

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ

Το επιστημονικό αντικείμενο της Υδρολογίας αφορά την εξέταση των διαφόρων φάσεων του υδρολογικού κύκλου και ιδιαίτερα τη χωρική και χρονική μεταβολή της έντασης τους με την οποία πραγματοποιούνται. Στον υδρολογικό κύκλο υπεισέρχονται ποικίλες και περίπλοκες διαδικασίες όπως η εξάτμιση, η βροχή, η διήθηση, η διαπνοή, η κατείσδυση, η αποθήκευση και η απορροή. Πολλές από αυτές τις διαδικασίες αποτελούν το αντικείμενο διαφόρων άλλων επιστημών, τα πορίσματα των οποίων ανασυνθέτει η Υδρολογία για να προσεγγίσει και να επιλύσει υδρολογικά προβλήματα. Έτσι λοιπόν η Υδρολογία είναι δευτερογενής επιστήμη που στηρίζεται στη Φυσική, στα Μαθηματικά, στη Μηχανική των Ρευστών, στη Στατιστική, στη Γεωλογία, στη Μετεωρολογία και σε άλλες επιστήμες.

Το πεδίο μελέτης της Υδρολογίας περιλαμβάνει την ατμόσφαιρα (μέχρι ύψους περίπου 15 km), την επιφάνεια και το εσωτερικό της λιθόσφαιρας (μέχρι βάθους περίπου 1 km) και την υδρόσφαιρα (ωκεανούς). Μέσα στο σύστημα των τριών αυτών τμημάτων του πλανήτη, με τις συνεχείς αλληλεπιδράσεις τους, εξελίσσεται ο υδρολογικός κύκλος.

Οι διάφορες φάσεις του υδρολογικού κύκλου αναπτύσσονται με διαφορετική ένταση κάθε φορά, τόσο χρονικά όσο και χωρικά. Έτσι η παροχή ενός ποταμού σε συγκεκριμένη θέση άλλοτε έχει πολύ υψηλές τιμές (πλημμύρες) και άλλοτε πολύ χαμηλές σε σχέση προς τη συνηθισμένη παροχή του. Τέτοιες ακραίες τιμές των υδρολογικών φαινομένων έχουν ιδιαίτερη σημασία στον υδρολόγο Μηχανικό, δεδομένου ότι τα διάφορα υδραυλικά έργα μελετώνται για να ανταποκρίνονται σε περιόδους εμφάνισης ακραίων τιμών.

Αν λάβουμε υπόψη ότι η ένταση με την οποία εμφανίζεται ένα υδρολογικό φαινόμενο είναι, ως ένα βαθμό τυχαία, κατά την μελέτη σημαντικών υδραυλικών έργων είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την πιθανότητα εμφάνισης των ακραίων τιμών των φαινομένων σε καθορισμένη χρονική περίοδο, που συνήθως αντιπροσωπεύει και την οικονομική ζωή του έργου.

Το νερό στον πλανήτη μας

Το ποσό του νερού στον πλανήτη μας, από την αυγή της ιστορίας του, είναι πρακτικά σταθερό και ανέρχεται περίπου στα $1600 \times 10^6 \text{ Km}^3$ (48×10^{45} μόρια H_2O). Ένα μέρος του νερού αυτού είναι χημικά συνδεδεμένο με τα υλικά του μανδύα της γης. Αυτό το κρυσταλλικό νερό προς το παρόν ανέρχεται σε $230 \times 10^6 \text{ Km}^3$ και

ελαττώνεται κάθε χρόνο κατά 170 Km^3 , είναι η ποσότητα του νεαρού (Juvenile) νερού που εξέρχεται από το εσωτερικό της γης στην επιφάνεια της, αυξάνοντας έτσι το επιφανειακό και υπόγειο νερό.

Έτσι, το ποσό του νερού που απαντά ελεύθερο στην επιφάνεια του πλανήτη μας ανέρχεται σε $1370 \times 10^6 \text{ Km}^3$ και αντιστοιχεί σε ένα στρώμα νερού γύρω από ολόκληρη την υδρόγειο ($510 \times 10^6 \text{ Km}^3$) πάχους 2700m, ή σε ένα μέσο βάθος νερού στις θάλασσες και τους ωκεανούς (374.106 Km^2) της τάξης των 3700m. Από την ποσότητα αυτή του ελεύθερου νερού ποσοστό 97,2% είναι αλμυρό (θαλασσινό), που δεν προσφέρεται αυτούσιο για κάποια χρήση (ύδρευση, άρδευση, βιομηχανική χρήση). Δεν προσφέρεται, επίσης, για χρήση η ποσότητα νερού που αντιπροσωπεύουν το χιόνι και ο πάγος (ποσοστό 2,1% στο σύνολο) καθώς και οι ατμοσφαιρικοί υδρατμοί (0,001%). Κατά συνέπεια, από τις τεράστιες υγρές ποσότητες που κατακλύζουν τον πλανήτη μας, μόνο ποσοστό 0,6% είναι διαθέσιμο στον άνθρωπο.

Παράμετρος	Επιφάνεια 10^6 km^2	Όγκος 10^6 km^3	Όγκος %	Ισοδύναμο πάχος Στρώματος σε m	Μέσος χρόνος παραμονής
Ωκεανοί θάλασσες	361,00	1370	94,00	2500,00	4000 χρόνια
Τεχνητές Φυσικές λίμνες	1,55	0,13	<0,01	0,25	1-10 "
Έλη	<0,1	<0,01	<0,01	0,007	1-10 "
Ποταμοί	<0,1	<0,01	<0,01	0,003	2 εβδομάδες
Υγρασία	130,0	0,07		0,13	2 εβδομάδες
Υπόγειο νερό	130,0	60,00	4,00	120,00	- 1 χρόνο
Παγετώνες	17,8	30,00	2,00	60,00	2 εβδομάδες
Ατμοσφαιρικό νερό	504,0	0,01	<0,01	0,025	-10000 χρόνο
Βιοσφαιρικό νερό	<0,1	0,01	<0,01	0,001	10 - 1000 χρόνια
					10 μέρες
					1 εβδομάδα

Πίνακας 1. Εκτιμητέο υδατικό ισοζύγιο της Υδρογείου (Nace 1971).

Αυτό το ποσοστό αντιπροσωπεύει $8,2 \times 10^6 \text{ Km}^3$ νερού, το οποίο αντιστοιχεί σε ένα υδάτινο στρώμα πάνω στη ξηρά (έκταση 136.106 Km^2) πάχους 60m περίπου. Από την ποσότητα αυτή ποσοστό 12 % αντιπροσωπεύεται από το επιφανειακό νερό (ποταμοί-λίμνες), ενώ το υπόλοιπο ποσό, περίπου $7,2 \times 10^6 \text{ Km}^3$, είναι υπόγειο νερό. Όμως, το μισό απ' αυτή την ποσότητα δεν είναι άμεσα διαθέσιμο στον άνθρωπο γιατί βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο από 800m., ενώ πρέπει να αφαιρεθεί ποσοστό 0,6% της συνολικής ποσότητας του υπόγειου νερού, που αποτελούν η υγρασία και οι διάφορες απώλειες. Από τα πιο πάνω προκύπτει τελικά ότι ο άνθρωπος έχει στη διάθεσή του $0,1 \times 10^6 \text{ Km}^3$ επιφανειακού νερού και $3,0 \times 10^6 \text{ Km}^3$ υπόγειου νερού. Οι τιμές της κατανομής του νερού στον πλανήτη διαφέρουν από ερευνητή σε ερευνητή.

Ο άνθρωπος και το νερό

Το νερό είναι απαραίτητο όχι μόνο για τον άνθρωπο αλλά για κάθε μορφή ζωής. Είναι γνωστό ότι υπάρχουν οργανισμοί που μπορούν να ζήσουν χωρίς οξυγόνο, σε αναερόβιες συνθήκες, ζωή όμως χωρίς νερό είναι αδύνατη.

Πριν από μια δεκαετία το υπόγειο νερό το θεωρούσαν σαν ένα πόρο και σαν τέτοιο το αξιοποιούσαν, δηλαδή το εκμεταλλεύονταν σαν ένα ορυκτό (εξόρυξη). Ο χρόνος όμως που πέρασε έδειξε ότι το υπόγειο νερό είναι κάτι πολύ περισσότερο από ένας πόρος. Είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό του φυσικού περιβάλλοντος οδηγεί ή δημιουργεί περιβαλλοντολογικά προβλήματα και συχνά προσφέρει ένα μέσον για περιβαλλοντολογικές λύσεις. Είναι μέρος του υδρολογικού κύκλου, δηλαδή του γήινου κυκλοφορικού συστήματος και η κατανόηση του ρόλου του στον κύκλο αυτό αποκτά ουσία όταν γίνεται η θεώρησή του στο σύνολο των υδατικών πόρων της λεκάνης απορροής - με ολοκληρωμένες στοχαστικές και προσδιοριστικές αναλύσεις - αλλά και στις τοπικές εκτιμήσεις της υποβάθμισης του περιβάλλοντος.

Το νερό είναι λοιπόν το πολυτιμότερο ορυκτό, η βασικότερη πρώτη ύλη που η έλλειψη της είναι ο πιο σημαντικός περιοριστικός παράγοντας για την οικονομική, κοινωνική και πολιτιστική ανάπτυξη.

Η μέση κατά κεφαλή "κατανάλωση" νερού σε μια αναπτυγμένη χώρα είναι 315 l/day περίπου και αναλύεται ως εξής (Nat. Georg. Soc. Journal, Vol. 158, No 2/80):

- 121 λίτρα για τις οικιακές ανάγκες
- 91 " " την τουαλέτα
- 95 " " γκαζόν και πισίνα
- 8 " " πόση και μαγείρεμα

Τα τελευταία 8 λίτρα νερού είναι η μοναδική ποσότητα που είναι τελείως απαραίτητη για την επιβίωση του ανθρώπου. Τα υπόλοιπα 307 λίτρα αποτελούν την πιο φτηνή "πολυτέλεια" και "άνεση", απ' αυτές που μπορεί να απολαμβάνει ο μέσος πολίτης ακόμα και σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες.

Όμως στο 75% του πληθυσμού της γης, όπου δεν έχουν προβλεφθεί υγειονομικά μέτρα για το νερό, εκτιμάται ότι 10 εκατομμύρια άνθρωποι έχασαν στο 1980 τη ζωή τους από ασθένειες, που τους προκάλεσε το νερό που ήπιαν. Αλλά για να συνεχίσουμε την απαρίθμηση των τεράστιων ποσοτήτων νερού που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος, σημειώνουμε ότι για την παραγωγή ενός αυγού έχουν χρησιμοποιηθεί 450 κιλά και για μια μοσχαρίσια μπριζόλα 13 m³ νερού περίπου. Για ένα τόνο χάλυβα από το αυτοκίνητο μας έχουν "χρησιμοποιηθεί" 227 m³ νερού. Δεν είναι υπερβολή να δεχθούμε ότι ο καθένας μας "κοστίζει" γύρω στα 7,5 m³ νερό το 24ωρο, ή 170.000 περίπου m³ σ' όλη τη διάρκεια της ζωής μας.

Προϊόν ή Υπηρεσία	Κατανάλωση	Μονάδες
Κάρβουνο	250	1/tonne
Γυαλί	70	1/kg
Ψωμί.....	1,3	1/kg
Ζάχαρη	9	1/kg
Προϊόντα κρέατος	16	1/kg
Τυρί.....	20	1/kg
Εμφιάλωση γάλακτος.....	3	1/kg
Βούτυρο	11	1/kg
Μπύρα.....	5	1/1
Πλυντήρια	30	1/kg
Αναψυκτικά.....	7	1/1
Κονσερβοποιία φρούτων.....	20	1/kg
Κονσερβοποιία λαχανικών	10	1/kg
Χημικά	5	1/kg
Συνθετικές ίνες	200000	1/tonne
Έλαση χάλυβα	1900	1/tonne
Χαλβουργία	4000	1/tonne
Διυλιστήρια πετρελαίου	10	1/kg
Μεταλλουργία αλουμινίου	8500	1/tonne
Αυτοκίνητα.....	5000	1/όχημα
Ηλεκτρόλυση.....	15300	1/tonne
Χαλιά	34	1/m ²
Βαφή υφασμάτων	80	1/kg
Σκυρόδεμα.....	390	1/m ³
Χαρτί.....	54000	1/tonne
Αγελαδοτροφία	150	1/ζώο
Χοιροτροφία	15	1/χοίρο
Οрниθοτροφία	0,3	1/πτηνό
Σχολεία.....	75	1/άτομο. ημέρα
Νοσοκομεία.....	175	1/άτομο. ημέρα
Ξενοδοχεία	760	1/υπάλληλο. ημέρα
Καταστήματα.....	135	1/υπάλληλο. ημέρα
Γραφεία.....	60	1/υπάλληλο. ημέρα

Πίνακας 2. Παραδείγματα βιομηχανικών και άλλων χρήσεων νερού (κατά Thackray et al. 1978, και Tebbut, 1971).

Η ιστορία του νερού σε σχέση με την ανθρώπινη εξέλιξη

Η ιστορία του νερού αρχίζει μαζί με την ιστορία του ανθρώπου. Ο πρωτόγονος άνθρωπος φρόντιζε να κατοικεί κοντά σε πηγές, λίμνες και ποτάμια. Οι πρώτοι, μεγάλοι πολιτισμοί (4.000 π.Χ.) αναπτύχθηκαν κοντά σε ποταμούς, ο Αιγυπτιακός στην κοιλάδα του Νείλου, ο στην Μεσοποταμία, ο Ινδικός (Harappan) στην κοιλάδα του Ινδού και ο Σινικός στις όχθες του Κίτρινου ποταμού, καθώς και η οικονομική ευρωστία βασιζόταν στη γεωργική παραγωγή σε αρδευόμενα εδάφη.

Τα πρώτα υδραυλικά έργα κατασκευάζονται στις περιοχές του Νείλου, του Τίγρη και του Ευφράτη ήδη από τα τέλη της τρίτης χιλιετηρίδας π.χ. Ήταν έργα μεταφοράς, εκτροπής και προστασίας από τις πλημμύρες. Το πρώτο φράγμα κατασκευάζεται στην Αίγυπτο το 4.000 π.Χ. στον Νείλο από το βασιλιά Μένες, ενώ περί τα 3000 π.Χ. κατασκευάζεται δεύτερο φράγμα, μήκους, στη στέψη του 440 μ. και ύψους 15 μ. Περισσότερο εξελιγμένα αρδευτικά έργα κατασκευάζονται στην Αίγυπτο τον 14ο αιώνα π.Χ. θαυμαστό για την εποχή του ήταν το δίκτυο διωρύγων που κατασκεύασε ο βασιλιάς Hammurabi γύρω στα 1760 π.Χ. στην Μεσοποταμία.

Η ανόρυξη πηγαδιών αρχίζει επίσης πολύ νωρίς, στη Γένεση αναφέρεται ότι οι Φιλισταίοι έφραξαν τα πηγάδια που είχε κατασκευάσει (πριν 5000 χρόνια από σήμερα) ο γενάρχης των Εβραίων Αβραάμ. Επίσης οι Εβραίοι, κατά τις επί 40 χρόνια περιπλανήσεις τους στις ερήμους της Αραβίας, κατασκεύασαν πολλά πηγάδια. Γύρω στο 3000 π.Χ. η τέχνη της κατασκευής των πηγαδιών ήταν γνωστή στους Αιγυπτίους και τους Κινέζους και ίσως και στους Άραβες- Οι Κινέζοι χρησιμοποιώντας μπαμπού κατάφεραν να κατασκευάσουν πραγματικές γεωτρήσεις βάθους 1.500m. !! Από του 2000 π.Χ. ήδη οι Αιγυπτιακές οάσεις αρδεύονταν με αρτεσιανά πηγάδια.

Στην Παλαιστίνη κατασκευάζονται πριν από το 1200 π.Χ. σήραγγες μεταφοράς νερού. Η πιο γνωστή από τις αρχέγονες σήραγγες είναι εκείνη του Σιλωάμ (κολυμπήθρα του Σιλωάμ) που κατασκεύασε το 700 π.Χ. ο βασιλιάς Ιεζεκίας, με την οποία μεταφερόταν το νερό από τις πηγές του όρους Σιών στην Ιερουσαλήμ. Σπουδαία έργα ύδρευσης, αποχέτευσης και άρδευσης κατασκευάστηκαν στην Κρήτη στους Μινωϊκούς χρόνους.

Το καταπληκτικότερο όμως έργο συλλογής υπόγειων νερών είναι τα Περσικά Κάνατς, πρόκειται για σήραγγες που συνδέουν τους πυθμένες πηγαδιών. Η Τεχεράνη ακόμα και σήμερα υδρεύεται με 36 σήραγγες Κάνατς, που το μήκος της κάθε μιας είναι 13 έως 26 Km και το βάθος τους 150m. Ο αριθμός των πηγαδιών ανέρχεται σε 40/Km. Η τεχνική των Κάνατς χρησιμοποιήθηκε αργότερα και από τους Αιγυπτίους.

Ανάλογο έργο είναι το Αδριάνειο υδραγωγείο, που χρησιμοποιήθηκε επί 2000 χρόνια για την ύδρευση της Αθήνας. Την τέχνη της ανόρυξης πηγαδιών γνώριζαν οι Μυκηναίοι και οι Αθηναίοι (6ος αιώνας π.Χ.), ενώ αξιοθαύμαστα υδραγωγεία κατασκευάστηκαν στα Μέγαρα - από τον Ευπαλίνο (625 π.Χ.) και αργότερα στην Αθήνα (Αδριάνειο).

Χρειάστηκαν πολλοί αιώνες μέχρι να γίνει απόλυτα κατανοητή η έννοια του υδρολογικού κύκλου. Και μόνο η λύση του προβλήματος της προέλευσης των υπόγειων νερών έδωσε οριστικό τέρμα στις διάφορες δοξασίες και έκανε γενικά αποδεκτό τον υδρολογικό κύκλο σαν μια φυσική διαδικασία ανακύκλωσης του νερού στον πλανήτη μας. Αν θελήσει κανείς να καταγράψει με βήματα - σταθμούς την ιστορική εξέλιξη της Υδρολογίας, θα συμφωνούσε με τον Ven Te Chow(1964), ο οποίος διακρίνει τους πιο κάτω σταθμούς:

α) Περίοδος της Υπόθεσης (Αρχαιότητα - 1400 μ.Χ.) :

Κυριαρχούν οι απόψεις του Θαλή, του Πλάτωνα και του Αριστοτέλη στην Αρχαία Ελλάδα και του Σενέκα και του Πλίνιου στη Ρώμη. Το φωτεινό μυαλό του Μάρκου Βιτρούβιου βάζει το πρώτο λιθάρι στην οικοδόμηση του υδρολογικού κύκλου.

β) Περίοδος της Παρατήρησης (1400-1600) :

Στην περίοδο της Αναγέννησης δεσπόζουν οι απόψεις του Da Vinci και του B. Palissy, όπου ο υδρολογικός κύκλος γίνεται πια κατανοητός και διατυπώνεται έμμεσα η αρχή της "συνεχειάς".

γ) Περίοδος της Μέτρησης (1600-1700) :

Θεμελιώνεται η επιστήμη της Υδρολογίας από τους Per-rault, Mariotte και Halley.

δ) Περίοδος του Πειραματισμού (1700-1800) :

Θεμελιώνεται η Υδραυλική από τους Bernoulli, Pitot, Chezy κ.ά.

ε) Περίοδος του Εκσυγχρονισμού (1800-1900) :

Θεμελιώνεται η υδρολογία των υπόγειων νερών και η σύγχρονη υδρολογική επιστήμη. Την πιο σημαντική συμβολή έχουν οι Darcy, Smith, Poiseuille, Dupuit-Thiem, Ghyben - Herzberg κ.ά.

στ) Περίοδος του Εμπειρισμού (1900-1930) :

Δεσπόζουν οι εμπειρικοί τύποι, που προτείνονται για τον υπολογισμό των φυσικών μεγεθών του υδρολογικού κύκλου, με προσφορά πληθώρας συντελεστών και παραμέτρων που είχε να επιλέξει ο ερευνητής κατά τη χρησιμοποίηση των πιο πάνω τύπων.

ζ) Περίοδος του Ορθολογισμού (1930-1950) :

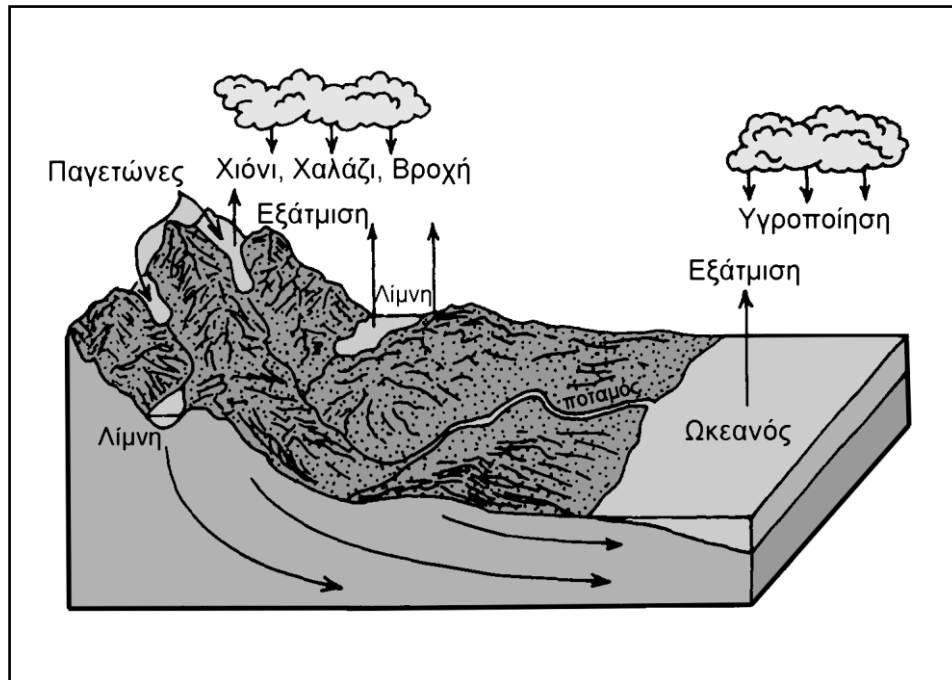
Οι Sherrnan (μοναδιαίο υδρογράφημα), Horton (θεωρεία κατεΐσδυσης), Theis (υδραυλική των φρεάτων), Gumbel (ανάλυση συχνότητας υδρολογικών δεδομένων), Hazen (στατιστική) που είχε προηγηθεί αλλά που οι απόψεις του βρίσκουν μεγάλη τώρα ανταπόκριση κ.ά., χρησιμοποιούν την ορθολογική ανάλυση αντί της εμπειρικής για την επίλυση των υδρολογικών προβλημάτων. Κατά την ίδια περίοδο θεμελιώνεται η υδρομετεωρολογία (Bernard, 1944).

η) Περίοδος της θεωρίας (1950 - σήμερα) :

Χρησιμοποιείται η ανάλυση συστημάτων με τη χρησιμοποίηση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, θεμελιώνεται η σύγχρονη μηχανική των ρευστών και η θεωρητική Υδρολογία.

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ (Η ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ) - ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

Με τον όρο υδρολογικός κύκλος εννοούμε τη σταθερή και αδιάκοπη κίνηση του νερού στην ατμόσφαιρα, στην επιφάνεια της γης και στο υπέδαφος.



Σχήμα 1. Σχηματική παράσταση του υδρολογικού κύκλου.

Η σημασία του υδρολογικού κύκλου είναι βασική στην κατανόηση της εμφάνισης και κίνησης του νερού, καθώς και στην ανάπτυξη και διαχείριση των υδάτινων πόρων.

Ο υδρολογικός κύκλος είναι μια συνεχής διαδικασία που δεν παρουσιάζει αρχή και τέλος. Παρόλα αυτά, έχει καθιερωθεί η περιγραφή του να αρχίζει με την εξάτμιση του νερού των ωκεανών, δεδομένου ότι αυτοί καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της υδρογείου.

Το νερό που εξατμίζεται από τους ωκεανούς σχηματίζει τα σύννεφα, τα οποία κάτω από κατάλληλες συνθήκες συμπυκνώνονται και σχηματίζουν τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (βροχή, χιόνι, χαλάζι, δροσιά κ.λ.π.).

Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (P), πέφτοντας στην επιφάνεια της γης ακολουθούν έναν αριθμό διαφορετικών διαδρομών του υδρολογικού κύκλου. Το μεγαλύτερο μέρος τους πέφτει στους ωκεανούς και αποδίδεται πάλι στην ατμόσφαιρα, με την εξάτμιση. Ένα πολύ μικρό ποσοστό εξατμίζεται και επιστρέφει

στην ατμόσφαιρα, προτού καν φθάσει στην επιφάνεια της γης. Τέλος ένα τμήμα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων πέφτει στην ξηρά, όπου είτε εξατμίζεται αμέσως ερχόμενο σε επαφή με το έδαφος, την βλάστηση κ.α. είτε μπορεί να ακολουθήσει έναν από τους δύο παρακάτω δρόμους:

Ένα μέρος απορρέει επιφανειακά, τροφοδοτώντας τα ρυάκια, τους χείμαρρους, τους παραπόταμους και τους ποταμούς και καταλήγει στις λίμνες ή τις θάλασσες, απ' όπου, με την εξάτμιση, επιστρέφει στην ατμόσφαιρα. Το νερό αυτό που διακινείται μέσω του υδρογραφικού δικτύου, αποτελεί την επιφανειακή απορροή (R).

Το άλλο μέρος διεισδύει στη γη από τους πόρους ή τις ρωγμές και τα ρήγματα των διαφόρων πετρωμάτων και σχηματίζει το υπόγειο νερό, ή προστίθεται σ' αυτό. Το νερό αυτό μετά από μία μικρή ή μεγάλη, αργή ή γρήγορη πορεία μέσα στο υπέδαφος, επανέρχεται στην επιφάνεια της γης μέσα από τις πηγές, τροφοδοτεί τους ποταμούς, ή οδηγείται στη θάλασσα, ή ακόμα με τη βοήθεια του ριζικού συστήματος των φυτών και του φαινομένου της διαπνοής, επανέρχεται στην ατμόσφαιρα. Το νερό που διαπερνά την επιφάνεια της γης και εισέρχεται σ αυτή, αποτελεί την κατείδυση (I).

Τέλος μία σημαντική ποσότητα νερού επιστρέφει στην ατμόσφαιρα είτε με την εξάτμιση του νερού των λιμνών, των ποταμών και των στρωμάτων που είναι πολύ κοντά στην επιφάνεια της γης, είτε με το φαινόμενο της διαπνοής των φυτών. Το σύνολο των μερικών αυτών περιπτώσεων ονομάζεται εξατμισιδιαπνοή (E).

Μετά τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι ο υδρολογικός κύκλος, ή κύκλος του νερού μπορεί να εκφραστεί με την παρακάτω μαθηματική εξίσωση, που είναι γνωστή και σαν τύπος του υδρολογικού ισοζυγίου.

$$P = E + R + I$$

Όπου : P=ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

E=εξατμισιδιαπνοή

R=επιφανειακή απορροή

I=κατείδυση

Τα δεύτερα μέλη της παραπάνω εξίσωσης, είναι γνωστά και σαν φάσεις του υδρολογικού ισοζυγίου και εκφράζονται σε χιλιοστά (mm), σε μονάδες όγκου (π.χ. m³) είτε σε (%) ποσοστά επί των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.

Η εκτίμηση των φάσεων και η εφαρμογή του τύπου του υδρολογικού ισοζυγίου γίνεται σε συγκεκριμένα τμήματα της επιφάνειας της γης που ονομάζονται υδρολογικές λεκάνες (ή λεκάνες απορροής).

Για ένα παγκόσμιο υδρολογικό ισοζύγιο είναι απαραίτητη η σύνταξη ξεχωριστών ισοζυγίων για την ξηρά και τις θαλάσσιες περιοχές. Τα ισοζύγια αυτά πρέπει να στηρίζονται σε μακροχρόνιες μετρήσεις, προκειμένου να εξομαλυνθούν οι κλιματικές διακυμάνσεις.

Ο όγκος του νερού που παίρνει μέρος στις διαδικασίες του υδρολογικού ισοζυγίου διαφέρει όχι μόνο στα διάφορα γεωγραφικά μήκη και πλάτη αλλά ακόμα και από περιοχή σε περιοχή.

Ανεξάρτητα από τη μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί για τη σύνταξη ενός υδρολογικού ισοζυγίου, απαιτείται η εγκατάσταση ενός ελάχιστου αριθμού οργάνων και εκτέλεση των αντίστοιχων παρατηρήσεων, όπως:

- Μετεωρολογικά όργανα (βροχόμετρα, χρονόμετρα, εξατμισήμετρα κλπ.).
- Όργανα μετρήσεως της υγρασίας του εδάφους συνιστάται η χρησιμοποίηση ραδιενεργών ισοτόπων (με χρησιμοποίηση ακτινοβολίας γ ή νετρονίων).
- Δειγματοληψία εδάφους για τον προσδιορισμό της υγρασίας του εδάφους.
- Πιεζόμετρα για την εκτέλεση πιεζομετρικών παρατηρήσεων.
- Σταθμημετρικοί σταθμοί (υπερχειλιστές-σταθμήμετρα) για τη μέτρηση της απορροής.

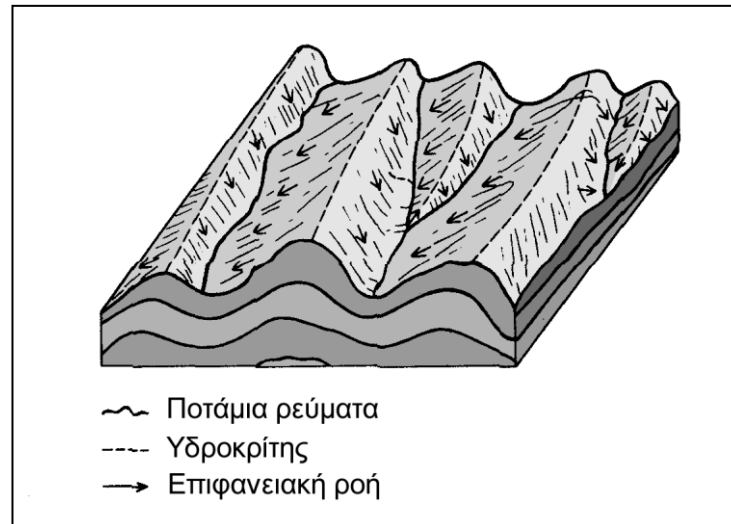
Λεκάνη απορροής

Για να υπολογίσουμε τις παραμέτρους του υδρολογικού ισοζυγίου πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μια λεκάνη απορροής. Ονομάζουμε λεκάνη απορροής ενός ποταμού, ή υδρολογική λεκάνη, ένα τμήμα της επιφάνειας του εδάφους, πάνω στο οποίο τα νερά που ρέουν επιφανειακά αποστραγγίζονται από το υδρογραφικό δίκτυο του εν λόγω ποταμού.

Οι λεκάνες που σχηματίζονται από τους παραπόταμους, ονομάζονται υπολεκάνες και ανάλογα με την τάξη του παραπόταμου που περιέχουν τις διακρίνουμε σε υπολεκάνες 1ης, 2ης, 3ης κ.λπ. τάξεως. Το άθροισμα των επί μέρους λεκανών μας κάνει τη λεκάνη του κυρίως ποταμού. Τα όρια κάθε λεκάνης καθορίζονται από μία γραμμή που λέγεται υδροκριτική γραμμή ή υδροκρίτης. Ο υδροκρίτης σχηματίζεται ενώνοντας τα ψηλότερα σημεία μιας περιοχής, που

εκατέρωθεν αυτού τα επιφανειακά νερά κατευθύνονται προς διαφορετικές λεκάνες απορροής. Εξ' άλλου η λέξη υδροκρίτης, σημαίνει ότι κρίνει την τύχη των υδάτων.

Τα στοιχεία μιας λεκάνης απορροής που παίζουν ρόλο στον καθορισμό του υδρολογικού ισοζυγίου εκτός από τα κλιματικά (βροχοπτώσεις, θερμοκρασίες) είναι:



Σχήμα 2. Τρισδιάστατη απεικόνιση όπου σημειώνονται τα ποτάμια ρεύματα, η επιφανειακή ροή του νερού και η υδροκριτική γραμμή (υδροκρίτης) που οριοθετεί μια λεκάνη απορροής.

- Η φύση των πετρωμάτων που καλύπτουν τη λεκάνη και οι σχέσεις μεταξύ τους. Λέγοντας φύση των πετρωμάτων, τα εξετάζουμε κυρίως από πλευράς περατότητας και θέσεως που έχουν στη λεκάνη. Αν π.χ. υπάρχει ένας αδιαπέραστος σχηματισμός στα όρια της λεκάνης, τότε το νερό που πέφτει σ' αυτόν απορρέει επιφανειακά και δεν κατεισδύει, αν κατερχόμενο συναντήσει ένα υδροπερατό σχηματισμό μπορεί να τον εμπλουτίσει, εκτός από το νερό που δέχεται κατευθείαν από τις βροχοπτώσεις όπως π.χ. μια λεκάνη που αποτελείται από ασβεστόλιθο και φλύσχη.
- Η μορφολογία της λεκάνης και του υδρογραφικού δικτύου. Εννοούμε τον ποσοτικό προσδιορισμό ορισμένων παραμέτρων που έχουν σχέση με το υδρολογικό ισοζύγιο όπως είναι:

ι) Η μέση κλίση λεκάνης
$$P = \frac{D \cdot L}{E}$$

όπου P = μέση κλίση

D = ισοδιάσταση

$L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n$ το συνολικό μήκος των ισοϋψών καμπυλών.

E = έκταση λεκάνης

Είναι φανερό ότι όσο η μορφολογική κλίση αυξάνει, αυξάνει και ο συντελεστής επιφανειακής απορροής R, ενώ όσο η μορφολογική κλίση μικραίνει, αυξάνει ο συντελεστής κατείδυσης I, εννοείται βέβαια για τον ίδιο λιθολογικό σχηματισμό.

ii) Η κατανομή της επιφάνειας στα διάφορα υψόμετρα (υψογραφική καμπύλη)

Το ύψος των βροχοπτώσεων εκτός των άλλων παραγόντων εξαρτάται από το απόλυτο υψόμετρο. Για την κατασκευή της υψογραφικής καμπύλης συντάσσεται ένας πίνακας όπως παρακάτω.

Ισοϋψείς	Επιφάνεια μεταξύ δύο διαδοχικών ισοϋψών σε Km ²	Επιφάνεια α επί τοις %	Επιφάνεια επί τοις % αθροιστικά
0-100	6,47	15,92	15,92
100-200	16,01	30,42	55,34
200-300	6,86	16,91	72,25
300-400	3,08	7,57	79,82
400-500	2,55	6,30	86,12
500-600	2,74	6,75	92,87
600-700	1,51	3,73	96,60
700-800	0,97	2,38	98,98
800-900	3,38	0,96	99,94
900-1000	0,02	0,04	99,98
Σύνολο	40,6		

Πίνακας 3. Στοιχεία που απαιτούνται για την κατασκευή της αθροιστικής καμπύλης

Στη συνέχεια σε ένα μιλλιμετρέ χαρτί τοποθετούμε στον άξονα των χ την επί τοις % αθροιστική επιφάνεια και τον άξονα των ψ το υψόμετρο.

iii) Το μέσο υψόμετρο

$$H_{\mu} = \frac{\Sigma \alpha \cdot \varepsilon}{E}$$

όπου H_{μ} = μέσο υψόμετρο

α = επιφάνεια μεταξύ διαδοχικών ισοϋψών

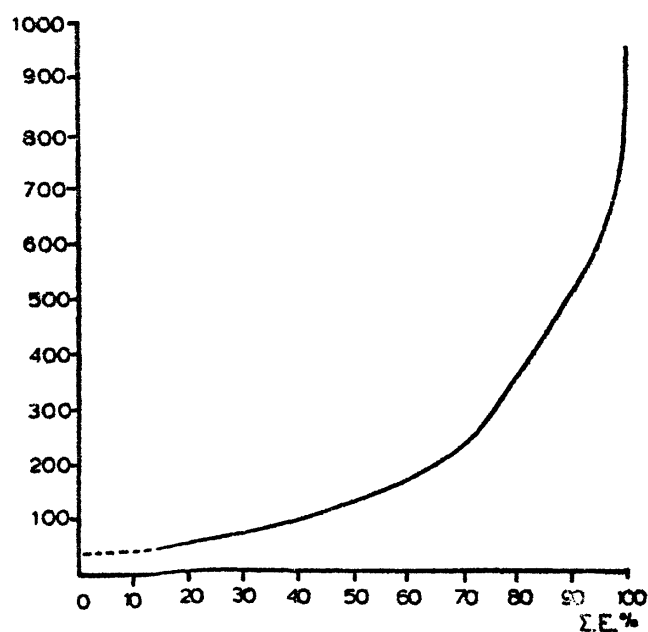
ε = ημιάθροισμα των τιμών μεταξύ διαδοχικών ισοϋψών

E = συνολική επιφάνεια

Παράδειγμα: Από τον προηγούμενο πίνακα έχουμε:

$$H_{\mu} = \frac{6,47 \cdot 50 + 16,01 \cdot 150 + 6,86 \cdot 250 + \dots \dots \dots}{40,6} = \alpha \text{ μετρα}$$

Λέγοντας μέσο υψόμετρο εννοούμε το απόλυτο υψόμετρο που θα είχε η περιοχή της λεκάνης αν ήταν κατά κάποιο τρόπο επίπεδη επιφάνεια.



Σχήμα 3. Υψογραφική καμπύλη μιας λεκάνης απορροής.

iv) Ανάλυση υδρογραφικού δικτύου

α. Συντελεστής αποστραγγίσεως:

$$d = \frac{E}{L}$$

όπου E = συνολική επιφάνεια και

L = συνολικό μήκος των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου

β. Πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου

$$D = \frac{N}{E}$$

όπου N = αριθμός των κλάδων ανεξαρτήτως τάξεως

E = επιφάνεια λεκάνης

Ένα πυκνό υδρογραφικό δίκτυο δημιουργείται εκεί που έχουμε πολλά επιφανειακά νερά και αντίθετα. Τα επιφανειακά νερά έχουν όμως άμεση σχέση με την περατότητα των γεωλογικών σχηματισμών που δομούν την περιοχή. Αν παρατηρήσει κανείς ένα γεωλογικό χάρτη, θα δει ότι σε περιοχή με αργιλικούς σχηματισμούς (φλύσχη, σχιστόλιθους), το υδρογραφικό δίκτυο είναι πολύ πυκνότερο από ότι σε περιοχές με ανθρακικούς σχηματισμούς (υδροπερατοί).

Η βλάστηση έχει μεγάλη επίδραση στο υδρολογικό ισοζύγιο. Είναι αρνητική σε ότι αφορά την επιφανειακή απορροή και θετική σε ότι αφορά την εξατμισοδιαπνοή. Η επίδραση του ανθρώπου παίζει επίσης σπουδαίο ρόλο στο ισοζύγιο. Π.χ. η άρση διευκολύνει την κατείσδυση και περιορίζει την απορροή. Η μεταβολή της βλάστησης και γενικά των καλλιεργειών παίζει επίσης σπουδαίο ρόλο. Το ίδιο και η άντληση των υπόγειων νερών που είναι και η σημαντικότερη επίδραση του ανθρώπου.

Η υδρογεωλογική λεκάνη.

Η υδρογεωλογική λεκάνη είναι μια υδρογεωλογική ενότητα που περιέχει ένα μεγάλο, ή περισσότερους αλληλοσυνδεόμενους υδροφόρους. Μια υδρογεωλογική λεκάνη σημαίνει, με άλλα λόγια, μια περιοχή που περιλαμβάνει υπόγεια αποθήκη ικανή να δώσει αξιόλογη ποσότητα νερού. Τέτοια λεκάνη μπορεί να συμπίπτει ή όχι με μια φυσιογραφική μονάδα, ή με μια υδρολογική λεκάνη. Η τελευταία είναι ταυτόσημη με τη λεκάνη απορροής, δηλαδή με τη λεκάνη ενός υδρορεύματος που ορίζεται από την υδροκριτική γραμμή ή τον υδροκρίτη, που είναι η γραμμή εκατέρωθεν της οποίας τα επιφανειακά νερά ρέουν προς αντίθετες κατευθύνσεις. Με άλλα λόγια, η λεκάνη απορροής είναι η φυσιογραφική ενότητα που τροφοδοτεί με επιφανειακό νερό ένα υδρόρευμα, ενώ η υδρογεωλογική λεκάνη είναι η γεωλογική ενότητα που τροφοδοτεί με υπόγειο νερό έναν υδροφόρο ορίζοντα. Η λεκάνη απορροής και η υδρογεωλογική λεκάνη μπορεί να συμπίπτουν ή όχι. Σε μια κοιλάδα που διαμορφώνεται ανάμεσα σε βουνά, η υδρογεωλογική λεκάνη είναι δυνατόν να κατέχει μόνο το κεντρικό τμήμα της λεκάνης απορροής. Αντίθετα, στους καρστικούς σχηματισμούς και στους αμμόλοφους οι δύο λεκάνες είναι τελείως διαφορετικές και συχνά ανεξάρτητες ανάμεσα τους.

ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΑ

Βροχομετρικά δίκτυα

Η πυκνότητα και σύνθεση ενός βροχομετρικού δικτύου εξαρτώνται βασικά από το σκοπό για τον οποίο προορίζονται οι βροχομετρικές παρατηρήσεις καθώς και από την παρατηρούμενη ανομοιομορφία των βροχών μιας συγκεκριμένης περιοχής. Έτσι λοιπόν για τις υδρολογικές μελέτες απαιτείται ένα πυκνό δίκτυο βροχομετρικών σταθμών.

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Μετεωρολογίας συνιστά την ελάχιστη πυκνότητα μετεωρολογικών σταθμών για υδρολογικούς σκοπούς στις μεσογειακές χώρες:

- i. Στις πεδινές περιοχές: 1 σταθμό ανά 600-900 km².
- ii. Στις ορεινές περιοχές: 1 σταθμό ανά 100-250 km².

Οι σταθμοί καλό θα ήταν να κατανέμονται στις υψομετρικές ζώνες με υψομετρική διαφορά 500m περίπου κατά ζώνη και το 10% αυτών (το ελάχιστο) να είναι εφοδιασμένοι με αυτογραφικά όργανα.

Για κάθε υδρομετρικό σταθμό πρέπει να αντιστοιχούν κατ' ελάχιστο δύο βροχομετρικοί σταθμοί, ένας κοντά στον υδρομετρικό σταθμό και ένας άλλος στο ανώτερο τμήμα της υδρολογικής λεκάνης του υδατορεύματος.

Οι παρατηρήσεις εις τους βροχομετρικούς σταθμούς με απλό βροχόμετρο διεξάγονται από την ΕΜΥ (Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία) δυο φορές την ημέρα κατά τις ώρες 08:00 και 20:00.

Επεξεργασία των βροχομετρικών παρατηρήσεων

Επεξεργασία των βροχομετρικών παρατηρήσεων ενός σταθμού.

Από την ανάγνωση των βροχομετρικών οργάνων προσδιορίζεται αρχικά το ημερήσιο ύψος βροχής σε κάθε βροχομετρικό σταθμό. Από τα δεδομένα των ημερησίων υψών βροχής προσδιορίζονται στη συνέχεια, ως αθροίσματα των σχετικών ημερησίων υψών, τα μηνιαία ύψη βροχής ή τα ύψη αυτής κατά την διάρκεια οιασδήποτε χρονικής περιόδου μικρότερης του έτους (π.χ. εβδομάδας ή εποχής). Τέλος προσδιορίζεται το ετήσιο ύψος βροχής αναφερόμενο στην διάρκεια του υδρολογικού έτους.

Ως υδρολογικό έτος χαρακτηρίζεται η χρονική περίοδος ίση προς το ημερολογιακό έτος, που ξεκινά όμως με διαφορετική ημερομηνία και κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η αρχή του υδρολογικού έτους να συμπίπτει με την έναρξη της βροχερής περιόδου συγκεκριμένης περιοχής. Σε γενικές γραμμές στην Ελλάδα το υδρολογικό έτος αρχίζει τη 1η Οκτωβρίου και λήγει τη 30η Σεπτεμβρίου.

Από τις παραπάνω τιμές καθορίζονται στη συνέχεια το μέγιστο και το ελάχιστο ύψος βροχής ισόχρονων περιόδων κατά τη διάρκεια του υδρολογικού έτους. Από ομοειδείς παρατηρήσεις σειράς ετών υπολογίζεται ο μέσος όρος, το μέσο ύψος βροχής_εβδομάδος, μηνός, εποχής ή έτους (μέσο εβδομαδιαίο, μηνιαίο, εποχιακό ή ετήσιο ύψος βροχής). Επίσης προσδιορίζονται το απολύτως μέγιστο και το απολύτως ελάχιστο ύψος βροχής συγκεκριμένης περιόδου, κατά τη χρονική διάρκεια του συνόλου των διατιθεμένων παρατηρήσεων, όπως και το μέσο μέγιστο και μέσο ελάχιστο ύψος βροχής, σειράς ισοχρόνων περιόδων. Το μέσο ύψος βροχής μιας χρονικής περιόδου υπολογιζόμενο από τις παρατηρήσεις μιας τριακονταετίας ονομάζεται κανονικό ύψος βροχής της περιόδου αυτής.

Ειδικότερα για περιόδους μικρότερες της ημέρας ή προκειμένου για τον προσδιορισμό της έντασης μιας ραγδαίας βροχής, το ύψος καθορίζεται ακριβέστερα από τα δεδομένα διαγραμμάτων των αυτογραφικών οργάνων. Αναλόγως για το σκοπό για τον οποίο προορίζονται τα βροχομετρικά δεδομένα, είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός του μεγίστου ύψους βροχής, στις χρονικές διάρκειες συνήθως 1, 2, 4, 6, 12, 24, 36, 48, 72 και 96 ωρών. Αν διαιρεθεί το ύψος της βροχής, δια του αντιστοίχου χρονικού διαστήματος στο οποίο πραγματοποιήθηκε αυτό, προκύπτει η (μέση) ένταση της βροχής στο θεωρούμενο βροχομετρικό σταθμό.

Εκτίμηση ελλειπών παρατηρήσεων.

Πολλές φορές εμφανίζεται η περίπτωση έλλειψης ορισμένων παρατηρήσεων ενός σταθμού (βλάβη του οργάνου ή άλλη αιτία). Είναι αναγκαία λοιπόν η συμπλήρωση αυτών με μεθοδολογίες εκτίμησης, ώστε να υπάρχει μια πλήρης σειρά διατιθεμένων παρατηρήσεων του σταθμού. Δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται γι αυτό βασιζόμενες σε ταυτόχρονες παρατηρήσεις τριών γειτονικών σταθμών ομοιόμορφα κατανεμημένων γύρω από τον σταθμό με τις ελλειπείς παρατηρήσεις.

- i. Εάν το κανονικό ετήσιο ύψος βροχής σε κάθε ένα από τους τρεις γειτονικούς σταθμούς Α, Β, Γ διαφέρει του σταθμού Χ κατά λιγότερο του 10% τότε ο απλός

αριθμητικός μέσος όρος των ενδείξεων των τριών σταθμών αντικαθιστά την ελλιπή παρατήρηση του σταθμού X.

- ii. Αν η διαφορά είναι μεγαλύτερη του 10% ακόμη και για έναν από τους γειτονικούς σταθμούς, τότε χρησιμοποιείται ο αριθμητικός μέσος όρος με βάρος, που δίνεται από τη σχέση:

$$P_x = \frac{1}{3} \left(\frac{N_x}{N_A} P_A + \frac{N_x}{N_B} P_B + \frac{N_x}{N_\Gamma} P_\Gamma \right)$$

όπου P παριστά το ύψος βροχής της θεωρούμενης περιόδου και

N είναι το κανονικό ετήσιο ύψος βροχής.

Έλεγχος της ομογένειας των παρατηρήσεων ενός σταθμού - Διπλή αθροιστική καμπύλη.

Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν τη μέτρηση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Για να είναι οι βροχομετρικές παρατηρήσεις ομογενείς οι παράγοντες αυτοί πρέπει να παραμένουν αμετάβλητοι. Στο «ιστορικό» ενός βροχομετρικού σταθμού συμβαίνουν διάφορες αλλαγές, όπως η αντικατάσταση ενός οργάνου, η αλλαγή θέσης αυτού ή της μεθόδου παρατήρησης κ.λ. Για να ληφθεί υπόψη η σχετική επίδραση των παραγόντων αυτών ώστε οι παρατηρήσεις ενός σταθμού να γίνουν ομογενείς, χρησιμοποιείται η τεχνική της διπλής αθροιστικής καμπύλης.

Τα αθροιστικά εποχιακά ή ετήσια ύψη βροχής του εξεταζομένου σταθμού συγκρίνονται με εκείνα των αντίστοιχων αθροιστικών τιμών της μέσης βροχόπτωσης μιας αντιπροσωπευτικής ομάδας γειτονικών σταθμών, που χαρακτηρίζονται ως βασικοί. Η ομάδα αυτή πρέπει να περιλαμβάνει τουλάχιστον 10 βροχομετρικούς σταθμούς. Σημαντική αλλαγή της κλίσης της καμπύλης δηλώνει αλλαγή της θέσης του οργάνου στο παρελθόν ή άλλη σχετική μεταβολή στον θεωρούμενο σταθμό. Αλλαγή οφειλομένη στα μετεωρολογικά αίτια θα επιδρά ομοιότροπα σε όλους τους σταθμούς και καμία αλλαγή στην κλίση της καμπύλης δεν θα εμφανίζεται.

Οι σταθμοί των οποίων τα στοιχεία παρουσιάζουν σημαντική αλλαγή κλίσης της καμπύλης πρέπει να αποκλεισθούν από την ομάδα των βασικών σταθμών και τα στοιχεία τους να διορθωθούν.

Εκτίμηση ποσότητας ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων με τη μέθοδο της χάραξης των ισοϋετίων καμπυλών

Για τον υπολογισμό του όγκου των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που πέφτουν σε μία περιοχή, απαιτείται η γνώση του εμβαδού της περιοχής (E) και το μέσο ύψος βροχής (h) που δέχεται η περιοχή. Το γινόμενο του εμβαδού επί το μέσο ύψος βροχής δίνει τον όγκο των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που πέφτουν στην περιοχή. Για τον υπολογισμό του μέσου ύψους βροχής, χρησιμοποιούμε τις μετρήσεις των μετεωρολογικών σταθμών που είναι εγκατεστημένοι στην περιοχή.

Ένας τρόπος υπολογισμού των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων είναι η μέθοδος των ισοϋετίων καμπυλών. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην άσκηση της Κλιματολογίας, ισοϋέτιες καμπύλες είναι καμπύλες γραμμές που ενώνουν σημεία με το ίδιο ύψος βροχής. Η μέθοδος αυτή δίνει τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, διότι κατά την χάραξη των καμπυλών λαμβάνονται υπόψη όχι μόνο το ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων αλλά και άλλοι παράγοντες που επιδρούν στην κατανομή των βροχοπτώσεων εντός της λεκάνης, όπως η μορφολογία του ανάγλυφου, οι επικρατούντες άνεμοι και άλλες τοπικές ιδιομορφίες. Με τη μέθοδο αυτή αρχικά σχεδιάζονται οι ισοϋέτιες καμπύλες της περιοχής βάσει των δεδομένων των μετεωρολογικών σταθμών.

Στη συνέχεια μετράται το εμβαδόν της περιοχής που περικλείεται μεταξύ δύο διαδοχικών καμπυλών και πολλαπλασιάζεται το εμβαδόν αυτό με το ημιάθροισμα των τιμών των δύο ισοϋετίων καμπυλών. Επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία για όλα τα ζεύγη των ισοϋετίων καμπυλών της λεκάνης και προστίθενται τα επί μέρους αποτελέσματα, οπότε υπολογίζεται ο συνολικός όγκος νερού που πέφτει σε όλη την έκταση της λεκάνης. Για την εκτίμηση του μέσου ύψους βροχής που πέφτει στη λεκάνη ο συνολικός όγκος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων διαιρείται με την έκταση της λεκάνης.

Εκτίμηση ποσότητας ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων με τη μέθοδο μετατροπής των ισοϋψών καμπυλών σε ισοϋέτιες

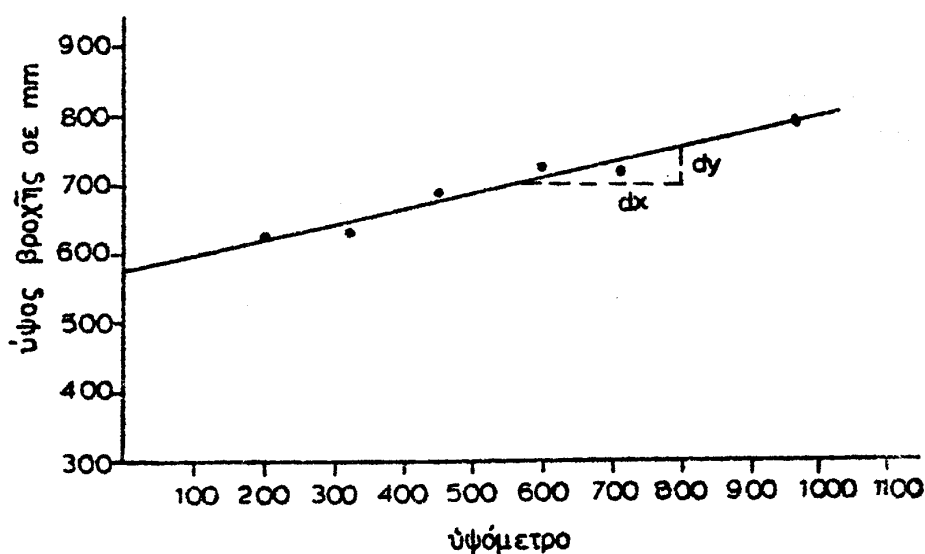
Όπως έχει ήδη αναφερθεί στα κεφάλαια της κλιματολογίας τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα αυξάνονται αναλογικά με την αύξηση του υψόμετρου. Με τη λογική αυτή είναι επιτρεπτή και πολλές φορές χρήσιμη η μετατροπή των ισοϋψών καμπυλών σε ισοϋέτιες καμπύλες. Για τη μετατροπή αυτή είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της βροχοβαθμίδας.

Βροχοβαθμίδα ονομάζεται η μεταβολή των βροχοπτώσεων σε σχέση με το υψόμετρο. Για τον υπολογισμό της βροχοβαθμίδας απαιτείται η κατασκευή ενός πίνακα που σημειώνουμε τα εξής:

a/a	Βροχομετρικοί Σταθμοί	Απόλυτ. Υψόμ. Σταθμού	Περίοδος Παρατηρήσεων	Αριθμός ετών	Ύψος βροχής σε mm
1	Κεφαλόβρυσο	200	1950-1980	31	625
2	Νεοχώρι	325	1950-1980	31	640
3		450	1950-1980	31	684
4		600	1950-1980	31	723
5		710	1950-1980	31	725
6		965	1950-1980	31	792

Πίνακας 4. Στοιχεία μετεωρολογικών σταθμών.

Στη συνέχεια σε ένα μιλλιμετρέ χαρτί σημειώνουμε στον άξονα των χ το απόλυτο υψόμετρο των βροχομετρικών σταθμών σε μέτρα και στον άξονα των ψ το ύψος της βροχής σε mm.



Σχήμα 4. Διάγραμμα ύψους βροχής – υψόμετρον. Γραφικός υπολογισμός της βροχοβαθμίδας.

Τοποθετώντας τα σημεία ανά ζεύγη τιμών υψομέτρου - ύψους βροχής, κατασκευάζουμε την ευθεία της.

Η κλίση της ευθείας $\alpha = \frac{d\psi}{d\chi}$ μας δίνει την βροχοβαθμίδα $\alpha = \frac{60}{230} = 0,26$ για το παράδειγμά μας.

Αν το ύψος της βροχής εξαρτιόταν μόνο από το υψόμετρο θα έπρεπε όλα τα σημεία να βρίσκονται πάνω στην ευθεία. Επειδή ο κάθε σταθμός επηρεάζεται περισσότερο ή λιγότερο από τους άλλους παράγοντες εκτός του υψομέτρου,

παρατηρούνται αυτές οι αποκλίσεις. Έτσι λοιπόν σχεδιάζουμε την κεντροβαρή ευθεία η οποία μας δίνει τη μέση τιμή της μεταβολής των βροχοπτώσεων σε σχέση με το υψόμετρο για τη δεδομένη λεκάνη.

Το ολικό ύψος βροχής ψ που πέφτει σε ένα καθορισμένο υψόμετρο χ δίνεται από την εξίσωση:

$$\psi = \alpha\chi + \beta$$

όπου α = βροχοβαθμίδα και

β = ύψος βροχής στην επιφάνεια της θάλασσας

Το ύψος βροχής στην επιφάνεια της θάλασσας (β), βρίσκεται προεκτείνοντας την ευθεία μέχρι να συναντήσει τον άξονα ψ . Στην περίπτωση του παραδείγματός μας έχει την τιμή $\beta=580$ mm. Με την παραπάνω εξίσωση μπορούμε να μετατρέψουμε τον τοπογραφικό χάρτη μιας λεκάνης σε χάρτη ισοϋετίων καμπυλών. Για να μετατρέψουμε μία ισοϋψή καμπύλη σε ισοϋέτια στην παραπάνω εξίσωση αντικαθιστούμε όπου χ την τιμή της ισοϋψούς οπότε το ψ που υπολογίζουμε είναι η τιμή ύψους βροχής που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο υψόμετρο. Π.χ. η ισοϋψής των 600mm θα ταυτίζεται με την ισοϋέτια των 157 mm, όπως προκύπτει από τη λύση της εξίσωσης $\psi=\alpha\chi+\beta$, οπότε $\psi=0.26*600+0.58 = 157$ mm.

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζουμε σε ποια ισοϋέτια αντιστοιχεί η ισοϋψής των 700, 800 m κ.λπ.

Υπολογίζοντας την επιφάνεια μεταξύ δύο διαδοχικών ισοϋψών που τώρα έχουν μετατραπεί σε ισοϋέτιες καμπύλες και πολλαπλασιάζοντας επί το μέσο όρο των τιμών των δεδομένων ισοϋετίων καμπυλών, βρίσκουμε τον όγκο βροχής που πέφτει στην περιοχή που ορίζεται από τις δύο συγκεκριμένες ισοϋέτιες καμπύλες. Αν κάνουμε την ίδια δουλειά για όλα τα ζεύγη των ισοϋετίων καμπυλών της λεκάνης μας και προσθέσουμε τα επί μέρους αποτελέσματα, υπολογίζουμε το συνολικό όγκο νερού που πέφτει από τις βροχοπτώσεις στη λεκάνη μας.

Η βροχοβαθμίδα χρησιμοποιείται σε περιοχές που έχουν έντονο ανάγλυφο και οπωσδήποτε υπάρχει αρκετός αριθμός βροχόμετρων (τουλάχιστον 5) και σε διαφορετικά υψόμετρα.

Εκτίμηση ποσότητας ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων με τη μέθοδο του μέσου υψόμετρου της λεκάνης

Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού του συνολικού όγκου του νερού που πέφτει σε μια λεκάνη, είναι χρησιμοποιώντας το μέσο υψόμετρο της λεκάνης H_m και τη

βροχοβαθμίδα. Δεδομένου του μέσου υψομέτρου H_m υπολογίζουμε από την εξίσωση $\psi = \alpha\chi + \beta$ την τιμή του ψ που παίρνει αν στο χ αντικαταστήσουμε την τιμή του μέσου υψομέτρου H_m . Στη συνέχεια γνωρίζοντας το ψ , δηλαδή το ύψος βροχής που αντιστοιχεί στο μέσο υψόμετρο και την έκταση της λεκάνης, υπολογίζουμε το συνολικό όγκο βροχής που δέχεται η λεκάνη μας $P = E \cdot h$.

Εκτίμηση ποσότητας ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων με τη μέθοδο χάραξης των πολυγώνων THIESSEN

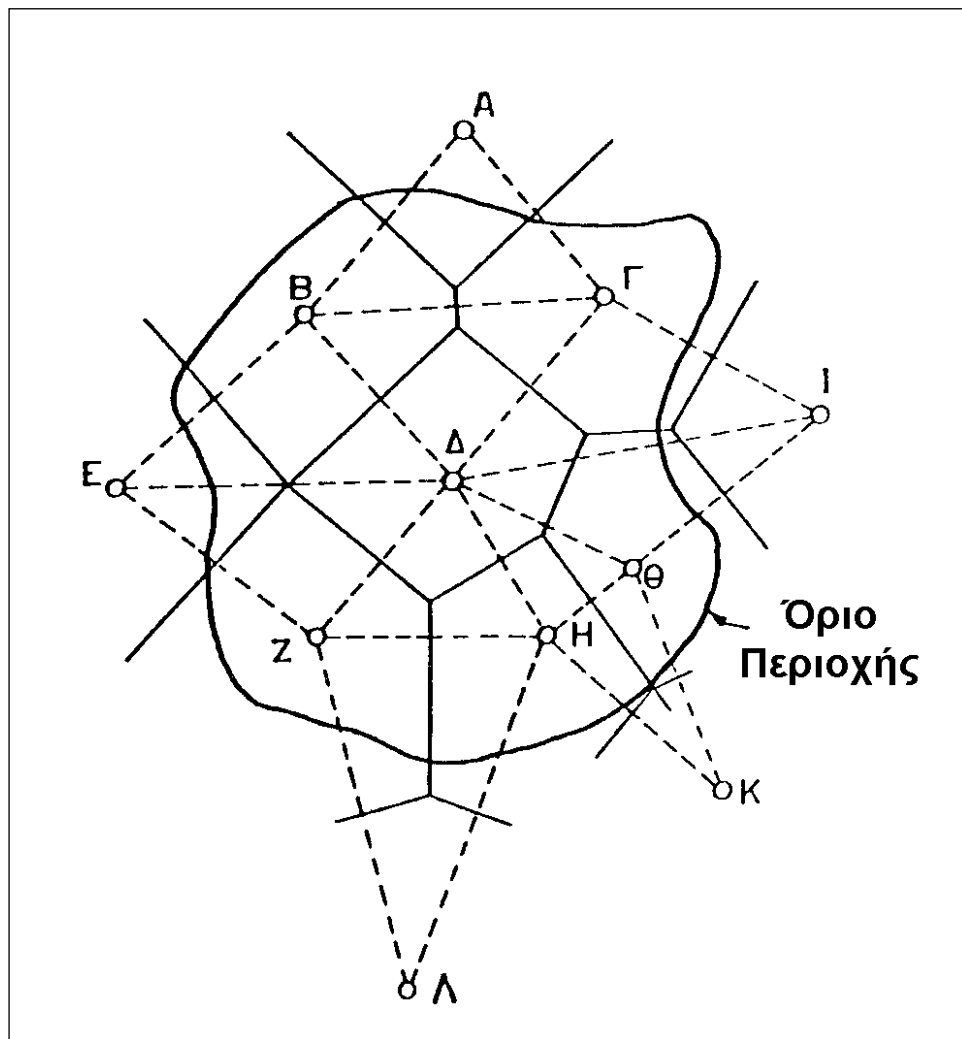
Η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ποσότητας των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων όταν ο αριθμός των βροχομετρικών σταθμών μιας λεκάνης είναι μικρός και η κατανομή τους μέσα στη λεκάνη δεν είναι ομοιόμορφη και το ανάγλυφο της λεκάνης δεν είναι έντονο.

Σε αυτή, η τιμή του ύψους βροχής κάθε βροχομετρικού σταθμού θεωρείται ότι ισχύει, μέχρι του μέσου της απόστασης μεταξύ των γειτονικών σταθμών. Για την εφαρμογή της μεθόδου οι βροχομετρικοί σταθμοί τοποθετούνται σε τοπογραφικό χάρτη και ενώνονται με ευθείες γραμμές, ώστε η όλη περιοχή να καλυφθεί με τρίγωνα. Στη συνέχεια χαράζονται οι μεσοκάθετοι όλων των πλευρών των τριγώνων.

Οι μεσοκάθετοι τεμνόμενες ορίζουν πολύγωνα που περιβάλλουν κάθε σταθμό. Στον καθορισμό των ορίων της περιοχής κάθε σταθμού πρέπει να ληφθούν υπόψη και τα όρια της περιοχής μελέτης. Η επιφάνεια κάθε πολυγώνου βρίσκεται με εμβαδομέτρηση.

Δεχόμαστε ότι η έκταση που καλύπτει κάθε πολύγωνο δέχεται σε κάθε σημείο της τόση βροχή, όση και ο βροχομετρικός σταθμός που βρίσκεται μέσα στο πολύγωνο. Κατ' αυτό τον τρόπο υπολογίζουμε τον όγκο του νερού στα επί μέρους πολύγωνα πολλαπλασιάζοντας το μέσο ύψος βροχής του σταθμού με το εμβαδόν του πολυγώνου. Στη συνέχεια προσθέτουμε τα γινόμενα οπότε υπολογίζοντας το συνολικό όγκο νερού που δέχεται η λεκάνη μας.

Τα βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής συνίσταται, στην ανάγκη αλλαγής του συστήματος των πολυγώνων όταν προστίθεται ή αφαιρείται ένας σταθμός και στο γεγονός ότι δεν λαμβάνονται υπόψη οι τοπογραφικές ανωμαλίες του ανάγλυφου (ορεογραφικές επιδράσεις).



Σχήμα 5. Πολύγωνα μεθόδου Thiessen.

ΕΞΑΤΜΙΣΙΔΙΑΠΝΟΗ

Εξατμισιδιαπνοή είναι η διαδικασία με την οποία το νερό μεταβαίνει από την υγρή στην αέρια κατάσταση. Εξάτμιση έχουμε όταν ο αριθμός των μορίων του νερού που μεταπίπτει στην αέρια φάση υπερβαίνει τον αριθμό των μορίων που υγροποιούνται. Η ενέργεια που απαιτείται για την μετατροπή του νερού σε υδρατμούς προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία. Στο φαινόμενο της εξάτμισης υπόκεινται τόσο τα νερά που βρίσκονται στην επιφάνεια της γης (λίμνες, ποτάμια, υδατοδεξαμενές κ.λ.π.) όσο και εκείνα που βρίσκονται πολύ κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

Οι σπουδαιότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την εξάτμιση είναι:

- η θερμοκρασία του νερού.
- Η θερμοκρασία και η απόλυτη υγρασία του στρώματος του αέρα που είναι αμέσως επάνω από την εξατμιζόμενη επιφάνεια.
- Ο άνεμος που απομακρύνει τους υδρατμούς από την περιοχή της εξατμιζόμενης επιφάνειας και διατηρεί χαμηλή την απόλυτη υγρασία
- Η πίεση των υδρατμών στην επιφάνεια και στο υπερκείμενο στρώμα αέρος.
- Η ποσότητα των αλάτων που είναι διαλυμένα στο νερό.
- Το βάθος της επιφάνειας του υπόγειου νερού.
- Τη δομή και τη σύσταση του εδάφους
- Τις βροχοπτώσεις σε συνδυασμό με την εποχή και τον τρόπο που πραγματοποιούνται.

Διαπνοή είναι η διαδικασία κατά την οποία η υπάρχουσα βλάστηση και οι καλλιέργειες αντλούν διαρκώς νερό από το υπέδαφος με το ριζικό τους σύστημα και το αποδίδουν με τα στόματα του φυλλώματος στην ατμόσφαιρα.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν η διαπνεόμενη ποσότητα νερού πέρα απ' αυτούς που αναφέρθηκαν για την εξάτμιση είναι και οι ακόλουθοι:

- Το είδος, η πυκνότητα και το μέγεθος ή στάδιο ανάπτυξης της βλάστησης και των καλλιεργειών.
- Η υγρασία του εδάφους
- Η εποχή του έτους
- Οι καιρικές συνθήκες

Υπολογισμός του όγκου του νερού της εξατμοδιαπνοής

Μέθοδος TURC

Ένας από τους εμπειρικούς τύπους που εφαρμόζεται συχνά είναι ο εμπειρικός τύπος του L. TURC. Για να έχει πιο ακριβή αποτελέσματα πρέπει στην περιοχή να έχουμε υψηλές βροχοπτώσεις, χαμηλές θερμοκρασίες και η λεκάνη να μην περιέχει ανθρακικούς καρστικούς σχηματισμούς.

Ο τύπος είναι:

$$E = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

όπου E = ετήσια πραγματική εξατμισιδιαπνοή
 P = μέσο ετήσιο ύψος βροχής σε mm
 L = συντελεστής = με $300+25T+0,05T^3$
 T = μέση ετήσια θερμοκρασία σε βαθμούς °C.

Παράδειγμα: Έστω $P=1000\text{mm}$ και $T=10^\circ\text{C}$.

$$E = \frac{1000}{\sqrt{0,9 + \frac{1000^2}{(300 + 25 \cdot 10 + 0,05 \cdot 10^3)^2}}} = \frac{1000}{\sqrt{3,6}} = \frac{1000}{1,9} = 526,3 \text{ mm}$$

άρα $E=526,3 \text{ mm}$ ή $52,63\%$. Εάν πολλαπλασιάσουμε την τιμή αυτή με την συνολική έκταση της λεκάνης απορροής, υπολογίζουμε τον συνολικό όγκο νερού της εξατμισιδιαπνοής.

Για λεκάνες που έχουν μικρότερο ύψος βροχής και μεγαλύτερη μέση ετήσια θερμοκρασία, εφαρμόζεται ο διορθωμένος τύπος του TURC ως προς τη μέση ετήσια θερμοκρασία. Δηλαδή ο διορθωμένος τύπος του TURC μικραίνει με άλλα λόγια την τιμή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας.

Ο τύπος αυτός έχει ως εξής:

$$T = \frac{\sum P_i \cdot T_i}{\sum P_i}$$

όπου $P_i=P_1, P_2, P_3$ και τα κ.λπ. τα μέσα μηνιαία ύψη των κατακρημνισμάτων και $T_i=T_1, T_2, T_3$ κ.λπ. οι αντίστοιχες μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες του αέρα.

$$\text{άρα } T = \frac{P_1 \cdot T_1 + P_2 \cdot T_2 + P_3 \cdot T_3 + \dots + P_{12} \cdot T_{12}}{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_{12}}$$

Εάν έχουμε αναλυτικά κλιματολογικά στοιχεία εφαρμόζουμε το διορθωμένο τύπο. Για την εφαρμογή του πρέπει να έχουμε ένα πίνακα με τα μέσα μηνιαία ύψη βροχής και τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες του αέρα. Αν π.χ. η μέση ετήσια θερμοκρασία μιας περιοχής είναι 16°C μετά από την εφαρμογή του διορθωμένου τύπου η διορθωμένη θερμοκρασία έστω ότι υπολογίζεται στους 12°C . Στη συνέχεια εφαρμόζουμε τον τύπο του TURC

$$E = \frac{P}{\sqrt{0,9 \frac{P^2}{L^2}}}$$

κατά τα γνωστά και αντί της τιμής $T=16^{\circ}\text{C}$, βάζουμε τη διορθωμένη τιμή $T=12^{\circ}\text{C}$.

Μέθοδος D. BURDON - N. PAPAKIS

Η μέθοδος αυτή είναι καθαρά εμπειρική και εφαρμόστηκε σε ασβεστολιθικές περιοχές με έντονο καρστ. Στην Ελλάδα εφαρμόστηκε στους ασβεστολιθικούς ορεινούς όγκους του Παρνασσού - Γκιόνας και είχε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Λαμβάνει μόνο υπόψη το ύψος των μηνιαίων ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.

Αν το ετήσιο ύψος των κατακρημνισμάτων είναι μεγαλύτερο από 1000mm, τότε σαν εξατμισοδιαπνοή λαμβάνονται τα 500mm των βροχοπτώσεων των 150 ημερών, του χρονικού διαστήματος Νοεμβρίου - Μαρτίου, συν τις βροχοπτώσεις των υπολοίπων μηνών. Δηλαδή αν έχουμε π.χ. ετήσιο ύψος βροχής 1200mm και την περίοδο Νοεμβρίου - Μαρτίου 980 mm, ενώ την περίοδο Απριλίου - Οκτωβρίου 220mm, σαν εξατμισοδιαπνοή θα λάβουμε $E=500+220=720\text{mm}$ άρα στα

$$\begin{array}{r} 1200 \quad 720 \\ 100 \quad X \\ \hline X=60\% \end{array}$$

Για περιοχές όπου το ύψος βροχής είναι μικρότερο από 1000mm και μεγαλύτερο από 250mm, λαμβάνεται σαν εξατμισοδιαπνοή το 50% των βροχοπτώσεων του χρονικού διαστήματος μεταξύ των μηνών Νοεμβρίου - Μαρτίου συν τις βροχοπτώσεις των υπόλοιπων μηνών. Π.χ. αν έχουμε βροχοπτώσεις μεταξύ των μηνών Νοεμβρίου - Μαρτίου 400mm και μεταξύ Απριλίου - Οκτωβρίου 150mm, σαν εξατμισοδιαπνοή θα πάρουμε $E=400 \cdot 0,5 + 150 = 350\text{mm}$ άρα 63,5%.

Μέθοδος COUTAGNE

Όπως και ο εμπειρικός τύπος του TURC, έτσι και ο τύπος του Coutagne λαμβάνει υπόψη τις βροχοπτώσεις και τη θερμοκρασία.

$$E = P \cdot \lambda P^2 \quad \text{όπου} \quad \begin{array}{l} E = \text{εξατμοδιαπνοή} \\ P = \text{βροχοπτώσεις} \end{array}$$

$$\frac{\lambda = 1}{0,8+0,14T} \quad T_a = \text{θερμοκρασία}$$

Ο τύπος εφαρμόζεται για $\frac{1}{8\lambda} \leq P \leq \frac{1}{\lambda}$ και το P εκφράζεται σε μέτρα.

Μέθοδος THORNTHWAITE

Η μέθοδος αυτή λαμβάνει υπόψη τη δυνητική εξατμοδιαπνοή που ορίζεται ως το μέγιστο ποσό του νερού που μπορεί να χαθεί από την επιφάνεια του εδάφους που καλύπτεται πλήρως από βλάστηση και με την προϋπόθεση ότι υπάρχει επάρκεια νερού για την πλήρη ικανοποίηση των φυτών. Επομένως η δυνητική εξατμοδιαπνοή δίνει το πραγματικά εξατμοδιαπνεόμενο νερό από το έδαφος, μόνο στις περιπτώσεις στις οποίες οι συνθήκες βλάστησης και υγρασίας του εδάφους είναι ιδανικές, οι δε μηνιαίες βροχοπτώσεις είναι υψηλότερες της υπολογιζόμενες μηνιαίας δυνητικής εξατμισιδιαπνοής. Στις περιπτώσεις αυτές η δυνητική εξατμοδιαπνοή ισούται με την πραγματική, ενώ σε άλλες περιπτώσεις που οι μηνιαίες βροχοπτώσεις είναι μικρότερες, τότε η δυνητική υπολογιζόμενη εξατμοδιαπνοή είναι κατά πολύ μεγαλύτερη της πραγματικής και η πραγματική θα ισούται με τις βροχοπτώσεις.

Ο υπολογισμός της δυνητικής εξατμοδιαπνοής με τη μέθοδο του THORNTHWAITE γίνεται με βάση την εξίσωση:

$$^eT = 1,6 (10T/I)^{\alpha}$$

eT = μη διορθωμένη δυνητική εξατμοδιαπνοή σε mm

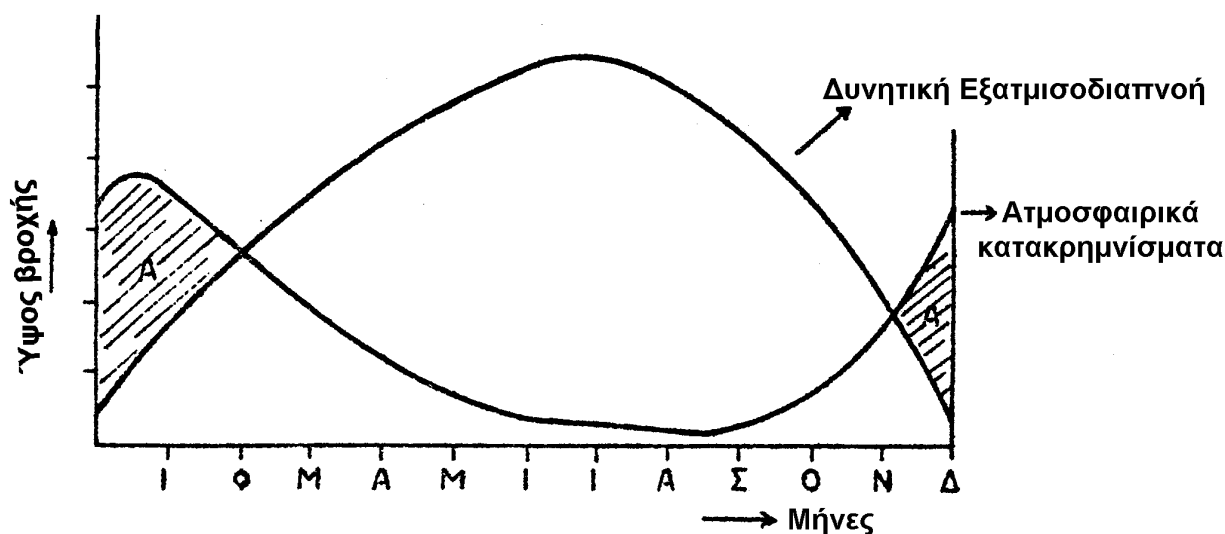
T = μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα σε °C

I = δείκτης θερμότητας

α = κυβική συνάρτηση του I

$$\alpha = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,792 \cdot 10^{-2} + 0,49239$$

Η λύση της εξίσωσης απλοποιείται από τη χρησιμοποίηση μιας σειράς πινάκων και διαγραμμάτων ειδικών για κάθε περίπτωση. Αυτό το οποίο θα πρέπει να προσέχει κανείς εφαρμόζοντας αυτό τον τύπο, είναι να υπολογίζει την πραγματική εξατμοδιαπνοή. Δηλαδή θα υπολογίζει τη δυνητική και σε περίπτωση που η δυνητική είναι μικρότερη των βροχοπτώσεων τότε αυτή θα ισούται με την πραγματική. Σε περίπτωση που η δυνητική είναι μεγαλύτερη των βροχοπτώσεων τότε η πραγματική ισούται με τις βροχοπτώσεις.



Σχήμα 6. Διάγραμμα μέσων μηνιαίων βροχοπτώσεων και μηνιαίας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Η ποσότητα του νερού που αντιστοιχεί στην περιοχή Α παραμένει για κατείδυση και απορροή.

Παραδείγματα εκτίμησης Εξατμισοδιαπνοής στην Ελλάδα

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή της εξατμοδιαπνοής δεν θα πρέπει κανείς να είναι απόλυτος στις τιμές που του δίνει ο εφαρμοζόμενος τύπος. Όπως προαναφέρθηκε οι τιμές αυτές είναι ενδεικτικές και πολλές φορές διαφέρουν κατά πολύ της πραγματικότητας. Στην Ελλάδα κατά καιρούς έχουν εφαρμοσθεί διάφοροι τύποι. Πολλές φορές εφαρμόζεται ο τύπος του TURC χωρίς να έχει ακρίβεια. Στην περιοχή Παρνασσού - Γκίονας εφαρμόστηκε η μέθοδος BOURDON-PAPAKIS. Στην υπολεκάνη της Καλαμπάκας εφαρμόστηκε ο εμπειρικός τύπος του TURC προσαρμοσμένος όπως στις συνθήκες του τόπου.

$$E = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} - 30$$

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΑΠΟΡΡΟΗ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην περιγραφή του υδρολογικού κύκλου (κύκλου του νερού) ένα μέρος του νερού της βροχόπτωσης κατακρατείται από τη βλάστηση και μπορεί να εξατμισθεί ή να πέσει αργότερα στην επιφάνεια του εδάφους. Ένα άλλο

μέρος του νερού πέφτει απευθείας στην επιφάνεια του εδάφους και είτε εξατμίζεται αμέσως, είτε κατεισδύει, είτε κυλάει υπό μορφή λεπτού στρώματος αμέσως κάτω από την επιφάνεια του εδάφους αποτελώντας αυτό που ονομάζεται υποδερμική ροή, είτε συγκεντρώνεται σε διάφορες μορφολογικά βυθίσματα (λακκούβες) στην επιφάνεια του εδάφους.

Όταν οι ανάγκες μιας περιοχής για κατακράτηση, κατείσδυση και συγκέντρωση στην επιφάνεια ικανοποιηθούν, οπότε υπάρχει πλεόνασμα νερού, τότε αυτή η ποσότητα νερού ρέει επιφανειακά υπακούοντας το νόμο της βαρύτητας. Το νερό αυτό καταλήγει στις κοίτες των ρυακιών, χειμάρρων και ποταμών δηλαδή στο υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μέσω του οποίου καταλήγει στις λίμνες ή την θάλασσα. Το νερό αυτό αποτελεί την επιφανειακή απορροή (Runoff).

Η ποσότητα του νερού που αποτελεί την επιφανειακή απορροή εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων οι κυριότεροι από τους οποίους είναι οι ακόλουθοι:

- Η διαπερατότητα των σχηματισμών που αναπτύσσονται στην λεκάνη απορροής (δηλαδή αν είναι υδροπερατοί ή αδιαπέρατοι) και από τον βαθμό κορεσμού τους. Είναι προφανές ότι αν η επιφανειακή έκταση μιας περιοχής αποτελείται από υδροπερατά πετρώματα, η ποσότητα νερού που παραμένει για να κυλήσει επιφανειακά θα είναι περιορισμένη λόγω αυξημένης κατείσδυσης. Αντίθετα αν τα πετρώματα από τα οποία αποτελείται η περιοχή είναι αδιαπέρατα, η κατείσδυση είναι περιορισμένη και η επιφανειακή απορροή σημαντική.
- Η διάρκεια, η ένταση και η κατανομή των βροχοπτώσεων σε μια λεκάνη απορροής. Η ραγδαιότητα της βροχόπτωσης είναι πολύ μεγάλης σημασίας για την επιφανειακή απορροή. Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση μιας βροχόπτωσης (δηλαδή σε μικρό χρονικό διάστημα η ποσότητα του νερού που πέφτει σαν βροχή είναι μεγάλη), τόσο μεγαλύτερη είναι και η ποσότητα του νερού που απορρέει επιφανειακά σε αντίθεση με την ποσότητα νερού που κατεισδύει.
- Η βλάστηση. Έχει υπολογισθεί ότι η ποσότητα νερού που κατακρατείται από την βλάστηση σε πυκνά δάση κυμαίνεται από 8-25% ανάλογα με τον τύπο της βλάστησης. Από το νερό από ένα ποσοστό που κυμαίνεται γύρω στο 10% εξατμίζεται.
- Η κλίση της μορφολογίας της λεκάνης απορροής. Όσο μεγαλύτερη είναι η μορφολογική κλίση μιας περιοχής τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα νερού που απορρέει επιφανειακά και μικρότερη η ποσότητα νερού που κατεισδύει. Αυτό οφείλεται στο μικρό χρονικό διάστημα που παραμένει σε επαφή το νερό με την επιφάνεια του ανάγλυφου.

- Η γεωμετρία του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης.
- Το βάθος της ελεύθερης επιφάνειας του υπόγειου νερού. Όσο πιο μεγάλη είναι η στάθμη του υπόγειου νερού τόσο μεγαλύτερη είναι και η επιφανειακή απορροή.
- Οι επεμβάσεις του ανθρώπου. Ο άνθρωπος επηρεάζει την επιφανειακή απορροή με μια σειρά από ενέργειες όπως είναι η χρησιμοποίηση του υπόγειου και του επιφανειακού νερού για άρδευση ή ύδρευση και η μεγάλης κλίμακας αναδιανομή της επιφανειακής απορροής (όπως για παράδειγμα οι εκτροπές ποταμών). Σημαντική επέμβαση του ανθρώπου στην επιφανειακή απορροή μιας περιοχής είναι η αστικοποίησή της. Η κάλυψη της επιφάνειας μιας περιοχής με τεχνητές κατασκευές (δρόμοι, πεζοδρόμια, σπίτια, κατασκευές από τσιμέντο) αλλά και ο περιορισμός της κοίτης των ποταμών, περιορίζει σημαντικά την κατείσδυση που θα εμφάνιζε η περιοχή αν δεν υπήρχαν οι τεχνητές κατασκευές, αυξάνοντας σημαντικά την επιφανειακή απορροή προκαλώντας συχνά πλημμυρικά φαινόμενα.

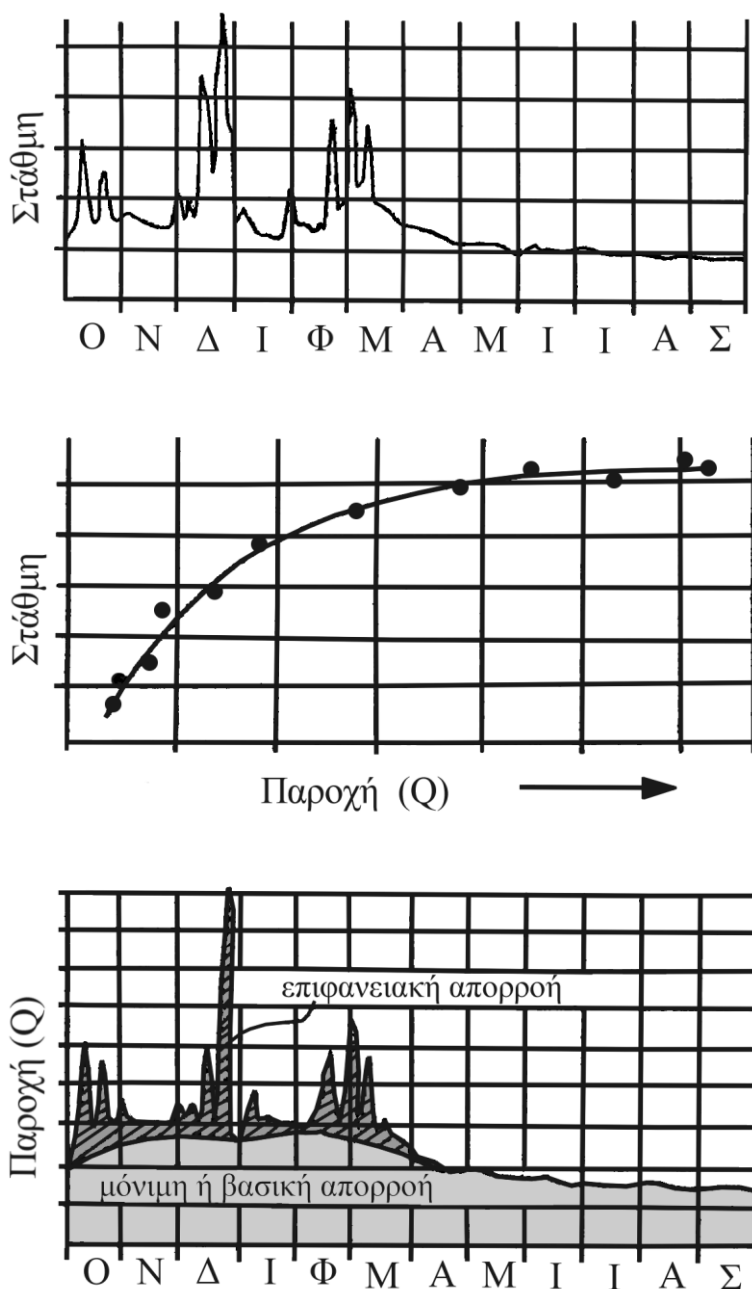
Μέθοδοι υπολογισμού της επιφανειακής απορροής

Η συνολική ποσότητα του νερού που αποστραγγίζεται από μια συγκεκριμένη λεκάνη απορροής είναι δυνατόν να υπολογισθεί με διάφορες μετρήσεις που γίνονται στο υδρογραφικό δίκτυο κατά την έξοδό του κεντρικού ποταμού από την λεκάνη απορροής την οποία θέλουμε να μελετήσουμε.

Τις περισσότερες φορές τα στοιχεία της επιφανειακής απορροής ενός υδρορεύματος (ποταμού ή χειμάρρου) προέρχονται από συνεχή ή συχνή μέτρηση της στάθμης του νερού σε συγκεκριμένα σημεία της διαδρομής του, στα οποία είναι γνωστή η διατομή και με την περιοδική μέτρηση της παροχής στα ίδια σημεία. (Παροχή είναι το ποσό νερού που περνά από μια συγκεκριμένη διατομή κοίτης στην μονάδα του χρόνου).

Με τις μετρήσεις της στάθμης κατασκευάζονται τα σταθμηγραφήματα δηλαδή διαγράμματα στα οποία ο οριζόντιος άξονας περιλαμβάνει τις ημέρες του έτους και ο κατακόρυφος τη στάθμη του ποταμού όπως έχει προκύψει από τις μετρήσεις. Επιπλέον από τις μετρήσεις της στάθμης του υδρορεύματος και της παροχής κατασκευάζονται οι καμπύλες στάθμης – παροχής. Με την βοήθεια των καμπυλών αυτών μπορούμε να εκτιμήσουμε την παροχή γνωρίζοντας την στάθμη, οπότε μπορούμε να κατασκευάσουμε το υδρογράφημα που στην ουσία είναι η μεταβολή της παροχής συναρτήσει του χρόνου.

Η απορροή μιας λεκάνης προέρχεται τόσο από τη συγκέντρωση του νερού των βροχοπτώσεων που πέφτουν στην επιφάνεια της λεκάνης (αυτή ονομάζεται επιφανειακή απορροή) όσο και από υπόγειες τροφοδοσίες δηλαδή τροφοδοσία των ποταμών της λεκάνης από πηγές (αυτή ονομάζεται βασική απορροή). Από την ανάλυση του υδρογραφήματος μπορεί κανείς να υπολογίσει τόσο την επιφανειακή όσο και την βασική απορροή.



Σχήμα 7. Σταθμηγράφημα, καμπύλη στάθμης – παροχής και υδρογράφημα.

Μέθοδοι μέτρησης της στάθμης

Η μέτρηση της στάθμης ενός ποταμού σε ένα συγκεκριμένο σημείο της διαδρομής του γίνεται με τη βοήθεια οργάνων. Ορισμένα από τα όργανα αυτά είναι αυτογραφικά ή καταγραφικά δηλαδή μας δίνουν την συνεχή καταγραφή των μεταβολών της στάθμης. Υπάρχουν και όργανα μη καταγραφικά ή μη αυτογραφικά με τα οποία μπορούμε να πάρουμε μετρήσεις μόνο κατά τη στιγμή πραγματοποίησης της μέτρησης.

Μέτρηση της στάθμης με μη αυτογραφικά όργανα

Τα μη αυτογραφικά όργανα είναι οι σταθερές αφετηρίες και οι σταθμημετρικοί πήλεις.

- Σταθερές αφετηρίες: Κατά μήκος της όχθης ενός υδρορεύματος επιλέγονται σταθερά σημεία γνωστού υψόμετρου τα οποία χρησιμοποιούνται σαν σημεία αναφοράς για τη μέτρηση της στάθμης.
- Σταθμημετρικοί πήλεις: Είναι πήλεις βαθμονομημένοι που τοποθετούνται με την ένδειξη 0 κάτω από την κατώτατη δυνατή στάθμη την οποία μπορεί να εμφανίσει το ποτάμι. Θα πρέπει το ύψος του πήλη να είναι τέτοιο ώστε να μπορεί να μετρήσει ακόμη και τη μέγιστη στάθμη στην οποία μπορεί να φθάσει ο ποταμός.

Στην κατηγορία των αυτογραφικών οργάνων ανήκουν οι διάφοροι τύποι σταθμηγράφων όπως οι σταθμηγράφοι με πλωτήρες καθώς και οι σταθμηγράφοι με αέριο. Η αρχή λειτουργίας των οργάνων αυτών είναι ότι υπάρχει ένας μηχανισμός που μεταφέρει τις μεταβολές που παρατηρούνται στη στάθμη του ποταμού σε ένα σύστημα καταγραφής οπότε οι μεταβολές αυτές καταγράφονται σε μια ταινία.

Μέτρηση της παροχής

Όπως ειπώθηκε πριν παροχή ονομάζεται η ποσότητα νερού που περνά από συγκεκριμένη θέση του ποταμού στη μονάδα του χρόνου. Οι μέθοδοι μέτρησης της παροχής ενός ποταμού είναι τρεις: η μέτρηση της ταχύτητας του νερού και της διατομής στη θέση της μέτρησης, η μέτρηση με τη χρήση μόνιμων κατασκευών και με τη χρήση διαλυμάτων.

Μέθοδος μέτρησης ταχύτητας – διατομής

Η παροχή (Q) ενός υδρορεύματος μπορεί να υπολογισθεί από τον τύπο:

$$Q = V * A$$

Όπου V είναι η μέση ταχύτητα κίνησης του νερού σε μια συγκεκριμένη θέση του υδρορεύματος και

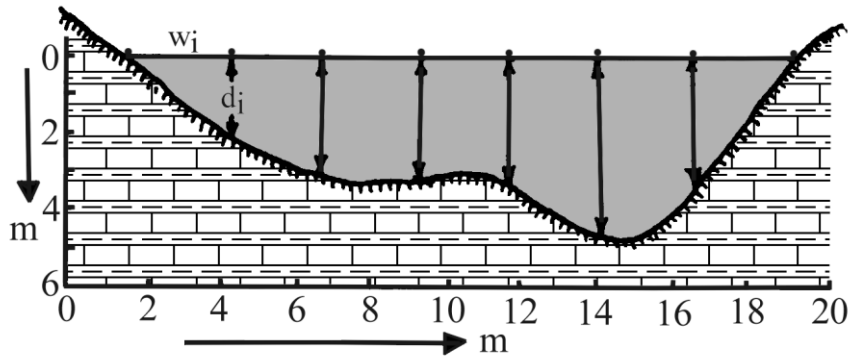
A είναι το εμβαδόν της διατομής του υδρορεύματος στην ίδια θέση.

Η μέτρηση της ταχύτητας του νερού γίνεται με την χρήση κατάλληλων οργάνων που ονομάζονται μυλίσκοι.

Συνήθως οι μυλίσκοι αποτελούνται από μια μικρή έλικα που μπορεί να περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα ο οποίος κατά την διάρκεια της μέτρησης πρέπει να διατηρείται παράλληλος προς την διεύθυνση ροής του νερού. Κάθε περιστροφή της έλικας καταγράφεται στο όργανο. Η μέτρηση διαρκεί ένα μικρό χρονικό διάστημα (συνήθως 1 λεπτό). Μπορούμε να μετατρέψουμε τον αριθμό των περιστροφών του έλικα που σημειώθηκαν σε χρόνο 1 λεπτού σε ταχύτητα κίνησης του νερού χρησιμοποιώντας διαγράμματα αριθμού περιστροφών – ταχύτητας νερού που είναι συγκεκριμένα για κάθε τύπο μυλίσκου.

Το ερώτημα το οποίο προκύπτει είναι σε ποιο σημείο της διατομής του ποταμού πρέπει να πάρω μέτρηση της ταχύτητας; Η απάντηση στο ερώτημα αυτό δεν είναι εύκολη διότι η ταχύτητα ροής του νερού σε μια κοίτη δεν έχει παντού την ίδια τιμή. Όπως είναι γνωστό το νερό καθώς κινείται μέσα σε έναν αγωγό υπόκεινται σε τριβές καθώς έρχεται σε επαφή με τα τοιχώματα και τον πυθμένα του αγωγού. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και με την ταχύτητα ροής του νερού σε μια κοίτη. Υπάρχουν τριβές κατά την επαφή του νερού με τις όχθες και τον πυθμένα της κοίτης. Έτσι η ταχύτητα κίνησης του νερού είναι διαφορετική για διαφορετικά σημεία μιας συγκεκριμένης διατομής της κοίτης. Η μεγαλύτερη ταχύτητα εμφανίζεται στην επιφάνεια της διατομής στο σημείο που βρίσκεται ακριβώς στη μέση. Εάν τώρα λάβουμε μια σειρά μετρήσεων της ταχύτητας κατά μήκος μιας ευθείας κατακόρυφης από την επιφάνεια ενός ποταμού μέχρι τον πυθμένα της κοίτης θα διαπιστώσουμε ότι κάθε μέτρηση θα έχει διαφορετική τιμή. Με τις μεγαλύτερες ταχύτητες να εντοπίζονται κοντά στην επιφάνεια του ποταμού. Έχει αποδειχθεί ότι η ταχύτητα που μετρείται σε βάθος ίσο προς τα 0,6 του συνολικού βάθους του ποταμού στο συγκεκριμένο σημείο, είναι ίση προς τη μέση ταχύτητα κίνησης του νερού στο τμήμα αυτό του ποταμού. Εάν τα βάθη

του ποταμού είναι σχετικά μεγάλα τότε μια καλή προσέγγιση της μέσης ταχύτητας κίνησης του νερού μας δίνει το ημιάθροισμα των ταχυτήτων που μετριοούνται σε βάθη 0,2 και 0,8 του συνολικού βάθους του ποταμού κάτω από το σημείο μέτρησης.



Σχήμα 8. Διατομή ενός φυσικού ποτάμιου ρεύματος και υπολογισμός της παροχής ανά τμήμα (w_i).

Αφού γίνει η επιλογή της θέσης για τη μέτρηση της παροχής ενός ποταμού υποδιαιρούμε το πλάτος του ποταμού σε ένα αριθμό τμημάτων που κυμαίνεται μεταξύ 15 και 30 (ανάλογα με το πλάτος του ποταμού). Από τη μέση κάθε τμήματος I μετράμε το βάθος του ποταμού d_i στο σημείο αυτό και με τη βοήθεια ενός μολίσκου, μετράμε την ταχύτητα v_i κίνησης του νερού, είτε στα 0,6 του βάθους d_i είτε στα 0,2 και 0,87 του βάθους. Εάν w_i είναι το πλάτος κάθε τμήματος, τότε η παροχή για κάθε τμήμα θα δίνεται από τη σχέση:

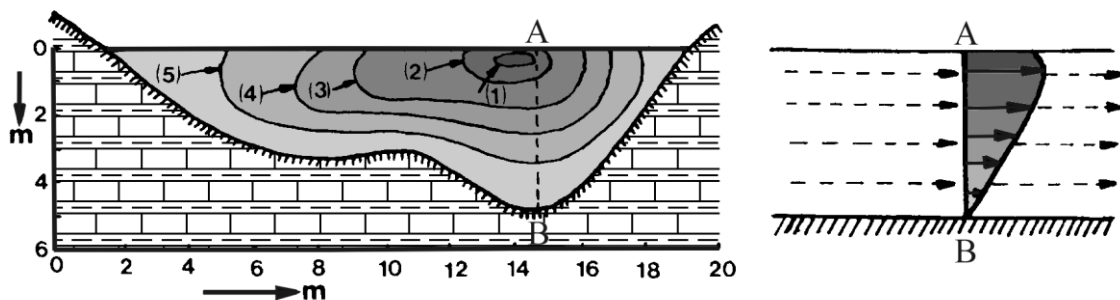
$$q_i = v_i * d_i * w_i$$

Η συνολική παροχή Q θα είναι το άθροισμα της παροχής όλων των τμημάτων. Έτσι εάν το πλάτος του ποταμού έχει διαιρεθεί σε m τμήματα, τότε η συνολική παροχή δίνεται από τον τύπο:

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

Είναι προφανές ότι όσο περισσότερες είναι οι μετρήσεις της ταχύτητας κατά μήκος πολλών κατακόρυφων γραμμών (δηλαδή όσο περισσότερα είναι τα τμήματα m στα οποία χωρίζεται τη διατομή του ποταμού) τόσο περισσότερο αξιόπιστα θα είναι τα αποτελέσματα.

Ένας άλλος τρόπος εκτίμησης της παροχής του ποταμού σε μια διατομή είναι η πραγματοποίηση πολλών μετρήσεων της ταχύτητας του νερού (με τη χρησιμοποίηση μυλίσκου) σε διάφορα σημεία της διατομής. Στη συνέχεια σχεδιάζουμε τη διατομή του ποταμού, επιλέγοντας μάλιστα για τον άξονα των βαθών μεγαλύτερη κλίμακα, και τοποθετούμε στην τομή κάθε σημείο στο οποίο λάβαμε μέτρηση με την αντίστοιχη τιμή ταχύτητας την οποία μετρήσαμε. Στη συνέχεια συνδέουμε με καμπύλη γραμμή τα σημεία τα οποία έχουν την ίδια ταχύτητα.



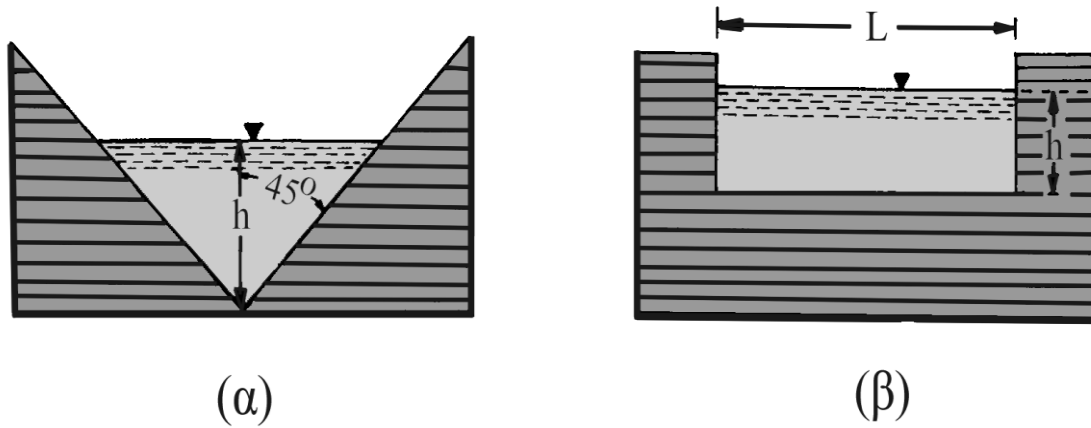
Σχήμα 9. Ισοταχείς καμπύλες στην διατομή ενός ρεύματος. Οι ταχύτητες ροής του νερού αυξάνονται όσο προχωράμε στην επιφάνεια και το κέντρο της διατομής. Στο δίπλα σχήμα οι ταχύτητες απεικονίζονται με ανύσματα. Το σημείο A της επιφάνειας του ποταμού εμφανίζει τη μεγαλύτερη ταχύτητα ενώ το B (στον πυθμένα της κοίτης) έχει τη μικρότερη.

Οι καμπύλες που προκύπτουν είναι ισοταχείς καμπύλες (γραμμές δηλαδή που σε κάθε σημείο τους η ταχύτητα ροής του ποταμού είναι ίδια). Αν μετρηθεί το εμβαδόν κάθε περιοχής που περικλείεται μεταξύ δύο διαδοχικών ισοταχών καμπυλών και πολλαπλασιασθεί με το ημιάθροισμα των τιμών των ισοταχών αυτών υπολογίζεται η παροχή q_i για την συγκεκριμένη επιφάνεια. Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία αυτή για όλες τις επιφάνειες μεταξύ των διαδοχικών ισοταχών της διατομής, και προσθέτοντας τις επί μέρους τιμές των παροχών υπολογίζουμε τη συνολική παροχή Q του ποταμού στη συγκεκριμένη διατομή.

Μέθοδος μονίμων κατασκευών

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για τη μέτρηση της παροχής μικρών ποταμών και χειμάρρων. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην κατασκευή μικρών φραγμάτων που υποχρεώνουν το νερό του υδρορεύματος να περάσει από υπερχειλιστές συγκεκριμένης και γνωστής διατομής συνήθως σχήματος ορθογωνίου ή σχήματος V που οι δύο πλευρές του σχηματίζουν γωνία 90° . Μετρώντας το ύψος h του νερού μέσα στον υπερχειλιστή μπορεί να υπολογιστεί η παροχή Q

χρησιμοποιώντας κατάλληλους μαθηματικούς τύπους που διαφέρουν ανάλογα με το σχήμα του υπερχειλιστή.



Σχήμα 10. Τύποι υπερχειλιστών. α) ορθογώνιος β) σχήματος V.

Για ορθογώνια διατομή: $Q = \frac{1}{3} \sqrt{2g} L h^{3/2}$

Για διατομή σχήματος V: $Q = 2.5 h^{5/2}$

Όπου L είναι το πλάτος του υπερχειλιστή και
h είναι το ύψος του νερού στον υπερχειλιστή

Μέθοδος χρησιμοποίησης χημικών ουσιών

Σε ορισμένες περιπτώσεις η χρήση του μυλίσκου για τη μέτρηση της ταχύτητας ροής δεν είναι δυνατή, όπως για παράδειγμα σε αβαθή ρεύματα, σε ορεινά ρεύματα με πολύ ανώμαλη κοίτη κ.τ.λ. Στις περιπτώσεις αυτές η χρήση της χημικής μεθόδου μπορεί να παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Γι αυτό χρησιμοποιούνται ορισμένες χημικές ουσίες που δεν υπάρχουν (σε σημαντική ποσότητα) στο νερό, και μπορούν να ανιχνευθούν εύκολα ως π.χ. μαγειρικό αλάτι, ραδιενεργές ουσίες, χρωστικές ουσίες κ.λπ.

Σε ρεύμα με ομοιόμορφη διατομή σε επαρκή μήκος οι εν λόγω ουσίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της μέσης ταχύτητας ροής κατόπιν στιγμιαίας προσθήκης αυτών στο νερό, με την ανίχνευση και τη χρονομέτρηση της

διέλευσης της μεγίστης συγκέντρωσής τους από δύο διαδοχικές διατομές του ρεύματος.

Στη μέθοδο του διαλύματος, διάλυμα ουσίας περιεκτικότητας C_0 προστίθεται στο ρεύμα υπό παροχή Q_0 . Η ουσία ανιχνεύεται στη μια διανομή κατάντη, όταν δε αποκατασταθεί ισορροπία η περιεκτικότητα του νερού στην ουσία αυτή θα είναι C . Η παροχή του ρεύματος δίνεται τότε από τη σχέση:

$$Q = Q_0 \left(\frac{C_0}{C} - 1 \right)$$

η οποία βασίζεται στην αρχή της διατηρήσεως της μάζας της χημικής ουσίας που χρησιμοποιήθηκε.

Εναλλακτικές μέθοδοι

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις κατά τις οποίες δεν υπάρχουν καθόλου στοιχεία για την απορροή. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιούνται διάφοροι εμπειρικοί τύποι που συνδέουν την απορροή με τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα. Ένας τέτοιος εμπειρικός τύπος είναι ο παρακάτω:

$$Q = \kappa * \frac{P}{1.8}$$

Όπου P είναι τα ετήσια ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα σε μέτρα και κ είναι η μέση κλίση (%) της λεκάνης απορροής

Ο παραπάνω τύπος εφαρμόζεται σε μη καρστικές περιοχές ή σε περιοχές όπου η συμμετοχή των ανθρακικών πετρωμάτων (ασβεστόλιθων) δεν υπερβαίνει το 15% της επιφάνειας της λεκάνης απορροής.

ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗ

Λέγοντας κατείσδυση εννοούμε το σύνολο των διαδικασιών με τις οποίες το νερό της βροχής διεισδύει στο έδαφος και εν συνεχεία διηθείται στα βαθύτερα στρώματα, αναπληρώνοντας έτσι τη φυσική υγρασία και δημιουργεί ή προστίθεται στους υδροφόρους ορίζοντες. Το νερό που προστίθεται στους υδροφόρους ορίζοντες αποτελεί την ενεργή κατείσδυση.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την κατείσδυση μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Η μία περιλαμβάνει φυσικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής, και η

άλλη κλιματικούς παράγοντες που ως γνωστό ποικίλουν σημαντικά από εποχή σε εποχή και από έτος σε έτος. Αναλυτικότερα την κατείσδυση επηρεάζουν:

- Η μορφολογική κλίση. Όσο μεγαλύτερη είναι η μορφολογική κλίση μιας επιφάνειας τόσο μικρότερο ποσό νερού των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων κατεisdύει ενώ αντίθετα μεγάλη ποσότητα νερού απορρέει επιφανειακά. Συνεπώς λεκάνες με μικρές μορφολογικές κλίσεις ευνοούν την επιφανειακή απορροή και περιορίζουν την κατείσδυση.
- Η λιθολογική σύσταση. Αν η λεκάνη απορροής καταλαμβάνεται από πετρώματα μικρής διαπερατότητας ευνοείται η επιφανειακή απορροή. Αντίθετα λεκάνες που καταλαμβάνονται από υδροπερατά πετρώματα ευνοούν την κατείσδυση.
- Η φυτοκάλυψη. Η βλάστηση ανάλογα βέβαια με τον τύπο και το στάδιο ανάπτυξης, στο οποίο βρίσκεται, ευνοεί την συγκράτηση μέρους του νερού των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Από το νερό αυτό μια ποσότητα μπορεί να κατεisdύσει ενισχύοντας το υπόγειο νερό.
- Η ένταση και η διάρκεια της βροχόπτωσης. Ραγδαίες βροχοπτώσεις ευνοούν την επιφανειακή απορροή. Αντίθετα βροχοπτώσεις μεγάλης διάρκειας και μικρής έντασης ευνοούν την κατείσδυση. Οι βροχές αυτού του είδους θεωρούνται ιδανικές για τον εμπλουτισμό των υδροφόρων οριζόντων.
- Η υγρασία του εδάφους. Όσο μεγαλύτερη είναι η υγρασία του εδάφους τόσο μικρότερη ποσότητα νερού απαιτείται για την ύγρανση των ανώτερων στρωμάτων του εδάφους και συνεπώς μεγαλύτερη ποσότητα νερού κατεisdύει και καταλήγει στους υδροφόρους ορίζοντες.
- Η παρουσία πάγου ή χιονιού.
- Η εποχή του έτους. Για περιοχές με κλιματολογικές συνθήκες που χαρακτηρίζουν τη χώρα μας η εποχή του έτους που ευνοεί την κατείσδυση του νερού των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων είναι η περίοδος από Οκτώβριο - Μάρτιο.

Μέτρηση της κατείσδυσης

Η μέτρηση της κατείσδυσης μπορεί να γίνει με τους εξής τρόπους:

- Με την παρακολούθηση της παροχής των πηγών σε όλη τη διάρκεια του έτους. Για να εφαρμοσθεί η μέθοδος αυτή θα πρέπει να γνωρίζουμε ακριβώς την επιφάνεια της περιοχής η οποία τροφοδοτεί με νερό την πηγή και θα πρέπει η περιοχή αυτή να μην τροφοδοτεί άλλες γειτονικές πηγές ή υδροφόρους ορίζοντες. Με άλλα λόγια θα πρέπει να πηγάζει από την πηγή όλο το νερό που κατεisdύει στην περιοχή τροφοδοσίας. Επιπλέον είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε

το ποσό του νερού που δέχεται με τη μορφή ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων η περιοχή τροφοδοσίας της πηγής. Αν πληρούνται όλες οι παραπάνω προϋποθέσεις τότε ο ολικός όγκος της ετήσιας παροχής της πηγής θα αντιστοιχεί προς την ολική ποσότητα του νερού εκείνου των κατακρημνισμάτων που κατείσδυσε από την περιοχή τροφοδοσίας της πηγής.

- Με τη χρήση ειδικών συσκευών ή εγκαταστάσεων που ονομάζονται λυσίμετρα. Τα λυσίμετρα χρησιμοποιούνται κυρίως σε προσχωσιγενείς περιοχές. Τα λυσίμετρα μετρούν άμεσα την κατείσδυση και έμμεσα μπορούν να μετρήσουν την εξατμισδιαπνοή και πρέπει να συνοδεύονται από βροχόμετρα ή βροχογράφους. Η αρχή στην οποία στηρίζονται είναι να κατασκευάσουμε μια τέτοια συσκευή ή εγκατάσταση που να απομονώνει ένα τμήμα του εδάφους, χωρίς να του μεταβάλει τις φυσικές υδρογεωλογικές συνθήκες και να δέχεται σε ένα βάθος (συνήθως 1 με 2 μέτρων) το νερό της βροχής που θα διαπεράσει αυτό το απομονωμένο στρώμα να δέχεται δηλαδή το νερό της κατείσδυσης. Τα μειονεκτήματα της μέτρησης με τη χρησιμοποίηση των λυσίμετρων οφείλονται στο ότι:

1. Το δείγμα του εδάφους που χρησιμοποιούμε είναι αναγκαστικά μικρό και ίσως όχι αντιπροσωπευτικό για το σύνολο του εξεταζόμενου εδάφους, που συνήθως είναι ανομοιογενές. Το μειονέκτημα αυτό μπορεί να απαλειφθεί χρησιμοποιώντας περισσότερα λυσίμετρα.

2. Άλλο μειονέκτημα είναι ότι ακόμη και με την προσεκτικότερη τοποθέτηση της εγκατάστασης προκαλείται κάποια διατάραξη της φυσικής κατάστασης του εδάφους που μπορεί να έχει αρνητικά αποτελέσματα σε ότι αφορά την ορθότητα των μετρήσεων.

- Ένας τρόπος εκτίμησης της κατείσδυσης σε μια λεκάνη απορροής είναι και η ακόλουθη: Αρχικά γίνεται μια ομαδοποίηση των γεωλογικών σχηματισμών που καταλαμβάνουν την επιφάνεια της λεκάνης απορροής ανάλογα με τα υδρολιθολογικά τους χαρακτηριστικά (ανάλογα δηλαδή με τη συμπεριφορά τους στο νερό). Κατόπιν αφού έχουν χαραχθεί οι ισοϋέτιες καμπύλες της λεκάνης απορροής, μετράται το εμβαδόν που καταλαμβάνει κάθε λιθολογικός σχηματισμός μεταξύ δύο διαδοχικών ισοϋετιών καμπυλών. Ο πολλαπλασιασμός του εμβαδού αυτού επί το ημίθροισμα των τιμών των διαδοχικών ισοϋετιών μας δίνει τον όγκο νερού που πέφτει με τη μορφή ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στην συγκεκριμένη έκταση. Αν τώρα γνωρίζουμε το συντελεστή κατείσδυσης του συγκεκριμένου γεωλογικού σχηματισμού μπορούμε να υπολογίσουμε το ποσό νερού που κατεισδύει. Με τον ίδιο τρόπο μπορεί να εκτιμηθεί ο όγκος

νερού που κατεισδύει σε κάθε επιμέρους περιοχή κάθε λιθολογικού σχηματισμού. Το άθροισμα των επί μέρους αποτελεσμάτων μας δίνει το συνολικό ποσό νερού που κατεισδύει στη λεκάνη απορροής.

ΤΟ ΥΠΟΓΕΙΟ ΝΕΡΟ

Οι υδροφόροι σχηματισμοί του φλοιού της γης δρουν σαν αγωγοί για τη μεταβίβαση και σαν αποθήκες για την αποθήκευση του νερού. Το νερό εισέρχεται σ' αυτούς τους σχηματισμούς είτε άμεσα με τις βροχοπτώσεις από την επιφάνεια του εδάφους (κατείσδυση-infiltration) είτε έμμεσα, από σώματα επιφανειακού νερού, όπως τα ποτάμια και οι λίμνες (διήθηση-percolation) που μετά ταξιδεύει αργά σε ποικίλες αποστάσεις μέχρι να επιστρέψει στην επιφάνεια είτε με φυσική ροή, (πηγές, υποδερμική ροή), είτε με την παρέμβαση των φυτών (διαπνοή) ή του ανθρώπου (έργα υδρομάστευσης).

Το υπόγειο νερό που επιστρέφει στους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου με τη μορφή πηγών (βασική ροή - base flow) διατηρεί τη ροή σ' αυτό όταν η επιφανειακή απορροή είναι μικρή ή μηδενική. Από την άλλη μεριά το αντλούμενο από πηγάδια υπόγειο νερό αποτελεί για πολλές περιοχές της υδρογείου το μοναδικό υδατικό πόρο ολόκληρο το χρόνο. Πρακτικά, όλες οι ποσότητες του υπόγειου νερού είναι επιφανειακής προέλευσης. Οι κύριες πηγές του φυσικού εμπλουτισμού των υπόγειων νερών περιλαμβάνουν τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, την επιφανειακή απορροή και τις φυσικές και τεχνητές λίμνες. Ένα μέρος της αναπλήρωσης των υδροφόρων οριζόντων, που αναφέρεται σαν τεχνητός εμπλουτισμός, προέρχεται από το πλεόνασμα του αρδευτικού νερού, τις διαρροές και διηθήσεις από τα κανάλια μεταφοράς και από τα έργα τεχνητού εμπλουτισμού. Το νερό στο υπέδαφος κινείται προς τα κάτω στη μεν ακόρεστη ζώνη κάτω από την επίδραση της βαρύτητας, στη δε κορεσμένη ζώνη κάτω από την επίδραση των τοπικών υδραυλικών συνθηκών.

Εκροή (discharge) υπόγειου νερού γίνεται όταν το νερό αναδύεται από το υπέδαφος. Το μεγαλύτερο μέρος της φυσικής εκροής έχει τη μορφή εκφόρτισης σε σώματα επιφανειακού νερού όπως π.χ. τα υδατορεύματα, η θάλασσα και οι λίμνες η ροή του υπόγειου νερού στην επιφάνεια του εδάφους εμφανίζεται με τη μορφή πηγών.

Το υπόγειο νερό κοντά στην επιφάνεια είναι δυνατό να επιστρέφει άμεσα στην ατμόσφαιρα με τη διαδικασία της εξάτμισης από το έδαφος και της διαπνοής από τα

φυτά. Οι σημαντικότερες τεχνητές "εκροές" υπόγειου νερού είναι οι αντλούμενες ποσότητες του, από πηγάδια, τάφρους, στοές και γεωτρήσεις.

Η Υδρογεωλογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών.

Το υπόγειο νερό απαντά σε γεωλογικούς σχηματισμούς πολλών και διαφορετικών τύπων οι πιο σημαντικοί απ' αυτούς ονομάζονται υδροφόροι ορίζοντες ή απλά υδροφόροι (aquifers). Υδροφόροι δηλαδή είναι γεωλογικοί σχηματισμοί που περιέχουν αρκετό, κορεσμένο με νερό, υλικό, ώστε να τροφοδοτήσουν με σημαντικές ποσότητες νερού, γεωτρήσεις πηγάδια και πηγές. Αυτό συνεπάγεται ότι ο υδροφόρος έχει κάποια αυξημένη ικανότητα να αποθηκεύει και να μεταβιβάζει το νερό. Τυπικό παράδειγμα αποτελούν οι χαλαρές άμμοι και τα χαλίκια.

Κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την υδρογεωλογική συμπεριφορά - πορώδες.

Τα μέρη ενός πετρώματος ή εδάφους που δεν κατέχονται από στερεά ορυκτή ύλη μπορούν να καταληφθούν από νερό. Αυτοί οι "κενοί" χώροι που συχνά αναφέρονται σαν "κενά" (voids), "πόροι" (pores), δρουν σαν αγωγοί και αποθήκες του νερού. Χαρακτηρίζονται από το μέγεθος τους, το σχήμα τους, την κατανομή τους και τις ανωμαλίες τους. Πρωτογενώς δημιουργήθηκαν διάκενα από τις γεωλογικές διαδικασίες με τις οποίες σχηματίστηκαν οι γεωλογικοί σχηματισμοί και απαντούν στα ιζηματογενή και μαγματικά πετρώματα (πρωτογενές πορώδες). Δευτερογενώς διάκενα αναπτύχθηκαν μετά το σχηματισμό των πετρωμάτων (αρμοί, ρωγμές διάφοροι τύποι κατακερματισμού των πετρωμάτων, ανοίγματα προερχόμενα από διάλυση ή δημιουργημένα από φυτά και ζώα) και αποτελούν το δευτερογενές πορώδες.

Το πορώδες (η) ενός πετρώματος ή εδάφους είναι ένα μέτρο των διάκενων που περιέχονται σ' αυτό και εκφράζεται με το λόγο του συνολικού όγκου των διακένων (V_i) προς τον ολικό όγκο (V) του πετρώματος ή του εδάφους, δηλαδή:

$$n = V_i/V \text{ ή } n = \frac{P_m - P_d}{P_m} = 1 - \frac{P_d}{P_m}$$

όπου P_m και P_d οι πυκνότητες των ορυκτών σωματιδίων (κόκκων) και του πετρώματος ή εδάφους αντίστοιχα. Συχνά αναφέρεται και ως "ολικό πορώδες".

Σχηματισμός	Τιμή K σε cm/sec κατά προσέγγιση	Τιμή S	Χαρακτηρισμός
Χαλίκια μικρού μεγέθους	$7 \cdot 10^{-2}$ 10^{-2}	0,1	Υδροφόρο
Χονδρόκοκκη άμμος	$2,3 \cdot 10^{-2}$	0,1-0,25	Υδροφόρο
Λεπτόκοκκη άμμος	$1,1 \cdot 10^{-2}$ $1 \cdot 10^{-2}$	0,25-0,35	Υδροφόρο
Άμμοι και ιλύς	$2,3 \cdot 10^{-3}$	0,35	Βραδυδροφόρο
Άργιλος	$1 \cdot 10^{-7}$ $3 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-7}$	--	Ανυδροφόρο
Αρτεσιανοί υδροφόροι	--	0,005-0,0005	

Πίνακας 5. Ενδεικτικές τιμές υδροπερατότητας και υδροχωρητικότητας (Mandel-Shiftan 1981, με τροποποιήσεις).

Το ενεργό πορώδες (effective porosity) αναφέρεται στο ποσό των επικοινωνούντων διάκενων που διατίθενται για τη ροή του ρευστού και εκφράζεται με τον λόγο του όγκου που καταλαμβάνουν οι πόροι αυτοί προς το συνολικό όγκο του πετρώματος ή εδάφους. Στα χαλαρά πορώδη μέσα και σε πολλά συμπαγή πετρώματα τα δύο πορώδη συμπίπτουν. Το πορώδες μπορεί να εκφρασθεί επίσης σαν ποσοστό %, αν τα δεξιά μέλη των πιο πάνω δύο εξισώσεων πολλαπλασιαστούν με το 100. Στις περιπτώσεις αυτές συνηθίζεται η χρήση του όρου συντελεστής πορώδους.

Στα ιζηματογενή πετρώματα, τα οποία είναι επιδεκτικά συμπύκνωσης, ιδιαίτερα κατά τις διεργασίες της διαγένεσης, έχει αποδειχθεί ότι το πορώδες ελαττώνεται με το βάθος στο οποίο βρίσκονται αυτά. Η σχέση πορώδους με το βάθος έχει τη μορφή:

$$n_z = n_0 e^{-az}$$

όπου n_z το πορώδες σε βάθος z ,

n_0 το πορώδες στην επιφάνεια,

a μια σταθερά και

e η βάση των Νεπέριων λογάριθμων.

Υλικό	πορώδες %	Υλικό	πορώδες %
Χοντρά χαλίκια	28*	Άμμος θινών	45
Χαλίκια μέσου μεγέθους	32*	Αιολική γη	49
Χαλίκια μικρού μεγέθους	34*	Τύρφη	92
Χοντρή άμμος	39	Κρυσταλλικός σχιστόλιθος	38
Μεσόκοκκος άμμος	39	Ιλύτης	35
Λεπτόκοκκος "	43	Συμπαγής άργιλος	43
Ιλύς	46	Αργιλικός σχιστόλιθος	6
Άργιλος	42	Τόφος	41
Ψαμμίτης λεπτόκοκκος	33	Βασάλτης	17
Ψαμμίτης μεσόκοκκος	37	Αποσαθρωμένος γάβρος	
Ασβεστόλιθος	30	Αποσαθρωμένος γρανίτης	45
Δολομίτης	26		

Πίνακας 6. Αντιπροσωπευτικές τιμές πορώδους (Morris -Johnson, 1967).

Τύποι του υπεδαφικού νερού

Το νερό που προέρχεται από την ατμόσφαιρα και βρίσκεται μέσα στους γεωλογικούς σχηματισμούς διακρίνονται στους εξής τύπους:

Νερό συγκρατήσεως ή κατακρατήσεως ονομάζεται το νερό που υπακούει στους νόμους της βαρύτητας.

Το νερό συγκρατήσεως διακρίνεται σε:

- Υγροσκοπικό νερό: Βρίσκεται μέσα στους μικροπόρους ή τις αυλακώσεις των κόκκων του εδάφους και καλύπτει έτσι ένα τμήμα των κόκκων. Το νερό αυτής της κατηγορίας δεν κινείται από τη βαρύτητα και συγκρατείται ισχυρά από τους κόκκους με απορροφητικές δυνάμεις. Το νερό αυτό μπορεί να απομακρυνθεί μόνο με εξάτμιση. Η ποσότητα του νερού αυτού εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την πίεση και κυρίως από την κοκκομετρική σύσταση του υλικού. Όσο πιο λεπτόκοκκο είναι το υλικό τόσο μεγαλύτερη είναι η συνολική επιφάνεια των επί μέρους κόκκων η οποία αυξάνει γεωμετρικά όσο μειώνεται η διάμετρος των κόκκων.
- Υμενώδες νερό χαρακτηρίζεται το νερό που επικαλύπτει σε ένα πολύ μικρό πάχος τους κόκκους του εδάφους και συγκρατείται με δυνάμεις συνάφειας. Όπως και το υγροσκοπικό δεν κινείται από την επίδραση της βαρύτητας.
- Τριχοειδές νερό. Είναι το νερό που συγκρατείται με τριχοειδείς δυνάμεις. Τα τριχοειδή φαινόμενα γίνονται κατανοητά με την περιγραφή του παρακάτω πειράματος: αν σε μια λεκάνη με νερό βυθίσουμε ένα σωλήνα με πολύ μικρή

διάμετρο θα παρατηρήσουμε ότι η στάθμη στο λεπτό σωλήνα θα ανέβει ψηλότερα από τη στάθμη του νερού στη λεκάνη. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και με το νερό που καταλαμβάνει το χώρο (τριχοειδή κενά) μεταξύ των κόκκων ενός εδάφους. Η ποσότητα του τριχοειδούς νερού που περιέχεται στο έδαφος είναι συνάρτηση της κοκκομετρικής σύστασης του εδάφους. Όταν η διάμετρος των κόκκων μικραίνει, η ποσότητα του τριχοειδούς νερού μεγαλώνει. Αυτό συμβαίνει μέχρι ένα ορισμένο όριο πέραν του οποίου αν η διάμετρος των κόκκων εξακολουθεί να μειώνεται, μειώνεται και η ποσότητα του τριχοειδούς νερού. Το τριχοειδές νερό διακρίνεται σε δύο κατηγορίες στο κλειστό ή συνεχές τριχοειδές νερό και στο ανοικτό ή απομονωμένο ή ασυνεχές τριχοειδές νερό. Το κλειστό τριχοειδές βρίσκεται αμέσως πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και αποτελεί την προς τα πάνω συνέχειά του πληρώνοντας τα κενά που έχουν τριχοειδή διάμετρο. Το νερό αυτό υπακούει στους νόμους της βαρύτητας. Το ανοικτό ή απομονωμένο τριχοειδές βρίσκεται πάνω από το κλειστό τριχοειδές. Συμπληρώνει ορισμένα μόνο τριχοειδή κενά χωρίς να αποτελεί συνέχεια του κλειστού γιατί παρεμβάλλεται αέρας. Το νερό αυτό δεν υπακούει στους νόμους της βαρύτητας.

Εκτός από το νερό συγκρατήσεως υπάρχει και το νερό βαρύτητας: Ονομάζεται το νερό που γεμίζει το κεντρικό μέρος των κενών μεταξύ των κόκκων και είναι το μόνο που μπορεί να ρέει ελεύθερα υπό την επίδραση της βαρύτητας.

Κατακόρυφη κατανομή του υπόγειου νερού

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω μια ποσότητα του νερού κατεισδύσεως συγκρατείται από τα πετρώματα, ενώ μια άλλη κινείται υπό την επίδραση της βαρύτητας. Αν προσπαθήσουμε να κατανέμουμε κατακόρυφα τις διάφορες ζώνες νερού που προαναφέρθηκαν σε ένα γεωλογικό σχηματισμό θα έχουμε τα εξής:

- Ζώνη εξατμισοδιαπνοής. Η ζώνη αυτή αποτελεί το ανώτερο τμήμα του εδάφους και ορίζεται από την επιφάνεια μέχρι τη ζώνη του ανοιχτού τριχοειδούς. Το πάχος της είναι μεταβλητό και εξαρτάται από την κοκκομετρική σύσταση του εδάφους (δηλαδή το μέγεθος των κόκκων από τους οποίους αποτελείται), τη βλάστηση, και τους κλιματικούς παράγοντες (βροχόπτωση, θερμοκρασία αέρα). Η ζώνη αυτή περιέχει νερό συγκρατήσεως (υμενώδες και υγροσκοπικό). Κατά τη

διάρκεια των βροχοπτώσεων αν η ποσότητα του νερού είναι μεγαλύτερη από το νερό συγκρατήσεως τότε υπάρχει και νερό κατείσδυσης.

- Ζώνη ανοικτού τριχοειδούς. Βρίσκεται κάτω από τη ζώνη εξατμισδιαπνοής και η θέση της δεν είναι καθορισμένη, αλλά μετατοπίζεται σε συνάρτηση με τις βροχοπτώσεις. Οι επιφάνειες που ορίζουν αυτή τη ζώνη δεν είναι επίπεδες γιατί τόσο αυτές όσο και το πάχος της εξαρτάται από τη φύση του εδάφους. Το νερό που περιέχεται στη ζώνη αυτή είναι νερό συγκρατήσεως (υγροσκοπικό, υμενώδες και ανοικτό τριχοειδές).
- Ζώνη κλειστού τριχοειδούς. Η ζώνη αυτή αποτελεί συνέχεια της προηγούμενης και το πάχος της μεταβάλλεται ανάλογα με τη φύση του εδάφους. Η προς τα κάτω επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί ως επίπεδη, γιατί αποτελεί συνέχεια του υδροφόρου ορίζοντα. Το νερό της ζώνης αυτής έχει άμεση σχέση με το νερό του υδροφόρου ορίζοντα και η θέση της εξαρτάται άμεσα από αυτό.
- Ζώνη κορεσμού. Αποτελεί τη βαθύτερη ζώνη και ταυτίζεται με τον υδροφόρο ορίζοντα. Ονομάζεται κορεσμένη ζώνη, γιατί τα κενά των πετρωμάτων καταλαμβάνονται μόνο από νερό σε αντίθεση με τις προηγούμενες, όπου υπάρχει και αέρας και για το λόγο αυτό οι προηγούμενες ονομάζονται και ζώνη αερισμού ή ακόρεστη ζώνη. Η ζώνη κορεσμού παρουσιάζει ενδιαφέρον για την υδρογεωλογία γιατί είναι η μόνη που μπορεί να τροφοδοτεί τα υδροληπτικά έργα (γεωτρήσεις, πηγάδια κα). Ένα μέρος του νερού της ζώνης αυτής είναι νερό συγκρατήσεως και κατά το υπόλοιπο ποσοστό είναι νερό βαρύτητας.

Υδροφόροι ορίζοντες

Όταν σε ένα διαπερατό πέτρωμα ή γεωλογικό σχηματισμό πέσει νερό, τότε από την επίδραση της βαρύτητας το νερό κινείται από την επιφάνεια προς το βάθος και η κατακόρυφη κίνηση θα σταματήσει, όταν συναντήσει ένα αδιαπέρατο στρώμα. Από τη στιγμή αυτή η διεύθυνση της κίνησης του νερού αλλάζει και εξαρτάται κυρίως από τη μορφολογία του αδιαπέρατου στρώματος που αποτελεί τον πυθμένα του υπόγειου νερού. Συνεπώς το σχήμα, η έκταση και η κλίση του αδιαπέρατου υπόβαθρου επηρεάζει το σχήμα, την έκταση και μερικώς την κλίση της επιφάνειας της υπόγειας μάζας του νερού. Η προς τα πάνω οριακή επιφάνεια του νερού ονομάζεται ισοσταθμική επιφάνεια.

Υδροφόρος ορίζοντας ονομάζεται το πέτρωμα ή ο γεωλογικός σχηματισμός που περιέχει νερό που μπορεί να εκμεταλλευτεί.

Ο συνδυασμός ενός διαπερατού στρώματος με άλλα αδιαπέρατα μπορεί να σχηματίσει μια λεκάνη ή ένα υδροφόρο ορίζοντα, εφόσον φυσικά υπάρχουν οι κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες στην περιοχή. Μπορεί επίσης να σχηματιστεί υδροφόρος ορίζοντας ακόμη και όταν κάτω από το υδροπερατό στρώμα υπάρχει ημιπερατό, αρκεί η ποσότητα νερού που δέχεται η περιοχή να είναι μεγαλύτερη από εκείνο το ποσό νερού που διέρχεται από το ημιδιαπερατό στρώμα στη μονάδα του χρόνου.

Οι υδροφόροι ορίζοντες διακρίνονται στους ελεύθερους, τις φρεάτιες λεκάνες, τους υπό πίεση ή αρτεσιανούς, τους ημιελεύθερους και τους μερικώς υπό πίεση.

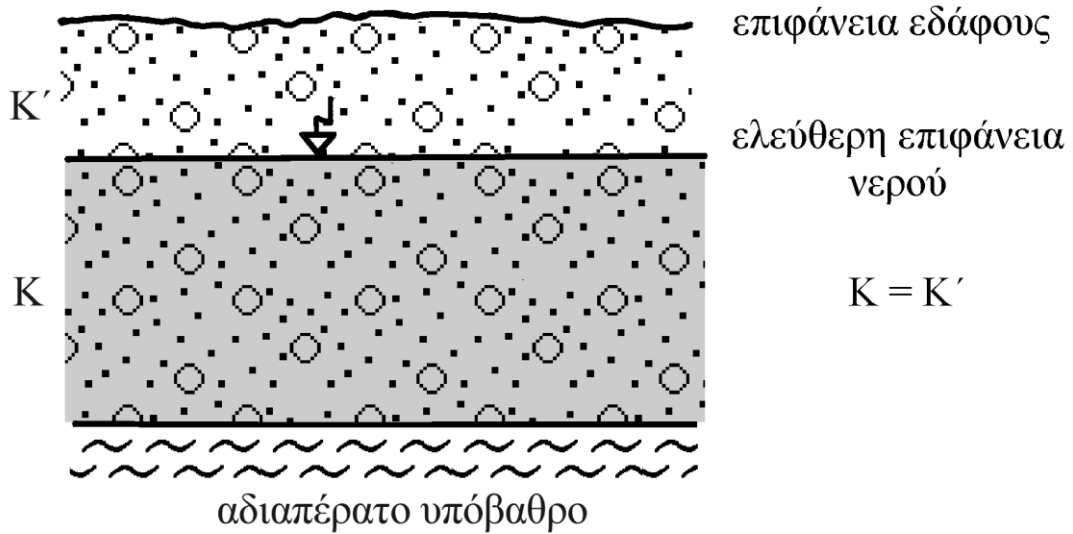
Ελεύθεροι υδροφόροι ορίζοντες

Ένας υδροφόρος ορίζοντας ονομάζεται ελεύθερος όταν μεταξύ αυτού και της τοπογραφικής επιφάνειας του ανάγλυφου δεν παρεμβάλλεται αδιαπέρατο στρώμα. Στην περίπτωση αυτή η περατότητα K των στρωμάτων που βρίσκονται μέσα στον υδροφόρο ορίζοντα και αυτών που βρίσκονται πάνω από αυτός K' είναι περίπου ίση.

Τέτοιοι υδροφόροι ορίζοντες σχηματίζονται συνήθως στις λεκάνες που αποτελούνται από προσχωσιγενείς αποθέσεις.

Φρεάτιες λεκάνες

Οι φρεάτιες λεκάνες είναι μια ιδιαίτερη κατηγορία ελεύθερων υδροφόρων οριζόντων. Πρόκειται για υδροφόρους ορίζοντες των οποίων η στάθμη βρίσκεται



Σχήμα 11 Σχηματική απεικόνιση ελεύθερου υδροφόρου ορίζοντα. K και K' είναι η περατότητα των στρωμάτων.

κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και συναντώνται κυρίως στις αλλουβιακές προσχώσεις και στους μανδύες αποσάθρωσης.

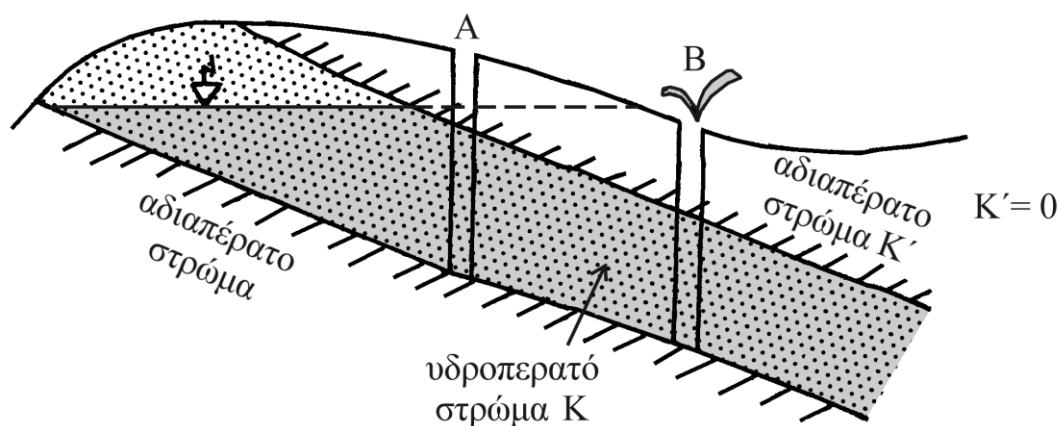
Τα νερά των λεκανών αυτών λόγω του μικρού τους βάθους από την επιφάνεια επηρεάζονται εύκολα από τις εξωτερικές επιδράσεις και γι αυτό είναι εύκολο να μολυνθούν.

Υπό πίεση ή εγκλωβισμένοι ή αρτεσιανοί υδροφόροι ορίζοντες

Στην περίπτωση αυτή η περατότητα K' των στρωμάτων που βρίσκονται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα ισούται με μηδέν δηλαδή είναι τελείως αδιαπέρατα από το νερό.

Αν τα στρώματα είναι κεκλιμένα ή πτυχωμένα το διαπερατό στρώμα που περιέχει το υπόγειο νερό μπορεί να εμφανίζεται στην επιφάνεια από όπου και τροφοδοτείται. Το νερό έχοντας πάνω και κάτω από το διαπερατόστρώμα στο οποίο εμπεριέχεται τελείως αδιαπέρατα στρώματα βρίσκεται υπό πίεση.

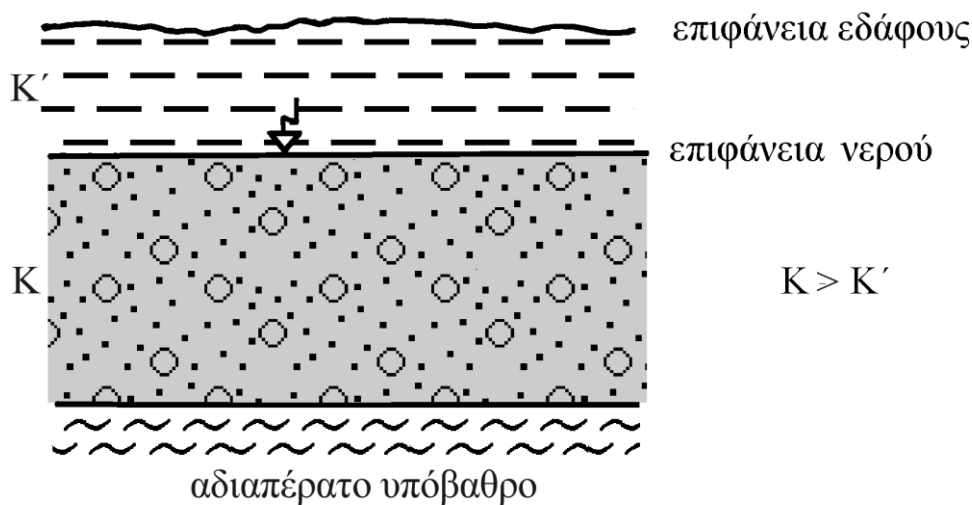
Αν στην περίπτωση του σχήματος πραγματοποιηθεί μια γεώτρηση στη θέση Β, αφού διατρηθεί το αδιαπέρατο στρώμα το υπόγειο νερό που βρίσκεται υπό πίεση μπορεί να ρέει ελεύθερα στην επιφάνεια χωρίς άντληση. Στην περίπτωση αυτή το νερό ονομάζεται αρτεσιανό.



Σχήμα 12. Σχηματική απεικόνιση ενός υπό πίεση ή αρτεσιανού υδροφόρου ορίζοντα. K και K' είναι η περατότητες των γεωλογικών σχηματισμών.

Ημιελεύθεροι υδροφόροι ορίζοντες

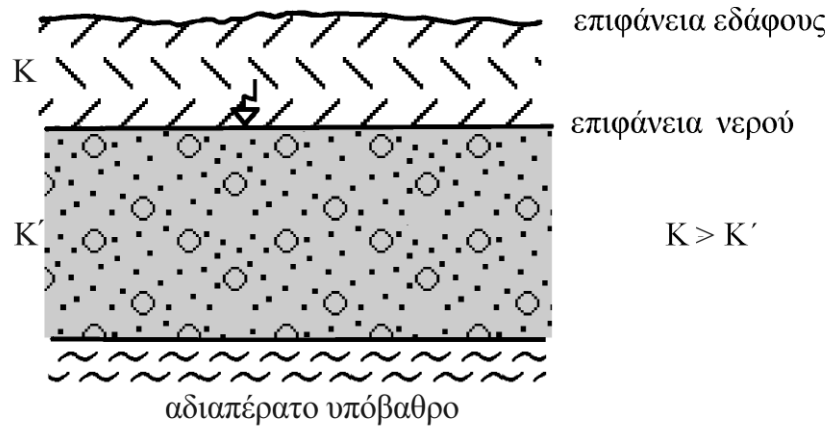
Αν σε ένα υδροφόρο στρώμα υπέρκειται άλλο στρώμα με περατότητα K' μικρότερη από αυτή του υδροφόρου στρώματος K , τότε ο υδροφόρος ορίζοντας ονομάζεται ημιελεύθερος. Τέτοιοι υδροφόροι ορίζοντες εμφανίζονται σε λεκάνες που αποτελούνται από εναλλαγές στρωμάτων με διαφορετικά λιθολογικά χαρακτηριστικά (όπως ψαμμίτες, άργιλοι, κροκαλοπαγή κα).



Σχήμα 13. Σχηματική απεικόνιση ενός υπό πίεση ή αρτεσιανού υδροφόρου ορίζοντα. K και K' είναι η περατότητες των γεωλογικών σχηματισμών.

Μερικώς υπό πίεση υδροφόροι ορίζοντες

Ονομάζονται οι υδροφόροι ορίζοντες στην περίπτωση που η περατότητα K' των στρωμάτων που βρίσκονται πάνω από αυτούς είναι πολύ μικρή όχι όμως ίση με 0.



Σχήμα 14. Σχηματική απεικόνιση ενός μερικώς υπό πίεση υδροφόρου ορίζοντα. K και K' είναι η περατότητες των γεωλογικών σχηματισμών.