



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών
— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 —
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΧΗΜΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών
σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με
διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων



Σιώζιος Θωμάς
ΑΜ : 1114201400097
Φουρμούζης Γιώργος / Χαράλαμπος
ΑΜ : 1114201400119

Επιβλέπουσα
Αριάδνη Αργυράκη
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

ΑΘΗΝΑ
2019

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών φυσικών αργιλικών υλικών από την λεκάνη των Βενζίων Δυτικής Μακεδονίας. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν έξι (6) αργιλικά δείγματα τα οποία συλλέχθηκαν στην ύπαιθρο από λατομικούς χώρους της ΓΕΩΕΛΛΑΣ Α.Μ.Μ.Α.Ε.. Οι μέθοδοι των προσδιορισμών περιλάμβαναν παριθλασιμετρία ακτίνων Χ για ποιοτική ορυκτολογική ανάλυση, υπολογισμό της ιοντοεναλλακτικής ικανότητας των υλικών με την μέθοδο κυανού του μεθυλενίου, υπολογισμό της φυσικής υγρασίας, του ορίου υδαρότητας, του ορίου πλαστικότητας, του ειδικού βάρους, καθώς πραγματοποιήθηκε και κοκκομετρική διαβάθμιση. Επίσης, στα υλικά μελετήθηκε η μεταβολή της διαπερατότητας κατά την αλληλεπίδραση των δειγμάτων αυτών με διάλυμα χαμηλού pH και υψηλής συγκέντρωσης TDS, το οποίο προήλθε από έκπλυση μεταλλευτικού αποβλήτου της περιοχής του Στρατωνίου Χαλκιδικής. Οι κύριες ορυκτολογικές φάσεις που προσδιορίστηκαν περιλαμβάνουν, σιδηρούχο σμεκτίτη, νοντρονίτη, και φυσικό μίγμα σμεκτίτη-παλυγορσκήτη. Η ιοντοεναλλακτική ικανότητα των δειγμάτων κυμάνθηκε από 49-67 (meq/100g δείγματος) και συγκεκριμένα τα δείγματα που περιείχαν παλυγορσκήτη παρουσίασαν τις χαμηλότερες τιμές. Ο γεωτεχνικός χαρακτηρισμός πραγματοποιήθηκε στην ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΤΕ, από τον οποίο εξάχθηκε γεωτεχνική ταξινόμηση των δειγμάτων. Τα δείγματα ταξινομούνται στην κατηγορία MH Elastic Silt, με βάση το ASTM D2487-00 . Στην συνέχεια, υπολογίστηκε ο συντελεστής διαπερατότητας στις τρεις (3) παρακάτω περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση, χρησιμοποιήθηκαν τα υπό μελέτη δείγματα τα οποία κορέστηκαν με απιονισμένο νερό, στην δεύτερη ενεργοποιημένα δείγματα (ενεργοποίηση με Na_2CO_3) με απιονισμένο νερό και τέλος ενεργοποιημένα δείγματα με διάλυμα χαμηλού pH και υψηλής συγκέντρωσης TDS. Ο συντελεστής διαπερατότητας μειώνεται λόγω της ενεργοποίησης των δειγμάτων, καθώς και με την αλληλεπίδραση του με το διάλυμα. Το χαμηλό pH του διαλύματος μεταβλήθηκε σε βασικό (pH=9) και η συγκέντρωση των TDS αυξήθηκε πιθανά λόγω της διάλυσης των οκταέδρων του σμεκτίτη σε χαμηλά pH απελευθερώνοντας έτσι ιόντα όπως Si, Al, Ca, Fe. Μέσω των αποτελεσμάτων και με βάση την ελληνική νομοθεσία όλα τα δείγματα προτείνονται κατάλληλα για χρήση αργιλικών επενδύσεων δαπέδου (base liners) σε χώρους απόθεσης αποβλήτων αδρανών υλικών.

Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων

Λέξεις κλειδιά: σμεκτίτης, παλυγορσκήτης, ανάλυση XRD, γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων, γεωμεμβράνες, στράγγισμα χαμηλού pH

ABSTRACT

In the present thesis, the results of the study of the geotechnical characteristics of natural clay materials from the western Macedonia Ventzia basin are presented. Specifically, six (6) clay samples were collected from open pit quarries of the GEOHELLAS S.A. The methods of the assays included X-ray diffraction measurement for qualitative mineralogical analysis, calculation of the cation exchange capacity of the materials by the method of methylene blue, calculation of natural moisture, liquid limit, plasticity limit, specific gravity, as well as a granulometric calibration. Furthermore, the permeability variation of these samples was measured during the interaction with a solution of low pH and high concentration of TDS, which resulted from the leaching of mining waste from the Stratoní area of Chalkidiki. The main mineralogical phases that were identified included Fe-rich smectite, nontronite and natural mixture of smectite-palygorskite. The cation exchange capacity of the samples ranged from 49-67 (meq / 100g of clay), and in particular the samples containing palygorskite had the lowest observable values. The geotechnical characterization was carried out at EDAFOMICHANIKI S.A., from which the geotechnical classification of the samples was extracted. The samples are classified into the MH Elastic Silt category, based on ASTM D2487-00. Then, the permeability coefficient was measured in the three (3) following cases. In the first case, the studied samples were used, which were added with deionized water, secondly activated samples (activation with Na_2CO_3) with deionized water and finally activated samples with low pH solution and high concentration of TDS. The permeability coefficient decreases due to activation of the samples and its interaction with the solution. The low pH of the solution was changed to basic (pH = 9) and the TDS concentration was increased. That occurred, because at low pH the octahedrals of the smectite were dissolved, so ions such as Si, Al, Ca and Fe were released in the solution. By means of the results and according to Greek legislation all samples are recommended for the use of clay base liners in waste disposal sites of aggregates.

Keywords: smectite, palygorskite, XRD analysis, geotechnical characteristics, cation exchange capacity, geomembranes, low pH leachate

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε όλα τα άτομα που μας βοήθησαν στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά, ευχαριστούμε πολύ την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του Τομέα Οικονομικής Γεωλογίας και Γεωχημείας και επιβλέπουσα της παρούσας εργασίας, κυρία Αργυράκη Αριάδνη. Οι συμβουλές και η καθοδήγηση της υπήρξαν καθοριστικές για το τελικό αποτέλεσμα. Ευχαριστούμε την ΓΕΩΕΛΛΑΣ Α.Μ.Μ.Α.Ε, η οποία διέθεσε τα υπό μελέτη γεωλογικά δείγματα αργίλων με την σημαντική βοήθεια του γεωλόγου της εταιρίας, κύριο Κωνσταντίνο Βυθούλκα.

Ευχαριστούμε την ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΤΕ στα εργαστήρια της οποίας έγιναν τα γεωτεχνικά πειράματα και οι μετρήσεις διαπερατότητας και ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στον κύριο Βασίλειο Ζωτιάδη και τον κύριο Χάρη Τσίαβο.

Για την βοήθεια της στα πειράματα στο Εργαστήριο Οικονομικής Γεωλογίας και Γεωχημείας, ευχαριστούμε την διδάκτορα Κυπριτίδου Ζαχαρένια.

Ο συγγραφέας Σιώζιος Θωμάς θα ήθελε να ευχαριστήσει τους γονείς του, την Ειρήνη και τον Ευστάθιο, για την υποστήριξη και την καθοδήγηση τους κατά την διάρκεια των σπουδών του.

Τέλος, ο συγγραφέας Φουρμούζης Γιώργος / Χαράλαμπος θα ήθελε να ευχαριστήσει θερμά τους γονείς του για την υποστήριξη τους σε όλα τα χρόνια των σπουδών του, την Βασιλική και τον Βασίλειο.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT.....	3
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1 Σκοπιμότητα και στόχοι	7
1.2 Περιγραφή της περιοχής προέλευσης της υπό μελέτης αργίλου	9
1.2.1 Γεωγραφία και γεωλογία.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ.....	11
2.1 Τα αργιλικά ορυκτά	11
2.2 Όξινη απορροή μεταλλείων.....	14
2.3 Γεωμεμβράνες και διαχείριση αποβλήτων	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	17
3.1 Περιθλασιμετρία ακτινών X (XRD)	20
3.1.1 Ανάλυση ολικού μη προσανατολισμένου δείγματος.....	21
3.1.2 Ανάλυση προσανατολισμένου δείγματος	22
3.2 Προσδιορισμός ιοντοεναλλακτικής ικανότητας	23
3.3 Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.....	26
3.3.1 Φυσική υγρασία.....	26
3.3.2 Όριο υδαρότητας	27
3.3.3 Όριο πλαστικότητας.....	28
3.3.4 Ειδικό βάρος.....	30
3.3.5 Κοκκομετρική ανάλυση.....	31
3.3.6 Υπολογισμός της διαπερατότητας.....	34
3.4 Παρασκευή στραγγίσματος (Leachate).....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	38
4.1 Ορυκτολογική ανάλυση	38

Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων

4.2	Ιοντοεναλλακτική ικανότητα.....	39
4.3	Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.....	39
4.3.1	Διαπερατότητα και παραμόρφωση.....	41
4.3.2	Ολικά διαλυμένα στερεά (TDS) και pH.....	45
4.4	Συζήτηση.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....		50
5.1	Συμπεράσματα.....	50
5.2	Προτάσεις.....	50
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		51
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.....		53
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ.....		56

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπιμότητα και στόχοι

Είναι ευρέως γνωστό πως τα αργιλικά ορυκτά αποτελούν μια από τις κυριότερες κατηγορίες βιομηχανικών ορυκτών, καθώς αξιοποιούνται σε πολυάριθμες εφαρμογές και σε διάφορους επιστημονικούς κλάδους. Βρίσκουν εφαρμογές στην γεωπονία, στην μηχανική, στην φαρμακευτική, σε μεταποιητικές βιομηχανίες και παρουσιάζουν τις κατάλληλες ιδιότητες για περιβαλλοντικές εφαρμογές (Munray, 2000). Στις τελευταίες ανήκει και η χρήση των αργιλικών ορυκτών για την κατασκευή γεωμεμβρανών (geomembranes) και αργιλικών επενδύσεων (clay liners).

Η διαχείριση των απορριμμάτων αποτελεί ολοένα και σημαντικότερο περιβαλλοντικό πρόβλημα στις σύγχρονες κοινωνίες, καθώς ο πληθυσμός αυξάνεται, η τεχνολογία αναπτύσσεται και ο άνθρωπος καταναλώνει μεγαλύτερη ποσότητα αγαθών. Έτσι, αναπόφευκτα το είδος και η ποσότητα των αποβλήτων συνεχώς αυξάνεται. Είναι λοιπόν υψίστης σημασίας η ορθή διαχείριση των αποβλήτων αυτών στους χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ).

Έρευνες των *Sánchez-Jiménez et al, 2012* , *Oztobrak and Pisirici, 2011* και *Shaw and Hendry 2008* που αναφέρονται στην χρήση αργιλικών ορυκτών όπως μοντμοριλλονίτη, μείγμα ιλίτη/σμεκτίτη, καολινίτη έχουν διεξαχθεί στο παρελθόν για την ανάπτυξη γεωμεμβρανών και αργιλικών επενδύσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την “ενθυλάκωση” των αποβλήτων. Αυτές εστιάζουν στην επίδραση ελαφρώς αλκαλικών (pH=8) έως όξινων (pH=5-3) διαλυμάτων σε αυτά τα ορυκτά και στον τρόπο με τον οποίο επηρεάζεται η διαπερατότητα τους από αυτά καθώς και με τον τρόπο που αλληλοεπιδρούν με δυνητικά τοξικά στοιχεία.

Η παρούσα μελέτη, σε αντίθεση με τις παραπάνω, εξετάζει την επίδραση στραγγισμάτων όξινης απορροής (pH=2,7) σε δείγματα αργίλων με κύρια σύσταση σιδηρούχου σμεκτίτη και μεικτά δείγματα, δηλαδή σιδηρούχου σμεκτίτη και παλυγορσκήτη. Συγκεκριμένα μελετάται η συμπεριφορά του υλικού όταν μέσα από αυτό διέρχεται διάλυμα χαμηλού pH και υψηλής συγκέντρωσης TDS (Total Dissolved Solids).

Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων

Παρακάτω παρατίθενται οι στόχοι της μελέτης:

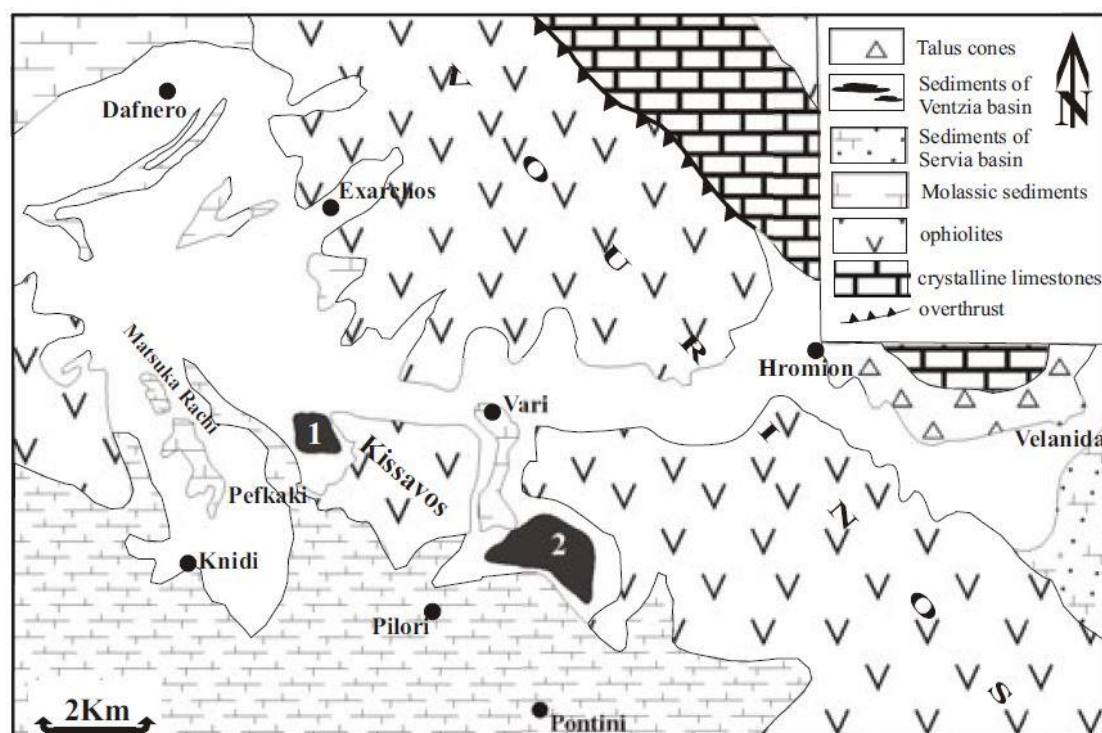
- Χαρακτηρισμός του υλικού: προσδιορισμός των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών, της ορυκτολογικής του σύστασης και της ιοντοεναλλακτικής ικανότητας.
- Μελέτη της μεταβολής της διαπερατότητας κατά την επίδραση διαλύματος χαμηλού pH και υψηλής συγκέντρωσης TDS

Στα δείγματα προσδιορίστηκε το όριο πλαστικότητας, το όριο υδαρότητας, ο δείκτης πλαστικότητας, ο δείκτης συνεκτικότητας, το ειδικό βάρος, η φυσική υγρασία, η ιοντοεναλλακτική ικανότητα και το υλικό ταξινομήθηκε με βάση το Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών (Unified Soil Classification System) και πραγματοποιήθηκε ορυκτολογική ανάλυση με περιθλασιμετρία ακτίνων Χ. Σε συνδυασμό με τα παραπάνω, υπολογίστηκαν οι διαπερατότητες των δειγμάτων σε διάφορες τάσεις όταν μέσα από αυτά διερχόταν νερό από το δίκτυο της ΕΥΔΑΠ και στράγγισμα (εκχύλισμα) που παρασκευάστηκε από υλικά επιχώσεων της παραλίας του Στρατωνίου, τα οποία αποτελούν μεταλλευτικά απόβλητα παλαιότερης μεταλλευτικής δραστηριότητας στην περιοχή.

1.2 Περιγραφή της περιοχής προέλευσης της υπό μελέτης αργίλου

1.2.1 Γεωγραφία και γεωλογία

Η περιοχή προέλευσης του υλικού που μελετήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης ονομάζεται λεκάνη των Βεντζίων και βρίσκεται βορειοανατολικά της πόλης των Γρεβενών στην Δυτική Μακεδονία. Έχει μέγιστο μήκος 22 km, μέγιστο πλάτος 6 km και εμβαδόν περίπου 70 km². Το υπόβαθρο της λεκάνης αποτελείται κυρίως από τα υπερμαφικά πετρώματα του οφιολιθικού συμπλέγματος του Βούρινου και από τα μολασσικά ιζήματα της Μεσοελληνικής αύλακας. Τα ιζήματα της λεκάνης είναι κυρίως κλαστικά στην φύση τους, ηπειρωτικής απόθεσης, με ηλικία Ανώτερο Πλειόκαινο/Κατώτερο Πλειστόκαινο και έχουν αποτεθεί ασύμφωνα πάνω στο υπόβαθρο, εμφανίζονται σχετικά οριζόντια με ένα μέγιστο πάχος περίπου 200 m (Kastritis, Mroskos and Kacandes 2003).



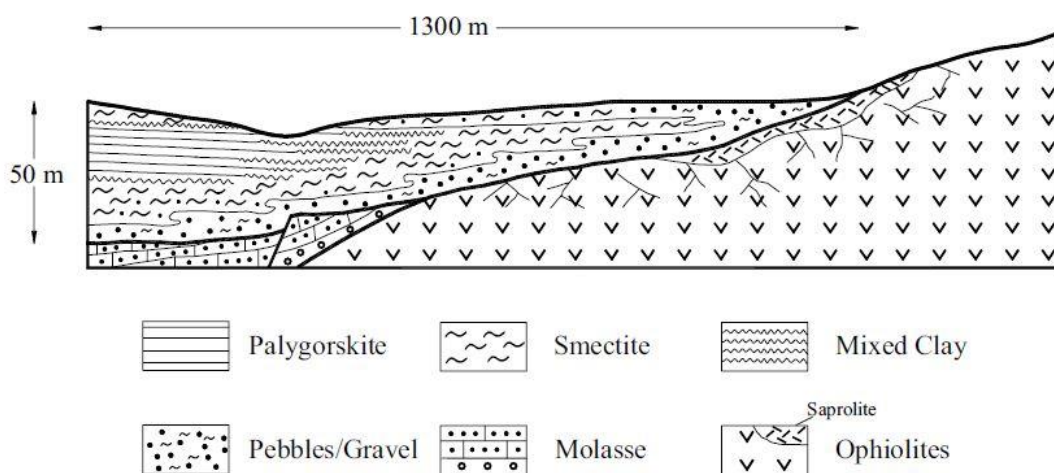
Εικόνα 1: Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης των Βεντζίων. 1: Κοίτασμα Πευκάκι, 2: Κοίτασμα Πυλωροί (Πηγή: Kastritis, Mroskos and Kacandes 2003)

Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων

Οι *Kastritis, Mposkos and Kacandes 2003* διακρίνουν τέσσερις (4) ενότητες:

- i. Μια κατώτερη ενότητα αποτελούμενη από ασύνδετους χάλικες και άμμο
- ii. Μια ενότητα με σμεκτιτικό άργιλο και αμμώδεις άργιλο με παρεμβλλόμενα στρώματα από χάλικες
- iii. Μια ενότητα αποτελούμενη από στρώματα παλυγορσκιτικής αργίλου, πάχους 2 με 6 m
- iv. Μια ανώτερη ενότητα με ασύνδετους χάλικες, άμμο και αρκετούς λεπτούς φακούς από σμεκτιτικά και μικτά στρώματα παλυγορσκήτη/σμεκτίτη

Από χημικές αναλύσεις βρέθηκε ότι οι σμεκτιτικοί άργιλοι είναι εμπλουτισμένοι σε Fe_2O_3 χαρακτηρίζοντας τους έτσι ως σιδηρούχους σμεκτίτες. Οι σμεκτίτες αυτοί μαζί με τον παλυγορσκήτη πιστεύεται πως έχουν προέλθει από διαγενετικές διαδικασίες προϋπάρχοντος αμμώδους σμεκτιτικού υλικού, το οποίο έχει προέλθει από τα υπερμαφικά πετρώματα του Βούρινου και μολασσικά ιζήματα της Μεσοελληνικής αύλακας (*Kastritis, Mposkos and Kacandes 2003*).



Εικόνα 2: Γεωλογική τομή των αποθέσεων παλυγορσκήτη και σμεκτίτη στην περιοχή των Πυλωρών (κατά *Kastritis, Mposkos and Kacandes 2003*)

Τα παραπάνω κοιτάσματα της λεκάνης των Βεντζίων αποτελούν αντικείμενο εκμετάλλευσης από την εταιρία ΓΕΩΕΛΛΑΣ ΑΜΜΑΕ και όλα τα δείγματα αργίλων που θα αναφερθούν στην συνέχεια την μελέτης μας, έχουν προέλθει από τα λατομεία της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Τα αργιλικά ορυκτά

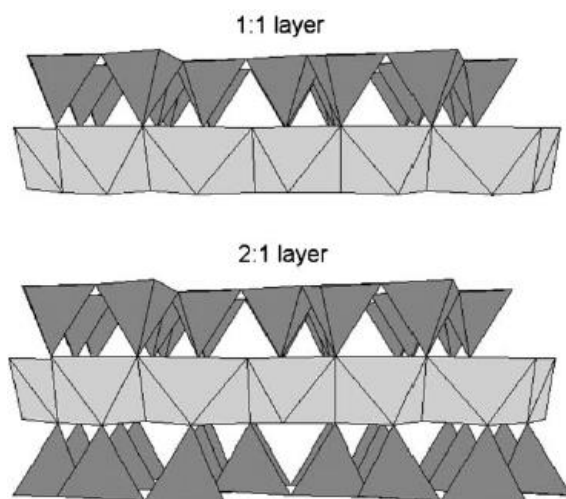
Είναι μια ομάδα ορυκτών που προέρχεται από την αποσάθρωση πυριτικών ορυκτών και η γένεση τους οφείλεται σε διαγενετικές διεργασίες και υδροθερμικές μεταβολές πετρωμάτων. Είναι λεπτόκοκκα (<2 μm) ένυδρα φυλλοπυριτικά ορυκτά που αποτελούνται από στρώματα κατιόντων που είναι οργανωμένα σε τετραεδρικές και οκταεδρικές δομές.

Το οκταεδρικό στρώμα αποτελείται από δύο στρώσεις ιόντων OH⁻ με ιόντα Mg²⁺ ή Al³⁺ ανάμεσα σε αυτές τις δυο στρώσεις, όπου αντισταθμίζονται μεταξύ τους. Ανάμεσα στα στρώματα υπάρχουν τετραεδρικές ή οκταεδρικές οπές (θέσεις). Αν καταλάβουν αυτές τις οπές ιόντα Mg²⁺ το στρώμα θεωρείται τρι-οκταεδρικό, διότι πληρούνται όλες οι θέσεις. Ενώ, αν καταληφθούν αυτές οι οπές από ιόντα Al³⁺ τότε το στρώμα θεωρείται δι-οκταεδρικό, διότι πληρούνται οι δυο από τις τρεις θέσεις.

Το τετραεδρικό στρώμα αποτελείται από πυριτικά τετράεδρα οργανωμένα σε φύλλα, όπου το Si⁴⁺ μπορεί να αντικατασταθεί από Al³⁺ και η αντικατάσταση αυτή ισοσταθμίζεται ως προς το φορτίο μέσω της προσθήκης Na⁺ και K⁺. Οι διαφορετικοί συνδυασμοί αυτών των στρωμάτων έχουν ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό διαφορετικών τύπων αργιλικών ορυκτών.

Ένας από αυτούς τους συνδυασμούς είναι η 1:1 δομή αργιλικών ορυκτών, η οποία αποτελείται από ένα τετραεδρικό και ένα οκταεδρικό στρώμα. Το Al³⁺ καταλαμβάνει τις οπές στο οκταεδρικό στρώμα και περιορίζει τις αντικαταστάσεις. Ο Fe²⁺ πολλές φορές αντικαθιστά το Al³⁺ στο οκταεδρικό στρώμα και κάποιες φορές παρατηρείται αντικατάσταση του Si⁴⁺ από Al³⁺ στο τετραεδρικό στρώμα. Τα φύλλα των τετραεδρικών στρωμάτων ενώνονται με άλλα φύλλα με ασθενείς δυνάμεις van der Waals που έχει ως αποτέλεσμα τα αργιλικά ορυκτά να είναι μαλακά και εύκολα παραμορφώσιμα.

Η 2:1 δομή αργιλικών ορυκτών αποτελείται από δυο τετραεδρικά στρώματα και ένα ενδιάμεσο οκταεδρικό το οποίο μπορεί να είναι δι-οκταεδρικό ή τρι-οκταεδρικό. Συμβαίνουν αντικαταστάσεις που ισοσταθμίζονται ως προς το φορτίο με την προσρόφηση κατιόντων στις διαστρωματικές οπές.



Εικόνα 3: Μοντέλα 1:1 και 2:1 δομής στρώματος αργιλικών ορυκτών (Πηγή: Brigatti M.F., 2006)

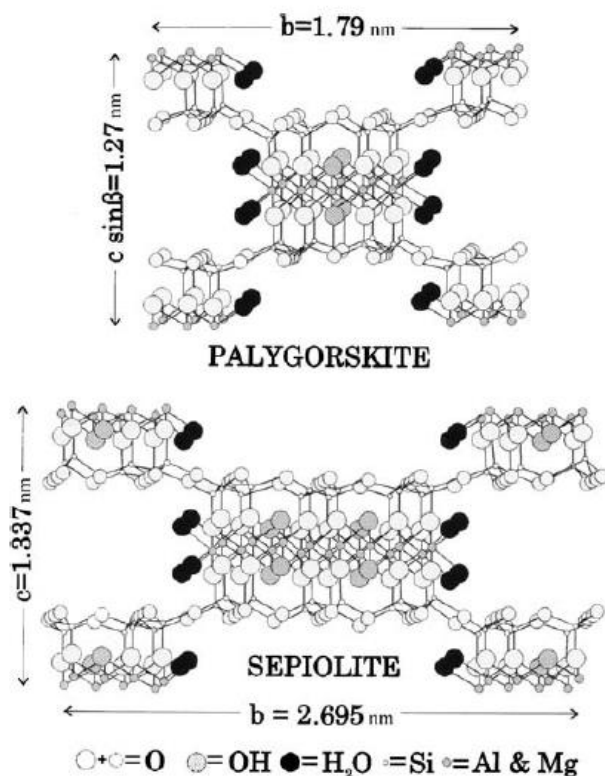
Οι βασικές ομάδες των αργιλικών ορυκτών είναι οι:

- Βερμικουλίτες (2:1, τρι-οκταεδρικοί)
- Ιλλίτες (2:1, δυ-οκταεδρικοί)
- Καολινίτες (1:1, δυ-οκταεδρικοί)
- Σμεκτίτες (2:1, δυ- ή τρι-οκταεδρικοί)

Η βασική ομάδα που θα αναλυθεί σε αυτή την εργασία είναι οι σμεκτίτες. Αυτή η ομάδα χωρίζεται σε δυο κατηγορίες τους δυ-οκταεδρικούς που ανήκουν τα ορυκτά Μοντμοριλλονίτης, Μπεϋδελίτης και Νοντρονίτης και τους τρι-οκταεδρικούς που ανήκουν τα ορυκτά Σαπωνίτης, Εκτορίτης και Σωσονίτης. Σε αυτή την ομάδα ορυκτών μπορούν να συμβούν πολλές αντικαταστάσεις, όπως του Al^{3+} από Fe^{2+} και Mg^{2+} στο οκταεδρικό στρώμα και του Si^{4+} από το Al^{3+} στο τετραεδρικό στρώμα. Λόγω αυτών των αντικαταστάσεων δημιουργείται αρνητικό φορτίο το οποίο εξισορροπείται από την προσθήκη κατιόντων (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) στις διαστρωματικές θέσεις. Αυτά τα διαστρωματικά κατιόντα επειδή είναι ένυδρα και άμεσα ανταλλάξιμα προσδίδουν στον σμεκτίτη υψηλή ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (Cation Exchange Capacity CEC). Οπότε, η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων σχετίζεται άμεσα με το φορτίο και με την ειδική επιφάνεια. Η ειδική επιφάνεια αυξάνει με την μείωση του μεγέθους, οπότε σε αυτή την περίπτωση μπορεί να είναι πολύ μεγάλη.

Μια άλλη σημαντική ιδιότητα των σμεκτιτών είναι ότι μπορούν να προσροφούν ποσότητα νερού ίση με την μισή τους μάζα (Mooney et al., 1952a, 1952b). Έχει αποδειχθεί ότι η ικανότητα τους αυτή εξαρτάται άμεσα από την φύση των ανταλλάξιμων κατιόντων στις διαστρωματικές θέσεις. Συγκεκριμένα στον σμεκτίτη η πλεγματική απόσταση διογκώνεται μέχρι τα 17 Å όταν επιδρά σε αυτόν η αιθυλενογλυκόλη.

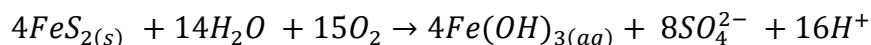
Επιπλέον, λόγω της παρουσίας της στην περιοχή και το υλικό μελέτης, είναι σημαντικό να αναφερθεί και η ομάδα ορυκτών του παλυγορσκήτη (Σεπιόλιθο, Παλυγορσκήτης), που αποτελείται από 2:1 στρώματα οργανωμένων αλυσίδων και όχι φύλλων. Ο παλυγορσκήτης έχει αλυσίδες πλάτους τεσσάρων τετραέδρων πυριτίου, ενώ ο σεπιόλιθος έξι τετραέδρων πυριτίου. Στα οκταεδρικά στρώματα τα οποία είναι ασυνεχείς, παρατηρείται αντικατάσταση Al^{3+} και για τα δύο ορυκτά, καθώς υπάρχουν και κάποια ανταλλάξιμα κατιόντα.



Εικόνα 5: Σχηματική απεικόνιση της δομής του Παλυγορσκήτη (κατά Bradley, 1940) και του Σεπιόλιθου (κατά Jones and Galan, 1988)

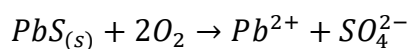
2.2 Όξινη απορροή μεταλλείων

Ένα κοινό περιβαλλοντικό πρόβλημα που συνδέεται με την εξόρυξη θειούχων μεταλλευμάτων, είναι η όξινη απορροή. Καλείται όξινη καθώς τα νερά αυτά παρουσιάζουν μεγάλες συγκεντρώσεις κατιόντων υδρογόνου (H^+), τα οποία προέρχονται από την οξείδωση των θειούχων ορυκτών. Τα περισσότερα υπόγεια νερά δεν περιέχουν σημαντικές ποσότητες οξυγόνου, άρα η οξείδωση των ορυκτών αυτών περιορίζεται στα επιφανειακά περιβάλλοντα αποσάθρωσης (Eby, 2012). Τα βασικά ορυκτά σε αυτού του είδους κοιτάσματα είναι ο σιδηροπυρίτης (FeS_2), ο χαλκοπυρίτης ($CuFeS_2$), ο σφαλερίτης (ZnS), ο γαληνίτης (PbS), ο κοβελίνης (CuS) και ο χαλκοσίνης (Cu_2S). Αν χρησιμοποιήσουμε για παράδειγμα τον σιδηροπυρίτη, η αντίδραση που λαμβάνει χώρα για την απελευθέρωση κατιόντων υδρογόνου στο νερό είναι η :



Γνωρίζουμε από διαγράμματα Eh-pH του σιδήρου, ότι διαλυτότητα του αυξάνεται με την μείωση του pH, έτσι στις όξινες συνθήκες ο σίδηρος και τα περισσότερα μέταλλα παραμένουν στο διάλυμα με αποτέλεσμα η όξινη απορροή να περιέχει σημαντικές ποσότητες βαρέων μετάλλων (Eby, 2012).

Όπως φαίνεται παραπάνω τα θειούχα ορυκτά με χημικό τύπο MS_2 (όπου M = μέταλλο), όταν οξειδώνονται απελευθερώνουν σημαντικές ποσότητες ιόντων υδρογόνου σε αντίθεση με τα ορυκτά MS. Παρακάτω παρουσιάζεται το παράδειγμα του γαληνίτη:



Όξινη απορροή μεταλλείων μπορεί να προέρχεται από αρκετές πιθανές πηγές :

- Όταν σε ένα ενεργό ορυχείο επιφανειακής εξόρυξης τα κατακρημνίσματα αλλά και τα υπόγεια νερά εισέρχονται σε αυτό.
- Μετά το κλείσιμο του ορυχείου τα νερά μπορούν να διέρχονται από αυτό και μέσα στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες, έχοντας όξινο χαρακτήρα.
- Τα απόβλητα κατά το στάδιο εμπλουτισμού του μεταλλεύματος αποτίθενται σε τεχνητές λίμνες, με αποτέλεσμα να σχηματίζεται ένας χώρος με υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων. Το νερό της βροχής διηθείται μέσα από αυτά και γίνεται όξινο.
- Κατά την εξόρυξη, το υλικό συγκεντρώνεται σε σωρούς. Αυτοί περιέχουν σημαντικές ποσότητες σιδηροπυρίτη και μπορεί να είναι πηγή όξινης απορροής.

Η παρούσα έρευνα πραγματοποιείται την περίπτωση της απόθεσης αποβλήτων της εξόρυξης. Συγκεκριμένα ο χώρος απόθεσης ήταν η παραλία του Στρατωνίου. Αντίστοιχη περίπτωση αντιμετώπισαν οι *Boulet και Laroque, 1998* στην δικιά τους μελέτη, στην θέση που αναφέρουν ως CM.

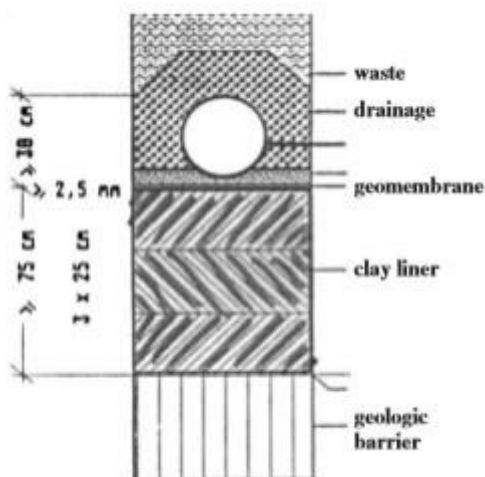
2.3 Γεωμεμβράνες και διαχείριση αποβλήτων

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω , τα αργιλικά ορυκτά έχουν την ιδιότητα να έλκουν και να προσροφούν κατιόντα και ορισμένα από αυτά τα ορυκτά, όπως οι σμεκτίτες στους για τους οποίους γίνεται αυτή η έρευνα, όταν απορροφούν νερό διογκώνονται. Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά έχει εκμεταλλευτεί η βιομηχανία για να κατασκευάσει γεωμεμβράνες, αργιλικές επενδύσεις (clay liners) και αργιλικά φράγματα. Αυτές, βρίσκουν εφαρμογές σε χώρους υγειονομικής ταφής αποβλήτων ή οπουδήποτε χρειάζεται μια μάζα αποβλήτων να απομονωθεί από το γύρω περιβάλλον. Στην ξενόγλωσση βιβλιογραφία αυτά τα συστήματα χαρακτηρίζονται ως συστήματα ενθυλάκωσης (encapsulation systems) (Czurda, 2006). Ουσιαστικά τα ορυκτά που προορίζονται για χρήση σε τέτοια υλικά πρέπει να προσδίδουν σε αυτά πολύ χαμηλές διαπερατότητες (να είναι σχεδόν αδιαπέραστα) έτσι ώστε να εμποδίζουν την απορροή στραγγισμάτων να φτάσει στο περιβάλλον. Το πάχος και οι διαπερατότητες των υλικών αυτών όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν είναι μεταβλητό και σχετίζεται με ο είδος των αποβλήτων.

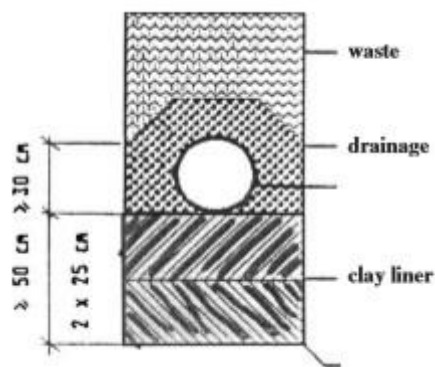
Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων

Η ελληνική νομοθεσία Κ.Υ.Α.Η.Π.29407/3508/2002 – ΦΕΚ Β-1572/1-12-2002 τονίζει πως για αδρανή απόβλητα η διαπερατότητα του πυθμένα και των πρανών των ΧΥΤΑ πρέπει να είναι χαμηλότερη από : $k < 1 \times 10^{-7}$ m/s και πάχος μεγαλύτερο από ένα (1) μέτρο. Για μη επικίνδυνα απόβλητα πρέπει : $k < 1 \times 10^{-9}$ m/s και πάχος μεγαλύτερο από ένα (1) μέτρο ενώ για επικίνδυνα απόβλητα πρέπει : $k < 1 \times 10^{-9}$ m/s και πάχος μεγαλύτερο των πέντε (5) μέτρων. Όπου k , είναι η διαπερατότητα των υλικών.

Στο εμπόριο, τα υλικά αυτά κατηγοριοποιούνται σε επενδύσεις δαπέδου ή base liners και σε επενδύσεις οροφής (surface liners). Αυτές οι κατηγορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα στον ίδιο χώρο απόθεσης αποβλήτων, δημιουργώντας έτσι ένα σύστημα πολλαπλών φραγμών (multibarrier waste deposit system).



Εικόνα 6 : Σύστημα πολλαπλών φραγμών με τρία αργιλικά στρώματα και μια γεωμεμβράνη. Χρησιμοποιείται για οικιακά απόβλητα (Πηγή: Czurda , 2006)



Εικόνα 7 : Σύστημα πολλαπλών φραγμών με δύο αργιλικά στρώματα , χωρίς γεωμεμβράνη. Χρησιμοποιείται για αδρανή απόβλητα (Πηγή: Czurda , 2006)

Τα αργιλικά υλικά που εξετάζει η παρούσα εργασία προορίζονται για χρήση σε επενδύσεις δαπέδου, δηλαδή ως base liners, καθώς αυτά χαρακτηρίζονται από χαμηλές υδραυλικές διαπερατότητες, μπορούν να προσροφούν κατιόντα και διογκώνονται όταν έρθουν σε επαφή με ρευστά. Οι ιδιότητες αυτές είναι καθοριστικές για τις επενδύσεις δαπέδου, διότι το υλικό αυτό πρέπει να αποτρέπει την οποιαδήποτε διαρροή στραγγισμάτων από τα απόβλητα να μεταναστεύσει σε γειτονικούς υδροφόρους ορίζοντες ή στο υπέδαφος και πρέπει να συγκρατεί τα τοξικά κατιόντα μετάλλων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν, συλλέχθηκαν από τρία (3) λατομεία της ΓΕΩΕΛΛΑΣ ΑΜΜΑΕ. Συνολικά συγκεντρώθηκαν έξι (6) δείγματα, δύο (2) από κάθε λατομείο. Τα δείγματα, οι κωδικοί τους και οι θέσεις από τις οποίες έγινε η συλλογή τους παρουσιάζονται παρακάτω. Για πρακτικούς λόγους, στην συνέχεια δεν χρησιμοποιείται ο πλήρης κωδικός της δειγματοληψίας αλλά επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί μόνο το μεταβλητό κομμάτι αυτού.

Πλήρης κωδικός	Κωδικός εργασίας	Περιοχή δειγματοληψίας	Συντεταγμένες
RD.KGF1.296-018	KGF1	Κνίδη	40° 07' 18" N 21° 37' 30" E
RD.KGF2.296-018	KGF2	Κνίδη	40° 07' 22" N 21° 37' 32" E
RD.PGF3.296-018	PGF3	Πυλωροί	40° 06' 21" N 21° 40' 45" E
RD.PGF4.296-018	PGF4	Πυλωροί	40° 06' 12" N 21° 40' 53" E
RD.LGF5.296-018	LGF5	Βελανίδα	40° 06' 53" N 21° 46' 13" E
RD.LSGF6.296-018	LSGF6	Βελανίδα (Σωρός)	40° 06' 53" N 21° 46' 38" E

Πίνακας 1: Περιοχές δειγματοληψίας, κωδικοί δειγμάτων και οι συντεταγμένες τους



Εικόνα 8: Δειγματοληψία λατομείου Κνίδης (Πηγή: Google Earth)

Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων



Εικόνα 9: Δειγματοληψία Πυλωρών (Πηγή: Google Earth)



Εικόνα 10: Δειγματοληψία Βελανίδας (Πηγή: Google Earth)

Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων



Εικόνα 11: Θέση συλλογής δείγματος KGF1



Εικόνα 12: Θέση συλλογής δείγματος KGF2



Εικόνα 13: Θέση συλλογής δείγματος PGF3



Εικόνα 14: Θέση συλλογής δείγματος PGF4



Εικόνα 15: Θέση συλλογής δείγματος LGF5



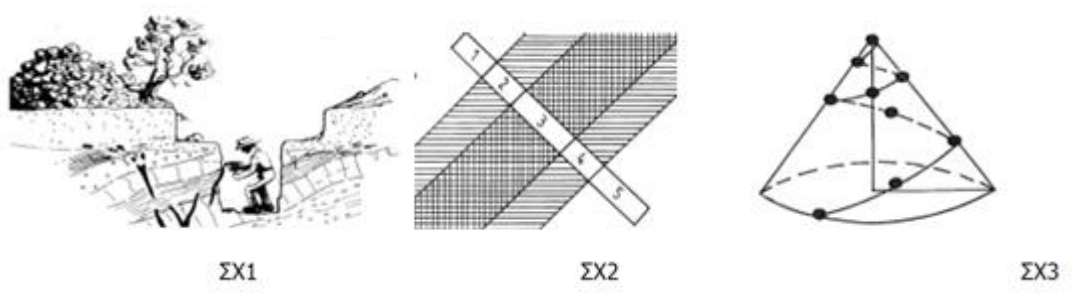
Εικόνα 16: Θέση συλλογής δείγματος LSGF6

Τρόπος Δειγματοληψίας

Δειγματοληψία σε Στρώματα: Διάνοιξη αύλακας εγκάρσια σε όλο το πάχος του στρώματος και συλλογή του δείγματος προσπαθώντας το υλικό να έχει ομοιογενή μακροσκοπικά χαρακτηριστικά. (Δειγματοληψία με αύλακα ΣΧ1,ΣΧ2)

Δειγματοληψία σε Σωρούς: Λήψη δείγματος κατά μήκος μιας ελικοειδούς γραμμής στοχεύοντας το υλικό του δείγματος να είναι ομοιογενές (ΣΧ3).

Σχηματική αναπαράσταση των μεθόδων δειγματοληψίας παρουσιάζεται παρακάτω.



3.1 Περιθλασιμετρία ακτίνων X (XRD)

Οι ορυκτολογικές αναλύσεις ακτίνων X των δειγμάτων διεξήχθησαν στο Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Χρησιμοποιήθηκε το όργανο περιθλασιμετρίας ακτίνων X Siemens D5005, με ακτινοβολία Cu λειτουργώντας στα 40kV και 40mA. Τα αποτελέσματα ψηφιοποιήθηκαν με το λογισμικό DIFRAC PLUS v2.2 της εταιρίας Siemens. Η αποτίμηση των ακτινοδιαγραμμάτων έγινε με το λογισμικό EVA[®] της εταιρίας Bruker.

Η αρχή λειτουργίας των οργάνων περιθλασιμετρίας ακτίνων X βασίζεται στην μαθηματική σχέση που ονομάζεται ‘Νόμος του Bragg’. Σύμφωνα με αυτόν τον νόμο, οι ακτίνες X προσπίπτουν στο δείγμα και περιθλώνται μέσα στα διαστρωματικά κενά των κρυσταλλικών πλεγμάτων των ορυκτών, στην συνέχεια εξέρχονται από αυτά και καταγράφονται.

Η μαθηματική έκφραση του “Νόμου του Bragg” είναι η εξής:

$$n \lambda = 2 d \eta\mu(\theta)$$

όπου:

n = ακέραιος αριθμός

λ = το μήκος κύματος της δέσμης των ακτινών X που είναι γνωστό και εξαρτάται από το στοιχείο της καθόδου

θ = η γωνία πρόσπτωσης ή ανάκλασης της ακτίνας X σε σχέση με τα κρυσταλλικά επίπεδα, και την ορίζουμε εμείς επειδή ελέγχουμε τον ρυθμό περιστροφής του δείγματος

d = οι αποστάσεις των διαφορετικών ατόμων στο πλέγμα του κρυστάλλου.

Με αγάτινο γουδί, τα δείγματα υπαίθρου κονιοποιήθηκαν έτσι ώστε να αποκτήσουν την απαραίτητη κοκκομετρία κατώτερη των 10 μm . Έπειτα, ένα τμήμα της ποσότητας αυτής των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε για μη προσανατολισμένη ολική ανάλυση, σε ένα άλλο τμήμα πραγματοποιήθηκε διαχωρισμός της αργίλου (<2 μm) για προσανατολισμένη ανάλυση του κλάσματος αυτού, με και χωρίς αιθυλενογλυκόλη.

3.1.1 Ανάλυση ολικού μη προσανατολισμένου δείγματος

Μετά την κονιοποίηση των δειγμάτων, αφού τοποθετήθηκαν στους κατάλληλους υποδοχείς του μηχανήματος, σαρώθηκαν σε εύρος γωνίας 2θ από 3 έως 65°, με βήμα 0.01°/sec.



Εικόνα 17: Δείγματα μέσα στους υποδοχείς, έτοιμα για ανάλυση (Πηγή: Προσωπικό αρχείο συγγραφέων)

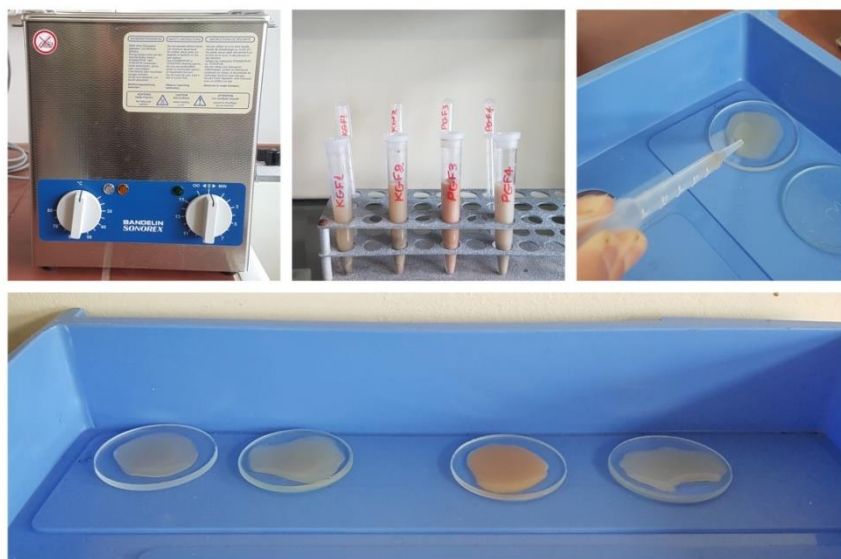
Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων

3.1.2 Ανάλυση προσανατολισμένου δείγματος

Μετά την κονιοποίηση τοποθετήθηκε 1g δείγματος και 5ml απιονισμένου νερού σε κύλινδρο χωρητικότητας 10ml. Ο κύλινδρος ανακινήθηκε έντονα και έμεινε σε μηχανήμα εκπομπής υπερήχων για 2 λεπτά, έτσι ώστε να αποτραπεί ο σχηματισμός κολλοειδών σωματιδίων. Στην συνέχεια, με το πέρας 20 λεπτών και με την χρήση πλαστικής πιπέτας μιας χρήσης, πάρθηκε το ανώτερο τμήμα του διαλύματος που περιείχε εν αιωρήση ιλύ και άργιλο (<4μm). Αυτό το διάλυμα τοποθετήθηκε προσεκτικά σε γυάλινη κάψα και ξεράθηκε φυσικά σε θερμοκρασία δωματίου για 24 ώρες.



Εικόνα 18: Διαδικασία παρασκευής προσανατολισμένων δειγμάτων (Πηγή: Προσωπικό αρχείο συγγραφέων)



Εικόνα 19: Διαδικασία παρασκευής προσανατολισμένων δειγμάτων (Πηγή: Προσωπικό αρχείο συγγραφέων)

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για την παρασκευή δειγμάτων με αιθυλενογλυκόλη. Αυτή την φορά όμως η ξήρανση δεν έγινε φυσικά, αλλά τα δείγματα παρέμειναν σε δοχείο που περιέχει αιθυλενογλυκόλη το οποίο τοποθετήθηκε για 24 ώρες σε κλίβανο στους 60°C.

3.2 Προσδιορισμός ιοντοεναλλακτικής ικανότητας

Η ιοντοεναλλακτική ικανότητα προσδιορίστηκε με την απορρόφηση κυανού του μεθυλενίου από τα δείγματα. Για την διεξαγωγή της μεθόδου αυτής παρασκευάστηκαν τρία (4) διαλύματα. Διάλυμα H_2SO_4 5N, διάλυμα TSPP (10% κ.β.), διάλυμα κυανού του μεθυλίου και το διάλυμα των δειγμάτων.

Για το διάλυμα H_2SO_4 5N, σε ογκομετρική φιάλη 200ml προστέθηκαν 100ml απιονισμένου νερού και έπειτα 28ml H_2SO_4 . Τέλος η ογκομετρική φιάλη πληρώθηκε με απιονισμένο νερό μέχρι την χαραγή.

Για το διάλυμα TSPP (10% κ.β.), σε ογκομετρική φιάλη των 1000ml προστέθηκαν 500ml απιονισμένου νερού και στη συνέχεια 100g TSPP υπό συνεχή ανάδευση. Έπειτα η ογκομετρική φιάλη πληρώθηκε με απιονισμένο νερό μέχρι την χαραγή. Το διάλυμα αφέθηκε υπό ισχυρή ανάδευση για 1 ώρα περίπου, ώστε να διαλυθεί η ποσότητα του στερεού TSPP μέχρι το σημείο κορεσμού.



Εικόνα 20: Αριστερά διάλυμα TSPP 10%, δεξιά διάλυμα κυανού του μεθυλενίου (Πηγή: Προσωπικό αρχείο συγγραφέων)

Για το διάλυμα κυανού του μεθυλενίου, σε ποτήρι ζέσεως των 600ml διαλύθηκαν 5g κυανού του μεθυλενίου σε 500ml απιονισμένου H₂O υπό συνεχή ανάδευση και σε θερμοκρασία 60°C για 1ώρα περίπου. Το παρασκεύασμα αφέθηκε σε ηρεμία για αρκετές ώρες (διάρκεια μίας νύχτας) σε θερμοκρασία δωματίου. Στη συνέχεια, το διάλυμα μεταγγίστηκε σε ογκομετρική φιάλη των 1000ml. Έπειτα πληρώθηκε η ογκομετρική φιάλη με απιονισμένο νερό μέχρι πλήρωσης χαραγής.

Για τα διαλύματα εργασίας, σε κωνική φιάλη των 250ml προστέθηκαν 50ml απιονισμένου νερού και στη συνέχεια 0,5g του προς εξέταση δείγματος μαζί με 5ml κορεσμένου διαλύματος TSPP 10% κ.β, με σκοπό την πλήρη διασπορά του. Το διάλυμα βρισκόταν υπό συνεχή ανάδευση και θέρμανση μέχρι σημείου βρασμού του (περίπου για 15min). Έπειτα απομακρύνθηκε η φιάλη από το πιάτο ανάδευσης και θέρμανσης και αφέθηκε σε ηρεμία ώστε το διάλυμα να κρυώσει σε θερμοκρασία δωματίου. Κατόπιν προστέθηκαν 2ml H₂SO₄ 5N και το διάλυμα είναι ήταν έτοιμο για τιτλοδότηση.

Διαδικασία μέτρησης

Σε προχοίδα των 25ml προστέθηκε το διάλυμα (τιτλοδότης) κυανού του μεθυλενίου. Η κωνική φιάλη που περιείχε το διάλυμα εργασίας τοποθετήθηκε σε πιάτο ανάδευσης στην έξοδο της προχοίδας. Προστέθηκε σιγά-σιγά και ελεγχόμενα, με την βοήθεια της στρόφιγγας της προχοίδας, ποσότητα από το διάλυμα του τιτλοδότη μέχρι κορεσμού απορρόφησης. Ο έλεγχος για την μέγιστη απορρόφηση ελεγχόταν με το αποτύπωμα σταγόνας του διαλύματος εργασίας σε διηθητικό χαρτί τύπου Whatman No 50 με την βοήθεια γυάλινης ράβδου. Το σημείο εκείνο στο οποίο άρχισε να σχηματίζεται αχνά στεφάνι γύρω από τη σταγόνα είναι το σημείο που θεωρήθηκε ότι υπήρξε η μέγιστη απορρόφηση σε κυανού του μεθυλενίου από το δείγμα. Τέλος, καταγράφηκε η ποσότητα (ml) του τιτλοδότη που καταναλώθηκε μέχρι το σχηματισμό του στεφανιού στη σταγόνα ελέγχου.



Εικόνα 21: Τα δείγματα σε κωνικές φιάλες και η διάταξη για την τιτλοδότηση (Πηγή: Προσωπικό αρχείο συγγραφέων)

Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων

Για να υπολογιστεί όμως η ιοντοεναλλακτικότητα χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση από την εργασία των *Yukselen and Kaya, 2008*:

$$C = \frac{100}{m_s} V_{cc} N_{mb}$$

Όπου:

C= Ιοντοεναλλακτικότητα (meq/100g δείγματος)

m_s = Βάρος του δείγματος (g)

V_{cc} = Ο όγκος του Κυανού του Μεθυλενίου που καταγράφηκε (mL)

N_{mb} = Κανονικότητα του Κυανού του Μεθυλενίου (meq/mL)

3.3 Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά

Όλες οι παρακάτω δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στον εργαστηριακό χώρο της ΕΛΔΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΤΕ και σύμφωνα με τις προδιαγραφές εργαστηριακών δοκιμών εδαφομηχανικής (E 105-86).

3.3.1 Φυσική υγρασία

Με την δοκιμή αυτή υπολογίζεται ο επί τοις εκατό λόγος του βάρους του νερού προς το βάρος του ξηρού δείγματος. Το κάθε δείγμα τοποθετήθηκε σε έναν υποδοχέα του οποίου το βάρος είναι γνωστό και ζυγίστηκε το ολικό βάρος (βάρος δείγματος + υποδοχέας). Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στο υγρό βάρος ή στο βάρος πριν την ξήρανση. Στην συνέχεια, τα δείγματα έμειναν σε κλίβανο θερμοκρασίας 110°C για 24 ώρες. Μετά την ξήρανση πραγματοποιήθηκε δεύτερη ζύγιση, η οποία ουσιαστικά αντιστοιχεί στο ολικό ξηρό βάρος του δείγματος μαζί με τον υποδοχέα. Αφαιρέθηκαν τα ολικά υγρά βάρη μαζί με τους υποδοχείς από τα ολικά ξηρά βάρη μαζί με τους υποδοχείς για να υπολογιστεί το βάρος ύδατος. Για να υπολογιστεί το ξηρό βάρος αφαιρέθηκε το απόβαρο του υποδοχέα από το ξηρό βάρος δείγματος. Τέλος, υπολογίστηκε το ποσοστό επί τοις εκατό (%) υγρασίας διαιρώντας το βάρος ύδατος με το ξηρό βάρος δείγματος.

Η διαδικασία που περιγράφηκε αντιστοιχεί στην προδιαγραφή ASTM D 2216.

3.3.2 Όριο υδαρότητας

Το όριο υδαρότητας αντιστοιχεί στο ποσοστό της υγρασίας κατά το οποίο το έδαφος μεταβαίνει από την πλαστική στην υδαρή κατάσταση. Για τον υπολογισμό αυτού, ακολουθήθηκε η προδιαγραφή ASTM 4318. Αρχικά συγκεντρώθηκαν 100g υλικού διερχόμενα από το κόσκινο Νο 40 και ξηράθηκαν στον αέρα. Σε μία γυάλινη κάψα προστέθηκαν περίπου 20cm³ απιονισμένου νερού και με την σπαθίδα αναμίχθηκε το νερό ομοιόμορφα σε όλο το δείγμα ώστε να προκύψει μια παχύρρευστη μάζα. Μέρος αυτής τοποθετήθηκε στην μηχανική συσκευή ορίου υδαρότητας και ταυτόχρονα προστέθηκε νερό σε μικρές ποσότητες, της τάξης των 3cm³ και το υλικό ομογενοποιήθηκε όπως παραπάνω.

Έπειτα το υλικό απλώθηκε στη συσκευή με το μέγιστο βάθος αυτού να μην ξεπερνά το 1cm και το δείγμα διαιρέθηκε σε δύο (2) τμήματα με το όργανο χαράξεως κατά μήκος της διαμέτρου του κυπέλλου της συσκευής.

Με την βοήθεια της συσκευής μετρήθηκαν οι κτύποι στους οποίους το υλικό που είχε διαχωριστεί, ερχόταν ξανά σε επαφή και το τμήμα αυτό με την χρήση της σπαθίδας απομακρύνθηκε και τοποθετήθηκε σε γυάλινη κάψα γνωστού βάρους.

Η διαδικασία επαναλήφθηκε σε δυο ακόμα τμήματα του δείγματος καθώς με προσθήκη νερού γινόταν όλο και πιο ρευστό. Αυτό γίνεται με στόχο να γίνει προσδιορισμός στις εξής τρεις (3) περιοχές κτύπων : 15-25 , 20-30 , 25-35.



Εικόνα 22: Μηχανική συσκευή ορίου υδαρότητας (Πηγή : προσωπικό αρχείο συγγραφέων)

Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων

Οι γυάλινες κάψες στη συνέχεια έμειναν στον κλίβανο σε 110°C και ξηράθηκαν έως σταθερού βάρους για να υπολογιστεί το ποσοστό υγρασίας.

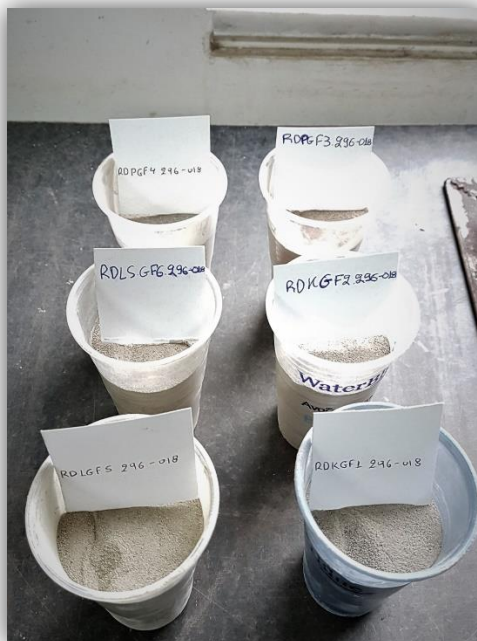
Σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα προβλήθηκαν για κάθε δείγμα, οι τρεις (3) αριθμοί κτύπων που βρέθηκαν παραπάνω και το ποσοστό υγρασίας. Το ποσοστό που αντιστοιχεί στην καμπύλη ροής της τεταγμένης των 25 κτύπων, θεωρείται το όριο υδαρότητας.

3.3.3 Όριο πλαστικότητας

Ως όριο πλαστικότητας ορίζεται το χαμηλότερο ποσοστό υγρασίας, στο οποίο το έδαφος μεταβαίνει από την πλαστική στην ημιστερεά κατάσταση. Όπως και προηγουμένως ακολουθήθηκε η ίδια προδιαγραφή, η ASTM 4318. Αρχικά συγκεντρώθηκαν 20gr υλικού διερχόμενα από το κόσκινο Νο 40 και ξηράθηκαν στον αέρα. Σε πορσελάνινη κάψα αναμείχθηκαν με απιονισμένο νερό έως ότου να προκύψει ομοιόμορφη πλαστική μάζα. Από αυτήν χρησιμοποιήθηκαν 8gr για να δημιουργηθεί ραβδίσκος 3mm. Όταν η επιθυμητή διάμετρος αυτή επιτεύχθηκε ο ραβδίσκος χωρίστηκε σε έξι (6) έως οκτώ (8) τμήματα και συμπιέστηκε ξανά σε ομοιόμορφη μάζα. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε τρεις (3) φορές έτσι ώστε ο ραβδίσκος να μην μπορεί να πλαστεί έως διαμέτρου 3mm χωρίς να θραύεται. Τα τμήματα του θραυσθέντος δείγματος τοποθετήθηκαν σε γυάλινη κάψα γνωστού βάρους και ζυγίστηκαν. Έπειτα, τοποθετήθηκαν σε κλίβανο 110°C, ξηράθηκαν έως σταθερού βάρους και ζυγίστηκαν ξανά. Τέλος, από τις διαφορές των βαρών υπολογίστηκε το ποσοστό υγρασίας, δηλαδή το όριο πλαστικότητας.

Έχοντας ως δεδομένα το όριο υδαρότητας και το όριο πλαστικότητας, υπολογίστηκε ο δείκτης πλαστικότητας ο οποίος προκύπτει από την διαφορά τους.

Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων



Εικόνα 23: Ποσότητα υλικού για τον υπολογισμό ορίων υδαρότητας και πλαστικότητας (Πηγή: Προσωπικό αρχείο συγγραφέων)



Εικόνα 24: Κάψες με υλικό για τον προσδιορισμό ορίου υδαρότητας και ορίου πλαστικότητας (Πηγή: Προσωπικό αρχείο συγγραφέων)

3.3.4 Ειδικό βάρος

Για τον υπολογισμό του ειδικού βάρους των δειγμάτων ακολουθήθηκε η προδιαγραφή ASTM D854. Σε πυκνόμετρο προστέθηκαν τουλάχιστον 25g ξηρού δείγματος, όπως προβλέπει η διαδικασία, ζυγίστηκε το βάρος το συνδυασμένο βάρος πυκνόμετρου και δείγματος και στην συνέχεια προστέθηκε απιονισμένο νερό μέχρι την έναρξη του λαιμού του πυκνόμετρου. Το πυκνόμετρο παρέμεινε αδιατάραχτο για 24 ώρες και συμπληρώθηκε ποσότητα απιονισμένου νερού μέχρι το χείλος του και μετρήθηκε η θερμοκρασία του νερού, όπου η οποία ήταν 20°C. Έπειτα, τοποθετήθηκε σε αμμόλουτρο έως το σημείο βρασμού του νερού, έτσι ώστε να απομακρυνθεί ο παγιδευμένος αέρας που είχε εγκλωβιστεί στο δείγμα. Ζυγίστηκε το συνδυασμένο βάρος πυκνόμετρου, ξηρού δείγματος, απιονισμένου νερού.



Εικόνα 25: Πυκνόμετρα με ποσότητα ξηρού δείγματος (Πηγή: Προσωπικό αρχείο συγγραφέων)

Καθώς το πυκνόμετρο ήταν γνωστού βάρους, υπολογίστηκε το ακριβές βάρος του ξηρού δείγματος και το ειδικό βάρος υπολογίστηκε από την παρακάτω εξίσωση:

$$S = \frac{g}{Gt_2 + g - Gp}$$

Όπου:

S= ειδικό βάρος (gr/cm³)

g= ξηρό βάρος (g)

Gt₂= βάρος πυκνόμετρου και 100 cm³ απιονισμένο νερό και η διόρθωση θερμοκρασίας ΔG=1 (g)

Gp= βάρος πυκνόμετρου και βάρος απιονισμένου νερού και βάρος ξηρού δείγματος (g)

Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων

3.3.5 Κοκκομετρική ανάλυση

Όλα τα κόσκινα που αναφέρονται παρακάτω και χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις είναι τα πρότυπα αμερικάνικα κόσκινα κατά AASHTO M92-42.

Πριν την κοκκομετρική ανάλυση τα δείγματα ζυγίστηκαν, μετά την ξήρανση τους, βρέθηκε το ξηρό τους βάρος και πραγματοποιήθηκε πλύση σε κόσκινο No 200 (74μm) για τον διαχωρισμό του αργιλικού κλάσματος από το κλάσμα της άμμου και των χάλικων. Το διερχόμενο κλάσμα του υλικού αλλά και το παραμένον, συγκεντρώθηκαν σε υποδοχείς και έμειναν σε κλίβανο 110°C έως σταθερού βάρους.



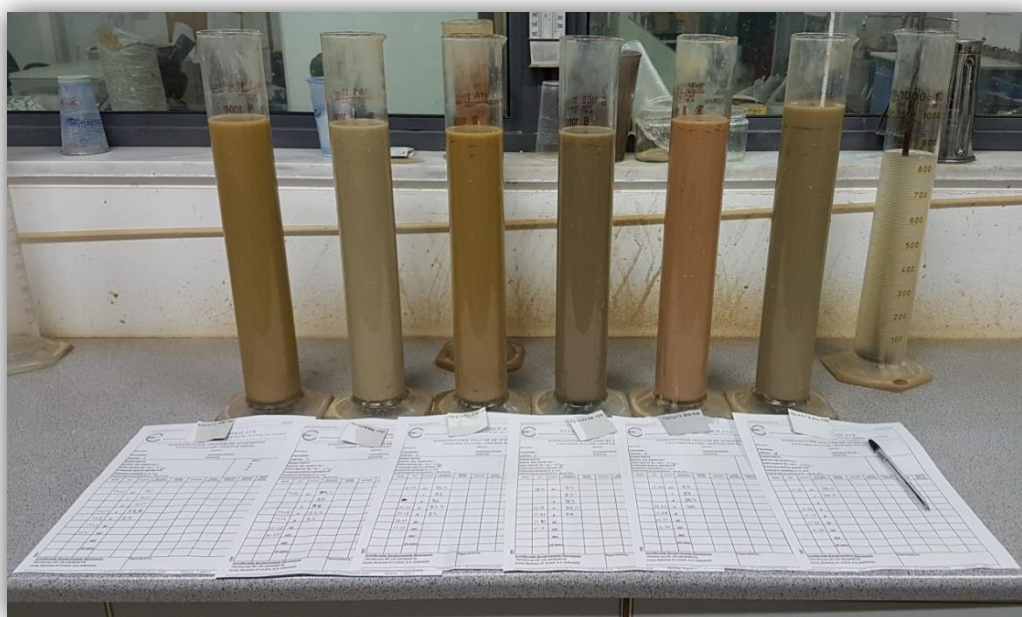
Εικόνα 26: Κόσκινο No 200 (Πηγή: Προσωπικό αρχείο συγγραφέων)

Για την κοκκομετρική ανάλυση του κλάσματος της άμμου και των χάλικων ακολουθήθηκε η ξηρά μέθοδος με κόσκινα (ASTM C136 , E105-86). Το κάθε δείγμα ζυγίστηκε για να βρεθεί το ξηρό βάρος του κλάσματος αυτού και στη συνέχεια, με το κοσκίνισμα του ξηρού αυτού δείγματος ζυγίστηκε το βάρος του παραμένοντος υλικού σε κάθε κόσκινο. Τα κόσκινα αυτά ήταν τα : 1/2", 3/8", No 4, No 10, No 16, No 30, No 60, No 100 και No 200.

Η κοκκομετρική ανάλυση του κλάσματος διερχόμενου του κόσκινου No 200 έγινε με αραιόμετρο σε ογκομετρικούς κυλίνδρους των 1000ml σύμφωνα με την ξένη προδιαγραφή ASTM D 422 ή την αντίστοιχη ελληνική E105-86.

Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων

Στον ογκομετρικό κύλινδρο 1000ml αναμείχθηκαν 100g δείγματος με 40ml έτοιμου διαλύματος παράγοντα διασποράς $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ (Τριφωσφορικό Νάτριο) και συμπληρώθηκε ο ογκομετρικός κύλινδρος μέχρι την χαραγή του με απιονισμένο νερό. Για τις παρακάτω μετρήσεις η υγροσκοπική υγρασία θεωρήθηκε μηδενική, το υδρόμετρο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το 151 Η. Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα 30", 1', 2', 4', 8', 30', 120', 24 ώρες και σε θερμοκρασία 21.5°C. Πριν από κάθε μέτρηση το διάλυμα αναδεύονταν έντονα για 1 λεπτό με μεταλλική ράβδο.



Εικόνα 27: Κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρο. Παρουσιάζονται οι ογκομετρικοί κύλινδροι 1L που περιέχουν τα δείγματα και δεξιά από αυτά διακρίνεται η μεταλλική ράβδος ανάδευσης (Πηγή: Προσωπικό αρχείο συγγραφέων)

Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων

Στην συνέχεια, για κάθε χρονική στιγμή υπολογίστηκε το ποσοστό των κόκκων με διάμετρο <math><2\mu\text{m}</math> από την παρακάτω εξίσωση:

$$K = \frac{100 \times \rho_s}{m(\rho_s - 1)} \cdot Rd$$

Όπου:

K = ποσοστό κόκκων διαμέτρου <math><2\mu\text{m}</math> (%)

ρ_s = ειδικό βάρος (g/cm^3)

m = ξηρό βάρος δείγματος (g)

Rd = τροποποιημένη ένδειξη υδρομέτρου

Με την παρακάτω εξίσωση για κάθε χρονική στιγμή υπολογίστηκε η διάμετρος των κόκκων, οι οποίοι ήταν <math><2\mu\text{m}</math>:

$$d_i = 0,005531 \sqrt{\frac{\eta \times H_r}{(\rho_s - 1) \times t}}$$

Όπου:

d_i = διάμετρος κόκκων (mm)

η = ιξώδες νερού

H_r = ενεργό βάθος του υδρομέτρου (mm)

ρ_s = ειδικό βάρος (g/cm^3)

t = χρόνος (s)

Τέλος, πραγματοποιήθηκε η συσχέτιση της διαμέτρου των κόκκων και του ποσοστού των κόκκων διαμέτρου <math><2\mu\text{m}</math>, έτσι ώστε να δημιουργηθούν διαγράμματα κοκκομετρικής διαβάθμισης όπως παρουσιάζονται στο παράρτημα Ι.

3.3.6 Υπολογισμός της διαπερατότητας

Η δοκιμή που αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό της διαπερατότητας των δειγμάτων, αναφέρεται στις προδιαγραφές εργαστηριακών δοκιμών εδαφομηχανικής (E 105-86) και η αντίστοιχη διεθνής προδιαγραφή είναι η ASTM D2435. Η διάταξη του εξοπλισμού της μέτρησης ήταν σύμφωνη με τις παραπάνω προδιαγραφές.



Εικόνα 28: Πειραματική διάταξη υπολογισμού διαπερατότητας (Πηγή: Προσωπικό αρχείο συγγραφέων)

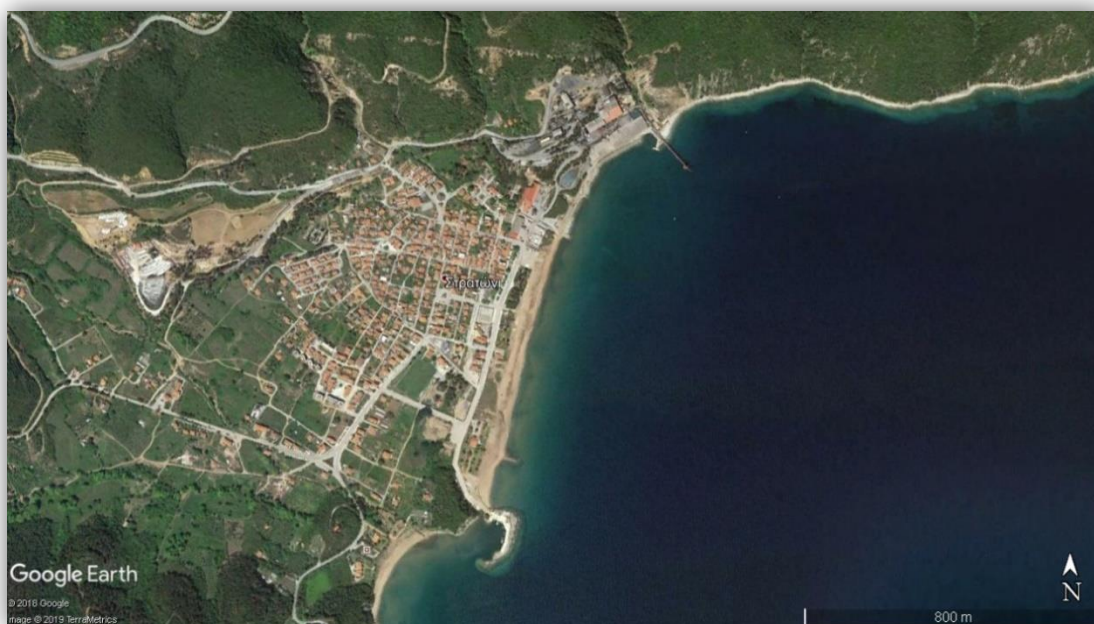
Στα συμπιεσόμετρα αρχικά τοποθετήθηκαν τα μη επεξεργασμένα δείγματα και το διάλυμα το οποίο περνούσε μέσα από αυτά ήταν απιονισμένο νερό. Με το πέρας των μετρήσεων αυτών, σειρά είχαν οι μετρήσεις των ενεργοποιημένων δειγμάτων με το χρησιμοποιούμενο διάλυμα να είναι πάλι το απιονισμένο νερό.

Τέλος, ακόμα μια ποσότητα ενεργοποιημένων δειγμάτων τοποθετήθηκε στις συσκευές όμως αυτή τη φορά το διάλυμα το οποίο τα διαπερνούσε ήταν στράγγισμα (leachate) από άμμο με χαμηλό pH και με μεγάλη συγκέντρωση διαλυμένων στερεών σωματιδίων (TDS).

Οι μετρήσεις για τον υπολογισμό της διαπερατότητας έγιναν στα 25, 50, 100, 200, 400 kPa.

3.4 Παρασκευή στραγγίσματος (Leachate)

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία αυτού του στραγγίσματος αποτελεί σύνθετο δείγμα το οποίο συλλέχθηκε από διάφορα τμήματα όλης της έκτασης της παραλίας του Στρατωνίου στην Χαλκιδική. Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν διαθέσιμο σε ξηρή μορφή στο Εργαστήριο Οικονομικής Γεωλογίας και Γεωχημείας. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την παρασκευή του στραγγίσματος βασίστηκε στην προδιαγραφή EN 12457-4:2002.



Εικόνα 29: Δειγματοληψία από την παραλία του Στρατωνίου (Πηγή: Google Earth)

Όπως προβλέπει η διαδικασία, τοποθετήθηκαν 100gr δείγματος σε κλίβανο στους 100°C για 24 ώρες και στην συνέχεια ζυγίστηκε ξανά το δείγμα έτσι ώστε να βρεθεί το βάρος του ξηραμένου δείγματος. Μέσω της παρακάτω σχέσης υπολογίστηκε το ποσοστό υγρασίας:

$$MC = 100 \times (M_W - M_D) / M_D$$

Όπου:

MC= ποσοστό υγρασίας (%)

M_W= βάρος μη ξηραμένου δείγματος (kg)

M_D= βάρος ξηραμένου δείγματος (kg)

Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων

Στην συνέχεια, για να βρεθεί η ποσότητα του απιονισμένου νερού που θα πρέπει να αναμειχθεί με το έδαφος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξίσωση:

$$L = \left(10 - \frac{MC}{100}\right) \times M_D$$

Όπου:

L= όγκος απιονισμένου νερού (l)

MC= ποσοστό υγρασίας (%)

M_D= βάρος ξηραμένου δείγματος (kg)

Έπειτα, τοποθετήθηκε η ανάλογη ποσότητα απιονισμένου νερού και εδάφους με αναλογία 10:1, σε δοχείο ενός λίτρου. Το δοχείο αυτό παρέμεινε σε μηχανήμα ανάδευσης, το οποίο περιστρεφόταν με ταχύτητα 10 στροφών το λεπτό (10 rpm). Μετά από 24 ώρες το δοχείο αφαιρέθηκε από το μηχανήμα και με φίλτρο 0,45 μm διηθήθηκε όλη η ποσότητα του διαλύματος. Μετά την διήθηση μετρήθηκε το pH και τα TDS (Total Dissolved Solids) του διαλύματος.



Εικόνα 30: Δοχεία 1 λίτρου με απιονισμένο νερό και έδαφος με αναλογία 10:1 (Πηγή: Προσωπικό αρχείο συγγραφέων)

Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων

Το διάλυμα αυτό μεταφέρθηκε στις εργαστηριακές εγκαταστάσεις της ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΤΕ, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί για τις δοκιμές διαπερατότητας.

Κατά την διάρκεια των δοκιμών διαπερατότητας πάρθηκε μια μικρή ποσότητα διαλύματος από το κάθε δείγμα στις τάσεις 25 kPa και 100 kPa, έτσι ώστε να μετρηθεί το pH και η συγκέντρωση των TDS μετά την αλληλεπίδραση του με το κάθε δείγμα.



Εικόνα 31: Συλλογή διαλύματος κατά την διάρκεια του πειράματος διαπερατότητας (Πηγή: Προσωπικό αρχείο συγγραφέων)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1 Ορυκτολογική ανάλυση

Η αποτίμηση των ακτινοδιαγραμμάτων στα ολικά γεωλογικά δείγματα έδειξε ότι κύριες ορυκτολογικές φάσεις αποτελούν ο Σμεκτίτης, ο Παλυγορσκήτης και ο Χαλαζίας, ενώ δευτερεύουσες αποτελούν τα Πλαγιόκλαστα και ο Αντιγορίτης. Τα δείγματα KGF1, KGF2 από το λατομείο της Κνίδης παρουσίασαν μεικτή σύσταση σμεκτίτη-παλυγορσκήτη και περιείχαν ποσότητα χαλαζία και πλαγιόκλαστων. Το KGF1 περιείχε ελάχιστη ποσότητα αντιγορίτη. Τα δείγματα PGF3, PGF4 από το λατομείο των Πυλωρών αποτελούνται κυρίως από σμεκτίτη-χαλαζία και δευτερευόντως από πλαγιόκλαστα και αντιγορίτη. Το PGF4 περιείχε ελάχιστη ποσότητα παλυγορσκήτη. Το LGF5 από το λατομείο της Βελανίδας, εμφάνισε την πιο απλή ορυκτολογική σύσταση, αποτελούμενο από σμεκτίτη και αντιγορίτη, καθώς επίσης απουσίαζε ο χαλαζίας. Ωστόσο, στο LSGF6, το οποίο είχε παρθεί από το σωρό του λατομείου αυτού, έχει ως κύριες φάσεις τον σμεκτίτη και τον χαλαζία, ενώ ως δευτερεύοντες τον παλυγορσκήτη και τον αντιγορίτη. Συγκεκριμένα, σε αυτό το δείγμα παρατηρήθηκε το μεγαλύτερο ποσοστό χαλαζία και από τα έξι δείγματα.

Ορυκτά	KGF1	KGF2	PGF3	PGF4	LGF5	LSGF6
Νοντρονίτης	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Παλυγορσκήτης	✓	✓		✓		✓
Χαλαζίας	✓	✓	✓	✓		✓
Πλαγιόκλαστο	✓	✓	✓			
Αντιγορίτης	✓		✓	✓	✓	✓

Πίνακας 2: Ορυκτολογία των δειγμάτων

Ο σμεκτίτης που εμφανίστηκε στα ακτινοδιαγράμματα, παρουσιάζει την κορυφή (peak) της έδρας $d_{(060)}$ στις 61.3° με $d = 1.51\text{\AA}$ υποδεικνύοντας πως πρόκειται για δι-οκταεδρικό σμεκτίτη. Από τους *Kastritis, Mposkos & Kacandes, 2003* είναι γνωστό πως αυτός είναι σιδηρούχος. Ο σιδηρούχος δι-οκταεδρικός σμεκτίτης είναι ο Νοντρονίτης με χημικό τύπο $\text{Na}_{0.3}\text{Fe}_2((\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ και αυτός εντοπίζεται σε όλα τα δείγμα της έρευνας.

4.2 Ιοντοεναλλακτική ικανότητα

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ιοντοεναλλακτικής ικανότητας όλων των δειγμάτων, με βάση του πειράματος του κυανού του μεθυλενίου:

Δείγμα	CEC (meq/100g δείγματος)
KGF1	49,61
KGF2	48,17
PGF3	60,86
PGF4	66,88
LGF5	66,97
LSGF6	52,50

Πίνακας 3: Ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων

Παρατηρήθηκε ότι τα δείγματα με το μεγαλύτερο ποσοστό αργίλου, άρα κατά συνέπεια μεγαλύτερο ποσοστό σμεκτίτη, παρουσίασαν τις μεγαλύτερες τιμές ιοντοεναλλακτικής ικανότητας. Τα δείγματα αυτά ήταν από το λατομείο των Πυλωρών (PGF3, PGF4) και από το λατομείο της Βελανίδας (LGF5).

4.3 Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών για όλα τα δείγματα, η κοκκομετρική τους διαβάθμιση και η ταξινόμηση τους στο Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών (Unified Soil Classification System).

Δείγμα	Φυσική υγρασία (%)	Όριο υδαρότητας (%)	Όριο πλαστικότητας (%)	Ειδικό βάρος (gr/cm ³)
KGF1	12,78	117,4	66,5	2,33
KGF2	17,58	136	77,2	2,33
PGF3	15,33	108	32,8	2,43
PGF4	16,73	150,5	51,1	2,33
LGF5	13,58	130,7	53	2,42
LSGF6	20,00	125,7	59,6	2,30

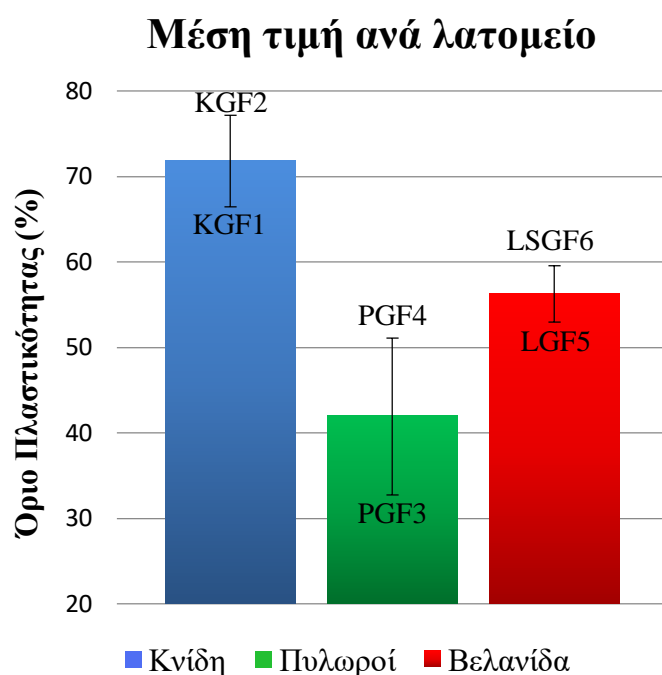
Δείγμα	Δείκτης Συνεκτικότητας (Ic)	Δείκτης Πλαστικότητας (Ws)
KGF1	1,19	50,8
KGF2	1,13	58,8
PGF3	1	75,2
PGF4	1,02	99,4
LGF5	1,17	77,7
LSGF6	1,07	66,1

Πίνακας 4-5: Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά

Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων

Όλα τα δείγματα παρουσίασαν υψηλά όρια υδαρότητας, παρόμοια ειδικά βάρη και τα όρια πλαστικότητας ανά λατομείο δεν εμφάνισαν μεγάλη διακύμανση. Εξαιρέση αποτέλεσαν τα δείγματα PGF3 και PGF4, που προέρχονται από το λατομείο των Πυλωρών, όπου παρουσίασαν την μεγαλύτερη ετερογένεια μεταξύ τους όσον αφορά τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά. Τα υψηλότερα όρια πλαστικότητας ανήκουν στα δείγματα του λατομείου της Κνίδης.

Ο δείκτης συνεκτικότητας (I_c) κυμαίνεται από 1 έως 1,19 χαρακτηρίζοντας τα δείγματα ως ‘πολύ σκληρά’. Ως εμπειρικός κανόνας έχει επικρατήσει ότι δείγματα με δείκτη πλαστικότητας (W_s) πάνω από 25% τείνουν να διογκώνονται όταν προσροφούν νερό. Ο κανόνας αυτός επιβεβαιώθηκε με τα παραπάνω αποτελέσματα, καθώς η ελάχιστη τιμή W_s ήταν 50,8%.



Διάγραμμα 1: Μέση τιμή ορίου πλαστικότητας ανά λατομείο. Παρουσιάζονται και οι απόλυτες τιμές των δειγμάτων και επιπλέον διακρίνεται μεγαλύτερη απόκλιση στις τιμές αυτές στο λατομείο των Πυλωρών. Φαίνεται ότι στο λατομείο αυτό εμφανίζονται οι μικρότερες τιμές.

Από τα διαγράμματα κοκκομετρικής διαβάθμισης που παρουσιάζονται στο παράρτημα II, μπορεί να υπολογιστεί το ποσοστό άμμου, ιλύος και αργίλου στο κάθε δείγμα, όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Δείγμα	Αργίλος (%)	Ίλύς (%)	Άμμος (%)
KGF1	46,3	8,8	44,9
KGF2	63,5	9	27,5
PGF3	74,7	17	8,3
PGF4	87,3	8,4	4,3
LGF5	69,5	12	18,5
LSGF6	48,3	16,7	35

Πίνακας 6: Ποσοστό κόκκων Άμμου, Ίλως και Αργίλου

Όπως ήταν αναμενόμενο όλα τα δείγματα είχαν υψηλό ποσοστό αργίλου, το ποσοστό ίλως κυμαινόταν από 8,4% έως 16,7% και υπήρχε διακύμανση στο ποσοστό της άμμου με ακραίες τιμές το 4,3% και το 44,9%. Αναλυτικότερα, τα δείγματα PGF3, PGF4 από το λατομείο των Πυλωρών παρουσίασαν τα μεγαλύτερα ποσοστά αργίλου. Εξίσου υψηλό ποσοστό παρουσίασε το δείγμα LGF5 από το λατομείο της Βελανίδας. Τα υπόλοιπα τρία (3) δείγματα, KGF1 και KGF2 από το λατομείο της Κνίδης και το LSGF6 από το λατομείο της Βελανίδας περιέχουν χαλαζία και μια ποσότητα παλυγορσκήτη.

Συνθέτοντας όλα τα παραπάνω αποτελέσματα, μπορεί να γίνει η ταξινόμηση των εδαφών στο Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών (Unified Soil Classification System) – D2487-00. Η ταξινόμηση αυτή λαμβάνει υπόψη της, τις κοκκομετρίες, τα όρια υδαρότητας, τα όρια πλαστικότητας και τον δείκτη πλαστικότητας των δειγμάτων.

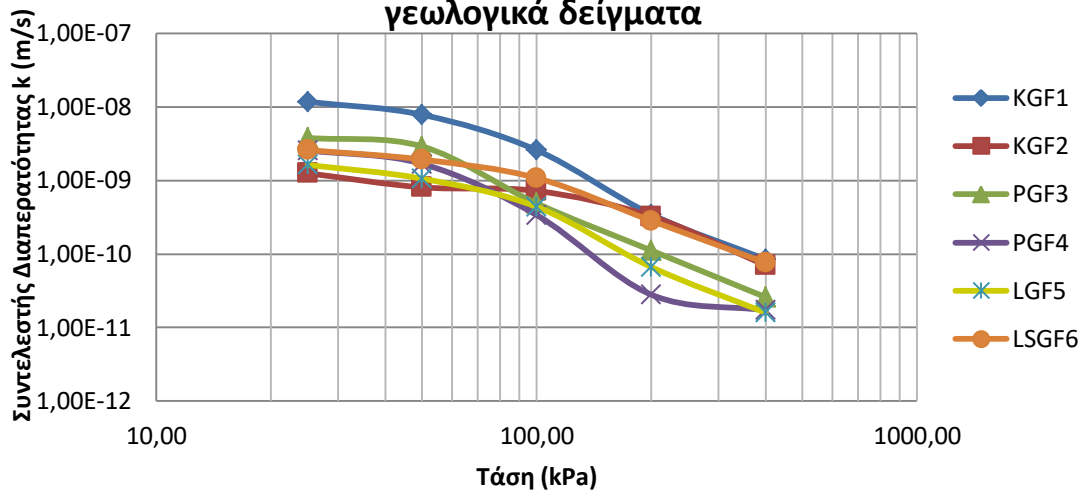
Δείγμα	Ταξινόμηση εδαφών
KGF1	MH Sandy elastic silt
KGF2	MH Elastic silt with sand
PGF3	MH Elastic silt
PGF4	MH Elastic silt
LGF5	MH Elastic silt with sand
LSGF6	MH Sandy elastic silt

Πίνακας 7: Ταξινόμηση κατά ASTM D2487-00

4.3.1 Διαπερατότητα και παραμόρφωση

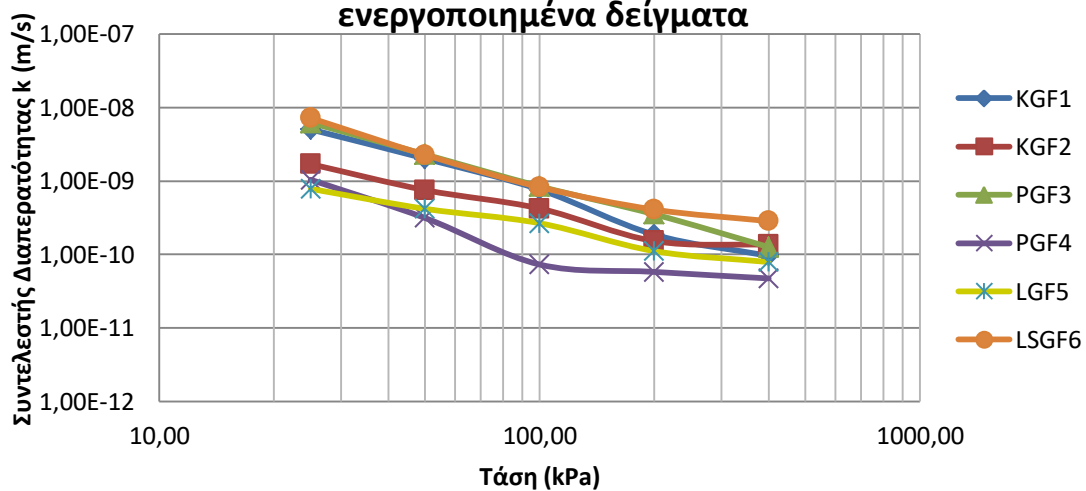
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα του συντελεστή διαπερατότητας k όπως προέκυψαν από τα αποτελέσματα της δοκιμής που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο:

Κατανομή συντελεστή διαπερατότητας στα ολικά γεωλογικά δείγματα

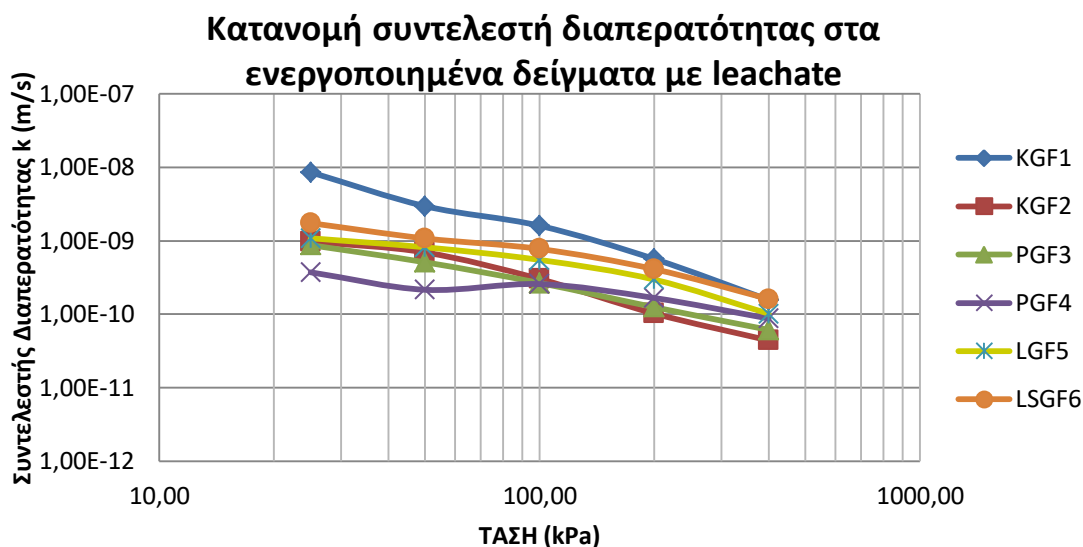


Διάγραμμα 2: Συντελεστής διαπερατότητας k συναρτήσει της τάσης. Το διάγραμμα αναφέρεται στα ολικά γεωλογικά δείγματα με την χρήση νερού από το δίκτυο ύδρευσης.

Κατανομή συντελεστή διαπερατότητας στα ενεργοποιημένα δείγματα



Διάγραμμα 3: Συντελεστής διαπερατότητας k συναρτήσει της τάσης. Το διάγραμμα αναφέρεται στα ενεργοποιημένα δείγματα με την χρήση νερού από το δίκτυο ύδρευσης.



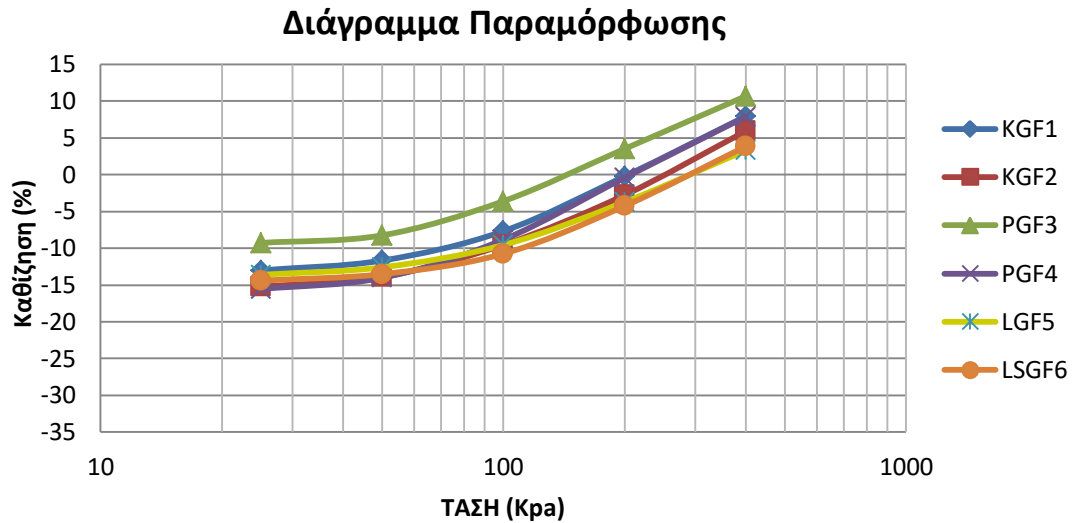
Διάγραμμα 4: Συντελεστής διαπερατότητας k συναρτήσει της τάσης. Το διάγραμμα αναφέρεται στα ενεργοποιημένα δείγματα με την χρήση στραγγίσματος (leachate).

Παρατηρήθηκε πως η υψηλότερη διαπερατότητα (k) δεν ξεπέρασε την τιμή $1,17 \times 10^{-8}$ m/s. Διακρίθηκε συσχέτιση του ποσοστού αργίλικού κλάσματος με τις τιμές του συντελεστή διαπερατότητας. Συγκεκριμένα, δείγματα με υψηλό ποσοστό αργίλικού κλάσματος (>60%) παρουσίασαν μικρότερο συντελεστή διαπερατότητας και στις τρεις (3) δοκιμές.

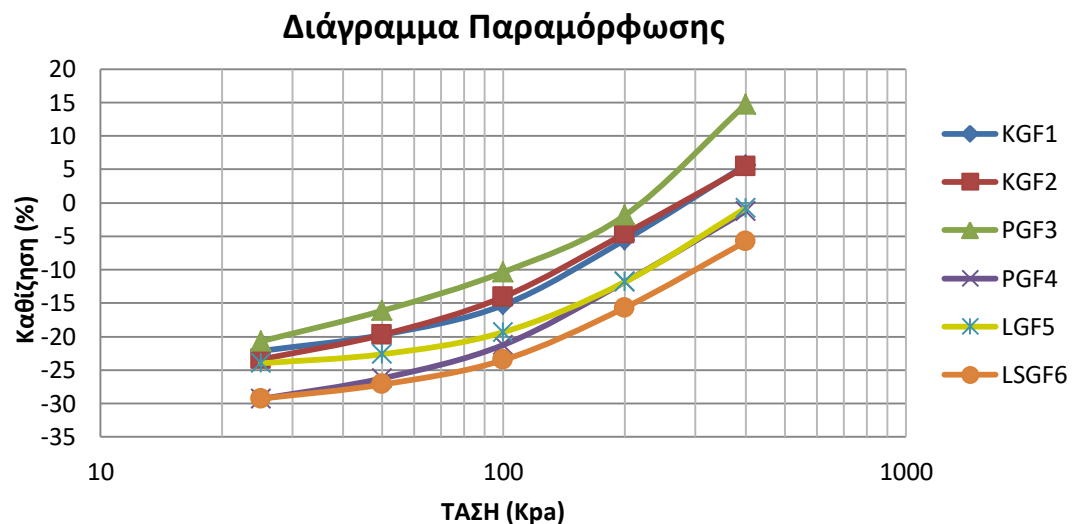
Συγκρίνοντας τα ολικά γεωλογικά δείγματα με τα ενεργοποιημένα δείγματα με χρήση νερού από το δίκτυο ύδρευσης, υπήρξε εμφανής μείωση του συντελεστή διαπερατότητας στα ενεργοποιημένα δείγματα. Ακόμα, τα δείγματα KGF1 και LSGF6 τα οποία αποτελούνται από τα υψηλότερα ποσοστά κλάσματος άμμου, με την ενεργοποίηση παρουσίασαν ικανοποιητική μείωση του συντελεστή διαπερατότητας. Γεγονός που υποδηλώνει ότι η επεξεργασία των γεωλογικών δειγμάτων με σόδα (Na_2CO_3) προσδίδει στα υλικά χαμηλότερη διαπερατότητα, όπως αναμενόταν.

Στην συνέχεια, συγκρίνοντας την επίδραση του στραγγίσματος (leachate) με την επίδραση του νερού από το δίκτυο ύδρευσης στα ενεργοποιημένα δείγματα, ενώ αναμενόταν υψηλότερες τιμές του συντελεστή διαπερατότητας με την αύξηση της τάσης, αυτό δεν παρατηρήθηκε. Αναλυτικότερα, τα δείγματα KGF2, PGF3, PGF4 και LGF5, ακόμα και από την τάση των 25kPa παρουσίασαν συντελεστή διαπερατότητας της τάξης $k = 1 \times 10^{-9}$ m/s και χαμηλότερα. Και στην δοκιμή, αυτή παρατηρήθηκε πως τα δείγματα με το υψηλότερο ποσοστό αργίλικού κλάσματος προσδίδουν τις χαμηλότερες τιμές διαπερατότητας.

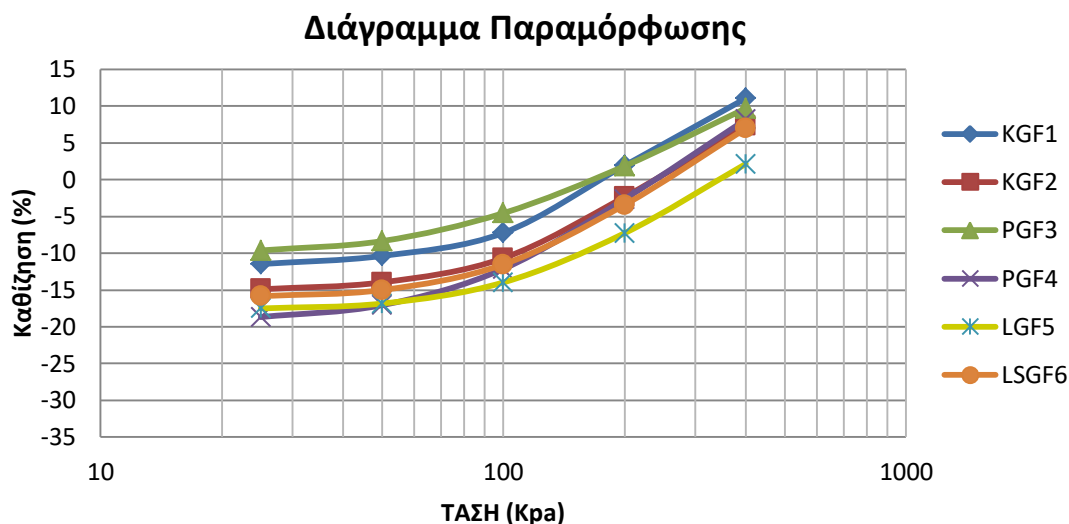
Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων



Διάγραμμα 5: Καθίζηση συναρτήσει της τάσης. Το διάγραμμα αναφέρεται στα ολικά γεωλογικά δείγματα με την χρήση νερού από το δίκτυο ύδρευσης.



Διάγραμμα 6: Καθίζηση συναρτήσει της τάσης. Το διάγραμμα αναφέρεται στα ενεργοποιημένα δείγματα με την χρήση νερού από το δίκτυο ύδρευσης.



Διάγραμμα 7: Καθίζηση συναρτήσει της τάσης. Το διάγραμμα αναφέρεται στα ενεργοποιημένα δείγματα με την χρήση στραγγίσματος (leachate).

Καθώς εξελισσόταν το πείραμα υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας, με την χρήση μηκυνσιομέτρου, μετρήθηκε ταυτόχρονα η παραμόρφωση των δειγμάτων για τις διάφορες τάσεις. Στα παραπάνω διαγράμματα εκφράζεται η παραμόρφωση ως το ποσοστό της καθίζησης των δειγμάτων. Όπως παρουσιάζεται, η καθίζηση (%) για τις περισσότερες τιμές τάσης είχε αρνητική τιμή υποδεικνύοντας πως το ύψος των δοκιμίων ήταν μεγαλύτερο σε σχέση με την αρχική τιμή αυτού. Έτσι, φάνηκε πως τα αργιλικά δείγματα παρουσίασαν διόγκωση όπως έδειξαν και τα αποτελέσματα των ορίων Attenberg και του δείκτη πλαστικότητας.

Τα ενεργοποιημένα δείγματα παρουσίασαν τις πιο αρνητικές τιμές καθίζησης, άρα και τις μεγαλύτερες τιμές διόγκωσης. Με την αύξηση της τάσης το ποσοστό καθίζησης αυξάνεται και μέχρι τα 100 kPa τα δείγματα βρίσκονται ακόμα σε διογκωμένη κατάσταση.

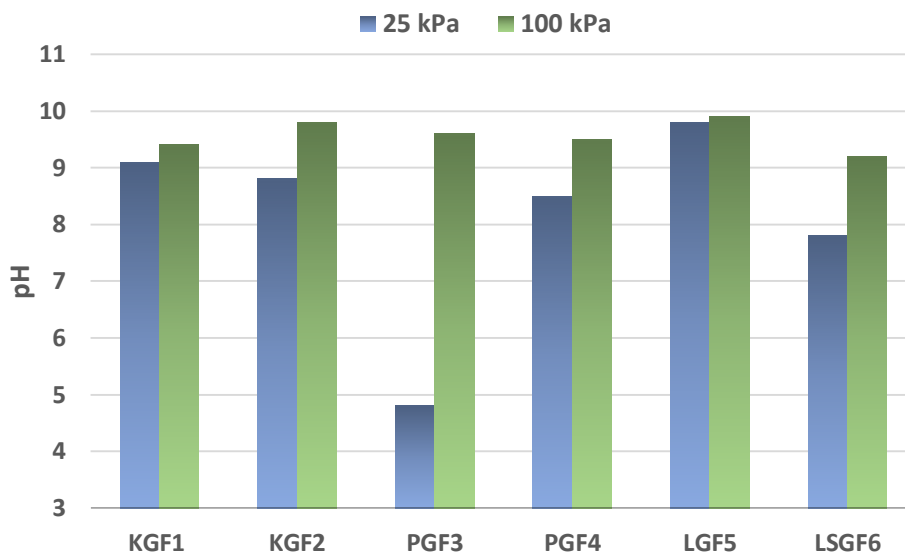
4.3.2 Ολικά διαλυμένα στερεά (TDS) και pH

Στο αρχικό στράγγισμα, μετρήθηκε το pH=2,7 και τα TDS=1,66 g/L. Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν δύο (2) μετρήσεις του pH και των TDS στο στράγγισμα (leachate) που είχε διαπεράσει το δείγμα:

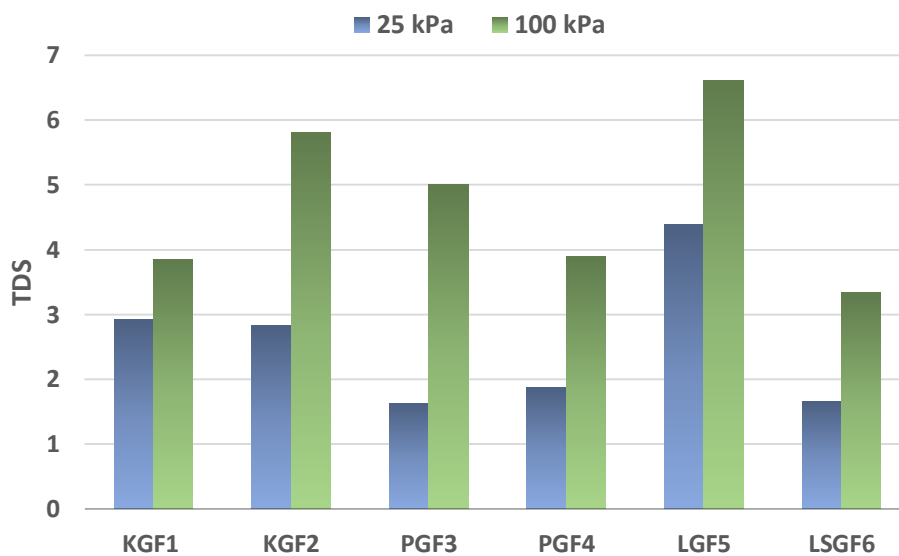
- μετά την δοκιμή διαπερατότητας με τάση 25 kPa (28-Μαρτίου)
- μετά την δοκιμή διαπερατότητας με τάση 100 kPa (04-Απριλίου)

Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων

Αυτές οι δύο (2) επιλέχθηκαν ως ακραίες τάσεις για την προσομοίωση των συνθηκών που μπορεί να υπάρχουν σε έναν χώρο υγειονομικής ταφής.



Διάγραμμα 5: Μετρήσεις pH στραγγίσματος (leachate) μετά από δοκιμές τάσεων 25 kPa και 100 kPa

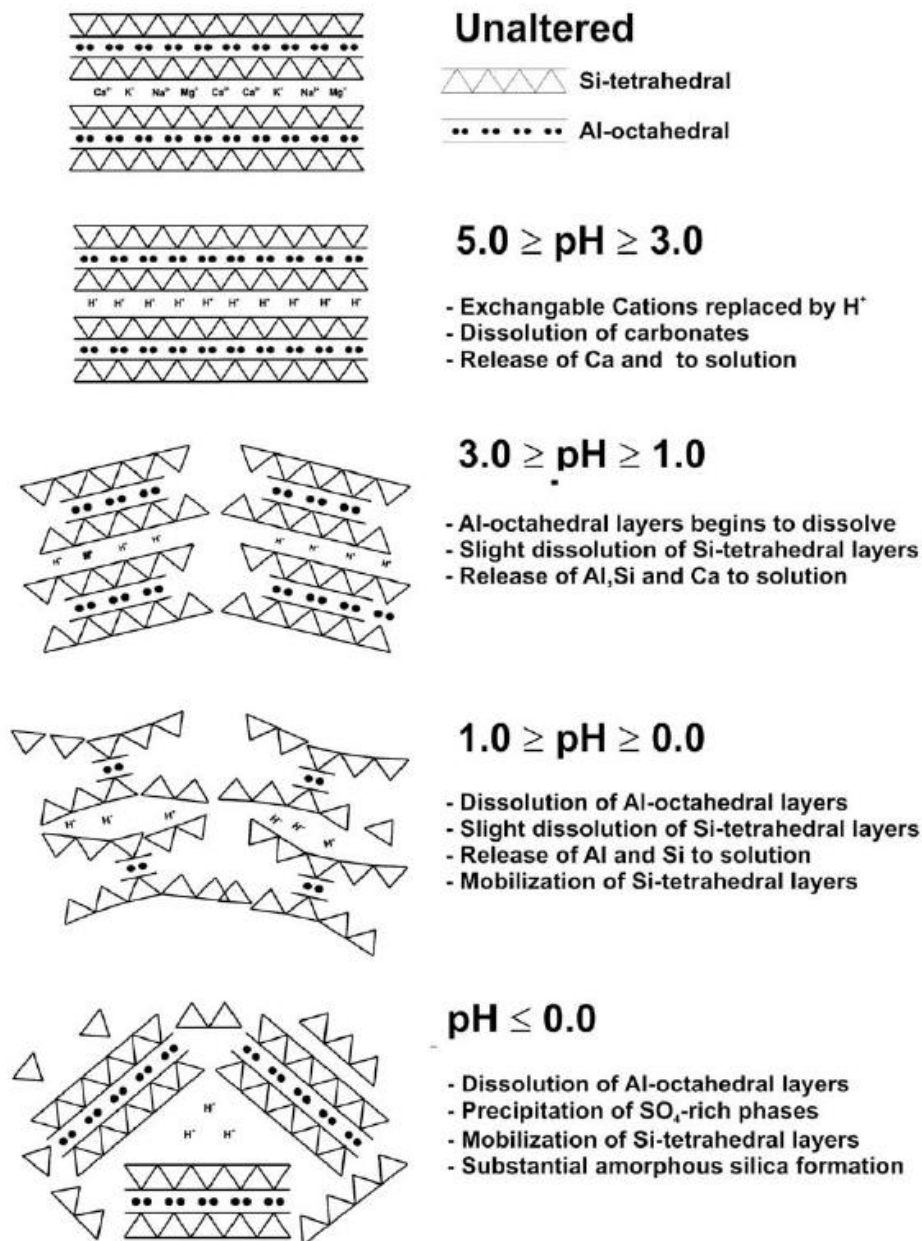


Διάγραμμα 6: Μετρήσεις TDS του στραγγίσματος (leachate) μετά από δοκιμές τάσεων 25 kPa και 100 kPa

Τα δείγματα τοποθετήθηκαν στην πειραματική διάταξη του υπολογισμού της διαπερατότητας στις 26 Μαρτίου, με τάση 25kPa, και η δειγματοληψία και η μέτρηση του pH και TDS έγινε στις 28 Μαρτίου. Μέσα στις δύο πρώτες μέρες, στις οποίες τα δείγματα αντέδρασαν με το ρευστό, το pH αυτού μετρήθηκε από 7,8 έως 9,8. Εξαιρέση αποτέλεσε το δείγμα PGF3 στο οποίο μετρήθηκε pH = 4,8.

Ωστόσο, με το πέρας επτά (7) ημερών και την αύξηση της τάσης στα 100kPa (ενδιάμεσα μεσολάβησε και η τάση των 50kPa) το pH όλων των δειγμάτων είχε σταθεροποιηθεί μεταξύ των τιμών 9,2 και 9,9, με μία μέση τιμή για όλα τα δείγματα να είναι 9,57. Το δείγμα PGF3 έδωσε αυτή τη φορά pH = 9,6. Φάνηκε, πως καθώς η τάση αυξανόταν η διαπερατότητα των δειγμάτων μειωνόταν, αφού οι κρύσταλλοι των ορυκτών και στη συνέχεια οι κόκκοι συμπίεζονταν μεταξύ τους, το ρευστό είχε περισσότερο χρόνο να αντιδράσει με τον σμεκτίτη. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται με την μέτρηση των ολικών διαλυμένων στερεών (TDS). Υπήρξε μια μικρή αύξηση στις δύο πρώτες ημέρες, αλλά μετά από επτά ημέρες η αύξηση ήταν αρκετά μεγάλη, το οποίο ήταν αναμενόμενο. Το στράγγισμα που παρασκευάστηκε περιέχει ποσότητα H₂SO₄ από την διάλυση του σιδηροπυρίτη (FeS₂). Αυτό επιδρά πάνω στον σμεκτίτη, με αποτέλεσμα για pH = 2.7 του αρχικού διαλύματος τα αργιλούχα οκτάεδρα του σμεκτίτη να αρχίζουν να διαλύονται, ενώ υπάρχει και μερική διάλυση των τετραέδρων. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση ιόντων Al, Si και Ca στο διάλυμα και αύξηση των TDS (Pesquera et al. , 1992).

Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων



Εικόνα 32: Γεωχημικό και ορυκτολογικό μοντέλο της επίδρασης του H₂SO₄ για διάφορες τιμές pH (κατά Pesquera et al., 1992).

4.4 Συζήτηση

Εξετάζοντας την ορυκτολογία και την κοκκομετρία των δειγμάτων, παρατηρήθηκε ότι τα δείγματα PGF3, PGF4, LGF5, που είχαν από ελάχιστο έως καθόλου παλυγκορσκήτη, είχαν και το υψηλότερο ποσοστό αργίλου. Επιπλέον, σε αυτά τα δείγματα παρουσιάστηκαν οι υψηλότερες τιμές δείκτη πλαστικότητας και ιοντοεναλλακτικής ικανότητας. Αυτές οι τιμές επαληθεύουν την υψηλή συγκέντρωση σμεκτίτη (νοντρονίτη) σε αυτά τα δείγματα. Όσον αφορά την διογκωσιμότητα των δειγμάτων, αυτή επιβεβαιώνεται από τα διαγράμματα παραμόρφωσης.

Συσχετίζοντας την κατανομή του συντελεστή διαπερατότητας σε σχέση με την τάση εντοπίστηκε πως τα γεωλογικά δείγματα καθώς και τα ενεργοποιημένα KGF2, PGF4, LGF5 εμφανίζουν τις χαμηλότερες τιμές του συντελεστή διαπερατότητας. Ενώ, στα ενεργοποιημένα δείγματα με την χρήση του στραγγίσματος (leachate) εμφανίζει και το δείγμα PGF3 πολύ χαμηλές τιμές. Σε αυτό σημείο αξίζει να αναφερθεί πως η κοκκομετρία διαδραματίζει ξανά καθοριστικό ρόλο στα αποτελέσματα. Τα δείγματα που προαναφέρθηκαν είναι αυτά με το υψηλότερο ποσοστό αργιλικού κλάσματος, άρα και μεγαλύτερο ποσοστό σιδηρούχου σμεκτίτη. Ωστόσο, και τα έξι (6) δείγματα όταν αντιδρούν με το στράγγισμα (leachate) δίνουν τιμές συντελεστή διαπερατότητας μικρότερης της τάξης $k < 1 \times 10^{-7}$ m/s. Με βάση την ελληνική νομοθεσία Κ.Υ.Α.Η.Π.29407/3508/2002 – ΦΕΚ Β-1572/1-12-2002 τα υλικά αυτά προτείνονται κατάλληλα για χρήση αργιλικών επενδύσεων δαπέδου (base liners) σε χώρους απόθεσης αποβλήτων αδρανών υλικών.

Εξετάζοντας την περίπτωση χρήσης των υλικών σε χώρους απόθεσης αποβλήτων μη-επικινδύνων και επικίνδυνων υλικών, εξάχθηκαν τα παρακάτω συμπεράσματα. Τα δείγματα PGF3, PGF4, παρουσιάζουν από την μικρότερη τιμή τάσης των 25kPa συντελεστή διαπερατότητας $k < 1 \times 10^{-9}$ m/s. Για την ίδια τάση, τιμές οριακά πάνω από αυτή την τιμή δίνουν τα δείγματα KGF2, LGF5. Συμβουλευόμενοι και πάλι την ελληνική νομοθεσία Κ.Υ.Α.Η.Π.29407/3508/2002 – ΦΕΚ Β-1572/1-12-2002, τα δείγματα PGF3, PGF4 προτείνονται για χρήση αργιλικών επενδύσεων δαπέδου (base liners) σε χώρους απόθεσης αποβλήτων μη-επικινδύνων και επικίνδυνων υλικών, καθώς πληρούν τις προδιαγραφές διαπερατότητας ακόμη και μετά την αλληλεπίδραση με όξινα στραγγίσματα, υψηλού φορτίου διαλυμένων ιόντων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 Συμπεράσματα

Από όσα έχουν αναφερθεί παραπάνω στην έρευνα έως τώρα συμπεραίνουμε:

- Το κυρίαρχο αργιλικό ορυκτό εντοπίστηκε πως είναι ο Νοντρονίτης
- Τα δείγματα που δεν περιείχαν Παλυγορσκήτη παρουσίασαν την βέλτιστη απόκριση στις πειραματικές μεθόδους
- Ο συντελεστής διαπερατότητας εξαρτάται από το ποσοστό συμμετοχής του σιδηρούχου σμεκτίτη στο αργιλικό κλάσμα
- Τα δείγματα ταξινομούνται στην κατηγορία MH Elastic Silt
- Το στράγγισμα μετά το πείραμα διαπερατότητας έχει μεγαλύτερη συγκέντρωση TDS, διότι σε αυτό το εύρος pH τα οκτάεδρα του σμεκτίτη διαλύονται και απελευθερώνονται ιόντα όπως Si, Al, Ca, Fe
- Όλα τα δείγματα της έρευνας προτείνονται για χρήση αργιλικών επενδύσεων δαπέδου (base liners) σε χώρους απόθεσης αποβλήτων αδρανών υλικών. Ενώ, για χώρους απόθεσης αποβλήτων μη-επικινδύνων και επικινδύνων υλικών προτείνονται τα δείγματα PGF3, PGF4

5.2 Προτάσεις

Συμπληρωματικά με την εργασία αυτή μπορούν να πραγματοποιηθούν περαιτέρω έρευνες με στόχο να διευρυνθεί η γνώση πάνω σε αυτή την σιδηρούχο άργιλο, καθώς και στην αλληλεπίδραση της με διαλύματα ποικίλου pH.

- Χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) στα δείγματα μετά την αλληλεπίδραση τους με το στράγγισμα (leachate)
- Ορυκτολογική ανάλυση των δειγμάτων που είχαν αλληλεπιδράσει με το στράγγισμα (leachate), με περιθλασιμετρία ακτίνων X (XRD)
- Διεκπεραίωση χημικών αναλύσεων των διαλυμάτων πριν και μετά το πείραμα διαπερατότητας
- Να πραγματοποιηθεί πιλοτική δοκιμή πεδίου μικρής κλίμακας με αυτά τα υλικά ως αργιλικές επενδύσεις δαπέδου
- Πραγματοποίηση πειράματος διαπερατότητας με μεγαλύτερο χρόνο αλληλεπίδρασης του υλικού με το στράγγισμα (leachate)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Boulet M.P., Larocque A.C.L., (1998) A comparative mineralogical and geochemical study of sulfide mine tailings at two sites in New Mexico, USA. *Environmental geology*, Vol.33, 130–142
- Bradley, W.F., (1940) The structural scheme of attapulgite. *American Mineralogist*, Vol.25, 405–410
- Brigatti, M.F., Galan, E., Theng, B.K.G., (2006) Structures and mineralogy of clay minerals. *Developments in Clay Science*, Vol.1, 19–86
- Czurda K., (2006) Clay liners and waste disposal. *Handbook of Clay Science*, Vol.1, 693–701
- Eby G.N. (2004) Principles of environmental geochemistry. Translated from English by E.P. Kostaraki. Athens: Scientific Textbook Publishing
- Jones, B.F., Galan, E., (1988) Sepiolite and palygorskite. In: Bailey, S.W. (Ed.), Hydrous Phyllosilicates (Exclusive of Micas). *Reviews in Mineralogy*, vol. 19, 631–674.
- Kastritis, I.D., Mposkos E., Kacandes G.H., (2003) The palygorskite and Mg-Fe-smectite clay deposits of the Ventzia basin, western Macedonia, Greece. *Mineral exploration and sustainable development*, 891–894
- Komadell P., Madejova J., (2006) Acid activation of clay minerals. *Handbook of Clay Science*, Vol.1, 263–287
- Mooney, R.W., Keenan, A.G., Wood, L.A., (1952a) Adsorption of water vapor by montmorillonite. Heat of desorption and application of BET theory. *Journal of the American Chemical Society*, Vol.74, 1367–1374.
- Murray H.H. (2000) Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview. *Applied Clay Science*, Vol.17, 207–221
- Oztobrak S., Pisirici B., (2011) Effects of micro structure changes on the macro behaviour of Istanbul (Turkey) clays exposed to landfill leachate. *Engineering Geology*, Vol.121, 110–122
- Pesquera, C., Gonzalez, F., Benito, I., Blanco, C., Mendioroz, S., Pajares, J., (1992) Passivation of a montmorillonite by the silica created in acid activation. *J. Matr. Chem.*, 2, 907–911.
- Sánchez-Jiménez N., Gismera M.J., Sevilla M.T., Cuevas J., Rodríguez-Rastrero M., Procopio J.R., (2011) Clayey materials as geologic barrier in urban landfills: Comprehensive study of the interaction of selected quarry materials with heavy metals. *Applied Clay Science* Vol.56 23–29
- Schoonheydt R.A., Johnston C.T., (2006) Surface and interface chemistry of clay minerals. *Handbook of Clay Science*, Vol.1, 87–113

Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων

Shaw S.A., Hendry M.J., (2008) Geochemical and mineralogical impacts of H₂SO₄ on clays between pH 5.0 and 3.0. *Applied Geochemistry* Vol.24 333–345

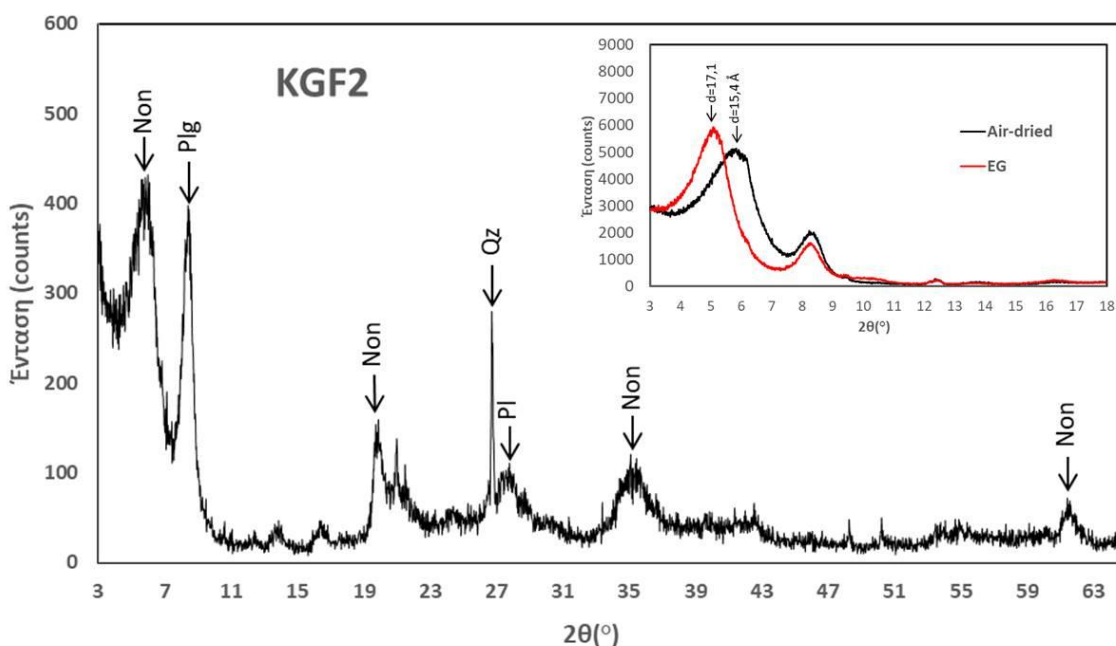
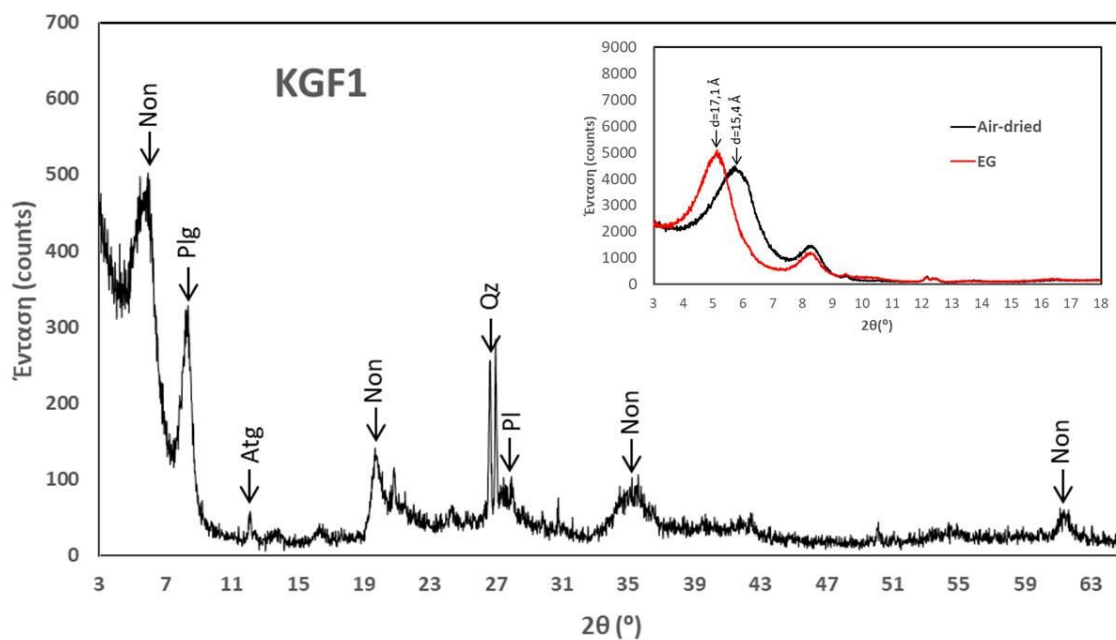
Whitney D.L., Evans B.W., (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, Vol. 95, 185–187

Yuksulen Y., Kaya A., (2008) Suitability of the methylene blue test for surface area, cation exchange capacity and swell potential determination of clayey soils. *Engineering Geology*, Vol. 102, 38–45

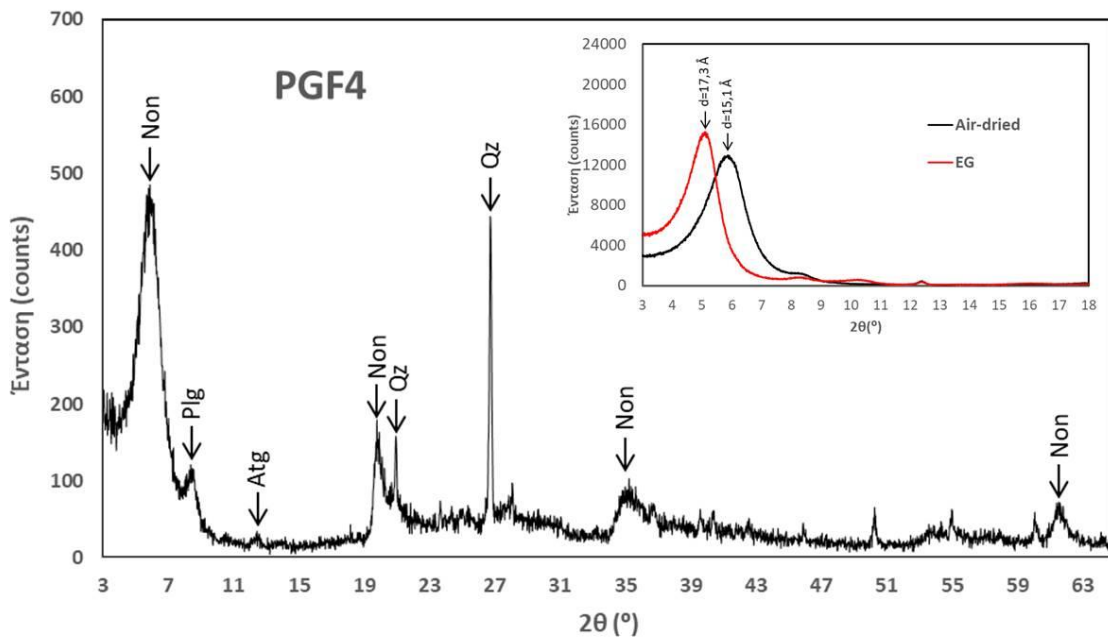
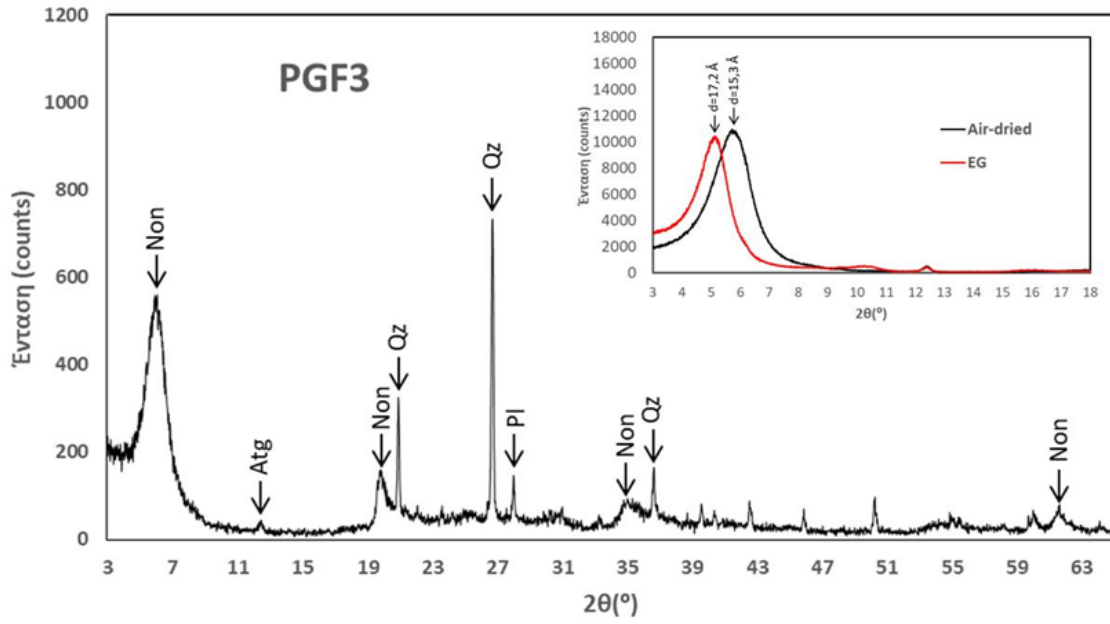
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Από την εργασία των *Whitney και Evans, 2010* χρησιμοποιήθηκαν οι εξής συντομογραφίες των ορυκτών: Non: Νοντρονίτης, Plg: Παλυγορσκήτης, Atg: Αντιγορίτης, Pl: Πλαγίοκλαστο, Qz: Χαλαζίας. Επιπλέον, όπου Air-Dried: Προσανατολισμένο δείγμα, με ξήρανση σε θερμοκρασία δωματίου και EG: Προσανατολισμένο δείγμα, εμποτισμένο με αιθυλενογλυκόλη.

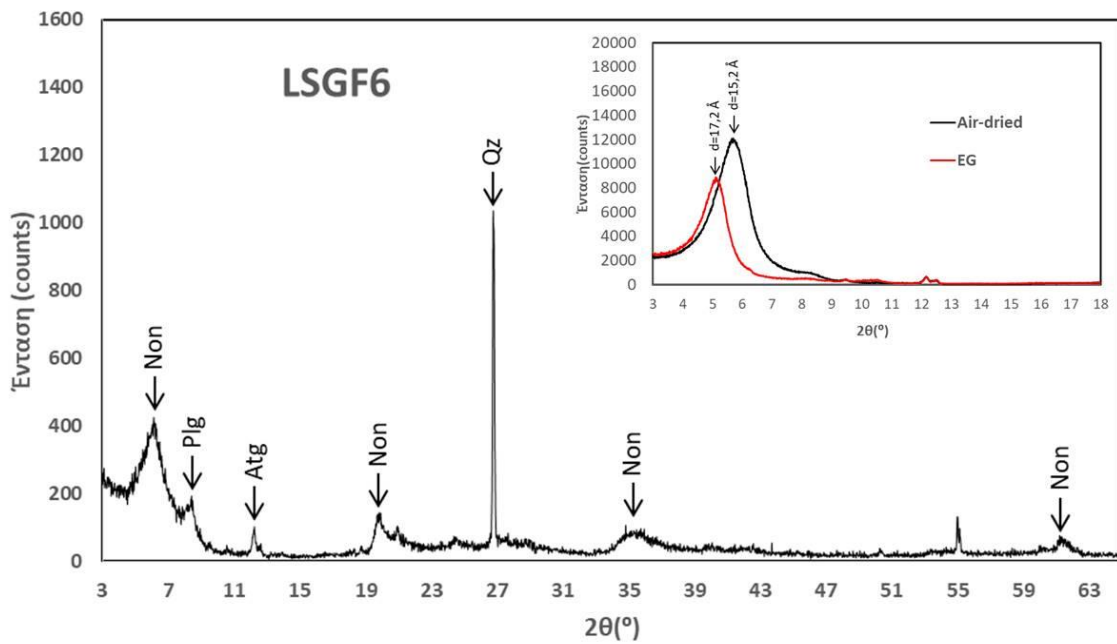
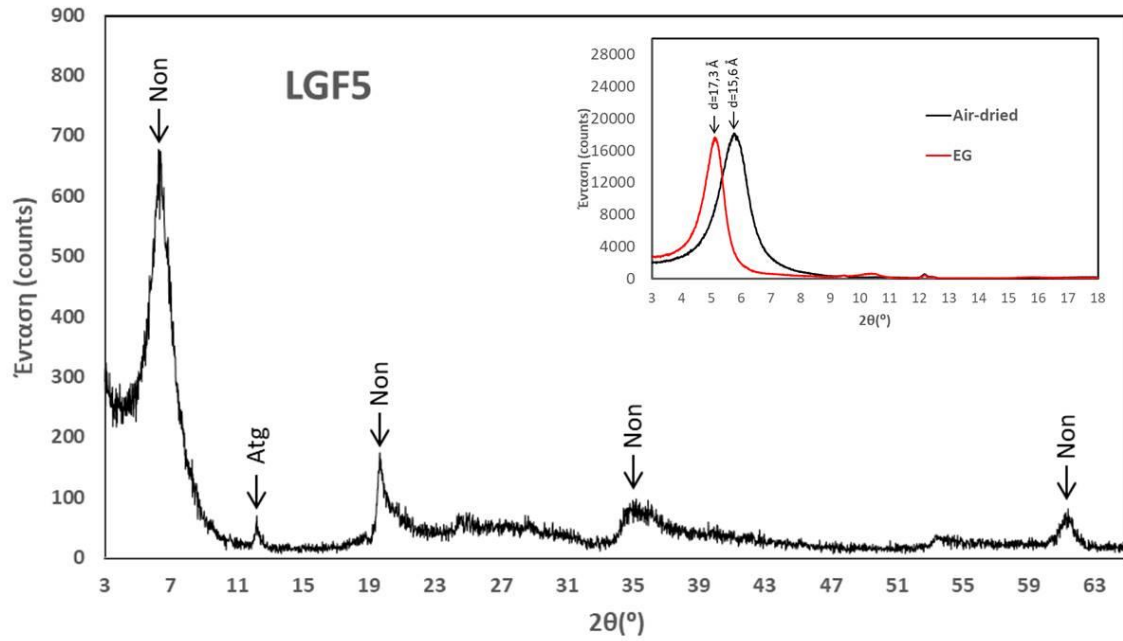
Παρατίθενται τα ακτινοδιαγράμματα ακτίνων X των δειγμάτων:



Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων



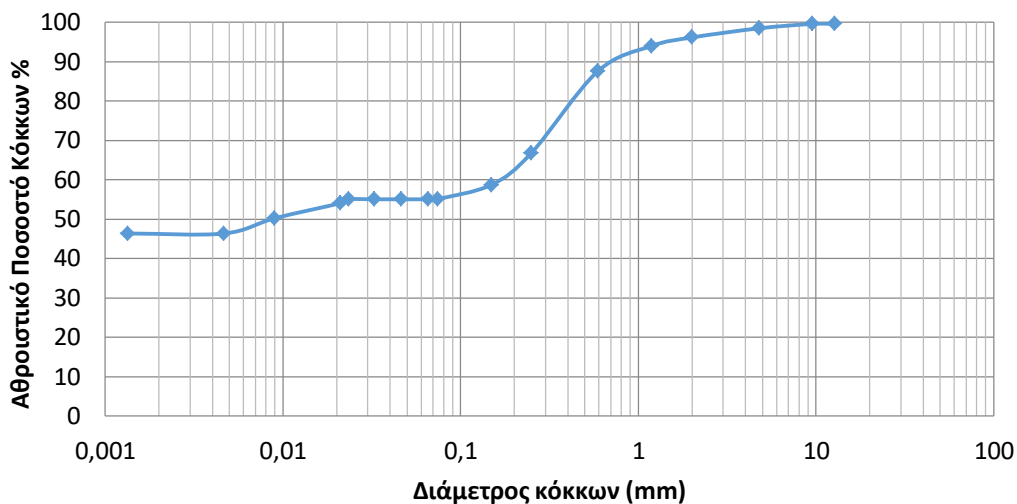
Χαρακτηρισμός και μεταβολή των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών σιδηρούχου σμεκτιτικής αργίλου κατά την αλληλεπίδραση με διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας μετάλλων



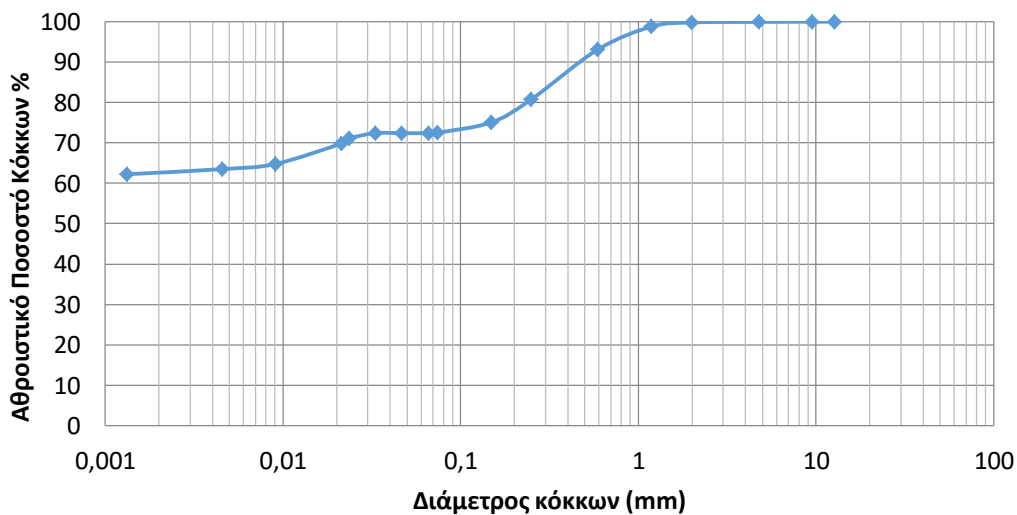
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

Η κοκκομετρική διαβάθμιση των δειγμάτων όπως προέκυψε από τη ξηρή κοσκίνιση και από την ανάλυση με αραιόμετρο παρατίθεται στην συνέχεια:

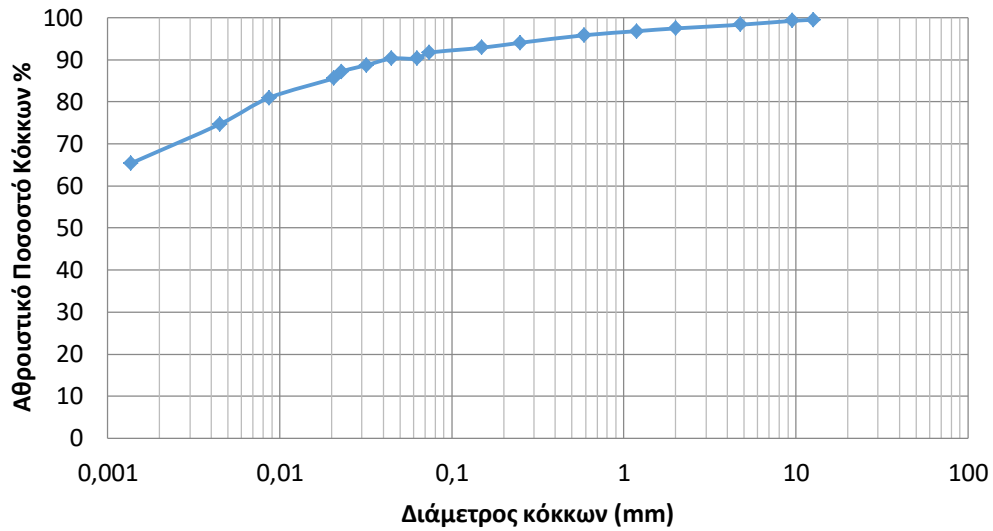
Διάγραμμα Κοκκομετρικής Διαβάθμισης KGF1



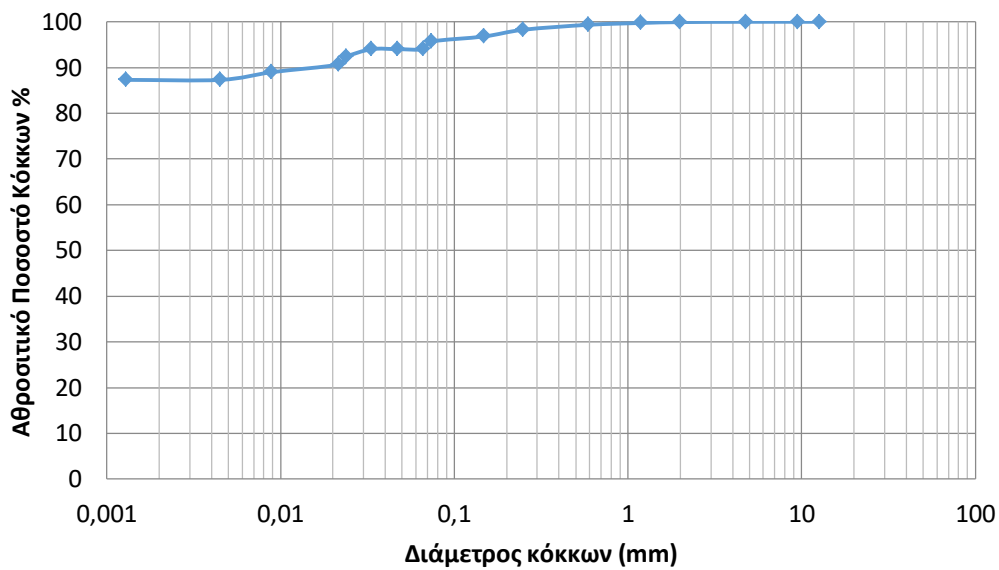
Διάγραμμα Κοκκομετρικής Διαβάθμισης KGF2



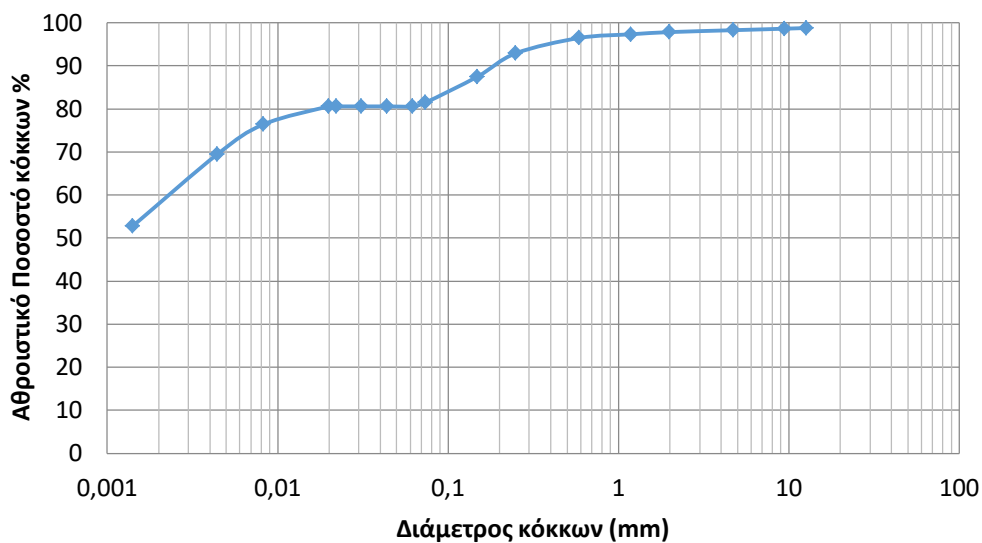
Διάγραμμα Κοκκομετρικής Διαβάθμισης PGF3



Διάγραμμα Κοκκομετρικής Διαβάθμισης PGF4



Διάγραμμα Κοκκομετρικής Διαβάθμισης LGF5



Διάγραμμα Κοκκομετρικής Διαβάθμισης LSGF6

