

Χημεία του περιβάλλοντος
της επιφάνειας της Γης



1. Πετρώματα και ορυκτά

Οι διεργασίες της αποσάθρωσης δρουν στα πετρώματα του φλοιού της γης που είναι εκτεθειμένα στην επιφάνεια, επιφέροντας αλλαγές στη δομή και στα χαρακτηριστικά τους. Αυτές οι διεργασίες μπορεί να είναι φυσικές, χημικές ή βιολογικές και τα προϊόντα της αποσάθρωσης μπορεί να είναι καινούργια ορυκτά, αλλοιωμένα ορυκτά ή ευδιάλυτα συστατικά που απελευθερώνονται στο περιβάλλον.

Οι κυρίαρχοι τύποι ορυκτών σε αυτά τα πετρώματα είναι τα πυριτικά, που χαρακτηρίζουν επίσης και τα περισσότερα εδάφη. Στον Πίνακα 1.1 δίνονται τα χημικά στοιχεία στον φλοιό της γης που έχουν μια μέση συγκέντρωση μεγαλύτερη από 1%, μαζί με την αντίστοιχη περιεκτικότητά τους στα εδάφη. Οι συντελεστές εμπλουτισμού, περίπου 1 για τα O, Si και Al δείχνουν τη σημασία των αργιλλοπυριτικών ορυκτών στο έδαφος. Τιμές <1 δείχνουν απώλεια αυτών των στοιχείων από το έδαφος σαν αποτέλεσμα της αποσάθρωσης.

Πίνακας 1.1 Μέσες συγκεντρώσεις των στοιχείων στο φλοιό της Γης και στα εδάφη και ο συντελεστής εμπλουτισμού τους στο έδαφος (αναλογία εδάφους:φλοιού).

Στοιχείο	Μέση συγκέντρωση στο φλοιό (%)*	Μέση συγκέντρωση στο έδαφος (%)*	Αναλογία εδάφους:φλοιός
Οξυγόνο	46,5	49	1,05
Πυρίτιο	27,8	32	1,16
Αργίλιο	8,1	7,1	0,88
Σίδηρος	5,1	3,8	0,75
Ασβέστιο	3,6	1,4	0,39
Νάτριο	2,8	0,6	0,21
Κάλιο	2,6	0,8	0,31
Μαγνήσιο	2,1	0,5	0,24

*Τιμές από W.L. Lindsay (1979) *Soil Chemical Equilibria*, σελ. 7-8. John Wiley & Sons, New York.

Τα πετρώματα ταξινομούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες: πυριγενή, ιζηματογενή και μεταμορφωμένα.

Τα **πυριγενή πετρώματα** σχηματίζονται από το μάγμα μέσα στο φλοιό της γης και περιέχουν κρυστάλλους. Τα *ηφαιστειακά* πετρώματα σχηματίζονται όταν το μάγμα εξέρχεται γρήγορα στην επιφάνεια και ψύχεται, δίνοντας ένα λεπτόκοκκο υλικό (π.χ. ανδεσίτης, βασάλτης, ρυόλιθος). Τα *πλουτωνικά* πετρώματα ψύχονται αργά καθ' οδόν προς την επιφάνεια και είναι αδρόκοκκα (π.χ. γάββρος, γρανίτης).

Τα **ιζηματογενή πετρώματα** σχηματίζονται από τα προϊόντα αποσάθρωσης άλλων πετρωμάτων ή από βιογενείς διεργασίες. Παραδείγματα αποτελούν ο ψαμμίτης (χαλαζιακή άμμος), ο αργιλικός σχιστόλιθος και ο πηλόλιθος (άργιλοι), ο ασβεστόλιθος (ανθρακικό ασβέστιο, βιολογικής προέλευσης από κελύφη και σκελετούς θαλάσσιων οργανισμών), τα κροκαλοπαγή (κροκάλες ποικίλης ορυκτολογικής σύστασης). Σε κάθε περίπτωση τα συστατικά αποτέθηκαν με την ιζηματογένεση και με την πάροδο του χρόνου συμπαγοποιήθηκαν για να σχηματίσουν πέτρωμα.

Τα **μεταμορφωμένα πετρώματα** σχηματίζονται από ανακρυστάλλωση σαν αποτέλεσμα υψηλών θερμοκρασιών ή/και υψηλών πιέσεων που έδρασαν σε πυριγενή ή ιζηματογενή πετρώματα. Αυτά είναι πιο ανθεκτικά στην αποσάθρωση πετρώματα. Παραδείγματος χάριν, ο χαλαζίτης σχηματίζεται από τον ψαμμίτη, ο σχιστόλιθος από τον αργιλικό σχιστόλιθο και τον πηλόλιθο, το μάρμαρο από τον ασβεστόλιθο.

Τα **μη-συμπαγοποιημένα υλικά** είναι μερικώς αποσασθρωμένα πετρώματα που έχουν μεταφερθεί με διάφορους τρόπους και έχουν αποθεθεί στην επιφάνεια της γης. Οι πιο σημαντικές ομάδες είναι:

- Παγετώδεις αποθέσεις, προερχόμενες από τη δράση των πάγων
- Αλλουβιακές αποθέσεις από το νερό
- Αιολικές αποθέσεις από τη δράση του ανέμου

Τα πετρώματα από τα οποία προέρχονται καθορίζουν και τη σύστασή τους καθώς και τα χαρακτηριστικά τους.

Πρωτογενή πυριτικά ορυκτά

Τα *πρωτογενή ορυκτά* που απαντούν στην επιφάνεια της γης είναι εκείνα που επιβιώνουν από τη διάβρωση των πετρωμάτων και των μη συμπαγοποιημένων υλικών, συνεχίζοντας να υπάρχουν σε μια σχετικά αμετάβλητη μορφή. Διακρίνονται από τα *δευτερογενή ορυκτά*, τα οποία σχηματίζονται με διάφορες επιφανειακές χημικές διεργασίες. Τα περισσότερα πρωτογενή ορυκτά είναι πυριτικές ενώσεις (Πίνακας 1.2.) με βάση το τετράεδρο SiO_4^{4-} (Σχήμα 3.1.), αλλά σε μερικές περιπτώσεις το άτομο του πυριτίου μπορεί να αντικατασταθεί από το αργίλιο με τη διαδικασία της *ισόμορφης αντικατάστασης* (βλ.

Κεφάλαιο 3), προκαλώντας μια διαταραχή της ισορροπίας του σθένους, το οποίο εξουδετερώνεται από κατιόντα, όπως K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} και Fe^{2+} .

Τα τετράεδρα του πυριτίου συνδέονται μεταξύ τους με κοινά άτομα οξυγόνου σχηματίζοντας διαφορετικές δομές πυριτικών ενώσεων με διαφορετική αντοχή στη διάβρωση:

- Στις *τεκτοπυριτικές δομές* κάθε τετράεδρο SiO_4 μοιράζεται όλα του τα οξυγόνα με γειτονικά τετράεδρα. Αυτή η διάταξη παρατηρείται σε όλες τις μορφές του διοξειδίου του πυριτίου (χαλαζίας, τριδυμίτης, χριστοβαλίτης), στους αστρίους και τους ζεόλιθους. Η βασική μονάδα της δομής αυτής είναι το $(SiO_2)_0^0$.
- Οι *φυλλοπυριτικές δομές*, όπως οι μαρμαρυγίες, σχηματίζονται από τετράεδρα πυριτίου που μοιράζονται τρία οξυγόνα με γειτονικά τετράεδρα. Η βασική μονάδα της δομής αυτής είναι το $(Si_2O_5)^{2-}$.
- Οι *ινοπυριτικές δομές* αποτελούνται από τετράεδρα ενωμένα σε ατέρμονες αλυσίδες. Τέτοια διάταξη έχουν οι αμφίβολοι, με διπλές αλυσίδες τετραέδρων που μοιράζονται δύο ή τρία άτομα οξυγόνου, και οι πυρόξενοι, με απλές αλυσίδες τετραέδρων τα οποία μοιράζονται δύο άτομα οξυγόνου. Η βασική μονάδα είναι το $(Si_4O_{11})^{6-}$ για τις διπλές αλυσίδες και το $(SiO_3)^{2-}$ για τις απλές αλυσίδες.
- Οι *νησοπυριτικές δομές* (ή ορθοπυριτικά), όπως ο ολιβίνης, αποτελούνται από μεμονωμένα τετράεδρα πυριτίου. Η βασική μονάδα της δομής αυτής είναι το $(SiO_4)^{4-}$.

Όσο κατεβαίνουμε στον κατάλογο του Πίνακα 1.2., οι πυριτικές ενώσεις διαβρώνονται ευκολότερα, δεδομένου ότι λιγότεροι δεσμοί Si-O πρέπει να σπάσουν για να απελευθερώσουν το πυριτικό άλας. Ο χαλαζίας και οι άστριοι ειδικά, καθώς και ο μωσχοβίτης στις εύκρατες περιοχές, είναι συνήθη ορυκτά του αδρομερούς κοκκομετρικού κλάσματος (0,002-2 mm) πολλών εδαφών και ιζημάτων (βλ. Κεφάλαιο 16). Ο βιοτίτης (ο πιο συνηθισμένος μαρμαρυγίας των πυριγενών πετρωμάτων), οι αμφίβολοι, οι πυρόξενοι και ο ολιβίνης είναι πολύ ευκολότερο να αποσπασθούν. Αυτά τα ορυκτά περιέχουν μεγάλες ποσότητες Fe και Mg έναντι του χαλαζία, των αστρίων και του μωσχοβίτη και είναι γνωστά ως *σιδηρομαγνησιούχα ορυκτά*.

Μη-πυριτικά ορυκτά

Παραδείγματα σημαντικών μη-πυριτικών ορυκτών δίνονται στον Πίνακα 1.3.

Δευτερογενή ορυκτά

Τα δευτερογενή ορυκτά σχηματίζονται από την αλλοίωση ενός πρωτογενούς ορυκτού ή από την αντίδραση μεταξύ διαλυτών συστατικών που απελευθερώνονται από ένα πρωτογενές ορυκτό, τα οποία αντιδρούν μεταξύ τους προς σχηματισμό ενός νέου ορυκτού. Οι κύριοι τύποι δευτερογενών ορυκτών είναι τα αργιλοπυριτικά ορυκτά της αργίλου, τα ένυδρα οξειδία και τα χωρίς ταξινομημένη διάταξη (άμορφα) αργιλοπυριτικά. Οι πρώτες δύο ομάδες ορυκτών εξετάζονται χωριστά στα Κεφάλαια 3 και 4.

Τα άμορφα αργιλοπυριτικά έχουν μελετηθεί λιγότερο από τα υπόλοιπα δευτερογενή ορυκτά. Έχουν μικρό μέγεθος κόκκων χωρίς συγκεκριμένη κρυσταλλική δομή και πολύ μεγάλο εμβαδόν επιφάνειας, που τα καθιστά ιδιαίτερα δραστικά. Έχουν και σταθερό αρνητικό σθένος, που προκύπτει από την ισόμορφη αντικατάσταση στα τετραεδρικά φύλλα του Si, και μεταβλητό σθένος, εξαρτώμενο από το pH, παρόμοιο με εκείνο που εμφανίζεται στις ακμές της αργίλου και στις επιφάνειες των ένυδρων οξειδίων. Τα δύο κύρια ορυκτά αυτής της ομάδας, αλλοφανής και ιμογκολίτης, βρίσκονται στα πιο πρόσφατα εδάφη και στα εδάφη ηφαιστειακής προέλευσης.

Πίνακας 1.2 Δομές των συνηθισμένων πρωτογενών πυριτικών ορυκτών.

Χαλαζίας	SiO_2
Άστριοι	
Μικροκλινής	$KAlSi_3O_8$
Αλβίτης	$NaAlSi_3O_8$
Ανορθίτης	$CaAlSi_2O_8$
Μαρμαρυγίες	
Μωσχοβίτης	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$
Βιοτίτης	$K(Mg, Fe)_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$
Αμφίβολοι	
Κεροστίλβη	$(Na, Ca)_2(Mg, Fe, Al)_5(Si, Al)_8O_{22}(OH)_2$
Πυρόξενοι	
Ενστατίτης	$MgSiO_3$
Αυγίτης	$Ca(Mg, Fe, Al)(Si, Al)_2O_6$
Ολιβίνης	$(Mg, Fe)_2SiO_4$

Πίνακας 1.3 Δομές μερικών συνηθισμένων μη-πυριτικών ορυκτών.

Ανθρακικά	
Ασβεστίτης	$CaCO_3$
Δολομίτης	$MgCO_3 \cdot CaCO_3$
Σουλφίδια (θειούχα)	
Σιδηροπυρίτης	FeS_2
Γαληνίτης	PbS
Σφαλερίτης	ZnS
Οξειδία	
Χαλαζίας	SiO_2
Αιματίτης	Fe_2O_3
Ρουτίλιο	TiO_2
Φωσφορικά	
Απατίτης	$Ca_5(PO_4)_3(OH)$
Θειικά (ανυδρίτης)	
Γύψος	$CaSO_4$
Βαρύτης	$BaSO_4$
Αλίδια (αλογονούχα)	
Αλίτης	$NaCl$
Φθορίτης	CaF_2

2. Διεργασίες αποσάθρωσης

Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε πετρώματα και ορυκτά και επιφέρουν αλλαγές στη σύσταση και στα χαρακτηριστικά τους είναι ευρέως γνωστές ως αποσάθρωση. Οι διεργασίες αποσάθρωσης μπορεί να είναι φυσικές, χημικές ή βιολογικές.

Φυσική αποσάθρωση

Αρχικά, επικρατεί η φυσική διάβρωση (αποσάθρωση) προκαλώντας κατακερματισμό του πετρώματος με μείωση του κοκκομετρικού μεγέθους και αύξηση του εμβαδού επιφάνειας, χωρίς καμμία χημική αλλαγή. Η αποσάθρωση προκαλείται από διάφορες αιτίες:

- Τριβή του πετρώματος λόγω της επίδρασης του πάγου, του νερού και του αέρα, που οδηγεί σε φυσική διάσπαση (θραύση).
- Η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας και οι κύκλοι "σχηματισμός-τήξη" του πάγου δημιουργούν σημαντικές πιέσεις, οι οποίες προκαλούν τη διάσπαση των πετρωμάτων κατά μήκος των γραμμών αδυναμίας.
- Η κρυστάλλωση ορισμένων αλάτων προκαλεί διόγκωση στις ρωγμές και στις σχισμές, ασκώντας πίεση στο πέτρωμα.
- Οι ρίζες των φυτών έχουν την τάση να διεισδύουν στις υπάρχουσες σχισμές και στα κανάλια των πετρωμάτων και μπορούν έτσι να ασκήσουν σημαντική πίεση.

Το σημείο-κλειδί της φυσικής αποσάθρωσης είναι ότι αυξάνει το εμβαδόν της επιφάνειας του πετρώματος που είναι διαθέσιμη για επίθεση από διάφορες χημικές και βιολογικές διεργασίες αποσάθρωσης.

Μεταφορά των μερικώς αποσαθρωμένων πετρωμάτων

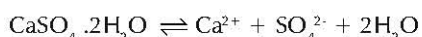
Μερικώς αποσαθρωμένα πετρώματα που θραύστηκαν από φυσικές διεργασίες αποσαθρώνονται περαιτέρω με χημικές διεργασίες *in situ* ή μπορούν να μεταφερθούν με διάφορα μέσα και να αποτεθούν αλλού. Τα κυριότερα μέσα μεταφοράς φαίνονται στον Πίνακα 2.1

Χημική αποσάθρωση

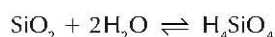
Πρόκειται για την αντίδραση μεταξύ των φυσικών νερών και των ορυκτών των πετρωμάτων που προκαλεί μερική ή πλήρη διάλυση του πετρώματος και το σχηματισμό ενός νέου ορυκτού. Διακρίνουμε διάφορους τύπους αντιδράσεων:

Διάλυση - Τα διαλυτά ορυκτά διαλύονται στο νερό

Ορυκτά, όπως η γύψος ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), είναι ιδιαίτερα διαλυτά και για το λόγο αυτό παραμένουν μόνο στις ξηρές και ημιάγονες περιοχές, όπου η ύπαρξη νερού είναι περιορισμένη. Στις εύκρατες και στις τροπικές περιοχές υπάρχει αρκετό νερό για να προκαλέσει τη διάλυση και την απώλεια της γύψου:



Ο χαλαζίας είναι πολύ λιγότερο διαλυτός από τη γύψο, αλλά ακόμη και αυτός είναι ένα ελαφρώς διαλυτό ορυκτό:



Η παραπάνω αντίδραση χαρακτηρίζεται από την απώλεια του διαλυτού πυριτικού οξέος. Στις εύκρατες περιοχές, υπάρχει ανεπάρκεια νερού και, δεδομένου ότι η αποσάθρωση έχει προχωρήσει κατά τη διάρκεια ενός σχετικά σύντομου χρόνου από την τελευταία εποχή των παγετώνων, δεν έχει προκληθεί σημαντική απώλεια πυριτίου, έτσι ο χαλαζίας είναι το κυρίαρχο ορυκτό στο αδρομερές κλάσμα πολλών εδαφών. Αντίθετα, στις υγρές τροπικές περιοχές, ο κατά πολύ μεγαλύτερος όγκος νερού που περνά μέσα από έδαφος για πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και η υψηλότερη θερμοκρασία έχουν προκαλέσει σημαντική, αν όχι ολοκληρωτική, απώλεια του πυριτίου.

Πίνακας 2.1 Διεργασίες μεταφοράς αποσαθρωμένων πετρωμάτων.

Πάγος	
Παγετώδης σιβάδα	Μετακίνηση και απόθεση από παγετώνες
Τριβή	Λείανση από παγετώνες, περιέχει γωνιώδεις πέτρες
Ποταμο-παγετώδης απόθεση	Απόθεση από τηγμένο νερό πάγου με πέτρες ταξινομημένες ως ένα βαθμό και στρογγυλεμένες από τη δράση νερού
Νερό	
Αλλουβιακές αποθέσεις	Αποθέσεις από ρέον νερό σε ρυάκια και ποτάμια με ταξινόμηση κοκκομετρίας και πυκνότητας, περιέχει στρογγυλεμένες πέτρες
Λιμναίες αποθέσεις	Ιζήματα αποτεθημένα σε λιμναία νερά
Παράλιες αποθέσεις	Αποθέσεις από τη δράση κυμάτων, συνήθως άμμοι
Άνεμος	Αιολικές αποθέσεις, π.χ. άμμοι ερήμων, loess (αιολικός σχηματισμός)
Βαρύτητα	
Κολλουβιακές αποθέσεις	Υλικά αποτεθημένα στη βάση πλαγιών - από υγρό χώμα που γλιστρά πάνω σε παγωμένο υπόβαθρο - κατωφέρεια ή αργή κίνηση εδάφους σε μια κατωφέρεια

