αυτής τις τεταγμένες του κατάλληλου μοναδιαίου υδρογραφήματος, δηλαδή του μοναδιαίου υδρογραφήματος διάρκειας ίσης με την περίοδο.
3. Οι τεταγμένες των υδρογραφημάτων της άμεσης απορροής κάθε περιόδου προσθέτονται γραμμικά, αφού πρώτα γίνει η πρέπουσα χρονική μετάθεση.

5.7.6 Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder

Τα συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα χρησιμοποιούνται στις θέσεις όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις. Μεγάλη σημασία σ' αυτές τις μεθόδους, που είναι εμπειρικές, έχει η ρύθμιση των παραμέτρων που υπάρχουν στις σχέσεις υπολογισμού της αιχμής και του χρόνου διάρκειας μεταξύ του κέντρου βάρους της βροχής και της αιχμής.

Η πιο γνωστή μέθοδος κατασκευής συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος, είναι η μέθοδος Snyder, η οποία προέκυψε από αναλύσεις μεγάλου αριθμού βροχοπτώσεων στην περιοχή των Απαλλαχίων, στη Βόρεια Αμερική.

Η μέθοδος αυτή προσδιορίζει το χρόνο υστέρησης t_0 την αιχμή Q_p , το χρόνο βάσης T , καθώς και τα πλάτη του ΜΥΓ W_{50} και W_{75} σε χρόνο που αντιστοιχεί στο 50% και 75% της αιχμής (McCuen, 1998).

Οι εξισώσεις που διέπουν το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα του Snyder είναι:

$$t_p = C_t (L_{ca} L)^{0.3} \quad (hr)$$

$$Q_p = C_p \frac{640 \cdot A}{t_p} \quad ft^3/s$$

$$T = 3 + 3 \cdot \left(\frac{t_p}{24} \right) \quad (ημέρες)$$

όπου:

L_{ca} = η απόσταση του παροχομετρικού σταθμού (στην έξοδο της λεκάνης) από το κέντρο βάρους της λεκάνης, που μετριέται κατά μήκος της κοίτης του κύριου υδατορεύματος ως το πλησιέστερο σημείο του κέντρου βάρους (mi).

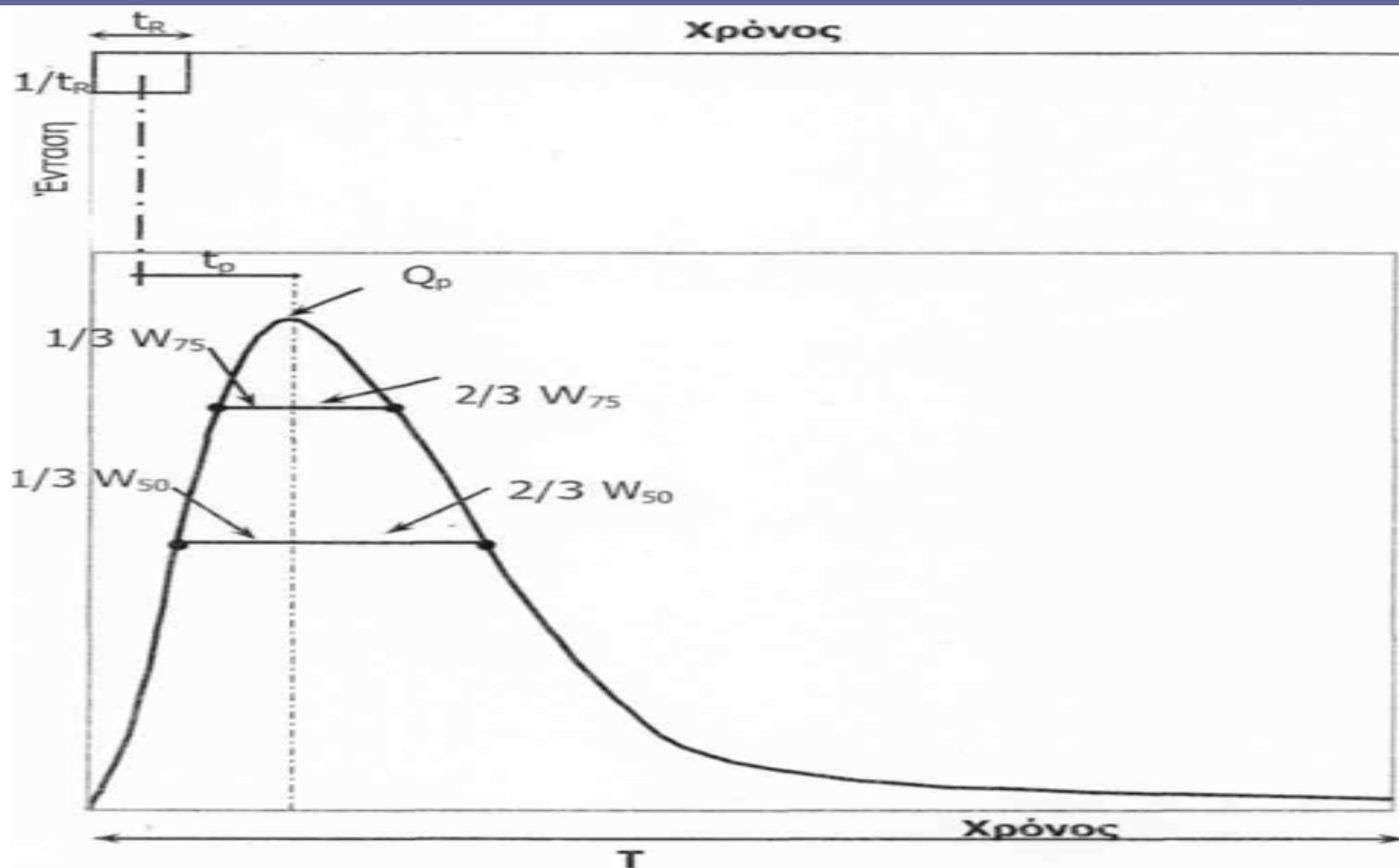
L = η απόσταση του σταθμού ως τον υδροκρίτη, που μετριέται κατά μήκος του κύριου ρεύματος (mi).

C_t = συντελεστής που αντιπροσωπεύει τα τοπογραφικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης (κυμαίνεται από 1.80 μέχρι 2.20). Για λεκάνες με μεγάλες κλίσεις η τιμή του C_t τείνει στη χαμηλότερη τιμή.

C_p = συντελεστής που εξαρτάται από τις μονάδες και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης (κυμαίνεται από 0.56 έως 0.69).

A = η έκταση της λεκάνης (mi²).

T = η χρονική βάση του υδρογραφήματος. Η εξίσωση δίνει μια ελάχιστη τιμή ίση με 3 ημέρες.



Σχήμα 5.34 Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder.

Υπενθυμίζεται ότι ο χρόνος υστέρησης μετράται από το κέντρο βάρους της ενεργού βροχόπτωσης μέχρι την αιχμή του πλημμυρογραφήματος. Η διάρκεια ενεργού βροχόπτωσης t_R , συνδέεται με τη χρονική υστέρηση με τη σχέση:

$$t_R = t_p / 5.5$$

Αν το ζητούμενο ΜΥΓ έχει διάρκεια t_R' μεγαλύτερη της t_R ο χρόνος υστέρησης διορθώνεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$t_p' = t_p + \frac{(t_R' - t_R)}{4}$$

Η διορθωμένη αυτή τιμή του χρόνου υστέρησης πρέπει να αντικατασταθεί στις σχέσεις (5.42) για να υπολογιστούν οι διορθωμένες τιμές των Q_p' και T' .

Τα πλάτη του ΜΥΓ στο 50% και 75% της αιχμής, W_{50} και W_{75} , δίνονται από τις σχέσεις:

$$W_{50} = \frac{830}{q_p^{1.1}}$$

$$W_{75} = \frac{470}{q_p^{1.1}}$$

όπου $q_p = Q_p/A$ παροχή αιχμής ανηγμένη στην επιφάνεια της λεκάνης A.

Με υπολογισμό των πιο πάνω μεγεθών, προσδιορίζονται συνολικά 7 σημεία του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος (συμπεριλαμβανομένων αυτών της αρχής και του τέλους) και με αυτά γίνεται η χάραξη του.