

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



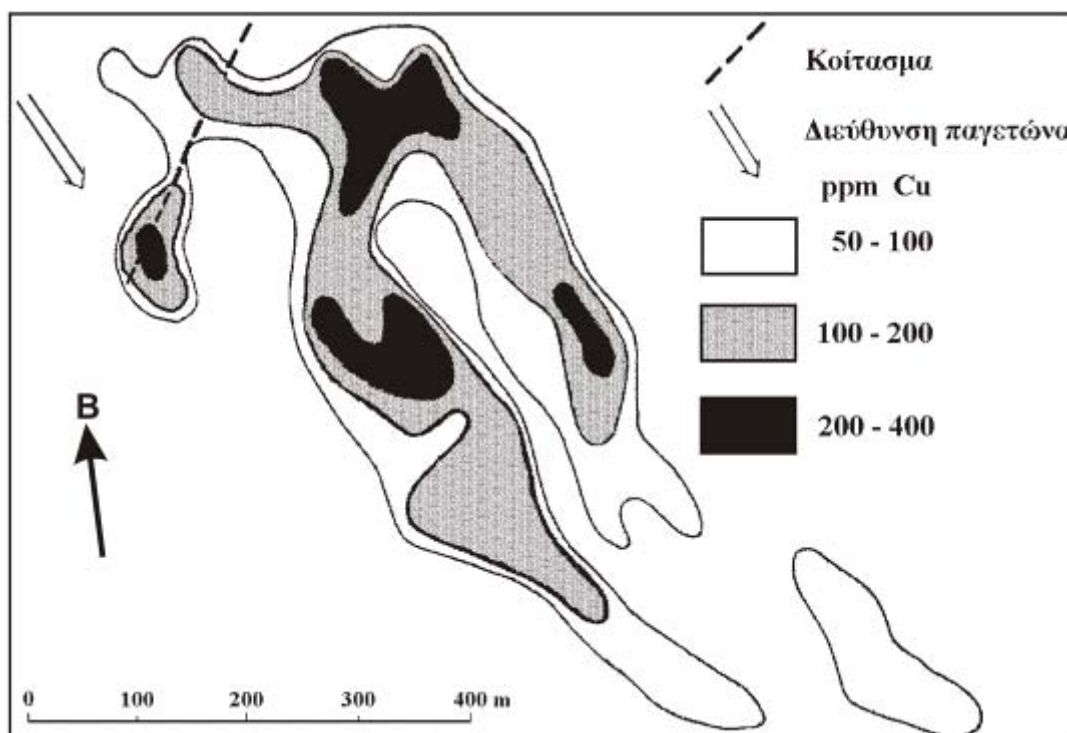
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ



ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

Τομέας Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας

ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ



Ανέστης Α. Φιλιππίδης
Καθηγητής Ορυκτολογίας-Κοιτασματολογίας

Βασίλης Ι. Μέλφος
Λέκτορας Κοιτασματολογίας-Γεωχημείας

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
1. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΧΗΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΟ ΣΥΜΠΑΝ.....	4
1.1. Σύμπαν - Κοσμική Ύλη.....	4
1.2. Ηλιακό Σύστημα.....	5
1.2.1. Ο Ήλιος.....	5
1.2.2. Οι πλανήτες.....	7
1.3. Σελήνη.....	10
1.4. Μετεωρίτες.....	13
1.4.1. Ταξινόμηση, ορυκτολογία και χημική σύσταση των μετεωριτών.....	14
1.4.2. Προέλευση των ευγενών μετάλλων από «βομβαρδισμό» μετεωριτών.....	17
2. ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΗΣ.....	19
2.1. Δομή και σύσταση του φλοιού.....	21
2.1.1. Δομή του φλοιού.....	22
2.1.2. Σύσταση του φλοιού.....	22
2.2. Δομή και σύσταση του μανδύα.....	25
2.2.1. Μέθοδοι εκτίμησης της χημικής σύστασης του μανδύα.....	26
2.2.2. Σύσταση του ανώτερου μανδύα.....	28
2.2.3. Σύσταση της μεταβατικής ζώνης.....	28
2.2.4. Σύσταση του κατώτερου μανδύα.....	29
2.3. Σύσταση του πυρήνα.....	29
3. ΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	31
4. ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ.....	33
4.1. Εισαγωγή.....	33
4.2. Γεωχημικός κύκλος (πρωτογενές και δευτερογενές περιβάλλον).....	34
4.3. Στοιχεία δείκτες.....	35
4.4. Γεωχημεία πετρωμάτων.....	37
4.5. Γεωχημεία εδαφών.....	39
4.6. Γεωχημεία ποτάμιων ίζημάτων.....	41
4.7. Γεωχημεία υδάτων.....	43
4.8. Γεωχημεία βλάστησης.....	45
4.9. Γεωχημεία αερίων.....	48
4.10. Αναζήτηση υδρογονανθράκων.....	49
5. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ.....	50
5.1. Εισαγωγή.....	50
5.2. Μεταλλεύματα και περιβάλλον.....	50
5.2.1. Όξινη απορροή μεταλλείων.....	50
5.2.2. Διαχείριση στερεών αποβλήτων.....	54
5.2.3. Εκτροπή επιφανειακών υδάτων.....	54
5.2.4. Μέθοδοι εκμετάλλευσης.....	55
5.2.5. Έλεγχος ποιότητας επιφανειακών και υπόγειων υδάτων.....	55
5.2.6. Διαχείριση υγρών αποβλήτων.....	56
5.2.7. Μεταλλεύματα χρυσού και περιβάλλον.....	56
5.2.8. Η περίπτωση της μονάδας χρυσού Χαλκιδικής.....	57
5.3. Ενεργειακές πρώτες ύλες και περιβάλλον.....	59
5.3.1 Εισαγωγή.....	59

5.3.2. Άνθρακες.....	59
5.3.3. Πετρέλαιο και φυσικό αέριο	62
5.3.4. Μη ανανεώσιμα καύσιμα και όξινη βροχή.....	63
5.3.5. Πυρηνική ενέργεια.....	64
5.3.6 Ανανεώσιμες και ήπιες πηγές ενέργειας.....	65
5.4. Ιχνοστοιχεία και περιβάλλον	66
5.4.1. Επιπτώσεις και μέτρα προστασίας.....	66
5.4.2. Γεωχημική έρευνα και προστασία του περιβάλλοντος.....	69
5.5. Περιβαλλοντικές χρήσεις βιομηχανικών ορυκτών και πετρωμάτων.....	70
5.5.1. Εισαγωγή	70
5.5.2. Υλικά καθαρισμού λυμάτων και υγρών αποβλήτων	73
5.5.3. Ζωοτροφές	77
5.5.4. Βελτιωτικά εδαφών και υποστρωμάτων	77
5.5.5. Εξυγίανση και οξυγόνωση υδάτινων οικοσυστημάτων.....	79
5.5.6. Βελτίωση ποιότητας πόσιμου νερού.....	82
5.5.7. Απορροφητικά, αποξηραντικά και στεγανά υλικά	83
5.5.8. Εμπλουτισμός οξυγόνου και καταπολέμηση της δυσσομίας.....	83
5.5.9. Εξόρυξη μεταλλευμάτων και μεταλλουργία.....	85
5.5.10. Ιατρική και φαρμακευτική	85
6. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑ	87
6.1. Εισαγωγή	87
6.2. Αμίαντος	87
6.3. Επιδράσεις στην υγεία από σκόνη ορυκτών	88
7. ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	90
7.1. Περιβαλλοντικές μελέτες.....	90
7.2. Ορυκτές πρώτες ύλες και μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων.....	90
7.3. Εθνική και Ευρωπαϊκή περιβαλλοντική νομοθεσία	93
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	95

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Γεωχημεία αποτελεί έναν σημαντικό κλάδο των Γεωεπιστημών που ασχολείται με τις χημικές διεργασίες στη λιθόσφαιρα, στο μανδύα, στον πυρήνα, καθώς και στην επιφάνεια (έδαφος, υδρόσφαιρα, ατμόσφαιρα) του πλανήτη Γη. Ο κύριος στόχος της γεωχημικής έρευνας είναι η μελέτη της κατανομής και μετακίνησης των χημικών στοιχείων στο χώρο και στο χρόνο. Κάθε πέτρωμα, είτε βρίσκεται στην επιφάνεια της Γης είτε στο εσωτερικό της, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα χημικό σύστημα στο οποίο προκαλούνται ποικίλες χημικές μεταβολές από διάφορους παράγοντες. Κάθε τέτοια μεταβολή προκαλεί διαταραχή της χημικής ισορροπίας, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα νέο σύστημα, το οποίο, υπό τις νέες συνθήκες, είναι σταθερό. Η μελέτη αυτών των μεταβολών είναι το κύριο αντικείμενο της γεωχημείας.

Σύμφωνα με τον V.M. Goldschmidt (1929), ενός από τους θεμελιωτές της γεωχημικής έρευνας, «ο πρωταρχικός σκοπός της γεωχημείας είναι αφενός να καθορίσει ποσοτικά τη χημική σύσταση της Γης, και αφετέρου να ανακαλύψει τους νόμους που ελέγχουν τη διασπορά των χημικών στοιχείων».

Για την επίλυση αυτών των προβλημάτων ο γεωχημικός έχει στη διάθεσή του έναν σημαντικό όγκο αναλυτικών δεδομένων από υλικά που βρίσκονται στη Γη, όπως ορυκτά, πετρώματα, ύδατα και ατμόσφαιρα. Χρησιμοποιεί επίσης αναλύσεις από μετεωρίτες, αστροφυσικά δεδομένα σχετικά με τη σύσταση άλλων ουρανίων σωμάτων, καθώς και γεωφυσικά δεδομένα σχετικά με τη φύση του εσωτερικού της Γης. Σημαντικές πληροφορίες προέρχονται και από την πειραματική σύνθεση στο εργαστήριο διαφόρων ορυκτών και τη διερεύνηση του τρόπου σχηματισμού τους για να εξακριβωθούν οι συνθήκες σταθερότητάς τους κάτω από ακραίες συνθήκες θερμοκρασιών και πιέσεων.

Η επιστήμη της γεωχημείας αναπτύσσεται ραγδαία κατά τις τελευταίες δεκαετίες, παρόλο που ο όρος «γεωχημεία» έχει εισαχθεί από τον Ελβετό χημικό Schonbein ήδη από το 1838. Ο κύριος λόγος αυτής της εξέλιξης είναι η βελτίωση των αναλυτικών μεθόδων που επιτρέπει να πραγματοποιούνται χημικές αναλύσεις σχεδόν σε όλα τα χημικά στοιχεία γρήγορα, οικονομικά και με πολύ μεγάλη ακρίβεια που φθάνει τα λίγα ppb (parts per billion).

Στο εγχειρίδιο αυτό γίνεται προσπάθεια σύντομης κάλυψης των θεωριών και τάσεων της σύγχρονης γεωχημείας. Επιχειρείται η κάλυψη των βασικών θεμάτων της γενικής γεωχημείας, αλλά και των πρακτικών και εφαρμοσμένων κλάδων της γεωχημείας, όπως εφαρμοσμένη και περιβαλλοντική γεωχημεία καθώς και η γεωχημική νομοθεσία που αφορά το περιβάλλον.

1. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΧΗΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΟ ΣΥΜΠΑΝ

1.1. Σύμπαν - Κοσμική Ύλη

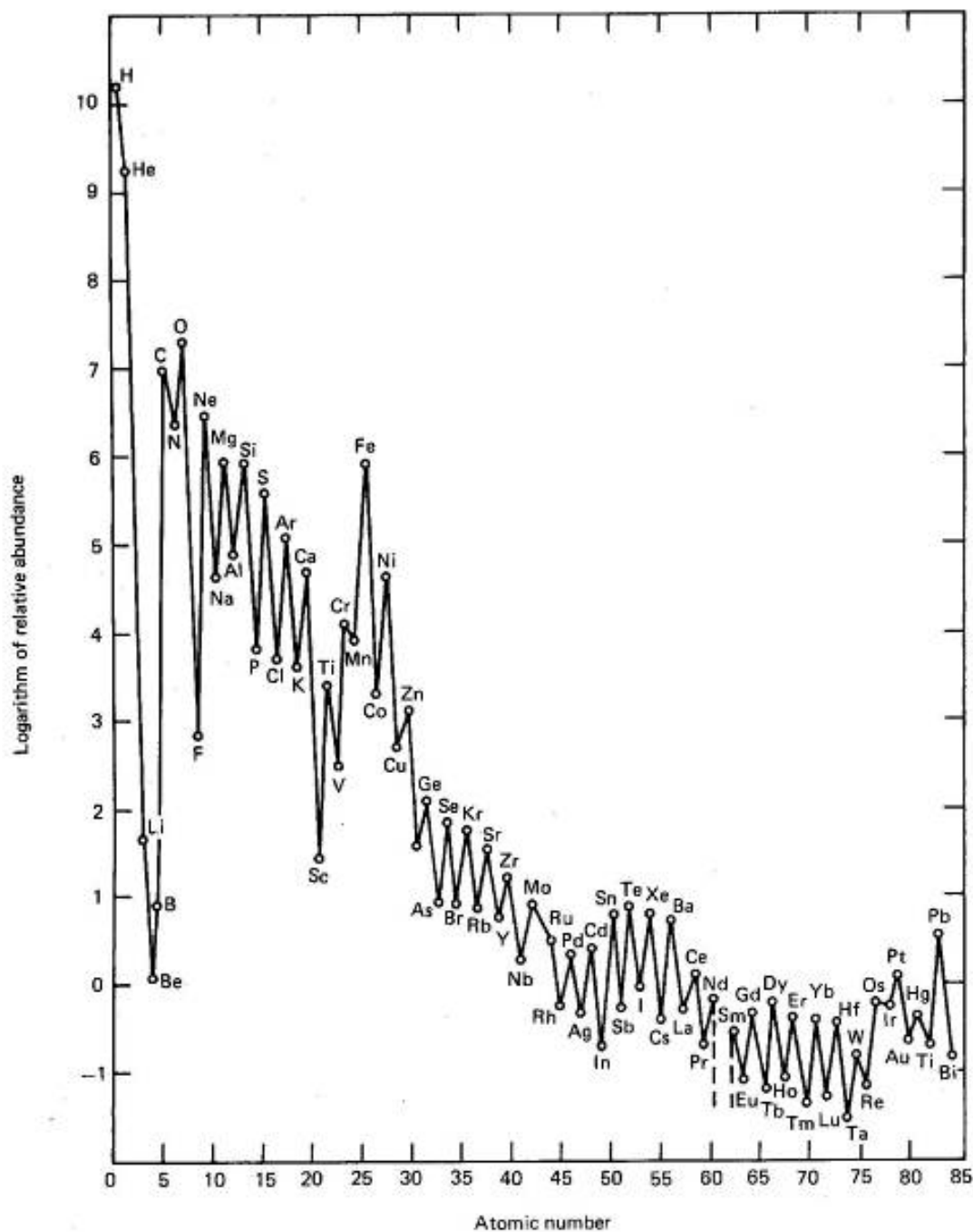
Το Σύμπαν αποτελείται από αστέρες, νεφελώματα, αστεροειδείς, αέρια και κοσμική σκόνη. Η κατανομή των στοιχείων στο Σύμπαν υπολογίζεται: α) από τις φασματοσκοπικές αναλύσεις του φωτός των αστέρων και των νεφελωμάτων και β) από τη σύσταση των μετεωριτών που πέφτουν στη Γη. Σύμφωνα με τον Wedepohl (1971) δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφορές στη χημική σύσταση μεταξύ του Ηλιακού μας συστήματος και του υπόλοιπου Σύμπαντος.

Είναι όμως αποδεκτό ότι τα αποτελέσματα των μεθόδων που προαναφέρθηκαν δεν θεωρούνται ιδιαίτερα αξιόπιστα. Και αυτό γιατί οι περιεκτικότητες για τα ελαφρά στοιχεία που προέρχονται από τις φασματοσκοπικές αναλύσεις του φωτός των αστέρων, δεν είναι ακριβείς, επειδή αντιπροσωπεύουν τη σύσταση των εξωτερικών μόνο ζωνών των αστέρων, η οποία δεν είναι σίγουρο ότι είναι όμοια με την ολική σύστασή τους. Οι περιεκτικότητες για τα βαρύτερα στοιχεία έχουν υπολογιστεί από αναλύσεις κυρίως χονδριτών μετεωριτών που θεωρούνται τμήματα που αποσπάστηκαν από την επιφάνεια των αστέρων. Και στην περίπτωση αυτή τα αποτελέσματα είναι υπό συζήτηση, αφού υπάρχει πιθανότητα το μετεωρικό υλικό να έχει υποστεί χημικές μεταβολές κατά το σχηματισμό των πλανητών από τους οποίους προέρχονται.

Για το λόγο αυτό άλλοι ερευνητές, όπως ο Cameron (1959), βασίστηκαν σε δεδομένα κυρίως από ραδιο-φυσικές μεθόδους. Στο σχήμα 1.1 φαίνεται η γραφική παράσταση με τη συμμετοχή των χημικών στοιχείων στο Σύμπαν, σύμφωνα με τον Cameron (1959), μετά από επανυπολογισμό όλων των τιμών ανά σταθερή συγκέντρωση 10^6 ατόμων Si. Αυτός ο επανυπολογισμός με το Si ως στοιχείο αναφοράς, βελτιώνει τη σύγκριση με τα επίγεια δεδομένα. Από το διάγραμμα αυτό προκύπτουν μερικά χρήσιμα συμπεράσματα σε ότι αφορά τη συχνότητα εμφάνισης των χημικών στοιχείων σε σχέση με τον ατομικό αριθμό:

- α. Η μεγάλη συμμετοχή του H και του He στη σύσταση τους Σύμπαντος (μεγαλύτερη από 99% κατά βάρος).
- β. Η μείωση της συμμετοχής των στοιχείων στη σύσταση του Σύμπαντος, όσο αυξάνει ο ατομικός τους αριθμός. Παρατηρείται αρχικά μία απότομη εκθετική ελάττωση της συχνότητας εμφάνισης των χημικών στοιχείων μικρού ατομικού αριθμού (μέχρι περίπου 30), ενώ τα βαρύτερα χημικά στοιχεία που ακολουθούν παρουσιάζουν μία σχεδόν σταθερή τιμή συχνότητας εμφάνισης.
- γ. Τα χημικά στοιχεία με άρτιο ατομικό αριθμό είναι αφθονότερα σε σύγκριση με τα χημικά στοιχεία με περιττό ατομικό αριθμό.
- δ. Οι σχετικές συχνότητες εμφάνισης των χημικών στοιχείων με μεγαλύτερο ατομικό αριθμό από εκείνον του νικελίου (Ni=28), εμφανίζουν μικρότερη διακύμανση από τις σχετικές συχνότητες εμφάνισης των χημικών στοιχείων με μικρότερο ατομικό αριθμό.
- ε. Μόνο δέκα χημικά στοιχεία (H, He, C, N, O, Ne, Mg, Si, S, Fe), που έχουν ατομικούς αριθμούς μικρότερους από 27, δείχνουν μια αισθητή αφθονία

εμφάνισης. Αντίθετα τα χημικά στοιχεία Li, Be, B, Sc που έχουν ατομικό αριθμό μεγαλύτερο από 27 εμφανίζουν χαμηλή συμμετοχή.



Σχ. 1.1. Προβολή των σχετικών κοσμικών συχνοτήτων εμφάνισης των χημικών στοιχείων σε άτομα ανά 10^6 άτομα Si (Cameron 1959, Mason & Moore 1982).

1.2. Ηλιακό Σύστημα

1.2.1. Ο Ήλιος

Ο Ήλιος κατέχει περίπου το 99,9% της μάζας του ηλιακού μας συστήματος. Οι γνώσεις μας για τη χημική του σύσταση βασίζονται κυρίως στις φασματοσκοπικές αναλύσεις του φωτός. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει

μειονεκτήματα, αφού ορισμένα χημικά στοιχεία δεν δίνουν ανιχνεύσιμα φάσματα ή οι έντονες φασματικές τους γραμμές απορροφούνται από τη γήινη ατμόσφαιρα. Μία ακόμη δυσκολία οφείλεται στο ότι τα φάσματα του ηλιακού φωτός μας δίνουν τη σύσταση της ηλιακής ατμόσφαιρας και όχι την ολική του σύσταση.

Συνολικά έχουν βρεθεί περίπου 70 χημικά στοιχεία στον Ήλιο και η σύστασή του δεν διαφέρει σημαντικά από αυτή του Σύμπαντος. Οι περιεκτικότητες της ηλιακής ατμόσφαιρας σε H και He είναι ιδιαίτερα υψηλές σε σχέση με τα άλλα χημικά στοιχεία και στο γεγονός αυτό οφείλονται οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης που συμβαίνουν στον Ήλιο (Σχ. 1.2). Επίσης και το O βρίσκεται σε σχετικά υψηλές περιεκτικότητες.

Τα οχτώ κύρια χημικά στοιχεία που παρατηρούνται στις εξωτερικές ζώνες του Ήλιου είναι τα: H, He, O, Fe, N, Mg, C και Si σε σχετική αναλογία 51.000 : 10.000 : 280 : 2,7 : 2,1 : 1,7 : 1 : 1. Επίσης έχουν ανιχνευθεί S, Al και Ca.

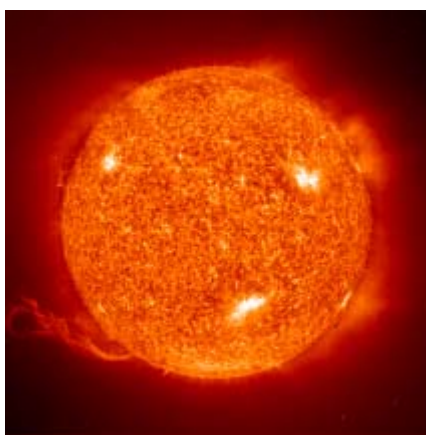
Στον πίνακα 1.1 δίνεται μία εκτίμηση της συμμετοχής των στοιχείων στον Ήλιο, σύμφωνα με τους Ross & Aller (1976), μετά από επανυπολογισμό όλων των τιμών ανά σταθερή συγκέντρωση 10^6 ατόμων Si.

Πίν. 1.1. Οι σχετικές περιεκτικότητες των χημικών στοιχείων στο Ηλιακό μας σύστημα, κατά ατομικό αριθμό, σε άτομα ανά 10^6 άτομα Si (Ross & Aller 1976). Με έντονα γράμματα τα έξι συνηθέστερα μη-πηχτικά πετρογενετικά στοιχεία (Palme & O'Neil 2005)

1	H	2.24×10^{10}	26	Fe	7.08×10^5	58	Ce	0.794
2	He	1.41×10^9	27	Co	1.78×10^3	59	Pr	0.102
3	Li	0.22	28	Ni	4.27×10^4	60	Nd	0.38
4	Be	0.032	29	Cu	2.57×10^2	62	Sm	0.12
5	B	<2.8	30	Zn	6.31×10^2	63	Eu	0.1
6	C	9.33×10^6	31	Ga	14	64	Gd	0.295
7	N	1.95×10^6	32	Ge	70.8	66	Dy	0.257
8	O	1.55×10^7	37	Rb	8.91	68	Er	0.13
9	F	8.12×10^2	38	Sr	17.8	69	Tm	0.041
10	Ne	8.32×10^5	39	Y	2.82	70	Yb	0.2
11	Na	4.27×10^4	40	Zr	12.6	71	Lu	0.13
12	Mg	8.91×10^5	41	Nb	1.8	72	Hf	0.14
13	Al	7.41×10^4	42	Mo	3.24	74	W	1.1
14	Si	1.0×10^6	44	Ru	1.51	75	Re	<0.01
15	P	7.08×10^3	45	Rh	0.562	76	Os	0.11
16	S	3.6×10^5	46	Pd	0.71	77	Ir	0.16
17	Cl	7.1×10^3	47	Ag	0.16	78	Pt	1.26
18	Ar	2.2×10^4	48	Cd	1.59	79	Au	<0.13
19	K	3.24×10^3	49	In	1.00	80	Hg	<2.8
20	Ca	5.01×10^4	50	Sn	2.2	81	Tl	0.18
21	Sc	24.5	51	Sb	0.22	82	Pb	1.91
22	Ti	2.51×10^3	55	Cs	<1.8	83	Bi	1.8
23	V	2.34×10^2	56	Ba	2.75	90	Th	0.035
24	Cr	1.15×10^4	57	La	0.302	92	U	<0.09
25	Mn	5.89×10^3						

1.2.2. Οι πλανήτες

Η ολική χημική σύσταση των πλανητών του ηλιακού μας συστήματος δεν είναι δυνατό να υπολογιστεί αφού δεν υπάρχουν άμεσες παρατηρήσεις και αναλύσεις, εκτός βέβαια από τον Άρη όπου τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί σημαντικές διαστημικές αποστολές. Έτσι λοιπόν οι φασματοσκοπικές παρατηρήσεις δίνουν πληροφορίες κυρίως για τη σύσταση της ατμόσφαιρας των πλανητών. Σε ότι αφορά την ολική τους σύσταση μπορεί να υποτεθεί ότι αυτή είναι ανομοιογενής σε κάθε πλανήτη και διαφοροποιείται σημαντικά από το κέντρο προς την περιφέρεια. Ορισμένα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν από τις πυκνότητές τους αλλά και από τις συγκρίσεις τους με τη Γη (Πίν. 1.2).



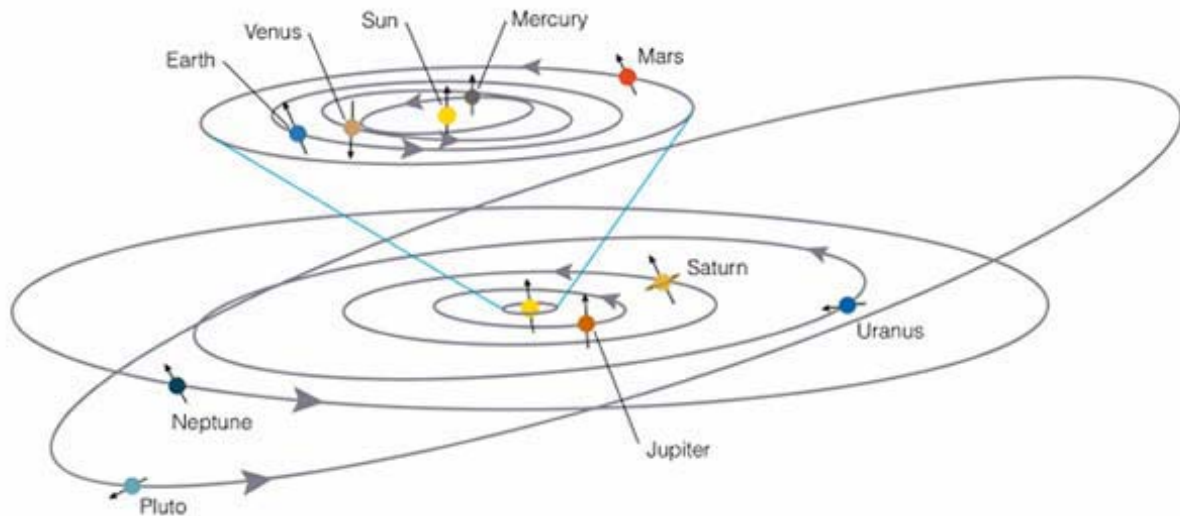
Σχ. 1.2. Οι περιεκτικότητες της ηλιακής ατμόσφαιρας σε Η και He είναι ιδιαίτερα υψηλές, με αποτέλεσμα τις θερμοπυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης.

Πίν. 1.2. Δεδομένα του Ηλιακού μας συστήματος (Wedepohl 1971).

	Μάζα (Γη=1)	Ακτίνα (Km)	Όγκος (Γη=1)	Πυκνότητα (g/cm ³)	Ενεργή θερμοκρασία (°K)	Αέρια στην ατμόσφαιρα	Απόσταση από τον Ήλιο (10 ⁶ km)
Ήλιος	332.000	695.000	1.300.000	1,41	6.000	H, He, O, Fe, N, Mg, C, Si	
Ερμής	0,05	2.500	0,06	5,10	450	-	58
Αφροδίτη	0,81	6.200	0,92	5,00	235	CO ₂ , H ₂ O, HCl, HF, O ₂	107
Γη	1	6.371	1	5,52	240	N₂, O₂, Ar, CO₂, H₂O	149
Άρης	0,11	3.400	0,15	3,90	220	CO ₂ , H ₂ O	226
Δίας	318	71.000	1.312	1,33	100	H ₂ , CH ₄ , NH ₃	775
Κρόνος	95	57.000	734	0,71	75	H ₂ , CH ₄	1421
Ουρανός	14,5	25.800	64	1,27	50	H ₂ , CH ₄	2861
Ποσειδώνας	17,3	22.300	43	2,22	40	H ₂ , CH ₄	4485
Πλούτωνας	0,03	2.900	0,1	2,00	40	-	5886

Οι πλανήτες του Ηλιακού μας συστήματος είναι συνολικά 9: Ερμής, Αφροδίτη, Γη, Άρης, Δίας, Κρόνος, Ουρανός, Ποσειδώνας και Πλούτωνας (Σχ. 1.3). Ο Ερμής, η Αφροδίτη και η Γη έχουν περίπου την ίδια πυκνότητα, ενώ οι

πυκνότητες των υπόλοιπων πλανητών με εξαίρεση του Άρη, δεν διαφέρουν πολύ από αυτή του Ήλιου. Οι ατμόσφαιρες των πλανητών που βρίσκονται



Σχ. 1.3. Οι τροχιές των 9 πλανητών του ηλιακού μας συστήματος γύρω από τον Ήλιο. Ερμής (Mercury), Αφροδίτη (Venus), Γη (Earth), Άρης (Mars), Δίας (Jupiter), Κρόνος (Saturn), Ουρανός (Uranus), Ποσειδώνας (Neptune) και Πλούτωνας (Pluto).

πλησιέστερα στον Ήλιο αποτελούνται από H, C και N και από ενώσεις αυτών των στοιχείων.

Οι πλανήτες προς το εσωτερικό μέρος του ηλιακού συστήματος είναι πιο πετρώδεις, επειδή οι υψηλές θερμοκρασίες που προκλήθηκαν από την έντονη ακτινοβολία του Ήλιου δεν επέτρεψαν αέρια, όπως οι υδρατμοί και το μεθάνιο, να συμπυκνωθούν κατά το σχηματισμό τους (Albarede 2003). Κοινή είναι η πεποίθηση ότι η «γραμμή χιονιού» (snow line), δηλαδή το υποθετικό όριο της σταθερότητας του πάγου, βρισκόταν κοντά στη ζώνη των αστεροειδών μεταξύ του Άρη και του Δία. Οι εξωτερικοί πλανήτες όπως ο Δίας και ο Ποσειδώνας σχηματίστηκαν σε ένα ψυχρότερο περιβάλλον και, εκτός από τον πετρώδη πυρήνα τους, προσέλκυσαν σημαντικές ποσότητες υδρογόνου και μεθανίου.

Οι πολυάριθμες συγκρούσεις μεταξύ των πλανητοειδών προκάλεσαν την αύξηση του μεγέθους των πλανητικών σωμάτων που προέκυψαν, μείωσαν τον αριθμό τους, και καθόρισαν τις τροχιές τους. Η βαρυτική έλξη των εξωτερικών πλανητών με τη μεγάλη μάζα διατάραξαν τα γειτονικά τους πλανητικά σώματα, τα οποία είτε απομακρύνθηκαν από το Ηλιακό Σύστημα είτε διατηρήθηκαν με το σχηματισμό των εσωτερικών πλανητών. Το αποτέλεσμα αυτών των διαδικασιών, οι οποίες διήρκεσαν λιγότερο από 100 εκατομμύρια έτη, ήταν ένας μικρός αριθμός πλανητών με παρόμοιο μέγεθος: Ερμής, Αφροδίτη, Γη και Άρης.

Από τους εσωτερικούς πλανήτες, ο **Ερμής** έχει αραιή ατμόσφαιρα, σχεδόν ανύπαρκτη, και η πυκνότητά του δείχνει πιθανή ομοιότητα με τη σύσταση της Γης. Η **Αφροδίτη** είναι ο πλησιέστερος γειτονικός μας πλανήτης. Έχει πυκνή ατμόσφαιρα που αποτελείται κυρίως από CO₂ (98 %). Το μέγεθος και η μάζα της Αφροδίτης δείχνουν ότι μοιάζει και αυτή πολύ με τη σύσταση της Γης.

Ο Άρης αποτελεί τον δεύτερο πλησιέστερο πλανήτη προς τη Γη. Λέγεται και «ερυθρός πλανήτης» εξαιτίας του χρώματος που παρουσιάζει και το οποίο οφείλεται στη διασπορά του Fe_2O_3 στην επιφάνειά του. Περιβάλλεται από λεπτή ατμόσφαιρα και έχει μέση ατμοσφαιρική πίεση λιγότερο από το 1% της Γης, κάτι που οφείλεται στη μικρή του βαρύτητα. Καθώς το μεγαλύτερο μέρος της ατμόσφαιρας διέφυγε στο διάστημα πριν από 500 εκατομμύρια έτη, όπως πιθανολογείται, μειώθηκε η ατμοσφαιρική πίεση και το υγρό ύδωρ που υπήρχε στην επιφάνειά του, εξατμίστηκε ή διέρρευσε στο υπέδαφος και στους πόλους του υπό μορφή παγετώνων.

Έτσι ο Άρης αποτελεί σήμερα έναν ερημικό και άνυδρο πλανήτη με αραιή ατμόσφαιρα (Σχ. 1.4). Η σκόνη που καλύπτει την επιφάνειά του είναι αρκετά ψιλή και οι εκτεταμένες αμμοθύελλες αποτελούν συχνό φαινόμενο, καλύπτοντας ένα πολύ μεγάλο τμήμα της επιφάνειάς του, όπως αυτές το 2001 και το 2007. Από τη μάζα και το μέγεθός του προκύπτει ότι η σύσταση του Άρη πιθανόν να είναι όμοια με αυτή της Γης.



Σχ. 1.4. Ο Άρης αποτελεί έναν ερημικό και άνυδρο πλανήτη με αραιή ατμόσφαιρα, και ψιλή σκόνη καλύπτει την επιφάνεια του πλανήτη.

Η ατμόσφαιρα του Άρη αποτελείται κατά 95,32% από CO_2 , 2,7% N_2 και 1,6% Ar (Πίν. 1.2). Επίσης από τις αναλύσεις με φασματομέτρα φθορισμού ακτίνων X (XRF) που διέθεταν τα αμερικανικά διαστημόπλοια Viking 1 και 2 που το 1976 προσέγγισαν τον Άρη, προέκυψαν κάποιες ενδείξεις για τη χημική σύσταση των πετρωμάτων, του εδάφους και του υπεδάφους του. Η μέθοδος βέβαια αυτή δεν έδωσε πλήρη αποτελέσματα, γιατί από τη φύση της δεν μπορεί να ανιχνεύσει στοιχεία με ατομικό αριθμό κάτω από 11. Έτσι, για στοιχεία όπως H, C, N, O και Na δεν ήταν δυνατό να υπάρξουν πληροφορίες.

Για τα υπόλοιπα στοιχεία τα πετρώματα του Άρη είναι πλούσια σε Si (13-15%), Fe (12-16%), Ca (3-8%) και Al (2-7%) (Πρέκα-Παπαδήμα 2005). Σε μικρότερες περιεκτικότητες ανιχνεύτηκαν P, Cl, V, Cr, Ni, Co και σε ίχνη Cu, Zn και άλλα μέταλλα, συμπεριλαμβανομένου και του U.

Στον Άρη υπάρχουν ενδείξεις μίας παλαιότερης γεωλογικής δραστηριότητας, όπως τεράστια ηφαιστεια. Ανάμεσά τους το ανενεργό ηφαιστειο Olympus Mons, που είναι και το ψηλότερο βουνό του ηλιακού συστήματος με ύψος 27.000 μέτρα, στο υψίπεδο Θαρσίς. Ενδείξεις ηφαιστειακής δραστηριότητας έχουν βρεθεί στον κρατήρα Γκούσεβ, που εξερεύνησε πρόσφατα το ρομπότ Spirit, με την ανεύρεση ηφαιστειακού βασάλτη και άλλων πετρωμάτων. Σήμερα ο Άρης είναι γεωλογικά ανενεργός, αν και η ύπαρξη μεθανίου που ανιχνεύθηκε σε ίχνη σε ορισμένες περιοχές, πιθανώς να προκαλείται από περιορισμένη ηφαιστειακή δραστηριότητα, όπως και η πιθανολογούμενη έκλυση υγρού νερού (Christensen 2003, Golombek 2003, Lunine et al. 2003, Lundin 2004, Lemmon 2004).

Οι μεγαλύτεροι πλανήτες **Δίας**, **Κρόνος**, **Ποσειδώνας** και **Ουρανός** έχουν πολλά κοινά γνωρίσματα, ειδικότερα σε ότι αφορά τις χαμηλές πυκνότητες και τις ατμόσφαιρές τους που έχουν μεγάλο πάχος και που αποκρύπτουν οπτικά πλήρως τις επιφάνειες τους. Αυτό οφείλεται στην αφθονία του H_2 και του He .

Ο Δίας αποτελείται κυρίως από αέρια, αν και σύμφωνα με κάποιες θεωρίες ο εσωτερικός του πυρήνας να είναι πιθανώς στερεός, με μέγεθος όσο η Γη. Ο Δίας πιθανώς να σχηματίστηκε πολύ γρήγορα, μέσα σε λίγα εκατομμύρια έτη (Albarede 2003). Το κυριότερο χαρακτηριστικό της εικόνας του είναι η «Μεγάλη Ερυθρά Κηλίδα» που αποτελεί σύστημα από νέφη που περιστρέφονται σαν ένας γιγάντιος αντικυκλώνας. Η χημική σύσταση της ατμόσφαιράς του αποτελείται από 89,8% H_2 και 10,2% He . Υπάρχουν ωστόσο και άλλα χημικά στοιχεία σε ίχνη, όπως μεθάνιο (CH_4), αμμωνία (NH_3), υδρογόνο-δευτέριο που είναι ισότοπο του υδρογόνου (HD), αιθάνιο (C_2H_6), νερό (H_2O), πάγος αμμωνίας και ένα υδροσουλφίδιο της αμμωνίας. Ένας δειγματολήπτης-διαστημόπλοιο, ο Galileo, που μπήκε στην ατμόσφαιρα του Δία, διαπίστωσε ότι επικρατούν καταιγίδες πολύ μεγαλύτερες και εντονότερες από αυτές της Γης, και που προκαλούνται από κατακόρυφη κυκλοφορία νερού στην ατμόσφαιρα (Μούσας 2005).

Ο **Πλούτωνας** είναι ο πιο μακρινός πλανήτης με μέγεθος περίπου όμοιο με εκείνο του Ερμή. Είναι ένας αινιγματικός πλανήτης για τον οποίο γνωρίζουμε πολύ λίγα.

1.3. Σελήνη

Συνολικά 12 άνθρωποι έχουν πατήσει στην επιφάνεια της Σελήνης (Σχ. 1.5) στο πλαίσιο του διαστημικού προγράμματος «Απόλλων» των ΗΠΑ. Οι έξι αποστολές που προσσεληνώθηκαν κατά την περίοδο 1969-1972, συνέλλεξαν και έφεραν στη Γη συνολικά 382 κιλά δειγμάτων από πετρώματα και έδαφος, από έξι διαφορετικές τοποθεσίες. Ανάμεσά τους βρίσκεται και ένα πέτρωμα που οι επιστήμονες το ονόμασαν «Γένεση», επειδή έχει ηλικία περίπου 4,5 δισεκατομμυρίων ετών, δηλαδή όσο και το ηλιακό μας σύστημα.

Η μελέτη των δειγμάτων αυτών, τα οποία δεν έχουν υποστεί χημικές εξαλλοιώσεις λόγω της έλλειψης ατμόσφαιρας και επιφανειακού ύδατος στη

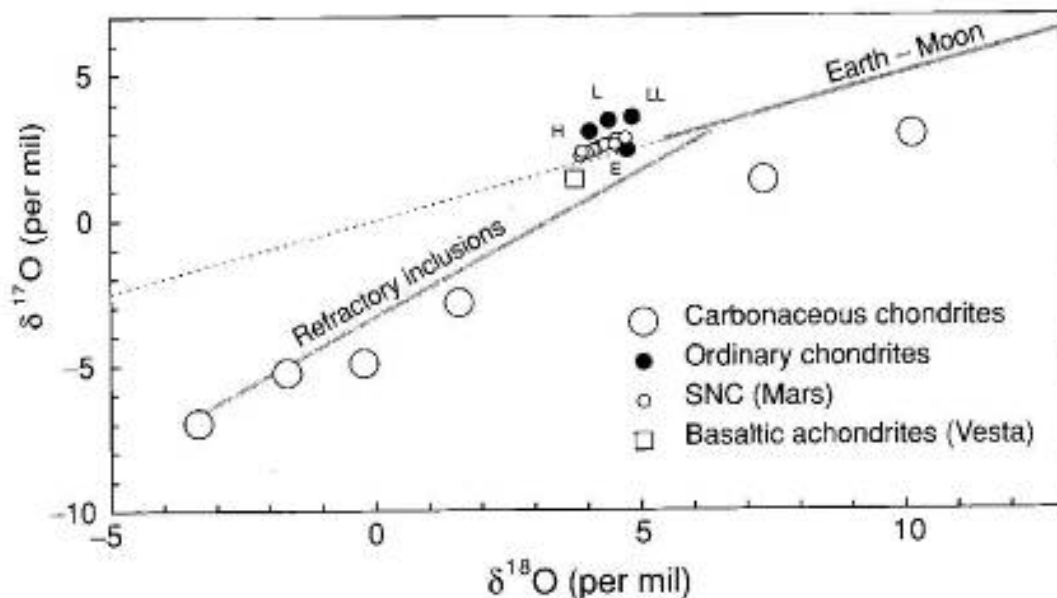
Σελήνη, έδωσε σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τους παράγοντες που έδρασαν κατά τα πρώτα στάδια του σχηματισμού τόσο της Σελήνης όσο και της



Σχ. 1.5. Μία μικρή περιοχή βορειοανατολικά του Tsiolkovsky, στην αθέατη πλευρά της Σελήνης, με πολυάριθμους κρατήρες. Η διάμετρος των κρατήρων κυμαίνεται από μερικές δεκάδες μέτρα έως 75 χιλιόμετρα. Σε περιοχές όπως αυτή θα πρέπει να αναζητηθούν τα πετρώματα από τον αρχικό σεληνιακό φλοιό.

Γης, όπως επίσης και για τη σύσταση του εσωτερικού τους.

Τα ισότοπα Ο έδειξαν ότι η Γη και η Σελήνη σχηματίστηκαν από τα ίδια κατάλοιπα που προέκυψαν από τη σύγκρουση ενός ουράνιου σώματος στο μέγεθος του Άρη με την νεαρή Γη, πριν από περίπου 4,5 δισεκατομμύρια έτη. Τα ισότοπα Ο δηλαδή δείχνουν μία κοινή προέλευση της Γης με τον δορυφόρο της, αφού στο διάγραμμα $\delta^{17}\text{O}$ - $\delta^{18}\text{O}$ (Σχ. 1.6) προβάλλονται επάνω στην ίδια γραμμή (Albarede 2003). Εντούτοις η Γη και ο δορυφόρος της ακολούθησαν μία τελείως διαφορετική γεωλογική ιστορία.



Σχ. 1.6. Ισοτοπική σύσταση του οξυγόνου από διαφορετικά πλανητικά σώματα (Albarede 2003).

Η Σελήνη έχει μάζα $7,35 \times 10^{22}$ Kg, όγκο $2,2 \times 10^{10}$ Km³ και η μέση πυκνότητά της ($3,34$ g/cm³) είναι κατά πολύ μικρότερη από αυτή της Γης ($5,52$ g/cm³). Η επιφάνειά της καλύπτεται από ένα στρώμα που ονομάζεται ρεγκόλιθος και αποτελείται από θραύσματα πετρωμάτων, ορυκτών και υάλου,

καθώς και συντρίμματα μετεωριτών. Επίσης λατυποπαγή πετρώματα, πετρώματα δηλαδή που αποτελούνται από γωνιώδη τεμάχια που συγκολλούνται από ένα συνδετικό υλικό, εκτείνονται σε ένα μεγάλο βάθος που μπορεί να φθάσει έως και 10 km. Ο σχηματισμός αυτών των λατυποπαγών οφείλεται κυρίως στην πρόσκρουση μεγάλων μετεωριτών, ενώ δεν αποκλείονται και οι τεράστιες θερμοκρασιακές μεταβολές μεταξύ ημέρας και νύχτας (~150 °C).

Τα πετρώματα της Σελήνης είναι κυρίως πυριγενή και αποτελούνται από βασάλτες. Οι αναλύσεις έδειξαν ότι στο στερεό φλοιό της επικρατούν τα ίδια στοιχεία που επικρατούν και στο στερεό φλοιό της Γης, δηλαδή O, Si, Al, Fe, Ca, Mg, Ti και Na. Οι σημαντικότερες διαφορές τους εντοπίζονται κυρίως στις υψηλότερες περιεκτικότητες σε Τί και στις χαμηλότερες σε K και Na σε ορισμένα δείγματα από τη Σελήνη. Η συσχέτιση των κύριων χημικών στοιχείων που προέκυψαν από τις αναλύσεις των πετρωμάτων της Σελήνης, δείχνει πορεία μαγματικής διαφοροποίησης.

Τα πιο συνηθισμένα ορυκτά που υπάρχουν στα πετρώματα της Σελήνης είναι ο ολιβίνης [(Mg,Fe)₂SiO₄], οι πυρόξενοι (συνήθως αυγίτης [(Ca,Na)(Mg,Fe,Ti,Al)₂(Si,Al)₂O₆]), τα βασικά πλαγιόκλαστα [(Ca,Na)(Si,Al₄)O₈], ο ίλμενίτης [FeTiO₃] και ο σπινέλλιος [MgAl₂O₄]. Σε μικρότερα ποσοστά εντοπίζονται το ρουτίλιο [TiO₂], ο αρμαλκολίτης [(Fe,Mg)Ti₂O₅], ο τροϊλίτης [FeS], ο σρείβερσίτης [(Fe,Ni)₃P] και ο κοχενίτης [(Fe,Ni,Co)₃C]. Τα παραπάνω ορυκτά σχηματίζονται στα πρώτα στάδια της κρυστάλλωσης του μάγματος, ενώ στο τελευταίο στάδιο σχηματίζονται χριστοβαλίτης [SiO₂], απατίτης [Ca₅(F,Cl)(PO₄)] και ζιρκόνιο [ZrSiO₄].

Από τη χημική σύσταση των πετρωμάτων της Σελήνης μπορούν να εξαχθούν μερικά χρήσιμα συμπεράσματα για την πετρογένεσή τους και τη δημιουργία της Σελήνης:

1. Τα πετρώματα έχουν μικρότερη περιεκτικότητα σε πτητικά στοιχεία (volatiles) όπως K, Na, Pb, Hg, Tl, σε σχέση με τα ανάλογα πετρώματα της Γης και τους χονδρίτες μετεωρίτες, ενώ απουσιάζει το νερό.
2. Τα πετρώματα έχουν σχηματιστεί κάτω από συνθήκες πολύ χαμηλής πτητικότητας οξυγόνου (fO₂).
3. Υπάρχει ένας υψηλός εμπλουτισμός σε δύστηκτα στοιχεία σε σχέση με τους χονδρίτες μετεωρίτες.
4. Υπάρχει μία έντονη θετική συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων διαφόρων στοιχείων, που δείχνει ότι έλαβαν χώρα μαγματικές διεργασίες.
5. Υπάρχουν ιχνοστοιχεία, μεταξύ αυτών και οι σπάνιες γαίες (REE).
6. Υπάρχουν μερικές σημαντικές διαφορές στη χημική σύσταση των πυριγενών πετρωμάτων σε ότι αφορά τα στοιχεία που βρίσκονται σε μικρές περιεκτικότητες, όπως το Ti.

Τα ορυκτά που προέρχονται από τη Σελήνη χαρακτηρίζονται από απουσία ύδατος, κάτι που συμφωνεί με τις θεωρίες που υποστηρίζουν ότι στη Σελήνη δεν υπάρχει νερό. Οι Sharp et al. (2010) ανέλυσαν τα ισότοπα χλωρίου (Cl) σε δείγματα από σεληνιακά πετρώματα και διαπίστωσαν ότι στο μάγμα κατά τη

διάρκεια του σχηματισμού της Σελήνης υπήρχε ελάχιστο ή καθόλου H_2 . Συγκεκριμένα μελέτησαν την αναλογία $^{37}Cl/^{35}Cl$ και διαπίστωσαν ότι δεν είναι όμοιες με αυτές της Γης, τα αρχικά πετρώματα της οποίας περιείχαν στο εσωτερικό τους αρκετό νερό. Αυτό σημαίνει ότι η Σελήνη υπήρξε πάντοτε ξερή χωρίς ίχνη ύδατος.

Ένα ακόμη ιδιαίτερα σημαντικό γεωχημικό ζήτημα που σχετίζεται και με πιθανή μελλοντική αναζήτηση ορυκτών πόρων στη Σελήνη, αφορά το ισότοπο του He, το 3He . Το ισότοπο αυτό είναι πολύ σπάνιο στη Γη, σε αντίθεση με τη Σελήνη. Είναι πολύτιμο στην πυρηνική σύντηξη, μια τεχνολογία η οποία, αν και βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο, πιθανώς να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες του πλανήτη μας στο μέλλον. Στη Σελήνη εκτιμάται ότι υπάρχουν αποθέματα 2,5 εκατομμυρίων τόνων 3He και υπολογίζεται ότι μόνο 25 τόνοι είναι αρκετοί για να για να τροφοδοτήσουν με ενέργεια (από πυρηνική σύντηξη) την Ευρώπη και τις ΗΠΑ επί ένα χρόνο.

Με βάση τις χημικές αναλύσεις το 3He στη Σελήνη, και ιδιαίτερα στον επιφανειακό ρεγκόλιθο, εντοπίζεται σε περιεκτικότητες από 1,4 έως 15 ppb σε περιοχές με ηλιοφάνεια και έως 50 ppb σε περιοχές με συνεχή σκίαση (Slyuta et al. 2007, Cocks 2010). Προς αυτή την κατεύθυνση γίνονται έρευνες από διαστημικά κέντρα και ερευνητικά ινστιτούτα στις Η.Π.Α., τη Ρωσία, την Κίνα και την Ινδία (Palaszewski 2005).

1.4. Μετεωρίτες

Οι μετεωρίτες είναι ουράνια σώματα που έλκονται από τη βαρύτητα της Γης και πέφτουν στην επιφάνειά της χωρίς να διαλυθούν τελείως στην ατμόσφαιρα, όπου κατά την είσοδο τους θερμαίνονται λόγω τριβής και αναφλέγονται. Οι μετεωρίτες αποτελούν την πιο άμεση πηγή γνώσης για τη χημική σύσταση του εσωτερικού των πλανητών, αφού όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, με την φασματοσκοπική ανάλυση μπορούμε να πληροφορηθούμε μόνο για τη σύσταση της ατμόσφαιράς τους. Για το λόγο αυτό οι μετεωρίτες είναι πολύ σημαντικοί για τη μελέτη του ηλιακού μας συστήματος, αφού αποτελούν τμήματα των αστεροειδών που θεωρούνται υπολείμματα πλανητοειδών που βρισκόταν σε τροχιά γύρω από τον Ήλιο.

Μερικοί μετεωρίτες θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν το πρωταρχικό υλικό του ηλιακού συστήματος επειδή δεν έχουν υποστεί καμία χημική διαφοροποίηση ή μεταβολή από τότε που σχηματίστηκαν (Henderson 1982, Μητρόπουλος 2010). Αν και υπολογίζεται ότι στην επιφάνεια της Γης πέφτουν κάθε χρόνο συνολικά 30.000 έως 150.000 τόνοι μετεωρικού υλικού, αυτό είναι κυρίως υπό μορφή σκόνης (Mason & Moore 1982). Έτσι η μελέτη τους περιορίζεται μόνο στα λίγα ευμεγέθη κομμάτια μετεωριτών (5-6 ετησίως) που είτε γίνονται ορατοί κατά την πτώση τους, είτε συλλέγονται με βάση τα χαρακτηριστικά τους που τους κάνουν να ξεχωρίζουν από τα γήινα πετρώματα.

Η συμμετοχή των ελευθέρων μετάλλων στους μετεωρίτες και η χημική σύσταση των πυριτικών και θειούχων φάσεων που υπάρχουν σε πολλούς από

αυτούς, είναι παρόμοιες με την κατανομή των στοιχείων σε αυτές τις φάσεις στη Γη (Henderson 1982, Μητρόπουλος 2010). Επιπλέον, οι ισοτοπικές μελέτες των μετεωριτών έχουν οδηγήσει στον υπολογισμό της ηλικίας της Γης και έχουν δώσει πληροφορίες σχετικά με τα μητρικά ουράνια σώματα από τα οποία προήλθαν. Η μελέτη της χημικής τους σύστασης (Πίν. 1.3) είναι καθοριστική στον προσδιορισμό των παραμέτρων με τις οποίες ασχολείται η γεωχημεία.

Πίν. 1.3. Χημική-ορυκτολογική σύσταση αντιπροσωπευτικών μετεωριτών (Allen 1973).

	1	2	3	4	5
Fe	6.68	16.30	14.8	—	0.25
Ni	1.30	1.74	1.22	—	<0.01
Co	0.08	0.09	0.02	—	—
FeS	6.46	5.48	10.74	0.82	0.27
SiO ₂	39.29	36.74	43.66	48.16	48.30
TiO ₂	0.12	0.12	<0.01	0.32	0.57
Al ₂ O ₃	2.49	2.04	2.42	15.57	11.92
Cr ₂ O ₃	0.55	0.55	0.19	0.44	0.33
FeO	14.96	10.24	0.30	15.02	19.95
MnO	0.33	0.32	<0.02	0.31	0.43
MgO	24.78	23.44	24.56	8.41	6.96
CaO	1.62	1.60	0.27	11.08	9.67
Na ₂ O	0.93	0.90	0.90	0.45	0.37
K ₂ O	0.10	0.09	0.074	0.09	0.03
P ₂ O ₅	0.30	0.27	<0.02	—	<0.05
C	0.18	0.02	0.41	—	—
Total	100.17	100.00	100.1	100.67	99.76
Olivine	46	35	—	—	—
Orthopyroxene	23	26	62	—	—
Clinopyroxene	4	4	—	51	61
Plagioclase	10	10	9	45	34
Chromite	0.8	0.8	—	0.7	0.5
Phosphate	0.7	0.6	—	—	—
Troilite	7	6	10	0.8	0.3
Metal	8	18	16	—	0.3

1.4.1. Ταξινόμηση, ορυκτολογία και χημική σύσταση των μετεωριτών

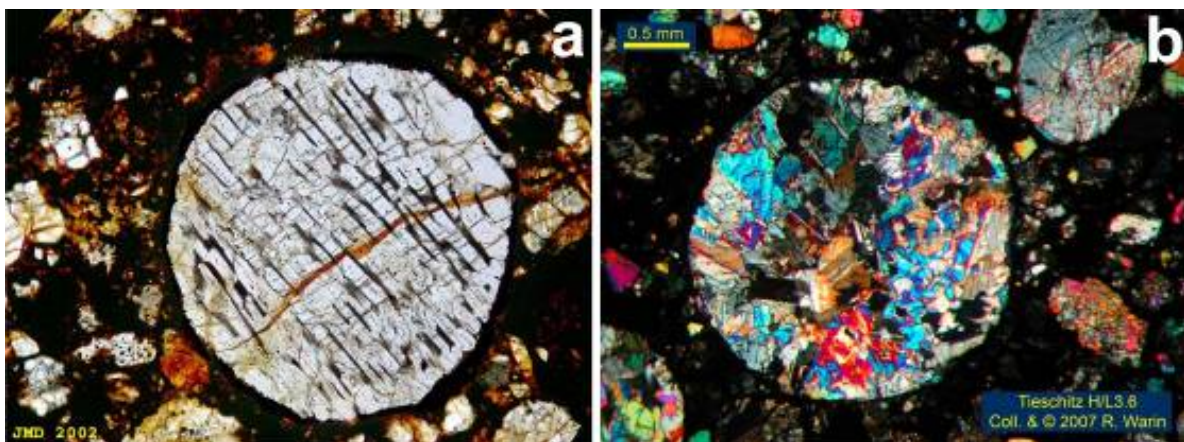
Οι μετεωρίτες αποτελούνται κυρίως από κράματα Ni-Fe, από πυριτικά ορυκτά, κυρίως ολιβίνη και πυρόξενο, από τροϊλίτη, που αποτελεί μονοσουλφίδιο του Fe, ή από ένα μίγμα όλων αυτών των ορυκτών συστατικών. Σε σχέση με τα γήινα πετρώματα μοιάζουν περισσότερο με πυριγενή, παρά με μεταμορφωμένα ή ιζηματογενή (Mason and Moore 1982). Οι μετεωρίτες διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, με βάση την ποσοστιαία περιεκτικότητά τους σε μέταλλα (Henderson 1982):

- A. Σιδηρομετεωρίτες ή σιδερίτες (μέταλλα > 90%)
- B. Σιδηρολιθομετεωρίτες ή σιδηρόλιθοι (μέταλλα = ~50%)
- Γ. Λιθομετεωρίτες ή αερόλιθοι: α) χονδρίτες (μέταλλα = ~10%) και β) αχονδρίτες (μέταλλα < 1%).

Α. Οι **σιδηρομετεωρίτες** αποτελούνται από μία ή δύο μεταλλικές φάσεις του Ni-Fe (το Ni είναι συνήθως μεταξύ 4 και 20%), καθώς και από τροϊλίτη (FeS), σρεϊβερσίτη (schreibersite-[(Fe,Ni,Co)₃P]) και γραφίτη (C), ενώ σπανιότερα συμμετέχουν και ορυκτά του Cr. Ανάλογα με τον τύπο και τη δομή των μεταλλικών συστατικών διακρίνονται σε **εξαεδρίτες**, που αποτελούνται κυρίως από καμασίτη (κράμα Ni-Fe με περίπου 6% Ni) σε κυβικούς κρυστάλλους, **οκταεδρίτες**, στους οποίους ο καμασίτης βρίσκεται υπό μορφή οκταέδρων, και **αταξίτες**, όπου επικρατεί κυρίως ο ταινίτης (κράμα Ni-Fe με περίπου 30% Ni) σε σχέση με τον καμασίτη. Οι αταξίτες είναι πιο πλούσιοι σε Νί (> 14%). Μερικοί σιδηρομετεωρίτες περιέχουν μικρά εγκλείσματα που αποτελούνται από τροϊλίτη, γραφίτη, πυρόξενο, ολιβίνη και σφαλερίτη.

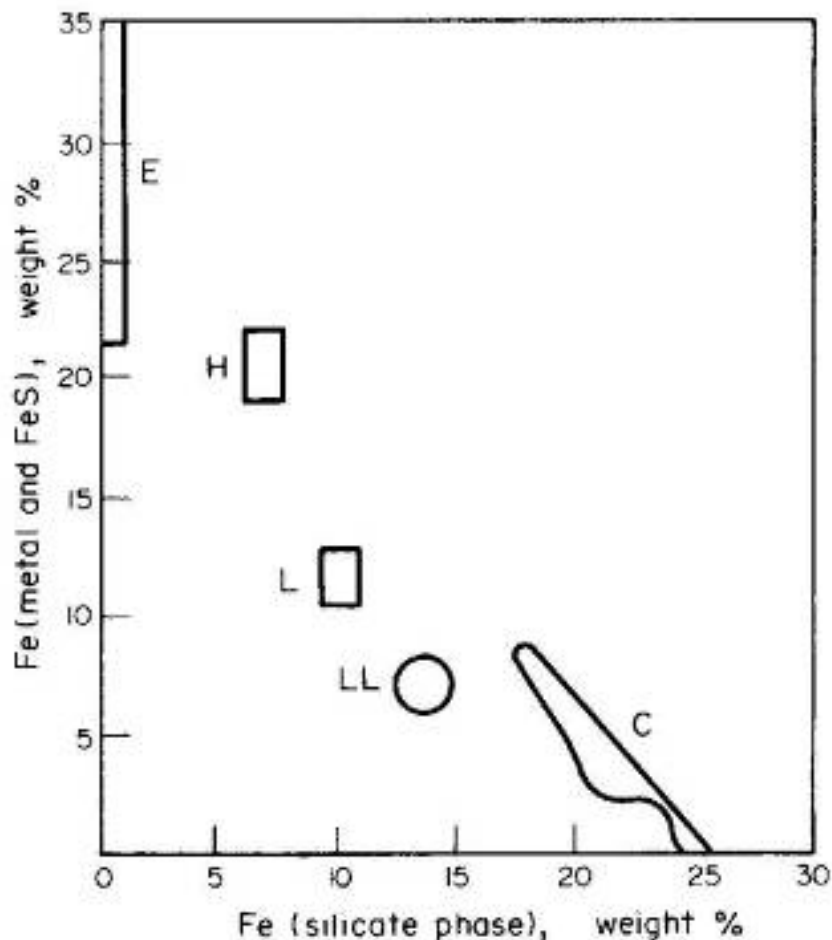
Β. Οι **σιδηρολιθομετεωρίτες** αποτελούνται από κράματα Ni-Fe και από πυριτικά ορυκτά, σε ίσες περίπου ποσότητες. Υπάρχουν δύο διαφορετικές ομάδες, οι παλλασίτες και οι μεσοσιδηρίτες, με διαφορετική χημική και ορυκτολογική σύσταση. Στους παλλασίτες οι σιδηρονικελιούχες φάσεις είναι καμασίτης και ταινίτης με εγκλείσματα ολιβίνη [(Mg,Fe)₂SiO₄], ενώ στους μεσοσιδηρίτες τα πυριτικά ορυκτά είναι κυρίως πλαγιόκλαστα, άστριοι και πυρόξενοι και σπανιότερα ολιβίνης.

Γ. Οι **λιθομετεωρίτες** αποτελούν τη σπουδαιότερη ομάδα μετεωριτών επειδή είναι οι πιο άφθονοι. Με βάση την υφή τους χωρίζονται σε δύο ομάδες: τους **χονδρίτες** και τους **αχονδρίτες**. Οι **χονδρίτες** οφείλουν το όνομά τους στα σφαιροειδή συσσωματώματα (chondrules ή chondri) που περιέχουν, και τα οποία έχουν διάμετρο περίπου 1 mm και αποτελούνται κυρίως από ολιβίνη ή/και πυρόξενο (Σχ. 1.7). Τα συσσωματώματα αυτά είναι μοναδικά και εντοπίζονται μόνο σε μετεωρίτες και δεν έχουν παρατηρηθεί ποτέ σε γήινα πετρώματα. Για το λόγο αυτό η μελέτη της σύστασής τους έχει μεγάλη σημασία από γενετικής άποψης. Τα σφαιροειδή αυτά συσσωματώματα αποτελούν πιθανώς σταγόνες τήγματος που δημιουργήθηκαν από την τήξη προϋπάρχοντος πυριτικού υλικού με ταχεία κρυστάλλωση και θερμική μεταμόρφωση.



Σχ. 1.7. Μικροσκοπικές εικόνες σφαιροειδών συσσωματωμάτων (chondrules ή chondri) που περιέχουν οι χονδρίτες και αποτελούνται κυρίως από ολιβίνη (a) ή πυρόξενο (b). a=H3 χονδρίτης Brownfield PPL, b=Μετεωρίτης χονδρίτης Tieschitz HL3.6 (Τσεχία).

Τα κύρια ορυκτά των χονδριτών μετεωριτών είναι: ολιβίνη, πυρόξενος, πλαγιόκλαστο, τροϊλίτης και κράματα Ni-Fe, κυρίως καμασίτης. Οι χημικές αναλύσεις έδειξαν ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές στη χημική σύσταση διαφόρων τύπων χονδριτών. Αυτό φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 1.8, όπου οι διάφοροι τύποι προβάλλονται σε διαφορετικά τμήματα στο διάγραμμα Fe σε πυριτικές φάσεις - Fe σε μέταλλα και σουλφίδια του σιδήρου.



Σχ. 1.8. Ταξινόμηση χονδριτών μετεωριτών με βάση τις περιεκτικότητες του Fe στις πυριτικές φάσεις σε σχέση με τα μέταλλα και τα σουλφίδια (Keil 1969, Henderson 1982).

Οι περιοχές που δείχνουν τις συστάσεις στους διάφορους τύπους είναι:

- E = Χονδρίτες από ενστατίτη,
- H = Χονδρίτες με υψηλό Fe και υψηλά μέταλλα,
- L = Χονδρίτες με χαμηλό Fe,
- LL = Χονδρίτες με χαμηλό Fe και χαμηλά μέταλλα,
- C = Ανθρακούχοι χονδρίτες.

Οι χονδρίτες μοιάζουν αρκετά στη σύστασή τους με τη Γη, κάτι το οποίο υποδηλώνει ότι ίσως σχηματίστηκαν από τις ίδιες ουράνιες πρώτες ύλες. Παρόλα αυτά παρουσιάζουν κάποιες διαφορές οι οποίες είναι δύσκολο να εξηγηθούν. Για παράδειγμα, τα ισότοπα O στους χονδριτικούς μετεωρίτες δεν είναι τα ίδια με αυτά που υπάρχουν στη Γη.

Μια ομάδα χονδριτών, οι ανθρακούχοι χονδρίτες (carbonaceous chondrites), είναι μοναδική μεταξύ των μετεωριτών, επειδή περιέχουν σε μεγάλο βαθμό ενυδατωμένα σιδηρομαγνησιούχα πυριτικά ορυκτά (όπως τα ορυκτά σερπεντίνης ή χλωρίτης) και περιέχουν έως και 10% πολύπλοκες οργανικές ενώσεις. Η προέλευση αυτών των ενώσεων αποτελεί θέμα διαφόρων επιστημονικών συζητήσεων για περισσότερο από έναν αιώνα σχετικά με την πιθανή εξωγήινη προέλευση της ζωής. Ωστόσο, πρόσφατες έρευνες, ειδικά στο μετεωρίτη Murchison που έπεσε στην Αυστραλία το 1969, υποστηρίζεται μια μη-βιολογική προέλευση για τις οργανικές ενώσεις που περιέχονται. Ο μετεωρίτης Murchison περιέχει ένα σύνθετο μείγμα οργανικών ενώσεων (αλειφατικούς και αρωματικούς υδρογονάνθρακες, καρβοξυλικά οξέα, αμινοξέα και άλλα). Η ομοιότητα αυτών των ενώσεων με εκείνες που παράγονται από τη θερμική σύνθεση απλών οργανικών μορίων υποστηρίζει τη μη-βιολογική προέλευση, όπως και η φύση των αμινοξέων, πολλά από τα οποία δεν βρίσκονται σε φυσικές πρωτεΐνες.

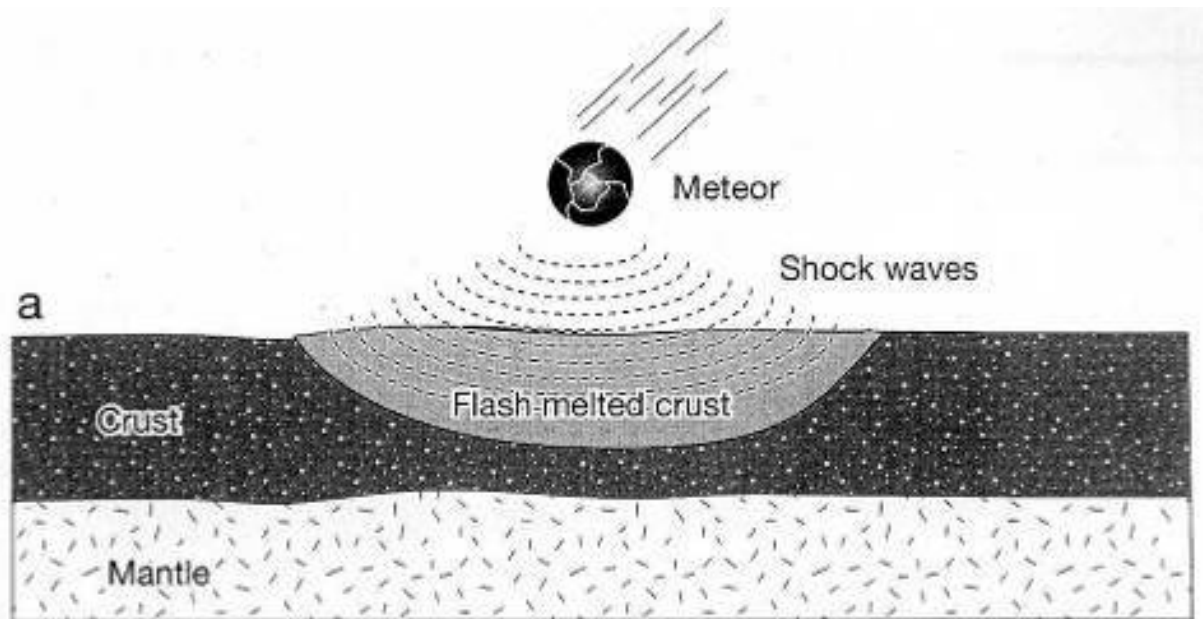
Οι **αχονδρίτες** είναι μια διαφορετική ομάδα λιθομετεωριτών που δεν περιέχουν σφαιροειδή συσσωματώματα (chondrules) και είναι συνήθως πολύ πιο αδροκρυσταλλικοί από τους χονδρίτες. Πολλοί αχονδρίτες μοιάζουν με γήινα πυριγενή πετρώματα στη σύσταση και την υφή, και έχουν πιθανώς κρυσταλλωθεί από πυριτικό τήγμα. Έχουν χαμηλότερη περιεκτικότητα σε Fe και Ni από τους χονδρίτες και η ορυκτολογική τους σύσταση ποικίλει. Τα κυριότερα ορυκτά είναι οι πυρόξεννοι και τα πλαγιόκλαστα, ενώ μερικοί τύποι είναι πλούσιοι σε ολιβίνη.

1.4.2. Προέλευση των ευγενών μετάλλων από «βομβαρδισμό» μετεωριτών

Ένας μεγάλος αριθμός από βασικά, πολύτιμα και σπάνια μέταλλα, σιδηρόφιλα κυρίως, όπως ο χρυσός, το ίνδιο, η πλατίνα, το όσμιο, το παλλάδιο, το ρήνιο, το νικέλιο, το κοβάλτιο κ.ά., είναι εξαιρετικά πλούσια σε συγκεκριμένα τμήματα του στερεού φλοιού της Γης, και σχηματίζουν τα κοιτάσματα. Όταν σχηματίστηκε η Γη, το αρχικό υλικό συμπυκνώθηκε σε χαμηλή θερμοκρασία και στη συνέχεια περιήλθε σε κατάσταση τήγματος, εξαιτίας πυρηνικών αντιδράσεων σύντηξης με επακόλουθο την αύξηση της θερμοκρασίας της. Η τήξη συνδυάστηκε στη συνέχεια με χημικές διαφοροποιήσεις (αποχωρισμός χημικών ενώσεων), ως συνέπεια των κατακόρυφων μετακινήσεων των υλικών της, ανάλογα με την πυκνότητά τους. Έτσι με αυτή τη διαδικασία, ο τηγμένος σίδηρος βυθίστηκε προς το κέντρο της Γης, δημιουργώντας τον πυρήνα, παρασύροντας και τα περισσότερα ευγενή μέταλλα.

Μια θεωρία που εξηγεί ικανοποιητικά με βάση τα ισοτοπικά δεδομένα την παρουσία κοιτασμάτων πολύτιμων μετάλλων στην επιφάνεια της Γης, σχετίζεται με έναν «βομβαρδισμό» που δέχτηκε ο πλανήτης μας από μετεωρίτες (Σχ. 1.9) τουλάχιστον μετά από 200 εκατομμύρια έτη από τη δημιουργία του πυρήνα (Holzheid et al. 2000, Schmidt 2007, Willbold et al. 2011). Σύμφωνα με

τη θεωρία αυτή ο γήινος φλοιός εμπλουτίστηκε στα παραπάνω μέταλλα από τους σιδηρομετεωρίτες και τους σιδηρολιθομετεωρίτες που αποτελούσαν κομμάτια αστεροειδών του ηλιακού μας συστήματος.



Σχ. 1.9. Η Γη δέχτηκε τουλάχιστον 200 εκατομμύρια έτη μετά το σχηματισμό του φλοιού, έναν «βομβαρδισμό» από μετεωρίτες και έτσι εμπλουτίστηκε σε σιδηρόφιλα μέταλλα.

Υπάρχουν πετρώματα στη Γροιλανδία που έχουν ηλικία περίπου 3,8 δισεκατομμύρια έτη και διατηρούν τα ισότοπα ορισμένων στοιχείων από αυτή την εποχή της πτώσης των πολυάριθμων μετεωριτών. Σύμφωνα με τους Willbold et al. (2011), οι υψηλής ακρίβειας ισοτοπικές αναλύσεις βολφραμίου στα πετρώματα αυτά δείχνουν ότι έχουν μια ισοτοπική σύσταση $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ που είναι σημαντικά υψηλότερη (περίπου 13 ppm) από τα πιο σύγχρονα γήινα πετρώματα. Η μείωση των ισότοπων $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ στο μανδύα συνέβη κατά τη διάρκεια της Αρχαϊκής περιόδου (περίπου πριν από τέσσερα έως τρία δισεκατομμύρια έτη), ενώ για το ίδιο χρονικό διάστημα παρατηρείται μια αξιοσημείωτη μείωση των ισότοπων $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$. Οι Willbold et al. (2011) θεωρούν ότι οι σημαντικές αυτές μεταβολές στα ισότοπα οφείλονται σε έναν «βομβαρδισμό» μετεωριτών που προκάλεσε την έναρξη της κυκλικής κυκλοφορίας (convection) του μανδύα.

Επίσης σύμφωνα με τον Schmidt (2007) οι περιεκτικότητες των σιδηρόφιλων στοιχείων στον ανώτερο φλοιό της Γης και στους μετεωρίτες είναι παρόμοιες κάτι που επιβεβαιώνει την παραπάνω υπόθεση. Αντίθετα οι περιεκτικότητες του ανώτερου μανδύα σε σιδηρόφιλα στοιχεία δεν παρουσιάζουν ομοιότητες με τις περιεκτικότητες στους μετεωρίτες.

2. ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΗΣ

Η Γη αποτελεί έναν από τους 9 πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος και ο σχηματισμός της σχετίζεται άμεσα με αυτό. Σύμφωνα με την επικρατέστερη θεωρία, το ηλιακό σύστημα δημιουργήθηκε από ένα εκτεταμένο κοσμικό νέφος από σκόνη και αέρια. Στο κέντρο του στροβιλιζόμενου αυτού νεφελώματος δημιουργήθηκε αρχικά ο Ήλιος, που τον περιέβαλε το υπόλειμμα του νεφελώματος με τη μορφή ενός γιγάντιου δίσκου που προοδευτικά διευθετήθηκε σε επιμέρους δακτυλίους. Το υλικό των δακτυλίων συμπυκνώθηκε δημιουργώντας τους πλανήτες. Οι παραπάνω διαδικασίες έγιναν σε συνθήκες σχετικά χαμηλών θερμοκρασιών, με αποτέλεσμα η Γη να αποτελεί αρχικά ένα ψυχρό, στερεό σώμα. Στη συνέχεια θερμοπυρηνικές αντιδράσεις παρήγαγαν τεράστια ενέργεια που προκάλεσαν σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ τα παγιδευμένα ραδιενεργά στοιχεία στο εσωτερικό της, διασπάστηκαν, προκαλώντας τη θέρμανσή της κάτι που ισχύει ακόμη και σήμερα. Τα στοιχεία που προκαλούν με τις ραδιενεργές τους διασπάσεις τη θερμότητα της Γης είναι το K, το U και το Th.

Η ηλικία της Γης υπολογίζεται από τη στιγμή που σχηματίστηκε σαν ξεχωριστός πλανήτης και προσδιορίζεται περίπου στα 4,6 δισεκατομμύρια έτη, ενώ ο παλαιότερος γήινος φλοιός σχηματίστηκε σε μεταγενέστερο στάδιο, στα 3,8 δισεκατομμύρια έτη.

Σε ότι αφορά τη σύσταση και τη δομή, η Γη και οι υπόλοιποι πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Παρόλα αυτά θεωρείται, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ότι προέρχονται από την ίδια αρχέγονη κοσμική ύλη. Οι διαφοροποιήσεις αυτές μεταξύ των πλανητών αποδίδονται στη διαφορετική ισχύ του ηλιακού πεδίου βαρύτητας σε συνδυασμό και με τις πολύ μεγάλες μεταβολές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και θερμότητας, λόγω των διαφορετικών αποστάσεων από τον ήλιο.

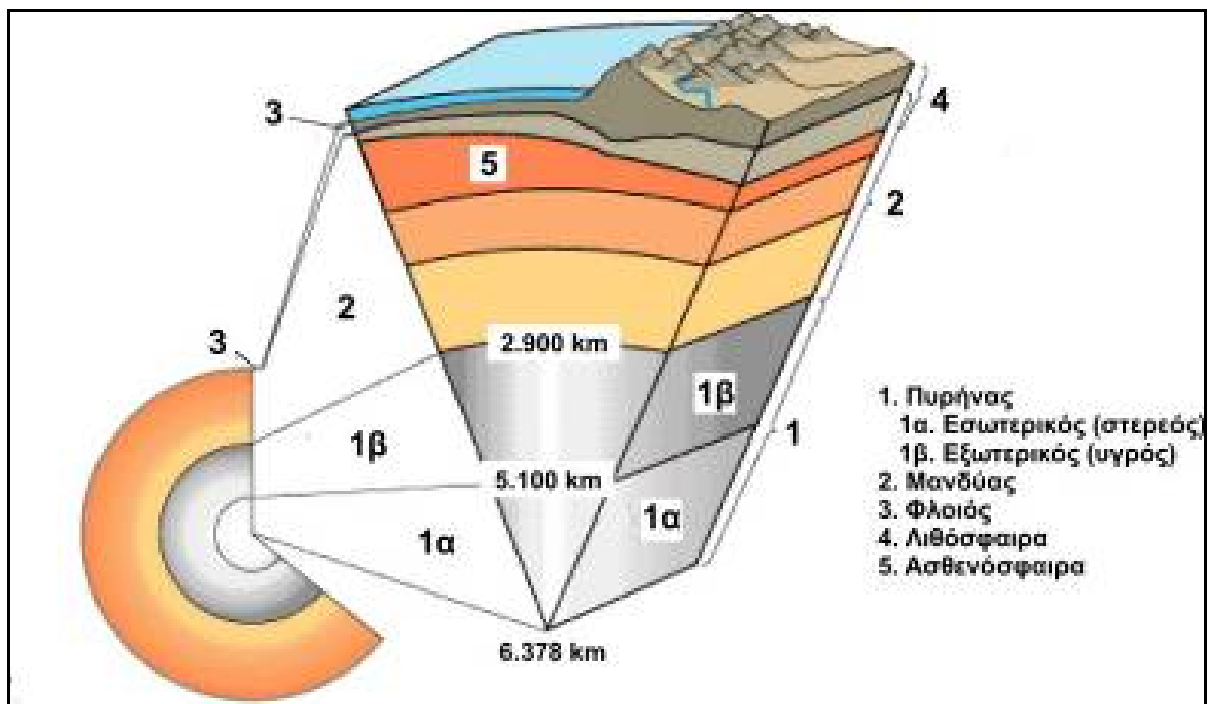
Οι γνώσεις μας για τη δομή και σύσταση του εσωτερικού της Γης, δηλαδή της ορυκτολογικής, πετρογραφικής και χημικής σύστασης των υλικών που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια, προέρχονται είτε από άμεσες γεωλογικές παρατηρήσεις, που περιορίζονται όμως στη περίπτωση αυτή στα επιφανειακά μόνο στρώματα του φλοιού, είτε από τις γεωφυσικές μελέτες και την επεξεργασία των γεωφυσικών δεδομένων που αφορούν το εσωτερικό της Γης, καθώς επίσης και από τη μελέτη και ανάλυση των μετεωριτών. Τα γεωφυσικά δεδομένα θα πρέπει να θεωρούνται ανεπαρκή ως ένα σημείο για να περιγράψουν με πληρότητα, σαφήνεια και αξιοπιστία ένα καθορισμένο μοντέλο σύστασης των υλικών και των θερμοδυναμικών συνθηκών στο εσωτερικό της Γης, αφού πολλές φορές οι φυσικές ιδιότητες διαφορετικής σύστασης πετρωμάτων εμφανίζονται ίδιες ή σχεδόν παρόμοιες. Άλλωστε οι ιδιότητες των υλικών στις ακραίες συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό της Γης δεν είναι γνωστές.

Ο Goldschmidt (1929) εισήγαγε μία θεωρία σχετικά με τη δομή και τη σύσταση της Γης. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή αρχικά ο πλανήτης βρισκόταν σε μία κατάσταση τήξης που με τη σταδιακή ψύξη του διαχωρίστηκε σε τρία μη αναμειγνύμενα ρευστά που οδήγησαν στη διαμόρφωση ενός πυρήνα από Fe-Ni ο οποίος περιβαλλόταν από ένα ρευστό σουλφιδίων (θειούχων μεταλλικών ενώσεων) που με τη σειρά του καλυπτόταν από ένα εξωτερικό φλοιό από πυριτικές ενώσεις. Η θεωρία αυτή μόνο σε γενικές γραμμές ισχύει σήμερα, ενώ ειδικά για τη χημική σύσταση επικρατούν πλέον διαφορετικά μοντέλα.

Σύμφωνα λοιπόν με τις πιο σύγχρονες αντιλήψεις και με βάση τα αποτελέσματα ορυκτολογικών, πετρολογικών, γεωφυσικών και γεωχημικών ερευνών, η Γη διαιρείται σε τρεις κύριες ζώνες που έχουν διαφορετικές φυσικές ιδιότητες και χημική σύσταση. Οι ζώνες αυτές αποτελούνται από ένα συμπαγή πυριτικό εξωτερικό φλοιό, από έναν ημίρρευστο **μανδύα** και από έναν **πυρήνα** που χωρίζεται στον ρευστό εξωτερικό πυρήνα, ο οποίος είναι αρκετά πιο ιξώδης από τον μανδύα, καθώς και στο στερεό εσωτερικό πυρήνα (Σχ. 2.1).

Συνολικά, η κατά προσέγγιση χημική σύσταση της Γης φαίνεται στον πίνακα 2.1. Η κατανομή των χημικών στοιχείων ανάμεσα στον πυρήνα και τον μανδύα καθορίζεται από τους νόμους της Φυσικής και της Χημείας, ενώ η κατανομή των στοιχείων στο φλοιό εξαρτάται κυρίως από τις διαφορές στις ιοντικές ακτίνες και τον αριθμό οξείδωσής τους, σε σχέση με τα κύρια στοιχεία του μανδύα (Fe, Mg).

Οι ζώνες από τις οποίες αποτελείται η Γη είναι αποτέλεσμα μίας χημικής διαφοροποίησης που αφορά ολόκληρο τον πλανήτη και για το λόγο αυτό έχουν διαφορετική σύσταση.



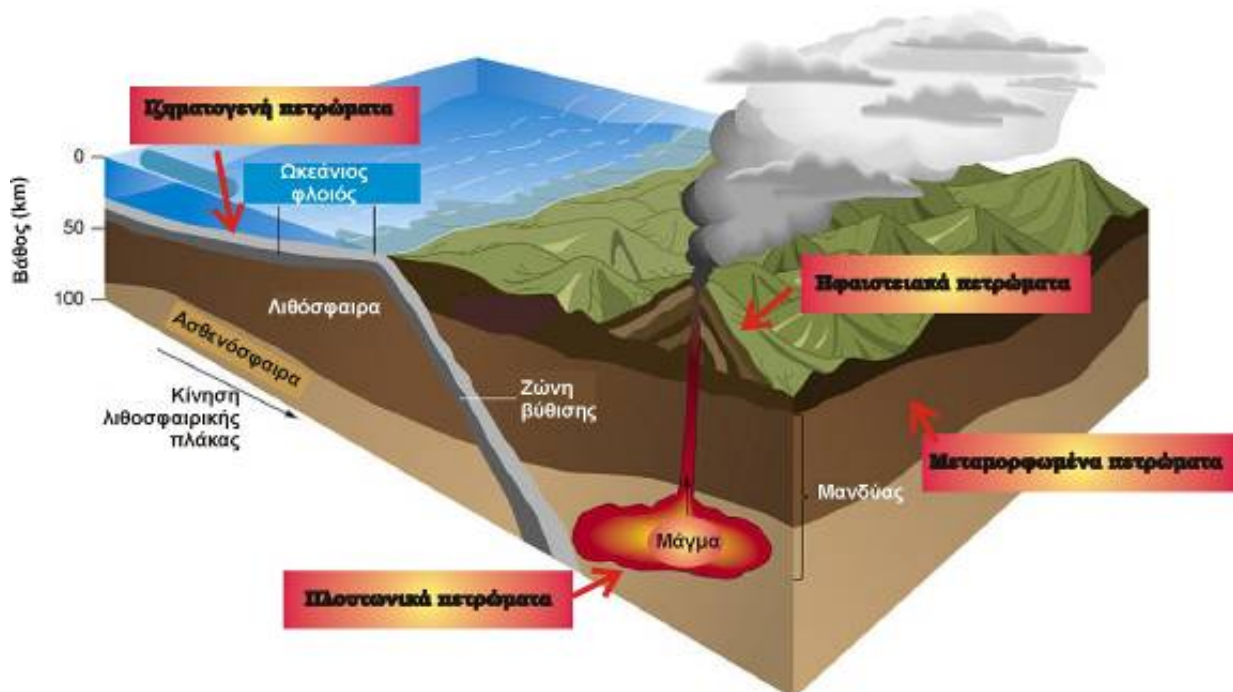
Σχ. 2.1. Η Γη διαιρείται σε τρεις ζώνες που έχουν διαφορετικές φυσικές ιδιότητες και χημική σύσταση: φλοιός, μανδύας, πυρήνας.

Πίνακας 2.1. Συνολική χημική σύσταση της Γης (Henderson 1982).

Σίδηρος	34,63%	Θείο	1,93%	Μαγγάνιο	0,22%
Οξυγόνο	29,53%	Ασβέστιο	1,13%	Κοβάλτιο	0,13%
Πυρίτιο	15,20%	Αργίλιο	1,09%	Φώσφορος	0,10%
Μαγνήσιο	12,70%	Νάτριο	0,57%	Κάλιο	0,07%
Νικέλιο	2,39%	Χρώμιο	0,26%	Τιτάνιο	0,05%

2.1. Δομή και σύσταση του φλοιού

Ο φλοιός της Γης είναι ανομοιογενής, τόσο στη χημική του σύσταση όσο και στο είδος των πετρωμάτων από τα οποία αποτελείται. Τα πετρώματα ανάλογα με τον τρόπο που σχηματίζονται κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες: στα **πυριγενή**, **ιζηματογενή** και **μεταμορφωμένα** (Σχ. 2.2). Τα **πυριγενή** είναι πετρώματα που προκύπτουν από τη στερεοποίηση ή κρυστάλλωση ενός μάγματος και ανάλογα με το βάθος που σχηματίζονται, διακρίνονται σε **πλουτωνικά** (μεγάλο βάθος) και σε **ηφαιστειακά** (επιφάνεια της Γης). Τα **ιζηματογενή** πετρώματα σχηματίζονται από την καθίζηση λεπτόκοκκων ή αδρόκοκκων υλικών στην επιφάνεια της Γης μέσα σε κάποιο μέσο, που μπορεί να είναι η ατμόσφαιρα ή το νερό. Τέλος, τα **μεταμορφωμένα** πετρώματα είναι αυτά που προέρχονται από μεταμόρφωση άλλων πετρωμάτων, μέσω ιστολογικών ή ορυκτολογικών μεταβολών, σε στερεή κατάσταση, υπό την επίδραση υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων.



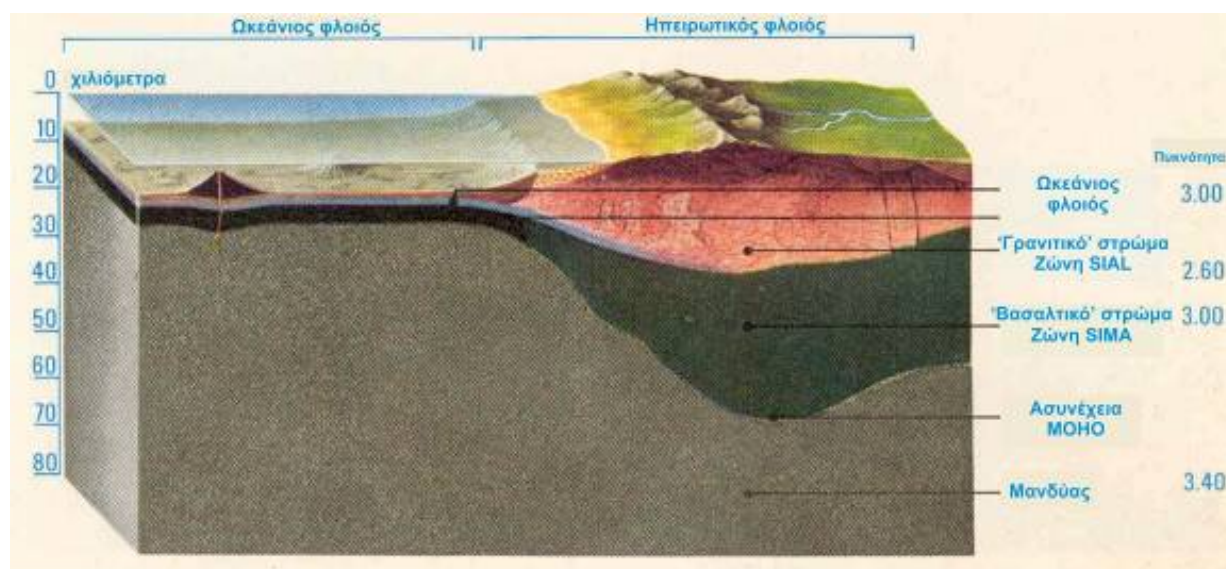
Σχ. 2.2. Τα πετρώματα ανάλογα με τον τρόπο που σχηματίζονται κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες: τα πυριγενή (πλουτωνικά ή ηφαιστειακά), τα ιζηματογενή και τα μεταμορφωμένα.

2.1.1. Δομή του φλοιού

Ο γήινος φλοιός εκτείνεται από την επιφάνεια της Γης μέχρι την ασυνέχεια Mohorovicic ή “Moho”, που διαχωρίζει το φλοιό από τον υποκείμενο μανδύα (Σχ. 2.3), όπου παρατηρείται μία απότομη αύξηση της ταχύτητας των επιμήκων (P) και των εγκαρσίων (S) σεισμικών κυμάτων. Το βάθος της ασυνέχειας αυτής δεν είναι σταθερό σε όλο τον πλανήτη αλλά παρουσιάζει σημαντικές διαφορές μεταξύ του ηπειρωτικού (μέσο πάχος: 33 km) και του ωκεάνιου φλοιού (μέσο πάχος: 5-8 km). Οι δύο αυτοί τύποι φλοιού, ο **ωκεάνιος** και ο **ηπειρωτικός** (Σχ. 2.3), παρουσιάζουν μεταβολές στην πετρογραφική, ορυκτολογική και χημική σύσταση. Η μάζα του φλοιού αντιπροσωπεύει πολύ μικρό ποσοστό της συνολικής μάζας της Γης (< 1%).

Ο φλοιός μαζί με το ανώτερο τμήμα του μανδύα χαρακτηρίζονται με τον όρο **Λιθόσφαιρα**, ενώ το τμήμα του μανδύα που υπόκειται της λιθόσφαιρας ονομάζεται **Ασθενόσφαιρα**.

Το ανώτερο τμήμα του φλοιού καλύπτεται κυρίως από ιζηματογενή πετρώματα που έχουν μέγιστο πάχος 1-2 km. Ακολουθεί ένα στρώμα γρανιτικής ή γρανοδιοριτικής σύστασης με πάχος που φθάνει περίπου 15 km και έχει μέση πυκνότητα 2.7 gr/cm^3 . Κάτω από το στρώμα υπάρχει το βασαλτικό στρώμα με πυκνότητα 3.0 gr/cm^3 που περιλαμβάνει πετρώματα βασικής ή/και υπερβασικής σύστασης (γάββροι, αμφιβολίτες, εκλογίτες). Το γρανιτικό-γρανοδιοριτικό στρώμα υπάρχει μόνο στον ηπειρωτικό φλοιό και όχι στον ωκεάνιο φλοιό (Σχ. 2.3).



Σχ. 2.3. Δομή του φλοιού της Γης.

2.1.2. Σύσταση του φλοιού

Οι εκτιμήσεις της μέσης χημικής σύστασης του ηπειρωτικού και του ωκεάνιου φλοιού δίνονται στον Πίνακα 2.2, από όπου φαίνεται ότι ο ηπειρωτικός φλοιός είναι πλουσιότερος σε SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O και K_2O .

Αντίθετα ο ωκεάνιος φλοιός έχει υψηλότερες περιεκτικότητες σε MgO και CaO.

Με βάση τα αποτελέσματα πολυάριθμων χημικών αναλύσεων σε διάφορους τύπους πετρωμάτων, προκύπτει ότι το γρανιτικής σύστασης τμήμα του φλοιού της Γης περιέχει ενώσεις του O με το Si και το Al σε ποσοστό πάνω από 90% και για το λόγο αυτό χαρακτηρίζεται ως ζώνη **SIAL**. Εδώ αφθονούν τα αργιλιοπυριτικά ορυκτά, όπως οι καλιούχοι άστριοι $[K(Al, Si_3)O_8]$, τα όξινα πλαγιόκλαστα $[Na(Al, Si_3)O_8]$, οι λευκοί μαρμαρυγίες $[KAl_2(Al, Si_3)O_{10}(OH)]$, καθώς επίσης και ο χαλαζίας (SiO_2). Η μέση πυκνότητα της ζώνης SIAL είναι περίπου 2.6 g/cm^3 .

Πίν. 2.2. Εκτίμηση της μέσης σύστασης του ηπειρωτικού και του ωκεάνιου φλοιού (Taylor & McLennan 1985). * ολικός Fe.

	Ηπειρωτικός φλοιός (κβ %)	Ωκεάνιος φλοιός (κβ %)
SiO ₂	58,0	47,8
TiO ₂	0,8	0,6
Al ₂ O ₃	18,0	12,1
FeO*	7,5	9,0
MgO	3,5	17,8
CaO	7,5	11,2
Na ₂ O	3,5	1,3
K ₂ O	1,5	0,1
H ₂ O	-	1,0

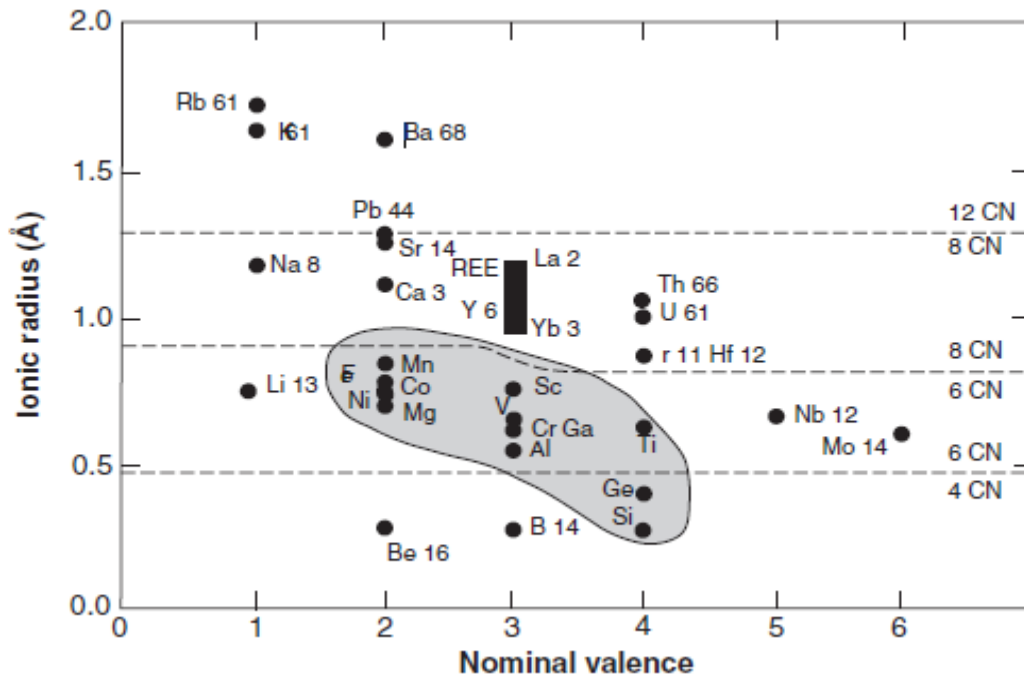
Το βασαλτικό στρώμα, αν και περιέχει λιγότερο SiO₂, χαρακτηρίζεται από Si και Mg, και για το λόγο αυτό ονομάζεται ζώνη **SIMA**. Εδώ επικρατούν αργιλιοπυριτικές ενώσεις του Mg και Fe με τη μορφή ορυκτών όπως η κεροστίλβη $[Ca_2(Mg_4(Al, Fe))Si_7AlO_{22}(OH)_2]$, οι πυρόξενοι $[(Ca, Na)(Mg, Fe, Al)Si_2O_6]$, ο ολιβίνης $[(Mg, Fe)_2SiO_4]$, καθώς και τα βασικά πλαγιόκλαστα $[Ca(Si, Al)_4O_8]$. Η μέση πυκνότητα της ζώνης SIMA είναι περίπου 3.0 g/cm^3 .

Η κατανομή των χημικών στοιχείων στο φλοιό εξαρτάται κυρίως από τις διαφορές στις ιοντικές ακτίνες και τον αριθμό οξειδώσής τους σε σχέση με τα κύρια στοιχεία του μανδύα, δηλαδή του Fe και Mg (Σχ. 2.4).

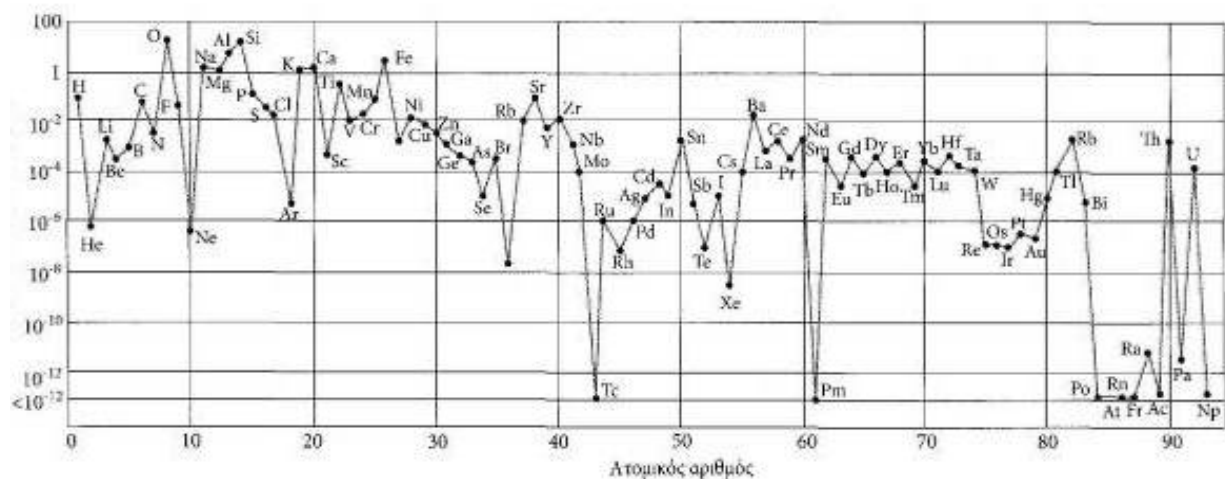
Στο σχήμα 2.5 περιγράφεται η σχέση της συχνότητας των στοιχείων του φλοιού με τον ατομικό τους αριθμό. Οκτώ στοιχεία και συγκεκριμένα τα O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg παίζουν βασικό ρόλο στη σύσταση του φλοιού και αποτελούν το 99% του συνόλου της μάζας του. Από τα στοιχεία αυτά το οξυγόνο και το Si είναι τα επικρατέστερα με μεγάλη διαφορά από τα υπόλοιπα.

Βλέπουμε δηλαδή ότι ο φλοιός της Γης αποτελείται κυρίως από πυριτικές ενώσεις του O με Al, Ca, Mg, Na, K και Fe. Από άποψη βάρους το οξυγόνο προσεγγίζει σε ποσοστό 50% του συνολικού βάρους του φλοιού, ενώ αν υπολογίσουμε τη συμμετοχή σε αριθμό ατόμων τότε εμφανίζεται με ποσοστό μεγαλύτερο από 60%. Τέλος, αν ληφθεί υπόψη ο όγκος των ατόμων ή καλύτερα οι διαστάσεις των ιόντων στις διάφορες ενώσεις (ακτίνα ιόντος), τότε το

ποσοστό του οξυγόνου φτάνει σχεδόν το 92% του συνολικού όγκου των στοιχείων του φλοιού.



Σχ. 2.4. Ο εμπλουτισμός ενός στοιχείου στον ηπειρωτικό φλοιό εξαρτάται από τις διαφορές στην ιοντική ακτίνα και το σθένος του από τα άφθονα στοιχεία στον Μανδύα (σκιασμένη περιοχή).



Σχ. 2.5. Διάγραμμα που δείχνει τη σχέση της συχνότητας των στοιχείων του φλοιού με τον ατομικό τους αριθμό (Mason & Moore 1982).

Έτσι μπορούμε να πούμε ότι ο φλοιός της Γης αποτελεί ένα σύνολο ανιόντων οξυγόνου που δεσμεύονται με ιόντα Si και άλλων έξι στοιχείων. Γι' αυτό και ο Goldschmidt χαρακτήρισε τη λιθόσφαιρα και ως **οξύσφαιρα**.

Οι περισσότερες μελέτες σε ότι αφορά τον ανώτερο φλοιό αναφέρονται στα **πυριγενή πετρώματα**. Η μέση χημική σύσταση των πυριγενών πετρωμάτων

(Πίν. 2.3) θεωρείται αντιπροσωπευτική της μέσης σύστασης του ανώτερου φλοιού εφόσον το 66% αυτού αποτελείται από αυτό τον τύπο πετρωμάτων.

Πίν. 2.3. Μέση χημική σύσταση (% κ.β.) πυριγενών πετρωμάτων του ανώτερου φλοιού (Wedepohl 1971).

SiO₂	TiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	FeO	MnO
65,4	0,7	14,8	1,4	3,3	0,1
MgO	CaO	Na₂O	K₂O	H₂O	P₂O₅
2,3	4,0	3,3	3,4	0,6	0,2

Έτσι είναι σημαντικό όταν μελετάται η κατανομή των χημικών στοιχείων στα ίζηματογενή και μεταμορφωμένα πετρώματα που έχουν σχηματιστεί δευτερογενώς από πυριγενή, να προσδιορίζεται το αρχικό πυριγενές πέτρωμα.

Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται τα χημικά στοιχεία που έχουν μικρότερη συμμετοχή στα πετρώματα και ονομάζονται ιχνοστοιχεία, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως “καθοδηγητικά”. Τέτοια στοιχεία είναι το Ba, το Rb και ο Pb που εμφανίζονται κυρίως στα γρανιτικού τύπου πετρώματα, και το Ni, το Cr και το Co που βρίσκονται πιο συχνά στους περιδοτίτες και στους βασάλτες.

Το Eu (στοιχείο των σπανίων γαιών - REE) αποτελεί το μόνο στοιχείο του περιοδικού πίνακα που μπορεί να παρέχει τόσες πληροφορίες στη μελέτη του φλοιού της Γης και της εξέλιξης αυτού, λόγω του μοναδικού συνδυασμού αριθμού οξείδωσης, ιοντικής ακτίνας και πτητικότητας. Είναι το πιο χρήσιμο στοιχείο στη γεωχημική έρευνα. Η δημιουργία φλοιού συγκεντρώνει ασυμβίβαστα στοιχεία προς την επιφάνεια. Αυτές οι διεργασίες επιταχύνουν την πτώση θερμοκρασιών στον μανδύα διότι αποβάλλονται μαζί και τα ραδιενεργά στοιχεία K, U και Th, στα οποία οφείλεται κατά μεγάλο μέρος η θερμοκρασία των βαθύτερων τμημάτων της Γης.

Σχετικά με τα υπόλοιπα στοιχεία διαπιστώθηκε ότι ορισμένα από αυτά που θεωρούνται σημαντικά για την οικονομική ανάπτυξη και πολύ γνωστά στην καθημερινή τους χρήση, όπως ο Cu, ο Pb, το Cr, το Ni, το Mn, ο Au κ.ά., είναι αρκετά σπάνια και όπου εμφανίζονται σε σχετικά υψηλότερες περιεκτικότητες σε σχέση με το φλοιό, σχηματίζονται τα **κοιτάσματα**. Με τον όρο αυτό ονομάζουμε κάθε φυσική συγκέντρωση ορυκτών πρώτων υλών η οποία είναι οικονομικά εκμεταλλεύσιμη με βάση τις σημερινές συνθήκες.

2.2. Δομή και σύσταση του μανδύα

Ο μανδύας (Σχ. 2.1) εκτείνεται από την ασυνέχεια Moho (βάθος 15-70 km) μέχρι την ασυνέχεια Gutenberg (βάθος 2900 km) και η σύστασή του είναι περισσότερο ομοιογενής σε σύγκριση με το φλοιό. Αποτελεί το 82% του όγκου της Γης και το 65% της μάζας της. Από γεωφυσικά δεδομένα προκύπτει ότι η δομή του μανδύα περιλαμβάνει επάλληλες στρώσεις υλικών με διαφορές στη σύσταση και στις ελαστικές ιδιότητες με αποτέλεσμα να διακρίνεται σε επί μέρους ζώνες: α) τον ανώτερο μανδύα, μέχρι βάθος 400 km, β) τη μεταβατική

ζώνη, από 400 Km ως 1000 km και γ) τον εσωτερικό μανδύα, που φθάνει έως 2900 km βάθος.

Σε αντίθεση με τον φλοιό ο οποίος βρίσκεται σε άμεση παρατήρηση και μελέτη από τους ερευνητές, ο μανδύας αποτελεί ένα μυστήριο και για το λόγο αυτό η φύση του, ιδιαίτερα του ανώτερου μανδύα και της μεταβατικής ζώνης, έγιναν αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας, αλλά και συχνών επιστημονικών διαφωνιών και αντιπαραθέσεων. Σήμερα γίνεται αποδεκτό ότι στον ανώτερο μανδύα και στη μεταβατική ζώνη βρίσκεται το κλειδί για τη λύση πολλών γεωλογικών και γεωχημικών προβλημάτων, όπως της προέλευσης του μάγματος, της δημιουργίας σεισμών μεγάλου εστιακού βάθους καθώς και της κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών που απαρτίζουν τον φλοιό.

2.2.1. Μέθοδοι εκτίμησης της χημικής σύστασης του μανδύα

Με βάση τη γενική θεώρηση γίνεται αποδεκτό ότι τα κύρια χημικά στοιχεία με τη μεγαλύτερη πυκνότητα, βρίσκονται προς το κέντρο της Γης, ενώ τα ελαφρύτερα στοιχεία καθώς και εκείνα που εισέρχονται στα μάγματα και σχηματίζουν ελαφρύτερα ορυκτά, συγκεντρώνονται προς το φλοιό. Λόγω της αδυναμίας να προσεγγίσουμε τον μανδύα έχουν αναπτυχθεί δύο ομάδες θεωριών, με βάση τις οποίες γίνεται προσπάθεια να εκτιμηθεί η σύστασή του: 1) η κοσμοχημική θεωρία και 2) τα πετρολογικά μοντέλα.

1) Η κοσμοχημική θεωρία δέχεται ότι το ηλιακό σύστημα και οι μετεωρίτες αποτελούν τα βασικά «δομικά» υλικά τα οποία μπορούν να συγκριθούν με τα υλικά του μανδύα. Υπολογισμοί έχουν δείξει ότι υπάρχουν ομοιότητες στις αναλογίες συγκεκριμένων χημικών στοιχείων όπως Mg/Si, Al/Si και Fe/Si, μεταξύ του μανδύα και του ηλιακού συστήματος (Palme & O'Neill 2005). Εντούτοις η κοσμοχημική θεωρία αφορά περισσότερο στη συνολική χημική σύσταση της Γης, παρά στη σύσταση αποκλειστικά του μανδύα.

2) Τα πετρολογικά μοντέλα βασίζονται στο σκεπτικό ότι οι βασάλτες (ηφαιστειακά πετρώματα βασικής σύστασης) αντιπροσωπεύουν τήγματα από το μανδύα, και ότι οι περιδοτίτες (μαγματικά πετρώματα υπερβασικής σύστασης) αποτελούν στερεοποιημένα κατάλοιπα του μανδύα που έχουν φθάσει στην επιφάνεια της Γης με τις τεκτονικές κινήσεις. Με βάση αυτό το σκεπτικό θα μπορούσε κάποιος να θεωρήσει ότι η χημική σύσταση του μανδύα, και ιδιαίτερα του ανώτερου μανδύα, αντιπροσωπεύει μία μείξη των συστάσεων των προαναφερθέντων πετρωμάτων.

Στον πίνακα 2.4 δίνεται η μέση σύσταση του μανδύα όπως προκύπτει από την γενική παραδοχή ότι η ολική σύσταση του Ήλιου ταυτίζεται με τη σύσταση του μανδύα (Κοσμοχημική θεωρία) αλλά και με βάση τη χημική σύσταση των πετρωμάτων που έχουν προέρθει από τον ανώτερο μανδύα (Πετρολογικά μοντέλα).

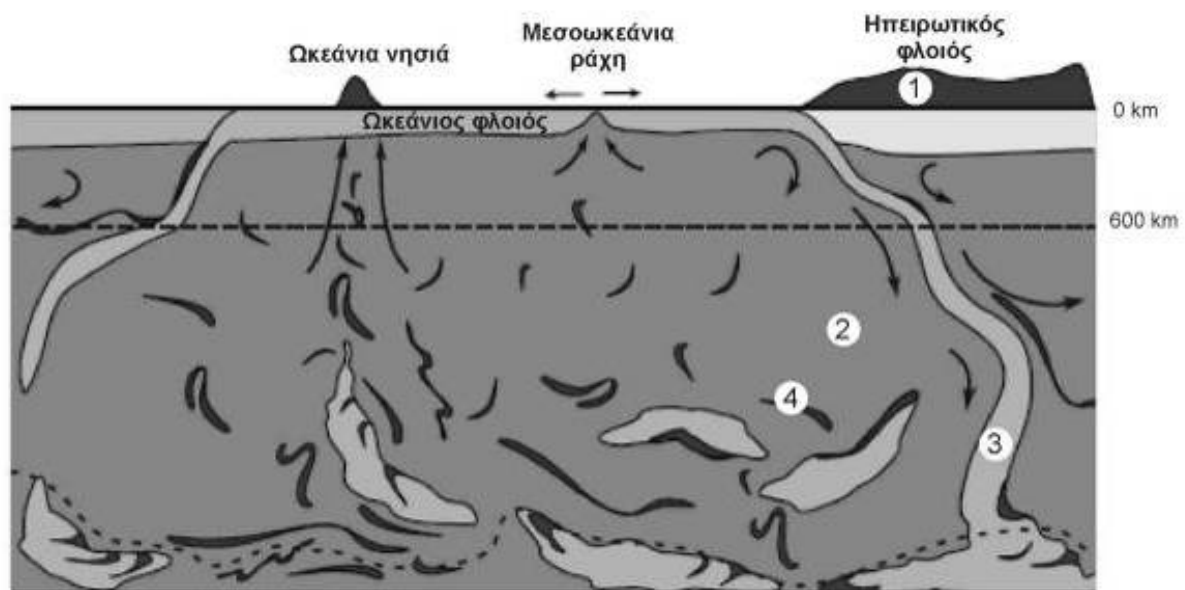
Τα αποτελέσματα από αυτές τις δύο προσεγγίσεις σε ένα γενικό πλαίσιο ταιριάζουν αρκετά καλά. Αν όμως προσπαθήσουμε να τα εφαρμόσουμε σε

μικρότερη κλίμακα τότε θα προκύψουν διαφορές που οφείλονται πιθανώς στο σφάλμα από το μοντέλο υπολογισμού με βάση τη σύσταση του Ήλιου.

Πίν. 2.4. Μέση χημική σύσταση (% κ.β.) του μανδύα της Γης με βάση τη μέση σύσταση του Ήλιου και τη σύσταση των πετρωμάτων που προέρχονται από τον ανώτερο μανδύα (Palme & O'Neil 2005).

	Μανδύας της Γης με βάση το μοντέλο του Ήλιου	Μανδύας της Γης με βάση τη σύσταση των πετρωμάτων από τον ανώτερο μανδύα
MgO	35,8	36,77
SiO ₂	51,2	45,40
FeO	6,3	8,10
Al ₂ O ₃	3,7	4,49
CaO	3,0	3,65

Για τη σύσταση του μανδύα θα πρέπει να θεωρήσουμε ότι αυτός προέρχεται από έναν αρχικό μανδύα (primitive mantle) από τότε που σχηματίστηκε η Γη και πριν από τη δημιουργία των λιθοσφαιρικών πλακών. Η τεκτονική όμως των λιθοσφαιρικών πλακών με τις διαρκείς κινήσεις και τις βυθίσεις της μίας πλάκας κάτω από μία άλλη, στα ηπειρωτικά περιθώρια, έχουν δημιουργήσει σημαντικές μετακινήσεις μαζών μεταξύ του ανώτερου και του κατώτερου μανδύα και έχουν προκαλέσει μεταβολές στη χημική τους σύσταση (Lyubetskaya & Korenaga 2007). Οι κινήσεις αυτές είναι η αιτία της μεταβολής στην ομοιογένεια του μανδύα που οδηγούν σε πλευρικές διακυμάνσεις στη χημική σύστασή του, η οποία οφείλεται στα βυθισμένα τμήματα των λιθοσφαιρικών πλακών που έχουν χημική σύσταση διαφορετική από τον περιβάλλοντα μανδύα (Σχ. 2.6).



Σχ. 2.6. Σχήμα που δείχνει το προτιμώμενο μοντέλο για τη δομή του μανδύα της Γης, από τους Lyubetskaya & Korenaga (2007). (1) Φλοιός της Γης εμπλουτισμένος σε ασυμβίβαστα στοιχεία, (2) Μανδύας που έχει εκπλυθεί στα ασυμβίβαστα στοιχεία, (3) Ωκεάνιος φλοιός που βυθίζεται στον μανδύα, (4) Τμήματα του βυθισμένου ωκεάνιου φλοιού.

2.2.2. Σύσταση του ανώτερου μανδύα.

Τα πετρώματα που προέρχονται από τον ανώτερο μανδύα και χρησιμοποιούνται για το μοντέλο προσδιορισμού της σύστασής του περιλαμβάνουν: α) ξενόλιθους από περιδοτίτη (στερεοποιημένα τμήματα από το μανδύα που μεταφέρονται στην επιφάνεια με τους κίμπερλίτες και τους βασάλτες), β) περιδοτίτες (τμήματα των ωκεάνιων φλοιών που έχουν επωθηθεί στο φλοιό της Γης) και γ) αρχικά μάγματα υψηλής θερμοκρασίας (π.χ. βασάλτες και κοματίτες).

Γεωχημική μελέτη των παραπάνω πετρωμάτων δείχνουν ότι η σύσταση του ανώτερου μανδύα, τουλάχιστον μέχρι το βάθος των 150 km, είναι κυρίως περιδοτιτική. Οι περιδοτίτες είναι υπερβασικά πετρώματα με κυριότερα ορυκτά τον ολιβίνη [Mg_2SiO_4] και τους πυροξένους [$(Ca,Na)(Mg,Fe,Al)Si_2O_6$]. Σύμφωνα με τους Palme and O'Neill (2005) η μέση χημική τους σύσταση αποτελείται κυρίως από MgO (35-46%) και SiO_2 (43-46%), καθώς και από μικρότερες ποσότητες άλλων στοιχείων, όπως FeO (8%), Cr_2O_3 (0,4%), Ni (2200 ppm), Co (100 ppm) και Ir (3,2 ppb). Παράλληλα, ο ανώτερος μανδύας περιλαμβάνει ως πρόσθετα στοιχεία το Ca, το Al και το Na.

Γενικά θεωρείται ότι ο ανώτερος μανδύας σε σχέση με τον αρχικό μανδύα (primitive mantle) είναι εκπλυμένος σε μία σειρά από στοιχεία που μετακινήθηκαν, έως και κατά 90%, όταν σχηματιζόταν ο στερεός φλοιός, όπως το K, Na, Rb, Sr, Ba, La, U και Th. Τα στοιχεία αυτά ονομάζονται ασυμβίβαστα (incompatible elements), καθώς και λιθόφιλα. Η χημική σύσταση του ανώτερου μανδύα αντιπροσωπεύεται από τη σύσταση των περιδοτιτών που περιέχουν συμβατά στοιχεία (compatible elements), όπως Mg, Cr, Co, Ni, Os, Ir.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω οι κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών με την καταβύθισή τους στα ηπειρωτικά περιθώρια, δημιουργούν έναν εμπλουτισμό στον ανώτερο μανδύα με τα στοιχεία του φλοιού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο ανώτερος μανδύας να παρουσιάζει μία σημαντική ετερογένεια λόγω της προσθήκης στοιχείων από τις καταδυόμενες λιθοσφαιρικές πλάκες.

2.2.3. Σύσταση της μεταβατικής ζώνης.

Σε μία πρώτη προσέγγιση η μεταβατική ζώνη συνίσταται από MgO και SiO_2 που ανταποκρίνεται σε ένα μίγμα των ορυκτών ολιβίνη [Mg_2SiO_4] και πυροξένων [$MgSiO_3$]. Χαρακτηριστικό της μεταβατικής ζώνης του μανδύα είναι η μετατροπή των σιδηρο-μαγνησιούχων ορυκτών από ολιβίνη σε σπινέλιο. Η βασικότερη αιτία της μετατροπής αυτής είναι η αύξηση της πίεσης λόγω του βάθους. Η πυκνότητα στη μεταβατική ζώνη είναι $3.2-3.9 \text{ g/cm}^3$.

Σημαντική εξέλιξη στην κατανόηση της φύσης της μεταβατικής ζώνης του μανδύα αποτελεί η πραγματοποίηση εργαστηριακών πειραμάτων σε ορυκτές φάσεις ολιβίνη, πυροξένων και άλλων ορυκτών σε συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης που γίνονται θεωρητικά αποδεκτές σήμερα για την μεταβατική ζώνη του

μανδύα (400-1000 km). Έτσι η σεισμική ασυνέχεια μεταξύ του ανώτερου μανδύα και της μεταβατικής ζώνης είναι αποτέλεσμα πολυμορφικών μετατροπών ολιβίνη σε συνθήκες υψηλής πίεσης.

2.2.4. Σύσταση του κατώτερου μανδύα

Ο κατώτερος μανδύας εκτείνεται μεταξύ 1000 και 2900 km, και δείχνει να είναι ομοιογενής. Είναι πλέον αποδεκτό ότι έχει διαφορετική σύσταση από τον ανώτερο μανδύα και θεωρείται ότι είναι στερεός και έχει πυκνότητα $5-9 \text{ g/cm}^3$. Πιθανόν αποτελείται από ένα μίγμα $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ με δομή ιλμενίτη και $(\text{Mg,Fe})\text{O}$ με δομή περίκλαστου. Ο κατώτερος μανδύας έχει αυξημένες περιεκτικότητες σε Fe και η μοριακή σχέση $\text{FeO}/\text{FeO}+\text{MgO}$ υπολογίζεται μεταξύ 0.1 και 0.2.

Σύμφωνα με τις νεότερες απόψεις ο κατώτερος μανδύας είναι πλούσιος σε πυρόξενο με δομή περοβσκίτη (CaTiO_3) με τον λόγο Mg/Si να είναι παρόμοιος με αυτόν στους χονδριτικούς μετεωρίτες.

2.3. Σύσταση του πυρήνα

Ο πυρήνας εκτείνεται από την ασυνέχεια Gutenberg μέχρι το κέντρο της Γης, δηλαδή από τα 2900 μέχρι τα 6378 km (Σχ. 2.1). Η δομή του και η σύστασή του προσδιορίζονται με βάση τις γεωφυσικές παρατηρήσεις όπως: α) η απότομη αύξηση της πυκνότητας των υλικών στο όριο κατώτερου μανδύα-πυρήνα, β) η αδυναμία διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων σε βάθη μεγαλύτερα των 2900 km και γ) η απότομη μείωση της ταχύτητας των επιμήκων σεισμικών κυμάτων στα 2900 km, και η σταδιακή τους αύξηση στη συνέχεια, με κάποια ανάκαμψη στα 5100 km. Έτσι λοιπόν ότι ο πυρήνας έχει πυκνότερη δομή από το μανδύα και αποτελείται από δύο τμήματα, τον ρευστό εξωτερικό και τον στερεό εσωτερικό πυρήνα, το όριο των οποίων βρίσκεται στα 5100 km. Η μέση πυκνότητά του είναι 11 g/cm^3 .

Ο πυρήνας χημικά θεωρείται πιο απλός από τον μανδύα. Είναι μεταλλικός και αποτελείται κυρίως από ένα κράμα Fe-Ni σε ποσοστό περίπου 90%, ενώ το 10% αποτελείται από άλλα στοιχεία (Πίν. 2.5).

Οι γεωχημικές και κοσμοχημικές έρευνες και τα πειραματικά δεδομένα έχουν ως στόχο να διερευνήσουν ποια μπορεί να είναι τα επιπρόσθετα στοιχεία που συγκεντρώνονται στον πυρήνα. Σύμφωνα με τον McDonough (2001) τα στοιχεία αυτά θα πρέπει να είναι σιδηρόφιλα, αφού αυτή η κατηγορία στοιχείων συγκεντρώθηκε στον πυρήνα με τη διαφοροποίηση λόγω του σχηματισμού των ζωνών της Γης. Πιο συγκεκριμένα η χημική σύστασή του αποτελείται από 85% Fe, 5% Ni, 6% Si, 2% S, ~0,9% Cr και 0,2-0,4% P, Mn, Co και Cr (Πίν. 2.5). Τα στοιχεία Si και S είναι ελαφρά στοιχεία σε σχέση με τα υπόλοιπα και συμπεριφέρονται ως σιδηρόφιλα κάτω από ιδιαίτερα αναγωγικές συνθήκες.

Ο Fe αποτελεί το κυριότερο στοιχείο του πυρήνα και πιθανόν σχετίζεται με το μαγνητικό πεδίο της Γης σε σχέση με την υγρή φάση του εξωτερικού πυρήνα και σε συνδυασμό με την παρουσία Ni.

Πίνακας 2.5. Χημική σύσταση του πυρήνα σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του McDonough (2001). Όλες οι τιμές σε ppm, εκτός από όπου αναφέρεται % που είναι % κ.β.

H	600	Zn	0	Pr	0
Li	0	Ga	0	Nd	0
Be	0	Ge	20	Sm	0
B	0	As	5	Eu	0
C	2000	Se	8	Gd	0
N	75	Br	0.7	Tb	0
O %	0	Rb	0	Dy	0
F	0	Sr	0	Ho	0
Na %	0	Y	0	Er	0
Mg %	0	Zr	0	Tm	0
Al %	0	Nb	0	Yb	0
Si %	6.0	Mo	5	Lu	0
P	3500	Ru	4	Hf	0
S	19000	Rh	0.74	Ta	0
Cl	200	Pd	3.1	W	0.47
K	0	Ag	0.15	Re	0.23
Ca %	0	Cd	0.15	Os	2.8
Sc	0	In	0	Ir	2.6
Ti	0	Sn	0.5	Pt	5.7
V	150	Sb	0.13	Au	0.5
Cr	9000	Te	0.85	Hg	0.05
Mn	3000	I	0.13	Tl	0.03
Fe %	85	Cs	0.065	Pb	0.4
Co	2500	Ba	0	Bi	0.03
Ni	52000	La	0	Th	0
Cu	125	Ce	0	U	0

3. ΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Ο Goldschmidt (1929) ήταν ο πρώτος που, σύμφωνα με τη γεωχημική τους συμπεριφορά και την τάση κατανομής τους σε καταστάσεις τήγματος, χώρισε τα χημικά στοιχεία σε 4 ομάδες: τα σιδηρόφιλα, τα χαλκόφιλα, τα λιθόφιλα και τα ατμόφιλα (Σχ. 3.1).

	1																	18	
1	1 H	2																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	**	(104) Rf	(105) Db	(106) Sg	(107) Bh	(108) Hs	(109) Mt	(110) Ds	(111) Rg	(112) Cn	(113) Uut	(114) Uuq	(115) Uup	(116) Uuh	(117) Uus	(118) Uuo	
Λανθανίδες	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu				
Ακτινίδες	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	(95) Am	(96) Cm	(97) Bk	(98) Cf	(99) Es	(100) Fm	(101) Md	(102) No	(103) Lr				

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

Λιθόφιλα	Σιδηρόφιλα	Χαλκόφιλα	Ατμόφιλα	Πολύ σπάνια
----------	------------	-----------	----------	-------------

Σχήμα 3.1. Ταξινόμηση των χημικών στοιχείων του περιοδικού πίνακα με βάση τη γεωχημική τους συμπεριφορά (Goldschmidt (1929)).

Σιδηρόφιλα ονομάζονται τα στοιχεία που δημιουργούν ενώσεις πιο εύκολα με το Fe, και πιο δύσκολα με το O και το S. Για το λόγο αυτό στους μετεωρίτες αφθονούν στις μεταλλικές ορυκτές φάσεις, παρά στις πυριτικές ή τις σουλφιδικές και είναι πιο διαδεδομένα στους σιδηρομετεωρίτες. Είναι ιδιαίτερα άφθονα στον πυρήνα της Γης. Τα σιδηρόφιλα στοιχεία (Fe, Co, Ni, Cr, Mn, Re, Os, Mo, Au, PGE: Pt, Ru, Rh, Pd, Os και Ir) χαρακτηρίζονται από ατελή συμπλήρωση του φλοιού των ηλεκτρονίων και έχουν μικρό όγκο.

Χαλκόφιλα ονομάζονται τα στοιχεία που έχουν μεγάλη συγγένεια με το S και οι ενώσεις τους παρουσιάζουν τάση διάλυσης σε τήγματα σουλφιδίων. Για το λόγο αυτό έχουν την τάση να σχηματίζουν σταθερά σουλφίδια (θειούχα ορυκτά) και αφθονούν στη σουλφιδική φάση των μετεωριτών παρά στη μεταλλική ή την πυριτική. Τα στοιχεία αυτά είναι διαδεδομένα κυρίως στο μανδύα της Γης παρά στον πυρήνα και στον φλοιό. Τα χαλκόφιλα στοιχεία (Cu,

Zn, Ag, Pb, Bi, Hg, Cd) χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη 16 ηλεκτρονίων στο φλοιό, ενώ ο ατομικός τους όγκος δεν είναι μεγάλος.

Λιθόφιλα ονομάζονται τα στοιχεία που έχουν ισχυρή συγγένεια με το Ο και οι ενώσεις τους έχουν ισχυρή τάση διάλυσης στα πυριτικά τήγματα. Γι' αυτό ονομάζονται και οξύφιλα. Συναντώνται περισσότερο με τη μορφή οξειδίων και είναι συχνότερα στα πυριτικά ορυκτά. Αφθονούν στην πυριτική φάση των μετεωριτών παρά στη μεταλλική και σουλφιδική. Είναι συγκεντρωμένα κυρίως στα πετρογενετικά ορυκτά του φλοιού και του ανώτερου μανδύα της Γης. Τα λιθόφιλα στοιχεία (Na, K, Si, Al, Ti, Mg, Ca, Sr, Ba, Zr) έχουν ατομική δομή που χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη 8 ηλεκτρονίων στην εξωτερική ηλεκτρονική στοιβάδα, και ο ατομικός τους όγκος είναι σχετικά μεγάλος.

Ατμόφιλα ονομάζονται τα στοιχεία που κάτω από κανονικές συνθήκες βρίσκονται σε αέρια φάση και περιέχονται στην ατμόσφαιρα της Γης. Τα στοιχεία αυτά (O, N, H, He, Ar, Xe) παρουσιάζονται είτε μεμονωμένα είτε με μορφή πτητικών ενώσεων. Έχουν σταθερή ηλεκτρονιακή διαμόρφωση στη στοιχειακή τους κατάσταση.

Ορισμένα στοιχεία σχετίζονται με περισσότερες από μία ομάδες επειδή η κατανομή κάθε στοιχείου εξαρτάται μέχρις ενός σημείου και από τη θερμοκρασία και πίεση, καθώς και από το χημικό περιβάλλον του συστήματος. Το Cr, για παράδειγμα, είναι ένα ισχυρά λιθόφιλο στοιχείο στο φλοιό της Γης, όταν όμως το οξυγόνο δεν είναι επαρκές, όπως συμβαίνει στους σιδηρομετεωρίτες, τότε συμπεριφέρεται ως χαλκόφιλο. Παρομοίως, κάτω από ισχυρά αναγωγικές συνθήκες ο άνθρακας και ο φωσφόρος είναι σιδηρόφιλα στοιχεία.

4. ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ

4.1. Εισαγωγή

Η Εφαρμοσμένη Γεωχημεία είναι η πρακτική εφαρμογή των θεωρητικών αρχών της γεωχημείας για τον εντοπισμό κοιτασμάτων ορυκτών πρώτων υλών ή των πηγών ρύπανσης. Κοιτάσματα είναι φυσικές συγκεντρώσεις χρήσιμων ορυκτών και πετρωμάτων που μπορεί να τύχουν οικονομικής εκμετάλλευσης. Οι ορυκτές πρώτες ύλες διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: α) Ενεργειακές Ορυκτές Πρώτες Ύλες όπως άνθρακες, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, ουράνιο, γεωθερμία κ.ά., β) Μεταλλεύματα (Μ) όπως νικέλιο, χρυσός, χαλκός κ.ά. και γ) Βιομηχανικά Ορυκτά και Πετρώματα (ΒΟΠ) όπως άστριοι, γρανίτες, γύψος, ζεόλιθοι, καολίνης, μαγνησίτης, μάρμαρα, μπεντονίτης, περλίτης, χαλαζίας, πολύτιμοι και ημιπολύτιμοι λίθοι, κ.ά.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται συμπεριλαμβάνουν τη συστηματική μέτρηση ενός ή περισσότερων χημικών στοιχείων ή συστατικών, τα οποία συνήθως εμφανίζονται σε πολύ μικρές ποσότητες. Οι μετρήσεις γίνονται σε διάφορα υλικά της φύσης, σε πετρώματα, εδάφη, ποτάμια ιζήματα, ύδατα, βλάστηση, αποθέσεις παγετώνων και στον αέρα. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν αναλύσεις σε ζώα για αναζήτηση μεταλλευμάτων όπως η περιεκτικότητα Cu, Zn, και Pb σε σκώτι ζώων (Warren et al. 1971). Το είδος της γεωχημικής μεθόδου που θα επιλεγεί εξαρτάται από τη γεωχημική συμπεριφορά του χημικού στοιχείου, τη διαθεσιμότητα υλικού για δειγματοληψία, τις κλιματολογικές συνθήκες, τις συνθήκες αλλοίωσης και διασποράς στοιχείων στην περιοχή έρευνας, π.χ. σε περιοχές με χαμηλό ανάγλυφο, παχιά ιζήματα και λίγα ύδατα (μεγάλες περιοχές Αυστραλίας) η μέθοδος έρευνας εδάφους θα είναι πολύ πιο συνηθισμένη από τις άλλες μεθόδους. Η ρύπανση είναι παράγοντας που απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, διότι μπορεί να δημιουργήσει ανωμαλίες χωρίς φυσικά την παρουσία μεταλλεύματος. Οι γεωχημικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται επίσης και για τον εντοπισμό των πηγών ρύπανσης, οι οποίες συνήθως είναι ανθρωπογενείς π.χ. βιομηχανίες, μεταλλεία, οικοδομικές δραστηριότητες, γεωργικές καλλιέργειες κ.ά.

Η ταξινόμηση των γεωχημικών μεθόδων που παρουσιάζονται παρακάτω βασίζεται στο είδος του υλικού που συλλέχθηκε για ανάλυση. Η γεωχημική έρευνα μπορεί να είναι **αναγνωριστική (στρατηγική γεωχημεία) ή λεπτομερής**. Η αναγνωριστική γεωχημική έρευνα (στρατηγική γεωχημεία) γενικά είναι σύντομη έχει σχετικά μικρό κόστος και εκτελείται σε μεγάλες εκτάσεις. Στις περιοχές που η αναγνωριστική έρευνα έδειξε κοιτασματολογικό ενδιαφέρον εκτελείται πυκνότερη δειγματοληψία για την λεπτομερή γεωχημική έρευνα (De Vivo et al. 2008). Σκοπός της λεπτομερούς έρευνας είναι ο ακριβής εντοπισμός του κοιτάσματος. Η γεωχημική έρευνα αποσκοπεί στον εντοπισμό διασποράς στοιχείων ή συστατικών με περιεκτικότητα μεγαλύτερη του κανονικού, δηλαδή εντοπισμό της **γεωχημικής ανωμαλίας**, η οποία με τη σειρά της θα οδηγήσει στον εντοπισμό του κοιτάσματος (Φιλιππίδης 2002).

Η γεωχημική έρευνα είναι μια από τις μεθόδους αναζήτησης κοιτασμάτων

και συνήθως χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους, όπως γεωλογικές, γεωφυσικές κλπ. Η γεωχημική έρευνα μπορεί να βοηθήσει στην ερμηνεία και εκτίμηση γεωλογικών δομών, γεωφυσικών ανωμαλιών, όπως και αντίστροφα, η ερμηνεία της γεωχημικής ανωμαλίας απαιτεί τη βοήθεια της γεωλογίας και της γεωφυσικής. Ο συνδυασμός των γεωχημικών με τις γεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους, πολλές φορές είναι απαραίτητος.

Κατά το 3^ο διεθνές συμπόσιο 16-18/4/1970 εφαρμοσμένης γεωχημείας (3rd International Symposium) στο Τορόντο του Καναδά (Cooper 1971), δημιουργήθηκε η οργάνωση των γεωχημικών (The Association of Exploration Geochemists). Το επιστημονικό περιοδικό της οργάνωσης The Journal of Geochemical Exploration κυκλοφόρησε το 1972.

Στη γεωχημεία συνήθως μετρούμε ιχνοστοιχεία και η περιεκτικότητα εκφράζεται συνήθως σε γραμμάρια ανά τόνο (g/t) ή ppm (parts per million) ή ppb (parts per billion):

$$1 \text{ g/t} = 1 \text{ ppm.}$$

$$0,1\% = 1000 \text{ ppm.}$$

$$0,0001\% = 1 \text{ ppm} = 1000 \text{ ppb.}$$

$$0,0000001\% = 0,001 \text{ ppm} = 1 \text{ ppb.}$$

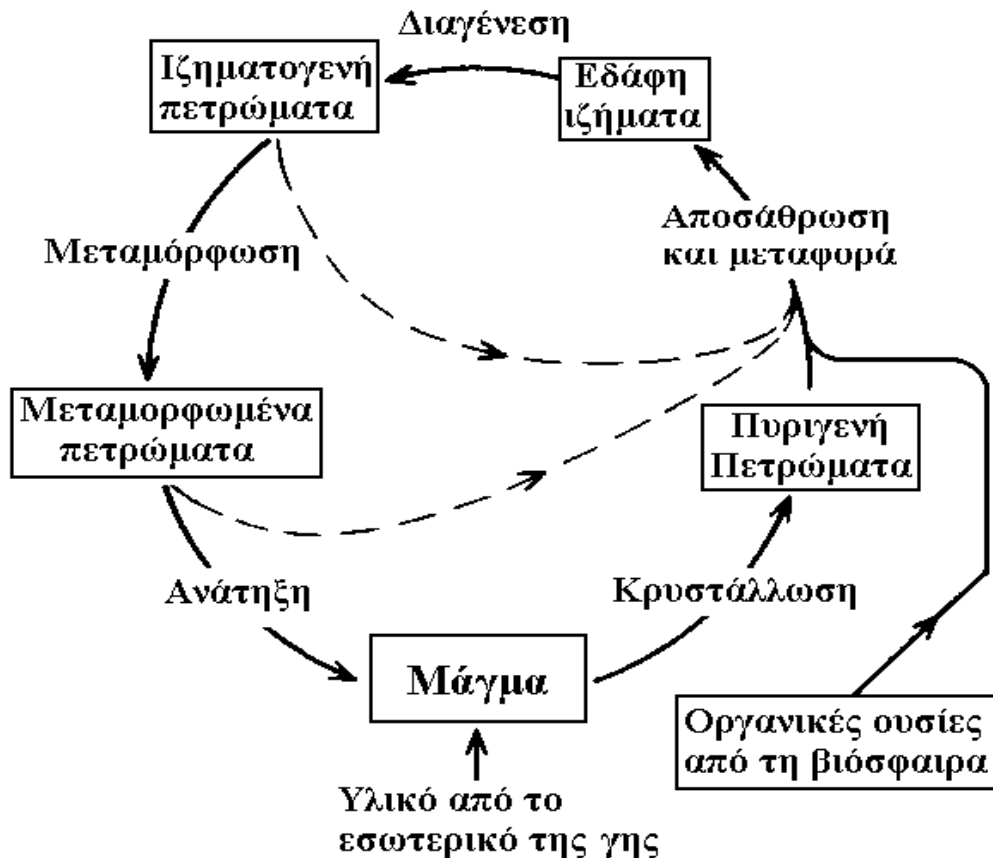
4.2. Γεωχημικός κύκλος (πρωτογενές και δευτερογενές περιβάλλον)

Η εφαρμοσμένη γεωχημεία βασίζεται στη συστηματική μελέτη της διασποράς των χημικών στοιχείων στα φυσικά υλικά που περιβάλλουν ή σχετίζονται με τα κοιτάσματα. Με τη βοήθεια των φυσικών και χημικών διαδικασιών γίνεται η κατανομή ή ανακατανομή των χημικών στοιχείων. Η διασπορά των χημικών στοιχείων μπορεί να γίνει στο πρωτογενές ή δευτερογενές περιβάλλον. Το πρωτογενές περιβάλλον περιλαμβάνει διαδικασίες από το χαμηλότερο ορίζοντα των υπογείων υδάτων έως τα μεγάλα βάθη όπου επικρατεί ο μαγματικός διαχωρισμός και η μεταμόρφωση. Το δευτερογενές περιβάλλον συμπεριλαμβάνει τις επιφανειακές διαδικασίες, αποσάθρωσης, σχηματισμό εδαφών και ιζηματογένεσης στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης.

Στο πρωτογενές περιβάλλον έχουμε γενικά σχετικά υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις με λίγο ελεύθερο οξυγόνο και περιορισμένες σχετικά κινήσεις διαλυμάτων. Ενώ το δευτερογενές περιβάλλον χαρακτηρίζεται για τις χαμηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, αφθονία σε ελεύθερο οξυγόνο και άλλα αέρια, ειδικότερα CO₂ και σχετικά ελεύθερη διακίνηση διαλυμάτων. Κινήσεις υλικών μεταξύ του πρωτογενούς και δευτερογενούς περιβάλλοντος παρουσιάζονται απλά σ' ένα κλειστό σύστημα γνωστό ως ο **γεωχημικός κύκλος** (Σχ. 4.1).

Πετρώματα που σχηματίστηκαν στο πρωτογενές περιβάλλον μπορούν να καταλήξουν στο δευτερογενές δια μέσου γεωλογικών διαδικασιών (π.χ. αποσάθρωση, διάβρωση, ιζηματογένεση, διαγένεση και βιολογική δράση). Ορυκτά που σχηματίστηκαν στο πρωτογενές περιβάλλον μπορεί να είναι ασταθή στο δευτερογενές. Η αλλοίωση των ορυκτών έχει ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση, μεταφορά και ανακατανομή των χημικών στοιχείων στο

περιβάλλον. Οι φυσικές και χημικές διαδικασίες αποσθρώνουν τα πετρώματα με αποτέλεσμα την απελευθέρωση, μεταφορά και ανακατανομή των ορυκτών στο περιβάλλον. Σε αυτή τη μεταφορά και ανακατανομή στηρίζεται κυρίως η εφαρμοσμένη γεωχημεία, προσπαθώντας να ανακαλύψει την αρχική πηγή των στοιχείων ή ακόμη το νέο κοίτασμα που πιθανώς δημιουργήθηκε με τη μεταφορά και ανακατανομή των στοιχείων ή των ορυκτών.



Σχήμα 4.1. Ο Γεωχημικός κύκλος (Saxby 1969)

4.3. Στοιχεία δείκτες

Το στοιχείο διασποράς που δίνει την γεωχημική ανωμαλία, συνήθως δεν συμπεριλαμβάνεται σαν κύριο στοιχείο στο κοίτασμα, αλλά είναι γεωχημικά στενά συνδεδεμένο με αυτό. Ορισμένα χημικά στοιχεία (ή αέρια, ή ενώσεις) σχετίζονται γεωχημικά με το κοίτασμα και παρότι περιέχονται σε πολύ μικρές ποσότητες μπορούν με την παρουσία τους να υποδείξουν κοιτάσματα και άλλων μετάλλων. Τα στοιχεία (ή ενώσεις ή αέρια) αυτά ονομάζονται **στοιχεία δείκτες** (parthfinders ή indicator elements). Η καταγραφή και μελέτη των στοιχείων αυτών είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την εντοπισμό κοιτασμάτων, διότι συνήθως τα στοιχεία δείκτες παρουσιάζουν μεγάλες συγκεντρωτικές ζώνες διασποράς. Η εφαρμογή των στοιχείων αυτών μπορεί να γίνει και στο πρωτογενές και στο δευτερογενές περιβάλλον. Στον Πίνακα 4.1. αναφέρονται τα σημαντικότερα από τα στοιχεία δείκτες και ο τύπος μεταλλεύματος που υποδεικνύουν.

Πίνακας 4.1. Στοιχεία δείκτες που χρησιμοποιούνται στην αναζήτηση κοιτασμάτων.

Στοιχεία δείκτες	Τύπος υποδεικνυόμενου κοιτάσματος
As	Au, Ag: φλεβικά Au-Ag-Cu-Co-Zn: σύνθετα σουλφιδίων
B	W-Be-Zn-Mo-Cu-Pb: skarn Sn-W-Be: φλεβικά ή τύπου greisen
Hg	Pb-Zn-Ag: σύνθετα σουλφιδίων
Mo	W-Sn: μεταμορφωσιγενή επαφής
Mn	Ba-Ag: φλεβικά και πορφυριτικών χαλκών
Se, V, Mo	U: ιζηματογενή
Cu, Bi, As, Co, Mo, Ni	U: φλεβικά
Mo, Te, Au	Πορφυριτικά χαλκού
Pd, Cr, Cu, Ni, Co	Pt: σε υπερβασικά πετρώματα
Zn	Ag-Pb-Zn: γενικά σουλφιδίων
Zn, Cu	Cu-Pb-Zn: γενικά σουλφιδίων
Rn	U: όλους τους τύπους
SO ₄	Σουλφίδια όλων των τύπων

Συνήθως, η δειγματοληψία γίνεται σε όλα τα υλικά, σε ορισμένες όμως περιπτώσεις (όπως π.χ. το Rn) μόνο δείγματα του αέρα των υδάτων και των εδαφών έχουν πρακτική εφαρμογή, για δε τα θειικά άλατα μόνο δείγματα υδάτων θα αποδώσουν. Τα στοιχεία δείκτες άλλοτε συνδέονται με τα σύνδρομα (διαφανή) ορυκτά του κοιτάσματος και άλλοτε με τα μεταλλικά (αδιαφανή) ορυκτά του κοιτάσματος. Γενικά, η αποτελεσματικότητα εντοπισμού κοιτασμάτων, οφείλεται στο γεγονός ότι τα στοιχεία δείκτες είναι περισσότερο ευκίνητα από τα κύρια στοιχεία του κοιτάσματος, δημιουργώντας έτσι μεγάλες συγκεντρωτικές ζώνες διασποράς, όπως π.χ. ο δείκτης As για τα κοιτάσματα Au. Επίσης, οξείδωση ορυκτών του κοιτάσματος μπορεί να δημιουργήσει αέριο ως στοιχείο δείκτη. Η ραδιενεργός διάσπαση επίσης μπορεί να δημιουργήσει στοιχείο δείκτη, όπως π.χ. ο δείκτης Rn που δημιουργείται από τη διάσπαση του U σε Ra, το οποίο με τη σειρά διασπάται σε Rn.

Τα στοιχεία δείκτες μπορούν επίσης να βρίσκονται στο πλέγμα ορυκτών του κοιτάσματος. Στον Πίνακα 4.2 δίνονται οι περιεκτικότητες στοιχείων και ιχνοστοιχείων σε δύο σημαντικά ορυκτά της ομάδας των σουλφιδίων. Οι περιεκτικότητες των στοιχείων και ιχνοστοιχείων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2, κινούν την προσοχή των ερευνητών για την συγκέντρωση επιβλαβών στοιχείων στα κοιτάσματα (π.χ., υψηλές συγκεντρώσεις As στον γαληνίτη και σφαλερίτη) καθώς επίσης ποιά στοιχεία και ιχνοστοιχεία πρέπει να υπολογίζονται σαν δευτερεύοντα στοιχεία εκμετάλλευσης, κατά τη μεταλλουργική διαδικασία (π.χ. Cd και Ge στο σφαλερίτη). Τα δευτερεύοντα στοιχεία και ιχνοστοιχεία ενός κοιτάσματος συνήθως παίζουν πολύ σημαντικό οικονομικό ρόλο. Το κάδμιο περιέχεται πάντοτε στο σφαλερίτη, όπως και ο άργυρος είναι πάντοτε σημαντικό δευτερεύον στοιχείο του γαληνίτη.

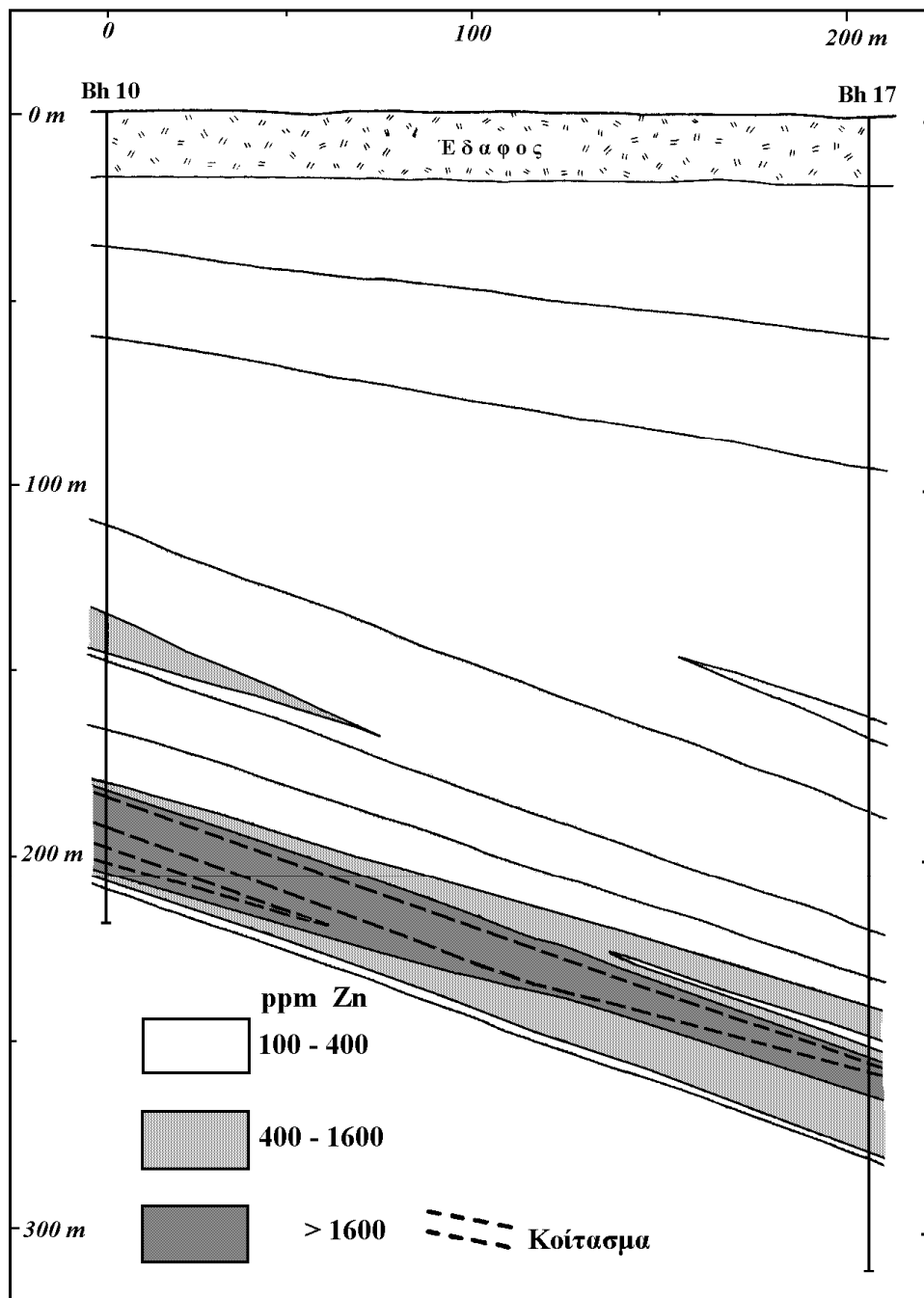
Πίνακας 4.2. Περιεκτικότητα ιχνοστοιχείων στο γαληνίτη και σφαλερίτη (Levinson 1974).

Στοιχεία	Μέγιστη περιεκτικότητα σε ppm ή %	Πιο συνηθισμένες περιεκτικότητες	Σχετική συχνότητα συμμετοχής (%)
Γαληνίτης (PbS)			
Cu	3000	10-200	96
Ag	3%	50-5000	94
Sb	3%	200-5000	84
Bi	5%	200-5000	62
Fe	5000	10-50	43
Mn	2000	10-50	41
Ni	100	10-50	38
Tl	1000	<10-50	36
Sn	1300	<10-50	24
As	1%	200-5000	22
Σφαλερίτης (ZnS)			
Cd	4,4%	1000 - 5000	100
Se	900	< 10	100
Mn	5,4%	1000 - 5000	87
Ag	1%	10 - 100	84
Cu	5%	1000 - 5000	80
Ga	3000	10 - 200	66
In	1%	10 - 50	52
Co	3000	10 - 100	49
Ge	5000	50 - 200	48
Sn	1%	100 - 200	40
Hg	1%	10 - 50	37
Ni	300	10 - 50	33
As	1%	200 - 500	25
Tl	5000	10 - 50	25
Sb	3%	10 - 50	24
Bi	1000	10 - 50	22

4.4. Γεωχημεία πετρωμάτων

Η γεωχημική έρευνα σε πέτρωμα (ή λιθογεωχημεία) βασίζεται σε ανάλυση του πετρώματος ή ορισμένων μεμονωμένων ορυκτών του πετρώματος. Η δειγματοληψία μπορεί να είναι επιφανειακή ή υπόγεια (Σχ. 4.2) και από το αναλλοίωτο μέρος του πετρώματος. Συνήθως, παρατηρείται διασπορά στοιχείων του κοιτάσματος στο πέτρωμα που φιλοξενεί το κοιτάσμα. Σκοπός της γεωχημείας πετρώματος είναι ο εντοπισμός των αρχικών κύκλων διασποράς στοιχείων που σχετίζονται με το κοιτάσμα, δηλαδή ο εντοπισμός της γεωχημικής ανωμαλίας, της οποίας η μορφή, καθορίζει τη θέση και τη

γεωμετρία του κοιτάσματος. Οι κύκλοι διασποράς γύρω από το κοιτάσμα μπορεί να έχουν ακτίνα διασποράς λίγων μέτρων έως και χιλιομέτρων. Το μέγεθος της ακτίνας διασποράς εξαρτάται από τις χημικές ιδιότητες του στοιχείου δείκτη, από το μέγεθος και το σχήμα του κοιτάσματος, από τη γεωλογική-γεωτεκτονική δομή της περιοχής, καθώς και από την ορυκτολογική και χημική σύσταση του κοιτάσματος. Η ακτίνα διασποράς πχ. του Hg ή του Zn μπορεί να φτάσει τα 2-5 χλμ επειδή τα στοιχεία αυτά είναι πολύ ευκίνητα.

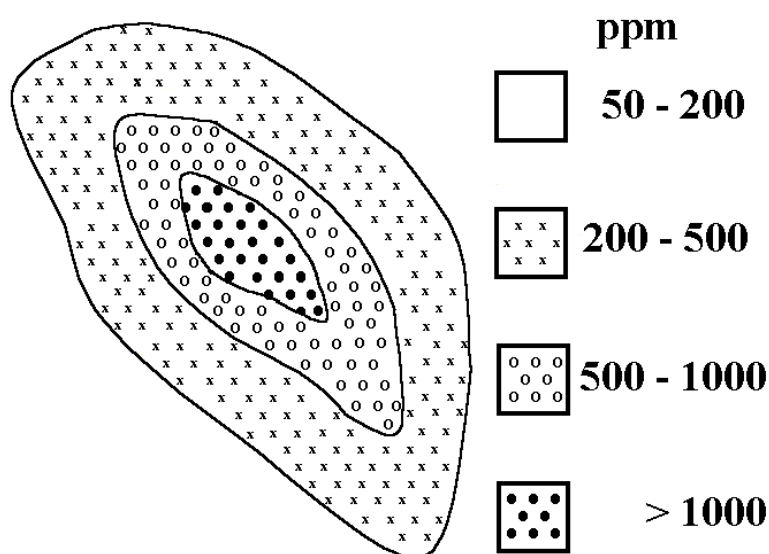


Σχήμα 4.2. Γεωχημικές ανωμαλίες σε γεωτρήσεις (Bh 10 και Bh 17) στο κοιτάσμα σουλφιδίων (σιδηροπυρίτης, χαλκοπυρίτης, σφαλερίτης) της Rudtjebacken, Σουηδίας (Frietsch 1972).

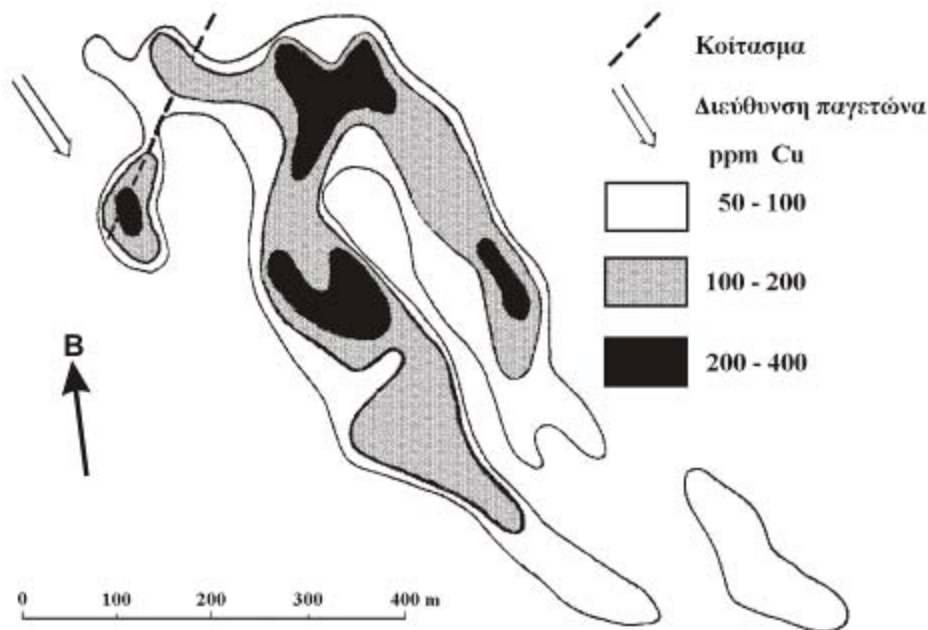
4.5. Γεωχημεία εδαφών

Η γεωχημεία εδαφών βασίζεται στο γεγονός ότι στοιχεία του κοιτάσματος διασκορπίζονται στο υπερκείμενο έδαφος και δημιουργούν ένα δευτερεύον πεδίο διασποράς, με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις μετάλλων πλησιέστερα στο κοίτασμα. Η γεωχημική ανωμαλία καταγράφεται μετά από δειγματοληψία εδάφους κατά μήκος οριζόντιων και καθέτων τομών της περιοχής έρευνας. Όπως και στη γεωχημεία πετρωμάτων έτσι και στη γεωχημεία εδαφών, οι διάφορες τιμές της συγκέντρωσης ενός στοιχείου, τοποθετούνται σε χάρτη και ακολούθως χαράσσονται οι **ισοχημικές καμπύλες** (Σχ. 4.3). Η ισοχημική καμπύλη ενώνει τα σημεία που έχουν την ίδια συγκέντρωση ενός χημικού στοιχείου. Η μορφή και το σχήμα της γεωχημικής ανωμαλίας, αποτελούν κρίσιμα και απαραίτητα στοιχεία για τον εντοπισμό του κοιτάσματος.

Σε εδάφη με πολλά στρώματα, όπου το καθένα έχει τη δική του ορυκτολογική σύσταση, είναι δυνατό να προκύψουν διαφορετικές τιμές συγκεντρώσεις, ανάλογα με το στρώμα που έγινε η δειγματοληψία, με υψηλότερες τιμές όμως στο στρώμα που βρίσκεται σε επαφή με το κοίτασμα. Κάθε στρώμα με τη σειρά του παρουσιάζει τη δική του γεωχημική ανωμαλία (Σχ. 4.4). Γεωχημικές ανωμαλίες σε παραμένοντα εδάφη είναι αξιόπιστες, όπου οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις του στοιχείου εμφανίζονται πάνω από το κοίτασμα. Αρκετές φορές και εξ' αιτίας της μετακίνησης εδαφών, των υδρογεωλογικών διαδικασιών και της ευκινησίας των χημικών στοιχείων, καταγράφονται μετατοπισμένες ανωμαλίες (πλαστές ή διαρροής ή μη δηλωτικές). Γεώτρηση πάνω από τις πλαστές αυτές ανωμαλίες δε θα συναντήσει το κοίτασμα (Σχ. 4.5 και 4.6). Σε παρόμοιες περιπτώσεις πριν τον προσδιορισμό του σημείου γεώτρησης, προτείνεται εκτός της γεωχημικής ανωμαλίας να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη οι υδρογεωλογικές και γενικότερα οι γεωλογικές συνθήκες της περιοχής έρευνας.



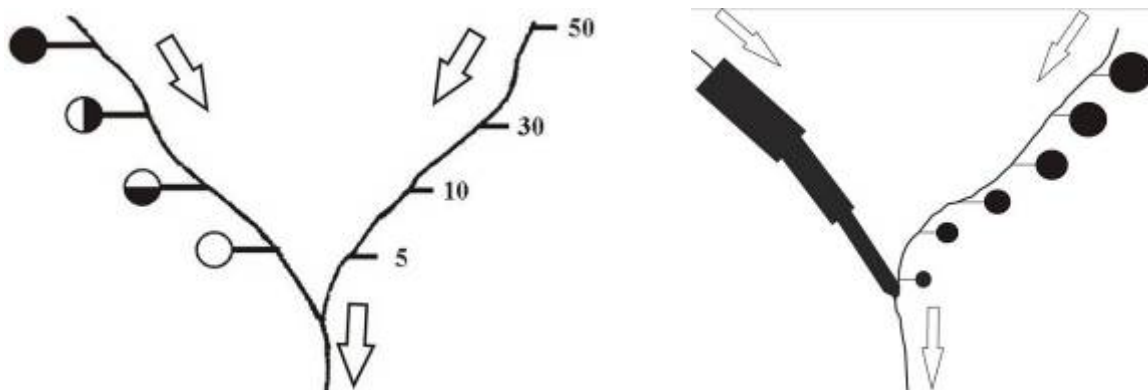
Σχήμα 4.3. Γεωχημικός χάρτης εδάφους.



Σχήμα 4.6. Γεωχημικός χάρτης εδάφους σε περιοχή με κοιτάσμα χαλκοπυρίτη-σιδηροπυρίτη στο Balley (Norrbotten) Σουηδίας. Η επιμήκης μορφή των γεωχημικών ανωμαλιών αποδίδονται στον παγετώνα (Frietsch 1972).

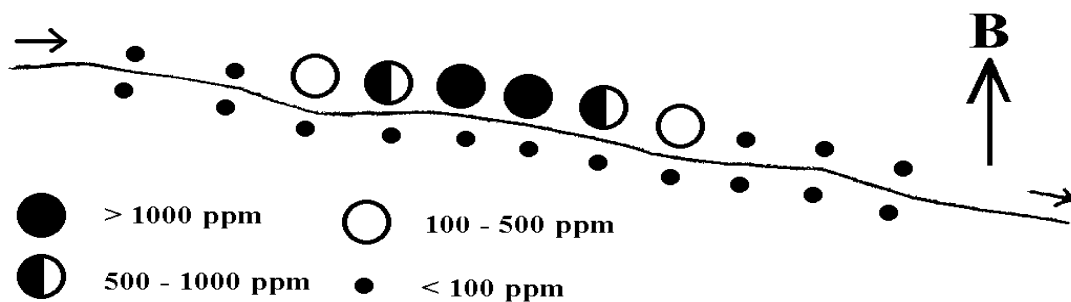
4.6. Γεωχημεία ποτάμιων ιζημάτων

Η γεωχημεία ποτάμιων ιζημάτων στηρίζεται στη χημική ή/και ορυκτολογική σύσταση ιζημάτων που προέρχονται από ποτάμια, ρυάκια, λίμνες, βάλτους και το βυθό της θάλασσας. Με τις χημικές αναλύσεις σε ποτάμια ιζήματα ή σε ορισμένα ορυκτά αυτών ή ακόμη με το ποσοστό συμμετοχής ορισμένων ορυκτών στο ίζημα, κατασκευάζονται οι γεωχημικές ή ορυκτολογικές ανωμαλίες, οι οποίες με τη σειρά τους οδηγούν στον εντοπισμό του κοιτάσματος. Ορισμένοι συνηθισμένοι τρόποι παρουσίασης των χημικών ή ορυκτολογικών αναλύσεων σε ποτάμια ιζήματα δίνονται στο Σχήμα 4.7. Αποτέλεσμα της χημικής και μηχανικής διάβρωσης είναι η διασπορά χημικών στοιχείων (με τη βοήθεια διαλυμάτων) ή και ορυκτών του κοιτάσματος σε μεγάλες αποστάσεις από το μητρικό κοιτάσμα.

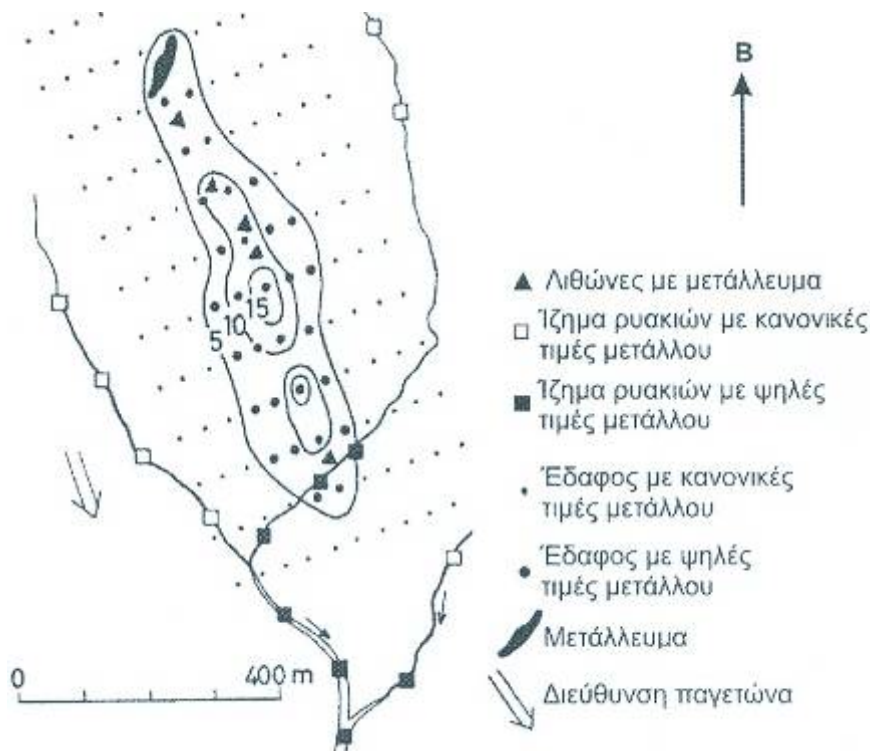


Σχήμα 4.7. Η συγκέντρωση του χημικού στοιχείου ή του ορυκτού στο ποτάμιο ίζημα: (Αριστερά) αντιπροσωπεύεται με σύμβολα ή με αριθμούς % ή ppm ή ppb και (Δεξιά) είναι ανάλογη με το μέγεθος των συμβόλων.

Κατά τη γεωχημική έρευνα ποτάμιων ιζημάτων σε συγκεκριμένο σημείο καταγράφεται η υψηλότερη συγκέντρωση του μετάλλου στο ίζημα. Στο σημείο αυτό, είτε εισέρχονται στον ποταμό υπόγεια ύδατα, είτε εισέρχονται πλευρικά κορρήματα πλούσια σε μέταλλο, είτε ο ποταμός τέμνει το κοίτασμα. Σε ορισμένες περιπτώσεις καταγράφονται γεωχημικές ανωμαλίες σε πλευρικά ιζήματα ποταμών μόνο στη μια πλευρά του ποταμού (Σχ. 4.8). Μετά την καταγραφή παρόμοιων ανωμαλιών στρέφεται η προσοχή της λεπτομερούς γεωχημικής έρευνας στην πλευρά του ποταμού που εντοπίστηκε η πρώτη αναγνωριστική γεωχημική ανωμαλία. Η γεωχημεία ποτάμιων ιζημάτων μπορεί να συνδυαστεί και με άλλους γεωχημικούς μεθόδους όπως το παράδειγμα του Σχήματος 4.9.



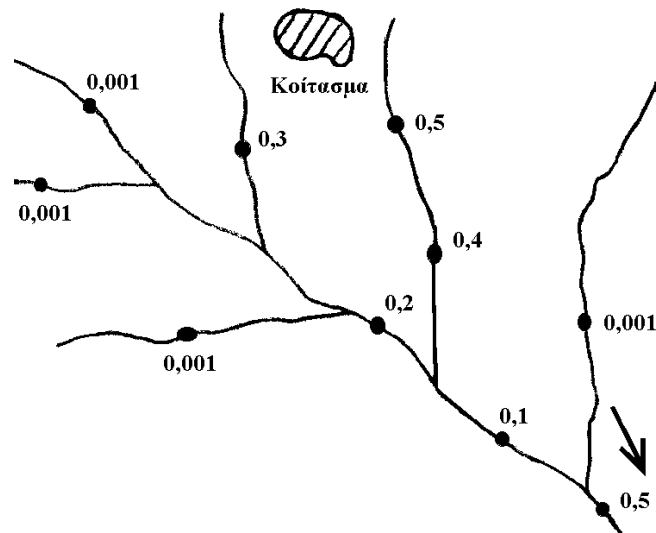
Σχήμα 4.8. Η γεωχημική ανωμαλία των πλευρικών ιζημάτων του ποταμού υποδεικνύει κοίτασμα βόρεια και κεντρικά του ποταμού.



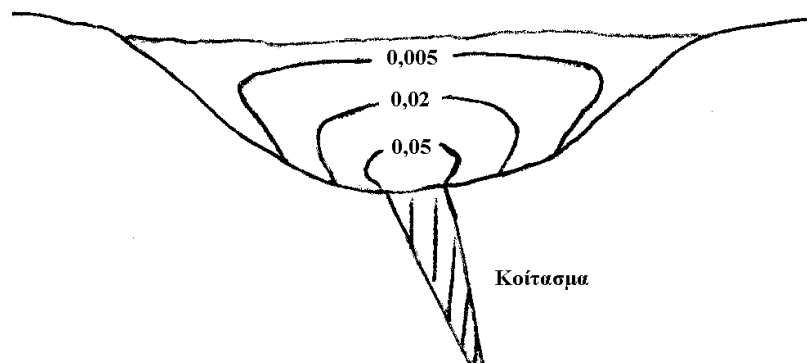
Σχήμα 4.9. Συνδυασμένες έρευνες γεωχημείας ποτάμιων ιζημάτων και εδαφών, καθώς και καταγραφή λιθώνων και γεωλογικών συνθηκών, οδήγησαν στον εντοπισμό του κοιτάσματος (Frietsch 1972).

4.7. Γεωχημεία υδάτων

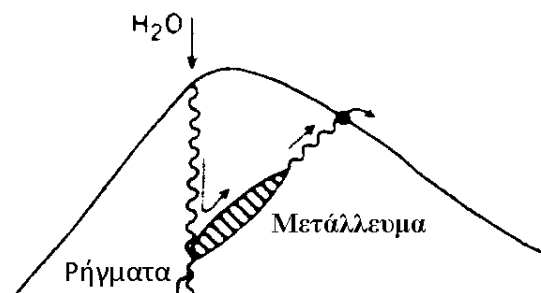
Η γεωχημεία υδάτων (υδρογεωχημεία) βασίζεται σε χημικές αναλύσεις υπόγειων και επιφανειακών υδάτων (ποτάμια, ρυάκια, λίμνες, έλη, πηγές, θάλασσα). Τα διαλυμένα χημικά στοιχεία δημιουργούν μια αλληλουχία στη διασπορά τους, με αυξημένες τιμές προς το κοιτάσμα (Σχ. 4.10) ή κύκλους διασποράς με αυξημένες τιμές πλησιέστερα του κοιτάσματος (Σχ. 4.11). Η γεωλογία, η τεκτονική και η υδρογεωλογία της περιοχής βοηθούν σημαντικά στη σωστή ερμηνεία των γεωχημικών ανωμαλιών (Σχ. 4.12 και 4.13).



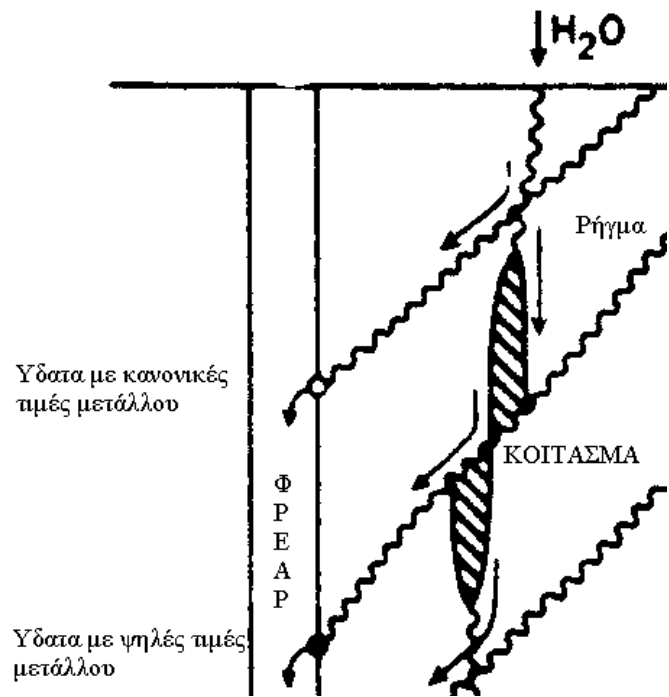
Σχήμα 4.10. Ιδανική διασπορά χημικών στοιχείων σε επιφανειακά ύδατα (Levinson 1974).



Σχήμα 4.11. Ιδανικοί κύκλοι διασποράς χημικών στοιχείων σε νερά λίμνης (Levinson 1974).

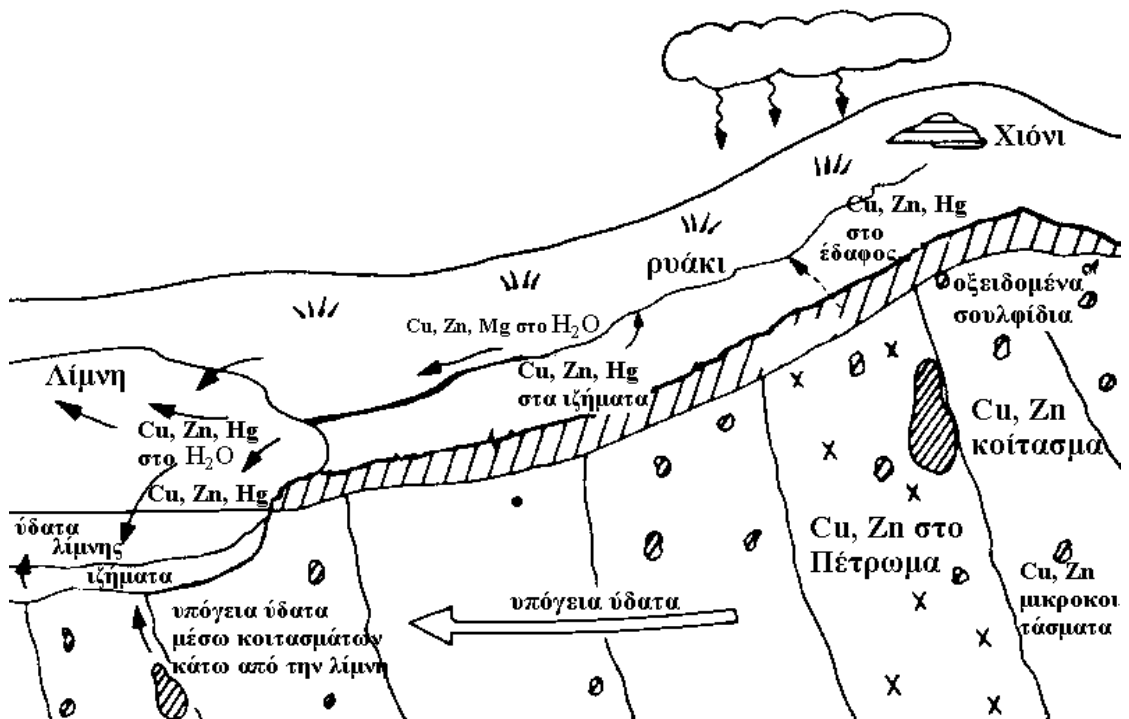


Σχήμα 4.12. Ύδατα πηγής με ανώμαλες τιμές μετάλλων εξαιτίας του μεταλλοφόρου ρήγματος (Boyle et al. 1971).



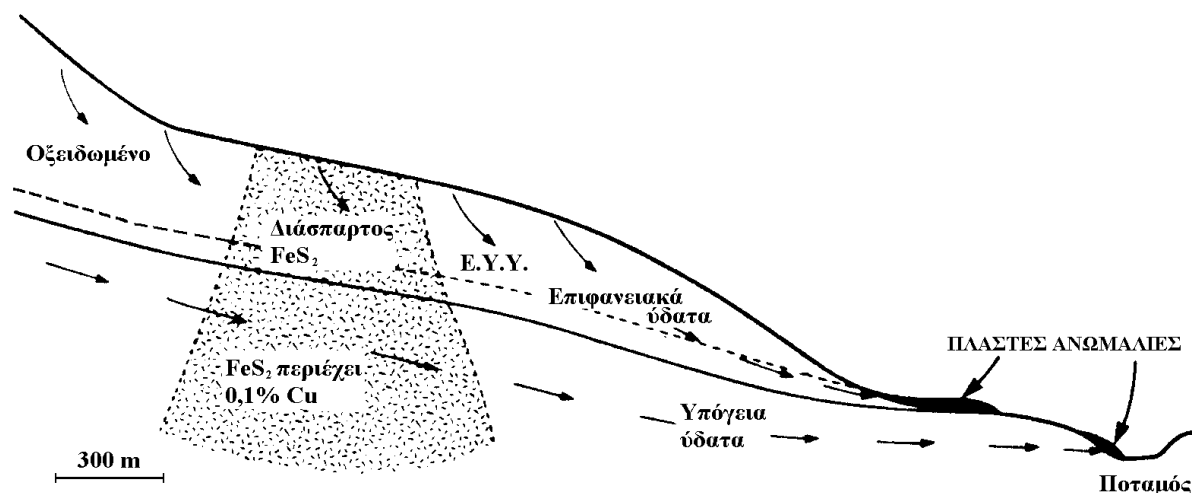
Σχήμα 4.13. Εντοπισμός κοιτάσματος με τη βοήθεια χημικών αναλύσεων σε ύδατα φρέατος και της τεκτονική της περιοχής έρευνας (Boyle et al. 1971).

Συνήθως, τα υπόγεια ύδατα παρουσιάζουν υψηλότερες συγκεντρώσεις διαλυμένων χημικών στοιχείων απ' ό τι τα επιφανειακά ύδατα. Υπόγεια ύδατα κοντά σε οξειδωμένο κοιτάσμα σουλφιδίων έχουν χαμηλό pH (όξινο) και γι' αυτό έχουν μεγαλύτερη ικανότητα να διαλύουν και να μεταφέρουν μέταλλα απ' ό τι τα επιφανειακά ύδατα (Σχ. 4.14).



Σχήμα 4.14. Διασπορά μετάλλων από υπόγεια και επιφανειακά ύδατα (Allan et al. 1973).

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στις πλαστές ανωμαλίες, διότι τα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα με σχετική ευκολία μεταφέρουν χημικά στοιχεία και δημιουργούν πλαστές ανωμαλίες (Σχ. 4.15).



Σχήμα 4.15. Πλαστές γεωχημικές ανωμαλίες που δημιουργήθηκαν με την μεταφορά μετάλλων από επιφανειακά και υπόγεια ύδατα. E.Y.Y.: Επιφάνεια υπόγειων υδάτων. (Levinson 1974).

Το γεγονός ότι η περιεκτικότητα μετάλλου στα ύδατα κυμαίνεται με τη βροχόπτωση και με τις εποχές, πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά την γεωχημική έρευνα υδάτων. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται σε περιοχές με έντονη βιομηχανική και γεωργική δραστηριότητα, διότι η έκπλυση με το νερό της βροχής, μεταφέρει τους χημικούς ρύπους από το χερσαίο στο υδάτινο περιβάλλον (επιφανειακά και υπόγεια ύδατα). Με βασικό κίνητρο τον εντοπισμό των πηγών ρύπανσης και ακολούθως την προστασία του περιβάλλοντος, εκτελούνται τακτικά υδροχημικές μελέτες στα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα.

4.8. Γεωχημεία βλάστησης

Η γεωχημεία βλάστησης βασίζεται στο γεγονός ότι τα φυτά απορροφούν τα χημικά στοιχεία από το έδαφος και τα πετρώματα. Η γεωχημεία βλάστησης διαχωρίζεται στη γεωβοτανική και βιογεωχημεία (De vivo et al. 2008).

Η **γεωβοτανική** βασίζεται στην οπτική έρευνα της βλάστησης και περιλαμβάνει αναγνώριση α) ειδικών φυτών (στην παρουσία ή απουσία τους) που είναι δείκτες ορισμένων χημικών στοιχείων και β) ορισμένων χαρακτηριστικών των φυτών (γένος, χρώμα κλπ.) τα οποία χαρακτηριστικά είναι αποτέλεσμα της παρουσίας κάποιου χημικού στοιχείου. Ορισμένα φυτά αναπτύσσονται στην παρουσία ορισμένων χημικών στοιχείων στο έδαφος και υπέδαφος, άλλα πάλι εξαφανίζονται.

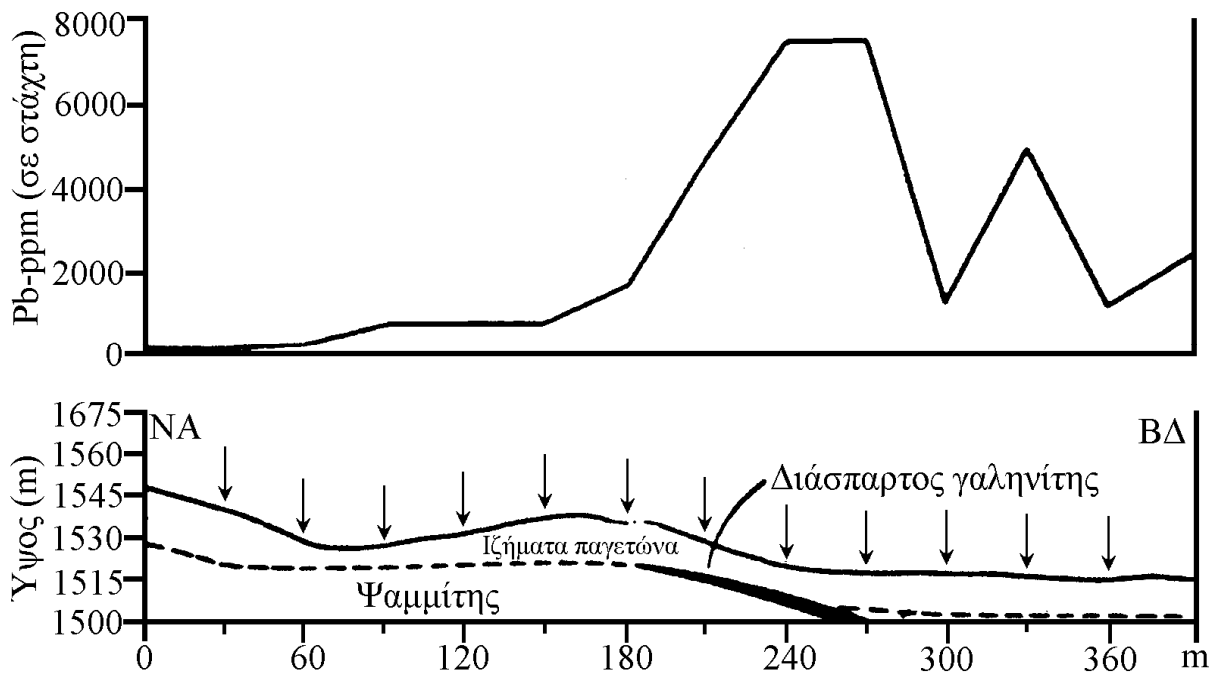
Τα φυτά που σε όλη την υφήλιο δηλώνουν την παρουσία ενός συγκεκριμένου στοιχείου ονομάζονται **παγκόσμιοι δείκτες** (Universal

indicators) ενώ τα φυτά που δηλώνουν την παρουσία στοιχείου και χρησιμοποιούνται γι' αυτό το σκοπό μέσα στα όρια ορισμένης περιφέρειας ονομάζονται **τοπικοί δείκτες** (Local indicators). Στον Πίνακα 4.3 δίνονται ορισμένοι παγκόσμιοι και τοπικοί δείκτες.

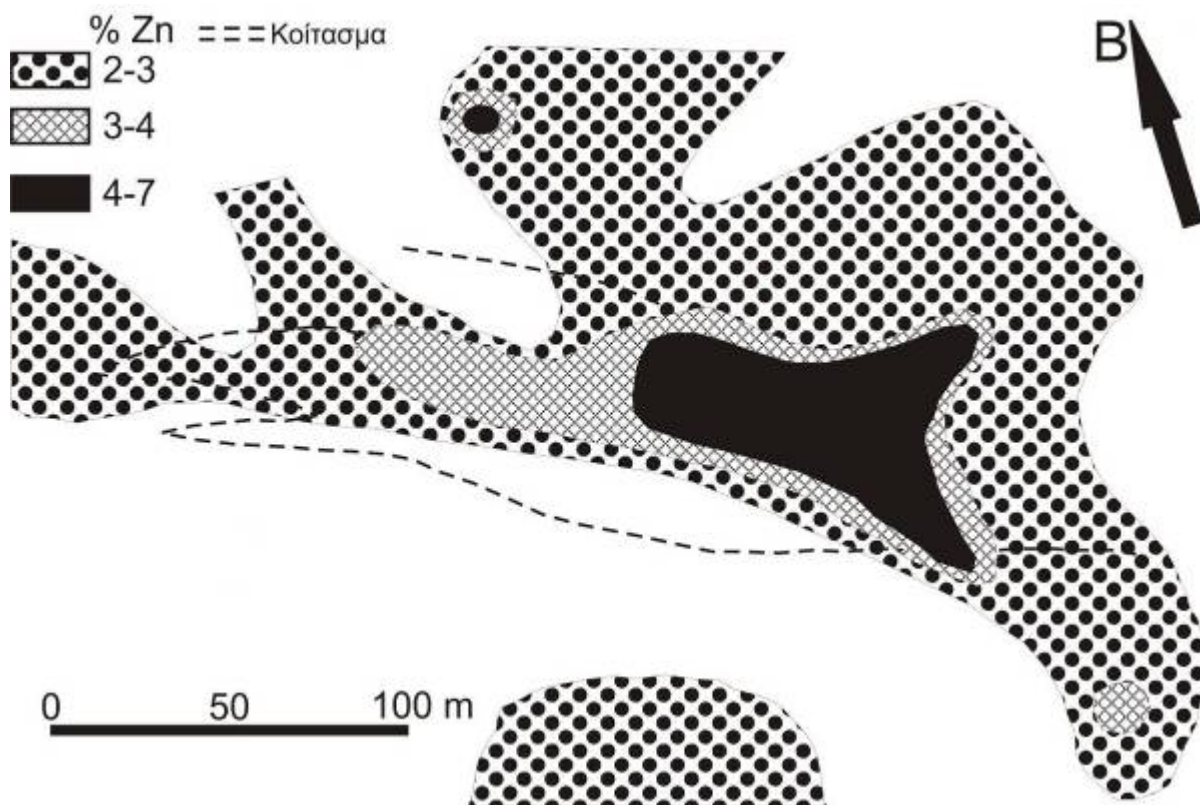
Η **βιογεωχημεία** βασίζεται στην συλλογή των φυτών ή σε ορισμένα τμήματα αυτών και στη χημική ανάλυσή τους για την καταγραφή γεωχημικών ανωμαλιών (Σχ. 4.16 και 4.17). Οι χημικές αναλύσεις γίνονται συνήθως σε στάχτη από τμήματα δένδρων (πχ. φλούδες, κλωνάρια, φύλλα κλπ.). Η ερμηνεία των γεωχημικών ανωμαλιών βλάστησης είναι σύνθετη. Συνήθως, όπου οι βιογεωχημικές ανωμαλίες υπέδειξαν κοίτασμα, το ίδιο συμβαίνει και με τη γεωχημική ανωμαλία εδάφους, διότι τα μέταλλα εμπλουτίζονται στο έδαφος με την πτώση των φύλλων.

Πίνακας 4.3. Παγκόσμιοι (Π) και τοπικοί (Τ) δείκτες φυτά (Frietsch 1972, Brooks 1983, Kelepertsis et al. 1985, Filippidis et al. 2012).

Στοιχεία	Φυτά δείκτες
Cu	Acalypha dikuluwensis (Π) Bulbostylis barbata (Π) Mielichhoferia macrocarpa (Π) Mielichhoferia mielichhoferi (Π) Merceya ligulata (Π) Oligotrichum hercynicum (Π) Eschscholtzia mexicana (Τ) Αριζόνα (ΗΠΑ) Viscaria alpina (Τ) Κεντρική Σουηδία Rumex acetosella (Τ) Σερβομακεδονική ζώνη (Ελλάδα) Minuartia verna (Τ) Σερβομακεδονική ζώνη (Ελλάδα) Silene compacta Fischer (Τ) Μάζα της Ροδόπης (Ελλάδα)
Fe	Acacia patens (Τ) Αυστραλία Burtonia polyzyga (Τ) Αυστραλία Eriachne dominii (Τ) Αυστραλία Silene compacta Fischer (Τ) Μάζα της Ροδόπης (Ελλάδα)
Pb	Alyssum wulfenianum (Π) Baptisia bracteata (Τ) Wisconsin (ΗΠΑ) Erianthus giganteus (Τ) Tennessee (ΗΠΑ) Rumex acetosella (Τ) Σερβομακεδονική ζώνη (Ελλάδα) Minuartia verna (Τ) Σερβομακεδονική ζώνη (Ελλάδα)
Se & U	Aster venusta (Π) Astragalus spp. (Π) Oonopsis spp. (Π) Stanleya spp. (Π)
Zn	Viola calaminaria(Π) Philadelphus spp (Τ) ΗΠΑ Rumex acetosella (Τ) Σερβομακεδονική ζώνη (Ελλάδα) Minuartia verna (Τ) Σερβομακεδονική ζώνη (Ελλάδα) Silene compacta Fischer (Τ) Μάζα της Ροδόπης (Ελλάδα)
Ag	Eriogonum ovalifolium (Τ)-Montana ΗΠΑ
V	Astragalus bisulcatus (Π)



Σχήμα 4.16. Βιογεωχημική ανωμαλία Pb σε στάχτη από κλωνάρια δένδρων, δηλώνοντας μετάλλευμα γαληνίτη σε ψαμμίτη, που καλύπτεται από ιζήματα παγετώνα (Lang 1970).



Σχήμα 4.17. Βιογεωχημική ανωμαλία Zn σε στάχτη από φλούδα σημόδας, πάνω από κοίτασμα σουλφιδίων (σιδηροπυρίτης, χαλκοπυρίτης, αρσενοπυρίτης και σφαλερίτης) στο Vasterbotten (Σουηδίας). Κανονικές τιμές σε στάχτη από φλούδα σημόδας είναι 0,1% περίπου (Frietsch 1972).

4.9. Γεωχημεία αερίων

Η γεωχημεία αερίων βασίζεται στη χημική ανάλυση των αερίων. Συγκεκριμένα αέρια και πτητικά συστατικά λειτουργούν ως δείκτες συγκεκριμένων κοιτασμάτων. Η απελευθέρωση των πτητικών συστατικών γίνεται κύρια με την οξείδωση των κοιτασμάτων, τη ραδιενεργό διάσπαση και με την ηφαιστειογένεση. Οι χημικές αναλύσεις γίνονται στον αέρα της ατμόσφαιρας, του εδάφους και των υδάτων. Εναέριες μετρήσεις είναι εφικτές για ορισμένα αέρια (π.χ. Hg), το αεροπλάνο πετά σε απόσταση 60-120 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους. Ορισμένα αέρια που λειτουργούν ως δείκτες κοιτασμάτων δίνονται στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4. Αέρια ως δείκτες κοιτασμάτων (Bristow & Jonasson 1972).

Ατμοί	Τύπος κοιτάσματος
Hg	Σουλφίδια Ag-Pb-Zn. Σουλφίδια Zn-Cu. Κοιτάσματα U. Κοιτάσματα Au. Κοιτάσματα Sn-Mo. Σιδηροπυρίτες. Πολυμεταλλικά κοιτάσματα (Hg, As, Sb, Bi, Cu).
SO ₂	Όλα τα κοιτάσματα σουλφιδίων.
H ₂ S	Όλα τα κοιτάσματα σουλφιδίων.
CO ₂ , O ₂	Όλα τα κοιτάσματα σουλφιδίων. Κοιτάσματα Au.
N ₂ O, NO ₂	Κοιτάσματα αζωτούχων νιτρικών αλάτων.
F, Br, I	Σουλφίδια Pb-Zn. Κοιτάσματα πορφυριτικού Cu.
He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn	Κοιτάσματα U-Ra. Σουλφίδια Hg.
Συστατικά από Pb, Cu, Ag, Ni, Co	Κοιτάσματα Au-As. Πιθανώς όλα τα κοιτάσματα σουλφιδίων.

Το SO₂ και H₂S και άλλα αέρια που ελευθερώνονται κατά την οξείδωση κοιτασμάτων σουλφιδίων, εκτός του ατμοσφαιρικού αέρα, μπορούν να μετρηθούν στον αέρα που εγκλωβίζεται στα εδάφη και στα ύδατα. Το Ουράνιο με τη ραδιενεργό διάσπαση δίνει ράδιο, το οποίο με τη σειρά του διασπάται στο ευγενές αέριο, το ραδόνιο. Το ραδόνιο έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε μετρήσεις κυρίως στον αέρα των εδαφών και υδάτων, στην αναζήτηση κοιτασμάτων ουρανίου και ραδίου. Το ιώδιο συνδέεται με πορφυριτικά κοιτάσματα χαλκού και άλλους τύπους μεταλλικών κοιτασμάτων, γι' αυτό μετρήσεις ιωδίου στον αέρα εδάφους ήταν συνήθως αποτελεσματικές για τον εντοπισμό αυτών των κοιτασμάτων.

Στα κοιτάσματα σουλφιδίων που βρίσκονται σε ασβεστολιθικά πετρώματα, ο αέρας που εγκλωβίζεται στα υπερκείμενα εδάφη είναι φτωχός σε O₂ και πλούσιος σε CO₂. Το θειικό οξύ που σχηματίζεται με την οξείδωση των σουλφιδίων, αντιδρά με τα ανθρακικά ορυκτά του πετρώματος και παράγει

πρόσθετο CO₂, έτσι ο λόγος CO₂:O₂ στον αέρα που εγκλωβίζεται στο έδαφος, αυξάνεται ακόμα περισσότερο. Γι' αυτό ο λόγος CO₂:O₂ στον αέρα εδαφών είναι πολύ αποτελεσματικός στην αναζήτηση κοιτασμάτων σουλφιδίων σε ασβεστολιθικά πετρώματα. Για την καταγραφή λιθώνων με σουλφίδια χρησιμοποιήθηκαν με πολύ μεγάλη επιτυχία, ειδικά εκπαιδευμένοι σκύλοι. Τα ειδικά εκπαιδευμένα σκυλιά αντιδρούν στους ατμούς του SO₂ και άλλων αερίων του θείου, που δημιουργούνται με την οξείδωση των σουλφιδίων. Η χρησιμοποίηση των ειδικά εκπαιδευμένων σκύλων για τον εντοπισμό σουλφιδίων ξεκίνησε στην Σκανδιναβία, όπου αναφέρονται περιπτώσεις αντίδρασης των σκύλων σε σουλφίδια εντός του εδάφους, σε βάθη μέχρι και 4 μέτρα.

4.10. Αναζήτηση υδρογονανθράκων

Η γεωχημική αναζήτηση υδρογονανθράκων (πετρέλαιο και φυσικό αέριο) διαφέρει σε κάποια βασικά θέματα, σε σχέση με τη γεωχημική αναζήτηση μεταλλευμάτων (Μ) καθώς και βιομηχανικών ορυκτών και πετρωμάτων (ΒΟΠ). Η εφαρμογή της γεωχημείας στην αναζήτηση υδρογονανθράκων απαιτεί πολυσύστατη ανάλυση των ρευστών και πετρωμάτων, γνώσεις υδροδυναμικής, γεωφυσικές έρευνες και τέλεια αντίληψη της γεωλογίας. Οι βασικές διαφορές δίνονται στον Πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5. Βασικές διαφορές στη γεωχημική αναζήτηση μεταλλευμάτων (Μ), βιομηχανικών ορυκτών & πετρωμάτων (ΒΟΠ) και υδρογονανθράκων (πετρέλαιο και φυσικό αέριο).

Μεταλλεύματα (Μ) + Βιομηχανικά Ορυκτά και Πετρώματα (ΒΟΠ)	Υδρογονάνθρακες (πετρέλαιο και φυσικό αέριο)
Κυρίως επιφανειακή αναζήτηση ή μικρού βάθους, Γενικά επιφανειακές συνθήκες.	Γενικά συνθήκες μεγάλου βάθους, υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, υψηλές συγκεντρώσεις H ₂ S.
Γνώσεις υδροδυναμικής βασικός παράγοντας.	Γνώσεις υδροδυναμικής αναγκαίος παράγοντας.
Κυρίως χρήση μόνο ανόργανων δεικτών.	Χρήση οργανικών και ανόργανων δεικτών.
Ποτέ ως πολύ σπάνια χρήση μικροβιολογικών δεικτών.	Χρήση μικροβιολογικών δεικτών αυξάνεται συνεχώς.
Στατικό το αναζητούμενο.	Ευκίνητο και μπορεί να διαφύγει.

5. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ

5.1. Εισαγωγή

Η ζήτηση ορυκτών πρώτων υλών αυξάνεται συνεχώς με αποτέλεσμα ο όγκος των εξορυχθέντων πετρωμάτων να γίνεται όλο και μεγαλύτερος. Ο άνθρωπος με τις δραστηριότητές του ρυπαίνει το περιβάλλον σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό σε σύγκριση με τις φυσικές διεργασίες. Η εκμετάλλευση των ορυκτών πρώτων υλών δημιουργεί περιβαλλοντικά προβλήματα, ταυτόχρονα όμως οι ορυκτές πρώτες ύλες ή προϊόντα αυτών είναι απαραίτητα και χρησιμοποιούνται σε καθημερινή βάση από τον άνθρωπο. Περίπου το 60% των βιομηχανικών ορυκτών και πετρωμάτων χρησιμοποιούνται στη θεραπεία και προστασία του περιβάλλοντος. Η εξόρυξη των ορυκτών πρώτων υλών γίνεται επιφανειακά και υπόγεια. Η επιφανειακή εξόρυξη είναι φθηνότερη, αλλά έχει πιο άμεσες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η εκμετάλλευση των ορυκτών πρώτων υλών, μετά το στάδιο εξόρυξης περιλαμβάνει και τα στάδια μεταποίησης και παραγωγής προϊόντων προς χρήση (Φιλιππίδης 2002).

Η εξόρυξη και μεταποίηση των ορυκτών πρώτων υλών μπορεί να έχει επίδραση στα εδάφη, στο νερό και στην ατμόσφαιρα. Επίσης, μπορεί να έχει και κοινωνικές επιδράσεις, όχι μόνο στην περιοχή εξόρυξης, αλλά και στην ευρύτερη περιοχή σε νομούς, περιφέρειες, αλλά και σ' ολόκληρη τη χώρα. Η σύμφωνη γνώμη των τοπικών κοινωνιών, η αυστηρή τήρηση των περιβαλλοντικών όρων, η παράλληλη και τελική αποκατάσταση του περιβάλλοντος, καθώς και τα ανταποδοτικά οφέλη των τοπικών κοινωνιών, χαρακτηρίζουν την εκμετάλλευση των ορυκτών πρώτων υλών στην Ευρωπαϊκή Ένωση και στις λοιπές αναπτυγμένες χώρες της υφελίου. Η εκμετάλλευση των ορυκτών πρώτων υλών με αυστηρούς περιβαλλοντικούς όρους, αποτελεί βασική αρχή της περιβαλλοντικής νομοθεσίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Οι πλήρης εφαρμογή της Ευρωπαϊκής περιβαλλοντικής νομοθεσίας και η χρήση βιομηχανικών ορυκτών και πετρωμάτων κατά την αποκατάσταση, μπορούν να μετατρέψουν το περιβάλλον εξόρυξης καλύτερο από ότι ήταν πριν την εξόρυξη.

Μεταλλεύματα και περιβάλλον, ενεργειακές ορυκτές πρώτες ύλες και περιβάλλον, ιχνοστοιχεία και περιβάλλον, περιβάλλον και βιομηχανικά ορυκτά-πετρώματα, περιβαλλοντική ορυκτολογία, ορυκτές πρώτες ύλες και μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων, καθώς και η περιβαλλοντική νομοθεσία, αποτελούν τα βασικά αντικείμενα της περιβαλλοντικής γεωχημείας (Sarkar et al. 2007, De Vivo et al. 2008). Η ελαχιστοποίηση της περιβαλλοντικής υποβάθμισης εξαιτίας της εξόρυξης και μεταποίησης των ορυκτών πρώτων υλών είναι υποχρέωση μ.α., των γεωλόγων, χημικών και γεωχημικών.

5.2. Μεταλλεύματα και περιβάλλον

5.2.1. Όξινη απορροή μεταλλείων

Η όξινη απορροή μεταλλείων οφείλεται στην οξείδωση των μεταλλικών ορυκτών που συνήθως είναι εντονότερη στα θειούχα ορυκτά (De Vivo et al. 2008, Duke & Williams 2008). Τα μεταλλικά ορυκτά με την παρουσία αέρα,

νερού και οξειδωτικών βακτηρίων, οξειδώνονται με εξώθερμες αντιδράσεις και ανάλογα με την ομάδα των ορυκτών παράγεται θειικό οξύ και κατιόντα μετάλλων (Πίν. 5.1). Η ταχύτητα οξείδωσης των ορυκτών εξαρτάται μεταξύ άλλων από το pH και την κοκκομετρία των ορυκτών. Η ταχύτητα οξείδωσης των ορυκτών αυξάνεται με την μείωση της κοκκομετρίας των, ενώ η αντίσταση των ορυκτών στην οξείδωση εξαρτάται και από τις συνθήκες οξείδωσης (ατμόσφαιρας, εργαστηριακές, gossan, απόβλητα πετρωμάτων).

Πίνακας 5.1. Προϊόντα υδατικών διαλυμάτων με πλήρη οξείδωση των σημαντικότερων ορυκτών της ομάδας των σουλφιδίων (Sengupta 1993).

Ορυκτό	Χημικός τύπος	Προϊόντα υδατικών διαλυμάτων
Σιδηροπυρίτης	FeS ₂	Fe ³⁺ , SO ₄ ²⁻ , H ⁺
Μαγνητοπυρίτης	FeS	Fe ³⁺ , SO ₄ ²⁻ , H ⁺
Χαλκοπυρίτης	CuFeS ₂	Cu ²⁺ , Fe ³⁺ , SO ₄ ²⁻ , H ⁺
Βορνίτης	Cu ₅ FeS ₄	Cu ²⁺ , Fe ³⁺ , SO ₄ ²⁻ , H ⁺
Αρσеноπυρίτης	FeAsS	Fe ³⁺ , AsO ₄ ³⁻ , SO ₄ ²⁻ , H ⁺
Τετραεδρίτης - Τεναντίτης	Cu ₁₂ (Sb,As) ₄ S ₁₃	Cu ²⁺ , SbO ₃ ³⁻ , AsO ₄ ³⁻ , SO ₄ ²⁻ , H ⁺
Μολυβδαινίτης	MoS ₂	MoO ₄ ²⁻ , SO ₄ ²⁻ , H ⁺
Σφαλερίτης	ZnS	Zn ²⁺ , SO ₄ ²⁻ , H ⁺
Γαληνίτης	PbS	Pb ²⁺ , SO ₄ ²⁻ , H ⁺
Κοβαλτίτης	CoAsS	Co ²⁺ , AsO ₄ ³⁻ , SO ₄ ²⁻ , H ⁺
Πεντανδίτης	(Fe,Ni) ₉ S ₈	Fe ³⁺ , Ni ²⁺ , SO ₄ ²⁻ , H ⁺

Στα κοιτάσματα μεταλλικών ορυκτών συνυπάρχουν και σύνδρομα ορυκτά (ανθρακικά, αργιλικά, πυριτικά, κτλ.). Κατά την οξείδωση των μεταλλικών ορυκτών, με τη συμμετοχή και των συνδρόμων ορυκτών, ανάλογα με την αρχική ορυκτολογική σύσταση και τις συνθήκες οξείδωσης, σχηματίζονται τα δευτερογενή ορυκτά, τα οποία με τη σειρά τους συμμετέχουν στην δημιουργία όξινων διαλυμάτων. Ορισμένα από τα δευτερογενή ορυκτά που παρατηρήθηκαν σε αποθέσεις εκμετάλλευσης σουλφιδίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ο σχηματισμός όξινων διαλυμάτων με σημαντικές περιεκτικότητες σε μέταλλα (As, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn κτλ.). Τυπικές αναλύσεις όξινων διαλυμάτων μεταλλείων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.2. Ορισμένα δευτερογενή ορυκτά που εντοπίστηκαν σε αποθέσεις εκμετάλλευσης σουλφιδίων (Jambor & Blowes 1994).

Ορυκτό	Χημικός τύπος	Ορυκτό	Χημικός τύπος
Γκαιτίτης	α-FeOOH	Μαλαχίτης	Cu ₂ (CO ₃)(OH) ₂
Λεπιδοκροκίτης	γ-FeOOH	Υδροκερυσίτης	Pb ₃ (CO ₃) ₂ (OH) ₂
Ακαγανείτης	β-FeOOH	Υδροζινκίτης	Zn ₅ (CO ₃) ₂ (OH) ₆
Αγγλεσίτης	PbSO ₄	Γύψος	CaSO ₄ ·2H ₂ O
Μελαντερίτης	FeSO ₄ ·7H ₂ O	Μπασσανίτης	2CaSO ₄ ·H ₂ O
Εψωμίτης	MgSO ₄ ·7H ₂ O	Γιαροσίτης	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆
Ροζενίτης	FeSO ₄ ·4H ₂ O	Καολινίτης	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Κοκουίμπίτης	Fe ₂ (SO ₄) ₃ ·9H ₂ O	Βερμικουλίτης	(Mg,Fe) ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂

Πίνακας 5.3. Τυπικές αναλύσεις (mg/l) όξινων διαλυμάτων μεταλλείων (Sengupta 1993).

Μεταλλείο	pH	Ca	Mg	Cu	Zn	Pb	Fe	Mn	SO ₄
Cu-Pb-Zn, Ενεργό	4,0	-	-	17	118	0,4	79	21	36
Cu-Pb-Zn, Ενεργό	2,0	-	-	11	1090	58,0	1830	0	16560
Cu-Pb-Zn, Εγκαταλειμμένο	2,6	454	178	3	34	0,5	11300	8	4050
U, Ενεργό	2,0	416	106	4	11	0,7	3200	6	7440
U, Εγκαταλειμμένο	2,4	-	-	2	9	0,0	300	4	6900

Οι πηγές σχηματισμού της όξινης απορροής μεταλλείων απαντούν, στις επιφανειακές και υπόγειες εκμεταλλεύσεις, στις θέσεις απόθεσης μεταλλευτικών στερεών αποβλήτων αλλά και στις θέσεις απόθεσης μεταλλευτικών προϊόντων, όπως εμπλουτίσματα ορυκτών (Sarkar et al. 2007). Η μη αντιμετώπιση της όξινης απορροής μεταλλείων οδηγεί στην ρύπανση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, όχι μόνο στο χώρο του μεταλλείου αλλά και στην ευρύτερη περιοχή. Η αντιμετώπιση του προβλήματος της όξινης απορροής μεταλλείων περιλαμβάνει:

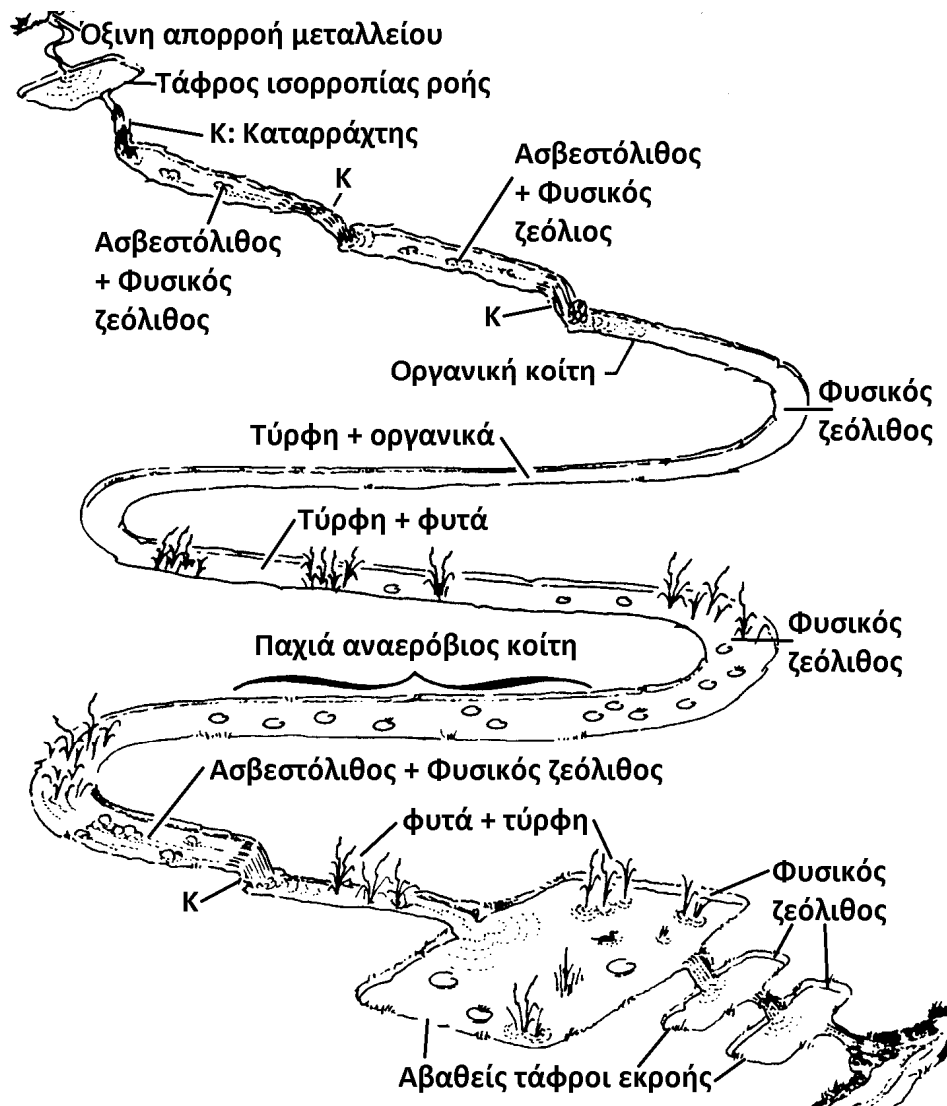
- α) Δειγματοληψία στερεών και υδάτων από στρατηγικά σημεία του μεταλλείου και της ευρύτερης περιοχής. Συστηματική μελέτη αυτών (π.χ. χημική και ορυκτολογική ανάλυση) για προσδιορισμό της οξειδωτικής δράσης από μεταλλευτικές δραστηριότητες προηγούμενων ετών. Εντοπισμός περιοχών με όξινο δυναμικό και προσθήκη αλκαλικών υλικών σ' αυτές.
- β) Συστηματική μελέτη του μεταλλεύματος, των μεταλλικών στείρων και των προϊόντων της μεταλλευτικής δραστηριότητας. Κατάταξη των υλικών αυτών ανάλογα με το δυναμικό γένεσης όξινης απορροής. Τα απόβλητα ή προϊόντα με υψηλή οξειδωτική δράση αποτίθενται χωριστά και καλύπτονται με υλικά κάλυψης μεταλλευτικών στερεών (Πίν. 5.4), για τον περιορισμό της κυκλοφορίας του αέρα. Επίσης, γίνεται χρήση βακτηριοκτόνων για την καταστολή της οξειδωτικής δράσης των βακτηρίων.

Πίνακας 5.4. Ορισμένα υλικά κάλυψης μεταλλευτικών στερεών (Sengupta 1993).

Υλικό	Διαπερατότητα (m/sec)	Υλικό	Διαπερατότητα (m/sec)
Συμπιεσμένη άργιλος	$10^{-9} - 10^{-11}$	Σκυροκονίαμα	$10^{-10} - 10^{-12}$
Συμπιεσμένο επιφ. έδαφος	$10^{-5} - 10^{-8}$	Άσφαλτος	10^{-20}
Τύρφη τέλματος	$10^{-5} - 10^{-6}$	HDPE συνθετικό	αδιαπέρατο

- γ) Μελέτη καταλληλότητας των χώρων απόθεσης των στερεών αποβλήτων και προϊόντων της μεταλλευτικής δραστηριότητας (μπάζα, τέλματα επίπλευσης, συμπτκνώματα).
- δ) Καταστολή της οξειδωτικής δράσης, όχι μόνο στις εν λειτουργία θέσεις εξόρυξης και απόθεσης, αλλά και των εξοφλημένων θέσεων ή στοών του μεταλλείου. Κλείσιμο ή παύση των εργασιών του μεταλλείου ή θέσεων ή στοών, απαιτεί ειδικό σχέδιο καταστολή της οξειδωτικής δράσης στο εγκαταλειμμένο μεταλλείο ή θέση ή στοά.

- ε) Περιοδική δειγματοληψία και μελέτη των στερεών αποβλήτων ή προϊόντων της μεταλλευτικής δραστηριότητας. Εκτός της χημικής και ορυκτολογικής σύστασης στους σωρούς των αποβλήτων ή προϊόντων, εξετάζεται η κοκκομετρία, η πυκνότητα, η υγρασία, το πορώδες και η διαπερατότητα.
- στ) Συνεχή έλεγχο της ποιότητας των υγρών αποβλήτων και ακολούθως συλλογή και κατεργασία των όξινων νερών της μεταλλευτικής δραστηριότητας. Η ποιότητα του νερού στους πόρους της απόθεσης και στον υδροφόρο ορίζοντα ελέγχεται τακτικά. Η κατεργασία όξινων διαλυμάτων μπορεί να γίνει με αναερόβια φρεάτια ασβεστολίθου ή άλλων βιομηχανικών ορυκτών, καθώς και με τη δημιουργία τεχνητού υδροβιότοπου (Σχ. 5.1). Στον τεχνητό υδροβιότοπο, μ.α. χρησιμοποιούνται φυτά, βιομηχανικά ορυκτά και πετρώματα, με στόχο την εξουδετέρωση της οξύτητας και την απορρόφηση διαφόρων μετάλλων και ενώσεων. Η αποτελεσματικότητα κατεργασίας όξινων υδάτων μεταλλείων με βάση τα στοιχεία έντεκα τεχνητών υδροβιοτόπων παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.5.



Σχήμα 5.1. Σχηματική παράσταση τεχνητού υδροβιότοπου (Φιλιππίδης & Κασώλη-Φουρναράκη 2000).

Πίνακας 5.5. Αποτελεσματικότητα (Α) κατεργασίας όξινων υδάτων μεταλλείων σε τεχνητούς υδροβιότοπους (Sengupta 1993).

Ποιοτικοί παράμετροι	Μέτρηση Εισροής	Μέτρηση Εκροής	Α (%)
pH (ισοδύναμο H ⁺)	4,9	6,0	92
Οξύτητα(mg/l) ισοδύναμο CaCO ₃	170	40	76
Fe (mg/l)	33,0	1,2	96
Mn (mg/l)	26	15	42
SO ₄ (mg/l)	1.000	500	50

- ζ) Περιοδική δειγματοληψία και μελέτη επιφανειακών και υπόγειων υδάτων της ευρύτερης περιοχής. Η μελέτη μ.α. περιλαμβάνει μετρήσεις ιχνοστοιχείων, θερμοκρασίας, pH και αγωγιμότητας.
- η) Στρατηγική καταστολής της όξινης απορροής μεταλλείου, όχι μόνο στην περιοχή του μεταλλείου, αλλά και στην ευρύτερη περιοχή. Ο εντοπισμός όλων των θέσεων με οξειδωτική δράση (κενά στοών, μπάζα, απόβλητα), καθώς και η καταγραφή δομών (ρωγματώσεις, στρώσεις) μεταφοράς των όξινων διαλυμάτων σε συνδυασμό με τα μέτρα καταστολής, συμβάλλουν καθοριστικά στην αντιμετώπιση της όξινης απορροής μεταλλείων, όχι μόνο κατά τη λειτουργία του μεταλλείου αλλά ιδιαίτερα μετά το κλείσιμό του.

5.2.2. Διαχείριση στερεών αποβλήτων

Στο χώρο του μεταλλείου παράγονται στερεά απόβλητα, όπως μπάζα εκμετάλλευσης, τέλματα επίπλευσης και ιζήματα εξουδετέρωσης από την κατεργασία υδάτων και συμπυκνωμάτων (Brownlow 1996). Τα μεταλλευτικά απόβλητα και τα προϊόντα εμπλουτισμού, αποθέτονται σε ασφαλείς θέσεις απόθεσης. Οι θέσεις απόθεσης ή είναι φυσικώς κατάλληλες ή προετοιμάζονται κατάλληλα, έτσι ώστε να διαθέτουν «αδιαπέρατο» αργιλικό υπόστρωμα, πάχους μερικών δεκάδων εκατοστών με χαμηλή διαπερατότητα. Οι τελικοί σωροί των αποβλήτων και των συμπυκνωμάτων καλύπτονται με στεγανά υλικά ή με αδιάβροχα καλύμματα. Τα παραπάνω μέτρα μειώνουν καθοριστικά την οξείδωση των μεταλλικών ορυκτών (ιδιαίτερα των θειούχων) και αποτρέπεται έτσι η δημιουργία όξινης απορροής στις θέσεις απόθεσης των στερεών αποβλήτων και των συμπυκνωμάτων.

5.2.3. Εκτροπή επιφανειακών υδάτων

Η κατείσδυση των επιφανειακών υδάτων (βροχοπτώσεις) στις υπόγειες και υπαίθριες εκμεταλλεύσεις, αποτρέπεται με επιφανειακό δίκτυο τσιμεντένιων καναλιών περισυλλογής των νερών. Έτσι αποτρέπεται η κατείσδυση των επιφανειακών υδάτων στις ιδιαίτερα ευαίσθητες θέσεις όπου το μέταλλευμα έχει εξοφληθεί. Επίσης, αποτρέπεται η διαλυτοποίηση και μεταφορά των προϊόντων οξείδωσης των μεταλλικών ορυκτών, η οποία σε αντίθετη περίπτωση θα οδηγούσε στην αύξηση της οξύτητας και της συγκέντρωσης των μετάλλων στα νερά του μεταλλείου. Το τελικό αποτέλεσμα του δικτύου

εκτροπής και περισυλλογής των επιφανειακών υδάτων είναι η σημαντική μείωση της παροχής των νερών, αλλά και η βελτίωση της ποιότητας των νερών του μεταλλείου.

5.2.4. Μέθοδοι εκμετάλλευσης

Η επιλογή της μεθόδου εκμετάλλευσης μπορεί να έχει θετική ή αρνητική περιβαλλοντική επίπτωση στο χώρο της εκμετάλλευσης και της ευρύτερης περιοχής. Σε υπόγειο μεταλλείο, η αντικατάσταση της μεθόδου εκμετάλλευσης “κατακρήμνιση διαδοχικών οροφών” με την μέθοδο της “λιθογόμωσης” των εξοφλημένων θέσεων του κοιτάσματος με υλικό πλήρωσης έχει θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Το υλικό πλήρωσης παρασκευάζεται με τη χρήση των υλικών του τέλους επίπλευσης, αναμειγμένο με νερό και τσιμέντο. Οι θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι οι ακόλουθες.

- α) Αποτρέπεται η δημιουργία κενών στα υπόγεια και περιορίζονται οι διαταραχές στην επιφάνεια του εδάφους (ρηγματώσεις, καθιζήσεις, κτλ.), με αποτέλεσμα τη μείωση της κατείσδυσης επιφανειακών και όμβριων υδάτων στο μεταλλείο.
- β) Περιορίζεται σημαντικά η κυκλοφορία αέρα και νερού στα υπόγεια, ενώ η ανάμειξη του τσιμέντου στο υλικό λιθογόμωσης προσθέτει αλκαλικότητα στα νερά του μεταλλείου, με αποτέλεσμα τη μείωση της ποσότητας και τη βελτίωση της ποιότητας των νερών που αντλούνται από τα υπόγεια του μεταλλείου.
- γ) Περιορίζεται η όξινη απορροή και ιδιαίτερα στις παλιές εξοφλήσεις του μεταλλείου, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της ποιότητας των νερών του μεταλλείου.
- δ) Η προσθήκη αλκαλικότητας στα υπόγεια (τσιμέντο της λιθογόμωσης) μειώνει τις εστίες οξείδωσης των μεταλλικών ορυκτών στις εξοφλημένες θέσεις του μεταλλείου.
- ε) Περιορίζεται ο όγκος των στερεών αποβλήτων του μεταλλείου, διότι με την λιθογόμωση το τέλος της επίπλευσης επιστρέφει στα υπόγεια.

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα με μικρές διαφορές ισχύουν και σε επιφανειακές εκμεταλλεύσεις.

5.2.5. Έλεγχος ποιότητας επιφανειακών και υπόγειων υδάτων

Για την πρόληψη πιθανών αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην ποιότητα των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων από την εξόρυξη μεταλλευμάτων, απαιτείται συστηματικός έλεγχος των νερών στην ευρύτερη περιοχή του μεταλλείου. Η συστηματική δειγματοληψία νερών θα πρέπει να γίνεται σύμφωνα με την γενική γεωλογία της περιοχής αλλά και την κοιτασματολογία του μεταλλείου. Ο έλεγχος αυτός θεωρείται απαραίτητος για να επιβεβαιώσει ότι τα μέτρα περιβαλλοντικής προστασίας που λαμβάνονται στην περιοχή εξόρυξης είναι αποτελεσματικά και επαρκή.

5.2.6. Διαχείριση υγρών αποβλήτων

Τα νερά του μεταλλείου πριν την απόρριψή τους σε φυσικό υδάτινο αποδέκτη συλλέγονται και υπόκεινται σε διάφορες κατεργασίες, φυσικές ή/και χημικές, με κύριο στόχο το τελικό προς διάθεση στο φυσικό αποδέκτη νερό, να ικανοποιεί τα όρια που επιβάλλει η περιβαλλοντική νομοθεσία, όσον αφορά τις συγκεντρώσεις μετάλλων, το pH, αιωρούμενα στερεά, κτλ. Τα υγρά απόβλητα πριν την απόρριψή τους πρέπει να διέρχονται από δεξαμενές διαύγειας για μείωση των αιωρουμένων στερεών. Σε ύδατα με όξινο pH (<6,0) απαιτείται κατεργασία με ασβέστη ή άλλα βιομηχανικά ορυκτά, σε μονάδα εξουδετέρωσης και ρύθμισης του pH προς το ουδέτερο έως αλκαλικό (6,5 - 8,5). Ο τεχνητός υδροβιότοπος (βλέπε 5.2.1. όξινη απορροή μεταλλείων) αποτελεί αποτελεσματική λύση για τον καθαρισμό των υγρών αποβλήτων.

5.2.7. Μεταλλεύματα χρυσού και περιβάλλον

Η ανάκτηση του Au (ή και άλλων πολύτιμων μετάλλων) από το πλέγμα των ορυκτών και ιδιαίτερα των σουλφιδίων απαιτεί φρύξη, οξείδωση ή κυάνωση. Για περισσότερα από 100 χρόνια τώρα, κυανιούχα διαλύματα χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση του Au. Η σχέση μεταξύ του ιόντος κυανίου (CN⁻) και υδροκυανίου (HCN) εξαρτάται από το pH του συστήματος. Σε ύδατα με pH <8 το κυάνιο βρίσκεται κυρίως με τη μορφή του HCN. Η κατεργασία κυάνωσης για ανάκτηση του Au είναι μια σύνθετη χημική διαδικασία που περιλαμβάνει την δημιουργία πολλών συμπλόκων μετάλλου και κυανίου. Η βασική γενική αντίδραση της κυάνωσης Au είναι: $4\text{Au} + 8\text{NaCN} + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = 4\text{NaAu}(\text{CN})_2 + 4\text{NaOH}$. Η επιλογή μεθόδου κατεργασίας και ο βαθμός διαχείρισης των αποβλήτων καθορίζουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της μεταλλουργίας Au. Συνήθως, στους χώρους εκμετάλλευσης παράγονται διάφορα συμπυκνώματα ορυκτών, αλλά το συμπύκνωμα σιδηροπυρίτη ή/και αρσενόπυρίτη είναι αυτό που κυρίως περιέχει τον εκμεταλλεύσιμο Au. Τα συμπυκνώματα όμως αυτών των ορυκτών έχουν υψηλή δυσκατεργαστότητα, γι' αυτό και επιβάλλεται η διάσπαση του πλέγματος των ορυκτών με στόχο την απελευθέρωση και τέλος την ανάκτηση του Au. Το ποσοστό ανάκτησης του Au από το μέταλλευμα / συμπύκνωμα ανάλογα με την μέθοδο οξειδωτικής κατεργασίας κυμαίνεται από 4 έως 99%. Οι μέθοδοι αξιοποίησης δυσκατέργαστων χρυσοφόρων θειούχων μεταλλευμάτων / συμπυκνωμάτων χαρακτηρίζονται από το στάδιο της οξειδωτικής κατεργασίας. Σε βιομηχανική κλίμακα εφαρμόζονται κυρίως η φρύξη και η υδατική οξείδωση υπό πίεση, ενώ οι υπόλοιπες βακτηριακή οξείδωση, ατμοσφαιρική οξείδωση, λειοτρίβηση-κυάνωση, απευθείας κυάνωση και τήξη, εφαρμόζονται σπανιότερα. Συνηθίζεται επίσης να εφαρμόζονται συνδυασμοί των διαφόρων μεθόδων.

Η Φρύξη: Η φρύξη μπορεί να γίνει σε κενό ή σε αδρανή ατμόσφαιρα ή μπορεί να είναι οξειδωτική, αναγωγική - οξειδωτική, θειωτική ή χλωριωτική. Η υψηλή παραγωγή As_2O_3 και SO_2 με την μέθοδο αυτή, επιβάλλει αυστηρό έλεγχο της παραγωγικής διαδικασίας για την ελαχιστοποίηση του κινδύνου

ρύπανσης του περιβάλλοντος από εκπομπές As_2O_3 και SO_2 . Η περιβαλλοντική διαχείριση στην περίπτωση αυτή επιβάλλει χρήση μεθόδων για σταθεροποίηση (σχηματισμός ορυκτών) των ενώσεων του αρσενικού και θείου.

Η υδατική οξείδωση υπό πίεση: Ο πολφός του συμπυκνώματος των ορυκτών μετά από λειοτρίβηση σε υγρό κύκλωμα εισάγεται και οξειδώνεται υπό πίεση και θερμοκρασία. Ο οξειδωμένος πολφός οδηγείται ακολούθως στο τμήμα έκπλυσης / πάχυνσης και κατόπιν στο τμήμα κυάνωσης. Η εκχύλιση γίνεται σε pH περίπου 10,5 με αραιό διάλυμα κυανιούχου νατρίου, ενώ ταυτόχρονα προστίθεται ενεργός άνθρακας, ο οποίος προσροφά στην επιφάνειά του τα κυανιούχα σύμπλοκα του Au. Η ρύθμιση του pH γίνεται με προσθήκη πολφού ασβέστου. Ο ενεργός άνθρακας με τα κυανιούχα σύμπλοκα Au, εισάγεται στο τμήμα αποφόρτισης και ηλεκτρολυτικής ανάκτησης του Au. Η αποφόρτιση γίνεται με διαλύματα υδροχλωρικού οξέος, καυστικού νατρίου και κυανιούχου νατρίου. Μετά την αποφόρτιση το διάλυμα υποβάλλεται σε ηλεκτρόλυση για ανάκτηση του Au.

Με την προσθήκη πολφών ασβεστολίθου και ασβέστου σε pH περίπου 10, επιτυγχάνεται η εξουδετέρωση του αρσενικού οξίνου διαλύματος στο στάδιο έκπλυσης/πάχυνσης. Κατά την εξουδετέρωση καθιζάνουν ιόντα As σε ενώσεις του Fe (άμορφος σκοροδίτης), ενώ ο υπόλοιπος Fe και άλλα βαρέα μέταλλα καθιζάνουν ως υδροξείδια. Η παραγόμενη ιλύς (λάσπη) μετά από τον παχυντή εξουδετέρωσης αποτίθεται στη λεκάνη απόθεσης. Ένα άλλο τμήμα του As καταβυθίζεται στα αυτόκλειστα με τη μορφή του κρυσταλλικού σκοροδίτη.

Ο αποφορτισμένος ενεργός άνθρακας μετά από αναγέννηση της ενεργότητάς του, επανατροφοδοτείται στο κύκλωμα της κυάνωσης. Η υπερροή του πολφού των στείων υλικών του κυκλώματος της κυάνωσης μετά από τον παχυντή, επανέρχεται στο κύκλωμα κυάνωσης για εξοικονόμηση κυανιούχου νατρίου. Η υποροή του παχυντή της κυάνωσης, μετά από εξουδετέρωση αναμιγνύεται με την υποροή του παχυντή εξουδετέρωσης και ο πολφός αποθέτεται στη λεκάνη απόθεσης. Η υδατική φάση που αποστραγγίζει στη λεκάνη απόθεσης επιστρέφει στο παραγωγικό κύκλωμα.

Από τα παραπάνω εύκολα συμπεραίνεται ότι η ανάκτηση Au από το πλέγμα των σουλφιδίων απαιτεί χρήση επικίνδυνων χημικών ουσιών. Γι' αυτό, επιβάλλεται αυστηρός έλεγχος της παραγωγικής διαδικασίας και χρήση όλων των μέτρων περιβαλλοντικής προστασίας. Λόγω της μακρόχρονης πείρας του ανθρώπου στην ανάκτηση Au από σουλφίδια, η τεχνολογία σήμερα μπορεί να θεωρηθεί επαρκής και ασφαλής, εφόσον φυσικά εφαρμοστεί με συνέπεια και σοβαρότητα η Ευρωπαϊκή περιβαλλοντική νομοθεσία για την ανάκτηση χρυσού, η οποία σήμερα είναι η αυστηρότερη σε όλη την υφήλιο.

5.2.8. Η περίπτωση της μονάδας χρυσού Χαλκιδικής

Στην κατηγορία των δυσκατέργαστων θειούχων μεταλλευμάτων / συμπυκνωμάτων ανήκει η περίπτωση της Ολυμπιάδας. Το όριο εκμεταλλευσιμότητας του χρυσού είναι περίπου 3 g/t. Το συμπύκνωμα

σιδηροπυρίτη-αρσеноπυρίτη της Ολυμπιάδας περιέχει κατά μέσο όρο 26 g/t χρυσό (Πίν. 5.6). Ο Au βρίσκεται κυρίως στο πλέγμα των ορυκτών σιδηροπυρίτη και αρσеноπυρίτη.

Πίνακας 5.6. Χημική σύσταση του συμπυκνώματος σιδηροπυρίτη-αρσеноπυρίτη της Ολυμπιάδας Χαλκιδικής (Δημητριάδης & Κοντόπουλος 1994).

S	41 %	Zn	0,8 %	Au	26 g/t
Fe	40 %	Pb	0,7 %	Ag	20 g/t
As	12 %	Cu	0,1 %		
Αδιάλυτα	5 %				

Σε πιθανή ανάκτηση του χρυσού από το συμπύκνωμα σιδηροπυρίτη-αρσеноπυρίτη τα βασικά περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή είναι η διαχείριση των στερεών, υγρών και αέριων αποβλήτων.

α) Η διαχείριση των στερεών αποβλήτων απαιτεί την κατασκευή της λεκάνης απόθεσης, που πρέπει να περιλαμβάνει τα εξής στάδια: Διαμόρφωση του πυθμένα της λεκάνης με κλίση <2 %, επικάλυψη του πυθμένα με υδατοστεγές υλικό, εγκατάσταση αποστραγγιστικού συστήματος μέσω του οποίου το νερό θα καταλήγει σε δεξαμενή και ακολούθως θα επιστρέφει στην μονάδα ανάκτησης του Au, κατασκευή αναχώματος με αδιαπέρατο υλικό σε όλη την περίμετρο της λεκάνης απόθεσης, φύτευση ποωδών και θαμνωδών φυτών στο πρηνές του αναχώματος για σταθερότητα του πρηνούς και καλύτερη αισθητική του τοπίου, σύστημα υδρογεωτρήσεων κοντά στο ανάχωμα για συστηματική δειγματοληψία από τον υδροφόρο ορίζοντα, κατασκευή τάφρων γύρω από την λεκάνη απόθεσης για προστασία από τα νερά απορροής των γειτονικών περιοχών και για περιπτώσεις κατακλυσμιαίας βροχής, κατασκευή συστήματος διαβροχής της λεκάνης απόθεσης σε ξηρές περιόδους για αποφυγή διασποράς σκόνης με την πνοή ισχυρών ανέμων, παρακολούθηση της σταθερότητας των πρηνών του αναχώματος (ιδιαίτερα μετά την εκδήλωση σεισμών), τοποθέτηση πιεζόμετρων εξωτερικά της λεκάνης για έγκαιρο εντοπισμό υδροστατικών πιέσεων και τέλος συνεχόμενη κάλυψη χώρων με φυτική γη και δενδροφύτευση.

β) Η διαχείριση των υγρών αποβλήτων απαιτεί ανακύκλωση του νερού αποστράγγισης από την λεκάνη απόθεσης, ποιότητα νερών σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή νομοθεσία πριν την απόρριψή τους σε ανοικτό φυσικό αποδέκτη, εγκατάσταση συστήματος εξουδετέρωσης των κυανιόντων με H₂O₂ πριν την απόρριψη των αποβλήτων στη λεκάνη απόθεσης.

γ) Η διαχείριση αέριων αποβλήτων απαιτεί την μεθοδολογία/ες που δεν θα επιτρέπουν την ύπαρξη αέριων εκπομπών As₂O₃ και SO₂, την πρόβλεψη εγκατάστασης αφυγραντών που αποτρέπει την εκπομπή σταγονιδίων διαλύματος διαμέσου των εκπομπών ατμού από τα δοχεία εκτόνωσης των αυτοκλείστων, καθώς και εγκατάσταση απορρόφησης ατμών.

Η πλήρη δραστηριότητα των μεταλλείων Κασσάνδρας και εγκατάσταση της μεταλλουργίας Au και Ag, είναι ιδιαίτερα σημαντική για την εθνική οικονομία και την βιομηχανική ανάπτυξη της Ελλάδας. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η εφαρμογή των ευρωπαϊκών περιβαλλοντικών όρων και μέτρων προστασίας του περιβάλλοντος. Η περιβαλλοντική διαχείριση στερών και υγρών αποβλήτων μεταλλείων και επιστροφή εδαφών σε γεωργική χρήση, θα μπορούσε να γίνει και με τη χρήση φυσικών ζεολίθων. Οι φυσικοί ζεολίθοι δεσμεύουν και απομακρύνουν μέταλλα καθώς επίσης ρυθμίζουν προς το ουδέτερο το pH των υδάτων και των εδαφών (Pond & Mumpton 1984, Colella & Mumpton 2000, Bish & Ming 2001, Φιλιππίδης 2007, Filippidis & Kantiranis 2007, Φιλιππίδης κ.α. 2007, Filippidis 2010, Φιλιππίδης & Τσιραμπίδης 2012,).

5.3. Ενεργειακές πρώτες ύλες και περιβάλλον

5.3.1 Εισαγωγή

Σήμερα οι κύριες πηγές ενέργειας είναι τα ορυκτά στερεά καύσιμα (άνθρακες), το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, το νερό και η πυρηνική σχάση. Τα αποθέματα στερεών καυσίμων είναι πολύ μεγάλα, ενώ τα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι σαφώς λιγότερα. Τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα είναι πολύ λίγα και συνήθως τοπικής σημασίας, ενώ η λειτουργία πυρηνικών εργοστασίων δεν είναι απόλυτα ασφαλής. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση ανθράκων, πετρελαίου και της πυρηνικής σχάσης είναι σημαντικές. Έτσι, γίνεται προσπάθεια χρήσης εναλλακτικών ήπιων μορφών ενέργειας όπως η υδατική, η γεωθερμική, η ηλιακή, η αιολική και της βιομάζας. Τα οικονομικά και περιβαλλοντικά προβλήματα που συνδέονται με τους άνθρακες, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και την πυρηνική ενέργεια, οδηγούν την ανθρωπότητα στις εναλλακτικές ήπιες μορφές ενέργειας, για την πλήρη μετάβαση όμως, θα απαιτηθούν αρκετά ακόμη χρόνια έρευνας και ανάπτυξης.

5.3.2. Άνθρακες

Στους άνθρακες (τύρφη, λιγνίτης, λιθάνθρακας, ανθρακίτης), εκτός της μεθόδου εξόρυξης, σημαντικό ρόλο για το περιβάλλον παίζει η περιεκτικότητα των ανθράκων σε ορυκτά, ιχνοστοιχεία και θείο. Σε όλες τις μορφές εξόρυξης ανθράκων μπορεί να δημιουργηθεί το πρόβλημα της όξινης απορροής, ρυπαίνοντας τα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα. Η όξινη απορροή αντιμετωπίζεται με τη συλλογή/εκτροπή της επιφανειακής και υπόγειας απορροής, καθώς και με τα μέτρα προστασίας που αναφέρονται στο κεφάλαιο 5.2. Όλες οι μέθοδοι επιφανειακής εξόρυξης υποβαθμίζουν προσωρινά το τοπίο, με την απομάκρυνση μεγάλων ποσοτήτων υπερκείμενων και ενδιάμεσων στείρων υλικών. Η αποκατάσταση του τοπίου είναι απαραίτητη καθ' όλη τη διάρκεια αλλά και μετά την λήξη της εξόρυξης. Η αποκατάσταση του τοπίου με αναδάσωση μειώνει σημαντικά τη διασπορά ορυκτών και ιχνοστοιχείων στο νερό, στα εδάφη και στην ατμόσφαιρα. Οι εσωτερικές και εξωτερικές

αποθέσεις των στείων υλικών και των στερεών αποβλήτων με κατάλληλη ανάμειξη εδάφους, στείων, στερεών αποβλήτων, βιομηχανικών ορυκτών και πετρωμάτων, μπορούν να μετατραπούν σε γεωργικά εδάφη, περισσότερο έφορα απ' ότι ήταν πριν την εξόρυξη (Φιλιππίδης & Κασώλη-Φουρναράκη 2000).

Πολύ σημαντικό για το περιβάλλον είναι η περιεκτικότητα του άνθρακα σε **θείο**, γιατί με την καύση των ανθράκων ένα μέρος του θείου δεσμεύεται στα ανόργανα συστατικά (ορυκτά) και το υπόλοιπο εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα δημιουργώντας το πρόβλημα της όξινης βροχής (βλέπε κεφάλαιο 5.3.4). Στις περιπτώσεις χρήσης ανθράκων με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο (>3%), απαιτείται διαδικασία αποθείωσης του άνθρακα, έστω και αν με αυτό τον τρόπο αυξάνει η τιμή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

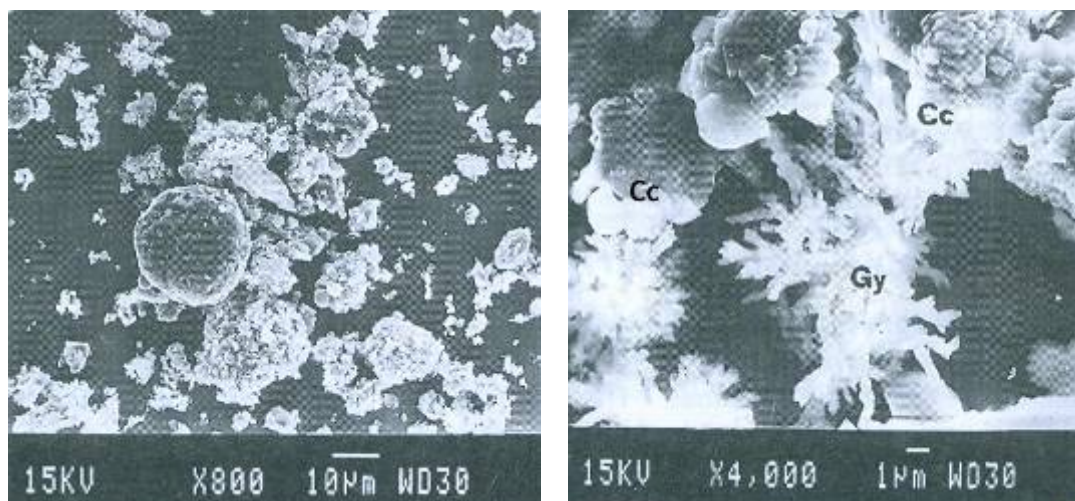
Κατά την καύση των ανθράκων τα ανόργανα συστατικά υφίστανται μια σειρά φυσικών και χημικών μεταβολών. Νέα ορυκτά δημιουργούνται είτε με την καύση είτε με τη διαβροχή της τέφρας. Οι κυριότερες **ορυκτολογικές φάσεις** των ανθράκων και της τέφρας καύσης αυτών (ιπτάμενη, εσχάρας, καπναερίων) αναφέρονται στον Πίνακα 5.7.

Πίνακας 5.7. Ορυκτά των ανθράκων της τέφρας καύσης αυτών (Mitchell & Gluskoter 1976, Filippidis & Georgakopoulos 1992, Filippidis et al. 1992, 1996a, Φιλιππίδης κ.α. 1997).

Ορυκτό (Κατηγορία) Χημικός τύπος	Ορυκτό (Κατηγορία) - Χημικός τύπος
Ασβεστίτης (A) CaCO_3	Γύψος (A & Δ) $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Δολομίτης (A) $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Αιματίτης (K) Fe_2O_3
Χαλαζίας (A) SiO_2	Ανυδρίτης (K) CaSO_4
Άστριοι (A) $(\text{K}, \text{Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8 - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	Ελεύθερο CaO (K) CaO
Μοσχοβίτης (A) $\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$	Περίκλαστο (K) MgO
Ιλλίτης (A) $\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$	Πορτλανδίτης (K) $\text{Ca}(\text{OH})_2$
Καολινίτης (A) $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Γκελενίτης (K) $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$
Σιδηροπυρίτης (A) FeS_2	Μερβινίτης (K) $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$
Σφαλερίτης (A) ZnS	Καλσιοφερρίτης (K) $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$
Γαληνίτης (A) PbS	Μετα-Καολινίτης (K) $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
Χαλκοπυρίτης (A) CuFeS_2	Μουλλίτης (K) $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$
Βαρύτης (A) BaSO_4	Εττρινγκίτης (Δ) $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{CO}_3)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$
Ζιρκόνιο (A) ZrSiO_4	Τομπερμορίτης (Δ) $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4-8\text{H}_2\text{O}$

(A): Αρχικά συστατικά των ανθράκων, (K): Δημιουργούνται κατά τη καύση των ανθράκων, (Δ): Δημιουργούνται με τη διαβροχή της τέφρας.

Η **κοκκομετρία** και η **μορφολογία** των ορυκτών της τέφρας και ιδιαίτερα της τέφρας καπναερίων (η τέφρα που διαμέσου των ηλεκτροστατικών φίλτρων διαφεύγει στην ατμόσφαιρα) έχει σημασία για το περιβάλλον και την υγεία του ανθρώπου. Η ιπτάμενη τέφρα (η τέφρα που κατακρατείται στα ηλεκτροστατικά φίλτρα) και η τέφρα εσχάρας (η τέφρα που καταπίπτει διαμέσου της σχάρας του καυστήρα), δημιουργούν περιβαλλοντικό πρόβλημα κυρίως με την απόθεσή τους σε ακάλυπτες εξωτερικές αποθέσεις (ισχυροί άνεμοι μεταφέρουν ορυκτά ως αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα). Τα σωματίδια της τέφρας καπναερίων έχουν μέγεθος <5 μm και είναι εισπνεύσιμα (Σχ. 5.2).



Σχήμα 5.2. Μικροφωτογραφίες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου ιπτάμενης τέφρας Πτολεμαΐδας (Αριστερά) Αιχμηροί κόκκοι χαλαζίας και σφαιρικά-ωοειδή κενοσφαιρίδια, (Δεξιά) Ιπτάμενη τέφρα κοκκομετρίας <math><5\mu\text{m}</math>, Cc: Ασβεστίτης, Gy: Γύψος (Kassoli-Fournaraki et al. 1993).

Τα **ιχνοστοιχεία** στους άνθρακες συνδέονται είτε με τα ορυκτά είτε με την οργανική ύλη (Πίν. 5.8). Κατά την καύση, ορισμένα ιχνοστοιχεία (πτητικά) εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα, άλλα και ανάλογα με την οργανική ή ανόργανη συγγενείά τους, εμπλουτίζονται στην ιπτάμενη τέφρα, άλλα στην τέφρα εσχάρας και άλλα πάλι στα σωματίδια της τέφρας καπναερίων.

Πίνακας 5.8. Περιεκτικότητα (ppm) ιχνοστοιχείων στους άνθρακες και η πιθανή σύνδεσή τους με τα ορυκτά συστατικά και την οργανική ύλη των ανθράκων. (1) Mason & Moore (1982), (2) Valkovic (1983), (3) Finkelman (1993, 1994).

Στοιχείο	Φλοιός Γης(1)	Άνθρακες Παγκοσμίως(2)	Πιθανή Μορφή Σύνδεσης(3)
As	1,8	5,0	Σιδηροπυρίτης
B	10	75	Οργανική, Ιλλίτης
Ba	425	500	Βαρύτης, Οργανική
Be	2,8	3,0	Οργανική, Αργίλους
Cd	0,2	1,3	Σφαλερίτης
Co	25	5	Σιδηροπυρίτης
Cr	100	10	Αργίλους, Οργανική
Cu	55	15	Χαλκοπυρίτης
Hg	0,08	0,01	Σιδηροπυρίτης
Li	20	65	Αργίλους
Mo	1,5	5,0	Σουλφίδια, Οργανική
Ni	75	15	Σουλφίδια, Οργανική, Αργίλους
Pb	13	25	Γαληνίτης, Σελενίδια
Sb	0,2	3,0	Σιδηροπυρίτης, Οργανική
Se	0,05	3,00	Οργανική, Σουλφίδια, Σελενίδια
Sn	2,0	1,6	Σουλφίδια, Οξειδία
Th	7,2	1,9	Φωσφορικά άλατα
U	1,8	1,0	Οργανική, Ζιρκόνιο
V	135	25	Αργίλους, Οργανική
Zn	70	50	Σφαλερίτης

Τα μέτρα προστασίας του περιβάλλοντος απαιτούν χρήση ηλεκτροστατικών φίλτρων στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς και σε ειδικές περιπτώσεις καθαρισμό των ανθράκων με φυσικές και χημικές μεθόδους πριν την καύση τους. Η χρήση όμως των ηλεκτροστατικών φίλτρων επιβάλλεται, γιατί αυτά (εφόσον συντηρούνται) κατακρατούν την ιπτάμενη τέφρα σε ποσοστό από 99,2 έως και 99,9 % και μειώνουν την εκπομπή ιχνοστοιχείων (ανάλογα με το ιχνοστοιχείο) μέχρι και 99,6% (Πίν. 5.9).

Πίνακας 5.9. Αποτελεσματικότητα (ταχύτητα ροής μάζας g/h) των Ηλεκτροστατικών Φίλτρων (ΗΦ) σε σταθμό ηλεκτρικής ενέργειας της Δανίας (Clarke & Sloss 1992).

Στοιχείο	Αρχικός λιγνίτης	Τέφρα εσχάρας	(ΗΦ) Ιπτάμενη τέφρα	Σωματίδια καπναερίων	Αέριες φάσεις	Ποσοστό (%) εκπομπής
As	202,4	21,5	426,3	3,7	0,1	1,9
B	4398	88	3430	14	1221	28,1
Cd	15,66	0,42	12,30	0,10	0,12	1,4
Cr	1491	138	1240	6	0	0,4
Hg	5,11	0,01	0,92	0,01	3,39	66,5
Ni	969	77	794	6	2	0,8
Pb	320	20	347	7	1	2,5
Se	415	1	228	155	8	39,3

5.3.3. Πετρέλαιο και φυσικό αέριο

Η άντληση του πετρελαίου μεταφέρει στην επιφάνεια ποσότητες αλμυρού νερού μαζί με το πετρέλαιο. Μετά τον διαχωρισμό του πετρελαίου, το νερό που μπορεί να είναι τοξικό για το περιβάλλον, απομακρύνεται με εισπίεση πάλι πίσω στον ταμιευτήρα ή σε βαθιές γεωτρήσεις. Η ρύπανση του περιβάλλοντος συνδέεται συνήθως με τη διάθεση του νερού των γεωτρήσεων, τις ανεξέλεγκτες εκχύσεις πετρελαίου, τα ναυάγια τάνκερ, τη ρύπανση της ατμόσφαιρας από τα διυλιστήρια, κτλ. Σοβαρή επίδραση στο περιβάλλον που οφείλεται στη χρήση του πετρελαίου (καύση για ηλεκτρισμό, θέρμανση, κίνηση) είναι η ατμοσφαιρική ρύπανση σε αστικές περιοχές.

Το θείο και οι ενώσεις του, επιβαρύνουν σημαντικά το περιβάλλον. Το θείο περιέχεται σε υψηλές τιμές στα στερεά καύσιμα, χαμηλότερες στο πετρέλαιο και τα υποπροϊόντα του, ενώ σε πολύ χαμηλές στο φυσικό αέριο (Πίν. 5.10). Κατά την καύση των στερεών καυσίμων εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα αέρια του θείου, κυρίως SO₂ τα οποία μετασχηματίζονται κυρίως σε SO₄ και ακολούθως με το νερό σχηματίζουν θειϊκό οξύ, δηλαδή την όξινη βροχή (βλέπε παρακάτω κεφάλαιο 5.3.4). Η περιβαλλοντική νομοθεσία απαιτεί αποθείωση πριν την καύση των στερεών καυσίμων με υψηλές συγκεντρώσεις θείου. Η χρήση του φυσικού αερίου, απαιτεί ειδικά συστήματα ασφαλείας για την μεταφορά και την καύση του. Τα συστήματα αυτά πρέπει να μηδενίζουν τον κίνδυνο εκρήξεων και αναφλέξεων. Οι εκπομπές ιχνοστοιχείων μπορεί να είναι σημαντικές και με την καύση πετρελαίου (Πίν. 5.11), γι' αυτό απαιτείται η

χρήση τύπων πετρελαίου ή υποπροϊόντων με χαμηλές περιεκτικότητες σε ιχνοστοιχεία και θείο.

Πίνακας 5.10. Περιεκτικότητα θείου σε διάφορες καύσιμες πρώτες ύλες. (1) Andrews et al. (1996), (2) Εργαστήριο ΛΚΠ-Α Πτολεμαΐδα, (3) Foscolos et. al. (1989).

Καύσιμο	S (%) (1)	Καύσιμο	S (%)
Άνθρακες	0,2 - 7,0	Ξύλο και Φυσικό αέριο (1)	πολύ χαμηλή
Πετρέλαια	0,5 - 4,0	Λιγνίτης Πτολεμαΐδας, ολικό (2)	1,5
Κώκ	1,5 - 2,5	Λιγνίτης Πτολεμαΐδας, καύσιμο (2)	0,6
Diesel καύσιμο	0,3 - 0,9	Λιγνίτης Μεγαλόπολης, ολικό (3)	2,9
Βενζίνη	0,1		
Κηροζίνη	0,1		

Πίνακας 5.11. Παγκόσμια εκπομπή ιχνοστοιχείων (kt/y) από την καύση πετρελαίου (Clarke & Sloss 1992).

Ιχνοστοιχείο	Ηλεκτροπαραγωγική Χρήση	Βιομηχανική και οικιακή χρήση
As	<0,03	<0,01
Cd	<0,02	<0,01
Cr	0,1 - 0,6	0,4 - 1,8
Cu	0,3 - 2,3	0,2 - 1,1
Hg	Ασήμαντη	ασήμαντη
Mn	0,1 - 0,6	0,4 - 1,8
Mo	0,1 - 0,4	0,1 - 0,5
Ni	3,8 - 14,5	7 - 29
Pb	0,2 - 1,7	0,7 - 2,2
Sb	ασήμαντη	ασήμαντη
Se	<0,3	0,1 - 0,5
Sn	0,3 - 2,3	0,3 - 3,6
V	7 - 52	22 - 72
Zn	0,2 - 1,3	0,4 - 2,5

5.3.4. Μη ανανεώσιμα καύσιμα και όξινη βροχή

Με την καύση μη ανανεώσιμων πρώτων υλών (άνθρακες, βιτουμενούχοι σχιστόλιθοι, πετρέλαιο, φυσικό αέριο), εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα SO₂ και NO_x. Οι ενώσεις αυτές μετασχηματίζονται κυρίως σε SO₄ και NO₃, στη συνέχεια με το νερό σχηματίζουν θειικό και νιτρικό οξύ. Αυτά τα οξέα αποθέτονται ως όξινη κατακρήμνιση (βροχή, χιόνι ή ομίχλη). Η αιτία δημιουργίας της όξινης βροχής συνήθως βρίσκεται σε πολύ μεγάλη απόσταση από την περιοχή κατακρημνίσματος (Brownlow 1996, Duke & Williams 2008). Οι όξινες λίμνες της Σκανδιναβίας δημιουργήθηκαν με την καύση ανθράκων κυρίως στη Μεγάλη Βρετανία και λιγότερο στη Γερμανία και Γαλλία.

Η επιπτώσεις της όξινης βροχής διαφοροποιούνται ανάλογα με τη σύσταση του εδάφους και το είδος της βλάστησης. Περιοχές με ανθρακικά πετρώματα ή εδάφη πλούσια σε ανθρακικό ασβέστιο περιορίζουν σε κάποιο βαθμό τις επιπτώσεις της όξινης βροχής, σε αντίθεση με τα γρανιτικά πετρώματα, τα οποία δεν μπορούν να περιορίσουν την όξινη διείσδυση. Στη Βαυαρία

(Γερμανία), τα όξινα διαλύματα διείσδυσαν στο έδαφος και απελευθέρωσαν τοξικές συγκεντρώσεις μετάλλων, τα οποία με την σειρά τους αποδυνάμωσαν τις ρίζες των δένδρων, με τελικό αποτέλεσμα τη δημιουργία των νεκρών δασών της Βαυαρίας.

Στην Σκανδιναβία και ιδιαίτερα στη Σουηδία, η όξινη βροχή οδήγησε στην εξαφάνιση των ψαριών στις λίμνες. Η όξινη βροχή διαλυτοποιώντας τα θρεπτικά συστατικά της λίμνης, γίνεται η κύρια αιτία απομάκρυνσης αυτών με την απορροή. Με την απουσία των θρεπτικών συστατικών δεν αναπτύσσονται τα φίκοι που είναι η κύρια τροφή των μικροοργανισμών και ακολούθως περιορίζεται η διατροφή των ψαριών. Εκτός αυτού, η όξινη βροχή επηρεάζει αρνητικά και την αναπαραγωγή των οργανισμών. Το τελικό αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία των όξινων “νεκρών” λιμνών της Σκανδιναβίας. Για την εξυγίανση των όξινων λιμνών στην Σκανδιναβία χρησιμοποιήθηκαν τεράστιες ποσότητες ανθρακικών πετρωμάτων και τα τελευταία χρόνια «μπουφρίτη» (βλέπε παρακάτω κεφάλαιο 5.5.2).

Η όξινη βροχή μπορεί να προκαλέσει καταστροφές σε πολλά δομικά υλικά και μνημεία. Η εισπνοή των πολύ μικρών σωματιδίων που περιέχονται στις όξινες ομίχλες μπορεί να είναι επιβλαβής και για τον άνθρωπο. Ο περιορισμός της εκπομπής του θείου στην ατμόσφαιρα επιτυγχάνεται με τα μέτρα προστασίας που αναπτύχθηκαν παραπάνω για τις ενεργειακές πρώτες ύλες.

5.3.5. Πυρηνική ενέργεια

Σε όλο τον πυρηνικό κύκλο, από την εξόρυξη της πρώτης ύλης μέχρι την παραγωγή της ενέργειας και την διάθεση των πυρηνικών αποβλήτων, ποικίλα ποσοστά ραδιενέργειας εκλύονται και επηρεάζουν το περιβάλλον σε μικρό ή μεγάλο βαθμό. Έχει εκτιμηθεί ότι η πιθανότητα ενός καταστροφικού ατυχήματος είναι πολύ χαμηλή, όμως πολύ σοβαρά ατυχήματα έχουν συμβεί σε διάφορους σταθμούς ανά τον κόσμο (Three Mile Island, Pennsylvania, Η.Π.Α. το 1979 και Chernobyl Σοβιετική Ένωση το 1986). Σουηδοί ερευνητές προσπαθώντας να εντοπίσουν την πηγή υψηλών τιμών ραδιενέργειας στη χώρα τους, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ραδιενέργεια προερχόταν από την Σοβιετική Ένωση και μεταφέρθηκε με τη βοήθεια των ανέμων. Η διασπορά της ραδιενέργειας επιφέρει αύξηση των καρκινοειδών παθήσεων, αλλά και αχρηστεύει την αγροτική γη για αρκετές δεκαετίες. Η χρήση βιομηχανικών ορυκτών και πετρωμάτων σε ατυχήματα πυρηνικών εργοστασίων αναφέρεται στο κεφάλαιο 5.5.2 (ζεόλιθοι). Η απόθεση πυρηνικών αποβλήτων σε δόμους άλατος (ορυχεία) ή σε ειδικές στοές εντός μαγματικών πετρωμάτων δεν μπορεί να θεωρηθεί απόλυτα ασφαλής, εξαιτίας των διαβρωτικών συνθηκών που επικρατούν στους χώρους απόθεσης (Grambow 1994, Sarkar et al. 2007).

Η ραδιενέργεια των πετρωμάτων και ιζημάτων (γρανίτες, πηγματίτες, άμμοι) μπορεί να είναι υψηλή (Vanecek 1994, Filippidis et al. 1997). Η καταγραφή και παρακολούθηση της φυσικής ραδιενέργειας σ’ όλη την χώρα, αποτελεί το καλύτερο μέτρο προστασίας για το περιβάλλον και ιδιαίτερα για τον άνθρωπο.

Ο έλεγχος της περιεκτικότητας σε ορυκτά και ιχνοστοιχεία των φυσικών και τεχνητών υλικών, αποτελεί σημαντικό μέτρο προστασίας για τον άνθρωπο. Υπενθυμίζεται ότι ραδιενέργεια εκπέμπεται από συγκεκριμένα ισότοπα των ιχνοστοιχείων. Η διασπορά ραδιενέργειας που μπορεί να προκαλέσει η καύση άνθρακα που περιέχει ραδιονουκλίδια, δεν είναι αμελητέα. Σε σταθμό ηλεκτρικής ενέργειας 2.000 MW, η ατομική δόση μπορεί να ξεπεράσει τα 200 μSv με επικρατέστερα τα ραδιονουκλίδια: ^{232}Th , ^{210}Po , ^{230}Th , ^{210}Pb , ^{231}Pb , ^{231}Pa και ^{238}Th . Το ραδόνιο (Rn) που μπορεί να περιέχεται σε άμμο του μπετόν, μπορεί να γίνει αιτία αυξημένης ραδιενέργειας σε κατοικίες και ιδιαίτερα στα υπόγεια των κατοικιών. Ο άνθρωπος λοιπόν οφείλει να καταγράφει την ορυκτολογική, χημική και ραδιολογική σύσταση των υλικών που χρησιμοποιεί, ακολούθως να λαμβάνει όλα τα μέτρα προστασίας που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια και τέλος διαμέσου της νομοθεσίας να απαγορεύει τη διακίνηση/χρήση υλικών με ετήσια ισοδύναμη δόση ραδιενέργειας μεγαλύτερη από το ανώτατο όριο του παγκόσμιου οργανισμού υγείας, που είναι 0,6 mSv/y.

5.3.6 Ανανεώσιμες και ήπιες πηγές ενέργειας

Ορισμένοι πιστεύουν ότι μία πιθανή λύση παραγωγής ενέργειας, ίσως είναι η πυρηνική σύντηξη, της οποίας η έρευνα βρίσκεται ακόμη σε αρχικό στάδιο. Η σύντηξη φαίνεται να είναι καλύτερη, όσον αφορά το περιβάλλον, από τα στερεά καύσιμα και από τις πηγές ενέργειας που προέρχονται από την σχάση. Το δευτέριο και τρίτιο μπορούν να προέρχονται από το νερό ή το λίθιο (Li). Όμως το Li μπορεί να γίνει τοξικό όταν εισπνέετε. Άλλες πιθανές επιδράσεις στο περιβάλλον μπορεί να είναι το μαγνητικό πεδίο και τα μικροκύματα που θα χρησιμοποιηθούν για να απομονώσουν και να θερμάνουν το πλάσμα καθώς και μικρής διάρκειας ακτινοβολία που εκπέμπεται από το σώμα του αντιδραστήρα σύντηξης.

Σήμερα γίνονται προσπάθειες μετάβασης παραγωγής ενέργειας από τις μη ανανεώσιμες (άνθρακες, βιτουμενούχοι σχιστόλιθοι, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, πυρηνική σχάση) σε ανανεώσιμες και ήπιες μορφές ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική, η υδατική (υδατοπτώσεις, παλίρροιες, κύματα, ωκεανούς), η γεωθερμική και της βιομάζας.

Τα Πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων και ήπιων μορφών ενέργειας: α) Είναι σχετικά καθαρές και φιλικές στο περιβάλλον, έχοντας ουσιαστικά ελάχιστα-μηδενικά απόβλητα, β) Είναι σχεδόν ανεξάντλητες, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, γ) Αποτελούν εναλλακτική λύση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου, για μικρές και αναπτυσσόμενες χώρες, δ) Είναι ευέλικτες και παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επί τόπου πληθυσμού, καταργώντας την ανάγκη για κατασκευή τεράστιων μονάδων και ε) Συνήθως είναι απλές στην κατασκευή και τη συντήρηση και έχουν μεγάλο χρόνο ζωής.

Τα Μειονεκτήματα των ανανεώσιμων και ήπιων μορφών ενέργειας: α) Έχουν μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης <30%, γι' αυτό συνήθως χρησιμοποιούνται σαν συμπληρωματικές πηγές ενέργειας, προς το παρόν δεν

μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες μεγάλων αστικών κέντρων, γ) Η παροχή και απόδοση πολλών εξ' αυτών (π.χ., αιολική, υδροηλεκτρική, ηλιακή) εξαρτάται από την εποχή του έτους αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται, δ) Η αιολικές μηχανές δεν είναι κομψές από αισθητική άποψη κι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πουλιών. Με την προσεκτικότερη επιλογή χώρων εγκατάστασης (π.χ. σε πλατφόρμες στην ανοιχτή θάλασσα) αυτά τα προβλήματα έχουν σχεδόν λυθεί.

Όλες οι πηγές ενέργειας, άλλες σε μεγάλο και άλλες σε μικρότερο βαθμό, επιβαρύνουν το περιβάλλον. Σημαντικό μέτρο προστασίας του περιβάλλοντος είναι η **εξοικονόμηση ενέργειας**, η οποία είναι εφικτή με συντηρητικό τρόπο χρήσης της ενέργειας από τον άνθρωπο. Επίσης σημαντικό μέτρο που πρέπει πάντα να εφαρμόζεται, είναι η **ανακύκλωση**. Όλα τα στάδια εξόρυξης, μεταποίησης και παραγωγής προϊόντων των ορυκτών πρώτων υλών παράγουν απόβλητα. Σήμερα οι ενεργειακές πρώτες ύλες στην πραγματικότητα είναι μη ανανεώσιμες. Η ανακύκλωση αποβλήτων είναι ένας τρόπος οικονομίας των ενεργειακών πρώτων υλών με ταυτόχρονη μείωση της περιβαλλοντικής υποβάθμισης.

5.4. Ιχνοστοιχεία και περιβάλλον

5.4.1. Επιπτώσεις και μέτρα προστασίας

Ο άνθρωπος με τις διάφορες δραστηριότητές του εκπέμπει στην ατμόσφαιρα εκτός από αέρια (π.χ. CO₂ με τα γνωστά προβλήματα) και ιχνοστοιχεία, που πέραν ορισμένων ορίων είναι επιβλαβή για το περιβάλλον (Faure 1992, Albarede 2003). Οι ποσότητες των ιχνοστοιχεία που εκπέμπονται από τις δραστηριότητες του ανθρώπου είναι μεγαλύτερες από αυτές που εκπέμπονται από φυσικές διεργασίες (Πίν. 5.12). Ιδιαίτερα στην Ευρωπαϊκή Ένωση η περιβαλλοντική νομοθεσία είναι πολύ αυστηρή, για τις διάφορες δραστηριότητες του ανθρώπου. Ο άνθρωπος έχει τις γνώσεις και την τεχνογνωσία να εφαρμόσει τα μέτρα προστασίας του περιβάλλοντος, όμως προβλήματα αδιαφάνειας, άμεσης κερδοφορίας και διαφθοράς, είναι συνήθως οι αιτίες για την απουσία αντίδρασης ή την καθυστερημένη αντίδραση ή αντίδραση με την εφαρμογή μόνο ημίμετρων. Σε παγκόσμια κλίμακα, το βασικότερο πρόβλημα είναι η έλλειψη περιβαλλοντικής νομοθεσίας και εξειδικευμένου επιστημονικού προσωπικού. Η παραγωγή ενέργειας, η εκμετάλλευση ορυκτών πρώτων υλών, οι βιομηχανίες και τα μεταφορικά μέσα, είναι οι κύριες αιτίες της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε ιχνοστοιχεία, αλλά και η εκπομπή ιχνοστοιχείων από την αποτέφρωση αποβλήτων δεν είναι αμελητέα (Πίν. 5.12). Ο άνθρωπος δεν μπορεί να επηρεάσει τις περισσότερες φυσικές διεργασίες, μπορεί όμως με παρεμβάσεις και φροντίδα να συμβάλλει στη μείωση της εκπομπής ιχνοστοιχείων από ορισμένες άλλες φυσικές αιτίες, όπως η σκόνη και οι πυρκαγιές. Οι σοβαρές επιπτώσεις του Pb στο περιβάλλον και στην υγεία του ανθρώπου, επέβαλαν την αμόλυβδη βενζίνη.

Πίνακας 5.12. Παγκόσμιες εκπομπές ιχνοστοιχείων (kt/y), (Clarke & Sloss 1992).

Δραστηριότητα	As	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Ενέργεια (άνθρακες, υδρογονάνθρακες)	2,2	0,8	8,0	2,3	42,0	12,7	16,8
Εξόρυξη μετάλλων & μεταλλουργία	12,4	5,4	23,6	0,1	4,8	49,1	72,5
Λοιπές βιομηχανίες & μεταφορικά μέσα	4,0	0,6	2,0	0,1	4,5	268,2	36,7
Αποτέφρωση αποβλήτων	0,3	0,8	1,6	1,2	0,4	2,4	5,9
Σύνολο δραστηριοτήτων ανθρώπου	18,9	7,6	35,2	3,7	51,7	332,4	131,9
Σκόνη	2,6	0,2	8,0	0,1	11,0	3,9	19,0
Αφρός θαλάσσης	1,7	0,1	3,6	0,0	1,3	1,4	0,4
Ηφαιστειακή δραστηριότητα	3,8	0,8	9,4	1,0	14,0	3,3	9,6
Πυρκαγιές δασών	0,2	0,1	3,8	0,0	2,3	1,9	7,6
Βιογενείς πηγές	3,9	0,2	3,3	1,4	0,7	1,7	8,1
Σύνολο φυσικών διεργασιών	12,2	1,4	28,1	2,5	29,3	12,2	44,7
ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ	31,1	9,0	63,3	6,2	81,0	344,6	176,6
Δραστηριότητες του ανθρώπου (%)	61	84	56	60	64	96	75
Φυσικές διεργασίες (%)	39	16	44	40	36	4	25

Με το γεωχημικό κύκλο τα εδάφη αποκτούν ιχνοστοιχεία μέσω των φυσικών διεργασιών. Τα φυτά που πολλά αποτελούν τροφή του ανθρώπου, διαθέτουν την δική τους άμυνα. Προστασία εδαφών σημαίνει ισορροπημένη περιεκτικότητα ιχνοστοιχείων, έτσι ώστε κανένα ιχνοστοιχείο να μην υπερβαίνει τα όρια φυτοτοξικότητας. Τα βιολογικά προϊόντα προϋποθέτουν καλλιέργειες σε εδάφη με ιδανικές περιεκτικότητες σε ιχνοστοιχεία. Η υγιεινή διατροφή δεν συμβαδίζει με τη λογική της αύξησης της παραγωγής και τη χρήση κάθε είδους λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων (Πίν. 5.13).

Πίνακας 5.13. Περιεκτικότητες ορισμένων ιχνοστοιχείων σε εδάφη, λιπάσματα, φυτοφάρμακα και εντομοκτόνα. (Swaine 1990, Kabata-Pendias & Pendias 1992).

Στοιχείο	Μέση τιμή εδαφών (ppm)	Ανώτατο όριο εδαφών για υγιεινές τροφές (ppm)	Μέση τιμή φυτοτοξικότητας αγροτικών εδαφών (ppm)	Λιπάσματα (ppm)	Φυτοφάρμακα Εντομοκτόνα (%)
As	7	2	28	2 - 1200	22 - 60 %
Hg	0,1	2,1	2,3	0,01 - 2,9	0,8 - 42 %
Mn	500	1500	2250	0 - 2000	ίχνη
Ni	21	35	100	7 - 38	ίχνη
Pb	24	5	180	2 - 1250	0 - 60 %
Zn	67	110	270	1 - 1450	1,3 - 25 %

Η διασπορά των ιχνοστοιχείων έχει περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αλλά το σημαντικότερο είναι ότι επηρεάζει σοβαρά και την υγεία του ανθρώπου. Η τοξική επίδραση ορισμένων ιχνοστοιχείων σε συστήματα δοκιμών και στον άνθρωπο αναφέρονται στον Πίνακα 5.14. Το φάσμα των ασθενειών με βασική αιτία τα διάφορα ιχνοστοιχεία δεν είναι ακόμη πλήρως γνωστό. Ένα μέτρο

5.4.2. Γεωχημική έρευνα και προστασία του περιβάλλοντος

Η μελέτη των ιχνοστοιχείων σε ορυκτά και πετρώματα οδηγεί στην σύνταξη του **γεωχημικού άτλαντα**. Ο γεωχημικός άτλαντας θα έπρεπε να υπάρχει ήδη σε όλες τις χώρες του κόσμου και θα έπρεπε να καλύπτει το σύνολο του φλοιού της γης. Ελάχιστες χώρες διαθέτουν γεωχημικούς άτλαντες. Παρακάτω, συνοπτικά θα αναφερθούν ορισμένα οφέλη του γεωχημικού άτλαντα στην προστασία του περιβάλλοντος, αλλά και στην υγεία του ανθρώπου.

Βασικές προϋποθέσεις σε κάθε περίπτωση προστασίας του περιβάλλοντος είναι η γνώση και καταγραφή: α) Της χημικής σύστασης (κύρια στοιχεία και ιχνοστοιχεία) των πετρωμάτων, β) Της χημείας των ορυκτών (ορυκτοχημείας), με έμφαση στα βιομηχανικά ορυκτά, μεταλλεύματα και στερεά καύσιμα, γ) Της ορυκτολογικής και χημικής σύστασης προϊόντων ή υποπροϊόντων επεξεργασίας των ορυκτών πρώτων υλών, δ) Της κοκκομετρίας και μορφολογίας των προϊόντων επεξεργασίας των ορυκτών πρώτων υλών και ε) Της ορυκτολογίας (ορυκτοχημείας, κοκκομετρίας, μορφολογίας) και χημείας των φυσικών ρυπαντών (π.χ. φυσική σκόνη, σωματίδια ατμόσφαιρας).

Οι βασικές αυτές προϋποθέσεις καθορίζουν τις χρήσεις των ορυκτών πρώτων υλών στην προστασία του περιβάλλοντος, τη δυνατότητα εντοπισμού των πηγών ρύπανσης, καθώς και τα μέτρα που μπορούν να ληφθούν για την καταστολή ή μείωση της ρύπανσης.

Η εφαρμοσμένη γεωχημεία με τη χρήση δεικτών (ιχνοστοιχεία, αέρια, ραδιονουκλίδια, οργανικές ουσίες) σε πετρώματα, εδάφη, ιζήματα, ύδατα, φυτά και αέρια, για τον εντοπισμό ορυκτού πλούτου και σε συνδυασμό με την κανονική ορυκτολογική και χημική σύσταση κυρίως των πετρωμάτων, οδήγησε πολλές φορές τον άνθρωπο στην αναγνώριση, εντοπισμό και τελικά την καταστολή της ρύπανσης του περιβάλλοντος (Rose et al. 1979, Engel & Macko 1993, Krauskopf & Bird 1995). Οι δυνατότητες αυτές της γεωχημείας αποδίδονται κυρίως στις ανώμαλες συγκεντρώσεις των δεικτών (οργανικών και ανόργανων), καθώς και στις διαφοροποιήσεις (π.χ. ισότοπα) που παρουσιάζουν οι δείκτες, ανάλογα με τη σύσταση και μορφή της πηγής ρύπανσης.

Χαρακτηριστικές συσχετίσεις των στοιχείων που προέκυψαν από τις γεωχημικές έρευνες με περιβαλλοντικό όφελος είναι: α) Ανώμαλες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων και ραδιονουκλιδίων από ανθρωπογενείς, αλλά και φυσικούς παράγοντες, β) Μετατροπή χρήσης γης μετά τον εντοπισμό των ανώμαλων συγκεντρώσεων σε ορισμένα ιχνοστοιχεία, γ) Η ερμηνεία κατανομής πολλών ασθενειών στον άνθρωπο ξεκίνησε με την συσχέτιση των γεωχημικών δεδομένων. Σε αρκετές περιπτώσεις ακολούθησε η έρευνα της μεταφοράς ρυπαντών στην αλυσίδα ατμόσφαιρα - εδάφη - νερό - φυτά - ζώα - άνθρωπος, δ) Στη συντριπτική τους πλειοψηφία τα μέτρα προστασίας καθορίζονται με βάση τα γεωχημικά δεδομένα και ε) Απόδειξη της πηγής ρύπανσης προσφέρεται σε πολλές περιπτώσεις μόνο από τα γεωχημικά δεδομένα, με συνέπεια να επιβάλλονται οι ανάλογες ποινές στους παραβάτες της περιβαλλοντικής νομοθεσίας.

5.5. Περιβαλλοντικές χρήσεις βιομηχανικών ορυκτών και πετρωμάτων

5.5.1. Εισαγωγή

Η εξόρυξη και επεξεργασία των βιομηχανικών ορυκτών & πετρωμάτων δημιουργεί μικρότερης έντασης περιβαλλοντικά προβλήματα, σε σύγκριση με τα μεταλλεύματα και τις ενεργειακές πρώτες ύλες. Περίπου το 60% των βιομηχανικών ορυκτών & πετρωμάτων εξορύσσονται για χρήση στη θεραπεία και προστασία του περιβάλλοντος. Η εξόρυξη και η εκμετάλλευσή τους πρέπει να στηρίζεται στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που μπορεί να υπάρξουν στα ύδατα, ατμόσφαιρα και εδάφη. Τα προβλήματα, αισθητικής του τοπίου, καταστροφής της βλάστησης και των δασών, δημιουργίας θορύβου και σκόνης, απόθεσης στερεών αποβλήτων και δημιουργίας υγρών αποβλήτων, ξεκάθαρα ρυθμίζονται από αυστηρή περιβαλλοντική νομοθεσία, η οποία και πρέπει να εφαρμόζεται.

Τα μέτρα προστασίας του περιβάλλοντος πρέπει να εφαρμόζονται παράλληλα με την εξόρυξη και μετά το τέλος της εξόρυξης. Τα σημαντικότερα μέτρα προστασίας είναι: α) Αναδάσψεις, β) Χρήση δεξαμενών καθίζησης, γ) Ανακύκλωση των υδάτων, δ) Χρήση αδρανών-στείων υλικών και υποπροϊόντων σε άλλες εφαρμογές, αφού πρώτα ελεγχθεί η ορυκτολογική και χημική σύστασή τους, ε) Ανάμειξη των αδρανών και στείων υλικών με το έδαφος για μετατροπή της γης σε έφορες γεωργικές εκτάσεις, στ) Μετατροπή αργούντων λατομείων σε χώρους αναψυχής και άθλησης, ζ) Άμεση αποκατάσταση του περιβάλλοντος και η) Άμεση επιβολή προστίμων και άμεσο κλείσιμο λατομείων στους παραβάτες της περιβαλλοντικής νομοθεσίας.

Η γνώση της ορυκτολογικής και χημικής συστάσεως των βιομηχανικών ορυκτών & πετρωμάτων, είναι βασική προϋπόθεση ορθολογικής αντιμετώπισης των περιβαλλοντικών προβλημάτων. Τα βιομηχανικά ορυκτά & πετρώματα στην πλειοψηφία τους είναι αλκαλικά, υπάρχουν όμως και αυτά με πιθανές τοξικές συγκεντρώσεις μετάλλων, αρκετά από αυτά εκπέμπουν αέρια κατά την επεξεργασία τους, ενώ τα περισσότερα έχουν υψηλό δείκτη διαλυτότητας. Όσον αφορά τους εργαζόμενους σε λατομεία και χώρους επεξεργασίας βιομηχανικών ορυκτών & πετρωμάτων, ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στα μέτρα προστασίας έναντι της σκόνης (βλέπε παρακάτω κεφάλαιο 6).

Μεγάλος αριθμός βιομηχανικών ορυκτών & πετρωμάτων χρησιμοποιούνται σήμερα στη θεραπεία-προστασία του περιβάλλοντος και γενικότερα σε σημαντικές και απαραίτητες περιβαλλοντικές εφαρμογές. Στο εξής, όταν αναφερόμαστε σε ορυκτό, θα εννοούμε συγκέντρωση του ορυκτού (συνήθως >50%) στο πέτρωμα, διότι στη φύση 100% συγκέντρωση ενός ορυκτού με μορφή κοιτάσματος, δεν υπάρχει. Ορισμένες από τις περιβαλλοντικές εφαρμογές που αναφέρονται παρακάτω, ισχύουν για προϊόντα επεξεργασίας των βιομηχανικών ορυκτών και πετρωμάτων.

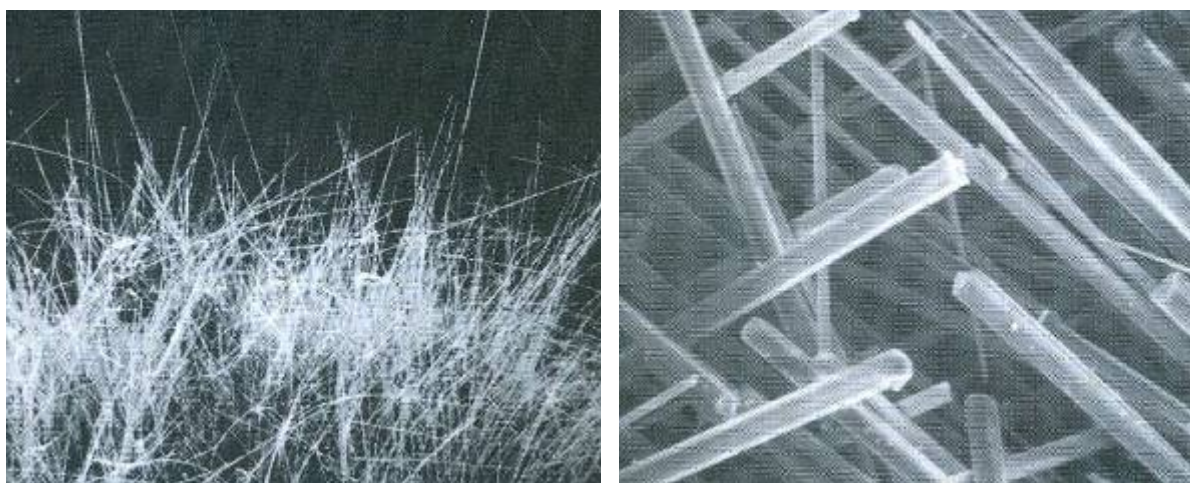
Η ορυκτολογική σύσταση των πετρωμάτων σε συνδυασμό με τη χημική τους σύσταση, καθορίζει τις φυσικο-χημικές ιδιότητες των πετρωμάτων. Το πορώδες

του πετρώματος αλλά και οι φυσικο-χημικές ιδιότητες των ορυκτών που το απαρτίζουν, παίζουν σημαντικό ρόλο για την επιλογή των χρήσεων. Μια από τις βασικότερες ιδιότητες των ορυκτών, που εξηγεί πολλές από τις παρακάτω περιβαλλοντικές εφαρμογές, είναι η ικανότητά τους να ανταλλάσσουν ιόντα (**ΙΑΙ: Ικανότητα Ανταλλαγής Ιόντων**). Η ΙΑΙ των ορυκτών παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.16).

Πίνακας 5.16. Ικανότητα Ανταλλαγής Ιόντων (ΙΑΙ) ορισμένων ορυκτών και υλικών (Pond & Mumpton 1984, Kabata-Pendias & Pendias 1992, Andrews et al. 1996).

Ορυκτό / Υλικό	ΙΑΙ (meq/100g)	Ορυκτό / Υλικό	ΙΑΙ (meq/100g)
Χαλαζίας	1 - 7	Άμορφα αργιλικά	5 - 100
Άστριοι	1 - 7	Αργιλικά ορυκτά	3 - 150
Μοσχοβίτης	15	Οργανική ύλη	150 - 500
Χλωρίτης	10 - 40	Ζεόλιθοι	220 - 550

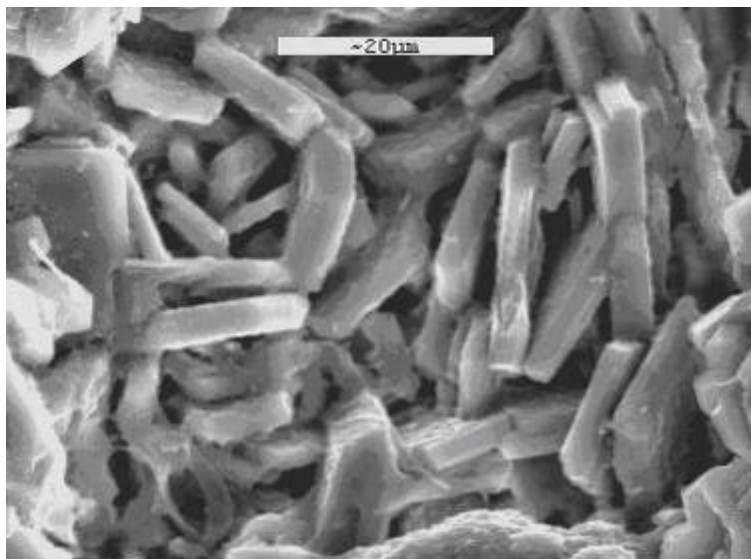
Βασική προϋπόθεση για τις διάφορες περιβαλλοντικές, διατροφικές, φαρμακευτικές, ιατρικές, κτηνοτροφικές, γεωργικές, υδατικές και βιομηχανικές χρήσεις των βιομηχανικών ορυκτών και πετρωμάτων, είναι η απουσία **ινωδών ορυκτών** στο πέτρωμα. Ένα από τα βιομηχανικά ορυκτά και πετρώματα με πολυάριθμες εφαρμογές είναι οι φυσικοί ζεόλιθοι. Σήμερα, έχουν αναγνωριστεί περισσότερα από 80 είδη φυσικών ζεολίθων, αλλά το κοιτασματολογικό ενδιαφέρον βρίσκεται στους ιζηματογενείς σχηματισμούς που συνήθως περιέχουν τα είδη: Κλινοπτιλόλιθο, ευλανδίτη, ανάλκιμο, χαμπαζίτη και φιλλιψίτη. Η παρουσία ινωδών ζεολίθων (Σχ. 5.3), όπως, εριονίτη, σκολεσίτη, μορντενίτη, μεσόλιθο, νατρόλιθο, ρογγιανίτη, μαζίτη και φερριερίτη, αποκλείουν τη χρήση των φυσικών ζεολίθων.



Σχήμα 5.3. Μικροφωτογραφίες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου ινωδών ζεολίθων. Αριστερά: Εριονίτης (κλίμακα $\times 30$), Δεξιά: Μορντενίτης (κλίμακα $\times 240$), (Gottardi & Galli 1985).

Ο ζεόλιθος με τις περισσότερες και πολύμορφες χρήσεις είναι ο ζεόλιθος τύπο-HEU (κλινοπτιλόλιθος-ευλανδίτης), με πινακοειδείς κρυστάλλους (Σχ.

5.4). Σήμερα στην αγορά διακινούνται κυρίως φυσικοί ζεόλιθοι με περιεκτικότητα σε ζεόλιθο τύπου-HEU που είναι μεγαλύτερη του 75%.



Σχήμα 5.4. Μικροφωτογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου ζεόλιθου τύπου-HEU (κλινοπτιλόλιθος-εουλανδίτης), (Φιλιππίδης 2007).

Η ορυκτολογική και χημική σύσταση, καθώς και οι μοναδικές φυσικοχημικές ιδιότητες, καθιστούν τους υψηλής ποιότητας (>80% ζεόλιθο) φυσικούς ζεόλιθους τύπου-HEU (κλινοπτιλόλιθος-εουλανδίτης), κατάλληλα υλικά για πολυάριθμες και πολύμορφες περιβαλλοντικές, διατροφικές, κτηνοτροφικές, γεωργικές, υδατικές και βιομηχανικές εφαρμογές, όπως καθαρισμό αστικών λυμάτων και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων, παραγωγή άοσμης και συνεκτικής ζεολυματολάσπης, κατεργασία λυματολάσπης και βιομηχανικής λάσπης για ασφαλή απόθεση, εξυγίανση και οξυγόνωση υδάτινων οικοσυστημάτων, δέσμευση και απομάκρυνση κυανοβακτηρίων, εξασθενούς χρωμίου και ραδιονουκλιδίων, βελτίωση τεχνητών υγροβιότοπων και λοιπών μονάδων διαχείρισης υδάτων, βελτίωση ποιότητας πόσιμου νερού, ιχθυοκαλλιέργειες, αποσμητικό υλικό, μετατροπή κοπριάς σε άοσμο λίπασμα, καθαρισμό και ξήρανση αερίων, ζωοτροφές, εδαφοβελτιωτικό γεωργικών καλλιεργειών, βελτιωτικό όξινων και αλκαλικών εδαφών, διαχείριση αποβλήτων μεταλλείων και επιστροφή εδαφών σε γεωργική χρήση, υπόστρωμα θερμοκηπίων και ανθοκομικής, υγιεινή και ασφάλεια τροφίμων, βελτίωση γεύσης και ποιότητας τροφίμων, ανθεκτικότερο και υγιέστερο γρασίδι, συμπλήρωμα διατροφής, κ.α. (Colella & Mumpton 2000, Φιλιππίδης 2001, Bish & Ming 2001, Filipidis 2010, Φιλιππίδης & Τσιραμπίδης 2012).

Οι περιβαλλοντικές εφαρμογές των βιομηχανικών ορυκτών και πετρωμάτων που αναφέρονται παρακάτω, δεν συνδυάζονται μόνο με την καταστολή της περιβαλλοντικής ρύπανσης και την εξυγίανση του περιβάλλοντος, αλλά και με την δημιουργία συνθηκών για πιο υγιεινή διαμονή και διατροφή του ανθρώπου.

Οι σημαντικότερες περιβαλλοντικές εφαρμογές των βιομηχανικών ορυκτών & πετρωμάτων, αναφέρονται συνοπτικά στη συνέχεια.

5.5.2. Υλικά καθαρισμού λυμάτων και υγρών αποβλήτων

Φυσικοί ζεόλιθοι: Οι υψηλής ποιότητας φυσικοί ζεόλιθοι έχουν την ικανότητα δέσμευσης βακτηρίων, αερίων, ραδιονουκλιδίων, μετάλλων, ανόργανων, οργανικών και οργανομεταλλικών ενώσεων, καθώς και ρυθμίζουν προς το ουδέτερο το pH των υδάτων. Το ποσοστό βελτίωσης των ποιοτικών παραμέτρων, κυμαίνεται από 10% έως 950% (Πίν. 5.17 και 5.18). Η ρόφηση και δέσμευση των διαφόρων συστατικών των υγρών αποβλήτων, συμβαίνει στους μέσο- και μακρο-πόρους του φυσικού ζεόλιθου (το πέτρωμα) και στους μικροπόρους του ζεόλιθου (το ορυκτό που περιέχεται στο πέτρωμα) και αποδίδονται σε διεργασίες προσρόφησης και επιφανειακής επικάθισης, καθώς και απορρόφησης (κυρίως ιοντο-ανταλλαγή). Σημαντικό ρόλο στις διεργασίες αυτές παίζουν οι επιφανειακές όξινες ενεργές θέσεις κατά Broensted και οι βασικές ενεργές θέσεις κατά Lewis του ζεόλιθου (του ορυκτού).

Πίνακας 5.17. Καθαρισμός αστικών λυμάτων με τη χρήση υψηλής ποιότητας φυσικού ζεολίθου (Filippidis 2008, 2010, Filippidis et al. 2008, Φιλιππίδης 2009, Φιλιππίδης & Τσιραμπίδης 2012).

Ποιοτικοί παράμετροι	Αστικά λύματα	Διαυγές νερό μετά την κατεργασία με φυσικό ζεόλιθο	Βελτίωση (±%)
pH	8,5	7,6	-11
Χρώμα, mg/L, κλίμακα Pt	1330	91	-93
Αιωρούμενα στερεά, mg/L	274	14	-95
Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD), mg/L	556	23	-96
Διαλυμένο οξυγόνο, mg/L	0,6	6,3	+950
P ₂ O ₅ , mg/L	13,62	0,31	-98
NH ₄ , mg/L	54,50	0,25	-100
SO ₄ , mg/L	0,74	0,02	-97
NO ₃ , mg/L	46,67	3,93	-92
NO ₂ , mg/L	0,11	0,02	-82
Cr, mg/L	0,20	0,02	-90
Mn, mg/L	0,31	0,02	-94
Ni, mg/L	0,28	0,02	-93

Πίνακας 5.18. Δέσμευση και απομάκρυνση κυανοβακτηρίων με τη χρήση υψηλής ποιότητας φυσικού ζεολίθου (Filippidis et al. 2010, Φιλιππίδης κ.α. 2011)

Κυανοβακτήριο	Αρχική συγκέντρωση	Συγκέντρωση μετά τη χρήση φυσικού ζεολίθου	± %
<i>Colonial Microcystis</i> , Νερό λίμνης Δοϊράνης, (colonies/mL)	320	157	- 51
<i>Filamentous</i> , Νερό λίμνης Δοϊράνης, (filaments/mL)	8254	2069	- 75
<i>Chroococcus</i>	1433751	124373	- 91
Καλλιέργεια (cells/mL)	478066	36508	- 92

Με την κατεργασία των αστικών λυμάτων προκύπτει ως ίζημα, η άοσμη και συνεκτική ζεολυματολάσπη (Σχ. 5.5), κατάλληλη για χρήση ως εδαφοβελτιωτικό, ενώ με την κατεργασία των βιομηχανικών υγρών αποβλήτων προκύπτει, η άοσμη και συνεκτική ζεολάσπη (Σχ. 5.6 και 5.7), κατάλληλη για ασφαλή απόθεση, λόγω της καθήλωσης των επιβλαβών ουσιών στους μικρο-μεσο- και μακροπόρους του φυσικού ζεόλιθου, οι οποίες δεν εκπλύνονται και δεν μεταφέρονται με το νερό της βροχής στα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα.



Σχήμα 5.5. Κατεργασία αστικών λυμάτων με τη χρήση υψηλής ποιότητας φυσικού ζεολίθου (Filippidis 2008)



Σχήμα 5.6. Κατεργασία υγρών αποβλήτων βαφείου με τη χρήση υψηλής ποιότητας φυσικού ζεολίθου (Φιλιππίδης 2007).

Οι τιμές των ποιοτικών παραμέτρων στο διαυγές νερό, με διαδοχικές κατεργασίες, μπορούν να γίνουν όλες μικρότερες από το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο των πρότυπων νερών, για διάθεση σε φυσικό αποδέκτη, για άρδευση, κολύμβηση και διαβίωση ψαριών. Οι φυσικοί ζεόλιθοι δεσμεύουν και απομακρύνουν ραδιενεργά ισότοπα από απόβλητα πυρηνικών εργοστασίων και

επιβλαβή ιχνοστοιχεία από βιομηχανικά υγρά απόβλητα. Σε όλα τα πυρηνικά ατυχήματα έχουν χρησιμοποιηθεί υψηλής ποιότητας φυσικοί ζεολίθοι κυρίως τύπου-HEU (κλινοπτιλόλιθος-εουλανδίτης).



Σχήμα 5.7. Κατεργασία υγρών αποβλήτων βυρσοδεψείου με τη χρήση υψηλής ποιότητας φυσικού ζεολίθου (Filippidis 2008)

Με τη χρήση υψηλής ποιότητας φυσικών ζεολίθων, γίνεται αφαίρεση χημικών ουσιών (π.χ. αμμωνίας) και ιχνοστοιχείων για καθαρισμό διαφόρων τύπων λυμάτων. Η αμμωνία (NH_4) δεν είναι τοξική σε υδάτινες μορφές ζωής, αλλά συντελεί στη ραγδαία ανάπτυξη φυκιών και οδηγεί στον ευτροφισμό των νερών. Έχουν επιβληθεί αυστηροί περιορισμοί για την επιτρεπτή ποσότητα αζώτου στα επιφανειακά ύδατα, το επιθυμητό όριο είναι 0,05-2 mg/L στα γλυκά επιφανειακά νερά για υδροληψία πόσιμου νερού (Πίν. 5.19) και 0,04-0,2 mg/L στα γλυκά επιφανειακά νερά για τη διαβίωση ψαριών (Πίν. 5.20).

Πίνακας 5.19. Πρότυπα ποιότητας γλυκών επιφανειακών νερών για υδροληψία πόσιμου νερού. (ΕΟ) Επιθυμητό όριο, (ΑΕΟ) Ανώτατο επιτρεπόμενο όριο. ΚΥΑ 46399/4352/1986 (ΦΕΚ 438B/03.0.1986) σε συμμόρφωση με τις οδηγίες του Συμβουλίου των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων 75/440/ΕΟΚ, 76/160/ΕΟΚ, 78/659/ΕΟΚ, 79/923/ΕΟΚ και 79/869/ΕΟΚ (Μιχαλοπούλου 2004).

Παράμετροι	Κατηγορία Α ₁		Κατηγορία Α ₂		Κατηγορία Α ₃	
	(ΕΟ)	(ΑΕΟ)	(ΕΟ)	(ΑΕΟ)	(ΕΟ)	(ΑΕΟ)
pH	6,5-8,5		5,5-9		5,5-9	
Χρώμα, mg/L, κλίμακα Pt	10	20	50	100	50	200
Αιωρούμενα στερεά, mg/L	25					
Χημικά απαιτ. οξυγόνο (COD), mg/L	30					
Φωσφορικά, P ₂ O ₅ , mg/L	0,4		0,7		0,7	
Αμμωνία, NH ₄ , mg/L	0,05		1	1,5	2	4
Θειικά, SO ₄ , mg/L	150	250	150	250	150	250
Νιτρικά, NO ₃ , mg/L	25		50		50	
Cr, mg/L	0,05		0,05		0,05	
Mn, mg/L	0,05		0,1		1	

Κατηγορία Α₁: Νερά κατάλληλα για ύδρευση μετά από απλή φυσική επεξεργασία και απολύμανση π.χ. ταχεία διύλιση και απολύμανση, **Κατηγορία Α₂**: Νερά κατάλληλα για ύδρευση μετά από συνήθους φυσική και χημική επεξεργασία και απολύμανση π.χ. προχλωρίωση, συσσωμάτωση, κροκύδωση, καθίζηση, διύλιση και απολύμανση, **Κατηγορία**

A₃: Νερά κατάλληλα για ύδρευση μετά από προχωρημένη φυσική και χημική επεξεργασία και απολύμανση π.χ. χλωρίωση μέχρι του σημείου θραύσεως, συσσωμάτωση, κροκιδωση, καθίζηση, διύλιση, προσρόφηση (ενεργός άνθρακας) και απολύμανση (όζον, τελική χλωρίωση, κτλ.).

Πίνακας 5.20. Πρότυπα ποιότητας γλυκών επιφανειακών νερών για τη διαβίωση ψαριών. (ΕΟ) Επιθυμητό όριο, (ΑΕΟ) Ανώτατο επιτρεπόμενο όριο. ΚΥΑ 46399/4352/1986 (ΦΕΚ 438B/03.0.1986) σε συμμόρφωση με τις οδηγίες του Συμβουλίου των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων 75/440/ΕΟΚ, 76/160/ΕΟΚ, 78/659/ΕΟΚ, 79/923/ΕΟΚ και 79/869/ΕΟΚ (Μιχαλοπούλου 2004).

Παράμετροι	Νερά Σαλμονίδων		Νερά Κυπρινιδών	
	(ΕΟ)	(ΑΕΟ)	(ΕΟ)	(ΑΕΟ)
pH	6,5-8,5	6-9	5,5-8,5	6-9
Αιωρούμενα στερεά, mg/L	25		25	
Αμμωνία, NH ₄ , mg/L	0,04	1	0,2	1
Νιτρώδη, NO ₂ , mg/L	0,01		0,03	

Ανθρακικά πετρώματα: Ο όρος «ανθρακικά πετρώματα» αναφέρεται στα πετρώματα (ασβεστόλιθο, δολομίτη και μάρμαρα) που περιέχουν τα ανθρακικά ορυκτά (κυρίως ασβεστίτη, δολομίτη, μαγνησίτη), αλλά και τα προϊόντα διάσπασης των ανθρακικών ορυκτών, άσβεστο(CaO) και περίκλαστο(MgO). Θρυμματισμένα ανθρακικά πετρώματα μεγάλης καθαρότητας (>85% CaCO₃, <5% MgO), αποτελούν σπουδαίο μέσο καθαρισμού αστικών λυμάτων και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων. Εκτός της απορρόφησης και αλκαλικότητας τα βακτήρια που αναπτύσσονται στην επιφάνεια των τεμαχίων των πετρωμάτων (μεγέθους 3-8 cm), κατατρώγουν τους μικροοργανισμούς των επιβαρυσμένων υδάτων. Η κατεργασία όξινων διαλυμάτων στο περιβαλλοντικό πρόβλημα της όξινης απορροής μεταλλείων (βλέπε κεφάλαιο 5.2.1) γίνεται με αναερόβια φρεάτια ασβεστολίθου. Η κατεργασία των υγρών αποβλήτων μεταλλείων για να αποκτήσουν ουδέτερο έως αλκαλικό pH, γίνεται με άσβεστο σε μονάδες εξουδετέρωσης. Με την προσθήκη πολφών ασβεστολίθου και ασβέστου επιτυγχάνεται η εξουδετέρωση του αρσενικούχου όξινου διαλύματος στο στάδιο έκπλυσης/πάχυνσης στη μεταλλουργία χρυσού, αλλά και άλλων μετάλλων.

Άργιλοι: Κυρίως ο μπεντονίτης, ο βερμικουλίτης, ο ατταπουλγίτης και ο σεπιόλιθος χρησιμοποιούνται στον καθαρισμό υγρών αποβλήτων (έλαια, λιπαρά, διαλύτες). **Διατομίτης:** Ο διατομίτης (SiO₂.nH₂O) χρησιμοποιείται στον καθαρισμό υδάτων και διαλυτών. **Τύρφη:** Χρησιμοποιείται σε συστήματα καθαρισμού μεταλλευτικών, βιομηχανικών και αστικών υγρών αποβλήτων, καθώς και στον καθαρισμό υδατικών συστημάτων από πετρέλαια. **Περλίτης:** Χρησιμοποιείται σε στρώσεις σε διάφορα συστήματα καθαρισμού υγρών αποβλήτων. **Άλλα ορυκτά** που χρησιμοποιούνται στον καθαρισμό υδάτων είναι: Το τρόνα [Na₃H(CO₃)₂.2H₂O], ο θεναρτίτης (Na₂SO₄) και ο συλβίτης(KCl).

5.5.3. Ζωοτροφές

Φυσικοί ζεόλιθοι: Η χρήση υψηλής ποιότητας φυσικών ζεολίθων ως πρόσθετο ζωοτροφών και υλικό δαπέδου κτηνοτροφικών μονάδων, αυξάνει την παραγωγή και βελτιώνει την ποιότητα των σχετικών προϊόντων, μειώνει την κατανάλωση τροφής, τις ασθένειες και τη φαρμακευτική αγωγή των ζώων, τη θνησιμότητα των νεογνών και τη δυσσομία, μετατρέποντας την κοπριά σε άοσμο λίπασμα (Πίν. 5.21). Η υψηλή απορροφητική ικανότητα και η συγκράτηση της αμμωνίας αποτελούν τις βασικές αιτίες χρήσης των φυσικών ζεολίθων ως συμπλήρωμα στις ζωοτροφές (χοίρους, αγελάδες, πουλερικά, κτλ.). Ανάλογα με την ποιότητα του φυσικού ζεολίθου και το είδος του ζώου, ο φυσικός ζεόλιθος αποτελεί το 0,5-7 % της ζωοτροφής. Η βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων ζωικής προέλευσης (κρέας, γάλα, αυγά, κτλ.) που αποτελούν βασική τροφή για τον άνθρωπο, είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ποιότητα και ασφάλεια των τροφίμων. Η ικανότητα των φυσικών ζεολίθων να δεσμεύουν και να απομακρύνουν ανόργανες και οργανικές τοξικές συγκεντρώσεις από το στομάχι των ζώων, είναι η βασική αιτία παραγωγής υγιεινών τροφών για τον άνθρωπο (Sand & Mumpton 1978).

Πίνακας 5.21. Πλεονεκτήματα της χρήσης υψηλής ποιότητας φυσικών ζεολίθων, ως πρόσθετο ζωοτροφών και υλικό δαπέδου κτηνοτροφικών μονάδων (Φιλιππίδης 2007).

17 % αύξηση γαλακτοπαραγωγής στις αγελάδες	Μείωση της φαρμακευτικής αγωγής
7 % αύξηση βάρους στα κοτόπουλα	Μείωση ασθενειών των ζώων
Μετατροπή της κοπριάς σε άοσμο λίπασμα	Μείωση της δυσσομίας
Μείωση της θνησιμότητας των νεογνών	Μείωση κατανάλωσης τροφής
Βελτίωση της γεύσης και ποιότητας των προϊόντων (κρέας, γάλα, αυγά, κλπ.)	

Ανθρακικά πετρώματα: Εξαιρετικά καθαρός ασβεστόλιθος (>98% CaCO₃) στις ζωοτροφές, συμβάλλει στην υγιεινή διάπλαση του σκελετού και των ιστών των ζώων. Κονιοποιημένος ασβεστόλιθος διασκορπίζεται στους θαλάμους πουλερικών, καταλήγοντας έτσι στο στομάχι όπου διευκολύνει σοβαρά την πέψη. Το περιβαλλοντικό όφελος είναι η μείωση τοξικών του κρέατος που αποτελεί βασική τροφή του ανθρώπου.

Άργιλοι: Κυρίως ο καολινίτης βρίσκει χρήση στην διατροφή των ζώων. Άλλα ορυκτά που χρησιμοποιούνται στην διατροφή ζώων είναι: Ο θεναρτίτης (Na₂SO₄), ο λαουταρίτης (CaI₂O₆) και ο αλίτης (NaCl).

5.5.4. Βελτιωτικά εδαφών και υποστρωμάτων

Φυσικοί ζεόλιθοι: Η συγκράτηση μ.α. του καλίου, αμμωνίας και άλλων θρεπτικών συστατικών από τους υψηλής ποιότητας φυσικούς ζεολίθους στο έδαφος, αυξάνει τον βαθμό διάθεσης των συστατικών αυτών για τα διάφορα φυτά. Οι φυσικοί ζεόλιθοι επίσης ως υπόστρωμα θερμοκηπίων και ανθοκομικής, περιορίζουν τις ασθένειες στο ριζικό σύστημα των φυτών, το οποίο γίνεται πλουσιότερο και αποτελεσματικότερο στην ανάκτηση θρεπτικών συστατικών. Οι φυσικοί ζεόλιθοι με την ικανότητά τους να ρυθμίζουν προς το

ουδέτερο το pH των εδαφών, χρησιμοποιούνται για την εξυγίανση όξινων και αλκαλικών εδαφών. Το περιβαλλοντικό όφελος είναι η μείωση της τοξικότητας εδαφών και υδάτων (οι φυσικοί ζεολίθοι αποτρέπουν την έκπλυση επιβλαβών συστατικών από τα γεωργικά εδάφη με το νερό της βροχής), καθώς και η παραγωγή υγιεινών καρπών/τροφών για τον άνθρωπο και τα ζώα. Η χρήση φυσικών ζεολίθων στις γεωργικές καλλιέργειες, αυξάνει την παραγωγή των γεωργικών προϊόντων κατά 17-73% (Πίν. 5.22), βελτιώνει την ποιότητα των αγροτικών προϊόντων κατά 4-46% (Πίν. 5.23), μειώνει τη χρήση λιπασμάτων κατά 56-100%, μειώνει τη χρήση του ύδατος άρδευσης κατά 33-67% (Πίν. 5.22), εμποδίζει την έκπλυση και μετακίνηση των επιβλαβών ουσιών από το χερσαίο στο υδάτινο περιβάλλον. Η άοσμη και συνεκτική ζεολυματολάσπη είναι κατάλληλη για χρήση ως εδαφοβελτιωτικό στις γεωργικές καλλιέργειες, καθώς και για ασφαλή απόθεση, επειδή οι επιβλαβείς ουσίες δεν εκπλύνονται με το νερό της βροχής, προστατεύοντας έτσι την ποιότητα των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων.

Πίνακας 5.22. Αύξηση παραγωγής, μείωση χρήσης λιπασμάτων και νερού άρδευσης με την προσθήκη υψηλής ποιότητας φυσικού ζεολίθου (ΦΖ) σε εδάφη γεωργικών καλλιεργειών (Φιλιππίδης 2007, Φιλιππίδης κ.α. 2007)

Είδος	Λίπασμα	Αρδεύσεις		Παραγωγή (kg/στρέμμα)		
	(kg/στρέμμα)	Αριθμ.	±%	χωρίς ΦΖ	με ΦΖ	±%
Σιτάρι	20			170		
	0				220	+ 29
	10			70		
	0				110	+ 57
Ρύζι	90			880		
	40				1180	+ 34
Καλαμπόκι	120	3		800		
	0	2	- 33		1200	+ 50
	0	1	- 67		800	± 0
Αύξηση παραγωγής						
Τομάτα	48-52 %	Ακτινίδια	45 %	25 %	Αύξηση ανθοφορίας στο	
Σταφύλι	48-73 %	Βαμβάκι	17 %		γαρίφαλο	

Πίνακας 5.23. Βελτίωση ποιοτικών χαρακτηριστικών τομάτας με τη χρήση υψηλής ποιότητας φυσικού ζεολίθου (Φιλιππίδης κ.α. 2007)

Ποιοτικά χαρακτηριστικά	Παραγωγής		
	χωρίς φυσικό ζεόλιθο	με φυσικό ζεόλιθο	± %
Διαλυτά στερεά συστατικά (%)	4.20	4.35	+ 4
Βιταμίνη C (mg/100g)	6.81	8.61	+ 26
Συνεκτικότητα σάρκας (kg)	0.619	0.906	+ 46

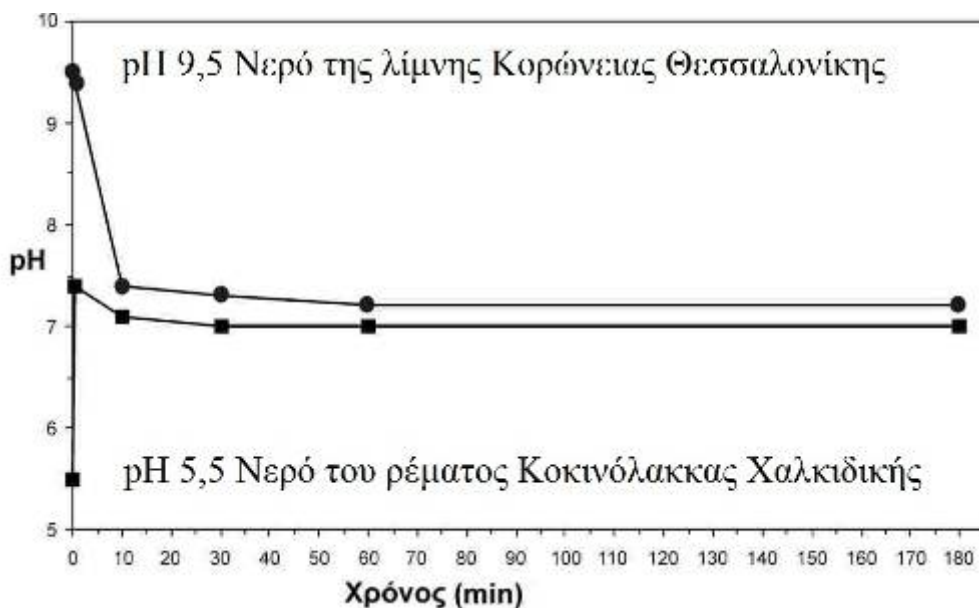
Ανθρακικά πετρώματα: Η προσθήκη των ανθρακικών πετρωμάτων στο έδαφος εξουδετερώνει την οξύτητα (αυξάνει το pH), παρέχει βασικά θρεπτικά συστατικά (Ca, Mg), περιορίζει την έκπλυση θρεπτικών ιχνοστοιχείων, ενεργοποιεί και αυξάνει χρήσιμους μικροοργανισμούς. Στη βιομηχανία

λιπασμάτων προστίθεται δολομίτης ως πληρωτικό υλικό, ο οποίος ταυτόχρονα συνεισφέρει Ca και Mg, εξουδετερώνει τις φωσφορικές, θειϊκές και νιτρικές ενώσεις, οι οποίες ευθύνονται για τη δημιουργία όξινων εδαφών. Καθαρός ασβεστόλιθος δεν προτείνεται γι' αυτή τη χρήση, διότι απελευθερώνει NH_3 από το λίπασμα.

Περλίτης: Εκτός της γενικής χρήσης ως βελτιωτικού εδαφών, ο περλίτης βρίσκει χρήση ως υπόστρωμα θερμοκηπίων και ανθοκομικής. **Άργιλοι:** Κυρίως ο βερμικουλίτης χρησιμοποιείται στη γεωργία. Το 45% της παραγωγής του βερμικουλίτη στις Η.Π.Α. χρησιμοποιείται στη γεωργία.

5.5.5. Εξυγίανση και οξυγόνωση υδάτινων οικοσυστημάτων

Φυσικοί ζεόλιθοι: Οι υψηλής ποιότητας φυσικοί ζεόλιθοι κατά τη χρήση τους σε υδατικά συστήματα και στις γεωργικές καλλιέργειες, δεσμεύουν βακτήρια, αέριες, ανόργανες, οργανικές και οργανομεταλλικές ενώσεις κατά 20-100%, μειώνουν τη χρήση των λιπασμάτων και του ύδατος άρδευσης, εμποδίζουν την έκπλυση και μετακίνηση (με το νερό της βροχής) των επιβλαβών συστατικών από το χερσαίο στο υδάτινο περιβάλλον, προστατεύοντας έτσι την ποιότητα των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Οι διεργασίες δέσμευσης ανόργανων, οργανικών, οργανομεταλλικών ενώσεων, βακτηρίων, αερίων, μετάλλων, κατιόντων και ανιόντων από τα υδατικά τους διαλύματα, είναι διεργασίες απορρόφησης (κυρίως ιοντο-ανταλλαγή), προσρόφησης και επιφανειακής επικάθισης. Επίσης, οι υψηλής ποιότητας φυσικοί ζεόλιθοι, εμπλουτίζουν το νερό σε οξυγόνο (οξυγονούχα ρεύματα) και ρυθμίζουν το pH των υδάτων προς το ουδέτερο, αυξάνοντας ή μειώνοντας αυτό, ανάλογα με την οξύτητα ή αλκαλικότητα των υδάτων (Σχ. 5.8).



Σχήμα 5.8. Ρύθμιση του pH των υδάτων με τη χρήση υψηλής ποιότητας φυσικού ζεολίθου (Filippidis & Kantiranis 2007).

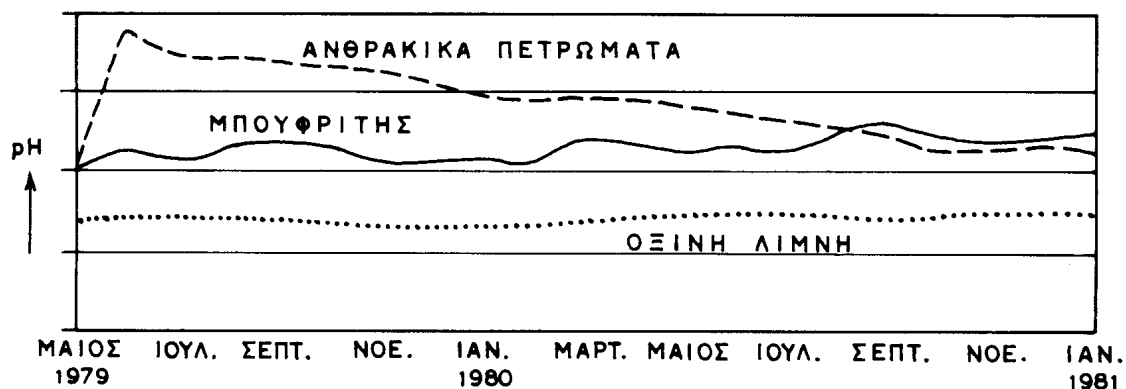
Κατά τη ρύθμιση του pH των υδάτων, ο ζεόλιθος δρα είτε ως δέκτης είτε ως δότης πρωτονίων. Για την αύξηση του pH γίνεται δέσμευση H^+ στις βασικές θέσεις κατά Lewis του ζεολίθου, ενώ για τη μείωση του pH γίνεται μετακίνηση OH^- από τις όξινες θέσεις κατά Brønsted του ζεολίθου ή/και από τα μόρια H_2O των ανταλλάξιμων κατιόντων του ζεολίθου (Filippidis et al. 1996b, Charistos et al. 1997, Filippidis and Kantiranis 2007). Έτσι, οι υψηλής ποιότητας φυσικοί ζεόλιθοι χρησιμοποιούνται στην παραγωγή οξυγονούχων ρευμάτων, στην καταπολέμηση του προβλήματος του ευτροφισμού των υδάτων, στην εξυγίανση των όξινων λιμνών και στις ιχθυοκαλλιέργειες. Κυρίως οι συνθετικοί ζεόλιθοι χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία απορρυπαντικών. Στα απορρυπαντικά, οι ζεόλιθοι αντικατέστησαν τις φωσφορικές ενώσεις, οι οποίες ρυπαίνουν σε μεγάλο βαθμό το υδάτινο περιβάλλον δημιουργώντας το φαινόμενο του ευτροφισμού των υδάτων (Sarkar et al. 2007, Duke & Williams 2008). Η περιβαλλοντική νομοθεσία απαγορεύει τη χρήση φωσφορικών στα απορρυπαντικά, έτσι τα απορρυπαντικά παράγονται χωρίς φωσφορικές ενώσεις και στην πλειοψηφία τους έχουν αντικατασταθεί με ζεόλιθο.

Οι δράσεις που προτείνονται για την εξυγίανση και προστασία υδάτων λιμνών και γενικότερα επιφανειακών συγκεντρώσεων υδάτων είναι (Φιλιππίδης 2005): α) Κατεργασία αστικών λυμάτων, βιομηχανικών και γεωργικών υγρών αποβλήτων με υψηλής ποιότητας φυσικό ζεόλιθο, θα έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της διαύγειας, τη ρύθμιση του pH προς το ουδέτερο και γενικότερα τη βελτίωση της ποιότητας των νερών πριν αυτά εισρεύσουν στη λίμνη. β) Η ανάμειξη υψηλής ποιότητας φυσικού ζεολίθου στα αγροτικά εδάφη που καλλιεργούνται γύρω από τη λίμνη, θα έχει ως αποτέλεσμα τη συγκράτηση των επιβλαβών ουσιών (φυτοφάρμακα-λιπάσματα), αποτρέποντας τη μετακίνηση τους από το χερσαίο στο υδάτινο περιβάλλον, προστατεύοντας έτσι τα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα. Ταυτόχρονα, μειώνει τη χρήση του νερού άρδευσης, μειώνει τη χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, ρυθμίζει το pH των εδαφών προς το ουδέτερο, βελτιώνει το ριζικό σύστημα των φυτών, αυξάνοντας έτσι την παραγωγή και βελτιώνοντας την ποιότητα των αγροτικών προϊόντων. γ) Η κατεργασία με υψηλής ποιότητας φυσικό ζεόλιθο, της λυματολάσπης, της λάσπης και της κοπριάς βιομηχανικών και κτηνοτροφικών μονάδων γύρω από τη λίμνη, θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της δυσσομίας και τη συγκράτηση των επιβλαβών ουσιών, αποτρέποντας τη μετακίνηση τους από το χερσαίο στο υδάτινο περιβάλλον, προστατεύοντας έτσι τα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα. δ) Η ανάμειξη υψηλής ποιότητας φυσικού ζεολίθου στην παραλίμνια ζώνη, θα έχει ως αποτέλεσμα τη δέσμευση επιβλαβών ουσιών, τη ρύθμιση του pH της παραλίμνιας λάσπης στο ουδέτερο, τη μείωση της δυσσομίας και τη βελτίωση του ριζικού συστήματος των φυτών. Γενικότερα επέρχεται βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης και ανάπτυξης των οργανισμών και φυτών της παραλίμνιας ζώνης και ε) Η ρίψη υψηλής ποιότητας φυσικού ζεολίθου στα νερά της λίμνης θα έχει ως αποτέλεσμα τη δέσμευση επιβλαβών ουσιών, τη βελτίωση της διαύγειας του νερού, τη ρύθμιση του pH του νερού

προς το ουδέτερο, τον εμπλουτισμό σε οξυγόνο του νερού, τη μείωση της αφθονίας των βακτηρίων, βελτιώνοντας έτσι τη διαβίωση των οργανισμών στο υδάτινο οικοσύστημα. Οι πλειοψηφία των βιολόγων σε καμιά περίπτωση δεν προτείνουν τη ρίψη φυσικού ζεολίθου σε φυσικά υδάτινα οικοσυστήματα πριν διερευνηθούν οι επιπτώσεις στα ύδατα λόγω πιθανής μείωσης α) Των ωφέλιμων ειδών φυτοπλαγκτού, β) Της μικροβιακής ποικιλότητας και γ) Σε άλλα είδη μικροοργανισμών που καθορίζουν την ποιότητα του νερού όπως ετερότροφα βακτήρια και πρωτόζωα (Φιλιππίδης κ.α. 2011).

Ανθρακικά πετρώματα: Με τη χρήση κονιοποιημένου ασβεστολίθου σε λίμνες και έλη, όπου η ζωή εξαιτίας της οξύτητας είναι φτωχή ή ανύπαρκτη, αυξάνεται το pH και εξουδετερώνεται η οξύτητα των υδάτων, με τελικό αποτέλεσμα την επαναφορά ζωής στα ύδατα.

Ολιβίνης: Το πρόβλημα των όξινων λιμνών της Σκανδιναβίας (δημιουργήθηκαν με την καύση ανθράκων στη Μ. Βρετανία), αντιμετωπίστηκε κυρίως με τη χρήση του **μπουφρίτη**. Υπολογίζεται ότι το πρόβλημα υπάρχει σε 10 έως 20 χιλιάδες λίμνες στον κόσμο. Τα πλεονεκτήματα του μπουφρίτη έναντι των ανθρακικών πετρωμάτων φαίνονται στο Σχήμα 5.9. Στη Σουηδία, ο μπουφρίτης απλωμένος στο χιόνι κατά τον χειμώνα, εισέρχονταν στην όξινη λίμνη με το λιώσιμο του χιονιού. Με τη χρήση του μπουφρίτη επέρχεται αύξηση του pH και αποφεύγεται το αρχικό σοκ αύξησης pH των ανθρακικών πετρωμάτων. Απότομες αλλαγές του pH προκαλούν βλάβη στα οικοσυστήματα. Επίσης, ο μπουφρίτης είχε μεγαλύτερη διάρκεια στην επίδραση του pH, σε σύγκριση με τα ανθρακικά πετρώματα (Σχ. 5.9).



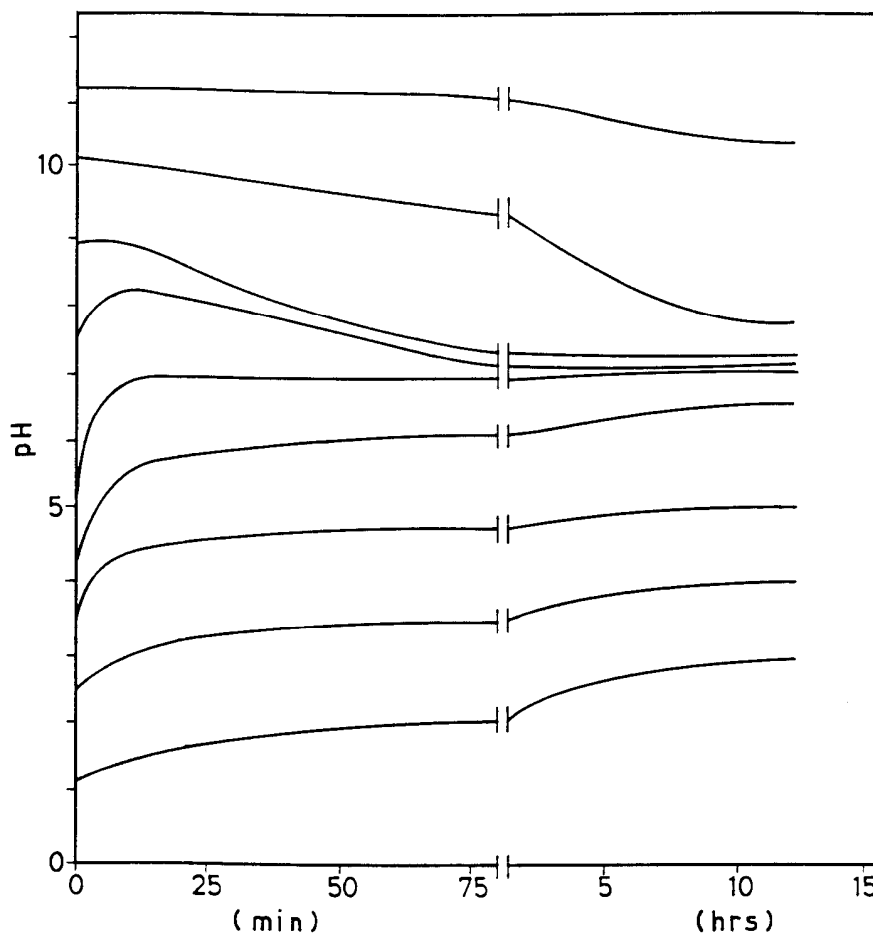
Σχήμα 5.9. Επίδραση μπουφρίτη και ανθρακικών πετρωμάτων στο pH των όξινων λιμνών (Handols Taljsten 1983).

Ο μπουφρίτης είναι σκόνη ολιβίνη $(Mg,Fe)_2SiO_4$. Ο ολιβίνης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο Mg-ούχος και δεν πρέπει να περιέχει στο πλέγμα του μέταλλα όπως Ni, Zn, Mn κ.ά. Ο ολιβίνης στη φύση απαντά στα υπερβασικά πετρώματα. Το πέτρωμα που είναι κατάλληλο για την παρασκευή μπουφρίτη είναι ο δουνίτης (>90% ολιβίνη). Ο δουνίτης όμως που θα επιλεγεί πρέπει να έχει όσο το δυνατόν μικρότερο βαθμό σερπεντινίωσης, κατά την οποία δημιουργούνται σουλφίδια του Ni και Fe όπως ο χαισλεγουδίτης και ο

πεντλανδίτης, αρσενίδια όπως ο μαουχερίτης, αντιμονίδια όπως ο μπρεουθαπτίτης και κράματα Ni και Fe όπως ο αβαρουίτης (Annersten et al. 1982, 1984, Nord et al. 1982, Filippidis 1982, 1985, 1991, Ericsson & Filippidis 1986).

5.5.6. Βελτίωση ποιότητας πόσιμου νερού

Φυσικοί ζεόλιθοι: Οι φυσικοί ζεόλιθοι εκτός της δέσμευσης ανόργανων αλλά και οργανικών συστατικών, ρυθμίζουν το pH των υδάτων προς το ουδέτερο, αυξάνοντας ή μειώνοντας το pH, ανάλογα με την οξύτητα ή αλκαλικότητά τους. Σε διάλυμα με pH περίπου 5, με την ρίψη υψηλής ποιότητας φυσικού ζεολίθου, εντός 10 περίπου λεπτών, το pH αυξήθηκε περίπου στο 7 και ακολούθως ισορρόπησε μεταξύ 7 και 8 (Σχ. 5.10). Το ουδέτερο pH στο πόσιμο νερό είναι καλύτερο για την υγεία του ανθρώπου. Έχουν καταγραφεί αρκετές περιπτώσεις πόσιμου νερού με pH 5,5 έως 6. Ενώ οι ζεόλιθοι αποτελούν υλικά κατασκευής φίλτρων καθαρισμού πόσιμου νερού, από τους κατασκευαστές δεν αναφέρεται η επίδραση των ζεολίθων στο pH. Ορισμένοι πάλι κατασκευαστές χρησιμοποιούν διάφορους κωδικούς για το υλικό και όχι την πραγματική ονομασία (ζεόλιθοι) του υλικού.



Σχήμα 5.10. Επίδραση υψηλής ποιότητας φυσικού ζεολίθου στο pH (Filippidis et al. 1996b).

Φθορίτης: Ο φθορίτης (CaF₂) χρησιμοποιείται κυρίως στη φθορίωση των υδάτων. **Περλίτης:** Ο περλίτης χρησιμοποιείται κυρίως στη δέσμευση φίκων και βακτηρίων κατά την παρασκευή μύρας, καθώς επίσης και στον εξευγενισμό χυμών φρούτων. **Κίσηρη:** Χρησιμοποιείται κυρίως ως φίλτρο για δέσμευση Fe από το πόσιμο νερό.

5.5.7. Απορροφητικά, αποξηραντικά και στεγανά υλικά

Φυσικοί ζεόλιθοι: Ο καθαρισμός και ξήρανση αερίων με τη χρήση υψηλής ποιότητας φυσικών ζεολίθων, αυξάνεται συνεχώς σε βάρος άλλων υλικών (Πίν. 5.24). Οι φυσικοί ζεόλιθοι έχουν την ικανότητα να απορροφούν (εκτός από τα ιχνοστοιχεία) και επιβλαβή αέρια συστατικά των διαφόρων αερίων (όπως π.χ. CO₂, H₂S) καθώς και να αποξηραίνουν τα αέρια απορροφώντας το H₂O.

Πίνακας 5.24. Απορροφητικά υλικά στον καθαρισμό αερίων (Clarke & Sloss 1992).

Υλικό	Μέταλλα που κυρίως δεσμεύει
Φυσικοί ζεόλιθοι	Hg, Cu, Ag, Zn, Co, Cd, Pb, Ni, As, V
Ενεργοποιημένος άνθρακας	Hg, Cd, Pb
Mg-ούχα πυριτικά ορυκτά	V, Pb, Ni
Mg-ούχα οξειδία και υδροξειδία	V, Ni
Al-ούχα πυριτικά ορυκτά	V, Pb, Ni, Hg
Ca-ούχα πυριτικά ορυκτά	V, Pb
Πυριτική άμμος	Pb, V, Zn
Ενεργοποιημένη αλουμίνα	Pb
Ασβεστόλιθος	As, Hg, Pb, Cd, V
Μείγμα, πυριτικά ορυκτά + Ιπτάμενη τέφρα	Hg, Pb, V, Ni, Cd
Μείγμα, πορτλανδίτη + Ιπτάμενη τέφρα	Hg
Μείγμα, ασβεστόλιθος + Ιπτάμενη τέφρα	Zn, Pb, Cd, V

Ανθρακικά πετρώματα: Κυρίως στην αποθείωση αερίων. Ασβεστόλιθος ή μείγμα ασβεστολίθου και ιπτάμενης τέφρας, χρησιμοποιούνται επίσης για δέσμευση μετάλλων κατά τον καθαρισμό των αερίων (Πίν. 5.24).

Άργιλοι: Οι άργιλοι χρησιμοποιούνται στην περιβαλλοντική διαχείριση των στερεών αποβλήτων (μεταλλεία, χωματερές) ως υλικά υποστρωμάτων αλλά και ως υλικά κάλυψης των στερεών αποβλήτων. **Συλβίτης:** (KCl) χρησιμοποιείται κυρίως στον καθαρισμό αερίων από μέταλλα. **Τρόνα:** [Na₃H(CO₃)₂.2H₂O] χρησιμοποιείται κυρίως στην αποθείωση αερίων.

5.5.8. Εμπλουτισμός οξυγόνου και καταπολέμηση της δυσσομίας

Φυσικοί ζεόλιθοι: Οι φυσικοί ζεόλιθοι απορροφούν επιλεκτικά το άζωτο και ορισμένα άλλα αέρια, αυξάνοντας έτσι το περιεχόμενο της ατμόσφαιρας σε οξυγόνο. Η επιλεκτική αυτή δέσμευση, έχει ως αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό του αέρα σε οξυγόνο. Η αφυδάτωση κατά τη διάρκεια της ημέρας και η ενυδάτωση κατά τη νύχτα των φυσικών ζεολίθων, συντελεί στην ανταλλαγή μερικών εκατοντάδων θερμίδων, αρκετών για τη δημιουργία δροσερής ατμόσφαιρας σε κτίρια. Χώροι όπου η εφαρμογή αυτή έχει πολύ καλά

αποτελέσματα είναι εργοστάσια τήξης/καμίνευσης και στοές ορυχείων. Η επιλεκτική αυτή δεσμευτική ικανότητα των υψηλής ποιότητας φυσικών ζεολίθων, δεν εμπλουτίζει μόνο την ατμόσφαιρα με οξυγόνο, κάνει έντονα αισθητή τη μείωση της δυσσομίας, ιδιαίτερα σε κλειστούς χώρους (π.χ. χοιροστάσια, πτηνοτροφεία και λοιπές κτηνοτροφικές μονάδες), γι' αυτό οι φυσικοί ζεόλιθοι χρησιμοποιούνται ως άμμος υγιεινής για κατοικίδια ζώα. Στις κτηνοτροφικές μονάδες, η χρήση υψηλής ποιότητας φυσικού ζεολίθου μετατρέπει την κοπριά σε άοσμο λίπασμα.

Ιδιαίτερο περιβαλλοντικό πρόβλημα δυσσομίας και έκπλυσης επιβλαβών συστατικών με το νερό της βροχής, αποτελούν οι εξωτερικές αποθέσεις λυματολάσπης και βιομηχανικής λάσπης. Η κατεργασία λυματολάσπης και βιομηχανικής λάσπης με υψηλής ποιότητας φυσικό ζεόλιθο, παράγει την άοσμη και συνεκτική ζεολυματολάσπη (Σχ. 5.11) και την άοσμη και συνεκτική ζεολάσπη. Η άοσμη και συνεκτική ζεολυματολάσπη είναι κατάλληλη για χρήση ως εδαφοβελτιωτικό στις γεωργικές καλλιέργειες.



Σχήμα 5.11. Παραγωγή άοσμης και συνεκτικής ζεολυματολάσπης (αριστερά) με τη κατεργασία λυματολάσπης (δεξιά) με υψηλής ποιότητας φυσικό ζεόλιθο (Filippidis 2010).

Η άοσμη και συνεκτική ζεολάσπη είναι κατάλληλη για ασφαλή απόθεση, λόγω της καθήλωσης των επιβλαβών συστατικών στους μικροπόρους του ζεολίθου (ορυκτού), καθώς και στους μεσο- και μακροπόρους του φυσικού ζεολίθου (πέτρωμα), αυτές δεν εκπλύνονται και δεν μεταφέρονται με το νερό της βροχής στο υδάτινο περιβάλλον, προστατεύοντας έτσι την ποιότητα των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων.

Ανθρακικά πετρώματα: Με άσβεστο που διασκορπίζεται στα δάπεδα των θαλάμων πουλερικών, εξουδετερώνονται ορισμένες ασθένειες και μειώνεται η δυσσομία.

Άλλα ορυκτά που χρησιμοποιούνται ως άμμοι υγιεινής για κατοικίδια ζώα είναι οι άργιλοι και ο διατομίτης.

5.5.9. Εξόρυξη μεταλλευμάτων και μεταλλουργία

Φυσικοί ζεόλιθοι: Οι δράσεις που προτείνονται στην προστασία του περιβάλλοντος κατά την εξόρυξη μεταλλευμάτων για την διαχείριση υγρών και στερεών αποβλήτων, καθώς και επιστροφή εδαφών για γεωργοκτηνοτροφική χρήση, είναι: α) Η κατεργασία της όξινης απορροής μεταλλείων και των υγρών αποβλήτων μεταλλείων με υψηλής ποιότητας φυσικό ζεόλιθο, θα έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της διαύγειας, τη ρύθμιση του pH προς το ουδέτερο, τον καθαρισμό και την εξυγίανση των υγρών αποβλήτων πριν την εκροή τους σε φυσικό αποδέκτη ή χρησιμοποιηθούν για άρδευση, β) Η ανάμειξη υψηλής ποιότητας φυσικού ζεολίθου στα στερεά απόβλητα μεταλλείου και κυρίως στη λεκάνη διαχείρισης τελμάτων, θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της πιθανής δυσοσμίας, τη καθήλωση/συγκράτηση των επιβλαβών συστατικών, αποτρέποντας την έκπλυσή τους με το νερό της βροχής στα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα, γ) Η ανάμειξη υψηλής ποιότητας φυσικού ζεολίθου στα πρώην αγροτικά εδάφη του μεταλλείου, θα έχει ως αποτέλεσμα τη ρύθμιση του pH των εδαφών προς το ουδέτερο, τη βελτίωση του ριζικού συστήματος των φυτών, αυξάνοντας έτσι την παραγωγή και βελτιώνοντας την ποιότητα των αγροτικών προϊόντων. Ταυτόχρονα, μειώνεται η χρήση του νερού άρδευσης καθώς και η χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων. Γενικά, η ανάμειξη υψηλής ποιότητας φυσικού ζεολίθου στα εδάφη προς απόδοση σε γεωργοκτηνοτροφική χρήση, επιφέρει μεγαλύτερη γονιμότητα και καλύτερη ποιότητα στα παραγόμενα προϊόντα φυτικής και ζωικής προέλευσης, σε σύγκριση με τα εδάφη πριν την εξόρυξη των μεταλλευμάτων.

Ανθρακικά πετρώματα: Η χρήση ασβέστου (CaO) στην ανάκτηση Cu, Au, Ag, U, Hg, Zn, Ni και άλλων μετάλλων είναι πολύ εκτεταμένη. Το MgO χρησιμοποιείται στην αποθείωση του Fe και του χάλυβα, επίσης ως αναγωγικό υλικό στην παραγωγή Be, Ti, Zr, Hf και U. Το 80% της παραγωγής του Mg στις Η.Π.Α., χρησιμοποιείται στη μεταλλουργία. Η αποθείωση των καπνοδόχων βιομηχανικών μονάδων (κυρίως μεταλλουργικών), γίνεται με τη χρήση κονιοποιημένου ασβεστολίθου. Το περιβαλλοντικό όφελος είναι η μείωση διασποράς του θείου και τοξικών συγκεντρώσεων μετάλλων και ραδιονουκλιδίων στο περιβάλλον.

Τρόνα: Το τρόνα $[\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ χρησιμοποιείται σε ορισμένες περιπτώσεις στην αποθείωση του χάλυβα.

5.5.10. Ιατρική και φαρμακευτική

Φυσικοί ζεόλιθοι: Πολύ υψηλής ποιότητας φυσικοί ζεόλιθοι χρησιμοποιούνται ως συμπληρώματα διατροφής. Συνήθως οι συνθετικοί ζεόλιθοι χρησιμοποιούνται ως στιλβωτικό υλικό σε οδοντόπαστες, διότι είναι λιγότερο αποξεστικό υλικό σε σύγκριση με το CaHPO_4 και επιτρέπει περισσότερα ιόντα φθορίου να παραμένουν στην ανιονική μορφή. Επειδή οι ζεόλιθοι έχουν υψηλή ικανότητα ανταλλαγής ιόντων, είναι υπέρτεροι άλλων υλικών στον διαχωρισμό αμμωνιακού αζώτου στα υγρά αιμοδιάλυσης.

Ανθρακικά πετρώματα: Υψηλής καθαρότητας, κυρίως ανθρακικά ορυκτά καθώς και προϊόντα διάσπασης αυτών, χρησιμοποιούνται ως φαρμακευτικά υλικά.

Άργιλοι: Υψηλής καθαρότητας καολινίτης χρησιμοποιείται στη φαρμακευτική. **Χαλαζίας:** Μεγάλης καθαρότητας και εξαιρετικά λεπτόκοκκος χαλαζίας, αλλά και άλλα ορυκτά του SiO_2 , χρησιμοποιούνται στη φαρμακευτική βιομηχανία, αλλά και ως υλικά καθαρισμού και στίλβωσης των δοντιών. Ο διατομίτης ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) χρησιμοποιείται επίσης στην παρασκευή της οδοντόπαστας. **Λαουρίτης:** Ο λαουρίτης (CaI_2O_6) βρίσκει εφαρμογή στην φαρμακευτική βιομηχανία (αντισηπτικό), καθώς και για τη θεραπεία της βρογχοκήλης. **Άστριοι:** Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τεχνητών δοντιών. **Γύψος:** Βρίσκει χρήσεις στην οδοντιατρική, ορθοπεδική και φαρμακευτική. **Ορυκτά του Li:** Σποδουμένης ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$) και πεταλίτης ($\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$) χρησιμοποιούνται κυρίως στην παρασκευή υπνωτικών, καθώς και ως βακτηριδιοκτόνα στις πισίνες. **Φθοριοαπατίτης:** Χρησιμοποιείται κυρίως στην παρασκευή οδοντόπαστας. **Κίσηρη:** Χρησιμοποιείται κυρίως στην οδοντιατρική ως υλικό στίλβωσης. **Άλλα ορυκτά** με φαρμακευτική χρήση είναι ο τάλκης, το τρόνα και ο αλίτης.

6. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑ

6.1. Εισαγωγή

Η σκόνη στο περιβάλλον του ανθρώπου αποτελείται από διάφορα ορυκτά, ορισμένα από είναι άκρως επικίνδυνα για την υγεία του ανθρώπου. Η σκόνη δημιουργείται από φυσικές διεργασίες (διάβρωση, ηφαιστειακή δράση, ανέμους κτλ.), αλλά και από τις διάφορες δραστηριότητες του ανθρώπου (κατασκευές, οδικά δίκτυα και μεταφορές, εκμετάλλευση ορυκτών πρώτων υλών, κτλ.). Η σκόνη της Αφρικανικής ερήμου που έπεσε στη χώρα μας την Καθαρά Δευτέρα του έτους 1993, διαπιστώθηκε (από τον ομότιμο καθηγητή ΑΠΘ κ. Ανανία Τσιραμπίδη) ότι είχε μέσο μέγεθος κόκκων 0,02 mm και τα ορυκτά συστατικά της ήταν χαλαζίας, ασβεστίτης, μαρμαρυγίες, άστριοι, καολινίτης, δολομίτης και σμεκτίτης.

Σε φυσικά ύδατα που επηρεάζονται από πλούσιους σε αμιάντο γεωλογικούς σχηματισμούς βρέθηκαν $10^6 - 10^{13}$ (ίνες/L), ενώ σε ύδατα που δεν επηρεάστηκαν η συγκέντρωση βρέθηκε να είναι $<10^6$ (ίνες/L). Στα χιόνια και πάγους της Ανταρκτικής καταγράφηκαν τιμές από $1-3 \times 10^5$ (ίνες/L). Σε εργαζόμενους ορυχείων, μόνο στους πνεύμονες, βρέθηκαν μέχρι και 400×10^6 (ίνες/g), ενώ σε κατοίκους μεγάλων πόλεων μέχρι και 2×10^6 (ίνες/g).

Στους πνεύμονες κατοίκων της Ρώμης βρέθηκαν τα εξής ορυκτά: Μοσχοβίτης + φλογοπίτης (10%), καολινίτης + πυροφυλλίτης (10%), χαλαζίας (10%), τάλκης (10%), τρεμολίτης + κροκιδόλιθος (6%), χλωρίτης + βερμικουλίτης (6%), άστριοι + πυρόξενοι + ζεόλιθοι (9%), γύψος (3%), ρουτίλιο (2%), χρυσοτίλης (1%), απροσδιόριστα (8%). Από τα παραπάνω, και λαμβάνοντας υπόψη την ορυκτολογική σύσταση του φλοιού της γης (Andrews et al. 1996), αλλά και της τέφρας των ηφαιστειακών εκρήξεων (Guthrie & Mossman 1993), γίνεται σαφές ότι ο άνθρωπος με τις δραστηριότητές του αποτελεί σοβαρή αιτία παρουσίας των ορυκτών στην σκόνη που τον περιβάλλει.

Οι επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου καθορίζονται κυρίως από την κοκκομετρία, τη μορφολογία, τη χημική σύσταση την διαλυτότητα των ορυκτών της σκόνης. Η σκόνη περιέχει εισπνεύσιμα σωματίδια ορυκτών, κοκκομετρίας συνήθως $<5 \mu\text{m}$. Τα ινώδη και γωνιώδη ορυκτά της σκόνης είναι φυσικά περισσότερο επικίνδυνα για τον άνθρωπο. Οι ίνες αμιάντου έχουν συνήθως μέγεθος από $0,03 \mu\text{m}$ έως $0,60 \mu\text{m}$.

6.2. Αμιάντος

Σύμφωνα με το Π.Δ. 212, ΦΕΚ 212/9-10-2006 (σε συμμόρφωση της οδηγίας 83/477/ΕΟΚ - ΕΕ L263/24-9-1983, όπως αυτή τροποποιήθηκε με τις οδηγίες 91/382/ΕΟΚ - ΕΕ L206/29-7-1991 και 2003/18/ΕΚ - ΕΕ L97/15-4-2003), ως ΑΜΙΑΝΤΟΣ νοείται οποιοδήποτε από τα παρακάτω ινώδη πυριτικά ορυκτά: 1) Ακτινολίτης (ακτινόλιθος), 2) Γρουνερίτης (αμοσίτης), 3) Ανθόφυλλος (ανθοφυλλίτης), 4) Κροκιδόλιθος (ριμπεκίτης), 5) Τρεμολίτης (τρεμόλιθος) και 6) Χρυσότιλος (χρυσοτίλης).

Συνήθως, πρώτα γίνεται μέτρηση της πιθανής συγκέντρωσης ινών αμιάντου στον αέρα του χώρου εργασίας ή διαμονής και σε περίπτωση που εντοπιστούν ίνες αμιάντου, γίνεται εντοπισμός του υλικού που περιέχει τον αμιάντο, καθώς επίσης και προσδιορισμός του τύπου του αμιάντου. Ο πιο επικίνδυνος αμιάντος θεωρείται ο κροκιδόλιθος (ριμπεκίτης), ο οποίος αποκαλείται και μπλε αμιάντος λόγω του χρώματός του. Ως οριακή τιμή έκθεσης σύμφωνα με τον νόμο, ισχύει ότι η συγκέντρωση ινών αμιάντου δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη της 0,1 ίνας / cm³ αέρα, ως μέση 8ωρη χρονικά σταθμισμένη έκθεση. Το όριο έκθεσης σε εισπνεύσιμη σκόνη είναι 10 mg / m³ αέρα.

Η εθνική νομοθεσία εναρμονίζεται υποχρεωτικά με την ευρωπαϊκή και είναι: α) Π.Δ. 212/2006 (ΦΕΚ 212/Α/9.10.2006) Προστασία των εργαζομένων που εκτίθενται σε αμιάντο κατά την εργασία, σε συμμόρφωση με την οδηγία 83/477/ΕΟΚ του Συμβουλίου, όπως αυτή τροποποιήθηκε με την οδηγία 91/382/ΕΟΚ του Συμβουλίου και την οδηγία 2003/18/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, β) Π.Δ. 175/1997 (ΦΕΚ 150/Α/15.7.1997) Τροποποίηση του π.δ. 70α/88 «προστασία εργαζομένων που εκτίθενται στον αμιάντο κατά την εργασία» (31/Α) σε συμμόρφωση με την οδηγία 91/382/ΕΟΚ, γ) Π.Δ. 70α/1988 (ΦΕΚ 31/Α/17.2.1988) Προστασία των εργαζομένων που εκτίθενται σε αμιάντο κατά την εργασία και δ) Αποφ. 2592/84/1985 (ΦΕΚ 230/Β/29.4.1985) Εναρμόνιση του Ελληνικού Δικαίου προς το Κοινοτικό. Τροποποίηση και συμπλήρωση του π.δ. 445/83 (166/Α).

6.3. Επιδράσεις στην υγεία από σκόνη ορυκτών

Τα πιο επικίνδυνα ορυκτά συστατικά της σκόνης για την υγεία του ανθρώπου είναι: Ο αμιάντος, κρυσταλλικό πυρίτιο (π.χ. χαλαζίας), τα ανόργανα συστατικά των ανθράκων, οι μαρμαρυγίες, ο πυροφυλλίτης και ο χλωρίτης. Ο αριθμός θανάτων που καταγράφηκαν σε ορισμένες χώρες και περιπτώσεις έως το 1992 (Πίν. 6.1), απαιτεί από κυβερνήσεις, διεθνείς οργανισμούς, αλλά και τον καθένα μας χωριστά ευθύνη και λήψη αυστηρών μέτρων προστασίας του περιβάλλοντος (Prasad et al. 2006, Sahai & Schoonen 2006).

Πίνακας 6.1. Αριθμός θανάτων που καταγράφηκαν σε συγκεκριμένες περιπτώσεις με αίτιο τη σκόνη των ορυκτών (Guthrie & Mossman 1993).

Μεταλλείο / Ορυχείο / Λατομείο	Αριθμός Θανάτων
Ανθρακωρυχεία Η.Π.Α., ορισμένες καταγραφές έως το 1977	6.322
Μόνο από σιλίκωση (silicosis) στην Φιλανδία έως το 1986	627
Ορυχείο Διατομίτη στην Καλιφόρνια έως το 1992 (ΟΔΚ 1992)	577
Μόνο από καρκίνο στο ΟΔΚ 1992	132
Λατομείο γρανίτη στο Vermont (Η.Π.Α.) έως το 1969	1.481
Μεταλλείο χρυσού στο Kalgoorlie (Αυστραλία) έτη 1961-1975	420
Μεταλλείο αιματίτη στο St. Louis (Η.Π.Α.) από 1937 έως 1978	4.186

Μεγάλος είναι ο αριθμός των ασθενειών που έχουν καταγραφεί ανά τον κόσμο με αιτία τα ορυκτά συστατικά της σκόνης. Ορισμένες από τις ασθένειες είναι: Καρκίνος, αμιάντωση (asbestosis), ίνωση (fibrosis), σιλίκωση (silicosis), καρδιακές ασθένειες, βρογχίτις, πνευμονία, άσθμα, φυματίωση, νεφρίτις, πνευμονοκονίαση και διάφορες αναπνευστικές ασθένειες. Επτά θάνατοι στην ΒΔ Ελλάδα, αποδίδονται στην επίδραση ινών αμιάντου (Constantopoulos et al. 1985).

Βασικά μέτρα προστασίας είναι: Καταγραφή της ορυκτολογικής και χημικής σύστασης, καθώς και μορφολογίας της σκόνης σε πόλεις, σχολεία και άλλα δημόσια κτίρια, εντοπισμός της πηγής ρύπανσης και ακολούθως ενέργειες για μείωση της διασποράς των ορυκτών από τις πηγές ρύπανσης. Στα μέτρα αυτά πρέπει να προστεθούν και όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, σχετικά με τις δραστηριότητες εκμετάλλευσης των ορυκτών πόρων, αλλά και τις λοιπές δραστηριότητες του ανθρώπου. Επίσης, ο άνθρωπος με επεμβάσεις (π.χ. δένδροφύτεση, κάλυψη ελεύθερων διαβρωμένων επιφανειών κ.ά.), μπορεί και πρέπει να μειώσει τη δημιουργία της φυσικής σκόνης.

7. ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

7.1. Περιβαλλοντικές μελέτες

Σύμφωνα με την περιβαλλοντική νομοθεσία (Π.Δ. 256/ΦΕΚ 190/12.8.1998), στις κατηγορίες μελετών προστίθεται η κατηγορία 27 με τίτλο «Περιβαλλοντικές Μελέτες». Το αντικείμενο της κατηγορίας 27 περιλαμβάνει: α) μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων δημοσίων ή ιδιωτικών έργων και δραστηριοτήτων, β) ειδικές περιβαλλοντικές μελέτες, γ) μελέτες προστασίας και διαχείρισης περιβάλλοντος (π.χ. διαχείρισης ατμόσφαιρας, αερίων αποβλήτων, διαχείρισης υδάτων, υγρών αποβλήτων, απορριμμάτων, τοξικών και επικίνδυνων αποβλήτων, θορύβων δονήσεων και κραδασμών, βιοτόπων, οικοτόπων, ευαίσθητων οικοσυστημάτων και γενικότερα συνόλων ή στοιχείων φύσης) και δ) μελέτες αποκατάστασης περιβάλλοντος και ρυπασμένων αποδεκτών (π.χ. επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, εδάφους).

Η εκπόνηση των μελετών ανατίθεται: α) Για μελέτες που απαιτούν τάξεις πτυχίων Α, Β και Γ της προτεινόμενης κατηγορίας 27 σε μελετητή ή γραφείο μελετών ή σε συμπράξεις μελετητών ή γραφείων μελετών της ίδιας κατηγορίας, β) Για μελέτες μα τάξη πτυχίου Δ σε γραφεία μελετών, τα οποία συγκροτούνται από ατομικά πτυχία μελετητών της προτεινόμενης κατηγορίας 27, εκ των οποίων το ένα τουλάχιστον ανήκει σε επιστήμονα της ειδικότητας του μηχανικού με τάξη πτυχίου Β ή Γ και ένα σε επιστήμονα άλλης ειδικότητας (φυσικού ή **χημικού ή γεωλόγου** ή δασολόγου ή γεωπόνου ή ιχθυολόγου ή περιβαλλοντολόγου ή βιολόγου ή οικολόγου ή άλλης συναφούς επιστημονικής ειδικότητας) με τάξη πτυχίου Β ή Γ. γ) Για μελέτες μα τάξη πτυχίου Ε σε γραφεία μελετών, τα οποία συγκροτούνται από ατομικά πτυχία μελετητών της προτεινόμενης κατηγορίας 27, εκ των οποίων το δύο (2) τουλάχιστον ανήκουν σε επιστήμονες της ειδικότητας του μηχανικού (ένα εξ αυτών σε τάξη πτυχίου Γ και ένα σε τάξη πτυχίου Β ή Γ) και ένα (1) σε επιστήμονα άλλης ειδικότητας (φυσικού ή **χημικού ή γεωλόγου** ή δασολόγου ή γεωπόνου ή ιχθυολόγου ή περιβαλλοντολόγου ή βιολόγου ή οικολόγου ή άλλης συναφούς επιστημονικής ειδικότητας) με τάξη πτυχίου Β ή Γ.

Στις περιπτώσεις όπου η φύση και τα ειδικότερα προβλήματα περιβαλλοντικών μελετών ορισμένων έργων, καθιστούν αναγκαία τη χρησιμοποίηση ειδικών συνεργατών με αντίστοιχες ειδικότητες, ο εργοδότης ζητεί κατά την πρόσκληση εκδήλωσης ενδιαφέροντος την σύμπραξη των συνεργατών αυτών στην κατάρτιση της μελέτης.

7.2. Ορυκτές πρώτες ύλες και μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Η σύνταξη των μελετών περιβαλλοντικών επιπτώσεων απαιτεί συνεργασία μεταξύ επιστημόνων πολλών ειδικοτήτων. Τα δεδομένα περιβαλλοντικής μελέτης, διαφοροποιούνται από περιοχή σε περιοχή αλλά και με το είδος του ορυκτού πλούτου. Οι τροποποιήσεις στην περιβαλλοντική νομοθεσία είναι τακτικές (Μιχαλοπούλου & Μουχατόπουλος 1995, Τσιραμπίδης 1996, Ρέκκας 2002, Μιχαλοπούλου 2004), γι' αυτό απαιτείται συνεχής παρακολούθησή. Οι

προδιαγραφές σύνταξης μελετών περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε σχέση με τις ορυκτές πρώτες ύλες, διακρίνονται σε δύο μέρη: Α' μέρος (για την έρευνα) και Β' μέρος (για την εκμετάλλευση). Τα ζητούμενα θα αναφέρονται εφόσον υπάρχει σχετικό αντικείμενο, ανάλογο με τον ορυκτό πλούτο.

Α' μέρος (έρευνα): 1) Ονομασία και είδος επιχείρησης, 2) Περίληψη του αντικειμένου της μελέτης, 3) Γεωγραφική θέση, έκταση και διοικητική υπαγωγή: Γεωγραφική θέση επέμβασης, τοπωνύμιο και διοικητική υπαγωγή της θέσης. Ακριβής έκταση σε τ.μ., καθώς και συντεταγμένες των ορίων της περιοχής. Απεικόνιση σε χάρτες και συσχέτιση με χώρους ειδικού χαρακτήρα (οικισμοί, βιομηχανίες, αρχαιολογικοί και τουριστικοί χώροι, οικολογικά ευαίσθητες και προστατευόμενες περιοχές, εθνικοί δρυμοί, κτλ.), 4) Υφιστάμενη κατάσταση περιοχής: Μορφή χρήσης γης, χαρακτηρισμός (γεωργική, δασική, κτλ.), ιδιοκτησιακό καθεστώς, γεωλογικά στοιχεία, βλάστηση (δενδρώδης, θαμνώδης, είδη), υδρολογικά και τοπογραφικά στοιχεία. Σε χάρτες και φωτογραφίες, απεικόνιση της περιοχής, δρόμων προσπέλασης, οικισμοί, αρχαιολογικοί και τουριστικοί χώροι και προστατευόμενες περιοχές, 5) Έρευνα: Μέθοδοι έρευνας, θέσεις ερευνητικών έργων, δρόμοι προσπέλασης, θέση και τρόπος απόρριψης αποβλήτων, εφόσον υπάρξουν. Περιγραφή και θέση πιθανών βοηθητικών εγκαταστάσεων, ανάγκες και τρόπος κάλυψης σε νερό για τις ερευνητικές εργασίες, εκτίμηση χρονικής διάρκειας των ερευνητικών εργασιών, 6) Αντιμέτωπιση περιβαλλοντικών επιπτώσεων: Περιγραφή και είδος πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων των ερευνητικών εργασιών και τρόποι αποφυγής ή μείωσης αυτών. Επιπτώσεις που αφορούν δασική έκταση, διάνοιξη δρόμων ή πλατειών, προτεινόμενη διαμόρφωση χώρων, εκσκαφές, δημιουργία ή μη κάθε είδους αποβλήτων. Αποκατάσταση του χώρου επέμβασης (εκσκαφές, οδικό δίκτυο, υδρευτικό δίκτυο, βλάστηση). Τρόποι συντήρησης των προς αποκατάσταση εκτάσεων. Χρονοδιάγραμμα εργασιών αποκατάστασης.

Β' μέρος (εκμετάλλευση): 1) Ονομασία και είδος επιχείρησης, 2) Περίληψη του αντικειμένου της μελέτης, 3) Γεωγραφική θέση, έκταση και διοικητική υπαγωγή, 4) Υφιστάμενη κατάσταση περιοχής: Μορφή χρήσης γης (δασοπονικές, γεωργικές, κτλ.), χαρακτηρισμός σε κατηγορία δασών και δασικών εκτάσεων σύμφωνα με το νόμο, ιδιοκτησιακό καθεστώς. Γεωλογικά, ορυκτολογικά, γεωχημικά και κοιτασματολογικά στοιχεία. Έδαφος (βάθος, τύπος, εδαφολογική ανάλυση, pH, κτλ.). Βλάστηση - πανίδα (ποώδης - θαμνώδης - δενδρώδης βλάστηση, είδη, συχνότητα εμφάνισης, είδη άγριας πανίδας, τόπος διαμονής ενδημικών ειδών, κτλ.). Υδρολογικά, κλιματολογικά, τοπογραφικά και γεωτεχνικά στοιχεία. Απεικόνιση σε χάρτες των αξόνων προσπέλασης, οικισμών, αρχαιολογικών και τουριστικών χώρων, προστατευόμενων περιοχών κ.ά. Κοινωνικά και οικονομικά στοιχεία της περιοχής αμέσου επιρροής του χώρου επέμβασης. Πολλά από τα παραπάνω στοιχεία θα απεικονίζονται σε χάρτες και φωτογραφίες, 5) Κοιτασματολογικά στοιχεία: Αποθέματα, τομή / κάτοψη του προς εκμετάλλευση κοιτάσματος,

πάχος υπερκείμενων και ενδιάμεσων στειρών, σχέση αποκάλυψης και εκμετάλλευσης. Κοκκομετρία, μορφολογία, χημική (κύρια στοιχεία και ιχνοστοιχεία) και ορυκτολογική σύσταση του κοιτάσματος, 6) Μέθοδος εκμετάλλευσης: Περιγραφή της μεθόδου συνοδευόμενη από σχετικά διαγράμματα της τελικής κατάστασης του χώρου εκμετάλλευσης. Αιτιολόγηση της μεθόδου ως πλέον κατάλληλης, 7) Μέθοδος κατεργασίας και εμπλουτισμού: Περιγραφή μεθόδου/ων με σχετικά διαγράμματα ροής, περιγραφή στερεών, υγρών και αερίων προϊόντων (ποιοτικά και ποσοτικά στοιχεία). Τρόπος απόθεσης και μεταφοράς των προϊόντων εκμετάλλευσης. Ανάγκες και τρόπος κάλυψης σε νερό, 8) Απόθεση αποβλήτων: Περιγραφή στερεών, υγρών και αερίων αποβλήτων (ποιοτικά και ποσοτικά στοιχεία). Χώρος και τρόπος απόθεσης ή απόρριψης των αποβλήτων. Δυνατότητα πλήρωσης χώρων παλαιών εκμεταλλεύσεων. Δυνατότητα εσωτερικής ή εξωτερικής απόθεσης των αποβλήτων, 9) Εγκαταστάσεις: Γραφεία, μονάδες κατεργασίας, αποθήκες, αντλιοστάσια, διαμονής και αναψυχής, επεξεργασίας αποβλήτων, κτλ., 10) Αναφορά και ανάλυση με σειρά σπουδαιότητας των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων από το κοιτάσμα, από τα προϊόντα εκμετάλλευσης ή από τα απόβλητα της όλης δραστηριότητας, 11) Αναφορά και ανάλυση των μέτρων προστασίας για την αποφυγή ή μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στο χώρο εκμετάλλευσης, αλλά και στην ευρύτερη περιοχή. Δυνατότητα επεξεργασίας, εξουδετέρωσης ή ανακύκλωσης αποβλήτων. Μέτρα προστασίας σε περιπτώσεις έντονων φυσικών φαινομένων, 12) Αναφορά και ανάλυση εναλλακτικών μέτρων με στόχο την αποφυγή ή μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, 13) Αποκατάσταση του περιβάλλοντος: Επικάλυψη με φυτική γη, δενδροφυτεύσεις, πλήρωση με αδρανή υλικά ή νερό κ.ά., μετά το τέλος ή και κατά την διάρκεια των εξορυκτικών εργασιών. Χρονοδιάγραμμα και επιδιωκόμενο αποτέλεσμα των εργασιών αποκατάστασης. Δυνατότητα νέας χρήσης γης (η βασική έννοια της ορθολογικής χρήσης γης είναι η ίδια γη να χρησιμοποιηθεί για κάποιο νέο σκοπό). Εγκαταλειμμένα λατομεία να μετατραπούν σε οργανωμένους χώρους αναψυχής, αθλητικά κέντρα, εύφορα γεωργικά εδάφη, υπόγειες εκμεταλλεύσεις να μετατραπούν σε χώρους αποθήκευσης, κ.ά.). Η διαδικασία όμως αυτή απαιτεί αναγνώριση και προσδιορισμό των περιβαλλοντικών προβλημάτων και ακολούθως εφαρμογή συγκεκριμένων μέτρων προστασίας. Η κοκκομετρία, η μορφολογία, η χημική και ορυκτολογική σύσταση του κοιτάσματος και των αποβλήτων, καθώς και ο βαθμός διασποράς των συστατικών του κοιτάσματος και των αποβλήτων, αποτελούν βασικά στοιχεία για την σύνταξη μελέτης, αλλά και την ορθολογική χρήση γης με τη λήξη των εξορυκτικών εργασιών, 14) Μέτρα και συστήματα περιβαλλοντικής παρακολούθησης της περιοχής.

Μετά το τέλος των ερευνητικών εργασιών και εφόσον ο ενδιαφερόμενος δεν συνεχίσει στο στάδιο εκμετάλλευσης, υποχρεούται σε αποκατάσταση του περιβάλλοντος, σύμφωνα με την μελέτη του Α' μέρους. Εάν συνεχίσει στο στάδιο της εκμετάλλευσης, υποχρεούται στην εκπόνηση και υποβολή του Β'

μέρους. Σε περίπτωση πρόσθετων ή απρόβλεπτων επεμβάσεων εξαιτίας ειδικών συνθηκών, θα υποβάλλεται για θεώρηση συμπληρωματική μελέτη με τα νέα στοιχεία.

7.3. Εθνική και Ευρωπαϊκή περιβαλλοντική νομοθεσία

Η περιβαλλοντική νομοθεσία πέραν των γενικών θεμάτων, αφορά κυρίως την περιβαλλοντική αδειοδότηση, τη διαχείριση και προστασία των υδάτων, τη διαχείριση στερεών και άλλων αποβλήτων, τη διαχείριση τοξικών-επικίνδυνων αποβλήτων, τον έλεγχο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, τον θόρυβο, το φυσικό περιβάλλον, τις τουριστικές εγκαταστάσεις, τις πτηνο-κτηνοτροφικές εγκαταστάσεις, τα έργα οδοποιίας και τα λατομεία.

Η Ελληνική περιβαλλοντική νομοθεσία περιλαμβάνει νόμους, προεδρικά διατάγματα, υπουργικές αποφάσεις, νομοθετικά διατάγματα, εγκύκλιοι, νομαρχιακές αποφάσεις και αστυνομικές διατάξεις.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση λαμβάνει τριών ειδών νομοθετικά μέτρα για την προστασία του περιβάλλοντος: Κανονισμούς (R), Οδηγίες (L) και Αποφάσεις (D). Οι **κανονισμοί (R)** μόλις θεσμοθετηθούν από το συμβούλιο υπουργών της κοινότητας και δημοσιευθούν στην επίσημη εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, δεσμεύουν αμέσως την Ελλάδα. Έχουν δηλαδή «άμεση ισχύ» και δεν απαιτείται λήψη νομοθετικών μέτρων από την Ελλάδα για να εναρμονίσει το Ελληνικό δίκαιο προς αυτούς. Οι **οδηγίες (L)** απευθύνονται στα κράτη-μέλη και τα υποχρεώνουν να λάβουν όλα τα απαραίτητα νομοθετικά μέτρα ώστε να εφαρμόσουν τις υποχρεώσεις που επιβάλλουν αυτές. Όταν η Ελλάδα λάβει αυτά τα αναγκαία νομοθετικά μέτρα τότε λέμε ότι το Ελληνικό δίκαιο εναρμονίστηκε προς το κοινοτικό. Οι **αποφάσεις (D)** δεσμεύουν την Ελλάδα, και τα λοιπά κράτη-μέλη και συνήθως αναφέρονται στην κύρωση διεθνών συμβάσεων, την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ της Ευρωπαϊκής Κοινότητας και των κρατών-μελών ή της σύστασης επιτροπών για την αντιμετώπιση διαφόρων περιβαλλοντικών προβλημάτων.

Παρακάτω ακολουθεί ένα πολύ μικρό μέρος της περιβαλλοντικής νομοθεσίας που αφορά γεωλόγους, χημικούς και γεωχημικούς. Για πλήρη ενημέρωση, ο αναγνώστης πρέπει να ανατρέξει σε ιστοσελίδες υπηρεσιών, ΦΕΚ και εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων (Μιχαλοπούλου & Μουχαταρόπουλος 1995, Ρέκκας 2002, Μιχαλοπούλου 2004).

- 1) 75/440/ΕΟΚ/16.6.75 (L = Οδηγία): Περί της απαιτούμενης ποιότητας των υδάτων επιφάνειας που προορίζονται για την παραγωγή ποσίμου ύδατος.
- 2) Ν. 716/77, ΠΔ 541/78 (ΦΕΚ 116Α/78): Περί μητρώου μελετητών και αναθέσεως και εκπονήσεως μελετών.
- 3) 78/319/ΕΟΚ/20.3.78 (L = Οδηγία): Περί των τοξικών και επικινδύνων αποβλήτων.
- 4) ΠΔ 285/79 (ΦΕΚ 83Α/79): Περί εκμισθώσεως δημοσίων λατομείων βιομηχανικών ορυκτών και μαρμάρων.
- 5) 79/869/ΕΟΚ/9.10.79 (L = Οδηγία): Περί των μεθόδων μετρήσεως και περί

της συχνότητας των δειγματοληψιών και της αναλύσεως των επιφανειακών υδάτων τα οποία προορίζονται για την παραγωγή ποσίμου ύδατος στα Κράτη Μέλη.

6) 80/68/ΕΟΚ/17.12.79 (L = Οδηγία): Περί προστασίας των υπογείων υδάτων από τη ρύπανση που προέρχεται από ορισμένες επικίνδυνες ουσίες.

7) 80/778/ΕΟΚ/15.7.80 (L = Οδηγία): Περί της ποιότητας του ποσίμου νερού.

8) 80/779/ΕΟΚ/15.7.80 (L = Οδηγία): Περί των οριακών τιμών και των ενδεικτικών τιμών της ποιότητας της ατμόσφαιρας σε διοξείδιο του θείου και αιωρούμενα σωματίδια.

9) ΥΑ Π5η/Φ/17402 (ΦΕΚ 931Β/84): Κανονισμός μεταλλευτικών και λατομικών εργασιών.

10) ΚΥΑ (ΦΕΚ 53Β/86): Ποιότητα του πόσιμου νερού, σε συμμόρφωση προς την οδηγία του Συμβουλίου των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων της 15.7.80.

11) ΚΥΑ 46399/1352/86 (ΦΕΚ 438Β/86): Απαιτούμενη ποσότητα των επιφανειακών νερών που προορίζονται για: «πόσιμα», «κολύμβηση», «διαβίωση ψαριών σε γλυκά νερά» και «καλλιέργεια και αλιεία οστρακοειδών». Μέθοδοι μέτρησης, συχνότητα δειγματοληψίας και ανάλυση επιφανειακών νερών που προορίζονται για πόσιμα, σε συμμόρφωση με τις οδηγίες του Συμβουλίου των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων 75/440/ΕΟΚ, 76/160/ΕΟΚ, 78/659/ΕΟΚ.

12) 86/278/ΕΟΚ/12.6.86 (L = Οδηγία): Σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος και ιδίως του εδάφους κατά τη χρησιμοποίηση της ιλύος, καθαρισμού λυμάτων στη γεωργία.

13) Ν. 1739/87 (ΦΕΚ 201Α/87): Διαχείριση των υδατικών πόρων και άλλες διατάξεις.

14) 87/217/ΕΟΚ/19.3.87 (L = Οδηγία): Σχετικά με την πρόληψη και τη μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος από τον αμίαντο.

15) ΚΥΑ 18186/271/88 (ΦΕΚ 126Β/88): Μέτρα και περιορισμοί για την προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος και ειδικότερα καθορισμός οριακών τιμών των επικινδύνων ουσιών στα υγρά απόβλητα.

16) ΚΥΑ 69269/5387/90 (ΦΕΚ 678Β/90): Κατάταξη έργων και δραστηριοτήτων σε κατηγορίες, περιεχόμενο Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (Μ.Π.Ε.), καθορισμός περιεχομένου ειδικών περιβαλλοντικών μελετών (Ε.Μ.Π.) και λοιπές συναφείς διατάξεις, σύμφωνα με το Ν. 1650/1986.

17) ΚΥΑ 8243/1113/91 (ΦΕΚ 138Β/91): Καθορισμός μέτρων και μεθόδων για την πρόληψη και μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος από εκπομπές αμιάντου.

18) ΚΥΑ 55648/2210/91 (ΦΕΚ 323Β/91): Μέτρα και περιορισμοί για την προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος και ειδικότερα καθορισμός οριακών τιμών των επικινδύνων ουσιών στα υγρά απόβλητα.

19) ΥΑ Δ8/Γ/Φ17/16103/92 (ΦΕΚ 424Β/92): Τροποποίηση των διατάξεων του άρθρου 22 του Κανονισμού Μεταλλευτικών και Λατομικών Εργασιών που αναφέρονται στον αμίαντο.

- 20) ΚΥΑ 58751/2370/93 (ΦΕΚ 264Β/93): Καθορισμός και όρων για τον περιορισμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που προέρχεται από μεγάλες εγκαταστάσεις καύσης (Οδηγία 88/609/ΕΟΚ).
- 21) 94/3/ΕΚ/20.12.93 (L = Οδηγία): Για τη θέσπιση καταλόγου αποβλήτων σύμφωνα με το άρθρο (α) της Οδηγίας 75/442/ΕΟΚ του Συμβουλίου περί στερεών αποβλήτων.
- 22) Εγκύκλιος 37/94 (ΔΜΕΟ/δ/Ο/1158/3.10.94): Προσωρινές προδιαγραφές για Μελέτες Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων από οδικά έργα.
- 23) Εγκύκλιος 37/95 (ΔΜΕΟ/α/Ο/3429/11.9.95): Εκπόνηση Μελετών Δημοσίων Έργων.
- 24) ΠΔ 256/98 (ΦΕΚ 190/98): Συμπλήρωση των διατάξεων του ΠΔ 541/78 (Α΄116) «Περί κατηγοριών μελετών» (Νέα κατηγορία 27: Περιβαλλοντικές μελέτες).
- 25) 46. ΠΔ 344/2000 (ΦΕΚ 297/2000)
 Άσκηση του επαγγέλματος του γεωτεχνικού (κεφ. Ε΄: Επαγγελματικές δραστηριότητες – υποχρεωτική απασχόληση Γεωλόγων).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνόγλωσση

- Δημητριάδης Δ. & Κοντόπουλος Α. (1994). Εργοστάσιο χρυσού Χαλκιδικής, οικονομικότητα επένδυσης, περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ημερίδα ΓΕΩΤ.Ε.Ε., Γερακινή Χαλκιδικής, Πρακτικά, 163-186.
- Ελευθεριάδης Γ. & Κορωνάιος Α. (2005). Σημειώσεις Πετρολογίας Πυριγενών Πετρωμάτων. Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη.
- Θεοδωρίκας Σ.Σ. (2009). Γεωχημεία. Εκδόσεις Ερωδιός, Θεσσαλονίκη.
- Μητρόπουλος Π. (2010). Γεωχημεία. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- Μιχαλοπούλου Χ. (2004). Νομοθεσία για το Περιβάλλον. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Μιχαλοπούλου Χ. & Μουχταρόπουλος Α. (1995). Περιβάλλον-Νομοθεσία. Υπουργείο Π.Ε.ΧΩ.Δ.Ε., ΔΙ.Π.Ε.ΧΩ. Κεντρ. Μακεδονίας. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Μούσας Ξ.Δ. (2005). Δίας, ο «αγαθός γίγας». Εφημερίδα Καθημερινή.
- Πρέκα-Παπαδήμα Π. (2005). Ο αιγινματικός πλανήτης Άρης. Εφημερίδα Καθημερινή.
- Ρέκκας Σ.Α. (2002). Λατομεία-Νομοθεσία. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Σολδάτος Κ. & Κασώλη-Φουρναράκη Α. (1986). Εισαγωγή στη Γεωχημεία. Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη.
- Τσιραμπίδης Α. (1996). Τα Ελληνικά μάρμαρα και άλλα διακοσμητικά πετρώματα. University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Φιλιππίδης Α. (2001). Ορυκτοί πόροι και περιβάλλον. Διεθνές Συν. Προστατευόμενες Φυσικές Περιοχές και Περιβαλλοντική Εκπαίδευση, Λέσβος, Πρακτικά, 449-459.
- Φιλιππίδης Α. (2002). Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωχημεία. Τμήμα Εκδόσεων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη.
- Φιλιππίδης Α. (2005). Εξυγίανση και προστασία των υδάτων της λίμνης Κορώνειας με φυσικό ζεόλιθο. 13^ο Σεμ. Προστασία Περιβάλλοντος, Θεσσαλονίκη, Πρακτικά, 73-84.
- Φιλιππίδης Α. (2007). Ζεόλιθοι Δήμου Τριγώνου του Νομού Έβρου στη βιομηχανική, αγροτική, κτηνοτροφική και περιβαλλοντική τεχνολογία. Ημερίδα, Δυνατότητες Ανάπτυξης στο Βόρειο Έβρο, Πετρωτά, Πρακτικά, 89-107.
- Φιλιππίδης Α. (2009). Διαχείριση αστικών λυμάτων και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων με Ελληνικό Φυσικό Ζεόλιθο. Άρθρο ανασκόπησης. Συνέδριο, Ολοκληρωμένη Διαχείριση

- Υδατικών Πόρων σε Συνθήκες Κλιματικών Αλλαγών, Βόλος, Πρακτικά, Τόμος 2, 829-836.
- Φιλίππιδης Α. & Κασώλη-Φουρναράκη Α. (2000). Δυνατότητα χρήσης Ελληνικών φυσικών ζεολιθών στην ανάπλαση λιγνιτωρυχείων του Λιγνιτικού Κέντρου Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου. 1^ο Συν. Επιτρ. Οικονομικής Γεωλογίας, Ορυκτολογίας & Γεωχημείας, Ελληνική Γεωλογική Εταιρία, Κοζάνη, Πρακτικά, 506-515.
- Φιλίππιδης Α. & Τσιραμπίδης Α. (2012). Ποιοτικά χαρακτηριστικά των Ελληνικών ζεολιθών, περιβαλλοντικές, βιομηχανικές, αγροτικές και υδατικές χρήσεις του Ελληνικού φυσικού ζεολίθου: Ανασκόπηση. Επιστημονική Επετηρίδα, Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ, Ειδικός Τόμος, 101, 125-133.
- Φιλίππιδης Α., Κασώλη-Φουρναράκη Α., Γεωργακόπουλος Α. (1997). Ορυκτολογία, κύρια στοιχεία και ιχνοστοιχεία ιπτάμενων τεφρών των ΑΗΣ του Λιγνιτικού Κέντρου Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου. Δημερίδα, Χρήση της Ιπτάμενης Τέφρας στις Κατασκευές, Κοζάνη, Πρακτικά, Β, 159-168.
- Φιλίππιδης Α., Σιώμος Α., Μπαρμπαγιάννης Ν., Φιλίππιδης Σ. (2007). Αγροτικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές με τη Χρήση Ελληνικού Φυσικού Ζεόλιθου των Πετρωτών Έβρου. Συν. Δράση Jean Monnet, Βέροια, Πρακτικά, 557-569.
- Φιλίππιδης Α., Μουστάκα-Γούνη Μ., Κατσιάπη Μ., Φιλίππιδης Σ. (2011). Απομάκρυνση κυανοβακτηρίων με τη χρήση Ελληνικού Φυσικού Ζεόλιθου. 4^ο Περιβαλλοντικό Συνέδριο Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη, Πρακτικά, 9σ.
- Χαριστός Δ.Α., Γιούρη-Τσοχατζή Α., Μανουσάκης Γ.Ε. (1998). Γενική και Ανόργανη Χημεία Γεωλόγων. Β' Μέρος: Ανόργανη Χημεία. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Ξενόγλωσση

- Albarede F. (2003). Geochemistry, An Introduction. Cambridge University press, Cambridge.
- Allen R.O. (1973). Minor and trace elements in some meteoritic minerals. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 37, 1435-1456.
- Allan R.I., Cameron E.M., Durham, C.C. (1973). Lake Geochemistry. *Geochemical Exploration*, 131-160, IMM, London.
- Andrews J.E., Brimblecombe P., Jickells T.D., Liss P.S. (1996). An Introduction to Environmental Chemistry. Blackwell, Oxford.
- Annersten H., Ericsson T., Filippidis A. (1982). Cation ordering in Ni-Fe olivines. *American Mineralogist*, 69, 1212-1217.
- Annersten H., Adetunji J., Filippidis A. (1984). Cation ordering in Fe-Mn silicate olivines. *American Mineralogist*, 69, 1110-1115.
- Bish D.L. & Ming D.W. (2001). Natural Zeolites: Occurance, Properties, Applications. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, volume 45, Mineralogical Society of America, Virginia, USA.
- Boyle R.W. Hornbrook E.H.W., Allan R.J., Dyck W., Smith A.Y. (1971). Hydrogeochemical methods-application in the Canadian field. *CIM Bulletin*, 64, 60-71.
- Bristow Q. & Jonasson I.R. (1972). Vapour sensing for mineral exploration. *Canadian Mining Journal*, 93(5), 39-85.
- Brooks R.R. (1983). *Biological Methods of Prospecting for Minerals*. John Wiley & Sons, New York.
- Brownlow A.H. (1996). *Geochemistry*. Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- Cameron A.G.W. (1959). Origin and distribution of the elements. Ahrens L.N. (ed), Pergamon Press, Oxford, England
- Charistos D., Godelitsas A., Tsipis C., Sofoniou M., Dwyer J., Manos G., Filippidis A., Triantafyllidis C. (1997). Interaction of natrolite and thomsonite intergrowths with aqueous solutions of different initial pH values at 25^ο C in the presence of KCl: Reaction

- mechanisms. *Applied Geochemistry*, 12, 693-703.
- Christensen P.R. (2003). Morphology and Composition of the Surface of Mars: Mars Odyssey THEMIS Results. *Science*, 300, 2056-2061.
- Clarke L.B. & Sloss L.L. (1992). Trace elements - emissions from coal combustion and gasification. IEA Coal Research, London.
- Clayton R.N., Mayeda T.K., Goswami J.N., Olsen E.J. (1991). Oxygen isotope studies of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, 2317-2337.
- Cocks F.H. (2010). ^3He in permanently shadowed lunar polar surfaces. *Icarus*, 206, 778-779.
- Colella C. & Mumpton F.A. (2000). Natural Zeolites for the Third Millennium. De Frede Editore, Napoli.
- Constantopoulos S.H., Goudevenos J.A., Saratzis N., Langer A.M., Selikoff I.J., Moutsopoulos H.M. (1985). Pleural calcification and restrictive lung function in northwestern Greece-Environmental exposure to mineral fiber as etiology. *Environmental Research*, 38, 319-331.
- Coope J.A. (1971). The Association of Exploration Geochimists. *Geochemical Exploration*, CIM special Volume, 11, 5-6.
- De Vivo B., Belkin H.E., Lima A. (2008). *Environmental Geochemistry, Site Characterization, Data Analysis and Case Histories*. Elsevier, Amsterdam.
- Duke C.V.A. & Williams C.D. (2008). *Chemistry for Environmental and Earth Sciences*. Taylor & Francis, London.
- Engel M.H. & Macko S.A. (1993). *Organic Geochemistry*. Plenum, New York.
- Ericsson T. & Filippidis A. (1986). Cation ordering in the limited solid solution $\text{Fe}_2\text{SiO}_4\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$. *American Mineralogist*, 71, 1502-1509.
- Faure G. (1992). *Principles and Applications of Inorganic Geochemistry*. MacMillan Publ. Co., New York.
- Filippidis A. (1982). Experimental study of the serpentinization of Mg-Fe-Ni olivine in the presence of sulfur. *Canadian Mineralogist*, 20, 567-574.
- Filippidis A. (1985). Formation of awaruite in the system Ni-Fe-Mg-O-H-S and olivine hydration with NaOH solution, an experimental study. *Economic Geology*, 80, 1974-1980.
- Filippidis A. (1991). Further comments on the opaque mineral assemblages in ultramafic rocks-An experimental study. *Ophioliti*, 16, 1-6.
- Filippidis A. (2008). Treatment and recycling of municipal and industrial waste waters using Hellenic Natural Zeolite: A Review. *AQUA*, 3rd International Conference Water Science and Technology with emphasis on water and climate, Athens, Greece, Proceedings, 5p.
- Filippidis A. (2010). Environmental, industrial and agricultural applications of Hellenic Natural Zeolite. *Hellenic Journal of Geosciences*, 45, 91-100.
- Filippidis A. & Georgakopoulos A. (1992). Mineralogical and chemical investigation of fly ash from the Main and Northern lignite fields of Ptolemais, Greece. *Fuel*, 71, 373-376.
- Filippidis A. & Kantiranis N. (2007). Experimental neutralization of lake and stream waters from N. Greece using domestic HEU-type rich natural zeolitic material. *Desalination*, 213, 47-55.
- Filippidis A., Georgakopoulos A., Kassoli-Fournaraki A. (1992). Mineralogical components from ashing at 600°C to 1000°C of the Ptolemais lignite, Greece. *Trends in Mineralogy*, 1, 295-300.
- Filippidis A., Georgakopoulos A., Kassoli-Fournaraki A. (1996a). Mineralogical components of some thermally decomposed lignite and lignite ash from the Ptolemais basin, Greece. *International Journal of Coal Geology*, 30, 303-314.
- Filippidis A., Godelitsas A., Charistos D., Misaelides P., Kassoli-Fournaraki A. (1996b). The chemical behaviour of natural zeolites in aqueous environments: interactions between

- low-silica zeolites and 1M NaCl solutions of different initial pH-values. *Applied Clay Science*, 11, 199-209.
- Filippidis A., Misaelides P., Clouvas A., Godelitsas A., Barbayiannis N., Anousis I. (1997). Mineral, chemical and radiological investigation of a black sand at Touzla Cape, near Thessaloniki, Greece. *Environmental Geochemistry and Health*, 19, 83-88.
- Filippidis A., Apostolidis N., Paragios I., Filippidis S. (2008). Zeolites clean up. *Industrial Minerals*, 487, 68-71.
- Filippidis A., Moustaka-Gouni M., Papastergios G., Katsiapi M., Kantiranis N., Karamitsou V., Vogiatzis D., Filippidis S. (2010). Cyanobacteria removal by Hellenic Natural Zeolite. *Third International Conference on Small Decentralized Water and Wastewater Treatment Plants, Skiathos, Greece, Proceedings*, 383-387.
- Filippidis A., Papastergios G., Kantiranis N., Michailidis K., Chatzikirkou A., Katirtzoglou K. (2012). The species of *Silene Compacta* Fischer as indicator of zinc, iron and copper mineralization. *Chemie der Erde – Geochemistry*, 72, 71-76.
- Finkelman R.B. (1993). Trace and minor elements in coal. In: *Organic geochemistry* (M.H. Engel & S.A. Macko, eds), Plenum, New York, 593-607.
- Finkelman R.B. (1994). Modes of occurrence of potentially hazardous elements in coal, levels of confidence. *Fuel Processing Technology*, 39, 21-34.
- Fleet M.E. (1984). *Short Course in Environmental Geochemistry*. Mineralogical Association of Canada, London.
- Foscolos A.E., Goodarzi F., Koukouzas C.N., Hatziyannis G. (1989). Reconnaissance study of mineral matter and trace elements in Greek lignites. *Chemical Geology*, 76, 107-130.
- Frietsch R. (1972). *Metoder for malmletning*. Almqvist & Wiksell, Uppsala, Sweden.
- Goldschmidt V.M. (1929). The distribution of the chemical elements. *Proc. Roy. Inst. Great Britain*, 26, 73-86.
- Golombek M.P. (2003). The Surface of Mars: Not Just Dust and Rocks. *Science*, 300, 2043-2044.
- Gottardi G. & Galli E. (1985). *Natural zeolites*. Springer-Verlag, Berlin.
- Grambow B. (1994). Borosilicate glass: future research requirements or “what we don’t know”. *Mat. Res. Sci. Bull.* 19(12), 20-23.
- Guthrie G.D. & Mossman B.T. (1993). *Health Effects of Mineral Dusts*. Mineralogical Society of America, *Reviews in Mineralogy*, Vol. 28.
- Handols Taljsten (1983). *Det nya sattet att hejda forurningen*. Duved, Sweden.
- Henderson P. (1982). *Inorganic Geochemistry*. Pergamon Press, Oxford.
- Holzheid A., Sylvester P., O'Neill H.S.C., Rubie D.C., Palme H. (2000). Evidence for a late chondritic veneer in the Earth's mantle from high-pressure partitioning of palladium and platinum. *Nature*, 406, 396-399.
- Jambor J.L. & Blowes D.W. (1994). *Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-wastes*. Mineralogical Association of Canada, Ontario.
- Kabata-Pendias A. & Pendias H. (1992). *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC press, Boca Raton, Florida.
- Kassoli-Fournaraki A., Georgakopoulos A., Michailidis K., Filippidis A. (1993). Morphology, mineralogy and chemistry of the respirable-size (<5µm) fly ash fraction from the Main and Northern lignite fields in Ptolemais, Macedonia, Greece. In: *Current Research in Geology Applied to Ore Deposits* (Fenoll Hach-Ali et al., Eds), La Guioconda, Granada, 727-730.
- Keil K. (1969). Meteorite composition. In: K.G. Wedepohl (ed), *Handbook of Geochemistry*. Springer-Verlag. Vol. 1, 78-115.
- Kelepetsis, A.E., Andrułakis, I., Reeves, R.D. (1985). *Rumex Acetosella* (L) and *Minuartia verna* (L) as geobotanical and biogeochemical indicators for ore deposits in Northern

- Greece. *J. Geoph. Expl.*, 23, 203-212.
- Krauskopf K.B. & Bird D.K. (1995). *Introduction to Geochemistry*. McGraw-Hill, New York.
- Lang A.H. (1970). *Prospecting in Canada*. Geological Survey of Canada, Economic Geology Report No. 7.
- Lemmon M.T. (2004). Atmospheric Imaging Results from Mars Rovers. *Science*, 306, 1753–1756.
- Levinson A.A. (1974). *Introduction to Exploration Geochemistry*. Applied Publ. Ltd, Illinois, USA.
- Lundin R. (2004). Solar Wind-Induced Atmospheric Erosion at Mars: First Results from ASPERA-3 on Mars Express. *Science*, 305, 1933–1936.
- Lunine J.I., Chambers J., Morbidelli A., Leshin L.A. (2003). The origin of water on Mars. *Icarus*, 165, 1–8.
- Lyubetskaya T. & Korenaga J. (2007). Chemical composition of Earth's primitive mantle and its variance: 1. Method and results. *Journal of Geophysical Research*, 112, B03211, 21 p.
- Mason B. & Moore C.B. (1982). *Principles of Geochemistry*. John Wiley & Sons, New York.
- McDonough W.F. (2001). The Composition of the Earth. In: Teisseyre R. and Majewski E. (eds) *Earthquake Thermodynamics and Phase Transformation in the Earth's Interior*. International Geophysics Series, 76, 3-24.
- Mitchell R.S. & Gluskoter H.J. (1976). Mineralogy of ash of some American coals: variations with temperature and source. *Fuel* 55, 90-96.
- Nord A.G., Annersten H., Filippidis A. (1982). The cation distribution in synthetic Mg-Fe-Ni olivines. *American Mineralogist*, 67, 1206-1211.
- Palaszewski B. (2005). Atmospheric Mining in the Outer Solar System. 41st Joint Propulsion Conference and Exhibit cosponsored by AIAA, ASME, SAE, and ASEE, Tucson, Arizona.
- Palme H. & O'Neill H.S.C. (2003). Cosmochemical estimates of mantle composition. In: Carlson R.W., Holland H.D. and Turekian K.K. *Treatise on Geochemistry*, vol. 2, The mantle and the core. 1-38, Elsevier, New York.
- Pond W.G. & Mumpton F.A. (1984). *Zeo-Agriculture: Use of Natural Zeolites in Agriculture and Aquaculture*. International Committee on Natural Zeolites, Westview Press Inc., Colorado, USA.
- Prasad M.N.V., Sajwan K.S., Naidu R. (2006). *Trace Elements in the Environment, Biogeochemistry, Biotechnology and Bioremediation*. Taylor & Francis, London.
- Ringwood A.E. (1975). *Composition and Petrology of the Earth's Mantle*. McGraw-Hill, USA.
- Rose A.W., Hawkes H.E., Webb J.S. (1979). *Geochemistry in Mineral Exploration*. Academic press, London.
- Ross J.E. & Aller L.H. (1976). The chemical composition of the Sun. *Science*, 191, 1223-1229.
- Sahai N. & Schoonen M.A.A. (2006). *Medical Mineralogy and Geochemistry*. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Volume 64, Mineralogical Society of America, Virginia, USA.
- Sand L.B. & Mumpton F.A. (1978). *Natural Zeolites: Occurrence, Properties, Use*. Pergamon Press, Oxford.
- Sarkar D., Datta R., Hannigan R. (2007). *Concepts and Applications in Environmental Geochemistry*. Elsevier Ltd, Amsterdam.
- Saxby, J.D. (1969). Metal-organic chemistry of the geochemical cycle. *Rev. Pure Appl. Chem.*, 19, 131-150.

- Schmidt G. (2007). Estimated mass of iron meteorites contributing to highly siderophile element and Ni inventory of the Earth crust. *Lunar and Planetary Science XXXVIII*, 1214.
- Sengupta M. (1993). *Environmental Impacts of Mining*. Lewis publ., Boca Raton, Florida.
- Sharp Z.D., Shearer C.K., McKeegan K.D., Barnes J.D., Wang Y.Q. (2010). The Chlorine Isotope Composition of the Moon and Implications for an Anhydrous Mantle. *Science*, 329, 1050-1053.
- Slyuta E.N., Abdrakhimov A.M., Galimov E.M. (2007). The Estimation of Helium-3 Probable Reserves in Lunar Regolith. 38th Lunar and Planetary Science Conference. 2175.
- Suess H.E. & Urey H.C. (1956). Abundances of the elements. *Rev. Modern Phys.*, 28, 53-74.
- Swaine J.D. (1990). *Trace Elements in Coal*. Butterworths, London.
- Valkovic V. (1983). *Trace Elements in Coal*. CRC press, Boca Raton, Florida.
- Vanecek M. (1994). *Mineral Deposits of the World*. Elsevier, Amsterdam.
- Warren H.V., Delavault R.E., Fletcher K., Peterson G.R. (1971). The copper, zinc and lead content of trout livers as an aid in the search for favourable areas to prospect. *Geochemical Exploration, Spec. Vol.*, 11, 444-450.
- Wedepohl K.H. (1971). *Geochemistry*. Holt, Rinehart and Winston Inc, New York.
- Willbold M., Elliott T., Moorbath S. (2011). The tungsten isotopic composition of the Earth's mantle before the terminal bombardment. *Nature*, 477, 195-198.