



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ-ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ-ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

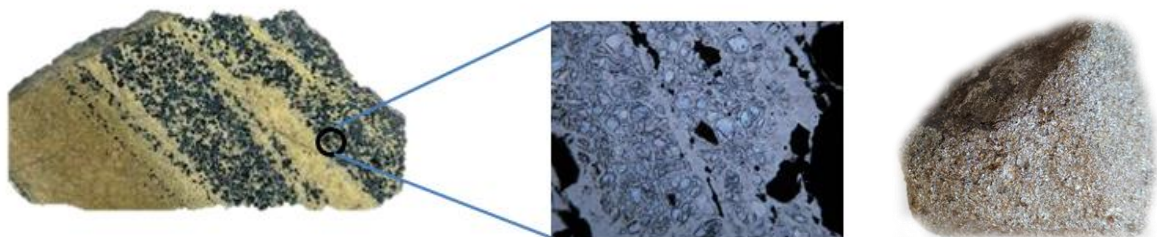


ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Π. ΠΑΤΚΟΣ  
Μηχανικός Μεταλλείων ΕΜΠ

Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΧΡΩΜΙΤΙΤΗ ΚΑΙ  
ΤΟΥ ΣΤΕΙΡΟΥ ΣΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ  
ΑΠΟΔΕΣΜΕΥΣΗΣ, ΤΗΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ  
ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΗΝ  
ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΕΤΟΡΡΑΧΕΣ ΤΟΥ ΟΡΟΥΣ ΒΟΥΡΙΝΟΥ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ 'ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ και ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ'  
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: 'ΟΡΥΚΤΟΙ ΠΟΡΟΙ - ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ'



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ  
2020





ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Π. ΠΑΤΚΟΣ  
Μηχανικός Μεταλλείων ΕΜΠ

Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΧΡΩΜΙΤΙΤΗ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΤΕΙΡΟΥ  
ΣΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΑΠΟΔΕΣΜΕΥΣΗΣ, ΤΗΣ  
ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ  
ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΕΤΟΡΡΑΧΕΣ ΤΟΥ ΟΡΟΥΣ ΒΟΥΡΙΝΟΥ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών  
Σπουδών "Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία", Κατεύθυνση "Ορυκτοί Πόροι –  
Περιβάλλον"

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 09/07/2020

### **Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή**

Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ. Ν. Καντηράνης, Επιβλέπων

Καθηγητής Α.Π.Θ. Α. Φιλιππίδης, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Καθηγητής ΕΜΠ Κ. Τσακαλάκης, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής



© Βασίλειος Π. Πάtkος, Μηχανικός Μεταλλείων, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΧΡΩΜΙΤΙΤΗ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΤΕΙΡΟΥ ΣΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΑΠΟΔΕΣΜΕΥΣΗΣ, ΤΗΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΕΤΟΡΡΑΧΕΣ ΤΟΥ ΟΡΟΥΣ ΒΟΥΡΙΝΟΥ – *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*

© Vasilios P. Patkos, Mining Engineer, 2020

All rights reserved.

THE ROLE OF THE MINERALOGICAL COMPOSITION OF CHROMITITE AND GANGUE IN THE SELECTION OF THE APPROPRIATE RELEASE METHODOLOGY, THE FEEDING GRANULOMETRY AND THE METHODS OF MINERAL ENRICHMENT FROM THE AREA OF AETORRACHES OF MOUNT VOURINOS – *Master Thesis*

#### Citation:

Πάtkος Π.Β., 2020. Ο ρόλος της ορυκτολογικής σύστασης του χρωμιτίτη και του στείρου στην επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας αποδέσμευσης, της κοκκομετρίας τροφοδοσίας και των μεθόδων εμπλουτισμού μεταλλεύματος από την περιοχή Αετορράχες του όρους Βούρινου. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., 162 σελ.

Patkos P.V., 2020. – The role of the mineralogical composition of chromitite and gangue in the selection of the appropriate release methodology, the feeding granulometry and the methods of mineral enrichment from the area of Aetorraches of mount Vourinos. Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 162 pp.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

*Εικόνα Εξωφύλλου: Χρωμιτίτης από τις Αετορράχες & Κράμα σιδηροχρωμίου από το εργοστάσιο των ΕΛΣΙ (1989-1990)*





«...οί τεχνῖται παραλαμβάντες τὸν ἀληγεσμένον λίθον πρὸς τὴν ὄλην ἄγουσι συντέλειαν· ἐπὶ γὰρ πλατείας σανίδος μικρὸν ἐγκεκλιμένης τρίβουσι τὴν κατειργασμένην μάρμαρον ὕδωρ ἐπιχέοντες· εἶτα τὸ μὲν γεῶδες αὐτῆς ἐκτηκόμενον διὰ τῶν ὑγρῶν καταρρέει κατὰ τὴν τῆς σανίδος ἔγκλισιν, τὸ δὲ χρυσίον ἔχον ἐπὶ τοῦ ξύλου παραμένει διὰ τὸ βάρος. πολλάκις δὲ τοῦτο ποιοῦντες, ....., μέχρι ἂν ὅτου καθαρὸν γένηται τὸ ψῆγμα τοῦ χρυσοῦ.»

«τὸν δὲ χρυσὸν καθαρὸν λαμβάνουσιν ὀλίγης ἀπουσίας γεγενημένης. ἢ μὲν οὖν ἐργασία τοῦ χρυσοῦ περὶ τὰς ἐσχατιὰς τῆς Αἰγύπτου γινομένη μετὰ τοσοῦτων καὶ τηλικούτων πόνων συντελεῖται.»

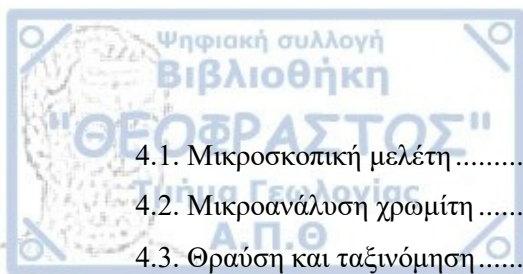
(επεξεργασία/εμπλουτισμός μεταλλεύματος χρυσοῦ ἀπὸ Αἰγυπτίους)

Διόδωρος Σικελιώτης (80 π.Χ. – 20 π.Χ.)

Βύβλος Γ΄ [3,14]



ΠΡΟΛΟΓΟΣ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Ο ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ...	7
1.1. Γενικά	7
1.2. Αποδέσμευση	12
1.3. Προσδιορισμός και μελέτη του βαθμού αποδέσμευσης	14
1.4. Κατάτμηση	17
1.5. Ο ρόλος της κατάτμησης στην αντιμετώπιση των θεμάτων του εμπλουτισμού και στην οικονομικότητα της εκμετάλλευσης	20
1.6. Ταξινόμηση	24
1.7. Συναρτήσεις κατανομής τεμαχίων – Η κατανομή Gates-Gaudin-Schuhmann	27
1.8. Διεργασίες εμπλουτισμού – διαχωρισμού ορυκτών	28
1.9. Ειδικό βάρος	29
1.9.1. Μέθοδος βαρέων διαμέσων ή ενδιαμέσου ειδικού βάρους	29
1.9.2. Μηχανικές βαρυτομετρικές μέθοδοι εμπλουτισμού	31
1.10. Μαγνητική επιδεκτικότητα – μαγνητικός διαχωρισμός	33
1.11. Επίπλευση	36
1.12. Άλλες μέθοδοι εμπλουτισμού	38
1.12.1. Οπτικός διαχωρισμός	38
1.12.2. Υδροαυτοκαθαρισμός - Έκπλυση	38
1.13. Συμπληρωματικές διεργασίες στον εμπλουτισμό	40
1.14. Ορυκτουργικά ισοζύγια – μεθοδολογία επεξεργασίας δεδομένων	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΒΟΥΡΙΝΟΥ	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ	50
3.1. Γενικά για το χρωμίτη	50
3.2. Δειγματοληψία	53
3.2. Μικροσκοπική μελέτη	54
3.3. Θραύση και ταξινόμηση	56
3.4. Βαρυτομετρικός διαχωρισμός σε παλλόμενη τράπεζα	58
3.5. Μαγνητικός διαχωρισμός-εμπλουτισμός	59
3.6. Ορυκτολογική μελέτη	61
3.7. Χημικές αναλύσεις	63
3.8. Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM-EDS)	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	67



4.1. Μικροσκοπική μελέτη.....	67
4.2. Μικροανάλυση χρωμίτη.....	73
4.3. Θραύση και ταξινόμηση.....	78
4.4 Προϊόντα θραύσης και ταξινόμησης.....	80
4.4.1 Ορυκτολογική ανάλυση.....	80
4.4.2 Παρατήρηση σε στερεοσκόπιο.....	85
4.4.3. Χημική σύσταση.....	88
Κύρια στοιχεία.....	88
Ιχνοστοιχεία.....	95
Πλατινοειδή.....	98
Συσχέτιση χημικής σύστασης.....	102
4.5  Εμπλουτισμός.....	104
4.5.1 Βαρυτομετρικός διαχωρισμός με παλλόμενη τράπεζα.....	104
Κύρια στοιχεία.....	105
4.5.2 Μαγνητικός διαχωρισμός-εμπλουτισμός.....	113
Ορυκτολογική ανάλυση.....	119
Χημική σύσταση.....	121
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	125
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	133
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΠΕΡΙΘΛΑΣΙΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΚΤΙΝΩΝ-Χ.....	141





## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διατριβή ειδίκευσης εκπονήθηκε στον Τομέα Ορυκτολογίας–Πετρολογίας–Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του ΑΠΘ και έχει ως σκοπό την διερεύνηση της δυνατότητας εμπλουτισμού του μεταλλεύματος χρωμιτίτη, που εμφανίζεται στις δυτικές πλαγιές του Νότιου Βούρινου στα όρια των ΠΕ Κοζάνης – Γρεβενών και συγκεκριμένα από τη θέση «Αετορράχες», σε απόσταση περίπου 2 χλμ. από την επαρχιακή οδό Χρωμίου Κοζάνης – Ποντινής Γρεβενών.

Στην περιοχή αυτή, διενεργήθηκε υπόγεια εκμετάλλευση κατά την δεκαετία του 1980, από την εταιρεία «ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΣΙΔΗΡΟΚΡΑΜΑΤΑ ΑΕ», στα πλαίσια ενός ευρύτερου προγράμματος ανάπτυξης και εκμετάλλευσης των χρωμιτικών κοιτασμάτων, τόσο του Βόρειου Βούρινου (Ριζό, Κουρσούμια, Βοϊδόλακκας, Κερασίτσα κλπ), όσο και του Νότιου Βούρινου (Μουτσάρα, Υπερνότιος Τομέας κλπ). Για τον λόγο αυτό, κατασκευάστηκε τότε και το νέο εργοστάσιο εμπλουτισμού στο Χρόμιο Κοζάνης με σκοπό να εξυπηρετήσει τα κοιτάσματα του Βόρειου Βούρινου, χρησιμοποιώντας κυρίως βαρυτομετρικές μεθόδους διαχωρισμού.

Ήδη είχε γίνει αντιληπτό από τα στελέχη της εκμεταλλεύτριας εταιρείας, η ιδιαιτερότητα που παρουσιάζουν οι ανεξάρτητες χρωμιτοφόρες εμφανίσεις, στην ορυκτολογική τους σύσταση, στην κοκκομετρία, στην εξαλλοίωση, στον τεκτονισμό κλπ και κατεβλήθησαν προσπάθειες στην εξεύρεση καταλλήλων λύσεων (πχ μαγνητικός εμπλουτισμός, δοκιμές επίπλευσης), πάνω στις οποίες εκπονήθηκαν διδακτορικές διατριβές και ερευνητικά προγράμματα. Δυστυχώς όμως, η αναστολή των εργασιών που έλαβε χώρα το 1991 λόγω οικονομικών δυσχερειών, ως αποτέλεσμα και της παγκόσμιας μεταλλευτικής κρίσης της δεκαετίας του 1980, δεν επέτρεψε την ολοκλήρωση του προγράμματος ανάπτυξης και κυρίως τη διερεύνηση και επίλυση των προβλημάτων εμπλουτισμού που ανέκυπταν κατά την τροφοδοσία του εργοστασίου με υλικό Run of Mine (ROM), δηλαδή υλικό ως έχει και όπως εξορύσσεται χωρίς οποιαδήποτε μηχανική προπαρασκευή ή άλλη κατεργασία, προερχόμενο από τα επιμέρους εργοτάξια που προαναφέρθηκαν. Η οριστική διακοπή της μεταλλευτικής δραστηριότητας, ανέστειλε και τις προσπάθειες αυτές, οι οποίες παρέμειναν σε ερευνητικό και εργαστηριακό επίπεδο.

Σήμερα, έτσι όπως έχει διαμορφωθεί η παγκόσμια αγορά των ορυκτών πρώτων υλών, ανέκυψε η δυνατότητα εκμετάλλευσης των χρωμιτικών κοιτασμάτων του Βούρινου και ήδη

γίνονται σοβαρές προσπάθειες και ενέργειες για την επανέναρξη των εργασιών εκμετάλλευσης, από νέο φορέα, εκπονώντας σειρά μελετών για την έρευνα και τον υπολογισμό των εναπομεινάντων αποθεμάτων, τον προσδιορισμό της ποιότητάς τους κλπ.

Έτσι λοιπόν, η εργασία αυτή δεν στοχεύει μόνο στην διερεύνηση των συνθηκών εμπλουτισμού του κοιτάσματος που εμφανίζεται στη θέση «Αετορράχες», λαμβάνοντας υπόψη και την ορυκτολογική σύσταση του χρωμιτίτη, αλλά έχει και ως απώτερο στόχο να αποτελέσει και τη βάση για την πλήρη διερεύνηση των προβλημάτων εμπλουτισμού σε όλο το Βούρινο.

Στο πρώτο κεφάλαιο της διατριβής γίνεται αναφορά στις βασικές έννοιες του εμπλουτισμού και στην αναγκαιότητά του, προκειμένου το εξορυσσόμενο ορυκτό να καταστεί εμπορεύσιμο και ανταγωνιστικό στην αγορά. Περιγράφονται όλες εκείνες οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται, ο μηχανολογικός εξοπλισμός που απαιτείται, τα κριτήρια επιλογής των μεθόδων εμπλουτισμού κ.ά.

Το δεύτερο κεφάλαιο περιλαμβάνει τις γενικές γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στο Βούρινο, γίνεται αναφορά στα επιμέρους εργοτάξια στα οποία διενεργήθηκε εκμετάλλευση και περιγράφεται η υπάρχουσα μεταλλευτική και λατομική δραστηριότητα.

Το τρίτο κεφάλαιο, περιλαμβάνει τη δειγματοληψία που διενεργήθηκε το Νοέμβριο του 2015 και τις εργασίες που πραγματοποιήθηκαν στα εργαστήρια του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. και στο Εργαστήριο Εμπλουτισμού των Μεταλλευμάτων του Τομέα Μεταλλουργίας και Τεχνολογίας Υλικών της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών του ΕΜΠ.

Το τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα των εργαστηριακών ερευνών και τα αντίστοιχα σχόλια και συμπεράσματα, που προέκυψαν.

Από τα δείγματα που συλλέχθηκαν κατασκευάστηκαν λεπτές στιλπνές τομές για την εξέταση των εξεταζόμενων υλικών σε μεταλλογραφικό και πετρογραφικό μικροσκόπιο. Ακολούθησε η θραύση και ταξινόμηση των εξεταζόμενων υλικών σε εργαστηριακά κόσκινα βρογχίδας «1,5», «1,0», «0,5», «0,3» & «0,125» mm. Σε κάθε κοκκομετρικό κλάσμα έγινε περαιτέρω εξέταση της ορυκτολογικής σύστασης με την μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτίνων-X (XRD) και της χημικής σύστασης με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας ακτίνων-X φθορισμού (XRF).

Επιπλέον, αντιπροσωπευτικό δείγμα από κάθε κοκκομετρικό κλάσμα, μετά από πλύση και ξήρανση εξετάστηκε σε στερεοσκόπιο προκειμένου να εκτιμηθεί ο βαθμός αποδέσμευσης του μεταλλεύματος.

Σε επιλεγμένα κοκκομετρικά κλάσματα, κυρίως λόγω του βαθμού αποδέσμευσης,

διενεργήθηκε ξηρός μαγνητικός διαχωρισμός σε εντάσεις 0,3 έως 1,5 A, στον εργαστηριακό μαγνητικό διαχωριστή τύπου FRANTZ MODEL L-1 του τομέα Ορυκτολογίας–Πετρολογίας–Κοιτασματολογίας, ενώ δείγματα εστάλησαν στο εργαστήριο Εμπλουτισμού των Μεταλλευμάτων του Τομέα Μεταλλουργίας και Τεχνολογίας Υλικών της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών του ΕΜΠ, προκειμένου να γίνουν δοκιμές σε εργαστηριακή παλλόμενη τράπεζα (*vibrating table*). Στα προϊόντα διαχωρισμού των παραπάνω μεθόδων πραγματοποιήθηκαν ορυκτολογικές αναλύσεις με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτίνων-Χ (XRD) και χημικές αναλύσεις με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας ακτίνων-Χ φθορισμού (XRF).

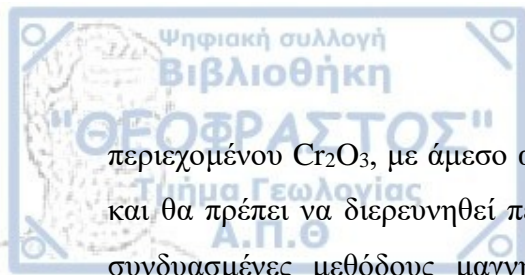
Ήδη, από την πρώτη μακροσκοπική εικόνα που δώσανε τα δείγματα κατά την κοσκίνηση τους μετά την πρωτογενή θραύση, γίνεται φανερό ότι ικανοποιητική αποδέσμευση του μεταλλεύματος έχουμε στα κοκκομετρικά κλάσματα «-0,5 έως +0,3» και «-0,3 έως +0,125» mm, ενώ παρατηρήθηκε αυξημένο ποσοστό (περίπου 20% κ.β.) λεπτομερούς προϊόντος (-0,125 mm) κατά τη θραύση, μέσης περιεκτικότητας 20% κ.β. σε Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Τα αποτελέσματα του ξηρού μαγνητικού διαχωρισμού, παρουσίασαν ενδιαφέρον, διότι φάνηκε πως σημαντική ποσότητα υλικού σε ένταση 0,75 A (περίπου 40% κ.β.), μπορεί να απομακρυνθεί έχοντας περιεκτικότητα σε Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> περίπου 1,5% κ.β., δημιουργώντας έτσι ένα προσυμπύκνωμα χρωμίτη με έως και 38 % κ.β. σε Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ικανό να τροφοδοτήσει δονούμενες τράπεζες ή άλλη μέθοδο βαρυτομετρικού διαχωρισμού.

Οι δοκιμές σε δονούμενη τράπεζα έδειξαν ενδιαφέροντα αποτελέσματα στην ικανότητα διαχωρισμού του χρωμίτη αφού παράχθηκε συμπύκνωμα υψηλής ποιότητας (>54% κ.β. σε Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) με ικανοποιητική ανάκτηση στα επιμέρους κλάσματα (περίπου 80% κ.β.), ενώ στα ενδιάμεσα και στο απόρριμμα, θα μπορούσε να γίνει επαναδιάταξη των διαμερισμάτων της τράπεζας, έτσι ώστε το απόρριμμα να έχει περιεκτικότητα σε Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> μικρότερη του 5% κ.β. και το ενδιάμεσο να ανακυκλωθεί προς λειοτρίβιση και μαζί με το κλάσμα «-0,125 mm» να οδηγηθούν σε άλλη μέθοδο διαχωρισμού (π.χ. υγρός μαγνητικός διαχωρισμός, MGS κλπ).

Η απώλεια πύρωσης των προϊόντων της τράπεζας, παρουσιάζει σαφέστατη αυξητική τάση (από 0,9 σε 13,61% κ.β.) από το συμπύκνωμα προς το απόρριμμα, ενώ στην αρχική τροφοδοσία και σε όλα τα κοκκομετρικά κλάσματα, η απώλεια πύρωσης παραμένει σχεδόν σταθερή (από 9,8 έως 12% κ.β.), γεγονός που υποδηλώνει την επιτυχία του διαχωρισμού.

Παρόλη την θετική ανταπόκριση των δειγμάτων στις δοκιμές εμπλουτισμού, παραμένει το ζήτημα του εμπλουτισμού των λεπτομερών υλικών, τα οποία ως ποσότητα (περίπου 20% κ.β.) και περιεκτικότητα (περίπου 20% κ.β. σε Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), μειώνουν τη συνολική ανάκτηση του



περιεχομένου  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , με άμεσο αντίκτυπο στην οικονομικότητα της εκμετάλλευσης. Γι' αυτό και θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω η εξέταση της εμπλουτισιμότητας του χρωμίτη με συνδυασμένες μεθόδους μαγνητικού διαχωρισμού, βαρυτομετρικού διαχωρισμού ή και επίπλευσης.



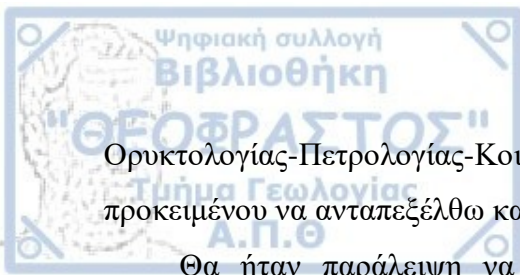


Η εκπόνηση της παρούσας διατριβής, δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την βοήθεια και συμβολή προσώπων που συνετέλεσαν καθοριστικά στην επιλογή του θέματος, στην καθοδήγηση και επίβλεψη και γενικότερα στην ολοκλήρωσή της.

Πάνω σ' αυτό, θα οφείλω ιδιαίτερα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. κ. Νικόλαο Καντηράνη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου τη διατριβή αυτή, τις υποδείξεις και τις συμβουλές του κατά τη διάρκεια, όχι μόνο εκπόνησης της διατριβής, αλλά και σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στο Τμήμα Γεωλογίας του Α.Π.Θ. Παράλληλα, καθοριστική ήταν και η συμβολή του κ. Ανέστη Φιλιππίδη Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ., ο οποίος πρόθυμα και με ευχαρίστηση συμμετείχε στην υποστήριξη της διατριβής, οι υποδείξεις και οι συμβουλές του οποίου αποδείχθηκαν παραπάνω από πολύτιμες, τον οποίο και ευχαριστώ θερμά.

Στο σημείο αυτό πρέπει ιδιαίτερα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π. κ. Κωνσταντίνο Τσακαλάκη, ο οποίος ως Επιστημονικός Συνεργάτης ακόμη, κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στο Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων -Μεταλλουργών του ΕΜΠ, ήταν ο πρώτος που μου δίδαξε, μαζί με τον αείμνηστο Ομότιμο Καθηγητή του ΕΜΠ κ. Αντώνιο Φραγκίσκο, το γνωστικό αντικείμενο του εμπλουτισμού και της μηχανικής προπαρασκευής των μεταλλευμάτων & βιομηχανικών ορυκτών. Η προθυμία του κ. Τσακαλάκη να συμμετάσχει στην τριμελή επιτροπή και η βοήθεια που μου παρείχε στις δοκιμές στο εργαστήριο Εμπλουτισμού των Μεταλλευμάτων του ΕΜΠ, ήταν καθοριστικές και συνέβαλλαν σε μεγάλο βαθμό στην εκπόνηση αυτής της διατριβής.

Επίσης, δεν θα μπορούσα να μην αναφέρω και ευχαριστήσω όλους εκείνους που συνέβαλαν με τον τρόπο τους στην ολοκλήρωση της διατριβής και ειδικότερα την κ. Λαμπρινή Παπαδοπούλου, Αν. Καθηγήτρια του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ., για τη βοήθεια της πάνω στις χημικές αναλύσεις, τον κ. Ηλία Σαμμά, Δρ Μηχανικό Μεταλλείων ΕΜΠ, για τη βοήθειά του στις δοκιμές με την παλλόμενη τράπεζα στο εργαστήριο Εμπλουτισμού των Μεταλλευμάτων του ΕΜΠ και φυσικά όλο το επιστημονικό και τεχνικό προσωπικό του Τομέα



Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας για τη βοήθεια και κατανόηση που έδειξε, προκειμένου να ανταπεξέλθω και στις επαγγελματικές και εκπαιδευτικές μου υποχρεώσεις.

Θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσω τον κ. Αλέξανδρο Βέργο, Μηχανικό Μεταλλείων, Γενικό Διευθυντή των ΕΛ.ΣΙ., με τον οποίο είχα την ευκαιρία να συνεργαστώ στην πρώτη μου απασχόληση ως Μηχανικός Μεταλλείων στο Μεταλλευτικό Συγκρότημα Σκούμτσας και να αποκομίσω πολύτιμες γνώσεις και εμπειρίες γύρω από τα θέματα εκμετάλλευσης και εμπλουτισμού του χρωμίτη και φυσικά τον καλό φίλο Χάρη Δύντσικο, εργοδηγό του εργοστασίου εμπλουτισμού της Σκούμτσας για την πολύ χρήσιμη συνεργασία και τις συμβουλές του πάνω σε πρακτικά θέματα λειτουργίας του εργοστασίου εμπλουτισμού.

Δεν θα μπορούσα επίσης να μην αναφέρω τον αείμνηστο Νίκο Κλήμαντο, εργοδηγό υπογείων του μεταλλείου Σκούμτσας-Ξηρολιβάδου για την ευκαιρία που είχα να αντιμετωπίσω μαζί του όλα τα προβλήματα εκμετάλλευσης του χρωμίτη και τις ατελείωτες συζητήσεις που είχαμε, στη μνήμη του οποίου αφιερώνω τη διατριβή αυτή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρεία «ΜΕΤΑΛΛΕΙΑ ΓΡΕΒΕΝΩΝ-ΚΟΖΑΝΗΣ» ΑΕ, για την στήριξη της εργασίας αυτής και για τη βοήθεια που προσέφερε.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Ο ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ

## 1.1. Γενικά

Κάθε ορυκτή πρώτη ύλη, ανεξάρτητα από την περιεκτικότητα σε χρήσιμο συστατικό, σε εξαιρετικά σπάνιες περιπτώσεις μπορεί να αποτελέσει εμπορεύσιμο και άμεσα αξιοποιήσιμο προϊόν, χωρίς να υποστεί σε κάποια επεξεργασία αμέσως μετά την εξόρυξή του. Ειδικότερα, η βαθμιαία, κατά τον περασμένο αιώνα, εξάντληση πλούσιων κοιτασμάτων μεταλλικών και βιομηχανικών ορυκτών, σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις της αγοράς, που είναι ολοένα και αυστηρότερες, δημιούργησαν και κατέστησαν απαραίτητη την μεσολάβηση μιας ενδιάμεσης διεργασίας, μεταξύ εξόρυξης και διάθεσης στην αγορά, η οποία αποκαλείται εμπλουτισμός μεταλλευμάτων & ορυκτών (*mineral/ore enrichment*). Η έννοια αυτή δεν αφορά στην ευρύτερη σημασία του όρου «εμπλουτισμός» δηλαδή την προσθήκη χρήσιμου υλικού σε ένα υπάρχον σύστημα (π.χ. εμπλουτισμός υδροφόρου ορίζοντα), αλλά με την αφαίρεση του μη χρήσιμου ή στείρου συστατικού, με σκοπό το εναπομένον υλικό να έχει αυξημένη περιεκτικότητα στο χρήσιμο συστατικό και μειωμένη στο μη χρήσιμο, ή στείρο, ή ανεπιθύμητο στοιχείο και να ανταποκρίνεται στις ελάχιστες απαιτήσεις της αγοράς.

Αυτό επιτυγχάνεται, στην περίπτωση πάντα των κοιτασμάτων μεταλλικών και βιομηχανικών ορυκτών, εφαρμόζοντας μεθόδους διαχωρισμού που βασίζονται πάνω στις μηχανικές και στις φυσικές ιδιότητες των επιμέρους ορυκτών που αποτελούν το μέταλλευμα ή και το βιομηχανικό ορυκτό με την ευρεία έννοια.

Γίνεται λοιπόν άμεσα αντιληπτό, ότι το εάν είναι «εμπορεύσιμο» ένα μέταλλευμα ή βιομηχανικό ορυκτό δεν εξαρτάται μόνο από την περιεκτικότητα σε χρήσιμο συστατικό της πρώτης ύλης και τα λοιπά στοιχεία της γεωλογικής και κοιτασματολογικής έρευνας, αλλά και από το κατά πόσο το μέταλλευμα επιδέχεται εμπλουτισμό, πάντα μέσα σε οικονομικά πλαίσια, γιατί σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει πλέον το ενδεχόμενο το κοίτασμα να μην μπορεί να θεωρηθεί εκμεταλλεύσιμο.

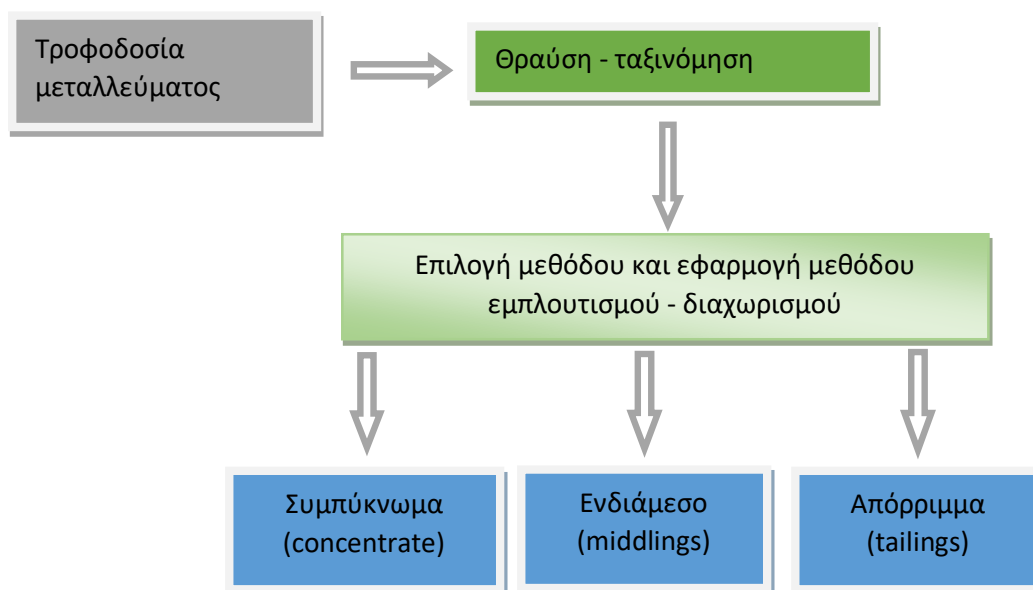
Έτσι, ο εμπλουτισμός ή «ορυκτουργία (mineralurgy)», όπως τείνει να καθιερωθεί (Φραγκίσκος, 1995) ορίζεται ως «η μεταλλευτική τεχνολογία με την οποία επιτυγχάνεται η μετατροπή ενός φτωχού μεταλλεύματος ή ακάθαρτου βιομηχανικού ορυκτού σε πλουσιότερο ή καθαρότερο αντίστοιχα, χωρίς να μεταβληθεί η χημική σύστασή του», ενώ σύμφωνα με τον Gaudin (Φραγκίσκος 1995) «Εμπλουτισμός μεταλλευμάτων ή ορυκτών θεωρείται η επεξεργασία των ακατέργαστων μεταλλευτικών υλών από την οποία παράγονται "εμπορεύσιμα προϊόντα" και "στείρα" με μεθόδους που δεν αλλοιώνουν το χημικό τους χαρακτήρα».

Η υλοποίηση της διαδικασίας εμπλουτισμού, προϋποθέτει, σε γενικές γραμμές, τα παρακάτω στάδια:

1. Πλήρη γνώση των ορυκτολογικών και κοιτασματολογικών χαρακτηριστικών του κοιτάσματος που πρόκειται να εκμεταλλευτεί.
2. Θραύση και ταξινόμηση του εξορυγμένου υλικού σε κατάλληλα κοκκομετρικά κλάσματα.
3. Εφαρμογή της κατάλληλης μεθόδου εμπλουτισμού.
4. Διάθεση των προϊόντων στην αγορά.
5. Απόθεση των στείρων.

Τα παραπάνω στάδια περιλαμβάνουν αρκετές επιμέρους φάσεις και διαδικασίες που είναι αποτέλεσμα έρευνας σε εργαστηριακή και ημι-βιομηχανική κλίμακα.

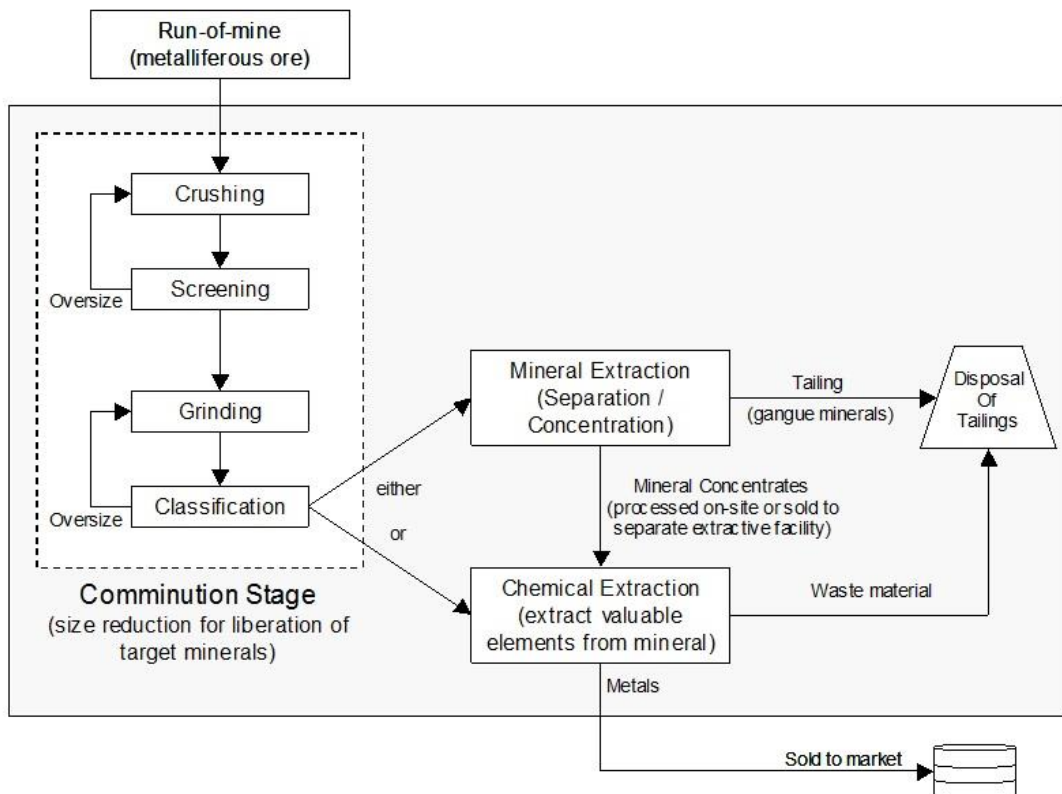
Μια γενική διάταξη της διαδικασίας του εμπλουτισμού φαίνεται στην Εικ. 1, ενώ ένα διάγραμμα ροής σε πραγματικές συνθήκες εκμετάλλευσης δίνεται στην Εικ. 2.



**Εικόνα 1.** Απλοποιημένο διάγραμμα ροής διαδικασίας εμπλουτισμού.

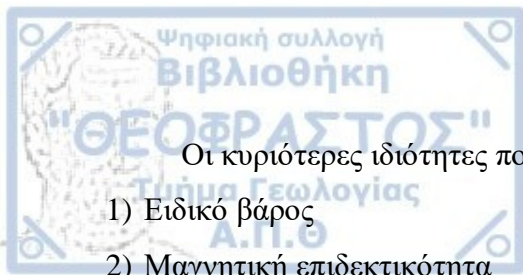
Γενικότερα, ο στόχος του εμπλουτισμού είναι:

- Η θραύση του μεταλλεύματος ή του βιομηχανικού ορυκτού και η ταξινόμησή του σε κοκκομετρικά κλάσματα κατάλληλα για μεταλλουργική κατεργασία ή άλλη βιομηχανική εφαρμογή.
- Η απομάκρυνση ανεπιθύμητων στοιχείων που μειώνουν την οικονομικότητα του προϊόντος ή/και επιδρούν αρνητικά στη μεταλλουργική κατεργασία.
- Η εκμετάλλευση μεταλλευμάτων με 2 ή και περισσότερα χρήσιμα στοιχεία, με εκλεκτικό διαχωρισμό.
- Η αξιοποίηση κοιτασμάτων με χαμηλή περιεκτικότητα, που σε άλλες συνθήκες θα ήταν ασύμφορη η εκμετάλλευσή τους.
- Η μείωση του μεταφορικού κόστους του παραγομένου προϊόντος.



**Εικόνα 2.** Τυπικό διάγραμμα ροής επεξεργασίας και εμπλουτισμού μεταλλεύματος  
Από: <http://met-solvelabs.com/> (ημ. πρόσβ.19/05/2019 )

Η επίτευξη όλων των παραπάνω προϋποθέτει καταρχήν καλή γνώση του κοιτάσματος, των συνθηκών μεταλλογένεσης, της συνύπαρξης των ορυκτών (χρήσιμα ορυκτά και σύνδρομα), της κοκκομετρίας κ.ά., προκειμένου να επιλεχθούν οι κατάλληλες φυσικομηχανικές ιδιότητες βάσει των οποίων θα λάβει χώρα ο διαχωρισμός των ορυκτών.



Οι κυριότερες ιδιότητες που εκμεταλλεύονται οι μέθοδοι εμπλουτισμού είναι :

- 1) Ειδικό βάρος
- 2) Μαγνητική επιδεκτικότητα
- 3) Ηλεκτρική αγωγιμότητα
- 4) Χρώμα
- 5) Επιφανειακή ενέργεια (φυσικοχημεία επιφανειών)

Δευτερεύουσα σημασία έχουν οι παρακάτω ιδιότητες που χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις:

- Λάμψη
- Σχήμα
- Σκληρότητα
- Ολισθηρότητα
- Ευθραυστότητα κ.ά.

Ο χώρος που πραγματοποιείται η διαδικασία του εμπλουτισμού, πάντα και σε όλες τις περιπτώσεις, είναι δίπλα στο χώρο που διενεργείται η εξόρυξη, ενώ η αρχική τροφοδοσία του εμπλουτισμού είναι το σημείο συγκέντρωσης ή εκφόρτωσης των προϊόντων της εξόρυξης. Στην πράξη πρόκειται για ένα εργοστάσιο, πλήρως διακεκριμένο από το τη λειτουργία του μεταλλείου και προϋποθέτει:

- Επαρκή έκταση για την εγκατάσταση του εξοπλισμού.
- Όλο το βοηθητικό εξοπλισμό (σιλό αποθήκευσης, τροφοδότες, αντλίες, αεροσυμπιεστές, σωληνώσεις, εργαστήριο ποιοτικού ελέγχου, υποσταθμοί Η/Ε κ.ά.)
- Χώρο για την απόθεση των στείρων
- Εργαστήριο ποιοτικού ελέγχου

Ένα επίσης σημαντικό πλεονέκτημα της διαδικασίας του εμπλουτισμού είναι το γεγονός ότι η παρουσία των στείρων προϊόντων αποτελεί μια καλή επιλογή για εσωτερική απόθεση στα κενά μέτωπα που δημιουργούνται μετά την εκμετάλλευση, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για αδρομερές υλικό.

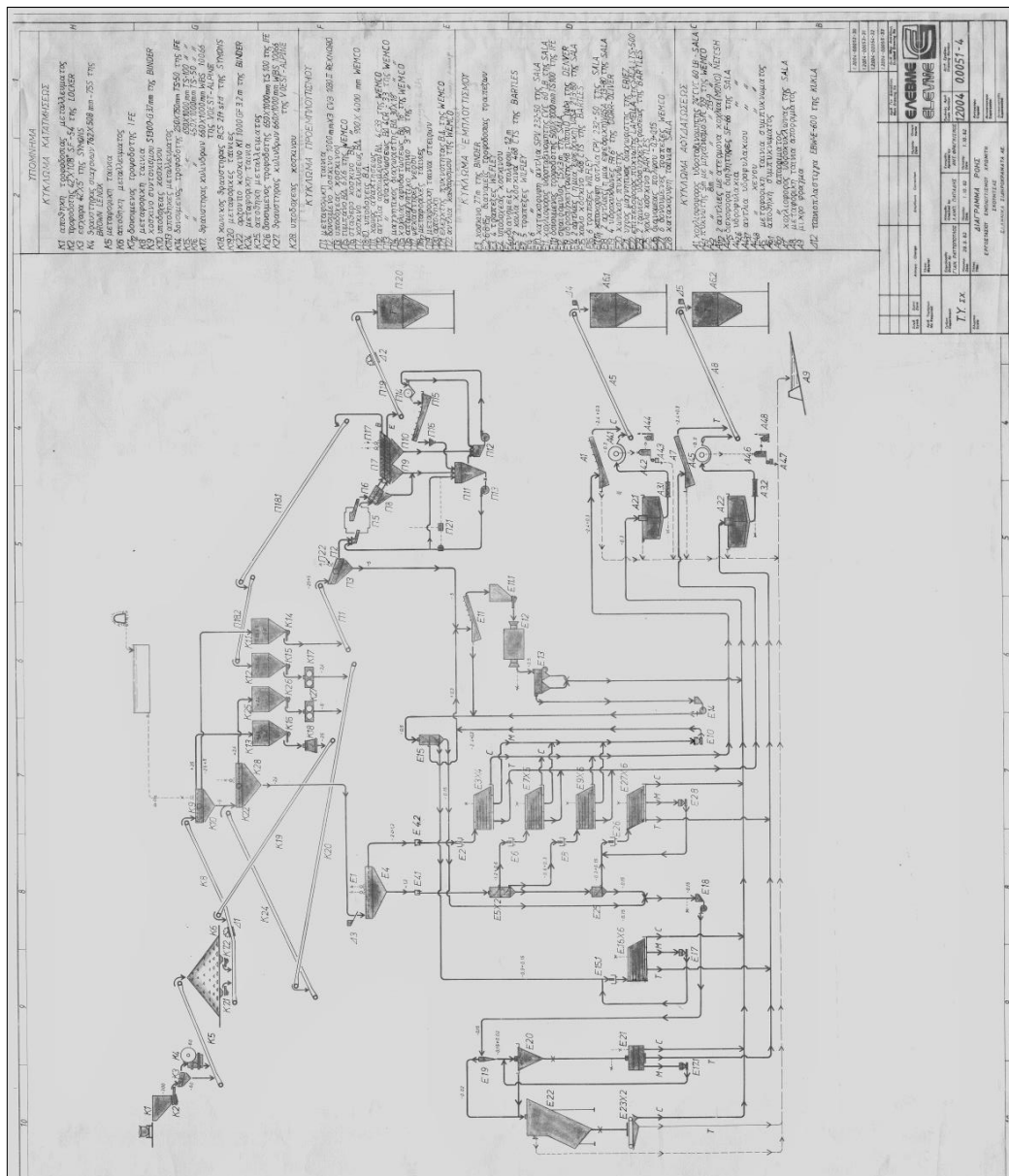
Στα μειονεκτήματα της διαδικασίας του εμπλουτισμού, όπως είναι φανερό, συμπεριλαμβάνονται:

- Η απώλεια σε χρήσιμο συστατικό.
- Το κόστος ανέγερσης και λειτουργίας του εργοστασίου εμπλουτισμού
- Ύπαρξη καταλλήλων εκτάσεων για την απόθεση των στείρων
- Επιπρόσθετες διαδικασίες αδειοδότησης και περιβαλλοντικών εγκρίσεων.



Πριν όμως από την εφαρμογή της μεθόδου εμπλουτισμού, είναι απαραίτητη η επεξεργασία του μεταλλεύματος. Η επεξεργασία αυτή που είναι γνωστή και ως μηχανική προπαρασκευή βιομηχανικών ορυκτών και μεταλλευμάτων προετοιμάζει το μέταλλευμα, κυρίως από πλευράς κοκκομετρικής διαβάθμισης, έτσι ώστε αυτό να οδηγηθεί στην διαδικασία του διαχωρισμού. Ακόμη και στις περιπτώσεις όπου δεν απαιτείται διαχωρισμός (αδρανή υλικά, βιομηχανικά ορυκτά, ενεργειακά ορυκτά κλπ) είναι απαραίτητη αυτή η διαδικασία για να παραχθεί εμπορεύσιμο προϊόν.

Στην Εικ. 3 φαίνεται το διάγραμμα ροής του εργοστασίου εμπλουτισμού χρωμίτη στο Μεταλλευτικό Συγκρότημα Σκούμτσας που κατασκευάστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Διακρίνονται οι επιμέρους φάσεις και τα στάδια που αναφέρθηκαν πιο πάνω.



Εικόνα 3. Διάγραμμα ροής εργοστασίου εμπλουτισμού Σκούμτσας (Αρχείο ΕΛΣΙ, 1982).

## 1.2. Αποδέσμευση

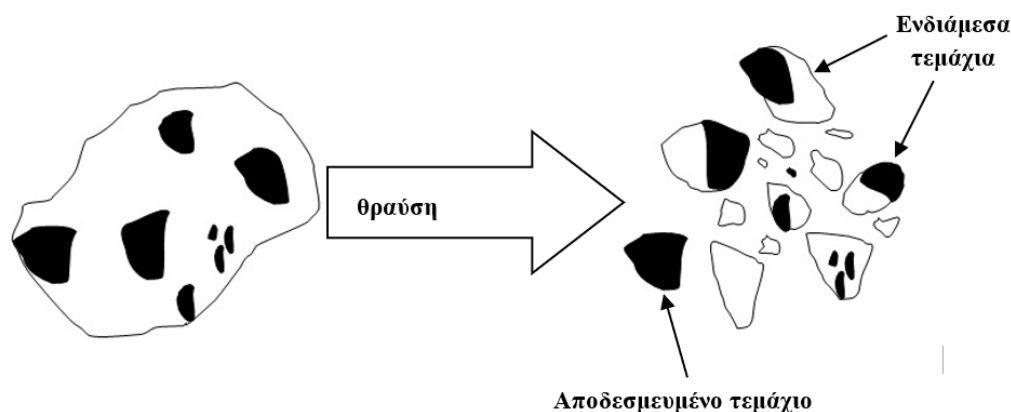
Πριν την εφαρμογή των μεθόδων εμπλουτισμού, θα πρέπει να έχει επιτευχθεί σε ένα ελάχιστο βαθμό η αποδέσμευση (liberation) του χρήσιμου ορυκτού (ή ορυκτών) από το στείρο ή μη χρήσιμο ορυκτό ή ορυκτών που το περιβάλλει (gangue minerals)

Ο όρος **αποδέσμευση** υποδηλώνει το φαινόμενο αποχωρισμού των ορυκτών που συνιστούν το μετάλλευμα σε ανεξάρτητα μεταξύ τους τεμάχια. Η εργασία αυτή επιτυγχάνεται συνήθως με τη **βαθμιαία κατάτμηση** (ελάττωση μεγέθους με θραύση) του μεταλλεύματος.

Τα προϊόντα της κατάτμησης και συνήθως και το εξορυσσόμενο μετάλλευμα, χαρακτηρίζονται από τρεις καταστάσεις δομής (Φραγκίσκος 1995) οι οποίες εξαρτώνται από τις συνθήκες της μεταλλογένεσης, της τεκτονικής και των γενικότερων γεωλογικών συνθηκών που επικρατούν:

- α. Καθαρό μετάλλευμα
- β. Μετάλλευμα και στείρο
- γ. Καθαρό στείρο

Τα τεμάχια του μεταλλεύματος που αποτελούνται από ένα και μόνο ορυκτό λέγονται **αποδεσμευμένα**, ενώ αυτά που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα λέγονται **δεσμευμένα ή ενδιάμεσα** (Εικ. 4).



Εικόνα 4 4. Προϊόντα θραύσης μεταλλεύματος

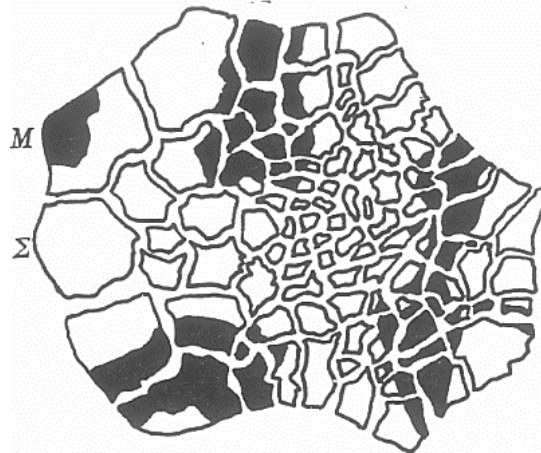
Από: <http://met-solvelabs.com/library/articles/mineral-processing-introduction> (ημ. πρόσβ. 19/05/2019).

**Βαθμός αποδέσμευσης** ενός ορισμένου ορυκτού ορίζεται το «επί τοις εκατό ποσοστό του βάρους του ορυκτού σε αποδεσμευμένα τεμάχια προς το συνολικό βάρος του ορυκτού αυτού στο μετάλλευμα».

Ως **αποδέσμευση με κατάτμηση μεγέθους** (Εικ. 5) ορίζεται η αποδέσμευση ενός

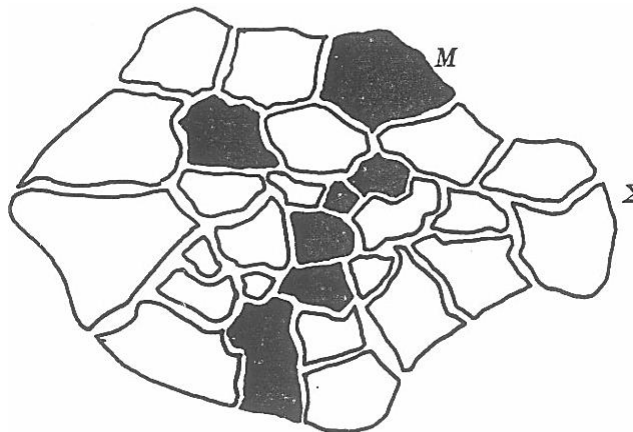


μεταλλεύματος με κατάτμηση (θραύση) σε τεμάχια που η επιφάνεια θραύσης είναι γενικά ανεξάρτητη των ορυκτολογικών ορίων των ορυκτών που συνυπάρχουν στο μέταλλευμα.



**Εικόνα 5.** Αποδέσμευση με κατάτμηση (Μ : Μέταλλευμα, Σ : Στείρο, Τσακαλάκης 2008α, 2018α).

Ως **αποδέσμευση με αποκόλληση** (Εικ. 6) ορίζεται η αποδέσμευση που εμφανίζεται κατά μήκος των ορυκτολογικών ορίων. Η περίπτωση αυτή είναι σχετικά σπάνια και αφορά κυρίως χαλαρά συνδεδεμένα πετρώματα (λατυποπαγή, κροκαλοπαγή, αποσαθρωμένα κοιτάσματα κλπ).



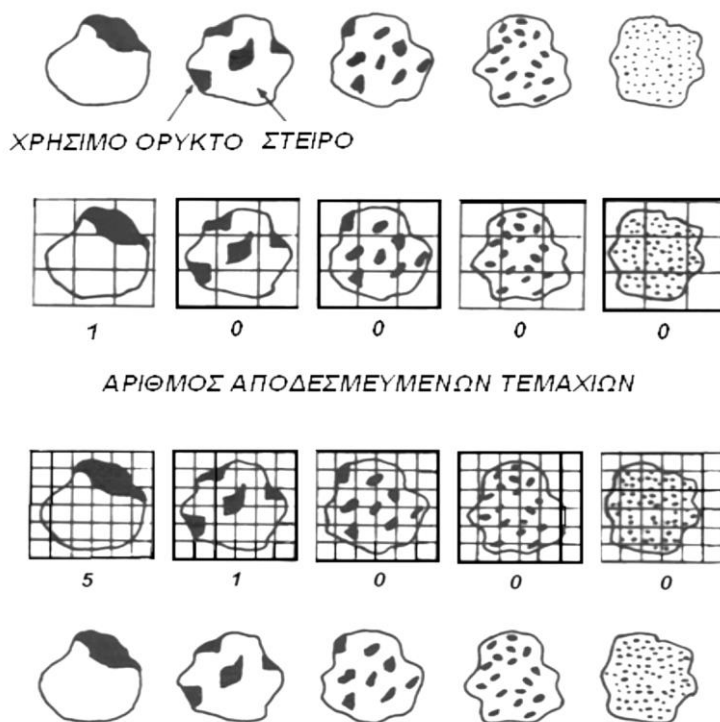
**Εικόνα 6.** Αποδέσμευση με αποκόλληση (Μ: Μέταλλευμα, Σ: Στείρο, Τσακαλάκης 2008α, 2018α)

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι αν υπάρχουν μόνο οι καταστάσεις (α) και (γ) στα προϊόντα της κατάτμησης ή ακόμη και στο εξορυγμένο μέταλλευμα (βαθμός αποδέσμευσης 100%), τότε μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα η επιλεγμένη μέθοδος εμπλουτισμού προκειμένου να παραχθεί το εμπορεύσιμο προϊόν. Αυτό όμως αποτελεί εξαιρετικά σπάνια περίπτωση, ειδικά στην

περίπτωση των μεταλλικών ορυκτών και αναγκαστικά τα ενδιάμεσα τεμάχια ανακυκλώνονται και οδηγούνται ξανά προς θραύση (λειοτριβήση) για την περαιτέρω αποδέσμευσή τους. Η διαδικασία αυτή προϋποθέτει επιπλέον εξοπλισμό και έχει σοβαρή επίδραση στην οικονομικότητα της εκμετάλλευσης. Στην πράξη έχει αποδειχθεί ότι ένας βαθμός αποδέσμευσης της τάξης του 85-95 % είναι γενικά αποδεκτός, πριν το υλικό οδηγηθεί στην διαδικασία του εμπλουτισμού (Φραγκίσκος 1995).

### 1.3. Προσδιορισμός και μελέτη του βαθμού αποδέσμευσης

Η εκτίμηση του βαθμού αποδέσμευσης (Β.Α.) είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την κοκκομετρική ανάλυση του παραγομένου προϊόντος αφού έτσι αποφεύγονται δαπανηρές διαδικασίες θραύσης και λειοτριβήσης του υλικού. Η υπερκατάτμηση ενδεχομένως να δημιουργεί συνθήκες βαθμού αποδέσμευσης κοντά στο 100%, η οικονομική όμως επιβάρυνση μπορεί να καταστήσει ακόμη και το σύνολο της εκμετάλλευσης οικονομικώς ασύμφορη, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Αντίθετα, μια υποκατάτμηση, μπορεί να έχει σημαντικά μειωμένο κόστος και μειωμένα λεπτομερή τεμάχια, θα παρουσιάσει όμως σοβαρές απώλειες σε χρήσιμο υλικό και υψηλή περιεκτικότητα του απορρίμματος σε χρήσιμο συστατικό. Στην Εικ. 7 φαίνεται η επίδραση του μεγέθους κατάτμησης στον βαθμό αποδέσμευσης.



Εικόνα 7. Επίδραση του μεγέθους κατάτμησης στον βαθμό αποδέσμευσης (Τσακαλάκης 2008α,β).

Βασικός στόχος μιας ορθολογικής κατάτμησης πρέπει να είναι ο προσδιορισμός του μεγίστου κοκκομετρικού μεγέθους στο οποίο έχουμε ικανοποιητική αποδέσμευση (>85%) και οι κυριότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι (Φραγκίσκος 1995):

- Εξέταση σε μεταλλογραφικό ή πετρογραφικό μικροσκόπιο
- Εξέταση σε στερεοσκόπιο των επιμέρους κοκκομετρικών κλασμάτων
- Βαθμιαία βαρυτομετρική ανάλυση

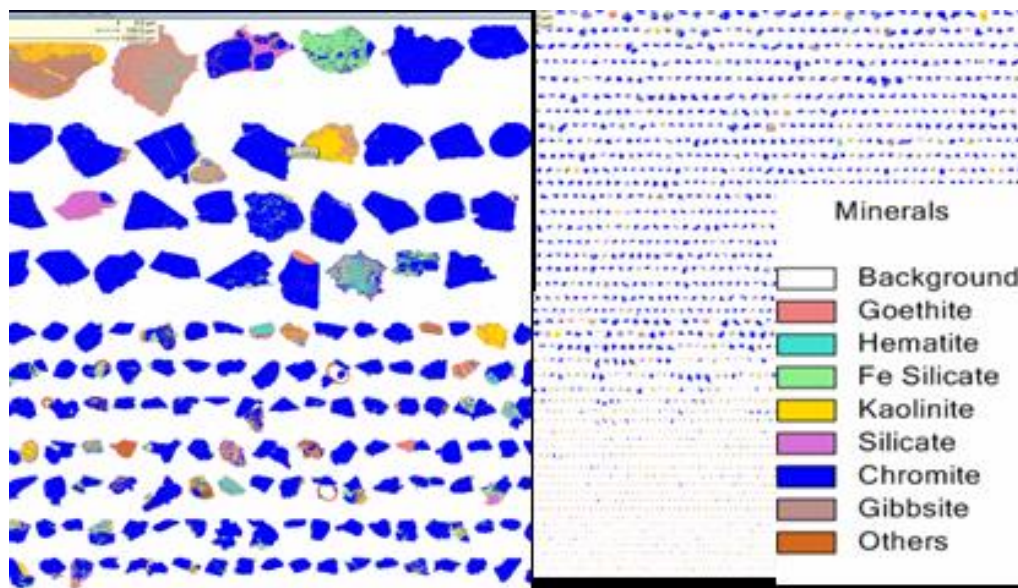
Η συστηματική καταγραφή των μετρήσεων μετά από διενέργεια μίας ή/και περισσότερων από τις παραπάνω μεθόδους, οδηγεί στον ακριβή προσδιορισμό του αριθμού των αποδεσμευμένων τεμαχίων.

Ειδικότερα για την μέτρηση του Β.Α. με τη χρήση στερεοσκοπίου προτάθηκε (Φραγκίσκος 1995) η μέθοδος της μέτρησης των κόκκων (σε συγκεκριμένα κοκκομετρικά κλάσματα) με σημαντικό πλεονέκτημα το μικρό χρόνο προετοιμασίας των δειγμάτων. Μετά από καταμέτρηση των κόκκων ο βαθμός αποδέσμευσης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$BA = \frac{\kappa}{\kappa + \lambda} \leq 1 \quad (1)$$

όπου  $\kappa$  ο αριθμός των αποδεσμευμένων τεμαχίων και  $\lambda$  ο αριθμός των δεσμευμένων τεμαχίων.

Τα τελευταία χρόνια (Εικ. 8) έχουν αναπτυχθεί και μέθοδοι προσδιορισμού του βαθμού αποδέσμευσης με τη χρήση ηλεκτρονικών μικροσκοπίων σάρωσης (SEM, QSCAN κ.ά.)

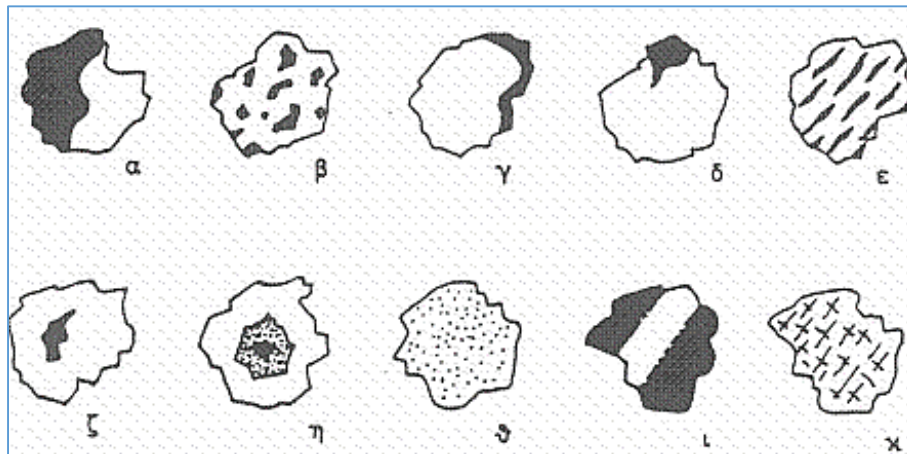


Εικόνα 8. Φωτογραφία τεμαχίων μεταλλεύματος σε QEMSCAN (Tripathy et al. 2012).

Η μελέτη και ο προσδιορισμός του Β.Α. θεωρείται ιδιαίτερα κρίσιμη για την μελέτη της εμπλουτισιμότητας των μεταλλευμάτων, διότι απ' αυτή προκύπτουν:

- Το μέγιστο μέγεθος στο οποίο θα πρέπει να θραυτεί το μετάλλευμα για να οδηγηθεί στην διαδικασία του εμπλουτισμού.
- Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εμπλουτισμού.
- Η επιλογή των κατάλληλων μηχανημάτων για την θραύση – ταξινόμηση.
- Η αποφυγή υπερυπολογισμού και υπερεκτίμησης των εγκαταστάσεων (κτίρια, μηχανήματα, εγκατεστημένη ισχύς κ.ά.).
- Σημαντική συμβολή στο επιχειρηματικό σχέδιο (business plan) της εκμετάλλευσης.

Σημαντικό επίσης ρόλο παίζει και η μορφή των ενδιαμέσων (Εικ. 9). Αυτό διαπιστώνεται στην εξέταση με στερεοσκόπιο ή μικροσκόπιο και είναι ιδιαίτερος κρίσιμη στην επιλογή της μεθόδου εμπλουτισμού.



**Εικόνα 9.** Χαρακτηριστικές μορφές ενδιαμέσων τεμαχίων (Φραγκίσκος & Κατράκης 1979)

Στον Πίν. 1 δίνονται μερικά παραδείγματα (Φραγκίσκος & Κατράκης 1979) του Β.Α. σε σχέση με το μέγεθος τεμαχίων και τη συνηθέστερη μέθοδο εμπλουτισμού.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το χρήσιμο ορυκτό αποτελεί (στην συντριπτική πλειοψηφία) μικρό ποσοστό του εξορυγμένου υλικού, προκύπτει ότι η κατάτμηση θα πρέπει να φτάσει μέχρι το μέγεθος του κόκκου του χρήσιμου ορυκτού. Σε αδρομερή κατάτμηση δεν είναι εφικτό να έχουμε ικανοποιητικό βαθμό αποδέσμευσης, παρόλα αυτά όμως είναι δυνατό να έχουμε σημαντικό ποσοστό αποδεσμευμένου καθαρού στείρου υλικού, γεγονός που είναι χρήσιμο στην εφαρμογή μεθόδου προ-εμπλουτισμού με την καταρχήν, απομάκρυνση των τεμαχίων που είναι καθαρό στέιρο υλικό και την εν συνεχεία οδήγηση του προσυμπυκνώματος στην κύρια μέθοδο εμπλουτισμού, όπως θα περιγραφεί σε επόμενο κεφάλαιο. Γι' αυτό και βασικός κανόνας του εμπλουτισμού είναι να αρχίζει ο διαχωρισμός με την πρώτη αποδέσμευση, εξοικονομώντας έτσι ενέργεια κατάτμησης και περαιτέρω θραύσης του ήδη αποδεσμευμένου χρήσιμου υλικού.



**Πίνακας 1.** Παραδείγματα μεγέθους τεμαχίων και Β.Α. (Φραγκίσκος & Κατράκης 1979)

Μετάλλευμα	Μέγεθος	Β.Α.	Μέθοδος εμπλουτισμού	Εξοπλισμός εμπλουτισμού
Μαγνησίτης	+40 mm	20 – 30 %	Οπτικός διαχωρισμός	Χειροδιαλογή Οπτικοί διαχωριστές
Μαγνητίτης	-100 mesh	έως 95 %	Επίπλευση	Υγρός μαγνητικός διαχωρισμός
Χρωμίτης	-5 έως +2 mm	έως 40%	Υδρομηχανικός βαρυτομετρικός	Υδροσυγκεντρωτές,
	-2 έως +0 mm με κατάτμηση ενδιάμεσων	έως 95%	Υδρομηχανικός βαρυτομετρικός	Τράπεζες, σπειροειδείς συγκεντρωτές
Μεικτά Θειούχα	-65 mesh	Βέλτιστη	Επίπλευση	Κυψέλες επίπλευσης
Βαρύτης	-200 mesh	Βέλτιστη	Επίπλευση	Κυψέλες επίπλευσης

#### 1.4. Κατάτμηση

Ως κατάτμηση θεωρείται η διαδικασία ελάττωσης του μεγέθους του υλικού, προκειμένου να οδηγηθεί στην διαδικασία του εμπλουτισμού ή απλώς να καταστεί εμπορεύσιμο.

Στον Πίν. 2 δίνονται τα δύο κύρια στάδια και οι 6 φάσεις του κύκλου της κατάτμησης, χωρίς όμως να είναι δεσμευτικό να τηρηθούν στο σύνολό τους, αλλά εξαρτάται από το μέγεθος στο οποίο επιτυγχάνεται η ζητούμενη αποδέσμευση, τις ανάγκες της αγοράς, το εύρος λειτουργίας των μηχανημάτων κ.ά.

Στον Πίν. 3 δίνονται τα γενικά χαρακτηριστικά των θραυστήρων με τις δυνάμεις που εξασκούνται.

Η διαδικασία της κατάτμησης ουσιαστικά ξεκινάει από την εξόρυξη του μεταλλεύματος με την χρήση εκρηκτικών υλών ή με μηχανικά μέσα. Η φόρτωση-μεταφορά και απόθεση συντελούν και αυτές με τη σειρά τους, σε μια επιπλέον και συνήθως ανεπιθύμητη θραύση μέχρι το υλικό να οδηγηθεί τελικά στις κύριες εγκαταστάσεις του εμπλουτισμού.

Κατά την θραύση εξασκούνται δυνάμεις στο υλικό, πέραν του μέτρου ελαστικότητάς του και χωρίς αυτό να παραμορφώνεται, οι οποίες είναι (Εικ. 10):

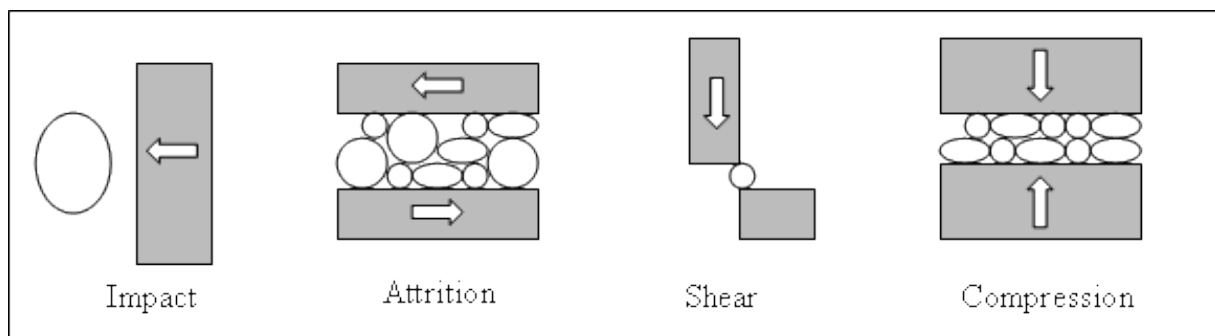
- Δυνάμεις κρούσης (Impact)
- Δυνάμεις τριβής (Attrition)
- Δυνάμεις διάτμησης (Shear)
- Δυνάμεις συμπίεσης-θλίψης (Compression)

**Πίνακας 2.** Στάδια – φάσεις κατάτμησης και μηχανήματα κατάτμησης (Τσακαλάκης 2018α)

Στάδια	Φάσεις	Μέγεθος τεμαχίων (mm)		Λόγος κατάτμησης (r)	Τύπος μηχανήματος
		Τροφοδοσίας	Προϊόντων		
Θραύση	Πρωτογενής	1200- 200	300- 60	3 – 5	θραυστήρας σιαγόνων, γυροσκοπικός, κρουστικός <sup>+</sup>
	Δευτερογενής	250 -90	80 – 25	4 – 6*	κωνικός θραυστήρας*, κρουστικός <sup>+</sup> , σφυρόμυλος <sup>+</sup> ,
	Τριτογενής	100 - 30	30 – 8	≤ 20 <sup>+</sup>	κρουστικός <sup>+</sup> , σφυρόμυλος <sup>+</sup> , θραυστήρας κυλίνδρων
Λειοτρί- βηση	Χονδρομερής	≤ 25 (≤ 300)**	1 – 0,5	≤ 25	ραβδόμυλος, αυτογενής λειοτριβέας**
	Λεπτομερής	≤ 15 (≤ 300)**	0,5 – 0,074	≤ 200	σφαιρόμυλος, αυτογενής λειοτριβέας**
	Άλεση	≤ 10	0,040	≤ 250	σφαιρόμυλος, μύλος περιφερομένων τροχών

**Πίνακας 3.** Γενικά χαρακτηριστικά των θραυστήρων με τις δυνάμεις που εξασκούνται (Τσακαλάκης, 2008α).

Μηχάνημα θραύσης	Δύναμη θραύσης	Λόγος κατάτμησης (r)
Σιαγόνων	Συμπίεση	3 - 4
Γυροσκοπικός	Συμπίεση	5 - 6
Κωνικός	Συμπίεση	6
Περιστροφικός/Κρουστικός	Κρούση	Έως και 20
Σφυρόμυλος	Τριβή/διάτμηση	15
Κυλινδρικός	Συμπίεση	3
Ραβδόμυλος	Κρούση	25
Σφαιρόμυλος	Κρούση	200
Αυτογενής λειοτριβέας	Κρούση	300



**Εικόνα 10.** Δυνάμεις που εξασκούνται κατά την κατάτμηση (Reddy et al. 2006)

Σύμφωνα με το Φραγκίσκος & Κατράκης (1979) δεν έχει αποκλειστεί και το ενδεχόμενο σχάσης ετεροπολικών και ομοιοπολικών δεσμών των μορίων των υλικών.

Η θραύση συντελείται με κατάλληλους θραυστήρες και η λειοτρίβηση με μύλους άλεσης.

Οι μηχανές κατάτμησης χαρακτηρίζονται από τρεις βασικές παραμέτρους (Τσακαλάκης, 2008α):

- i. Το λόγο κατάτμησης **R** (Reduction ratio) ή **n** ή **K**, που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$R = \frac{K_{\tau}}{K_{\pi}} = \frac{X_1}{X_2} \quad (2)$$

Όπου: **K<sub>τ</sub>** ή **X<sub>1</sub>** ο λόγος του χαρακτηριστικού μεγέθους της τροφοδοσίας (συντελεστής μεγέθους της κατανομής μεγέθους τεμαχίων της τροφής) και **K<sub>π</sub>** ή **X<sub>2</sub>** το αντίστοιχο χαρακτηριστικό μέγεθος του προϊόντος (συντελεστής μεγέθους της κατανομής μεγέθους τεμαχίων του προϊόντος).

Ο λόγος κατάτμησης **R** χρησιμεύει ως δείκτης της ικανότητας της μηχανής κατάτμησης, όσον αφορά στη μείωση του μεγέθους των τεμαχίων της τροφοδοσίας του θραυστήρα. Σε αρκετές περιπτώσεις στη βιβλιογραφία, χρησιμοποιείται και η σχέση:

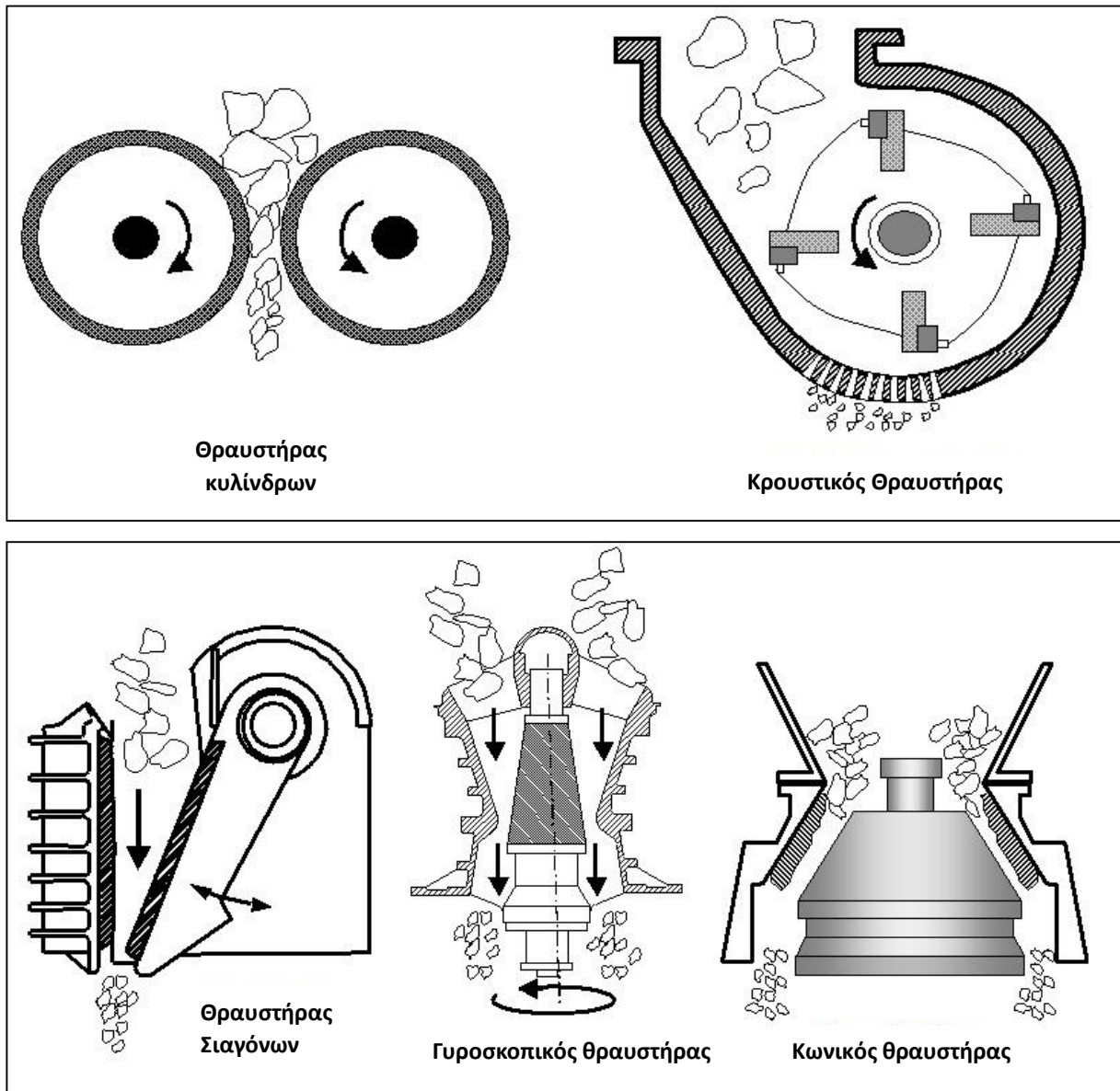
$$R = \frac{D_{80F}}{d_{80P}} \quad (3)$$

όπου **D<sub>80F</sub>** μέγεθος του κόσκινου από το οποίο διέρχεται το 80% του υλικού τροφοδοσίας και **d<sub>80P</sub>** μέγεθος του κόσκινου από το οποίο διέρχεται το 80% του προϊόντος.

- ii. Τη δυναμικότητα, η οποία ισοδυναμεί με την ποσότητα του προϊόντος ανά μονάδα χρόνου (t/h ή m<sup>3</sup>/h), με δεδομένο μέγεθος και λόγο κατάτμησης.
- iii. Την ειδική ενέργεια κατάτμησης, **ε**, που ισοδυναμεί με την ενέργεια ανά μονάδα μάζας (ή όγκου) προϊόντος με δεδομένο μέγεθος και λόγο κατάτμησης (kWh/t ή kWh/m<sup>3</sup>).

Στην πρωτογενή θραύση τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως οι θραυστήρες σιαγόνων (jaw crusher) και ο γυροσκοπικός (gyratory crusher) οι οποίοι λειτουργούν με δυνάμεις θλίψης, ενώ στην δευτερογενή θραύση χρησιμοποιούνται κυρίως κωνικοί θραυστήρες (cone crushers), περιστροφικοί ή κρουστικοί θραυστήρες (impact mill), σφυρόμυλοι (hammer mills), θραυστήρες κυλίνδρων (roll crusher), ραβδόμυλοι (rod mill), σφαιρόμυλοι (ball mill). Τα τελευταία χρόνια και ειδικά όταν απαιτείται λεπτομερής λειοτρίβηση ή/και άλεση (όπως π.χ. στα μεταλλεύματα μεικτών θειούχων) τείνουν να καθιερωθούν οι αυτογενείς ή ημιαυτογενείς λειοτριβείς (AG/SAG Mills) που καλύπτουν όλο το φάσμα της κατάτμησης μέσω μιας και μόνο διεργασίας. Η τροφοδοσία τους ανέρχεται σε 300-400 mm, ενώ το προϊόν φτάνει στα 200 ή ακόμη μέχρι τα -325 mesh (44μm). Στην Εικ. 11 παρουσιάζονται οι κυριότεροι θραυστήρες που χρησιμοποιούνται στη μεταλλευτική

βιομηχανία. Αναλυτική περιγραφή όμως της λειτουργίας των θραυστήρων εκφεύγει του σκοπού της παρούσας εργασίας.

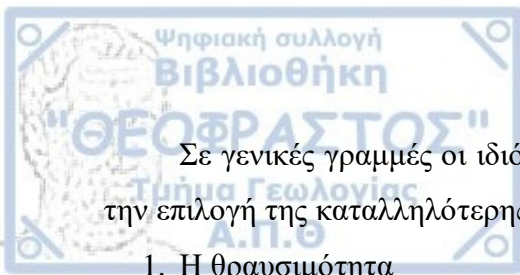


Εικόνα 11. Θραυστήρες μεταλλεύματος. Από: <http://met-solvelabs.com/> (ημ. πρόσβ.19/05/2019)

### 1.5. Ο ρόλος της κατάτμησης στην αντιμετώπιση των θεμάτων του εμπλουτισμού και στην οικονομικότητα της εκμετάλλευσης

Η αναγκαιότητα της κατάτμησης, αποτελεί ένα πολύ σοβαρό ζήτημα στην διαδικασία του εμπλουτισμού, αφού προϋποθέτει μεγάλες εγκαταστάσεις, σημαντικά κεφάλαια αγοράς, είναι ιδιαίτερος ενεργοβόρα και γενικά αποτελεί την μεγαλύτερη δαπάνη σ' ένα εργοστάσιο εμπλουτισμού.





Σε γενικές γραμμές οι ιδιότητες (ορυκτολογικές και φυσικομηχανικές) που καθορίζουν την επιλογή της καταλληλότερης μεθοδολογίας κατάτμησης είναι:

1. Η θραυσσιμότητα
2. Η σκληρότητα
3. Η σχιστότητα
4. Η δομή
5. Η κοκκομετρία τροφοδοσίας και η ζητούμενη κοκκομετρία του προϊόντος με κυριότερο τον πρώτο παράγοντα.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι (Τσακαλάκης 2008α,γ) τα πολύ σκληρά και αποξεστικά υλικά απαιτούν τη χρησιμοποίηση μηχανών κατάτμησης που περιστρέφονται ή κινούνται με χαμηλή ταχύτητα, χρησιμοποιούν ως δύναμη κατάτμησης τη συμπίεση και όχι την τριβή (απόξεση) και οι επιφάνειες κατάτμησης παραμένουν για μικρό χρονικό διάστημα σε επαφή με το σκληρό ή αποξεστικό υλικό.

Ινώδη υλικά ή μεταλλεύματα απαιτούν μηχανήματα κατάτμησης με διατμητικές δυνάμεις κατάτμησης (θραυστήρες κυλίνδρων με οδόντες, Shredder κ.ά.).

Υλικά σαπωνοειδούς υφής με μικρό συντελεστή τριβής μεταξύ των τεμαχίων και επιφανειών θραύσης απαιτούν μηχανές με αδρές (όχι επίπεδες) επιφάνειες κατάτμησης και εφαρμογή δυνάμεων συμπίεσης και διάτμησης (π.χ. θραυστήρες κυλίνδρων με οδόντες).

Σχετικά με την οικονομικότητα της θραύσης, έχουν διατυπωθεί διάφορες θεωρίες συσχετίζοντας την νέα παραγόμενη επιφάνεια των τεμαχίων με το καταναλισκόμενο έργο.

Σήμερα τείνει να καθιερωθεί η μέθοδος Bond (1961) με τις τροποποιήσεις της, σύμφωνα με την οποία η ειδική ενέργεια που καταναλώνεται για την κατάτμηση 1 short ton (0.907t) πετρώματος είναι (σε kWh):

$$\varepsilon = 10 \times w_i \times \left( \frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right) \quad (4)$$

όπου  $W_i$  ο δείκτης έργου σε kWh/s.ton,  $D_{80}$  το μέγεθος του κόσκινου (**σε  $\mu\text{m}$** ) από το οποίο διέρχεται το 80% του υλικού τροφοδοσίας και  $d_{80}$  μέγεθος του κόσκινου (**σε  $\mu\text{m}$** ) από το οποίο διέρχεται το 80% του προϊόντος.

Ο δείκτης έργου  $W_i$  υπολογίζεται από σειρά δοκιμών σε εργαστηριακό σφαιρόμυλο (Ball Mill Grindability Test), και συγκρίνεται με βιβλιογραφικά δεδομένα. Στον Πίν. 4, παρουσιάζονται ενδεικτικά οι τιμές του  $W_i$ .

**Πίνακας 4.** Ενδεικτικές τιμές του δείκτη  $W_i$  (Metso handbook-basics-in-minerals-processing, 2018).

Υλικό	$W_i$	Υλικό	$W_i$
Ανδεσίτης	18,25	Μαγνητίτης	9,97
Βαρύτης	4,73	Τακονίτης	14,61
Βασάλτης	17,10	Μετάλλευμα μολύβδου	11,90
Βωξίτης	8,78	Μετάλλευμα μολύβδου-ψευδαργύρου	10,93
Κλίνκερ τσιμέντου	13,45	Ασβεστόλιθος	12,74
Αδρανή υλικά τσιμέντου	10,51	Μετάλλευμα μαγγανίου	12,20
Αργίλος	6,30	Μαγνησίτης	11,13
Γαιάνθρακας	13,00	Μολυβδαίνιο	12,80
Κάρβουνο	15,13	Μετάλλευμα νικελίου	13,65
Μετάλλευμα χαλκού	12,72	Σχίστης, πετρελαιοφόρος	15,84
Διορίτης	20,90	Φωσφορίτης	9,92
Δολομίτης	11,27	Μετάλλευμα καλίου	8,05
Σμύριδα	56,70	Μετάλλευμα σιδηροπυρίτη	8,93
Αστριος	10,80	Μετάλλευμα μαγνητοπυρίτη	9,57
Σιδηρο-χρώμιο	7,64	Χαλαζίτης	9,58
Σιδηρο-μαγγάνιο	8,30	Χαλαζία	13,57
Σιδηρο-πυρίτιο	10,01	Μετάλλευμα ρουτιλίου	12,68
Πυριτιόλιθος	26,16	Σχίστης	15,87
Φθορίτης	8,91	Πυριτική άμμος	14,10
Γάββρος	18,45	Ανθρακοπυρίτιο	25,87
Γυαλί	12,31	Σκωρία	10,24
Γνεύσιος	20,13	Σχιστόλιθος	14,30
Μετάλλευμα χρυσού	14,93	Πυριτικό νάτριο	13,40
Γρανίτης	15,13	Μετάλλευμα σποδουμένη	10,37
Γραφίτης	43,56	Συηνίτης	13,13
Χαλίκι	16,06	Μετάλλευμα κασσίτερου	10,90
Γύψος, πέτρωμα	6,73	Μετάλλευμα τιτανίου	12,33
Αιματίτης	12,84	Μετάλλευμα ψευδαργύρου	11,56

Ενδεικτικά θα αναφερθεί ότι για έναν συνηθισμένο ασβεστόλιθο με  $W_i = 12,7 \text{ kWh/s.ton}$ , η ενέργεια που απαιτείται για τη θραύση εξορυγμένου υλικού με  $D_{80} = 300\text{mm}$ , σε διάφορα μεγέθη, φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίν. 5), κάνοντας εφαρμογή του νόμου του Bond.

Τα στοιχεία του Πίν. 5, επιβεβαιώνουν πόσο σημαντική είναι η επίδραση του μεγέθους στο κόστος θραύσης, στην οικονομικότητα του εμπλουτισμού και κατ' επέκταση της εκμετάλλευσης, καθιστώντας την πολλές φορές ασύμφορη και αντιοικονομική. Σε κάθε περίπτωση λοιπόν θα πρέπει να αποφεύγεται υπερκατάτμηση και αυτό αποτελεί ιδιαίτερο μέρος της έρευνας του εμπλουτισμού σε συνδυασμό με την ταξινόμηση, όπως θα αναφερθεί παρακάτω.

**Πίνακας 5.** Ενδεικτικές τιμές της κατανάλωσης ενέργειας για τη θραύση ασβεστόλιθου σε διάφορα μεγέθη.

<b>Δείκτης έργου Bond για ασβεστόλιθο = 12,7 kWh/s.ton</b>					
Τροφοδοσία (μm):	D80 =	300.000,00	30.000,00	1.000,00	100,00
Προϊόν (μm):	d80 =	30.000,00	1.000,00	100,00	10,00
Καταναλισκόμενη ενέργεια ε: (kWh)		<b>0,54</b>	<b>3,57</b>	<b>9,44</b>	<b>29,84</b>
Κατανάλωση ενέργειας ανά tn: (kWh) (απόδοση θραυστήρα: 85%)		0,59	3,86	10,22	32,31

Οι λόγοι για τους οποίους η κατανάλωση ενέργειας ανά τόνο, αυξάνει σε χαμηλότερα μεγέθη συσχετίζονται κυρίως με τη δομή, τον ιστό και το δίκτυο των κατακλάσεων και ρωγματώσεων του μεταλλεύματος. Όσο μεταβαίνουμε σε μικρότερα μεγέθη, τόσο περιορίζεται και μειώνεται το δίκτυο των κατακλάσεων και οι μεικτοί κόκκοι μεταλλεύματος-στείρου (ενδιάμεσα). Συνεπώς, οι δυνάμεις της θραύσης θα πρέπει να εφαρμοστούν σε καθαρό υλικό χωρίς ασυνέχειες και επιφάνειες επαφής διαφορετικών ορυκτών, επεμβαίνοντας πολλές φορές και στη δομή των κρυστάλλων, με ότι αυτό συνεπάγεται για την καταναλισκόμενη ενέργεια.

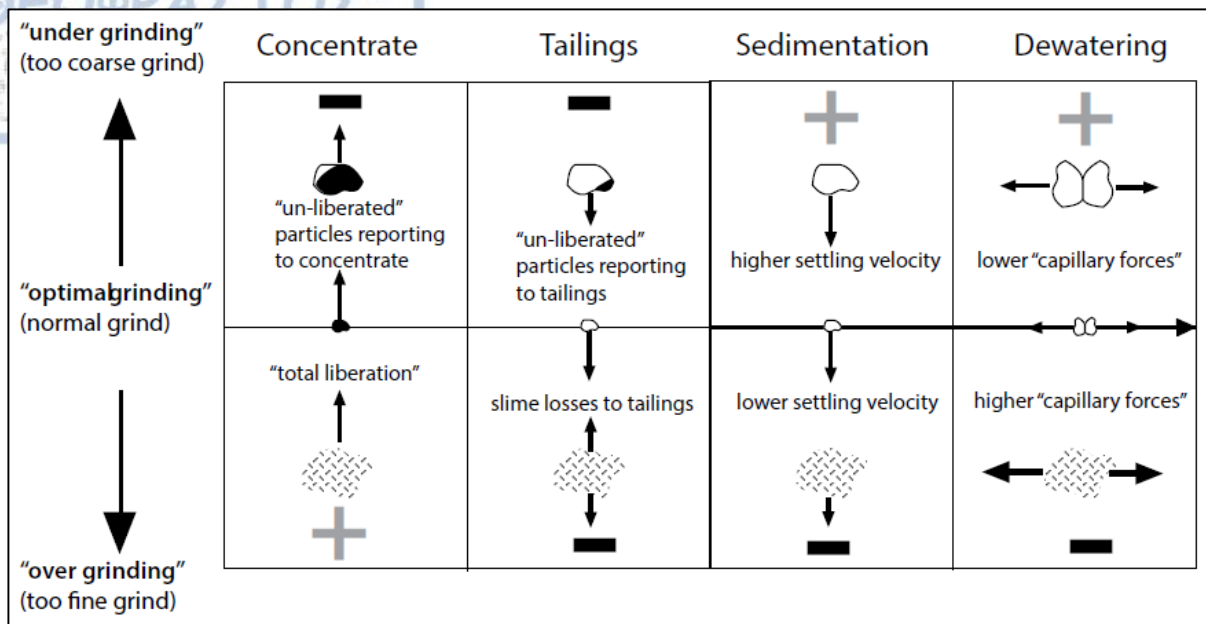
Ο Abdelhaffez (2011) σε μια προσπάθεια συσχετισμού του δείκτη έργου Bond, με διάφορες μηχανικές ιδιότητες δειγμάτων βωξίτη, καολίνη, γρανοδιορίτη, μαγνητίτη κ.ά., καταλήγει σε συσχέτιση μεταξύ του δείκτη έργου Bond και της αντοχής σε θλίψη και του μέτρου ελαστικότητας με συντελεστή συσχέτισης  $R^2$  81% και 90%, αντίστοιχα.

Οι Τσακαλάκης κ.ά. (2000), στην εξέταση τριών διαφορετικών δειγμάτων βωξίτη, διαπίστωσαν ότι η ύπαρξη διαφορετικών ορυκτολογικών φάσεων στις τρεις ποιότητες βωξίτη, έχει επίδραση στην τιμή του δείκτη έργου Bond  $W_i$  και κατά συνέπεια στην οικονομικότητα της λειοτρίβησης. Οι διαφορετικές φάσεις εντός του βωξίτη, εξηγούν και τη διαφορετική συμπεριφορά τους κατά τη λειοτρίβηση, αλλά και στην περαιτέρω επεξεργασία.

Επίσης, η Metso Corporation στο εγχειρίδιο: «Crushing and Screening Handbook» (2007), έπειτα από σειρά δοκιμών σε εξοπλισμό δικής της κατασκευής, διαπιστώνει ότι ο συσχετισμός μεταξύ ευθραυστότητας και της τιμής Los Angeles είναι ικανοποιητικός, αλλά ο δείκτης έργου Bond φαίνεται να μην συσχετίζεται ικανοποιητικά με την ευθραυστότητα των δειγμάτων που εξετάστηκαν.

Συμπερασματικά λοιπόν και όσον αφορά το ρόλο της κατάτμησης θα μπορούσαμε να πούμε ότι στο στάδιο αυτό δημιουργούμε τις απαραίτητες προϋποθέσεις, από πλευράς κοκκομετρίας για τα επόμενα στάδια επεξεργασίας εμπλουτισμού και της αναβάθμισης.

Στην Εικ. 12 απεικονίζεται η επίδραση της «υπέρ-» και «υπό-» κατάτμησης.



Εικόνα 12. Επίδραση υπέρ- και υπό- κατάτμησης στον εμπλουτισμό (Από: Metso handbook-basics-in-minerals-processing, 2018)

## 1.6. Ταξινόμηση

Η ταξινόμηση είναι το αμέσως επόμενο στάδιο της θραύσης κατά την οποία το υλικό χωρίζεται σε επιμέρους κοκκομετρικά κλάσματα που έχουν προεπιλεγεί, με σκοπό να οδηγηθούν είτε στη διαδικασία του εμπλουτισμού, είτε σε ανακύκλωση προς περαιτέρω θραύση. Συνηθέστερη μέθοδος ταξινόμησης είναι και η κοσκίνηση, που επιτυγχάνεται με τη τροφοδοσία υλικού πάνω από διάτρητη επιφάνεια (κόσκινο). Το άνοιγμα των βροχίδων της επιφάνειας καθορίζει το μέγεθος των διερχόμενων και μη τεμαχίων. Οι διαστάσεις της βρογχίδας καθορίζουν το ελάχιστο μέγεθος αυτού που δεν διέρχεται, που είναι γνωστό ως «παραμένον». Με την επανάληψη αυτής της εργασίας λαμβάνονται ομάδες τεμαχίων, **τα κοκκομετρικά κλάσματα**, με όρια μεγέθους που καθορίζονται από τις αντίστοιχες διαστάσεις των βροχίδων.

Τα κόσκινα που οι διαστάσεις του ανοίγματος (βροχίδα) τους είναι μικρότερο από μισή ίντσα, χαρακτηρίζονται με τον αριθμό mesh, που φανερώνει τον αριθμό των βροχίδων σε μια ίντσα (2,54 cm). Για κόσκινα με μεγαλύτερα ανοίγματα, προτιμότερη είναι η έκφραση του "καθαρού ανοίγματος συνήθως σε mm".

Τα μεγέθη κοσκίνησης και γενικότερα η κοκκομετρική ανάλυση, αποτελεί και αυτή ιδιαίτερο μέρος της μελέτης εμπλουτισμού των μεταλλευμάτων η οποία πραγματοποιείται σε ξηρό ή υγρό περιβάλλον και με την οποία επιτυγχάνεται:

- Η πρόβλεψη αποφυγής υπερκατάτμησης,

- Η παραγωγή του βέλτιστου μεγέθους τεμαχίων για την αποτελεσματική περαιτέρω επεξεργασία στα συστήματα διαχωρισμού.
- Η παραγωγή προϊόντος που πληροί τις προδιαγραφές της αγοράς

Πέραν των παραπάνω, κάθε κοκκομετρικό κλάσμα υποβάλλεται σε επιμέρους αναλύσεις (ορυκτολογική και χημική), εξέταση σε μικροσκόπιο και στερεοσκόπιο, προσδιορισμό του βαθμού αποδέσμευσης, με σκοπό την μελέτη εμπλουτισιμότητάς του.

Σε εργαστηριακό επίπεδο, συνήθως πραγματοποιείται με συσκευές κοσκίνησης, όπως αυτή της Εικ. 13.



**Εικ. 13.** Εργαστηριακή συσκευή κοσκίνησης του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας του ΑΠΘ

Η επιλογή της σειράς των κοσκίνων, αποτελεί κρίσιμη παράμετρο και εξαρτάται από παραμέτρους όπως το είδος του κοιτάσματος, τη μακροσκοπική εικόνα των δειγμάτων, τη μέθοδο εμπλουτισμού που δύναται να ακολουθηθεί, τα βιβλιογραφικά δεδομένα, η διαθεσιμότητα του εργαστηρίου και φυσικά την πείρα του ερευνητή.

Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι η σειρά μεταβολής του μεγέθους του κόσκινου θα μπορούσε να δοθεί και από την παρακάτω σχέση (Φραγκίσκος 1990):

$$X_{v-1} = q * X_v \quad (5)$$

όπου  $q = \sqrt{2}$  ή  $q = \sqrt[4]{2}$  ή  $q = 2$ ,  $X$  η διάσταση οπής του κόσκινου και  $v$  η σειρά των κοσκίνων.

Η διάσταση οπής των κοσκίνων είναι σε mm, σε  $\mu\text{m}$  ή σε ίντσες, ενώ συνηθίζεται και η χρήση των Αμερικάνικων προτύπων mesh. Η αντιστοιχία του ανοίγματος, στα πρότυπα αυτά φαίνεται στον Πίν. 6.

**Πίνακας 6.** Αντιστοιχία στο άνοιγμα κοσκίνων διαφόρων τύπων (<http://www.espimetals.com> & Φραγκίσκος 1990).

U.S. MESH U.S.S. 1924 ASTM (EΠ - 61)	Μικρόμετρα ( $\mu\text{m}$ )	Ίντσες (in)	Χιλιοστά (mm)
3	6730	0,2650	6,730
4	4760	0,1870	4,760
5	4000	0,1570	4,000
6	3360	0,1320	3,360
7	2830	0,1110	2,830
8	2380	0,0937	2,380
10	2000	0,0787	2,000
12	1680	0,0661	1,680
14	1410	0,0555	1,410
16	1190	0,0469	1,190
18	1000	0,0394	1,000
20	841	0,0331	0,841
25	707	0,0280	0,707
30	595	0,0232	0,595
35	500	0,0197	0,500
40	400	0,0165	0,400
45	354	0,0138	0,354
50	297	0,0117	0,297
60	250	0,0098	0,250
70	210	0,0083	0,210
80	177	0,0070	0,177
100	149	0,0059	0,149
120	125	0,0049	0,125
140	105	0,0041	0,105
170	88	0,0035	0,088
200	74	0,0029	0,074
230	63	0,0024	0,063
270	53	0,0021	0,053
325	44	0,0017	0,044
400	37	0,0015	0,037



Τα προϊόντα της κοσκίνησης ζυγίζονται χωριστά το καθένα και υπολογίζεται το επιμέρους ποσοστό του κάθε κλάσματος και το αθροιστικώς διερχόμενο (ή παραμένον) σε κάθε διάσταση οπής. Τα αποτελέσματα αυτά καταχωρούνται σε κατάλληλους πίνακες και συντάσσονται τα σχετικά διαγράμματα κοκκομετρικών καμπυλών σε διάγραμμα log-log ή σε ειδικό διάγραμμα Rosin-Rammler  $\log(1/R)$ -log

### 1.7. Συναρτήσεις κατανομής τεμαχίων – Η κατανομή Gates-Gaudin-Schuhmann

Συνήθως, ένα ορισμένο υλικό μπορεί να χαρακτηριστεί με μια γενική συνάρτηση κατανομής μεγέθους  $f(x)$ , μιας συνάρτησης δηλαδή που θα εκφράζει την κατανομή του μεγέθους των κόκκων του υλικού:

$$P = f(x) \leq 1 \text{ (ή 100\% όταν το } P \text{ εκφράζεται σε μορφή ποσοστού)}$$

ή

$$R = f(x) \leq 1 \text{ (ή 100\%)} \quad (6)$$

όπου  $x$  το άνοιγμα της βροχίδας του κόσκινου,  $P$  το % αθροιστικό ποσοστό του βάρους των σωματιδίων που διέρχονται από κόσκινο βροχίδας  $x$  (passing) και  $R$  το αθροιστικό ποσοστό % του βάρους των σωματιδίων που παραμένουν σε κόσκινο βροχίδας  $x$  (retaining), ως προς το συνολικό υλικό για κοσκίνιση. Προφανώς ισχύει  $P + R = 1$  (ή 100 %).

Μία χαρακτηριστική συνάρτηση των προϊόντων της ταξινόμησης είναι η κατανομή **Gates-Gaudin-Schuhmann (GGS)** η οποία είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη συνάρτηση και εφαρμόζεται συνήθως για την αξιολόγηση των δεδομένων κατανομής μεγέθους σωματιδίων που προκύπτουν από διεργασίες θραύσης (Εικ. 14). Είναι μια συνάρτηση κατανομής δύο παραμέτρων που μπορεί να εκφραστεί από την ακόλουθη συνάρτηση (Τσακαλάκης 2008β):

$$P = \left(\frac{x}{k}\right)^m \quad (7)$$

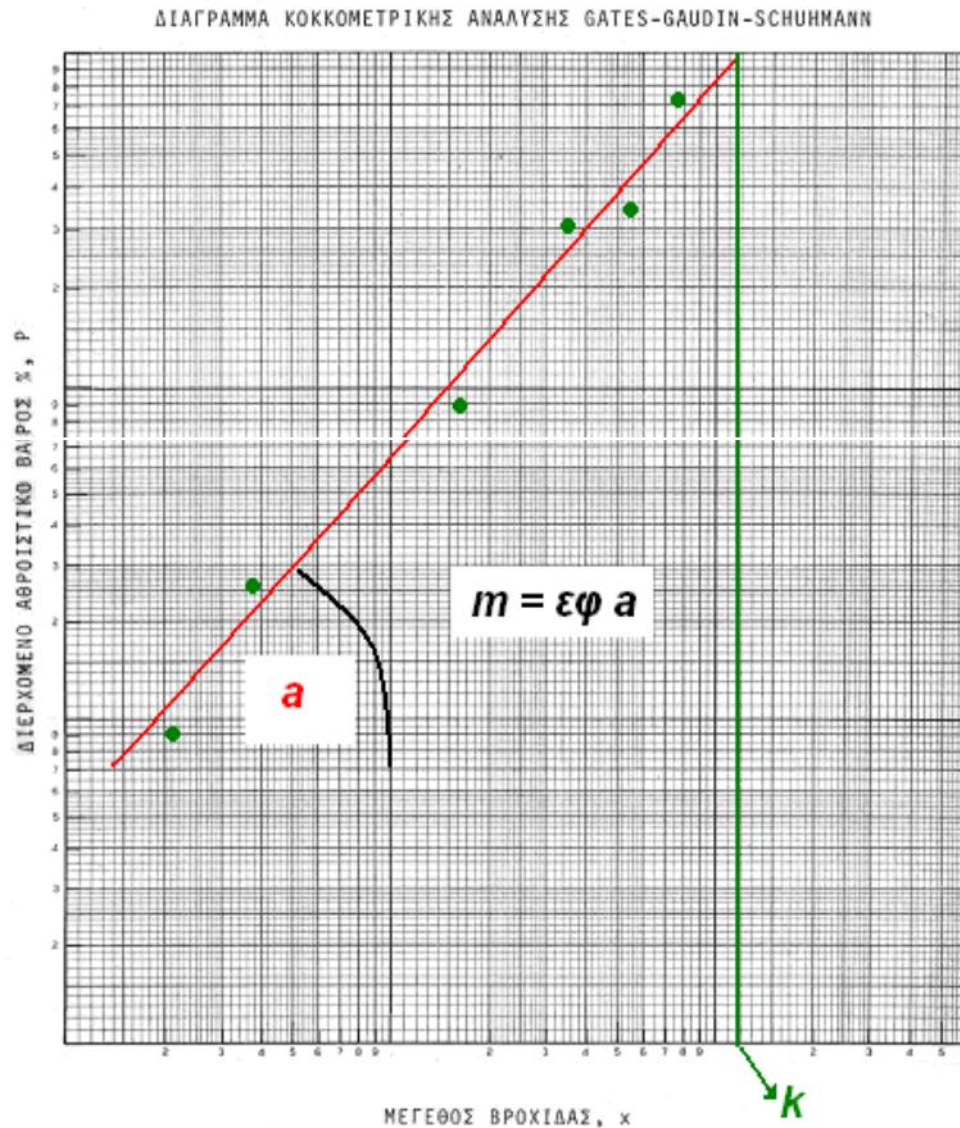
όπου  $P$  το αθροιστικώς διερχόμενο ποσοστό (%) από βρογχίδα ανοίγματος  $x$  (mm),  $k$  το ελάχιστο άνοιγμα βρογχίδας του κόσκινου από το οποίο περνάει το 100% του υλικού (mm),  $m$  ο συντελεστής ομοιομορφίας (είναι η εφαπτομένη της γωνίας  $\alpha$  της Εικ. 14).

Η παραπάνω κατανομή (συνάρτηση) μπορεί και να αναδιατυπωθεί ως εξής:

$$x = k * P^{\frac{1}{m}} \quad (8)$$

Από το παρακάτω διάγραμμα προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία  $\alpha$ , τόσο πιο ομοιόμορφο είναι το υλικό και κατ' επέκταση τόσο μικρότερο είναι το ποσοστό λεπτομερών τεμαχίων. Η σχέση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην επιλογή των μηχανημάτων θραύσης για

την επίλυση των προβλημάτων του εμπλουτισμού. Αν για παράδειγμα το ίδιο δείγμα θραυστεί σε διαφορετικούς τύπους θραυστήρων (π.χ. σιαγόνων και κυλίνδρων) από το αποτέλεσμα εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την ομοιομορφία του προϊόντος και κυρίως την ποσότητα των λεπτομερών τεμαχίων.



Εικόνα 14. Διάγραμμα κοκκομετρικής ανάλυσης Gates-Gaudin-Schuhmann (Τσακαλάκης 2008α).

### 1.8. Διεργασίες εμπλουτισμού – διαχωρισμού ορυκτών

Αναφέρθηκαν πιο πάνω οι κυριότερες φυσικές ιδιότητες των ορυκτών βάση των οποίων εκτελούνται οι κυριότερες διεργασίες διαχωρισμού των ορυκτών που είναι το ειδικό βάρος, η μαγνητική επιδεκτικότητα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, το χρώμα και η επιφανειακή ενέργεια (φυσικοχημεία επιφανειών), ενώ στον Πίν. 1 παρουσιάστηκαν τα κυριότερα παραδείγματα



(Φραγκίσκος & Κατράκης 1979) του βαθμού αποδέσμευσης (B.A.) σε σχέση με το μέγεθος τεμαχίων και τη συνηθέστερη μέθοδο εμπλουτισμού. Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά οι μέθοδοι με τις οποίες επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός.

## 1.9. Ειδικό βάρος

Η μέθοδος διαχωρισμού που βασίζεται στη διαφορά ειδικού βάρους των ορυκτών που αποτελούν το μετάλλευμα ονομάζεται και βαρυτομετρικός διαχωρισμός.

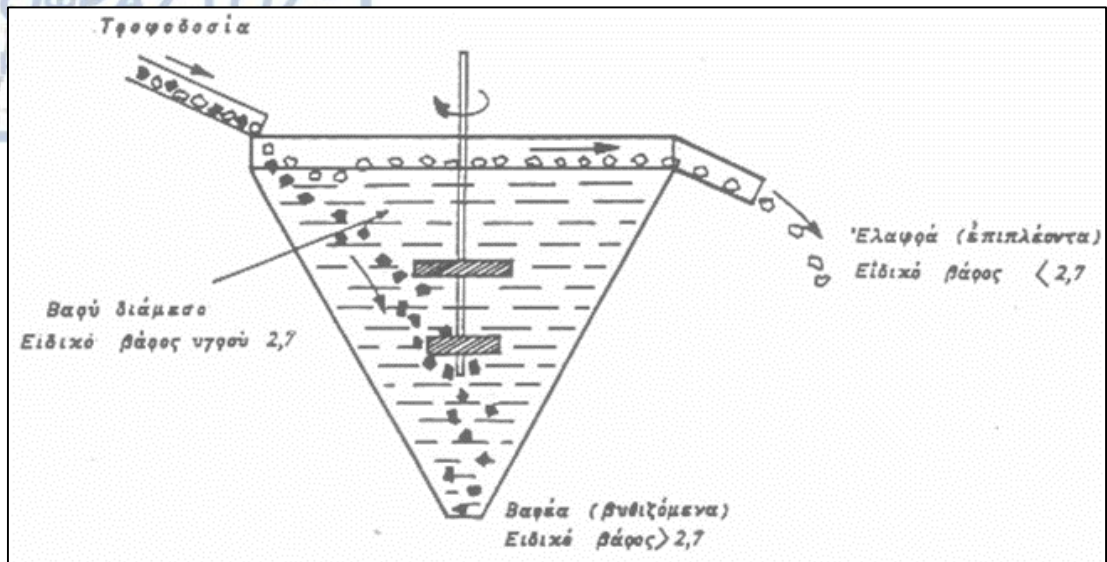
Οι μέθοδοι συγκέντρωσης βαρύτητας χωρίζουν τα σωματίδια με βάση τις διαφορές στην τιμή του ειδικού βάρους των τεμαχίων και καθορίζουν τη σχετική τους κίνηση μέσα σε μια φυσική ή εφαρμοζόμενη δύναμη βαρύτητας. Ο σχετικός ρυθμός καθίζησης με βάση τις δυνάμεις βαρύτητας και τις αντίθετες ιζώδεις δυνάμεις αξιοποιείται για αποτελεσματικό διαχωρισμό.

Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά του ειδικού βάρους, τόσο αποτελεσματικότερος είναι ο διαχωρισμός ο οποίος επιτυγχάνεται με μεθόδους που εκμεταλλεύονται αυτή τη διαφορά, σε μηχανήματα όπως οι παλλόμενες τράπεζες, οι μηχανές βαρέων διαμέσων, οι υδροσυγκεντρωτές, οι σπειροειδείς συγκεντρωτές κ.ά. Αυτές οι τεχνικές έχουν ευρύτατο πεδίο εφαρμογής και αποτέλεσαν από την αρχαιότητα ακόμη μεθόδους εμπλουτισμού αδρόκοκκων κυρίως μεταλλευμάτων (προσχωματικός χρυσός, αρχαία πλυντήρια Λαυρίου κ.ά.).

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι μέθοδοι αυτοί:

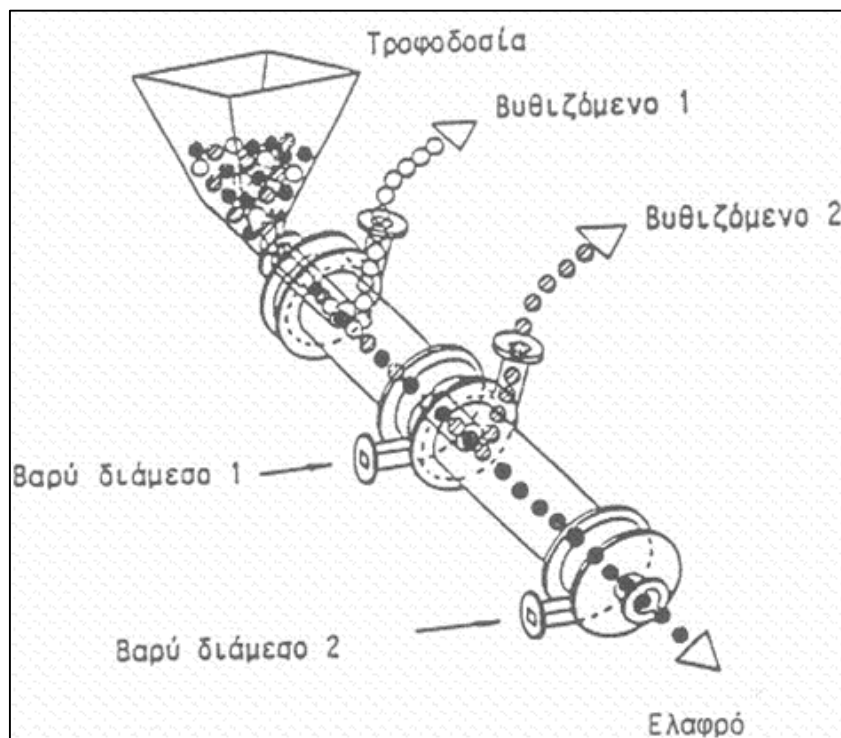
### 1.9.1. Μέθοδος βαρέων διαμέσων ή ενδιάμεσου ειδικού βάρους

Στη μέθοδο των βαρέων διαμέσων, που ονομάζονται επίσης και «Πραγματικές βαρυτομετρικές μέθοδοι εμπλουτισμού», το μετάλλευμα οδηγείται σε δεξαμενές πολφού ενδιάμεσης πυκνότητας, π.χ. αιώρημα αλεσμένου κράματος σιδηροπυριτίου (Fe-Si) ή σε αραιό πολφού μαγνητίτη (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) σε νερό. Το υλικό με μικρότερη πυκνότητα από αυτή του αιωρήματος παραμένει στην επιφάνεια και απομακρύνεται, ενώ το υλικό με μεγαλύτερη πυκνότητα βυθίζεται και συλλέγεται μαζί με το αιώρημα. Στη συνέχεια, τα βαρέα διάμεσα διαχωρίζονται από το αιώρημα και χρησιμοποιούνται εκ νέου. Η γενική αρχή λειτουργίας παρουσιάζεται στην Εικ. 15.



Εικόνα 15. Εμπλουτισμός με βαρέα διάμεσα (Φραγκίσκος & Κατράκης 1979).

Παράλληλα, έχουν εξελιχθεί και συστήματα δυναμικού διαχωρισμού με βαρέα διαλύματα σε κυλινδρικά δοχεία με μικρές διαστάσεις (σύστημα δυναμοστροβλικού διαχωριστή). Τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκε και ο τρίροος διαχωριστής που αποτελεί μια εξέλιξη του δυναμοστροβλικού διαχωριστή. Ο τρίροος (TRIFLO) διαχωριστής παράγει 3 προϊόντα με 2 στάδια διαχωρισμού (Εικ. 16).



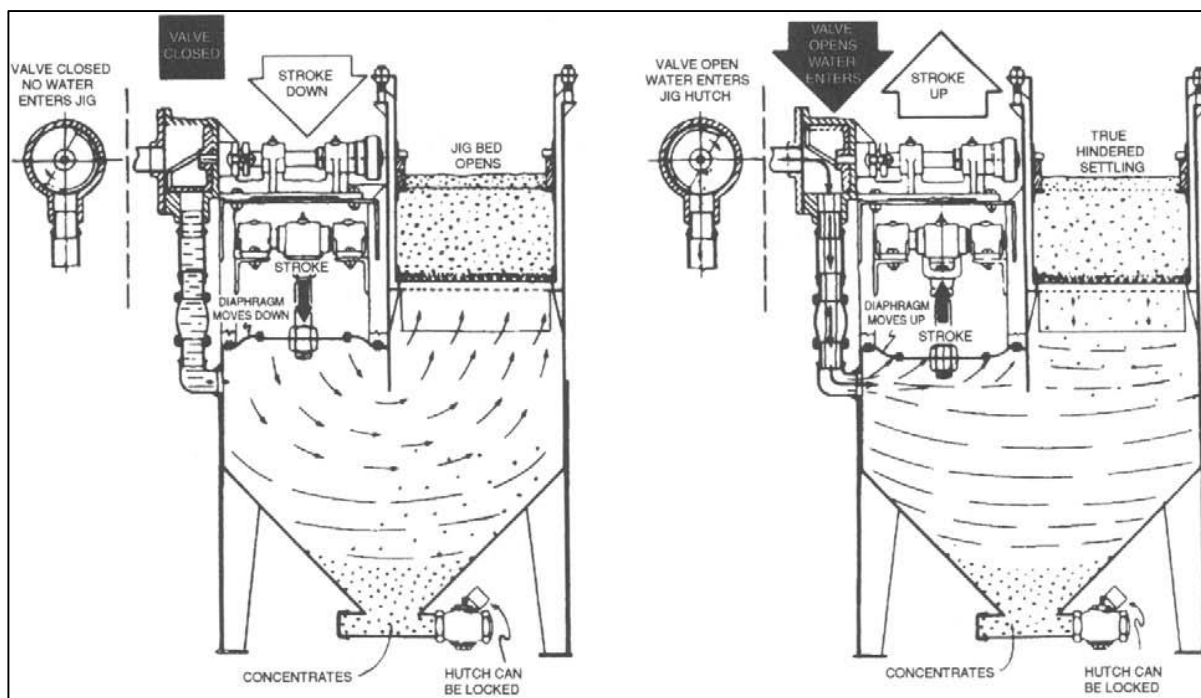
Εικόνα 16. Τρίροος βαρυτομετρικός διαχωριστής (Τσακαλάκης 2018β).

### 1.9.2. Μηχανικές βαρυτομετρικές μέθοδοι εμπλουτισμού

Στην κατηγορία αυτή (στην οποία χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά νερό) πέρα από το ειδικό βάρος, σημαντικό ρόλο παίζει η μορφή και οι διαστάσεις των τεμαχιδίων. Οι δυνάμεις οι οποίες δημιουργούν τους παράγοντες για την επίτευξη του βαρυτομετρικού διαχωρισμού είναι (Τσακαλάκης 2018β):

1. Η δύναμη της βαρύτητας η οποία επιδρά σε κάθε τεμάχιο και είναι ανάλογη με τη μάζα του.
2. Η δύναμη της άνωσης του υγρού (νερού).
3. Η σύνθετη δύναμη αντιστάσεων που προέρχεται από τη σχετική κίνηση των τεμαχίων στο νερό, την αλληλεπίδραση των γειτονικών τεμαχίων και τη δημιουργούμενη δίνη μεταξύ τους.

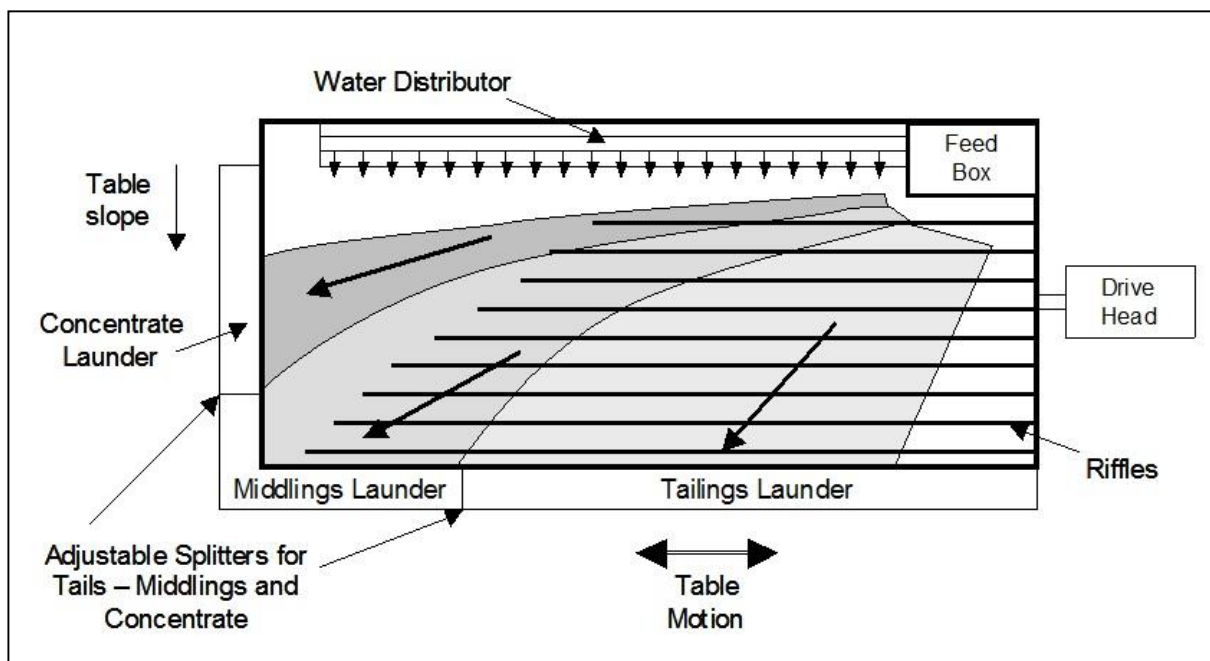
Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής έχουν αναπτυχθεί μηχανήματα εμπλουτισμού όπως οι υδρομηχανικοί συγκεντρωτές, οι σπειροειδείς συγκεντρωτές, οι παλλόμενες (δονούμενες) τράπεζες, οι κυκλώνες κ.ά., κατά τη λειτουργία των οποίων ο διαχωρισμός επιτυγχάνεται μέσω της ταξινόμησης, της διαφορικής επιτάχυνσης, της παρεμποδιζόμενης καταβύθισης και της μικρομερούς διείσδυσης. Στην Εικ. 17 παρουσιάζεται μια απλή περίπτωση υδροσυγκεντρωτή.



Εικόνα 17. Βασικές αρχές λειτουργίας υδροσυγκεντρωτή Denver (Wills & Napier-Munn 2006).

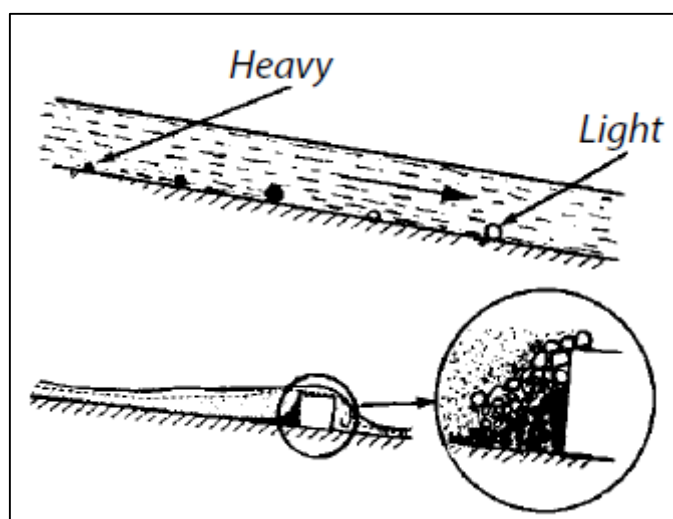
Οι δονούμενες ή παλλόμενες τράπεζες (shaking tables) έχουν ως αρχή λειτουργίας την επίδραση της ροής υδατικής μεμβράνης η οποία ρέει πάνω από μια επίπεδη, κεκλιμένη

επιφάνεια (κατάστρωμα), στην οποία έχουν τοποθετηθεί κατάλληλες ραβδώσεις, κάθετες προς την κίνηση του νερού (Εικ. 18). Η τράπεζα δονείται ασύμμετρα μέσω κατάλληλης διάταξης βραχίονα και κινητήρα, κάθετα στην κίνηση του νερού και παράλληλα με τις ραβδώσεις. Αυτή η κίνηση συνίσταται σε αργή κίνηση προς τα εμπρός, ακολουθούμενη από γρήγορη κίνηση επιστροφής.



**Εικόνα 18.** Βασικές αρχές λειτουργίας παλλόμενης τράπεζας (<http://met-solvelabs.com>, ημερομ. πρόσβασης 19/05/2019).

Οι ραβδώσεις είναι διατεταγμένες κατά τέτοιο τρόπο ώστε το βαρύ τεμάχιο παγιδεύεται σ' αυτές (Εικ. 19) και μεταφέρονται παράλληλα προς την κατεύθυνση της ταλάντωσης.



**Εικόνα 19.** Λεπτομέρεια εγκλωβισμού τεμαχίων στις ραβδώσεις (METSO minerals, Basics in mineral processing, edn 10, 2015. [www.metso.com](http://www.metso.com)).

Το νερό προστίθεται στην κορυφή του τραπεζιού κάθετα προς την κίνηση της τράπεζας. Τα βαρύτερα σωματίδια κινούνται προς το ένα άκρο της τράπεζας, ενώ τα ελαφρύτερα και λεπτότερα τεμαχίδια τείνουν να υπερπηδούν τις ραβδώσεις ακολουθώντας πορεία σχεδόν παράλληλη μ' αυτή του νερού. Τα ενδιάμεσα σημεία μεταξύ αυτών των άκρων παρέχουν ανάκτηση των μεσαίων (ενδιάμεσων μεγέθους και πυκνότητας) σωματιδίων.

### 1.10. Μαγνητική επιδεκτικότητα – μαγνητικός διαχωρισμός

Ο μαγνητικός διαχωρισμός βασίζεται στη διαφορά των μαγνητικών ιδιοτήτων μεταξύ των ορυκτών των μεταλλευμάτων ο οποίος επιτυγχάνεται μέσω της έλξης των τεμαχίων με μαγνητικές ιδιότητες, από το μαγνητικό πηνίο ενός μαγνήτη και την ελεύθερη και ανεμπόδιστη διέλευση των μη μαγνητικών μέσα από το πεδίο του.

Για τις ανάγκες του εμπλουτισμού μεταλλευμάτων, οι ορυκτές πρώτες ύλες, ανάλογα με τη συμπεριφορά τους, όταν αυτά βρεθούν σε ένα μαγνητικό πεδίο, κατατάσσονται σε 3 κατηγορίες οι οποίες είναι (Φραγκίσκος & Κατράκης 1979):

1. Ισχυρώς μαγνητικά ή σιδηρομαγνητικά. Τα ορυκτά αυτά έλκονται από έναν συνήθη μόνιμο μαγνήτη.
2. Ελαφρά μαγνητικά τα οποία έλκονται ύστερα από την εφαρμογή ισχυρού μαγνητικού πεδίου με ηλεκτρομαγνήτες.
3. Μη μαγνητικά ή διαμαγνητικά υλικά.

Σε γενικές γραμμές μπορούμε να πούμε ότι (Φραγκίσκος & Κατράκης 1979):

- Τα οξειδία είναι περισσότερο μαγνητικά από τα θειούχα.
- Οι μαγνητικές ιδιότητες ενός ορυκτού εξαρτώνται και από τις περιεχόμενες μη χρήσιμες ενώσεις, π.χ. η αντικατάσταση του Zn από Fe στον σφαλερίτη (μη μαγνητικός) σε ποσοστό 10 – 12 % (μαρματίτης) τον καθιστά ισχυρά μαγνητικό.
- Ορυκτά με όμοια χημική σύσταση παρουσιάζουν σημαντικές μαγνητικές ιδιότητες όπως ο σιδηροπυρίτης ( $FeS_2$ ), η οποίος είναι διαμαγνητικός, και ο μαγνητοπυρίτης ( $Fe_7S_8$ ) ο οποίος είναι ισχυρά μαγνητικός. Αυτά τα δύο ορυκτά έχουν σαφώς και διαφορετικές φυσικές ιδιότητες λόγω των μοριακών δομών

Στον Πίν. 7 φαίνεται μία ταξινόμηση ορυκτών με βάση τη μαγνητική τους συμπεριφορά.

Ένα υλικό όταν βρεθεί σε μαγνητικό πεδίο έντασης  $H$ , τότε η ένταση μαγνήτισης  $J$ , που θα ασκηθεί στο υλικό είναι ανάλογη του μαγνητικού πεδίου  $H$ . Το μέτρο και η διεύθυνση της μαγνήτισης που επάγεται στο υλικό, εξαρτάται από το μέτρο και τη διεύθυνση του εξωτερικού



πεδίου και της ικανότητας του υλικού να μαγνητισθεί και δίδεται από τη σχέση (Παπαδόπουλος 2008):

$$J = k * H \quad (9)$$

όπου J είναι η επαγόμενη μαγνήτιση του υλικού, k είναι η μαγνητική επιδεκτικότητα του υλικού (magnetic susceptibility) και H είναι το μέτρο και η διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου.

**Πίνακας 7.** Ομάδες μαγνητικής συμπεριφοράς υλικών (Φραγκίσκος & Κατράκης 1979).

Ισχυρά μαγνητικά ή σιδηρομαγνητικά	Ελαφρά μαγνητικά ή παραμαγνητικά		Ελαφρά μαγνητικά ανάλογα με την περι/τα Fe, Ni κ.α.	Μη μαγνητικά ή διαμαγνητικά	
Σίδηρος	Αιματίτης	Μίλλερίτης	Fe-ούχα	Τοπάζιο	Κερουσίτης
Νικέλιο	Λειμωνίτης	Ni-σιδηροπυρίτης	Αρσενοπυρίτης	Κρυολίτης	Ζαλαζίας
Λευκόχρυσος	Σιδηρίτης	Πολυδυμίτης	Ολιβίνης	Κορούνδιο	Χαλκηδόνιος
Σιδηρονικέλιο	Ανκερίτης	Σιδηροπυρίτης	Περιδοτίτης	Ρουμπίνι	Αμέθυστος
Μαγνητίτης	Χαμοσίτης	Βορνίτης	Χρυσολίνης	Ζάπφειρος	Άστριος
Τιτανιομαγνήτης	Χαλκοσιδηρίτης	Χρωμίτης	Σιδηροπυρίτης	Βωξίτης	Κασσιτερίτης
Μαγνητοπυρίτης	Χαλκοπυρίτης	Ερυθρίτης	Μαρκασίνης	Σιλλιμανίτης	Τελλουρίτης
Πεντανδίτης	Πυρολουσίτης	Σφαιροκοβαλίτης	Φρανκλινίτης	Βαρύτης	Ρουτίλιο
Μαρτίτης	Ψιλομέλας	Αμφιβολίτης	Κοβαλίνης	Βιτερίτης	Ανατάσης
Μαρματίτης	Μπραουνίτης	Μαρμαρυγίας	Σαφλορίτης	Αδάμας	Οκταεδρίτης
Πεφρυγμένος σιδηροπυρίτης	Μαγγανίτης	Γρανάτης	Σμαλτίτης	Λιθάνθρακας	Σεελίτης
Ζιρκόνιο	Χαουσμανίτης	Πυρόξενος	Ni-ούχα	Γραφίτης	Σφαλερίτης
	Ροδοχρωσίτης	Σπινέλιος	Γαρνιερίτης	Ανθρακοκορούνδιο	Βουρτσίτης
	Ροδονίτης	Ολιβίνης	Ρομελσμπερκίτης	Απατίτης	Σμιθσωνίτης
	Sb-νικέλιο	Σερπεντίνης	Χλοανθίτης	Κυπρίτης	Καλαμίνα
	Κολουμβίτης		Νικελίνης	Χαλκοσίτης	Ζιρκόνιο
	Νιοβίτης		Ουλμανίτης	Μαλαχίτης	Αμφιβολίτης
	Τονταλίτης		Σπεριλίτης	Εναργίτης	Κεροστίλβη
	Υτριοκολουμβίτης		Στανίτης	Φθορίτης	Ολιβίνης
	Σαμαρσκήτης		Sn-σιδηροπυρίτης	Λευκίτης	Μαρμαρυγίας
	Ευξενίτης		Ουρανίτης	Ποτάσα	Γρανάτης
	Μοναζίτης		Κλεβείτης	Αμίαντος	Πυρόξενος
	Ιλμενίτης		Πισουρανίτης	Υπερσθενής	Σπινέλιος
	Ιλμενορουτίλιο			Τάλκης	Ζεόλιθος
	Υτριοτιτανίτης			Μαγνησίτης	
	Βολφραμίτης			Δολομίτης	
	Φερμπερίτης			Καολινίτης	
	Χουμπνερίτης			Σερπεντίνης	
				Αντιγορίτης	
				Μολυβδαινίτης	
				Νεφελίνης	
				Λιθάργυρος	
				Γαληνίτης	
				Αγγλεσίτης	

Η μαγνητική επιδεκτικότητα εκφράζει το βαθμό ευκολίας (ή δυσκολίας) του υλικού να μαγνητιστεί. Στον Πιν. 8 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας συνηθισμένων ορυκτών.

**Πίνακας 8.** Μαγνητική επιδεκτικότητα ορυκτών (METSO minerals, Basics in mineral processing, edn 10, 2015. www.metso.com)

Ορυκτό	Μαγνητική επιδεκτικότητα (x 10 <sup>6</sup> )	Ορυκτό	Μαγνητική επιδεκτικότητα (x 10 <sup>6</sup> )
Μαγνητίτης	20.000 – 80.000	Ρουτίλιο	2
Μαγνητοπυρίτης	1.500 – 6.100	Σιδηροπυρίτης	0,21
Αιματίτης	172 – 290	Κασσιτερίτης	– 0,08
Ιλμενίτης	113 – 271	Φθορίτης	– 0,285
Σιδηρίτης	56 – 64	Γαληνίτης	– 0,35
Χρωμίτης	53 – 125	Ασβεστίτης	– 0,377
Βιοτίτης	23 – 80	Χαλαζίας	– 0,46
Γκαιτίτης	21 – 25	Γύψος	– 1,0
Μοναζίτης	18,9	Σφαλερίτης	– 1,2
Μαλαχίτης	8,5 – 15,0	Απατίτης	– 2,64
Βορνίτης	8,0 – 14,0		

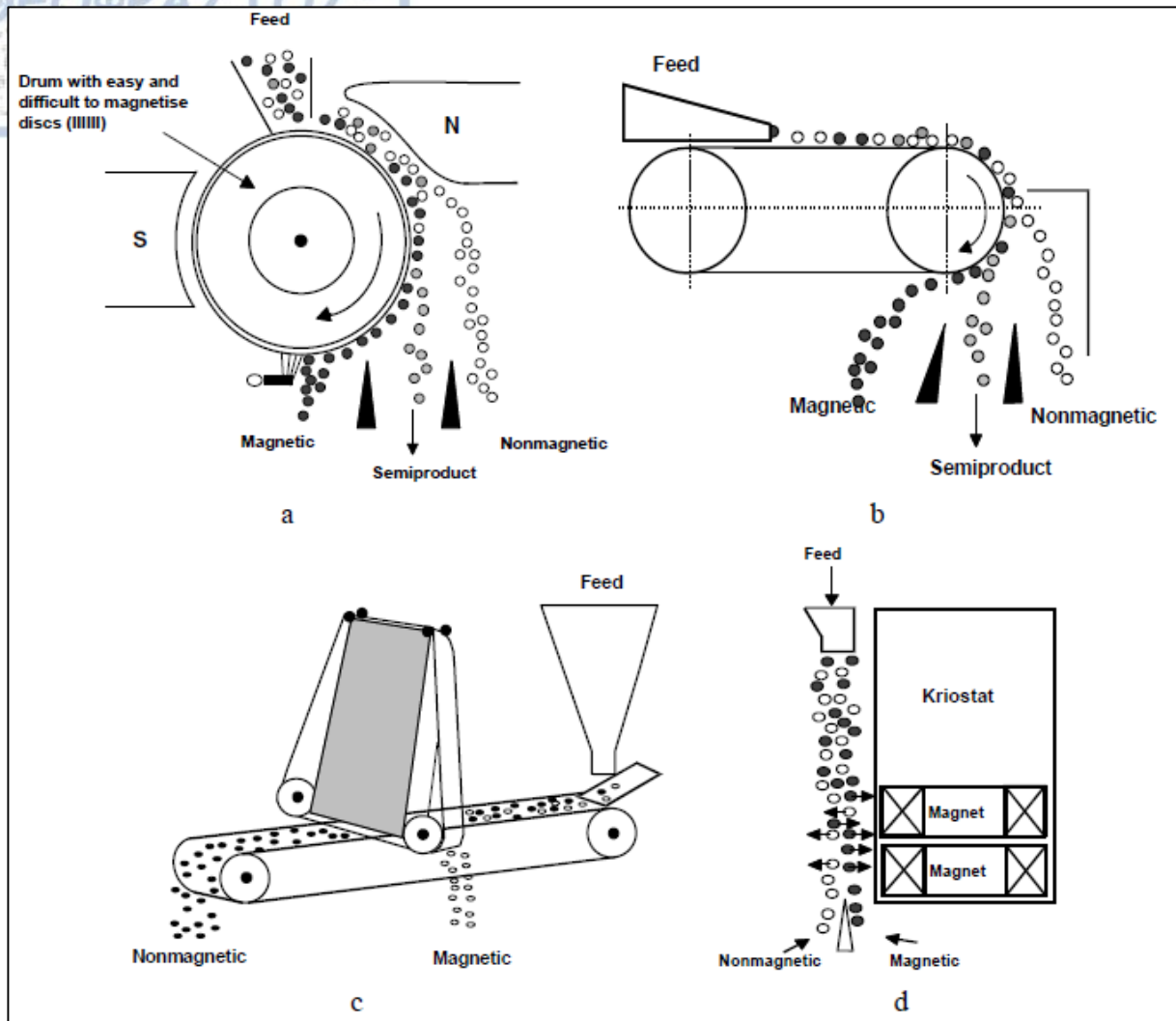
Με βάση τις διαφορές της μαγνητικής επιδεκτικότητας των ορυκτών που αποτελούν το μέταλλευμα, έχουν αναπτυχθεί και οι αντίστοιχοι μαγνητικοί διαχωριστές, οι οποίοι διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες (Φραγκίσκος, Κατράκης 1979).:

- Μαγνητικοί διαχωριστές με μόνιμους μαγνήτες
- Μαγνητικοί διαχωριστές με ηλεκτρομαγνήτες

Ενώ με βάση την αρχή λειτουργίας διακρίνονται σε (Φραγκίσκος, Κατράκης 1979).:

- Συγκράτησης των μαγνητικών τεμαχίων
- Έλξης των μαγνητικών τεμαχίων
- Ανύψωσης μαγνητικών τεμαχίων
- Επικόλλησης

Από πλευράς έντασης διακρίνονται σε χαμηλής και υψηλής έντασης, ανάλογα με την ένταση του μαγνητικού πεδίου που αναπτύσσεται κατά την εφαρμογή τους, ενώ μπορεί ο μαγνητικός διαχωρισμός να λαμβάνει χώρα σε ξηρούς ή υγρούς μαγνητικούς διαχωριστές. Στην Εικ. 20, φαίνονται κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα μαγνητικών διαχωριστών.

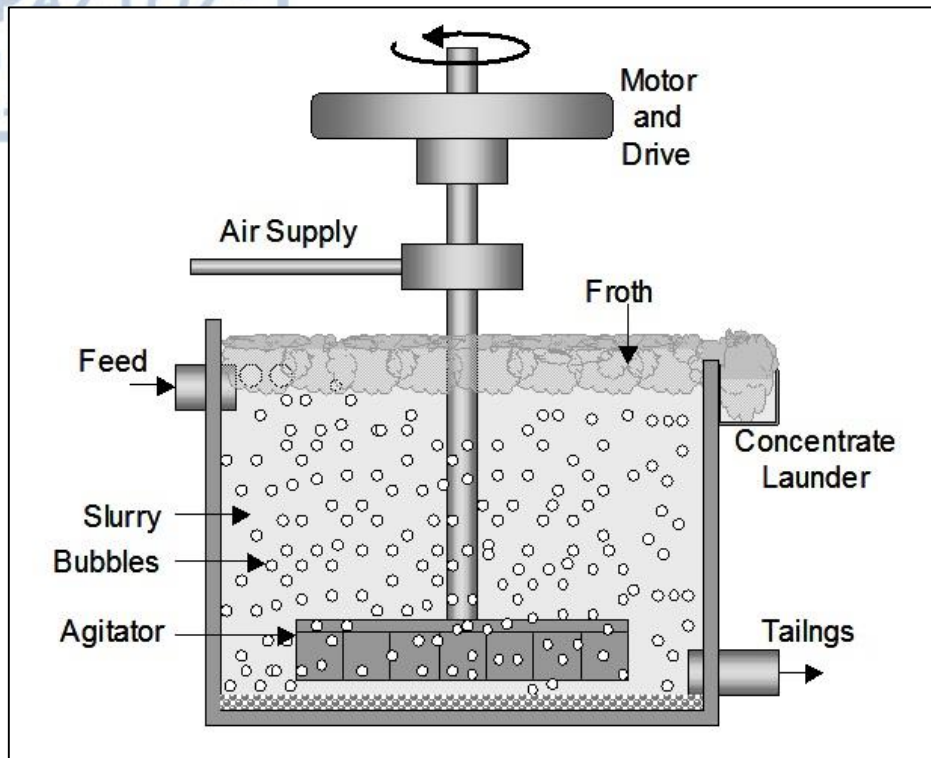


Εικόνα 20. Τύποι μαγνητικών διαχωριστών (Drzymala 2007).

### 1.11. Επίπλευση

Η επίπλευση ή αλλιώς επίπλευση αφρού, είναι μια διεργασία διαχωρισμού ορυκτών, η οποία λαμβάνει χώρα σε υδάτινο περιβάλλον στο οποίο έχουν προστεθεί κατάλληλα ρυθμιστικά διαλύματα. Οι επιφάνειες των προς διαχωρισμό ορυκτών καθίστανται υδρόφοβες με ρύθμιση εκλεκτικών αντιδραστηρίων. Στα υδρόφοβα σωματίδια προσκολλώνται φυσαλίδες αέρα που εισάγονται στον πολφό και μεταφέρονται σε ένα στρώμα αφρού πάνω από τον πολφό και έτσι διαχωρίζονται από τα υδρόφιλα σωματίδια (Εικ. 21). Εκτός από τα προστιθέμενα αντιδραστήρια, η διαδικασία επίπλευσης εξαρτάται από δύο κύριες παραμέτρους.

- Το χρόνο συγκράτησης που απαιτείται για τη διεξαγωγή της διαδικασίας διαχωρισμού που καθορίζει τον όγκο και τον αριθμό των κυψελών επίπλευσης που απαιτούνται.
- Η ανάδευση και ο αερισμός που απαιτούνται για τις βέλτιστες συνθήκες πλεύσης, καθορίζουν τον τύπο του μηχανισμού επίπλευσης και την απαιτούμενη ισχύ.



Εικόνα 21. Τυπική κυψέλη επίπλευσης (<http://met-solvelabs.com>, ημ. πρόσβασης 19/05/2019)

Στον Πίν. 9 παρουσιάζονται τα κυριότερα ορυκτά στα οποία εφαρμόζεται η μέθοδος της επίπλευσης (Τσακαλάκης 2018β, Τσακαλάκης κ.ά. 2000).

Πίνακας 9. Ορυκτά στα οποία εφαρμόζεται συνήθως η επίπλευση.

Θειούχα Μεταλλεύματα	Μη θειούχα	
	Μεταλλεύματα	Ορυκτά
Χαλκού	Σιδήρου	Ασβεσίτη
Μολύβδου	Χρωμίτη	Μαγνησίτη
Ψευδαργύρου	Μαγγανίου	Φθορίτη
Μολυβδαινίου	Βολφραμίτη	Αστρίων
Κοβαλτίου		Βαρύτη
Νικελίου		Θείου
Αρσενικού		Φωσφορικών
		Άνθρακα

Η μέθοδος της επίπλευσης, αν και δαπανηρή σε σχέση με τις υπόλοιπες, έχει εφαρμογή στα φτωχά μεταλλεύματα ιδιαίτερα όταν δεν υφίστανται σημαντικές διαφορές στις άλλες φυσικές ιδιότητες και όταν απαιτείται εξαρχής λεπτομερής λειοτριβήση για αποδέσμευση. Πετυχαίνει συνήθως καλή ανάκτηση και εφαρμόζεται ακόμη για την απομάκρυνση στείρου υλικού, για την παραγωγή καθαρών συμπυκνωμάτων. Η απαιτούμενη υδροφοβία –

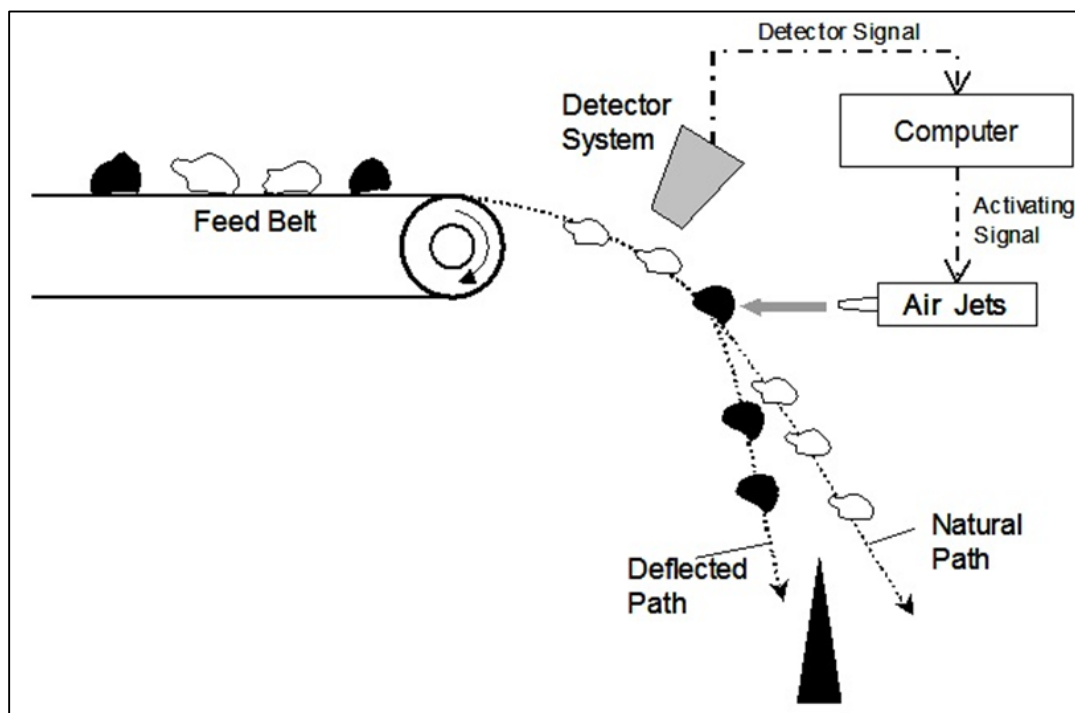
υδροφιλία μεταξύ χρήσιμου και μη συστατικού αναπτύσσεται με τεχνικά μέσα στο στάδιο της προοδοποίησης.

## 1.12. Άλλες μέθοδοι εμπλουτισμού

Εκτός από τις προαναφερθείσες μεθόδους εμπλουτισμού, έχουν εφαρμογή και άλλες μέθοδοι όπως περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

### 1.12.1. Οπτικός διαχωρισμός

Βασίζεται στη διαφορά χρώματος των προς διαχωρισμό ορυκτών και αποτέλεσε μέθοδο εμπλουτισμού από την αρχαιότητα, μέσω της χειροδιαλογής η οποία χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα σε πολλές περιπτώσεις. Παράλληλα έχουν αναπτυχθεί και συστήματα εμπλουτισμού με χρήση φωτοκύτταρων και ακτίνων laser (Εικ. 22).



Εικόνα 22. Οπτική διαλογή μεταλλεύματος (<http://met-solvelabs.com>, ημ. πρόσβασης 19/05/2019).

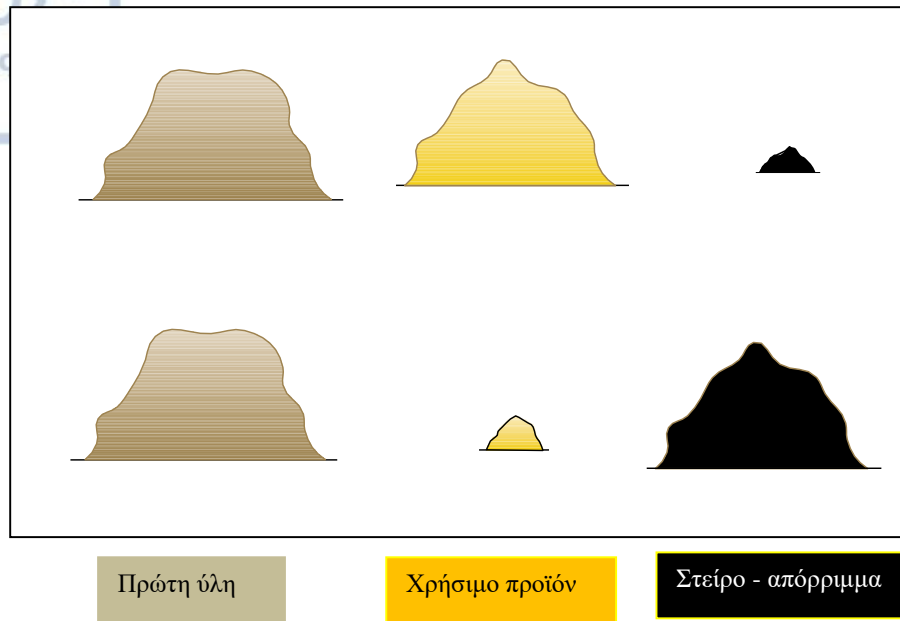
### 1.12.2. Υδροαυτοκαθαρισμός - Έκπλυση

Πρόκειται για αυτοτελείς ή ενδιάμεσες επεξεργασίες στον εμπλουτισμό των μεταλλευμάτων ή ορυκτών. Στην πρώτη παράγεται τελικό συμπύκνωμα, ενώ η δεύτερη αποτελεί απαραίτητη προεργασία για την παραπέρα εφαρμογή άλλης μεθόδου εμπλουτισμού (Εικ. 23).



Υδροαυτοκαθαρισμός -  
Έκπλυση

Εφαρμογή μεθόδων  
εμπλουτισμού



**Εικόνα 23.** Διαφορές στην τάξη μεγέθους της ποσότητας των παραγομένων υλικών κατά την εφαρμογή υδροαυτοκαθαρισμού-έκπλυσης και εμπλουτισμού (METSO minerals, Basics in mineral processing, edn 10, 2015. www.metsso.com).

Με τον «υδροαυτοκαθαρισμό» εννοείται η επεξεργασία στα μεταλλεύματα ή ορυκτά με την εφαρμογή ελαφρών σχετικά αλλά ικανών δυνάμεων για την αποσύνθεση υλικών χαλαρά συνδεδεμένων (κολλημένα) και με διαφορετική σκληρότητα και μέγεθος. Η επεξεργασία αυτή επιτυγχάνεται με την τριβή των μεγαλύτερων και σκληρότερων τεμαχίων με τα μικρότερα ή μαλακότερα μέσα στο νερό, με περιστροφή ή ανάδευση ή ακόμη με την εκτόξευση νερού με πίεση.

Με τον όρο «έκπλυση» εννοείται η πλύση μεταλλευμάτων με νερό η οποία διενεργείται για την απομάκρυνση αποκολλημένων υλικών από τον υδροαυτοκαθαρισμό ή ανεξάρτητα από αυτόν, όπως π.χ. της ιλύος, αργιλικών, φυτικής γης, κολλοειδών υλικών κ.ά., συνήθως χωρίς οικονομική σημασία.

Αντίστοιχες διαδικασίες εφαρμόζονται και στην παραγωγή μη μεταλλικών ορυκτών (αδρανή υλικά, αντιολισθηρά, ολιβίνης κ.ά.) σε ξηρό ή υγρό περιβάλλον (απομάκρυνση σαθρών και αργιλικών υλικών στον προδιαλογέα, καταιονισμό ύδατος στα κόσκινα κ.ά.). Σε αυτές τις περιπτώσεις έχουμε και απευθείας παραγωγή του τελικού προϊόντος, μόνο με περαιτέρω θραύση και ταξινόμηση, χωρίς τη διαμεσολάβηση άλλου διαχωρισμού. Η διαφορά στα ισοζύγια φαίνεται στην Εικ. 23.

### 1.13. Συμπληρωματικές διεργασίες στον εμπλουτισμό

Πρόκειται για συμπληρωματικές και τελικές επεξεργασίας του προϊόντος (συμπύκνωμα) προκειμένου αυτό να καταστεί εμπορεύσιμο. Αυτές είναι σε γενικές γραμμές:

- Πύκνωση (ο αραιός πολφός γίνεται πυκνός).
- Διήθηση (φιλτράρισμα του πυκνού πολφού).
- Αφυδάτωση (χρησιμοποιείται κυρίως σε χονδρομερή τεμάχια).
- Μορφοποίηση (σε περιπτώσεις λεπτομερούς συμπυκνώματος απαιτείται η συσσωμάτωσή του, σε σφαιρίδια, pellets κ.ά., προκειμένου αυτό να γίνει αποδεκτό από τη μεταλλουργία).

Τα παραπάνω εφαρμόζονται κατά περίπτωση και όπου είναι απαραίτητο, η αναλυτική περιγραφή των οποίων εκφεύγει των ορίων της παρούσας εργασίας.

### 1.14. Ορυκτουργικά ισοζύγια – μεθοδολογία επεξεργασίας δεδομένων

Τόσο στην φάση λειτουργίας ενός εργοστασίου εμπλουτισμού, όσο και στις εργαστηριακές ή ημιβιομηχανικές δοκιμές, είναι απαραίτητη η ποσοτικοποίηση και η έκφραση με μαθηματικούς τύπους των δεδομένων και των αποτελεσμάτων. Έχοντας λοιπόν ως βασικά κριτήρια την αρχή διατήρησης της μάζας, το γεγονός ότι δεν υπεισέρχονται χημικές αντιδράσεις στα δείγματα και θεωρώντας ότι (Φραγκίσκος & Κατράκης 1979):

**F (Feed):** είναι τροφοδοσία της πρώτης ύλης (σε tn ή και tn/h)

**C (Concentrate):** είναι το παραγόμενο συμπύκνωμα (σε tn ή και tn/h)

**T (Tailing):** είναι το παραγόμενο απόρριμμα (σε tn ή και tn/h)

$$\text{τότε προφανώς ισχύει: } \mathbf{F = C + T} \quad (10)$$

Αν  $f$ ,  $c$  και  $t$  είναι οι % κ.β. περιεκτικότητες στη χρήσιμη ουσία των  $F$ ,  $C$  και  $T$ , αντίστοιχα, τότε και όσον αφορά την χρήσιμη ουσία ισχύει:

$$\mathbf{F * f = C * c + T * t} \quad (11)$$

Αν υπάρχει και ενδιάμεσο προϊόν  $M$  (middling) περιεκτικότητας  $m$  στη χρήσιμη ουσία, τότε η παραπάνω σχέση γράφεται ως:

$$\mathbf{F * f = C * c + M * m + T * t} \quad (12)$$

Από απλούς μετασχηματισμούς των παραπάνω σχέσεων και θεωρώντας την περίπτωση ενός προϊόντος, προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις, οι οποίες είναι ιδιαίτερα χρήσιμες και κρίσιμες για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων:



### Λόγος συγκέντρωσης

(εκφράζει την ποσότητα τροφοδοσίας για την παραγωγή μιας μονάδας συμπυκνώματος)

$$K = \frac{F}{C} \quad (13)$$

$$K = \frac{c - t}{f - t} \quad (14)$$

---

**Περιεκτικότητα συμπυκνώματος σε χρήσιμη ουσία**

$$C = F * \frac{f - t}{c - t} \quad (15)$$

---

### Ανάκτηση R

(εκφράζει το % ποσοστό της χρήσιμης ουσίας που ανακτήθηκε στο συμπύκνωμα)

$$R = 100 * \frac{C * c}{F * f} \quad (16)$$

---

### Απώλειες J

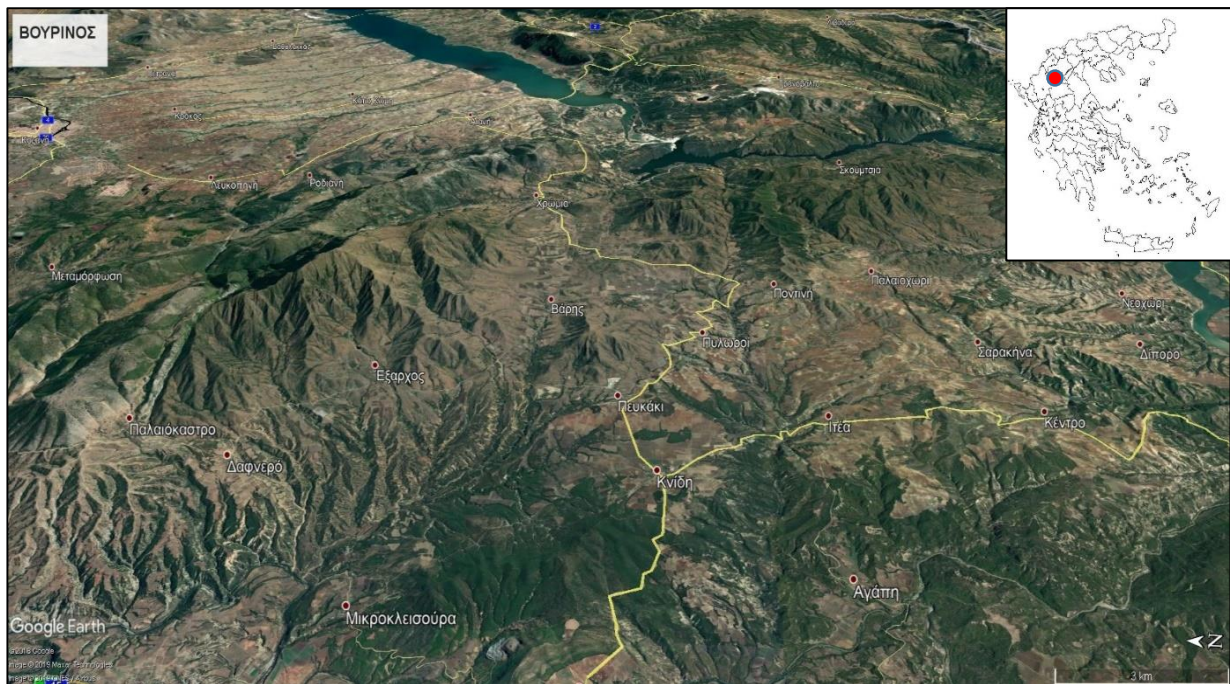
(εκφράζει το % ποσοστό της χρήσιμης ουσίας που χάθηκε στο απόρριμμα)

$$J = 100 - R \quad (17)$$

---

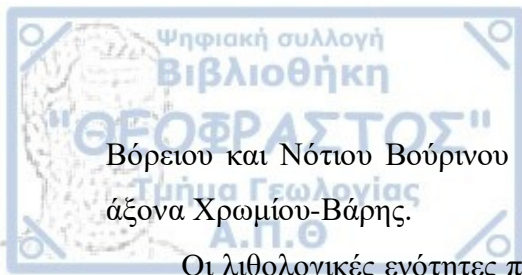
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΒΟΥΡΙΝΟΥ

Η οροσειρά του Βούρινου τοποθετείται γεωγραφικά στα όρια μεταξύ των Περιφερειακών Ενοτήτων Γρεβενών & Κοζάνης, στη Δυτική Μακεδονία (Εικ. 24), καταλαμβάνοντας μήκος περίπου 30 χλμ. και πλάτος περίπου 12 χλμ. και μία συνολική έκταση περίπου 450 km<sup>2</sup>. Γενικά οριοθετείται από την κοίτη του ποταμού Αλιάκμονα Ανατολικά, ενώ Νότια, Δυτικά και Βόρεια από την «ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟ» Τμήμα Κοζάνη - Γρεβενά και θεωρείται ως φυσική επέκταση του Ασκίου Όρους προς Νότο.



Εικόνα 24. Άποψη της οροσειράς του Βούρινου (google earth images).

Μορφολογικά, ο Βούρινος παρουσιάζει ομαλό ανάγλυφο, χωρίς πολλές εξάρσεις. Τα μεγαλύτερα υψόμετρα παρατηρούνται στο βόρειο κυρίως τμήμα της οροσειράς η οποία και είναι μέρος του Ευρωπαϊκού Δικτύου NATURA 2000. Η υψηλότερη από τις κορυφές του Βούρινου με υψόμετρο περίπου 1.866 m είναι η ομώνυμη κορυφή. Ως φυσικό όριο μεταξύ



Βόρειου και Νότιου Βούρινου θεωρείται η ρηξιγενής ζώνη με διεύθυνση Α-Δ, στον οδικό άξονα Χρωμίου-Βάρης.

Οι λιθολογικές ενότητες που απαντούν στην περιοχή του Βούρινου περιλαμβάνουν μία ευρεία ποικιλία σχηματισμών διαφορετικής ηλικίας, γι' αυτό άλλωστε και θεωρείται ως μια πλήρης οφιολιθική σειρά πετρωμάτων (Anonymous 1972) του συστήματος της Μεσοζωικής Τηθύος της Ανατολικής Μεσογείου (Εικ. 25).

Ο όγκος του Βούρινου έχει επίσης τρία «δορυφορικά» συμπλέγματα όμοιου προσανατολισμού:

- της Ροδιανής (πραγματοποιούνταν εκμετάλλευση χρωμίτη).
- της Καλαμιάς – Αλωνακίων – Ν. Νικόπολης με διάσπαρτες εμφανίσεις από τη Σιάτιστα έως το Δρέπανο Κοζάνης (όπου γινόταν και εκμετάλλευση χρωμίτη, μαρμαροψηφίδας, μαρμάρου και διακοσμητικών πετρωμάτων) και
- του Τρανοβάλτου – Μικροβάλτου με τις γνωστές εκμεταλλεύσεις του αμιάντου.

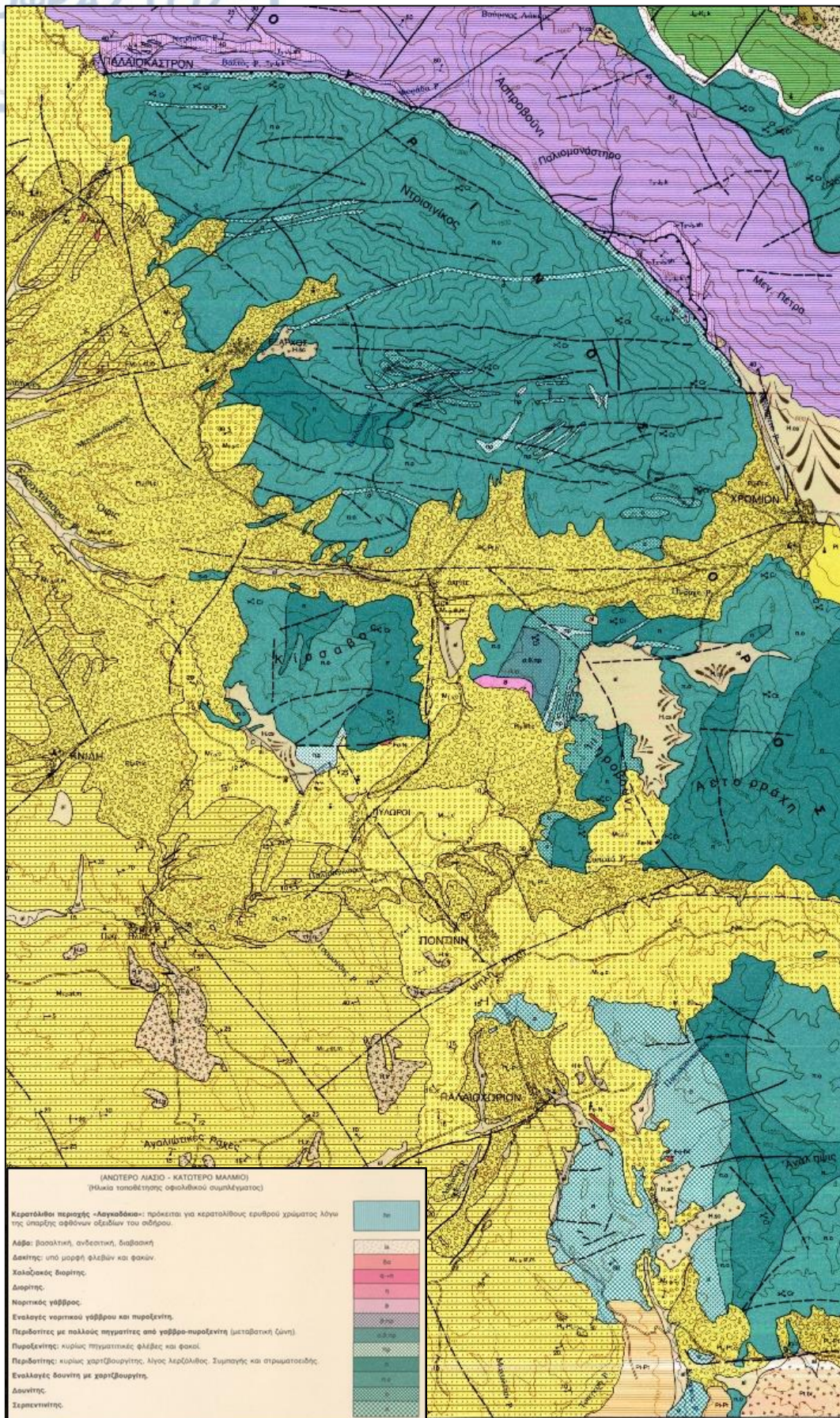
Όλη η επιφάνεια καλύπτεται κυρίως από χαρακτηριστικά υπερβασικά πετρώματα (χαρτζβουργίτες, δουνίτες, πυροξενίτες), ενώ σε μικρά τμήματα (Ταξιάρχης, Κίσσαβος) κάνει την εμφάνισή της η μαγματική σειρά με γάββρους, νορίτες και φλέβες βασάλτη και διαβασικές λάβες (Μικροκλεισούρα – Λαγκαδίκια Γρεβενών).

Το οφιολιθικό σύμπλεγμα του Βούρινου είναι επωθημένο προς τα ΒΑ πάνω σε μια μεταϊζηματογενή ακολουθία Τριαδικής ηλικίας με ανθρακικά πετρώματα ηπειρωτικής πλατφόρμας. Σε πολλά σημεία, από το βόρειο μέχρι το νότιο του τμήμα του συμπλέγματος η επώθηση είναι εμφανής.

Η βάση του οφιολιθικού συμπλέγματος επικάθεται στους ασβεστόλιθους της Πελαγονικής Ζώνης και επί μιας λεπτής λόγω τεκτονισμού περιθωριακής λιθολογικής ζώνης Ιουρασικής ηλικίας που καλείται σχηματισμός Άγιου Νικολάου (Naylor & Harle 1976).

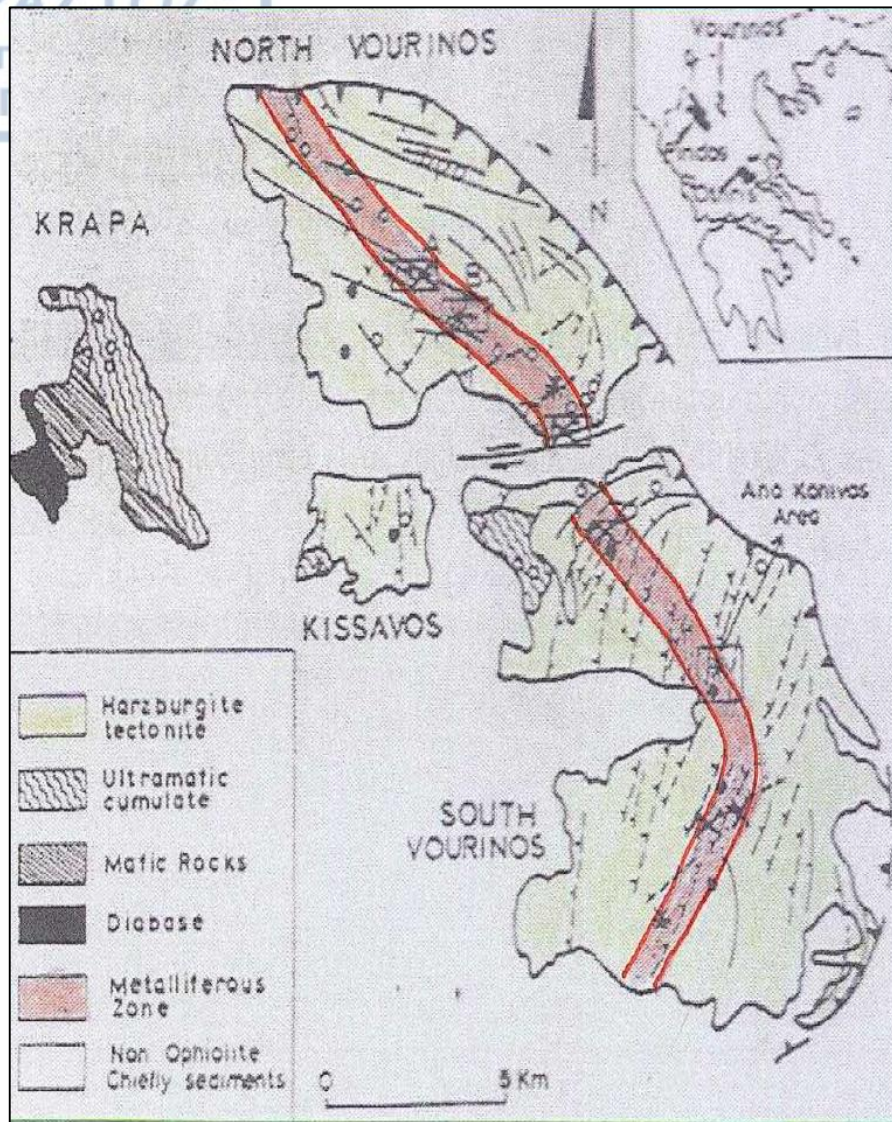
Μία «μεταλλοφόρος ζώνη» παρουσιάζεται στο μέσο περίπου της μανδουακής σειράς καθ' όλο το μήκος του οφιόλιθου (Εικ. 26). Έχει πάχος περίπου 0,5-1 km και εκτός της υψηλής συγκέντρωσης χρωμίτη χαρακτηρίζεται και από την ύπαρξη πολλών δουνιτικών σωμάτων που προσανατολίστηκαν κατά την τοποθέτηση του οφιόλιθου με τη μορφή αποκολλημένων τεμαχίων (Βραχάτης κ.ά. 1986). Συνηθισμένη είναι η παρουσία μυλωνιτικής παραμόρφωσης (Ross et al. 1980), η οποία δημιουργείται από την αποκόλληση του τεμάχους, καθώς και από την παραμόρφωση κατά την διάρκεια τοποθέτησης του οφιόλιθου (Roberts et al. 1988, Grivas et al. 1993, Rassios 1981).





Εικόνα 25. Απόσπασμα Γεωλογικού Χάρτη της Ελλάδας «Φύλλο ΚΝΙΔΗ» (ΓΓΜΕ 1993).





**Εικόνα 26.** Μεταλλοφόρος ζώνη δουνίτη που φιλοξενεί τα κοιτάσματα χρωμίτη (Grivas et al. 1993)

Η μεταλλοφορία χρωμίτη απαντά μέσα στο δουνίτη σε ποικιλία σχημάτων, μεγέθους και υφής (συμπαγής, σλίρεν, διάσπαρτος, λεοπαρδάλεως). Ορισμένα κοιτάσματα χρωμίτη φιλοξενούνται σε σερπεντινίτες, οι οποίοι έχουν προκύψει από τη σερπεντινίωση του αρχικού δουνίτη (Filippidis 1996, 1997b, Filippidis et al. 2000). Τα κοιτάσματα που έχουν εντοπιστεί είναι κατά βάση σλίρεν («schlieren») με χαμηλή περιεκτικότητα σε ολικό  $Cr_2O_3$ , κυμαινόμενη από 12 έως 25% κ.β. και μικρά πλούσια κοιτάσματα συμπαγούς χρωμίτη με περιεκτικότητα σε ολικό  $Cr_2O_3$  από 35 έως 52% κ.β., κυρίως στην περιοχή του Βοϊδόλακκα στον Β. Βούρινο και στη Μουτσάρα στο Ν. Βούρινο, με μικρά όμως αποθέματα. Στο οφιολιθικό σύμπλεγμα του Βούρινου έχουν περιγραφεί περισσότερες από 700 εμφανίσεις χρωμιτών (Βραχάτης και Γρίβας, 1980.) Η πιο σημαντική μεταλλοφορία όμως εμφανίζεται στο νότιο Βούρινο και αναφέρεται στο γνωστό μεταλλείο του Ξερολείβαδου (Σκούμτσα). Στο νότιο Βούρινο υπάρχει

επίσης το μεταλλείο Αετορράχες, ενώ μικρότερης σημασίας είναι οι μεταλλοφορίες στις περιοχές Μουτσάρα, Σκούμτσα (Π25), Ποταμιά και στον Κονιβό.

Οι κυριότερες θέσεις εμφάνισης κοιτασμάτων χρωμίτη του οφιολιθικού συμπλέγματος του Βούρινου με τα χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίν. 10). Σύμφωνα με τους Tsirambides & Filippidis (2012) η ακαθάριστη αξία (gross value) των εκτιμώμενων αποθεμάτων του χρωμίτη από το Βούρινο Κοζάνης εκτιμάται στα 2,552 δισεκατομμύρια ευρώ.

Σε γενικές επίσης γραμμές ο όγκος του Βούρινου (ΙΓΜΕ, 2003) δείχνει ότι είναι ένας δυναμικός ξενιστής χρωμίτη, ολιβινίτη, τιτανο-μαγνητίτη, χρυσού, πλατινοειδών και αντιολισθηρών αδρανών. Η διάβρωση υπερβασικών πετρωμάτων οδήγησε στην δημιουργία στρώσεων Ni-λατεριτών στους πρόποδες του Βούρινου. Η πολύ λεπτή επίσης ανώτερη στρωματογραφική σειρά αποτελεί ένα σοβαρό στόχο για έρευνα μεταλλοφορίας χαλκού (ΙΓΜΕ, 2003).

**Πίνακας 10.** Θέσεις και χαρακτηριστικά των κυριότερων χρωμιτικών κοιτασμάτων του οφιολιθικού συμπλέγματος του Βούρινου (Κωνσταντοπούλου 1990, Σταμούλης 1990, Tsirambides & Filippidis 2012).

Θέση	Τύπος	Εκτιμώμενα αποθέματα (τόνοι)	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (% κ.β.)	Περιβάλλον πέτρωμα
Ξερολείβαδο	s	-	-	Δουνίτης
Μουτσάρα	s/σ	25.000 - 50.000	30-40	-
Σκούμτσα	s	50.000	18-20	-
Κονιβός	s	100.000-200.000	10	-
Αετορράχες	s	250.000-300.000	16	Δουνίτης
Κοκκινόδρομος	s/σ	< 20.000	-	-
Ντουμαράχη	λ/σ	< 10.000	-	-
Ριζό	s/δ	400.000-435.000	14-18	-
Κουρσούμια	λ/σ/s	250.000	12	Δουνίτης
Κερασίτσα	δ	250.000	12	Δουνίτης
Βοϊδόλακκας	s/σ	180.000-220.000	18-40	Δουνίτης
Κίσσαβος	σ	< 30.000	40	-
Ροδιανή	σ	45.000	41	-
Τσούκα	s/λ	< 10.000	-	-
Ταξιάρχης	s/σ	< 10.000	-	-

s: schlieren, σ: συμπαγής, λ: λεοπαρδάλεως, δ: διάσπαρτο



Οι ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν τα χρωμιτικά σώματα, τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, ο τεκτονισμός και οι εξαλλοιώσεις συνέβαλλαν στο να εφαρμοστούν σχεδόν όλες οι γνωστές μέθοδοι εκμετάλλευσης. Επιφανειακές εκμεταλλεύσεις πραγματοποιήθηκαν αρχικά στο Ξερολείβαδο, στις Αετορράχες (Ν. Βούρινος) και στο Ριζό (Β. Βούρινος), ενώ στις υπόλοιπες θέσεις εφαρμόστηκαν μέθοδοι υπόγειας εκμετάλλευσης όπως:

- Η μέθοδος των διαδοχικών ορόφων κενών μετώπων (sub-level stoping)
- Η μέθοδος συμπτυσσόμενου μετώπου (Shrinkage method) στο Ξηρολίβαδο.
- Η μέθοδος των εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων (cut and fill method) με ξηρή λιθογόμωση, εφαρμόστηκε σε χαμηλότερα υψόμετρα του μεταλλείου Ξηρολιβάδου (755 – 800 μ. περ.)
- Η μέθοδος της υδραυλικής λιθογόμωσης (drift and fill) εφαρμόστηκε πιο χαμηλά στο μεταλλείο Ξηρολιβάδου (700 – 755μ.), στον Κεντρικό και Νότιο Τομέα με τα λεπτομερή απορρίμματα του εργοστασίου εμπλουτισμού αναμεμειγμένα με τσιμέντο.
- Συνδυασμοί των παραπάνω μεθόδων.

Η εκμετάλλευση των κοιτασμάτων χρωμίτη ξεκίνησε στις αρχές του περασμένου αιώνα και η Ελλάδα συγκαταλεγόταν ανάμεσα στις κύριες χώρες παραγωγής χρωμίτη που τροφοδοτούσαν την αγορά των ΗΠΑ και της Ευρώπης. Στους παρακάτω Πιν. 11 & 12 φαίνονται οι παγκόσμιες παραγωγές χρωμίτη και οι εισαγωγές των ΗΠΑ, όπως παρουσιάζονται από την U.S. Geological Survey (<https://www.usgs.gov/centers/nmic/chromium-statistics-and-information> και <http://images.library.wisc.edu/EcoNatRes/EFacs2/MineralsYearBk/MinYB193132/reference/econatres.minyb193132.lsmith.pdf>).

Αρχικά, η εκμετάλλευση ξεκίνησε στις περιοχές Δομοκού Φθιώτιδας και Ερέτριας Φαρσάλων, γρήγορα όμως και από το 1920 άρχισε η εκμετάλλευση των κοιτασμάτων της Ροδιανής, του Βοϊδόλακκα και του Ξερολειβάδου τροφοδοτώντας με χρωμίτη κυρίως τη Γερμανία και τις ΗΠΑ, καθιστώντας έτσι την Ελλάδα έναν από τους κύριους παραγωγούς της παγκόσμιας αγοράς χρωμίτη.

Πέρα από τα παραπάνω αξίζει να σημειωθεί ότι σήμερα, εκτός του χρωμίτη στην ευρύτερη περιοχή του Βούρινου έχουν ενεργοποιηθεί την τελευταία εικοσαετία και λατομεία ολιβίνη και ατταπουλγίτη.





Πίνακας 11. Παγκόσμια παραγωγή χρωμίτη κατά τα έτη 1900-1958 (USGS <https://www.usgs.gov/centers/nmic/chromium-statistics-and-information>).

[Compiled by Pearl J. Thompson and Berenice B. Mitchell]

Year	World total <sup>1</sup>	North America			South America <sup>2</sup>	Europe					Asia	
		United States	Cuba	Other <sup>3</sup>		Albania	Greece	U.S.S.R.	Yugo-slavia <sup>4</sup>	Other <sup>5</sup>	Cyprus	India
1900	58,600	157		2,335			6,173	21,105	110			
1901	96,400	412		1,274			5,346	24,437	557			
1902	94,000	353		899			12,875	21,666	298			
1903	105,200	168		3,509			9,345	18,101	162			287
1904	130,500	138		6,074			17,009	29,294	308			4,028
1905	158,600	25		8,575			9,811	29,819	205			3,032
1906	176,900	120		9,035			12,710	20,959	353			4,900
1907	123,500	325		7,196			12,980	29,052	181			8,147
1908	73,800	402		7,225			4,795	12,070	551			5,314
1909	118,700	670		2,470			10,582	24,480	366			10,360
1910	119,500	280		299			10,428	15,856	353			1,946
1911	89,400	134		157			6,087	1,323	276			4,260
1912	135,400	225					7,130	23,446	220			3,236
1913	162,100	285					6,991	16,500	336			6,357
1914	172,600	662		136			7,781	16,500	233		202	6,595
1915	204,300	3,675		12,341			11,486	16,500	408		386	4,219
1916	309,800	52,678	10 39	27,517			10,891	16,500	1,065	3,039		22,579
1917	289,700	48,971	10 19	36,725			7,441	15,400	1,990	4,382		30,308
1918	343,800	92,322	10 9,880	21,994	10 19,997		12,001	15,400	551	6,164		64,702
1919	188,400	5,688	10 16,196	8,541	10 5,376		8,878	4,409	551	675		40,812
1920	189,400	2,802	10 795	11,015	10 3,865		8,137	3,048	11	1,232		30,017
1921	147,400	316	10 672	2,798			8,850	4,423	11			35,934
1922	154,100	398		767			10,156	934		700		25,511
1923	226,200	255	10 11,670	3,558			16,345	3,311		717		60,752
1924	321,400	323	10 21,915				16,602	13,111			10 3,143	50,918
1925	339,000	121	10 33,410				8,906	33,192	13,404	10 987	10 2,228	41,946
1926	400,000	158	10 40,342	10 60	10 1,633		22,100	33,468	17,618	19	10 717	37,388
1927	441,000	225	10 19,021		10 2,006		19,085	21,268	9,653	423	10 797	64,072
1928	498,000	740	10 37,752		10 22		23,097	32,558	18,384			50,910
1929	700,000	301	10 59,303	126	10 77		26,691	58,300	47,424		10 2,737	55,513
1930	616,000	89	10 45,900	10 99	10 11		25,796	73,546	56,853		10 1,730	56,766
1931	423,000	300	10 16,752	10 101			6,210	73,855	64,357		10 224	22,308
1932	330,000	173	10 551	78			1,714	72,642	43,146	451	10 1,102	20,009
1933	451,000	945	10 26,625	10 2,338			16,297	120,853	28,933	547		17,389
1934	681,800	413	10 55,294	10 999			33,834	140,434	53,475	140	1,082	24,165
1935	855,000	577	10 53,472	1,144	10 6		32,829	195,100	58,452	358	1,321	43,822
1936	1,173,000	301	10 73,359	923	10 4,289		52,191	239,201	89,573	298	560	56,019
1937	1,416,000	2,599	10 104,270	4,271	10 3,285		58,004	220,000	66,064	3,121	1,809	69,784
1938	1,257,000	909	37,035	627	10 1,030	10 550	46,808	220,000	64,432	3,005	6,247	49,447
1939	1,815,000	4,048	65,656	622	10 2,918	10 3,400	62,982	220,000	85,617	5,871	10 1,232	55,033
1940	1,605,000	2,982	67,708	486	10 5,040	10 15,400	32,762	330,000	78,285	7,622	10 2,800	62,172
1941	1,531,000	14,268	179,509	3,154	10 6,618	10 22,000	17,902	375,000	77,000	6,500	10 5,909	58,162
1942	2,238,000	112,877	313,779	12,058	10 6,598	10 42,000	26,795	410,000	110,000	7,600	10 3,286	56,534
1943	2,004,000	180,130	360,385	30,007	10 8,588	10 34,000	17,098	360,000	72,000	7,500	10 3,803	37,246
1944	1,538,000	46,829	211,788	27,161	10 5,404		20,167	330,000	11,000	7,000	10 617	44,932
1945	1,170,000	13,973	190,287	6,263	10 4,949		2,660	330,000	6,600	1,840	10 1,179	34,879
1946	1,386,000	4,107	192,188	3,782	10 302		9,989	330,000	75,000	675	10 1,276	50,167
1947	1,910,000	948	176,498	2,861			2,910	530,000	80,000	2,400	10 5,524	38,833
1948	2,350,000	8,619	128,556	2,205	10 1,807	10 18,300	1,653	680,000	60,019	2,000	10 7,605	25,252
1949	2,370,000	433	107,330	681	10 3	10 44,000	4,106	385,000	120,284	11,000	10 16,397	21,746
1950	2,665,000	494	72,654	319	3,567	10 87,000	13,929	550,000	126,475	23,500	10 20,328	18,737
1951	3,170,000	7,056	87,154	1,264	2,683	10 50,000	27,925	660,000	108,833	23,700	10 13,943	18,706
1952	4,233,000	21,304	68,132	116	2,942	10 57,000	35,452	680,000	118,192	20,000	10 14,867	40,530
1953	4,265,000	65,817	77,205	411	3,942	10 52,000	40,520	660,000	139,850	21,000	10 8,115	72,543
1954	3,700,000	163,365	80,011	146	2,163	10 110,000	29,508	690,000	137,216	21,000	10 10,080	50,998
1955	4,020,000	153,288	85,107	320	4,562	10 135,000	27,902	750,000	139,119	21,000	10 9,599	100,071
1956	4,570,000	107,662	59,243	979	4,636	10 154,000	36,920	815,000	130,913	21,000	10 5,858	58,009
1957	6,125,000	166,137	127,126	1,100	8,748	10 184,000	82,700	850,000	132,570	23,000	10 4,878	87,908
1958	4,060,000	148,795	82,801	1,100	2,899	10 221,800	25,560	880,000	126,188	22,000	10 13,280	67,688



Πίνακας 12. Εισαγωγές χρωμίτη στις ΗΠΑ κατά τα έτη 1928-1932 (USGS,  
<https://www.usgs.gov/centers/nmic/chromium-statistics-and-information>).

*Crude chromite imported into the United States, 1928-32, by countries*

[General imports]

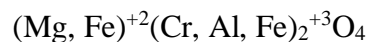
Country	1928 (long tons)	1929 (long tons)	1930 (long tons)	1931 (long tons)	1932		
					Long tons		Value
					Gross weight	Chro- mium content	
<b>Africa:</b>							
British—Union of South	15,745	17,545	24,376	5,379			
French—Algeria and Tunisia					2,206	1,303	\$52,944
Portuguese:							
Mozambique	112,073	167,381	145,709	68,291	15,496	7,324	309,678
Other	4,000		2,000	2,000			
Belgium		1,367	1,595	482			
Brazil	320	462	10				
Cuba	33,707	52,949	40,982	14,957			
Germany		1,700					
Greece	17,152	26,647	45,822	28,893	16,395	7,852	370,811
Guatemala			89	91			
India (British)	17,591	21,033	14,542	8,664	7,857	3,780	76,743
Malta, Gozo, and Cyprus	600						
Netherlands	50						
Oceania (French)	15,154	26,846	31,022	39,579	11,550	5,198	86,316
Soviet Russia in Europe			13,878	17,736	4,800	2,257	51,710
Turkey in Asia	200	1,700	2,591	2,198	17,602	9,079	360,820
United Kingdom			4,001	24,258	13,237	7,037	316,711
	216,592	317,630	326,617	212,528	89,143	43,830	1,625,733

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

### 3.1. Γενικά για το χρωμίτη

Ο χρωμίτης είναι μεταλλικό ορυκτό της ομάδας των σπινελίων, με γενικό χημικό τύπο  $AB_2O_4$  και κρυσταλλώνεται στο κυβικό σύστημα (Deer et al. 1962, 1992, Ramdohr 1980). Τις θέσεις (A) καταλαμβάνουν δισθενή μεταλλικά ιόντα όπως  $Fe^{+2}$ , Mg και Mn, και ενίοτε Zn και Ni, ενώ τις θέσεις (B) καταλαμβάνουν τρισθενή μεταλλικά ιόντα που εισέρχονται στην κρυσταλλική δομή των σπινελίων και κυρίως τα Al,  $Fe^{+3}$ , Cr και ενίοτε Ti και V.

Τις θέσεις A και B μπορεί να καταλαμβάνει το ίδιο στοιχείο, με διαφορετικό όμως σθένος, όπως στην περίπτωση του μαγνητίτη ( $Fe^{+2}Fe^{+3}_2O_4$ ). Ο γενικά αποδεκτός τύπος που χαρακτηρίζει τον χρωμίτη είναι:

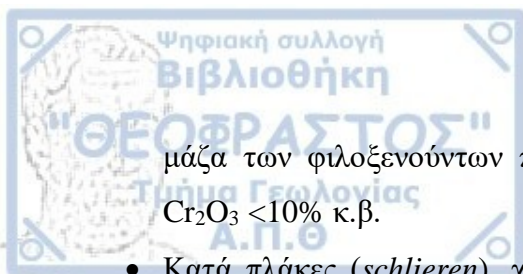


Ανάλογα με τις αντικαταστάσεις των ιόντων σχηματίζονται τα ορυκτά: Σιδηροχρωμίτης ( $FeCr_2O_4$ ) με 32% FeO και 68%  $Cr_2O_3$ , Μαγνησιοχρωμίτης ( $MgCr_2O_4$ ) με 21% MgO και 79%  $Cr_2O_3$ , Σπινέλιος ( $MgAl_2O_4$ ), Σιδηροσπινέλιος ( $FeAl_2O_4$ ), Μαγνησιοφερρίτης ( $MgFe_2O_4$ ) και Μαγνητίτης ( $Fe_3O_4$ ).

Τα μέλη της ομάδας των σπινελίων δημιουργούν μεταξύ τους στερεά διαλύματα σε διάφορες αναλογίες, όπως π.χ., η ισόμορφη παράμειξη χρωμίτη-μαγνησιοχρωμίτη. Τα ακραία μέλη των τριών ισόμορφων σειρών που δημιουργεί η ομάδα των σπινελίων είναι ο μαγνητίτης ( $Fe_2O_3 \cdot FeO$ ), ο σπινέλιος ( $Al_2O_3 \cdot MgO$ ) και ο χρωμίτης ( $Cr_2O_3 \cdot FeO$ ). Ο χρωμίτης αποτελεί συγχρόνως και την μοναδική φάση μαζί με τον μαγνησιοχρωμίτη, που σχηματίζει το Cr ως κύριο στοιχείο.

Ιστολογικά, ο χρωμίτης διακρίνεται σε τέσσερις κυρίως τύπους (Irvine 1965, 1967, 1977, Zachos 1969, Coleman 1977, Lago et al. 1982, Moores 1982, Paktunc 1990, Leblanc and Nicolas 1992, Arai 1997)

- Συμπαγής (*massive*), χαρακτηρίζει τα κοιτάσματα με πυκνή μεταλλοφορία, με περιεκτικότητα σε  $Cr_2O_3$  από 30 έως 55% κ.β.
- Διάσπαρτος (*disemminated*), αφορά στις εμφανίσεις των αραιά κατανεμημένων μέσα στη



μάζα των φιλοξενούντων πετρωμάτων κρυστάλλων χρωμίτη, με περιεκτικότητα σε  $\text{Cr}_2\text{O}_3 < 10\%$  κ.β.

- Κατά πλάκες (*schlieren*), χαρακτηρίζει τις εναλλασσόμενες συγκεντρώσεις χρωμίτη-ολιβίνη-σερπεντίνη κατά παράλληλα επίπεδα, με περιεκτικότητα σε  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  από 17 έως 22% κ.β. και
- Λεοπαρδάλεως ή οζώδης (*nodular*), ο οποίος χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις πολυάριθμες σφαιρόμορφες συναθροίσεις χρωμιτικών κρυστάλλων, οι οποίες συνήθως διευθετούνται σχεδόν κατά παράλληλες σειρές μέσα στο ίδιο χρωμιτικό σώμα με περιεκτικότητα σε  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  έως 40% κ.β.

Ανάλογα με τη χρήση του και σε συνάρτηση με τη χημική του σύσταση ο χρωμίτης διακρίνεται σε δύο τύπους, τον μεταλλουργικό (*metallurgic*) και τον πυρίμαχο (*refractory*) και οι κυριότερες χρήσεις είναι:

- Μεταλλουργία για την παραγωγή σιδηροχρωμίου, χρωμιοχάλυβα, κραμάτων Fe-Ni/Cu-Cr (67-75% της παγκόσμιας παραγωγής).
- Χημική βιομηχανία για την παρασκευή χρωμιούχων αλάτων, επιχρωμιώσεις, χρωματουργία, υφαντουργία κ.ά. (11 – 15% της παγκόσμιας παραγωγής).
- Πυρίμαχα υλικά για την παραγωγή πυριμάχων τούβλων και μαζών (11 – 18% της παγκόσμιας παραγωγής).
- Άμμοι χυτηρίων (περίπου 3% της παγκόσμιας παραγωγής).

Αναφορικά με τις πιο πάνω χρήσεις, το τελικό προϊόν της εκμετάλλευσης και εμπλουτισμού, θα πρέπει να πληροί κάποιες ελάχιστες προδιαγραφές. Στους πίνακες 13-15 δίνονται ενδεικτικά τα ελάχιστα απαιτούμενα χαρακτηριστικά του συμπυκνώματος χρωμίτη (Indian Minerals Yearbook 2015).

Τα στοιχεία των παρακάτω πινάκων διαφοροποιούνται ελαφρώς ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε μεταλλουργικής βιομηχανίας και στις περισσότερες περιπτώσεις αποτελούν αντικείμενο διαπραγμάτευσης. Η περιεκτικότητα όμως σε  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  και ο λόγος Cr/Fe, είναι οι κρισιμότεροι παράγοντες και η μη επίτευξη των ελαχίστων ορίων καθιστά το προϊόν αντικοινωνικό και κατ' επέκταση την εκμετάλλευση ασύμφορη. Συγκρίνοντας τα στοιχεία των παραπάνω πινάκων με τις χημικές αναλύσεις του χρωμιτίτη όπως αυτός εξορύσσεται από το μεταλλείο σε παγκόσμιο επίπεδο, αλλά και σε Ελληνικό (συνήθως  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  15-25 % κ.β., Fe 8-14% κ.β., Fe/Cr 1.9,  $\text{SiO}_2$  20-25% κ.β., MgO 30-40% κ.β. και L.O.I. 8-12% κ.β.) προκύπτει ξεκάθαρα ότι θα ήταν αδύνατη η εκμετάλλευση των χρωμιτικών κοιτασμάτων (και στην Ελλάδα) χωρίς την εφαρμογή μεθόδων εμπλουτισμού.

**Πίνακας 13.** Προδιαγραφές χρωμίτη για τη μεταλλουργική βιομηχανία (Indian Minerals Yearbook 2015).

Παράμετρος (% κ.β. επί ξηρού)	Χαμηλού άνθρακα σιδηροχρώμιο	Υψηλού άνθρακα σιδηροχρώμιο	Πύριτιο-χρώμιο	Charge χρώμιο
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , min.	48	48	48	44
Fe ολικός(ως FeO), max.	15	16	15	18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , max	13	13	13	10
SiO <sub>2</sub> , max.	5	8	10	12
CaO, max.	5	5	5	5
MgO, max.	14	16	14	12
S* (ως SO <sub>3</sub> ), max.	0,1	0,1	0,1	0,14
P* (as P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ), max.	0,005	0,02	0,02	0,2
Cr:Fe, min	3:1	2,8:1	3:1	1,6:2
MgO:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (εύρος)	–	1,2-1:4	–	–

Τα παραπάνω όρια και κυρίως ως προς το S και τον P, διαφοροποιούνται ανάλογα με τις ανάγκες και τις μεθόδους που χρησιμοποιεί κάθε μεταλλουργικό εργοστάσιο και πολλές φορές αποτελούν αντικείμενο ειδικής συμφωνίας

**Πίνακας 14.** Προδιαγραφές χρωμίτη για την πυρίμαχη βιομηχανία (Indian Minerals Yearbook 2015).

Παράμετρος (% κ.β.)	Ποιότητα – I	Ποιότητα – II	Ποιότητα – III
L.O.I., max.	1,5	1,5	1,5
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , min.	52	50	48
Fe ολικός (ως FeO), max.	16	18	18
SiO <sub>2</sub> , max.	3	7	9
MgO, max.	15	15	15

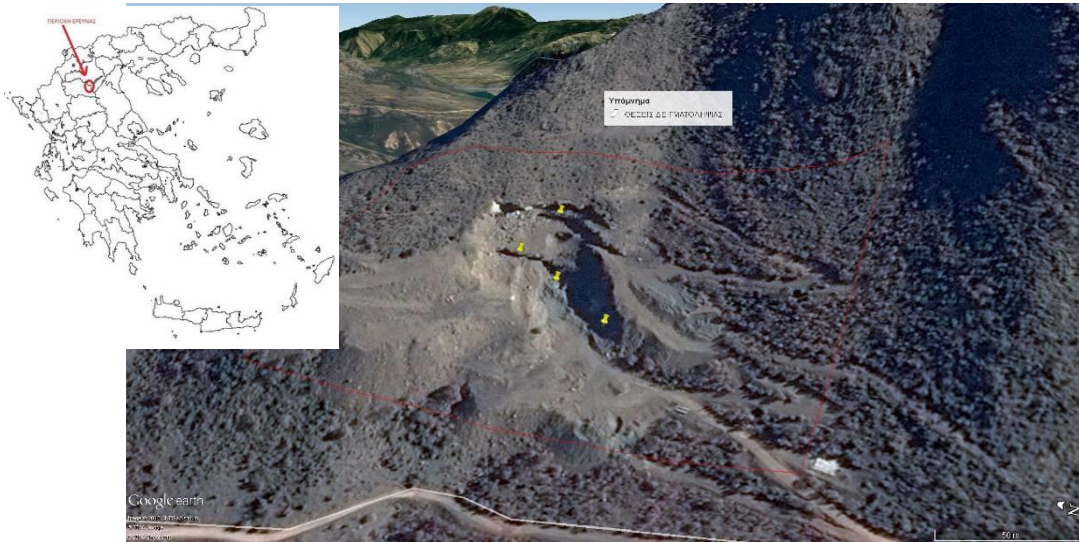
**Πίνακας 15.** Προδιαγραφές χρωμίτη για άμμο χυτηρίων (Indian Minerals Yearbook 2015).

Παράμετρος	(%) κ.β.
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> min.	44
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> max.	26
SiO <sub>2</sub> max.	4
CaO max.	0,5
MgO	Κατόπιν συμφωνίας
Αργίλος, max.	0,75
L.O.I. max.	1,0
Υγρασία, max.	0,5
pH	7,0 – 9,0



### 3.2. Δειγματοληψία

Το Νοέμβριο του 2015 διενεργήθηκε στην υπόψη περιοχή υπαίθρια έρευνα προκειμένου να διαπιστωθούν οι συνθήκες της περιοχής. Πραγματοποιήθηκε λήψη τεσσάρων (4) δειγμάτων, συνολικού βάρους 60 kg περίπου και μεταφέρθηκαν στα εργαστήρια του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας για περαιτέρω μελέτη. Η περιοχή έρευνας και οι θέσεις δειγματοληψίας φαίνονται στην Εικ. 27, ενώ τα δείγματα συλλέχθηκαν από θέση στην Εικ. 28.



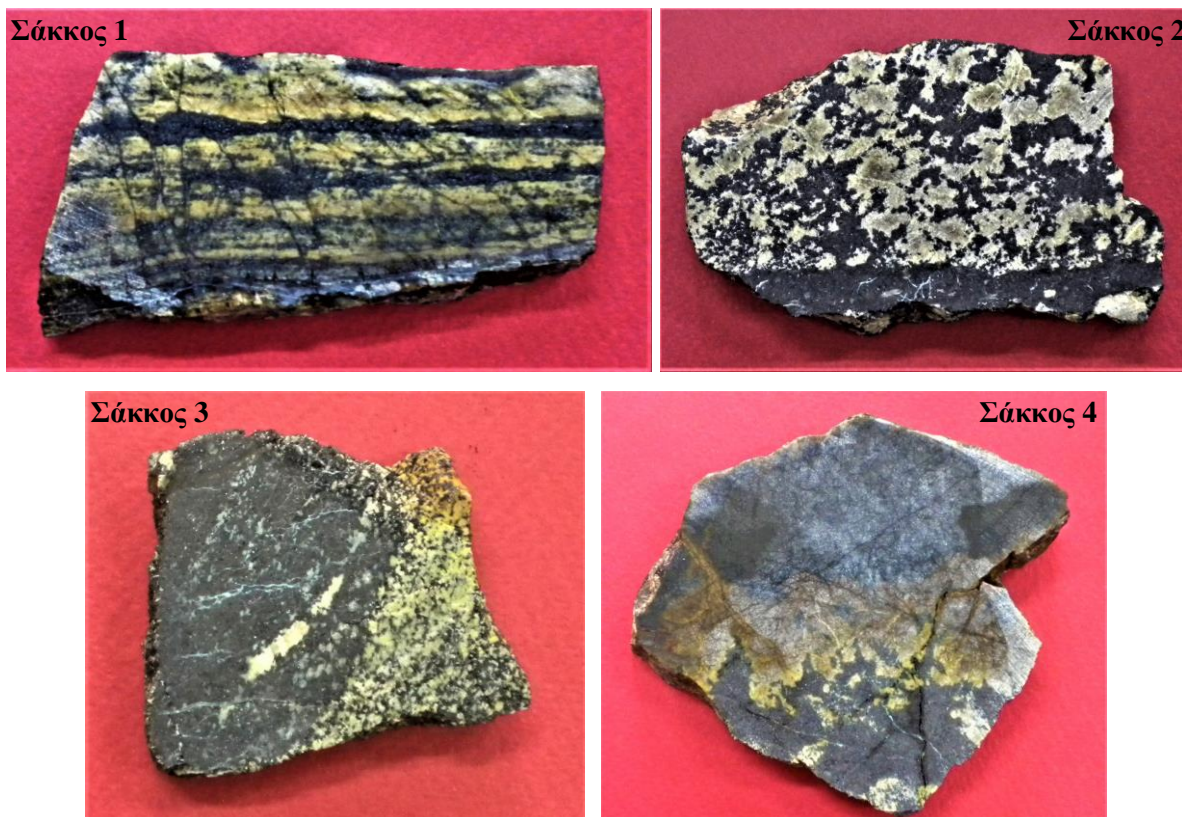
Εικόνα 27. Θέσεις δειγματοληψίας στη περιοχή «Αετορράχες» Βόρινου (Google earth images).



Εικόνα 28. Παλιά μεταλλευτική στοά από όπου συλλέχθηκαν τα εξεταζόμενα δείγματα.



Όπως διαπιστώνεται από τη μακροσκοπική εικόνα των δειγμάτων που συλλέχθηκαν (Εικ. 29), το εξεταζόμενο μετάλλευμα χρωμίτη από τις Αετορράχες Κοζάνης είναι κατά θέσεις ταινιωτό (schlieren) (Σάκκος 1&4), διάσπαρτο (Σάκκος 2) ή συμπαγές (Σάκκος 3).



Εικόνα 29. Μακροσκοπική εικόνα των δειγμάτων που συλλέχθηκαν.

Σύμφωνα με τους Economidou et al. (1986) στο Βούρινο υπάρχουν όλες οι μορφές κοιτασμάτων χρωμίτη (διάσπαρτος, ταινιωτός, λεοπαρδάλεως, συμπαγής) που είναι τυπικό χαρακτηριστικό οφειολιθικού χρωμιτίτη, ενώ σύμφωνα με τους Konstantopoulou & Economidou-Eliopoulos (1990) η πιο συνηθισμένη μορφή είναι ο ταινιωτός χρωμίτης (schlieren) που εμφανίζεται με εναλλασσόμενες ταινίες συμπαγούς χρωμίτη με διάσπαρτο χρωμίτη και δουνίτη στα μεταλλεία του Ξερολείβαδου και των Αετορραχών. Σύμφωνα με τους Grieco & Merlini (2011) η μορφή του χρωμίτη στις Αετορράχες είναι συχνά συμπαγής και λιγότερο ταινιωτός και διάσπαρτος

### 3.2. Μικροσκοπική μελέτη

Από τα δείγματα που συλλέχθηκαν κατασκευάστηκαν λεπτές στιλπνές τομές για την εξέταση των ιστολογικών και ορυκτολογικών χαρακτηριστικών του μεταλλεύματος σε μεταλλογραφικό και πετρογραφικό μικροσκόπιο Zeiss τύπου Axioskop 40 με ενσωματωμένη

φωτογραφική μηχανή Canon τύπου PowerShot A640 για την αυτόματη λήψη φωτογραφιών (Εικ. 30). Επιπλέον, αντιπροσωπευτικό δείγμα από κάθε κοκκομετρικό κλάσμα τόσο μετά τη θραύση και ταξινόμηση, όσο και μετά τον εμπλουτισμό με μαγνητικό διαχωριστή, αφού πλύθηκε και ξηράνθηκε, εξετάστηκε σε στερεοσκόπιο τύπου Zeiss εφοδιασμένο με φωτογραφική μηχανή Canon τύπου PowerShot A620 (Εικ. 30) προκειμένου να εκτιμηθεί ο βαθμός αποδέσμευσης του μεταλλεύματος.

Η μικροσκοπική μελέτη έγινε κάνοντας χρήση του μεταλλογραφικού και πετρογραφικού μικροσκοπίου, του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας του Α.Π.Θ., ενώ η στερεοσκοπική μελέτη έγινε στο στερεοσκόπιο του διατμηματικού εργαστηρίου ηλεκτρονικής μικροσκοπίας του Α.Π.Θ.

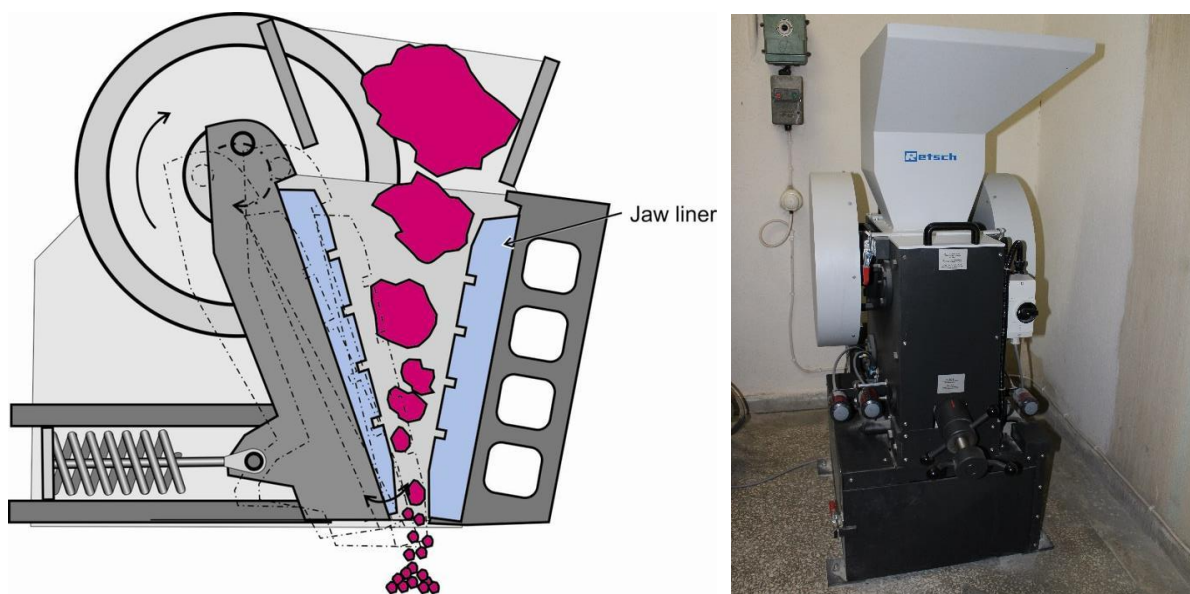


**Εικόνα 23-24.** Αριστερά: Μεταλλογραφικό και πετρογραφικό μικροσκόπιο Zeiss τύπου Axioskop 40 με ενσωματωμένη φωτογραφική μηχανή Canon τύπου PowerShot A640 του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας του Α.Π.Θ. Δεξιά: Στερεοσκόπιο τύπου Zeiss με ενσωματωμένη φωτογραφική μηχανή Canon τύπου PowerShot A620 του διατμηματικού εργαστηρίου ηλεκτρονικής μικροσκοπίας του Α.Π.Θ.

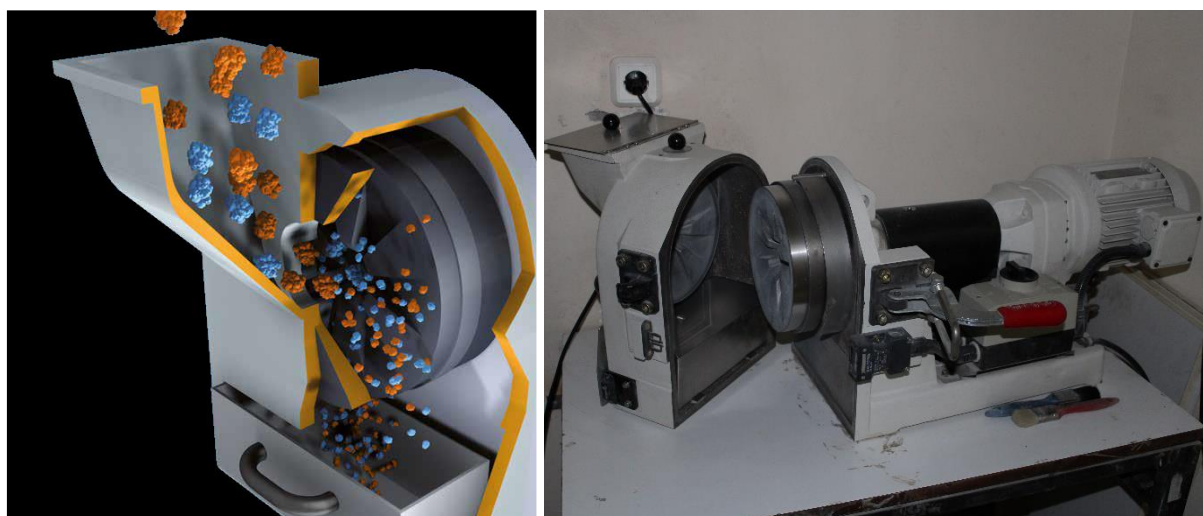


### 3.3. Θραύση και ταξινόμηση

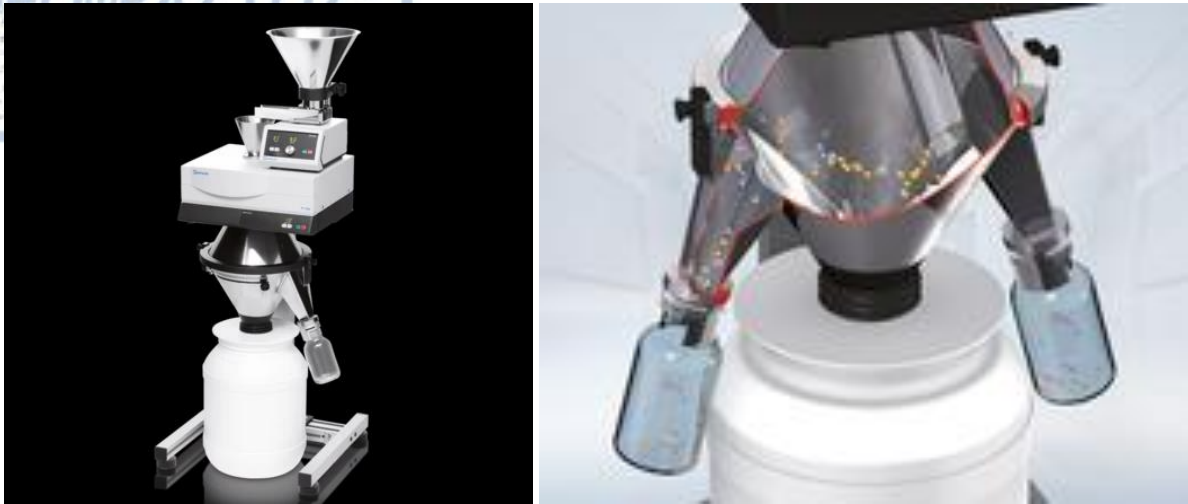
Στο εργαστήριο διαχωρισμού ορυκτών του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας πραγματοποιήθηκε θραύση και ταξινόμηση των δειγμάτων. Για τη θραύση των εξεταζόμενων δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε αρχικά σιαγονωτός σπαστήρας (jaw crusher) τύπου Retsch BB 300 (Εικ. 31) και ακολούθως κονιορτοποιητής (disk mill) τύπου Fritsch pulverisette 13 (Εικ. 32). Η λήψη αντιπροσωπευτικών δειγμάτων του κονιοποιημένου υλικού έγινε με χρήση δειγματολήπτη Retsch DR 100 rotating tube divider και τροφοδότη PT 200 (Εικ. 33).



**Εικόνα 31.** Αρχή λειτουργίας και χρησιμοποιούμενος τύπος σιαγονωτού σπαστήρα του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας του Α.Π.Θ.

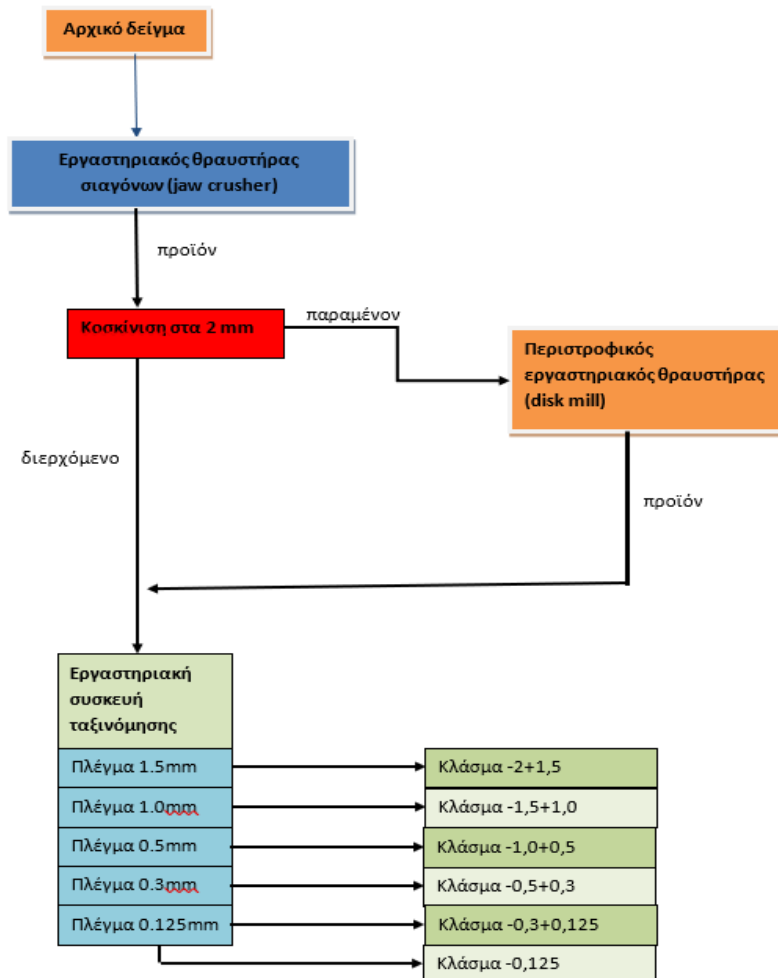


**Εικόνα 32.** Αρχή λειτουργίας και χρησιμοποιούμενος τύπος κονιορτοποιητή του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας του Α.Π.Θ.



**Εικόνα 33.** Αυτόματος δειγματολήπτης και αρχή λειτουργίας του οίκου Retsch τύπου DR 100 rotating tube divider και τροφοδότης PT 200 (<https://www.retsch.com/>) του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας του Α.Π.Θ.

Η μεθοδολογία θραύσης και ταξινόμησης που ακολουθήθηκε φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα ροής (Εικ. 34).



**Εικόνα 34.** Διάγραμμα ροής εργασιών θραύσης και ταξινόμησης.

### 3.4. Βαρυτομετρικός διαχωρισμός σε παλλόμενη τράπεζα

Ολικά δείγματα εστάλησαν στο εργαστήριο Εμπλουτισμού των Μεταλλευμάτων του Τομέα Μεταλλουργίας και Τεχνολογίας Υλικών της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π., προκειμένου να γίνουν δοκιμές σε εργαστηριακή παλλόμενη τράπεζα τύπου Denver BCA-14326/13A/AB (Εικ. 35).

Από τα δείγματα που εστάλησαν στο εργαστήριο στον ΕΜΠ, λήφθηκαν αντιπροσωπευτικά δείγματα με διαχωριστή Jones, και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές στην παλλόμενη τράπεζα. Οι παράμετροι λειτουργίας της τράπεζας ήταν: α) κλίση καταστρώματος 14°, β) στροφές 360 παλμοί/λεπτό, γ) εύρος παλμικής κίνησης 10 mm, δ) τροφοδοσία ξηρού υλικού 100 g/min, ε) πυκνότητα πολφού 17 – 18% κ.β. σε στερεά και στ) παροχή καταστρώματος 4 l/min.



**Εικόνα 35.** Δονούμενη τράπεζα τύπου Denver BCA-14326/13A/AB του εργαστηρίου Εμπλουτισμού των Μεταλλευμάτων του Τομέα Μεταλλουργίας και Τεχνολογίας Υλικών της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π.

Τα δείγματα μετά το διαχωρισμό τους κατέληξαν στα αντίστοιχα διαμερίσματα της



τράπεζας και αφού συλλέχθηκαν, πραγματοποιήθηκε διήθηση και ξήρανση στους 100° C, για δύο (2) ώρες. Στην Εικ. 36 φαίνονται τα διαδοχικά στάδια της διαδικασίας αυτής.



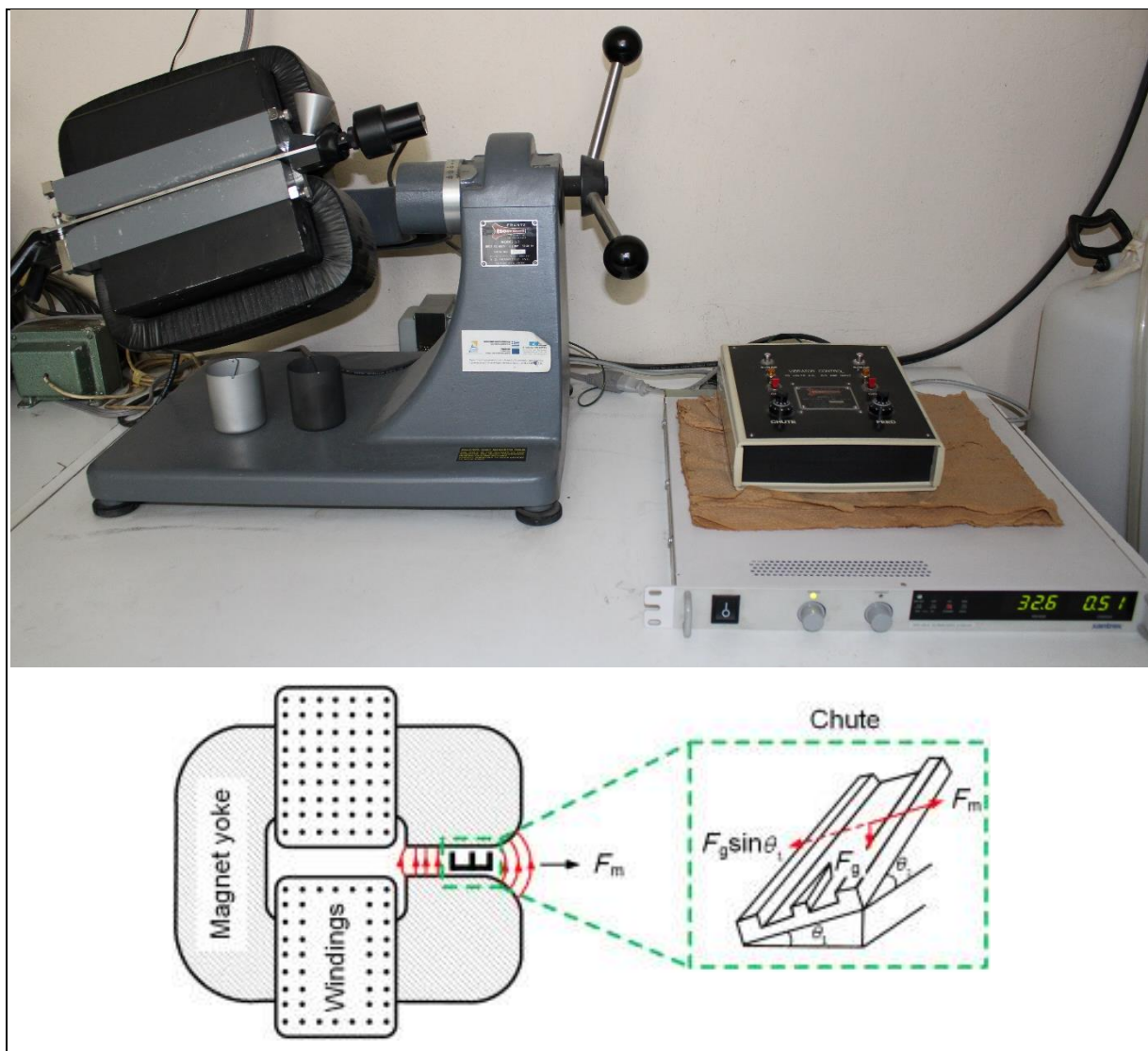
**Εικόνες 36.** Προϊόντα τράπεζας, διήθηση και προετοιμασία αυτών για ξήρανση.

Στα προϊόντα του βαρυτομετρικού διαχωρισμού πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις προκειμένου να γίνει αξιολόγηση της επιτυχίας του διαχωρισμού από την περιεκτικότητα του  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  που μετρήθηκε.

### 3.5. Μαγνητικός διαχωρισμός-εμπλουτισμός

Στα κοκκομετρικά κλάσματα «-0,5 έως +0,3», «-0,3 έως +0,125» και «-0,125» mm διενεργήθηκε ξηρός μαγνητικός διαχωρισμός σε εντάσεις 1,5 έως 0,3 Amps και με πλευρική γωνία 14° στον εργαστηριακό μαγνητικό διαχωριστή τύπου FRANTZ MODEL L-1 του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας του Α.Π.Θ. (Εικ. 37).

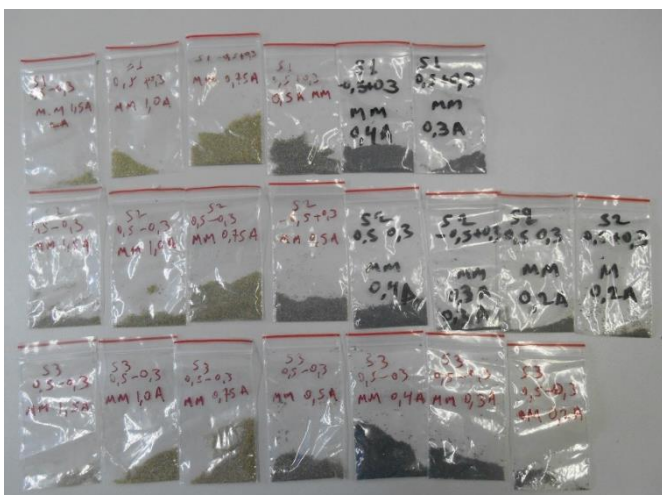
Στην ένταση των 0,5 Amps, τα προϊόντα (μαγνητικά και μη μαγνητικά) εξετάστηκαν με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας XRD. Το λεπτομερές κλάσμα «-0,125» δεν ανταποκρινόταν καλά στον μαγνητικό διαχωριστή και τα αποτελέσματα του δεν λήφθηκαν υπόψη. Αυτό κρίνεται λογικό διότι αυτά τα μεγέθη δεν συνιστώνται από τον κατασκευαστή για ξηρό μαγνητικό διαχωρισμό και ενδείκνυται ο υγρός μαγνητικός διαχωριστής.



**Εικόνα 37.** Μαγνητικός διαχωριστής τύπου FRANTZ MODEL L-1 του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας του Α.Π.Θ. και αρχή λειτουργίας του (Barry et al. 2016).

Επίσης πραγματοποιήθηκε σειρά μαγνητικών διαχωρισμών σε εντάσεις από 1,5 έως 0,2 Amps στα παραπάνω δείγματα προκειμένου να καταστεί δυνατή η εκτίμηση της έντασης και των συνθηκών κάτω από τις οποίες διαχωρίζεται μαγνητικά το δείγμα. Στην Εικ. 38 φαίνονται διαδοχικά τα στάδια των εργασιών.





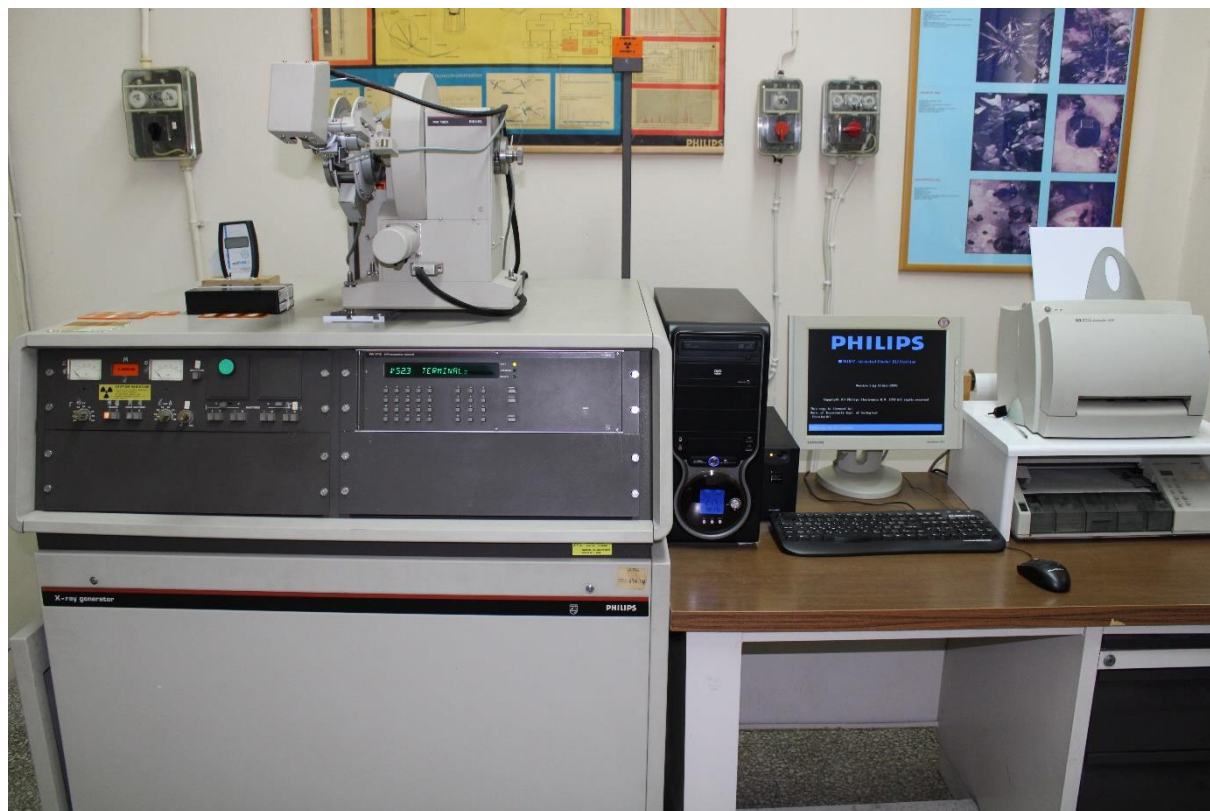
**Εικόνες 38.** Διαδοχικά στάδια λειτουργίας μαγνητικού διαχωριστή (πάνω). Διαχωρισμένο δείγμα μεγέθους «-0,3 έως +0,125» mm στα 0,5A (μαύρο μαγνητικό, κιτρινοπράσινο μη μαγνητικό) και μαγνητικά διαχωρισμένο δείγμα μεγέθους «-0,5 έως +0,3» mm σε εντάσεις από 1,5 έως 0,2 A (κάτω).

### 3.6. Ορυκτολογική μελέτη

Από κάθε κοκκομετρικό κλάσμα των εξεταζόμενων δειγμάτων (S1, S2, S3) λήφθηκε αντιπροσωπευτικό δείγμα για ανάλυση με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτίνων-X (XRD). Συνολικά από κάθε δείγμα μελετήθηκαν 6 κοκκομετρικά κλάσματα "-2,0 έως +1,5", "-1,5 έως +1,0", "-1,0 έως +0,5", "-0,5 έως +0,3", "-0,3 έως +0,125" και "-0,125". Επιπλέον, από κάθε δείγμα μελετήθηκαν 2 μαγνητικά και 2 μη μαγνητικά κλάσματα σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μαγνητικού διαχωρισμού. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν τα προϊόντα (μαγνητικά και μη μαγνητικά) του μαγνητικού διαχωρισμού στην ένταση των 0,5 Amps των κοκκομετρικών

κλασμάτων "-0,5 έως +0,3", "-0,3 έως +0,125" και "-0,125". Το λεπτομερές κλάσμα «-0,125» δεν ανταποκρινόταν καλά στον μαγνητικό διαχωριστή και τα αποτελέσματα του δεν λήφθηκαν υπόψη.

Η ορυκτολογική σύσταση κάθε δείγματος, προσδιορίστηκε με τη χρήση της μεθόδου της περιθλασιμετρίας ακτίνων-X (XRD) σε παρασκευάσμα κόνεως τυχαίου προσανατολισμού. Η ακτινοβολία ακτίνων-X χαλκού ( $\text{CuK}\alpha$ ) είχε μήκος κύματος  $1,54056 \text{ \AA}$  με φίλτρο Ni  $0,0170 \text{ mm}$  για την απομόνωση μονοχρωματικής ακτινοβολίας-X σε περιθλασίμετρο τύπου PHILIPS PW1710 του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας του Α.Π.Θ. (Εικ. 39). Το περιθλασίμετρο λειτούργησε σε συνθήκες: τάση  $35 \text{ kV}$ , ένταση  $25 \text{ mA}$ , ταχύτητα σάρωσης  $1,2^\circ/\text{sec}$  και περιοχή σάρωσης  $3-63^\circ 2\theta$ . Πριν από την ακτινογράφιση έγινε έλεγχος της ευαισθησίας και της ακρίβειας του περιθλασίμετρου με ειδικό πρότυπο καθαρού πυριτίου. Η απόκλιση των τιμών  $d$  ήταν  $\pm 0,0007 \text{ \AA}$  και των τιμών  $2\theta$   $\pm 0,0018^\circ$ .



**Εικόνα 39.** Περιθλασίμετρο ακτίνων-X τύπου PHILIPS PW1710 του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας του Α.Π.Θ.

Οι ορυκτολογικές φάσεις προσδιορίστηκαν ποσοτικά (% κ.β.) με βάση τις απαριθμήσεις συγκεκριμένων ανακλάσεων τους και λαμβάνοντας υπόψη την πυκνότητα και το συντελεστή απορρόφησης μάζας των ορυκτολογικών φάσεων για ακτινοβολία Cu ( $\text{CuK}\alpha$ ). Ως βάση

δεδομένων για την ταυτοποίηση των ορυκτολογικών φάσεων χρησιμοποιήθηκαν οι πρότυπες καρτέλες περίθλασης του ICDD (International Center of Diffraction Data). Διορθώσεις των αποτελεσμάτων του ποσοτικού προσδιορισμού των ορυκτολογικών φάσεων έγιναν με χρήση εξωτερικών πρότυπων μιγμάτων των ορυκτών που συμμετέχουν στα εξεταζόμενα δείγματα. Επιπλέον, έγινε αποτίμηση των περιθλασιογραμμάτων με την εφαρμογή MAUD-Material Analysis Using Diffraction και εφαρμογή της μεθόδου RIETVELD για βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων (Lutterotti et al. 2007). Η συνδυαστική αυτή προσέγγιση της εκτίμησης της ποσοτικής ορυκτολογικής σύστασης των εξεταζόμενων δειγμάτων οδηγεί σε ακρίβεια  $\pm 1\%$  κ.β. (Καντηράνης κ.ά. 2004, Kantiranis et al. 2011).

### 3.7. Χημικές αναλύσεις

Χημική ανάλυση κύριων στοιχείων, συμπεριλαμβανομένου του  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , και 45 ιχνοστοιχείων των υπό εξέταση δειγμάτων προσδιορίστηκε με την πραγματοποίηση χημικών αναλύσεων ολικού δείγματος. Αντιπροσωπευτικό δείγμα 100 g τόσο από τα αρχικά ομογενοποιημένα κοκκομετρικά κλάσματα, όσο και από τα προϊόντα του βαρυτομετρικού εμπλουτισμού στάλθηκε στα εργαστήρια της εταιρίας Activation Laboratories Ltd. στον Καναδά. Επιπλέον, στα αρχικά ομογενοποιημένα κοκκομετρικά κλάσματα μετρήθηκαν όλα τα πλατινοειδή και ο χρυσός.

Η ανάλυση για τον προσδιορισμό του ποσοστού συμμετοχής των κύριων στοιχείων ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) στα δείγματα έγινε με τη μέθοδο FUS-ICP (Fusion-Inductively Coupled Plasma) μετά από σύντηξη αυτών με μίγμα μεταβορικού ( $\text{LiBO}_2$ ) και τετραβορικού λιθίου ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ). Η απώλεια πύρωσης μετρήθηκε σταθμημετρικά. Για όλα τα κύρια στοιχεία και την απώλεια πύρωσης το όριο ανίχνευσης ήταν 0,01%, εκτός από των  $\text{MnO}$  και  $\text{TiO}_2$  που ήταν 0,001%. Επίσης, με την ίδια διαδικασία σύντηξης και μέθοδο ανάλυσης μετρήθηκαν τα ιχνοστοιχεία Ba, Be, Sc, Sr, V, Y, Zr με όριο ανίχνευσης 2, 1, 1, 2, 5, 1 και 2 ppm, αντίστοιχα.

Με τη μέθοδο FUS-MS (Fusion-Mass Spectrometry) μετρήθηκαν τα ιχνοστοιχεία Ag, As, Bi, Co, Cr, Cs, Cu, Ga, Ge, In, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sb, Sn, Tl, Th, U, W και Zn. Τα όρια ανιχνευσιμότητας σε ppm δίνονται παρακάτω.

Τα πλατινοειδή Os, Ir, Ru, Rh, Pt, Pd και Re με όριο ανίχνευσης 2, 0,1, 5, 0,2, 5, 2 και 5 ppb, αντίστοιχα, καθώς και ο Au με όριο ανίχνευσης 0,5 ppb μετρήθηκαν με τη μέθοδο νετρονικής ενεργοποίησης (INAA) αφού πρώτα είχε προηγηθεί σύντηξη με σουλφίδιο του



νικελίου (NiS) σύμφωνα με τη μέθοδο NI-FINA (Fire assay using NiS-Instrumental Neutron Activation Analysis) του Actlabs. Συγκεκριμένα, αντιπροσωπευτική ποσότητα 25 g από τα αρχικά ομογενοποιημένα κοκκομετρικά κλάσματα υποβάλλονται σε δοκιμασία σύντηξης με σουλφίδιο του νικελίου (NiS). Το παραγόμενο μετά τη σύντηξη με NiS δοκίμιο διαλύεται σε πυκνό HCl και το προκύπτον υπόλειμμα που περιέχει όλη την ποσότητα των PGE και του Au συλλέγεται σε διηθητικό χαρτί. Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης των PGE και του Au γίνεται με τη μέθοδο της νετρονικής ενεργοποίησης (INAA).

Τέλος, για τη μέτρηση της χημικής σύστασης των κύριων στοιχείων, συμπεριλαμβανομένου του  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , στα συμπυκνώματα μετά τη χρήση μαγνητικού διαχωριστή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος φθορισμού ακτίνων-X (XRF).

Τα δείγματα κονιοποιήθηκαν και κατασκευάστηκαν με τη χρήση συσκευής τήξης τύπου Vulcan (FLUXANA, Deutschland) υαλοποιημένα δισκία με αναλογία δείγματος: υλικού τήξης 1:8 σε θερμοκρασία 1200 °C (Εικ. 40). Το υλικό τήξης που χρησιμοποιήθηκε ήταν μίγμα τετραβορικού λιθίου ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) 34% και μεταβορικού λιθίου ( $\text{LiBO}_2$ ) 66%.

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε φασματόμετρο τύπου S4-Pioneer της Bruker-AMS (Εικ. 33) του Διατμηματικού Εργαστηρίου Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας του Α.Π.Θ. Το φασματόμετρο είναι εξοπλισμένο με λυχνία Rh, σύστημα 5 κρυστάλλων (PET, XS-55, LIF200, LIF220 και LIF420) και δύο ανιχνευτές, ένα ανιχνευτή σπινθήρων και ένα ανιχνευτή ροής αερίου (gas-flow counter) που χρησιμοποιεί αέριο P10 (μίγμα 90% αργό και 10% μεθάνιο). Οι συνθήκες λειτουργίας κατά την ανάλυση ήταν 60 kV και 45 mA. Το όργανο βαθμονομήθηκε με χρήση των προτύπων πετρωμάτων και μεταλλικών ορυκτών που διαθέτει το εργαστήριο, ενώ το όριο ανίχνευσης ήταν 0,01% κ.β. για όλα τα κύρια στοιχεία που μετρήθηκαν.



**Εικόνα 40.** Συσκευή Vulcan για την παρασκευή υαλοποιημένων δισκίων του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας του Α.Π.Θ. (αριστερά) και φασματόμετρο ακτίνων-X φθορισμού Bruker τύπου S8 Tiger του διατμηματικού εργαστηρίου ηλεκτρονικής μικροσκοπίας του Α.Π.Θ. (δεξιά).

### 3.8. Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM-EDS)

Το σαρωτικό ηλεκτρονικό μικροσκόπιο με σύστημα μικροανάλυσης (SEM-EDS: Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy) είναι το κύριο όργανο σχηματισμού εικόνας και μικροανάλυσης από τα δευτερογενή ηλεκτρόνια και αποτελείται από τα εξής μέρη: α) το ηλεκτρονικό τηλεβόλο, β) τον έλεγχο ευθυγράμμισης, γ) την αεροστεγή βαλβίδα, δ) τους συμπυκνωτές φακούς, ε) το διάφραγμα, στ) τα πηνία σάρωσης, ζ) τον αντικειμενικό φακό, η) την τράπεζα και θ) τον θάλαμο δείγματος.

Πηγή φωτός για το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο είναι το ηλεκτρονικό τηλεβόλο και είναι ο χώρος όπου παράγονται, επιταχύνονται και εστιάζονται τα ηλεκτρόνια της ηλεκτρονικής δέσμης. Η ηλεκτρονική δέσμη παράγεται από ένα νήμα βολφραμίου που έχει σχήμα "V" και αποτελεί την κάθοδο (αρνητικό δυναμικό). Στο νήμα εφαρμόζεται ρεύμα με αποτέλεσμα αυτό να πυρακτώνεται και να εκπέμπει τη δέσμη ηλεκτρονίων. Η άνοδος (θετικό δυναμικό) έλκει τα ηλεκτρόνια ώστε αυτά να επιταχύνονται. Καθώς η δέσμη διέρχεται από τη στήλη του μικροσκοπίου περνάει από το σύστημα των συμπυκνωτών φακών. Αυτοί οι φακοί μειώνουν την διάμετρο της δέσμης και ελέγχουν την φωτεινότητα της ηλεκτρονικής δέσμης που προσπίπτει πάνω στο δείγμα. Ο βασικός φακός του μικροσκοπίου που σχηματίζει το είδωλο του δείγματος και συνδυάζεται με το διάφραγμα είναι ο αντικειμενικός φακός. Η διάμετρος του διαφράγματος καθορίζει το ποσοστό των ηλεκτρονίων που θα εισέλθουν από αυτό και θα συνεισφέρουν στο σχηματισμό της εικόνας του δείγματος. Τα πηνία σάρωσης δημιουργούν ένα μαγνητικό πεδίο που αναγκάζει τη δέσμη να κινείται μπρος πίσω σαρώνοντας έτσι την επιφάνεια του δείγματος.

Η διακριτική ικανότητα της επιφάνειας στο σαρωτικό μικροσκόπιο δεν είναι πολύ μεγάλη επειδή το ίχνος της δέσμης πάνω σε αυτήν μεγαλώνει από πολλαπλή σκέδαση. Καλύπτει την περιοχή μεταξύ του οπτικού μικροσκοπίου και του ηλεκτρονικού διερχόμενης δέσμης και είναι της τάξης μεγέθους του 0,1 μm. Το τελικό είδωλο είναι ιδιαίτερα φωτεινό και πλούσιο σε αντίθεση.

Η αρχή λειτουργίας της ηλεκτρονικής μικροανάλυσης στηρίζεται στην ανίχνευση και μέτρηση της χαρακτηριστικής ακτινοβολίας X που παράγεται από την πρόσπτωση μιας υψηλής ενέργειας και καλά εστιασμένης δέσμης ηλεκτρονίων πάνω στο προς ανάλυση δείγμα (Long 1977). Το διάγραμμα ενέργειας που καταγράφεται για το εξεταζόμενο δείγμα, δίνει πληροφορίες για τη χημική σύσταση του δείγματος. Σε περίπτωση χρήσης διαγράμματος έντασης-ενέργειας γίνεται ανάλυση ενεργειακής διασποράς (EDS) σε αντίστοιχο φασματόμετρο.



**Εικόνα 41.** Σαρωτικό ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM-EDS) του εργαστηρίου ηλεκτρονικής μικροσκοπίας του Α.Π.Θ.

Αντιπροσωπευτικές λεπτές στιλπνές τομές από τα εξεταζόμενα δείγματα μελετήθηκαν με την μέθοδο της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας με χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης τύπου Jeol JSM - 840 του εργαστηρίου ηλεκτρονικής μικροσκοπίας του Α.Π.Θ. (Εικ. 41) προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τα χημικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων χρωμιτών. Οι συνθήκες λειτουργίας του οργάνου ήταν: τάση 15 kV, ένταση ηλεκτρονικής δέσμης <math><3\text{ nA}</math> και διαμέτρου 1  $\mu\text{m}$ . Τα δείγματα για να αναλυθούν πρέπει να έχουν τέλεια αγωγιμότητα και γι' αυτό γίνεται εξάχνωση σε κενό ενός αγώγιμου υλικού (π.χ. άνθρακας) από μία διάταξη βολταϊκού τόξου. Το πάχος της επικάλυψης με άνθρακα δεν ξεπερνά τα 200  $\text{\AA}$  ώστε να εξασφαλίζεται η ιδανική αγωγιμότητα, χωρίς να επηρεάζεται η ευαισθησία του οργάνου. Η επανθράκωση έγινε με εξαχνωτή κενού JEOL-4X.

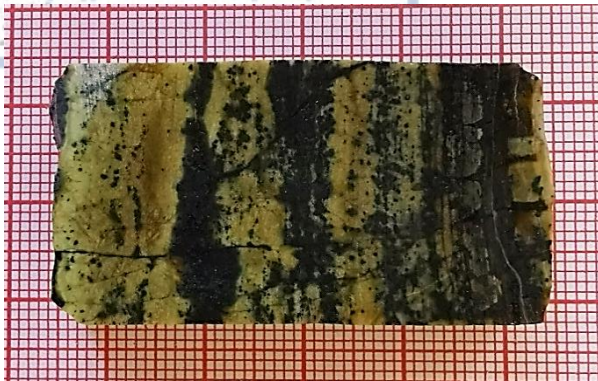
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 4.1. Μικροσκοπική μελέτη

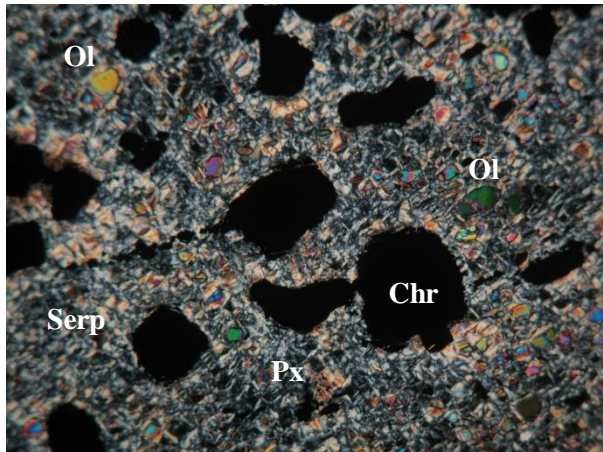
Γενικά θα μπορούσε να αναφέρει κανείς με βάσεις τις μικροσκοπικές παρατηρήσεις ότι τα εξεταζόμενα δείγματα και των τεσσάρων σάκκων εμφανίζουν εκτεταμένη σερπεντινίωση. Στις Εικ. 42 έως 46 παρουσιάζονται φωτογραφίες από πολωτικό και μεταλλογραφικό μικροσκόπιο αντιπροσωπευτικού δείγματος χρωμίτη από τον Σάκκο-1 (Εικ. 29). Όπως διαπιστώνεται από την εξέταση στο πολωτικό μικροσκόπιο κυριαρχεί ο σερπεντίνης ο οποίος εμφανίζει κυψελοειδή ιστό, ενώ κατά θέσεις παρατηρούνται και φλεβίδια χρυσοσίλη και χλωρίτης. Σε όλη την έκταση της τομής παρατηρείται διάσπαρτος χρωμίτης, καθώς και υπολειμματικός ολιβίνης και λίγος πυρόξενος που αποτελούν μαζί το χρωμίτη συστατικά του αρχικού δουνίτη. Σε αρκετές θέσεις συναντώνται δευτερογενή φλεβίδια πληρωμένα με ανθρακικά ορυκτά (ασβεστίτη και δολομίτη) τα οποία τέμνουν κάθετα τα φλεβίδια του χρυσοσίλη. Από την εξέταση στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο διαπιστώνεται ότι ο εξεταζόμενος χρωμίτης είναι λεπτόκοκκος ως προς το χρωμίτη και παρουσιάζει έντονη κατακλαστική υφή. Το μέγεθος των κόκκων του χρωμίτη κυμαίνεται μεταξύ 0,2 και 0,8 mm, ενώ κατά θέσεις παρατηρήθηκαν και κρύσταλλοι μέχρι 1,1 mm.

Στις Εικ. 47 έως 51 παρουσιάζονται φωτογραφίες από πολωτικό και μεταλλογραφικό μικροσκόπιο αντιπροσωπευτικού δείγματος χρωμίτη από τον Σάκκο-2 (Εικ. 29). Όπως διαπιστώνεται από την εξέταση στο πολωτικό μικροσκόπιο κυριαρχεί ο κυψελοειδής σερπεντίνης, υπάρχει διάσπαρτος χρωμίτης και υπολειμματικός ολιβίνης και πυρόξενος. Ο χρωμίτης, ο ολιβίνης και ο πυρόξενος αποτελούν συστατικά του αρχικού δουνίτη. Δεν εμφανίζονται δευτερογενή φλεβίδια. Από την εξέταση στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο διαπιστώνεται ότι ο εξεταζόμενος χρωμίτης είναι μεσόκοκκος ως προς το χρωμίτη, εμφανίζει τριεδρες γωνίες και παρουσιάζει έντονη κατακλαστική υφή. Το μέγεθος των κόκκων του χρωμίτη κυμαίνεται μεταξύ 0,7 και 1,3 mm, ενώ κατά θέσεις παρατηρήθηκαν και κρύσταλλοι μέχρι 1,6 mm.

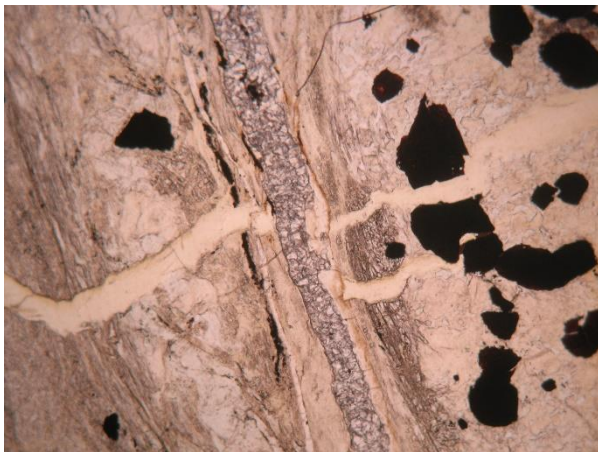




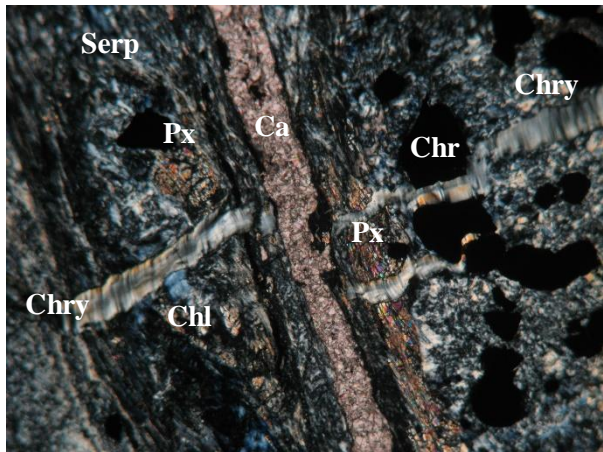
**Εικόνα 42.** Σάκκος-1 - Θέση λήψης δείγματος για την κατασκευή της λεπτής στιλπνής τομής.



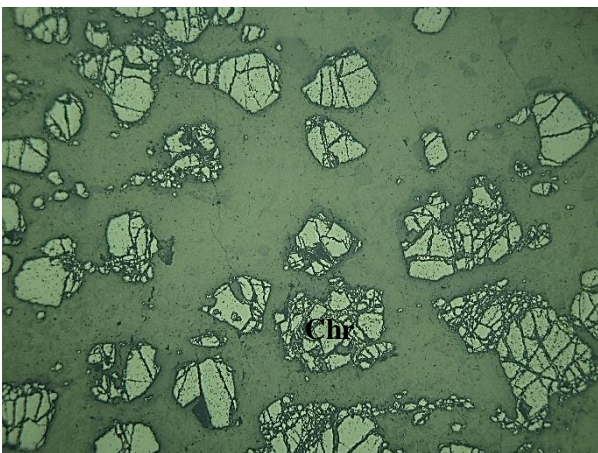
**Εικόνα 43.** Κυψελοειδής σερπεντίνη (Serp), διάσπαρτος χρωμίτης (Chr) και υπολειμματικός ολιβίνης (Ol) και πυρόξενος (Px) του χρωμιτίτη του Σάκκου-1. Μεγάλη διάσταση 3 mm, N⊥.



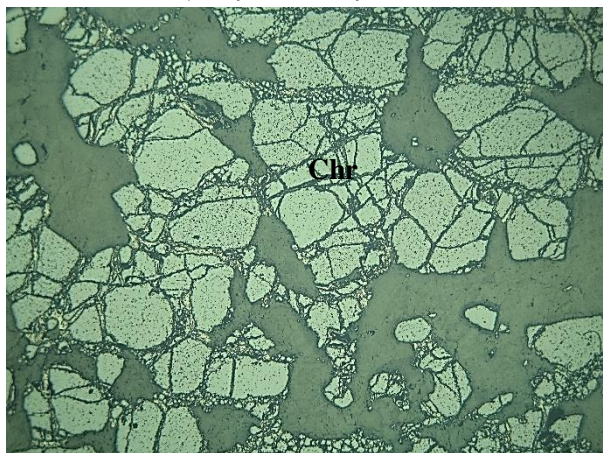
**Εικόνα 44α.** Δευτερογενής φλέβα ασβεστίτη και δολομίτη (Ca) που διακόπτει φλεβίδιο χρυσσίτη (Chry) εντός κυψελοειδούς σερπεντίνη (Serp), χλωρίτης (Chl), διάσπαρτος χρωμίτης (Chr) και υπολειμματικός πυρόξενος (Px) του χρωμιτίτη του Σάκκου-1. Μεγάλη διάσταση 3mm, N//.



**Εικόνα 44β.** Δευτερογενής φλέβα ασβεστίτη και δολομίτη (Ca) που διακόπτει φλεβίδιο χρυσσίτη (Chry) εντός κυψελοειδούς σερπεντίνη (Serp), χλωρίτης (Chl), διάσπαρτος χρωμίτης (Chr) και υπολειμματικός πυρόξενος (Px) του χρωμιτίτη του Σάκκου-1. Μεγάλη διάσταση 3mm, N ⊥.

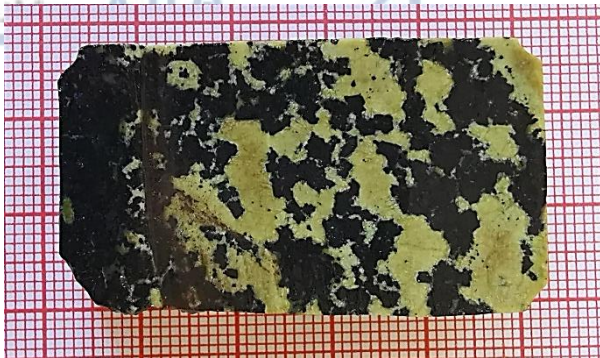


**Εικόνα 45.** Διάσπαρτος λεπτόκοκκος χρωμίτης (Chr) με έντονη κατακλαστική υφή. Φωτογραφία μεταλλογραφικού μικροσκοπίου του χρωμιτίτη του Σάκκου-1. Μεγάλη διάσταση 3 mm, N//.

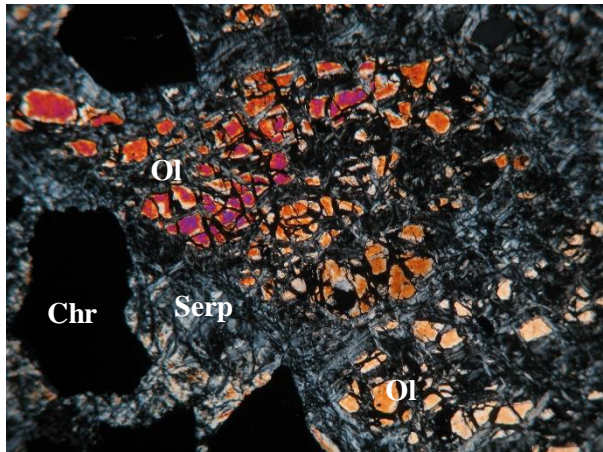


**Εικόνα 46.** Διάσπαρτος λεπτόκοκκος χρωμίτης (Chr) με έντονη κατακλαστική υφή. Φωτογραφία μεταλλογραφικού μικροσκοπίου του χρωμιτίτη του Σάκκου-1. Μεγάλη διάσταση 3 mm, N//.

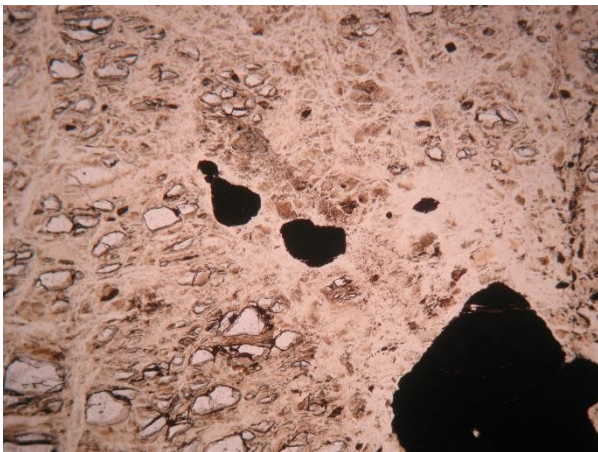




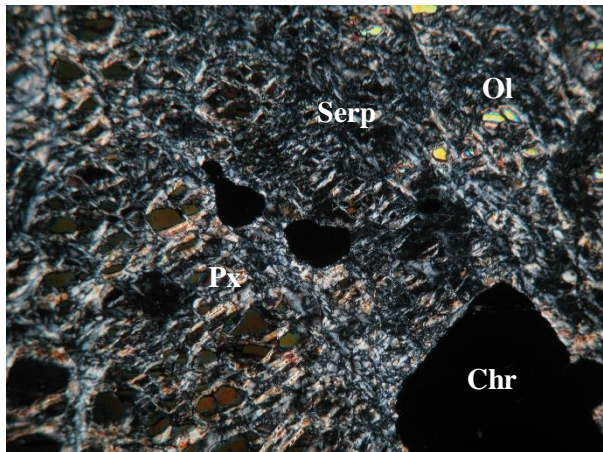
**Εικόνα 47.** Σάκκος-2 - Θέση λήψης δείγματος για την κατασκευή της λεπτής στιλπνής τομής.



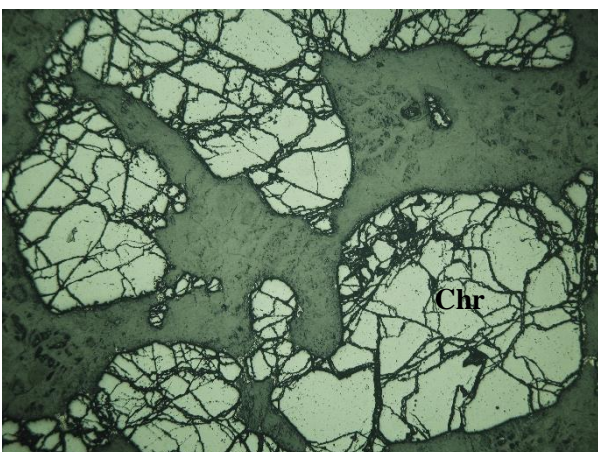
**Εικόνα 48.** Κυψελοειδής σερπεντίνης (Serp), διάσπαρτος χρωμίτης (Chr) και υπολειμματικός ολιβίνης (Ol) του χρωμιτίτη του Σάκκου-2. Μεγάλη διάσταση 3 mm, N.L.



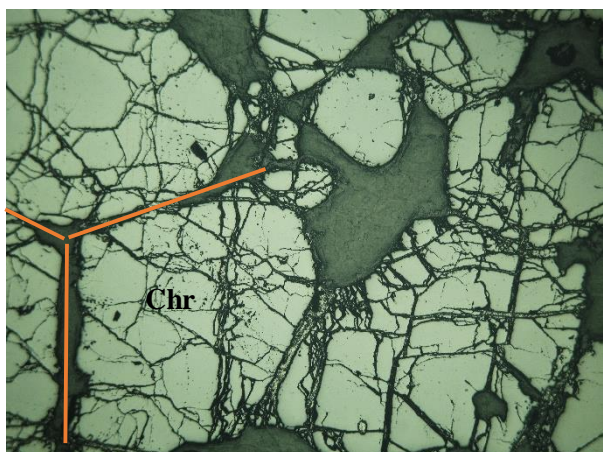
**Εικόνα 49α.** Κυψελοειδής σερπεντίνης (Serp), διάσπαρτος χρωμίτης (Chr) και υπολειμματικός ολιβίνης (Ol) και πυρόξενος (Px) του χρωμιτίτη του Σάκκου-2. Μεγάλη διάσταση 3mm, N//.



**Εικόνα 49β.** Κυψελοειδής σερπεντίνης (Serp), διάσπαρτος χρωμίτης (Chr) και υπολειμματικός ολιβίνης (Ol) και πυρόξενος (Px) του χρωμιτίτη του Σάκκου-2. Μεγάλη διάσταση 3mm, N ⊥.

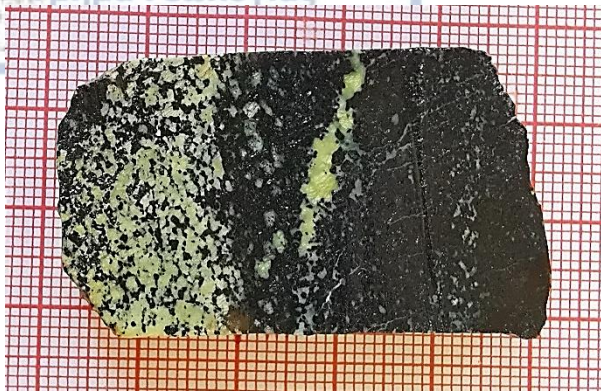


**Εικόνα 50.** Διάσπαρτος μεσόκοκκος χρωμίτης (Chr) με έντονη κατακλαστική υφή. Φωτογραφία μεταλλογραφικού μικροσκοπίου του χρωμιτίτη του Σάκκου-2. Μεγάλη διάσταση 3 mm, N//.

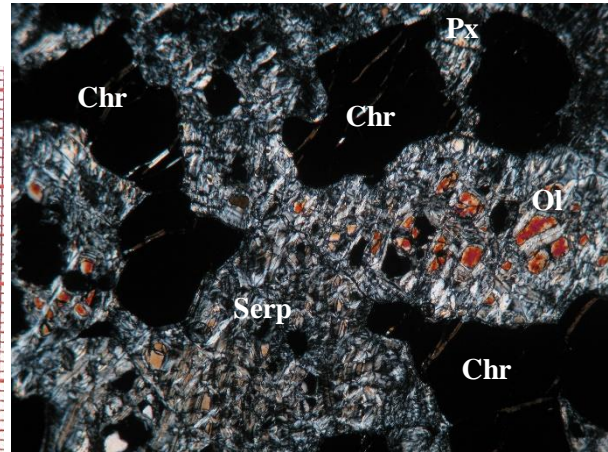


**Εικόνα 51.** Διάσπαρτος μεσόκοκκος χρωμίτης (Chr) με έντονη κατακλαστική υφή. Φωτογραφία μεταλλογραφικού μικροσκοπίου με εμφανείς και τις τριέδρες γωνίες του χρωμιτίτη του Σάκκου-2. Μεγάλη διάσταση 3 mm, N//.

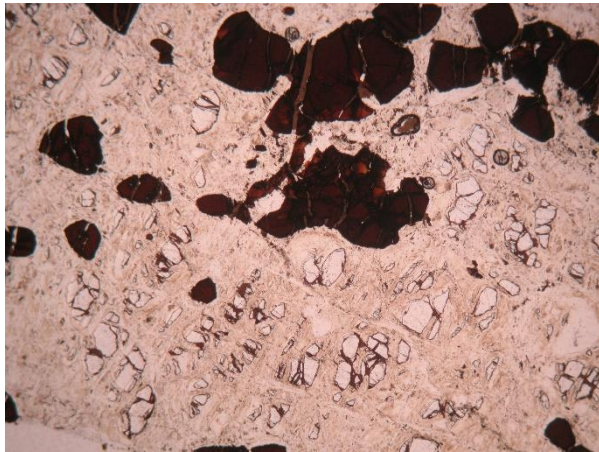




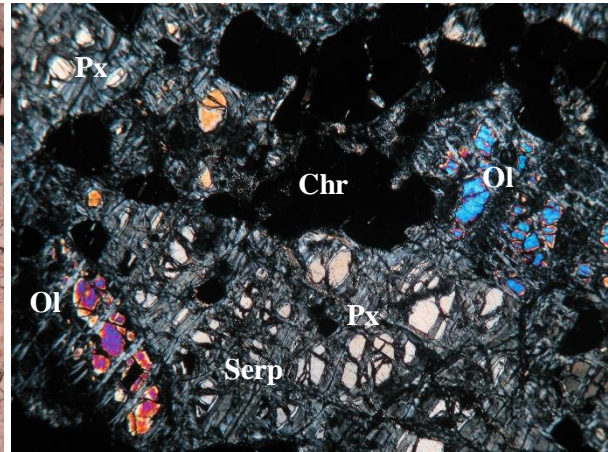
**Εικόνα 52.** Σάκκος-3 - Θέση λήψης δείγματος για την κατασκευή της λεπτής στιλπνής τομής.



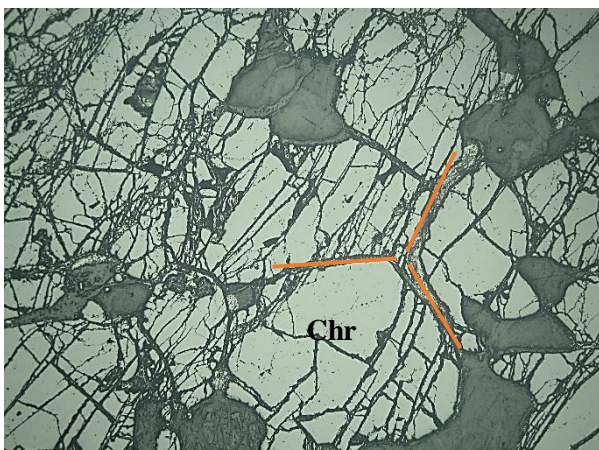
**Εικόνα 53.** Σερπεντίνης (Serp), διάσπαρτος χρωμίτης (Chr) και υπολειμματικός ολιβίνης (Oli) και πυρόξενος (Px) του χρωμιτίτη του Σάκκου-3. Μεγάλη διάσταση 3 mm, N $\perp$ .



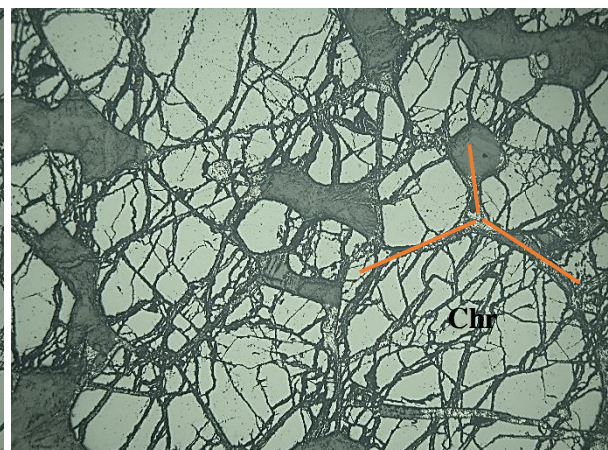
**Εικόνα 54α.** Κυψελοειδής σερπεντίνης (Serp), διάσπαρτος χρωμίτης (Chr) και υπολειμματικός ολιβίνης (Oli) και πυρόξενος (Px) του χρωμιτίτη του Σάκκου-3. Μεγάλη διάσταση 3mm, N//.



**Εικόνα 54β.** Κυψελοειδής σερπεντίνης (Serp), διάσπαρτος χρωμίτης (Chr) και υπολειμματικός ολιβίνης (Oli) και πυρόξενος (Px) του χρωμιτίτη του Σάκκου-3. Μεγάλη διάσταση 3mm, N $\perp$ .

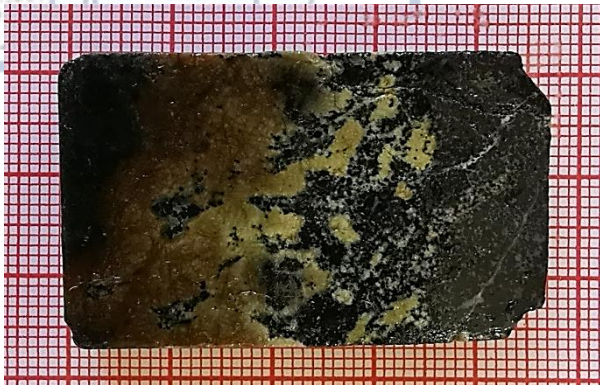


**Εικόνα 55.** Συμπαγής μεσόκοκκος χρωμίτης (Chr) με έντονη κατακλαστική υφή. Διακρίνονται οι τρίεδρες γωνίες. Φωτογραφία μεταλλογραφικού μικροσκοπίου του χρωμιτίτη του Σάκκου-3. Μεγάλη διάσταση 3 mm, N//.

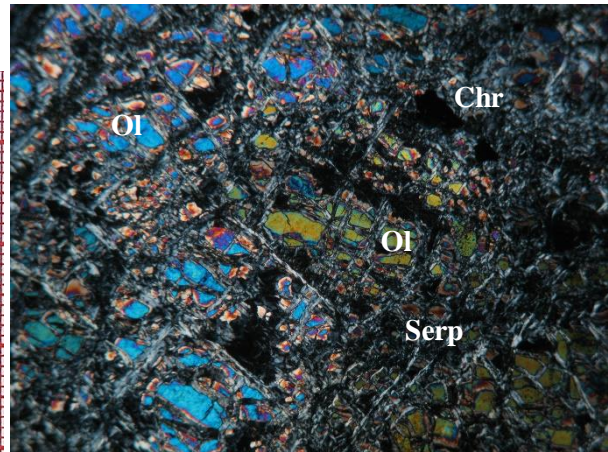


**Εικόνα 56.** Συμπαγής μεσόκοκκος ιδίομορφος χρωμίτης (Chr) με έντονη κατακλαστική υφή. Διακρίνονται οι τρίεδρες γωνίες. Φωτογραφία μεταλλογραφικού μικροσκοπίου του χρωμιτίτη του Σάκκου-3. Μεγάλη διάσταση 3 mm, N//.

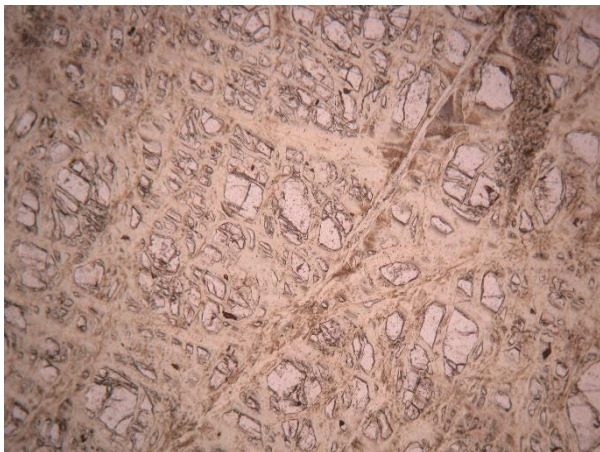




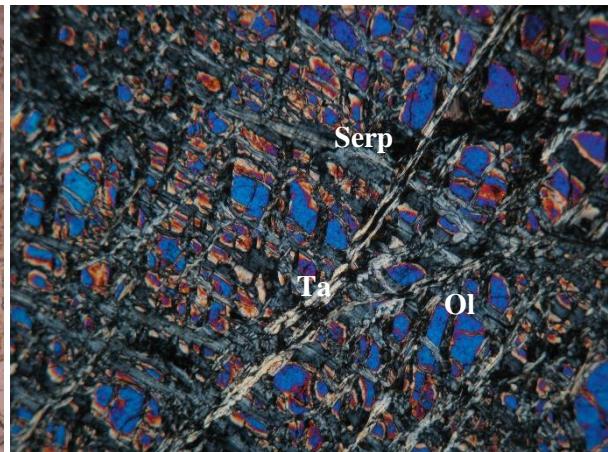
**Εικόνα 57.** Σάκκος-4 - Θέση λήψης δείγματος για την κατασκευή της λεπτής στιλπνής τομής.



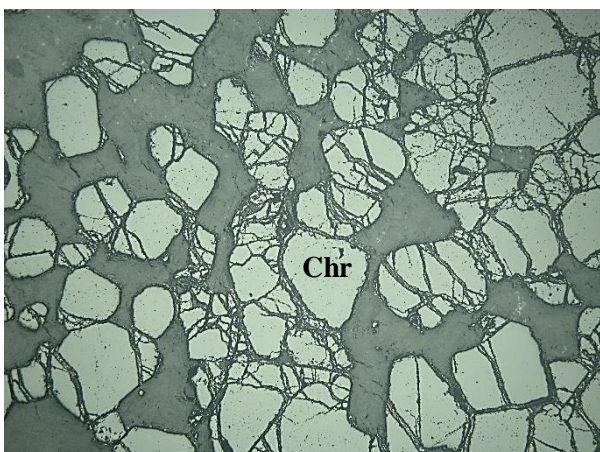
**Εικόνα 58.** Σερπεντίνης (Serp), διάσπαρτος χρωμίτης (Chr) και υπολειμματικός ολιβίνης (Ol) του χρωμιτίτη του Σάκκου-4. Μεγάλη διάσταση 3 mm, N⊥.



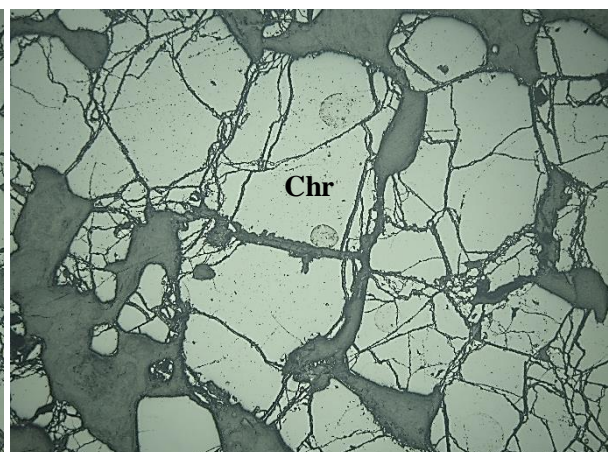
**Εικόνα 59α.** Ολιβίνης (Ol) που αλλοιώνεται σε σερπεντίνη (Serp) και δευτερογενής φλέβα τάλκη (Ta) του χρωμιτίτη του Σάκκου-4. Μεγάλη διάσταση 3mm, N//.



**Εικόνα 59β.** Ολιβίνης (Ol) που αλλοιώνεται σε σερπεντίνη (Serp) και δευτερογενής φλέβα τάλκη (Ta) του χρωμιτίτη του Σάκκου-4. Μεγάλη διάσταση 3mm, N ⊥.



**Εικόνα 60.** Διάσπαρτος λεπτόκοκκος χρωμίτης (Chr) με κατακλαστική υφή. Φωτογραφία μεταλλογραφικού μικροσκοπίου του χρωμιτίτη του Σάκκου-4. Μεγάλη διάσταση 3 mm, N//.



**Εικόνα 61.** Διάσπαρτος μεσόκοκκος χρωμίτης (Chr) με κατακλαστική υφή. Φωτογραφία μεταλλογραφικού μικροσκοπίου του χρωμιτίτη του Σάκκου-4. Μεγάλη διάσταση 3 mm, N//.



Στις Εικ. 52 έως 56 παρουσιάζονται φωτογραφίες από πολωτικό και μεταλλογραφικό μικροσκόπιο αντιπροσωπευτικού δείγματος χρωμίτη από τον Σάκκο-3 (Εικ. 29). Όπως διαπιστώνεται από την εξέταση στο πολωτικό μικροσκόπιο κυριαρχεί ο κυψελοειδής σερπεντίνης, ενώ ο χρωμίτης είναι συμπαγής. Επιπλέον, παρατηρούνται υπολειμματικός ολιβίνης και πυρόξενος. Ο χρωμίτης, ο ολιβίνης και ο πυρόξενος αποτελούν συστατικά του αρχικού δουνίτη. Δεν εμφανίζονται δευτερογενή φλεβίδια. Από την εξέταση στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο διαπιστώνεται ότι ο εξεταζόμενος χρωμίτης είναι κυρίως μεσόκοκκος ως προς το χρωμίτη με ορισμένες θέσεις να εμφανίζεται πιο αδρόκοκκος, παρουσιάζει τριέδρες γωνίες και πολύ έντονη κατακλαστική υφή. Το μέγεθος των κόκκων του χρωμίτη κυμαίνεται μεταξύ 0,9 και 1,6 mm, ενώ κατά θέσεις παρατηρήθηκαν και κρύσταλλοι μέχρι 3,0 mm.

Στις Εικ. 57 έως 61 παρουσιάζονται φωτογραφίες από πολωτικό και μεταλλογραφικό μικροσκόπιο αντιπροσωπευτικού δείγματος χρωμίτη από τον Σάκκο-4 (Εικ. 29). Όπως διαπιστώνεται από την εξέταση στο πολωτικό μικροσκόπιο κυριαρχεί ο κυψελοειδής σερπεντίνης, ενώ ο χρωμίτης είναι διάσπαρτος. Επιπλέον, παρατηρούνται υπολειμματικός ολιβίνης και πυρόξενος. Ο χρωμίτης, ο ολιβίνης και ο πυρόξενος αποτελούν συστατικά του αρχικού δουνίτη. Κατά θέσεις εμφανίζονται δευτερογενή φλεβίδια τάλκης που τέμνουν σχεδόν κάθετο το σερπεντίνη. Από την εξέταση στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο διαπιστώνεται ότι ο εξεταζόμενος χρωμίτης είναι λεπτόκοκκος προς μεσόκοκκος ως προς το χρωμίτη και παρουσιάζει όχι και τόσο έντονη κατακλαστική υφή. Το μέγεθος των κόκκων του χρωμίτη κυμαίνεται μεταξύ 0,3 και 0,9 mm, ενώ κατά θέσεις παρατηρήθηκαν και κρύσταλλοι μέχρι 1,3 mm.

Ο Filippidis (1997b) μελετώντας το μέγεθος των κόκκων χρωμίτη στο σερπεντινίτη, στον ενδιάμεσο σερπεντινίτη των ταινιών schlieren, αλλά και στις ταινίες χρωμίτη του Schlieren του κεντρικού τομέα του μεταλλείου Ξερολείβαδου Βούρινου διαπίστωσε ότι αυτός γίνεται πιο αδρόκοκκος όσο πλησιάζουμε στις ταινίες χρωμίτη του Schlieren με το μέσο μέγεθος των κρυστάλλων να μεταβάλλεται από 0,3 στο σερπεντινίτη σε 1,3 mm στο χρωμίτη.

Σύμφωνα με τους Kapsiotis et al. (2006) δείγματα χρωμίτη που συλλέχθηκαν από το Βοϊδόλακκο και το Ξερολείβαδο είναι κυρίως μεσόκοκκα και αποτελούνται από κρυστάλλους χρωμίτη με μέγεθος <5 mm. Σύμφωνα με τον Καψιώτη (2008) οι χρωμίτες του Βούρινου κοκκομετρικά εμφανίζουν μία μεγάλη διακύμανση μεγέθους στους κρυστάλλους χρωμίτη. Στο Βοϊδόλακκο και στο Ξερολείβαδο είναι κυρίως αδροκρυσταλλικοί χρωμίτες, ενώ στο Ριζό και λιγότερο στις Αετορράχες και τα Κουρσούμια τα κοιτάσματα είναι σαφώς πιο

λεπτοκρυσταλλικά με την επικράτηση κυρίως λεπτο-μεσοκρυσταλλικών χρωμιτιτών χωρίς να είναι σπάνια η ανάπτυξη κατά τόπους αδροκρυσταλλικών χρωμιτιτών.

Σύμφωνα με τους Grieco and Merlini (2011) όλα τα χρωμιτιτικά σώματα, ανεξάρτητα από τη μορφή τους (συμπαγή, ταινιωτά ή διάσπαρτα), αποτελούνται από ιδιόμορφους έως υπιδιόμορφους κρυστάλλους χρωμίτη των οποίων το μέγεθος κυμαίνεται μεταξύ 0,1 και 2 mm, με ορισμένους μεγάλους κρυστάλλους να φτάνουν σε σπάνιες περιπτώσεις και τα 5 mm.

#### 4.2. Μικροανάλυση χρωμίτη

Στον Πίν. 16 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές ( $\pm$  την τυπική απόκλιση) των μικροαναλύσεων (% κ.β.) που έγιναν στους χρωμίτες από τις λεπτές τομές των εξεταζόμενων δειγμάτων, καθώς και ο αριθμός κατιόντων ανά 4 οξυγόνα. Συνολικά έγιναν περισσότερες από 400 μικροαναλύσεις, ενώ μετά την αξιολόγησή τους επιλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς του χημικού τύπου του χρωμίτη 80, 86, 69 και 82 μικροαναλύσεις για τους σάκκους 1, 2, 3 και 4, αντίστοιχα. Επίσης, υπολογίστηκαν οι λόγοι  $Mg/(Mg+Fe^{2+})$  και  $Cr/(Cr+Al)$  που χρησιμοποιήθηκαν για την ταξινόμηση του περιεχόμενου στα εξεταζόμενα δείγματα χρωμίτη.

Σύμφωνα με τον Πίν. 16 οι εξεταζόμενοι χρωμίτες περιέχουν κυρίως  $Cr_2O_3$ ,  $FeO+Fe_2O_3$ ,  $MgO$  και  $Al_2O_3$ , ενώ σε ελάχιστες ποσότητες  $SiO_2$ ,  $ZnO$ ,  $MnO$ ,  $NiO$ ,  $TiO_2$  και  $CaO$ . Πιο συγκεκριμένα το  $Cr_2O_3$  κυμαίνεται μεταξύ  $57,07\pm 0,75$  (σάκκος 2) και  $57,79\pm 0,86\%$  κ.β. (σάκκος 4). Όπως παρατηρείται το ποσοστό του περιεχόμενου  $Cr_2O_3$  στους εξεταζόμενους χρωμίτες έχει πολύ μικρή διακύμανση μεταξύ των διαφορετικών σάκκων και είναι ανεξάρτητο από τον τύπο του χρωμίτη, δηλαδή αν πρόκειται για schlieren, διάσπαρτο ή συμπαγές μετάλλευμα.

Σύμφωνα με τους Kassoli-Fournaraki et al. (1995) και Filippidis (1997b) η χημική σύσταση του χρωμίτη σε ακολουθίες υπερβασικών πετρωμάτων μπορεί να μεταβληθεί τόσο κατά το υδρομαγματικό στάδιο, όσο και κατά το μετασωριτικό στάδιο. Αυτές οι μεταβολές μπορεί να προκληθούν από φαινόμενα ανταλλαγής κατιόντων μεταξύ του χρωμίτη και των συνοδών πυριτικών ορυκτών ή το υπάρχον τήγμα σε στερεά ή υποστερεά κατάσταση, αντίστοιχα και επηρεάζονται από το μέγεθος των κόκκων χρωμίτη, τη μερική πίεση του οξυγόνου, τη θερμοκρασία και την πίεση (Filippidis 1997a,b).

Οι Konstantopoulou & Economou-Eliopoulos (1990) μελετώντας τα μεταλλεύματα χρωμίτη του Βούρινου αναφέρουν για τις Αετορράχες ότι το  $Cr_2O_3$  στον χρωμίτη κυμαίνεται μεταξύ 58,75 και 62,32% κ.β.

**Πίνακας 16.** Μικροανάλυση χρωμίτη (% κ.β.) και υπολογισμός χημικού τύπου στα εξεταζόμενα δείγματα.

	<b>ΣΑΚΚΟΣ-1</b> (n = 80)	<b>ΣΑΚΚΟΣ-2</b> (n = 86)	<b>ΣΑΚΚΟΣ-3</b> (n = 69)	<b>ΣΑΚΚΟΣ-4</b> (n = 82)
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0,35 ±0,20	0,28 ±0,14	0,26 ±0,11	0,26 ±0,14
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,23 ±0,12	0,25 ±0,14	0,24 ±0,08	0,23 ±0,12
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	12,57 ±0,64	12,23 ±0,38	11,62 ±0,48	11,90 ±0,53
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	57,22 ±1,00	57,07 ±0,75	57,77 ±0,73	57,79 ±0,86
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*</b>	2,23 ±0,88	3,88 ±0,83	4,44 ±0,73	2,96 ±1,14
<b>FeO*</b>	14,56 ±1,27	12,31 ±0,77	10,55 ±0,66	13,10 ±1,2
<b>MnO</b>	0,28 ±0,19	0,26 ±0,16	0,21 ±0,12	0,27 ±0,2
<b>NiO</b>	0,27 ±0,12	0,28 ±0,12	0,33 ±0,12	0,33 ±0,15
<b>ZnO</b>	0,35 ±0,16	0,41 ±0,14	0,38 ±0,1	0,38 ±0,14
<b>MgO</b>	12,74 ±0,87	14,24 ±0,50	15,38 ±0,43	13,66 ±0,74
<b>CaO</b>	0,14 ±0,05	0,13 ±0,05	0,13 ±0,04	0,15 ±0,06
<b>Σύνολο</b>	99,98 ±0,28	100,21 ±0,35	100,28 ±0,36	100,05 ±0,28
<b>Αριθμός κατιόντων για 4 [O]</b>				
<b>Si</b>	0,011 ±0,006	0,009 ±0,005	0,008 ±0,004	0,008 ±0,005
<b>Ti</b>	0,006 ±0,003	0,006 ±0,003	0,006 ±0,002	0,005 ±0,003
<b>Al</b>	0,475 ±0,022	0,458 ±0,013	0,433 ±0,016	0,449 ±0,019
<b>Cr</b>	1,452 ±0,031	1,434 ±0,022	1,444 ±0,023	1,461 ±0,028
<b>Fe<sup>3+</sup></b>	0,054 ±0,021	0,093 ±0,02	0,105 ±0,017	0,071 ±0,027
<b>Fe<sup>2+</sup></b>	0,391 ±0,037	0,328 ±0,021	0,280 ±0,018	0,351 ±0,034
<b>Mn</b>	0,008 ±0,005	0,007 ±0,004	0,006 ±0,003	0,007 ±0,005
<b>Ni</b>	0,007 ±0,003	0,007 ±0,003	0,008 ±0,003	0,009 ±0,004
<b>Zn</b>	0,008 ±0,004	0,010 ±0,003	0,009 ±0,002	0,009 ±0,003
<b>Mg</b>	0,609 ±0,037	0,674 ±0,021	0,725 ±0,017	0,651 ±0,031
<b>Ca</b>	0,005 ±0,002	0,005 ±0,002	0,004 ±0,001	0,005 ±0,002
<b>Σύνολο</b>	3,000 ±0,000	3,001 ±0,000	3,001 ±0,000	3,001 ±0,000
<b>Mg/(Mg+Fe<sup>2+</sup>)</b>	0,609 ±0,036	0,673 ±0,021	0,721 ±0,017	0,650 ±0,033
<b>Cr/(Cr+Al)</b>	0,753 ±0,012	0,758 ±0,007	0,769 ±0,009	0,765 ±0,09

\*Μετρήθηκε ως FeO και κατανεμήθηκε στοιχειομετρικά.

Ο Filippidis (1996, 1997b) μελετώντας το χρωμίτη στο σερπεντινίτη, στον ενδιάμεσο σερπεντινίτη των ταινιών schlieren, αλλά και στις ταινίες χρωμίτη του Schlieren του κεντρικού τομέα του μεταλλείου Ξερολείβαδου Βούρινου διαπίστωσε ότι το Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> κυμαίνεται μεταξύ 55,98 και 60,08% κ.β. με σαφή τάση εμπλουτισμού από το σερπεντινίτη προς το χρωμίτη των ταινιών Schlieren.

Σύμφωνα με τον Κασιώτη (2008) ο μαγνησιοχρωμίτης από τους χρωμιτίτες των

Αετορραχών Βούρινου εμφανίζουν τιμές  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  μεταξύ 50,51 και 58,21% κ.β. και μικρότερη συμμετοχή  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και  $\text{MgO}$  με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 10,82-18,28% κ.β. και 9,98-14,82% κ.β., αντίστοιχα. Η ταξινόμησή τους στο διάγραμμα Stevens (1944) τους τοποθετεί στην κατηγορία των Al-ούχων χρωμιτών.

Οι Grieco & Merlini (2011) μελετώντας μεταξύ άλλων και μετάλλευμα από τις Αετορράχες διαπίστωσαν ότι οι κόκκοι του χρωμίτη εμφανίζουν συγκεντρώσεις  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  που κυμαίνονται μεταξύ 60,04 και 63,14% κ.β., διακρίνοντας μία σαφώς πιο πλούσια σε  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  εξωτερική ζώνη σιδηροχρωμίτη.

Ο σίδηρος είναι κυρίως  $\text{FeO}$  και κυμαίνεται μεταξύ  $10,55 \pm 0,66$  (σάκκος 3) και  $14,56 \pm 1,27\%$  κ.β. (σάκκος 1), ενώ ο  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  κυμαίνεται μεταξύ  $4,44 \pm 0,73$  (σάκκος 3) και  $2,23 \pm 0,88\%$  κ.β. (σάκκος 1). Οι Konstantopoulou & Economou-Eliopoulos (1990) μελετώντας τα μεταλλεύματα χρωμίτη του Βούρινου αναφέρουν για τις Αετορράχες ότι ο  $\text{FeO}$  στον χρωμίτη κυμαίνεται μεταξύ 11,71 και 13,89% κ.β., ενώ ο  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  φτάνει το 2,59% κ.β. Ο Filippidis (1996, 1997b) μελετώντας το χρωμίτη στο σερπεντινίτη, στον ενδιάμεσο σερπεντινίτη των ταινιών schlieren, αλλά και στις ταινίες χρωμίτη του Schlieren του κεντρικού τομέα του μεταλλείου Ξερολείβαδου Βούρινου διαπίστωσε ότι ο  $\text{FeO}$  κυμαίνεται μεταξύ 10,21 και 16,91% κ.β., ενώ ο  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  κυμαίνεται μεταξύ 2,99 και 5,49% κ.β. Οι Grieco & Merlini (2011) διαπίστωσαν ότι το  $\text{FeO}$  στον αναλλοίωτο πυρήνα του χρωμίτη από το μετάλλευμα των Αετορραχών κυμαίνεται μεταξύ 13,66 και 14,68% κ.β., ενώ του  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  κυμαίνεται μεταξύ 0,53 και 1,21% κ.β.

Το  $\text{MgO}$  κυμαίνεται μεταξύ  $12,74 \pm 0,87$  (σάκκος 1) και  $15,38 \pm 0,43\%$  κ.β. (σάκκος 3), ενώ το  $\text{Al}_2\text{O}_3$  κυμαίνεται μεταξύ  $11,62 \pm 0,48$  (σάκκος 3) και  $12,57 \pm 0,64\%$  κ.β. (σάκκος 1). Οι Konstantopoulou & Economou-Eliopoulos (1990) μελετώντας τα μεταλλεύματα χρωμίτη του Βούρινου αναφέρουν για τις Αετορράχες ότι το  $\text{MgO}$  στον χρωμίτη κυμαίνεται μεταξύ 11,98 και 14,27% κ.β., ενώ το  $\text{Al}_2\text{O}_3$  στο χρωμίτη κυμαίνεται μεταξύ 9,92 και 11,91% κ.β. Ο Filippidis (1996, 1997b) μελετώντας το χρωμίτη στο σερπεντινίτη, στον ενδιάμεσο σερπεντινίτη των ταινιών schlieren, αλλά και στις ταινίες χρωμίτη του Schlieren του κεντρικού τομέα του μεταλλείου Ξερολείβαδου Βούρινου διαπίστωσε ότι το  $\text{MgO}$  κυμαίνεται μεταξύ 10,91 και 15,24% κ.β., ενώ το  $\text{Al}_2\text{O}_3$  μεταξύ 9,94 και 12,02% κ.β. Οι Grieco & Merlini (2011) διαπίστωσαν ότι το  $\text{MgO}$  στον αναλλοίωτο πυρήνα του χρωμίτη από το μετάλλευμα των Αετορραχών κυμαίνεται μεταξύ 12,17 και 12,94% κ.β., ενώ το  $\text{Al}_2\text{O}_3$  μεταξύ 11,10 και 11,25% κ.β.

Όσον αφορά τα υπόλοιπα στοιχεία που μετρήθηκαν σε ελάχιστες ποσότητες το  $\text{SiO}_2$



κυμαίνεται μεταξύ 0,26 και 0,35% κ.β., το ZnO κυμαίνεται μεταξύ 0,35 και 0,41% κ.β., το MnO κυμαίνεται μεταξύ 0,21 και 0,28% κ.β., το NiO κυμαίνεται μεταξύ 0,27 και 0,33% κ.β., το TiO<sub>2</sub> κυμαίνεται μεταξύ 0,23 και 0,25% κ.β. και τέλος το CaO κυμαίνεται μεταξύ 0,13 και 0,15% κ.β. Οι Konstantopoulou & Economou-Eliopoulos (1990) μελετώντας τα μεταλλεύματα χρωμίτη του Βούρινου αναφέρουν για τις Αετορράχες ότι το NiO στον χρωμίτη κυμαίνεται μεταξύ 0,08 και 0,23% κ.β., το MnO στο χρωμίτη κυμαίνεται μεταξύ 0,21 και 0,26% κ.β., το TiO<sub>2</sub> στο χρωμίτη κυμαίνεται μεταξύ 0,08 και 0,26% κ.β., ενώ το SiO<sub>2</sub> στο χρωμίτη μετρήθηκε μεταξύ 0,04 και 0,06% κ.β. Σύμφωνα με τον Πίν. 11 ο χημικός τύπος των εξεταζόμενων χρωμιτών από τους διάφορους τύπους μεταλλεύματος στις Αετορράχες Βούρινου έχει μικρή διακύμανση και κυμαίνεται μεταξύ:



και

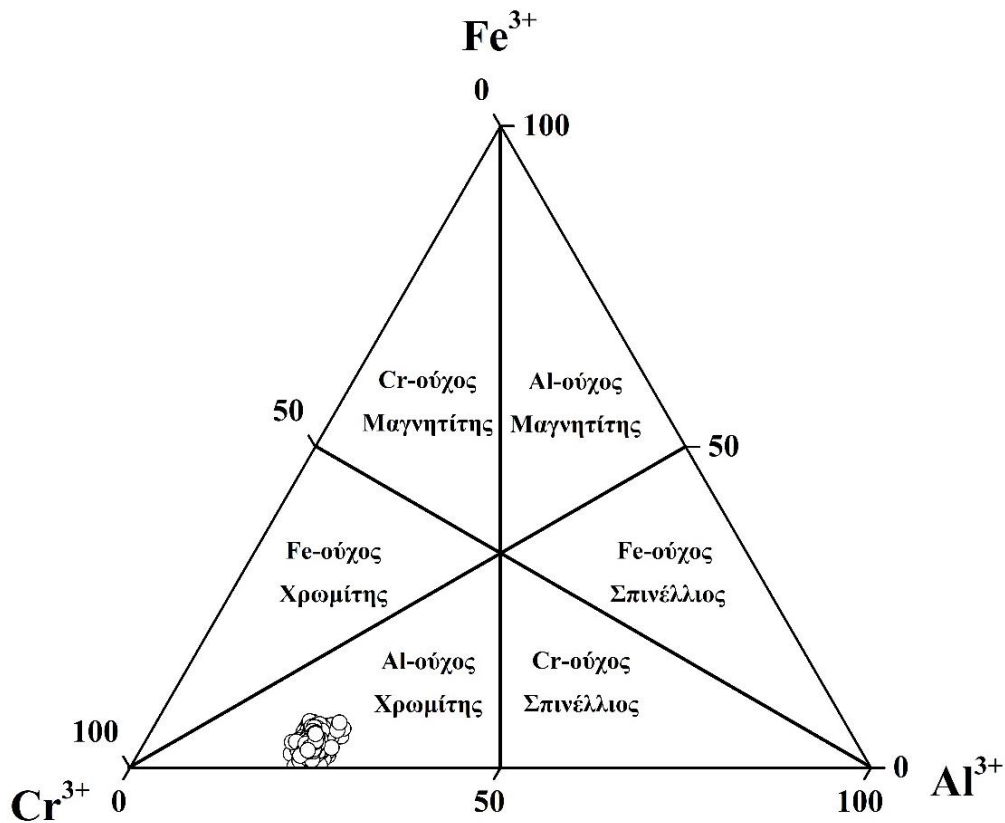


Λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό κατιόντων που υπολογίστηκαν για 4 οξυγόνα (Πίν. 16) ταξινομήθηκαν οι εξεταζόμενοι χρωμίτες με δύο τρόπους. Πρώτον, σύμφωνα με Stevens (1944) σε τριγωνικό διάγραμμα λαμβάνοντας υπόψη την αναλογία Cr, Al και Fe<sup>3+</sup> (Εικ. 62). Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή όλοι οι εξεταζόμενοι χρωμίτες εμπίπτουν στην κατηγορία Al-ούχοι χρωμίτες. Οι Filippidis et al. (2000) μελετώντας χρωμίτες του νοτίου τομέα του μεταλλείου Ξερολείβαδου Βούρινου, ταξινόμησαν επίσης κατά Stevens (1944) ως Al-ούχους χρωμίτες.

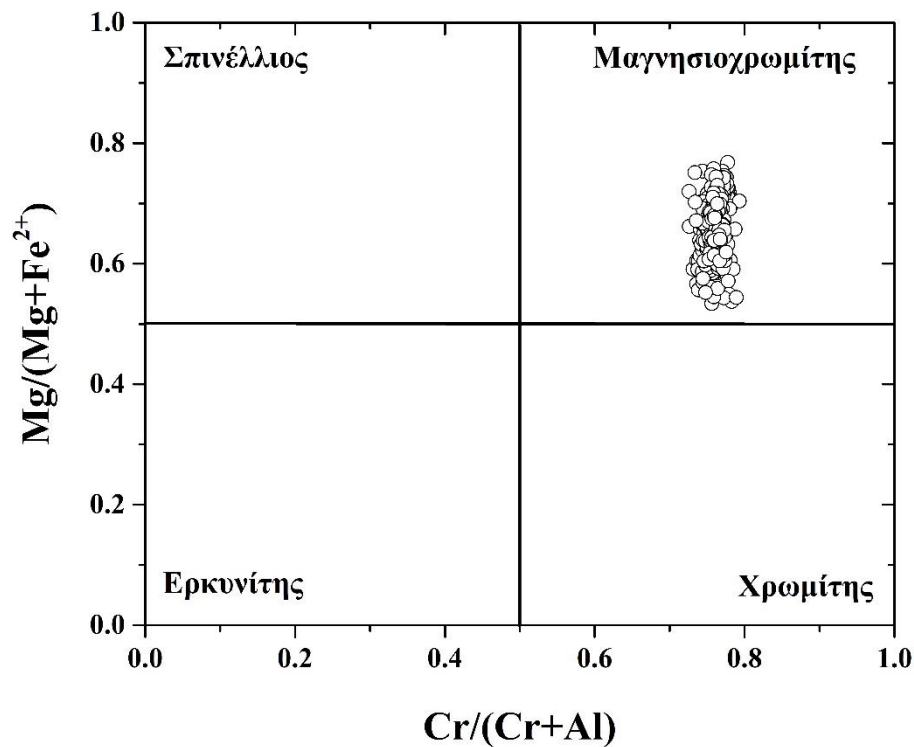
Δεύτερον, με χρήση των λόγων Mg/(Mg+Fe<sup>2+</sup>) και Cr/(Cr+Al), οι μέσες τιμές των οποίων κυμαίνονται για τα εξεταζόμενα δείγματα μεταξύ 0,609±0,036 και 0,721±0,017 και μεταξύ 0,753±0,012 και 0,769±0,009, αντίστοιχα. Με βάση τους λόγους Mg/(Mg+Fe<sup>2+</sup>) και Cr/(Cr+Al) των εξεταζόμενων χρωμιτών αυτοί ταξινομούνται ως σύστασης μαγνησιοχρωμίτη (Εικ. 63).

Οι Konstantopoulou & Economou-Eliopoulos (1990) μελετώντας τα μεταλλεύματα χρωμίτη του Βούρινου αναφέρουν για τις Αετορράχες ότι οι λόγοι Mg/(Mg+Fe<sup>2+</sup>) και Cr/(Cr+Al) μεταβάλλονται μεταξύ 0,61-0,68 και 0,77-0,81, αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τον Καπιώτη (2008) οι Cr-ούχοι σπινέλιοι από τους περιδοτίτες και τους χρωμιτίτες του Βούρινου εμφανίζουν τιμές των λόγων Mg/(Mg+Fe<sup>2+</sup>) και Cr/(Cr+Al) υψηλότερες από 0,5 που αντιστοιχούν σε σπινέλιους σύστασης μαγνησιοχρωμίτη.



Εικόνα 62. Τριγωνικό διάγραμμα ταξινόμησης εξεταζόμενου χρωμίτη κατά Stevens (1944).



Εικόνα 56. Διάγραμμα ταξινόμησης εξεταζόμενου χρωμίτη στο ορθογώνιο διάγραμμα Stevens (1944) και Dick & Bullen (1984).

### 4.3. Θραύση και ταξινόμηση

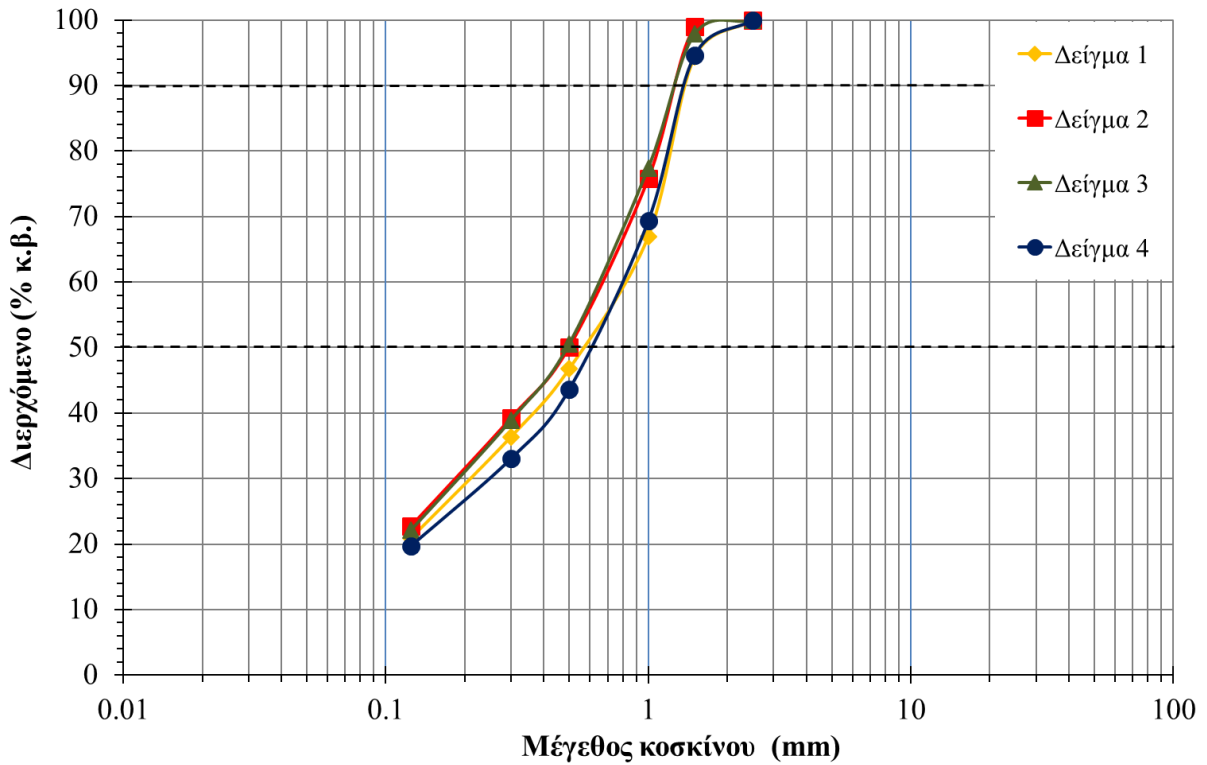
Τα έξι (6) κοκκομετρικά κλάσματα που προέκυψαν για κάθε ένα από τα τέσσερα δείγματα που συλλέχθηκαν, ζυγίστηκαν και τα αποτελέσματα δίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίν. 17). Επίσης, κατασκευάστηκαν οι αθροιστικές κοκκομετρικές καμπύλες συχνότητας (Εικ. 64) και το διάγραμμα Gates-Gaudin-Schuhmann με τις αντίστοιχες συναρτήσεις για κάθε δείγμα (Εικ. 65).

**Πίνακας 17.** Κοκκομετρικά κλάσματα (mm) των εξεταζόμενων δειγμάτων.

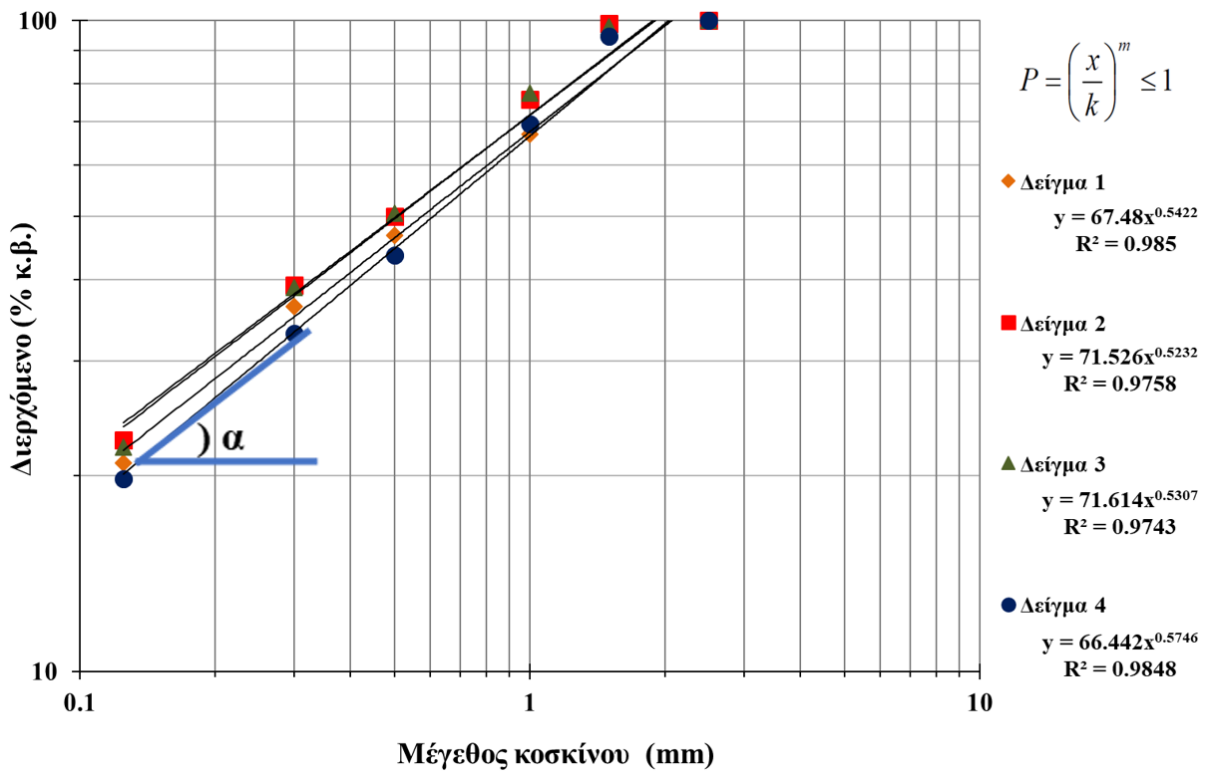
Κοκκομετρικό κλάσμα (mm)	Σάκκος							
	1		2		3		4	
	Βάρος Διερχόμενο (g)	(%)	Βάρος Διερχόμενο (g)	(%)	Βάρος Διερχόμενο (g)	(%)	Βάρος Διερχόμενο (g)	(%)
"-2,0 έως +1,5"	869	100,00	144	100,00	326	100,00	831	100,00
"-1,5 έως +1,0"	4199	94,33	3160	98,94	3117	97,86	3888	94,60
"-1,0 έως +0,5"	3096	66,93	3503	75,76	4098	77,43	3957	69,34
"-0,5 έως +0,3"	1593	46,73	1477	50,06	1777	50,56	1624	43,64
"-0,3 έως +0,125"	2368	36,33	2254	39,22	2563	38,91	2052	33,09
"-0,125"	3200	20,88	3092	22,69	3373	22,11	3041	19,76
<b>Σύνολο</b>	<b>15325</b>		<b>13630</b>		<b>15254</b>		<b>15393</b>	

Όπως προκύπτει από την Εικ. 64 οι τιμές d50 (50% κ.β. αθροιστικό βάρος) είναι παρόμοιες για όλα τα δείγματα και κυμαίνονται μεταξύ 0,5-0,6 mm. Παράλληλα, οι τιμές d90 (90% κ.β. αθροιστικό βάρος) κυμαίνονται μεταξύ 1,2 και 1,4 mm. Η ύπαρξη αυξημένου ποσοστού λεπτομερών υλικών οφείλεται, κατά τόσο στην έντονη κατακλαστική υφή που παρουσιάζει το μέταλλευμα, όσο και στη χρήση του περιστροφικού θραυστήρα ο οποίος εφαρμόζει δυνάμεις διάτμησης (shearing) και κρούσης (impact). Οι τιμές d50 και d90 χρησιμοποιούνται για το χαρακτηρισμό των θραυστών υλικών και η παρόμοια διακύμανση των τιμών τους στα εξεταζόμενα δείγματα δείχνει ότι αυτά θραύονται με παρόμοιο τρόπο. Η παρατήρηση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν το αρχικό υλικό είναι μέταλλευμα που πρόκειται, μετά από θραύση, να ακολουθήσει άμεσα η εφαρμογή μεθόδου εμπλουτισμού ή το υλικό να ανακυκλωθεί για επιπλέον λειοτρίβηση.

Από την Εικ. 65 προκύπτει ότι η γωνία  $\alpha$  είναι σχετικά μικρή (εφα: 0,52 – 0,57), συνεπώς το παραγόμενο από την εργαστηριακή θραύση υλικό των εξεταζόμενων δειγμάτων δεν είναι αρκετά ομοιόμορφο και δίνει σημαντικό ποσοστό λεπτομερών τεμαχίων. Η παρατήρηση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην τελική επιλογή των μηχανημάτων θραύσης η οποία θα επηρεάσει και τον εμπλουτισμό του εξεταζόμενου μεταλλεύματος.



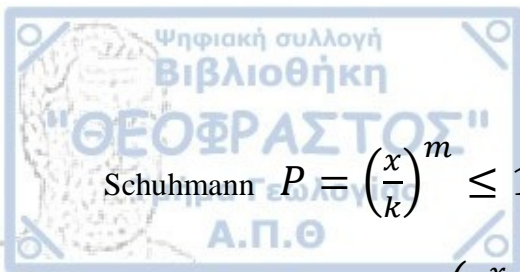
Εικόνα 64. Αθροιστικές καμπύλες συχνότητας (% κ.β.) των εξεταζόμενων δειγμάτων.



Εικόνα 65. Διάγραμμα Gates-Gaudin-Schuhmann με τις αντίστοιχες συναρτήσεις για τα εξεταζόμενα δείγματα.

Προσαρμόζοντας τα στοιχεία της εικόνας 65 στην μορφή της κατανομής Gates-Gaudin-





Schuhmann  $P = \left(\frac{x}{k}\right)^m \leq 1$  προκύπτει για κάθε δείγμα:

- Δείγμα 1:  $P = \left(\frac{x}{2,06}\right)^{0,5422} \leq 1$
- Δείγμα 2:  $P = \left(\frac{x}{1,897}\right)^{0,5232} \leq 1$
- Δείγμα 3:  $P = \left(\frac{x}{1,876}\right)^{0,5307} \leq 1$
- Δείγμα 4:  $P = \left(\frac{x}{2,037}\right)^{0,5746} \leq 1$

#### 4.4 Προϊόντα θραύσης και ταξινόμησης

##### 4.4.1 Ορυκτολογική ανάλυση

Στον Πίν. 18 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του προσδιορισμού της ορυκτολογικής σύστασης (% κ.β.) των κοκκομετρικών κλασμάτων των εξεταζόμενων δειγμάτων, ενώ στην Εικ. 66 δίνονται τα διαγράμματα συσχέτισης των κοκκομετρικών κλασμάτων (mm) με τα περιεχόμενα ορυκτά (% κ.β.). Επίσης, στον Πίν. 18 δίνεται και η μέση σύσταση για κάθε σάκκο που υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη την ορυκτολογική σύσταση κάθε κλάσματος και τα δεδομένα του Πίν. 17.

Σύμφωνα με τον Πίν. 18 στα εξεταζόμενα δείγματα και τα παραγόμενα από αυτά κοκκομετρικά κλάσματα περιέχονται χρωμίτης, σερπεντίνης, πυροαουρίτης και ολιβίνης σε όλα τα δείγματα και πυρόξενος και αμφίβολος σε ορισμένα από αυτά. Συγκεκριμένα, ο χρωμίτης κυμαίνεται στον σάκκο 1 μεταξύ 18 (κλάσμα "-2,0 έως +1,5") και 38% κ.β. (κλάσμα "-0,3 έως +0,125"), στο σάκκο 2 μεταξύ 27 (κλάσμα "-1,0 έως +0,5") και 46% κ.β. (κλάσμα "-0,5 έως +0,3"), στο σάκκο 3 μεταξύ 32 (κλάσμα "-2,0 έως +1,5") και 59% κ.β. (κλάσμα "-0,3 έως +0,125") και στο σάκκο 4 μεταξύ 6 (κλάσμα "-1,0 έως +0,5") και 26% κ.β. (κλάσμα "-1,5 έως +1,0"). Όσον αφορά τη μέση σύσταση, ο χρωμίτης κυμαίνεται μεταξύ 16 (σάκκος 4) και 47% κ.β. (σάκκος 3), διαπιστώνεται δηλαδή ότι το μέταλλευμα του σάκκου 3 είναι το πλουσιότερο, ενώ αυτό του σάκκου 4 το φτωχότερο σε χρωμίτη. Ο Κασιώτης (2008) μελετώντας ορυκτολογικά χρωμιτίτες από τις Αετορράχες διαπίστωσε ότι αποτελούνται από χρωμίτη σε ποσοστό μεταξύ 35 και 60% κ.β., σερπεντίνη σε ποσοστό μεταξύ 10 και 40% κ.β. και ολιβίνη σε ποσοστό μεταξύ 10 και 40% κ.β., ενώ σε ορισμένα δείγματα αναγνώρισε και μικρά ποσοστά χλωρίτη (έως 5% κ.β.).

**Πίνακας 18.** Ορυκτολογική σύσταση (% κ.β.) των κοκκομετρικών κλασμάτων.

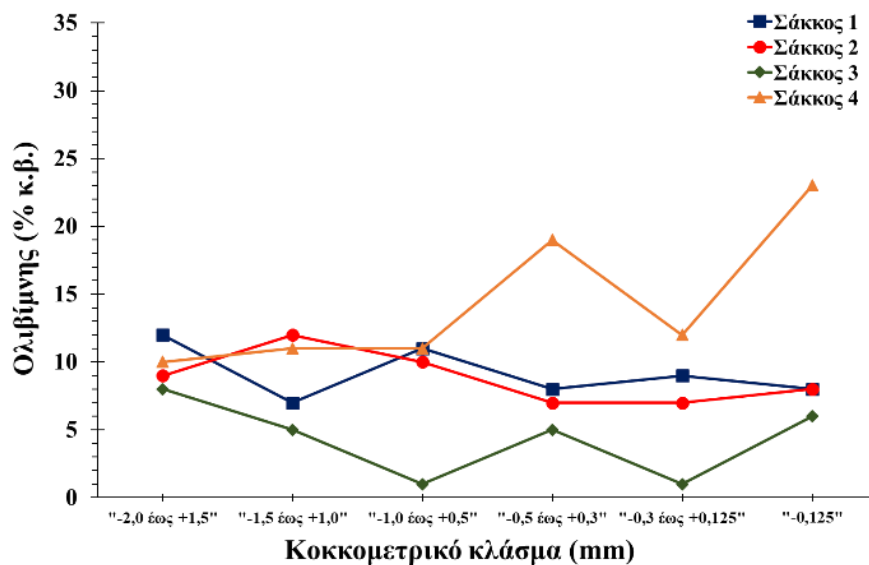
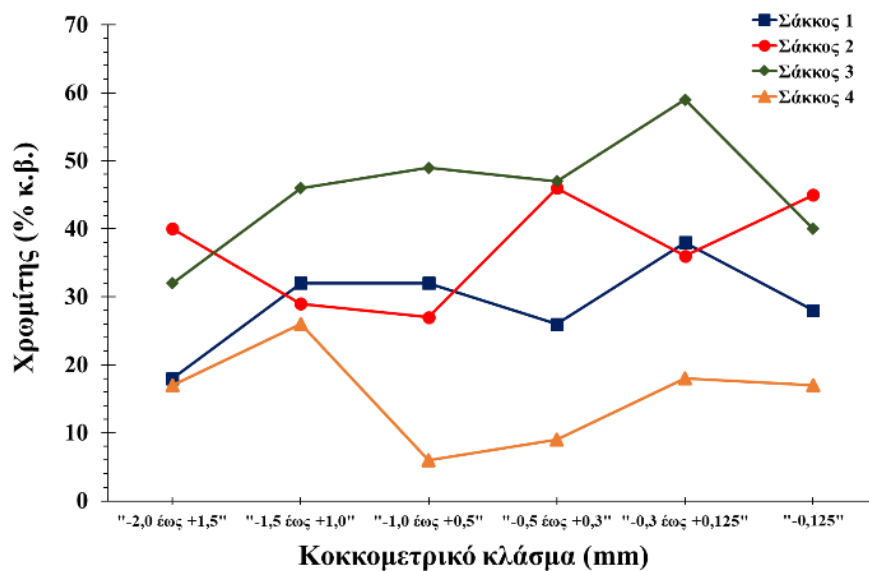
Κοκκομετρικό κλάσμα (mm)	Chr	Oi	Px	Serp	Am	Pyr
Σάκκος 1	"-2,0 έως +1,5"	18	12	4	47	19
	"-1,5 έως +1,0"	32	7		38	23
	"-1,0 έως +0,5"	32	11		40	17
	"-0,5 έως +0,3"	26	8		42	24
	"-0,3 έως +0,125"	38	9	5	28	20
	"-0,125"	28	8	2	38	24
	<b>Μέση σύσταση*</b>	<b>31</b>	<b>9</b>	<b>1</b>	<b>38</b>	<b>21</b>
Σάκκος 2	"-2,0 έως +1,5"	40	9	2	35	14
	"-1,5 έως +1,0"	29	12		46	13
	"-1,0 έως +0,5"	27	10	3	46	14
	"-0,5 έως +0,3"	46	7	2	35	10
	"-0,3 έως +0,125"	36	7	1	42	14
	"-0,125"	45	8	7	30	10
	<b>Μέση σύσταση</b>	<b>35</b>	<b>9</b>	<b>3</b>	<b>40</b>	<b>12</b>
Σάκκος 3	"-2,0 έως +1,5"	32	8	8	33	19
	"-1,5 έως +1,0"	46	5	9	25	15
	"-1,0 έως +0,5"	49	1		34	16
	"-0,5 έως +0,3"	47	5		33	15
	"-0,3 έως +0,125"	59	1		23	17
	"-0,125"	40	6		35	19
	<b>Μέση σύσταση</b>	<b>47</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>30</b>	<b>17</b>
Σάκκος 4	"-2,0 έως +1,5"	17	10	24	37	3
	"-1,5 έως +1,0"	26	11	8	38	7
	"-1,0 έως +0,5"	6	11	24	45	4
	"-0,5 έως +0,3"	9	19	16	44	2
	"-0,3 έως +0,125"	18	12	11	43	1
	"-0,125"	17	23	8	40	2
	<b>Μέση σύσταση</b>	<b>16</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>41</b>	<b>4</b>

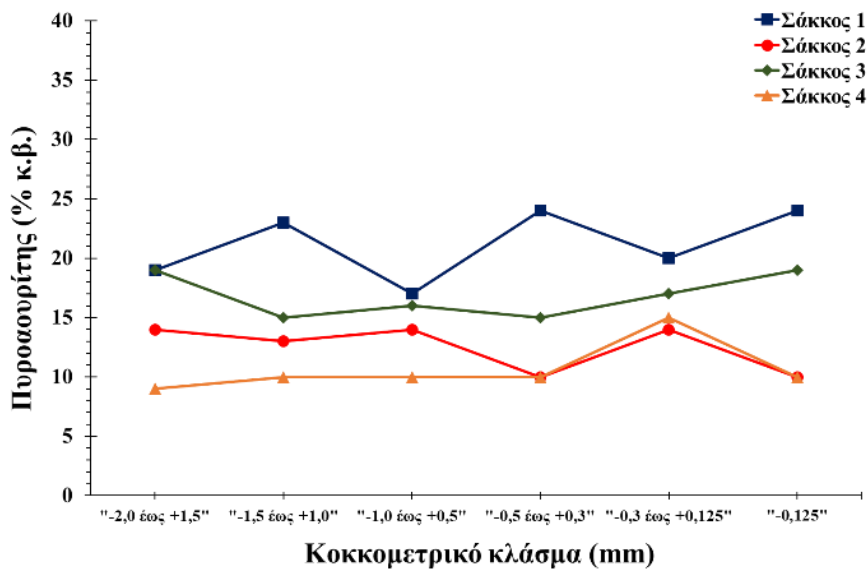
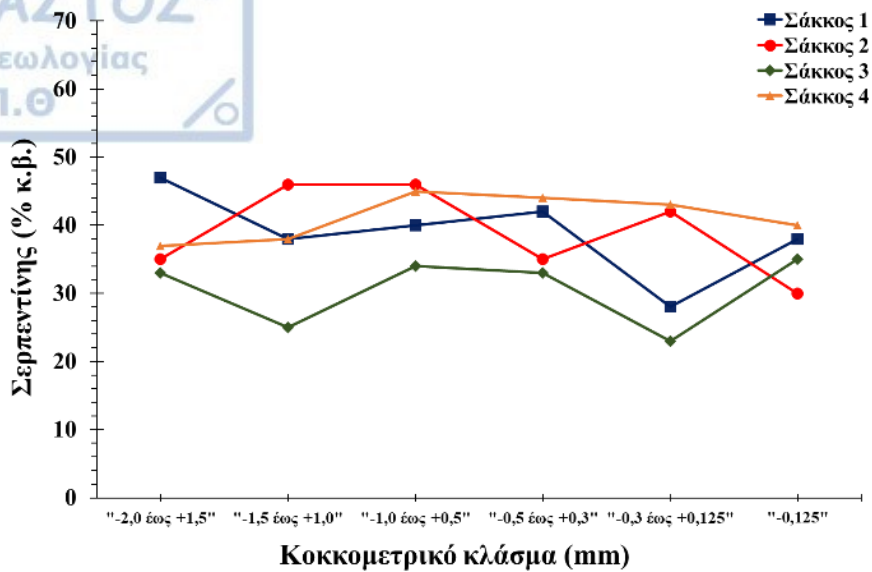
Chr: Χρωμίτης, Oi: Ολιβίνης σύστασης φορστερίτη, Px: Πυρόξενος σύστασης ενστατίτη, Serp: Σερπεντίνης, Am: Αμφίβολος, Pyr: Πυροσουλφίτης. \*Μέση σύσταση όπως υπολογίστηκε για τα εξεταζόμενα δείγματα λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα του Πιν. 17.

Ο σερπεντίνης κυμαίνεται στον σάκκο 1 μεταξύ 28 (κλάσμα "-0,3 έως +0,125") και 47% κ.β. (κλάσμα "-2,0 έως +1,5"), στο σάκκο 2 μεταξύ 30 (κλάσμα "-0,125") και 46% κ.β. (κλάσματα "-1,5 έως +1,0" και "-1,0 έως +0,5"), στο σάκκο 3 μεταξύ 23 (κλάσμα "-0,3 έως +0,125") και 35% κ.β. (κλάσμα "-0,125") και στο σάκκο 4 μεταξύ 37 (κλάσμα "-2,0 έως +1,5") και 45% κ.β. (κλάσμα "-1,0 έως +0,5"). Όσον αφορά τη μέση σύσταση, ο σερπεντίνης κυμαίνεται μεταξύ 30 (σάκκος 3) και 41% κ.β. (σάκκος 4), διαπιστώνεται δηλαδή ότι το μέταλλευμα του σάκκου 4 είναι το πλουσιότερο, ενώ αυτό του σάκκου 3 το φτωχότερο σε σερπεντίνη. Σύμφωνα με τους Grieco and Merlini (2011) στις Αετορράχες παρατηρείται εκτεταμένη σερπεντινίωση από την οποία έχουν διατηρηθεί μόνο λίγοι υπολειμματικοί κρύσταλλοι πυρόξενου και ολιβίνης.

Σύμφωνα με το νόμο του Bond, όταν εφαρμοστεί μια ποσότητα ενέργειας μέσω του θραυστήρα στο αρχικό δείγμα, τότε τα επιμέρους ορυκτά θραύονται σε διαφορετικό βαθμό. Γι' αυτό άλλωστε και παρουσιάζεται διαφορετική χημική και ορυκτολογική ανάλυση σε κάθε κλάσμα.

Σύμφωνα με τον Filippidis (1982, 1985) η ενυδάτωση Mg-Fe-Ni ολιβίνη παρουσία θείου (S) οδηγεί στο σχηματισμό σερπεντίνη και βρουσίτη και στη μετατροπή μέρους του σιδήρου και νικελίου σε μαγνητίτη και σουλφίδια σύμφωνα με την αντίδραση: (Mg,Fe,Ni)-ολιβίνης + H<sub>2</sub>O + S<sub>2</sub> → Σερπεντίνης + Βρουσίτης + Μαγνητίτης + Σουλφίδια. Τα σουλφίδια που μπορεί να παραχθούν είναι χεζλεγουδίτης, πετλανδίτης, μιλερίτης ± μπραβοΐτης, ± σιδηροπυρίτης, ανάλογα με τη μερική πίεση του θείου (S).





Εικόνα 66. Συσχέτιση των κοκκομετρικών κλασμάτων (mm) με τα περιεχόμενα ορυκτά (% κ.β.).

Ο πυροαουρίτης  $[Mg_6Fe^{3+}_2(CO_3)(OH)_{16} \times 4H_2O]$  κυμαίνεται στον σάκκο 1 μεταξύ 17 (κλάσμα "-1,0 έως +0,5") και 24% κ.β. (κλάσματα "-0,5 έως +0,3" και "-0,125"), στο σάκκο 2 μεταξύ 10 (κλάσματα "-0,5 έως +0,3" και "-0,125") και 14% κ.β. (κλάσματα "-2,0 έως +1,5", "-1,0 έως +0,5" και "-0,3 έως +0,125"), στο σάκκο 3 μεταξύ 15 (κλάσματα "-1,5 έως +1,0" και "-0,5 έως +0,3") και 19% κ.β. (κλάσματα "-2,0 έως +1,5" και "-0,125") και στο σάκκο 4 μεταξύ 9 (κλάσμα "-2,0 έως +1,5") και 15% κ.β. (κλάσμα "-0,3 έως +0,125"). Όσον αφορά τη μέση σύσταση, ο πυροαουρίτης κυμαίνεται μεταξύ 11 (σάκκος 4) και 21% κ.β. (σάκκος 1), διαπιστώνεται δηλαδή ότι το μέταλλευμα του σάκκου 1 είναι το πλουσιότερο, ενώ αυτό του σάκκου 4 το φτωχότερο σε πυροαουρίτη. Για να εξηγήσουν τις φυσικές εμφανίσεις του



πυροαουρίτη, οι Hansen & Taylor (1990) πρότειναν μια αντίδραση που περιλαμβάνει έναν χαμηλό ρυθμό οξειδωσης του Fe(II) που προέρχεται από τη διάλυση σιδηρίτη ( $\text{FeCO}_3$ ) σε ένα πλούσιο σε μαγνήσιο διάλυμα σε pH 8,5. Βασίστηκαν στις παρατηρήσεις ότι ο πυροαουρίτης συνδέονταν συχνά στη φύση με βρουσίτη [ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ] και μαγνησίτη ( $\text{MgCO}_3$ ), και ότι ο σιδηρίτης μερικές φορές βρέθηκε επίσης με μαγνησίτη, το ισόμορφο ανάλογό του. Σύμφωνα με τους Taylor et al. (1991) στις οφειολιθικές ακολουθίες ο πυροαουρίτης διαπιστώθηκε ότι συνδέεται με σερπεντινωμένο δουνίτη και ο σχηματισμός του περιορίζεται σε μία στενή ζώνη κάτω από τη στάθμη του υπόγειου νερού όπου λαμβάνει χώρα ανάμιξη υπόγειων νερών διαφορετικής σύστασης. Σύμφωνα με τους Sato et al. (2001) η αποσάθρωση των σερπεντινιτών και ο σχηματισμός σταθερών ένυδρων φάσεων του  $\text{MgCO}_3$  ελέγχεται από την ορυκτολογική σύσταση του αρχικού πετρώματος υπερβασικού πετρώματος και το βαθμό σερπεντινίωσης αυτού. Ο πυροαουρίτης εμφανίζεται με τη μορφή πλακοειδών κρυστάλλων που αναπτύσσονται ψευδόμορφα στη θέση Al- και Fe-ούχων σερπεντινιτών σε συνθήκες pH >9. Πιο συγκεκριμένα, στο τελευταίο στάδιο της σερπεντινίωσης όταν η  $P_{\text{CO}_2}$  και η θερμοκρασία πέσουν και η  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  πλησιάζει την τάση υδρατμών του νερού, δηλαδή επικρατούν υδροθερμικές συνθήκες, ο πυροαουρίτης εμφανίζεται σε πολύ εξαλλοιωμένες θέσεις ως μάζες που αναπτύσσονται ακανόνιστα εντός των υπερβασικών πετρωμάτων. Οι Μπόσκος & Περδικάτσης (1986) μελετώντας την εμφάνιση πυροαουρίτη σε δουνιτικό σερπεντινίτη της περιοχής Ξερολειβάδου στο νότιο Βούρινο διαπίστωσαν ότι αυτός εμφανίζεται με τη μορφή ζωνών μεταξύ αποσαθρωμένου και υγιούς σερπεντινικού δουνίτη και ο σχηματισμός του αποδίδεται στη μετατροπή του βρουσίτη σε πυροαουρίτη με ταυτόχρονη αποβολή μαγνησίου από τον πρώτο. Οι Stamatakis & Mitsis (2013) μελετώντας εξαλλοιωμένα οφειολιθικά πετρώματα από τα Γεράνια όρη (Δ. Αττική και ΒΑ Αργολίδα) διαπίστωσαν την ύπαρξη ακανόνιστων συγκεντρώσεων από λευκόχρωμα ορυκτά συσσωματώματα μέσα σε έντονα εξαλλοιωμένα και σερπεντινωμένα υπερβασικά πετρώματα. Τα συσσωματώματα αυτά αποτελούνται από υδρομαγνησίτη, μαγνησίτη, χουντίτη, καθώς και ορυκτά της ομάδας των πυροαουριτών, με τους τελευταίους να αποτελούν σε ορισμένες θέσεις την κύρια φάση. Θεωρούν ότι ο σχηματισμός των δευτερογενών αυτών ορυκτών ελέγχεται από την εξαλλοίωση των οφειόλιθων, ως συνδυασμένη δράση της έντονης υδροθερμικής δραστηριότητας πλούσιων σε  $\text{CO}_2$  διαλυμάτων, του τεκτονισμού, καθώς και του χημισμού του εδαφικού νερού που χαρακτηρίζεται από μεγάλες τιμές του λόγου Mg/Ca και του pH.

Ο ολιβίνης κυμαίνεται στον σάκκο 1 μεταξύ 7 (κλάσμα "-1,5 έως +1,0") και 12% κ.β. (κλάσμα "-2,0 έως +1,5"), στο σάκκο 2 μεταξύ 7 (κλάσματα "-0,5 έως +0,3" και "-0,3 έως

+0,125") και 12% κ.β. (κλάσμα "-1,5 έως +1,0"), στο σάκκο 3 μεταξύ 1 (κλάσματα "-1,0 έως +0,5" και "-0,3 έως +0,125") και 8% κ.β. (κλάσμα "-2,0 έως +1,5") και στο σάκκο 4 μεταξύ 10 (κλάσμα "-2,0 έως +1,5") και 23% κ.β. (κλάσμα "-0,125"). Όσον αφορά τη μέση σύσταση, ο ολιβίνης κυμαίνεται μεταξύ 4 (σάκκος 3) και 14% κ.β. (σάκκος 4), διαπιστώνεται δηλαδή ότι το μέταλλευμα του σάκκου 4 είναι το πλουσιότερο, ενώ αυτό του σάκκου 3 το φτωχότερο σε ολιβίνη. Ο Filippidis (1996) μελετώντας λεπτές τομές από δείγματα σερπεντινίτη του κεντρικού τομέα του μεταλλείου Ξερολείβαδου Βούρινου με τη μέθοδο της εμβαδομέτρησης με σημειομετρική διαπίστωση ότι ο ολιβίνης περιέχεται σε μικρό ποσοστό που κυμαίνεται μεταξύ 6,7 και 7,9% κ.β.

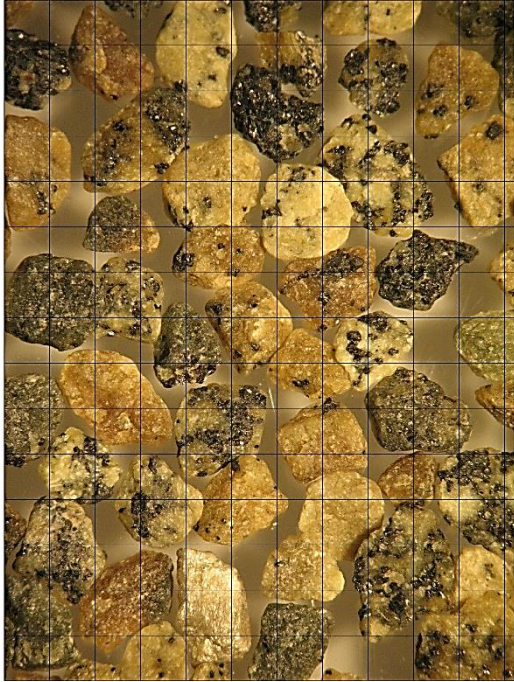
Ο πυρόξενος αναγνωρίστηκε σε όλα τα δείγματα όχι όμως και σε όλα τα κοκκομετρικά κλάσματα. Έτσι, η μέση σύσταση του πυρόξενου κυμαίνεται μεταξύ 1 (σάκκος 1) και 14% κ.β. (σάκκος 4). Τέλος, αμφίβολος αναγνωρίστηκε μόνο στο σάκκο 4 με τη μέση περιεκτικότητά του να προσδιορίζεται σε 4% κ.β. Ο Καμιάτης (2008) μελετώντας τα οφειολιθικά πετρώματα του Βούρινου αναφέρει μεταξύ άλλων και την παρουσία τρεμολίτη σε αυτά θεωρώντας ότι αποτελεί προϊόν δευτερογενούς μετασχηματισμού των πυροξένων.

Κατά τη θραύση και κοσκίνιση των εξεταζόμενων δειγμάτων διαπιστώθηκε ότι το μέταλλευμα του σάκκου 4 συμπεριφέρεται εντελώς διαφορετικά στη θραύση σε σύγκριση με τα υπόλοιπα 3 δείγματα. Όπως προκύπτει από τα δεδομένα τη ορυκτολογικής σύστασης των κοκκομετρικών κλασμάτων (Πίν. 18) το συγκεκριμένο δείγμα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα περιέχει σημαντικές ποσότητες πυρόξενου και αμφίβολου και είναι φτωχό σε χρωμίτη. Συνεπώς, το δείγμα 4 δεν είναι αντιπροσωπευτικό της μεταλλοφορίας και δεν μελετήθηκε περαιτέρω. Το συνολικό βάρος των τριών δειγμάτων που στη συνέχεια εξετάστηκαν (σάκκος 1, σάκκος 2, σάκκος 3) ανέρχεται στα 44,2 κιλά που είναι επαρκής και αντιπροσωπευτική ποσότητα για τη μελέτη της εξεταζόμενης μεταλλοφορίας.

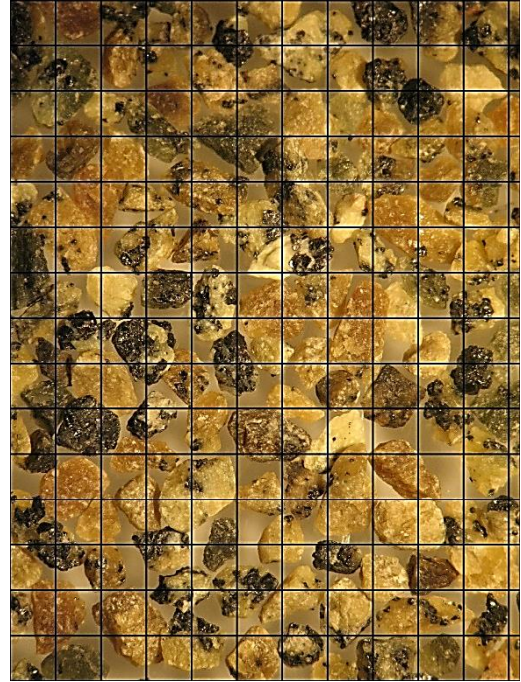
#### **4.4.2 Παρατήρηση σε στερεοσκόπιο**

Τα προϊόντα της ταξινόμησης εξετάστηκαν σε στερεοσκόπιο και αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες από το δείγμα του σάκκου 1 φαίνονται στην Εικ. 67. Τα δείγματα πλύθηκαν με απιονισμένο νερό και ξηράνθηκαν προκειμένου οι κόκκοι να είναι απαλλαγμένοι από το λεπτομερές υλικό και τη σκόνη.





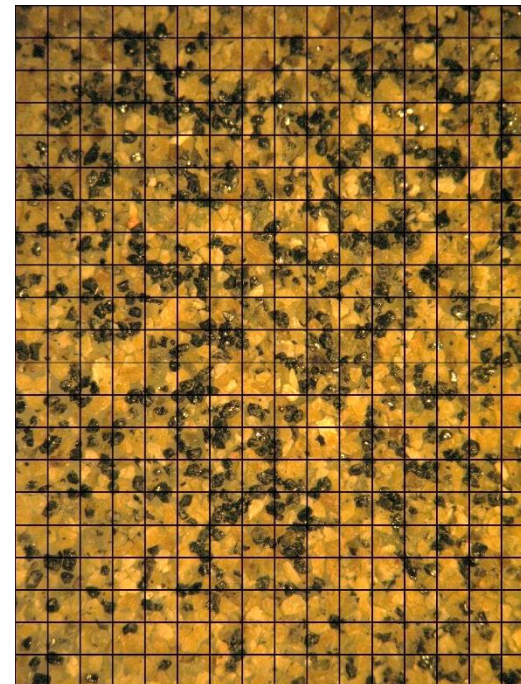
Κλάσμα «-2,0 έως +1,5» mm



Κλάσμα «-1,5 έως +1,0» mm

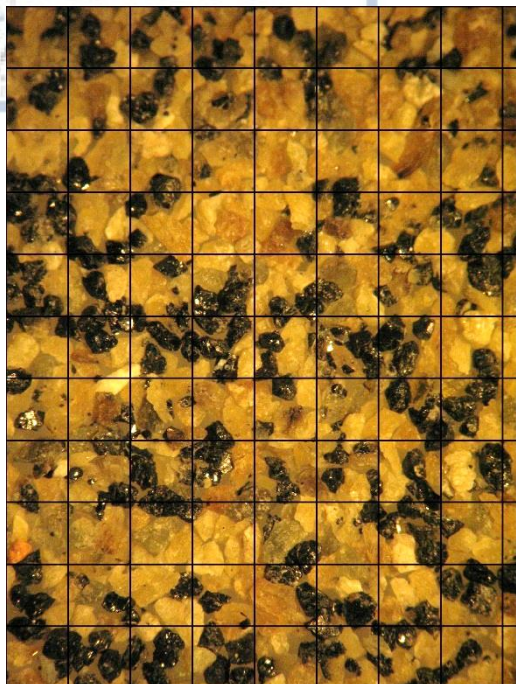


Κλάσμα «-1,0 έως 0,5» mm.

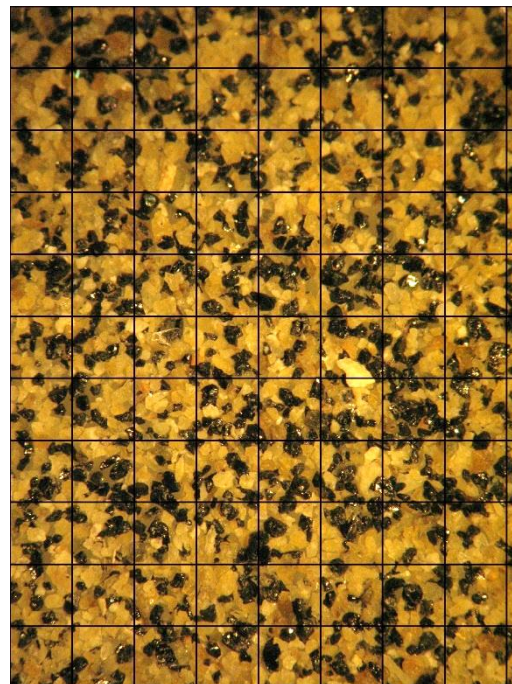


Κλάσμα «-0,5 έως +0,3» mm.





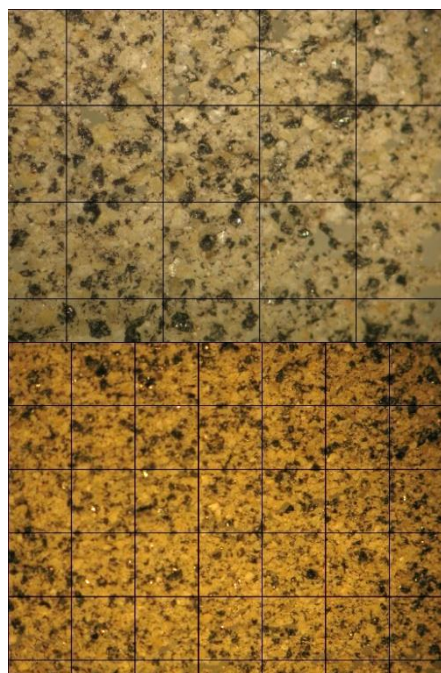
Κλάσμα  $\langle -0,5 \text{ έως } +0,3 \rangle \text{ mm}$ .



Κλάσμα  $\langle -0,3 \text{ έως } +0,125 \rangle \text{ mm}$ .



Κλάσμα  $\langle -0,3 \text{ έως } +0,125 \rangle \text{ mm}$ .



Κλάσμα  $\langle -0,125 \rangle \text{ mm}$ .

**Εικόνα 67.** Στερεοσκοπική παρατήρηση των κλασμάτων του σάκκου 1 (κάνναβος 1x1 mm).

Από την παρατήρηση της Εικ. 67 προκύπτουν οι ακόλουθες διαπιστώσεις:

1. Στο κλάσμα  $\langle -2,0 \text{ έως } +1,5 \rangle \text{ mm}$  η αποδέσμευση είναι σχεδόν μηδενική. Οι κόκκοι του χρωμίτη παραμένουν προσκολλημένοι στο στείρο υλικό. Παρατηρούνται ωστόσο στο μέγεθος αυτό αποδεσμευμένοι κόκκοι στείρου υλικού.



2. Στο κλάσμα «-1,5 έως +1,0» mm, οι κόκκοι καθαρού στείρου είναι ευδιάκριτοι σε μεγαλύτερο ποσοστό και εμφανίζονται κόκκοι χρωμίτη και ενδιάμεσα τεμάχια.
3. Στο κλάσμα «-1,0 έως +0,5» mm, οι κόκκοι καθαρού χρωμίτη είναι αυξημένοι και οι κόκκοι του καθαρού στείρου, αν και μειωμένοι απ' ότι στα προηγούμενα κλάσματα, εξακολουθούν να είναι το μεγαλύτερο ποσοστό. Στα ενδιάμεσα τεμάχια ο χρωμίτης παραμένει σε μικρό ποσοστό.
4. Στο κλάσμα «-0,5 έως +0,3» mm, το ποσοστό των καθαρών κόκκων χρωμίτη είναι ιδιαίτερα αυξημένο, προσεγγίζοντας το 30-40 % της επιφάνειας, ενώ το ποσοστό των ενδιάμεσων τεμαχίων εμφανίζεται μειωμένο.
5. Στο κλάσμα «-0,3 έως +0,125» mm, τα ενδιάμεσα τεμάχια είναι μειωμένα, το ποσοστό κόκκων καθαρού χρωμίτη παραμένει στα ίδια επίπεδα, ενώ οι καθαροί κόκκοι στείρου είναι στο μεγαλύτερο ποσοστό της επιφάνειας.
6. Στο κλάσμα «-0,125» mm παρατηρούνται κυρίως καθαροί κόκκοι χρωμίτη (μεγάλος βαθμός αποδέσμευσης) μέσα στην ευρύτερη μάζα του στείρου, το οποίο έχει αυξημένο ποσοστό.

#### 4.4.3. Χημική σύσταση

##### Κύρια στοιχεία

Τα όμοια κοκκομετρικά κλάσματα των τριών σάκκων (1, 2 και 3) ενοποιήθηκαν, με βάση τα βάρη και τις σχετικές μεταξύ των κοκκομετρικών κλασμάτων αναλογίες του Πίν. 17, για περαιτέρω μελέτη. Έτσι προέκυψε για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα ένα συνολικό σταθμισμένο δείγμα αντιπροσωπευτικό της μεταλλοφορίας. Σε κάθε σταθμισμένο δείγμα συγκεκριμένου κοκκομετρικού κλάσματος έγινε χημική ανάλυση κύριων στοιχείων, συμπεριλαμβανομένου του  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , ιχνοστοιχείων και πλατινοειδών.

Στον Πίν. 19 φαίνεται η χημική ανάλυση (% κ.β.) των κύριων στοιχείων, συμπεριλαμβανομένου του  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , καθώς και οι στατιστικές παράμετροι των σταθμισμένων δειγμάτων από τα εξεταζόμενα κοκκομετρικά κλάσματα (mm), ενώ στην Εικ. 68 παρουσιάζονται οι συσχετίσεις των κυριότερων οξειδίων με τα κοκκομετρικά κλάσματα.

Όπως προκύπτει από τον Πίν. 19 τα οξείδια των κύριων στοιχείων που μετρήθηκαν στις υψηλότερες συγκεντρώσεις (% κ.β.) στα εξεταζόμενα κοκκομετρικά κλάσματα (mm), κατά σειρά αφθονίας, είναι τα  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  και  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και η απώλεια πύρωσης.

Πιο συγκεκριμένα, το  $\text{MgO}$  μετρήθηκε μεταξύ 29,91 (κοκκομετρικό κλάσμα "-0,5 έως +0,3") και 35,26% κ.β. (κοκκομετρικό κλάσμα "-2,0 έως +1,5") με μέση τιμή  $32,37 \pm 1,71\%$  κ.β. και διάμεσο τιμή 32,23% κ.β. Από την Εικ. 68 προκύπτει ότι το  $\text{MgO}$  έχει μία σαφέστατη τάση

να μειώνεται προς τα μικρότερα κοκκομετρικά κλάσματα. Αν λάβουμε υπόψη την ορυκτολογική σύσταση (Πίν. 18) το MgO προέρχεται κυρίως από τον σερπεντίνη  $[(Mg,Fe)_3Si_2O_5(OH)_4]$  και τον πυροαουρίτη  $[Mg_6Fe^{3+}_2(OH)_6CO_3 \cdot 4H_2O]$  και δευτερευόντως από τον ολιβίνη  $[Mg,Fe)_2SiO_4]$  και τον χρωμίτη  $(Fe^{2+}Cr_2O_4)$ . Σύμφωνα με τον Filippidis (1985) κατά την ενυδάτωση του ολιβίνη (σερπεντινίωση) το Mg και το Ni προτιμούν κυρίως να εισέρχονται στη δομή του σερπεντίνη.

**Πίνακας 19.** Χημική σύσταση (% κ.β.) και στατιστικές παράμετροι των κοκκομετρικών κλασμάτων.

Κοκκομετρικό κλάσμα (mm)	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	L.O.I	Σύνολο
"-2,0 έως +1,5"	22,87	0,04	<b>2,70</b>	<b>17,59</b>	9,04	0,10	<b>35,26</b>	0,22	0,01	<0,01	<0,01	<b>12,00</b>	99,83
"-1,5 έως +1,0"	<b>24,17</b>	0,04	3,23	20,08	<b>8,58</b>	0,10	32,63	0,23	<0,01	<0,01	<0,01	10,80	99,86
"-1,0 έως +0,5"	23,44	0,05	3,72	20,25	9,16	0,11	32,22	0,23	<0,01	<0,01	<0,01	10,66	99,84
"-0,5 έως +0,3"	<b>20,94</b>	0,05	3,68	<b>26,12</b>	8,97	0,10	<b>29,91</b>	0,27	<0,01	<0,01	<0,01	<b>9,82</b>	99,86
"-0,3 έως +0,125"	22,60	0,06	4,15	20,01	10,02	0,12	32,24	0,29	<0,01	<0,01	<0,01	10,25	99,74
"-0,125"	21,54	0,06	<b>4,24</b>	21,19	<b>10,15</b>	0,12	31,97	0,31	<0,01	<0,01	<0,01	10,24	99,82
<i>Μέση τιμή</i>	22,59	0,05	3,62	20,87	9,32	0,11	32,37	0,26	<0,01	<0,01	<0,01	10,63	
<i>Τυπ. Απόκλιση</i>	1,19	0,01	0,58	2,83	0,62	0,01	1,71	0,04	-	-	<0,01	0,76	
<i>Διάμεσος τιμή</i>	22,74	0,05	3,70	20,17	9,10	0,11	32,23	0,25	<0,01	<0,01	<0,01	10,46	
<i>Ελάχιστη τιμή</i>	20,94	0,04	2,70	17,59	8,58	0,10	29,91	0,22	<0,01	<0,01	<0,01	9,82	
<i>Μέγιστη τιμή</i>	24,17	0,06	4,24	26,12	10,15	0,12	35,26	0,31	0,01	<0,01	<0,01	12,00	

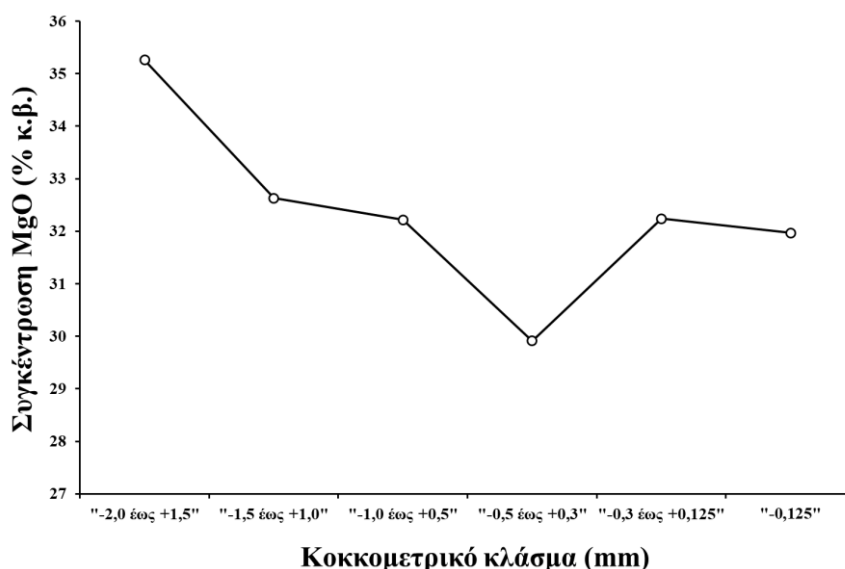
Το SiO<sub>2</sub> μετρήθηκε μεταξύ 20,94 (κοκκομετρικό κλάσμα "-0,5 έως +0,3") και 24,17% κ.β. (κοκκομετρικό κλάσμα "-1,5 έως +1,0") με μέση τιμή 22,59±% κ.β και διάμεσο τιμή 22,74% κ.β. Από την Εικ. 68 προκύπτει ότι το SiO<sub>2</sub> έχει μία σαφέστατη τάση να μειώνεται προς τα μικρότερα κοκκομετρικά κλάσματα. Αν λάβουμε υπόψη την ορυκτολογική σύσταση (Πίν. 18) το SiO<sub>2</sub> προέρχεται κυρίως από τον σερπεντίνη  $[(Mg,Fe)_3Si_2O_5(OH)_4]$  και δευτερευόντως από τον ολιβίνη  $[Mg,Fe)_2SiO_4]$ .

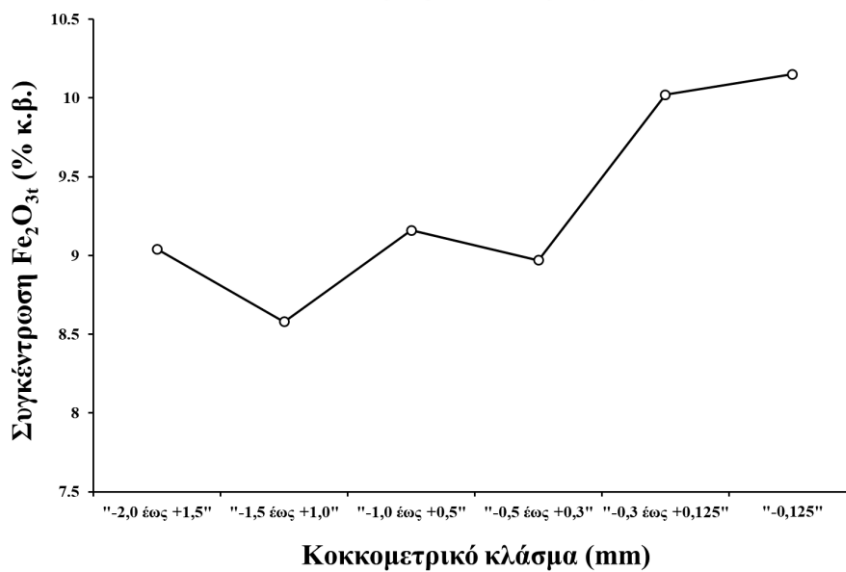
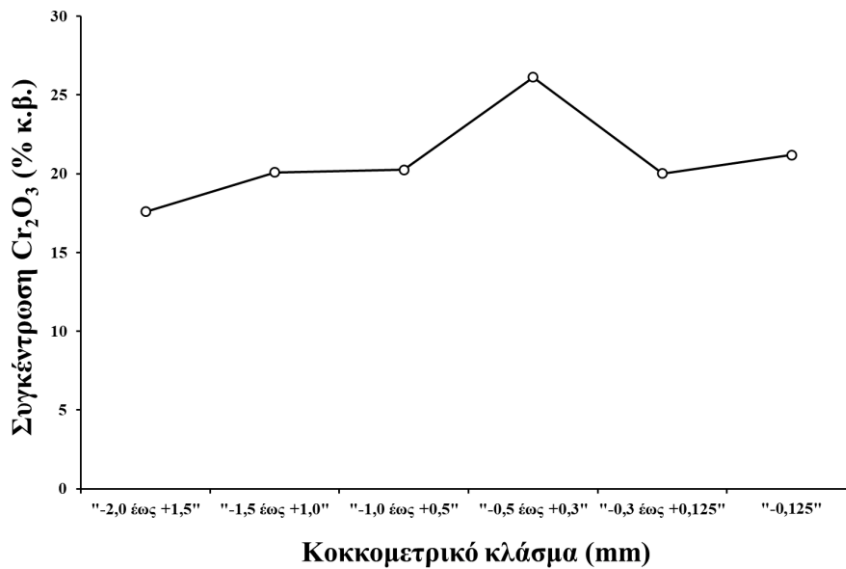
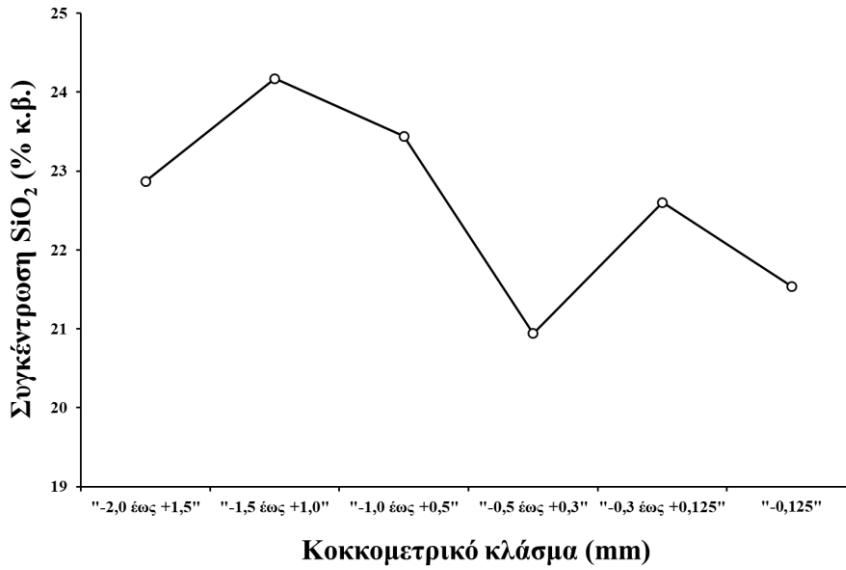
Το Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> μετρήθηκε μεταξύ 17,59 (κοκκομετρικό κλάσμα "-2,0 έως +1,5") και 26,12% κ.β. (κοκκομετρικό κλάσμα "-0,5 έως +0,3") με μέση τιμή 20,87±2,83% κ.β. και διάμεσο τιμή 20,17% κ.β. Από την Εικ. 68 προκύπτει ότι το Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> έχει έναν ξεκάθαρο εμπλουτισμό στο κοκκομετρικό κλάσμα "-0,5 έως +0,3", ενώ η γενική του τάση είναι να αυξάνει η συγκέντρωσή του με τη μείωση του μεγέθους του, λόγω διαφορετικής συμπεριφοράς του στείρου κατά την ελάττωση μεγέθους κλάσματος. Αν λάβουμε υπόψη την ορυκτολογική σύσταση (Πίν. 18) το Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> προέρχεται σχεδόν αποκλειστικά από το χρωμίτη  $(Fe^{2+}Cr_2O_4)$ .

Ο ολικός σίδηρος εκφρασμένος ως Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub> μετρήθηκε μεταξύ 8,58 (κοκκομετρικό κλάσμα

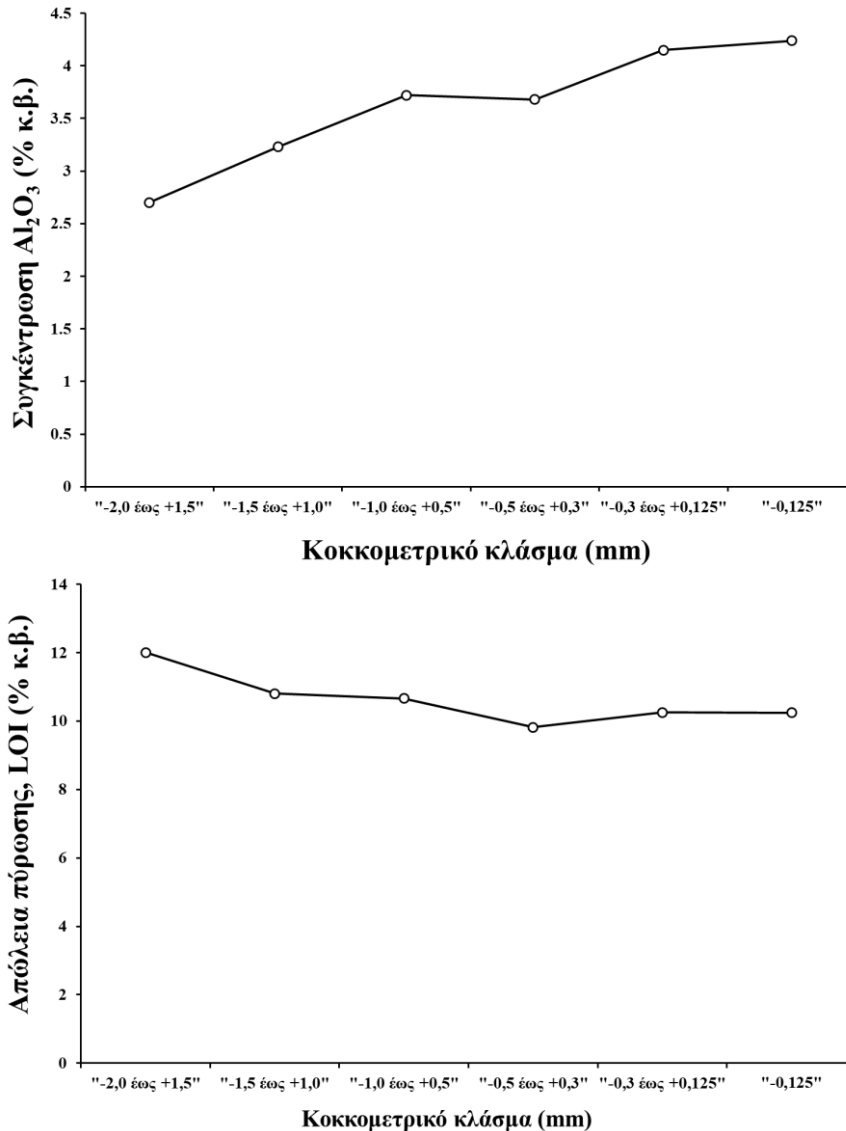
"-1,5 έως +1,0") και 10,15% κ.β. (κοκκομετρικό κλάσμα "-0,125") με μέση τιμή  $9,32 \pm 0,62\%$  κ.β. και διάμεσο τιμή 9,10% κ.β. Από την Εικ. 68 προκύπτει ότι το  $Fe_2O_3$  έχει μία ισχυρή τάση να αυξάνεται όσο μειώνεται το μέγεθος του κοκκομετρικού κλάσματος, λόγω διαφορετικής συμπεριφοράς του σιδήρου κατά θραύση. Αν λάβουμε υπόψη την ορυκτολογική σύσταση (Πίν. 18) το  $Fe_2O_3$  προέρχεται κυρίως από τον πυροαουρίτη  $[Mg_6Fe^{3+}_2(OH)_6CO_3 \cdot 4H_2O]$ , το σερπεντίνη  $[(Mg,Fe)_3Si_2O_5(OH)_4]$  και το χρωμίτη ( $Fe^{2+}Cr_2O_4$ ) και δευτερεύοντος από τον ολιβίνη  $[Mg,Fe)_2SiO_4]$ . Οι Μπόσκος & Περδικάτσης (1986) μελετώντας την αποσάθρωση δουνιτικού σερπεντινίτη από το Ξερολείβαδο Βούρινου διαπίστωσαν ότι κατά τη μετατροπή του ολιβίνη σε σερπεντίνη και βρουσίτη ο σίδηρος προτιμά να εισέρχεται κυρίως στη δομή του βρουσίτη και λιγότερο στον σερπεντίνη, ενώ κατά τη μετατροπή του βρουσίτη σε πυροαουρίτη ο σίδηρος κληρονομείται στον πυροαουρίτη.

Το  $Al_2O_3$  μετρήθηκε μεταξύ 2,70 (κοκκομετρικό κλάσμα "-2,0 έως +1,5") και 4,24% κ.β. (κοκκομετρικό κλάσμα "-0,125") με μέση τιμή  $3,62 \pm 0,58\%$  κ.β. και διάμεσο τιμή 3,70% κ.β. Από την Εικ. 68 προκύπτει ότι το  $Al_2O_3$  έχει μία ισχυρή τάση να αυξάνεται με τη μείωση του κοκκομετρικού κλάσματος, δηλαδή παρόμοια συμπεριφορά με το  $Fe_2O_3$ . Συνεπώς, αν λάβουμε υπόψη και την ορυκτολογική σύσταση (Πίν. 18) το  $Al_2O_3$  προέρχεται κυρίως από το χρωμίτη.









**Εικόνα 68.** Συσχέτιση κοκκομετρικών κλασμάτων (mm) με κυριότερα οξειδία και την απώλεια πύρωσης (% κ.β.)

Τέλος, η απώλεια πύρωσης (L.O.I.) μετρήθηκε μεταξύ 9,82 (κοκκομετρικό κλάσμα "-0,5 έως +0,3") και 12,00% κ.β. (κοκκομετρικό κλάσμα "-2,0 έως +1,5") με μέση τιμή  $10,63 \pm 0,76\%$  κ.β. και διάμεσο τιμή 10,46% κ.β. Από την Εικ. 68 προκύπτει ότι η απώλεια πύρωσης έχει μία σαφή τάση να μειώνεται με τη μείωση του κοκκομετρικού κλάσματος, δηλαδή παρόμοια συμπεριφορά με το  $MgO$  και το  $SiO_2$ . Συνεπώς, αν λάβουμε υπόψη και την ορυκτολογική σύσταση (Πίν. 18) η απώλεια πύρωσης (LOI) μπορεί να προέρχεται από τον πυροαουρίτη  $[Mg_6Fe^{3+}_2(OH)_6CO_3 \cdot 4H_2O]$  και το σερπεντίνη  $[(Mg,Fe)_3Si_2O_5(OH)_4]$  και δευτερεύοντος από την αμφίβολο.

Στη μελέτη μεταλλοφορίας χρωμίτη έχει ιδιαίτερη σημασία για την αξιολόγηση του κοιτάσματος η περιεκτικότητα του  $Cr_2O_3$  και του  $Fe_2O_3$ , καθώς και ο λόγος  $Cr/Fe$ . Ο λόγος

αυτός, σε συνδυασμό με τις συγκεντρώσεις και άλλων κυρίων στοιχείων ή/και ιχνοστοιχείων, π.χ.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , S, P κ.ά. οδηγεί στη διάκριση του εμπλουτισμένου μεταλλεύματος, ανάλογα με τη χρήση του (Evans 1987), στις παρακάτω κατηγορίες:

- i. Μετάλλευμα μεταλλουργικού τύπου: Ο κλασικός μεταλλουργικός τύπος πρέπει να έχει  $\text{Cr}_2\text{O}_3 >48\%$  κ.β., λόγο Cr:Fe  $>2,8$ ,  $\text{SiO}_2 <8\%$  κ.β., S  $<0,08\%$  κ.β. και P  $<0,04\%$  κ.β. Υπάρχει και ο μεταλλουργικός τύπος με χαμηλό άνθρακα ή αλλιώς μεταλλουργικός τύπος N. Αφρικής, ο οποίος πρέπει να έχει  $\text{Cr}_2\text{O}_3 >38\%$  κ.β. και λόγο Cr:Fe  $>1,5$ .
- ii. Μετάλλευμα πυρίμαχου τύπου:  $\text{Cr}_2\text{O}_3 >30\%$  κ.β.,  $\text{Cr}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3 >57\%$  κ.β., λόγος Cr:Fe συνήθως 2-2,5,  $\text{SiO}_2 <5\%$  κ.β. και Fe  $<10\%$  κ.β.
- iii. Μετάλλευμα χημικού τύπου:  $\text{Cr}_2\text{O}_3 >45\%$  κ.β. και  $\text{SiO}_2 <8\%$  κ.β.
- iv. Άμμος χυτηρίων:  $\text{Cr}_2\text{O}_3 >35\%$  κ.β.,  $\text{SiO}_2 <3\%$  κ.β. και S  $<0,5\%$  κ.β.

Στην παγκόσμια αγορά ο μεταλλουργικός τύπος αποτελεί το 67-75% της παγκόσμιας κατανάλωσης, ενώ ακολουθεί ο πυρίμαχος τύπος (11-18%), ο χημικός τύπος (11-15%) και τελευταία η άμμος χυτηρίων ( $\approx 3\%$ ).

Επιπλέον, τα μεταλλεύματα χρωμίτη μπορούν να ταξινομηθούν σε εμπορικούς και μη εμπορικούς τύπους σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Πίν. 20 (Gasik 2013). Οι περιεκτικότητες  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  και  $\text{SiO}_2$  αφορούν την ολική συγκέντρωσή τους στο μετάλλευμα. Οι υψηλής ποιότητας εμπορικοί τύποι μπορούν να πωληθούν ως έχει ή με ελάχιστο εμπλουτισμό, ενώ όλοι οι άλλοι τύποι, εμπορικοί και μη, απαιτούν σημαντικό εμπλουτισμό πριν το μετάλλευμα καταστεί εμπορεύσιμο.

**Πίνακας 20.** Κατηγορίες συμπυκνώματος χρωμίτη ανάλογα με την εμπορικότητα (Gasik 2013).

		$\text{Cr}_2\text{O}_3$ (% κ.β.)	$\text{SiO}_2$ (% κ.β.)
Εμπορικός τύπος	Υψηλής ποιότητας	58-62	0,3-3
		50-58	3-8
	Μέση Ποιότητας	38-50	8-15
	Χαμηλής ποιότητας	25-38	15-24
Μη εμπορικός τύπος	Χαμηλής ποιότητας	$<25$	$>25$

Τέλος, τα μεταλλεύματα χρωμίτη είναι δυνατόν να ταξινομηθούν με βάση τη φυσική τους κατάσταση σε συμπαγείς/σκληρούς (strong), εύθρυπτους (friable), κονιορτοποιημένους (pulverized) και πυριτωμένους ή ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων του χρωμίτη σε αδρόκοκκους (7-15 mm) μεσόκοκκους (1-7 mm) και λεπτόκοκκους ( $<1$  mm). Το συμπαγές/σκληρό μετάλλευμα χρωμίτη αποτελεί παγκοσμίως το 80% περίπου των μεταλλευμάτων χρωμίτη, το εύθρυπτο το 10% περίπου και το κονιοποιημένο και πυριτωμένο 5% περίπου το καθένα (Lyakishev & Gasik 1998).

Εφόσον σε ένα δείγμα μεταλλεύματος το χρώμιο και ο σίδηρος μπορεί να περιέχονται στη δομή και άλλων ορυκτών εκτός του χρωμίτη, π.χ. του σερπεντίνη, του πυροαουρίτη, του ολιβίνη, του πυρόξενου κ.ά., οι ποσότητες  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  και  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  που δίνονται στον Πίν. 19 και χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς του Πίν. 21, αλλά και όλων των άλλων κύριων στοιχείων (Πίν. 19), ιχνοστοιχείων (Πίν. 22) και πλατινοειδών (Πίν. 23), αποτελούν τις ολικές περιεχόμενες ποσότητες αυτών των στοιχείων στα εξεταζόμενα κοκκομετρικά κλάσματα. Στον Πίν. 21 δίνεται η περιεκτικότητα του ολικού  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , ο ολικός σίδηρος ως  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  όπως μετρήθηκε και ως  $\text{FeO}$  όπως υπολογίστηκε από τη συγκέντρωση του  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , το ολικό  $\text{Cr}_t$ , ο ολικός  $\text{Fe}_t$  και ο λόγος  $\text{Cr}_t/\text{Fe}_t$ , καθώς και η σταθμισμένη μέση τιμή του λόγου  $\text{Cr}_t/\text{Fe}_t$ .

**Πίνακας 21.** Περιεκτικότητα (% κ.β.) σε ολικό  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - $\text{FeO}$ - $\text{Cr}$ - $\text{Fe}$  και λόγος ολικού  $\text{Cr}/\text{Fe}$  των εξεταζόμενων κοκκομετρικών κλασμάτων.

Κοκκομετρικό κλάσμα (mm)	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Cr}_t$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{FeO}_t$	$\text{Fe}_t$	$\text{Cr}_t/\text{Fe}_t$
"-2,0 έως +1,5"	17,59	12,04	9,04	8,13	6,32	<b>1,91</b>
"-1,5 έως +1,0"	20,08	13,74	8,58	7,72	6,00	<b>2,29</b>
"-1,0 έως +0,5"	20,25	13,86	9,16	8,24	6,41	<b>2,16</b>
"-0,5 έως +0,3"	26,12	17,87	8,97	8,07	6,27	<b>2,85</b>
"-0,3 έως +0,125"	20,01	13,69	10,02	9,02	7,01	<b>1,95</b>
"-0,125"	21,19	14,50	10,15	9,13	7,10	<b>2,04</b>
<b>Σταθμισμένη μέση τιμή</b>	<b>20,93</b>	<b>14,32</b>	<b>9,35</b>	<b>8,42</b>	<b>6,54</b>	<b>2,19</b>

Όπως προκύπτει από τον Πίν. 21 ο λόγος ολικού  $\text{Cr}_t/\text{Fe}_t$  κυμαίνεται μεταξύ 1,90 (κοκκομετρικό κλάσμα "-2,0 έως +1,5") έως 2,85 (κοκκομετρικό κλάσμα "-0,5 έως +0,3") με σταθμισμένη μέση τιμή 2,19. Συνεπώς, ο λόγος  $\text{Cr}_t/\text{Fe}_t$  μας επιτρέπει να κατατάξουμε το εξεταζόμενο μέταλλευμα ως κατάλληλη πρώτη ύλη για την παραγωγή "charge" μεταλλουργικού τύπου εμπλουτισμένο μέταλλευμα. Είναι δυνατόν, μετά από επιλεκτική θραύση και κοσκίνιση του συγκεκριμένου μεταλλεύματος σε μεγέθη μεταξύ 0,3-0,5 mm (πρωτογενής εμπλουτισμός) να παραχθεί συμπύκνωμα κατάλληλο για μεταλλουργική χρήση.

Επιπλέον, σύμφωνα με τον Πίν. 20 το εξεταζόμενο μέταλλευμα χρωμίτη κατατάσσεται στην πρωτογενή του μορφή στη χαμηλής ποιότητας μη εμπορικό τύπο, καθώς έχει ολική συγκέντρωση  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  <25% κ.β. (Πίν. 21) και χρίζει σημαντικού εμπλουτισμού ώστε να καταστεί εμπορεύσιμο. Με βάση τη φυσική κατάσταση του μεταλλεύματος και το μέγεθος των κόκκων του χρωμίτη κατατάσσεται ως εύθρυπτος και λεπτόκοκος έως μεσόκοκος τύπος, αντίστοιχα.

### Ιχνοστοιχεία

Στον Πίν. 22 δίνεται η περιεκτικότητα (ppm) των ιχνοστοιχείων, που έδωσαν έστω και μία μέτρηση υψηλότερη από το όριο ανίχνευσης, καθώς και οι στατιστικές παράμετροι των σταθμισμένων δειγμάτων από τα εξεταζόμενα κοκκομετρικά κλάσματα (mm), ενώ στην Εικ. 69 παρουσιάζονται οι συσχετίσεις των κυριότερων, βάση περιεκτικότητας, ιχνοστοιχείων με τα κοκκομετρικά κλάσματα.

**Πίνακας 22.** Περιεκτικότητα (ppm) σε ιχνοστοιχεία των εξεταζόμενων κοκκομετρικών κλασμάτων.

Κοκκομετρικό κλάσμα (mm)	Ba	Co	Cu	Ga	Ge	Mo	Nb	Ni	Rb	Sc	V	Y	Zn	Zr
"-2,0 έως +1,5"	2	130	10	5	<1	<2	<1	<b>2380</b>	<2	4	<b>138</b>	<1	<b>80</b>	3
"-1,5 έως +1,0"	4	134	<10	7	1	<2	1	2120	<2	4	186	<1	110	4
"-1,0 έως +0,5"	4	<b>120</b>	<10	6	1	<2	1	2110	<2	5	157	1	<b>270</b>	4
"-0,5 έως +0,3"	5	<b>120</b>	10	7	1	<2	1	<b>1920</b>	<2	5	190	1	90	4
"-0,3 έως +0,125"	6	139	10	8	1	4	1	2040	<2	5	204	<1	120	4
"-0,125"	3	<b>148</b>	10	8	<1	4	<1	2110	2	5	<b>224</b>	<1	130	<2
<i>Μέση τιμή</i>	4	132	<10	7	<1	<4	<1	2113	<2	5	183	<1	133	<4
<i>Τυπ. Απόκλιση</i>	1	11	-	1	-	-	-	151	-	1	31	-	69	0.4
<i>Διάμεσος τιμή</i>	4	132	<10	7	<1	<4	<1	2110	<2	5	188	<1	115	<4
<i>Ελάχιστη τιμή</i>	2	120	<10	5	<1	<2	<1	1920	<2	4	138	<1	80	<2
<i>Μέγιστη τιμή</i>	6	148	10	8	1	4	1	2380	2	5	224	1	270	4

Όπως προκύπτει από τον Πίν. 22 τα ιχνοστοιχεία που μετρήθηκαν στις υψηλότερες συγκεντρώσεις (ppm) στα εξεταζόμενα κοκκομετρικά κλάσματα (mm), είναι κατά σειρά αφθονίας τα Ni, V, Co και Zn.

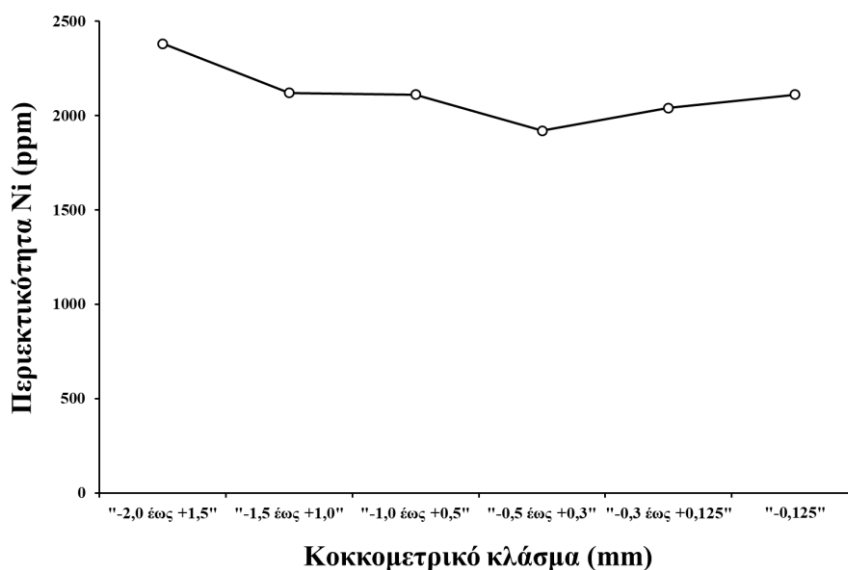
Ποιο συγκεκριμένα, το Ni μετρήθηκε μεταξύ 1920 (κοκκομετρικό κλάσμα "-0,5 έως +0,3") και 2380 ppm (κοκκομετρικό κλάσμα "-2,0 έως +1,5") με μέση τιμή  $2113 \pm 151$  ppm και διάμεσο τιμή 2110 ppm. Από την Εικ. 69 προκύπτει ότι το Ni έχει μία τάση να μειώνεται προς τα μικρότερα κοκκομετρικά κλάσματα. Αν λάβουμε υπόψη την ορυκτολογική σύσταση (Πίν. 18) το Ni εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά με το MgO και την απώλεια πύρωσης παρατηρήσεις που αποτελούν ισχυρή ένδειξη ότι περιέχεται κυρίως στον πυροαουρίτη και στον σερπεντίνη και δευτερεύοντος στον ολιβίνη. Σύμφωνα με τον Filippidis (1982) ο ολιβίνης σε υπερβασικά πετρώματα οφειλιθικών ακολουθιών είναι πλούσιος σε μαγνήσιο και περιέχει έως και 0,5% κ.β. Ni. Επιπλέον, οι Filippidis & Annersten (1980, 1981) και Filippidis (1991) αναφέρουν ότι η σερπεντινίωση Ni-ούχων ολιβινών οδηγεί στο σχηματισμό Ni-ούχων σουλφιδίων και Ni-ούχου μαγνητίτη.

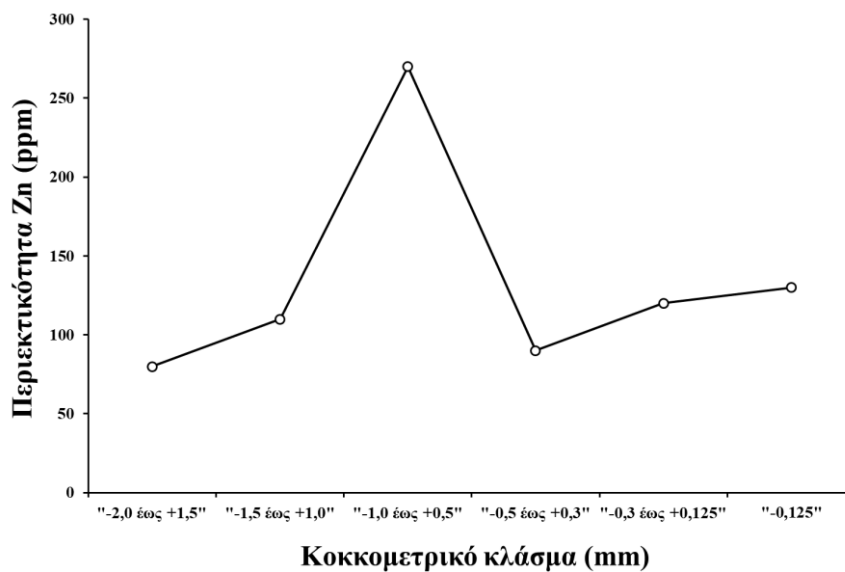
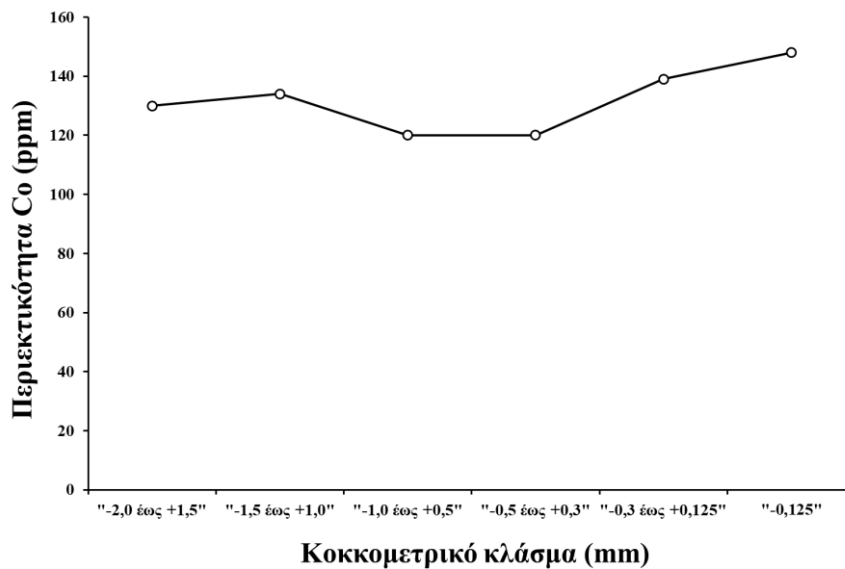
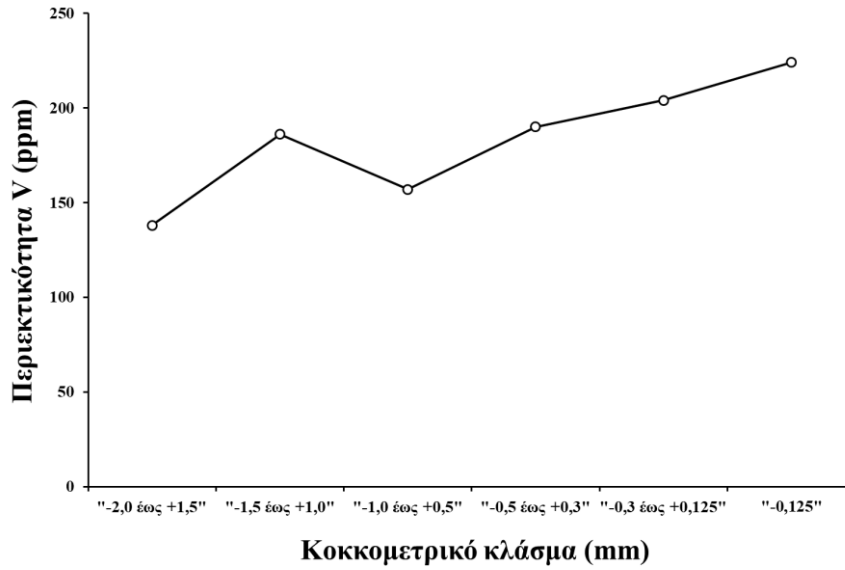
Οι Μπόσκος & Περδικάτσης (1986) μελετώντας την αποσάθρωση δουνιτικού



σερπεντινίτη από το Ξερολείβαδο Βούρινου διαπίστωσαν ότι το νικέλιο κατά την αποσάθρωση του ολιβίνη σε σερπεντίνη και βρουσίτη προτιμά να εισέρχεται σχεδόν αποκλειστικά στη δομή του βρουσίτη και πολύ λιγότερο στον σερπεντίνη, ενώ κατά τη μετατροπή του βρουσίτη σε πυροαουρίτη το νικέλιο κληρονομείται στον παραγόμενο πυροαουρίτη. Οι Stamatakis & Mitsis (2013) σε μικροαναλύσεις πυροαουριτών από τα εξαλλοιωμένα οφειολιθικά πετρώματα των Γεράνιων όρεων (Δ. Αττική και ΒΑ Αργολίδα) δίνουν συγκεντρώσεις NiO μέχρι 2,3% κ.β.

Το V μετρήθηκε μεταξύ 138 (κοκκομετρικό κλάσμα "-2,0 έως +1,5") και 224 ppm (κοκκομετρικό κλάσμα "-0,125") με μέση τιμή  $183 \pm 31$  ppm και διάμεσο τιμή 188 ppm. Από την Εικ. 69 προκύπτει ότι το V έχει μία σαφέστατη τάση να αυξάνεται προς τα μικρότερα κοκκομετρικά κλάσματα. Αν λάβουμε υπόψη την ορυκτολογική σύσταση (Πίν. 18) το V εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά με τον  $Fe_2O_3$  και προέρχεται κυρίως από τον πυροαουρίτη και το χρωμίτη. Σύμφωνα με τους Zaccarini et al. (2019) το βανάδιο περιέχεται σε φωσφορίδια και σουλφίδια που συνδέονται με κατακλασμένους χρωμίτες, αβαρουίτη και διάφορα άλλα σουλφίδια που σχηματίζονται κατά την εξαλλοίωση των χρωμιτιτών κάτω από αναγωγικές συνθήκες. Οι Karsiotis et al. (2018) αναφέρουν την ύπαρξη εμπλουτισμένων Cr-σπινελλίων σε Zn και V από χρωμιτίτες της περιοχής Μεταλλείων Δομοκού. Οι Tzamos et al. (2016) κατά τη μελέτη χρωμίτη από το μεταλλείο Ξερολείβαδου-Σκούμτσας νότιου Βούρινου διαπίστωσαν ότι το Mg στο χρωμίτη αντικαθίσταται από Fe και σε μικρότερο βαθμό από Mn και Zn, ενώ το Cr αντικαθίσταται κυρίως από Al και σε μικρότερο βαθμό από V. Οι Tzamos et al. (2017) σε μικροαναλύσεις χρωμιτών από χρωμιτίτες του ίδιου μεταλλείου αναφέρουν συγκεντρώσεις  $V_2O_3$  στις ταινίες χρωμίτη μέχρι 0,12% κ.β. και στις ταινίες σερπεντινίτη μέχρι 0,17% κ.β.





Εικόνα 69. Συσχέτιση των κοκκομετρικών κλασμάτων (mm) με τα κύρια ιχνοστοιχεία (ppm).

Το Co μετρήθηκε μεταξύ 120 (κοκκομετρικά κλάσματα "-1,0 έως +0,5" και "-0,5 έως +0,3") και 148 ppm (κοκκομετρικό κλάσμα "-0,125") με μέση τιμή  $132 \pm 11$  ppm και διάμεσο τιμή 132 ppm. Από την Εικ. 69 προκύπτει ότι η συγκέντρωση του Co έχει μικρή διακύμανση μεταξύ των διαφόρων κοκκομετρικών κλασμάτων, δείχνοντας μία τάση να αυξάνεται στα λεπτόκοκκα κλάσματα. Από τις Εικ. 68 και 69 προκύπτει παρόμοια συμπεριφορά του Co με το Ni, το MgO και την απώλεια πύρωσης που αποτελούν ισχυρές ενδείξεις ότι το Co περιέχεται κυρίως στον πυροαουρίτη και στον σερπεντίνη και δευτερευόντως στον ολιβίνη.

Ο Zn μετρήθηκε μεταξύ 80 (κοκκομετρικό κλάσμα "-2,0 έως +1,5") και 270 ppm (κοκκομετρικό κλάσμα "-1,0 έως +0,5") με μέση τιμή  $133 \pm 69$  ppm και διάμεσο τιμή 115 ppm. Από την Εικ. 69 προκύπτει ότι ο Zn δεν εμφανίζει κάποια συγκεκριμένα τάση παρά μόνο έναν έντονο εμπλουτισμό στο κοκκομετρικό κλάσμα "-1,0 έως +0,5". Ο Zn είναι πιθανόν να περιέχεται στη δομή του χρωμίτη αντικαθιστώντας το Mg κάτω από καθαρά υδροθερμικές συνθήκες εξαλλοίωσης (Wyllie et al. 1987) ή/και στη δομή του ολιβίνη και να κληρονομείται κατά την ενυδάτωση αυτού στον παραγόμενο σερπεντίνη. Σύμφωνα με τους Ericsson & Filippidis (1986) ο Zn στη δομή του ολιβίνη προτιμά να αντικαθιστά τον  $Fe^{2+}$  στη θέση M1.

Επιπλέον μετρήθηκαν και τα ιχνοστοιχεία Ag, Be, In, Sn, Sb, Sr, Cs, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Tl, Pb, Bi, Th, U τα οποία βρέθηκαν όλα κάτω του ορίου ανίχνευσης της μεθόδου. Τέλος, παρόλο που μετρήθηκε W μέχρι 500 ppm, οι τιμές του δεν λήφθηκαν υπόψη γιατί αποδίδονται στο γουδί βολφραμίου με το οποίο έγινε η λειοτριβίση των εξεταζόμενων δειγμάτων.

### Πλατινοειδή

Η ομάδα του λευκόχρυσου περιλαμβάνει τα μεταβατικά μέταλλα: Pt (λευκόχρυσος), Pd (παλλάδιο), Rh (ρόδιο), Ru (ρουθίνιο), Ir (ιρίδιο) και Os (όσμιο). Τα μέταλλα αυτά χωρίζονται σε δύο υποσύνολα: τα ελαφριά πλατινοειδή με μέλη τα Ru, Rh, Pd και τα βαριά πλατινοειδή με μέλη τα Os, Ir, Pt. Είναι ιδιαίτερα σημαντικά στοιχεία γιατί παρουσιάζουν εξαιρετικές ιδιότητες ως καταλύτες, ευρεία μεταβολή του σθένους τους και ιδιαίτερη ικανότητα σχηματισμού συμπλόκων και κραμάτων μεταξύ τους, με ημιμέταλλα (Te, Sb, As), με μέταλλα (Pb, Ni, Cu) και αμέταλλα (κυρίως S), με αποτέλεσμα να βρίσκουν ευρεία χρήση σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές (Daltry & Wilson 1997). Έχουν πολύ μεγάλη οικονομική αξία εξαιτίας των χρήσεων τους, αλλά και της σπανιότητάς τους. Γενικά, κατά τη μελέτη των πλατινοειδών συμπεριλαμβάνεται και ο χρυσός (Au) ως ευγενές μέταλλο παρόλο που δεν

ανήκει στα πλατινοειδή, γι' αυτό πολλές φορές κατά τη μελέτη των πλατινοειδών γίνεται αναφορά στη γεωχημεία των PGE+Au.

Στον Πίν. 23 δίνεται η περιεκτικότητα (ppb) των πλατινοειδών, καθώς και οι στατιστικές παράμετροι των σταθμισμένων δειγμάτων από τα εξεταζόμενα κοκκομετρικά κλάσματα (mm), ενώ στην Εικ. 70 παρουσιάζονται οι συσχετίσεις της περιεκτικότητας των κυριότερων πλατινοειδών με τα κοκκομετρικά κλάσματα. Δεν μελετήθηκε το αδρομερέστερο κλάσμα ("-2,0 έως +1,5").

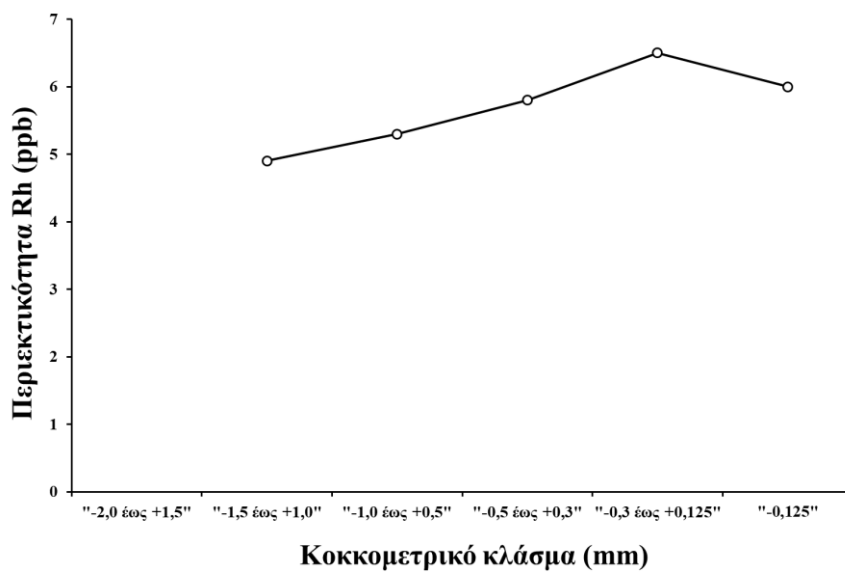
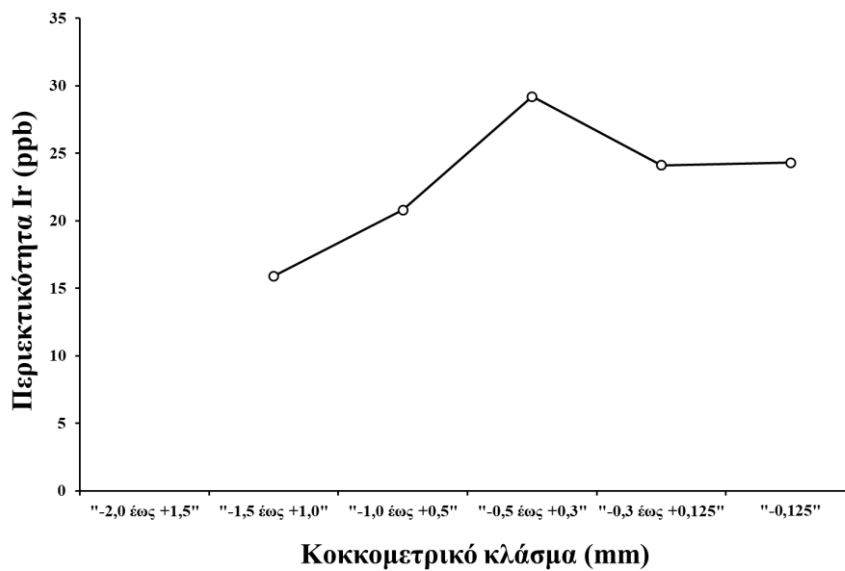
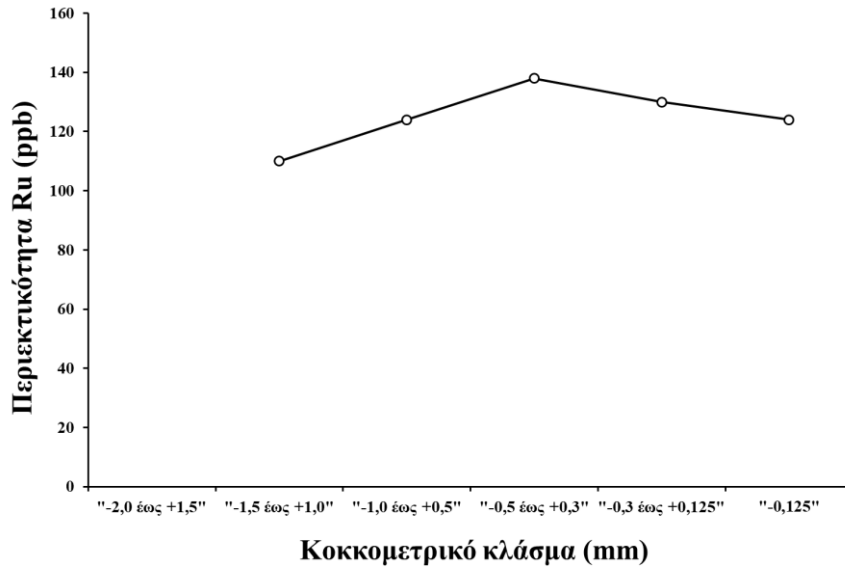
**Πίνακας 23.** Περιεκτικότητα (ppb) σε πλατινοειδή των εξεταζόμενων κοκκομετρικών κλασμάτων και σύγκριση με βιβλιογραφικά δεδομένα από το Βούρινο και τη μέση σύσταση του μανδύα.

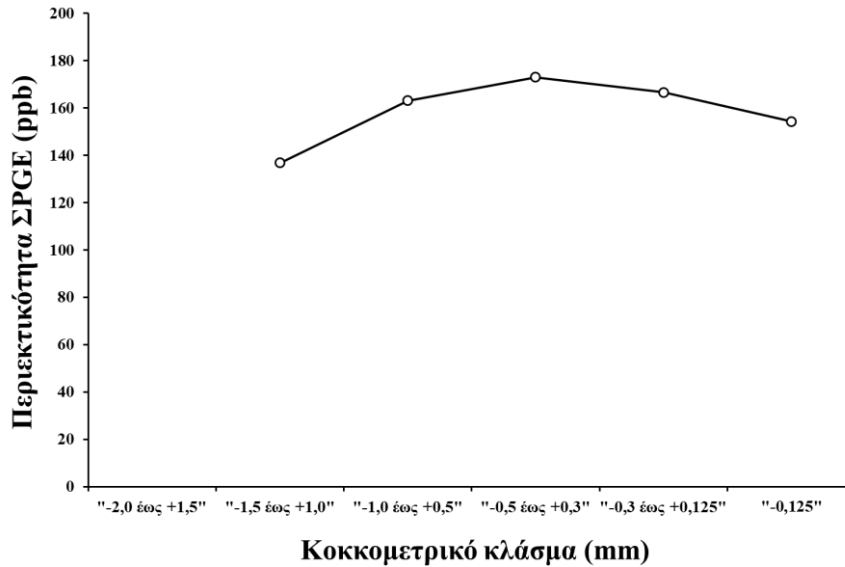
<b>Κοκκομετρικό κλάσμα (mm)</b>	<b>Os</b>	<b>Ir</b>	<b>Ru</b>	<b>Rh</b>	<b>Pt</b>	<b>Pd</b>	<b>Re</b>	<b>Σ.Π.</b>	<b>Au</b>	<b>Δ1</b>	<b>Δ2</b>	<b>Δ3</b>
"-1,5 έως +1,0"	<2	<b>15,9</b>	<b>110</b>	<b>4,9</b>	6	<2	<5	<b>136,8</b>	<0,5	0,05	18,33	0,87
"-1,0 έως +0,5"	<2	20,8	124	5,3	7	<2	6	163,1	<0,5	0,05	17,71	0,86
"-0,5 έως +0,3"	<2	<b>29,2</b>	<b>138</b>	5,8	<5	<2	<5	<b>173,0</b>	<0,5	-	-	0,83
"-0,3 έως +0,125"	<2	24,1	130	<b>6,5</b>	6	<2	<5	166,6	<0,5	0,04	21,67	0,84
"-0,125"	<2	24,3	124	6,0	<5	<2	<5	154,3	<0,5	-	-	0,84
<i>Μέση τιμή</i>	<2	22,9	125	5,7	<6	<2	<6	158,8	<0,5	0,04	19,24	0,85
<i>Τυπ. Απόκλιση</i>	-	4,9	10	0,6	-	-	-	14,0	-	0,01	2,13	0,02
<i>Διάμεσος τιμή</i>	<2	24,1	124	5,8	<6	<2	<6	163,1	<0,5	0,05	18,33	0,84
<i>Ελάχιστη τιμή</i>	<2	15,9	110	4,9	<5	<2	<5	136,8	<0,5	0,04	17,71	0,83
<i>Μέγιστη τιμή</i>	<2	29,2	138	6,5	7	<2	6	173,0	<0,5	0,05	21,67	0,87
Βούρινος <sup>1</sup>	23	15	48	12	6	5	-	109	-	0,13	8,00	0,56
Μέση σύσταση μανδύα <sup>2</sup>	4,2	4,4	5,6	0,6	8,3	8,4	-	31,5	-	1,18	0,67	0,39

Σ.Π.: Σύνολο πλατινοειδών, Δ1: (Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru), Δ2: Ru/Pt, Δ3: Ru/(Os+Ir+Ru). <sup>1</sup> Μέση τιμή όπως υπολογίστηκε από Konstantopoulou & Economou- Eliopoulos (1991) και Economou-Eliopoulos et al. (2020), <sup>2</sup> Barnes et al. 1988.

Το ρουθίνιο (Ru) μετρήθηκε μεταξύ 110 (κοκκομετρικό κλάσμα "-1,5 έως +1,0") και 138 ppb (κοκκομετρικό κλάσμα "-0,5 έως +0,3") με μέση τιμή 125±10 ppb και διάμεσο τιμή 124 ppb. Αντίστοιχα, το ιρίδιο (Ir) μετρήθηκε μεταξύ 15,9 (κοκκομετρικό κλάσμα "-1,5 έως +1,0") και 29,2 ppb (κοκκομετρικό κλάσμα "-0,5 έως +0,3") με μέση τιμή 22,9±4,9 ppb και διάμεσο τιμή 24,1 ppb. Από την Εικ. 70 προκύπτει ότι η κατανομή της συγκέντρωσης του Ru και του Ir έχει σημαντική ομοιότητα με την κατανομή του Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Εικ. 68) δείχνοντας τη στενή σύνδεσή τους με το ορυκτό χρωμίτης.







Εικόνα 70. Συσχέτιση των κοκκομετρικών κλασμάτων (mm) με τα κύρια πλατινοειδή (ppb).

Σύμφωνα με τους Locmelis et al. (2018), η συγκέντρωση Ru σε χρωμίτες επηρεάζεται έντονα από την παρουσία ή την απουσία υγρής φάσης σουλφιδίων κατά την κρυστάλλωση του χρωμίτη και θεωρείται ισχυρός петρογενετικός δείκτης. Σε κορεσμένα θειούχα συστήματα, το χαλκόφιλο Ru, θα κατανεμηθεί κυρίως σε τήγμα σουλφιδίων, ενώ σε απουσία σουλφιδίων, το Ru θα κατανεμηθεί κατά προτίμηση στο χρωμίτη σε σχέση με όλες τις άλλες διαθέσιμες φάσεις και στην περίπτωση αυτή η περιεκτικότητα σε Ru μπορεί να κυμανθεί από 150 έως 600 ppb, ενώ σε αντίθετη περίπτωση περιέχουν λιγότερο από 150 ppb.

Σύμφωνα με τον Κασιώτη (2008) στους χρωμιτίτες των Αετορραχών η επικρατέστερη φάση από τους στατιστικούς προσδιορισμούς της επιφανειακής κατανομής των κόκκων των πλατινοειδών είναι ο λωρίτης  $(Ru,Os)S_2$  και ακολουθούν οι πλούσιες σε Ru δευτερογενείς φάσεις προερχόμενες από τον λωρίτη, τα κράματα Os-Ir και ο ερλισμανίτης  $(Os,Ru)S_2$ . Οι πρωτογενείς φάσεις αποτελούν αρχικά κρυσταλλικά προϊόντα που αποχωρίστηκαν από το μάγμα μαζί με το μαγνησιοχρωμίτη και τον ολιβίνη, ενώ η παρουσία των δευτερογενών φάσεων δείχνει την επίδραση μετα-μαγματικών διεργασιών (Garuti & Zaccarini 1997).

Το ρόδιο (Rh) μετρήθηκε μεταξύ 4,9 (κοκκομετρικό κλάσμα "-1,5 έως +1,0") και 6,5 ppb (κοκκομετρικό κλάσμα "-0,3 έως +0,125") με μέση τιμή  $5,7 \pm 0,6$  ppb και διάμεσο τιμή 5,8 ppb. Από την Εικ. 70 προκύπτει ότι η κατανομή της συγκέντρωσης του Rh δεν έχει σε πρώτη εκτίμηση καμία σαφή ομοιότητα με την κατανομή κάποιου κύριου στοιχείου του μεταλλεύματος (Εικ. 68).

Επιπλέον, μετρήθηκε το όσμιο (Os) που βρέθηκε σε όλα τα δείγματα σε συγκεντρώσεις  $<2$  ppb, ο λευκόχρυσος (Pt) που μετρήθηκε σε συγκεντρώσεις από  $<5$  έως 7 ppb, το παλλάδιο

(Pd) που βρέθηκε σε συγκεντρώσεις  $<2$  ppb, το ρήνιο (Re) που μετρήθηκε σε συγκεντρώσεις από  $<5$  έως  $6$  ppb και ο χρυσός (Au) που βρέθηκε σε όλα τα δείγματα  $<0,5$  ppb.

Επίσης, στον Πίν. 23 δίνεται το άθροισμα των πλατινοειδών (ΣΡΓΕ) το οποίο κυμαίνεται μεταξύ  $136,8$  (κοκκομετρικό κλάσμα  $-1,5$  έως  $+1,0$ ") και  $173,0$  ppb (κοκκομετρικό κλάσμα  $-0,5$  έως  $+0,3$ ") με μέση τιμή  $158,8 \pm 14,0$  ppb και διάμεσο τιμή  $163,1$  ppb. Από την Εικ. 70 προκύπτει ότι η κατανομή της συγκέντρωσης του συνόλου των πλατινοειδών (ΣΡΓΕ) έχει σημαντική ομοιότητα με την κατανομή του  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (Εικ. 68) δείχνοντας τη στενή σύνδεση των περισσοτέρων από αυτά με το ορυκτό χρωμίτης. Για σύγκριση παραθέτονται στον ίδιο πίνακα οι μέσες συγκεντρώσεις πλατινοειδών για το Βούρινο όπως υπολογίστηκαν από τη βιβλιογραφία και η μέση σύσταση του μανδύα. Όπως διαπιστώνεται το μετάλλευμα από τις Αετορράχες είναι πλουσιότερο σε Ir, Ru και ΣΡΓΕ και φτωχότερο σε Os, Rh και Pd σε σύγκριση με τη μέση περιεκτικότητα του Βούρινου, ενώ σε σύγκριση με τη μέση σύσταση του μανδύα είναι πλουσιότερο σε Ir, Ru, Rh και ΣΡΓΕ και φτωχότερο σε Os και Pd.

### Συσχέτιση χημικής σύστασης

Στον Πίν. 24 παρουσιάζονται οι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης ( $r$ ) κατά Pearson που λαμβάνουν τιμές μεταξύ  $-1$  και  $+1$ . Τιμές του συντελεστή συσχέτισης ( $r$ )  $+1$  ή απλά  $1$  δείχνουν απόλυτη θετική συσχέτιση, ενώ τιμές ( $r$ )  $-1$  δείχνουν απόλυτη αρνητική συσχέτιση. Τιμές του συντελεστή συσχέτισης  $0$  δε δείχνουν καμία συσχέτιση. Όσο πιο ισχυρή θετική είναι μία συσχέτιση, τόσο οι τιμές της πλησιάζουν στο  $+1$ , ενώ η φυσική έννοια αυτή της συσχέτισης είναι η κοινή προέλευση των δύο μεταβλητών. Στην προκειμένη περίπτωση ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ δύο χημικών στοιχείων δείχνει κοινή πηγή προέλευσης, δηλαδή περιέχονται στο ίδιο ορυκτό, ενώ αντίθετα η ισχυρή αρνητική συσχέτιση μεταξύ δύο χημικών στοιχείων δείχνει διαφορετικές πηγές προέλευσης, δηλαδή περιέχονται σε διαφορετικά ορυκτά.

Σύμφωνα με τον Πίν. 24 θετικό συντελεστή συσχέτισης ( $r$ ) παρουσιάζει το  $\text{SiO}_2$  με το  $\text{MgO}$  ( $r = 0,54$ ) και την απώλεια πύρωσης (L.O.I.) ( $r = 0,54$ ) φανερώνοντας την κοινή προέλευση των τριών αυτών παραμέτρων που είναι πιθανόν το ορυκτό σερπεντίνης. Το  $\text{TiO}_2$  συσχετίζεται ισχυρά με το  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $r = 0,95$ ), το  $\text{Fe}_2\text{O}_{3t}$  ( $r = 0,91$ ), το  $\text{MnO}$  ( $r = 0,91$ ) και το  $\text{CaO}$  ( $r = 0,90$ ) φανερώνοντας κοινή πηγή/πηγές προέλευσης πιθανόν τους πυρόξενους. Το  $\text{Al}_2\text{O}_3$  συσχετίζεται ισχυρά θετικά με το  $\text{Fe}_2\text{O}_{3t}$  ( $r = 0,77$ ), το  $\text{MnO}$  ( $r = 0,84$ ) και το  $\text{CaO}$  ( $r = 0,87$ ) δείχνοντας κοινή πηγή/πηγές προέλευσης πιθανόν τους πυρόξενους ή/και τον πυροαουρίτη. Το  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  δεν συσχετίζεται θετικά με κανένα κύριο στοιχείο, ενώ συσχετίζεται ισχυρά αρνητικά με το  $\text{MgO}$  ( $r = -0,93$ ) και την απώλεια πύρωσης (L.O.I.) ( $r = -0,81$ ), παρατηρήσεις που οδηγούν

στο συμπέρασμα ότι το  $Cr_2O_3$  δεν περιέχεται σε σημαντικές περιεκτικότητες σε κανένα άλλο ορυκτό του εξεταζόμενου μεταλλεύματος και προέρχεται σχεδόν αποκλειστικά από το χρωμίτη. Ο  $Fe_2O_3$  συσχετίζεται ισχυρά θετικά με το  $MnO$  ( $r = 0,94$ ) και το  $CaO$  ( $r = 0,84$ ) δείχνοντας κοινή πηγή προέλευσης πιθανόν τον πυροαουρίτη. Το  $MnO$  συσχετίζεται θετικά ( $r = 0,76$ ) με το  $CaO$  δείχνοντας κοινή πηγή προέλευσης πιθανόν τον πυροαουρίτη ή/και τους πυρόξενους, ενώ το  $MgO$  συσχετίζεται ισχυρά θετικά ( $r = 0,96$ ) με την απώλεια πύρωσης (L.O.I.) δείχνοντας κοινή πηγή/πηγές προέλευσης πιθανόν το σερπεντίνη ή/και τον πυροαουρίτη.

**Πίνακας 24.** Συντελεστές γραμμικής συσχέτισης ( $r$ ) κατά Pearson των χημικών στοιχείων των εξεταζόμενων δειγμάτων.

	$SiO_2$	$TiO_2$	$Al_2O_3$	$Cr_2O_3$	$Fe_2O_3$	$MnO$	$MgO$	$CaO$	LOI	Ba	Co	Ga	Ni	Sc	V	Zn	Ir	Ru	Rh	Pt
<b>SiO<sub>2</sub></b>	1,00																			
<b>TiO<sub>2</sub></b>	-0,54	1,00																		
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	-0,44	0,95	1,00																	
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	-0,69	0,28	0,40	1,00																
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	-0,45	0,91	0,77	-0,06	1,00															
<b>MnO</b>	-0,21	0,91	0,84	-0,12	0,94	1,00														
<b>MgO</b>	0,54	-0,48	-0,65	-0,93	-0,10	-0,14	1,00													
<b>CaO</b>	-0,69	0,90	0,87	0,41	0,84	0,76	-0,53	1,00												
<b>LOI</b>	0,54	-0,68	-0,83	-0,81	-0,35	-0,40	0,96	-0,71	1,00											
<b>Ba</b>	-0,14	0,47	0,57	0,49	0,18	0,29	-0,67	0,38	-0,73	1,00										
<b>Co</b>	-0,07	0,47	0,40	-0,33	0,68	0,65	0,20	0,62	-0,05	-0,13	1,00									
<b>Ga</b>	-0,35	0,77	0,85	0,40	0,62	0,67	-0,62	0,87	-0,80	0,60	0,61	1,00								
<b>Ni</b>	0,45	-0,52	-0,69	-0,86	-0,14	-0,21	0,97	-0,54	0,97	-0,82	0,15	-0,69	1,00							
<b>Sc</b>	-0,60	0,87	0,88	0,56	0,63	0,66	-0,71	0,70	-0,79	0,55	-0,01	0,55	-0,70	1,00						
<b>V</b>	-0,45	0,74	0,82	0,44	0,62	0,63	-0,60	0,90	-0,78	0,44	0,66	0,98	-0,63	0,52	1,00					
<b>Zn</b>	0,34	0,19	0,30	-0,11	0,06	0,30	-0,12	-0,18	-0,12	0,08	-0,32	-0,11	-0,10	0,43	-0,18	1,00				
<b>Ir</b>	-0,95	0,59	0,56	0,77	0,40	0,17	-0,84	0,63	-0,97	0,33	-0,14	0,29	-0,82	0,79	0,33	-0,29	1,00			
<b>Ru</b>	-0,82	0,55	0,50	0,70	0,33	0,15	-0,80	0,48	-0,90	0,50	-0,31	0,14	-0,84	0,83	0,13	-0,14	0,96	1,00		
<b>Rh</b>	-0,63	0,91	0,88	0,13	0,85	0,73	-0,23	0,86	-0,68	0,49	0,41	0,72	-0,40	0,72	0,62	-0,29	0,69	0,68	1,00	
<b>Pt</b>	0,04	0,00	0,04	0,96	-0,11	0,00	-0,54	-0,50	0,27	-0,50	-0,97	-0,87	0,40	0,50	-0,93	1,00	0,11	0,23	-0,28	1,00

Όσον αφορά τα ιχνοστοιχεία, αξιοπρόσεκτη είναι η ισχυρή συσχέτιση του  $Ni$  ( $r = 0,97$ ) με το  $MgO$  και την απώλεια πύρωσης L.O.I. που φανερώνει την κοινή τους προέλευση που είναι ο σερπεντίνης, καθώς και ο υπολειμματικός αρχικός ολιβίνης. Σύμφωνα με τους Nord et al. (1982a,b) το  $Ni$  φιλοξενείται αποκλειστικά στη δομή του ολιβίνης και προτιμά ιδιαίτερα τη θέση M1, ενώ ακολούθως με τη σερπεντινίωση του ολιβίνης κληρονομείται στον παραγόμενο σερπεντίνη. Επίσης, ισχυρά θετική συσχέτιση έχει το  $Ga$  με το  $CaO$  ( $r = 0,87$ ) και το  $Al_2O_3$  ( $r$



= 0,85), το Sc με το  $Al_2O_3$  ( $r = 0,88$ ) και το  $TiO_2$  ( $r = 0,87$ ), το V με το Ga ( $r = 0,98$ ) και το CaO ( $r = 0,90$ ), το Ru με το Ir ( $r = 0,96$ ) και το Sc ( $r = 0,83$ ), το Rh με το  $TiO_2$  ( $r = 0,91$ ), το  $Al_2O_3$  ( $r = 0,88$ ), το CaO ( $r = 0,86$ ) και το  $Fe_2O_3$  ( $r = 0,85$ ) και τέλος ο Pt με τον Zn ( $r = 1,00$ ) και το  $Cr_2O_3$  ( $r = 0,96$ ). Ο Κασιώτης (2008) αναφέρει ότι διεισδύοντα τήγματα σε περιδοτίτες μπορούν να προκαλέσουν αποκλίσεις αυτών από τις συνήθεις συστάσεις τους και κυρίως αλλαγές στο περιεχόμενο τους σε ελαφριές σπάνιες γαίες, CaO,  $Al_2O_3$  και  $TiO_2$ .

## 4.5 Εμπλουτισμός

### 4.5.1 Βαρυτομετρικός διαχωρισμός με παλλόμενη τράπεζα

Αντιπροσωπευτική ποσότητα μεταξύ 950 και 1467 (g) από τα ενοποιημένα αρχικά κοκκομετρικά κλάσματα (mm) των σάκκων 1-3 επεξεργάστηκε σε παλλόμενη τράπεζα και αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα του βαρυτομετρικού διαχωρισμού. Το κλάσμα "-2,0 έως +1,5" ήταν φτωχό σε  $Cr_2O_3$  και δεν επιλέχθηκε να διαχωρισθεί βαρυτομετρικά, ενώ το κλάσμα "-0,125" δεν είναι αποδεκτό στην παλλόμενη τράπεζα σύμφωνα με τις προδιαγραφές χρήσης.

Στον Πίν. 25 δίνονται τα αποτελέσματα του βαρυτομετρικού διαχωρισμού με παλλόμενη τράπεζα από τα εξεταζόμενα κοκκομετρικά κλάσματα (mm). Τα παραγόμενα προϊόντα χωρίζονται σε συμπύκνωμα, ενδιάμεσο και απόρριμμα ανάλογα με τη θέση απόληψης από την παλλόμενη τράπεζα (Εικ. 71) και είναι εκφρασμένα σε (g) και (%).

Όπως προκύπτει από τον Πίν. 25 το περισσότερο συμπύκνωμα δίνει το κοκκομετρικό κλάσμα "-0,3 έως +0,125" με 40,14% ή 490 στα 1467 g τροφοδοσίας. Την υψηλότερη τιμή ενδιάμεσου προϊόντος δίνει το κοκκομετρικό κλάσμα "-1,5 έως +1,0" με 61,50% ή 619,55 στα 1036 g τροφοδοσίας. Τα κλάσματα "-1,0 έως +0,5", "-0,5 έως +0,3" και "-0,3 έως +0,125" δίνουν παρόμοιες υψηλές τιμές παραγόμενου απορρίμματος με το κλάσμα "-0,5 έως +0,3" να δίνει την υψηλότερη τιμή με 55,16% ή 446,10 στα 950,00 g τροφοδοσίας.

**Πίνακας 25.** Παραγόμενα προϊόντα του βαρυτομετρικού διαχωρισμού με παλλόμενη τράπεζα.

Κοκκομετρικό κλάσμα (mm)	Συμπύκνωμα		Ενδιάμεσο		Απόρριμμα		Σύνολο (g)	Τροφοδοσία (g)	Απώλεια (%)
	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)			
"-1,5 έως +1,0"	238,00	23,62	619,55	<b>61,50</b>	149,93	14,88	1007,48	1036,00	2,75
"-1,0 έως +0,5"	269,44	27,05	195,10	19,58	531,75	53,37	996,29	1185,00	15,92
"-0,5 έως +0,3"	200,60	24,81	162,00	20,03	446,10	<b>55,16</b>	808,70	950,00	14,87
"-0,3 έως +0,125"	490,00	<b>40,14</b>	80,80	6,62	650,00	53,24	1220,80	1467,00	<b>16,78</b>



Κλάσμα «-1,5 έως +1,0».



Κλάσμα «-1,0 έως +0,5».



Κλάσμα «-0,5 έως +0,3».



Κλάσμα «-0,3 έως +0,125».

**Εικόνα 71.** Παραγόμενα προϊόντα ανάλογα με τη θέση απόληψης από την παλλόμενη τράπεζα.

Αξιοσημείωτη στον Πίν. 25 είναι και η απώλεια υλικού από την παλλόμενη τράπεζα που κυμαίνεται μεταξύ 2,75 (κοκκομετρικό κλάσμα "-1,5 έως +1,0") έως 16,78% (κοκκομετρικό κλάσμα "-0,3 έως +0,125"). Ως απώλεια χαρακτηρίζεται το υλικό που διέφυγε από τα διαμερίσματα των προϊόντων τόσο κατά τη λειτουργία της τράπεζας, όσο και κατά τη συλλογή των προϊόντων (συμπυκνώματος, ενδιάμεσου και απορρίμματος), γι' αυτό και στα πιο λεπτομερή κλάσματα έχουμε μεγαλύτερες απώλειες. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι κατά τη συλλογή των προϊόντων και το χαρακτηρισμό τους ως συμπύκνωμα, ενδιάμεσο ή απόρριμμα, κύριο ρόλο παίζει η μακροσκοπική τους εικόνα και φυσικά η εμπειρία του κάθε ερευνητή.

### **Κύρια στοιχεία**

Στον Πίν. 26 παρουσιάζονται οι χημικές αναλύσεις των επιμέρους κλασμάτων και στον Πίν. 27 μόνο οι περιεκτικότητες σε  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  μαζί με τις επιμέρους ανακτήσεις σε  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  και τον εκάστοτε λόγο των στοιχείων Cr, Fe και λόγος Cr/Fe, όπως υπολογίζονται από τις σχέσεις 13 – 17 (σελ. 49).

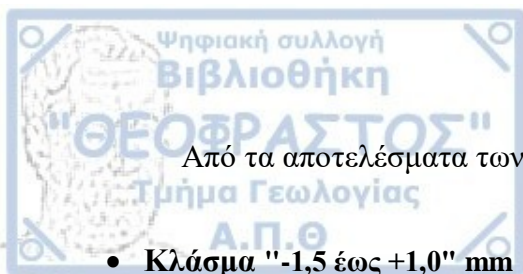
**Πίνακας 26.** Περιεκτικότητα (% κ.β.) των κύριων στοιχείων των επιμέρους κλασμάτων του βαρυτομετρικού διαχωρισμού.

Κοκκομετρικό κλάσμα (mm)	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	L.O.I.	Σύνολο
"-1,5 έως +1,0" Συμπύκνωμα	11,40	0,11	7,39	<b>39,70</b>	<b>12,47</b>	0,14	22,22	0,22	<0,01	<0,01	6,24	99,89
"-1,5 έως +1,0" Ενδιάμεσο	26,41	0,04	2,48	<b>14,40</b>	<b>8,07</b>	0,10	36,38	0,26	<0,01	<0,01	11,58	99,72
"-1,5 έως +1,0" Απόρριμμα	33,57	0,02	1,14	<b>4,09</b>	<b>6,87</b>	0,09	40,21	0,24	<0,01	<0,01	13,66	99,88
"-1,0 έως +0,5" Συμπύκνωμα	7,10	0,11	8,60	<b>47,28</b>	<b>13,60</b>	0,16	18,94	0,16	<0,01	<0,01	3,85	99,80
"-1,0 έως +0,5" Ενδιάμεσο	20,80	0,07	4,18	<b>24,03</b>	<b>9,79</b>	0,11	30,42	0,32	<0,01	<0,01	10,12	99,85
"-1,0 έως +0,5" Απόρριμμα	32,26	0,03	1,63	<b>6,69</b>	<b>7,23</b>	0,09	38,83	0,28	<0,01	<0,01	12,85	99,88
"-0,5 έως +0,3" Συμπύκνωμα	3,10	0,12	10,08	<b>54,72</b>	<b>15,10</b>	0,17	15,15	0,10	<0,01	<0,01	1,18	99,75
"-0,5 έως +0,3" Ενδιάμεσο	13,59	0,10	7,20	<b>35,62</b>	<b>13,00</b>	0,14	23,73	0,28	<0,01	<0,01	6,13	99,80
"-0,5 έως +0,3" Απόρριμμα	26,60	0,03	1,56	<b>11,51</b>	<b>7,05</b>	0,08	39,19	0,32	<0,01	<0,01	13,45	99,79
"-0,3 έως +0,125" Συμπύκνωμα	3,50	0,13	9,95	<b>54,08</b>	<b>15,65</b>	0,17	15,40	0,10	<0,01	<0,01	0,90	99,88
"-0,3 έως +0,125" Ενδιάμεσο	16,81	0,09	6,26	<b>30,72</b>	<b>12,04</b>	0,14	26,74	0,38	<0,01	<0,01	6,68	99,86
"-0,3 έως +0,125" Απόρριμμα	31,77	0,03	1,77	<b>6,32</b>	<b>7,19</b>	0,09	38,73	0,37	<0,01	<0,01	13,61	99,88

L.O.I.: Απώλεια πύρωσης 1050 °C/2h.

**Πίνακας 27.** Περιεκτικότητες σε Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub> μαζί με τις επιμέρους ανακτήσεις σε Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και τον εκάστοτε λόγο των στοιχείων Cr, Fe και λόγος Cr/Fe.

Κοκκομετρικό κλάσμα (mm)	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (% κ.β.)	Κατανομή-Ανάκτηση Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Cr (% κ.β.)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub> (% κ.β.)	Fe (% κ.β.)	Cr/Fe
"-1,5 έως +1,0" Συμπύκνωμα	39,70	49,77	27,16	12,47	8,72	<b>3,11</b>
"-1,5 έως +1,0" Ενδιάμεσο	14,40	47,00	9,85	8,07	5,64	1,75
"-1,5 έως +1,0" Απόρριμμα	4,09	3,23	2,80	6,87	4,81	0,58
"-1,0 έως +0,5" Συμπύκνωμα	47,28	60,71	32,35	13,60	9,51	<b>3,40</b>
"-1,0 έως +0,5" Ενδιάμεσο	24,03	22,34	16,44	9,79	6,85	2,40
"-1,0 έως +0,5" Απόρριμμα	6,69	16,95	4,58	7,23	5,06	0,91
"-0,5 έως +0,3" Συμπύκνωμα	54,72	50,16	37,44	15,10	10,56	<b>3,54</b>
"-0,5 έως +0,3" Ενδιάμεσο	35,62	26,37	24,37	13,00	9,09	2,68
"-0,5 έως +0,3" Απόρριμμα	11,51	23,47	7,88	7,05	4,93	1,60
"-0,3 έως +0,125" Συμπύκνωμα	54,08	80,08	37,00	15,65	10,95	<b>3,38</b>
"-0,3 έως +0,125" Ενδιάμεσο	30,72	7,50	21,02	12,04	8,42	2,50
"-0,3 έως +0,125" Απόρριμμα	6,32	12,41	4,32	7,19	5,03	0,86



Από τα αποτελέσματα των Πίν. 26 και 27 εξάγονται οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- **Κλάσμα "-1,5 έως +1,0" mm**

Το κλάσμα αυτό δεν παρουσιάζει ικανοποιητικό συμπύκνωμα και σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να ανακυκλωθεί προς περαιτέρω θραύση. Πρέπει πάντως να τονιστεί ότι το συμπύκνωμα και το ενδιάμεσο παρουσιάζουν αθροιστική ανάκτηση  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  που προσεγγίζει το 97% του ολικού  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (Πίν. 27), η οποία κρίνεται ικανοποιητική. Το απόρριμμα παρουσιάζει περιεκτικότητα 4,09% κ.β. σε  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  η οποία αν συσχετιστεί με την απώλεια πύρωσης που δίνει το προϊόν αυτό (13,66% κ.β.), αλλά και τα υπόλοιπα στοιχεία της χημικής ανάλυσης, υποδηλώνει υλικό στο οποίο η σερπεντινίωση είναι εκτεταμένη. Σύμφωνα με τους Deer et al. (1992) ο σερπεντίνης εμφανίζει απώλεια πύρωσης μεταξύ 12 και 15% κ.β. Η σχετικά αυξημένη περιεκτικότητα σε  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , πιθανότατα οφείλεται σε δεσμευμένα τεμάχια χρωμίτη στο στείρο ή/και στο περιεχόμενο χρώμιο στη δομή του σερπεντίνης. Η περαιτέρω θραύση του προϊόντος αυτού για ανάκτηση του χρωμίου, θα πρέπει να εξεταστεί από οικονομικής πλέον άποψης. Σε κάθε περίπτωση, φαίνεται ότι είναι δυνατή η απομάκρυνση του απορρίμματος, η ποσότητα του οποίου ανέρχεται στο 14,88% κ.β. της αρχικής τροφοδοσίας (Πίν. 25), ελαφρύνοντας έτσι τον εξοπλισμό της μετέπειτα διαδικασίας.

- **Κλάσμα "-1,0 έως +0,5" mm**

Το συμπύκνωμα φαίνεται να είναι οριακό για παραγωγή χαμηλού και υψηλού άνθρακα σιδηροχρώμιου (Πίν. 13). Αν και ο λόγος Cr/Fe, είναι ικανοποιητικός, η ανάκτηση (60,71%) θεωρείται χαμηλή, ενώ υπάρχουν σημαντικές απώλειες στο απόρριμμα (Πίν. 27). Τυχόν αναδιάταξη στα διαμερίσματα προϊόντων της τράπεζας θα μπορούσε να γίνει μόνο βελτιώνοντας την ποιότητα του συμπυκνώματος και ενδιάμεσο + απόρριμμα να οδηγηθούν σε περαιτέρω θραύση.

- **Κλάσμα "-0,5 έως +0,3" mm**

Το συμπύκνωμα στο κλάσμα αυτό σε γενικές γραμμές, υπερκαλύπτει τις προδιαγραφές των περισσότερων εμπορικών τύπων (Πίν. 13), ενώ παρατηρούνται (Πίν. 27) διαφυγές χρωμίτη στο αυξημένο απόρριμμα (23,47% κ.β. της τροφοδοσίας με 11,51% κ.β. σε  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ). Σε περίπτωση που μέσω επαναδιάταξης των διαμερισμάτων των προϊόντων ενωθούν συμπύκνωμα και ενδιάμεσο, το νέο προϊόν, συνδυάζοντας τους πίνακες 25 και 27, θα έχει περιεκτικότητα σε  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ :  $(200,60 \text{ g} \times 54,72\% + 162,00 \text{ g} \times 35,62\%) / (200,60 + 162,00) = 46,19\%$  με ανάκτηση ύψους  $50,16 + 26,37 = 76,53\%$  και λόγο Cr/Fe: **3,19** (Πίν. 27).



Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι με μικρές αλλαγές στη διάταξη των διαμερισμάτων μπορεί να παραχθεί ικανοποιητικής ποιότητας συμπύκνωμα, μειώνοντας ταυτόχρονα και την περιεκτικότητα σε  $Al_2O_3$ , κάτι που είναι επιθυμητό. Το αυξημένο απόρριμμα (55,16% κ.β. της τροφοδοσίας με 11,51% κ.β. σε  $Cr_2O_3$ ) θα πρέπει να οδηγηθεί σε περαιτέρω θραύση, κυρίως λόγω της αυξημένης περιεκτικότητας σε  $Cr_2O_3$  (Πίν 25 και 27).

- **Κλάσμα "-0,3 έως +0,125" mm**

Το κλάσμα αυτό χαρακτηρίζεται από καλή ανάκτηση στο συμπύκνωμα (>80%). Θα μπορούσαν να γίνουν οι αντίστοιχες αναδιατάξεις στα διαμερίσματα έτσι ώστε να ενωθεί συμπύκνωμα με ενδιάμεσο και το απόρριμμα να ανακυκλωθεί κατ' αντιστοιχία με το κλάσμα "-0,5 έως +0,3" mm.

Σε όλα τα προϊόντα του βαρυτομετρικού διαχωρισμού παρατηρείται γενικά μία ομοιομορφία όσον αφορά στην μεταβολή των κυριότερων χαρακτηριστικών σε σχέση με την κοκκομετρία.

Η απώλεια πύρωσης σε όλα τα προϊόντα έχει σαφή τάση αύξησης από το συμπύκνωμα προς το απόρριμμα (Πίν. 26), γεγονός που όπως προαναφέρθηκε, δείχνει και τον έντονο βαθμό σερπεντινίωσης του στείρου υλικού. Όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους σχετικά με την ορυκτολογική και χημική ανάλυση των κοκκομετρικών κλασμάτων πριν την εφαρμογή των μεθόδων διαχωρισμού, επαληθεύονται και μετά το διαχωρισμό και ειδικότερα:

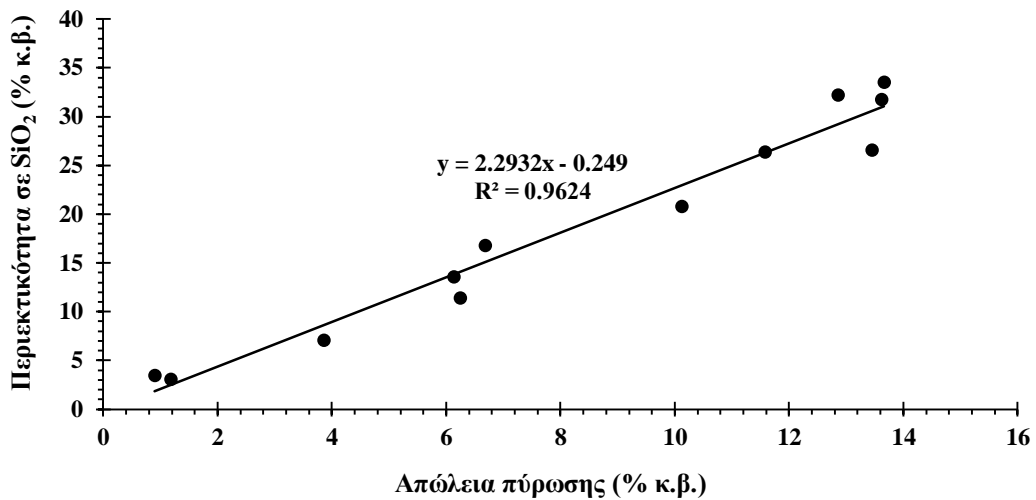
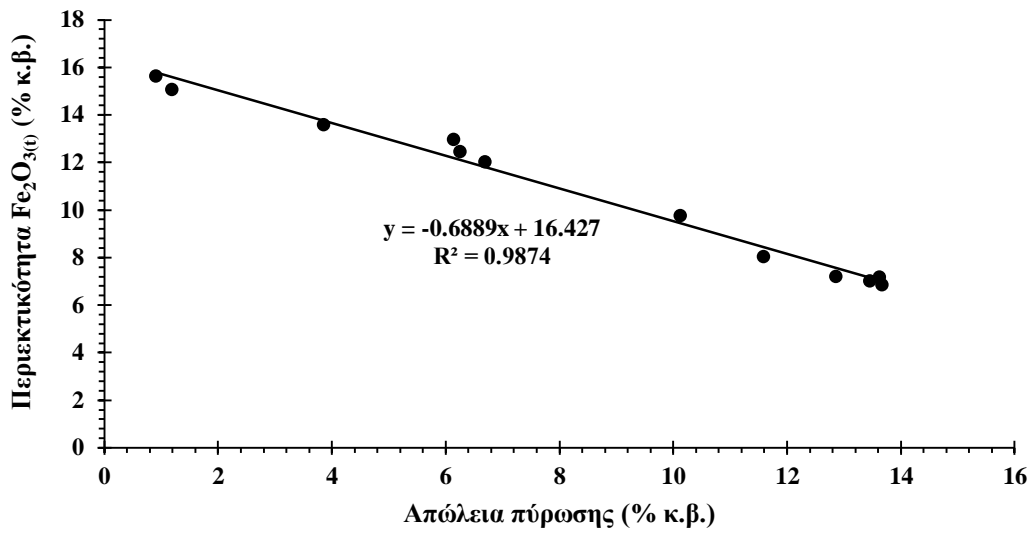
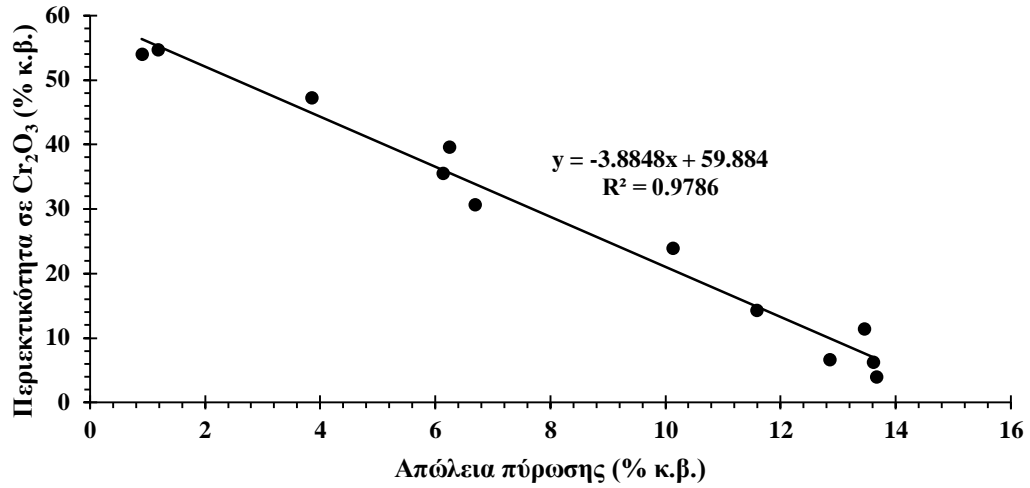
- Ο διάσπαρτος λεπτόκοκκος έως μεσόκοκκος χρωμίτης με την έντονη κατακλαστική υφή, θραύεται σε μεγέθη κάτω των 0,5 mm, όπου από εκεί και κάτω εμφανίζει ικανοποιητική αποδέσμευση.
- Το περιβάλλον πέτρωμα που αποτελείται κυρίως από σερπεντίνη και πυροαουρίτη με πυρόξενους και υπολειμματικό ολιβίνη σε μικρότερες ποσότητες, δημιουργεί τις σχετικά ευνοϊκές συνθήκες του βαρυτομετρικού διαχωρισμού.
- Η περιεκτικότητα σε  $MgO$  είναι υψηλότερη στα δύο πιο αδρόκοκκα κλάσματα, το οποίο οφείλεται κυρίως στη μικρή αποδέσμευση του χρωμίτη και στην παρουσία μαγνησίου στη δομή αυτού.
- Η αυξημένη επίσης παρουσία  $SiO_2$  στα αδρόκοκκα κλάσματα, οφείλεται στην παρουσία των στείρων πυριτικών ορυκτών, λόγω της μικρής αποδέσμευσής τους.
- Όλα τα στοιχεία (Πίν. 26) και τα ιχνοστοιχεία (Πίν 28), πλην των  $Be$ ,  $Cu$ ,  $Ge$ ,  $Mo$ ,  $Nb$ ,  $Rb$ ,  $Sr$ ,  $Y$  και  $Zr$  οι τιμές των οποίων κυμαίνονται στα όρια ανιχνευσιμότητας, εμφανίζουν

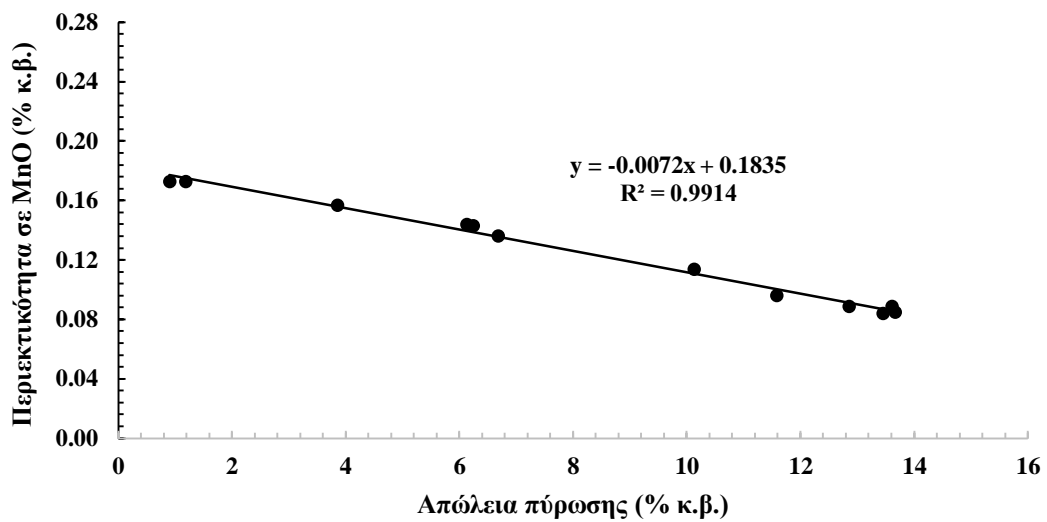
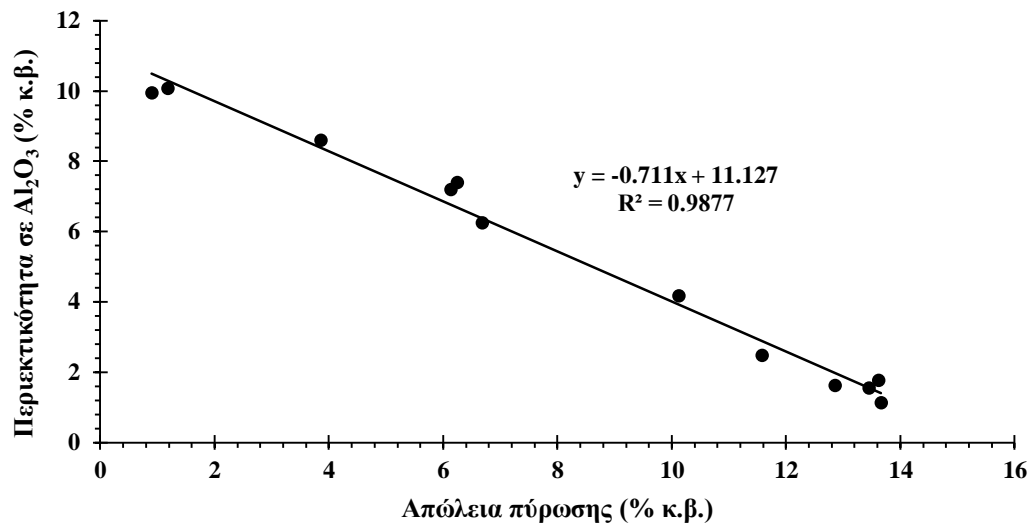
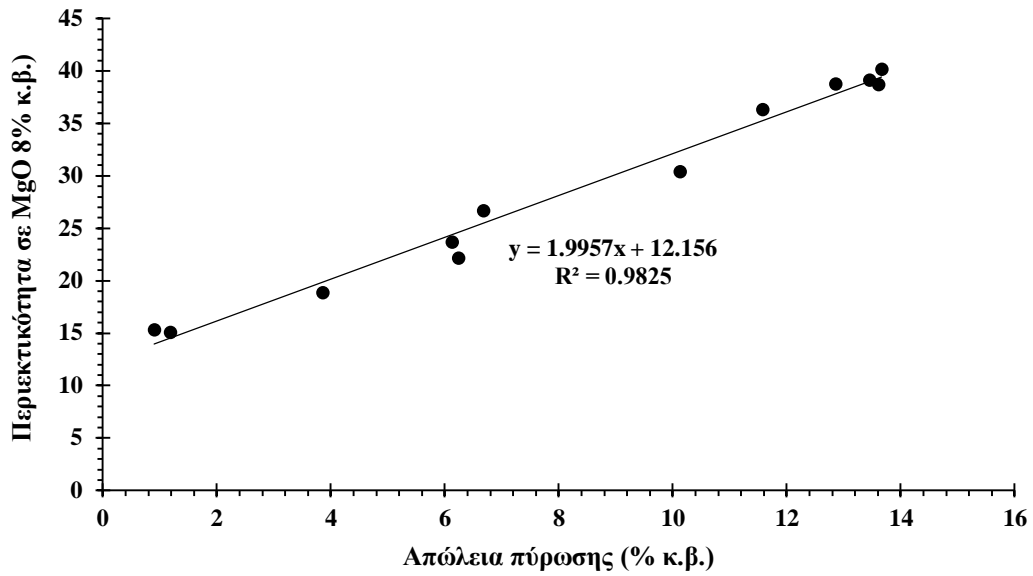
μια ξεκάθαρη τάση προτίμησης από το συμπύκνωμα προς το απόρριμμα ή αντίστροφα (Εικ. 72). Η τάση αυτή είναι ένας ιδιαίτερα χρήσιμος δείκτης της προέλευσης κάθε στοιχείου και της μελέτης των προβλημάτων του εμπλουτισμού.

**Πίνακας 28.** Συγκεντρώσεις (ppm) των ιχνοστοιχείων Co, Ni, V και Zn των επιμέρους κλασμάτων του βαρυτομετρικού διαχωρισμού.

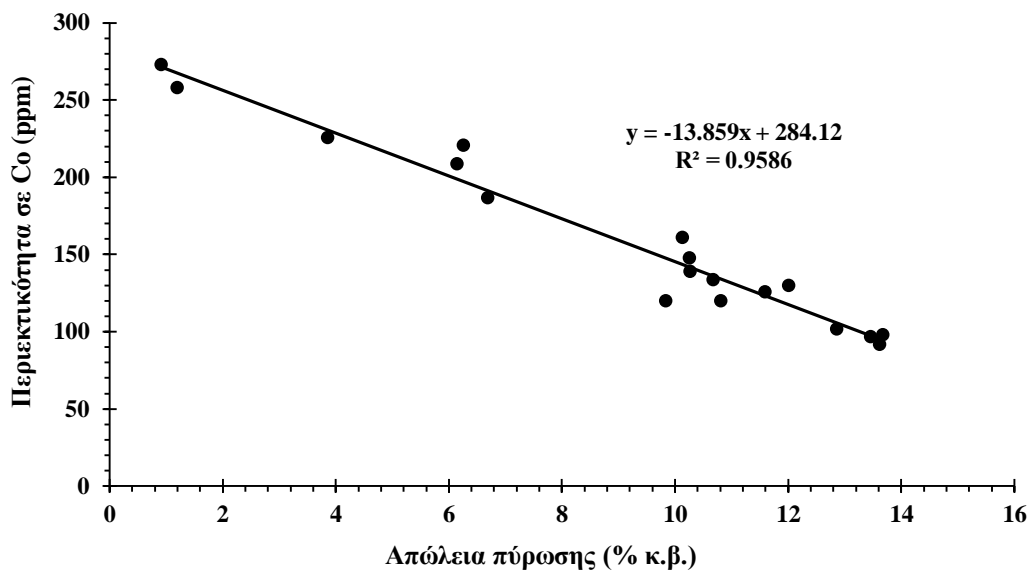
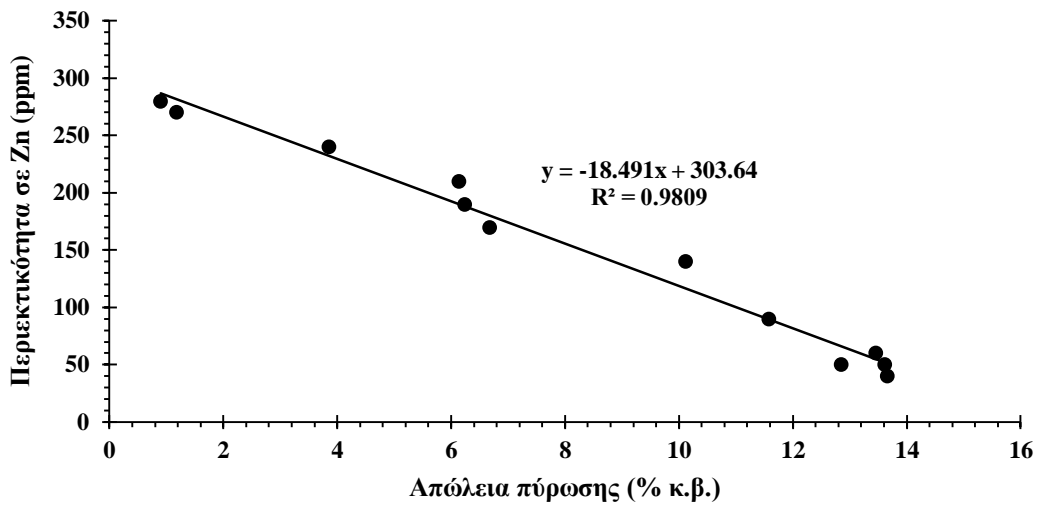
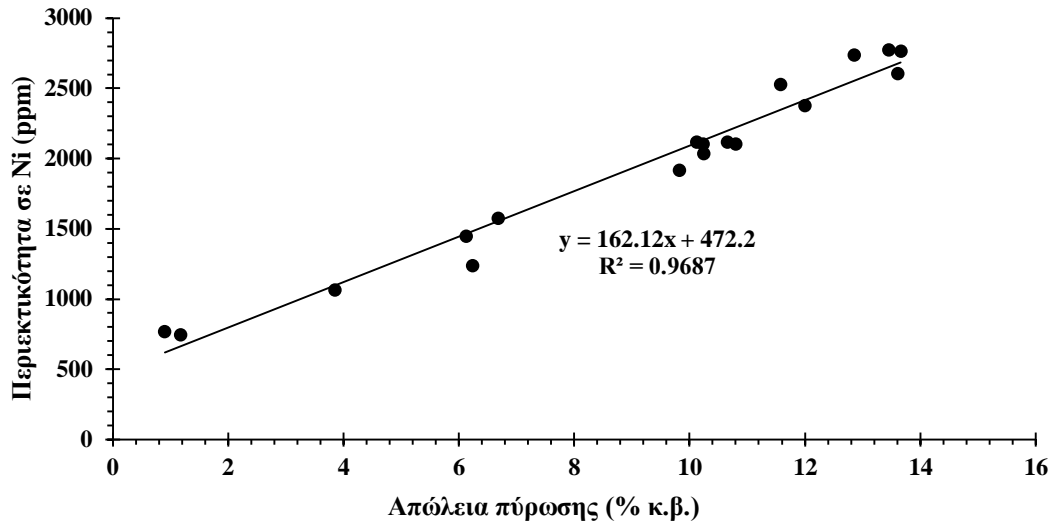
Κοκκομετρικό κλάσμα (mm)	Ba	Co	Ga	Ni	Sc	V	Zn
"-1,5 έως +1,0" Συμπύκνωμα	5	221	13	1240	6	416	190
"-1,5 έως +1,0" Ενδιάμεσο	<2	126	5	2530	4	127	90
"-1,5 έως +1,0" Απόρριμμα	5	98	2	2770	4	57	40
"-1,0 έως +0,5" Συμπύκνωμα	4	226	16	1070	6	475	240
"-1,0 έως +0,5" Ενδιάμεσο	<2	161	9	2120	6	228	140
"-1,0 έως +0,5" Απόρριμμα	5	102	2	2740	4	85	50
"-0,5 έως +0,3" Συμπύκνωμα	4	258	18	750	7	534	270
"-0,5 έως +0,3" Ενδιάμεσο	4	209	13	1450	6	371	210
"-0,5 έως +0,3" Απόρριμμα	2	97	3	2780	4	78	60
"-0,3 έως +0,125" Συμπύκνωμα	4	273	18	770	7	549	280
"-0,3 έως +0,125" Ενδιάμεσο	4	187	11	1580	6	325	170
"-0,3 έως +0,125" Απόρριμμα	7	92	2	2610	4	90	50

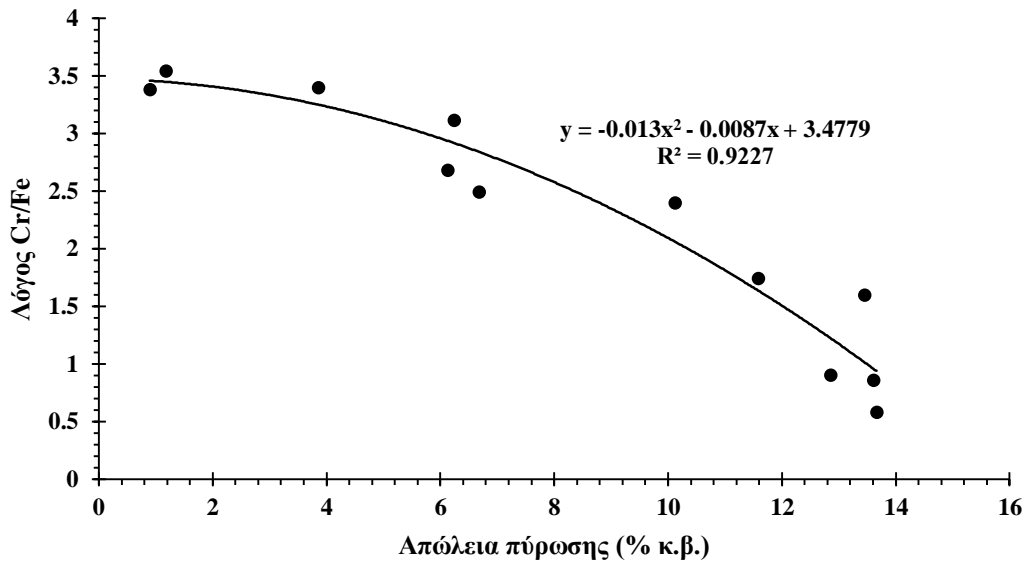
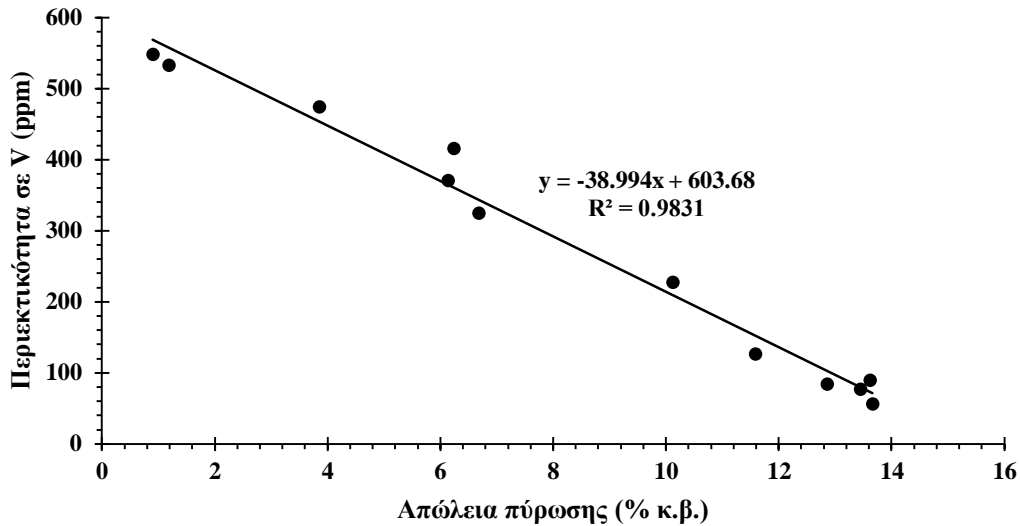
- Η παράμετρος της απώλειας πύρωσης σύμφωνα με τους Deer et al. (1992) και Κασιώτης (2008) αποτελεί σημαντικό και αξιόπιστο δείκτη του βαθμού σερπεντινίωσης, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω. Μετά όμως και από την εφαρμογή διαχωρισμού με παλλόμενη τράπεζα, ο δείκτης αυτός αποδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμος στην κατανόηση της προέλευσης κάθε στοιχείου (Εικ. 72). Το γεγονός επίσης ότι εμφανίζει πολύ καλή συσχέτιση με όλα τα στοιχεία, μας επιτρέπει να έχουμε μια καλή εικόνα της περιεκτικότητας σε κάθε στοιχείο.











Εικόνα 72. Συσχέτιση απώλειας πύρωσης με κύρια στοιχεία, ιχνοστοιχεία και το λόγο Cr/Fe.

#### 4.5.2 Μαγνητικός διαχωρισμός-εμπλουτισμός

Παράλληλα διενεργήθηκε κλασματικός μαγνητικός διαχωρισμός στα 3 δείγματα και σε εντάσεις από 2,0 έως 0,2 A και κατασκευάστηκαν οι αντίστοιχες μαγνητικές καμπύλες, τα δεδομένα των οποίων παρουσιάζονται στους Πίν. 29 & 30 και αντίστοιχα κατασκευάστηκαν οι αθροιστικές μαγνητικές καμπύλες, όπως φαίνονται στις Εικ. 73 & 74. Επιπλέον, τα προϊόντα του μαγνητικού διαχωρισμού, αφού πλύθηκαν με απιονισμένο νερό και ξηράνθηκαν προκειμένου οι κόκκοι να είναι απαλλαγμένοι από το λεπτομερές υλικό και σκόνη, εξετάστηκαν σε στερεοσκόπιο προκειμένου να γίνει φωτογραφική τεκμηρίωση των ευρημάτων. Σχετικές φωτογραφίες του δείγματος του σάκκου 1 φαίνονται στην Εικ. 75.

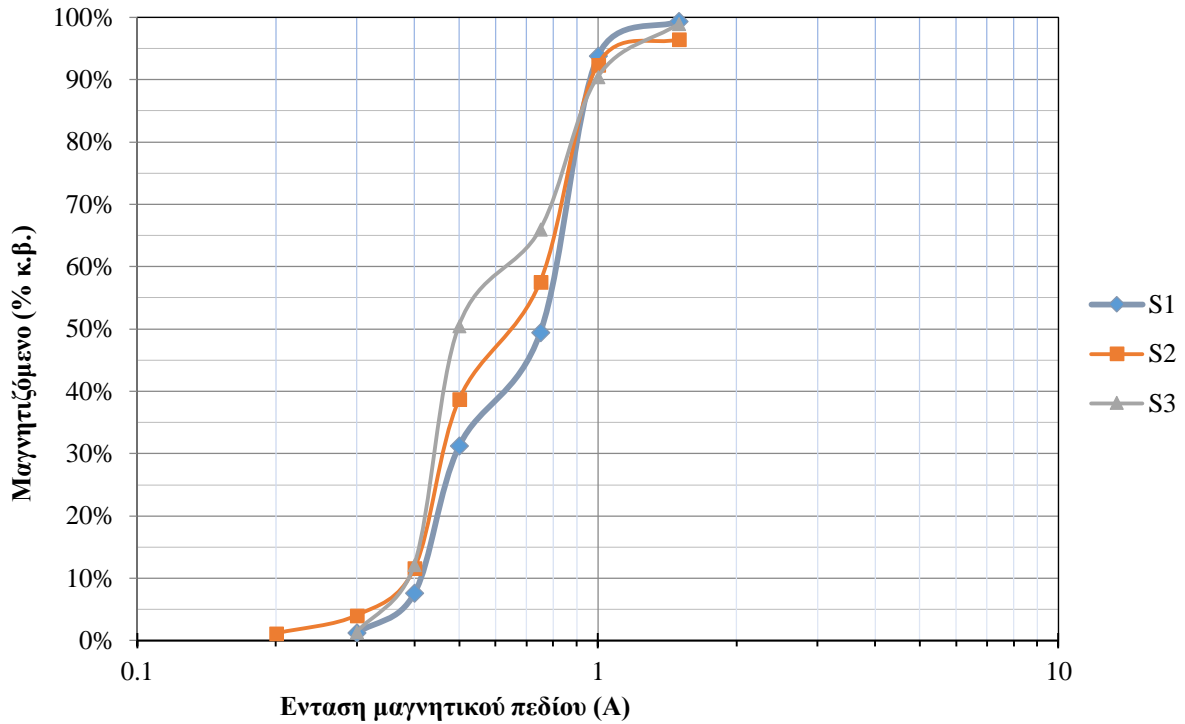
**Πίνακας 29.** Μαγνητική ανάλυση του κοκκομετρικού κλάσματος "-0,5 έως +0,3" mm.

Ένταση (Amps)	Μη Μαγνητικό (% κ.β.)	Μη Μαγνητικό (% κ.β. αθροιστικό)	Μαγνητικό (% κ.β. αθροιστικό)
<b>Σάκος 1</b>			
1,5	0,62	0,62	99,38
1	5,59	6,21	93,79
0,75	44,31	50,52	49,48
0,5	18,22	68,74	31,26
0,4	23,60	92,34	7,66
0,3	6,42	98,76	1,24
Μαγνητικό στα 0,3	1,24		
Σύνολο	100,00		
<b>Σάκος 2</b>			
1,5	3,50	3,50	96,50
1	4,09	7,59	92,41
0,75	34,82	42,41	57,59
0,5	18,87	61,28	38,72
0,4	27,04	88,33	11,67
0,3	7,59	95,91	4,09
0,2	2,92	98,83	1,17
Μαγνητικό στα 0,2	1,17		
Σύνολο	100,00		
<b>Σάκος 3</b>			
1,5	1,05	1,05	98,95
1	8,55	9,60	90,40
0,75	24,44	34,03	65,97
0,5	15,44	49,48	50,52
0,4	38,38	87,86	12,14
0,3	10,79	98,65	1,35
Μαγνητικό στα 0,3	1,35		
Σύνολο	100,00		

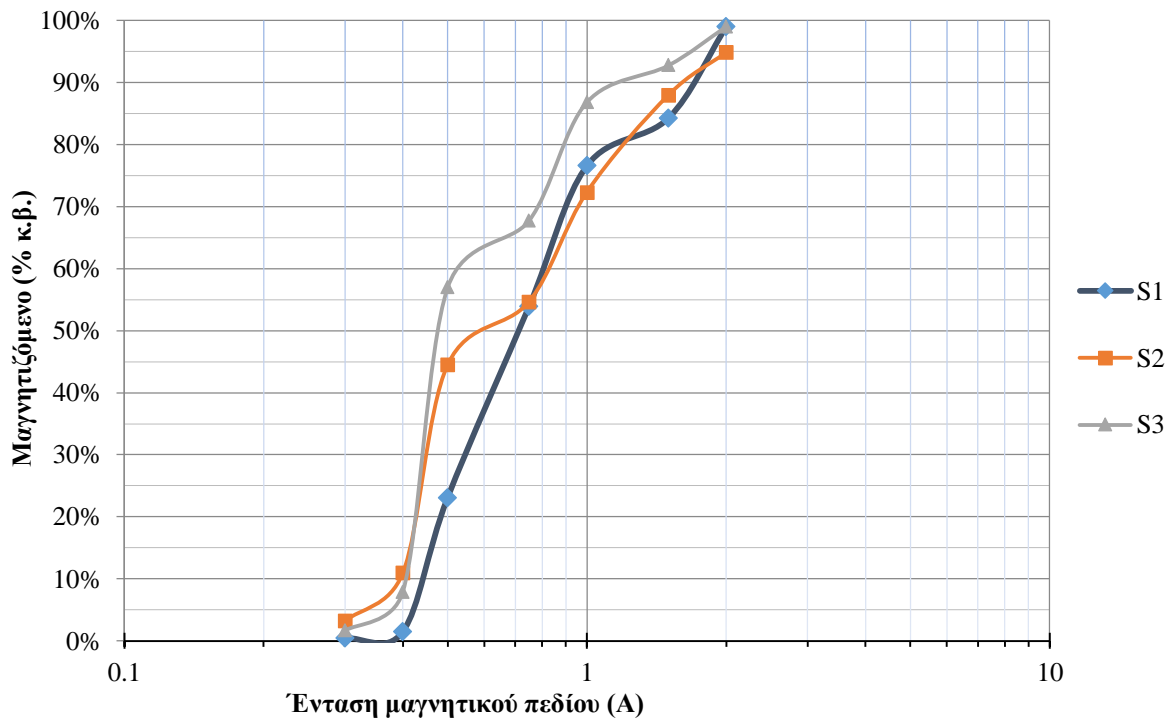
**Πίνακας 30.** Μαγνητική ανάλυση του κοκκομετρικού κλάσματος "-0,3 έως +0,125" mm.

Ένταση (Amps)	Μη Μαγνητικό (% κ.β.)	Μη Μαγνητικό (% κ.β. αθροιστικό)	Μαγνητικό (% κ.β. αθροιστικό)
<b>Σάκκος 1</b>			
2	0,95	0,95	99,05
1,5	14,77	15,72	84,28
1	7,68	23,41	76,59
0,75	22,65	46,06	53,94
0,5	30,89	76,95	23,05
0,4	21,60	98,54	1,46
0,3	2,01	99,60	0,40
Μαγνητικό στα 0,3	0,40		
Σύνολο	100,00		
<b>Σάκκος 2</b>			
2	5,16	5,16	94,84
1,5	6,89	12,05	87,95
1	15,64	27,69	72,31
0,75	17,65	45,34	54,66
0,5	10,19	55,52	44,48
0,4	33,57	89,10	10,90
0,3	7,75	96,84	3,16
Μαγνητικό στα 0,3	3,16		
Σύνολο	100,00		
<b>Σάκκος 3</b>			
2	0,97	0,97	99,03
1,5	6,26	7,23	92,77
1	5,93	13,16	86,84
0,75	19,09	32,25	67,75
0,5	10,79	43,04	56,96
0,4	49,08	92,13	7,87
0,3	6,26	98,38	1,62
Μαγνητικό στα 0,3	1,62		
Σύνολο	100,00		





**Εικόνα 73.** Μαγνητικά κλάσματα (% κ.β.) μαγνητιζόμενου υλικού του κοκκομετρικού κλάσματος -0,5 έως +0,3 mm.



**Εικόνα 74.** Μαγνητικά κλάσματα (% κ.β.) μαγνητιζόμενου υλικού του κοκκομετρικού κλάσματος -0,3 έως +0,125 mm.



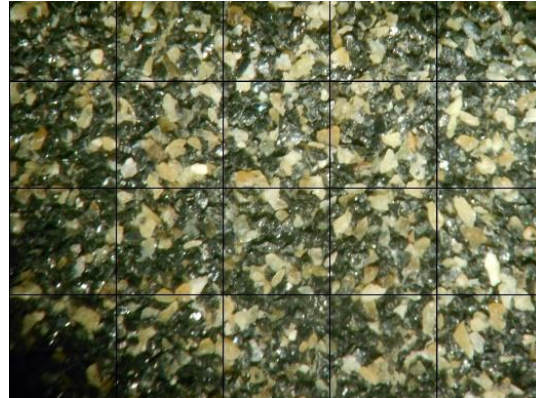
Κλάσμα «-0,5 έως +0,3 mm» MM 0,75 A.



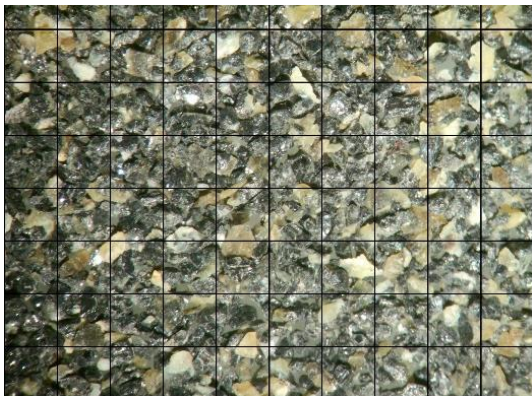
Κλάσμα «-0,3 έως +0,125» mm MM 0,75 A



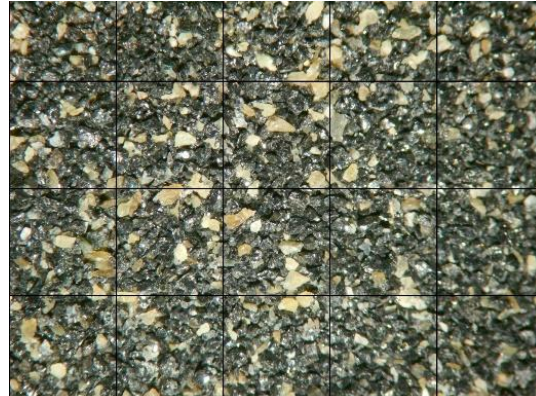
Κλάσμα «-0,5 έως +0,3 mm» MM 0,5 - M 0,75A.



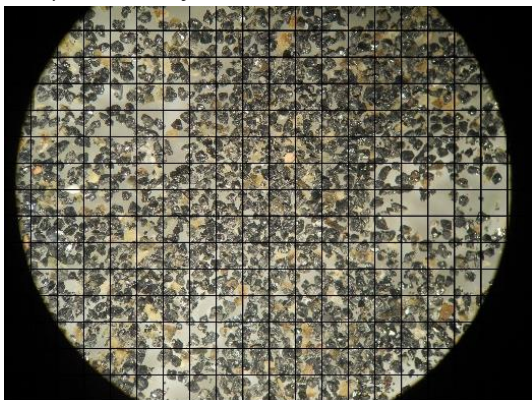
Κλάσμα «-0,3 έως +0,125» mm MM 0,5 - M 0,75A.



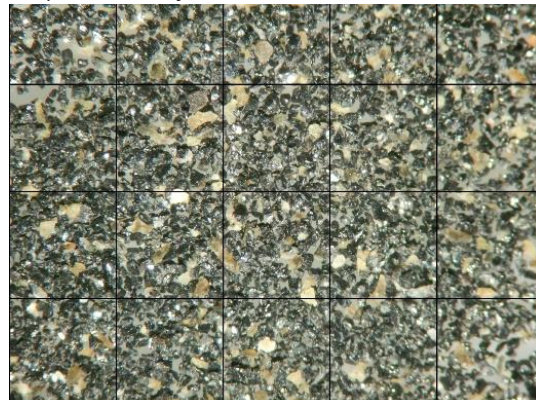
Κλάσμα «-0,5 έως +0,3» mm M 0,5 A. - MM 0,4 A



Κλάσμα «-0,3 έως +0,125» mm M 0,5 A. - MM 0,4 A



Κλάσμα «-0,5 έως +0,3» mm M 0,4 A - MM 0,3 A



Κλάσμα «-0,3 έως +0,125» mm M 0,4 A - MM 0,3 A

**Εικόνα 75.** Στερεοσκοπική μελέτη των μαγνητικών κλασμάτων (M: μαγνητικό, MM: μη μαγνητικό, κάνναβος 1 x 1 mm σε όλες τις εικόνες).



Από την παρατήρηση των παραπάνω Πίν. 29 & 30 και των Εικ. 73-75 προκύπτουν οι παρακάτω παρατηρήσεις για τα μαγνητικά κλάσματα:

- Τα κλάσματα που δεν μαγνητίζονται στην ένταση των 0,75A (Εικ. 75, πρώτη σειρά από επάνω) ανεξάρτητα από το μέγεθος της κοκκομετρίας, παρουσιάζουν την εικόνα του σχεδόν καθαρού στείρου υλικού. Πρόκειται κυρίως για μη μεταλλικά ορυκτά, χαμηλής μαγνητικής επιδεκτικότητας, στα οποία δεν αναμένεται να υπάρχουν σημαντικές ποσότητες χρωμίτη, μαγνητίτη ή άλλων μεταλλικών ορυκτών.
- Το υλικό που μαγνητίζεται στα 0,75A και δεν μαγνητίζεται στα 0,5A (Εικ. 75, δεύτερη σειρά από επάνω) παρουσιάζει σαφέστερες διαφορές με τα προηγούμενα, με την επικράτηση μεταλλικών ορυκτών και το αυξημένο ποσοστό ενδιάμεσων τεμαχίων και στείρων, κυρίως στο κλάσμα «-0,5 έως +0,3» mm. Παρατηρείται διαφυγή χρωμίτη προς το στέιρο η οποία πιθανότητα οφείλεται στο γεγονός ότι παρασύρονται από κόκκους στείρου, πριν φθάσουν στην διαχωριστική αύλακα του μαγνητικού διαχωριστή.
- Το υλικό που μαγνητίζεται στα 0,5A και δεν μαγνητίζεται στα 0,4A (Εικ. 75, τρίτη σειρά από επάνω) παρουσιάζει μεγαλύτερη ομοιομορφία στα δύο κοκκομετρικά κλάσματα και χαρακτηρίζεται από μικρότερο ποσοστό στείρου υλικού.
- Το υλικό που μαγνητίζεται στα 0,4A και δεν μαγνητίζεται στα 0,3A (Εικ. 75, τέταρτη σειρά από επάνω) και είναι σαφέστερα το πιο μαγνητικό, παρουσιάζει και αυτό μικρό ποσοστό στείρου, η παρουσία του οποίου οφείλεται πιθανότατα στη λειτουργία του μαγνητικού διαχωριστή.

Η ένταση των 0,5A (πλευρική γωνία 14°) κρίνεται κατάλληλη και αντιπροσωπευτική για τον διαχωρισμό του χρωμιτίτη των Αετορραχών και την περαιτέρω εξέταση των δειγμάτων και έρχεται σε συμφωνία με σχετικές παρατηρήσεις που έχουμε από τον Hess (1966) ο οποίος προτείνει για διαχωρισμό χρωμίτη ένταση 0,4A και πλευρική γωνία 20° και από τον Βουτετάκη (1960) ο οποίος προτείνει ως πλευρική γωνία την τιμή των 11° και ένταση 0,4A και αναφέρεται στο κοίτασμα του Ξηρολίβαδου. Επίσης, φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο το είδος των κόκκων που προκύπτουν από τη θραύση. Στο δείγμα υπάρχουν κόκκοι που προέρχονται τόσο απ' ευθείας από τον πρωτογενή θραυστήρα σιαγόνων, όσο και από την κυρίως δευτερογενή θραύση στον κονιορτοποιητή.

### Ορυκτολογική ανάλυση

Από τα προϊόντα του μαγνητικού διαχωρισμού στα 0,5A λήφθηκε αντιπροσωπευτικό υλικό και κονιοποιήθηκε σε μορφή σκόνης προκειμένου να μελετηθεί η ορυκτολογική τους σύστασης κάνοντας χρήση της μεθόδου της περιθλασιμετρίας ακτίνων-X (XRD). Τα αποτελέσματα του προσδιορισμού της ορυκτολογικής σύστασης παρουσιάζονται στον Πίν. 31, ενώ τα περιθλασιογράμματα των εξεταζόμενων δειγμάτων δίνονται στο παράρτημα.

**Πίνακας 31.** Ορυκτολογική σύσταση (% κ.β.) των προϊόντων του μαγνητικού διαχωρισμού στα 0,5A.

Κοκκομετρικά κλάσματα (mm)		Μη μαγνητικό					Μαγνητικό				
		Chr	OI	Px	Serp	Pyr	Chr	OI	Px	Serp	Pyr
<b>Σάκκος 1</b>	"-0,5 έως +0,3"	12	13	2	48	26	79			10	11
	"-0,3 έως +0,125"	7	15	3	52	23	85			8	8
	"-0,125"	8	15	2	48	26	25	10	1	42	22
<b>Σάκκος 2</b>	"-0,5 έως +0,3"	30	18	3	34	15	79			16	5
	"-0,3 έως +0,125"	11	15	2	55	17	89			8	2
	"-0,125"	26	19	2	41	13	44	8	1	38	9
<b>Σάκκος 3</b>	"-0,5 έως +0,3"	22	9	3	45	20	84		2	7	7
	"-0,3 έως +0,125"	8	14	3	54	21	85			7	8
	"-0,125"	12	13	3	50	22	73	4	1	15	7
<b>Μέση τιμή</b>	"-0,5 έως +0,3"	21	13	3	42	20	81		1	11	8
	"-0,3 έως +0,125"	9	15	3	54	20	86			8	6
	"-0,125"	15	16	2	46	20	47	7	1	32	13

Chr: Χρωμίτης, OI: Ολιβίνης σύστασης φορστερίτη, Px: Πυρόξενος σύστασης ενστατίτη, Serp: Σερπεντίνης, Pyr: Πυροαουρίτης,

Σύμφωνα με τον Πίν. 31 στα εξεταζόμενα προϊόντα του μαγνητικού διαχωρισμού στα 0,5A στα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα περιέχονται, τόσο στο μη μαγνητικό κλάσμα, όσο και στο μαγνητικό χρωμίτης, σερπεντίνης, πυροαουρίτης, ολιβίνης και πυρόξενος σε διαφορετικές κατά περίπτωση συγκεντρώσεις. Συγκεκριμένα, στο μη μαγνητικό κλάσμα ο χρωμίτης κυμαίνεται στον σάκκο 1 μεταξύ 7 (κλάσμα "-0,3 έως +0,125") και 12% κ.β. (κλάσμα "-0,5 έως +0,3"), στο σάκκο 2 μεταξύ 11 (κλάσμα "-0,3 έως +0,125") και 30% κ.β. (κλάσμα "-0,5 έως +0,3") και στο σάκκο 3 μεταξύ 8 (κλάσμα "-0,3 έως +0,125") και 22% κ.β. (κλάσμα "-0,5 έως +0,3"). Η μέση διακύμανση του χρωμίτη στο μη μαγνητικό κλάσμα κυμαίνεται μεταξύ 9 (κλάσμα "-0,3 έως +0,125") και 21% κ.β. (κλάσμα "-0,5 έως +0,3"), διαπιστώνεται δηλαδή ότι ο χρωμίτης απελευθερώνεται πολύ καλύτερα στο κλάσμα -0,3 έως +0,125 mm. Από τα σύνδρομα ορυκτά στο μη μαγνητικό κλάσμα κυριαρχούν ο σερπεντίνης και ο πυροαουρίτης



και ακολουθούν σε μικρότερες συγκεντρώσεις ο ολιβίνης και ο πυρόξενος. Συγκεκριμένα, στο μη μαγνητικό κλάσμα ο σερπεντίνης κυμαίνεται στον σάκκο 1 μεταξύ 48 και 52% κ.β., στο σάκκο 2 μεταξύ 34 και 55% κ.β. και στο σάκκο 3 μεταξύ 45 και 54% κ.β. με τη μέση διακύμανση του σερπεντίνης στο μη μαγνητικό κλάσμα να κυμαίνεται μεταξύ 42 και 54% κ.β. Ο πυροαουρίτης στο μη μαγνητικό κλάσμα κυμαίνεται στον σάκκο 1 μεταξύ 23 και 26% κ.β., στο σάκκο 2 μεταξύ 13 και 17% κ.β. και στο σάκκο 3 μεταξύ 20 και 22% κ.β. με τη μέση διακύμανση του πυροαουρίτη στο μη μαγνητικό κλάσμα να είναι σταθερή στο 20% κ.β. Ο ολιβίνης στο μη μαγνητικό κλάσμα κυμαίνεται στον σάκκο 1 μεταξύ 13 και 15% κ.β., στο σάκκο 2 μεταξύ 15 και 19% κ.β. και στο σάκκο 3 μεταξύ 9 και 14% κ.β. με τη μέση διακύμανση του ολιβίνης στο μη μαγνητικό κλάσμα να κυμαίνεται μεταξύ 13 και 16% κ.β. Τέλος, ο πυρόξενος στο μη μαγνητικό κλάσμα κυμαίνεται για όλα τα δείγματα μεταξύ 2 και 3% κ.β.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η αξιολόγηση του μαγνητικού κλάσματος και ιδιαίτερα η συμπεριφορά του χρωμίτη. Συγκεκριμένα, ο χρωμίτης στο μαγνητικό κλάσμα κυμαίνεται στον σάκκο 1 μεταξύ 25 (κλάσμα "-0,125") και 85% κ.β. (κλάσμα "-0,3 έως +0,125"), στο σάκκο 2 μεταξύ 44 (κλάσμα "-0,125") και 89% κ.β. (κλάσμα "-0,3 έως +0,125") και στο σάκκο 3 μεταξύ 73 "-0,125") και 85% κ.β. (κλάσμα "-0,3 έως +0,125"). Η μέση διακύμανση του χρωμίτη στο μαγνητικό κλάσμα κυμαίνεται μεταξύ 47 (κλάσμα "-0,125") και 86% κ.β. (κλάσμα "-0,3 έως +0,125"), διαπιστώνεται δηλαδή ότι ο χρωμίτης παρουσιάζει εξαιρετική απελευθέρωση στο κλάσμα -0,3 έως +0,125 mm. Πρέπει να σημειωθεί ότι με 81% κ.β. μέση τιμή ο χρωμίτης εμφανίζει πολύ καλή απελευθέρωση και στο κλάσμα -0,5 έως +0,3 mm. Από τα σύνδρομα ορυκτά στο μαγνητικό κλάσμα αναγνωρίστηκαν σερπεντίνης και ο πυροαουρίτης και σε ορισμένα μόνο δείγματα σε μικρότερες συγκεντρώσεις ολιβίνης και ο πυρόξενος. Συγκεκριμένα, στο μαγνητικό κλάσμα ο σερπεντίνης κυμαίνεται στον σάκκο 1 μεταξύ 8 και 42% κ.β., στο σάκκο 2 μεταξύ 8 και 38% κ.β. και στο σάκκο 3 μεταξύ 7 και 15% κ.β., με τη μέση διακύμανση του σερπεντίνης στο μαγνητικό κλάσμα να κυμαίνεται μεταξύ 8 και 32% κ.β. Ο πυροαουρίτης στο μαγνητικό κλάσμα κυμαίνεται στον σάκκο 1 μεταξύ 8 και 22% κ.β., στο σάκκο 2 μεταξύ 2 και 9% κ.β. και στο σάκκο 3 μεταξύ 7 και 8% κ.β., με τη μέση διακύμανση του πυροαουρίτη στο μαγνητικό κλάσμα να είναι κυμαίνεται μεταξύ 6 και 13% κ.β. Ο ολιβίνης στο μαγνητικό κλάσμα κυμαίνεται μεταξύ 4 και 10% κ.β. και ο πυρόξενος μεταξύ 1 και 2% κ.β., με τη μέση τιμή του ολιβίνης να φτάνει το 7% κ.β. και του πυρόξενου το 1% κ.β.

### Χημική σύσταση

Στα παραπάνω δείγματα, έγινε ενοποίηση κάποιων επιμέρους μαγνητικών κλασμάτων (εκεί όπου είχαμε εμφανείς μακροσκοπικές διαφορές) στις εντάσεις 0,75, 0,5 και 0,4 A και προκύψανε για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα (" $-0,5$  έως  $+0,3$ " mm και " $-0,3$  έως  $+0,125$ " mm), τέσσερα μαγνητικά κλάσματα: MM 0,75 A, M 0,75 – MM 0,5 A, M 0,5 – MM 0,4 A και M 0,4 A, όπου M: μαγνητικό, MM: μη μαγνητικό.

Στα οκτώ αυτά δείγματα, μετά από υποβολή σε απώλεια πύρωσης ( $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 2h), πραγματοποιήθηκε χημική ανάλυση κάνοντας χρήση της μεθόδου φασματοσκοπίας ακτίνων-X φθορισμού (XRF) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά, στον Πίν. 32.

Αντίστοιχα κατασκευάζονται οι πίνακες με την ανάκτηση του  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , το λόγο Cr/Fe, και την αθροιστική μαγνητιζόμενη ποσότητα σε κάθε ένταση (Πίν. 33,34).

Συνεκτιμώντας όλα τα παραπάνω αποτελέσματα του μαγνητικού διαχωρισμού μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής:

- Στην ένταση των 0,5A και με πλευρική γωνία  $14^{\circ}$  επικρατούν συνθήκες ικανοποιητικού μαγνητικού διαχωρισμού. Ο Βουτετάκης (1960) προτείνει πλευρική γωνία  $11^{\circ}$  και ένταση 0,4 A για τα στεία υλικά του μεταλλείου Ξερολείβαδου, ενώ οι Rosenblum & Brownfield (1999) προτείνουν για χρωμίτη πλευρική γωνία  $15^{\circ}$  και ενδεικτικό εύρος έντασης 0,05 - 0,50 A, με βέλτιστο μεταξύ 0,30 – 0,40 A.
- Το γεγονός ότι εμφανίζεται ελάχιστος πυρόξενος στο μαγνητικό υλικό του Πίν. 31, υποδηλώνει την απουσία σιδήρου στο ορυκτό, δηλαδή πρόκειται για σύστασης κυρίως ενστατίτη ( $\text{MgSiO}_3$ ), ως ακραίο μέλος της ομάδας των πυρόξενων. Σύμφωνα με τους Rosenblum & Brownfield (1999), ο ενστατίτης μαγνητίζεται σε ένταση 1,0 A και πάνω, ενώ για παράδειγμα ο εδενβεργίτης ( $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ ) μαγνητίζεται σε εντάσεις από 0,15 έως 0,4 A. Επίσης, τα πλούσια σε σίδηρο ακραία μέλη ορισμένων ομάδων ορυκτών, όπως του ολιβίνη, των πυροξένων κλπ, είναι πιο μαγνητικά από τα ορυκτά της ίδιας ομάδας με λιγότερο σίδηρο.
- Το μη μαγνητικό υλικό (Πίν. 31), αποτελείται κυρίως από σερπεντινίτη και πυροαουρίτη. Σύμφωνα με τους Rosenblum & Brownfield (1999), ο αντιγορίτης μαγνητίζεται σε εντάσεις από 0,9 έως 1,7 A, κάτι που δηλώνει ότι ο σερπεντινίτης στο κλάσμα αυτό είναι πιθανόν σύστασης αντιγορίτη.
- Η αυξημένη παρουσία σερπεντίνη στο κλάσματα « $-0,125$ » mm, δείχνει τον αυξημένο βαθμό θραύσης του σε σχέση με τα υπόλοιπα ορυκτά.

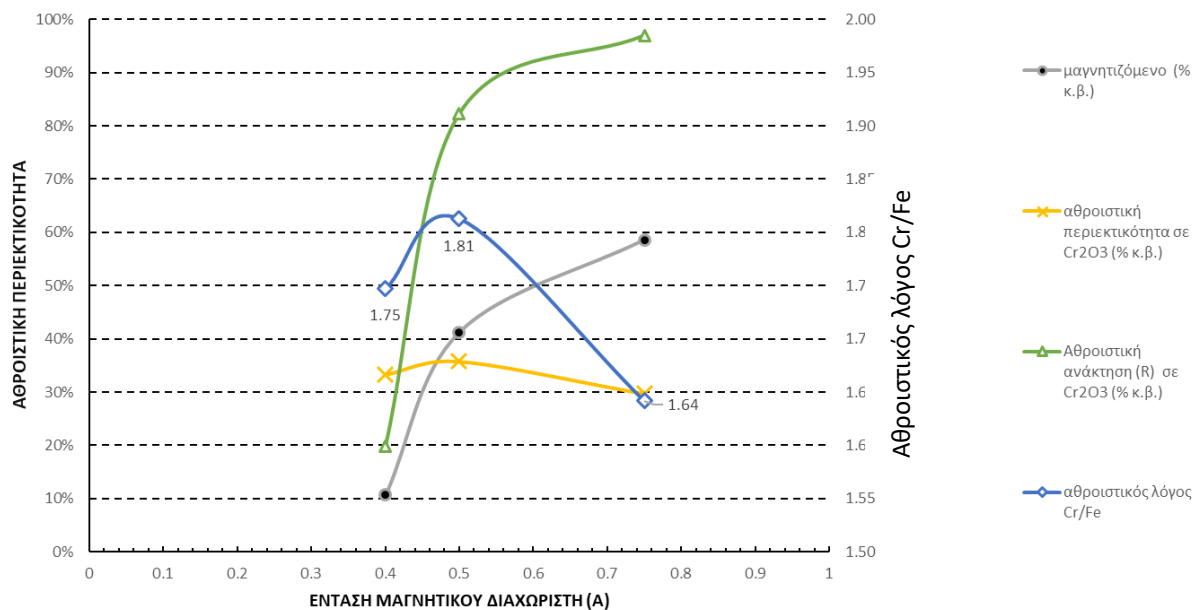
Πίνακας 32. Χημική ανάλυση (% κ.β.) των μαγνητικών κλασμάτων.

Μαγνητικό κλάσμα	% του βάρους	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ανάκτηση Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	Ανάκτηση Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	Λόγος Cr/Fe	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	LOI	
"-0.5 +0.3" mm	MM 0,75A	41,41	1,31	3,02	5,63	19,15	0,23	41,36	0,02	0,39	0,08	41,60	0,40	0,06	<0,01	14,95
	M 0,75A - MM 0,5A	17,31	15,16	14,64	10,21	14,51	1,44	27,27	0,06	3,46	0,17	33,65	0,14	0,05	<0,01	12,15
	M 0,5A - MM 0,4A	30,59	36,62	62,48	19,90	49,97	1,79	6,32	0,16	11,65	0,35	20,81	0,12	0,04	<0,01	2,69
	M 0,4A	10,70	33,29	19,86	18,64	16,37	1,73	9,63	0,15	10,61	0,33	22,16	0,10	0,01	<0,01	3,51
	<b>Σύνολο</b>	<b>100,00</b>	<b>17,93</b>	<b>100,00</b>	<b>12,18</b>	<b>100,00</b>										
"-0.3 +0.125" mm	MM 0,75A	42,16	1,46	2,97	5,11	5,11	0,28	37,67	0,02	0,38	0,07	41,98	0,37	0,06	<0,01	15,07
	M 0,75A - MM 0,5A	21,63	28,89	30,24	16,37	26,70	1,71	13,50	0,13	8,87	0,29	25,10	0,14	0,04	<0,01	5,31
	M 0,5A - MM 0,4A	30,79	38,85	57,90	21,16	49,15	1,78	9,45	0,17	12,57	0,37	19,01	0,07	0,02	<0,01	1,80
	M 0,4A	5,42	33,86	8,88	19,34	7,91	1,70	4,72	0,15	10,60	0,34	21,51	0,09	0,02	<0,01	3,23
	<b>Σύνολο</b>	<b>100,00</b>	<b>20,66</b>	<b>100,00</b>	<b>13,26</b>	<b>100,00</b>										

M: μαγνητικό κλάσμα, MM: μη μαγνητικό κλάσμα.

**Πίνακας 33.** Αθροιστικές τιμές περιεκτικότητας σε Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr/Fe, και ανάκτησης μαγνητικής ανάλυσης κλάσματος «-0,5 έως +0,3» mm.

ΕΝΤΑΣΗ (A)	% μαγνητιζόμενο	αθροιστική περιεκτικότητα σε Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	αθροιστική περιεκτικότητα σε Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	αθροιστικός λόγος Cr/Fe	Αθροιστική ανάκτηση (R) σε Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
0,75	58,59%	29,67%	17,68%	1,64	96,98%
0,5	41,29%	35,76%	19,30%	1,81	82,34%
0,4	10,70%	33,29%	18,64%	1,75	19,86%

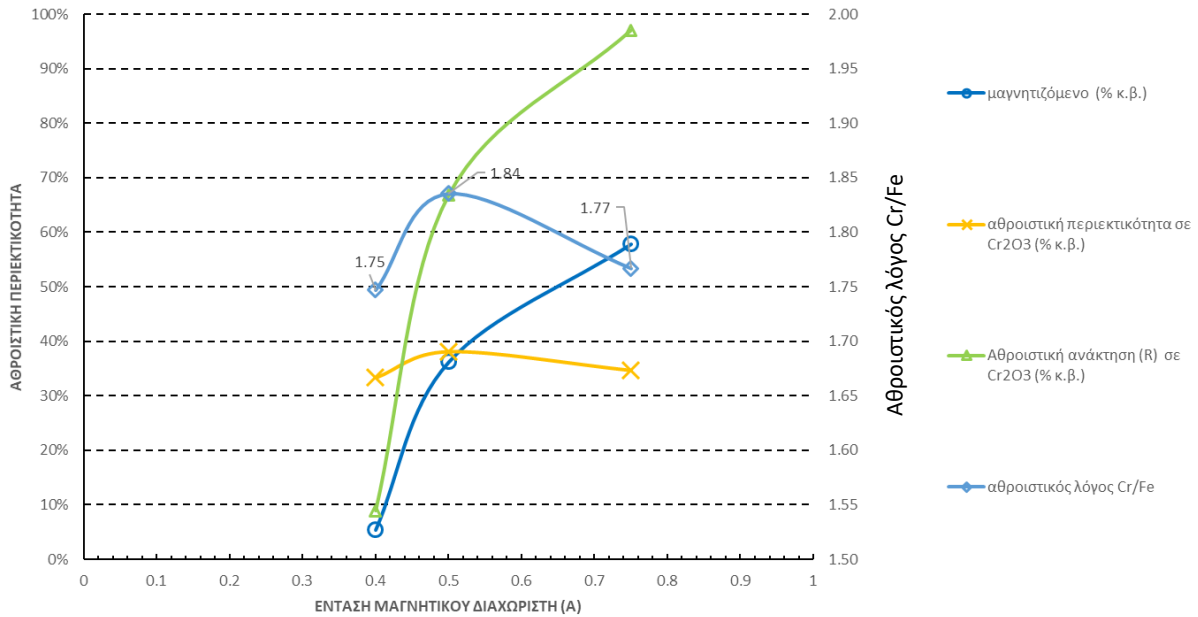


**Εικόνα 76.** Διάγραμμα αθροιστικών περιεκτικότητας μαγνητικής ανάλυσης του κλάσματος «-0,5 έως +0,3» mm.

**Πίνακας 34.** Αθροιστικές τιμές περιεκτικότητας σε Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr/Fe, και ανάκτησης μαγνητικής ανάλυσης κλάσματος «-0,3 έως +0,125» mm.

ΕΝΤΑΣΗ (A)	% μαγνητιζόμενο	αθροιστική περιεκτικότητα σε Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	αθροιστική περιεκτικότητα σε Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	αθροιστικός λόγος Cr/Fe	Αθροιστική ανάκτηση (R) σε Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
0,75	57,84%	34,66%	19,19%	1,77	97,03%
0,5	36,21%	38,11%	20,31%	1,84	66,78%
0,4	5,42%	33,29%	18,64%	1,75	8,88%





**Εικόνα 77.** Διάγραμμα αθροιστικών περιεκτικότητας μαγνητικής ανάλυσης του κλάσματος «-0,3 έως +0,125» mm.

- Ο μαγνητίτης ως ακραίο μέλος της ομάδας του σπινέλιου, σύμφωνα με τους Rosenblum & Brownfield (1999), μαγνητίζεται σε εντάσεις ακόμη και κάτω του 0,1Α. Τα στοιχεία των χημικών αναλύσεων του Πίν. 32, αλλά και οι εικόνες του μεταλλογραφικού και πετρογραφικού μικροσκοπίου (Εικ. 42-61), μας επιτρέπουν να συμπεράνουμε ότι στα υπό εξέταση δείγματα δεν υπάρχει μαγνητίτης.
- Η εφαρμογή μαγνητικού διαχωρισμού φαίνεται πως δεν μπορεί να παράξει απευθείας συμπύκνωμα χρωμίτη ικανοποιητικής ποιότητας. Παρόλα αυτά, λαμβάνοντας υπόψη και τις χημικές αναλύσεις του Πίν. 32, τα στοιχεία των Πιν. 33 & 34 και τις Εικ. 76 & 77, φαίνεται ότι είναι δυνατό να παραχθεί ένα προεμπλούτισμα με περιεκτικότητα σε Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> από 29 έως και 34%, με λόγο Cr/Fe από 1,64 έως 1,77.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το εξεταζόμενο μέταλλευμα χρωμίτη προέρχεται από τη θέση Αετορράχες στα όρια των ΠΕ Κοζάνης – Γρεβενών και είναι κατά θέσεις ταινιωτό (schlieren), διάσπαρτο ή συμπαγές. Τα δείγματα χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη σερπεντίνη (30-41% κ.β. ως προς τη μέση τιμή), με διάσπαρτο χρωμίτη (16-47% κ.β. ως προς τη μέση τιμή), υπολειμματικό ολιβίνη (4-14% κ.β. ως προς τη μέση τιμή) και πυρόξενο (1-14% κ.β. ως προς τη μέση τιμή) με τα τρία τελευταία ορυκτά να αποτελούν συστατικά του αρχικού δουνίτη. Από την εξέταση στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο διαπιστώνεται ότι ο εξεταζόμενος χρωμιτίτης είναι μεσόκοκκος ως προς το χρωμίτη και παρουσιάζει έντονη κατακλαστική υφή. Το μέγεθος των κόκκων του χρωμίτη κυμαίνεται μεταξύ 0,7 και 1,3 mm, ενώ κατά θέσεις παρατηρήθηκαν και κρύσταλλοι μέχρι 1,6 mm. Αξιοσημείωτη είναι άλλωστε και η παρουσία του πυροαουρίτη  $[Mg_6Fe_3^{+2}(CO_3)(OH)_{16} \times 4H_2O]$ , η περιεκτικότητα του οποίου ανέρχεται σε ορισμένα κοκκομετρικά κλάσματα έως και 24% κ.β., με τη μέση τιμή του να κυμαίνεται 11-21% κ.β.

Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για τη διερεύνηση της εμπλουτισμότητας βασίστηκε στις διαφορές ειδικού βάρους και στις διαφορές της μαγνητικής επιδεκτικότητας των επιμέρους ορυκτών που αποτελούν το χρωμίτη και συνιστούν τις συνηθέστερες μεθόδους εμπλουτισμού αντίστοιχων κοιτασμάτων.

Από τη θραύση και ταξινόμηση που προηγήθηκε, προκύπτει ότι παράγεται αυξημένο ποσοστό λεπτομερών τεμαχίων (περίπου 20% κ.β. του αρχικού υλικού τροφοδοσίας) και οφείλεται, κατά μεγάλο μέρος στην έντονη κατακλαστική υφή και στον αυξημένο βαθμό σερπεντινίωσης που παρουσιάζει το μέταλλευμα. Το φαινόμενο αυτό θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί, τόσο στην πρωτογενή, όσο και στη δευτερογενή θραύση, με τη χρήση θραυστήρων που εφαρμόζουν δυνάμεις συμπίεσης (κωνικός, κυλινδρικός) και όχι κρούσης ή διάτμησης.

Από τις χημικές και ορυκτολογικές αναλύσεις των κοκκομετρικών κλασμάτων που παράχθηκαν, σε συνδυασμό και με τις παρατηρήσεις στο στερεοσκόπιο γίνεται αντιληπτό ότι κατάλληλη κοκκομετρία τροφοδοσίας για εμπλουτισμό είναι το εύρος από 0,3 έως 0,5 mm, χωρίς ωστόσο να αποκλείονται και τα κλάσματα 0,5 έως 1,0 mm και 0,125 έως 0,3 mm.

Η εφαρμογή μεθόδου βαρυτομετρικού διαχωρισμού με παλλομένη τράπεζα χαρακτηρίζεται από την παραγωγή καλής ποιότητας συμπυκνώματος χρωμίτη με συγκέντρωση  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  στα κλάσματα "-0,5 έως +0,3" mm και "-0,3 έως +0,125" mm να ξεπερνά το 54% κ.β. και το λόγο  $\text{Cr}/\text{Fe} > 3,3$  και είναι κατάλληλο για τις περισσότερες χρήσεις. Το κλάσμα "-1,5 έως +1,0" mm δεν παρουσιάζει ικανοποιητικό συμπύκνωμα και σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να ανακυκλωθεί προς περαιτέρω θραύση. Είναι δυνατή η απομάκρυνση του απορρίμματος το βάρος του οποίου ανέρχεται στο 14,88% της τροφοδοσίας, ελαφρύνοντας έτσι τον εξοπλισμό της μετέπειτα διαδικασίας. Στο κλάσμα "-1,0 έως +0,5" mm το συμπύκνωμα έχει οριακή περιεκτικότητα σε  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (47,28% κ.β.) και ο λόγος  $\text{Cr}/\text{Fe}$  (3,40) είναι ικανοποιητικός. Στην περίπτωση αυτή θα μπορούσε να γίνει αναδιάταξη στα διαμερίσματα προϊόντων της τράπεζας βελτιώνοντας την ποιότητα του συμπυκνώματος, ενώ ενδιάμεσο και απόρριμμα να οδηγηθούν σε περαιτέρω θραύση. Στο κλάσμα "-0,5 έως +0,3" mm το συμπύκνωμα είναι ικανοποιητικό και θα μπορούσε να γίνει αναδιάταξη των διαμερισμάτων των προϊόντων έτσι ώστε να υποβαθμιστεί ελαφρώς αυξάνοντας έτσι την παραγόμενη ποσότητα. Το αυξημένο απόρριμμα (55,16% κ.β. της τροφοδοσίας με 11,51% κ.β. σε  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) θα πρέπει να οδηγηθεί για περαιτέρω θραύση, κυρίως λόγω της αυξημένης περιεκτικότητας σε  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Στο κλάσμα "-0,3 έως +0,125" mm η καλή ανάκτηση στο συμπύκνωμα (>80%) και η περιεκτικότητα σε  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (54,08% κ.β.) μας επιτρέπουν και εδώ, μέσω αναδιάταξης των διαμερισμάτων, να αυξήσουμε την ποσότητα του συμπυκνώματος και την ανάκτηση, αφού υπάρχει περιθώριο μείωσης της περιεκτικότητας σε  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  και του λόγου  $\text{Cr}/\text{Fe}$ .

Όσον αφορά στην εφαρμογή μαγνητικού διαχωρισμού, φαίνεται ότι αυτή δεν παράγει ικανοποιητικής ποιότητας συμπύκνωμα. Η παρουσία του πυροαουρίτη και ειδικότερα η ύπαρξη σιδήρου σε αυτόν, εκτιμάται ότι επηρεάζει δυσμενώς την αποδοτικότητα του μαγνητικού διαχωρισμού. Σημαντικός όμως παράγοντας που διευκολύνει την εφαρμογή του μαγνητικού διαχωρισμού είναι το γεγονός ότι δεν εμφανίζεται στα υπό εξέταση δείγματα μαγνητίτης ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Σε περίπτωση που είχαμε εμφάνιση μαγνητίτη, τότε αυτός εξαιτίας της υψηλής μαγνητικής επιδεκτικότητας που έχει θα απομακρύνονταν ακόμη και στις χαμηλές εντάσεις και αναπόφευκτα θα θεωρούνταν στείρο ή ενδιάμεσο υλικό, με ότι αυτό συνεπάγεται για την απόδοση του διαχωρισμού. Για το λόγο αυτό θα πρέπει απαραίτητα να διευκρινιστεί η ύπαρξη μαγνητίτη στο κοίτασμα των Αετορραχών με τη συστηματική μελέτη περισσότερων δειγμάτων.

Λαμβάνοντας υπόψη τις χημικές αναλύσεις και τα υπόλοιπα δεδομένα των μαγνητικών κλασμάτων φαίνεται ότι είναι δυνατό να παραχθεί προσυμπύκνωμα χρωμίτη με περιεκτικότητα σε  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  από 29 έως και 34% κ.β., με λόγο  $\text{Cr}/\text{Fe}$  από 1,64 έως 1,77, ενώ είναι ιδιαίτερα

ενθαρρυντικό το γεγονός ότι απομακρύνεται το 40% περίπου της αρχικής τροφοδοσίας με ανάκτηση σε  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  της τάξης του 98%.

Σημαντικός παράγοντας για την ερμηνεία και την αντιμετώπιση των θεμάτων του εμπλουτισμού φαίνεται να είναι και η τιμή της απώλειας πύρωσης, η οποία διαπιστώθηκε ότι έχει πολύ καλή συσχέτιση, θετική ή αρνητική, με τη χημική σύσταση των προϊόντων του διαχωρισμού. Η τιμή της μας δίνει μια καλή εικόνα της χημικής σύστασης των προϊόντων, αλλά αυτό φαίνεται να έχει εφαρμογή μόνο σε περιπτώσεις προχωρημένης σερπεντινίωσης.

Απ' όλα τα παραπάνω προκύπτει ξεκάθαρα ότι αν και σε γενικές γραμμές είναι γνωστές οι μέθοδοι εμπλουτισμού χρωμίτη, παραμένει πάντα δυσεπίλυτο πρόβλημα το μεγάλο ποσοστό λεπτομερών τεμαχίων και η διαφυγή χρωμίτη σε αυτά. Οι γενικότερες συνθήκες κοιτασματογένεσης, τεκτονισμού, εξαλλοίωσης κ.ά., δημιουργούν ένα σύνθετο και πολύπλοκο πλαίσιο που καθιστούν πολλές φορές την εκμετάλλευση ασύμφορη και αντιοικονομική, στρέφοντας τους ερευνητές σε συνδυασμένες μεθόδους εμπλουτισμού. Θα πρέπει λοιπόν, σε κάθε περίπτωση, να διερευνηθεί περαιτέρω η δυνατότητα αυτή και στους χρωμιτίτες του Βούρινου.

#### Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω τείνει να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι ενδείκνυται να δοκιμαστεί συνδυασμένη μέθοδος μαγνητικού προεμπλουτισμού του χρωμιτίτη και εν συνεχεία το προσυμπύκνωμα να οδηγηθεί σε μεθόδους βαρυστατικού διαχωρισμού. Επίσης, θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω και το ενδεχόμενο εξέτασης της εμπλουτισσιμότητας συνδυάζοντας τις παραπάνω μεθόδους με αυτή της επίπλευσης. Οι όποιες μελλοντικές δοκιμές κρίνεται σκόπιμο να γίνουν σε προεμπλουρισμένο δείγμα χρωμίτη, αφού η απομάκρυνση μεγάλης ποσότητας στείρου θα διευκολύνει και θα απλοποιήσει τις περαιτέρω ερευνητικές εργασίες. Τα παραπάνω πρέπει να αποτελέσουν τη βάση για το σχεδιασμό πιλοτικής μονάδας (ημιβιομηχανική κλίμακα).

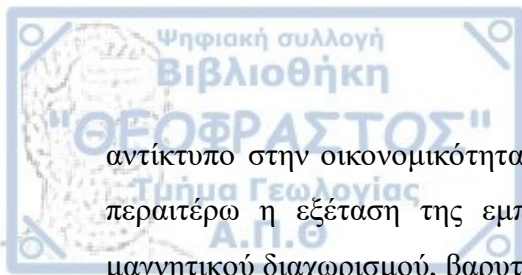
Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί και στην εξόρυξη του χρωμιτίτη και να ληφθεί ιδιαίτερη μέριμνα, ώστε να αποτελέσει ξεχωριστό αντικείμενο μελέτης, η χρήση κατάλληλων μηχανών θραύσης για να αποφεύγεται η υπερλειοτρίβηση του υλικού. Ειδικά στην τελευταία περίπτωση, η εκτίμηση του δείκτη έργου Bond (Wi), κρίνεται απαραίτητη.



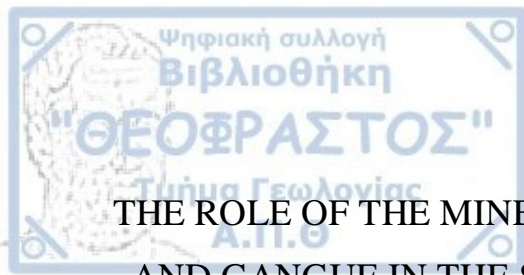


## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Από την θέση «Αετοράχες» του Ν. Βούρινου, συλλέχθηκαν 4 δείγματα μεταλλεύματος χρωμιτίτη, συνολικού βάρους 60 kg περίπου, στα οποία πραγματοποιήθηκε η διερεύνηση δυνατότητας εμπλουτισμού προς παραγωγή συμπυκνώματος χρωμίτη κατάλληλο για όλες τις βιομηχανικές εφαρμογές. Τα δείγματα εξετάστηκαν σε μεταλλογραφικό και πετρογραφικό μικροσκόπιο και ακολούθησε η θραύση και ταξινόμηση των εξεταζόμενων υλικών σε εργαστηριακά κόσκινα βρογχίδας "1,5", "1,0", "0,5", "0,3" & "0,125" mm. Σε κάθε κοκκομετρικό κλάσμα έγινε περαιτέρω εξέταση της ορυκτολογικής σύστασης με την μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτίνων-Χ (XRD) και της χημικής σύστασης με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας ακτίνων-Χ φθορισμού (XRF). Επιπλέον, αντιπροσωπευτικό δείγμα από κάθε κοκκομετρικό κλάσμα, μετά από πλύση και ξήρανση εξετάστηκε σε στερεοσκόπιο προκειμένου να εκτιμηθεί ο βαθμός αποδέσμευσης του μεταλλεύματος. Σε επιλεγμένα κοκκομετρικά κλάσματα, διενεργήθηκε ξηρός μαγνητικός διαχωρισμός σε εντάσεις 0,3 έως 1,5 A, ενώ επελέγησαν αντιπροσωπευτικά δείγματα προκειμένου να γίνουν δοκιμές σε εργαστηριακή παλλόμενη τράπεζα. Στα προϊόντα διαχωρισμού των παραπάνω μεθόδων πραγματοποιήθηκαν ορυκτολογικές αναλύσεις με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτίνων-Χ (XRD) και χημικές αναλύσεις με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας ακτίνων-Χ φθορισμού (XRF). Ικανοποιητική αποδέσμευση του μεταλλεύματος έχουμε στα κοκκομετρικά κλάσματα "-0,5 έως +0,3" και "-0,3 έως +0,125" mm, ενώ παρατηρήθηκε αυξημένο ποσοστό (περίπου 20% κ.β.) λεπτομερούς προϊόντος (-0,125 mm) κατά τη θραύση, μέσης περιεκτικότητας 20% κ.β. σε Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Από τα αποτελέσματα του ξηρού μαγνητικού διαχωρισμού, φάνηκε πως σημαντική ποσότητα υλικού σε ένταση 0,75 A (περίπου 40% κ.β.), μπορεί να απομακρυνθεί έχοντας περιεκτικότητα σε Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> περίπου 1,5% κ.β., δημιουργώντας έτσι ένα προσυμπύκνωμα χρωμίτη έως και 38% κ.β. σε Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Οι δοκιμές σε δονούμενη τράπεζα έδειξαν τη δυνατότητα παραγωγής συμπυκνώματος με περιεκτικότητα πάνω από 54% κ.β. σε Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> με ικανοποιητική ανάκτηση στα επιμέρους κλάσματα (έως και 80% κ.β.). Η απώλεια πύρωσης των προϊόντων της τράπεζας, παρουσιάζει σαφέστατη αυξητική τάση (από 0,9 σε 13,61% κ.β.) από το συμπύκνωμα προς το απόρριμμα, ενώ στην αρχική τροφοδοσία και σε όλα τα κοκκομετρικά κλάσματα, η απώλεια πύρωσης παραμένει σχεδόν σταθερή (από 9,8 έως 12% κ.β.), γεγονός που υποδηλώνει την επιτυχία του διαχωρισμού. Παρόλη την θετική ανταπόκριση των δειγμάτων στις δοκιμές εμπλουτισμού, παραμένει το ζήτημα του εμπλουτισμού των λεπτομερών υλικών, τα οποία ως ποσότητα (περίπου 20% κ.β.) και περιεκτικότητα (περίπου 20% κ.β. σε Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), μειώνουν τη συνολική ανάκτηση του περιεχομένου Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, με άμεσο



αντίκτυπο στην οικονομικότητα της εκμετάλλευσης. Γι' αυτό και θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω η εξέταση της εμπλουτισμότητας του χρωμίτη με συνδυασμένες μεθόδους μαγνητικού διαχωρισμού, βαρυτομετρικού διαχωρισμού ή και επίπλευσης.



THE ROLE OF THE MINERALOGICAL COMPOSITION OF CHROMITITE  
AND GANGUE IN THE SELECTION OF THE APPROPRIATE RELEASE  
METHODOLOGY, THE FEEDING GRANULOMETRY AND THE  
METHODS OF MINERAL ENRICHMENT FROM THE AREA OF  
AETORRACHES OF MOUNT VOURINOS

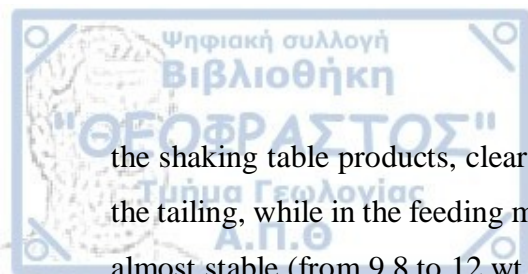
*by*

Vasilios P. Patkos, Mining Engineer

**ABSTRACT**

From the "Aetoraches mine" of S. Vourinos mt, Prefecture of Western Macedonia Greece, were collected 4 samples of chromite ore, with a total weight of 60 kg approximately, in which the possibility for the production of chromite concentrate, suitable for all industrial applications was investigated. Thin sections of the samples were examined under a metallographic and petrographic microscope. The samples crushed and classified in laboratory sieves No "1.5", "1.0", "0.5", "0.3" & "0.125" mm. In each granulometric fraction, was performed further examination of the mineral composition using the X-ray diffraction (XRD) method and the chemical composition using the X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) method. In addition, a representative sample from each granulometric fraction, was examined under stereoscope, in order to estimate the degree of liberation. In selected granulometric fractions, dry magnetic separation was performed in currencies of 0.3 to 1.5 A and representative sample of granulometric fractions were tested in a laboratory shaking table. In the products of the above methods mineralogical analyzes were performed by the method of X-ray diffraction (XRD) and chemical analyzes by the method of X-ray fluorescence spectroscopy (XRF). Satisfactory liberation of the ore is found in the granulometric fractions "-0.5 to +0.3" and "-0.3 to +0.125" mm, while an increased percentage (approximately 20 wt.%) of fine product "-0.125" mm was observed on crushing with an average content of 20 wt.% in Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. From the results of the dry magnetic separation, it appeared that a significant amount of material at a currency of 0.75 A (approximately 40% by weight), can be removed having a Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content of about 1.5 wt.%, thus creating a chromite pre-concentrate up to 38 wt.% in Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The vibrating table tests showed the ability of producing a concentrate with a content of more than 54 wt.% in Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, with satisfactory recovery in the individual fractions (up to 80 wt.%). The loss on ignition of



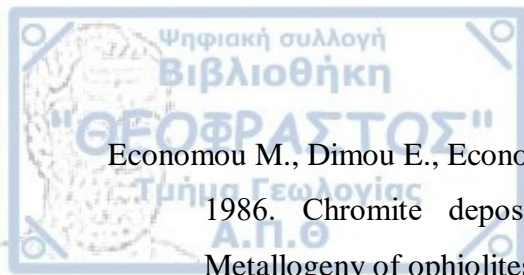


the shaking table products, clearly increases (from 0.9 to 13.61 wt.%) from the concentrate to the tailing, while in the feeding material in all the granular fractions the loss on ignition remains almost stable (from 9.8 to 12 wt.%), which indicates the success of the separation. Despite the positive response of the samples to the enrichment tests, the question of the enrichment of the fine materials remains, which as quantity (about 20 wt.%) and content (about 20 wt.% in  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), reduces the overall recovery of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  content, with a direct impact in the economy of the mining process. It is necessary the chromite enrichment test to be further investigated with combined methods of magnetic separation, gravimetric separation and flotation.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abdelhaffez S.G., 2012. Correlation Between Work Index and Mechanical Properties of some Saudi Ores. *Materials Testing* 54(2), 108-112.
- Anonymous, 1972. Penrose field conference on ophiolites. *Geotimes*, 17, 24-25.
- Arai S., 1997. Origin of podiform chromitites. *J. Asian Earth Sci.*, 15, 303-310.
- Barnes, S.-J., Boyd, R., Korneliussen, A., Nilsson, L.-P., Often, M., Pedersen, R.B. and Robins, B., 1988. The use of mantle normalization and metal ratios indiscriminating between the effects of partial melting, crystal fractionation and sulphide segregation on platinum-group elements, gold, nickel and copper: examples from Norway. In: H.M. Prichard, P.J. Potts, J.F.W.
- Bowles and S. Cribb (Editors), *Geo-platinum 87*. Elsevier, Barking, pp. 113-143.
- Barry A., Wills, J. and Finch A., 2016. *Wills' Mineral Processing Technology (Eighth Edition)*, Butterworth-Heinemann.
- Bond F.C., 1961. *Crushing & Grinding Calculations, Part I*. *British Chemical Engineering*, pp. 378-548.
- Coleman R.G., 1977. *Ophiolites, ancient oceanic lithosphere?* Springer, Heidelberg.
- Daltry V.D. and Wilson A.H., 1997. Review of platinum - group mineralogy: compositions and elemental associations of the PG- minerals and unidentified PGE-phases. *Mineral. Petrol.*, 60: 185-229.
- Deer W.A., Howie R.A., and Zussman J., 1962. *Rock-Forming Minerals, Vol. 5: Non-Silicates*, Longmans, London.
- Deer W.A., Howie R.A., and Zussman J., 1992. *An introduction to the rock forming minerals*, 2nd edition Longman, Essex, UK.
- Dick H.J.B. and Bullen Th., 1984. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 86, 54-76.
- Drzymala J., 2007. *Mineral Processing, Foundations of theory and practice, of minerallurgy*, 1st English edition. Wroclaw University of Technology, 508 p.



Economou M., Dimou E., Economou G., Vacandios I., Grivas E., Rassios A. and Dabitzias S., 1986. Chromite deposits of Greece. In: Chromites UNESCO'S-197 project, Metallogeny of ophiolites. Theophrastus Pub. S.A Athens, 129-159.

Economou-Eliopoulos, M., Frei, R. and Mitsis, I., 2020. Factors Controlling the Chromium Isotope Compositions in Podiform Chromitites. *Minerals*, 10, 10.

Ericsson T. and Filippidis A., 1986. Cation ordering in the limited solid solution  $Fe_2SiO_4$ - $Zn_2SiO_4$ . *American Mineralogist*, 71, 1502-1509.

Evans A.M., 1987. An introduction to ore geology. Blackwell Oxford, UK

Filippidis A. and Annersten H., 1980. Mineral-chemical investigation of an ultramafic nickel bearing body in the Swedish Caledonides. In UNESCO - An International Symposium on Metallogeny of Mafic and Ultramafic Complexes: the Eastern Mediterranean-Western Asia Area, and its Comparison with Similar Metallogenic Environments in the World, Proc. (S.S. Augustithis, ed.) 2, 115-130

Filippidis A. and Annersten H., 1981. Nickel partitioning between silicates and ore minerals in serpentinized ultramafic rocks from the Swedish Caledonides. Univ. Uppsala Dep. Mineral. Petrology(UUDMP) Res. Rep.24.

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-Si-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), 1-6.

Filippidis A., 1996. Chemical variation of olivine in the serpentinite of the central section in the Xerolivado chrome mine of Vourinos, Greece. *N. Jb. Miner. Abh.*, 170(2), 186-205.

Filippidis A., 1997a. Chemical variation of chromite in the Gorgona olivine-orthopyroxenite, Thrace, Greece. *N. Jb. Miner. Mh.*, 3, 113-130

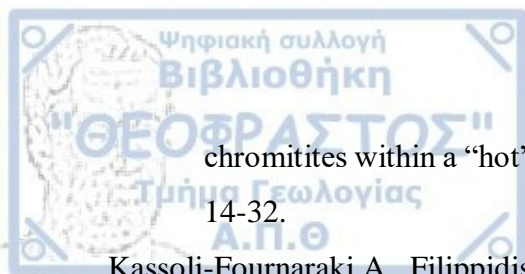
Filippidis A., 1997b. Chemical variation of chromite in the central sector of Xerolivado chrome mine of Vourinos, Western Macedonia, Greece. *N. Jb. Miner., Mh.*, 8, 354-370

Filippidis A., Kassoli-Fournaraki A. and Kantiranis N., 2000. Chromites in the southern sector of Xerolivado chrome mine of Vourinos, Macedonia, Greece. 1st Congress of the Economic Geology, Mineralogy and Geochemistry Committee of the Geological Society of Greece, Kozani, Greece, 12-13/02/2000, Proceedings, 485-497

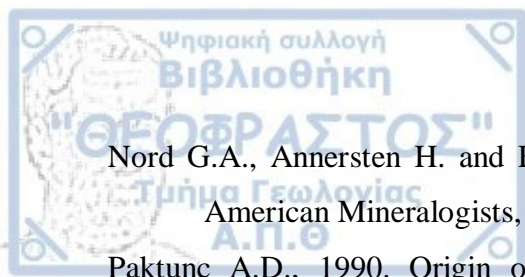
Garuti G. and Zaccarini F. 1997. In situ alteration of platinum-group minerals at low temperature

- evidence from serpentized and weathered chromitites of the Vourinos complex (Greece). *Canadian Mineralogist*, 35, 611-626.
- Gasik I.M., 2013. Technology of Chromium and Its Ferroalloys. In Gasik M. (ed) *Handbook of Ferroalloys*, 1st Edition, Theory and Technology. Butterworth-Heinemann, Oxford UK, 268-317.
- Grieco G. and Merlini A., 2011. Chromite alteration processes within Vourinos ophiolite. *International Journal of Earth Sciences*, 101(6), 1-11
- Grivas, E., Rassios, A., Konstantopoulou, G., Vacondios, I., and Vrahatis, G., 1993. Drilling for "blind" podiform chrome ore bodies at Voidolakkos in the Vourinos ophiolite complex, Greece. *Economic Geology* 88, 461-468.
- Hansen H.C.B. and Taylor R.M., 1990. Formation of synthetic analogues of double metal-hydroxy carbonate minerals under controlled pH conditions: I. The synthesis of pyroaurite and reevesite. *Clay Minerals*, 25, 161-179.
- Hess H.H., 1966. Notes on operation of Frantz isodynamic magnetic separator, Princeton University.
- Indian Minerals Yearbook 2015. Part-III: Mineral Reviews, chromite (advance release). Government of India Ministry of Mines. Indian Bureau of Mines, 54th Edition, March 2017, 21σ.
- Irvine T.N., 1965. Chromian spinel as a petrogenetic indicator, part I. Theory. *Canadian J. Earth Sci.*, 2, 648-671.
- Irvine T.N., 1967. Chromian spinel as a petrogenetic indicator, part II. Petrology applications. *Canadian J. Earth Sci.*, 2, 71-103.
- Irvine T.N., 1977. Origin of chromitite layers in the Muskox intrusion and other stratiform intrusions: A new interpretation. *Geology*, 5, 273-277.
- Kantiranis N., Sikalidis K., Godelitsas A., Squires C., Papastergios G. & Filippidis A., 2011. Extra framework cation release from heulandite-type rich tuffs on exchange with  $\text{NH}_4^+$ . *Journal of Environmental Management*, 92, 1569-1576.
- Kapsiotis A., Grammatikopoulos T.A., Zaccarini F., Tsikouras B., Garuti G. and Hatzipanagiotou K., 2006. Platinum-group mineral characterisation in concentrates from low-grade PGE chromitites from the Vourinos ophiolite complex, northern Greece. *Applied Earth Science*, 115(2), 49-57
- Kapsiotis A., Rassios A.E., Uysal I., Grieco G., Akmaz R.M., Saka S., Bussolesi M., 2018. Compositional fingerprints of chromian spinel from the refractory chrome ores of Metalleion, Othris (Greece): Implications for metallogeny and deformation of

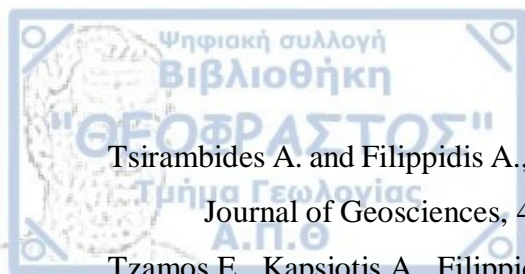




- chromitites within a “hot” oceanic fault zone. *Journal of Geochemical Exploration*, 185, 14-32.
- Kassoli-Fournaraki A., Filippidis A., Kolcheva K., Hatzipanayotou K., Koepke J., Dimadis E., 1995. Multi-stage alteration of the Gorgona ultramafic body, Central Rhodope Massif, Greece. *Chemie der Erde*, 55, 531-534.
- Konstantopoulou G. and Economou-Eliopoulos M., 1990. Geochemistry of the Vourinos chromite ores, Greece. In Malpas J., Moores E.M., Panayiotou A. and Xenophontas C., eds, *Ophiolites: Oceanic Crystal Analogues*. Int. Symposium “Troodos 1987”, Cyprus, Nicosia, Geological Survey Department, Proc. 605-613.
- Konstantopoulou G. and Economou-Eliopoulos M., 1991. Distribution of platinum-group elements and gold within the Vourinos chromitite ores, Greece. *Economic Geology*, 86(8), 1672-1682. Survey Department, Proc. 605-613.
- Lago B.L., Rabinowicz M., Nicolas A., 1982. Podiform chromite orebodies: A genetic model. *Journal of Petrology*, 23, 102-125.
- Leblanc M. and Nicolas A., 1992. Les chromitites ophiolitiques. *Chronique de la Recherche Minière*, 507, 3-25.
- Locmelis M., Fiorentini L.M., Barnes J.S., Hanski J.E., Kobussen F.A., 2018. Ruthenium in chromite as indicator for magmatic sulfide liquid equilibration in mafic-ultramafic systems. 2018 Elsevier.
- Long V.P.J., 1977. Electron probe microanalysis. In: Zussman J. (Ed) *Physical Methods in determinative mineralogy*. Academic Press, New York, pp. 273-341.
- Lutterotti L., Bortolotti M., Ischia G., Lonardelli I., Wenk H.-R., 2007. Rietveld texture analysis from diffraction images. *Z. Kristallogr. Suppl.*, 26, 125-130.
- Lyakishev N.P. and Gasik M.I., 1998. *Metallurgy of chromium*. Alletron Press, NY, 626 p.
- METSO minerals, *Basics in mineral processing handbook* (2015).
- METSO minerals, *Basics in mineral processing handbook* (2018).
- METSO minerals, *Crushing and Screening Handbook* (2007).
- Moores E.M., 1982. Origin and emplacement of ophiolites. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 20(4), 735-760.
- Naylor, M.A. and Harle, T.J., 1976. Palaeogeographic significance of rocks and structures beneath the Vourinos ophiolite, northern Greece. *Journal of the Geological Society*, London, 132, 667-675
- Nord G.A., Annersten H. and Filippidis A., 1982a. The cation distribution in synthetic Mg-Fe-Ni olivines. *American Mineralogists*, 67, 1206-1211.



- Nord G.A., Annersten H. and Filippidis A., 1982b. The cation ordering in Ni-Fe olivines. *American Mineralogists*, 67, 1212-1217.
- Paktunc A.D., 1990. Origin of podiform chromite deposits by lultistage melting, melt segregation and magma mixing in the upper mantle. *Ore Geol. Rev.*, 5, 211-222.
- Ramdohr P., 1980. *The ore minerals and their intergrowths*. Pergamon Press, 2nd edition, London, UK.
- Rassios A., 1981. *Geology and evolution of the Vourinos complex, northern Greece*. PhD Thesis, University of California (Davis), 499p.
- Reddy N.V., Kumar K.P., Kumar G.S., 2006. *Crushing laws*. <https://slideplayer.com/slide/4459728/>.
- Roberts S., 1988. Ophiolitic chromitite formation: A marginal basin phenomenon? *Economic Geology*, 83, 1034-1036.
- Roberts S., Rassios A., Wright L., Vacondios I., Vrachatis G., Grivas E., and Nesbitt R., 1988. Structural controls on the location and form of the Vourinos chromite deposits. In: Boissonnas J. and Omenetto P.: *Mineral Deposits within the European Community*. *Soc. Geol. Appl. Miner. Deposits, Spec. Publ.*, 6, 249-266.
- Ross R., Mercier J., Ave Lallemant H., Carter N. and Zimmerman J., 1980. The Vourinos ophiolite complex, Greece: the tectonite suite. *Tectonoph.*, 70, 63-83.
- Sam Rosenblum and Isabelle K. Brownfield. *Magnetic Susceptibilities of Minerals*, U.S. Geological Survey Open-File Report 99-0529, (1999, 38 σελ.)
- Sato T., Akita N., Hamadate A. and Fukushi K., 2001. Formation and stability of magnesium hydrocarbonate minerals during serpentinization and weathering of serpentinites. *Eleventh Annual V. M. Goldschmidt Conference*, paper 3763.pdf.
- Stamatakis G.M. and Mitsis I., 2013. The occurrences of Mg-hydroxycarbonates in serpentinites of the western section of the South Aegean volcanic arc (West Attica peninsula-Northeastern Argolis peninsula), Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 47, 427-437.
- Stevens R.E., 1944. Composition of some chromites of the Western hemisphere. *Amer. Mineral.*, 29, 1-34.
- Taylor R.M., Hansen H.C.B., Stanger G. and Bender Koch C., 1991. On the genesis and composition of natural pyroaurite. *Clay Minerals*, 26, 297-309.
- Tripathy S.K., Singh V. and Ramamurthy Y., 2012. Improvement in Cr:Fe Ratio of Indian Chromite Ore for Ferro Chrome Production. *International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing*, 1(3), 101-106.



Tsirambides A. and Filippidis A., 2012. Metallic mineral resources of Greece. Central European Journal of Geosciences, 4(4), 641-650.

Tzamos E., Kapsiotis A., Filippidis A., Koroneos A., Grieco G., Ewing Rassios A., Kantiranis N., Papadopoulos A., Gamaletsos N.P. and Godelitsas A., 2017. Metallogeny of the Chrome Ores of the Xerolivado-Skoumtsa Mine, Vourinos Ophiolite, Greece: Implications on the genesis of IPGE-bearing high-Cr chromitites within a heterogeneously depleted mantle section. Ore Geology Reviews, 90, 226-242.

Tzamos E., Filippidis A., Rassios A., Grieco Γ., Michailidis K., Koroneos A., Stamoulis K., Pedrotti M. and Gamaletsos N.P., 2016. Major and minor element geochemistry of chromite from the Xerolivado–Skoumtsa mine, Southern Vourinos: Implications for chrome ore exploration. Journal of Geochemical Exploration, 165, Pages 81-93.

Wills B.A. and Napier-Munn T., 2006. Mineral Processing Technology. An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral, 7th Edition, Pergamon.

Wylle G.A., Candela A.P. and Burke M.T., 1987. Compositional zoning in unusual Zn-rich chromite from the Sykesville district of Maryland and its bearing on the origin of “ferritchromit”. American Mineralogist, 72, 413-422.

Zaccarini F., Ifandi E., Tsikouras B., Grammatikopolous T., Garuti G., Mauro D., Bindi L., Stanley C., 2019. Occurrence of new phosphides and sulfide of Ni, Co, V, and Mo from chromitite of the Othrys ophiolite complex (Central Greece)(Article). Periodico di Mineralogia, 88(3), 105-119.

Zachos K., 1969. The chromite mineralization of the Vourinos ophiolite complex, Northern Greece. Economic Geology, 4, 147-153.

### **Ελληνική Βιβλιογραφία**

Βουτετάκης Σ.Κ, 1960. Επί της δυνατότητας μαγνητικού εμπλουτισμού των χρωμιτών Νοτίου Βούρινου Κοζάνης. ΙΓΕΥ 1960, Γεωλογικά και γεωφυσικά Μελέται, Τομ. 6, Νο 9, σελ. 179-205.

Βραχάτης Γ., Γρίβας Η. και Σταμούλης, Κ., 1986. Γεωλογική χαρτογράφηση της περιοχής του Βούρινου (Κοζάνη) 1:10.000. Αδημοσίευτη έκθ., Ι.Γ.Μ.Ε.

Βραχάτης Γ. και Γρίβας Η., 1980. Επί της γεωλογικής-κοιτασματολογικής χαρτογραφίσεως 1:10.000 περιοχής Βουρίνου Φλάμπουρου Κοζάνης. Αδημοσίευτη έκθ., Ι.Γ.Μ.Ε., 80 σ.

ΙΓΜΕ, 1993. Φύλλο χάρτη Κνίδη, κλίμακα 1:50.000.

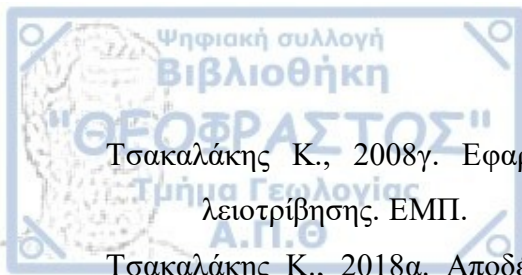
ΙΓΜΕ, 2003. Έργο: καινοτόμες τεχνολογίες-τεχνικές καταγραφής και αξιοποίησης απορριμμάτων μεταλλευτικής και μεταλλουργικής βιομηχανίας και εγκαταλειμμένων



δημόσιων μεταλλείων. Πιλοτικές εφαρμογές υποέργο 1: Καταγραφή απορριμμάτων μεταλλευτικής και μεταλλουργικής δραστηριότητας. Μελέτες και έρευνες επιπτώσεων, τεχνικών αδρανοποίησης και αξιοποίησης. Πιλοτικές εφαρμογές. Γ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης (2000-2006) Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Ανταγωνιστικότητα» (Ε.Π.Α.Ν.) Μεταλλευτικό κέντρο Βούρινου.

- Καντηράνης, Ν., Στεργίου, Α., Φιλιππίδης, Α., και Δρακούλης, Α., 2004. Υπολογισμός του ποσοστού του άμορφου υλικού με τη χρήση περιθλασιογραμμάτων ακτίνων-Χ. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, 36(1), 446-453.
- Καφιώτης Α., 2008. Κοιτασματογένεση πλατινοειδών ορυκτών και χρωμιτών συνδεόμενων με την πετρογενετική εξέλιξη των οφιολιθικών συμπλεγμάτων Βούρινου και Πίνδου. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, 718 σ.
- Κωνσταντοπούλου Π.Γ., 1990. Κατανομή των στοιχείων της ομάδας του λευκόχρυσου (PGE) και του χρυσού σε χρωμικά μεταλλεύματα και πετρώματα του οφιολιθικού συμπλέγματος του Βούρινου. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αθηνών, 262 σ.
- Μπόσκος Ε. και Περδικάτσης Β., 1986. Η αποσάθρωση του βρουσίτη και ο σχηματισμός του πυροαουρίτη στο δουνιτικό σερπεντινίτη της περιοχής Ξερολείβαδου στο νότιο Βούρινο. Ειδικό τεύχος ΙΓΜΕ, 279-287.
- Παπαδόπουλος Τ., 2008. Εισαγωγή στη γεωφυσική (σημειώσεις). Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Παππά, Α., 1996. Διερεύνηση της επίπλευσης του χρωμίτη της περιοχής Βούρινου (Νομού Κοζάνης). Δυνατότητες εφαρμογής στη πράξη. Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, 261 σ.
- Σταμπολτζής Γ.Α., 1991. Μηχανική Προπαρασκευή Μεταλλευμάτων Βιομηχανικών Ορυκτών και Πετρωμάτων. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Σταμπολτζής Γ.Α., 1994. Μηχανική Προπαρασκευή Μεταλλευμάτων Βιομηχανικών Ορυκτών και Πετρωμάτων, Υδροαυτοκαθαρισμός–Κατάτμηση–Ταξινόμηση. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα. [http://mycourses.ntua.gr/course\\_description/index.php](http://mycourses.ntua.gr/course_description/index.php)
- Σταμούλης, Κ. (1990): Παρατηρήσεις επί της ανάπτυξης των χρωμικών σωμάτων του Μεταλλείου Ξερολιβάδου. Αδημοσίευτη έκθ., ΕΛ.ΣΙ., 184σ.
- Τσακαλάκης Κ., 2008α. Κατάτμηση αρχές – θραυστήρες – εφαρμογές νομοί κατάτμησης. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα. [http://mycourses.ntua.gr/course\\_description/index.php](http://mycourses.ntua.gr/course_description/index.php)
- Τσακαλάκης Κ., 2008β. Συναρτήσεις κατανομής μεγέθους τεμαχίων. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα. [http://mycourses.ntua.gr/course\\_description/index.php](http://mycourses.ntua.gr/course_description/index.php)





Τσακαλάκης Κ., 2008γ. Εφαρμογή του νομού Bond - προσδιορισμός ισχύος μυλών λειοτρίβησης. ΕΜΠ.

Τσακαλάκης Κ., 2018α. Αποδέσμευση χρήσιμου συστατικού από το στείρο - διεργασίες κατάτμησης (ελάττωση μεγέθους τεμαχίων). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

[http://mycourses.ntua.gr/course\\_description/index.php](http://mycourses.ntua.gr/course_description/index.php)

Τσακαλάκης Κ., 2018β. Εισαγωγή στον εμπλουτισμό των μεταλλευμάτων. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα. [http://mycourses.ntua.gr/course\\_description/index.php](http://mycourses.ntua.gr/course_description/index.php))

Τσακαλάκης Κ., Ορφανουδάκη Α., Περράκη Θ., 2000. Η επίδραση της ορυκτολογικής σύστασης του βωξίτη στην κατάτμηση. Conference: 3rd International Congress of Mineral Wealth, Greece, November 2000, v. II, 271-280.

Φραγκίσκος Α.Ζ. 2000. Σχεδιασμός και κατασκευή εργοστασίων εμπλουτισμού. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Φραγκίσκος Α.Ζ. και Κατράκης Σ.Δ., 1979. Εισαγωγή εις τον Εμπλουτισμόν των Μεταλλευμάτων και Βιομηχανικών Ορυκτών. Έκδοση ΤΕΕ, Αθήνα.

Φραγκίσκος Α.Ζ., 1990. Η Μελέτη του Εμπλουτισμού των Μεταλλευμάτων και Βιομηχανικών Ορυκτών. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Φραγκίσκος Α.Ζ., 1995. Εμπλουτισμός μεταλλευμάτων και βιομηχανικών ορυκτών (ορυκτουργία). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

#### Διαδικτυακές Πηγές

<http://met-solve.com>

<https://labs.seprosystems.com/>

[www.metso.com](http://www.metso.com)

<http://www.espimetals.com>

[www.ig.pwr.wroc.pl/minproc](http://www.ig.pwr.wroc.pl/minproc)

<https://www.usgs.gov/centers/nmic/chromium-statistics-and-information>

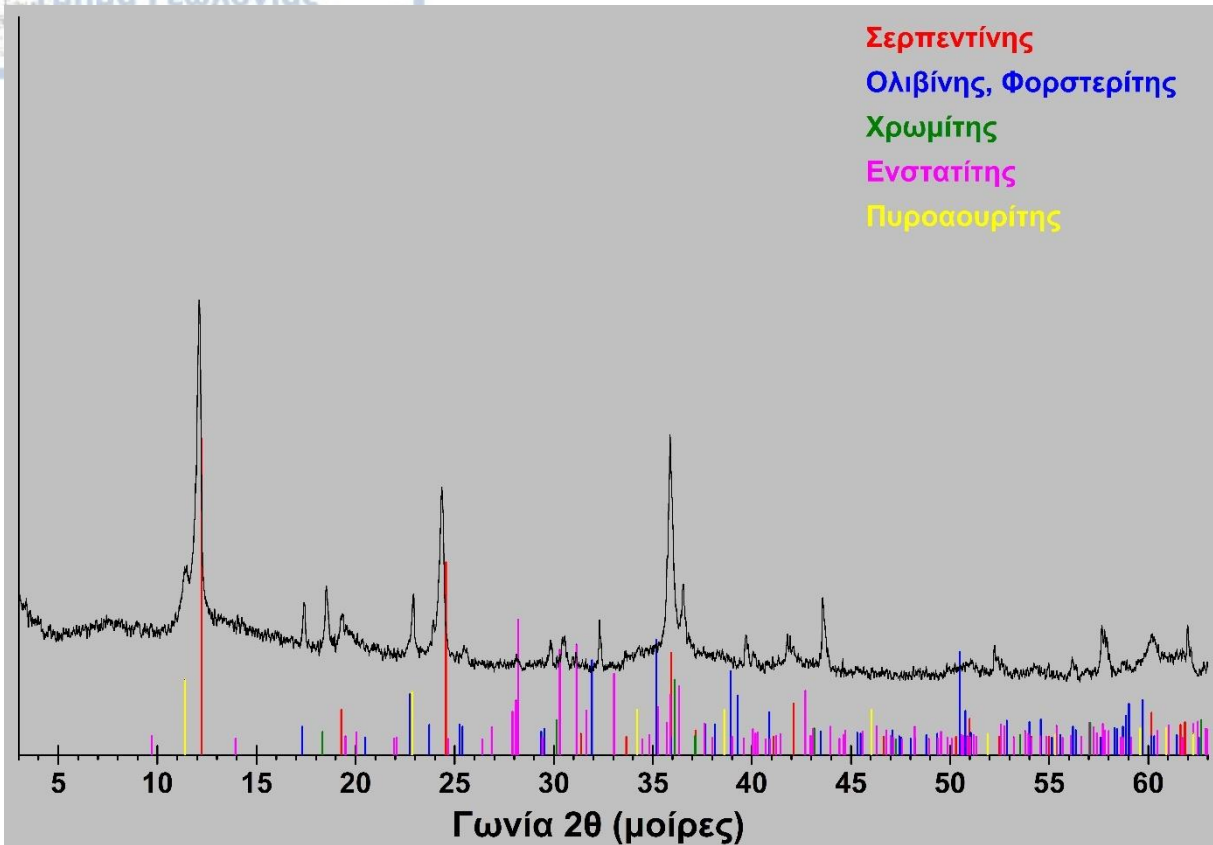
<http://images.library.wisc.edu/EcoNatRes/EFacs2/MineralsYearBk/MinYB193132/reference/econatres.minyb193132.lsmith.pdf>



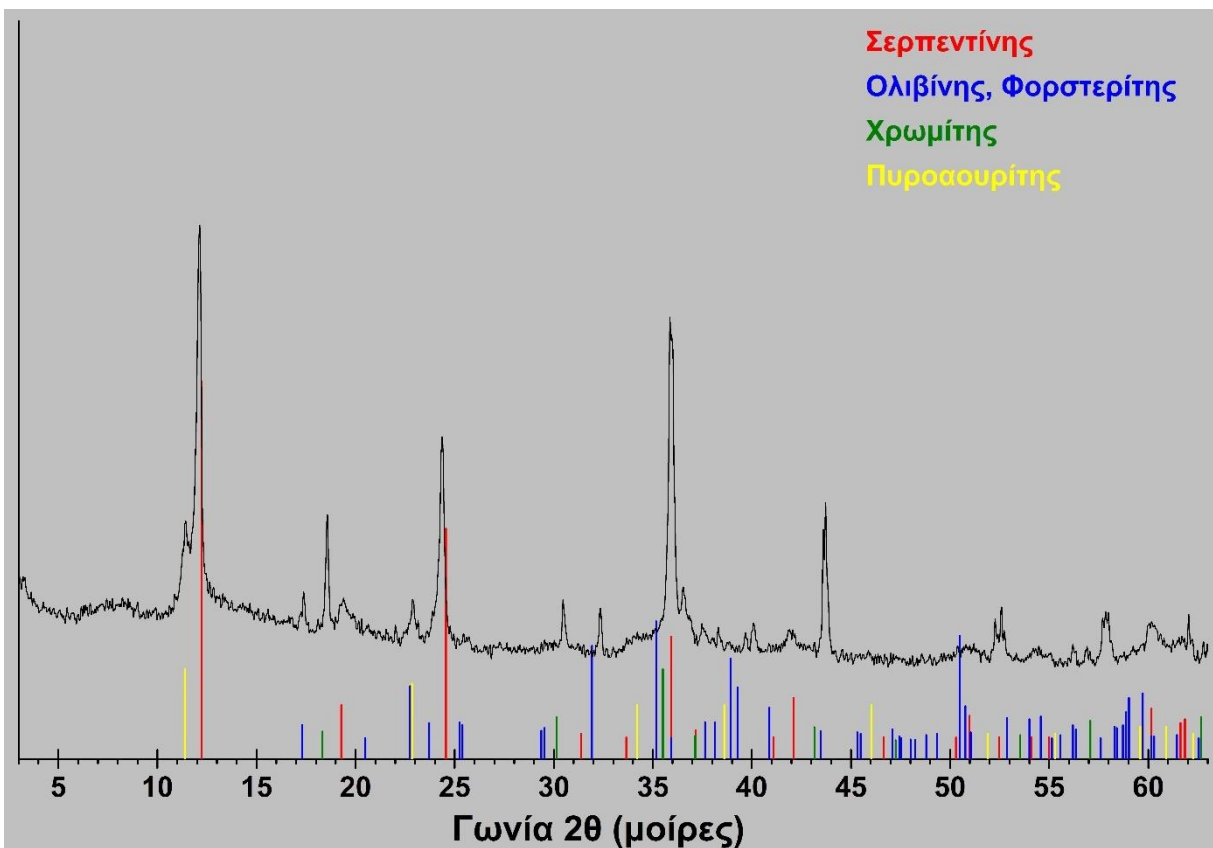
## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΠΕΡΙΘΛΑΣΙΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΚΤΙΝΩΝ-X**



**Δείγμα S1**

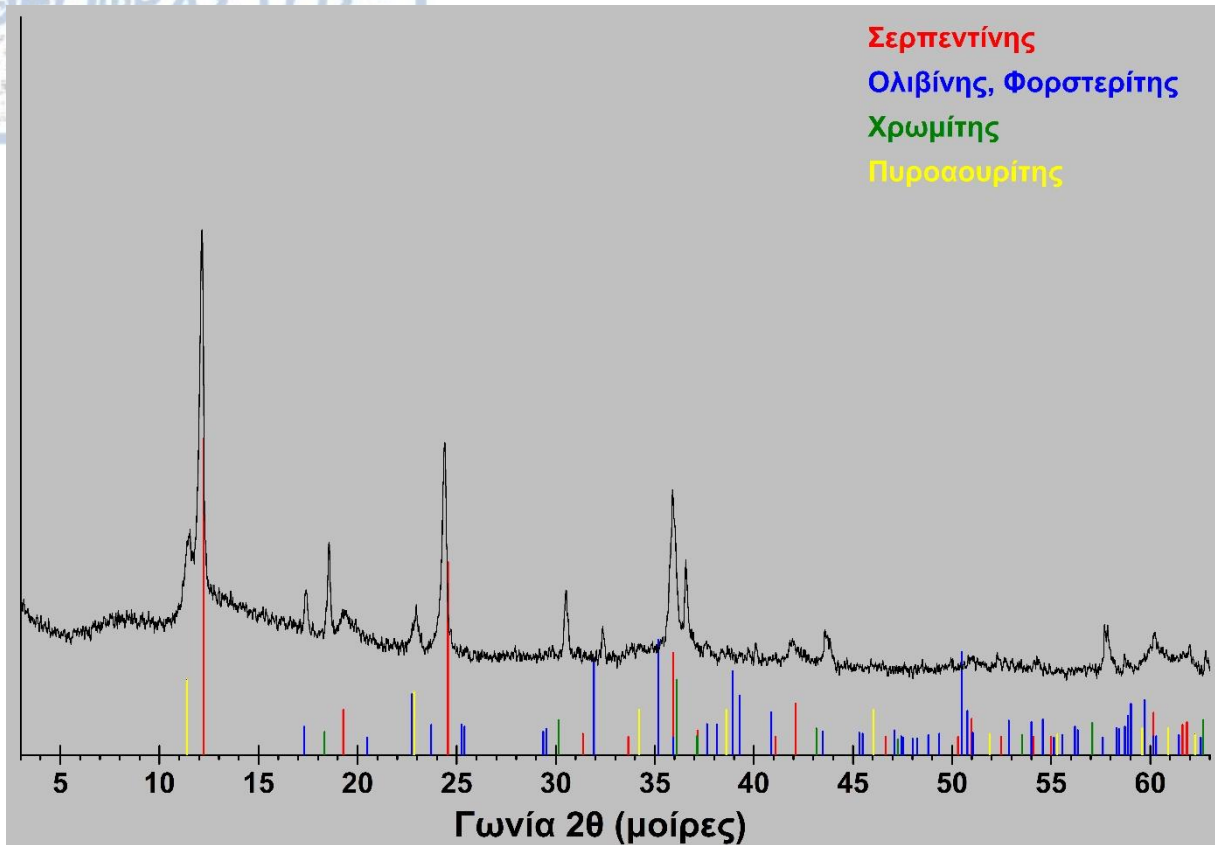


Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος 2,0-1,5 mm.

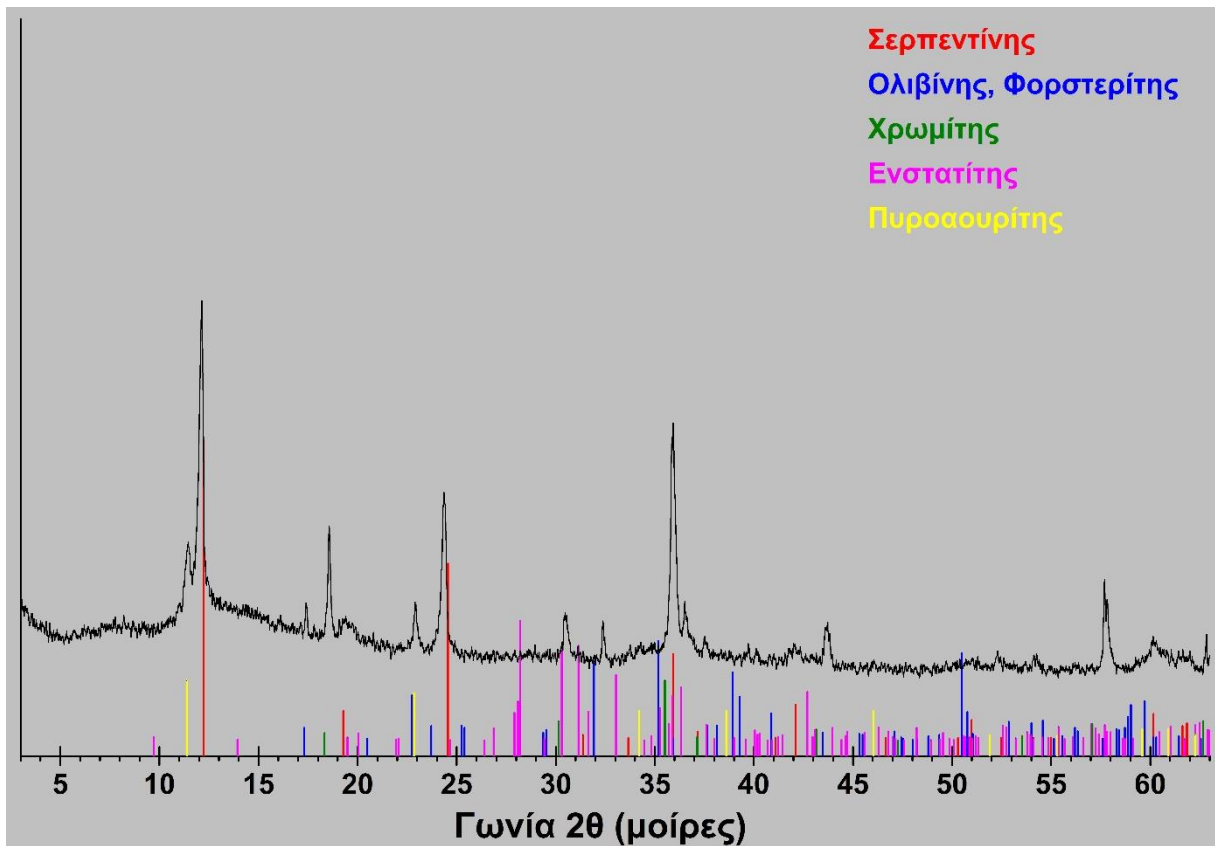


Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος 1,5-1,0 mm.

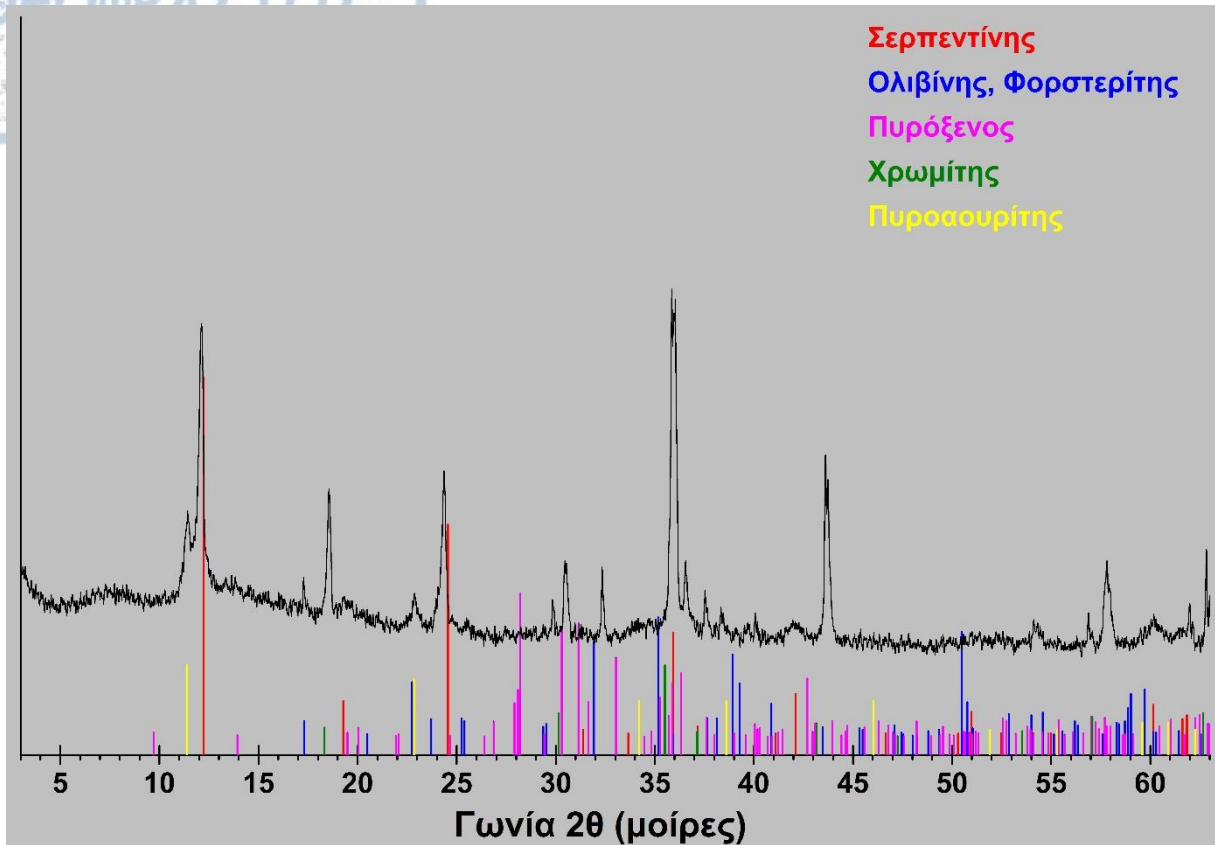




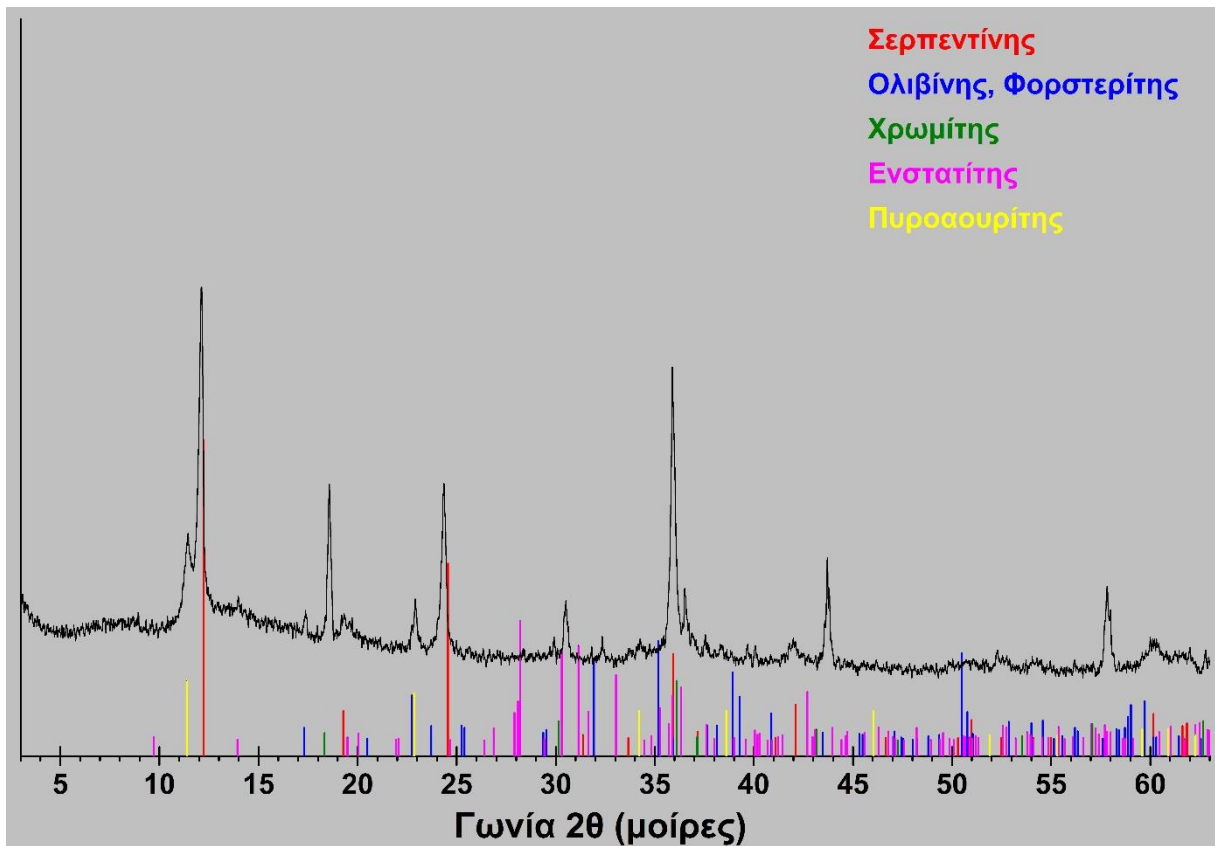
Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος 1,0-0,5 mm.



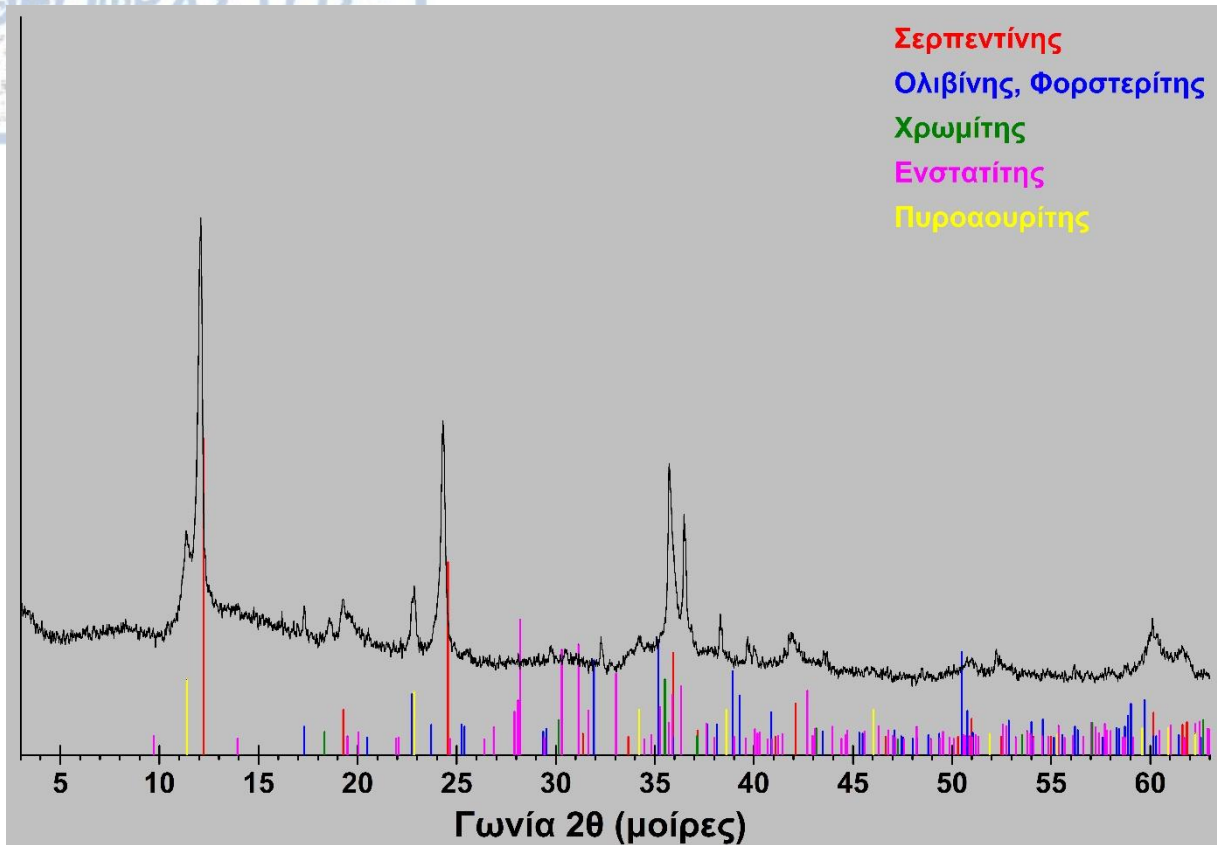
Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος 0,5-0,3 mm.



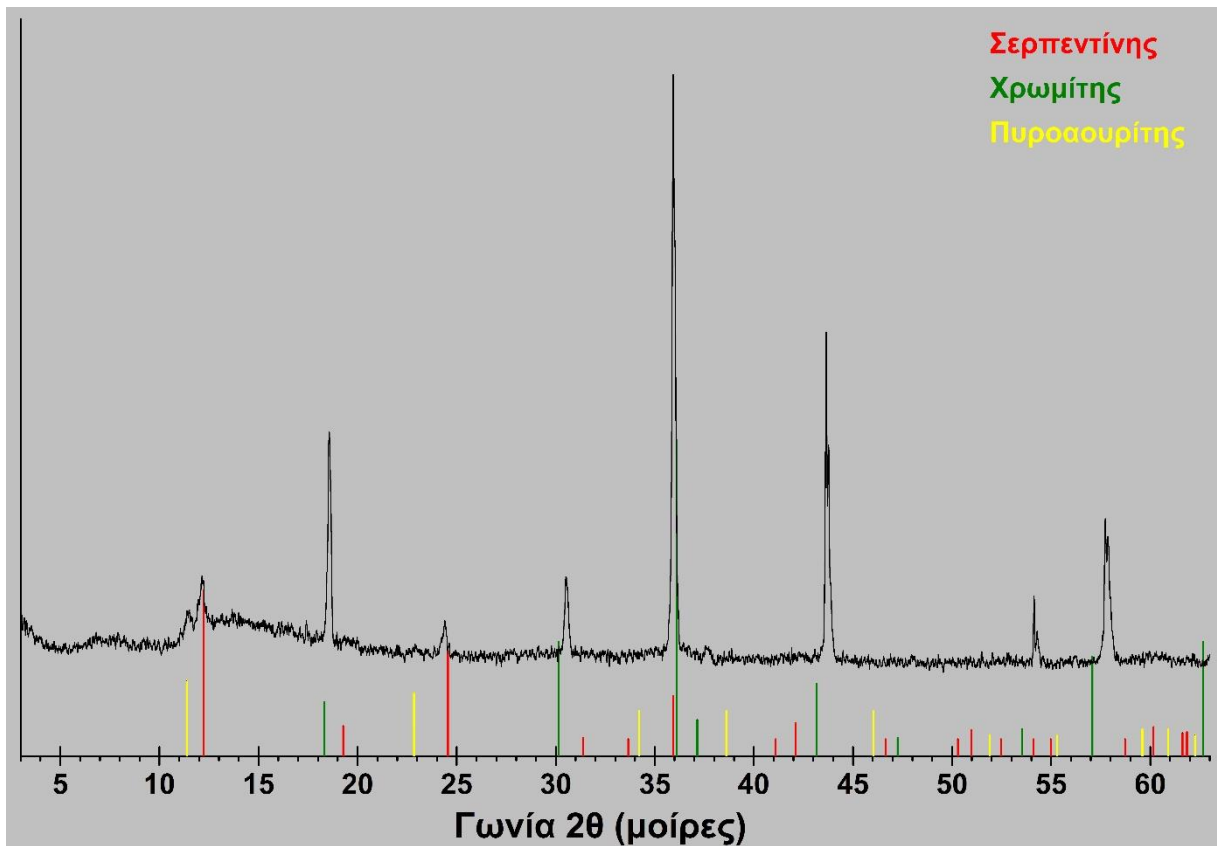
Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος 0,3-0,125 mm.



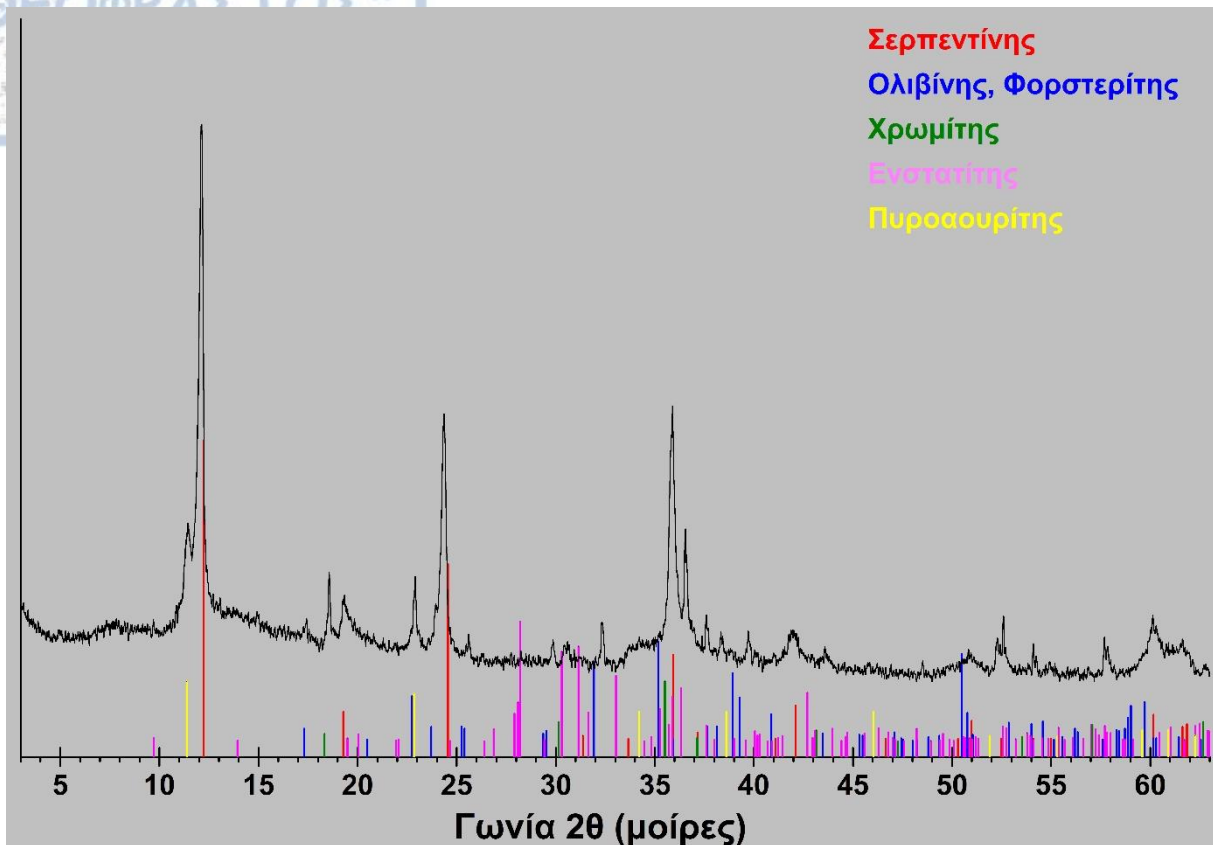
Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος  $<0.125$  mm.



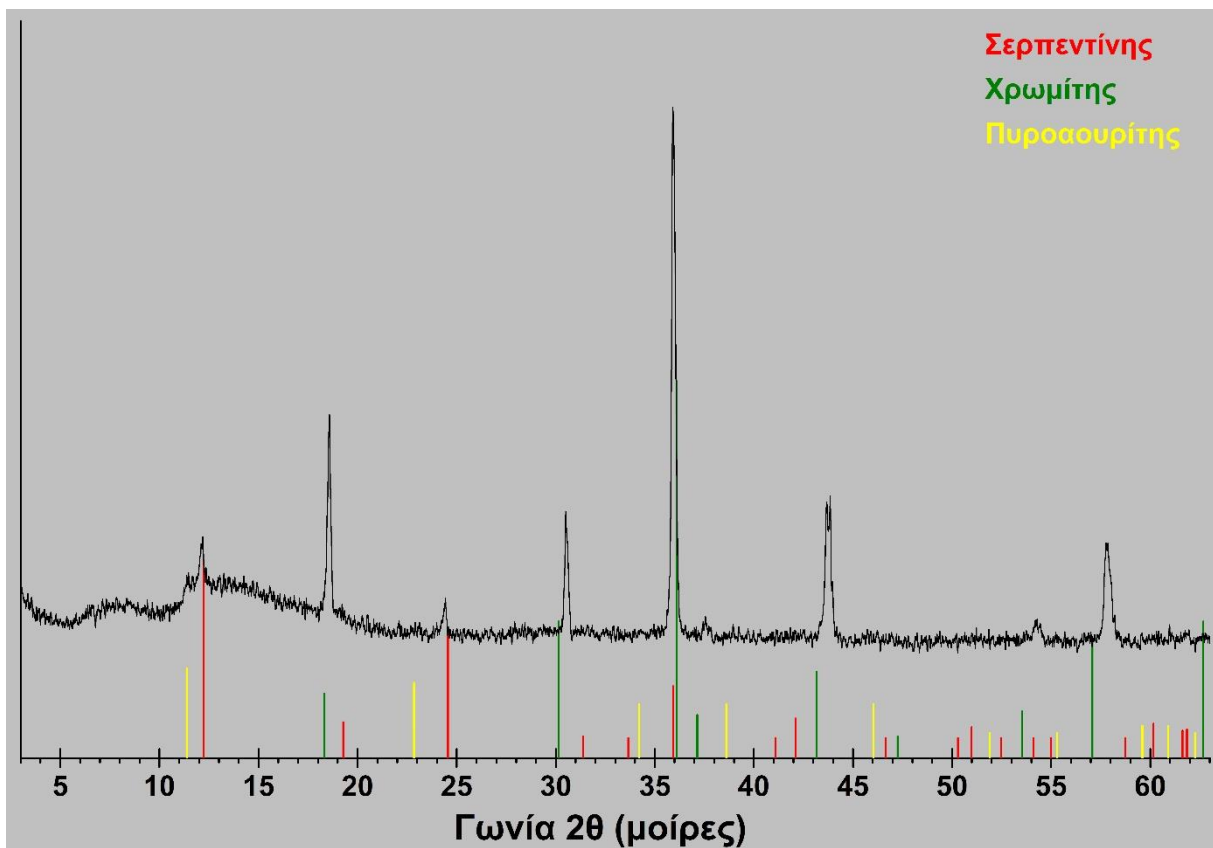
Περιθλασιόγραμμα του μη μαγνητικού κλάσματος του 0,5-0,3 mm στα 0,5Α.



Περιθλασιόγραμμα του μαγνητικού κλάσματος του 0,5-0,3 mm στα 0,5Α.

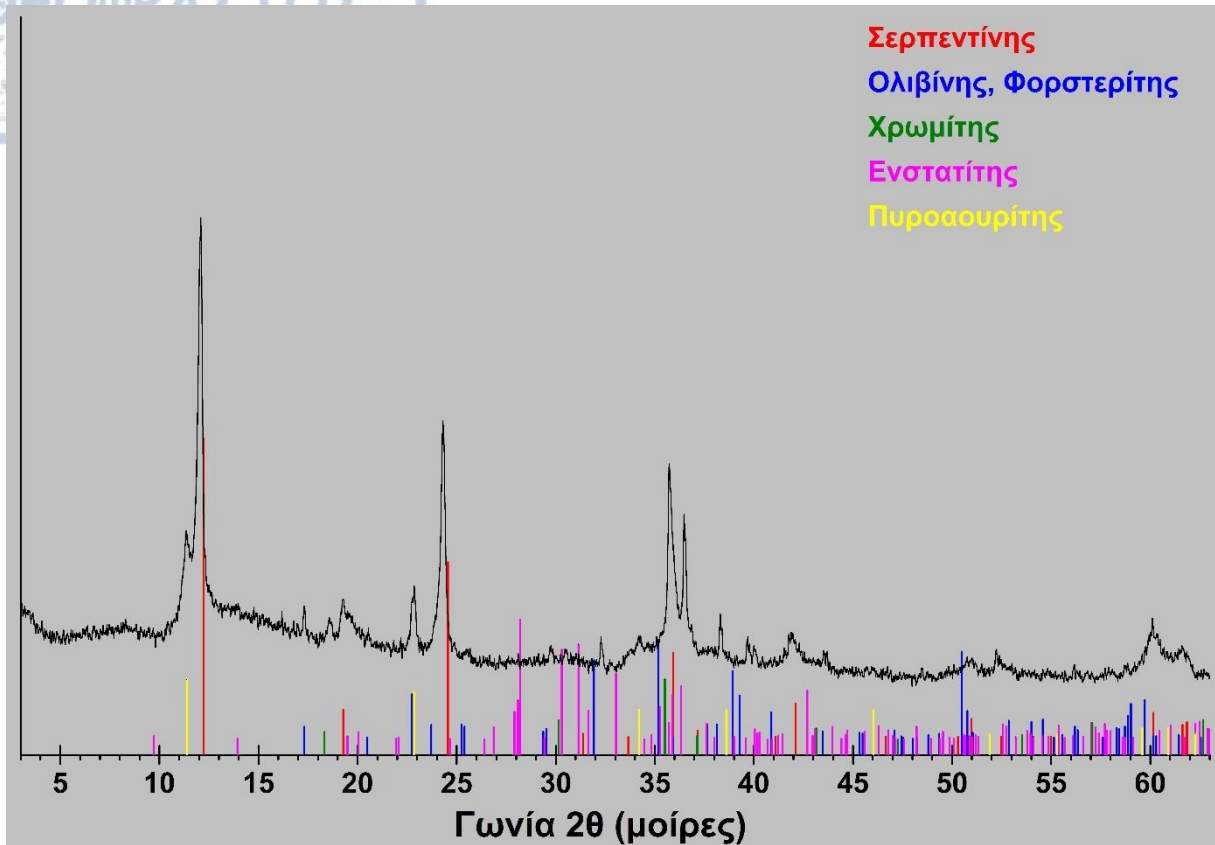


Περιθλασιόγραμμα του μη μαγνητικού κλάσματος του 0,3-0,125 mm στα 0,5Α.

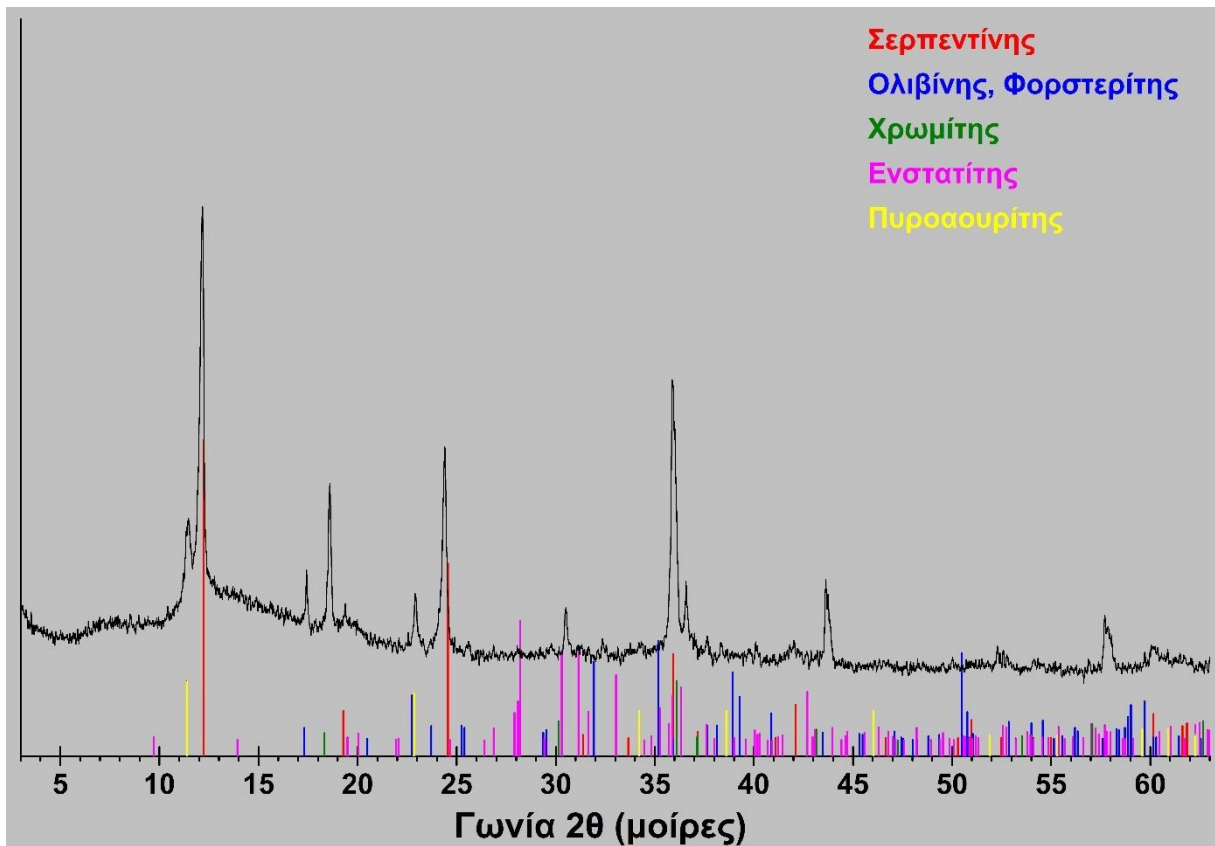


Περιθλασιόγραμμα του μαγνητικού κλάσματος του 0,3-0,125 mm στα 0,5Α.



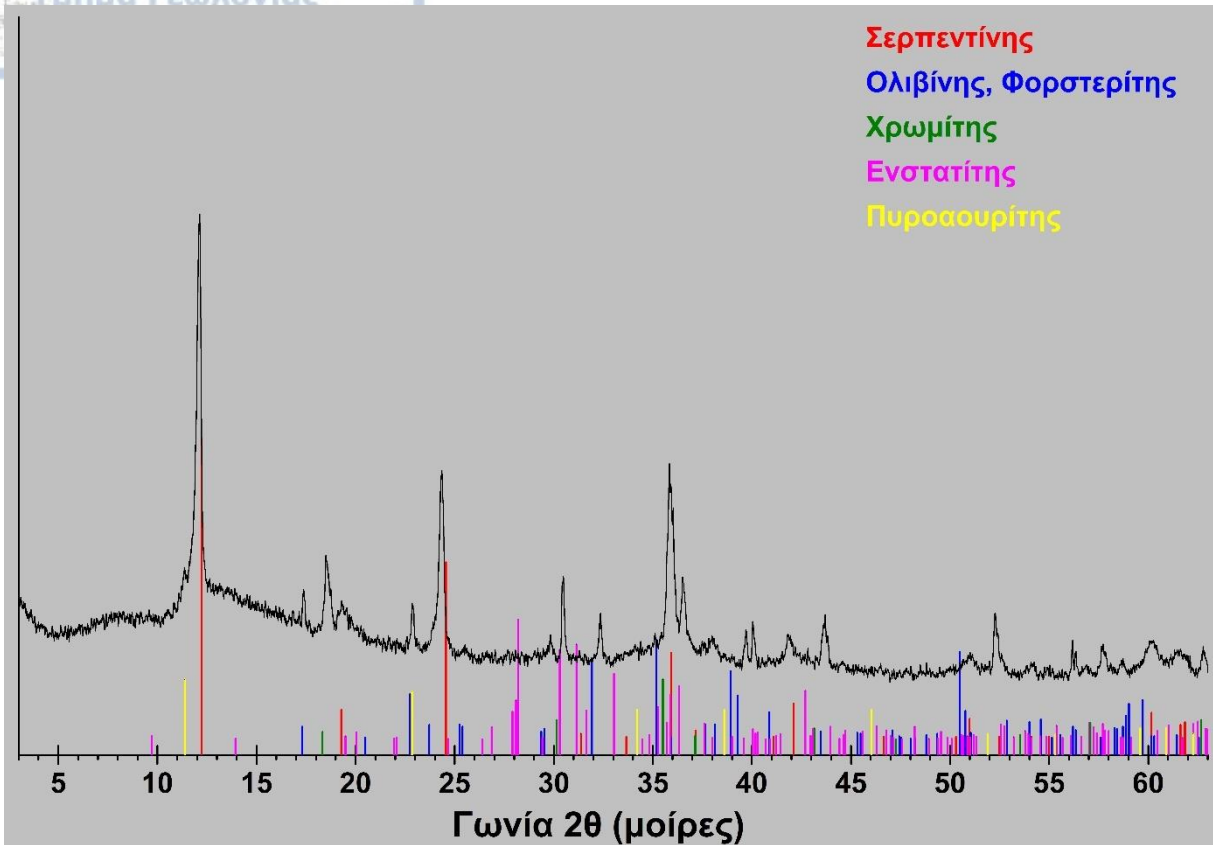


Περιθλασιόγραμμα του μη μαγνητικού κλάσματος του 0,125 mm στα 0,5Α.

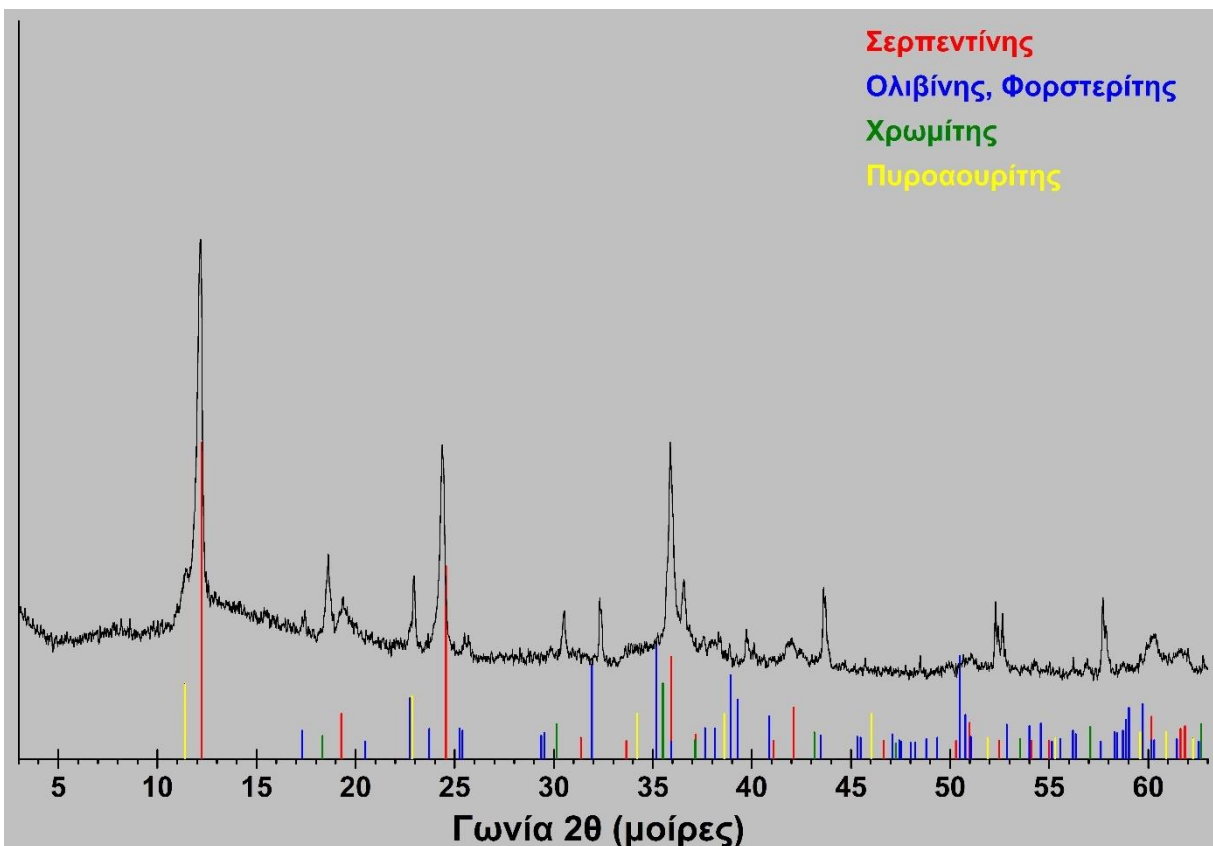


Περιθλασιόγραμμα του μαγνητικού κλάσματος του 0,125 mm στα 0,5Α.

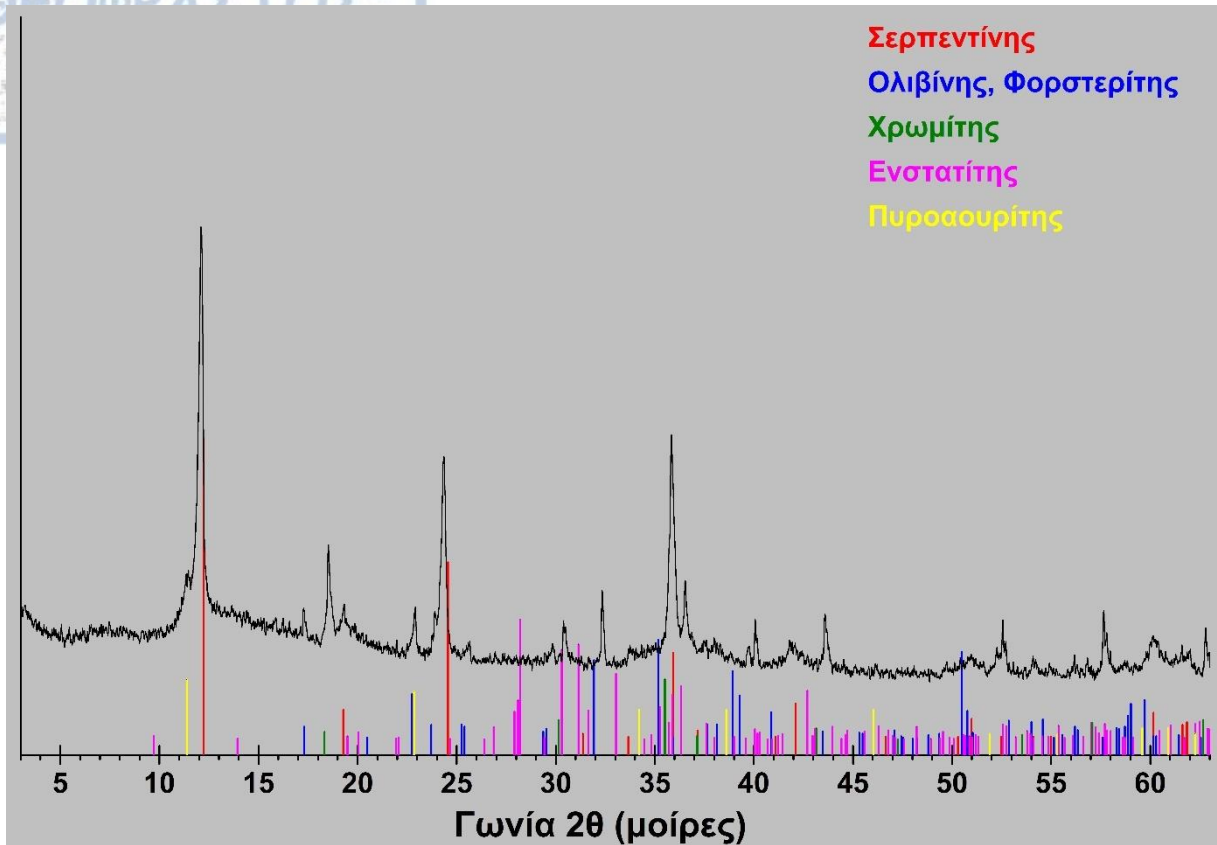
**Δείγμα S2**



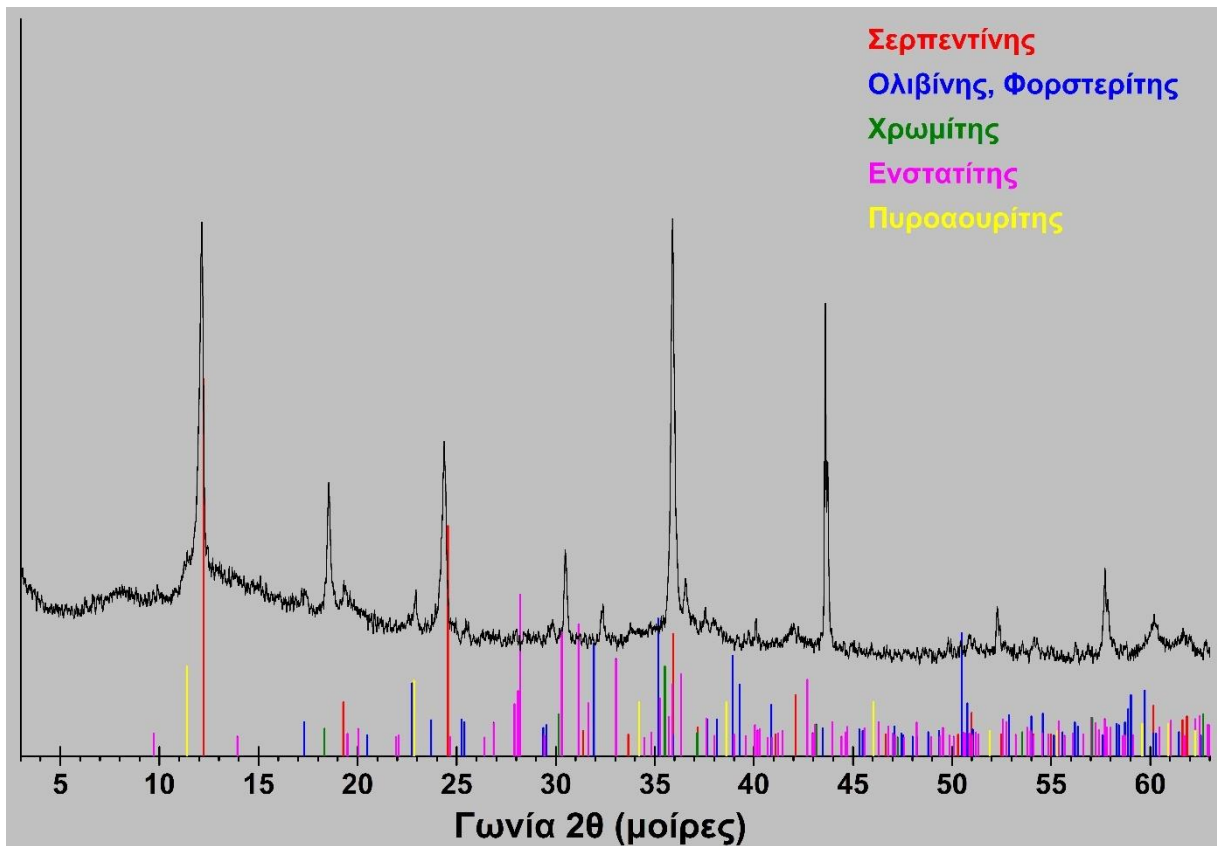
Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος 2,0-1,5 mm.



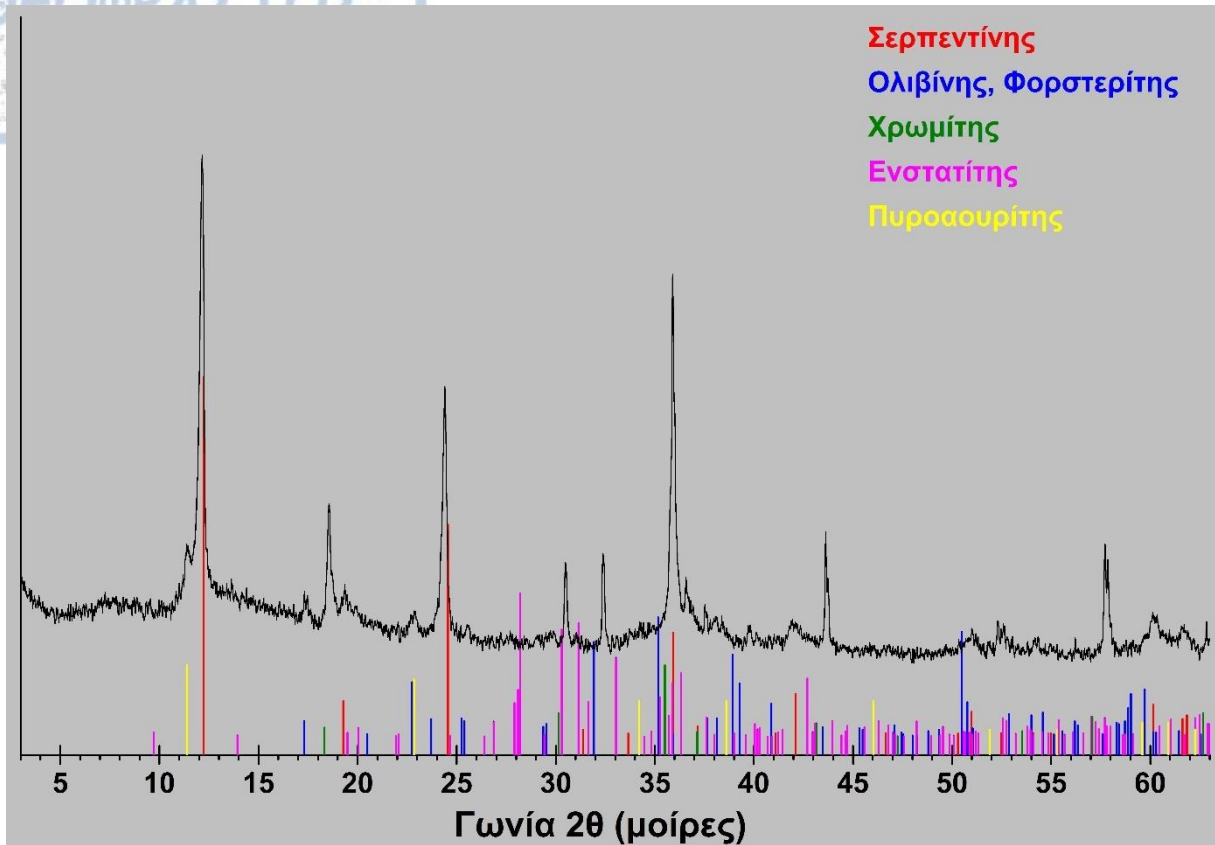
Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος 1,5-1,0 mm.



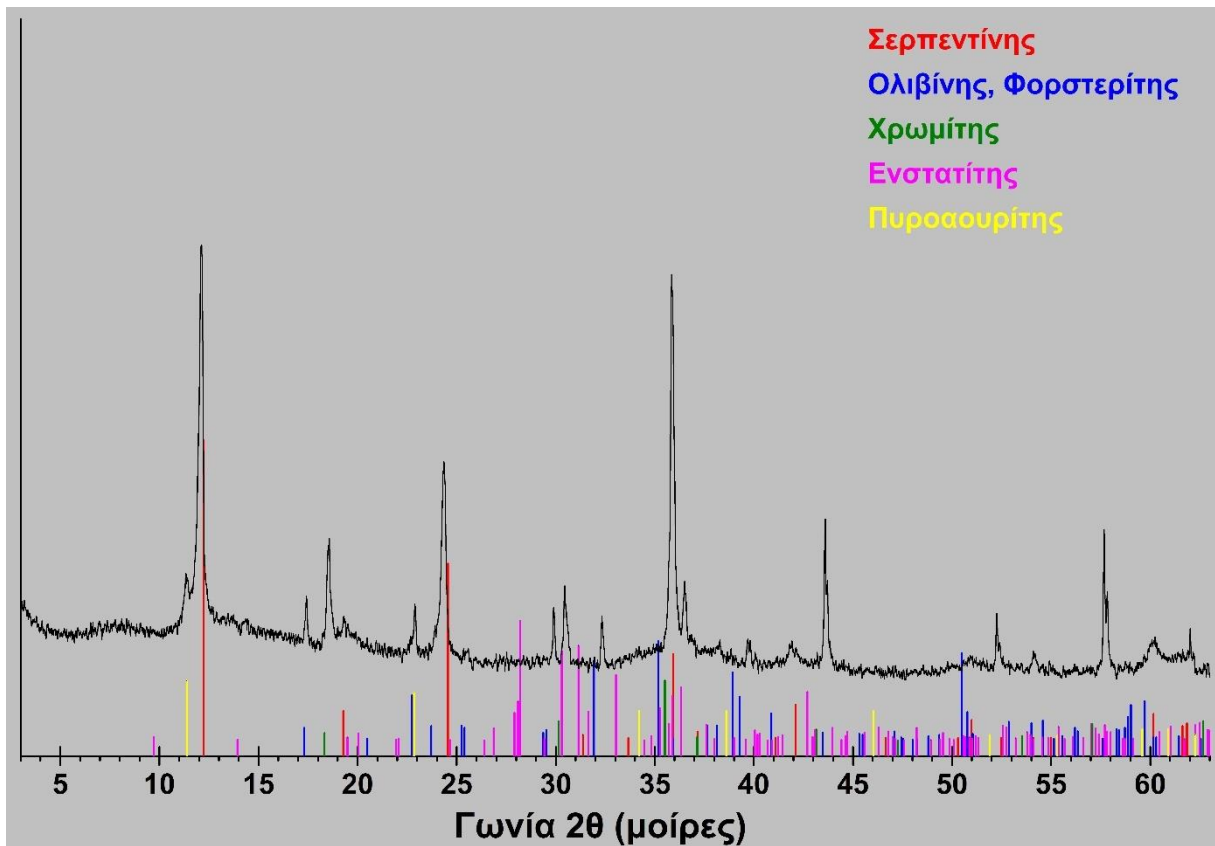
Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος 1,0-0,5 mm.



Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος 0,5-0,3 mm.

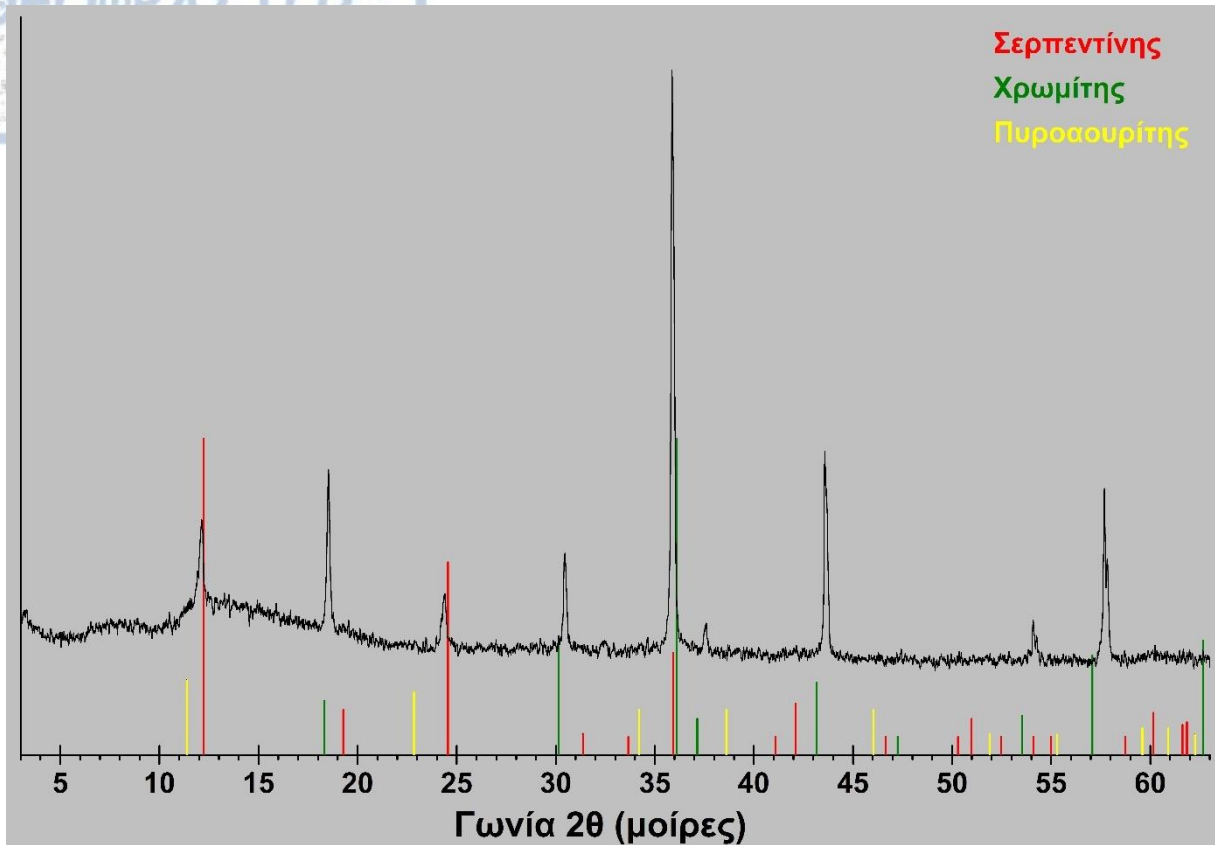


Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος 0,3-0,125 mm.

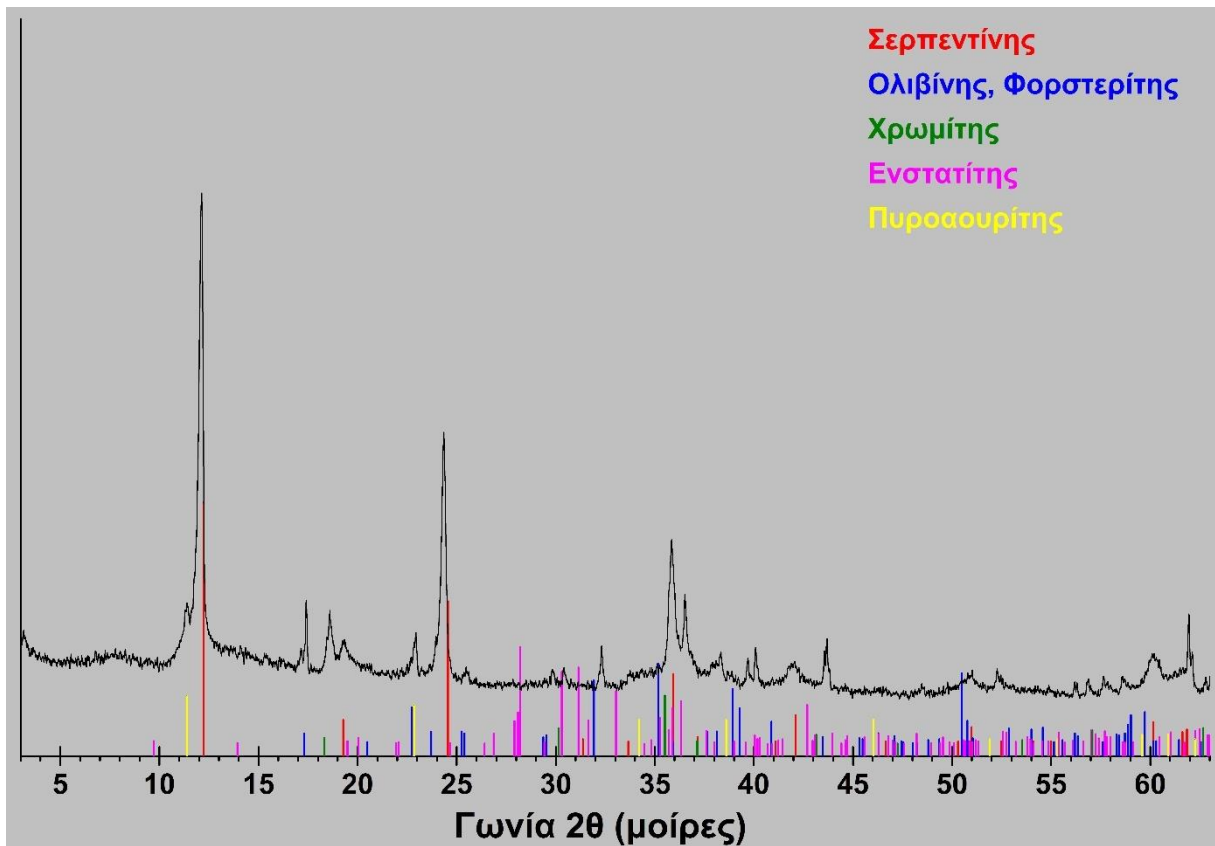


Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος  $<0.125$  mm.

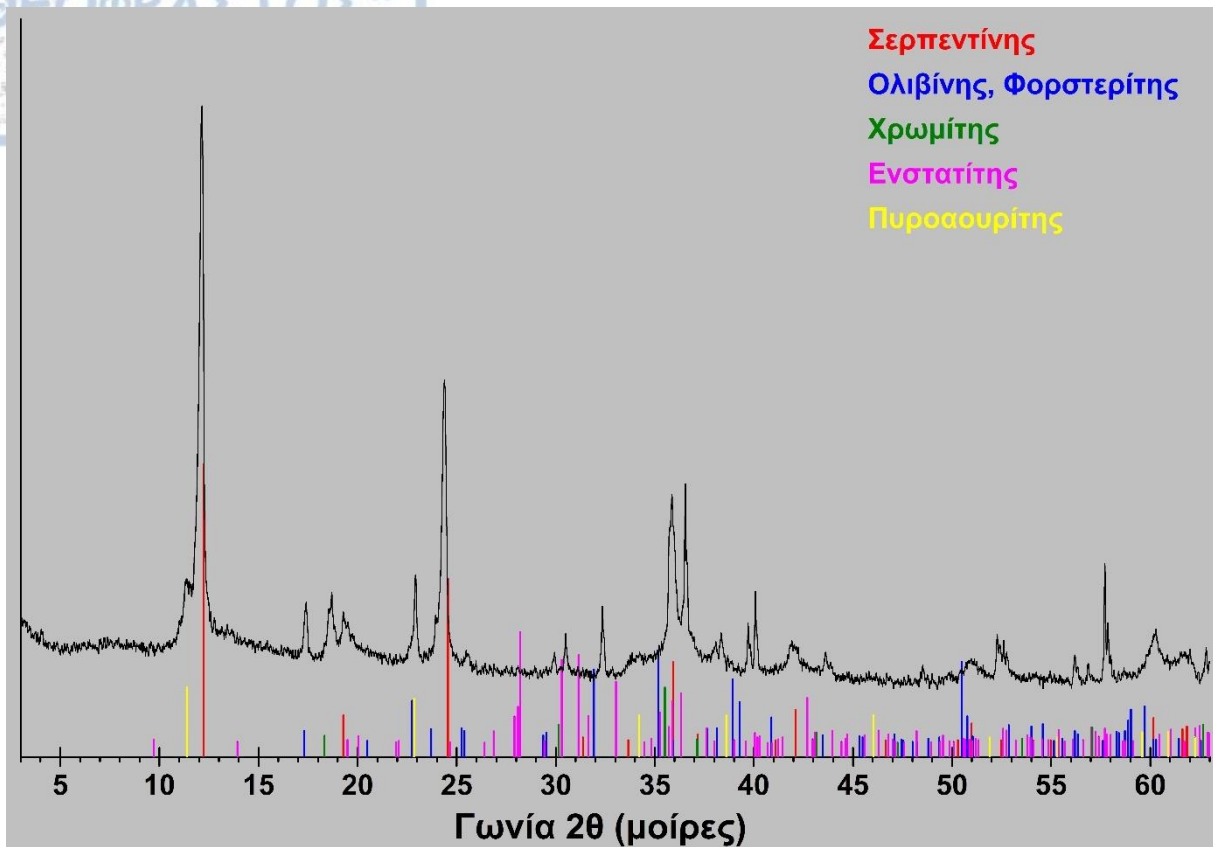




Περιθλασιόγραμμα του μαγνητικού κλάσματος του 0,5-0,3 mm στα 0,5Α.

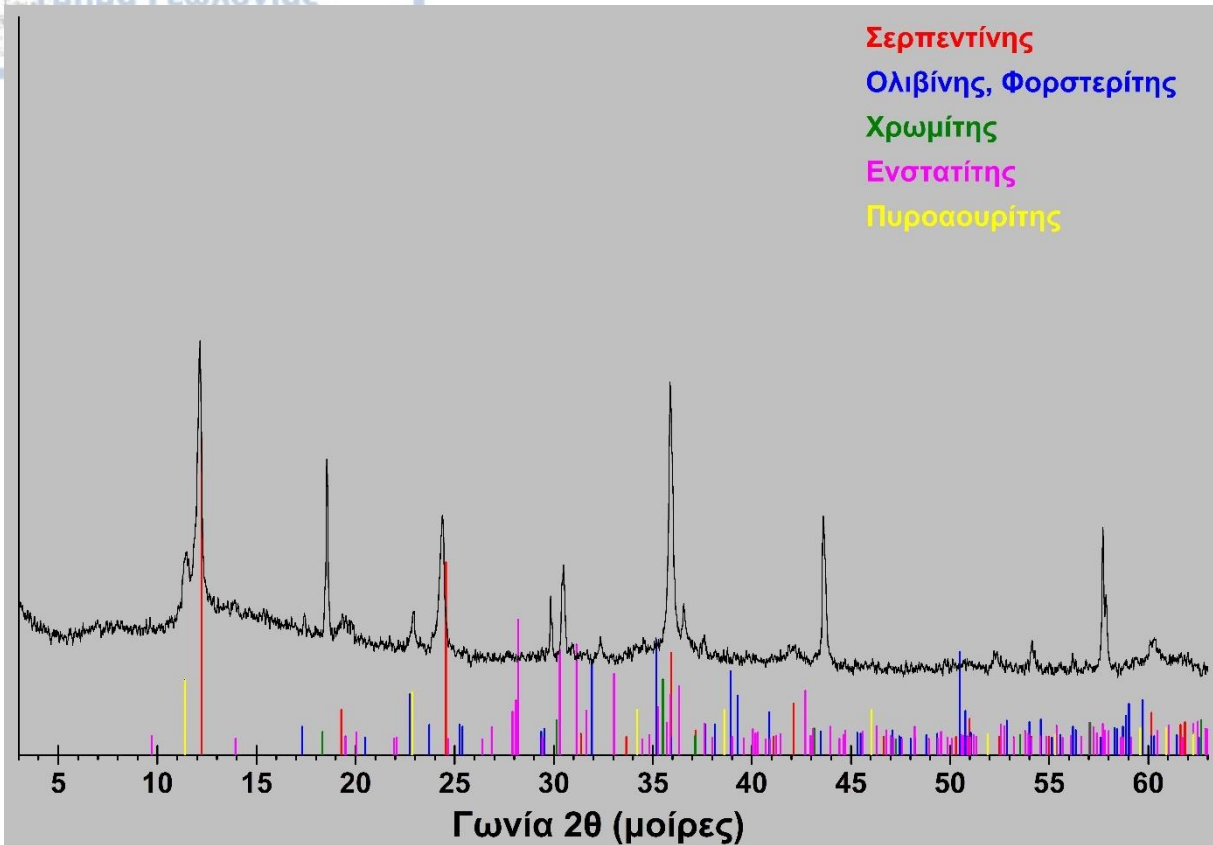


Περιθλασιόγραμμα του μη μαγνητικού κλάσματος του 0,3-0,125 mm στα 0,5Α.

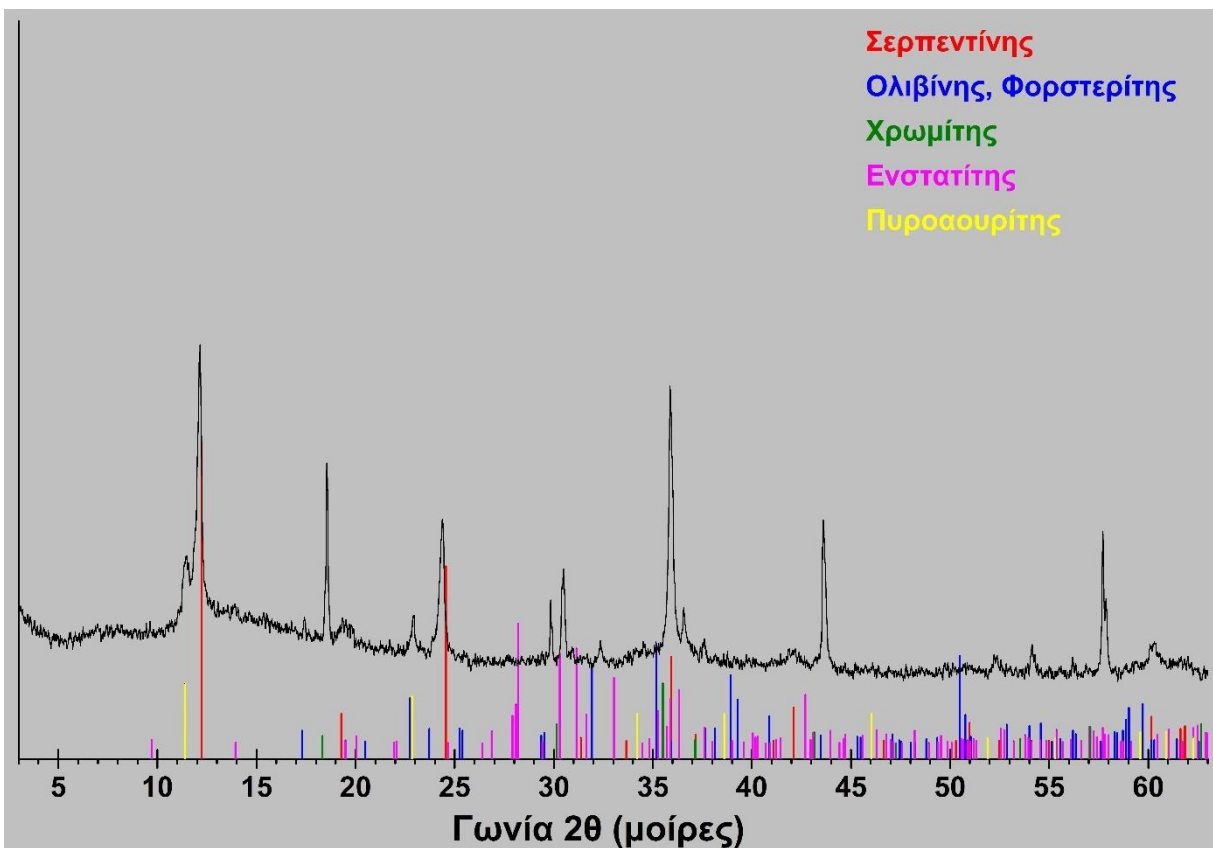


Περιθλασιόγραμμα του μη μαγνητικού κλάσματος του -0,125 mm στα 0,5Α.

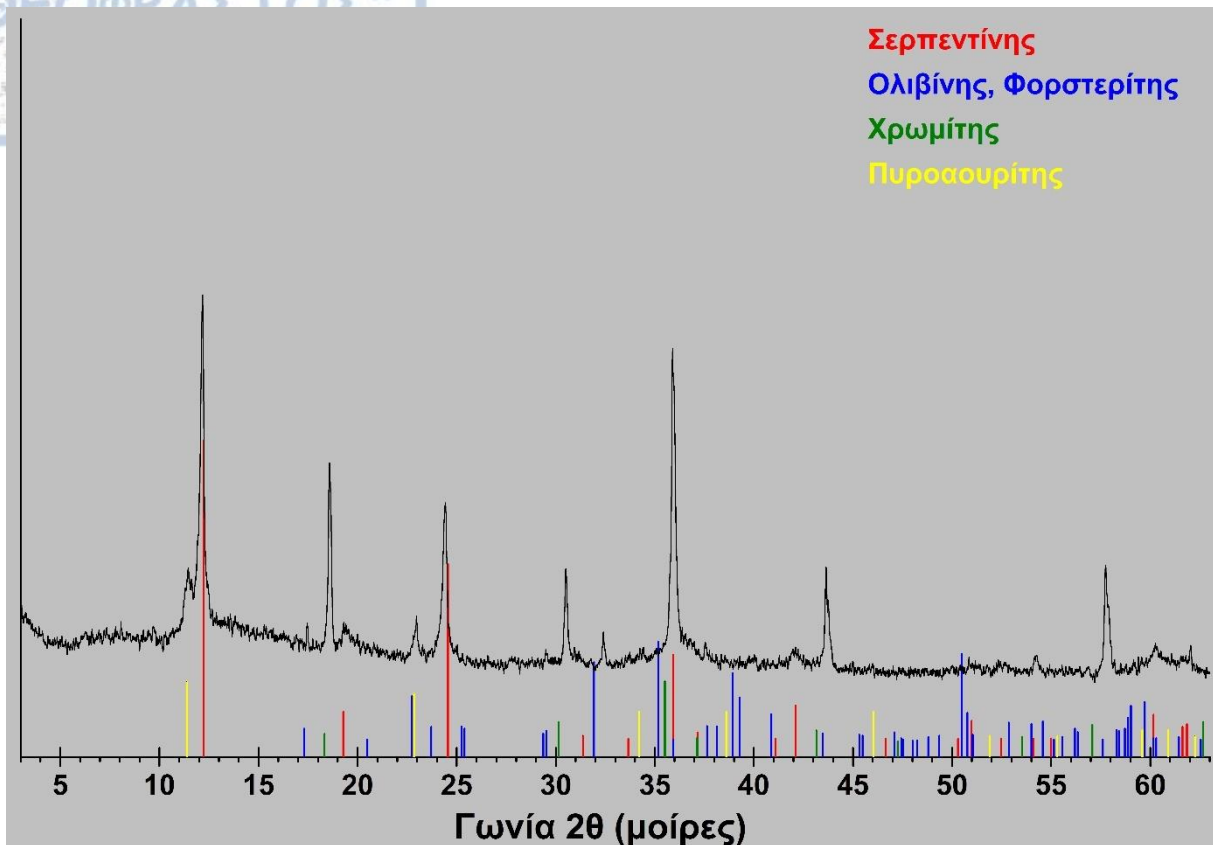
**Δείγμα S3**



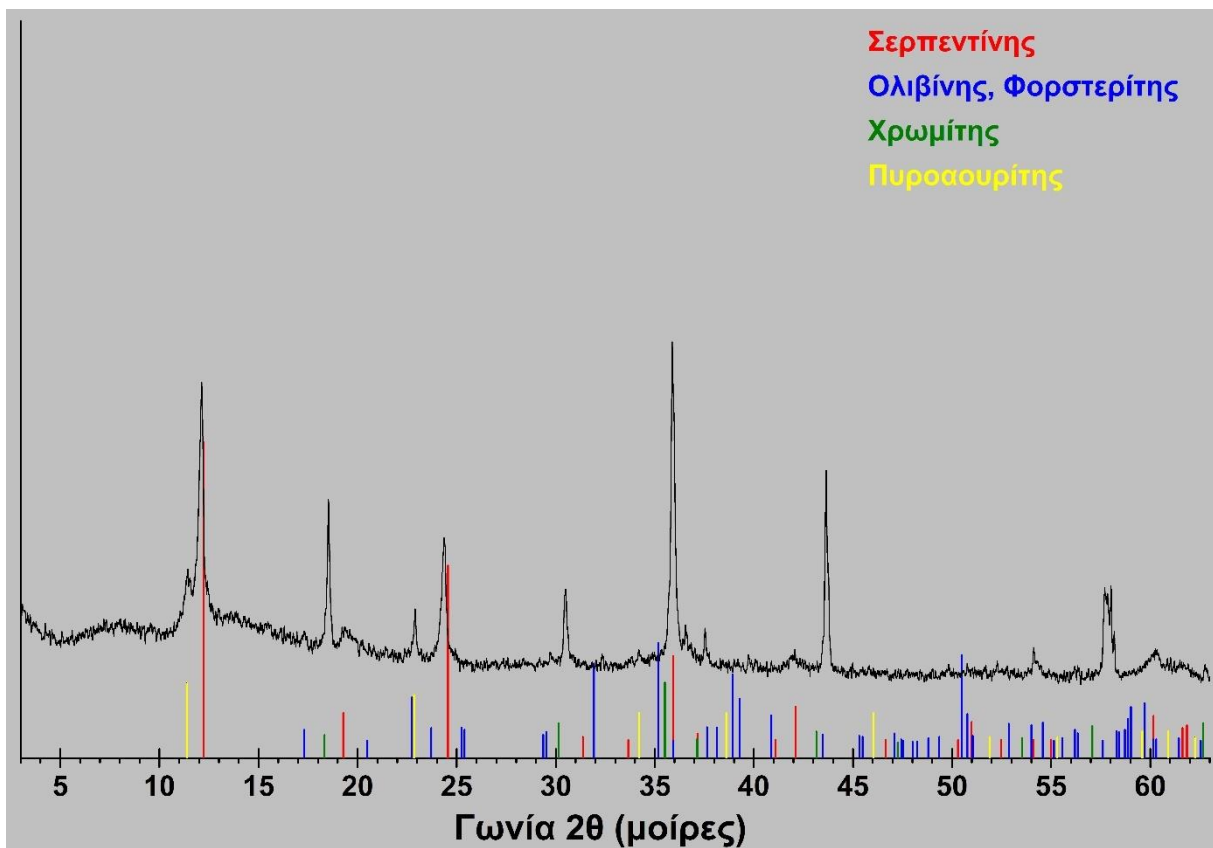
Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος 2,0-1,5 mm.



Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος 1,5-1,0 mm.

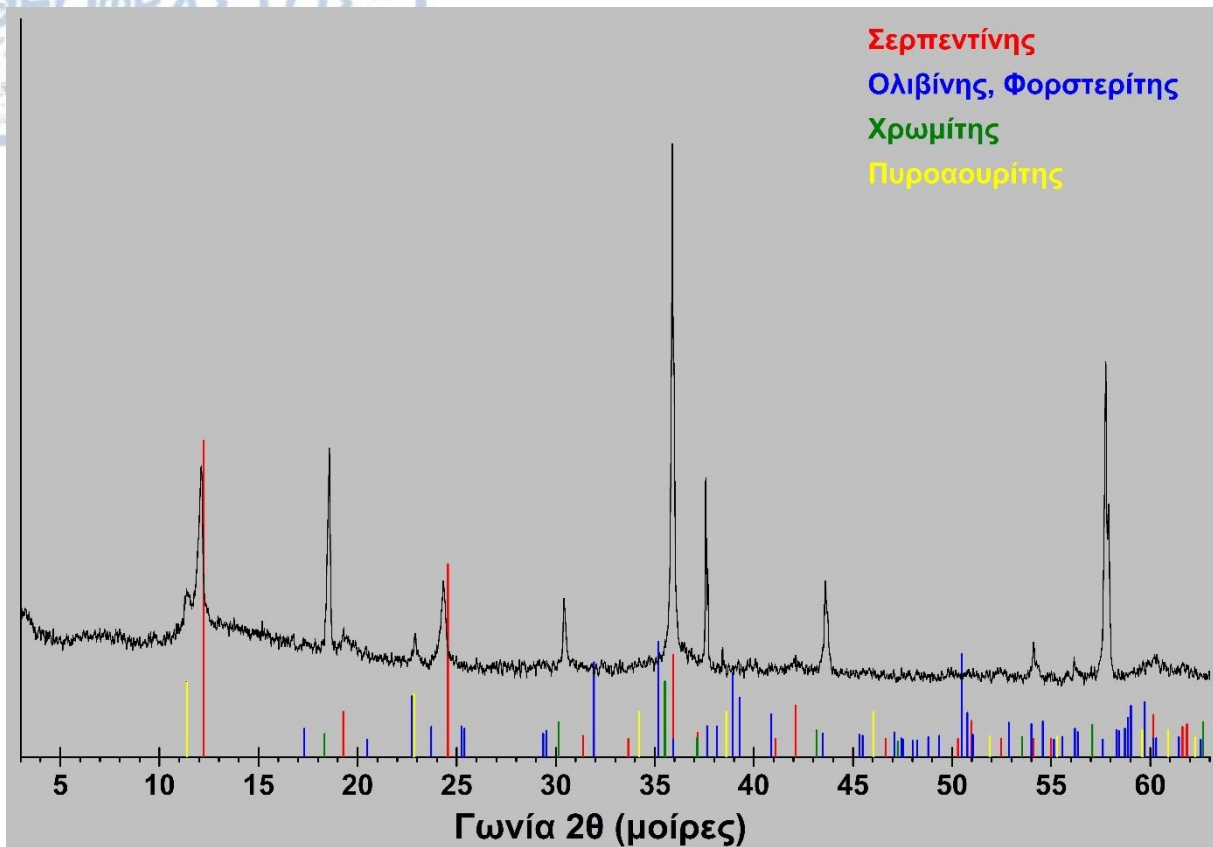


Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος 1,0-0,5 mm.

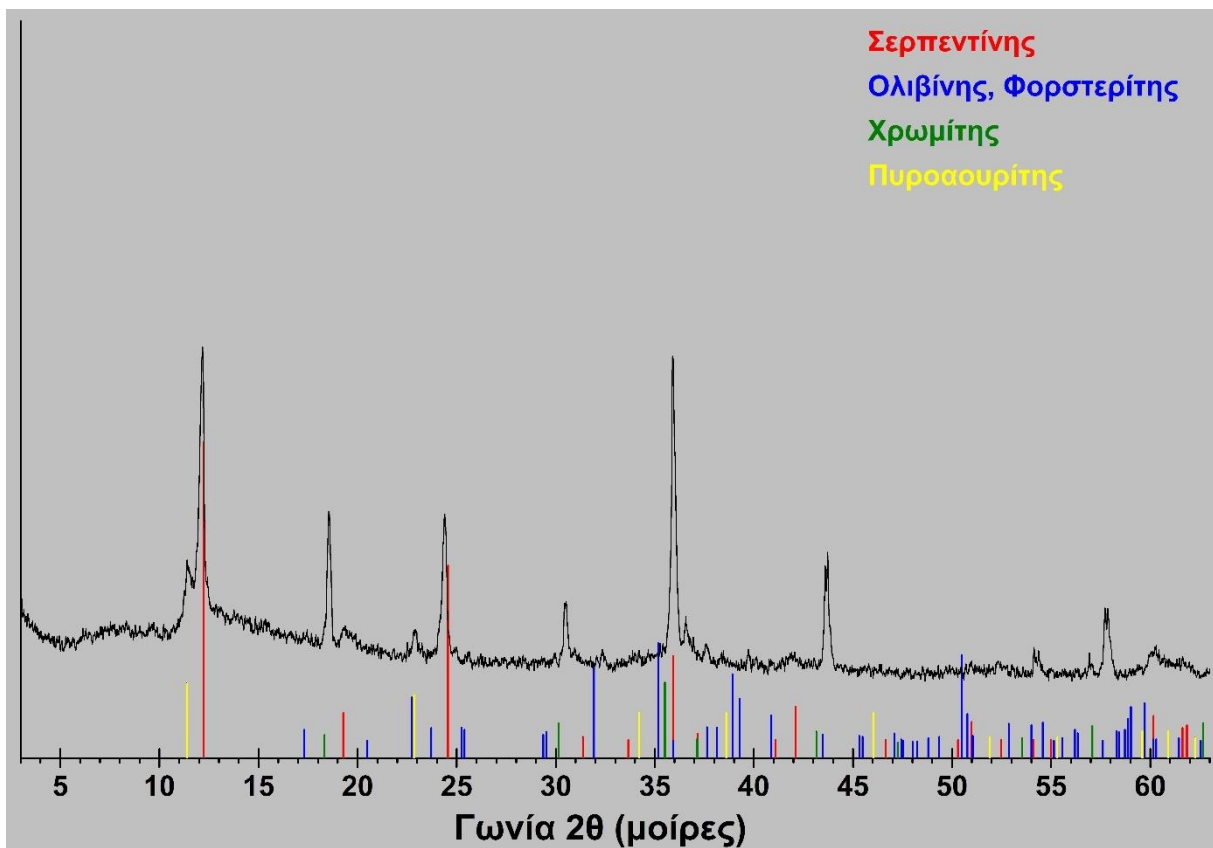


Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος 0,5-0,3 mm.

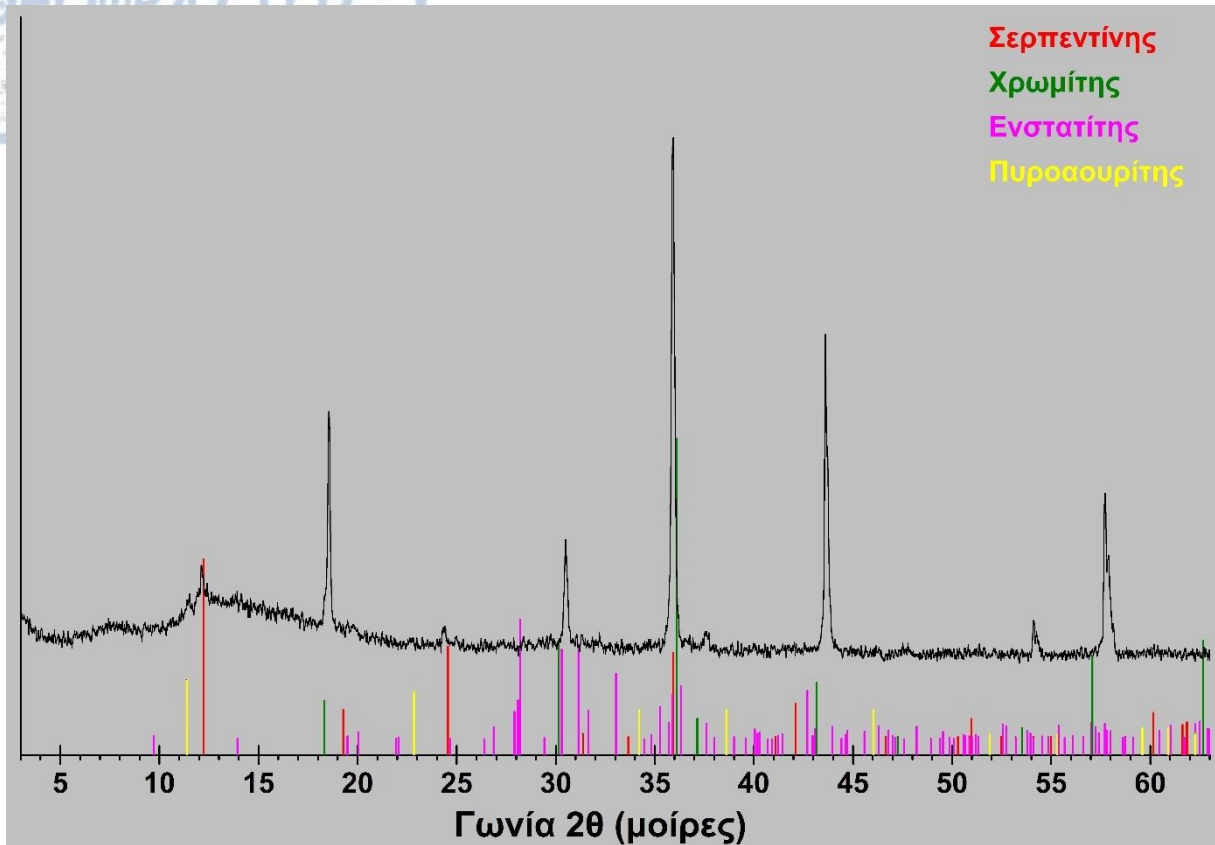




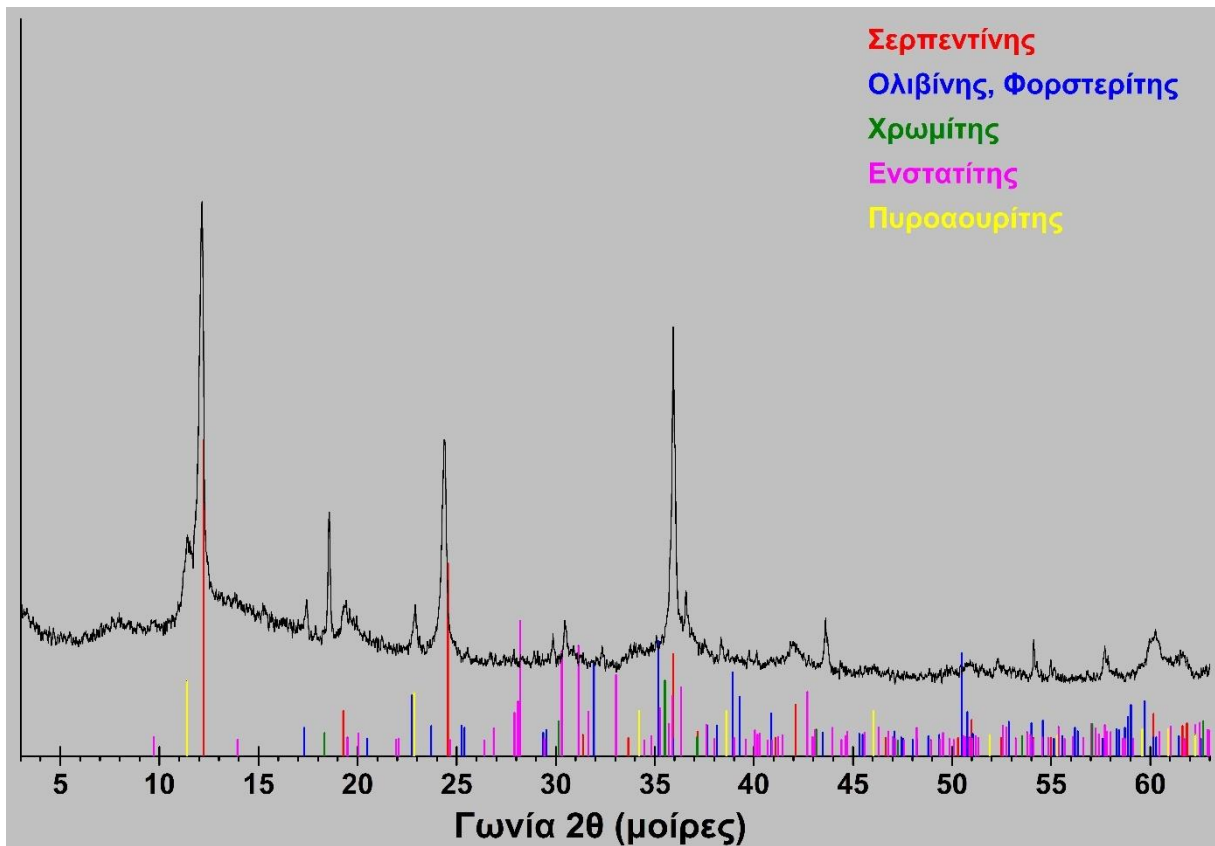
Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος 0,3-0,125 mm.



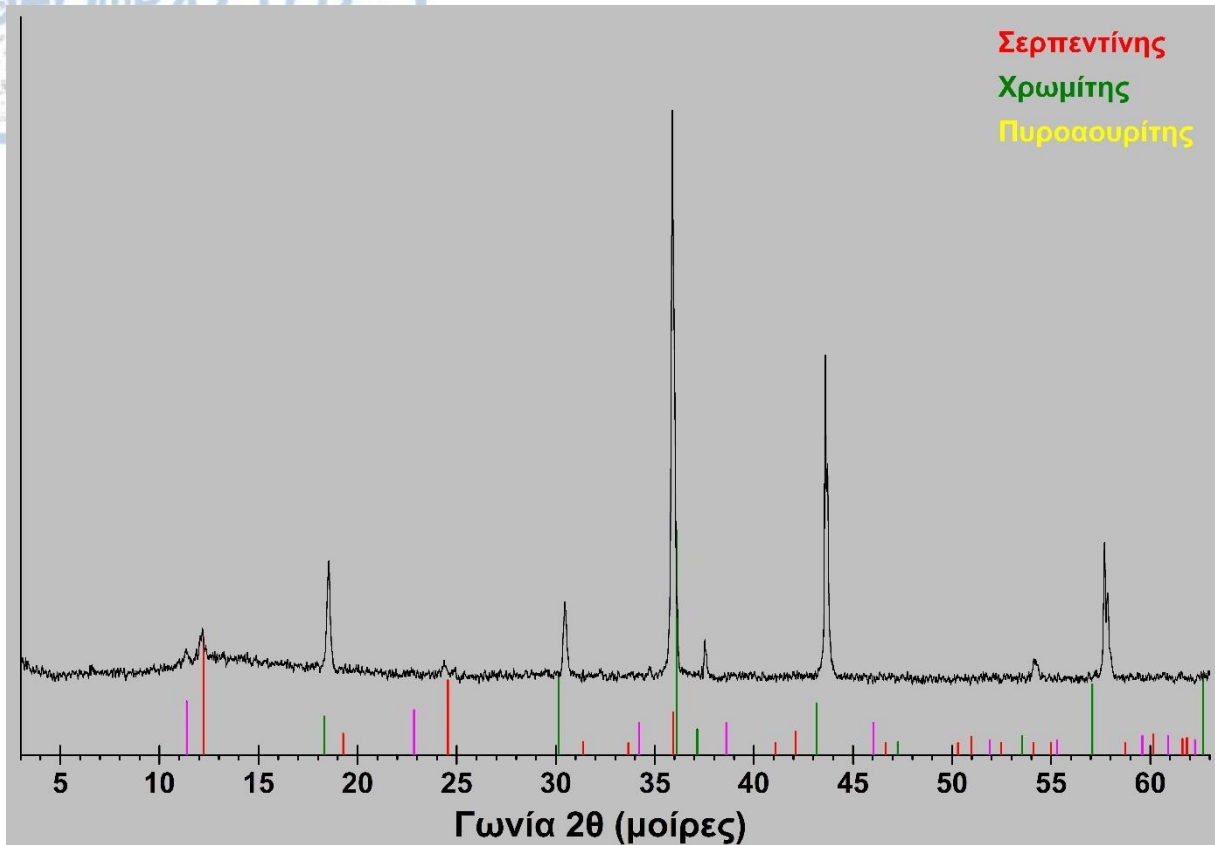
Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος  $<0,125$  mm.



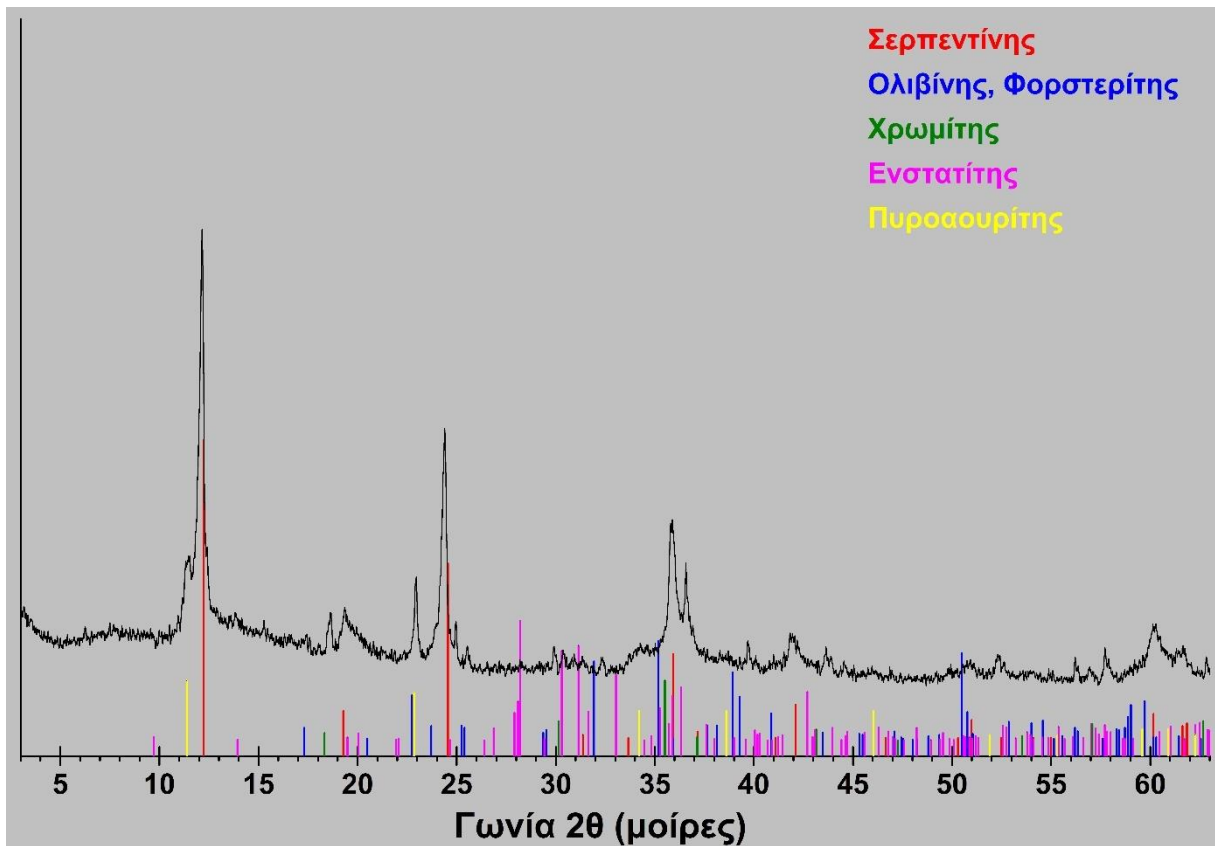
Περιθλασιόγραμμα του μαγνητικού κλάσματος του 0,5-0,3 mm στα 0,5Α.



Περιθλασιόγραμμα του μη μαγνητικού κλάσματος του 0,3-0,125 mm στα 0,5Α.

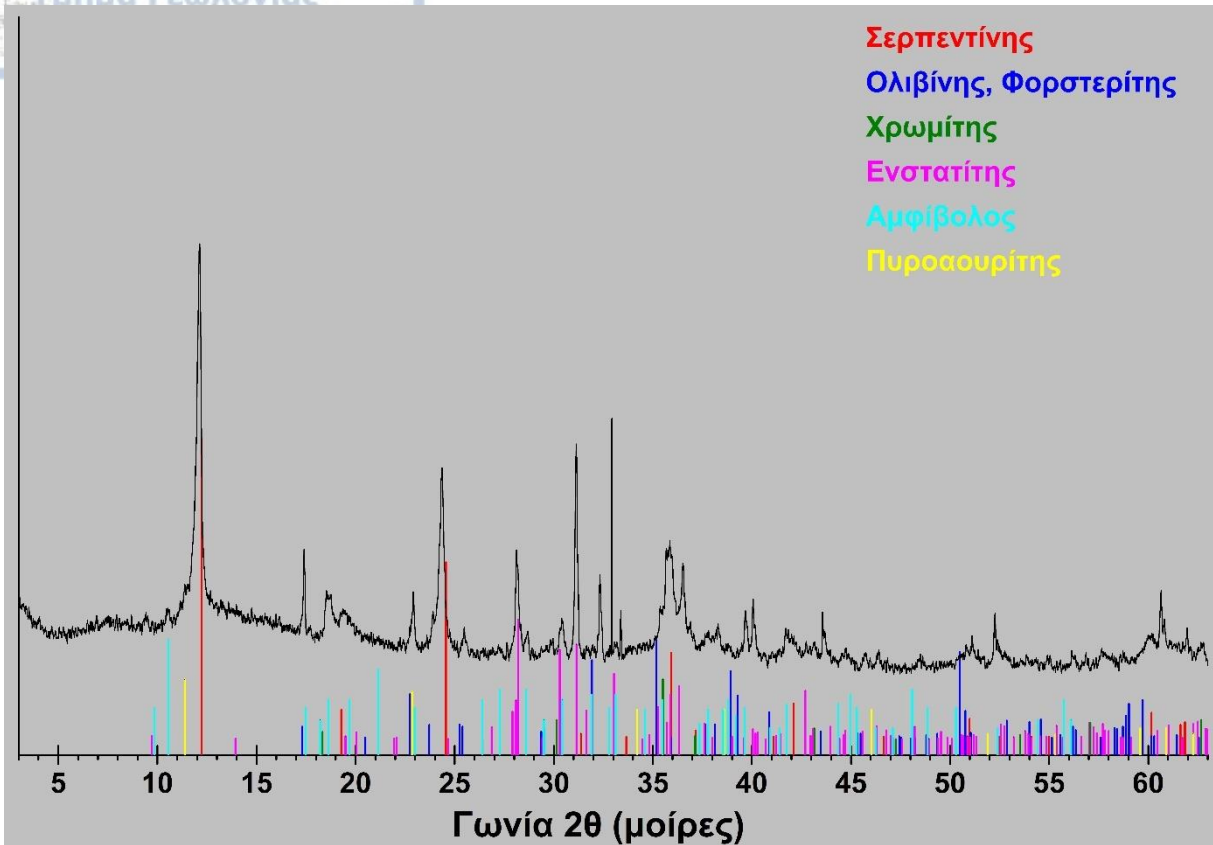


Περιθλασιόγραμμα του μαγνητικού κλάσματος του 0,3-0,125 mm στα 0,5Α.

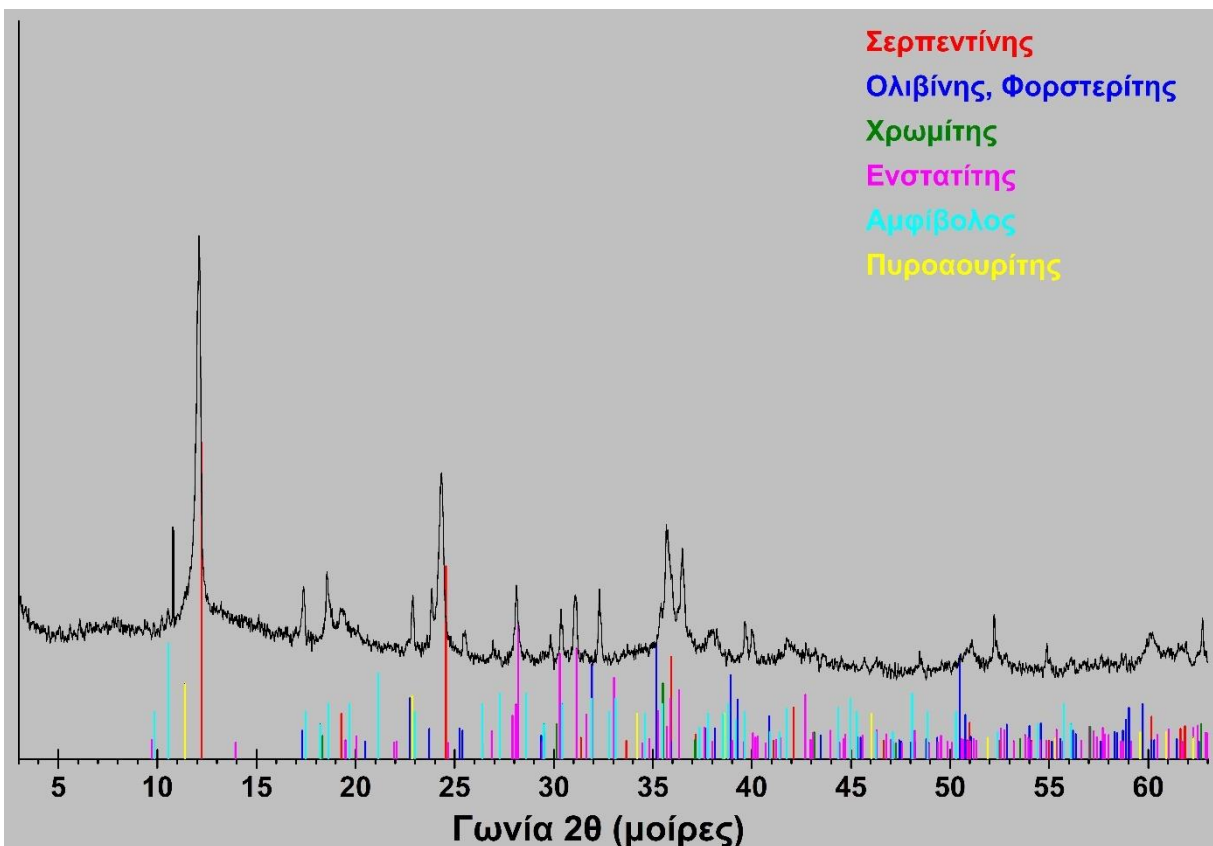


Περιθλασιόγραμμα του μη μαγνητικού κλάσματος του -0,125 mm στα 0,5Α.

**Δείγμα S4**

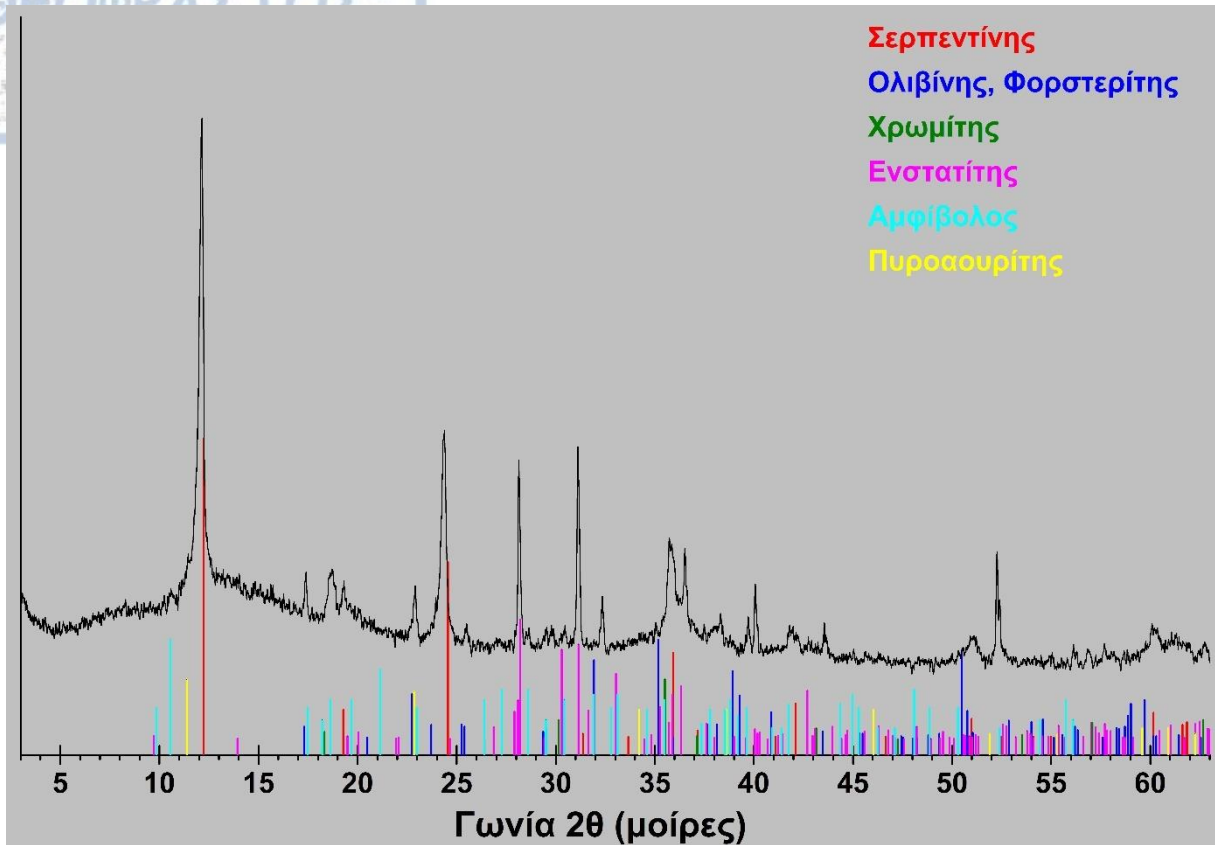


Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος 2,0-1,5 mm.

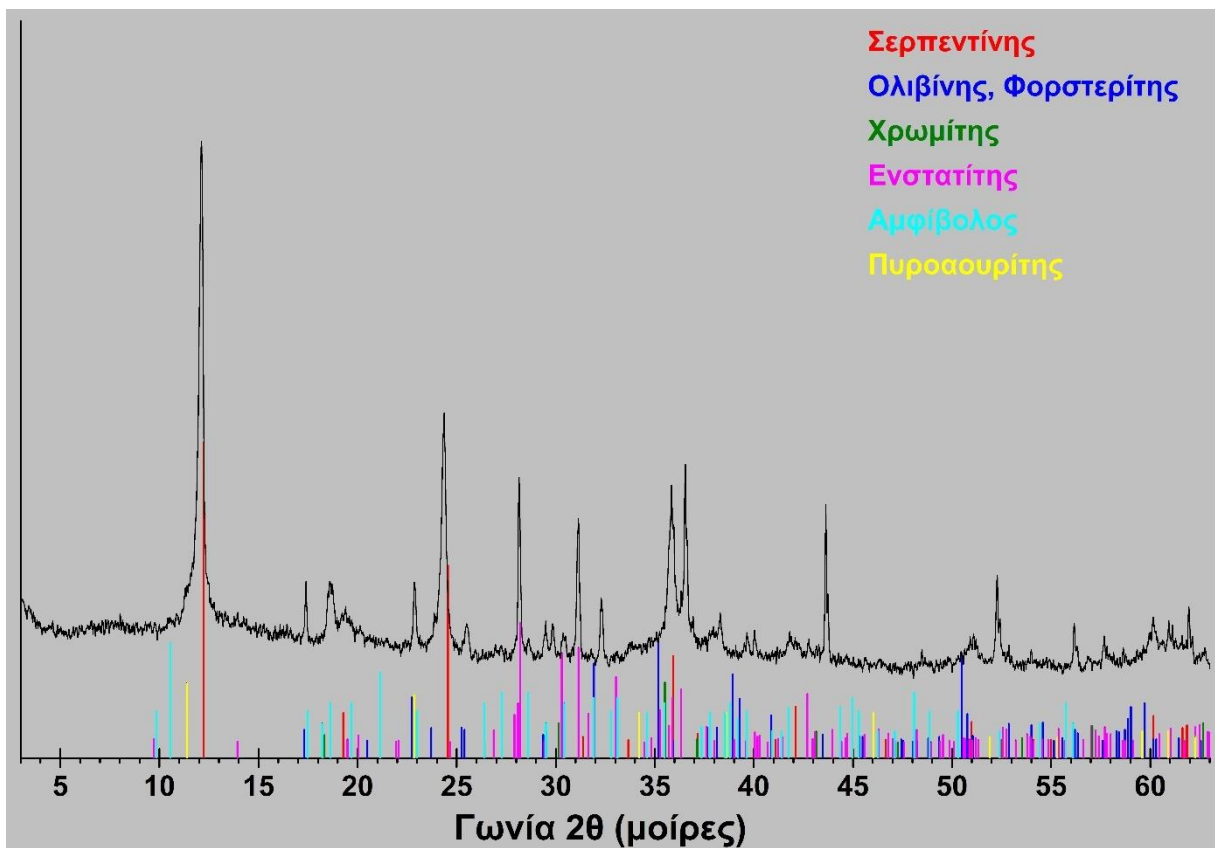


Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος 1,5-1,0 mm.

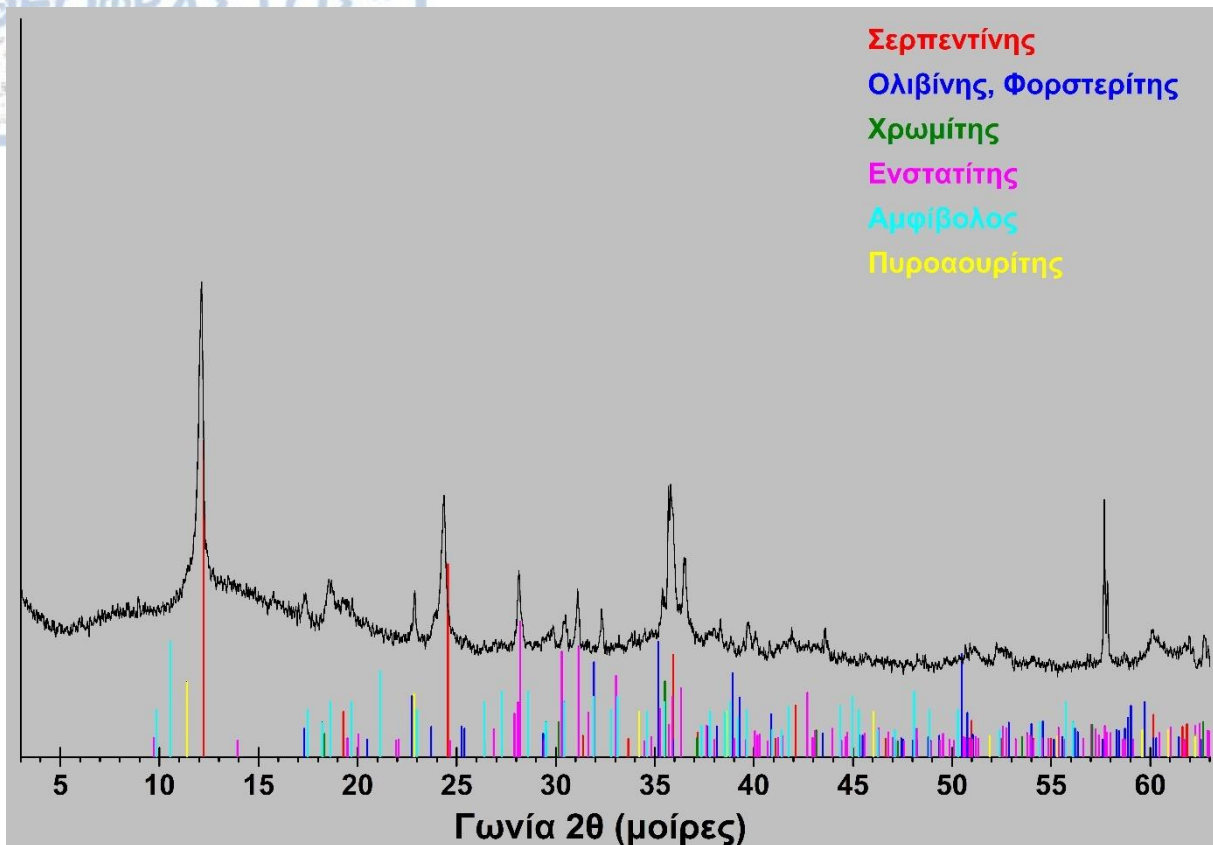




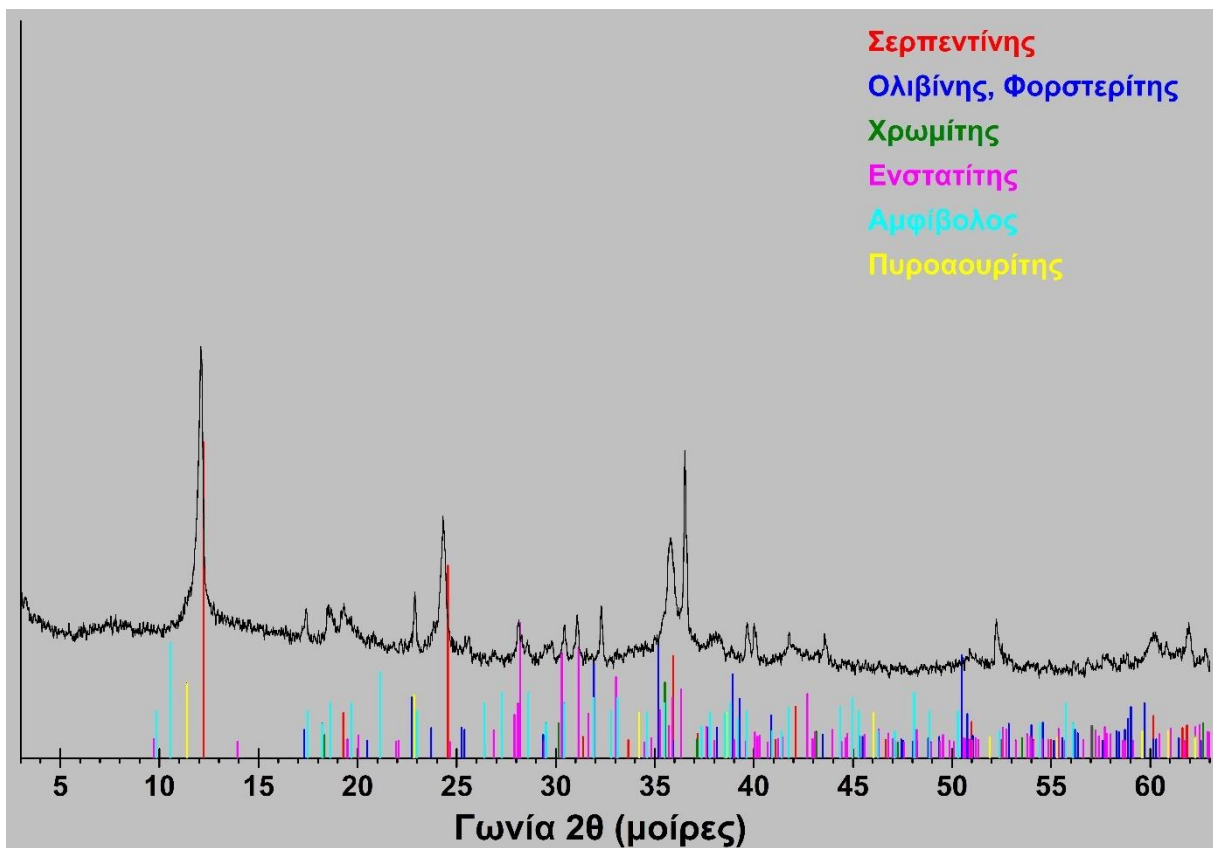
Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος 1,0-0,5 mm.



Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος 0,5-0,3 mm.



Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος 0,3-0,125 mm.



Περιθλασιόγραμμα του κοκκομετρικού κλάσματος  $<0.125$  mm.