

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ



**«Μελέτη αξιοποίησης της Ερυθράς Ιλύος από την
επεξεργασία του βωξίτη»**

Διπλωματική εργασία

Ευθύμιος Μ. Δρίτσας

Εξεταστική επιτροπή:

Σταμπολιάδης Ηλίας, Καθηγητής (επιβλέπων)

Κορνίτσας Κωνσταντίνος, Καθηγητής

Αλεβίζος Γεώργιος, Επίκουρος Καθηγητής

Χανιά, 2015

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό την αξιοποίηση της ερυθράς ιλύος (red mud), δηλαδή την ανάκτηση οξειδίων του σιδήρου από αυτή. Η ερυθρά ιλύς (E.I.) παράγεται με τη μέθοδο Bayer από την επεξεργασία βωξίτη για την παραγωγή αλουμίνας. Τα πειράματα και οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα εργαστήρια Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων, Ορυκτολογίας και του εργαστηρίου Ανόργανης Γεωχημείας- Οργανικής Γεωχημείας της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Σταμπολιάδη Ηλία, για την επιλογή του θέματος και τη βοήθεια που μου παρείχε καθώς και την καθοδήγησή του κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τον Καθηγητή κ. Κομνίτσα Κωνσταντίνο και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Αλεβίζο Γεώργιο για τις συμβουλές και τις πολύτιμες επισημάνσεις τους.

Ευχαριστώ θερμά τους Διπλ. Μηχ/κούς Ορυκτών Πόρων Παντελάκη Όλγα και Πετράκη Ευάγγελο καθώς επίσης και την Λέκτορα Πεντάρη Δέσποινα για τον χρόνο και την βοήθεια που μου προσέφεραν κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.

Επιπλέον Ευχαριστώ τους Φίλους Σταμάτη Εμμανουηλίδη, Σφαέλο Αλέξανδρο, Δημήτρη Σπυλιάδη, Μιχάλη Μιχάλα, Στράτο Θωμαΐδη, Ελένη Παναγιωταρά καθώς και τους υπόλοιπους συμφοιτητές για την συμπαράστασή τους.

Τέλος ευχαριστώ την οικογένειά μου για τη στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	2
Ευχαριστίες	3
Περιεχόμενα	4
Περίληψη.....	7
Abstract	8
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	9
Μέθοδος “Bayer”	10
1.1.Τα στάδια δημιουργίας της ερυθράς ιλύος από την διεργασία Bayer	10
1.1.1.Θραύση του βωξίτη	10
1.1.2.Ανάμιξη-Εκχύλιση	10
1.1.3. Αραίωση	10
1.1.4.Διαχωρισμός της ερυθράς ιλύος.....	11
1.2.Χημική και ορυκτολογική σύσταση ερυθράς ιλύος	11
1.3. Διαχείριση Ερυθράς ιλύος.....	12
1.3.1. Αξιοποίηση Ερυθράς ιλύος	13
1.3.1.1. Μεταλλουργικές χρήσεις.....	13
1.3.1.2. Παραγωγή τσιμέντου.....	14
1.3.1.3. Ως καταλύτης	14
1.3.1.4. Ως αδρανές υλικό (filler).....	14
1.3.1.5. Ως υλικό προσρόφησης ή εξουδετέρωσης.....	15
1.3.1.6. Παραγωγή δομικών κεραμικών	15
1.3.1.7. Παραγωγή άλλων υλικών	15
1.3.1.8. Άλλες χρήσεις.....	16
Κεφάλαιο 2: Μεθοδολογία εργαστηριακών δοκιμών.....	17
2.1.Χημική ανάλυση δείγματος.....	17
2.1.1.Φασματομετρία Ατομικής Απορρόφησης	17
2.1.2. Φθορισμετρίας ακτίνων-X (XRF)	19
2.1.3.Χημικές αναλύσεις	21
2.2.Ορυκτολογική ανάλυση δείγματος.....	24
2.3. Κοκκομετρικές αναλύσεις	25

2.3.1.Κοκκομετρικές αναλύσεις με κοκκομετρικό αναλυτή Laser.....	25
2.3.2.Υδροκυκλώνας	27
2.3.3. Σύστημα ταξινόμησης λεπτόκοκκου υλικού με υδροταξινομητή Warman.....	28
2.4. Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA)	30
2.5. Μαγνητικός διαχωρισμός	34
Κεφάλαιο 3: Πειραματική διαδικασία.....	36
3.1.Κοκκομετρική και χημική ανάλυση της ερυθράς ιλύος με σύστημα διαδοχικών κυκλώνων (Warman).....	37
3.1.1.Αποτελέσματα κοκκομετρικών και χημικών αναλύσεων.....	39
3.1.2. Αποτελέσματα ορυκτολογικών αναλύσεων	40
3.2.Ταξινόμηση ερυθράς ιλύος με την χρήση Υδροκυκλώνα	41
3.2.1.Αποτελέσματα κοκκομετρικής κατανομής και των αντίστοιχων χημικών αναλύσεων στα κλάσματα του Υδροκυκλώνα	42
3.3.Εμπλουτισμός ερυθράς ιλύος με μαγνητικό διαχωρισμό	46
3.3.1.Μαγνητικός διαχωρισμός στην 1 ^η Υπερχείλιση συναρτήσει σφαιρών διαφορετικής διαμέτρου ..	47
3.3.2.Μαγνητικός διαχωρισμός στην 1 ^η Υπερχείλιση	49
3.3.3.Μαγνητικός διαχωρισμός στην 2 ^η Υπερχείλιση	51
3.3.4.1.Μαγνητικός διαχωρισμός στην Απορροή.....	53
3.3.4.2.Αποτελέσματα ορυκτολογικών αναλύσεων στα προϊόντα του μαγνητικού διαχωρισμού της 2 ^{ης} Απορροής	55
3.4. Πρώτη σειρά πειραμάτων.....	56
3.4.1.Μαγνητικός διαχωρισμός στα μαγνητικά προϊόντα της 2 ^η Απορροής	56
3.4.2.Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού στο Μαγνητικό 1 της Απορροής.....	57
3.4.3.Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού στο Μαγνητικό 2 της Απορροής.....	59
3.5. Δεύτερη σειρά πειραμάτων	61
3.5.1.Μαγνητικός διαχωρισμός στην Απορροή σε υψηλή ένταση (8 Ampere).....	61
3.6. Τρίτη σειρά πειραμάτων.....	64
3.6.1.Μαγνητικός διαχωρισμός στο Μαγνητικό 1 (8 Ampere) της Απορροής με χαμηλή ένταση ρεύματος (1,5 Ampere).....	64
3.6.2.Μαγνητικός διαχωρισμός στο Μαγνητικό 1 (8 Ampere) της Απορροής με υψηλή ένταση ρεύματος (8 Ampere)	67
3.7. Τέταρτη σειρά πειραμάτων	70

3.7.1.Μαγνητικός διαχωρισμός σε δείγμα της 1 ^{ης} Υπερχείλισης (Overflow 1) που πυρώθηκε στους 650°C για τέσσερις ώρες	70
3.7.2.Μαγνητικός διαχωρισμός σε δείγμα την 2 ^η Απορροή που πυρώθηκε στους 650°C και στους 950°C.....	74
Συμπεράσματα.....	78
Βιβλιογραφία.....	79
I. Ελληνική.....	79
II. Ξενόγλωσση	80
III. Ηλεκτρονική.....	82
Παράρτημα.....	83
1.Πίνακες χημικών αναλύσεων.....	83
2.Ακτινογραφήματα	90

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολήθηκε με ένα σημαντικό πρόβλημα της βιομηχανίας. Πιο συγκεκριμένα έχει παρατηρηθεί ότι κατά την παραγωγή αλουμίνας με την μέθοδο Bayer παράγονται μεγάλες ποσότητες ερυθράς ιλύος (80 εκατομμύρια τόνοι παγκοσμίως) οι οποίες με την σειρά τους αποθέτονται στην θάλασσα ή σε τεχνητές λίμνες, προκαλώντας έτσι ένα σοβαρό περιβαλλοντικό πρόβλημα. Επειδή είναι γνωστό πως στην ερυθρά ιλύ περιέχεται ένα σημαντικό ποσοστό οξειδίων του σιδήρου, θεωρήθηκε σκόπιμο να βρεθεί ένας οικονομικός τρόπος ανάκτησης αυτών των οξειδίων, πράγμα που ταυτόχρονα θα μείωνε το παραπάνω περιβαλλοντικό πρόβλημα. Η έρευνα αυτή παραμένει ως θέμα μεγάλου ενδιαφέροντος αφού μόνο το 2013 κυκλοφόρησαν περισσότερες από 400 επιστημονικές δημοσιεύσεις (συμπεριλαμβανομένων διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας, άρθρα κ.λπ., redmud.org).

Η Ε.Ι. αποτελείται από μίγμα στερεών και μεταλλικών οξειδίων. Το κόκκινο χρώμα της προκύπτει από τα οξείδια του σιδήρου, τα οποία μπορούν να προσεγγίσουν το 60% της μάζας της. Παρόλα αυτά η Ε.Ι. παρουσιάζει υψηλό pH που μπορεί να κυμαίνεται από 10 έως 13. Άλλα οξείδια τα οποία επικρατούν είναι αυτά του αργιλίου, του ασβεστίου, του πυριτίου και του τιτανίου (Wikipedia.org/red_mud).

Abstract

This thesis dealt with a major problem in the industry. More specifically it has been observed that during the production of alumina by Bayer process large amounts of red mud are produced (77 million tons worldwide) which in turn are deposited on the sea or in the ponds, thereby causing a serious environmental problem. Because it is known that the red mud contains a significant proportion of iron oxides, it was considered appropriate to find an economical way to recover these ore which simultaneously reduce the above environmental problem. Remains a topic of great interest since only in 2013 released more than 400 scientific publications (including patents, articles etc. redmud.org).

The red mud consists of a mixture of solids and metal oxides. The red color results from iron oxides, which comprise up to 60% of the mass of red mud. Nevertheless it presents a high ph which may range from 10 to 13. Other dominant oxides are those of aluminum, calcium, silicon and titanium.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Το βιομηχανικό πρόβλημα στο οποίο προσπαθεί να δώσει λύση η παρούσα διπλωματική εργασία είναι η αξιοποίηση της ερυθράς ιλύος η οποία είναι το απόρριμμα της επεξεργασίας του βωξίτη για την παραγωγή αλουμίνας με τη μέθοδο Bayer. Η εταιρία “Αλουμίνιο της Ελλάδος” μέχρι το τέλος του 2011 εναπόθετα την Ε.Ι. στον πυθμένα της θάλασσας. Ωστόσο από τότε έχει προχωρήσει σε μια πρωτοποριακή επένδυση για την κατασκευή δύο φιλτροπρεσσών οι οποίες επιτρέπουν την ασφαλή απόθεση στερεών καταλοίπων βωξίτη. Σύμφωνα με εξειδικευμένες μελέτες δίνεται η δυνατότητα αξιοποίησης των καταλοίπων αυτών σε διάφορες εφαρμογές όπως στην τσιμεντοβιομηχανία και κεραμοποιία. Για αυτούς τους λόγους το εργαστήριο Εμπλουτισμού της Σχολής των Μηχανικών Ορυκτών Πόρων προσπάθησε να δώσει μια επιπλέον λύση αξιοποιώντας το συγκεκριμένο απόρριμμα δηλαδή η εύρεση ενός τρόπου επεξεργασίας της ερυθράς ιλύος που θα μπορούσε να «σταθεί» σε βιομηχανικό επίπεδο. Η λύση αυτή θα δημιουργούσε νέες θέσεις εργασίας, θα αύξανε τα έσοδα της εταιρίας που θα διαχειριζόταν τα συγκεκριμένα απορρίμματα και θα μείωνε την επιβάρυνση του περιβάλλοντος.

Στην παρακάτω εικόνα έχει φωτογραφηθεί ένα δείγμα Ερυθράς ιλύος μετά την απομάκρυνση του νερού.



Εικόνα 1: Ερυθρά ιλύς μετά την απομάκρυνση στην υγρασίας

Μέθοδος “Bayer”

1.1.Τα στάδια δημιουργίας της ερυθράς ιλύος από την διεργασία

Bayer

Το υλικό είναι το προϊόν από τον εμπλουτισμό του βωξίτη για την παραγωγή αλουμίνας με την μέθοδο “Bayer”. Τα στάδια από τα οποία προκύπτει η ερυθρά ιλύς είναι:

1.1.1.Θραύση του βωξίτη

Ο βωξίτης θραύεται και λειοτριβείται, ώστε το 55% περίπου του βάρους του να έχει μέγεθος μικρότερο από 63μm, ενώ κατά τη λειοτρίβηση αποφεύγεται η δημιουργία μεγάλου ποσοστού λεπτομερών τεμαχιδίων, γιατί η ερυθρά ιλύς που προκύπτει μετά την εκχύλιση καθιζάνει πολύ δύσκολα (*Φραγκίσκος Μ., 2004*).

1.1.2.Ανάμιξη-Εκχύλιση

Μετά τη λειοτρίβηση ο βωξίτης αναμιγνύεται με NaOH και με 3-5% οξειδίου του ασβεστίου και με το αργλικό διάλυμα που προέρχεται από τις συσκευές εξάτμισης στο οποίο έχουν συμπληρωθεί οι απώλειες σε καυστικό νάτριο. Ο πολφός ακολούθως οδηγείται σε μία σειρά αυτόκλειστων όπου γίνεται η εκχύλιση. Η θερμοκρασία στα αυτόκλειστα αυξάνεται διαδοχικά από 100°C στους 258°C, εφόσον πρόκειται για διασπορικό βωξίτη. Μετά την παρέλευση 4-8 ωρών, ο πολφός οδηγείται σε μία σειρά εκτονωτών, όπου η πίεση από 40atm υποβιβάζεται σε 1,5atm.

Με αυτές τις συνθήκες εκχύλισης το αλουμίνιο μεταβαίνει στο διάλυμα με τη μορφή αργλικού νατρίου. Τα άλλα οξείδια του μεταλλεύματος δεν προσβάλλονται και παραμένουν αδιάλυτα (ερυθρά ιλύς). Μέρος του οξειδίου του πυριτίου αντιδρά με το καυστικό νάτριο προς σχηματισμό πυριτικού νατρίου, το οποίο δεσμεύει το διαλυμένο αλουμίνιο αυξάνοντας τις απώλειες. Γενικά αναφέρεται ότι η εκχυλισσιμότητα του βωξίτη εξαρτάται από την ορυκτολογική του σύσταση.

1.1.3. Αραίωση

Μετά την επεξεργασία στα αυτόκλειστα ο πολφός (αργλικό διάλυμα και ερυθρά ιλύς) μεταφέρεται στα δοχεία αραίωσης όπου αναμιγνύεται με υγρά που έχουν προκύψει από την πλύση της ερυθράς ιλύος. Η θερμοκρασία διατηρείται

μεταξύ 95°C και 105°C και η συγκέντρωση του αργιλικού διαλύματος μεταξύ 100-160g/L Na₂O. Σκοπός της αραίωσης είναι η αποφυγή της πρόωρης διάσπασης του αργιλικού διαλύματος.

1.1.4. Διαχωρισμός της ερυθράς ιλύος

Ο πολφός μετά την αραίωση περιέχει 50-60g/L στερεά σωματίδια, την ερυθρά ιλύ. Το μεγαλύτερο μέρος της ερυθράς ιλύος αποτελείται από πολύ λεπτομερή κοκκομετρικά κλάσματα των οποίων οι κόκκοι έχουν μέγεθος μεταξύ 0,1 και 20μm. Ο διαχωρισμός τους από το αργιλικό διάλυμα γίνεται σε πυκνωτές ενώ η έκπλυση σε συστοιχία 5-6 συσκευών έκπλυσης (πλυντήρια). Το νερό έκπλυσης σε συνδυασμό με τον αριθμό των σταδίων έκπλυσης καθορίζουν τις απώλειες σε σόδα και διαλυμένη αλουμίνα. Το αργιλικό διάλυμα που προέρχεται από την υπερχειλίση των πυκνωτών περιέχει 20-100mg/L στερεά σωματίδια. Ο διαχωρισμός αυτών των σωματιδίων γίνεται με διήθηση σε φίλτρα σε θερμοκρασία 90-95°C.

1.2. Χημική και ορυκτολογική σύσταση ερυθράς ιλύος

Η ερυθρά ιλύ έχει αρκετά πολύπλοκη σύσταση και ο ορυκτολογικός προσδιορισμός των φτωχών συστατικών είναι πολύ δύσκολος. Οι κύριες φάσεις που εντοπίζονται είναι:

- Αιματίτης α-Fe₂O₃. Είναι από τα συστατικά που αρχικά υπήρχαν στον βωξίτη.
- Ασβεστίτης CaCO₃. Προέρχεται από τον βωξίτη και από την κατεργασία του με CaO.
- Διάσπορο AlO(OH), αντιπροσωπεύει το διάσπορο του βωξίτη που δεν αντέδρασε.
- SiO₂ από τα αρχικά συστατικά του βωξίτη.
- Οξείδια Ca-Al που σχηματίστηκαν κατά την κατεργασία.
- Σύνθετα οξείδια Si- Na- Mg- Ca- Al που σχηματίστηκαν κατά την κατεργασία.

Γενικά η ερυθρά ιλύς περιέχει:

1. Τα αδιάλυτα ορυκτολογικά συστατικά του βωξίτη και
2. Νέες φάσεις που σχηματίζονται κατά την εκχύλιση.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται η χημική σύσταση της Ερυθράς ιλύος σε διάφορες χώρες-εργοστάσια.

Πίνακας 1: Σύγκριση χημικής σύστασης Ερυθράς Ιλύος, παραγόμενης σε διαφορετικές χώρες-εργοστάσια (Paramguru, et al., 2005, Φραγκίσκος Μ., 2004)

Κύρια στοιχεία, κατά βάρος (%)						
Χώρα	Εργοστάσιο	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	SiO ₂ (%)	Απροσδιόριστα (%)
Ινδία	Al. Corp	20,3	19,6	28,0	6,7	25,4
	MALCO	45,2	27,0	5,1	5,7	17,0
	HINDALCO	35,5	23,0	17,2	5,0	19,3
	BALCO	33,8	15,6	22,5	6,8	21,3
	NALCO	52,4	14,7	3,3	8,4	21,1
Ουγγαρία		38,5	15,2	4,6	10,2	31,6
Τζαμάικα		50,9	14,2	6,9	3,4	24,6
Σουρινάμ		24,8	19,0	12,2	11,9	32,1
ΗΠΑ	ALCOA Mobile	30,4	16,2	10,1	11,1	32,2
	Arkansas	55,6	19,0	12,2	4,5	8,8
	Sherwon	50,5	11,1	ίχνη	2,6	35,8
Ταϊβάν		41,3	20,2	2,9	17,9	17,7
Αυστραλία		40,5	27,2	3,5	19,9	8,9
Ελλάδα	Αλουμίνιον της Ελλάδος	41,0	14,7	4,8	7,5	32,1

Παρατηρείται ότι η Ερυθρά ιλύς που παράγεται στην Ελλάδα περιέχει 41% οξείδια του σιδήρου ποσοστό που η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό να εμπλουτίσει.

1.3. Διαχείριση Ερυθράς ιλύος

Σε όλες τις περιοχές της γης, στις οποίες παράγεται ερυθρά ιλύς δημιουργούνται περιβαλλοντικά προβλήματα. Τα προβλήματα αυτά οφείλονται κυρίως στον συνδυασμό τριών παραγόντων: της υψηλής αλκαλικότητας του πολφού, της μεγάλης δυσκολίας απομάκρυνσης του περιεχομένου ύδατος και της μεγάλης έκτασης των περιοχών διάθεσης. Η παγκόσμια εμπειρία σχετικά με την διάθεση της ερυθράς ιλύος, δείχνει ότι υπάρχουν τέσσερις γενικοί τρόποι αντιμετώπισης του προβλήματος:

- Η απόθεση στο έδαφος αραιού πολφού ερυθράς ιλύος σε κατάλληλα διαμορφωμένους χώρους,
- η απευθείας απόρριψη στη θάλασσα,

- c. η απόθεση σε παραλίες πίσω από αναχώματα και
- d. η απόθεση σε ασφαλείς στεγανούς χώρους ερυθράς ιλύος υψηλής πυκνότητας πολφού,

είναι οι τέσσερις τρόποι αντιμετώπισης της ερυθράς ιλύος ως τελικό απόβλητο που πρέπει κάπου να απορριφθεί με λιγότερες ή περισσότερες προφυλάξεις. Ο τελευταίος τρόπος αντιμετώπισης είναι η προσπάθεια αξιοποίησης της ερυθράς ιλύος για την παραγωγή κάποιου χρήσιμου υλικού.

1.3.1. Αξιοποίηση Ερυθράς ιλύος

Εκτός από την πρακτική της απόρριψης της ερυθράς ιλύος ως απόβλητο υπάρχει και η τελείως διαφορετική αντιμετώπισή της που περιλαμβάνει επεξεργασία ώστε να ληφθούν όλα σχεδόν τα πολύτιμα συστατικά που περιέχει. Από την επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας προκύπτει ότι υπάρχει μια έντονη ερευνητική δραστηριότητα για την αξιοποίηση της ερυθράς ιλύος. Αναφέρονται δεκάδες ευρεσιτεχνίες και δημοσιεύσεις ερευνητικών εργασιών. Σχεδόν όμως σε καμία χώρα στον κόσμο δεν αναφέρεται εφαρμογή σε βιομηχανική κλίμακα. Η ερυθρά ιλύς μπορεί να αποτελέσει πρώτη ύλη στη Μεταλλουργία για την εξαγωγή των χρήσιμων συστατικών της. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη στη βιομηχανία για την παραγωγή τσιμέντου ή σε διάφορες άλλες εφαρμογές. Και στις δύο περιπτώσεις, σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό, παράγονται νέα απόβλητα που δημιουργούν άλλα προβλήματα στο περιβάλλον και απαιτούν διαφορετικούς τρόπους αντιμετώπισης.

1.3.1.1. Μεταλλουργικές χρήσεις

Έχουν αναφερθεί πολλές περιπτώσεις επιτυχούς ανάκτησης κύριων και δευτερευόντων συστατικών της ερυθράς ιλύος. Τα οικονομικά δεδομένα των διεργασιών αυτών δεν είναι ενθαρρυντικά και η διαχείριση της υπολειπόμενης ποσότητας παραμένει ένα ζήτημα. Ως αντιμετώπιση προτείνονται διεργασίες στις οποίες γίνεται ανάκτηση σε διαφορετικά στάδια των περισσότερων συστατικών της ερυθράς ιλύος. Αξίζει να τονιστεί όμως ότι το τελικό υπόλειμμα είναι πιθανό να είναι εμπλουτισμένο στα «ανεπιθύμητα» συστατικά της ερυθράς ιλύος (βαρέα μέταλλα και φυσικά ραδιενεργά στοιχεία). Οι κύριες εφαρμογές αφορούν στην ανάκτηση του σιδήρου και οξειδίων του σιδήρου, του τιτανίου, του βαναδίου, του χρωμίου, του

αργιλίου καθώς και σπάνιων γαιών (*Smirnov and Molchanova, 1997, Çengelöglu, et al., 2001, Tsakanika, et al. 2004, Yang, et al., 2004*).

1.3.1.2. Παραγωγή τσιμέντου

Η μεγάλη παραγωγικότητα των βιομηχανιών τσιμέντου αποτελεί εχέγγυο για σημαντική απορρόφηση ερυθράς ιλύος. Με το δεδομένο ότι δεν χρησιμοποιείται ως αδρανές υλικό (filler) αλλά ως πρώτη ύλη ή πρόσθετο, η ερυθρά ιλύς αποκτά προστιθέμενη αξία και το εγχείρημα αξιοποίησής της καθίσταται πιο ρεαλιστικό. Στα θετικά συγκαταλέγεται ότι είναι μια λύση η οποία μπορεί να εφαρμοστεί σε αρκετές χώρες, καθώς η τεχνογνωσία είναι διαθέσιμη. Αυτό είναι ένα άλλο κίνητρο καθώς πολλές χώρες με μεγάλη παραγωγή ερυθράς ιλύος είναι αναπτυσσόμενες. Στα αρνητικά αυτής της προσέγγισης σημειώνεται το πιθανώς αυξημένο φορτίο της ερυθράς ιλύος σε βαρέα μέταλλα έναντι άλλων προσθέτων/Α' υλών (*Mymrin, et al., 2003, Tsakiridis, et al., 2004*).

1.3.1.3. Ως καταλύτης

Η έρευνα στη δυνατότητα χρήσης της ερυθράς ιλύος ως καταλύτη είναι επίσης εκτεταμένη τα τελευταία χρόνια. Έχει χρησιμοποιηθεί, μετά από επεξεργασία, στην υδρογόνωση και αποχλωρίωση (hydrodechlorination) οργανικών ενώσεων (*Pirkanniemi and Sillanpaa, 2002*), ως υπόστρωμα στην καταλυτική οξείδωση (πτητικών) οργανικών ενώσεων, στην μετατροπή παραπροϊόντων ορυκτέλαιου και πλαστικού από αστικά απορρίμματα σε καύσιμο (*Cakici, et al., 2004*), στην καταλυτική καύση του μεθανίου (*Paredes, et al., 2004*) και σε πολλές άλλες διεργασίες.

1.3.1.4. Ως αδρανές υλικό (filler)

Η ερυθρά ιλύς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αδρανές υλικό (filler). Κύριες εφαρμογές είναι ως υπόστρωμα σε δρόμους, στην αποκατάσταση μεταλλείων, και σε εφαρμογές που απαιτείται μικρή υδροδιαπερατότητα, όπως για παράδειγμα στους ΧΥΤΑ και ΧΑΤΑ. Ανάλογα με την εφαρμογή, η ερυθρά ιλύς μπορεί να αποκτήσει τη σχετική προστιθέμενη αξία. Σημαντική έρευνα στον τομέα αυτό έχει πραγματοποιηθεί και στην Ελλάδα ενώ έχουν εκδοθεί και τεχνικές οδηγίες για την

υλοποίηση τέτοιων έργων (Εργαστήριο Οδοποιίας, ΑΠΘ, Εργαστήριο Μεταλλουργίας, ΕΜΠ). Περιοριστικό στοιχείο τέτοιων εφαρμογών είναι το κόστος μεταφοράς.

1.3.1.5. Ως υλικό προσρόφησης ή εξουδετέρωσης

Η έρευνα στο πεδίο αυτό είναι πολύ εκτεταμένη τα τελευταία χρόνια, υπό το πρίσμα της αυστηρότερης περιβαλλοντικής νομοθεσίας και ευαισθητοποίησης. Οι δυνατότητες φαίνονται μεγάλες, εντούτοις παραμένει μετά τη χρήση ένα υλικό που πρέπει να διαχειριστεί. Ως υλικό προσρόφησης, η ερυθρά ιλύς μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αέρια/υγρά ρεύματα για κατακράτηση CO₂ (Jones, *et al.*, 2006, www.publish.csiro.au/paper/EN06018), SO₂ και άλλων αερίων. Με υγρά ρεύματα, η κυριότερη εφαρμογή είναι στην αδρανοποίηση όξινων εκχυλισμάτων, “acid mine drainage” (Komnitsas, *et al.*, 2004, Maddocks, *et al.*, 2004, Munro, *et al.*, 2004, Brunori, *et al.*, 2005). Άλλες χρήσεις αφορούν στην απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου από λύματα (Ho, *et al.*, 1992). Μετά από προ-επεξεργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δέσμευση βαρέων μετάλλων (Gupta, *et al.*, 2001, Genç-Fuhrman, *et al.*, 2003, Santona, *et al.*, 2006).

1.3.1.6. Παραγωγή δομικών κεραμικών

Σε αντιστοιχία με τη χρήση προς παραγωγή τσιμέντου, η παραγωγή δομικών κεραμικών, όπως τούβλων, κεραμιδιών, πλακιδίων, επιτρέπει σημαντική απορρόφηση ερυθράς ιλύος, που είναι πιθανό να της προσδώσει προστιθέμενη αξία και η πρακτική αξιοποίηση της μπορεί να εφαρμοστεί σε αρκετές χώρες.

1.3.1.7. Παραγωγή άλλων υλικών

Συνήθως οι εφαρμογές αυτές έχουν μικρή ικανότητα απορρόφησης ερυθράς ιλύος και απαιτούν ερυθρά ιλύς με σχετικά σταθερά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά. Στο πεδίο των κεραμικών, έχουν αναφερθεί εργασίες προς παραγωγή υαλοκεραμικών (Peng, *et al.*, 2005), εφυαλώματος, (Yalcin and Sevinc, 2000), και γεωπολυμερών (Wagh and Jeong, 2003). Στο πεδίο των πλαστικών, η ερυθρά ιλύς μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή σύνθετων υλικών (Li, 2003), αλλά και σαν πρόσθετο προσδίδει αντίσταση στις υπεριώδεις (Park and Jun, 2005).

1.3.1.8. Άλλες χρήσεις

Η ερυθρά ιλύς έχει χρησιμοποιηθεί σε γεωργικές χρήσεις σε όξινα εδάφη λόγω της αλκαλικής της φύσης (*Maddocks, et al., 2004*) σε αμμώδη εδάφη για να αυξήσει την κατακράτηση του φωσφόρου (*Summers, et al., 1993*) και σε άλλες εφαρμογές. Η ερυθρά ιλύς μπορεί να συμβάλλει στη λύση άλλων περιβαλλοντικών προβλημάτων και συγκεκριμένα στην απορρόφηση του SO₂ και H₂S που περιέχονται στα καυσαέρια βιομηχανιών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία τσιμέντου εξαιτίας της περιεκτικότητας σε αιματίτη που δρα ως ρυθμιστής στη παραγωγή των υδραυλικών κρυσταλλικών φάσεων.

Μπορούν επίσης να παραχθούν δομικά υλικά (τούβλα, κεραμίδια, πλάκες) και αδρανή. Χαρακτηριστικό είναι ότι η ερυθρά ιλύς μπορεί να αναμιχθεί με άλλα απορρίμματα, όπως η ιπτάμενη τέφρα ώστε να παραχθούν τούβλα. Άλλες ερευνητικές προσπάθειες για εφαρμογές είναι η παραγωγή υαλωδών κεραμικών, χρώμα για σκυρόδεμα, προστατευτικό χρωμάτων για χάλυβες και προστατευτικό επιστρωμάτων για σκυρόδεμα. Για την αξιοποίηση της ερυθράς ιλύος ο Κοντόπουλος (1978) ερευνήσε την δυνατότητα μαγνητικού διαχωρισμού μετά από αναγωγική φρύξη και εκχύλιση με HCl και SO₂. Είναι φανερό ότι τα πεδία αξιοποίησης της ερυθράς ιλύος είναι μεγάλα και ποικίλα, αλλά δυστυχώς, η πολύπλοκη σύνθεσή της, το λεπτομερές των τεμαχιδίων της, η παραμένουσα υψηλή υγρασία, δηλαδή η δυσχέρεια απομάκρυνσης του περιεχόμενου νερού με οικονομικά μέσα, την καθιστούν ένα δύσκολα αξιοποιήσιμο απόβλητο.

Κεφάλαιο 2: Μεθοδολογία εργαστηριακών δοκιμών

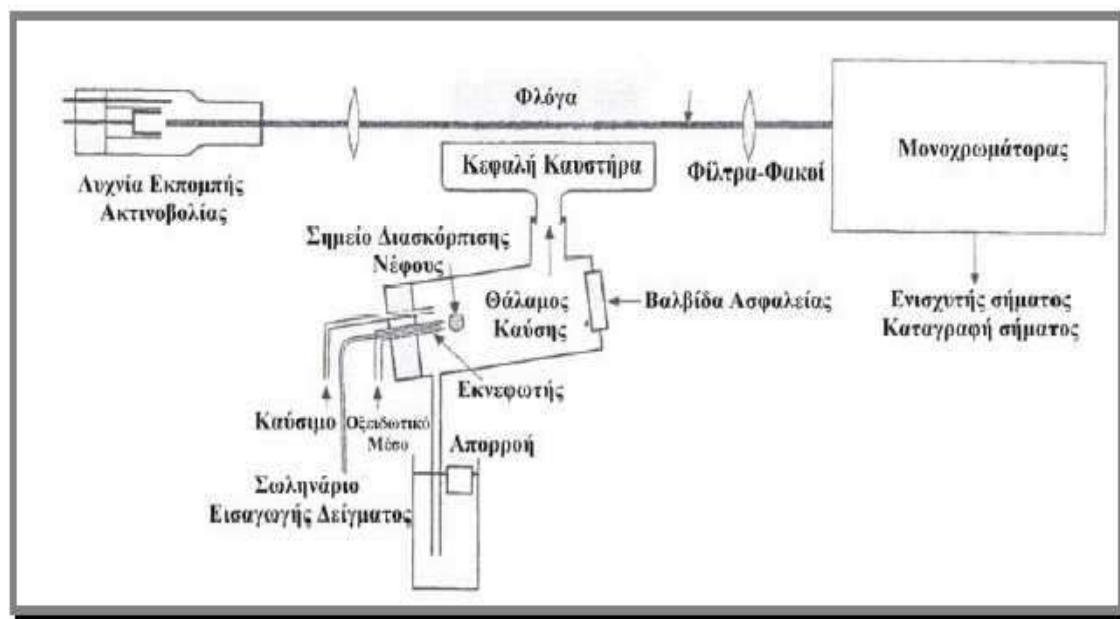
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια περιγραφή των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για την ορυκτολογική (XRD), χημική και κοκκομετρική ανάλυση (Σύστημα διαδοχικών κυκλώνων-Υδροκυκλώνα) των δειγμάτων καθώς επίσης και για την διαδικασία του μαγνητικού διαχωρισμού. Ακόμα γίνεται αναφορά για την Διαφορική θερμική ανάλυση, τον δείκτη ευτηκτότητας και την έννοια των μεταλλομονάδων.

2.1.Χημική ανάλυση δείγματος

Η χημική ανάλυση του δείγματος παρέχει τη δυνατότητα της αναγνώρισης των οξειδίων που περιέχονται μέσα σε αυτό. Οι χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας του Πολυτεχνείου Κρήτης με τις μεθόδους της φθορισμετρίας των ακτίνων-X (XRF: X-Ray Fluorescence) και της Φασματομετρίας ατομικής απορρόφησης.

2.1.1.Φασματομετρία Ατομικής Απορρόφησης

Η ιδιότητα που μετράται στους προσδιορισμούς με Φασματομετρία ατομικής απορρόφησης είναι η απορρόφηση ακτινοβολίας από τα ελεύθερα και στη θεμελιώδη κατάσταση βρισκόμενα άτομα του υπό προσδιορισμό στοιχείου.



Σχήμα 1: Σχηματική διάταξη φασματοφωτόμετρου ατομικής απορρόφησης

Κατά τον προσδιορισμό με Φασματομετρία ατομικής απορρόφησης πραγματοποιούνται δύο διαδικασίες. Αρχικά ατομοποιείται το υπό εξέταση στοιχείο και ακολουθεί διέγερση των παραγόμενων ατόμων. Η διέγερση επιτυγχάνεται με απορρόφηση ακτινοβολίας, συγκεκριμένου μήκους κύματος που αντιστοιχεί στην απαιτούμενη ενέργεια για μια ηλεκτρονική μετάπτωση από την θεμελιώδη κατάσταση σε μία διεγερμένη. Όταν ακτινοβολία αυτού του μήκους κύματος διέλθει μέσα από τα άτομα του μεταλλοϊόντος μέρος της απορροφάται ενώ τα άτομα διεγείρονται. Η παρατηρούμενη απορρόφηση είναι ανάλογη της συγκέντρωσης του μεταλλοϊόντος και ακολουθεί τον νόμο των Lambert-Beer.

$$A = \log \frac{P_o}{P} = -\log T = e * b * c$$

Όπου:

A= η απορρόφηση

P_ο= η ισχύς της προσπίπτουσας ακτινοβολίας

P= η ισχύς της εξερχόμενης ακτινοβολίας

T= η διαπερατότητα

b= η απόσταση, μέσα στο διάλυμα, που διανύει η δέσμη της ακτινοβολίας

e= μοριακή απορροφητικότητα

c= συγκέντρωση σε moles/l

Η διάταξη της μεθόδου περιλαμβάνει μία πηγή ακτινοβολίας, ένα κελί ατομοποίησης του δείγματος και έναν ανιχνευτή μονοχρωμάτορα. Η πηγή ακτινοβολίας αποτελείται από μία κυλινδρική λυχνία. Το εσωτερικό του κυλίνδρου αποτελείται από το στοιχείο προς ανίχνευση. Εφαρμόζοντας τάση στη λυχνία ιονίζεται το αέριο που υπάρχει στο εσωτερικό της. Τα κατιόντα του αερίου κατευθύνονται προς την κάθοδο της λυχνίας όπου συγκρούονται με τα άτομα του προς ανίχνευση στοιχείου. Τα παραπάνω έχουν σαν αποτέλεσμα τα άτομα από την κάθοδο να απομακρύνονται ιονισμένα και τελικά να εκπέμπουν ακτινοβολία η οποία είναι χαρακτηριστική για το στοιχείο που ανιχνεύουμε. Για κάθε στοιχείο που ανιχνεύεται απαιτείται διαφορετική λυχνία. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από την λυχνία είναι η ακτινοβολία που απαιτείται για να ιονίσει τα άτομα που παράγονται στον καυστήρα (ατομοποίηση).

Η ροή του καυσίμου και του οξειδωτικού ρυθμίζεται ανάλογα με το στοιχείο που ανιχνεύεται. Μερικά στοιχεία παρουσιάζουν καλύτερη ευαισθησία στην

ανίχνευση όταν η φλόγα είναι οξειδωτική και εμφανίζεται με μπλε πυρήνα, ενώ άλλα στοιχεία απαιτούν αναγωγικές συνθήκες με τη φλόγα να παρουσιάζει λευκό φωτεινό πυρήνα.

Η υψηλή θερμοκρασία της φλόγας μπορεί να προκαλέσει ιονισμό των ατόμων και τελικά μας οδηγεί σε υποεκτίμηση της ποσότητας του στοιχείου που μετράται. Για τον έλεγχο του ιονισμού προσθέτουμε τον κατάλληλο ιονιστή (La στην περίπτωση του Fe). Ο ιονιστής πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε να έχει μικρότερο δυναμικό ιονισμού από το στοιχείο προς ανάλυση. Επιπλέον τα διαλύματα τα οποία εξετάζονται πρέπει να έχουν τα ίδια φυσικά χαρακτηριστικά με τα πρότυπα που χρησιμοποιήθηκαν για τη κατασκευή των καμπύλων αναφοράς.

2.1.2. Φθορισμομετρία ακτίνων-X (XRF)

Η φασματοσκοπική μέθοδος της φθορισμομετρίας των ακτίνων-X (XRF: X-Ray Fluorescence) είναι η αναλυτική τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως στον προσδιορισμό κύριων και ιχνοστοιχείων σε πετρώματα.

Ένα φασματόμετρο XRF χρησιμοποιεί την πρωτογενή ακτινοβολία ακτίνων-X από μια λυχνία ανόδου για να διεγείρει το δείγμα. Το διεγερμένο δείγμα εκπέμπει δευτερογενείς ακτίνες-X (Φθορισμομετρία ακτίνων-X) με χαρακτηριστικά μήκη κύματος και ένταση ανάλογα με τα χημικά στοιχεία του δείγματος και την ποσότητα τους αντίστοιχα. Για την διεξαγωγή των αναλύσεων υπάρχουν δύο μέθοδοι, η standard-less και η σύντηξη.

Ο τρόπος διεξαγωγής των αναλύσεων με την μέθοδο standard-less έγινε σύμφωνα με την ακόλουθη διαδικασία:

- Λήψη αντιπροσωπευτικού δείγματος από το υλικό
- Πύρωση δείγματος στους 950°C για μία (1) ώρα
- Δημιουργία δισκίων με 5(g) υλικού και 0,5(g) Βορικού οξέος
- Τοποθέτηση δισκίων σε κυλινδρικούς δειγματοφορείς
- Επεξεργασία δεδομένων μέσω μονάδας ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Αντίστοιχα ο τρόπος διεξαγωγής των αναλύσεων με την μέθοδο της σύντηξης έγινε σύμφωνα με την ακόλουθη διαδικασία:

- Λήψη αντιπροσωπευτικού δείγματος από το υλικό

- Πύρωση δείγματος στους 950°C για μία (1) ώρα
- Λήψη 0,1g δείγματος 0,5g συντηκτικού και τοποθέτησή του σε κάψες λευκόχρυσου
- Σύντηξη δείγματος σε θερμοκρασία 980°C
- Διαλυτοποίηση του τηγμένου δείγματος σε ποτήρι ζέσεως με τη βοήθεια αραιού διαλύματος νιτρικού οξέος (5%)
- Κατάλληλη αραίωση και μέτρηση στην ατομική απορρόφηση των στοιχείων Fe, Al, Ca και Si συγκρίνοντάς τα με αντίστοιχα πρότυπα διαφόρων συγκεντρώσεων



Εικόνα 2:Φασματοσκόπιο ακτίνων -X φθορισμού του Εργαστηρίου Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας του Πολυτεχνείου Κρήτης

2.1.3.Χημικές αναλύσεις

Οι χημικές αναλύσεις ξεκίνησαν με την μέθοδο standard-less. Η μέθοδος αυτή παρουσίαζε στα δείγματα που εξετάστηκαν τα εξής χαρακτηριστικά:

- ❖ Υπέρ-εκτίμηση στα οξείδια του σιδήρου (Fe_2O_3)
- ❖ Υπό-εκτίμηση στα οξείδια του αργιλίου (Al_2O_3)
- ❖ Καλά αποτελέσματα στα οξείδια του πυριτίου (SiO_2) και οξείδια του ασβεστίου (CaO)
- ❖ Καλά αποτελέσματα στα οξείδια του τιτανίου (TiO_2)

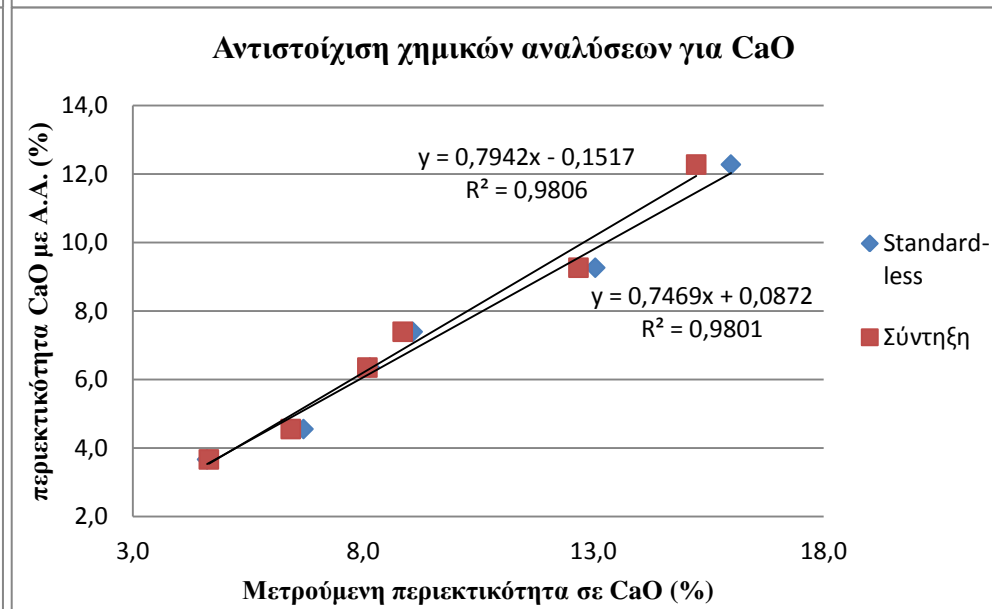
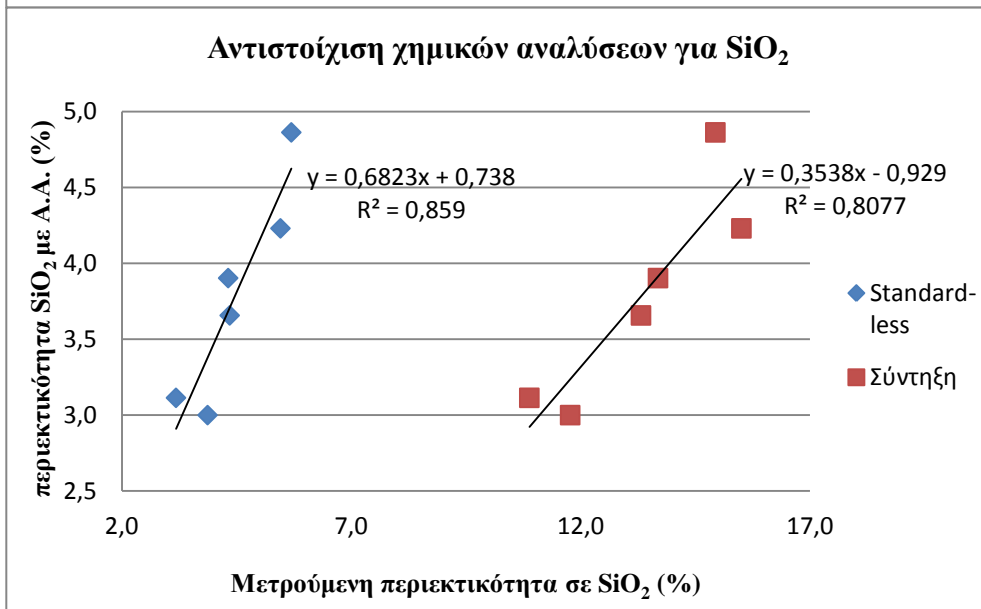
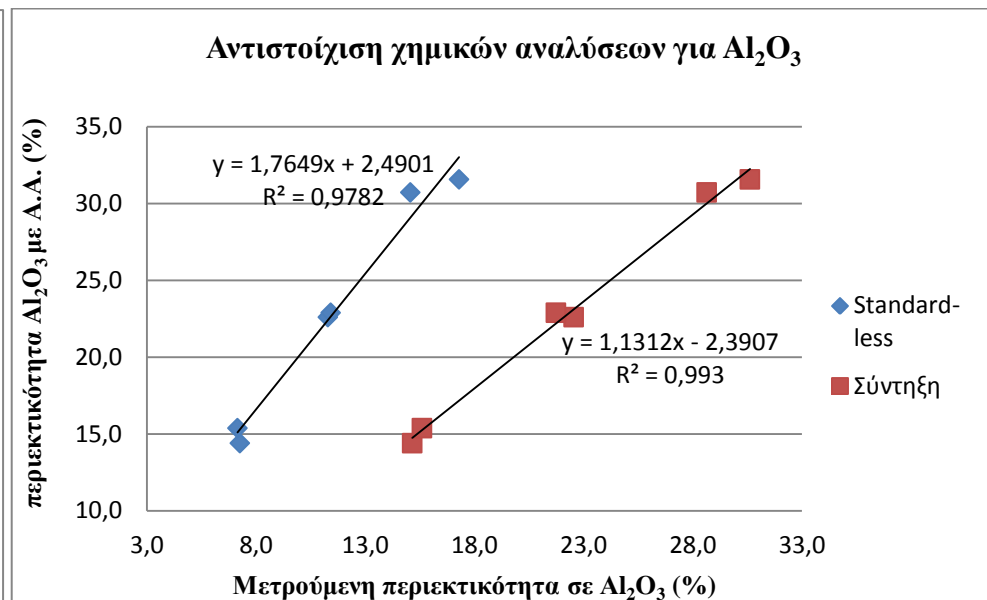
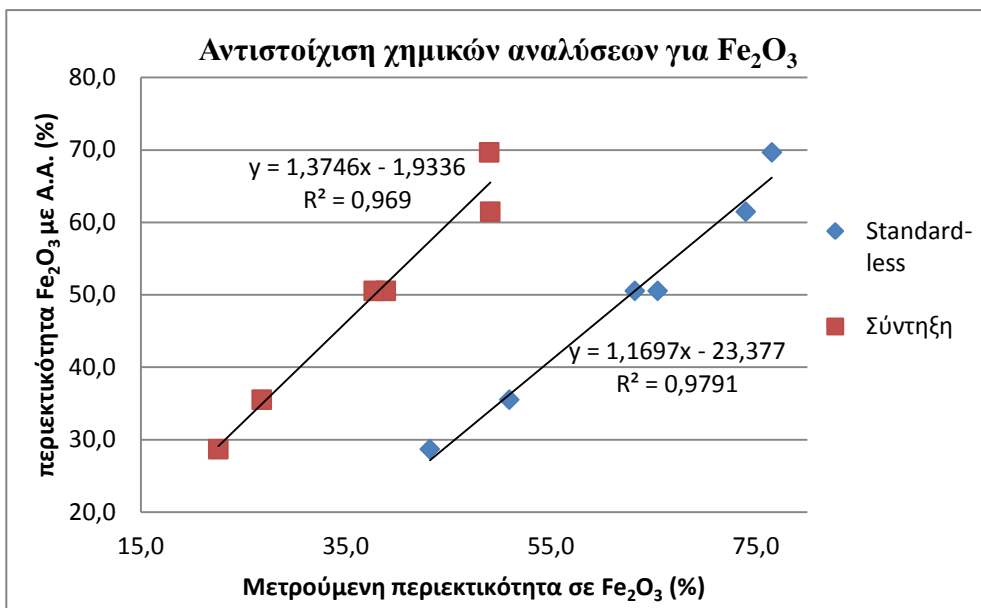
Στα ίδια δείγματα έγιναν χημικές αναλύσεις με την μέθοδο της σύντηξης για να εξακριβωθεί αν παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα από αυτά της προηγούμενης μεθόδου. Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα έδειξαν τα εξής χαρακτηριστικά:

- ❖ Υπό-εκτίμηση στα οξείδια του σιδήρου (Fe_2O_3)
- ❖ Καλά αποτελέσματα στα οξείδια του αργιλίου (Al_2O_3)
- ❖ Υπέρ-εκτίμηση στα οξείδια του πυριτίου (SiO_2)
- ❖ Μικρή υπό-εκτίμηση στα οξείδια του ασβεστίου (CaO)
- ❖ Υπέρ-εκτίμηση στα οξείδια του τιτανίου (TiO_2)

Ένα πρόβλημα που υπήρχε με τη μέθοδο της σύντηξης ήταν ότι δεν μπορούσαν να διατυτοποιηθούν εύκολα τα οξείδια του σιδήρου.

Η τρίτη μέθοδος που δοκιμάστηκε ήταν αυτή της ατομικής απορρόφησης. Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων με αυτή τη μέθοδο παρουσίαζαν πολύ μικρή απόκλιση από τα βιβλιογραφικά δεδομένα, συμφωνούσαν με τις ορυκτολογικές αναλύσεις και είχαν μικρό σφάλμα σε πρότυπα που δημιουργήθηκαν για την επιβεβαίωση αυτών.

Συμπέρασμα των παραπάνω είναι ότι η μέθοδος της ατομικής απορρόφησης προσφέρει τις πιο αξιόπιστες μετρήσεις σε σύγκριση με τις άλλες δύο. Όμως είναι η πιο ακριβή από τις τρεις που αναφέρθηκαν και απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα για την ολοκλήρωση των μετρήσεων. Επίσης δεν δίνεται η δυνατότητα να γίνουν μετρήσεις στα οξείδια του τιτανίου που περιέχει η Ερυθρά ιλύς με τη μέθοδο της Α.Α. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της αντιστοιχίας των χημικών αναλύσεων με τις μεθόδους της σύντηξης και την standard-less για Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 και CaO με αυτές της ατομικής απορρόφησης.



Διάγραμμα 1: Χημικές αναλύσεις ατομικής απορρόφησης σε σχέση με αυτές των μεθόδων Standard-less και σύντηξης

Αξιολογώντας τις παραπάνω επιλογές αποφασίστηκε οι χημικές αναλύσεις να γίνουν με την μέθοδο Standard-less και στην συνέχεια να γίνονται διορθώσεις των τιμών βάση εξισώσεων που υπολογίστηκαν από την σχέση τιμών που έδωσαν οι αναλύσεις με Standard-less και ατομική απορρόφηση.

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτουν οι εξισώσεις με τις οποίες θα γίνει η διόρθωση των τιμών (από τιμές Standard-less σε τιμές ατομικής απορρόφησης).

Η εξίσωση για την διόρθωση των τιμών των οξειδίων του σιδήρου είναι:

$$y = 1.169x - 23.37$$

Η εξίσωση για την διόρθωση των τιμών των οξειδίων του αργιλίου είναι:

$$y = 1.764x + 2.49$$

Η εξίσωση για την διόρθωση των τιμών των οξειδίων του πυριτίου είναι:

$$y = 0.682x + 0.738$$

Η εξίσωση για την διόρθωση των τιμών των οξειδίων του ασβεστίου είναι:

$$y = 0.746x + 0.087$$

2.2.Ορυκτολογική ανάλυση δείγματος

Η περιθλασιμετρία ακτίνων-X ή αλλιώς XRD (X-Ray Diffraction) είναι μια από τις σημαντικότερες μεθόδους προσδιορισμού της ορυκτολογικής σύστασης του πετρώματος. Η μέθοδος αυτή είναι σχετικά φτηνή και γρήγορη και σήμερα έχει αυτοματοποιηθεί και η αξιολόγηση των διαγραμμάτων γίνεται με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Ένα από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ο προσδιορισμός ορυκτών πολύ μικρού μεγέθους, (μικρότερου από τα 2 μm), που δεν διακρίνονται στο οπτικό μικροσκόπιο, όπως είναι τα αργίλικα ορυκτά, τα οποία αποτελούν καθοριστικό παράγοντα φθορά στους λίθους και είναι τα τελικά προϊόντα εξαλλοίωσης σχεδόν όλων των τύπων πετρωμάτων.

Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι ορυκτολογικές φάσεις που περιέχονται σε ποσοστό μικρότερο από 2% κ.ο. συνήθως δεν ανιχνεύονται. Ορισμένες φορές όμως, το συγκεκριμένο μειονέκτημα παρακάμπτεται εμπλουτίζοντας κάποιες από τις ορυκτολογικές φάσεις, που μας ενδιαφέρουν άμεσα, με διάφορους τρόπους και μεθόδους.

Η ορυκτολογική εξέταση των δειγμάτων έγινε στο Εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης με την χρήση περιθλασίμετρου ακτίνων X (XRD: X-Ray-Diffraction Analysis) και του μεταλλογραφικού μικροσκοπίου σε στιλπνές τομές.

Οι αναλύσεις των δειγμάτων έγιναν σε αυτοματοποιημένο σύστημα XRD τύπου D8 Advance της Bruker. Το περιθλασίμετρο συνδέεται με μονάδα ηλεκτρονικού υπολογιστή με τη βοήθεια του οποίου γίνεται όλη η διαδικασία μέτρησης των δειγμάτων.



Εικόνα 3:Περιθλασίμετρο ακτίνων-X του Εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης.

2.3. Κοκκομετρικές αναλύσεις

Ο κοκκομετρικός προσδιορισμός της ερυθράς ιλύος έγινε με τρεις τρόπους:

- με κοκκομετρικό αναλυτή Laser
- με υδροκυκλώνα
- με σύστημα διαδοχικών κυκλώνων (Warman)

2.3.1.Κοκκομετρικές αναλύσεις με κοκκομετρικό αναλυτή Laser

Ο προσδιορισμός της κοκκομετρικής κατανομής της ερυθράς ιλύος έγινε με κοκκομετρικό αναλυτή Laser του Εργαστηρίου Εμπλουτισμού του Πολυτεχνείου Κρήτης (Εικ. 3). Η αρχή λειτουργίας του οργάνου βασίζεται στην εκτροπή των ακτίνων Laser από την ευθεία πορεία τους, όταν αυτές προσπίπτουν σε κόκκους. Η γωνία εκτροπής εξαρτάται από το μέγεθος του κόκκου και συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος, τόσο μικρότερη είναι η γωνία εκτροπής και αντίστροφα. Οι βασικές μονάδες από τις οποίες αποτελείται ο αναλυτής αυτός είναι:

α) Οπτική μονάδα μέτρησης (optical measurement unit)

Η κύρια οπτική μονάδα μέτρησης περιλαμβάνει τα ακόλουθα μέρη:

- Πομπό (transmitter), που περιλαμβάνει τη μονάδα του Laser.
- Δέκτη (receiver), που περιλαμβάνει τη μονάδα του ανιχνευτή.
- Το κελί μέτρησης.
- Φακό (range lens). Ο φακός που χρησιμοποιήθηκε αναλύει κόκκους με μέγεθος 0,5-880 μm .



Εικόνα 3: Κοκκομετρικός αναλυτής Laser του Εργαστηρίου Εμπλουτισμού του Πολυτεχνείου Κρήτης.

β) Μονάδα αιώρησης τον δείγματος (sample suspension unit)

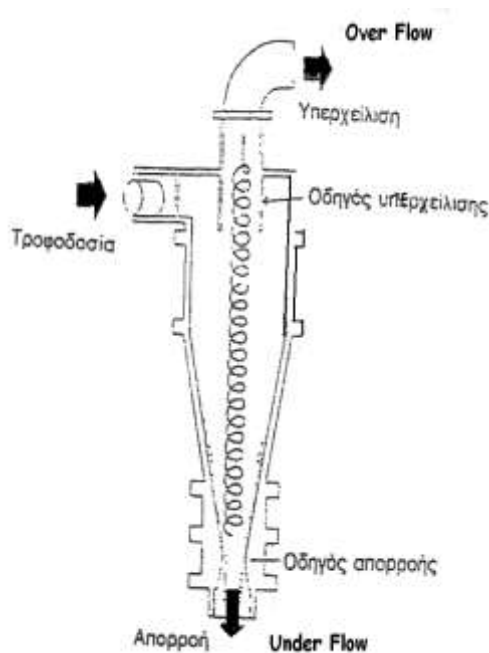
Στην μονάδα αυτή διασπείρεται το προς εξέταση υλικό μέσα σε νερό. Η μονάδα αυτή περιλαμβάνει, ένα σύστημα υπερήχων και ανάδευσης για την διασπορά των συνεκτικών υλικών και για την αποφυγή κροκίδωσης των κόκκων. Κατά την διαδικασία της μέτρησης το αιώρημα με τη βοήθεια μιας αντλίας, κυκλοφορεί συνεχώς μεταξύ του κελιού μέτρησης και της δεξαμενής (sample suspension unit).

γ) Λειτουργικό πρόγραμμα της Malvern

2.3.2. Υδροκυκλώνας

Ο υδροκυκλώνας διαχωρίζει τα στερεά σωματίδια κατά μέγεθος με βάση τη διαφορά της τερματικής ταχύτητας που αποκτούν κατά την καθίζησή τους μέσα σε νερό. Η τερματική ταχύτητα καθίζησης ενός σωματιδίου μέσα σε ένα υγρό εξαρτάται από την διάμετρο του σωματιδίου, αλλά και από την διαφορά πυκνότητας μεταξύ του σωματιδίου και του υγρού.

Μέσα στον υδροκυκλώνα τα σωματίδια κινούνται σε μια κυκλική τροχιά με γραμμική ταχύτητα εφαπτόμενη της τροχιάς της κίνησης. Ως αποτέλεσμα της κυκλικής κίνησης των σωματιδίων εξασκείται σε αυτά μια φυγόκεντρος δύναμη και έτσι οδεύουν γρηγορότερα προς την περιφέρεια και σε συνδυασμό μιας κάθετης δύναμης στην ταχύτητα τα μεγαλύτερα κλάσματα πάνε προς την απορροή. Υπάρχει μια ζώνη ισορροπίας όπου η ταχύτητα είναι μηδενική και τα σωματίδια που βρίσκονται μέσα σε αυτή έχουν την ίδια πιθανότητα να πάνε στα ψιλά ή τα χονδρά. Αυτό είναι το μέγεθος που διαχωρίζει ο υδροκυκλώνας.



Εικόνα 4: Υδροκυκλώνας

2.3.3. Σύστημα ταξινόμησης λεπτόκοκκου υλικού με υδροταξινομητή Warman

Το σύστημα ταξινόμησης λεπτόκοκκου υλικού με υδροταξινομητή Warman απαρτίζεται από πέντε υδροκυκλώνες τοποθετημένους σε σειρά (Εικ. 5), μία δεξαμενή νερού, αντλία, ροόμετρο, μανόμετρο, θερμόμετρο, χρονοδιακόπτη και δοχείο τροφοδοσίας.



Εικόνα 5: Σύστημα ταξινόμησης λεπτόκοκκου υλικού με υδροταξινομητή Warman

Μέσα στον κύλινδρο τα σωματίδια κινούνται σε μία κυκλική τροχιά με γραμμική ταχύτητα V εφαπτομενική της τροχιάς κίνησης. Η ταχύτητα αυτή εξαρτάται από την απόσταση r από το κέντρο του άξονα, τη ζώνη του κυκλώνα και την περιεκτικότητα του πολφού σε στερεά. Λόγω της κυκλικής κίνησης των σωματιδίων εξασκείται σε αυτά μια φυγόκεντρος δύναμη, που δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$F_c = m * V^2 / r$$

Στα μεγαλύτερα σωματίδια με τη μεγαλύτερη μάζα εξασκείται μεγαλύτερη φυγόκεντρος δύναμη και έτσι οδεύουν γρηγορότερα προς την περιφέρεια. Με τη συνεχή εισροή πολφού στον κυκλώνα δημιουργείται και μια οριζόντια κίνηση του νερού από την περιφέρεια προς το κέντρο του άξονα. Η οριζόντια κίνηση παρασύρει τους μικρούς κόκκους προς το κέντρο υπερνικώντας τη φυγόκεντρο δύναμη.

Αντίθετα, στους μεγάλους κόκκους υπερισχύει η φυγόκεντρος δύναμη και οδεύουν προς την περιφέρεια. Υπάρχει όμως και κάποιο μέγεθος κόκκου στο οποίο οι δύο δυνάμεις ισορροπούν.

Εκτός από την περιφερειακή και οριζόντια κίνηση, δημιουργούνται δευτερογενείς κινήσεις του νερού. Η μία, στο άνω μέρος του κυλινδρικού τμήματος του κυκλώνα η οποία βοηθάει την ταξινόμηση των χονδρών κόκκων προς την περιφέρεια και των ψιλών προς το κέντρο. Η άλλη δημιουργείται στο κωνικό τμήμα του κυκλώνα, όπου υπάρχει μια ροή καθοδική προς την απορροή. Όλη αυτή η ροή δεν χωράει να διαφύγει από την απορροή και έτσι αλλάζει φορά και κατευθύνεται προς τα πάνω.

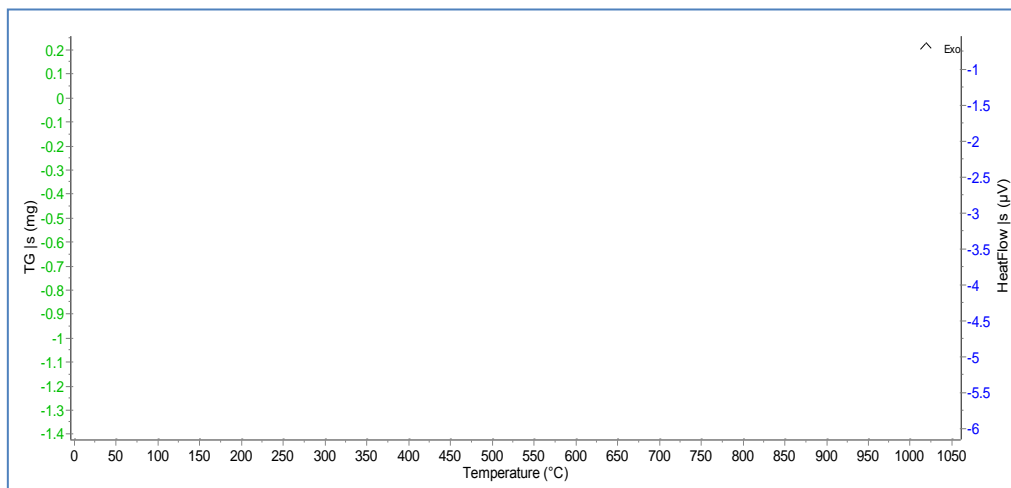
Ο πολφός του προς διαχωρισμού υλικού διοχετεύεται από το δοχείο τροφοδοσίας στο ρεύμα του ρέοντος νερού και μαζί με αυτό εισέρχεται στον κυκλώνα Νο1. Η είσοδος γίνεται εφαιπτομενικά με αποτέλεσμα τα στερεά να φυγοκεντρίζονται και να διαχωρίζονται τα χονδρά προς τα πάνω (apex chamber), ενώ τα ψιλά προς τα κάτω (vortex chamber) και να οδηγούνται στον επόμενο κυκλώνα. Η υπερχείλιση του κάθε κυκλώνα αποτελεί την τροφοδοσία του επόμενου. Κανονικά τα ψιλά του τελευταίου κυκλώνα (No5) απορρίπτονται αλλά επειδή η Ερυθρά ιλύς αποτελείται και από ψιλά με μέγεθος κόκκων $-10\mu\text{m}$, συλλέχθηκε και το τελευταίο κλάσμα.

Τα δείγματα τα οποία συγκεντρώνονται από τις απορροές των κυκλώνων περιέχουν κόκκους μεγέθους μεγαλύτερου αυτού στο οποίο ταξινομεί ο συγκεκριμένος κυκλώνας (πραγματικό μέγεθος διαχωρισμού) και μικρότερου αυτού που ταξινομεί ο προηγούμενος κυκλώνας.

2.4. Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA)

Η διαφορική θερμική ανάλυση περιλαμβάνει την θέρμανση του δείγματος και ενός ουδέτερου δείγματος αναφοράς υπό τις ίδιες συνθήκες, και την καταγραφή οποιασδήποτε διαφοράς θερμότητας μεταξύ του δείγματος και του δείγματος αναφοράς. Αυτή η διαφορά θερμότητας στη συνέχεια σχεδιάζεται συναρτήσει του χρόνου ή της θερμοκρασίας. Αλλαγές στο δείγμα οι οποίες οδηγούν σε απορρόφηση ή έκλυση θερμότητας, μπορούν να ανιχνευθούν σε σχέση με το ουδέτερο δείγμα αναφοράς.

Διαφορά στη θερμότητα μπορεί να προκύψει και μεταξύ δύο ουδέτερων δειγμάτων όταν η απόκρισή τους σε εφαρμοζόμενη θερμική επεξεργασία δεν είναι ίδια. Η διαφορική θερμική ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μελέτη των θερμικών ιδιοτήτων και την μεταβολή των φάσεων που δεν οδηγούν σε αλλαγή της ενθαλπίας. Η βασική γραμμή (baseline) του διαγράμματος της διαφορικής θερμικής ανάλυσης επιδεικνύει σ' αυτήν την περίπτωση ασυνέχειες στις θερμοκρασίες διάδοσης και η κλίση της καμπύλης σε οποιοδήποτε σημείο εξαρτάται από τη σύσταση της μικροδομής στη συγκεκριμένη θερμοκρασία. Μία καμπύλη διαφορικής θερμικής ανάλυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως «αποτύπωμα» για λόγους ταυτοποίησης, όπως για παράδειγμα στη μελέτη των αργίλων όπου οι ομοιότητες στη δομή των διαφόρων μορφών τους καθιστά δύσκολη την ερμηνεία των μετρήσεων περίθλασης. Η περιοχή κάτω από την καμπύλη της διαφορικής θερμικής ανάλυσης μπορεί να οφείλεται στις αλλαγές της ενθαλπίας και δεν επηρεάζεται από την θερμοχωρητικότητα (heat capacity) του δείγματος. Η διαφορική θερμική ανάλυση μπορεί να οριστεί επίσημα ως μία τεχνική καταγραφής της διαφοράς θερμότητας μεταξύ του εκάστοτε δείγματος και ενός υλικού αναφοράς συναρτήσει είτε του χρόνου είτε της θερμοκρασίας, καθώς τα δύο αυτά δείγματα υποβάλλονται σε ακριβώς ίδια θερμική επεξεργασία σε ένα περιβάλλον θερμαινόμενο ή ψυχόμενο με ελεγχόμενο ρυθμό. Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζονται οι δύο γραμμές που αναφερθήκαν παρακάτω.

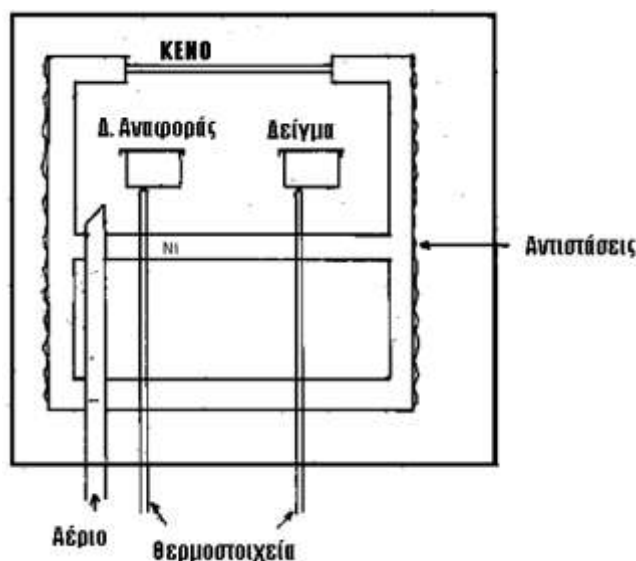


Διάγραμμα 2: Παράδειγμα διαγράμματος διαφορικής θερμικής ανάλυσης

Όπως παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα η μπλε γραμμή (baseline) προκύπτει από την διαφορά θερμότητας μεταξύ του υπό εξέταση δείγματος και του δείγματος αναφοράς σε συνάρτηση με την θερμοκρασία. Η πράσινη γραμμή δείχνει τη απώλεια βάρους του ουδέτερου δείγματος αναφοράς σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται ένα όργανο διαφορικής θερμικής ανάλυσης είναι τα ακόλουθα:

1. Ζεύγος θερμοστοιχείων που περιλαμβάνουν και βάση στήριξης των δειγμάτων, δειγματοφορείς και ένα κεραμικό ή μεταλλικό πλαίσιο (block).
2. Φούρνος.
3. Συσκευή ελέγχου και προγραμματισμού της θερμοκρασίας.
4. Καταγραφικό σύστημα.



Εικόνα 6: Η συσκευή Διαφορικής Θερμικής Ανάλυσης

Τα τρία τελευταία μέρη διατίθενται σε διάφορες εμπορικές μορφές. Η βασική προδιαγραφή ενός φούρνου είναι ότι πρέπει να παρέχει μία σταθερή και επαρκώς ευρεία θερμοκρασιακή περιοχή και πρέπει να αποκρίνεται γρήγορα σε εντολές που του δίνονται από την συσκευή ελέγχου της θερμοκρασίας. Μια συσκευή ελέγχου θερμοκρασίας είναι απαραίτητη προκειμένου να επιτευχθούν σταθεροί ρυθμοί θέρμανσης (ή ψύξης). Το καταγραφικό σύστημα πρέπει να έχει μικρή αδράνεια για να αναπαράγει με αξιοπιστία τις μεταβολές των πειραματικών ρυθμίσεων. Το σύστημα στήριξης των δειγμάτων αποτελείται από δύο θερμοστοιχεία, ένα για το δείγμα και ένα για το δείγμα αναφοράς, που περιέχονται μέσα σε ένα μεταλλικό πλαίσιο (block), ώστε να διασφαλίζεται ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας. Το προς εξέταση δείγμα τοποθετείται σε μια μικρή χοάνη σχεδιασμένη με μια οδόντωση στη βάση για να εφαρμόζει καλύτερα στην αυλάκωση του θερμοστοιχείου. Η χοάνη μπορεί να είναι κατασκευασμένη από υλικά όπως Pyrex, πυριτία, νικέλιο ή πλατίνα, ανάλογα με τη θερμοκρασία και τη φύση των δοκιμών και της χρήσης του οργάνου. Τα θερμοστοιχεία δεν πρέπει να έρχονται σε άμεση επαφή με το δείγμα για να αποφεύγεται τυχόν μόλυνσή του, παρόλο που αυτό μπορεί να επηρεάσει την ευαισθησία τους. Τα μεταλλικά πλαίσια είναι λιγότερο επιρρεπή στις μετακινήσεις της βασικής γραμμής (base-line) συγκρινόμενα με κεραμικά πλαίσια τα οποία έχουν πορώδες.

Από την άλλη πλευρά, η υψηλή τους θερμική αγωγιμότητα οδηγεί σε μικρότερες κορυφές (peaks) της διαφορικής θερμικής ανάλυσης. Το σύστημα που περιστοιχίζει το δείγμα είναι απομονωμένο για αποφυγή πιθανής ηλεκτρικής παρεμβολής από τη συνδεσμολογία του φούρνου με μία γειωμένη κάψα, κατασκευασμένη συνήθως από κεραμικό υλικό με επικάλυψη πλατίνας. Η κάψα αυτή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη διατήρηση του δείγματος σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα ή σε κενό.

Απαιτείται μεγάλη προσοχή στην επιλογή των πειραματικών παραμέτρων. Για παράδειγμα, χαρακτηριστικά του δείγματος, όπως η σύσταση, το μέγεθος και η αναλογία της επιφάνειάς του προς τον όγκο του, επηρεάζουν τις αντιδράσεις διάσπασης της κόνεος (decomposition reactions). Αντίθετα, για δείγματα σε συμπαγή μορφή, οι παραπάνω παράγοντες δεν επιδρούν στις αλλαγές των φάσεων. Συχνά, γίνονται πειραματικές μετρήσεις σε υλικά που είναι σε μορφή κόνεος και συνεπώς τα αποτελέσματα δεν είναι αντιπροσωπευτικά για δείγματα με συμπαγή μορφή, όπου οι μεταβολές μπορεί να ελέγχονται από την ανάπτυξη τάσεων. Η μετατροπή

οποιασδήποτε κόνεος σε δείγμα συμπαγούς δομής, επηρεάζει σημαντικά τις αντιδράσεις διάσπασης και επιφέρει σημαντικές διαφοροποιήσεις σε φαινομενικά ίδια δείγματα. Η μορφή των κορυφών της διαφορικής θερμικής ανάλυσης εξαρτάται από το βάρος του δείγματος και από το ρυθμό ανόδου (ή μείωσης) της θερμοκρασίας. Η μείωση του ρυθμού ανόδου της θερμοκρασίας επιφέρει περίπου ανάλογα αποτελέσματα με τη μείωση του βάρους του δείγματος. Και στις δύο περιπτώσεις το αποτέλεσμα είναι η εμφάνιση πιο έντονων κορυφών, με καλύτερη ανάλυση. Η επίδραση του ρυθμού ανόδου της θερμοκρασίας στη μορφή και τη διάταξη των κορυφών που εμφανίζονται, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την καλύτερη μελέτη των αντιδράσεων διάσπασης.

2.5. Μαγνητικός διαχωρισμός

Μαγνητικός διαχωρισμός είναι η μέθοδος εμπλουτισμού που εκμεταλλεύεται τη διαφορά στις μαγνητικές ιδιότητες των ορυκτών. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε υγρός μαγνητικός διαχωριστής σε δύο εντάσεις, μια χαμηλή (1.5 Ampere) και μία υψηλή (8 Ampere). Προτιμήθηκε ο υγρός διαχωρισμός αντί του ξηρού γιατί η ερυθρά ιλύς αποτελείται κυρίως από λεπτόκκοκο υλικό και έχει 30% υγρασία μετά την διήθηση στην μέθοδο Bayer. Η διαδικασία του μαγνητικού διαχωρισμού μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια.

Στο πρώτο στάδιο το υλικό εισάγεται στο μηχάνημα μέσω ειδικής χωνοειδούς εισόδου, σε μικρές ποσότητες και σταδιακά ώστε να αποφευχθεί ο συνωστισμός των κόκκων που σαν αποτέλεσμα θα είχε το μη σωστό διαχωρισμό.

Στο δεύτερο στάδιο το υλικό περνάει μέσα από μία διάταξη η οποία δημιουργεί ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Στο σημείο της διάταξης αυτής όπου εισέρχεται το υλικό υπάρχει μία δευτερεύουσα διάταξη η οποία αποτελείται από ένα διαμπερές ορθογώνιο το οποίο είναι πληρωμένο με μεταλλικές σφαίρες. Στο κάτω μέρος του ορθογωνίου είναι τοποθετημένη μία σχάρα οι οποία εμποδίζει την διαφυγή των σφαιρών αλλά ταυτόχρονα επιτρέπει την έξοδο του υλικού. Οι μεταλλικές σφαίρες μαγνητίζονται από τον ηλεκτρομαγνήτη και αυτές με την σειρά τους συγκρατούν τους μαγνητικούς κόκκους.

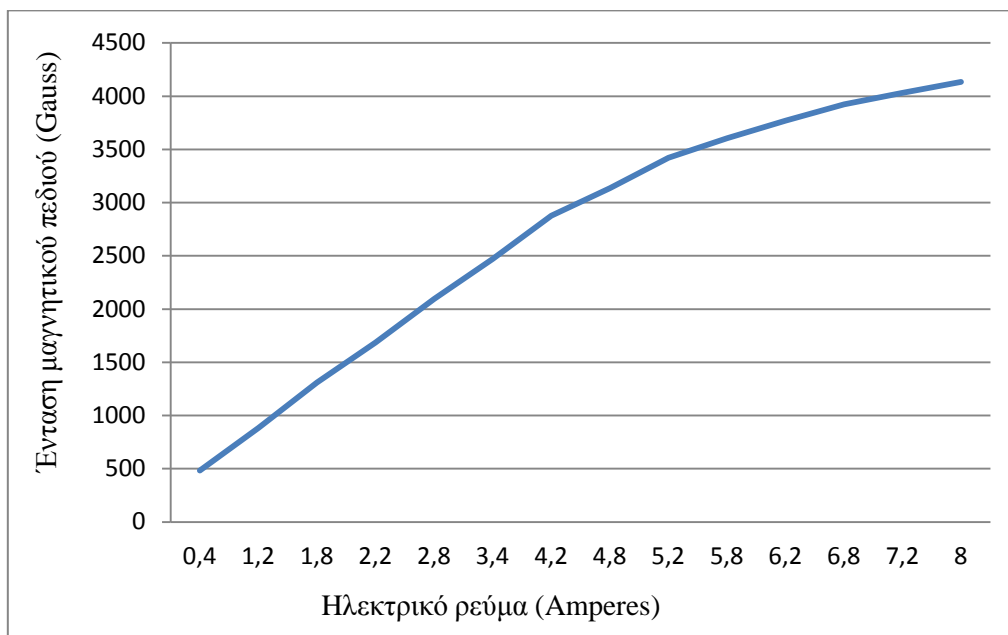
Στο τρίτο στάδιο οι κόκκοι που δεν συγκρατήθηκαν από το μαγνητικό πεδίο συλλέγονται σε ειδικό δοχείο στο κάτω μέρος του μηχανήματος.

Τέλος το μαγνητικό υλικό συλλέγεται από τις μεταλλικές σφαίρες μετά από έκπλυση αυτών με νερό.



Εικόνα 7: Υγρός μαγνητικός διαχωριστής του Εργαστηρίου Εμπλουτισμού

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η σχέση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος και της έντασης του μαγνητικού πεδίου όπως αυτή μετρήθηκε στον μαγνητικό διαχωριστή του εργαστηρίου.



Διάγραμμα 2: Αντιστοιχία έντασης ηλεκτρικού πεδίου (Ampere) με την ένταση του μαγνητικού πεδίου (Gauss)

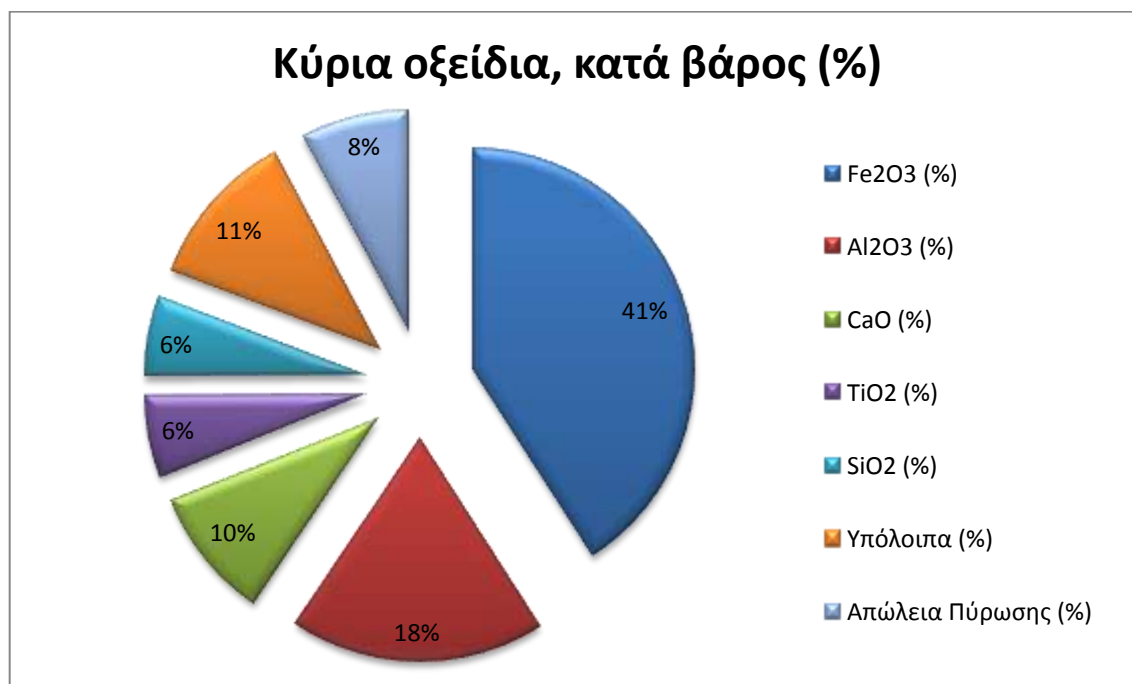
Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι στα 1,5 Ampere αντιστοιχούν 1000 Gauss και στα 8 Ampere αντιστοιχούν 4100 Gauss οι οποίες είναι και οι εντάσεις που πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα.

Κεφάλαιο 3: Πειραματική διαδικασία

Κατά την πειραματική διαδικασία έγιναν κοκκομετρικές αναλύσεις, μαγνητικός διαχωρισμός, χημικές και ορυκτολογικές αναλύσεις.

Οι κοκκομετρικές αναλύσεις έγιναν για να διαπιστωθεί αν το μέγεθος των κόκκων επηρεάζει την ανάλυση των προϊόντων. Ο μαγνητικός διαχωρισμός έχει σκοπό τον διαχωρισμό του υλικού σε μαγνητικό και μη μαγνητικό. Για να συγκριθούν τα αποτελέσματα μεταξύ τους έγιναν χημικές και ορυκτολογικές αναλύσεις.

Η Ε.Ι. αποτελείται από μίγμα στερεών και μεταλλικών οξειδίων. Το κόκκινο χρώμα προκύπτει από τα οξείδια του σιδήρου, τα οποία μπορεί να προσεγγίσουν το 60% της μάζας της Ε.Ι. Παρόλα αυτά παρουσιάζει υψηλό pH που μπορεί να κυμαίνεται από 10 έως 13. Άλλα δεσπόζουσα οξείδια είναι αυτά του αργιλίου, του ασβεστίου, του πυριτίου και του τιτανίου. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ως πρώτη ύλη προέρχεται από την εταιρία “Αλουμίνιο της Ελλάδος”, έχει 30% υγρασία είναι λεπτόκοκκο και η χημική του σύσταση παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 3: Χημική ανάλυση τροφής

3.1.Κοκκομετρική και χημική ανάλυση της ερυθράς ιλύος με σύστημα διαδοχικών κυκλώνων (Warman)

Τα πειράματα ξεκίνησαν με την υδροταξινόμηση με σύστημα διαδοχικών κυκλώνων (Warman) και σκοπός ήταν να ελεγχθεί το μέγεθος των κόκκων του υλικού και αν αυτό επηρεάζει το ποσοστό του σιδήρου.

Δείγμα 100 γραμμαρίων του υλικού τοποθετήθηκε στο δοχείο τροφοδοσίας και αφού ρυθμίστηκε ο χρονοδιακόπτης στα 5 λεπτά, μπήκε σε λειτουργία το σύστημα των διαδοχικών κυκλώνων. Η πυκνότητα του υλικού ήταν 3 γραμμάρια ανά κυβικό εκατοστό και η θερμοκρασία μετρήθηκε στους 18°C.

Από τα παραπάνω δεδομένα υπολογίζονται οι συντελεστές διόρθωσης και στην συνέχεια οι πραγματικές διαμέτροι που «κόβουν» οι κυκλώνες.

Από το σύστημα διαδοχικών κυκλώνων συλλέχθηκαν έξι κλάσματα τα οποία ξηράθηκαν στους 110°C και στην συνέχεια ζυγίστηκαν για να υπολογιστεί η κατανομή βάρους. Δείγμα από τα κλάσματα δόθηκε για χημική ανάλυση.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

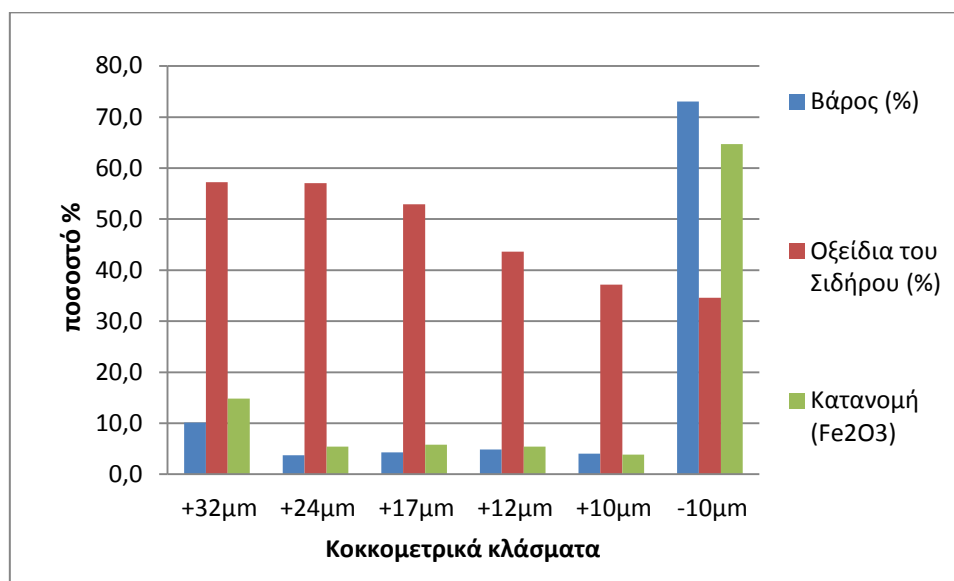
Πίνακας 2:Κοκκομετρική κατανομή και οι αντίστοιχες χημικές αναλύσεις από την υδροταξινόμηση με σύστημα κυκλώνων (Warman)

Μέγεθος Δείγματος (μm)	Κατανομή βάρους επί της τροφοδοσίας (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Fe (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	SiO ₂ (%)	Υπόλοιπα (%)	Απώλεια Πύρωσης (%)	Κατανομή (Fe ₂ O ₃)
+32	10,13	57,3	40,1	15,7	4,1	4,2	2,4	6,6	9,8	14,9
+24	3,7	57,1	39,9	16,8	4,2	4,6	2,9	4,7	9,8	5,4
+17	4,28	52,9	37,1	19,7	4,3	4,9	2,9	4,1	11,2	5,8
+12	4,83	43,7	30,6	19,7	6,4	5,5	3,2	7,9	13,7	5,4
+10	4,02	37,2	26,0	22,2	7,8	6,4	3,4	8,5	14,5	3,8
-10	73,0	34,6	24,2	15,9	11,2	8,7	7,4	12,4	9,8	64,7
Μετρούμενη Τροφή	100	40,9		18,5	9,6	5,9	5,8	11,5	7,8	100,0

Υπολογιζόμενη τροφή	39,0	16,5	9,5	7,7	6,1	10,8	10,2
Μέση τιμή	40,0	17,5	9,6	6,8	6,0	11,1	9,0
Σφάλμα %	2,4	5,8	0,2	13,3	2,7	2,9	13,5

3.1.1. Αποτελέσματα κοκκομετρικών και χημικών αναλύσεων

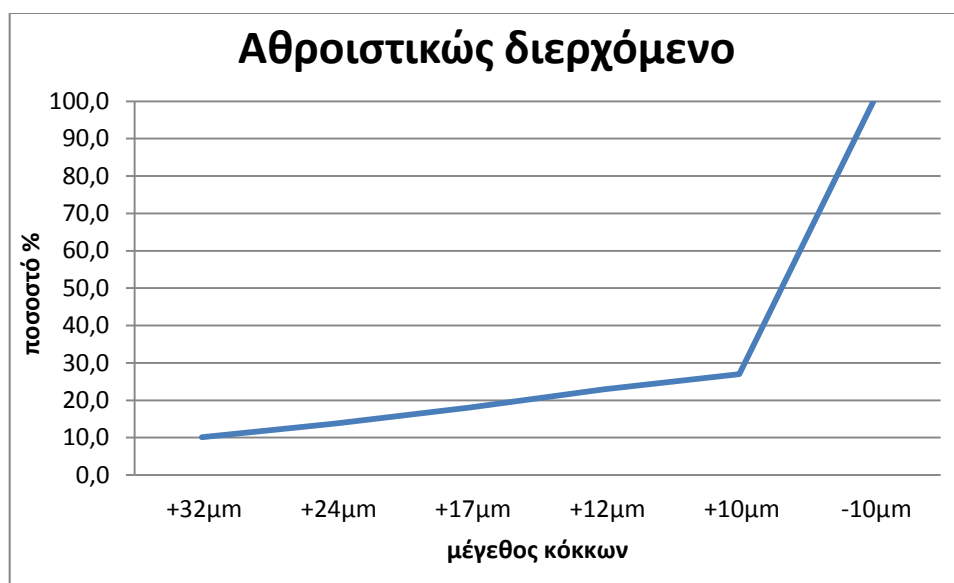
Στο διάγραμμα 3 παρουσιάζεται η Κατανομή βάρους, οξειδίων του σιδήρου και κατανομή του Fe_2O_3 στα έξι (6) κλάσματα του συστήματος διαδοχικών κυκλώνων.



Διάγραμμα 3: Κατανομή βάρους, οξειδίων του σιδήρου και κατανομή του Fe_2O_3 στα έξι (6) κλάσματα του συστήματος διαδοχικών κυκλώνων

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι το ποσοστό των οξειδίων του σιδήρου αυξάνεται όσο μεγαλώνει το μέγεθος των κόκκων.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα του αθροιστικού διερχόμενου βάρους.



Διάγραμμα 4: Αθροιστικό διερχόμενο βάρος

Από τα δύο παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό του υλικού (73%) έχει μέγεθος κόκκων διαμέτρου κάτω από 10 μm .

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν ορυκτολογικές αναλύσεις στα έξι κλάσματα των διαδοχικών κυκλώνων.

3.1.2. Αποτελέσματα ορυκτολογικών αναλύσεων

Στα έξι (6) κλάσματα του συστήματος των διαδοχικών κυκλώνων έγινε ορυκτολογική ανάλυση και τα αποτελέσματά της παρουσιάζονται στον πίνακα Νο3.

Πίνακας 3: Ορυκτολογική σύσταση της ερυθράς ιλύος στα διάφορα κλάσματα της υδροταξινόμησης σε σύστημα κυκλώνων (παράρτημα-ακτινογραφήματα εικόνες 8 μέχρι 13)

Ποσοστό % συμμετοχής των διαφόρων ορυκτολογικών φάσεων ανά κλάσμα							
Συστατικό	Χημικός τύπος	+32μm	+24μm	+17μm	+12μm	+10μm	-10μm
Αιματίτης	Fe ₂ O ₃	30	34	36	26	24	46
Γκαιτίτης	FeO(OH)	7	7	9	5	5	5
Γιψίτης	Al(OH) ₃	0	23	28	39	36	0
Διάσπορο	AlOOH	40	17	5	8	14	10
Βαιμίτης	AlO(OH)	0	1	1	1	1	0
Καολινίτης (1Α)	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	0	0	0	0	0	30
Ασβεστίτης	CaCO ₃	19	13	15	17	17	9
Χαλαζίας	SiO ₂	0	4	4	3	2	0
Ανατάσης	TiO ₂	4	1	2	1	1	0
Σύνολο		100	100	100	100	100	100

Διαπιστώνεται ότι ο σίδηρος (Fe) εμφανίζεται σαν Αιματίτης, στο μεγαλύτερο ποσοστό, και σαν Γκαιτίτης σε μικρότερο ποσοστό. Ο Αιματίτης περιέχει 70% Fe ενώ ο Γκαιτίτης 63%. Από τα ποσοστά συμμετοχής των δύο αυτών ορυκτών καθώς και από το ποσοστό περιεχόμενου Fe σε αυτά προκύπτει ότι το μέγιστο ποσοστό Fe είναι το 69%. Παρατηρείται επίσης ότι το Διάσπορο κατανέμεται κυρίως στα «χονδρά» κλάσματα ενώ αντίθετα ο Καολινίτης καταλήγει στα ψιλά.

Στο επόμενο βήμα πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση της Ε.Ι. με την χρήση Υδροκυκλώνα.

3.2.Ταξινόμηση ερυθράς ιλύος με την χρήση Υδροκυκλώνα

Στον υδροκυκλώνα η πειραματική διαδικασία ήταν η εξής:

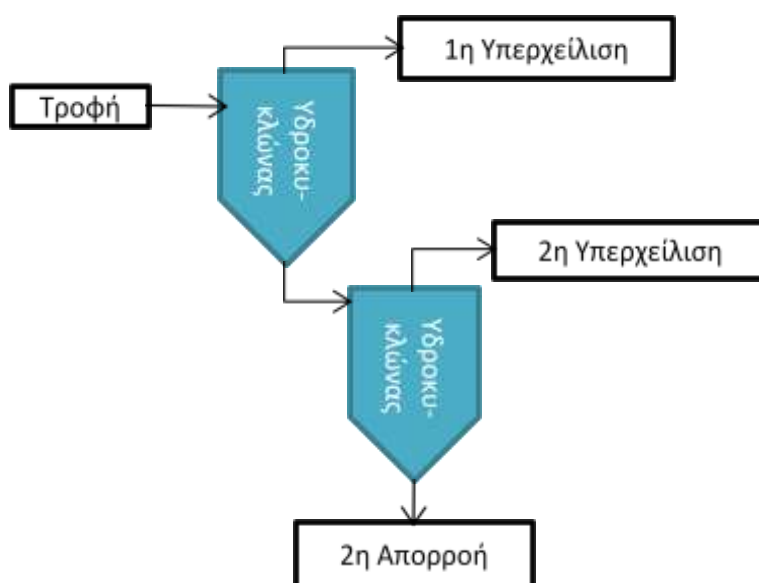
Αραίωση του υλικού (1kg Ερυθράς ιλύος ανά 10kg νερού) και τροφοδοσία αυτού στον υδροκυκλώνα. Στη συνέχεια το υλικό μένει για λίγα λεπτά ώστε να κυκλοφορήσει. Μετά γινότανε ταυτόχρονη συλλογή της υπερχειρίσης και της απορροής. Στην συνέχεια γινότανε επιστροφή της απορροής μέσα στον υδροκυκλώνα και αφού κυκλοφορούσε για λίγα λεπτά έγινε ταυτόχρονη συλλογή της δεύτερης υπερχειρίσης και της δεύτερη απορροής. Έτσι τα προϊόντα από τον υδροκυκλώνα ήταν:

1^η Υπερχείλιση (Overflow 1)

2^η Υπερχείλιση (Overflow 2)

2^η Απορροή (Underflow 2)

Στο ακόλουθο διάγραμμα παρατηρούμε το διάγραμμα ροής του υδροκυκλώνα.



Διάγραμμα 5: Διάγραμμα ροής Υδροκυκλώνα

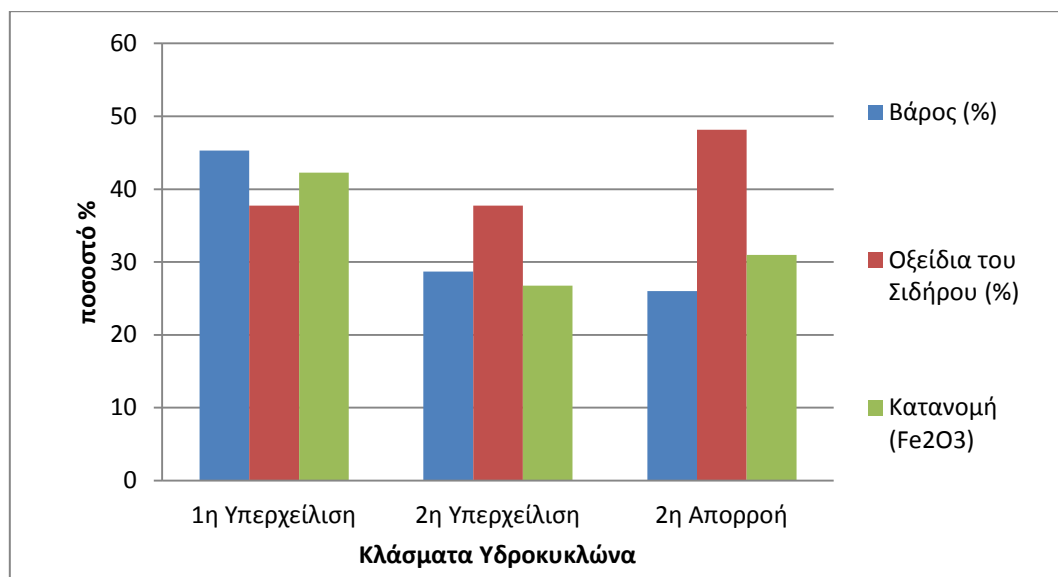
Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο πίνακας με τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής κατανομής μαζί με τις αντίστοιχες χημικές αναλύσεις για τα τρία προϊόντα του υδροκυκλώνα.

3.2.1.Αποτελέσματα κοκκομετρικής κατανομής και των αντίστοιχων χημικών αναλύσεων στα κλάσματα του Υδροκυκλώνα

Πίνακας 4:Κοκκομετρική κατανομή και οι αντίστοιχες χημικές αναλύσεις από τον Υδροκυκλώνα

Περιγραφή δείγματος	Κατανομή βάρους επί της τροφοδοσίας (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Fe (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	SiO ₂ (%)	Υπόλοιπα (%)	Απώλεια Πύρωσης (%)	Κατανομή (Fe ₂ O ₃)
1η Υπερχείλιση	45,3	37,7	26,4	14,6	10,5	6,5	7,0	14,6	9,1	42,3
2η Υπερχείλιση	28,7	37,7	26,4	15,0	11,0	6,8	6,4	14,5	8,6	26,8
2η Απορροή	26	48,2	33,7	21,8	6,4	3,8	3,6	7,4	8,8	31,0
Μετρούμενη Τροφή	100	40,9	-	18,5	9,6	5,9	5,8	11,5	7,8	100,0

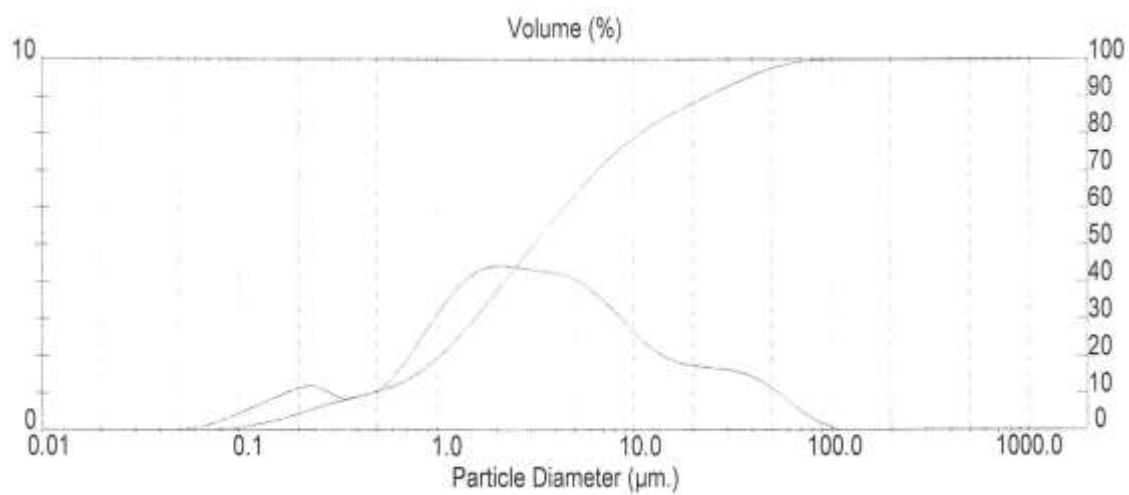
Υπολογιζόμενη Τροφή	40,4	16,6	9,6	5,9	5,9	12,7	8,9
Μέση τιμή	40,7	17,6	9,6	5,9	5,9	12,1	8,3
Σφάλμα %	0,6	5,4	0,0	0,4	1,1	5,1	6,5



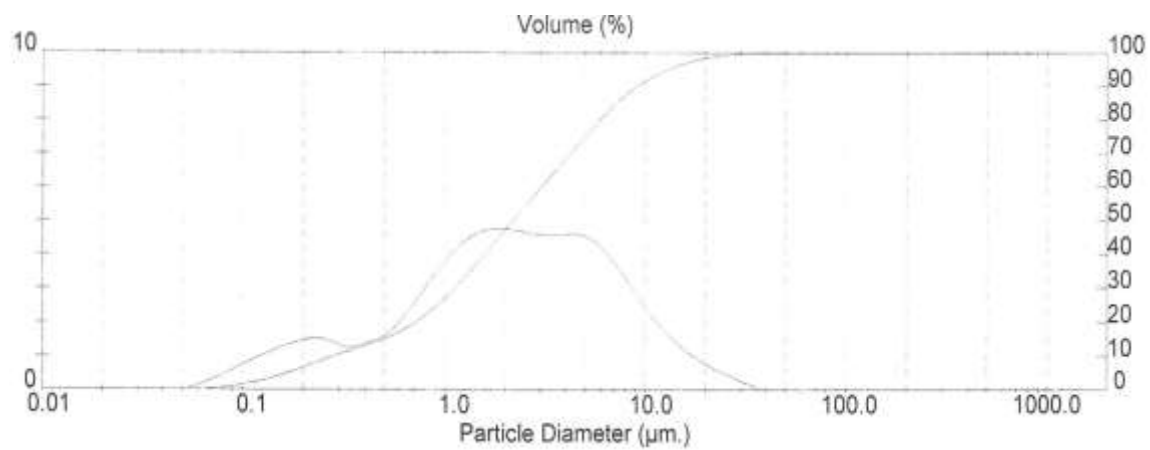
Διάγραμμα 6: Κατανομή βάρους, οξειδίων του σιδήρου και Κατανομή Fe₂O₃ στα τρία κλάσματα του Υδροκυκλώνα

Από τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι η απορροή του υδροκυκλώνα έχει σημαντικά καλύτερα ποσοστά οξειδίων του σιδήρου (Fe₂O₃) σε σχέση με τις δύο υπερχειλίσεις. Αυτό σημαίνει ότι, όπως και στην υδροταξινόμηση με σύστημα κυκλώνων (Warman) έτσι και στην περίπτωση του υδροκυκλώνα, τα οξείδια του σιδήρου έχουν την τάση να καταλήγουν στα χονδρόκοκκα κλάσματα. Ακόμα παρατηρείται αύξηση των οξειδίων του αργιλίου όσο αυξάνεται το μέγεθος των κόκκων. Αντίθετα με την αύξηση του μεγέθους των κόκκων μειώνεται το ποσοστό των οξειδίων του πυριτίου.

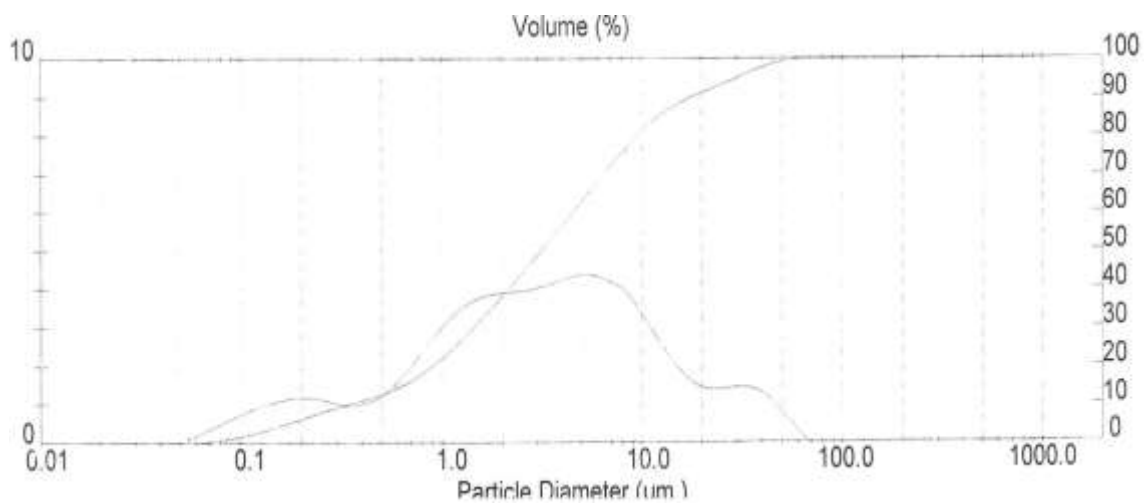
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα του κοκκομετρικού αναλυτή Laser που πραγματοποιήθηκαν στην αρχική τροφή καθώς επίσης και στα τρία προϊόντα του υδροκυκλώνα.



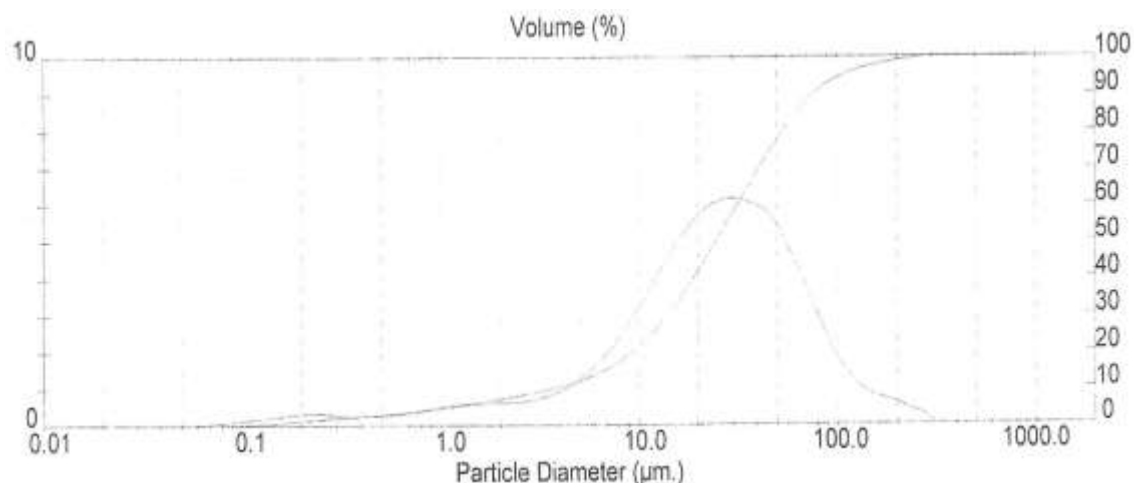
Διάγραμμα 7: Κοκκομετρική ανάλυση της αρχικής τροφής



Διάγραμμα 8: Κοκκομετρική ανάλυση της 1^{ης} Υπερχείλισης



Διάγραμμα 9: Κοκκομετρική ανάλυση της 2^{ης} Υπερχείλισης



Διάγραμμα 10: Κοκκομετρική ανάλυση της 2^{ης} Απορροής

Συνοψίζοντας τα κοκκομετρικά αποτελέσματα προκύπτει η μέση διάμετρος για κάθε δείγμα που μετρήθηκε και παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 5: Μέση διάμετρος για την αρχική τροφή και τα προϊόντα του υδροκυκλώνα

Μέση διάμετρος (μm)	
Αρχική τροφή	8,2
1η Υπερχείλιση	3,8
2η Υπερχείλιση	6,8
2η Απορροή	35,7

Είναι εμφανές ότι η πλειοψηφία του υλικού αποτελείται από κόκκους με μέγεθος μικρότερο των 10μm επαληθεύοντας τα κοκκομετρικά αποτελέσματα του διαχωρισμού με το σύστημα των διαδοχικών κυκλώνων (Warman). Παρόλα αυτά η 2^η Απορροή συλλέγει ένα προϊόν με σημαντικά αυξημένη διάμετρο κόκκων.

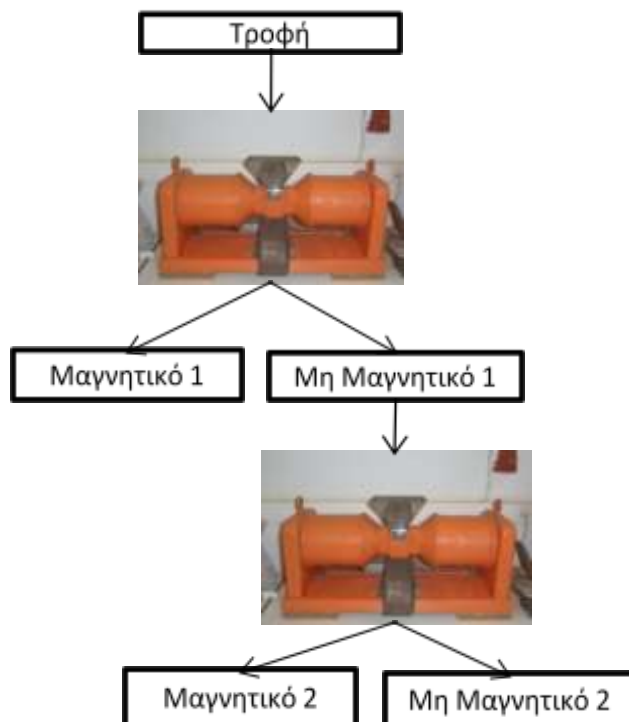
Για την επίτευξη καλύτερου διαχωρισμού τα τρία προϊόντα του υδροκυκλώνα εμπλουτίστηκαν με την μέθοδο του υγρού μαγνητικού διαχωρισμού. Επιλέχθηκε ο υγρός μαγνητικός διαχωρισμός λόγω του μικρού μεγέθους των κόκκων του υλικού όπως φαίνεται και από τα παραπάνω αποτελέσματα.

3.3.Εμπλουτισμός ερυθράς ιλύος με μαγνητικό διαχωρισμό

Πραγματοποιήθηκε μαγνητικός διαχωρισμός στα τρία προϊόντα του υδροκυκλώνα (Υπερχείλιση 1, Υπερχείλιση 2 και Απορροή) ξεχωριστά. Η διαδικασία είχε ως εξής:

- Γινότανε επιλογή αντιπροσωπευτικού δείγματος
- Το δείγμα αυτό εμπλουτιζόταν στον μαγνητικό διαχωριστή σε χαμηλή έντασης ρεύμα (1.5 Ampere) με αποτέλεσμα να παράγεται ένα μαγνητικό προϊόν (Μαγνητικό 1) και ένα λιγότερο μαγνητικό απόρριμμα (Μη Μαγνητικό 1).
- Το απόρριμμα περνούσε ξανά στον μαγνητικό διαχωριστή σε υψηλή έντασης ρεύμα (8 Ampere) και δημιουργούσε ένα λιγότερο μαγνητικό προϊόν (Μαγνητικό 2) και ένα μη μαγνητικό απόρριμμα (Μη Μαγνητικό 2).
- Επανάληψη της διαδικασίας για κάθε προϊόν του υδροκυκλώνα

Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 11: Διάγραμμα ροής Μαγνητικού διαχωρισμού

3.3.1. Μαγνητικός διαχωρισμός στην 1^η Υπερχείλιση συναρτήσεως σφαιρών διαφορετικής διαμέτρου

Στο εργαστήριο Εμπλουτισμού δίνεται η δυνατότητα να πραγματοποιηθεί μαγνητικός διαχωρισμός με την χρήση τριών διαφορετικών διαμέτρων σφαιρών. Τα μεγέθη ήταν 10mm, 12mm, και 22mm. Έτσι έγιναν δοκιμές για να διαπιστωθεί ποιο μέγεθος μπορεί να δώσει τα καλύτερα αποτελέσματα.

Όσο αυξάνεται η διάμετρος των σφαιρών παρατηρείται:

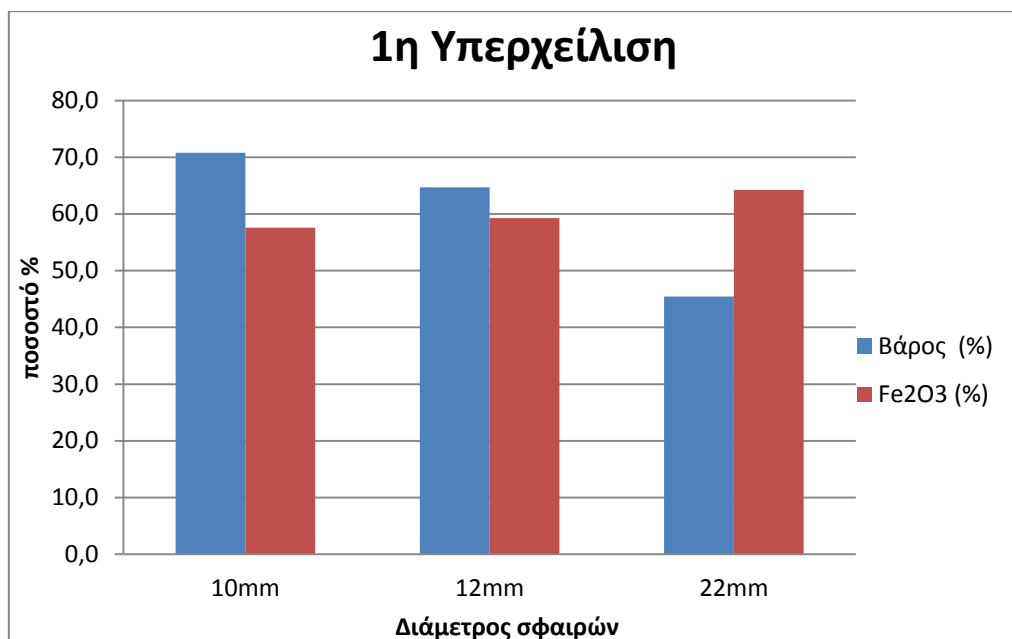
- ✓ Συλλογή των ισχυρά μαγνητικών που είναι πλούσια σε Fe_2O_3
- Απώλειες καθώς τα λιγότερα μαγνητικά παρασύρονται από το νερό στα Μη μαγνητικά

Όσο μειώνεται η διάμετρος των σφαιρών:

- ✓ γίνεται συλλογή και των μαγνητικά ασθενέστερων
- μη μαγνητικά υλικά παγιδευτούν ανάμεσα στα μαγνητικά λόγω υπερπλήρωσης των μικρών κενών μεταξύ των σφαιρών

Το υλικό που δοκιμάστηκε ήταν η πρώτη Υπερχείλιση (Overflow 1) το οποίο περιέχει και το λιγότερο ποσοστό οξειδίων του σιδήρου (Fe_2O_3). Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στα 8 Ampere ένταση πεδίου.

Ακολουθεί το διάγραμμα κατανομή βάρους και οξειδίων του σιδήρου ανάλογα με την διάμετρο των σφαιρών.



Διάγραμμα 12: Κατανομή βάρους και οξειδίων του σιδήρου ανάλογα με την διάμετρο των σφαιρών που χρησιμοποιήθηκαν για μαγνητικό διαχωρισμό στα 8 Ampere

Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το μέγεθος των σφαιρών, αυξάνεται και το ποσοστό των οξειδίων του σιδήρου που συλλέγετε. Με τη χρήση σφαιρών διαμέτρου 22mm επιτεύχθηκε η μεγαλύτερη ανάκτηση σε οξείδια του σιδήρου (64,2% Fe₂O₃) σε σχέση με τις σφαίρες μικρότερης διαμέτρου με μεγάλες όμως απώλειες του βάρους του υλικού. Κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας διαπιστώθηκε ότι η καλύτερη επιλογή είναι αυτή των σφαιρών με 10mm διάμετρο καθώς το ποσοστό του βάρους του υλικού που ανακτάται (71%) είναι αισθητά μεγαλύτερο από αυτό των υπόλοιπων σφαιρών.

Μετά την επιλογή των σφαιρών ξεκίνησε ο μαγνητικός διαχωρισμός στα τρία προϊόντα του υδροκυκλώνα. Τα αποτελέσματα των διαχωρισμών παρουσιάζονται στους πίνακες Νο6, Νο7 και Νο8.

3.3.2.Μαγνητικός διαχωρισμός στην 1^η Υπερχείλιση

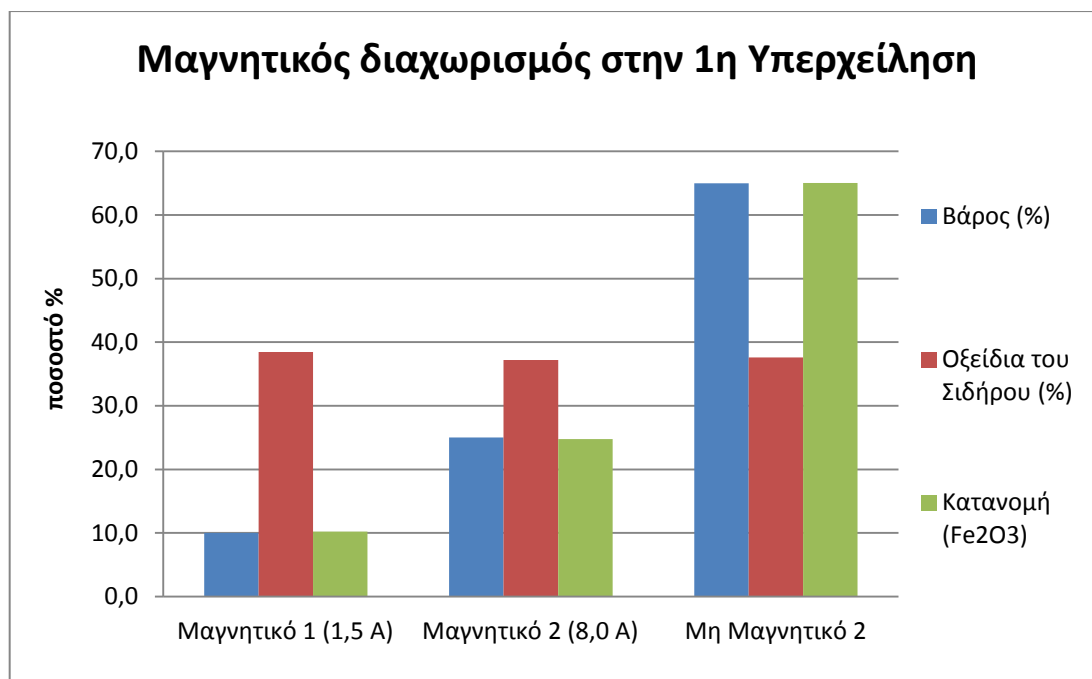
Πίνακας 6: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού στην 1η Υπερχείλιση

Περιγραφή δείγματος	Κατανομή βάρους επί του αρχικού (%)	Κατανομή βάρους επί της τροφοδοσίας (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Fe (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	SiO ₂ (%)	Υπόλοιπα (%)	Απώλεια Πύρωσης (%)	Κατανομή (Fe ₂ O ₃)
Μαγνητικό 1 (1,5 A)	4,5	10	38,4	26,9	13,0	10,3	7,2	6,8	15,1	9,1	10,2
Μαγνητικό 2 (8,0 A)	11,3	25	37,2	26,0	13,3	10,5	7,1	6,9	15,7	9,3	24,7
Μη Μαγνητικό 2	29,5	65	37,6	26,3	13,6	10,8	7,8	6,7	14,0	9,6	65,0
Μετρούμενη Τροφή	45,3	100	37,7	-	14,6	10,5	6,5	7,0	14,6	9,1	100,0

Υπολογιζόμενη Τροφή
Μέση τιμή
Σφάλμα (%)

37,6
37,7
0,2

13,5	10,7	7,5	6,7	14,5	9,5
14,1	10,6	7,0	6,9	14,6	9,3
4,1	0,9	7,6	1,9	0,2	1,9



Διάγραμμα 13: Κατανομή του βάρους και των οξειδίων σιδήρου στα τρία κλάσματα του μαγνητικού διαχωρισμού

Διαπιστώνεται ότι δεν έγινε καλός μαγνητικός διαχωρισμός καθώς η ανάλυση σε οξείδια του σιδήρου δείχνει ότι δεν συγκρατήθηκαν στα Μαγνητικά προϊόντα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι το υλικό είναι πολύ ψιλό και παρασύρεται από το νερό. Επιπροσθέτως φαίνεται ότι δεν έγινε διαχωρισμός και στα υπόλοιπα οξείδια αφού ισο-καταμερίστηκαν στα τρία προϊόντα.

3.3.3.Μαγνητικός διαχωρισμός στην 2^η Υπερχείλιση

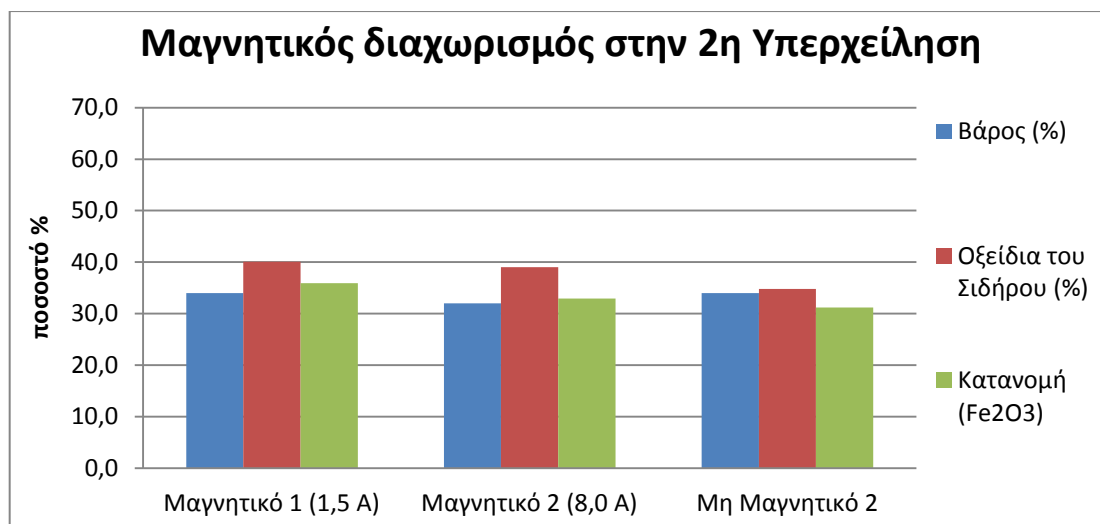
Πίνακας 7: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού στην 2η Υπερχείλιση

Περιγραφή δείγματος	Κατανομή βάρους επί του αρχικού (%)	Κατανομή βάρους επί της τροφοδοσίας (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Fe (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	SiO ₂ (%)	Υπόλοιπα (%)	Απώλεια Πύρωσης (%)	Κατανομή (Fe ₂ O ₃)
Μαγνητικό 1 (1,5 Α)	9,8	34,0	40,1	28,1	14,3	10,5	7,6	5,7	13,0	8,8	35,9
Μαγνητικό 2 (8,0 Α)	9,2	32,0	39,1	27,3	12,9	10,2	6,3	5,8	16,0	9,8	32,9
Μη Μαγνητικό 2	9,8	34,0	34,8	24,4	13,8	10,9	7,3	6,5	16,3	10,4	31,2
Μετρούμενη Τροφή	28,7	100,0	37,7	-	15,0	11,0	6,8	6,4	14,5	8,6	100,0

Υπολογιζόμενη τροφή
Μέση τιμή
Σφάλμα (%)

38,0
37,9
0,3

13,7	10,5	7,1	6,0	15,1	9,7
14,3	10,7	6,9	6,2	14,8	9,1
4,8	2,0	2,2	2,9	1,9	5,8



Διάγραμμα 14: Κατανομή του βάρους και των οξειδίων σιδήρου στα τρία κλάσματα του μαγνητικού διαχωρισμού

Στον μαγνητικό διαχωρισμό της δεύτερης (2^{ης}) υπερχείλισης του υδροκυκλώνα παρατηρείται μια βελτίωση της κατανομής των οξειδίων του σιδήρου (Fe₂O₃) σε σχέση με αυτήν της 1^{ης} υπερχείλισης αλλά δεν είναι αρκετή ώστε να θεωρηθεί επιτυχής διαχωρισμός. Όπως και πριν στα υπόλοιπα οξείδια ισο-μοιράστηκαν στα προϊόντα.

3.3.4.1.Μαγνητικός διαχωρισμός στην Απορροή

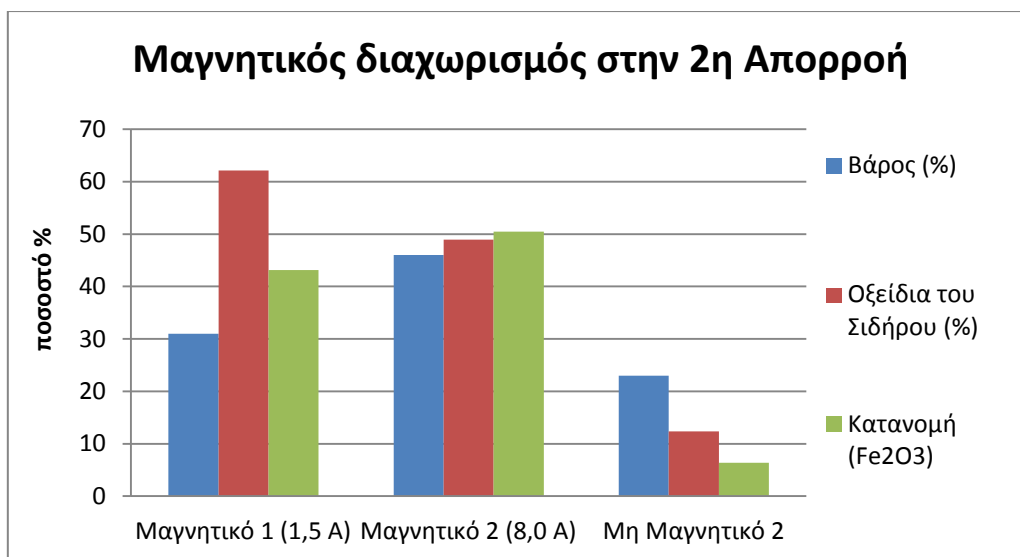
Πίνακας 8: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού στην Απορροή

Περιγραφή δείγματος	Κατανομή βάρους επί του αρχικού (%)	Κατανομή βάρους επί της τροφοδοσίας (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Fe (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	SiO ₂ (%)	Υπόλοιπα (%)	Απώλεια Πύρωσης (%)	Κατανομή (Fe ₂ O ₃)
Μαγνητικό 1 (1,5 A)	8,1	31	62,1	43,5	14,6	2,8	3,7	2,6	6,5	7,7	43,2
Μαγνητικό 2 (8,0 A)	12,0	46	49,0	34,3	18,6	5,1	4,3	3,2	8,4	11,3	50,5
Μη Μαγνητικό 2	6,0	23	12,3	8,6	28,5	15,4	7,8	4,9	12,2	19,0	6,4
Μετρούμενη Τροφή	26,0	100	48,2	-	21,8	6,4	3,8	3,6	7,4	8,8	100,0

Υπολογιζόμενη τροφή
Μέση τιμή
Σφάλμα (%)

44,6
46,4
3,8

19,6	6,8	4,9	3,4	8,7	11,9
20,7	6,6	4,3	3,5	8,1	10,4
5,2	3,0	12,9	3,0	8,1	15,2



Διάγραμμα 15: Κατανομή του βάρους και των οξειδίων σιδήρου στα τρία κλάσματα του μαγνητικού διαχωρισμού

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα επιτεύχθηκε μεγάλη ανάκτηση στα οξείδια του σιδήρου (43% Fe₂O₃ στο Μαγνητικό 1 και 50% Fe₂O₃ στο μαγνητικό 2). Τα οξείδια του αργιλίου (Al₂O₃), του ασβεστίου (CaO) και του πυριτίου (SiO₂) έχουν την τάση να καταλήγουν στα μη μαγνητικά

Από τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι στα χονδρά κλάσματα ο μαγνητικός διαχωρισμός είναι πιο αποτελεσματικός σε σχέση με αυτόν στα ψιλά κλάσματα.

Στην επόμενη υποενότητα γίνεται ορυκτολογική ανάλυση (XRD) των προϊόντων του μαγνητικού διαχωρισμού της Απορροής για να διαπιστωθεί η ορυκτολογική τους σύσταση. Αυτή η ανάλυση έχει σαν σκοπό να προσδιοριστούν οι ορυκτολογικές φάσεις που επηρεάζονται από τον μαγνητικό διαχωρισμό.

3.3.4.2.Αποτελέσματα ορυκτολογικών αναλύσεων στα προϊόντα του μαγνητικού διαχωρισμού της 2^{ης} Απορροής

Στα τρία προϊόντα του μαγνητικού διαχωρισμού της 2^{ης} Απορροής έγινε ορυκτολογική ανάλυση Πίνακας 9.

Πίνακας 9:Ορυκτολογική σύσταση της ερυθράς ιλύος στα κλάσματα του μαγνητικού διαχωρισμού της 2ης Απορροής (παράρτημα-ακτινογραφήματα εικόνες 15 μέχρι 17)

Ποσοστό (%) των ορυκτολογικών φάσεων στα προϊόντα του μαγνητικού διαχωρισμού της Απορροής				
Συστατικό	Χημικός τύπος	Μαγνητικό 1	Μαγνητικό 2	Μη Μαγνητικό
Αιματίτης	Fe ₂ O ₃	36	24	10
Γυψίτης	Al(OH) ₃	13	24	33
Διάσπορο	AlOOH	12	16	18
Ασβεστίτης	CaCO ₃	6	6	16
Γκαιτίτης	FeO(OH)	5	4	5
Ανατάσης	TiO ₂	1	1	1
Χαλαζία	SiO ₂	0	2	2
Βαιμίτης	AlO(OH)	0	2	2
Κατοϊτής	Ca _{2.93} Al _{1.97} (Si _{1.64} O _{2.56})(OH) _{9.44}	6	8	10
Καολινίτης(1Α)	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	21	13	0
Κανκρινίτης	Na ₆ (Al ₆ Si ₆ O ₂₄)(CaCO ₃)(H ₂ O) ₂	0	0	3
Σύνολο		100	100	100

Από τον πίνακα 9 διαπιστώνεται ότι ο μαγνητικός διαχωρισμός επιτυγχάνει καλύτερο διαχωρισμό για τον Αιματίτη που είναι ισχυρά μαγνητικός αλλά δεν ισχύει το ίδιο για τον Γκαιτίτη που δεν είναι ισχυρά μαγνητικός. Παρατηρείται πολύ καλός διαχωρισμός στον Γυψίτη και τον Ασβεστίτη και καλός για το Διάσπορο, τον Χαλαζία, τον Βαιμίτη, τον Κατοϊτή και τον Κανκρινίτη. Ο Ανατάσης ισοκατανέμεται στα τρία προϊόντα του μαγνητικού διαχωρισμού.

Επειδή τα αποτελέσματα της Απορροής ήταν καλύτερα από αυτά των δύο Υπερχειλίσεων, στα προϊόντα αυτής πραγματοποιήθηκε ξανά μαγνητικός διαχωρισμός ώστε να διαπιστωθεί αν θα υπάρξει βελτίωση της ανάλυσης σε σίδηρο.

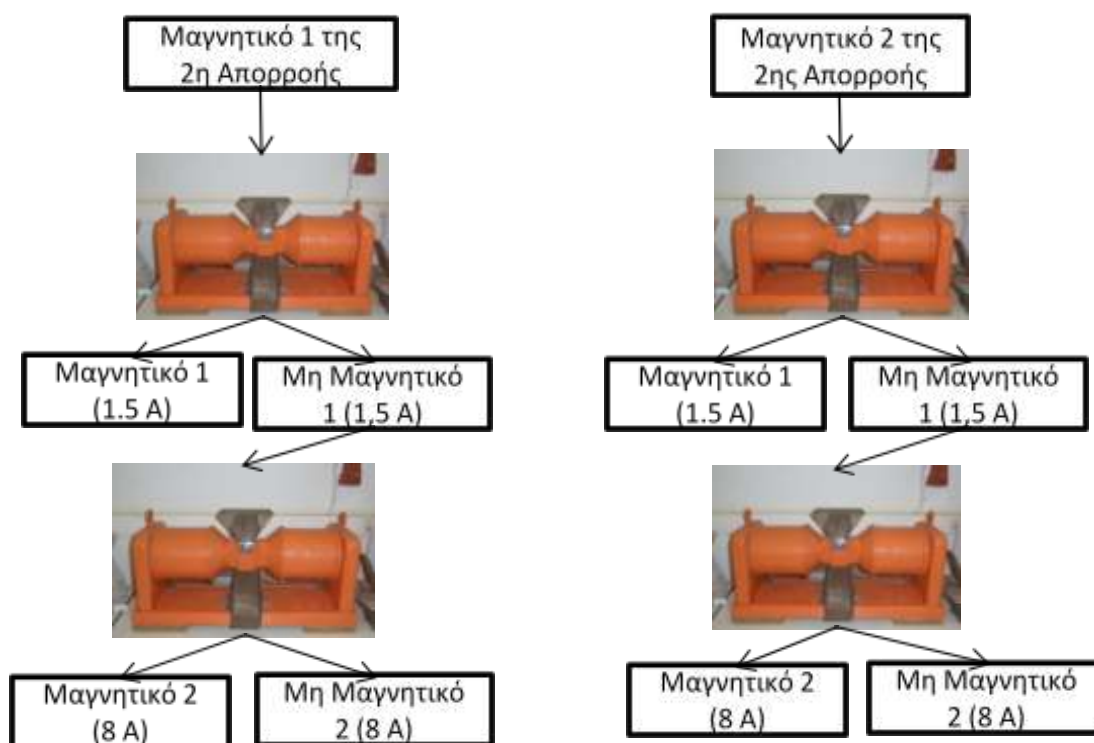
3.4. Πρώτη σειρά πειραμάτων

Επειδή τα αποτελέσματα της Απορροής ήταν καλύτερα από αυτά των δύο Υπερχειλίσεων, στα προϊόντα αυτής πραγματοποιήθηκε ξανά μαγνητικός διαχωρισμός ώστε να διαπιστωθεί αν θα υπάρξει βελτίωση της ανάλυσης σε σίδηρο.

3.4.1. Μαγνητικός διαχωρισμός στα μαγνητικά προϊόντα της 2^η

Απορροής

Στις επόμενες δοκιμές τα Μαγνητικό 1 και Μαγνητικό 2 περάστηκαν σε χαμηλή ένταση ρεύματος (1,5 Ampere) και το μη μαγνητικό προϊόν της διαδικασίας αυτής πέρασε σε υψηλή ένταση ρεύματος (8 Ampere) με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν δύο ακόμα προϊόντα, ένα Μαγνητικό 2 και ένα Μη Μαγνητικό.



Διάγραμμα 16: Διάγραμμα ροής του μαγνητικού διαχωρισμού στα μαγνητικά προϊόντα της 2ης Απορροής

Τα αποτελέσματα του μαγνητικού διαχωρισμού στο Μαγνητικό 1 της Απορροής παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

3.4.2.Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού στο Μαγνητικό 1 της Απορροής

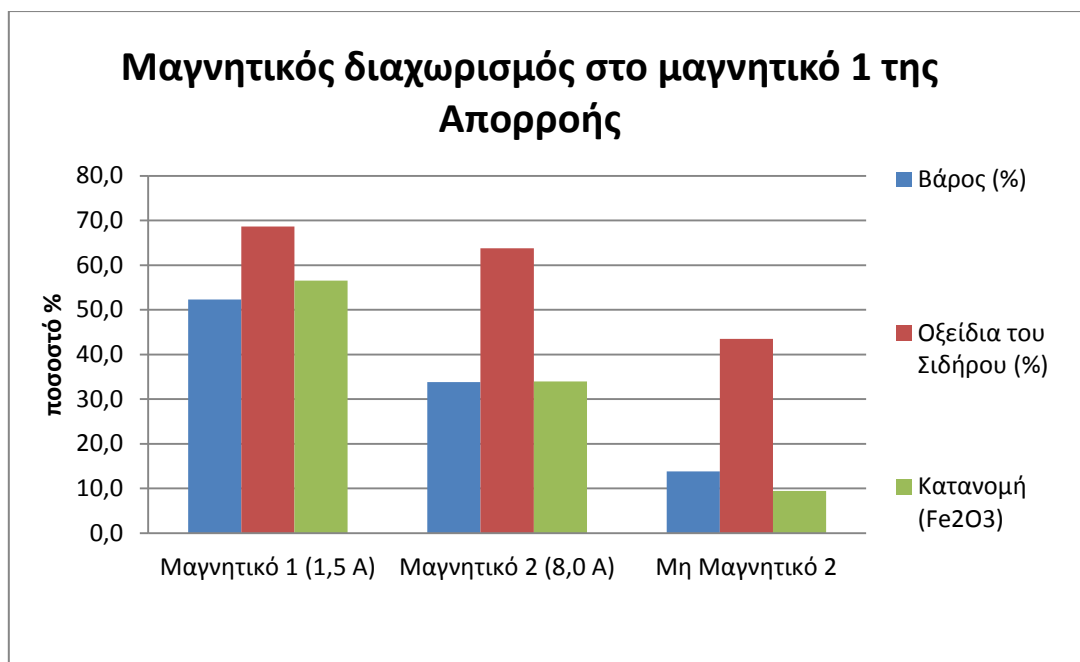
Πίνακας 10: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού στο Μαγνητικό 1 της Απορροής

Περιγραφή δείγματος	Κατανομή βάρους επί του αρχικού (%)	Κατανομή βάρους επί της τροφοδοσίας (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Fe (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	SiO ₂ (%)	Υπόλοιπα (%)	Απώλεια Πύρωσης (%)	Κατανομή (Fe ₂ O ₃)
Μαγνητικό 1 (1,5 Α)	4,2	52,3	68,7	48,1	9,2	1,4	3,1	2,1	6,7	8,9	56,6
Μαγνητικό 2 (8,0 Α)	2,7	33,8	63,8	44,7	14,0	2,6	3,5	2,5	6,1	7,5	34,0
Μη Μαγνητικό 2	1,1	13,8	43,5	30,4	19,0	6,5	3,9	3,1	11,8	12,1	9,5
Μετρούμενη Τροφή	8,1	100	62,1	-	14,6	2,8	3,7	2,6	5,3	8,9	100

Υπολογιζόμενη τροφή
Μέση τιμή
Σφάλμα (%)

63,5
62,8
1,1

12,2	2,5	3,3	2,4	7,2	8,9
13,4	2,7	3,5	2,5	6,2	8,9
9,1	6,0	5,0	4,7	15,5	0,0



Διάγραμμα 17: Σύγκριση βάρους και οξειδίων του σιδήρου στα τρία κλάσματα του μαγνητικού διαχωρισμού

Σε αυτή τη σειρά πειραμάτων επιτεύχθηκε το υψηλότερο ποσοστό οξειδίων του σιδήρου (68,7% Fe₂O₃) με κατανομή 56,6% που αντιστοιχεί στο 4,2% του βάρους της αρχικής τροφοδοσίας ή 52,3% βάρους της απορροής. Επιπροσθέτως τα υπόλοιπα οξείδια (αργιλίου, πυριτίου, ασβεστίου) έχουν την τάση να καταλήγουν στα Μη μαγνητικά.

Παρατηρείται ότι ένα δεύτερο πέρασμα του Μαγνητικού 1 καθαρίζει το υλικό μας από Μη μαγνητικά που πιθανότατα είχαν παγιδευτεί στα μαγνητικά προϊόντα του πρώτου περάσματος.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα του μαγνητικού διαχωρισμού στο Μαγνητικό 2 της Απορροής.

3.4.3.Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού στο Μαγνητικό 2 της Απορροής

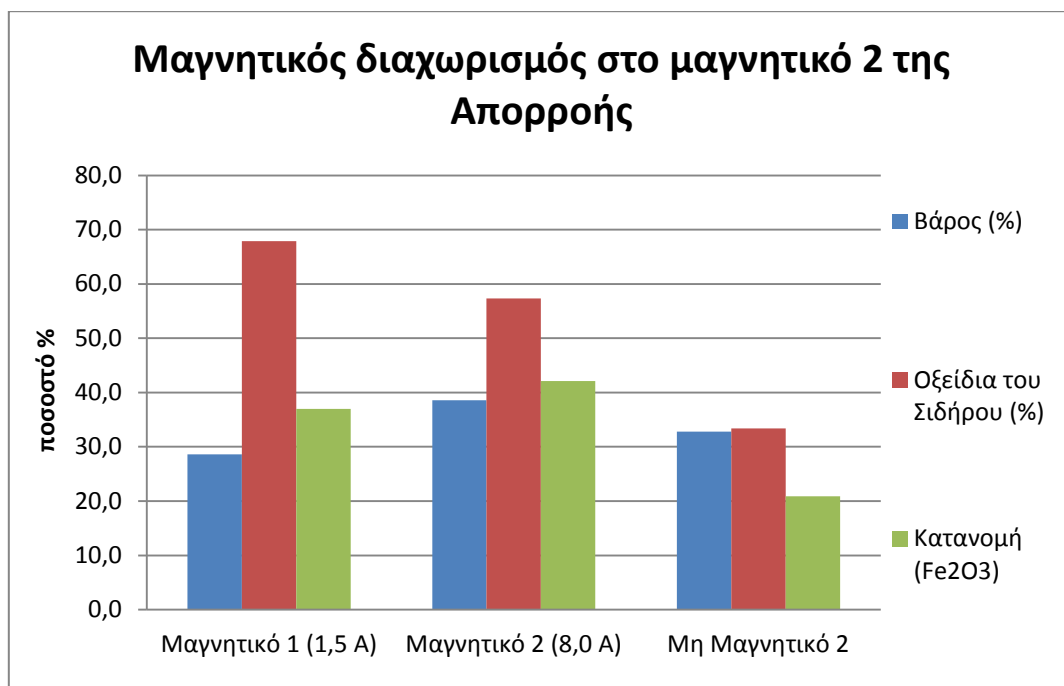
Πίνακας 11: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού στο Μαγνητικό 2 της Απορροής

Περιγραφή δείγματος	Κατανομή βάρους επί του αρχικού (%)	Κατανομή βάρους επί της τροφοδοσίας (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Fe (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	SiO ₂ (%)	Υπόλοιπα (%)	Απώλεια Πύρωσης (%)	Κατανομή (Fe ₂ O ₃)
Μαγνητικό 1 (1,5 Α)	3,4	28,6	67,9	47,5	12,3	2,0	3,4	2,4	5,8	6,3	37,0
Μαγνητικό 2 (8,0 Α)	4,6	38,6	57,3	40,1	17,4	3,5	3,8	2,9	5,7	9,5	42,1
Μη Μαγνητικό 2	3,9	32,8	33,4	23,4	24,7	9,1	6,1	3,7	8,3	14,8	20,9
Μετρούμενη Τροφή	12,0	100	49,0	-	18,6	5,1	4,3	3,2	8,4	11,3	100

Υπολογιζόμενη τροφή
Μέση τιμή
Σφάλμα (%)

52,5
50,7
3,5

18,3	4,9	4,4	3,0	6,6	10,3
18,5	5,0	4,3	3,1	7,5	10,8
0,7	2,2	1,5	4,1	12,5	4,8



Διάγραμμα 18: Σύγκριση βάρους και οξειδίων του σιδήρου στα τρία κλάσματα του μαγνητικού διαχωρισμού

Στο δεύτερο πέρασμα του Μαγνητικού 2 διαπιστώνεται ότι κατά βάρος το υλικό ισοκατανέμεται στα τρία προϊόντα. Ακόμα φαίνεται ότι μεγάλο ποσοστό του υλικού (32,8 % κατά βάρος) καταλήγει στα Μη Μαγνητικά. Παρόλα αυτά βελτιώθηκε αισθητά το ποσοστό των οξειδίων του σιδήρου που εμπλουτίζεται με αυτή τη διαδικασία αφού με τροφή που περιέχει 49% (Fe₂O₃) παράγονται δύο προϊόντα, μαγνητικό1 και μαγνητικό 2, με 67,9% και 57,3% (Fe₂O₃) αντίστοιχα. Όπως και στο προηγούμενο πείραμα τα μη μαγνητικά οξείδια έχουν την τάση να καταλήγουν στο απόρριμμα.

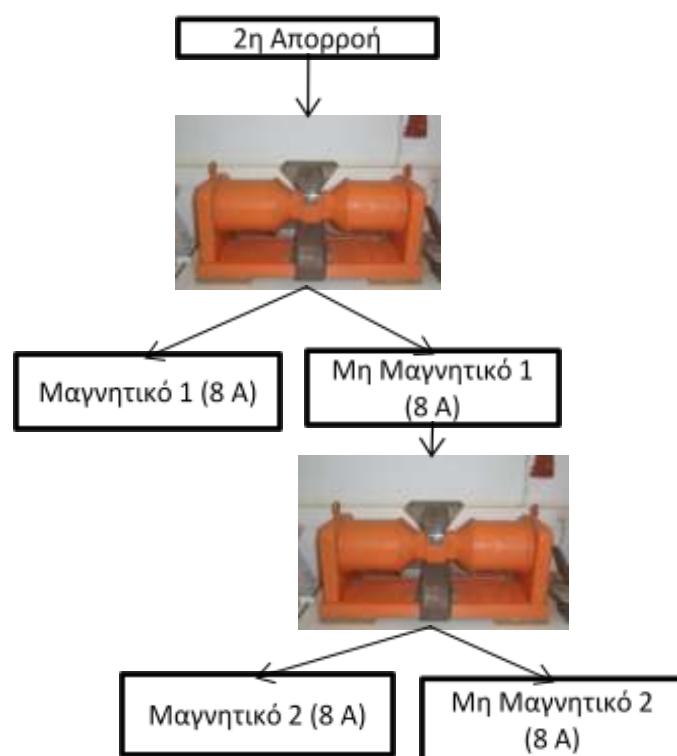
Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι το δεύτερο πέρασμα βελτιώνει τα αποτελέσματα του μαγνητικού διαχωρισμού.

3.5. Δεύτερη σειρά πειραμάτων

Στην δεύτερη σειρά πειραμάτων πραγματοποιήθηκε μαγνητικός διαχωρισμός στην Απορροή σε υψηλή ένταση (8 Ampere) για να διαπιστωθεί αν μπορεί να αυξηθεί η κατανομή (Fe_2O_3). Επιλέχθηκε η Απορροή γιατί έχει καλύτερα ποσοστά σιδήρου σε σχέση με τις δύο Υπερχειλίσσεις και επειδή επιτυγχάνεται καλύτερος μαγνητικός διαχωρισμός.

3.5.1. Μαγνητικός διαχωρισμός στην Απορροή σε υψηλή ένταση (8 Ampere)

Η πειραματική διαδικασία παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα ροής.



Διάγραμμα 19: Διάγραμμα ροής μαγνητικού διαχωρισμού στα 8 Ampere

Ακολουθεί ο πίνακας με τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης των προϊόντων του διαχωρισμού.

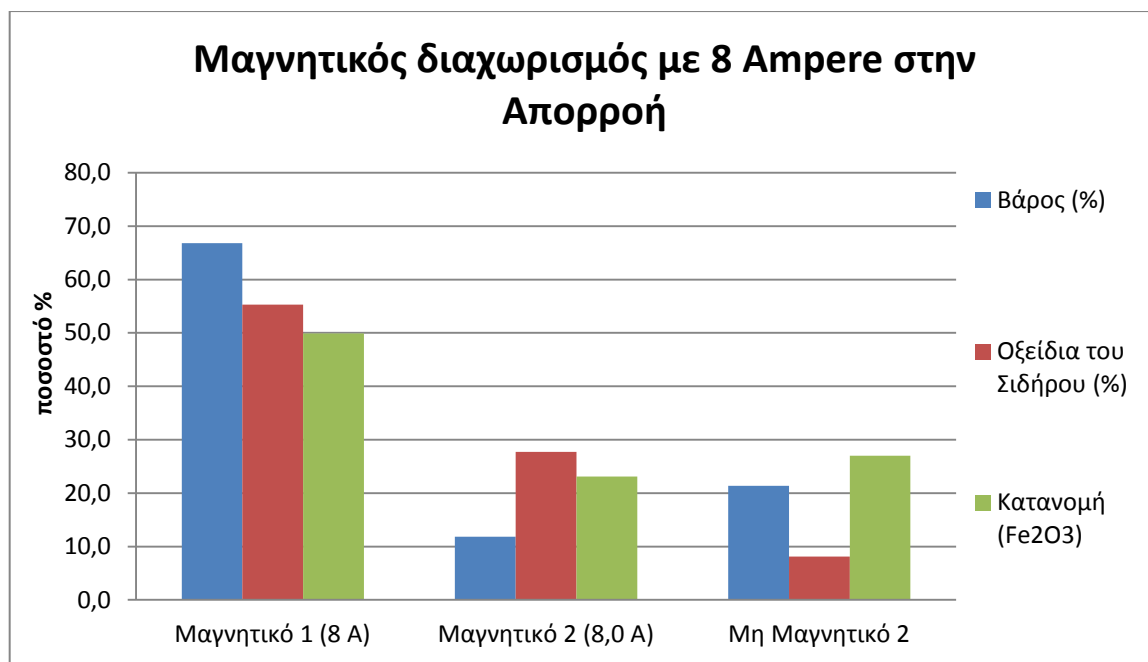
Πίνακας 12: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού της Απορροής στα 8 Ampere

Περιγραφή δείγματος	Κατανομή βάρους επί της τροφοδοσίας (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Fe (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	SiO ₂ (%)	Υπόλοιπα (%)	Απώλεια Πύρωσης (%)	Κατανομή (Fe ₂ O ₃)
Μαγνητικό 1 (8 Α)	66,8	55,3	38,7	19,8	3,3	3,7	3,0	5,8	9,2	49,9
Μαγνητικό 2 (8,0 Α)	11,9	27,7	19,4	29,7	10,0	6,2	4,0	7,2	15,2	23,1
Μη Μαγνητικό 2	21,3	8,1	5,7	27,2	15,8	6,7	4,8	18,5	18,9	27,0
Μετρούμενη Τροφή	100,0	48,2	-	21,8	6,4	3,7	3,6	7,2	9,2	100,0

Υπολογιζόμενη τροφή
Μέση τιμή
Σφάλμα (%)

42,0
45,1
6,9

22,6	6,7	4,6	3,5	8,7	11,9
22,2	6,6	4,1	3,6	7,9	10,6
1,7	2,7	11,3	2,1	9,6	13,2



Διάγραμμα 20: Σύγκριση βάρους, οξειδίων του σιδήρου και κατανομής των οξειδίων του σιδήρου στα τρία κλάσματα του μαγνητικού διαχωρισμού της Απορροής

Σε σύγκριση με τον πρώτο μαγνητικό διαχωρισμό της απορροής (πίνακας 8), παρατηρείται βελτίωση της κατανομής του Fe₂O₃ (49,9 έναντι 43,2% στο μαγνητικό 1) και δημιουργία ενός απορρίμματος με λιγότερο ποσοστό οξειδίων του σιδήρου (8,1 έναντι 12,3% Fe₂O₃). Παρά όλα αυτά η περιεκτικότητα σε οξείδια του σιδήρου (Fe₂O₃) παρέμεινε σε χαμηλές τιμές στα προϊόντα (55,3% για το Μαγνητικό1 και 27,7% για το Μαγνητικό 2).

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι με υψηλή ένταση ρεύματος το μαγνητικό 1 συγκρατεί πολύ περισσότερα μαγνητικά τεμαχίδια με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα φτωχό σε οξείδια του σιδήρου μαγνητικό 2.

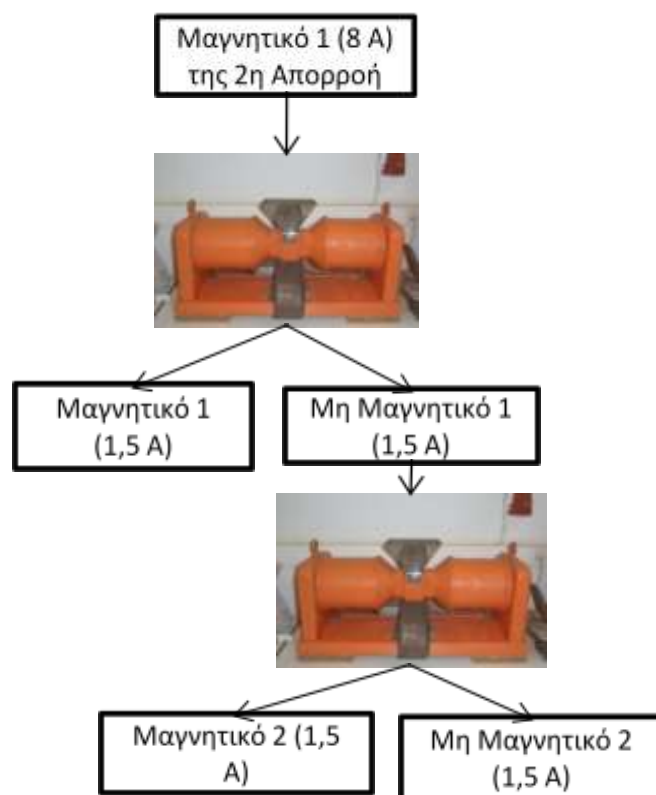
3.6. Τρίτη σειρά πειραμάτων

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δύο μαγνητικοί διαχωρισμοί με τροφοή το Μαγνητικό 1 της απορροής του προηγούμενου πειράματος. Ο πρώτος μαγνητικός διαχωρισμός πραγματοποιήθηκε σε χαμηλή ένταση ρεύματος (1,5 Ampere) για την επίτευξη ενός προϊόντος με υψηλό ποσοστό σιδήρου. Ο δεύτερος διαχωρισμός έγινε με ένταση ρεύματος 8 Ampere με στόχο ένα υψηλό ποσοστό κατανομής του Fe_2O_3 .

3.6.1. Μαγνητικός διαχωρισμός στο Μαγνητικό 1 (8 Ampere) της Απορροής με χαμηλή ένταση ρεύματος (1,5 Ampere)

Σε αυτό το σημείο της πειραματικής διαδικασίας σκοπός ήταν η δημιουργία ενός προϊόντος με υψηλό ποσοστό σιδήρου. Για την επίτευξη αυτού χρησιμοποιήθηκε το Μαγνητικό 1 της Απορροής σαν τροφοή για μαγνητικό διαχωρισμό με χαμηλή ένταση ρεύματος (1,5 Ampere).

Παρακάτω ακολουθούν το διάγραμμα ροής και ο πίνακας των χημικών αναλύσεων.



Διάγραμμα 21: Διάγραμμα ροής μαγνητικού διαχωρισμού στο μαγνητικό 1 της Απορροής στα 1,5 Ampere

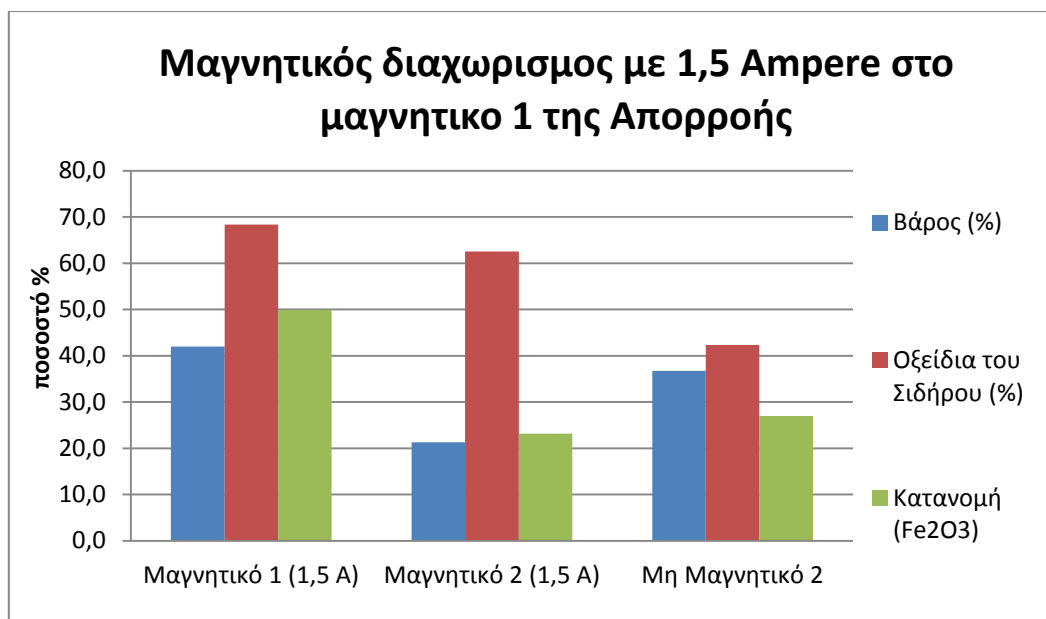
Πίνακας 13: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού στο Μαγνητικό 1 της Απορροής στα 1,5 Ampere

Περιγραφή δείγματος	Κατανομή βάρους επί του αρχικού (%)	Κατανομή βάρους επί της τροφοδοσίας (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Fe (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	SiO ₂ (%)	Υπόλοιπα (%)	Απώλεια Πύρωσης (%)	Κατανομή (Fe ₂ O ₃)
Μαγνητικό 1 (1,5 A)	7,3	42,0	68,4	47,9	9,8	1,8	3,1	2,3	7,8	6,8	49,9
Μαγνητικό 2 (1,5 A)	3,7	21,3	62,5	43,8	12,7	2,4	2,9	2,5	8,6	8,4	23,1
Μη Μαγνητικό 2	6,3	36,7	42,3	29,6	22,4	5,8	3,8	3,5	9,5	12,7	27,0
Μετρούμενη Τροφή	17,3	100,0	55,3	-	19,8	3,3	3,7	3,0	5,8	9,2	100,0

Υπολογιζόμενη τροφή
Μέση τιμή
Σφάλμα (%)

57,6
56,4
2,0

15,1	3,4	3,3	2,8	8,6	9,3
17,4	3,3	3,5	2,9	7,2	9,2
13,7	1,7	5,1	3,2	19,2	0,8



Διάγραμμα 22: Μαγνητικός διαχωρισμός στο Μαγνητικό 1 της Απορροής

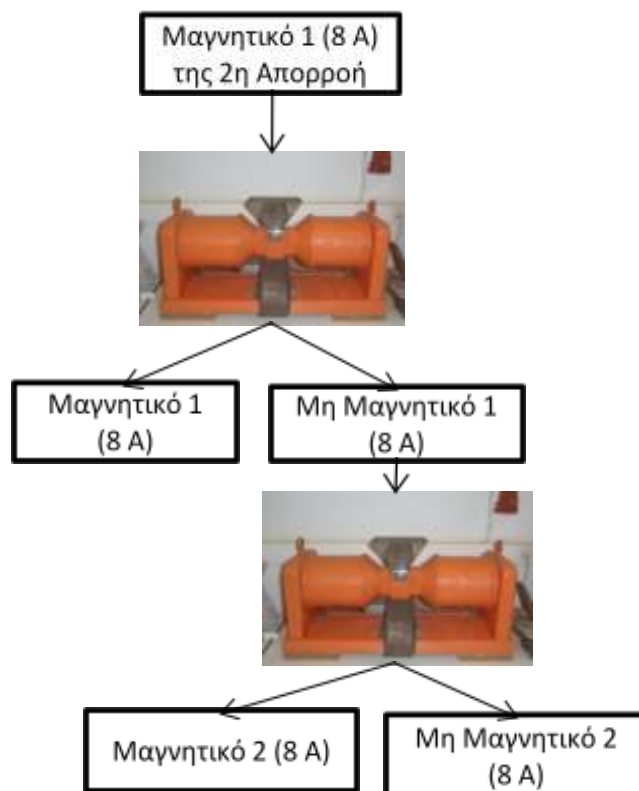
Παρατηρείται ότι δημιουργήθηκαν δύο προϊόντα με σημαντικά ποσοστά οξειδίων του σιδήρου (μαγνητικό 1 με 68,4% και μαγνητικό 2 με 62,5% Fe₂O₃). Παρά όλα αυτά δεν είναι τα καλύτερα ποσοστά σε οξείδια του σιδήρου που δημιουργήθηκαν αφού τα αποτελέσματα στον Πίνακα 10 είναι οριακά καλύτερα. Αυτό οφείλεται σε δύο λόγους:

- Λόγο της χαμηλής έντασης ρεύματος και του λεπτοκόκκου υλικού μεγάλο μέρος παρασύρθηκε στα Μη Μαγνητικά,
- Η τροφή περιέχει μικρότερο ποσοστό οξειδίων του σιδήρου σε σχέση με αυτή της πρώτης σειράς πειραμάτων (55,3% έναντι 62,1% Fe₂O₃).

Για τον πρώτο λόγο στο επόμενο πείραμα έγινε προσπάθεια ώστε να βελτιωθεί η κατανομή του Fe₂O₃ στα μαγνητικά προϊόντα με διαχωρισμό σε υψηλή ένταση ρεύματος.

3.6.2. Μαγνητικός διαχωρισμός στο Μαγνητικό 1 (8 Ampere) της Απορροής με υψηλή ένταση ρεύματος (8 Ampere)

Επειδή στο προηγούμενο βήμα η ανάκτηση είναι χαμηλή, που σημαίνει ότι αρκετό μαγνητικό υλικό δεν συγκρατήθηκε στον μαγνητικό διαχωριστή στα 1,5 Ampere έντασης ρεύματος, έγινε επανάληψη του πειράματος σε υψηλή ένταση ρεύματος (8 Ampere). Στόχος του πειράματος είναι ένα προϊόν με υψηλή κατανομή (Fe_2O_3) στα μαγνητικά προϊόντα.



Διάγραμμα 23: Διάγραμμα ροής μαγνητικού διαχωρισμού στο Μαγνητικό 1 της Απορροής με υψηλή ένταση ρεύματος

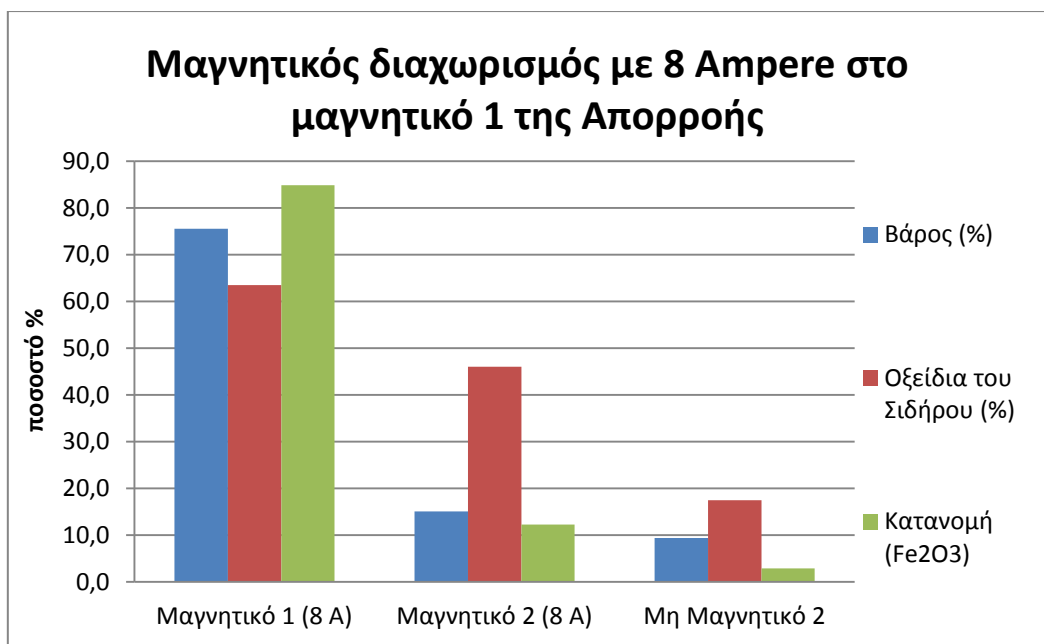
Πίνακας 14: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού στο Μαγνητικό 1 της Απορροής με υψηλή ένταση ρεύματος

Περιγραφή δείγματος	Κατανομή βάρους επί του αρχικού (%)	Κατανομή βάρους επί της τροφοδοσίας (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Fe (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	SiO ₂ (%)	Υπόλοιπα (%)	Απώλεια Πύρωσης (%)	Κατανομή (Fe ₂ O ₃)
Μαγνητικό 1 (8 Α)	13,1	75,5	63,5	44,4	15,9	2,2	3,5	2,6	5,2	7,1	84,8
Μαγνητικό 2 (8 Α)	2,6	15,1	46,0	32,2	24,1	5,0	4,8	3,3	5,3	11,5	12,3
Μη Μαγνητικό 2	1,6	9,4	17,5	12,2	23,9	11,7	5,3	4,4	20,5	16,8	2,9
Μετρούμενη Τροφή	17,3	100,0	55,3	-	19,8	3,3	3,7	3,0	5,8	9,2	100,0

Υπολογιζόμενη τροφή
Μέση τιμή
Σφάλμα (%)

56,5
55,9
1,1

17,9	3,5	3,9	2,9	6,6	8,7
18,9	3,4	3,8	2,9	6,2	8,9
5,1	3,3	2,6	1,1	6,5	2,7



Διάγραμμα 24: Μαγνητικός διαχωρισμός στο Μαγνητικό 1 της Απορροής στα 8 Ampere

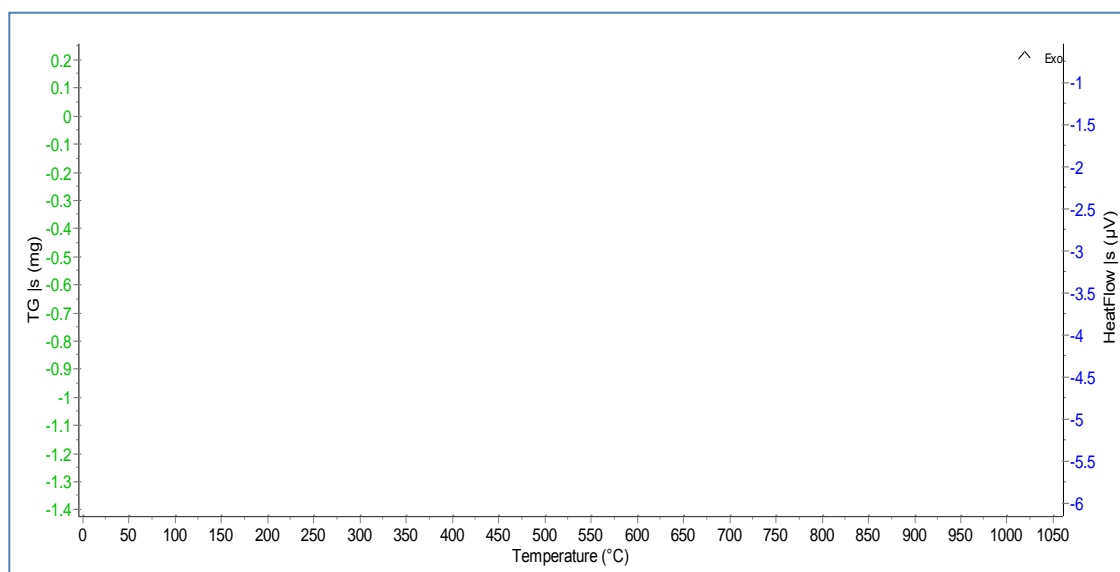
Σε αυτό το βήμα παράχθηκε ένα προϊόν (Μαγνητικό 1) με υψηλή κατανομή σε Fe₂O₃ (84,8%) που είναι και η μεγαλύτερη που επιτυγχάνεται. Επίσης φαίνεται ότι λιγότερο από 3% της κατανομής των οξειδίων του σιδήρου κατέληξε στα Μη Μαγνητικά. Επιπροσθέτως το Μη Μαγνητικό περιέχει μόνο 17,5% Fe₂O₃ που δηλώνει έναν καλό διαχωρισμό.

3.7. Τέταρτη σειρά πειραμάτων

Στη τελευταία σειρά πειραμάτων δείγματα πυρώθηκαν πριν το μαγνητικό διαχωρισμό με στόχο να βελτιωθούν τα μαγνητικά προϊόντα του διαχωρισμού.

3.7.1. Μαγνητικός διαχωρισμός σε δείγμα της 1^{ης} Υπερχείλισης (Overflow 1) που πυρώθηκε στους 650°C για τέσσερις ώρες

Σκοπός του πειράματος είναι η προσπάθεια αύξησης των μαγνητικών προϊόντων μετατρέποντας τον Γκαιτίτη, που δεν είναι μαγνητικά ισχυρός, σε Αιματίτη που είναι μαγνητικά ισχυρός. Η θερμοκρασία των 650°C επιλέχθηκε έπειτα από μια Διαφορική Θερμική Ανάλυση που έγινε σε δείγμα της 1^{ης} Υπερχείλισης. Ο λόγος που προτιμήθηκε η 1^η Υπερχείλιση είναι γιατί περιέχει το μικρότερο ποσοστό μαγνητικών και επιπροσθέτως έχει το μεγαλύτερο ποσοστό κατανομής κατά βάρος.



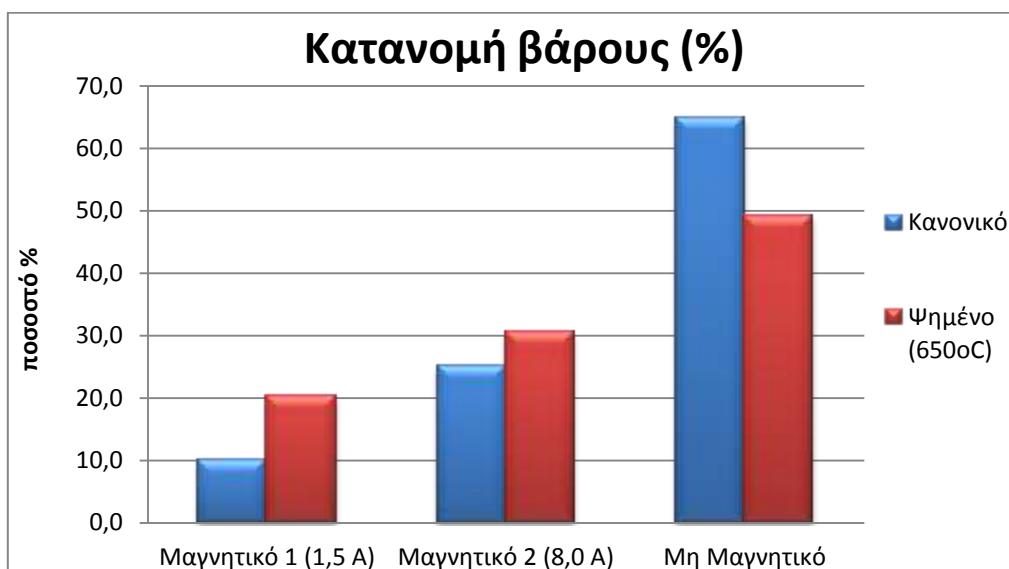
Διάγραμμα 25: Αποτελέσματα Διαφορικής Θερμικής Ανάλυσης σε δείγμα της 1ης Υπερχείλισης

Από το γράφημα παρατηρούνται δύο διασπάσεις στους 280°C και τους 330°C και από βιβλιογραφία οι 400°C φαίνονται αρκετοί για την μετατροπή του Γκαιτίτη σε Αιματίτη αλλά επειδή στην παραπάνω ανάλυση υπάρχει μια διάσπαση στους 520°C προτιμήθηκαν οι 650°C ως θερμοκρασία πύρωσης. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε μαγνητικός διαχωρισμός και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 15: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού στην ψημένη στους 650°C 1η Υπερχείλιση

Περιγραφή δείγματος	Κατανομή βάρους επί της τροφοδοσίας (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Fe (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	SiO ₂ (%)	Υπόλοιπα (%)	Απώλεια Πύρωσης (%)	Κατανομή (Fe ₂ O ₃)
Μαγνητικό 1 (1,5 Α)	20,3	41,1	28,8	10,8	11,3	8,6	6,4	15,3	6,5	23
Μαγνητικό 2 (8,0 Α)	30,5	37,8	26,5	10,6	10,5	7,3	6,2	22,3	5,2	32
Μη Μαγνητικό 2	49,2	33,8	23,7	12,1	10,7	5,9	6,8	25,2	5,4	46
Μετρούμενη Τροφή	100									100

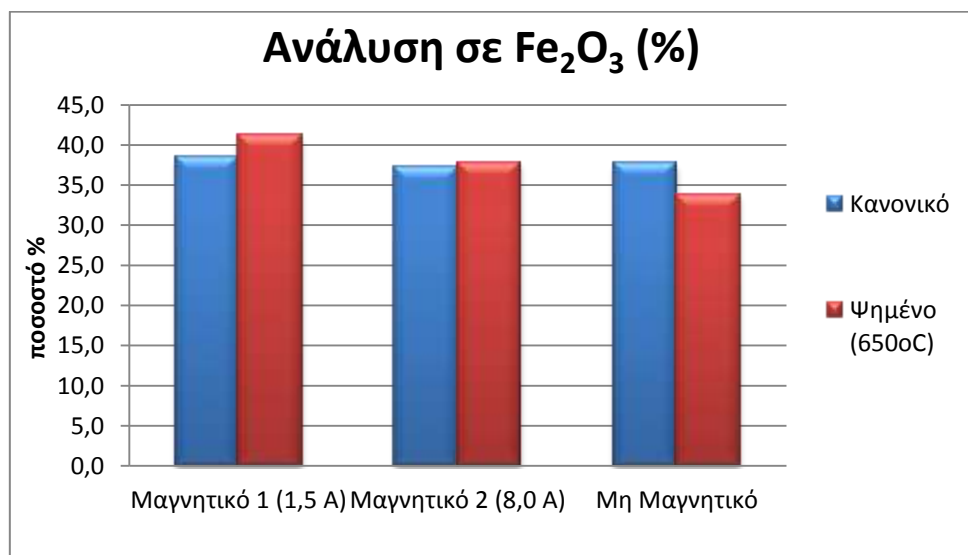
Υπολογιζόμενη τροφή	36,5		11,4	10,7	6,9	6,6	22,3	5,6
---------------------	------	--	------	------	-----	-----	------	-----



Διάγραμμα 26: Σύγκριση κατανομής βάρους σε κανονικό και ψημένο δείγμα της 1^{ης} Υπερχείλισης

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα η πύρωση του υλικού στους 650°C βελτίωσε τα αποτελέσματα του μαγνητικού διαχωρισμού στην κατανομή του βάρους καθώς περισσότερο υλικό συγκρατήθηκε στα μαγνητικά προϊόντα.

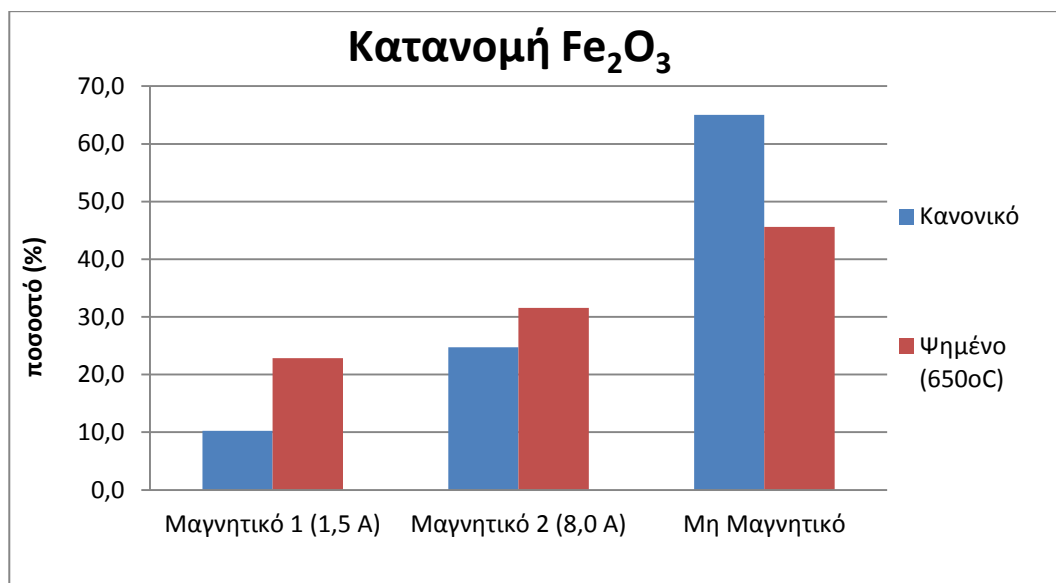
Για να επιβεβαιωθεί αν πραγματικά βελτιώθηκαν τα προϊόντα πρέπει να συγκριθούν ως προς την ανάλυσή τους σε οξείδια του σιδήρου και ως προς την κατανομή του Fe_2O_3 .



Διάγραμμα 27: Σύγκριση Fe_2O_3 (%) σε κανονικό και ψημένο δείγμα

Παρατηρούμε ότι τα ποσοστά των οξειδίων του σιδήρου στα μαγνητικά προϊόντα έχουν αυξηθεί πράγμα που σημαίνει ότι η πύρωση του υλικού βελτιώνει τα αποτελέσματα του μαγνητικού διαχωρισμού.

Από τα δύο παραπάνω διαγράμματα αναμένεται βελτίωση της κατανομής του Fe_2O_3 στα μαγνητικά προϊόντα αφού αυξήθηκε και το βάρος και το ποσοστό του Fe_2O_3 (%) σε αυτά.



Διάγραμμα 28: Σύγκριση κατανομή Fe_2O_3 σε κανονικό και ψημένο δείγμα

Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει μείωση 20% της κατανομής Fe_2O_3 στο Μη μαγνητικό η οποίο ισο-μοιράστηκε στα δύο μαγνητικά προϊόντα. Αυτό το γεγονός όμως προκάλεσε διπλασιασμό της κατανομής Fe_2O_3 στο μαγνητικό 1 η οποία είχε πολύ χαμηλό ποσοστό.

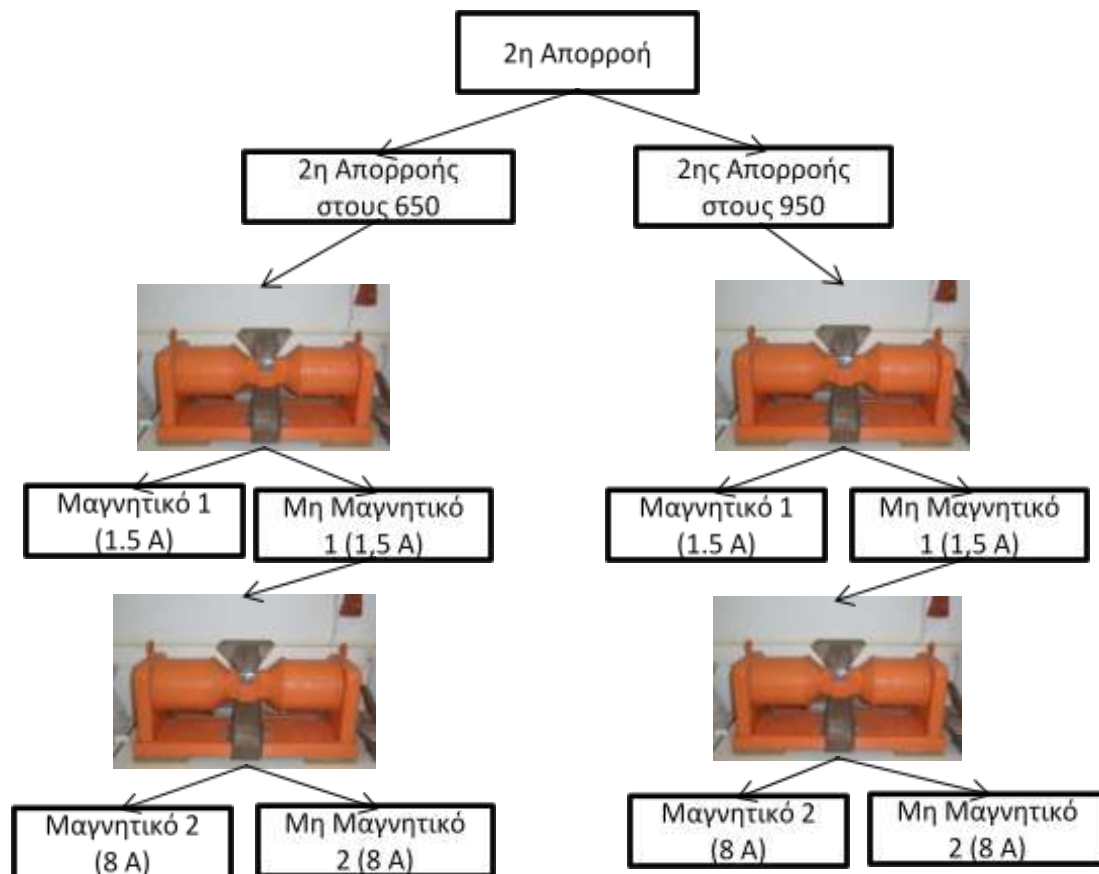
Επιβεβαιώνεται ότι η πύρωση του υλικού πριν τον μαγνητικό διαχωρισμό βελτιώνει τα αποτελέσματα αυτού.

Τέλος, έγινε επανάληψη της προηγούμενης διαδικασίας σε δείγματα της Απορροής καθώς αυτή περιέχει καλύτερα ποσοστά σιδήρου. Τα αποτελέσματα αυτής παρουσιάζονται στην επόμενη υπο-ενότητα.

3.7.2. Μαγνητικός διαχωρισμός σε δείγμα της 2^η Απορροή που πυρώθηκε στους 650°C και στους 950°C.

Για να κλείσει το πειραματικό μέρος της διπλωματικής πραγματοποιήθηκε μαγνητικός διαχωρισμός σε δείγματα της απορροής αφού πρώτα πυρώθηκαν. Σε αυτήν την διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν δύο (2) δείγματα της Απορροής τα οποία πυρώθηκαν στους 650°C και 950°C αντίστοιχα.

Τα βήματα της επεξεργασίας παρουσιάζονται στο διάγραμμα Νο. 29.



Διάγραμμα 29: Διάγραμμα ροής μαγνητικού διαχωρισμού σε ψημένα δείγματα της Απορροής

Τα αποτελέσματα από τον μαγνητικό διαχωρισμό της πυρωμένης απορροής στους 650°C και 950°C παρουσιάζονται στους επόμενους πίνακες.

Πίνακας 16: Μαγνητικός διαχωρισμός στην πυρωμένη Απορροή στους 650°C

Περιγραφή δείγματος	Κατανομή βάρους επί της τροφοδοσίας (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Fe (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	SiO ₂ (%)	Υπόλοιπα (%)	Απώλεια Πύρωσης (%)	Κατανομή (Fe ₂ O ₃)
Μαγνητικό 1 (1,5 Α)	38,6	66,5	46,6	14,9	3,5	3,8	2,8	7,0	1,5	52,2
Μαγνητικό 2 (8,0 Α)	29,8	50,6	35,4	22,6	6,2	4,6	3,7	10,8	1,5	30,7
Μη Μαγνητικό 2	31,6	26,7	18,7	29,2	12,2	6,9	4,8	18,7	1,5	17,1
Μετρούμενη Τροφή	100									100

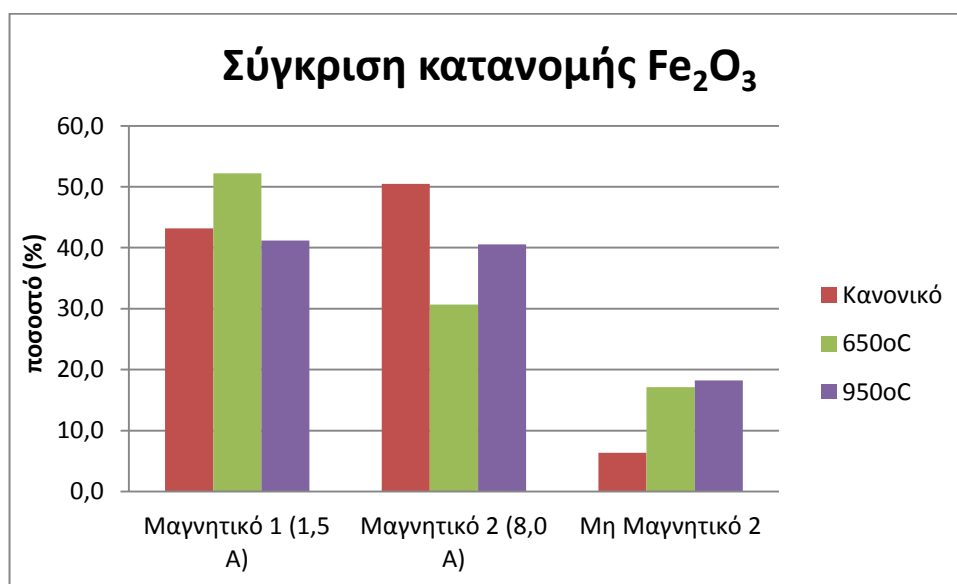
Υπολογιζόμενη τροφή	49,2	21,8	7,1	5,0	3,7	11,8	1,5
---------------------	------	------	-----	-----	-----	------	-----

Πίνακας 17: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού στην πυρωμένη Απορροή στους 950°C

Περιγραφή δείγματος	Κατανομή βάρους επί της τροφοδοσίας (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Fe (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	SiO ₂ (%)	Υπόλοιπα (%)	Απώλεια Πύρωσης (%)	Κατανομή (Fe ₂ O ₃)
Μαγνητικό 1 (1,5 Α)	33,8	63,5	44,4	15,1	5,1	3,9	3,3	7,5	1,5	41,2
Μαγνητικό 2 (8,0 Α)	39,7	53,2	37,2	22,4	6,9	4,8	3,7	6,7	2,3	40,5
Μη Μαγνητικό 2	26,5	35,9	25,1	33,3	10,0	7,0	4,6	5,9	3,4	18,3
Μετρούμενη Τροφή	100,0									100,0

Υπολογιζόμενη τροφή	52,1	22,8	7,1	5,1	3,8	6,8	2,3
----------------------------	------	------	-----	-----	-----	-----	-----

Με την βοήθεια των πινάκων 8, 16 και 17 προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα με τα οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων.



Διάγραμμα 30: Σύγκριση κατανομής Fe_2O_3 της κανονικής Απορροής με αυτές των πυρωμένων Απορροών

Από το Διάγραμμα 30 διαπιστώνεται ότι από την πύρωση του υλικού, τα οξείδια του σιδήρου αυξήθηκαν στο Μη μαγνητικό προϊόν και για τα δύο πυρωμένα δείγματα. Το δείγμα που πυρώθηκε στους 650°C έδωσε βελτιωμένο Μαγνητικό 1 και Μη Μαγνητικό ενώ το Μαγνητικό 2 έχασε μεγάλο μέρος της κατανομής Fe_2O_3 σε σχέση με αυτό του κανονικού δείγματος. Αντίθετα το δείγμα που πυρώθηκε στους 950°C δεν βελτίωσε τα ποσοστά της κατανομής Fe_2O_3 στα μαγνητικά προϊόντα παρά μόνο του Μη Μαγνητικού.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των πυρωμένων δειγμάτων της Υπερχείλισης και της απορροής πριν το μαγνητικό διαχωρισμό φαίνεται ότι η έψηση βοήθησε κυρίως τα ψιλά κλάσματα και όχι τα πιο χονδρόκοκα. Στα δείγματα αυτά έγιναν ορυκτολογικές αναλύσεις και προέκυψαν τα εξής.

Από το ακτινογράφημα Εικόνα 13 προκύπτει ότι η απορροή περιέχει τις εξής ορυκτολογικές φάσεις: Αιματίτης, Γκαιτίτης, Γιβίτης, Διάσπορο, Ασβεστίτης, Ανατάσης, Χαλαζίας, Βαιμίτης, Κατοΐτης, Καολινίτης(1A), Κανκρινίτης.

Το αντίστοιχο δείγμα μετά την πύρωσή του σε θερμοκρασία 650°C περιείχε Αιματίτη, Κορούνδιο, Ασβεστίτη και Ρουτίλιο (Εικόνα 19), ενώ αυτό το δείγμα που πυρώθηκε στους 950 °C περιείχε Αιματίτη, Κορούνδιο, Ρουτίλιο και Γκελενίτη (Εικόνα 20).

Συμπεράσματα

Το μέγεθος των κόκκων επηρεάζει την περιεκτικότητα των οξειδίων του σιδήρου. Όσο μεγαλώνει το μέγεθος των κόκκων αυξάνεται και το ποσοστό των οξειδίων του σιδήρου.

Η υδροταξινόμηση δεν είναι αρκετή ως διαδικασία εμπλουτισμού.

Επίσης στα λεπτόκοκκα κλάσματα δεν γίνεται καλός υγρός μαγνητικός διαχωρισμός καθώς μεγάλο ποσοστό του σιδήρου παρασύρεται από το νερό και καταλήγει στα μη μαγνητικά απορρίμματα.

Το δεύτερο πέρασμα βελτιώνει τα προϊόντα μου μαγνητικού διαχωρισμού

Το προϊόν με το μεγαλύτερο ποσοστό σιδήρου περιείχε 48,1% Fe και αντιστοιχούσε στο 4,2% κατά βάρος αρχικού υλικού.

Η πύρωση του υλικού βελτιώνει τον μαγνητικό διαχωρισμό στα λεπτόκοκκα κλάσματα.

Τα οξείδια του αργιλίου (Al_2O_3), του ασβεστίου (CaO), του πυριτίου (SiO_2) και τιτανίου (TiO_2) έχουν την τάση να καταλήγουν στα μη μαγνητικά.

Ο Καολίνης έχει την τάση να κατανέμεται μαζί με τον Αιματίτη.

Ο βασικός λόγος για τον οποίο δεν επιτευχθεί υψηλό ποσοστό ανάκτησης είναι η πολύ μικρή αποδέσμευση των κόκκων.

Βιβλιογραφία

I. Ελληνική

1. Αλεβίζος Γ. (2005) “Μικροσκόπια ορυκτών πρώτων υλών και τεχνητών προϊόντων” Σημειώσεις μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
2. Θωμαΐδης Ε.(2009) “Διερεύνηση δυνατοτήτων αξιοποίησης της ερυθράς ιλύος του Αγ. Νικολάου Βοιωτίας στην παρασκευή δομικών κεραμικών”, Μεταπτυχιακή εργασία , Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
3. Κουκλής Επ.-Αν. (2009)"Εμπλουτισμός μεταλλεύματος βωξίτη Παρνασσού-Γκιφνας", διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης Χανιά
4. Κοντόπουλος Α, (1978): “Δυνατότητες και προοπτικές αξιοποίησης της ελληνικής ερυθράς ιλύος” 1^ο Συνέδριο Ορυκτού πλούτου, Αθήνα
5. Κωστάκης Γ. (2005) “Οπτική κρυσταλλογραφία” Σημειώσεις μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
6. Κωστάκης Γ., (2005): “Συστηματική Ορυκτολογία.” Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά
7. Πασπαλιάρης Ι.(1985) "Συμβολή στη βελτιστοποίηση της εκχύλισης", Διδακτορική διατριβή Ε.Μ.Π. Αθήνα
8. Περδικάκης Β., ΠΕΝΤΑΡΗ Δ., (2003) “Εργαστηριακές ασκήσεις γεωχημείας” Πολυτεχνείου Κρήτης, Χανιά
9. Σταμπολιάδης Η.(2008) "Μηχανική των τεμαχιδίων", Σημειώσεις μαθήματος, Πολυτεχνείου Κρήτης, Χανιά
10. Σταμπολιάδης Η.(2008) "Εμπλουτισμός μεταλλευμάτων", Σημειώσεις μαθήματος Πολυτεχνείου Κρήτης, Χανιά
11. Φραγκίσκος Μ., (2004): “Παραγωγή στερεού αποθέσιμου συσσωματος από πολφό ερυθράς ιλύος με χρήση μεθόδων ηλεκτροαφυδάτωσης” Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα

II. Ξενογλώσση

1. Atasoooy A. (2005) “An investigation on characterization and thermal analysis of the aughinish red mad”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol 81 357-361.
2. Brunori, C., Cremisini, C., Massanisso, P., Pinto, V. and Torricelli, L., (2005)b: “Reuse of a treated red mud bauxite waste: Studies on environmental compatibility.” *J. Hazard. Mater.*, vol. 117(1), 55-63.
3. Cakici, A. I., Yanik, J., Ucar, S., Karayildirim, T. and Anil, H., (2004): “Utilization of red mud as catalyst in conversion of waste oil and waste plastics to fuel” *J.Mat. Cyc.and Was. Manag.*, vol. 6(1), 20-26.
4. Cengeloglu Y., Kir E. and Ersoz ., (2001): “Recovery and concentration of AL(III), Fe(III), Ti(IV), and Na(I) from red mud.” *J. Colloid Interface Sci.*, 244(2), 342-346.
5. Derie R, Ghodsi M, Culvo-Roche C. (1975)“DTA study of the dehydration of synthetic Geothite aFeOOH, ”, *Journal of thermal analysis* Vol.9 (1976) 435-440
6. Theo Klopogge J, Ruan D. Huada, Frost L. Ray (2002) “Thermal decomposition of Bauxite minerals: Infrared emission spectroscopy of Gibbsite, Beohmite and Diaspore, Queensland University of technology, Austalia.
7. Genç-Fuhrman, H., Tjell, J. C. and McConchie, D., (2003): “Increasing the arsenate adsorption capacity of neutralized red mud (Bauxsol).” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 271(2), 313-320.
8. Gupta, V. K., Gupta, M. and Sharma, S., (2001): “Process development for the removal of lead and chromium from aqueous solutions using red mud-an aluminium industry waste.” *Water Res.*, vol. 35(5), 1125-1134.
9. Ho, G. E., Mathew, K. and Gibbs, R. A., (1992): “Nitrogen and phosphorus removal from sewage effluent in amended sand columns.” *Water Res.*, vol. 26(3), 295-300.
10. Jones, G., Joshi, G., Clark, M. and McConchie, D., (2006): “Carbon Capture and theAluminium Industry.” *Preliminary Studies. Environ. Chem.*, vol 3, 297.
11. Komnitsas, K., Bartzas, G. and Paspaliaris, I., (2004): “Efficiency of limestone and red mud Barriers. Laboratory column studies.” *Miner. Eng.*, vol. 17(2), 183-194.
12. Li, Y. (2003): “Preparation of red mud/plastic composite for building material”. CN 1394898 A.
13. Mackenzie, R. C., (1970): “Differential Thermal Analysis.” Academic Press Inc., New York.
14. Maddockw G., Lin C. and McConchieD, (2004): “Effects of Bauxsol and biosolids on soil conditions of acid-generating mine spoil for plant growth” *Environ Pollut* vol.127(2), 157-167.
15. Mymrin V., de Araujo Ponte H. Ferreira L. O. and Vazquez V. A. (2003): “Environment-friendly method of high alkaline bauxite’s Red mud and ferrous slag utilization as an example of green chemistry” *Green Chem*, vol. 5(3), 357-360.

16. Munro, L. D., Clark, M. W. and McConchie, D., (2004): "A Bauxsol-based permeable reactive barrier for the treatment of acid rock drainage." *Mine Water Environ.*, vol. 23(4), 183-194.
17. Paramguru, R. K., Rath P. C. and Misra V. M., (2005): "Trends in the mud utilization-A review." *Miner Process. Extr. M.*, voll. 26, 1-29
18. Paredes, J. R., Ordonez, S., Vega, A. and Diez, F. V., (2004): "Catalytic combustion of methane over red mud-based catalysts." *Applied Catalysis, B: Environmental*, vol.47(1), 37-41.
19. Park, S. and Jun, B., (2005): "Improvement of red mud polymer-matrix nanocomposites by red mud surface treatment." *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 284(1), 204-209.
20. Peng, F., Liang, K., Shao, H. and Hu, A., (2005): "Nano-crystal glass-ceramics obtained by crystallization of vitrified red mud." *Chemosphere*, vol. 59(6), 899-903.
21. Pirkanniemi k. and Sillanpaa M. (2002): "Heterogeneous water catalysis as an environmental application: a review" *Chemosphere*, vol 48 (10), 1047-1060.
22. Plunkert, P. A., (2007): "Bauxite and Alumina. Minerals Commodity Summaries." U.S. Geological Survey.
23. Plunkert, P. A. (1996): "Bauxite and Alumina. Minerals Information" U.S. Geological Survey.
24. Santona, L., Castaldi, P. and Melis, P., (2006): "Evaluation of the interaction mechanisms between red muds and heavy metals" *J. Hazard. Mater.*, vol. 36(2), 324-329.
25. Summers R. N., Guise N. R. and Smirk D.D. (1993): "Bauxite residue (red mud) increases phosphorus retention in sandy soil catchments in Western Australia" *Nutr. Cycl. Agroecosys*, vol 34(1), 85-94.
26. Smirnov, D. I. and Molchanova, T. V., (1997): "The investigation of sulphuric acid sorption recovery of scandium and uranium from the red mud of alumina production." *Hydrometallurgy*, vol. 45(3), 249-259.
27. Tsakanika L. V., Ochenkuehn-Petropoulo, M. T. and Mendrinos L. N. I., (2004): "Investigation of the separation of scandium and rare earth elements from red mud by use of reversed-phase HPLC." *Anal. Bioanal. Chem.*, vol 379(5-6), 796-802.
28. Tsakiridis P.E., Agatzini-Leonardou S. and Oustadakis P. (2004): "Red mud addition in the raw meal for the production of Portland cement clinker" *J. Hazard Mater*, vol. 116(1-2), 103-110.
29. Walter D, Buxbaum G., Laquq W. (2000) "The mechanism of the thermal transformation from Geothite to Hematite, ", *Journal of thermal analysis and calorimetry*, Vol. 63 (2001) 733-748.
30. Wehr, J., Fulton, I. and Menzies, N., (2006): "Revegetation Strategies for Bauxite Refinery Residue." A Case Study of Alcan Gove in Northern Territory, Australia. *Environ. Manage.*, vol. 37(3), 297-306.
31. Yalcin, N. and Sevinc, V., (2000): "Utilization of bauxite waste in ceramic glazes." *Ceram. Int.*, 26(5), 485-493.

32. Yang Y. D., Sommerville I. D., McLean A. B. X. and Hou J. (2004): "The use of waste materials from aluminum production as refining fluxes for hot metal and liquid steel." In Proceedingw of the 5th International Symposium on Waste Prosessing and Recykling in Minenal and Mettallurgical Industries. Ontario, Canada

III. Ηλεκτρονική

<http://openarchives.gr>

<http://redmud.org>

<http://www.mytilineos.gr/el-gr/metallurgy-and-mining-aluminium/activities>

<http://www.alhellas.com>

http://en.wikipedia.org/wiki/Red_mud

Παράρτημα

1.Πίνακες χημικών αναλύσεων

Πίνακας 18:Χημική ανάλυση του αρχικού δείγματος καθώς και των προϊόντων του Υδροκυκλώνα

Περιγραφή Δείγματος	Αρχικό	1 ^η Υπερχείλιση	2 ^η Υπερχείλιση	Απορροή
Απώλεια Πύρωσης	7,80	9,10	8,60	8,80
Fe ₂ O ₃ (%)	59,79	57,70	57,40	67,09
Al ₂ O ₃ (%)	9,90	7,68	7,88	12,01
CaO (%)	13,58	15,11	15,67	9,19
TiO ₂ (%)	7,53	8,22	8,50	5,23
SiO ₂ (%)	7,61	9,35	8,48	4,69
SO ₃ (%)	0,48	0,60	0,58	0,83
Cr	0,22	0,29	0,31	0,24
ZrO ₂	0,20	0,26	0,23	0,18
Cl	0,13	0,11	0,13	0,00
P ₂ O ₅	0,12	0,16	0,18	0,19
Co	0,11	0,00	0,11	0,00
PbO	0,09	0,09	0,08	0,09
Ni	0,09	0,11	0,09	0,10
V	0,06	0,06	0,09	0,07
Nb	0,03	0,03	0,03	0,01
SrO	0,02	0,02	0,02	0,01
Cu	0,01	0,01	0,01	0,02
ZnO	0,01	0,01	0,01	0,02
Rb	0,01	0,01	0,01	0,01
BaO	0,01	0,18	0,15	0,02
K ₂ O	0,00	0,00	0,04	0,00
Σύνολο	100,00	100,00	100,00	100,00

Πίνακας 19: Χημικές αναλύσεις των προϊόντων των διαδοχικών κυκλώνων

Περιγραφή Δείγματος	Χημικές αναλύσεις των προϊόντων των διαδοχικών κυκλώνων					
	+32μm	+24μm	+17μm	+12μm	+10μm	-10μm
Απώλεια Πύρωσης	6,90	6,70	7,60	7,40	7,80	7,90
Fe₂O₃ (%)	71,88	75,74	73,04	62,87	56,95	54,97
Al₂O₃ (%)	7,91	9,03	10,95	10,73	12,26	8,45
CaO (%)	5,65	6,10	6,34	9,13	11,19	16,13
TiO₂ (%)	3,33	3,98	4,39	4,91	5,87	8,55
SiO₂ (%)	2,83	3,65	3,73	4,11	4,40	9,90
MgO (%)	1,45	0,00	0,00	1,48	1,71	0,00
BaO (%)	0,26	0,19	0,29	0,31	0,29	0,20
SO₃ (%)	0,21	0,13	0,09	0,17	0,15	0,52
P₂O₅ (%)	0,19	0,19	0,15	0,19	0,22	0,19
Cr (%)	0,19	0,24	0,26	0,23	0,23	0,30
K₂O (%)	0,15	0,00	0,00	0,14	0,14	0,00
PbO (%)	0,11	0,12	0,11	0,10	0,14	0,14
V (%)	0,06	0,07	0,07	0,07	0,06	0,08
Ni (%)	0,06	0,10	0,10	0,07	0,09	0,09
Διάφορα	5,72	0,46	0,48	5,49	6,30	0,48
Σύνολο	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Πίνακας 20: Χημικές αναλύσεις των προϊόντων του μαγνητικού διαχωρισμού στα προϊόντα του υδροκυκλώνα

Περιγραφή δείγματος	Μαγνητικό 1 ^{ης} της υπερχειίλισης	Μαγνητικό 2 της 1 ^{ης} υπερχειίλισης	Μη Μαγνητικό της 1 ^{ης} υπερχειίλισης	Μαγνητικό 1 της 2 ^{ης} υπερχειίλισης	Μαγνητικό 2 της 2 ^{ης} υπερχειίλισης	Μη Μαγνητικό της 2 ^{ης} υπερχειίλισης	Μαγνητικό 1 της Απορροής	Μαγνητικό 2 της Απορροής	Μη Μαγνητικό της Απορροής
Fe ₂ O ₃ (%)	55,54	55,06	57,87	59,72	56,36	51,09	78,92	69,76	38,48
Al ₂ O ₃ (%)	6,37	6,62	7,09	7,43	6,35	6,63	7,55	10,35	18,06
CaO (%)	14,17	14,51	15,65	15,02	13,98	14,60	4,08	7,59	24,83
TiO ₂ (%)	7,55	7,53	8,57	8,37	6,58	7,44	3,95	4,83	9,56
SiO ₂ (%)	8,67	8,84	8,94	7,57	7,43	8,10	3,27	4,27	7,17
SO ₃ (%)	0,48	0,47	0,54	0,46	0,51	0,56	0,83	0,75	0,65
Cr (%)	0,28	0,29	0,31	0,30	0,29	0,23	0,25	0,25	0,21
ZrO ₂ (%)	0,23	0,23	0,27	0,22	0,24	0,25	0,13	0,17	0,35
Cl (%)	0,08	0,09	0,10	0,08	0,11	0,10	0,00	0,02	0,07
P ₂ O ₅ (%)	0,14	0,17	0,15	0,14	0,18	0,19	0,16	0,16	0,19
Co (%)	0,10	0,09	0,12	0,14	0,10	0,07	0,20	0,12	0,00
PbO (%)	0,10	0,17	0,10	0,09	0,08	0,10	0,13	0,11	0,12
Ni (%)	0,09	0,10	0,11	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,07
V (%)	0,07	0,07	0,08	0,09	0,06	0,05	0,07	0,06	0,20
Nb (%)	0,03	0,03	0,03	0,05	0,04	0,03	0,01	0,01	0,01
SrO (%)	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,01	0,02	0,01
Cu (%)	0,03	0,03	0,02	0,04	0,03	0,02	0,00	0,02	0,01
ZnO (%)	0,03	0,03	0,01	0,03	0,03	0,02	0,00	0,02	0,01
Rb (%)	0,02	0,02	0,01	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00
BaO (%)	0,35	0,46	0,00	0,09	1,04	0,22	0,18	0,24	0,00
K ₂ O (%)	0,21	0,39	0,00	0,00	0,32	0,13	0,15	0,15	0,00
Na ₂ O (%)	4,78	4,00	0,00	0,00	5,05	8,47	0,00	0,00	0,00
MgO (%)	0,65	0,76	0,00	0,00	1,07	1,56	0,00	1,00	0,00
Σύνολο	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Πίνακας 21:Χημικές αναλύσεις του μαγνητικού διαχωρισμού για τα τρία διαφορετικά μεγέθη σφαιρών (10mm, 12mm και 22mm)

Περιγραφή δείγματος	Μαγνητικό με 10mm διάμετρο σφαιρών	Μη Μαγνητικό με 10mm διάμετρο σφαιρών	Μαγνητικό με 12mm διάμετρο σφαιρών	Μη Μαγνητικό με 12mm διάμετρο σφαιρών	Μαγνητικό με 22mm διάμετρο σφαιρών	Μη Μαγνητικό με 22mm διάμετρο σφαιρών
Fe₂O₃ (%)	75,86	0,00	76,99	41,98	80,43	53,44
Al₂O₃ (%)	10,18	0,00	9,36	17,95	5,99	17,13
CaO (%)	4,34	0,00	4,23	22,50	3,07	14,95
TiO₂ (%)	4,28	0,00	4,20	8,76	3,44	6,81
SiO₂ (%)	3,34	0,00	3,20	6,24	2,98	6,08
SO₃ (%)	0,72	0,00	0,76	0,52	0,76	0,59
Cr(%)	0,24	0,00	0,24	0,22	0,24	0,22
ZrO₂ (%)	0,12	0,00	0,11	0,25	0,12	0,25
Cl (%)	0,05	0,00	0,06	0,08	0,05	0,04
P₂O₅(%)	0,14	0,00	0,14	0,23	0,16	0,19
Co (%)	0,20	0,00	0,20	0,00	0,16	0,00
PbO(%)	0,15	0,00	0,11	0,07	0,10	0,09
Ni (%)	0,09	0,00	0,09	0,07	0,09	0,10
V (%)	0,08	0,00	0,08	0,06	0,08	0,05
Nb (%)	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02
SrO (%)	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02
Cu(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
ZnO (%)	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02
Rb (%)	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
BaO (%)	0,13	0,00	0,13	0,01	0,48	0,00
K₂O (%)	0,04	0,00	0,06	0,00	0,21	0,00
MgO (%)	0,00	0,00	0,00	1,01	1,58	0,00
Σύνολο	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Πίνακας 22: Χημικές αναλύσεις των προϊόντων του μαγνητικού διαχωρισμού της απορροής στα 8Ampere ένταση

Περιγραφή δείγματος	Μαγνητικό 1 (8A)	Μαγνητικό 2 (8A)	Μη Μαγνητικό (8A)
Fe ₂ O ₃ (%)	73,93	52	34,08
Al ₂ O ₃ (%)	10,84	18,06	17,19
CaO (%)	4,77	15,4	25,43
TiO ₂ (%)	4,04	7,29	8,21
SiO ₂ (%)	3,77	5,64	7,14
SO ₃ (%)	0,54	0,58	0,61
Cr (%)	0,24	0,21	0,1
ZrO ₂ (%)	0,14	0,2	0,32
Cl (%)	0,01	0	0,08
P ₂ O ₅ (%)	0,13	0,2	0,25
Co (%)	0,01	0,06	0,03
PbO (%)	0,12	0,1	0,09
Ni (%)	0,08	0,08	0,07
V (%)	0,07	0,08	0,08
Nb (%)	0,01	0,03	0,04
SrO (%)	0,01	0	0,03
Cu (%)	0	0	0,03
ZnO (%)	0,02	0,03	0,04
Rb (%)	0,01	0,01	0,02
BaO (%)	0,13	0,01	0,25
K ₂ O (%)	0,17	0,01	0,23
MgO (%)	0,96	0,01	1,34
Na ₂ O (%)	0	0	4,34
Σύνολο	100	100	100

Πίνακας 23: Χημικές αναλύσεις του μαγνητικού διαχωρισμού στα 1ο και το 2ο Μαγνητικό της Απορροής

Περιγραφή δείγματος	1ο Μαγνητικό του Μαγνητικού 1	2ο Μαγνητικό του Μαγνητικού 1	Μη Μαγνητικό του Μαγνητικού 1	1ο Μαγνητικό του Μαγνητικού 2	2ο Μαγνητικό του Μαγνητικού 2	Μη Μαγνητικό του Μαγνητικού 2
Fe₂O₃ (%)	85,73	80,30	65,14	82,91	76,05	57,29
Al₂O₃ (%)	4,34	7,17	10,71	6,08	9,39	14,74
CaO (%)	2,08	3,74	9,77	2,84	5,07	13,99
TiO₂ (%)	3,36	3,77	4,40	3,57	4,19	7,11
SiO₂ (%)	2,51	3,06	4,17	2,87	3,67	5,07
SO₃ (%)	0,68	0,66	0,67	0,51	0,54	0,63
Cr (%)	0,26	0,26	0,32	0,25	0,26	0,00
ZrO₂ (%)	0,11	0,12	0,19	0,11	0,14	0,21
Cl (%)	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
P₂O₅ (%)	0,13	0,15	0,25	0,11	0,14	0,20
Co (%)	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,10
PbO (%)	0,12	0,11	0,13	0,11	0,13	0,14
Ni (%)	0,11	0,10	0,08	0,09	0,11	0,09
V (%)	0,08	0,08	0,05	0,08	0,07	0,08
Nb (%)	0,01	0,02	0,05	0,02	0,01	0,03
SrO (%)	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03
Cu (%)	0,02	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00
ZnO (%)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
Rb (%)	0,01	0,02	0,05	0,02	0,01	0,22
BaO (%)	0,23	0,23	1,23	0,22	0,19	0,02
K₂O (%)	0,19	0,16	0,30	0,18	0,00	0,02
MgO (%)	0,00	0,00	1,99	0,00	0,00	0,00
Σύνολο	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Πίνακας 24: Χημικές αναλύσεις του μαγνητικού διαχωρισμού του 1ου Μαγνητικού της απορροής που έγιναν στα 1,5Ampere και στα 8 Ampere

Περιγραφή δείγματος	1 ^ο Μαγνητικό (1,5 ^Α)	2 ^ο Μαγνητικό (1,5 ^Α)	Μη Μαγνητικό (1,5 ^Α)	1 ^ο Μαγνητικό (8 ^Α)	2 ^ο Μαγνητικό (8 ^Α)	Μη Μαγνητικό (8 ^Α)
Fe ₂ O ₃ (%)	83,77	79,88	64,5	79,64	67,08	42,68
Al ₂ O ₃ (%)	4,57	6,48	12,95	8,24	13,82	14,59
TiO ₂ (%)	3,33	3,19	4,31	3,73	5,38	6,41
SiO ₂ (%)	2,8	3,1	4,73	3,24	4,38	6,29
CaO (%)	2,54	3,49	8,72	3,14	7,5	18,38
Υπόλοιπα(%)	2,99	3,86	4,79	2,01	1,84	11,65
Σύνολο	100	100	100	100	100	100

Πίνακας 25: Χημικές αναλύσεις με την μέθοδο standard-less των προϊόντων του μαγνητικού διαχωρισμού της απορροής αφού πρώτα πυρώθηκαν στους 950°C και 650°C

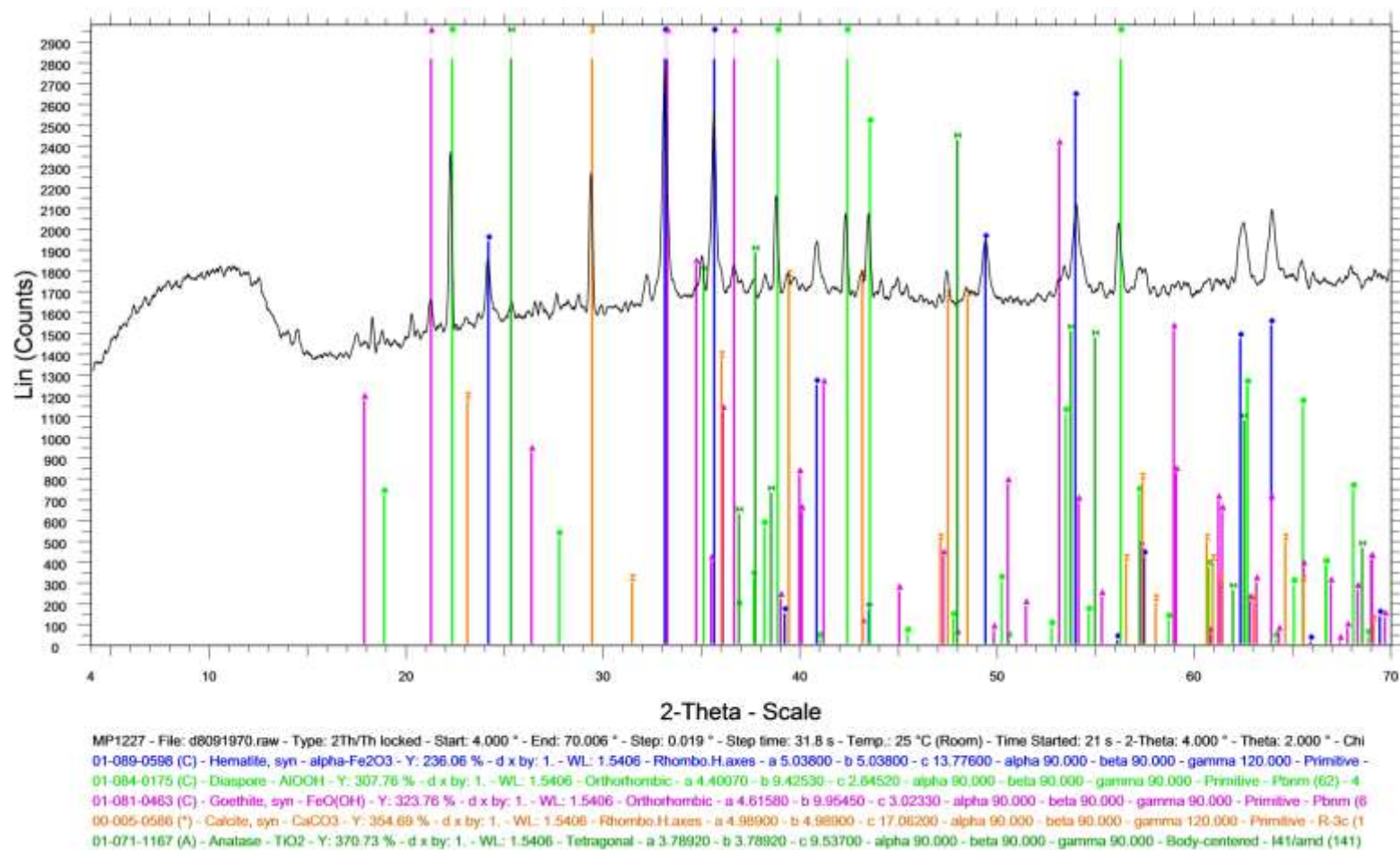
Περιγραφή δείγματος	Απώλεια πύρωσης	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	SiO ₂ (%)	Υπόλοιπα (%)	Σύνολο
Μαγνητικό 1 (950°C)	1,5	74,0	7,3	6,7	3,9	3,9	2,7	100
Μαγνητικό 2 (950°C)	2,3	65,4	11,3	9,1	4,8	4,3	2,8	100
Μη Μαγνητικό (950°C)	3,4	50,9	17,3	13,0	7,0	5,5	2,9	100
Μαγνητικό 1 (650°C)	3,3	76,6	7,1	4,6	3,8	3,2	1,5	100
Μαγνητικό 2 (650°C)	5,8	63,2	11,4	8,1	4,6	4,4	2,5	100
Μη Μαγνητικό (650°C)	9,3	43,2	15,1	16,0	6,9	5,7	3,8	100

Πίνακας 26: Χημικές αναλύσεις με την μέθοδο της σύντηξης των προϊόντων του μαγνητικού διαχωρισμού της απορροής αφού πρώτα πυρώθηκαν στους 950°C και 650°C

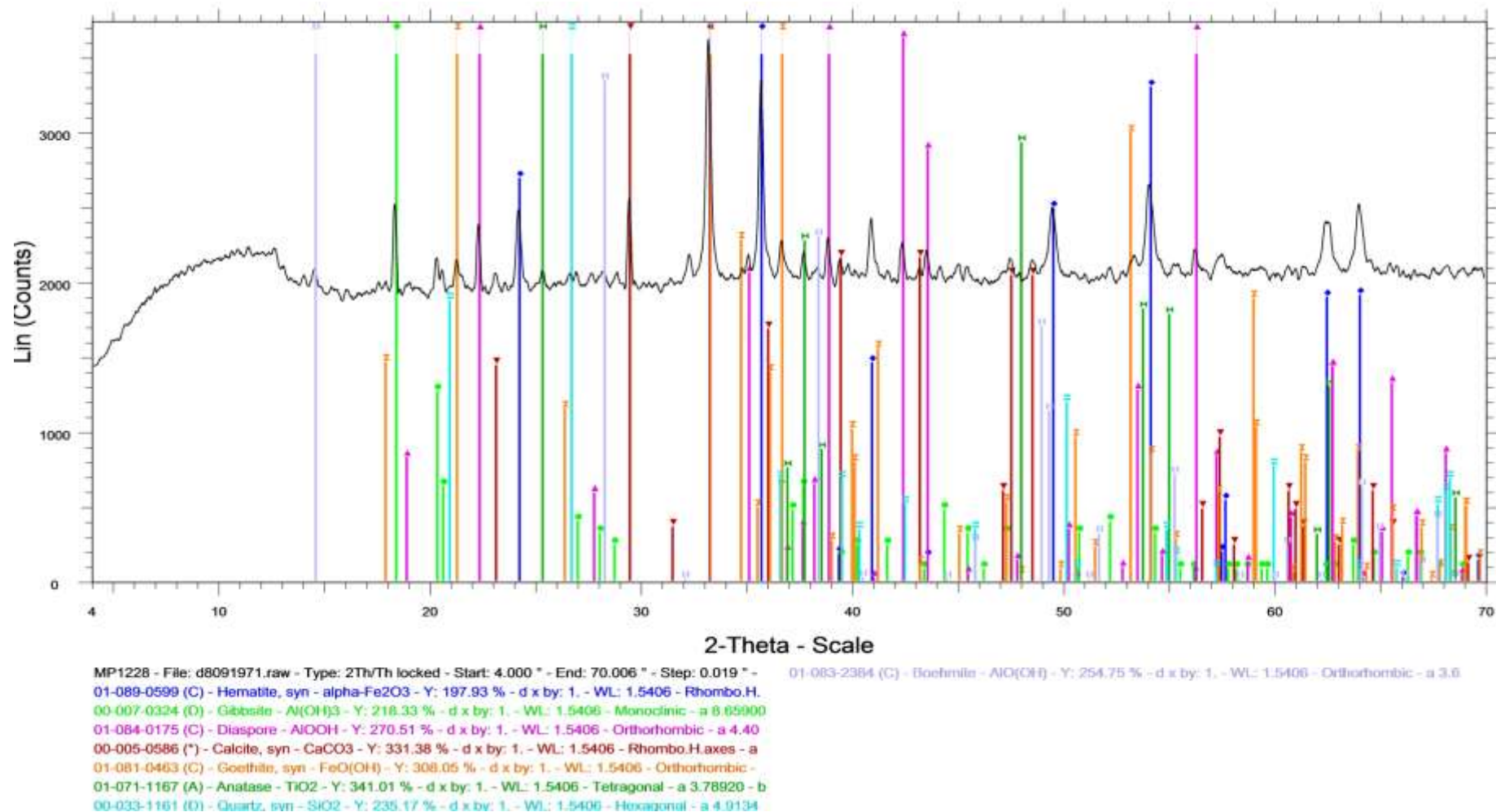
Περιγραφή δείγματος	Απώλεια πύρωσης	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	SiO ₂ (%)	Υπόλοιπα (%)	Σύνολο
Μαγνητικό 1 (950°C)	1,5	49,1	15,2	6,4	13,1	11,8	3,0	100,0
Μαγνητικό 2 (950°C)	2,3	38,9	22,5	8,9	11,4	13,7	2,4	100,0
Μη Μαγνητικό (950°C)	3,4	26,8	30,6	12,7	9,5	15,5	1,5	100,0
Μαγνητικό 1 (650°C)	3,3	49,0	15,6	4,7	13,6	10,9	3,0	100,0
Μαγνητικό 2 (650°C)	5,8	37,7	21,7	8,1	11,1	13,3	2,3	100,0
Μη Μαγνητικό (650°C)	9,3	22,6	28,6	15,2	7,8	14,9	1,5	100,0

2.Ακτινογραφήματα

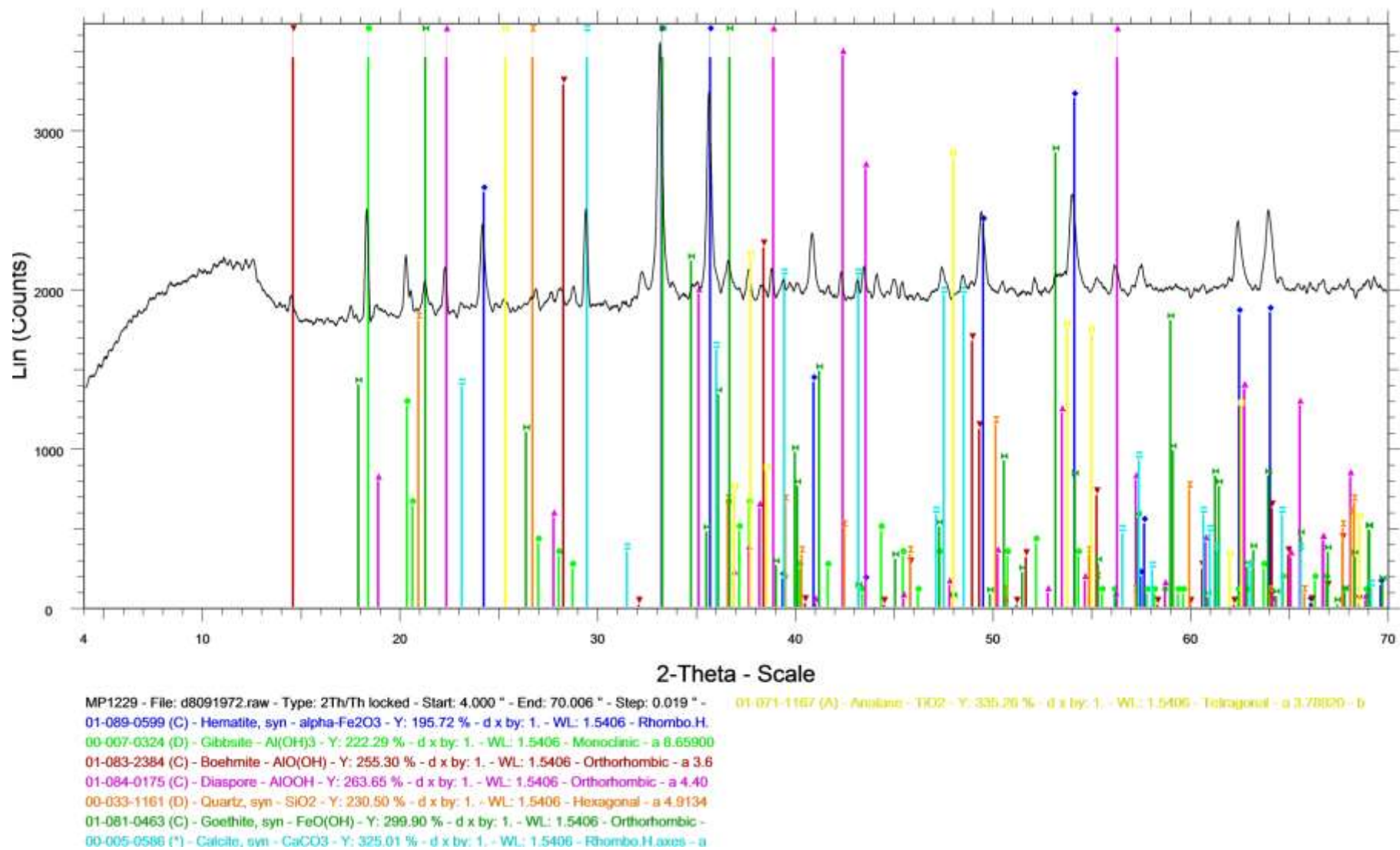
Ακτινογραφήματα περιθλασίμετρου ακτίνων-X πραγματοποιήθηκαν στα κλάσματα των διαδοχικών κυκλώνων, στην απορροή του υδροκυκλώνα καθώς επίσης και στα προϊόντα του μαγνητικού διαχωρισμού της απορροής. Ακτινογραφήματα μετρήθηκαν ακόμα στην 1^η υπερχειλίση και στην απορροή αφού πρώτα πυρώθηκαν στους 650°C και στους 950°C για τέσσερις ώρες.



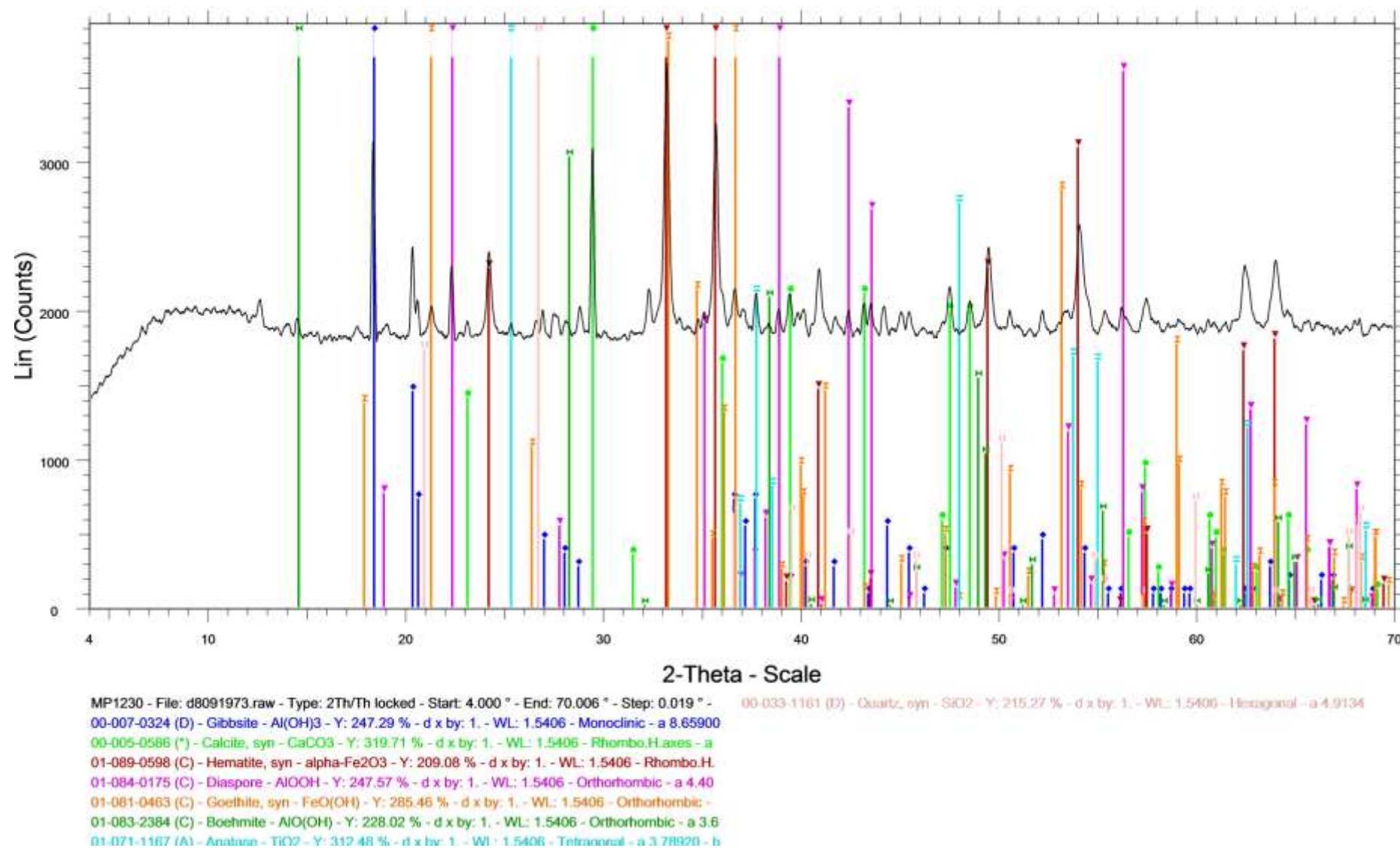
Εικόνα 7: Ακτινογράφημα περιθλασιμετρίας ακτίνων –X του πρώτου κλάσματος των διαδοχικών κυκλώνων (Warman)



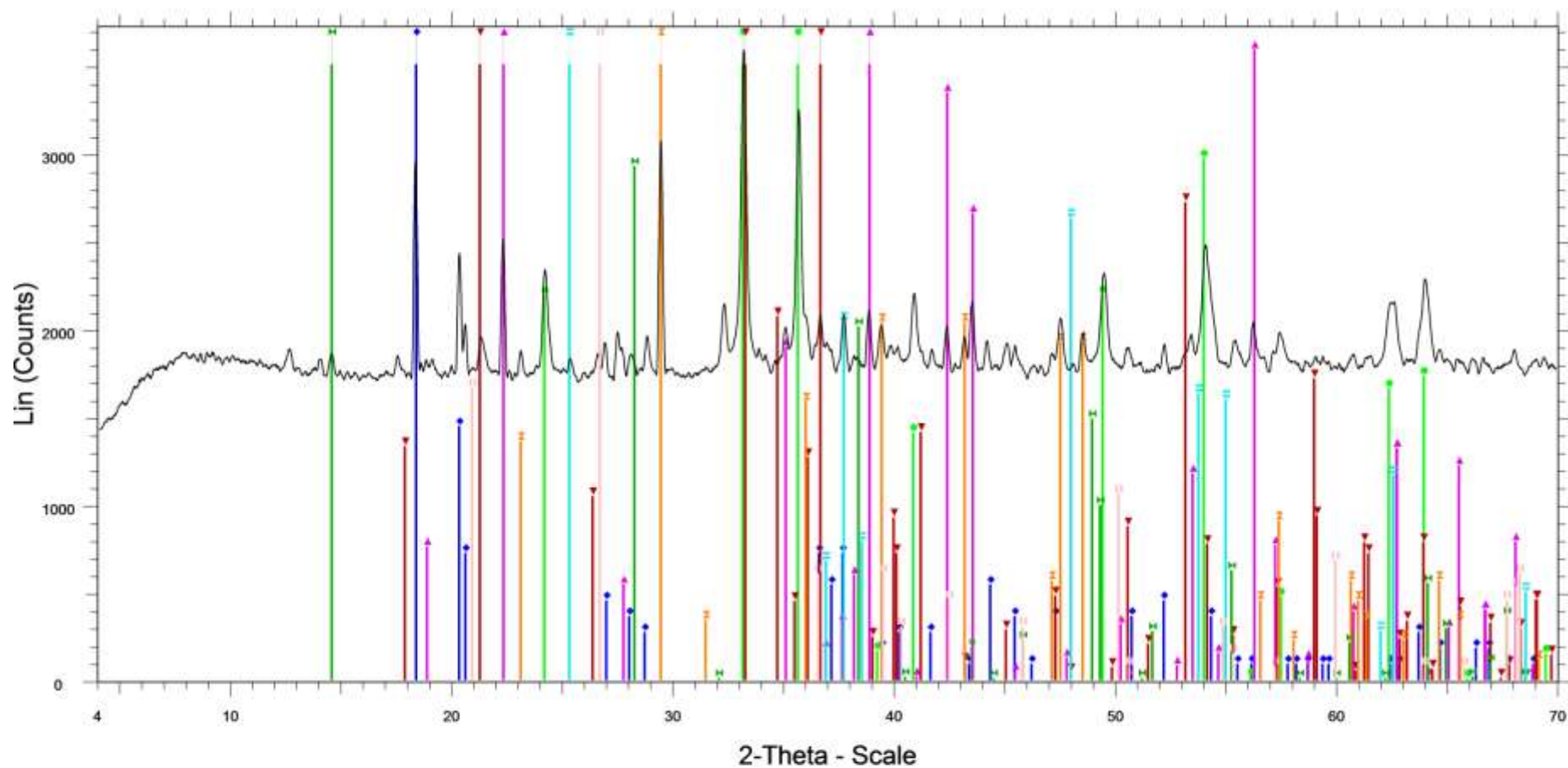
Εικόνα 8: Ακτινογράφημα περιθλασιμετρίας ακτίνων -X του δεύτερου κλάσματος των διαδοχικών κυκλώνων (Warman)



Εικόνα 9: Ακτινογράφημα περιθλασιμετρίας ακτίνων -X του τρίτου κλάσματος των διαδοχικών κυκλώνων (Warman)



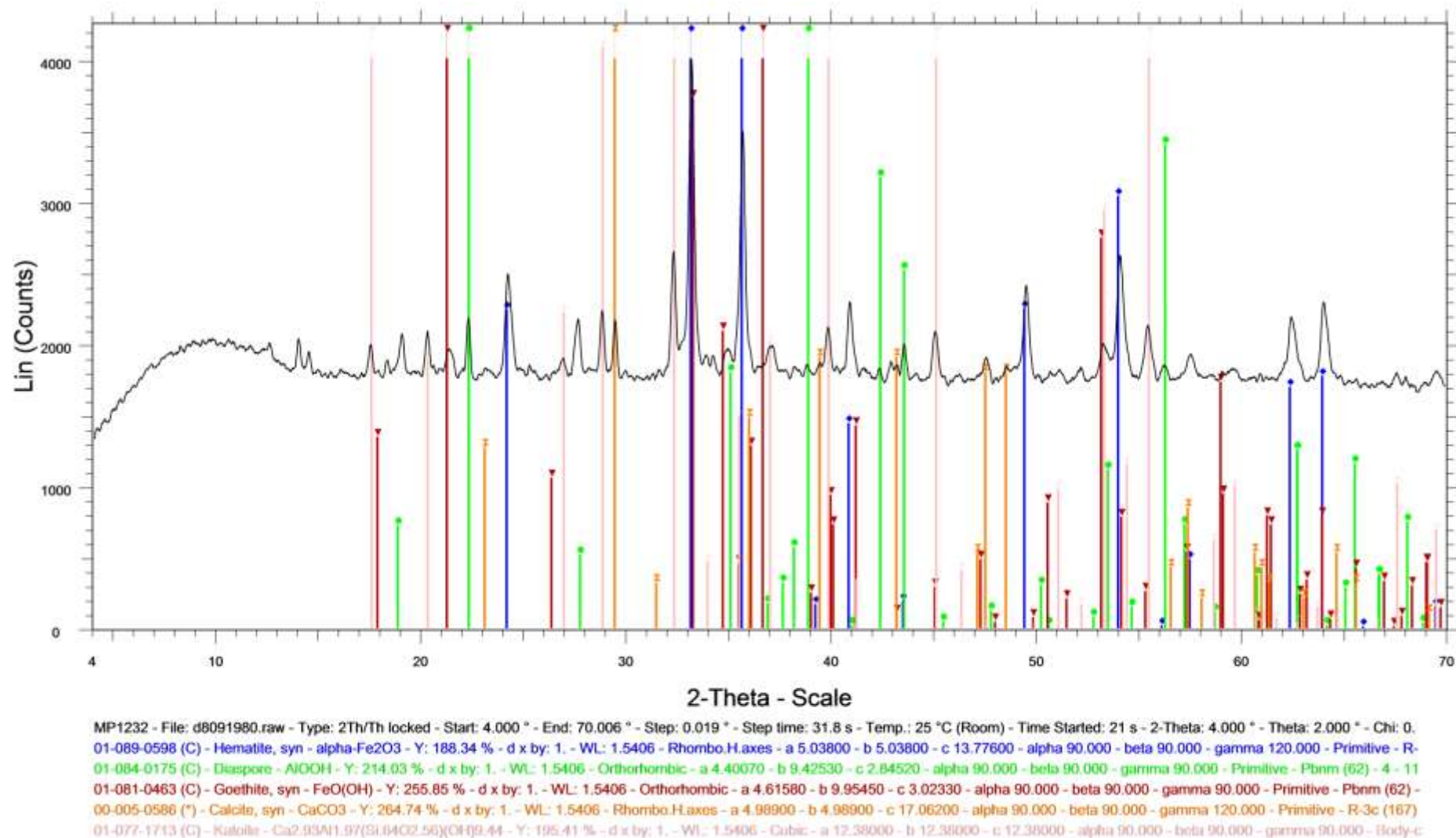
Εικόνα 10: Ακτινογράφημα περιθλασιμετρίας ακτίνων –X του τέταρτου κλάσματος των διαδοχικών κυκλώνων (Warman)



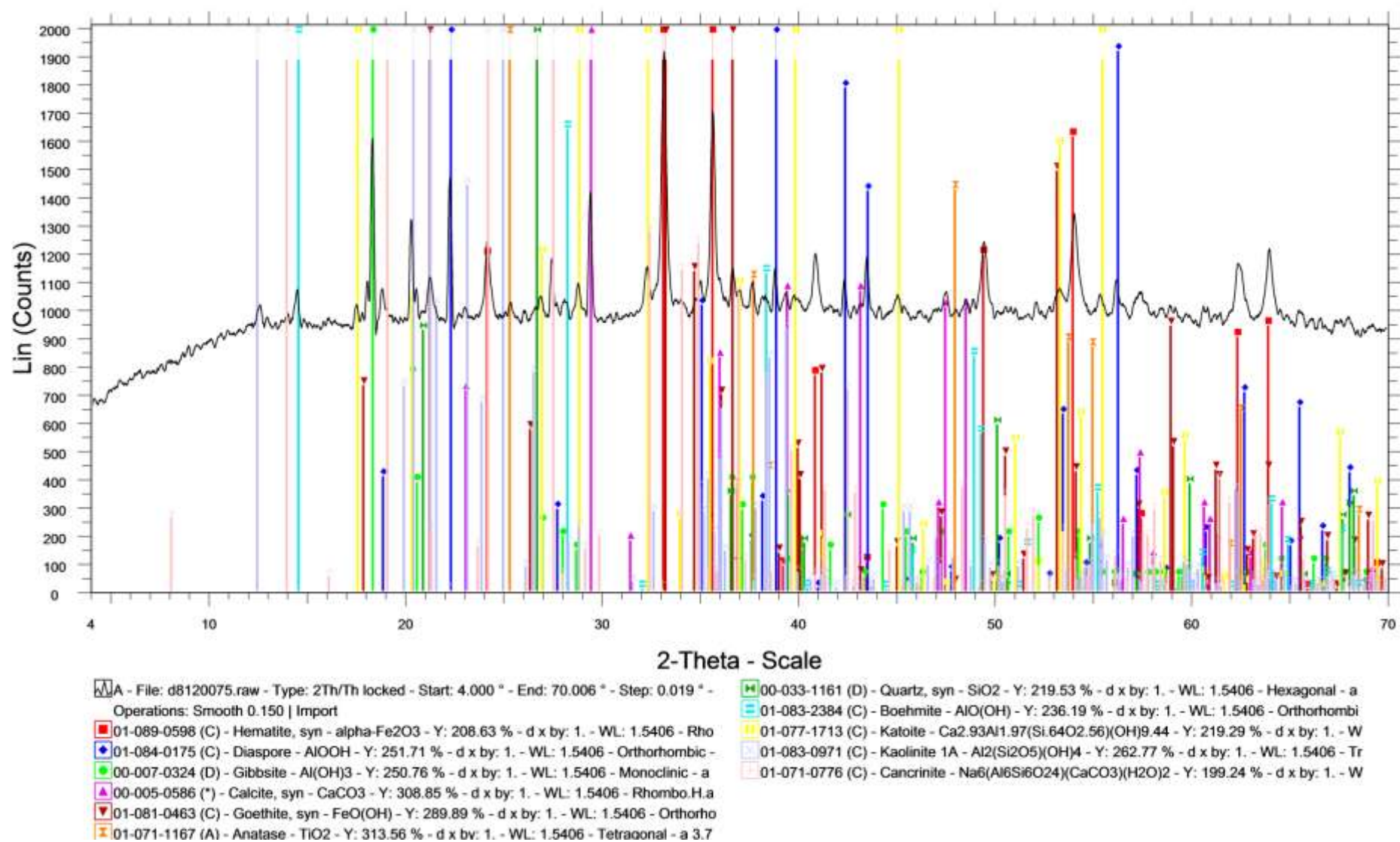
MP1231 - File: d8091974.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.000 ° - End: 70.006 ° - Step: 0.019 ° -
 00-007-0324 (D) - Gibbsite - $\text{Al}(\text{OH})_3$ - Y: 251.51 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic - a 8.65900
 01-089-0595 (C) - Hematite, syn - $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ - Y: 205.18 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.
 01-084-0175 (C) - Diaspore - AlOOH - Y: 251.65 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Orthorhombic - a 4.40
 01-081-0463 (C) - Goethite, syn - $\text{FeO}(\text{OH})$ - Y: 282.53 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Orthorhombic -
 00-005-0585 (*) - Calcite, syn - CaCO_3 - Y: 315.25 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.axes - a
 01-083-2384 (C) - Boehmite - $\text{AlO}(\text{OH})$ - Y: 224.97 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Orthorhombic - a 3.6
 01-071-1167 (A) - Anatase - TiO_2 - Y: 309.13 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Tetragonal - a 3.78920 - b

00-033-1161 (D) - Quartz, syn - SiO_2 - Y: 210.49 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal - a 4.9134

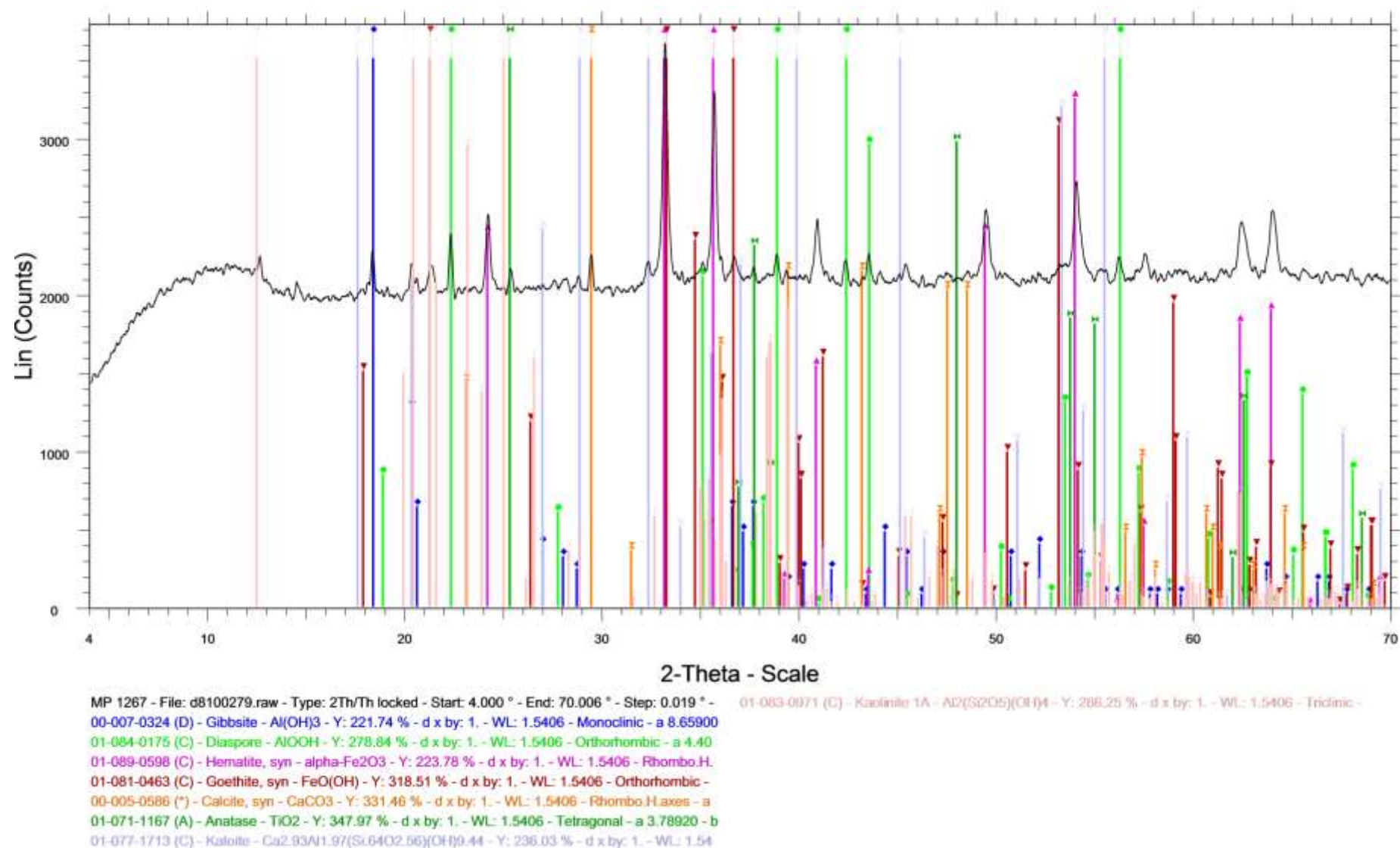
Εικόνα 11: Ακτινογράφημα περιθλασιμετρίας ακτίνων -X του πέμπτου κλάσματος των διαδοχικών κυκλώνων (Warman)



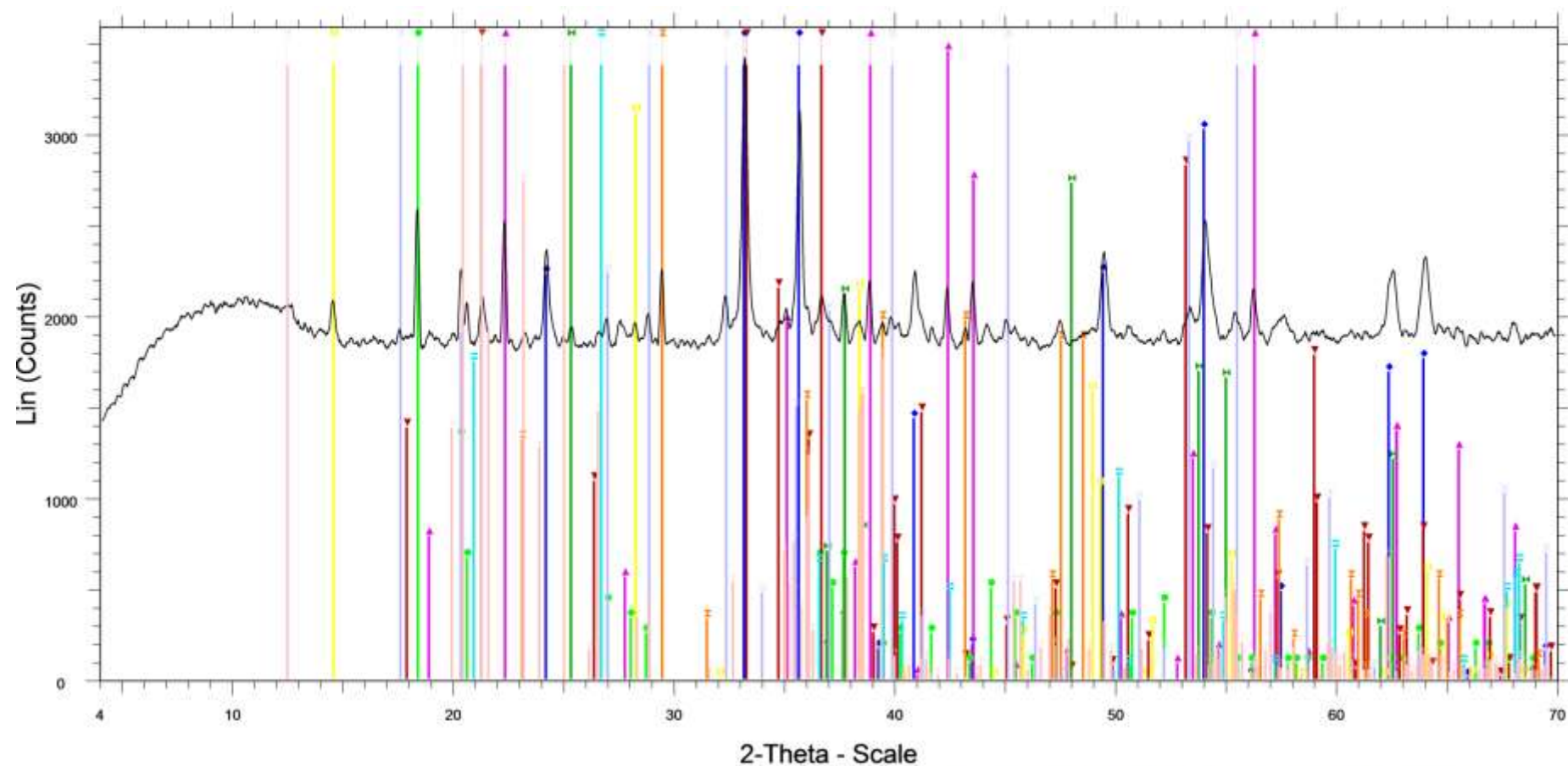
Εικόνα 12: Ακτινογράφημα περιθλασιμετρίας ακτίνων –X του έκτου κλάσματος των διαδοχικών κυκλώνων (Warman)



Εικόνα 13: Ακτινογράφημα περιθλασιμετρίας ακτίνων -X της Απορροής του υδροκυκλώνα



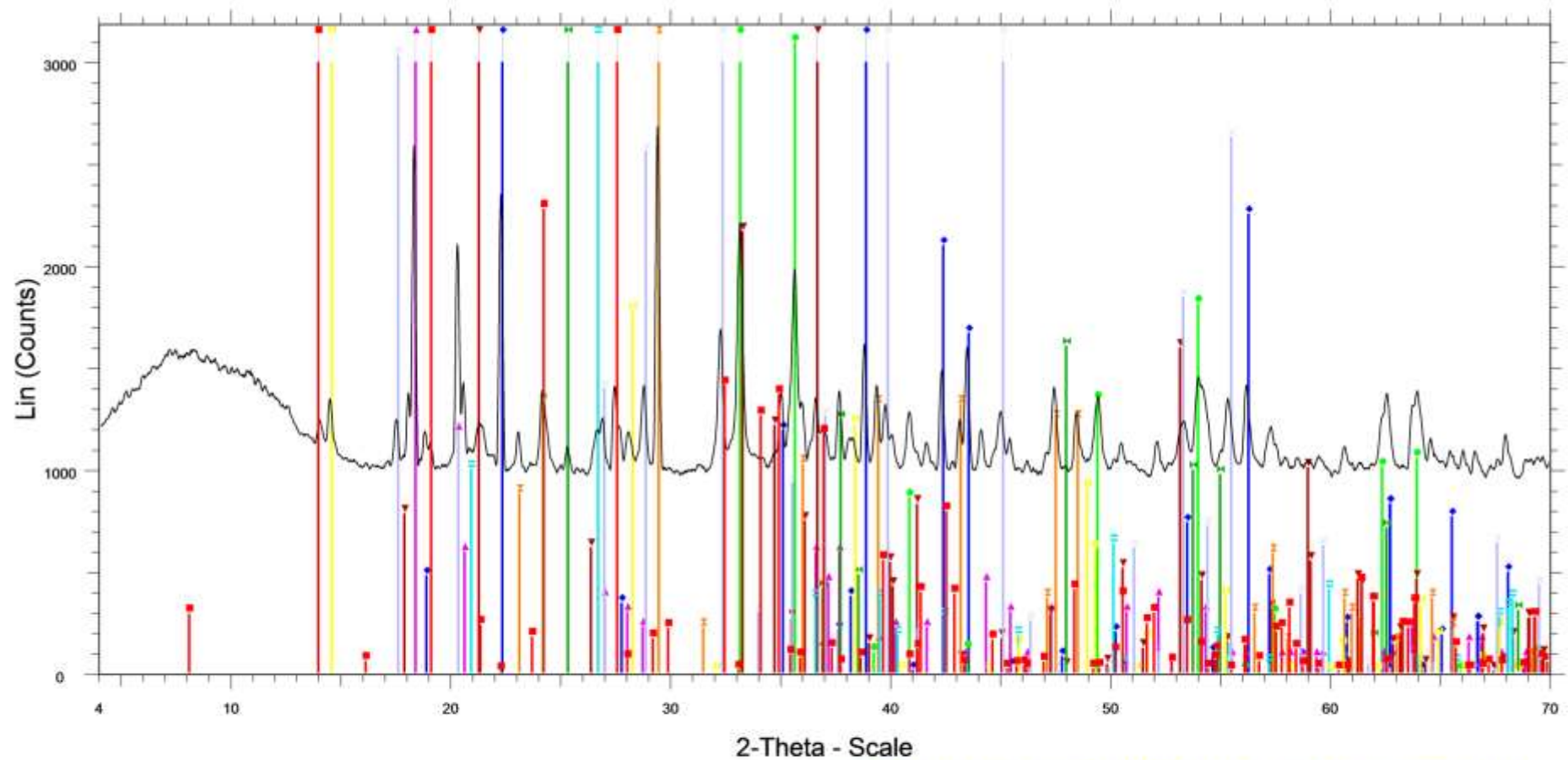
Εικόνα 14: Ακτινογράφημα περιθλασιμετρίας ακτίνων -X του μαγνητικού 1 της Απορροής του υδροκυκλώνα



MP 1268 - File: d8100280.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.000 ° - End: 70.006 ° - Step: 0.019 ° -
 01-089-0598 (C) - Hematite, syn - α -Fe₂O₃ - Y: 219.10 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.
 01-084-0175 (C) - Diaspore - AlOOH - Y: 272.70 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Orthorhombic - a 4.40
 00-007-0324 (D) - Gibbsite - Al(OH)₃ - Y: 243.16 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic - a 8.65900
 01-081-0463 (C) - Goethite, syn - FeO(OH) - Y: 307.92 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Orthorhombic -
 00-005-0586 (*) - Calcite, syn - CaCO₃ - Y: 320.59 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.axes - a
 01-071-1167 (A) - Anatase - TiO₂ - Y: 336.16 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Tetragonal - a 3.78920 - b
 00-033-1161 (D) - Quartz, syn - SiO₂ - Y: 231.99 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal - a 4.9134

01-083-2384 (C) - Boehmite - AlO(OH) - Y: 251.17 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Orthorhombic - a 3.6
 01-077-1713 (C) - Katoite - Ca₂93Al₁97(Si₁84O₂56)(OH)₀.44 - Y: 229.95 % - d x by: 1. - WL: 1.54
 01-083-0971 (C) - Kaolinite 1A - Al₂(Si₂O₅)(OH)₄ - Y: 279.46 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Triclinic -

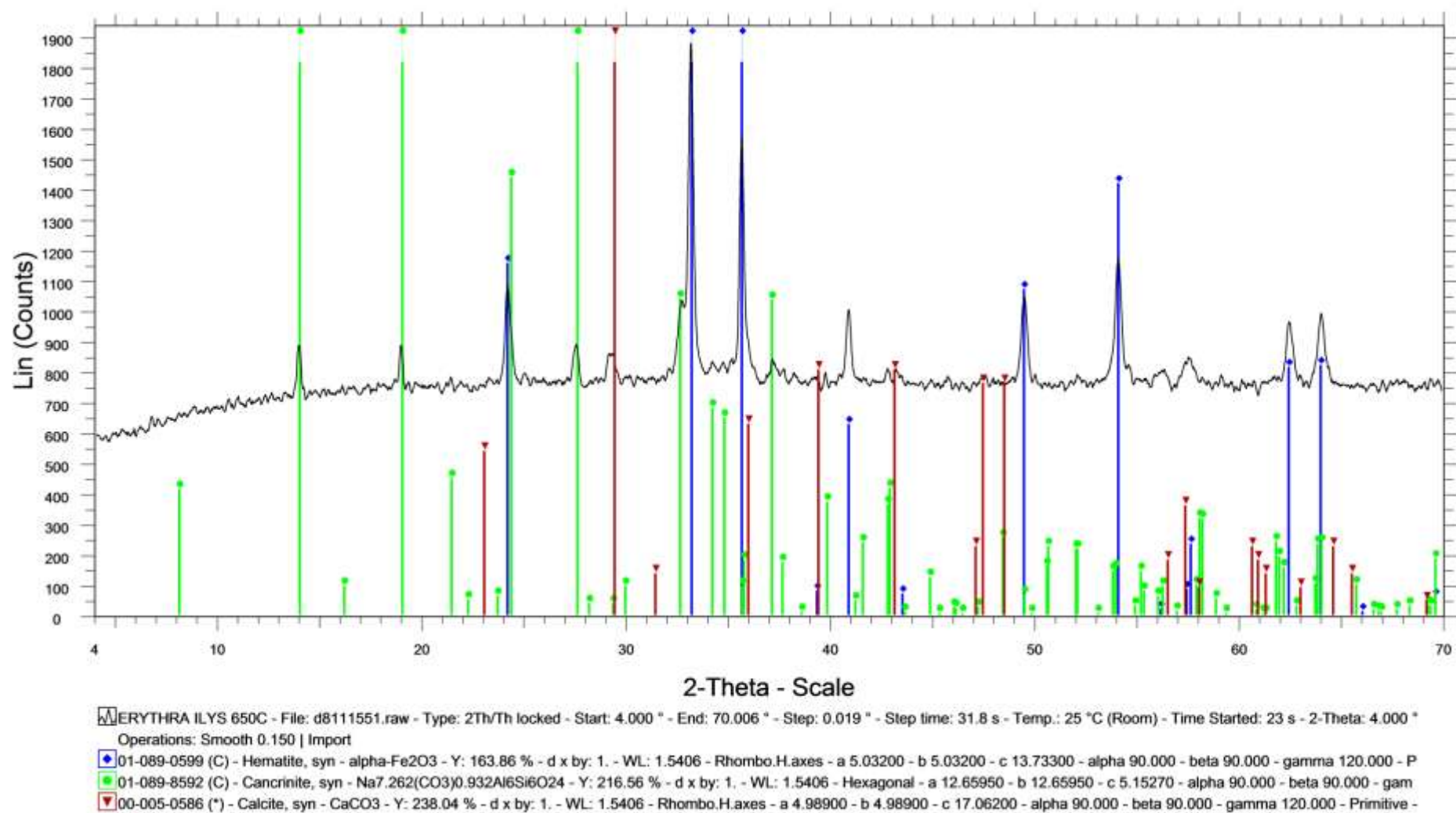
Εικόνα 15: Ακτινογράφημα περιθλασιμετρίας ακτίνων -X του μαγνητικού 2 της Απορροής του υδροκυκλώνα



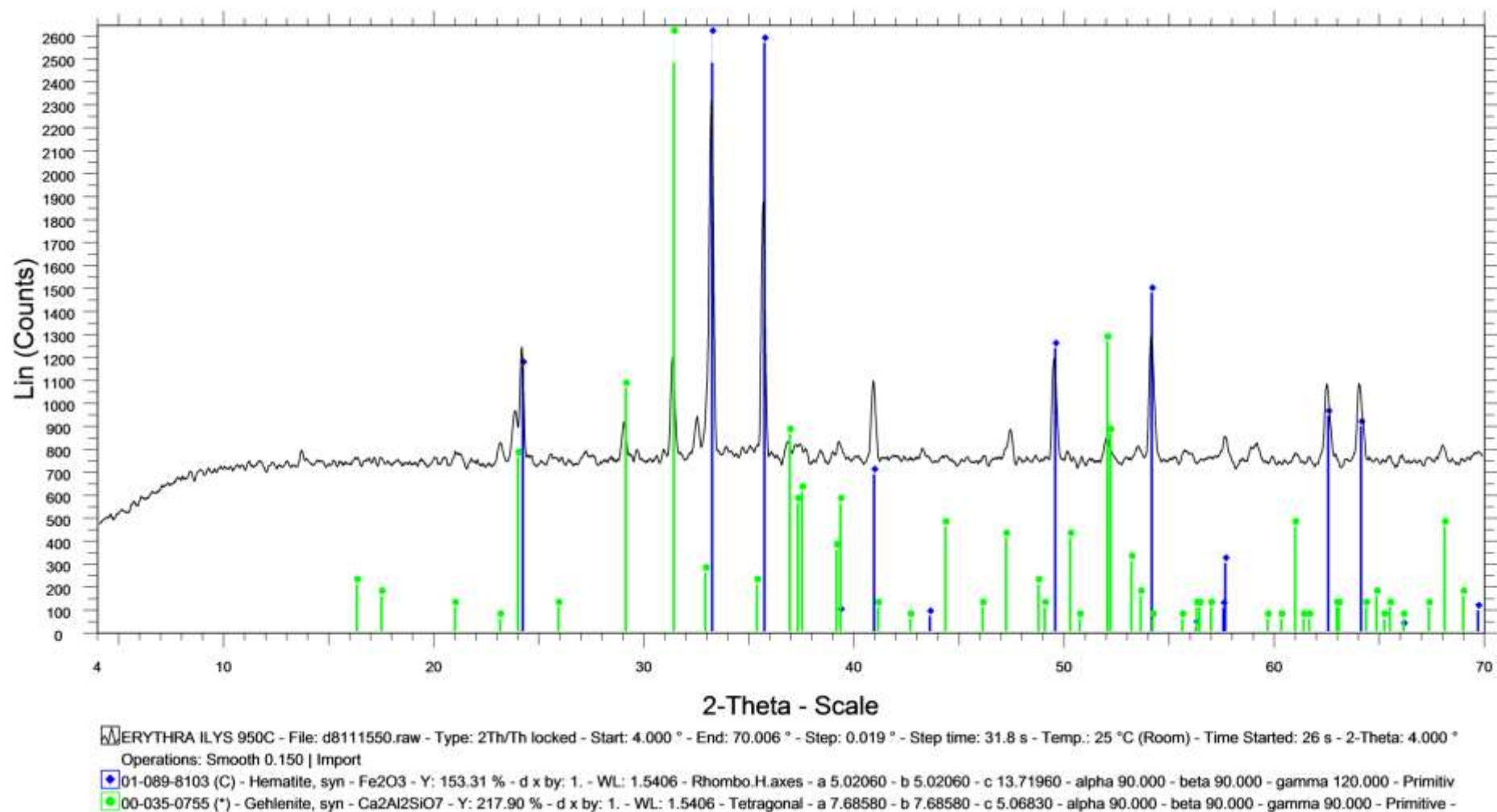
MP 1269 - File: d8100281.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.000 ° - End: 70.006 ° - Step: 0.019 ° -
 01-084-0175 (C) - Diaspore - AlOOH - Y: 210.98 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Orthorhombic - a 4.40
 01-089-0598 (C) - Hematite, syn - $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ - Y: 167.10 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.
 00-007-0324 (D) - Gibbsite - $\text{Al}(\text{OH})_3$ - Y: 275.69 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic - a 8.65900
 01-081-0463 (C) - Goethite, syn - $\text{FeO}(\text{OH})$ - Y: 221.35 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Orthorhombic -
 00-005-0586 (*) - Calcite, syn - CaCO_3 - Y: 272.80 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.axes - a
 01-071-1167 (A) - Anatase - TiO_2 - Y: 251.60 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Tetragonal - a 3.78920 - b
 00-033-1161 (D) - Quartz, syn - SiO_2 - Y: 168.88 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal - a 4.9134

01-083-2384 (C) - Boehmite - $\text{AlO}(\text{OH})$ - Y: 182.51 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Orthorhombic - a 3.6
 01-077-1713 (C) - Katoite - $\text{Ca}_2.93\text{Al}_1.97(\text{Si}_6\text{O}_{25.56})(\text{OH})_{9.44}$ - Y: 182.53 % - d x by: 1. - WL: 1.54
 01-071-0776 (C) - Cancrinite - $\text{Na}_6(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})(\text{CaCO}_3)(\text{H}_2\text{O})_2$ - Y: 157.46 % - d x by: 1. - WL: 1.54

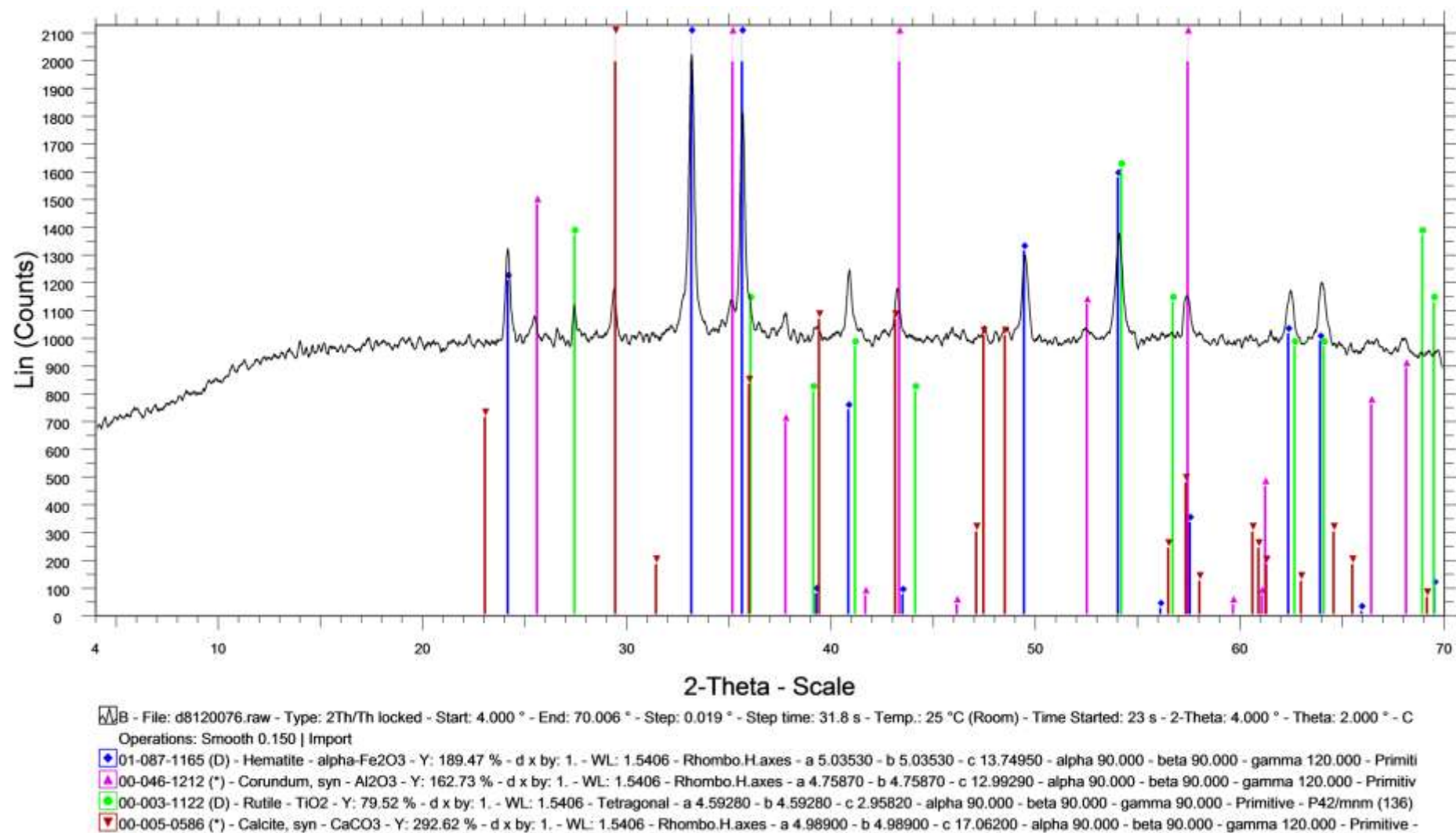
Εικόνα 16: Ακτινογράφημα περιθλασιμετρίας ακτίνων -X του Μη μαγνητικού 2 της Απορροής του υδροκυκλώνα



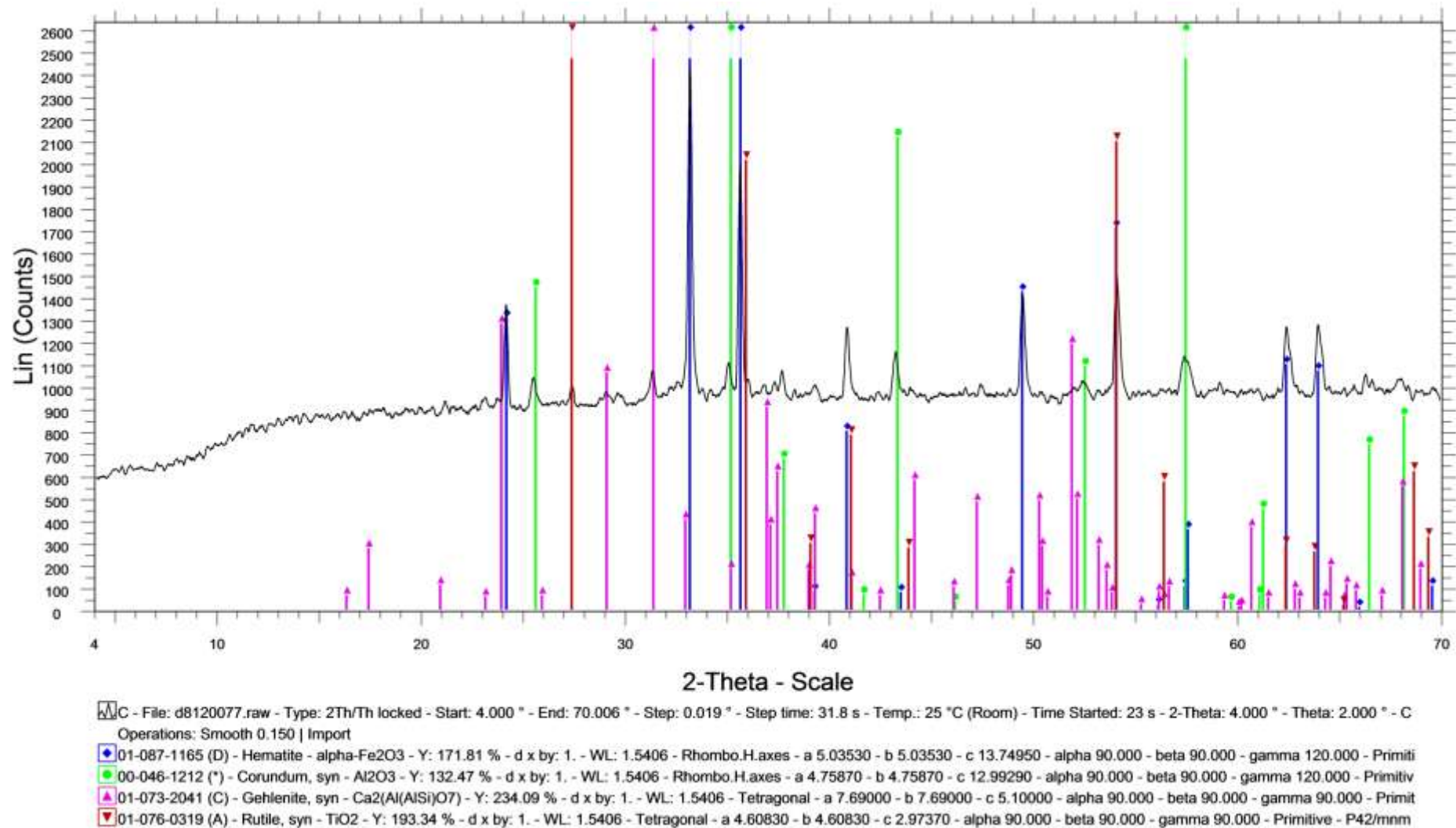
Εικόνα 17: Ακτινογράφημα περιθλασιμετρίας ακτίνων -X της $1^{\text{ης}}$ υπερχειλίσης που πυρώθηκε στους 650°C για τέσσερις ώρες



Εικόνα 18: Ακτινογράφημα περιθλασιμετρίας ακτίνων -X της $1^{\text{ης}}$ υπερχείλισης που πυρώθηκε στους 950°C για τέσσερις ώρες



Εικόνα 19: Ακτινογράφημα περιθλασιμετρίας ακτίνων $-X$ της $2^{\text{ης}}$ απορροής που πυρώθηκε στους 650°C για τέσσερις ώρες



Εικόνα 20: Ακτινογράφημα περιθλασιμετρίας ακτίνων -X της 2^{ης} απορροής που πυρώθηκε στους 950°C για τέσσερις ώρες

