

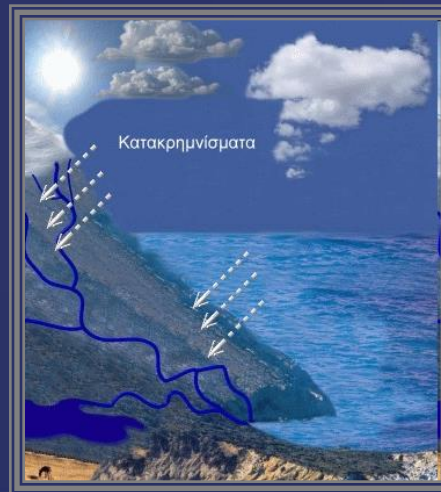


ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΡΑΚΗΣ

Πολυτεχνική Σχολή
Τομέας Υδραυλικών Έργων
Εργαστήριο Υδρολογίας και Υδραυλικών Έργων

Τεχνική Υδρολογία

Κεφάλαιο 2^ο : Κατακρημνίσματα



Φώτιος Π. ΜΑΡΗΣ
Αναπλ. Καθηγητής

2.1 Γενικά

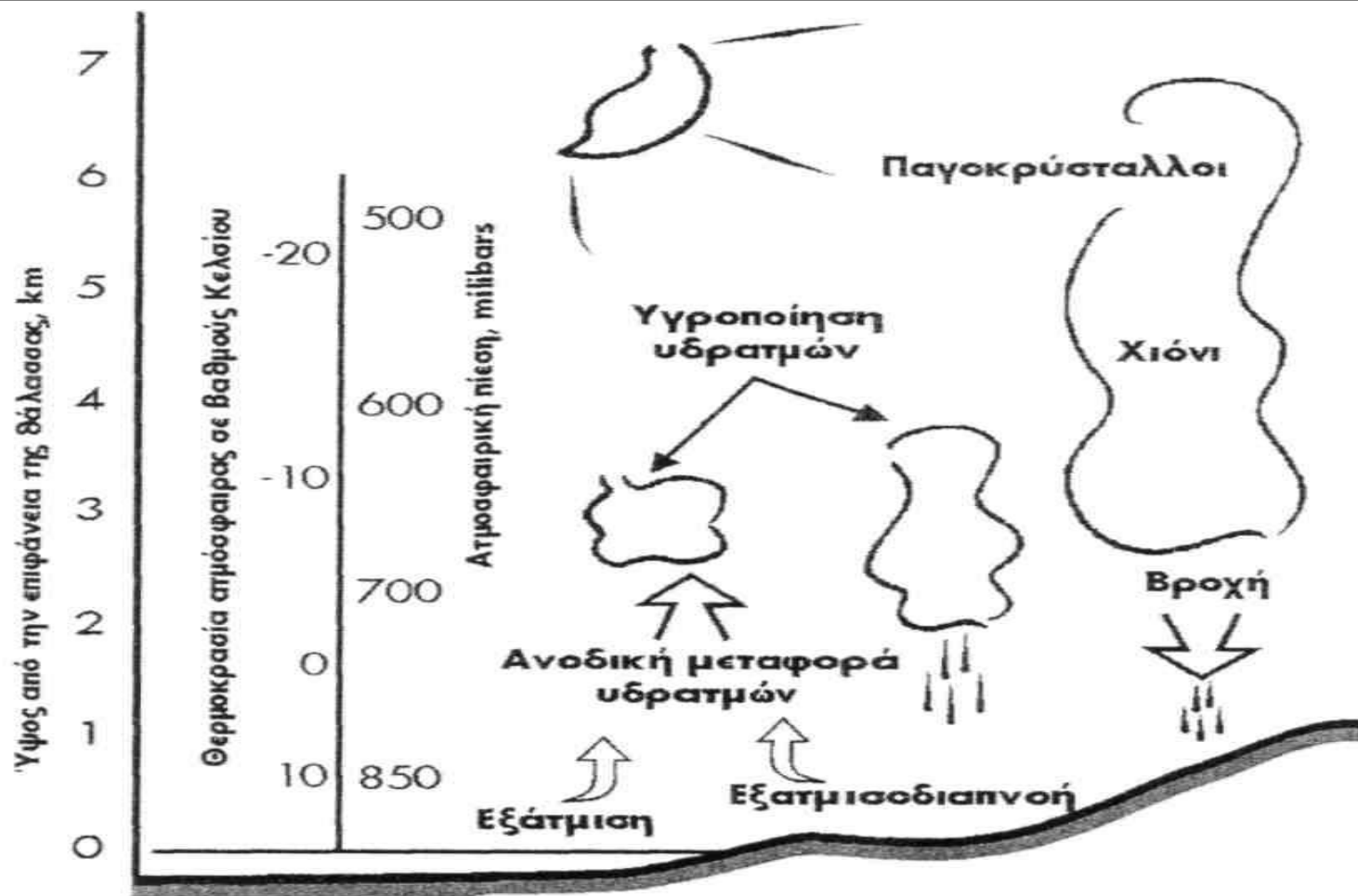
- Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι μορφές των κατακρημνισμάτων, τα όργανα μέτρησης αυτών, η βασική επεξεργασία της σημειακής βροχομετρικής πληροφορίας (ομοιογενοποίηση, συμπλήρωση ελλείψεων, υψομετρική αναγωγή) και οι μέθοδοι εκτίμησης της επιφανειακής βροχόπτωσης.
- Στον όρο κατακρημνίσματα περιλαμβάνεται κάθε μορφή υγρασίας που πέφτει από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης. Η υγρασία της ατμόσφαιρας προέρχεται κυρίως από την εξάτμιση του νερού από υγρές επιφάνειες κι από τη διαπνοή. Μεγάλοι και θερμοί όγκοι νερού και εκτεταμένες εδαφικές ζώνες καλυμμένες με πλούσια βλάστηση αποτελούν άριστες πηγές εμπλουτισμού της ατμόσφαιρας σε υγρασία. Στη χώρα μας τέτοια κύρια πηγή εμπλουτισμού της ατμόσφαιρας σε υγρασία αποτελεί η κεντρική και δυτική λεκάνη της Μεσογείου. Οι πιο σημαντικές βροχές εμφανίζονται όταν οι υγρές αέριες μάζες από την περιοχή αυτή μεταφέρονται με δυτικούς ανέμους κυρίως στη Δυτική Ελλάδα (Παπαζαφειρίου, 1983).

- Η ποσότητα των υδρατμών στην ατμόσφαιρα είναι μικρή σε σύγκριση με τις ποσότητες άλλων αερίων, αλλά σημαντική για την ανθρώπινη ζωή.
- Η ποσότητα των υδρατμών μεταβάλλεται στο χώρο και το χρόνο. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις των υδρατμών βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας και μειώνονται με το γεωγραφικό πλάτος, το υψόμετρο και την απόσταση από την ακτογραμμή. Περίπου το 50% της ατμοσφαιρικής υγρασίας βρίσκεται στα πρώτα 1500 m από την επιφάνεια του εδάφους. Να σημειωθεί ότι δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει σχέση ανάμεσα στην ποσότητα υδρατμών πάνω από μία περιοχή και των κατακρημνισμάτων της περιοχής.

2.2 Σχηματισμός των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων

- Τα κατακρημνίσματα αποτελούν τη βασική συνιστώσα του υδρολογικού κύκλου. Τροφοδοτούν τους επιφανειακούς αποδέκτες, ανανεώνουν τα αποθέματα της εδαφικής υγρασίας και εμπλουτίζουν τους υπόγειους υδροφορείς.
- Οι μορφές των κατακρημνισμάτων είναι η βροχή, το χιόνι, το χαλάζι και παραλλαγές αυτών (χιονόβροχο, δρόσος, πάχνη, ομίχλη) που έχουν όμως μικρή σημασία για την Υδρολογία.
- Η μορφή και η ποσότητα των κατακρημνισμάτων (προϊόν των υδρατμών της ατμόσφαιρας) εξαρτάται από κλιματικούς παράγοντες όπως ο άνεμος, η θερμοκρασία και η ατμοσφαιρική πίεση, ενώ η ατμοσφαιρική υγρασία είναι απαραίτητη αλλά όχι αρκετή για την πρόκληση κατακρήμνισης (Μιμίκου, 1990).

Στο Σχήμα 2.1 δίνεται ο μηχανισμός σχηματισμού κατακρημνισμάτων.



Σχήμα 2.1 Γραφική απεικόνιση του μηχανισμού σχηματισμού κατακρημνισμάτων.

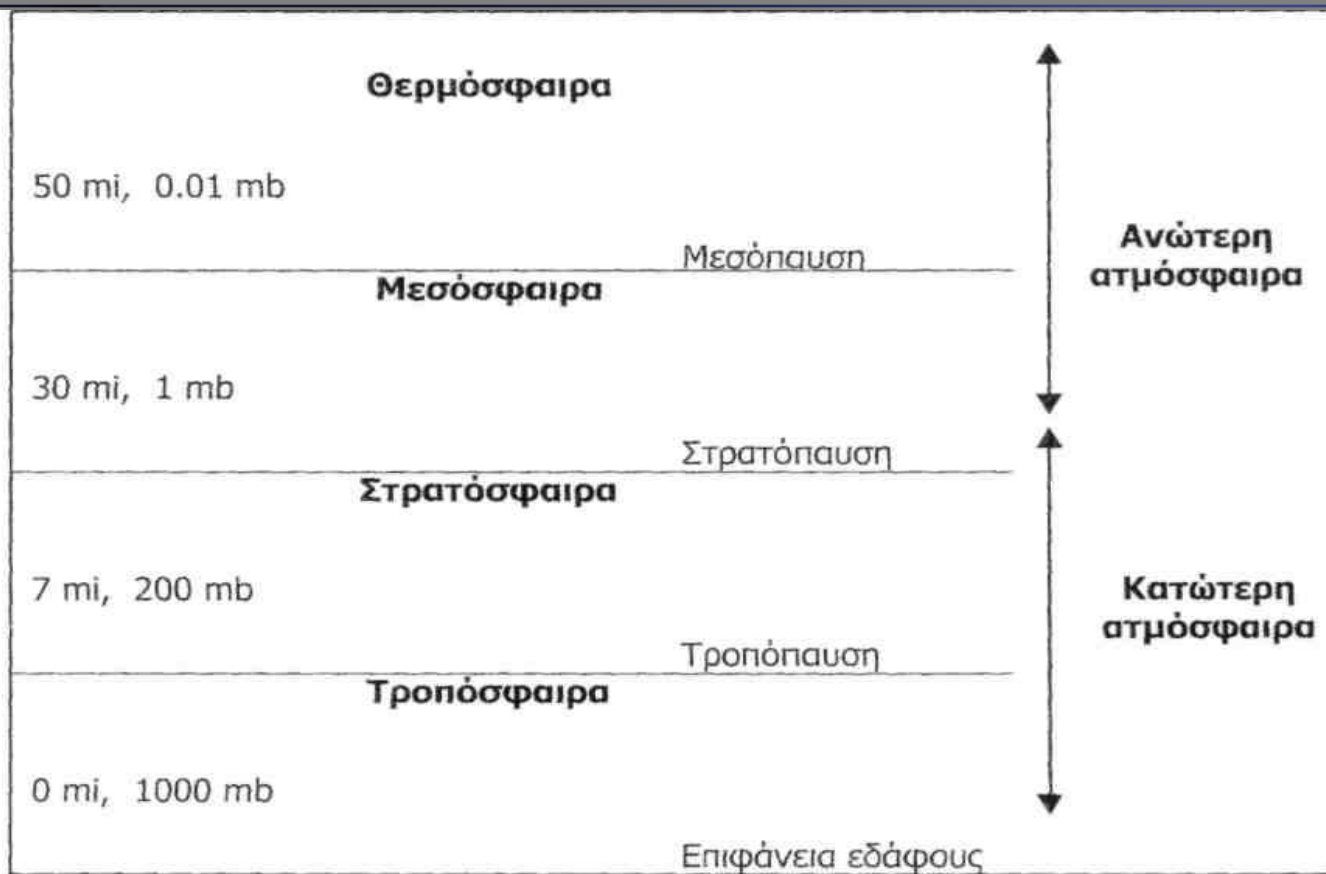
- Το κατακρημνίσσιμο νερό ορίζεται ως η ποσότητα του νερού που περιέχεται σε μία ατμοσφαιρική στήλη βάσης 1 cm^2 και ύψους z που εκτείνεται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους και δίνεται από την εξίσωση 2.1:

$$W = \int_0^z \rho_w dz$$

όπου:

- ρ_w = η απόλυτη υγρασία και
- W = το ύψος νερού σε cm.

Η κατακόρυφη δομή της ατμόσφαιρας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 Η κατακόρυφη δομή της ατμόσφαιρας

- **Τροπόσφαιρα:** Τα σπουδαιότερα κλιματικά φαινόμενα (νέφη, καταιγίδες, κατακρημνίσεις, άνεμοι) λαμβάνουν χώρα στην τροπόσφαιρα. Ουσιαστικό, το σύνολο της ποσότητας των υδρατμών βρίσκεται στην τροπόσφαιρα. Η θερμοκρασία μειώνεται με το ύψος. Ισχυρά κατακόρυφα ρεύματα αναπτύσσονται με συνέπεια να προκαλούν ισχυρές καταιγίδες.
- **Στρατόσφαιρα:** Στη στρατόσφαιρα δημιουργούνται αδύνατα κατακόρυφα ρεύματα. Η θερμοκρασία μειώνεται με το ύψος και η περιεκτικότητα σε όζον είναι αυξημένη.
- **Μεσόσφαιρα:** Στη μεσόσφαιρα υπάρχουν ιονισμένα μόρια και η θερμοκρασία μειώνεται με το ύψος.
- **Θερμόσφαιρα:** Η θερμόσφαιρα αποτελεί το 1% της μάζας της ανώτερης ατμόσφαιρας και χαρακτηρίζεται από υψηλές θερμοκρασίες (230-1730 °C).
- **Κατώτερη ατμόσφαιρα:** Είναι το 99.9% της μάζας της ατμόσφαιρας και συντίθεται ογκομετρικά ως εξής: Άζωτον 78.08%, Οξυγόνο 20.95%, Αργόν 0.93% και υδρατμοί 0-4%.

2.3 Μορφές κατακρημνισμάτων

Οι κύριες μορφές των κατακρημνισμάτων είναι τρεις: η βροχή, το χιόνι, και το χαλάζι.

2.3.1 Βροχή

- Η βροχή μεταβάλλεται γεωγραφικά, χρονικά και εποχιακά. Είναι προφανές ότι η χωροχρονική μεταβολή της βροχής είναι βασική συνιστώσα για όλες τις μελέτες που σχετίζονται με την αξιοποίηση και τη διαχείριση των υδατικών πόρων και τις υδρολογικές μελέτες.
- Η βροχή αποτελείται από σταγόνες νερού που έχουν διάμετρο από 0.5 mm έως 7 mm. Μια σταγόνα βροχής καθώς πέφτει μέσα σε ακίνητο αέρα γρήγορα αποκτά μια μέγιστη ταχύτητα που λέγεται *οριακή ταχύτητα*. Η ταχύτητα αυτή αποκτάται όταν η αντίσταση του αέρα αντισταθμίζει το βάρος της σταγόνας. Η οριακή ταχύτητα αυξάνει με το μέγεθος της σταγόνας μέχρι τη διάμετρο των 5.5 mm και μετά ελαττώνεται πάλι, γιατί οι σταγόνες αρχίζουν να πλαταίνουν, αυξάνοντας έτσι την αντίσταση στον αέρα.

- Μεγάλες σταγόνες παραμορφώνονται εύκολα και διασπώνται σε μικρότερες, πριν φτάσουν στην οριακή τους ταχύτητα. Η ένταση του ανοδικού αέρα καθορίζει τη μέση διάμετρο των σταγόνων στα σύννεφα και κατά συνέπεια και της βροχής που θα πέσει.
- Ανάλογα με το ύψος της βροχής, αυτή χαρακτηρίζεται ως *ελαφρά* για ύψος μέχρι 2.5 mm/hr, *μέση* για ύψος από 2.5 mm/hr έως 7.5 mm/hr και *έντονη* για ύψος από 7.5 mm/hr και πάνω. Βροχή που έχει σταγόνες με διάμετρο μικρότερη από 0.5 mm και πέφτει με ομοιόμορφο ρυθμό αναφέρεται σαν *ψιχάλο*, έχει δε ένταση μικρότερη από 1.0 mm/hr.
- Η συνολική βροχόπτωση που φθάνει στο έδαφος στη συνέχεια κατανέμεται σε διάφορες διεργασίες. Μέρος αυτής καλύπτει κοιλώματα στην επιφάνεια του εδάφους και τελικά εξατμίζεται. Επίσης μέρος καλύπτει τις ανάγκες της εδαφικής υγρασίας και κατόπιν εμπλουτίζει τα υπόγεια αποθέματα. Η πραγματική κατανομή των κατακρημνισμάτων εξαρτάται από το ολικό ύψος της βροχής, τις συνθήκες εδαφικής υγρασίας, την τοπογραφία, την κάλυψη της γης, τη χρήση γης κλπ.

2.3.2 Χιόνι

- Το χιόνι είναι κατακρήμνισμα σε μορφή παγοκρυστάλλων. Αν και μεμονωμένοι παγοκρύσταλλοι μπορεί να φθάσουν μέχρι την επιφάνεια του εδάφους, συνηθέστερα πολλοί παγοκρύσταλλοι συνενώνονται και σχηματίζουν τις νιφάδες.
- Το χιόνι, έχει την ιδιομορφία σε σχέση με τους άλλους τύπους κατακρημνισμάτων, ότι μπορεί να συγκεντρωθεί και να παραμείνει στην επιφάνεια του εδάφους για κάποιο χρονικό διάστημα πριν λιώσει κι απορρεύσει προς τα υδάτινα ρεύματα ή εξαχνωθεί. Συνεπώς, εκτός από τη μελέτη της συμπεριφοράς του σαν κατακρήμνισμα, ο υδρολόγος αντιμετωπίζει και το πρόβλημα του προσδιορισμού της ποσότητας του χιονιού που συγκεντρώνεται στο έδαφος και των συνθηκών που καθορίζουν το ρυθμό τήξεως και εξαχνωσής του.
- Η κατανομή της χιονοπτώσεως πάνω σε μια περιοχή είναι πιο ομοιόμορφη από ότι η αντίστοιχη της βροχής αλλά, λόγω της μορφής του, η συγκέντρωση και συγκράτηση του χιονιού στο έδαφος παρουσιάζουν μεγάλη ανομοιογένεια.

- **Ειδικότερα σε ορεινά διαμερίσματα, η ανομοιομορφία αυτή είναι πιο έντονη κι οφείλεται στο συνδυασμό των ισχυρών ανέμων που συνήθως πνέουν σε τέτοιες περιοχές και τη διακεκομμένη τοπογραφία.** Χιονοστιβάδες και ασυνήθεις μετατοπίσεις χιονιού, που οφείλονται σε τοπικούς στροβιλώδεις ανέμους, μπορεί να προκαλέσουν τοπική συγκέντρωση χιονιού που να είναι πολλαπλάσια του ετήσιου ύψους χιονιού της περιοχής.
- **Τοπογραφικές ανωμαλίες, χαραδρώσεις και διάφορες κατασκευές δρουν σαν «παγίδες» για τη συγκέντρωση χιονιού σε μεγάλες ποσότητες που μεταφέρονται με τον αέρα απ' τις γύρω περιοχές. Ιδιαίτερη επίδραση στη συγκέντρωση χιονιού ασκεί η φυτοκάλυψη.** Μέσα σ' ένα δάσος, η συγκέντρωση χιονιού στο έδαφος μεταβάλλεται ανάλογα με την πυκνότητα και το είδος των δένδρων και τον αριθμό και το είδος των ξέφωτων.
- **Η γνώση μόνο του πάχους του χιονιού σε μια περιοχή δεν είναι αρκετή για τον υπολογισμό του *ισοδύναμου ύψους νερού* του χιονοστρώματος.** Είναι δε ισοδύναμο ύψος νερού το ύψος του νερού σε mm που θα προκύψει από το λιώσιμο χιονιού που έχει το πάχος και τα χαρακτηριστικά ενός συγκεκριμένου χιονοστρώματος. Αν για τον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιηθούν μετρήσεις πάχους χιονοστρώματος, για να είναι τα αποτελέσματα κοντά στην πραγματικότητα, είναι απαραίτητη η γνώση της πυκνότητας του χιονιού.

- Το χιονόστρωμα σχηματίζεται από τους χιονοκρύσταλλους που πέφτουν κι έχουν διάφορα σχήματα και πυκνότητες. Καθώς περνάει ο καιρός, το χιόνι υφίσταται την επίδραση του περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της πυκνότητας του. Η μεταβολή της δομής από αφράτη, με θερμοκρασία κάτω από το μηδέν και χαμηλή πυκνότητα, σε αδρή, κοκκώδη και υγρή με υψηλή πυκνότητα λέγεται *ωρίμανση* του χιονοστρώματος.
- Το ώριμο χιονόστρωμα είναι έτοιμο να δώσει απορροή. Σε κατακόρυφη τομή, η πυκνότητα του χιονοστρώματος δεν είναι απαραίτητο να είναι ομοιογενής, μια που μπορεί να περιλαμβάνει φακούς από πάγο και στρώσεις χιονιού διαφορετικής πυκνότητας.

Παράγοντες που επηρεάζουν την πυκνότητα ενός χιονοστρώματος είναι :

- η ανταλλαγή θερμότητας που οφείλεται σε μεταφορά, υγροποίηση, ακτινοβολία και μεταφορά θερμότητας από το έδαφος,
- ο άνεμος,
- η θερμοκρασία του χιονοστρώματος,
- η πίεση που ασκείται από τις υπερκείμενες στρώσεις χιονιού,
- οι διακυμάνσεις στο περιεχόμενο νερό μέσα στο χιονόστρωμα και
- η διήθηση προς τα κάτω του νερού που προέρχεται από τήξη.

- Οι ιδιότητες του χιονοστρώματος σε σχέση με την ανάκλαση και την ακτινοβολία ενέργειας ενδιαφέρουν πολύ τον υδρολόγο για την εκτίμηση της εξατμίσεως από την χιονισμένη επιφάνεια και για τη διαδικασία τήξεως.
- Το χιονόστρωμα ενεργεί με μεγάλη προσέγγιση σαν «μελανό σώμα» σε σχέση με την ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος. Απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της προσπίπτουσας σ' αυτό από το περιβάλλον ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος, ενώ εκπέμπει προς το περιβάλλον ακτινοβολία σύμφωνα με το νόμο των Stefan - Boltzman.

2.3.3 Χαλάζι

- Το χαλάζι αποτελείται από μάζες παγοκρυστάλλων σφαιρικού ή ακανόνιστου σχήματος με διάμετρο από 5 mm και πάνω. Κάτω από ορισμένες συνθήκες, το μέγεθος των χαλαζόκοκκων είναι πολύ μεγάλο και σχηματίζονται οι *χαλαζόλιθοι*. Πολλοί χαλαζόλιθοι αποτελούνται από εναλλαγή διαστρώσεων συμπαγούς πάγου και χιονιού, γεγονός που οφείλεται σε αλληπάλληλες πτώσεις και ανυψώσεις τους μέσα στο σύννεφο σαν συνέπεια μεγάλης ατμοσφαιρικής αναταραχής. Άλλοι χαλαζόλιθοι, που δεν υπέστησαν τα παραπάνω ανεβοκατεβάσματα, φτάνουν στο έδαφος με τη μορφή καθαρού πάγου. Για το σχηματισμό των χαλαζόλιθων χρειάζονται ισχυρά ανοδικά ρεύματα για να τους συγκρατούν μέσα στο σύννεφο καθώς αυτοί αναπτύσσονται. Ταχύτητες ανοδικών ρευμάτων της τάξεως των 15 m/sec δεν είναι σπάνιες σε σύννεφα καταιγίδων και ταχύτητες μέχρι 36 m/sec έχουν παρατηρηθεί κάτω από συνθήκες εξαιρετικής αστάθειας. Χαλάζι παρατηρείται μόνο σε σφοδρές καταιγίδες που συμβαίνουν συνήθως στο τέλος της άνοιξης και το καλοκαίρι. Μια άλλη μορφή χαλάζιου, που μπορεί να χαρακτηριστεί σαν *μικροχαλάζι*, αποτελείται από κόκκους σφαιρικούς ή κωνικούς με διάμετρο από 2-5 mm, Συνήθως εμφανίζεται μαζί με βροχή.

2.4 Μηχανισμοί ψύξεως και τύποι κατακρημνισμάτων

- Ψύξη του αέρα ικανή να προκαλέσει σημαντική ποσότητα κατακρημνισμάτων επιτυγχάνεται όταν υπάρχουν ανοδικά ρεύματα σε μεγάλη κλίμακα. Τα χαρακτηριστικά ενός κατακρημνίσματος είναι συνάρτηση των χαρακτηριστικών του ανερχόμενου αέρα και του μηχανισμού ανυψώσεως (Eagleson, 1970). Δεδομένου ότι σε μία περιοχή τόσο ο εφοδιασμός του αέρα με υγρασία όσο κι οι μηχανισμοί ανυψώσεως αλλάζουν εποχιακά, το ίδιο συμβαίνει και με το χαρακτήρα των κατακρημνισμάτων που πέφτουν στην περιοχή αυτή. Οι κυριότεροι μηχανισμοί ψύξεως κι ο τύπος κατακρημνίσματος που προκαλούν περιγράφονται στο βιβλίο «Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» (Μιμίκου, 1990).

2.5 Μέτρηση κατακρημνισμάτων

- Το μετεωρολογικό στοιχείο που πρώτο μετρήθηκε από τον άνθρωπο είναι κατά πάσα πιθανότητα η βροχή.
- Η παλαιότερη και μακρύτερη περίοδος καταγραφής αναφέρεται στην Αίγυπτο στον ποταμό Νείλο περίπου στα 980.
- Στην Ελλάδα, το μακρύτερο μήκος καταγραφής βροχής αφορά στα δεδομένα του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών από το 1870 περίπου. Υπάρχουν αρκετά όργανα μέτρησης και εκτίμησης της βροχής, όπως τα τυπικά βροχόμετρα, βροχογράφοι, μετεωρολογικά ραντάρ και δορυφόροι. Σήμερα υπάρχει σε χρήση ένας μεγάλος αριθμός τύπων οργάνων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του μεγέθους των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Οι περισσότεροι χρησιμοποιούμενοι από τους τύπους αυτούς αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω.

2.5.1 Βροχόμετρα

- Τα βροχόμετρα είναι όργανα σημειακής μέτρησης της βροχής, εγκατεστημένα σε κατάλληλες θέσεις, που συλλέγουν κυρίως τη βροχόπτωση, και βοηθητικά τη χιονόπτωση, δίνοντας την αντίστοιχη σημειακή μέτρηση. Δίνουν την ολική σημειακή βροχόπτωση και το ισοδύναμο ύψος νερού μιας χιονόπτωσης ανά ορισμένα χρονικά διαστήματα (συνήθως 8ωρο, 12ωρο ή 24ωρο), με την ανάγνωση της ένδειξης από έναν παρατηρητή. Ο κλασικός τύπος βροχομέτρου είναι κυλινδρικός σε σχήμα και αποτελείται από το συλλέκτη, το χωνί και τον αποδέκτη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.

- Ο συλλέκτης είναι ένας κύλινδρος αρκετά ψηλός, με κατακόρυφα τα εσωτερικά του τοιχώματα, που καταλήγει στο χωνί, του οποίου το άνοιγμα έχει την ίδια διάμετρο με αυτήν του συλλέκτη. Η κλίση των τοιχωμάτων του χωνιού είναι τουλάχιστον 45° για να προλαβαίνει τις απώλειες νερού που μπορεί να προκληθούν κατά την πρόσκρουση των σταγόνων της βροχής. Το χωνί καταλήγει στον αποδέκτη που έχει στενή είσοδο και προστατεύεται από την ηλιακή ακτινοβολία για να ελαχιστοποιείται η απώλεια νερού από εξάτμιση.

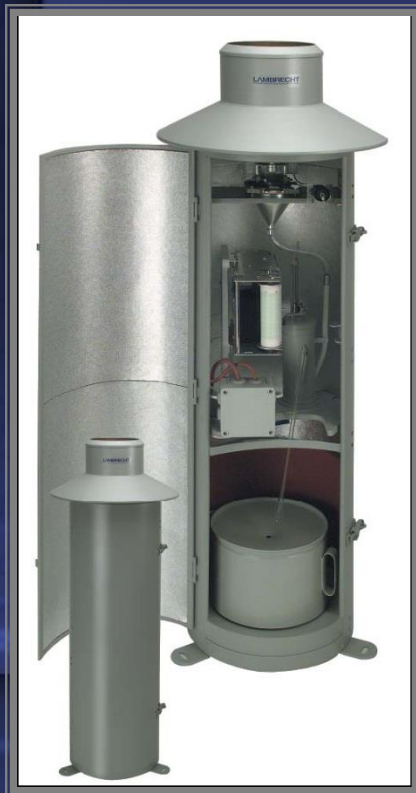


Σχήμα 2.3 *Τυπικό βροχόμετρο.*

- **Οι πιο συνηθισμένοι τύποι βροχομέτρων είναι το ογκομετρικό και το δεκαπλασιαστικό βροχόμετρο.** Τα ογκομετρικά βροχόμετρα γνωστής διατομής του συλλέκτη συνοδεύονται από ειδικούς ογκομετρικούς σωλήνες.
- Στα δεκαπλασιαστικά βροχόμετρα η επιφάνεια του συλλέκτη είναι δεκαπλάσια από την επιφάνεια της διατομής του αποδέκτη, έτσι που το ύψος βροχής που φτάνει στο συλλέκτη γίνεται δέκα φορές μεγαλύτερο στον αποδέκτη, με αποτέλεσμα την αύξηση της ακρίβειας των μετρήσεων.
- Σε ορισμένες όμως περιπτώσεις, τον υδρολόγο ενδιαφέρει η εποχιακή μόνο βροχόπτωση, ή η μέτρηση της βροχής σε περιοχές που δεν είναι ευκολο να προσπελαθούν, κυρίως κατά την περίοδο του χειμώνα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο αποδέκτης διαμορφώνεται έτσι που να χωράει όλο το πιθανό ύψος βροχής που αναμένεται να πέσει κατά μια σχετικά μακρά χρονική περίοδο. Επειδή υπάρχει πιθανότητα το νερό στον αποδέκτη να παγώσει, όταν το όργανο είναι εγκατεστημένο σε ορεινές κυρίως τοποθεσίες κι ακόμη για να λιώνει και το χιόνι που πέφτει, το βροχόμετρο εφοδιάζεται με αντιπηκτικό, με προτίμηση στην αιθυλική αλκοόλη. Ακόμη προστίθεται και μια μικρή ποσότητα λεπτόρρευστου λαδιού για τον περιορισμό των απωλειών από την εξάτμιση.

2.5.2 Βροχογράφοι

- Οι βροχογράφοι είναι όργανα σημειακής μέτρησης της βροχής, εγκατεστημένα σε κατάλληλες θέσεις, που συλλέγουν κυρίως τη βροχόπτωση, και βοηθητικά τη χιονόπτωση, καταγράφοντας με απλό ωρολογιακό μηχανισμό τη μεταβολή του ύψους βροχής στο χρόνο, περιγράφοντας έτσι τη χρονική κατανομή της σημειακής βροχόπτωσης. Ένας τέτοιος βροχογράφος παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4.Τυπικός βροχογράφος



Τρεις κυρίως τύποι βροχογράφων είναι σήμερα σε χρήση: ο βροχογράφος με ανατρεπόμενους κάδους, ο βροχογράφος με πλωτήρα και ο σταθμικός βροχογράφος.

- Οι βροχογράφοι δίνουν παρατηρήσεις για πολύ μικρά χρονικά διαστήματα και για το λόγο αυτό είναι κατάλληλος για την μελέτη της διακύμανσης της έντασης μιας βροχής. Αν ο αυτογραφικός μηχανισμός τους ρυθμιστεί έτσι ώστε το τύμπανο που φέρει το χαρτί καταγραφής να κάνει μια πλήρη περιστροφή την ημέρα (να χρειάζεται δηλαδή αλλαγή χαρτιού κάθε μέρα), το ύψος της βροχής μπορεί να μετράται κατά 5λεπτα διαστήματα. Αν ο μηχανισμός ρυθμιστεί για αλλαγή χαρτιού μια φορά την εβδομάδα, το ύψος της βροχής μπορεί να μετρηθεί ανά 30λεπτα διαστήματα.

- Ο βροχογράφος με ανατρεπόμενους κάδους αποτελείται από δύο μικρούς κάδους που είναι τοποθετημένοι σε κοινό άξονα και μετακινούνται πάνω - κάτω, καθώς γεμίζουν με το νερό της βροχής που κατευθύνεται προς αυτούς απ' το χωνί του οργάνου. Για την ανατροπή ενός κάδου χρειάζεται βροχή ίση με το $\frac{1}{4}$ του χιλιοστού κι ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται για μια ανατροπή είναι $\frac{2}{10}$ του δευτερολέπτου. Οι ιδιότητες αυτές του οργάνου έχουν σαν συνέπεια την εμφάνιση σφαλμάτων όταν η βροχή είναι πολύ ελαφρά και χρειάζεται χρόνος για να γεμίσει ο κάδος, οπότε το νερό που συγκεντρώνεται σ' αυτόν υπόκειται σε εξάτμιση, κι όταν η βροχή είναι πολύ ραγδαία κι ο κάδος γεμίζει σε χρόνο μικρότερο από $\frac{2}{10}$ sec. Οι ανατρεπόμενοι κάδοι συνδέονται με μηχανισμό καταγραφής που μεταφέρει τις παρατηρήσεις στο χαρτί καταγραφής.
- Ο σταθμιστικός βροχογράφος αποτελείται από ένα δοχείο που είναι τοποθετημένο πάνω σ' ένα ελατήριο. Καθώς νερό της βροχής συγκεντρώνεται στο δοχείο, το ελατήριο συμπιέζεται προς τα κάτω και η συμπίεση αυτή μεταφέρεται από ένα μηχανισμό στο χαρτί καταγραφής. Η δυναμικότητα του οργάνου φτάνει να συγκεντρώσει μέχρι και 1000 mm βροχής. Μια παραλλαγή του οργάνου, αντί για χαρτί καταγραφής, χρησιμοποιεί διατρητική ταινία που μπορεί να εισαχθεί σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Στην περίπτωση αυτή χρειάζεται κάποια πηγή ενέργειας για τη λειτουργία του διατρητικού μηχανισμού.

- **Ο βροχογράφος με πλωτήρα αποτελείται από ένα δοχείο που συγκεντρώνει το νερό της βροχής και στο οποίο υπάρχει ένας πλωτήρας που μεταφέρει τις μεταβολές της στάθμης του νερού στο χαρτί καταγραφής με κατάλληλο μηχανισμό.**
- Για να αποφεύγονται χονδροειδή σφάλματα, πρέπει σε κάθε αλλαγή ταινίας να μετριέται το συνολικό ύψος βροχής στον τελικό κύλινδρο συλλογής της βροχής και να συγκρίνεται με το αντίστοιχο συνολικό ύψος που καταγράφηκε στην ταινία.
- Αντί του παραπάνω συμβατικού μηχανισμού καταγραφής, η σημερινή τεχνολογία μετρήσεων δίνει τη δυνατότητα μετατροπής της κίνησης του μηχανισμού αυτοματισμού της μέτρησης σε ψηφιακό σήμα. Το σήμα αυτό, αντί να καταγράφεται σε χαρτί, μπορεί να αποθηκεύεται σε ηλεκτρονικό καταχωρητή δεδομένων (data logger). Παράλληλα, υπάρχει η δυνατότητα της τηλεμετρίας, δηλαδή της μετάδοσης του σήματος αυτού (μετά από κατάλληλη διαμόρφωση) είτε ασύρματα (μέσω ραδιοπομπού ή και δορυφόρου), είτε ενσύρματα (μέσω τηλεφωνικής γραμμής) και της λήψης του την ίδια στιγμή σε άλλη απομακρυσμένη θέση.

2.5.3 Μέτρηση Χιονιού

- **Το ύψος χιονόπτωσης μετριέται συνήθως με χιονοτράπεζες.** Αυτές είναι απλές οριζόντιες επιφάνειες, όπου, αφού συσσωρευτεί το χιόνι, μετριέται το ύψος του με έναν κοινό πήχη. Μετά τη μέτρηση η τράπεζα καθαρίζεται από το χιόνι, ώστε να είναι έτοιμη για την επόμενη μέτρηση του ύψους χιονόπτωσης. Το ισοδύναμο ύψος νερού της χιονόπτωσης και η αντίστοιχη πυκνότητα μπορούν να μετρηθούν από τη χιονοτράπεζα, αν αυτή είναι εφοδιασμένη με ένα απλό σύστημα ζύγισης που μετρά το βάρος του χιονιού.
- **Το ύψος χιονοκάλυψης μετριέται εύκολα με την έμπηξη ενός κοινού πήχη, ή την ανάγνωση σε μόνιμα εγκατεστημένη σταδία, της οποίας η μηδενική στάθμη συμπίπτει με την επιφάνεια του εδάφους.** Το ισοδύναμο ύψος νερού της χιονοκάλυψης μετριέται με τη λήψη δείγματος χιονιού, μέσω της έμπηξης κατάλληλου κυλίνδρου-δειγματολήπτη χιονιού, και στη συνέχεια με τη ζύγιση του χιονιού που συλλέγεται. Για τη λήψη αντιπροσωπευτικών δειγμάτων ύψους χιονοκάλυψης και ισοδύναμου ύψους νερού, αποφεύγεται η μέτρηση σε ένα σημείο και προτιμάται η λήψη του μέσου όρου των μετρήσεων σε περίπου 6 σημεία κατά μήκος μιας προκαθορισμένης (μόνιμης) διαδρομής χιονομέτρησης, με τυπικό μήκος 150-250 m. Μια άλλη κατηγορία μεθόδων μέτρησης του ύψους χιονόπτωσης, οι οποίες δίνουν επιπλέον και την έκταση της χιονοκάλυψης, στηρίζονται στη φωτογραμμετρία (με αεροφωτογραφίες) ή στην επίγεια παρατήρηση (με φωτογραφίες εδάφους). Η έκταση της χιονοκάλυψης μπορεί να προσδιοριστεί και από δορυφορικές εικόνες.

2.5.4 Μετεωρολογικό Ραντάρ

- Τα συμβατικά βροχομετρικά στοιχεία κρίνονται γενικά ανεπαρκή να περιγράψουν τη χωρική και χρονική κατανομή της βροχής. Μία μέθοδος στην οποία έχει αποδοθεί μεγάλη σημασία τα τελευταία χρόνια, είναι η μέτρηση της βροχής με στοιχεία από ραντάρ καιρού. Αυτό, γιατί το ραντάρ υπερτερεί έναντι του δικτύου βροχογράφων στα εξής σημεία:
- Η συνολική πληροφορία της κατανομής της βροχής στο χρόνο και στο χώρο συγκεντρώνεται και επεξεργάζεται για κάθε στοιχείο χωριστά, δηλαδή τα προβλήματα εξαιτίας της διαφοροποίησης μιας περιοχής ξεπερνιούνται με τη χρήση ραντάρ.
- Η χρήση ενός μετεωρολογικού ραντάρ είναι πολύ πιο εύκολη από τη χρήση ενός δικτύου βροχογράφων

- Οι βροχογράφοι και το μετεωρολογικό ραντάρ είναι δύο διαφορετικά συστήματα μέτρησης βροχής. Η περιοχή μέτρησης από ένα βροχογράφο είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με αυτή του ραντάρ.
- Μία άλλη αιτία που διαφοροποιεί το ποσό της βροχής που μετράται από τα δύο όργανα είναι ότι το ραντάρ σαρώνει σε μία απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους, ενώ ο βροχογράφος μετράει τη βροχή στην επιφάνεια του εδάφους. Οι βροχογράφοι έχουν ανάλυση πάνω από 5 λεπτά (οι πιο σύγχρονοι 1 λεπτό), ενώ οι μετρήσεις του ραντάρ είναι σχεδόν στιγμιαίες (20 sec/στροφή) οπότε για τη σύγκριση των μετρημένων ποσοτήτων βροχής τα στοιχεία του ραντάρ θα πρέπει να ολοκληρώνονται ως προς το χρόνο. Τα μετεωρολογικά ραντάρ είναι εκείνα τα οποία αξιοποιούν τη μετάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στην ατμόσφαιρα και τη σύγκρουση τους με τα υδροσταγονίδια. Η δέσμη συγκεντρώνεται σε μία γωνία 1° ή 2° στην κεραία, η οποία δέχεται το μέρος της δέσμης που ανακλάται πάνω στα υδρομετέωρα. Το ποσό της επιστρεφόμενης ενέργειας από τα υδρομετέωρα εξαρτάται από τον αριθμό των υδροσταγονιδίων μέσα στον παλμικό όγκο της δέσμης του ραντάρ, το μέγεθος, τη σύνθεση, τη σχετική θέση, το σχήμα και τον προσανατολισμό τους.

Η γενική εξίσωση του μετεωρολογικού ραντάρ απλοποιείται στην ακόλουθη μορφή (Anderson and Burt, 1985):

$$P_r = \frac{C_1 |K|^2 Z}{r^2} = \frac{C_2 Z}{r^2} \quad (2.2)$$

όπου: $Z = \sum D_i^6$

P_r = η επιστρεφόμενη ισχύς

D = η διάμετρος των υδροσταγονιδίων

r = η απόσταση από το στόχο

C_1, C_2 = σταθερές του ραντάρ

K = παράμετρος που σχετίζεται με το υλικό του στόχου, τη θερμοκρασία και το μήκος κύματος

Τα υδροσταγονίδια διαφέρουν σε μέγεθος από 0.2 mm μέχρι και 5 mm. Έχοντας την κατανομή του μεγέθους των υδροσταγονιδίων, μπορεί να υπολογιστεί η ανακλαστικότητα Z που προέρχεται από όλα τα υδροσταγονίδια (Collier, 1989):

$$Z = \sum_i N_i D_i^6 = \int_0^\infty N(D) D^6 dD \quad (2.3)$$

όπου:

$N(D)$ = η κατανομή των υδροσταγονιδίων,

D = η διάμετρος των υδροσταγονιδίων και

N_j = ο αριθμός των υδροσταγονιδίων με διάμετρο μεταξύ D και $D+dD$ ανά μονάδα όγκου στην ατμόσφαιρα.

Από το γεγονός ότι τα όρια ολοκλήρωσης είναι μεταξύ 0 και ∞ , συνάγεται το συμπέρασμα ότι η κατανομή των υδροσταγονιδίων γίνεται 0 όταν $D < D_{\min}$ και $D > D_{\max}$.

- Η μονάδα μέτρησης της ανακλαστικότητας του ραντάρ είναι mm^6/m^3 . Οι ανακλαστικότητες αρχίζουν από $0.001 \text{ mm}^6/\text{m}^3$ για ομίχλη ή ασθενή νέφη και φθάνουν μέχρι $50.000.000 \text{ mm}^6/\text{m}^3$ για ισχυρό χαλάζι. Αυτή η μεγάλη απόκλιση οδήγησε στον ορισμό μιας νέας παραμέτρου που μετράει την ανακλαστικότητα σε επίπεδα κατανοητά και υπολογιστικά:

$$\zeta = 10 \log_{10} \left(\frac{Z}{1 \text{ mm}^6 / \text{m}^3} \right)$$

Όπου: ζ η λογαριθμική παράμετρος μετρημένη σε dBZ και Z σε mm^6/m^3 .

- Αυτή η μετατροπή δίνει τιμές του ζ από -30 dBZ για ασθενή νέφη μέχρι και 75 dBZ για ισχυρό χαλάζι. Οι προσεκτικές μετρήσεις της επιστρεφόμενης ισχύος (απόσταση, αζιμούθιο, υψόμετρο, ισχύς, ταχύτητα και άλλα χαρακτηριστικά) σε προκαθορισμένους γνωστούς σημειακούς στόχους αποτελούν σπουδαία πληροφορία για την περιγραφή αυτών.

2.5.5 Εγκατάσταση βροχομέτρων και βροχογράφων

- Ο βασικός σκοπός των βροχομετρικών παρατηρήσεων είναι η απόκτηση τιμών που είναι αντιπροσωπευτικές μιας περιοχής. Ο σκοπός όμως αυτός είναι δύσκολο να επιτευχθεί και τούτο γιατί το όργανο που χρησιμοποιείται μπορεί αυτό καθ' εαυτό να επηρεάσει τη μέτρηση, ενώ είναι πια γνωστό ότι οι υδρομετεωρολογικές παράμετροι γενικά επηρεάζονται σημαντικά από το άμεσο περιβάλλον τους.
- Ανεξάρτητα αν πρόκειται για αυτογραφικά ή μη όργανα, αυτά πρέπει οπωσδήποτε να προστατεύονται από τον αέρα, επειδή τα χείλη του συλλέκτη βρίσκονται αρκετά πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Το μέγεθος της αναταράξεως διαφέρει ανάλογα με την ταχύτητα του αέρα και τις ανωμαλίες της περιοχής. Το πεδίο ροής του ανέμου κατά τη διάρκεια μιας βροχόπτωσης ή χιονόπτωσης αποτελεί το βασικό αίτιο των ανομοιογενειών και ασυνεχειών στην καταγραφή του ύψους κατακρημνισμάτων: οι διάφορες εδαφικές ή άλλες ανωμαλίες προκαλούν τοπικές διαταραχές στις γραμμές ροής του ανέμου και αντίστοιχες διαταραχές στην κίνηση των σταγόνων βροχής ή των νιφάδων χιονιού. Επίσης, όσον αφορά στα όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των κατακρημνισμάτων, πρέπει να λαμβάνεται κάθε μέριμνα ώστε να μη φεύγει νερό έξω απ' αυτά κατά την προσκρουση των βροχοσταγόνων στο χωνί και να περιορίζουν στο ελάχιστο την εξάτμιση από τον αποδέκτη.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι βασικοί κανόνες για την εγκατάσταση των βροχομέτρων - βροχογράφων συνοψίζονται στα εξής:

- Τοποθέτηση βροχομέτρου ή βροχογράφου σε περιοχές που προφυλάσσονται από ανέμους από όλες τις διευθύνσεις, δηλαδή απαλλαγμένες από έντονους στροβιλισμούς ή άλλες διαταραχές.
- Τοποθέτηση του συλλέκτη σε ύψος 1-1.5 m από την επιφάνεια του εδάφους
- Περιβολή από δένδρα ή θάμνους, αλλά η απόσταση αυτών των εμποδίων από το όργανο μέτρησης να είναι τουλάχιστον διπλάσια από το ύψος τους.

2.6 Εγκατάσταση δικτύων σημειακών μετρήσεων

- Η εγκατάσταση ενός οργάνου σημειακής μέτρησης, έστω και απλού βροχόμετρου, αποτελεί στην πραγματικότητα εγκατάσταση ενός μετρητικού σταθμού.
- Οι επιλογές των οργάνων των σταθμών, της πυκνότητας τους ανά ευρύτερες περιοχές και των θέσεων εγκατάστασής τους, αποτελούν αντικείμενο ειδικής μελέτης και εξαρτώνται κυρίως από γεωμορφολογικούς και κλιματικούς παράγοντες, καθώς επίσης και από τη χρήση των βροχομετρικών δεδομένων. Γι' αυτό και δεν υπάρχουν γενικοί κανόνες για την πυκνότητα των σταθμών και το είδος των οργάνων κάθε σταθμού.
- Γενικά, όσο πυκνότερο είναι το δίκτυο, τόσο αντιπροσωπευτικότερο είναι για την επιφανειακή βροχόπτωση. Ανομοιομορφίες όσον αφορά στη γεωμορφολογία απαιτούν πυκνότερο δίκτυο. Επιπλέον, το κόστος εγκατάστασης, συντήρησης και η εύκολη ή μη προσβασιμότητα του παρατηρητή, είναι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη.
- Σε γενικές γραμμές, τα λάθη μέτρησης της βροχής αυξάνονται με το ύψος της επιφανειακής βροχόπτωσης και μειώνονται με την αύξηση της πυκνότητας του δικτύου, τη διάρκεια της βροχής και το μέγεθος της επιφάνειας.
- Μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρούνται σε επίπεδο επεισοδίου βροχής, από ότι σε επίπεδο μήνα, εποχής ή έτους και κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου. Για την περιγραφή της επιφανειακής βροχόπτωσης το καλοκαίρι απαιτείται 2-3 φορές πυκνότερο δίκτυο από ότι το χειμώνα (Singh, 1992).

Η επάρκεια ή μη ενός δικτύου βροχογράφων προσδιορίζεται στατιστικά. Ο βέλτιστος αριθμός βροχογράφων που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο ποσοστό λάθους στην εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης είναι :

$$N = (C_u / \varepsilon)^2$$

όπου:

N = ο βέλτιστος αριθμός των βροχογράφων

C_u = ο συντελεστής μεταβλητότητας της βροχής των βροχογράφων

ε = το επιθυμητό ποσοστό λάθους

Η τυπική τιμή του ε είναι 10%. Εάν η τιμή αυτή μειωθεί, απαιτούνται περισσότεροι βροχογράφοι.

Εάν για παράδειγμα υπάρχουν m βροχογράφοι σε μία λεκάνη απορροής και $P_1, P_2, P_3, \dots, P_m$ είναι τα ύψη βροχής για συγκεκριμένο χρονικό βήμα, τότε ο συντελεστής C_u είναι:

$$C_u = 1005/P$$

Όπου:

- P είναι η μέση τιμή της βροχόπτωσης που κατέγραψαν οι βροχογράφοι:

$$P = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_i$$

- και S είναι η τυπική απόκλιση:

$$S = \left[\sum_{i=1}^m \frac{(x_i - \bar{x})^2}{m-1} \right]^{0.5}$$

Ο Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός (WMO) όσον αφορά στη πυκνότητα του δικτύου σε σχέση με τις γενικότερες υδρομετεωρολογικές συνθήκες, έχει προτείνει τα εξής:

- Ένα βροχογράφο ανά 600-900 km² σε επίπεδες περιοχές για ήπιες μεσογειακές και τροπικές ζώνες
- Ένα βροχογράφο ανά 100-250 km² σε ορεινές περιοχές για ήπιες μεσογειακές και τροπικές ζώνες
- Ένα βροχογράφο ανά 25 km² σε ημιορεινές περιοχές με έντονη διαφοροποίηση στη βροχή
- Ένα βροχογράφο ανά 1500-10000 km² σε ξηρές και πολικές ζώνες.

- Εάν ο σκοπός είναι η εκτίμηση του πλημμυρογραφήματος ή της πλημμυρικής αιχμής τότε η πυκνότητα του δικτύου είναι διαφορετική.
- Επίσης στον Πίνακα 2.1 δίνεται η πυκνότητα σταθμών βροχομετρικών παρατηρήσεων σε σχέση με την έκταση γεωργικών υδρολογικών λεκανών σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (Λ/ΜΟ). Ο αριθμός και ο τύπος των οργάνων που πρέπει να τοποθετηθούν σε μια λεκάνη είναι συνάρτηση παραγόντων οικονομικών, κλιματικών και τοπογραφικών (προσπελασιμότητα), όπως και του τρόπου αναλύσεως των παρατηρήσεων. Η πυκνότητα του δικτύου μιας λεκάνης πρέπει να καθορίζεται κυρίως απ' το βαθμό ανομοιομορφίας των κατακρημνισμάτων και το σκοπό που πρόκειται να εξυπηρετήσει.

Πίνακας 2.1 Πυκνότητα σταθμών βροχομετρικών παρατηρήσεων ανάλογα με την έκταση αγροτικών υδρολογικών λεκανών.

Έκταση υδρολογικής λεκάνης, στρέμματα	Αναλογία Km² / σταθμό	Ελάχιστος αριθμός σταθμών
0- 120	0.13	1
120 - 140	0.20	2
400 - 800	0.25	3
800 - 2000	0.40	1 ανά 0.4 Km ²
2000 - 10000	1.00	1 ανά 1 Km ²
10000 - 20000	2.50	1 ανά 2.5 Km ²
>20000	7.50	1 ανά 7.5 Km ²

2.7 Έλεγχος ομοιογένειας και ανάλυση διπλών αθροιστικών καμπύλων

- **Η πιθανότητα μιας καταιγίδας να συμβεί σε μια συγκεκριμένη περιοχή είναι η ίδια εάν όλες οι μετεωρολογικές συνθήκες παραμένουν σταθερές. Μία τέτοια περιοχή θεωρείται μετεωρολογικά ομοιογενής.** Επίσης μία περιοχή είναι μετεωρολογικά ομοιογενής εάν έχει την ίδια ετήσια βροχόπτωση και το ίδιο περίπου πεδίο βροχής. **Οι παράγοντες που καθορίζουν την ετήσια βροχόπτωση και τη μετεωρολογική ομοιογένεια είναι η απόσταση από την ακτογραμμή, η διεύθυνση των ανέμων που καθορίζουν και τη διεύθυνση των καταιγιδοφόρων νεφών, η μέση ετήσια θερμοκρασία, το υψόμετρο και η τοπογραφία.** Εάν μία περιοχή είναι μετεωρολογικά ομοιογενής τότε η πιθανότητα μίας καταιγίδας ίδιας διάρκειας και ύψους είναι η ίδια σε ολόκληρη την περιοχή.
- **Πριν από την ανάλυση των βροχομετρικών δεδομένων ενός σταθμού πρέπει πρώτα να ελεγχθεί η ποιότητα και η πληρότητα των δεδομένων.** Για τον έλεγχο της ποιότητας των παρατηρήσεων, εκτός των άλλων «λογικών» ελέγχων, γίνεται ο έλεγχος της ομοιογένειας τους. Ελέγχεται, δηλαδή, κατά πόσο το σύνολο των παρατηρήσεων προέκυψε με τις ίδιες συνθήκες μετρήσεως. Η αλλαγή της θέσης του οργάνου, η αντικατάσταση του οργάνου και η αλλαγή του παρατηρητή οδηγούν συνήθως σε μη ομοιογενή δεδομένα.

- Ο έλεγχος της ομοιογένειας των δεδομένων ενός σταθμού γίνεται με μεθόδους όπως της διπλής αθροιστικής καμπύλης, των αθροιστικών αποκλίσεων, της δοκιμής πιθανοφάνειας, της αναλογίας Von Neumann κλπ. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος για έλεγχο ομοιογένειας στις χρονοσειρές βροχοπτώσεων είναι η δημιουργία διπλής αθροιστικής καμπύλης (Dingman, 1994).

Η διπλή αθροιστική καμπύλη εξάγεται ως εξής: θεωρώντας δύο γειτονικούς σταθμούς X και Y , στους οποίους η χρονοσειρά ετήσιων βροχοπτώσεων συμβολίζεται με x και y , εξάγονται οι αθροιστικές χρονοσειρές, δηλαδή:

$$sx_j = \sum_{i=1}^j x_i \text{ και } sy_j = \sum_{i=1}^j y_i$$

Στις οποίες σε κάθε τιμή αντιστοιχεί το άθροισμα των βροχοπτώσεων όλων των προηγούμενων ετών.

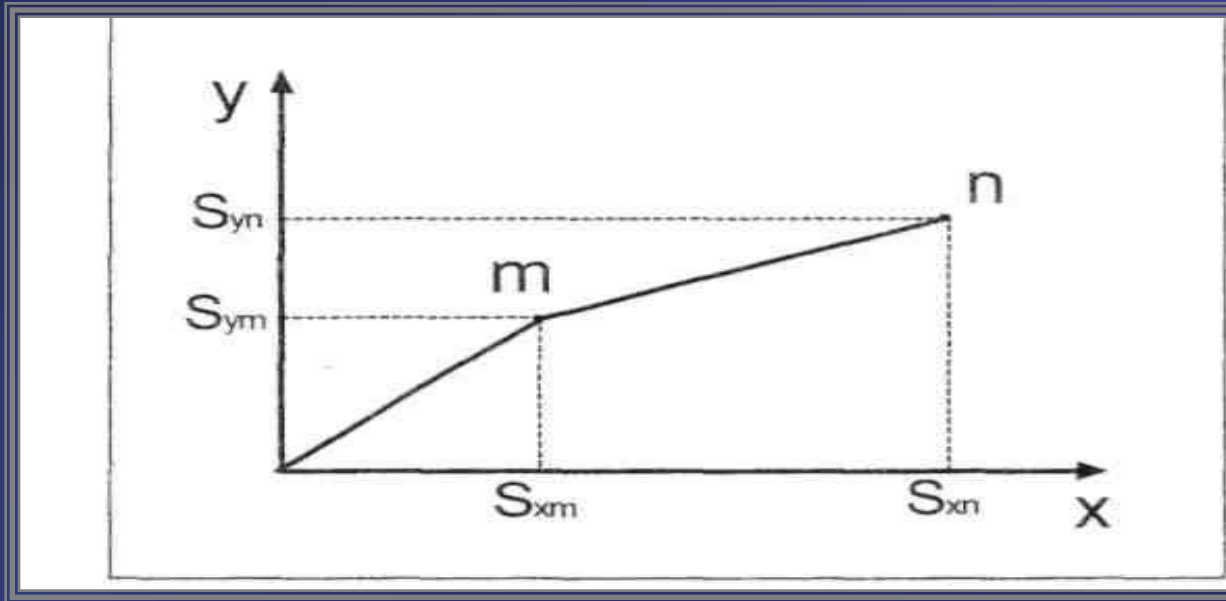
Συχνά η άθροιση γίνεται ξεκινώντας από το πιο πρόσφατο έτος και πηγαίνοντας προς τα πίσω, οπότε κάθε τιμή της αθροιστικής χρονοσειράς είναι το άθροισμα των βροχοπτώσεων όλων των επόμενων ετών.

Με το σχεδιασμό του ζεύγους τιμών (sy_i, sx_i) σε διάγραμμα, προκύπτει η διπλή αθροιστική καμπύλη

- Στο Σχήμα 2.5 δίνεται η τυπική μορφή μιας διπλής αθροιστικής καμπύλης που παρουσιάζει θλάση σε σημείο m . Στη συγκεκριμένη περίπτωση, δηλαδή, τα σημεία της διπλής αθροιστικής καμπύλης δεν περιγράφονται καλά από μία μόνο ευθεία, αλλά από δύο ευθείες που σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία. Η ανομοιογένεια αυτή διορθώνεται με την πραγματοποίηση ανόρθωσης, κατά την οποία οι τιμές της ανομοιογενούς χρονοσειράς πολλαπλασιάζονται, από το σημείο θλάσης και μετά, με συντελεστή τέτοιο ώστε η διπλή αθροιστική καμπύλη να γίνει ευθεία. Συγκεκριμένα, αν οι χρονοσειρές x και y έχουν n τιμές και στη διπλή αθροιστική καμπύλη υπάρχει θλάση στο σημείο m , τότε ο διορθωτικός συντελεστής της χρονοσειράς y υπολογίζεται ως:

$$\lambda = \frac{SY_n - SY_m}{SX_n - SX_m} \cdot \frac{SX_m}{SY_m}$$

Ακολουθως, πολλαπλασιάζοντας τις τιμές y_{m+1} ως y_n με λ , η χρονοσειρά y διορθώνεται.



Σχήμα 2.5 Θλάση σε διπλή αθροιστική καμπύλη.

- Ανορθώσεις γίνονται μόνο σε ετήσιες χρονοσειρές. Δεν υπάρχει βιβλιογραφία για έλεγχο ομοιογένειας σε υψηλότερες χρονικές διακριτικότητες. Η ύπαρξη ανωμαλιών στη διπλή αθροιστική καμπύλη δείχνει ότι υπάρχει πρόβλημα στα δεδομένα. Είναι λογικότερο, λοιπόν, να γίνει προσπάθεια εντοπισμού του προβλήματος, παρά διόρθωση χωρίς περαιτέρω εξέταση, που μάλλον καλύπτει το πρόβλημα.

2.8 Συμπλήρωση Βροχομετρικών Παρατηρήσεων – Αναγωγή σε διαφορετικό υψόμετρο

Οι βασικές πηγές σφαλμάτων στις μετρήσεις της βροχής είναι οι εξής:

- Σφάλματα οργάνων που απαρτίζουν το βροχογράφο
- Ακατάλληλη θέση του βροχογράφου
- Ανθρώπινα σφάλματα
- Αρκετά δεδομένα βροχής είναι ελλιπή. Η έλλειψη αυτή μπορεί να αφορά μερικές ημέρες μέχρι και μερικά χρόνια. Οι πιο γνωστές μέθοδοι συμπλήρωσης είναι η μέθοδος αριθμητικού μέσου, η μέθοδος των κανονικών λόγων, η μέθοδος των αντίστροφων αποστάσεων, η μέθοδος ισοϋψών, η μέθοδος Lagrange, οι μέθοδοι παρεμβολής και η μέθοδος Kriging).

- Η συμπλήρωση των ελλείψεων είναι απαραίτητη σε κάθε υδρολογική μελέτη και γίνεται με βάση τα δεδομένα γειτονικών βροχομετρικών σταθμών.
- Εξάλλου, όχι σπάνια, η συνολική περίοδος λειτουργίας ενός βροχομετρικού σταθμού μπορεί να είναι μικρή, ενώ παράλληλα στη γειτονιά του σταθμού μπορεί να υπάρχουν άλλοι σταθμοί με μεγαλύτερη περίοδο λειτουργίας. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να γίνει επέκταση του δείγματος του υπόψη σταθμού, αξιοποιώντας και πάλι τα δεδομένα των γειτονικών σταθμών. Η γενική μεθοδολογία συμπλήρωσης και επέκτασης είναι καταρχήν ίδια, αλλά πάντως η περίπτωση της επέκτασης, επειδή αφορά κατά κανόνα σε μεγαλύτερες περιόδους απ' ό,τι η συμπλήρωση, χρειάζεται μεγαλύτερη προσοχή.
- Οι μέθοδοι συμπλήρωσης που θα εξεταστούν στα πλαίσια αυτού του μαθήματος είναι η μέθοδος αριθμητικού μέσου, η μέθοδος των κανονικών λόγων, η μέθοδος των αντίστροφων αποστάσεων και η μέθοδος γραμμικής παλινδρόμησης.

2.8.1 Μέθοδος Αριθμητικού Μέσου

- Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τη μέση τιμή όλων των μετρήσεων των σταθμών που περιβάλλουν το σταθμό που έχει ελλείψεις. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται όταν οι ετήσιες βροχοπτώσεις αποκλίνουν λιγότερο από 10% από τον υπό συμπλήρωση σταθμό.

$$P = \sum_{i=1}^N a_i P_i \quad (2.11)$$

όπου:

$a_i = 1/N$

N = ο αριθμός των σταθμών

P_i = η βροχόπτωση που καταγράφηκε στο σταθμό i

P = η μέση βροχόπτωση των σταθμών

2.8.2 Μέθοδος Κανονικών Λόγων

- Η μέθοδος των κανονικών λόγων είναι πολύ απλή και ευρέως διαδεδομένη και δίνει συντελεστή βαρύτητας για κάθε σταθμό. Συνήθως επιλέγονται οι τρεις σταθμοί που απέχουν ίσες περίπου αποστάσεις και περιβάλλουν τον υπό συμπλήρωση σταθμό. Η γενική σχέση που δίνει τις τιμές είναι:

$$P_x = \frac{1}{m} \left(\frac{N_x}{N_1} P_1 + \frac{N_x}{N_2} P_2 + \frac{N_x}{N_3} P_3 + \dots \frac{N_x}{N_m} P_m \right) = \sum_{i=1}^m \left(\frac{N_x}{mN_i} \right) P_i \quad (2.12)$$

όπου:

P = η βροχόπτωση

N = είναι η ετήσια βροχόπτωση

X = δείκτης που υποδηλώνει τον υπό συμπλήρωση σταθμό και οι δείκτες 1,2,3 ...m υποδηλώνουν τους περιβάλλοντες σταθμούς.

2.8.3 Μέθοδος Αντίστροφων Αποστάσεων

- Η μέθοδος αυτή ενέχει τους περιβάλλοντες σταθμούς σε σχέση με την απόσταση από τον υπό συμπλήρωση σταθμό. Οι αποστάσεις αυτές υπολογίζονται υποθέτοντας ότι η αρχή των αξόνων είναι ο υπό συμπλήρωση σταθμός. Οι εξισώσεις που δίνουν τη βροχόπτωση είναι:

$$P_y = \sum_{i=1}^k w_i P_i \quad (2.13)$$

και

$$w_j = \frac{d_i^{-b}}{\sum_{j=1}^k d_j^{-b}} \quad (2.14)$$

όπου:

k = το πλήθος των σταθμών

P_y = η εκτιμημένη βροχόπτωση στον υπό συμπλήρωση σταθμό

P_i = η βροχόπτωση σε κάθε σταθμό

d_i = η απόσταση κάθε σταθμού από τον υπό συμπλήρωση σταθμό

b = εκθέτης με τυπική τιμή 2

w_i = ο συντελεστής βαρύτητας κάθε σταθμού

2.8.4 Συσχέτιση και παλινδρόμηση

- Επίσης η συμπλήρωση των βροχομετρικών παρατηρήσεων μπορεί να γίνει με βάση τη γραμμική συσχέτιση των παρατηρήσεων του προς συμπλήρωση σταθμού με άλλο σταθμό βάσης, εφόσον ο βαθμός γραμμικής συσχέτισης είναι υψηλός.
- Συσχέτιση σημαίνει να προσδιοριστεί η σχέση μεταξύ δύο ή περισσότερων τυχαίων μεταβλητών. Για παράδειγμα, αν X και Y είναι οι τυχαίες μεταβλητές που συμβολίζουν τη βροχόπτωση σε δύο γειτονικούς μετρητικούς σταθμούς, τότε οι μεταβλητές συνδέονται με τη σχέση:

$$Y = f(X)$$

- Η συσχέτιση των μεταβλητών συνίσταται στον προσδιορισμό της σχέσης f .
- Παλινδρόμηση λέγεται κάθε συσχέτιση που στηρίζεται στη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, πρακτικά δηλαδή ταυτίζεται με τη συσχέτιση, αφού η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιείται σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις. Η πιο συνηθισμένη είναι η γραμμική παλινδρόμηση, στην οποία η συνάρτηση f είναι γραμμική.
- Για να πραγματοποιηθεί η παλινδρόμηση, πρέπει το σύνολο των χρονοσειρών που θα χρησιμοποιηθούν, ανεξάρτητες και εξαρτημένες, να έχουν κοινή περίοδο μετρήσεων, δηλαδή σύνολο χρονικών στιγμών για τις οποίες υπάρχουν τιμές σε όλες τις χρονοσειρές.
- Από τις μεθόδους αυτής της κατηγορίας θα περιγραφεί η απλούστερη μέθοδος της απλής γραμμικής παλινδρόμησης. Σύμφωνα με αυτή, η προς συμπλήρωση τιμή $y := P_y$ εκτιμάται από την αντίστοιχη τιμή $x := P_x$ γειτονικού σταθμού X (για την περίοδο όπου σημειώνεται η έλλειψη στο σταθμό Y) με βάση τη γραμμική σχέση:

$$y = a + bx$$

Όπου:

- α και β παράμετροι που εκτιμώνται με τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί το τετραγωνικό σφάλμα της εκτίμησης. Αν x_i και y_i είναι ταυτόχρονες μετρήσεις στους σταθμούς X και Y , αντίστοιχα, τη χρονική περίοδο (κατά κανόνα έτος ή δεδομένο μήνα του έτους) με αριθμό i , τότε:

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.17)$$

$$a = \bar{y} - b \bar{x} \quad (2.18)$$

- όπου και οι μέσες τιμές των x_i και y_i αντίστοιχα, δηλαδή:

$$\bar{x} \quad \bar{y}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (2.19)$$

- και n το (κοινό για τα x_i και y_i) μήκος του δείγματος (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1997).

- Ο βαθμός καταλληλότητας της μεθόδου για τα συγκεκριμένα δεδομένα αποδίδεται από την εκτίμηση του συντελεστή συσχέτισης r .

$$\begin{aligned}
 r &= \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]}} \\
 &= \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.20)
 \end{aligned}$$

Όσο πλησιέστερα βρίσκεται ο συντελεστής συσχέτισης στη μονάδα, τόσο πιο κατάλληλη είναι η μέθοδος. Συνήθως, για την εφαρμογή της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης απαιτείται:

$$r \geq \frac{2}{\sqrt{n}} \quad (2.21)$$

- Απλοποιητικά, μερικές φορές απαιτείται $r \geq 0.7$

2.8.5 Διόρθωση της βροχόπτωσης με το υψόμετρο

- Χρήσιμη για τη συμπλήρωση των βροχομετρικών δεδομένων ενός σταθμού αποδεικνύεται πολλές φορές η παρατήρηση ότι το σημειακό ύψος βροχής αυξάνει με την αύξηση του υψομέτρου. Η παρατήρηση αυτή είναι επίσης ιδιαίτερα χρήσιμη για οποιαδήποτε αναγωγή βροχομετρικών παρατηρήσεων σε διαφορετικό υψόμετρο από αυτό που αρχικά ανήκουν.
- Η μέση αύξηση του ετήσιου σημειακού βροχομετρικού ύψους, ανά 100 m αύξησης του υψομέτρου, ονομάζεται βροχοβαθμίδα. Η βροχοβαθμίδα συνήθως προκύπτει για κάθε περιοχή, από τη γραφική παράσταση των μέσων ετήσιων βροχομετρικών υψών των βροχομετρικών σταθμών της περιοχής, σε συνάρτηση με τα υψόμετρα των σταθμών.
- Πολλές φορές η ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης που χαράσσεται για τον προσδιορισμό της βροχοβαθμίδας προκύπτει με χαμηλό βαθμό γραμμικής συσχέτισης. Σ' αυτήν την περίπτωση πρέπει να ελεγχθούν οι δυνατότητες εξαίρεσης κάποιων σταθμών ή ο χωρισμός της περιοχής σε υποπεριοχές, στις οποίες να προκύπτει η ευθεία γραμμή παλινδρόμησης με ικανοποιητικό συντελεστή γραμμικής συσχέτισης.

2.9 Επιφανειακή ολοκλήρωση σημειακών βροχοπτώσεων

- Οι μετρήσεις βροχόπτωσης που λαμβάνονται από τα βροχόμετρα και τους βροχογράφους είναι σημειακές και ως εκ τούτου αντιπροσωπεύουν το σημείο στο οποίο μετρήθηκε η βροχόπτωση. Στις περισσότερες περιπτώσεις, όμως, όπως για παράδειγμα στην εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου, ιδιαίτερη σημασία έχει η επιφανειακή βροχόπτωση, η βροχόπτωση, δηλαδή, που αντιπροσωπεύει ολόκληρη τη λεκάνη απορροής που εξετάζεται.
- Για το λόγο αυτό, σε μια λεκάνη απορροής εγκαθίσταται δίκτυο βροχογράφων, οι θέσεις των οποίων θα πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να περιγράφουν όσο το δυνατόν καλύτερα τη χωρική διαφοροποίηση της βροχής.
- Κατόπιν, οι σημειακές μετρήσεις των βροχογράφων ανάγονται σε επιφανειακή βροχόπτωση της λεκάνης απορροής, χρησιμοποιώντας μεθόδους επιφανειακής ολοκλήρωσης.

- Υπάρχει πληθώρα μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης.
- Αυτές μπορούν να διαχωριστούν στις μεθόδους άμεσης ολοκλήρωσης και στις μεθόδους προσαρμογής επιφάνειας (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1997). Οι μέθοδοι άμεσης ολοκλήρωσης υπολογίζουν την επιφανειακή βροχόπτωση απευθείας, από τις τιμές της σημειακής βροχόπτωσης. Οι πιο γνωστές μέθοδοι που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία είναι η μέθοδος του μέσου όρου, η μέθοδος Thiessen, η μέθοδος δύο αξόνων του Bethlahmy και η μέθοδος βέλτιστης ολοκλήρωσης (kriging).

- Αντίθετα οι μέθοδοι προσαρμογής επιφάνειας εκτιμούν πρώτα τη γεωγραφική μεταβλητότητα της βροχοπτώσης στην υπό εξέταση περιοχή και με βάση αυτή, υπολογίζουν την επιφανειακή βροχοπτώση.
- Εδώ ανήκουν η μέθοδος των ισοϋέτιων, η μέθοδος υπολογιστικής γραμμικής παρεμβολής, η μέθοδος της αντίστροφης απόστασης, η μέθοδος πολυτετραγωνικής παρεμβολής, η μέθοδος ελάχιστων τετραγώνων με πολυώνυμα, η μέθοδος πολυωνύμων Lagrange, η μέθοδος προσαρμογής splines και η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής (kriging). Οι μέθοδοι προσαρμογής επιφάνειας χωρίζονται παραπέρα σε μεθόδους παρεμβολής και εξομάλυνσης. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά η μέθοδος του μέσου όρου, η μέθοδος Thiessen και η μέθοδος των ισοϋέτιων.
- Ανεξάρτητα από τη μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί, η αξιοπιστία του τελικού αποτελέσματος εξαρτάται πρωτίστως από την πυκνότητα της σημειακής πληροφορίας: η ολοκλήρωση είναι τόσο επιτυχεστέρα, όσο πυκνότερο είναι το δίκτυο των βροχομετρικών σταθμών. Δυστυχώς, τα δίκτυα δεν είναι συνήθως αρκετά πυκνά, ενώ σε ορισμένες ορεινές δυσπρόσιτες περιοχές οι σταθμοί σπανίζουν.

2.9.1 Μέθοδος μέσου όρου

- Πρόκειται για την απλούστερη μέθοδο, σύμφωνα με την οποία τα βάρη όλων των σταθμών λαμβάνονται ίσα, δηλαδή: $w_i = 1/k$
- Η μέθοδος λόγω της απλότητας της μπορεί να χρησιμοποιείται για πρώτες χονδρικές εκτιμήσεις, αλλά όχι για οριστικές. Η ακρίβεια της είναι ανεκτή μόνο όταν η περιοχή είναι σχετικά επίπεδη, οι σταθμοί ομοιόμορφα κατανομημένοι σε αυτή και τα ύψη βροχής δεν διαφέρουν πολύ από σταθμό σε σταθμό. Η επιφανειακή βροχόπτωση δίνεται από τη σχέση:

$$P_s = \sum_{i=1}^k w_i P_i$$

2.9.2 Μέθοδος Thiessen

- Σύμφωνα με αυτή την κλασική μέθοδο, η συνολική επιφάνεια A χωρίζεται γεωμετρικά σε ζώνες επιρροής A_i μία για κάθε σταθμό, έτσι ώστε:

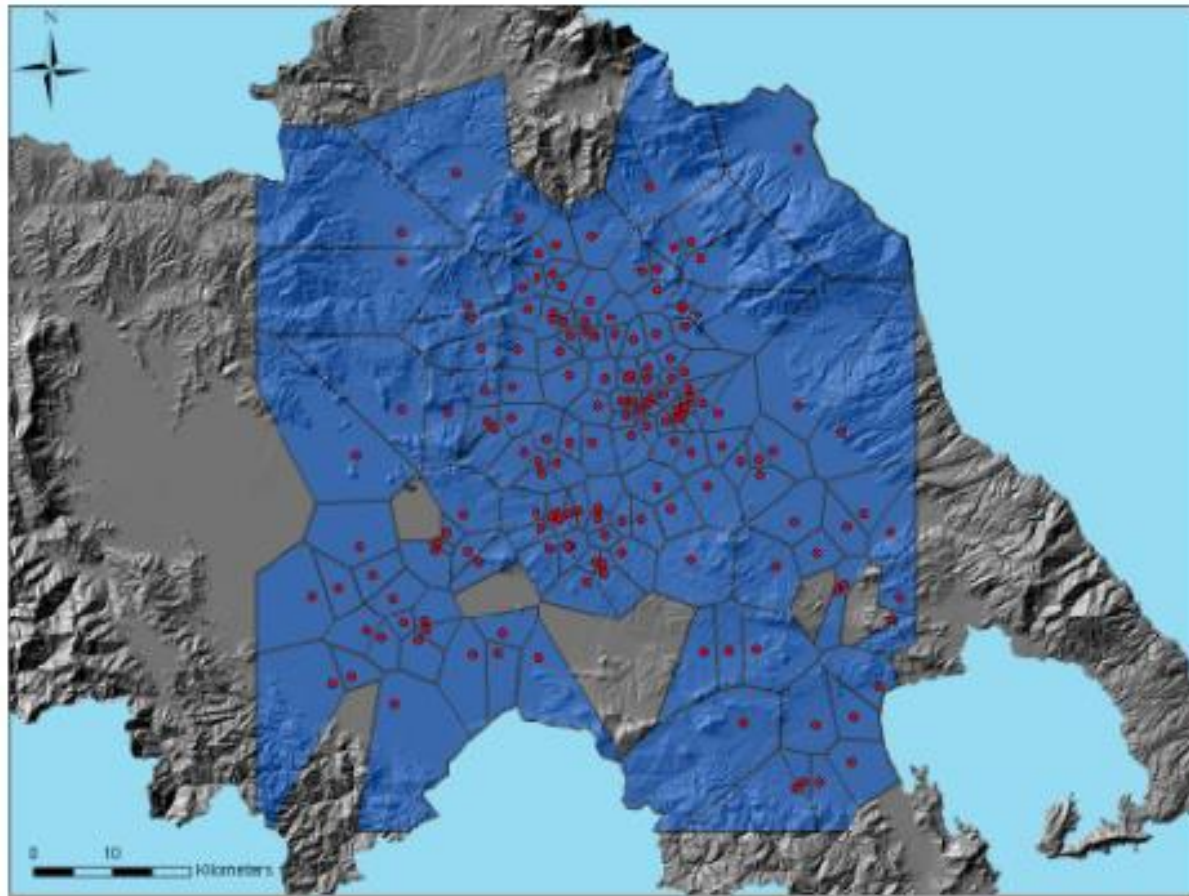
$$\sum_{i=1}^k A_i = A$$

Ο συντελεστής βάρους θεωρείται ανάλογος του εμβαδού της ζώνης επιρροής του σταθμού, δηλαδή:

$$w_i = \frac{A_i}{A}$$

- Οι ζώνες επιρροής προσδιορίζονται έτσι ώστε κάθε σημείο της ζώνης του σταθμού i να απέχει από τη θέση του σταθμού i λιγότερο απ'όσο απέχει από οποιονδήποτε άλλο σταθμό της περιοχής.
- Η αρχή αυτή οδηγεί άμεσα σε μια απλή γεωμετρική κατασκευή των ζωνών επιρροής βασισμένη στις μεσοκαθέτους των ευθυγράμμων τμημάτων που συνδέουν τους σταθμούς ανά ζεύγη. Προκύπτουν έτσι τα γνωστά *πολύγωνα Thiessen* (Σχήμα 2.9). Παρά τη μεγάλη ηλικία της, η μέθοδος παραμένει και σήμερα ευρέως διαδεδομένη, λόγω της απλότητας στην εφαρμογή της και των αξιόπιστων εκτιμήσεων της. Οι εκτιμήσεις της μεθόδου είναι τόσο καλύτερες όσο πυκνότερο είναι το δίκτυο των βροχομετρικών σταθμών και όσο μεγαλύτερη είναι η χρονική κλίμακα μελέτης (π.χ, οι εκτιμήσεις σε υπερετήσια κλίμακα είναι πιο ακριβείς από τις εκτιμήσεις στην κλίμακα ενός επεισοδίου βροχής). Η υψομετρική αναγωγή της επιφανειακής βροχόπτωσης που προκύπτει από τη μέθοδο Thiessen με χρήση συντελεστή υψομετρικής αναγωγής περιγράφεται στις σελίδες 28 και 29 του βιβλίου Τεχνολογία Υδατικών Πόρων (Μιμίκου, 1990).

Σχήμα 2.9 Πολύγωνα Thiessen στη Θεσσαλία
(Πηγή: Αλεξάκης Δ., κ.α. 2008).



2.9.3 Μέθοδος των ισοϋέτιων

- Η ισοϋέτια καμπύλη ορίζεται από τον γεωμετρικό τόπο των σημείων στα οποία το ύψος βροχής παίρνει μια δεδομένη τιμή. Ανάλογα με το εύρος διακύμανσης του ύψους βροχής, χαράσσονται ισοϋέτιες καμπύλες με δεδομένη ισοδιάσταση ΔP . Βεβαίως, η ακριβής χάραξη μιας ισοϋέτιας καμπύλης εξαρτάται από τα διαθέσιμα σημεία και από την εμπειρία του υδρολόγου. Αφού χαραχτούν οι ισοϋέτιες καμπύλες, για να προκύψει η επιφανειακή μέση βροχόπτωση της περιοχής, εμβαδομετρούνται οι επιφάνειες A_i μεταξύ των διαδοχικών καμπυλών που αντιστοιχούν σε ύψη βροχής P_i και P_{i-1} . Η επιφανειακή μέση βροχόπτωση της περιοχής θα είναι:

$$P_s = \sum_i \frac{P_i + P_{i-1}}{2} \frac{A_i}{A}$$

όπου το άθροισμα όλων των ταυτίζεται με την ολική επιφάνεια A της περιοχής. Στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζονται οι ισοϋέτιες καμπύλες για την περιοχή της Θεσσαλίας, με βάση της μέσες υπερετήσιες τιμές της βροχόπτωσης (από 1/10/1955) και ισοδιάσταση 100 mm.

Σχήμα 2.10 Ισοϋέτιες καμπύλες στην περιοχή της Θεσσαλίας
(Πηγή: ΕΤΥΜΠ).

