

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

4.1. Το νερό ως γεωλογικός παράγοντας

Το υπόγειο νερό αποτελεί το 0,61% του συνολικού νερού στον πλανήτη μας και είναι ένας σημαντικός γεωλογικός παράγοντας. Οι δύο θεμελιώδεις αιτίες για τον ενεργό ρόλο του υπόγειου νερού είναι:

1. Η ικανότητά του να αλληλεπιδρά με το περιβάλλον που το περιέχει
2. Η συστηματική χωρική κατανομή της ροής του

Αλληλεπίδραση και ροή συμβαίνουν ταυτόχρονα σε όλες τις κλίμακες του χωρόχρονου, αν και ποικίλλουν σε ρυθμό και ένταση. Έτσι τα αποτελέσματα της ροής του υπόγειου νερού γίνονται ορατά από την επιφάνεια του εδάφους έως τα μεγαλύτερα βάθη και από τη διάρκεια μιας ημέρας μέχρι την κλίμακα του γεωλογικού χρόνου.

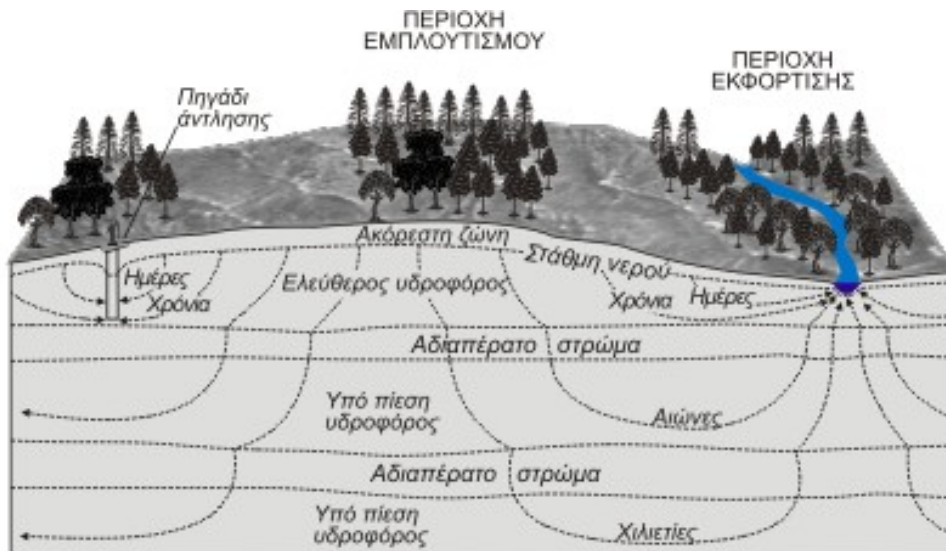
Οι ποικίλες εκδηλώσεις που προκαλούνται από την αλληλεπίδραση υπόγειων νερών και περιβάλλοντος σε μια περιοχή ονομάζονται «επιτόπια περιβαλλοντικά αποτελέσματα του υπόγειου νερού» (in situ environmental effects of groundwater).

4.2. Συστήματα υπόγειας ροής

Ένα *σύστημα υπόγειας ροής* (groundwater flow system) ορίζεται ως μια συνεχής τρισδιάστατη μονάδα υπόγειας ροής με μία περιοχή τροφοδοσίας (εμπλουτισμού) και μία ή περισσότερες περιοχές εκφόρτισης ή εκροής (Toth, 1963).

Εμπλουτισμός συμβαίνει σε περιοχές όπου το νερό της βροχόπτωσης πέφτει στην επιφάνεια του εδάφους, κινείται στην ακόρεστη ζώνη και εισέρχεται στην κορεσμένη, καθώς και σε περιοχές όπου επιφανειακά στρώματα νερού τροφοδοτούν υπόγεια υδροφόρα στρώματα. *Εκφόρτιση* συμβαίνει σε πηγές, υδρορεύματα, λίμνες, θάλασσα στις παράκτιες περιοχές, καθώς και ως διαπνοή των φυτών, όπου οι ρίζες των φυτών είναι κοντά στη στάθμη του υπόγειου νερού (Σχ. 4.1).

Η σταθερότητα του συστήματος ροής είναι συνάρτηση του βάθους και της θέσης. Οι αλλαγές προσαρμόζονται πιο γρήγορα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους σε συνθήκες ελεύθερης ροής, παρά σε μεγάλα βάθη και υπό πίεση συνθήκες.



Σχήμα 4.1: Περιοχές εμπλουτισμού και εκφόρτισης.

4.3. Αλληλεπίδραση νερού και περιβάλλοντος

Η τάση για ισορροπία σε όλα τα συστήματα στη φύση είναι γενικός κανόνας και συνοδεύεται από πολλές διαδικασίες. Ως συνέπεια της ιδιότητας αυτής το υπόγειο νερό μπορεί (Toth, 1999):

- Να μεταφέρει ύλη και θερμότητα
- Να κινεί και αποθέτει ύλη
- Να παράγει και μεταβάλλει την πίεση του νερού στα πορώδη μέσα
- Να ολισθαίνει ασυνεχείς επιφάνειες.

Οι ανωτέρω δραστηριότητες του υπόγειου νερού παράγουν πολλά επιτόπου αποτελέσματα, η φύση των οποίων εξαρτάται από τις φυσικοχημικές συνθήκες της περιοχής. Σε περιοχές υψηλής χημικής και θερμικής ενέργειας ορυκτά προστίθενται στο νερό με διάλυση, οξείδωση, επίδραση οξέων κ.ά. Αντίθετα σε περιοχές χαμηλής χημικής, θερμικής και κινητικής ενέργειας το νερό τείνει να συγκεντρώνεται και να αφήνει το υπέδαφος εκφορτιζόμενο στην επιφάνεια, στις όχθες ποταμών, στον πυθμένα λιμνών, αποθέτοντας ορυκτή ύλη. Σχετικά υψηλή μηχανική ενέργεια προξενεί κίνηση του νερού από μια θέση μεταφέροντας διαλυμένα ορυκτά και θερμότητα.

Τυπικά περιβαλλοντικά αποτελέσματα που προέρχονται από την κίνηση του υπόγειου νερού είναι τα κάτωθι:

- Αλλαγή στο υδραυλικό φορτίο κατά τη διεύθυνση ροής, από τις περιοχές εμπλουτισμού προς τις περιοχές εκφόρτισης, που καθορίζεται από τον νόμο του Darcy.

- Σχετικά ξηρές συνθήκες υγρασίας εδάφους και επιφανειακού νερού στις περιοχές εμπλουτισμού και πλεόνασμα νερού στις περιοχές εκφόρτισης.
- Συστηματικές αλλαγές στη φάση των ανιόντων από HCO_3^- σε SO_4^{2-} και σε Cl^- , κατά τη διεύθυνση ροής και το βάθος.
- Ανωμαλίες στη γεωθερμική βαθμίδα σε περιοχές ανοδικής και καθοδικής ροής.
- Χημικά οξειδωτικές συνθήκες κοντά σε περιοχές εμπλουτισμού και αναγωγικές σε περιοχές εκφόρτισης.
- Συσσώρευση των μεταφερομένων μεταλλικών συστατικών ή υδρογονανθράκων και συστατικών ανθρώπινης προέλευσης αρχικά σε περιοχές, όπου το δυναμικό ροής είναι ελάχιστο ή σε περιοχές σύγκλισης της ροής (υδραυλικές παγίδες-hydraulic traps).
- Μηχανικές αστοχίες (διάβρωση, κατολισθήσεις κ.ά.) στις περιοχές εκφόρτισης.
- Αλλαγή στον τύπο και την ποσότητα της βλάστησης, ανάλογα με τις θρεπτικές ουσίες και την υγρασία του εδάφους που επικρατούν σε διάφορα σημεία του συστήματος ροής.
- Έκπλυση του εδάφους και των πετρωμάτων κοντά στην επιφάνεια.
- Αύξηση της περιεκτικότητας αλάτων προς τον τελικό σταθμό του συστήματος ροής στις περιοχές εκφόρτισης.
- Αύξηση της αλατότητας προς τον τελικό σταθμό του συστήματος ροής στις περιοχές εκφόρτισης.

Τα ανωτέρω αναφέρονται σε βαρυντικά συστήματα ροής, αν και παρόμοιες φυσικές συνέπειες μπορεί να παραχθούν από ροές που οφείλονται σε άλλες πηγές ενέργειας, όπως: άνωση, όσμωση, θερμική μεταφορά κ.ά. Ως γνωστόν το νερό είναι νευτώνιο ρευστό με μοναδικές ιδιότητες, όπως: μεγάλη θερμοχωρητικότητα, μεγάλη διαλυτική ικανότητα, πολικότητα μορίου, ιδιόμορφη διαστολή κ.λπ. (βλ. παραγράφους 1.8 και 3.1).

Το νερό διαπερνά το πορώδες τμήμα του ανώτερου φλοιού της γης και μπορεί να φθάσει μέχρι βάθος 15-20 km. Αν και το βάθος ποικίλλει το νερό είναι σε συνεχή κίνηση με πολύ διαφορετικό ρυθμό από 3,6 m/h κοντά στην επιφάνεια έως λιγότερο από $3,6 \cdot 10^{-9}$ m/h σε μεγάλα βάθη.

Διακρίνονται τρεις (3) κύριοι τύποι αλληλεπίδρασης μεταξύ υπόγειων νερών και περιβάλλοντος με πολλές επί μέρους διαδικασίες για καθέναν από αυτούς (Toth, 1999):

- Χημική αλληλεπίδραση
- Φυσική αλληλεπίδραση
- Μεταφορική αλληλεπίδραση

4.3.1. Χημικές διαδικασίες

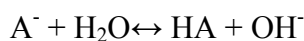
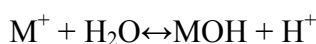
Διάλυση (dissolution) είναι μια από τις πιο αποτελεσματικές διαδικασίες στη χημεία των υπόγειων νερών και μπορεί να θεωρηθεί το πρώτο βήμα στη χημική εξέλιξη του νερού. Επηρεάζει και τα αέρια και τα στερεά. Τυπικές περιοχές διάλυσης αερίων από υπόγεια νερά είναι η εδαφική ζώνη, η ακόρεστη ζώνη και η ζώνη συσσώρευσης πετρελαίου και αερίων. Αέρια που αλληλεπιδρούν με το υπόγειο νερό είναι: N₂, O₂, H₂, He, Ar, CO₂, NH₃, CH₄ και H₂S.

Η διάλυση των αερίων καθιστά το νερό ασθενές όξινο δηλ. χημικά δραστικό. Ο βαθμός διάλυσης εξαρτάται από τη διαλυτότητα των ορυκτών, τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, την ποσότητα του νερού, τις αρχικές συγκεντρώσεις του νερού κ.ά. Τα πλέον διαλυτά πετρώματα είναι: ασβεστόλιθος, γύψος, δολομίτης, αλίτης, συλβίνης και θεωρούνται βασική πηγή των ιόντων Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, CO₃²⁻, SO₄²⁻ στο υπόγειο νερό. Τα πυριτικά και άλλα αδιάλυτα πετρώματα είναι διαλυτά σε κάποιο βαθμό κάτω από ειδικές συνθήκες και απελευθερώνουν δευτερεύοντα ιόντα ή ιχνοστοιχεία στο νερό.

Η διάλυση έχει μεγάλη σημασία στα ασβεστολιθικά πετρώματα, λόγω της μεγάλης εξάπλωσής των και των μορφών που εμφανίζουν (καρστικές μορφές).

Ενυδάτωση (hydration) είναι η είσοδος νερού στο κρυσταλλικό πλέγμα των ορυκτών ή η προσκόλληση μορίων νερού στα ιόντα διαλυμένων αλάτων. Η διεργασία αυτή οδηγεί στη δημιουργία νέων ορυκτών, περισσότερο σύνθετων π.χ αιματίτη σε λειμωνίτη, ανυδρίτη σε γύψο. Παρατηρείται σε θειϊκά, ανθρακικά και πυριτικά άλατα, καθώς και σε μερικά οξειδία. Παίζει δε σημαντικό ρόλο σαν πρώτο βήμα της αποσάθρωσης των ορυκτών.

Υδρόλυση (hydrolysis) είναι η αντίδραση ενός ιόντος με το νερό με αποτέλεσμα τη δημιουργία OH⁻ και H⁺, σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



Ο βαθμός υδρόλυσης είναι ανάλογος του σθένους (Z) και αντιστρόφως ανάλογος της ακτίνας (r) του ιόντος. Ο λόγος Z/r ονομάζεται **ιοντικό δυναμικό**.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι εξαλλοιώσεις των πυριτικών ορυκτών κατά την υδρόλυσή τους (καολινίωση, σερικιτίωση κ.ά). Τα ορυκτά που προκύπτουν εξαρτώνται από τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν.

Τα προϊόντα εξαλλοίωσης στις τροπικές και υποτροπικές περιοχές είναι πλουσιότερα σε οξειδία και υδροξείδια σιδήρου και αργιλίου, καθώς και σε διοξείδιο του πυριτίου

(Τσιραμπίδης, 2002). Η υδρόλυση γίνεται κατά μήκος λεπτών σχισμών του πετρώματος ή παράλληλα με τα επίπεδα σχισμού των κρυστάλλων του ορυκτού.

Αντιδράσεις οξειδοαναγωγής (oxidation- reduction reactions) είναι χημικές αντιδράσεις στις οποίες μεταφέρονται ηλεκτρόνια από ένα άτομο σε ένα άλλο.

Η οξείδωση επιτυγχάνεται με αποβολή e^- και η αναγωγή με πρόσληψη e^- . Η οξείδωση είναι πιο σημαντική στην ακόρεστη ζώνη, όπου υπάρχει σε αφθονία το οξυγόνο από τον ατμοσφαιρικό αέρα και το διοξείδιο του άνθρακα. Η σημασία της οξείδωσης μειώνεται γρήγορα με το βάθος. Τυπικές και σημαντικές διαδικασίες οξείδωσης είναι η οξείδωση των σουλφιδίων, κατά την οποία παράγονται ιόντα Fe^{3+} και SO_4^{2-} .

Η αναγωγή είναι σημαντική σε οργανικές αποθέσεις, που αποτελούν χημικά αναγωγικά περιβάλλοντα. Στις περιπτώσεις αυτές απομακρύνεται όλο ή μέρος του οξυγόνου από οξείδια, νιτρικά και νιτρώδη. Μπορεί να παραχθούν H_2 , H_2S , CH_4 και άλλοι υδρογονάνθρακες, S^{2-} , NO_2^- , NH_4^+ , Fe^{2+} και Mn^{2+} .

Η γύψος ανάγεται από άλλες ουσίες με την επίδραση θειοβακτηρίων για το σχηματισμό θείου, ενώ το ασβέστιο της γύψου σχηματίζει άλας του ασβεστίου. Έτσι δικαιολογείται η παρουσία θείου στο θαλασσινό νερό, που προέρχεται από τη διάσπαση της γύψου.

Η απόθεση διαλυμένης ορυκτής ύλης στο νερό συμβαίνει για πολλούς λόγους, όπως:

- Αντίδραση με ιόντα του υδροφορέα για σχηματισμό αδιάλυτων αποθέσεων (σχηματισμός φθορίτη λόγω της αντίδρασης φθορίου του νερού με πετρώματα πλούσια σε ασβέστιο).
- Αλλαγές στην πίεση και τη θερμοκρασία επηρεάζοντας τη διαλυτότητα των χημικών συστατικών του νερού, όπως η απόθεση ασβεστιτικής τούφας ($CaCO_3$) γύρω από το στόμιο πηγών που οφείλεται στην απελευθέρωση διαλυμένου CO_2 , λόγω ελάττωσης της πίεσης και η απόθεση SiO_2 από θερμές πηγές, λόγω ελάττωσης της θερμοκρασίας.
- Οξείδωση διαλυμένων υλικών εκτεθειμένων στον ατμοσφαιρικό αέρα, συμβάλλοντας στη μείωση της διαλυτότητας όπως, η απόθεση $Fe(OH)_3$ από νερά που περιέχουν ιόντα σιδήρου σε διάλυση.

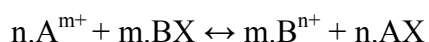
Προσρόφηση είναι η διαδικασία κατά την οποία μια ουσία προσκολλάται στην επιφάνεια των εδαφικών κόκκων ή στη διεπιφάνεια στερεών και νερού. Η έλξη οφείλεται σε ασθενείς δυνάμεις van der Waals. Η ικανότητα προσρόφησης των στερεών σωματιδίων των υδροφορέων αυξάνεται με την ειδική επιφάνεια. Τα σωματίδια της αργίλου, τα αδρομερέστερα σωματίδια με επικάλυψη από οργανικό υλικό και τα οξείδια και

υδροξείδια του σιδήρου έχουν μεγάλη ειδική επιφάνεια. Συνεπώς η ικανότητα προσρόφησης σχετίζεται με την περιεκτικότητα σε αργιλικά ορυκτά, σε οργανικά υλικά και σε οξείδια και υδροξείδια (Αναλυτικά βλέπε παράγραφο 5.7).

Ιοντοανταλλαγή (ion exchange) είναι η διαδικασία κατά την οποία ανταλλάσσονται ιόντα μεταξύ ρυπαντών και εδάφους, λόγω των αρνητικών επιφανειακών φορτίων που προέρχονται από τη δομή των αργιλοπυριτικών ορυκτών που υπάρχουν στο έδαφος (ηλεκτροστατική προσρόφηση).

Οι πλέον σημαντικές ουσίες ικανές για ιοντοανταλλαγή είναι τα αργιλικά ορυκτά όπως: καολίνη, μοντμοριλονίτης, ιλλίτης, χλωρίτης, ζεόλιθοι (βλ. παράγραφο 5.7). Παράδειγμα ιοντοανταλλαγής είναι η αντικατάσταση Na^+ από Ca^{2+} και/ή Mg^{2+} στον μπεντονίτη, συμβάλλοντας στη φυσική αποσκλήρυνση του νερού. Γενικά ιόντα με μεγαλύτερο σθένος αντικαθιστούν ιόντα με μικρότερο σθένος ($\text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+$). Για τα ιόντα με ίδιο σθένος σημαντικό ρόλο παίζει η ενυδατωμένη ακτίνα (Νικολαΐδης, 2005).

Γενικά αν θεωρήσουμε δύο τυχαία στοιχεία A και B και X αντιστοιχεί στη στερεά φάση, τότε η αντίδραση της κατιοανταλλαγής περιγράφεται από την εξίσωση:



όπου m, n είναι τα σθένη των στοιχείων A και B.

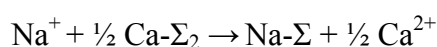
Η σταθερά ισορροπίας της ανωτέρω αντίδρασης ισούται με:

$$K = \frac{[B]^m \cdot [AX]^n}{[A]^n \cdot [BX]^m}$$

όπου [A] είναι η ενεργότητα ή ενεργή συγκέντρωση (effective concentration) της ουσίας A. Η ανωτέρω σταθερά K είναι γνωστή και ως **συντελεστής εκλεκτικότητας** (selectivity coefficient) και χαρακτηρίζει την ικανότητα των ορυκτών να ανταλλάσσουν ιόντα με το υπόγειο νερό.

Ο ρόλος της ιοντοανταλλαγής είναι σημαντικός στη διαμόρφωση της ποιότητας των υπόγειων νερών παράκτιων υδροφορέων. Το γλυκό νερό είναι κατά κανόνα οξυανθρακικό ασβεστούχο (Ca^{2+} - HCO_3^-) και το θαλασσινό χλωριονατριούχο (Na^+ - Cl^-).

Όταν διεισδύσει θαλασσινό νερό στην ενδοχώρα λαμβάνει χώρα ιοντοανταλλαγή (Apello & Postma, 1994):



όπου Σ είναι η στερεά φάση στην οποία λαμβάνει χώρα η ανταλλαγή (ιοντοανταλλάκτης).

Η ιοντοανταλλαγή οδηγεί σε απελευθέρωση Ca^{2+} και δέσμευση του Na^+ . Το υπόγειο νερό μετατρέπεται από Ca-HCO_3 σε Na-Cl υδροχημικό τύπο.

Το αντίθετο συμβαίνει κατά τη διάρκεια τεχνητού εμπλουτισμού με γλυκό νερό σε υφάλμυρο υδροφόρο ορίζοντα, όπου μετατρέπεται σε Na-HCO_3 τύπο (freshening). Στους παράκτιους καρστικούς υδροφόρους γίνεται δολομιτίωση (αντικατάσταση Ca^{2+} από Mg^{2+}).

Η προσρόφηση και η ιοντοανταλλαγή είναι δύο σημαντικές διαδικασίες φυσικής απορρύπανσης του υπόγειου νερού (βλ. παράγραφο 5.7), ελέγχοντας την κινητικότητα των ιόντων και βαρέων μετάλλων στο υπέδαφος (προσρόφηση) και την έκπλυση των κατιόντων Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ από το έδαφος (ιοντοανταλλαγή).

4.3.2. Φυσικές διαδικασίες

Οι φυσικές διαδικασίες συνδέονται με:

- **Ολισθήσεις.** Η παρουσία του υπόγειου νερού ελαττώνει την ενεργό τάση μεταξύ των κόκκων, μειώνει τη διατμητική αντοχή και συνεπώς την ευστάθεια των πρανών. Σαν αποτέλεσμα κινήσεις εδαφικής ύλης μπορεί να προκληθούν κατά μήκος ασυνεχειών με μεγέθη που κυμαίνονται από επανατοποθετήσεις κόκκων μέχρι ολισθήσεις. Η διαδικασία είναι πιο αποτελεσματική σε περιοχές, όπου ευρείες μεταβολές στο ύψος των βροχοπτώσεων προκαλούν μεγάλες διακυμάνσεις στη στάθμη του υπόγειου νερού. Το νερό μειώνει τη συνοχή των γεωλογικών σχηματισμών και το συντελεστή τριβής ανάμεσα στις επαπτόμενες επιφάνειες με αποτέλεσμα τη μείωση της ευστάθειας των πρανών. Τα ανωτέρω σε συνδυασμό με ανθρώπινες παρεμβάσεις (πλημμελής κατασκευή τεχνικών έργων) οδηγούν σε φαινόμενα, όπως: ολισθήσεις και καταπτώσεις βράχων, καθίζησης, ρευστοποίησης, λασπορροών, ερπυσμούς εδαφών, κατολισθήσεων.

Η διατμητική αντοχή, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.4, είναι αυτή που αντιστέκεται στη θραύση και/ή στην ολίσθηση του εδάφους κατά μήκος μιας επιφάνειας (επίπεδο θραύσης). Τα ανωτέρω μεγέθη συνδέονται με την εξίσωση του Coulomb:

$$\tau = c + (\Sigma - P) \epsilon \phi$$

όπου: τ =η διατμητική αντοχή ανά μονάδα επιφανείας, c =η συνοχή ανά μονάδα επιφανείας, Σ = η ολική κάθετη τάση στο επίπεδο διάτμησης που οφείλεται στο βάρος των στερεών και υγρών, P =η υδροστατική πίεση και ϕ =η γωνία τριβής.

Για αδρομερή, μη συνεκτικά εδάφη η συνοχή c είναι μηδενική. Η γωνία τριβής ϕ εξαρτάται από τη σχετική πυκνότητα των εδαφών. Καθώς οι περισσότερες κατολισθήσεις

σχετίζονται με την αύξηση της υδροστατικής πίεσης σημαίνει ότι απαιτείται επιφανειακή και υπόγεια αποστράγγιση ή αποχέτευση για την αποτροπή τους.

- **Μεταβολές στην πίεση του νερού των πόρων.** Σχετικά υψηλές ή αυξητικές πιέσεις του νερού των πόρων είναι χαρακτηριστικό στα τμήματα εκφόρτισης των υπόγειων συστημάτων ροής. Μείωση ή αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων (ή πίεσης πόρων, pore pressure) επιδρά στη διαλυτότητα των αερίων, στο βαθμό κορεσμού των αερίων και στην αντοχή και ακεραιότητα του γεωλογικού σχηματισμού. Η αλλαγή της πίεσης του νερού των πόρων στα βαρυντικά συστήματα ροής είναι μια δυναμική διεργασία. Σύμφωνα με τον Terzaghi (1950) αυτές οι αλλαγές οδηγούν στην αύξηση των ενεργών τάσεων στις περιοχές εμπλουτισμού, ενώ μειώνονται στις περιοχές εκφόρτισης. Το αποτέλεσμα είναι η αυξημένη τρωτότητα της επιφάνειας του εδάφους στη διάβρωση, κατολισθήσεις και άλλες μορφές εδαφικής κίνησης σε περιοχές εκφόρτισης (Σχ. 4.2).



Σχήμα 4.2: Εδαφικές κινήσεις, λόγω της επίδρασης του νερού.

4.3.3. Μεταφορικές ή κινητικές διαδικασίες

Η μεταφορά νερού στα συστήματα ροής είναι η πλέον θεμελιώδης διαδικασία του υπόγειου νερού. Εκτός από τη λειτουργία του ως μέσο μεταφοράς και τον ενεργητικό ρόλο στο υπεδάφιο περιβάλλον, το νερό αποτελεί επίσης μια συνιστώσα αυτού του περιβάλλοντος. Με τη βοήθεια των συστηματικών δρόμων ροής οι υδατικές μάζες κατανέμονται ομοιόμορφα σε ένα βαρυντικό πεδίο ροής και έτσι επηρεάζουν τοπικά, διαφοροποιώντας τις συνθήκες υγρασίας, μεταξύ περιοχών εισροών και περιοχών εκροών. Η διαδικασία αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως το υπεδάφιο μέρος του υδρολογικού κύκλου

και ως εκ τούτου ένα βασικό κλειδί στη γεωγραφική κατανομή των σωμάτων νερού, τα χημικά χαρακτηριστικά τους, τον τύπο και το εύρος των διακυμάνσεων της στάθμης του υπόγειου νερού και στις πολλές οικολογικές επιπτώσεις που συνδέονται με αυτές τις συνθήκες.

Η μεταφορά υδατικής και μη υδατικής ύλης από τα υπόγεια συστήματα ροής είναι σημαντική ανάμεσα στις υπεδάφειες γεωλογικές διαδικασίες. Μια μεγάλη ποικιλία ύλης σε διάφορες μορφές μεταφέρεται από την υπόγεια ροή, περιέχοντας υδατικά διαλύματα οργανικών και ανόργανων ιόντων, ύλη σε κολλοειδή μορφή, αιωρούμενους αδρομερείς κόκκους, αέρια σε φυσαλίδες ή εν διαλύσει, υδρογονάνθρακες, ιούς και βακτήρια. Η σημασία της μεταφοράς των υλικών αυτών από το υπόγειο νερό είναι μεγάλη και συμβάλλει στη μετακίνηση ορυκτών από το έδαφος και τα πετρώματα, στη μεταφορά θρεπτικών συστατικών στα επιφανειακά σώματα νερού, στην απόθεση μεταλλικών και μη μεταλλικών ορυκτών και υδρογονανθράκων. Η ροή του υπόγειου νερού συμπαρασύρει το ευδιάλυτο συνδετικό υλικό των πετρωμάτων, ελαττώνοντας τη συνοχή και την ευστάθεια των πρανών.

Η μεταφορά θερμότητας από την κίνηση του υπόγειου νερού είναι μια από τις πλέον ορατές διαδικασίες. Το νερό μπορεί να περιέχει και έτσι μεταφέρει θερμότητα εξαιτίας της ειδικής ικανότητας θερμότητας. Εάν υπάρχει θερμική διαφορά μεταξύ νερού και γειτονικού περιβάλλοντος, τότε μεταφέρεται θερμότητα προς την κατεύθυνση της χαμηλότερης θερμοκρασίας.

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, που περιλαμβάνουν τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του κορεσμένου μέσου, της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ νερού και περιβάλλοντος και την ταχύτητα ροής του υπόγειου νερού. Ο μεγαλύτερος ρυθμός ανταλλαγής θερμότητας σχετίζεται με την ταχύτερη μείωση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ νερού και περιβάλλοντος.

4.4. Υδρογεωλογικό περιβάλλον

Υδρογεωλογικό περιβάλλον (hydrogeologic environment) είναι ένα σύστημα γεωλογικών, κλιματικών και μορφολογικών παραμέτρων, που καθορίζουν τα αρχικά χαρακτηριστικά του καθεστώτος του υπόγειου νερού (groundwater regime) σε μια δοσμένη περιοχή.

Οι έξι (6) κύριοι παράμετροι του καθεστώτος του υπόγειου νερού είναι:

- 1) το περιεχόμενο νερό στα πετρώματα

- 2) η γεωμετρία του συστήματος ροής
- 3) η χημική σύσταση του νερού
- 4) η ειδική παροχή
- 5) η θερμοκρασία
- 6) οι μεταβολές όλων των ανωτέρω παραγόντων με τον χρόνο

Οι παράμετροι του καθεστώτος υπόγειου νερού ελέγχονται από τις τρεις συνιστώσες του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος: γεωλογία- μορφολογία- κλίμα.

Πίν. 4.1: Παράμετροι που καθορίζουν το καθεστώς του υπόγειου νερού.

| <i>Γεωλογία</i> | <i>Μορφολογία</i> | <i>Κλίμα</i> |
|--|---|--|
| Λιθολογικά και στρωματογραφικά χαρακτηριστικά Τεκτονικά στοιχεία (ρηγμάτωση, καρστ, διαρρήξεις κ.λπ.) | Μέγεθος, σχήμα τοπογραφικών εξάρσεων και ταπεινώσεων Γεωμορφικά χαρακτηριστικά | Θερμοκρασία Βροχοπτώσεις Εξάτμιση Υγρασία |

Το κλίμα καθορίζει τις ποσότητες νερού σε μια περιοχή, καθώς και την κατανομή τους στο χρόνο.

Η μορφολογία καθορίζει την ενεργειακή κατάσταση του νερού για κίνηση.

Η γεωλογία καθορίζει τον ρυθμό ροής, τις ποσότητες νερού που αποθηκεύονται στο υπέδαφος και το χημισμό του νερού.

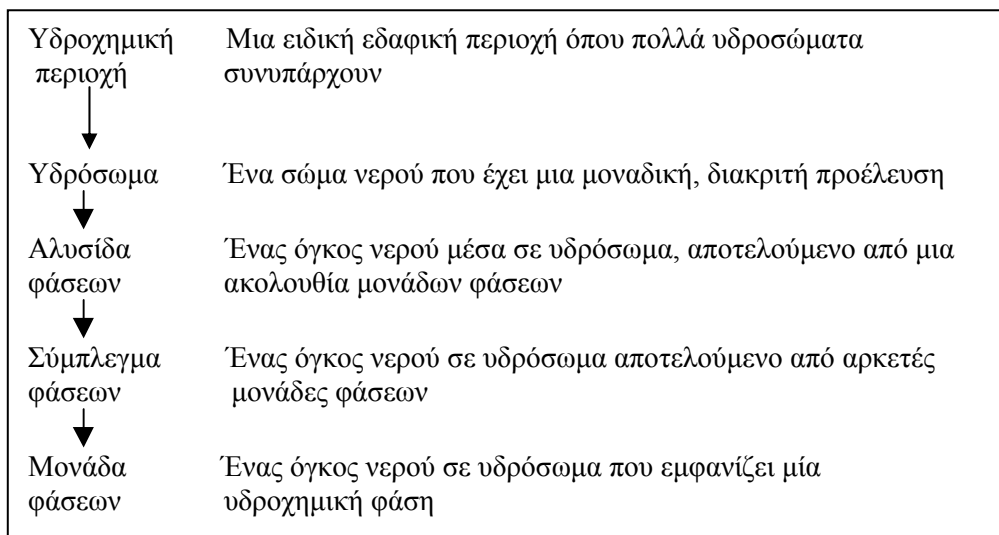
4.5. Υδροχημικές φάσεις

Ένα *υδροχημικό υπόγειο σύστημα* ή *υδρόσωμα* (hydrosome) ορίζεται ως μια μονάδα υπόγειου νερού, τρισδιάστατη, με μια συγκεκριμένη προέλευση.

Σε ένα δοσμένο υδρόσωμα, η χημική σύσταση του νερού ποικίλει στο χώρο και στο χρόνο και αυτό οφείλεται στις αλλαγές του ρυθμού εμπλουτισμού και τις χημικές διαδικασίες μεταξύ νερού και πορώδους μέσου.

Οι διαφορές στο χημικό χαρακτήρα των υπόγειων νερών χρησιμοποιούνται για την υποδιαίρεση ενός υδrosώματος σε χαρακτηριστικές ζώνες ή *υδροχημικές φάσεις* (hydrochemical facies).

Ένα υδρόσωμα μπορεί να αποτελείται από πολλές υδροχημικές φάσεις, που συνιστούν μια αλυσίδα φάσεων (facies chain). Η συνύπαρξη πολλών υδrosωμάτων σε μια ειδική εδαφική περιοχή μπορεί να αποτελέσει μια υδροχημική περιοχή (Σχ. 4.3). Τέτοιες περιοχές είναι: παράκτια πεδία, ηφαιστειακές περιοχές, περιοχές ανθρακικών ιζημάτων, ποτάμια περιβάλλοντα κ.λπ.



Σχήμα 4.3: Διάκριση υδροχημικών συστημάτων.

Ο Shirovalon (1984) αναγνωρίζει τρεις (3) τύπους υδροχημικών ζωνών σε περιφερειακή κλίμακα:

- 1) Οριζόντια ή εγκάρσια ζωνοποίηση, ως αποτέλεσμα των διαδοχικών αλλαγών των κλιματικών ζωνών
- 2) Κατακόρυφη ζωνοποίηση που σχετίζεται με το βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και συνεπώς με τις αλλαγές της κυκλοφορίας του νερού. Στο ανώτερο τμήμα (έντονη κυκλοφορία) το νερό είναι χαμηλής μεταλλικότητας (χαμηλό TDS), στο ενδιάμεσο (λιγότερο έντονη κυκλοφορία νερού) όπου το νερό έχει μεγαλύτερο TDS και είναι θειικό και στο κατώτερο τμήμα (σχεδόν στάσιμο) όπου η μεταλλικότητα του νερού είναι μεγάλη και η υδροχημική φάση χλωριούχα.
- 3) Υψομετρική ζωνοποίηση που σχετίζεται με το ύψος της επιφάνειας του εδάφους από το επίπεδο της θάλασσας.

Γενικά παρατηρείται μια βαθμιαία αύξηση της μεταλλικότητας του υπόγειου νερού στην κατεύθυνση:

- A) Από μεγάλα σε μικρά γεωγραφικά πλάτη, λόγω των μεγαλύτερων απωλειών εξατμισοδιαπνοής και της μεγαλύτερης παραγωγής CO₂.
- B) Από μικρά σε μεγαλύτερα βάθη, λόγω της μειούμενης κυκλοφορίας υπόγειου νερού και της αυξανόμενης αλληλεπίδρασης νερού-εδάφους.
- Γ) Από υψηλά σε χαμηλά υψόμετρα, λόγω μείωσης των βροχοπτώσεων, μεγαλύτερων απωλειών εξατμισοδιαπνοής και της μεγαλύτερης παραγωγής CO₂.

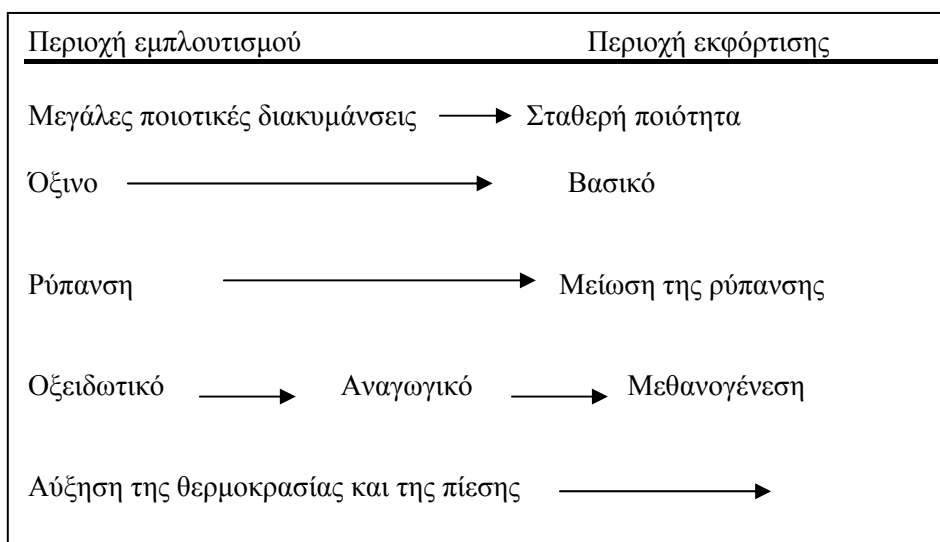
Το ανωτέρω γενικό σχέδιο μπορεί να τροποποιηθεί, ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες μιας περιοχής. Κατά κανόνα οι συγκεντρώσεις SO_4^{2-} και Cl^- αυξάνουν από τις περιοχές τροφοδοσίας, όπου επικρατούν τα HCO_3^- ιόντα, προς τα κατάντι.

Η κανονική υδροχημική εξέλιξη ενός υδροσώματος *κατά τη διεύθυνση της υπόγειας ροής* ακολουθεί τα κάτωθι βήματα (Stuyfzand, 1999):

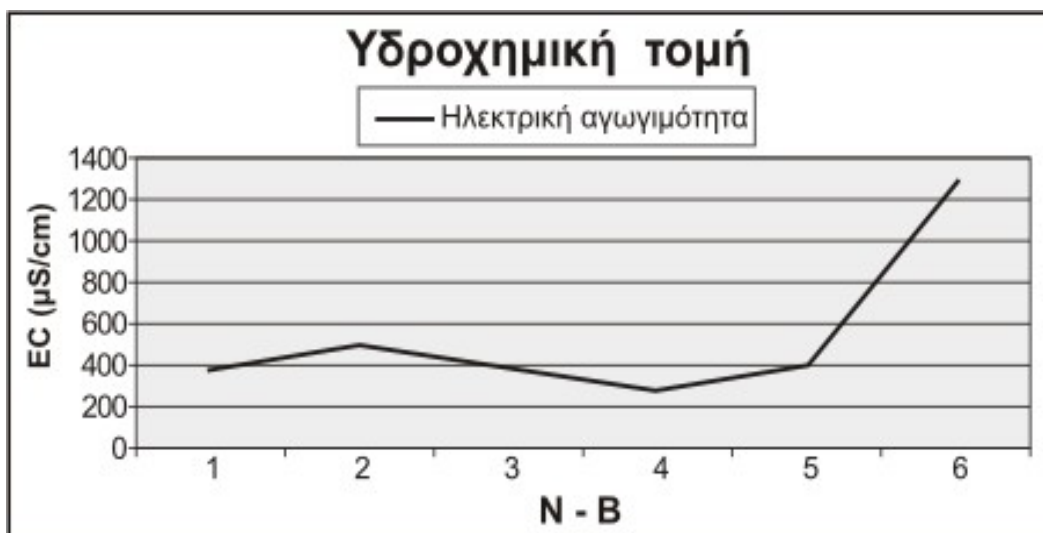
1. Από μεγάλες διακυμάνσεις της ποιότητας προκαλούμενες κυρίως από κυκλικές ατμοσφαιρικές και βιολογικές αλλαγές σε σχετικά σταθερή ποιότητα, λόγω της κατακόρυφης και της εγκάρσιας διασποράς του υπόγειου νερού.
2. Από ρυπασμένο με βαρέα μέταλλα κ.ά. σε μη ρυπασμένο, λόγω διαδικασιών εξασθένησης όπως: φιλτράρισμα, διάσπαση, προσρόφηση κ.λπ., καθώς και λόγω της αυξανόμενης ηλικίας του νερού που συμβάλλει στη μείωση του ρυπαντικού φορτίου (Edmunds et al., 1982).
3. Από όξινο σε βασικό, λόγω των αντιδράσεων αποσάθρωσης κατά τις οποίες καταναλώνονται οξέα, όπως H_2CO_3 , H_2SO_4 και HNO_3 (Eriksson, 1987).
4. Από φρέσκα σε υφάλμυρα και θαλασσινά νερά, λόγω υδροδυναμικής διάχυσης διαμέσου των ορίων με γειτονικά θαλάσσια υδροσώματα ή λόγω συνεχούς εξατμισοδιαπνοής.
5. Από οξειδωτικές σε αναγωγικές και συνθήκες μεθανογένεσης, λόγω οξείδωσης της οργανικής ύλης.
6. Από ισορροπία ανταλλαγής μεταξύ νερού και πορώδους μέσου σε ιοντοανταλλαγή, π.χ. κατά τη διείδυση θαλασσινού νερού σε παράκτιο υδροφόρο.
7. Από χαμηλές σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες. Αύξηση της θερμοκρασίας και πίεσης μπορεί να οδηγήσει σε εξάντληση του K^+ και Mg^{2+} , λόγω ανακρυστάλλωσης και σε αύξηση της ολικής αλατότητας, λόγω της μείωσης της ικανότητας κατιο-ανταλλαγής (Schoeller, 1955).

Στο Σχήμα 4.4 φαίνεται παραστατικά η υδροχημική εξέλιξη ενός υδροσώματος κατά τη διεύθυνση ροής του υπόγειου νερού.

Στο Σχ. 4.5 φαίνεται η υδροχημική τομή κατά τη διεύθυνση N-B του Νομού Κορινθίας, απ' όπου προκύπτει η μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας από περιοχές εμπλουτισμού (χαμηλές τιμές) σε περιοχές εκφόρτισης (υψηλές τιμές).



Σχήμα 4.4: Κανονική υδροχημική εξέλιξη ενός υδροσώματος κατά τη διεύθυνση ροής του υπόγειου νερού (Stuyfzand, 1999 με τροποποιήσεις).



Σχήμα 4.5: Διακύμανση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας από περιοχές εμπλουτισμού σε περιοχές εκφόρτισης (διεύθυνση N-B) στο Νομό Κορινθίας.

Ερωτήσεις

- 4.1. Τι είναι σύστημα υπόγειας ροής;
- 4.2. Ποια είναι τα τυπικά περιβαλλοντικά αποτελέσματα που προέρχονται από την κίνηση του υπόγειου νερού;
- 4.3. Ποιοι είναι οι κύριοι τύποι αλληλεπίδρασης μεταξύ υπόγειων νερών και περιβάλλοντος;
- 4.4. Τι είναι ιοντοανταλλαγή; Ποιος είναι ο ρόλος της στη διαμόρφωση της ποιότητας

των υπόγειων νερών στους παράκτιους υδροφόρους;

4.5. Τι είναι υδρογεωλογικό περιβάλλον;

4.6. Τι είναι υδρόσωμα και τι υδροχημικές φάσεις;

4.7. Ποια είναι η εξέλιξη ενός υδροσώματος κατά τη διεύθυνση της υπόγειας ροής;