



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ

Χρήση καταλοίπων βωξίτη ως στρώματος χαμηλής
διαπερατότητας σε χώρους υγειονομικής ταφής αστικών
απορριμάτων



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΑΠΑΓΓΕΛΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ
ΑΝΘΙΜΟΣ ΞΕΝΙΔΗΣ
ΕΠ. ΚΑΘ. Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2010

Περίληψη

Η παραγωγή αστικών αποβλήτων συνεχίζει να αυξάνεται δημιουργώντας την ανάγκη δημιουργίας νέων χώρων υγειονομικής ταφής απορριμάτων ή επέκτασης των παλαιών. Κομμάτι, και πρόβλημα προς λύση, της κατασκευής ενός χώρου υγειονομικής ταφής απορριμάτων είναι η στεγανοποίησή του με εδαφικό στρώμα χαμηλής διαπερατότητας. Ταυτόχρονα Το πρόβλημα της αποτελεσματικής εκμετάλλευσης των καταλοίπων βωξίτη από τη μέθοδο Bayer αποτελούσε και συνεχίζει να αποτελεί ένα σοβαρότατο πρόβλημα για τις βιομηχανίες αλουμίνιας παγκοσμίως. Τα δύο αυτά προβλήματα δεν είναι ασύνδετα, μία από τις ενδιαφέρουσες ιδιότητες της ερυθράς ιλύος είναι η χαμηλή τιμή διαπερατότητάς της όταν υποστεί συμπίεση. Μία από τις κύριες εφαρμογές ενός εδαφικού υλικού με χαμηλή διαπερατότητα είναι η χρήση του σαν αδιαπέρατο στρώμα σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμάτων. Στο παρελθόν είχαν γίνει έρευνες χρήσης της ερυθράς ιλύος σε τέτοια εφαρμογή, παρόλη τη χαμηλή διαπερατότητά της η ιλύς δεν πληρούσε τις προδιαγραφές. Στην διπλωματική αυτή εργασία διερευνήθηκε η πιθανότητα μείγματα ερυθράς ιλύος με άλλα πρόσθετα να παρουσιάζουν διαπερατότητες κοντά ή ακόμη καλύτερα να πληρούν τις προδιαγραφές. Αποφασίστηκε έτσι να εκτελεστούν πειράματα με υλικά φθηνά, λεπτόκοκκα και εύκολο να αποκτηθούν στον ελλαδικό χώρο. Τα υλικά αυτά ήταν μπεντονίτης, ιπτάμενη τέφρα και τσιμέντο. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως τελικά υπάρχει προοπτική για συγκεκριμένα μείγματα τσιμέντου και μπεντονίτη να μειώσουν τη διαπερατότητα της ερυθράς ιλύος ώστε να πληρεί τις προδιαγραφές χρήσης της σαν αδιαπέρατο στρώμα σε ΧΥΤΑ.

Abstract

The production of municipal waste continues to increase, creating the need for creation of new sanitary landfills or expansion of the existing ones. Part, and a problem to solve, of the construction of a municipal waste sanitary landfill is finding the suitable low permeability soil liner. At the same time the problem of the effective exploitation of the bauxite residues from Bayer process I was and it still is a very serious problem for the alumina companies worldwide. Those two problems are not irrelevant with each other. One of the interesting properties of the red mud is its low hydraulic conductivity when compacted. In the past there has been research done for this application, although its low permeability the red mud could not reach that limit. In this thesis it was investigated the possibility that mixtures of red mud with other admixtures could develop permeabilities close to the limit or even reach it. So it was decided to make compaction and permeability tests with admixtures of red mud and other intergradients, preferably cheap, fine grained and that could be obtained easily in Greece. These intergradients were cement, bentonite and flyash. The results have shown that there is a prospect for specific cement and bentonite admixtures to reduce the permeability of the red mud so that it can meet the requirements for use as a soil liner in sanitary landfills.

Ευχαριστίες

Ξεκινώντας τη διπλωματική αυτή είχα την εντύπωση πως θα ήταν κάτι απλό. Τελικά κατέληξε να είναι γεμάτη δυσκολίες μα παρόλα αυτά έδωσε αποτελέσματα. Χωρίς τη βοήθεια του επιβλέποντα καθηγητή μου, κυρίου Ανθιμου Ξενίδη δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί. Τον ευχαριστώ για όλα από καρδιάς.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην κυρία Ευαγγελία Μυλωνά για τη βοήθεια που μου έδινε συνεχώς βοήθεια στο εργαστήριο κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και ήταν συνεχώς εκεί για τη λύση των αποριών μου.

Επίσης να ευχαριστήσω την εταιρεία “Εδαφομηχανική Α.Ε.” στην οποία πραγματοποιήθηκε μεγάλο μέρος των πειραμάτων, και ιδιαίτερα τον κύριο Χάρη Τσιάβο, επιβλέποντά μου στο εργαστήριο της εταιρείας και το Γιάννη Ζευγώλη για την βοήθεια που μου έδωσε στην ερμηνεία των δεδομένων.

Να ευχαριστήσω ακόμα τον Κύριο Μπούρα και κύριο Στρουμπούλη από την Εταιρεία ΑΓΕΤ-Lafarge Αλιβερίου για την παραχώρηση του δείγματος τσιμέντου και τον Κύριο Καρυδάκη από τον εταιρεία S&B για την παραχώρηση του δείγματος Μπεντονίτη.

Τέλος, θα ήταν μάλλον λίγο να πώ ευχαριστώ σε δύο ανθρώπους που ήταν πάντα δίπλα μου να με στηρίζουν σε ότι κι αν έκανα στη ζωή μου.

Ελάχιστος φόρος τιμής λοιπόν είναι η αφιέρωση αυτής της εργασίας στους γονείς μου,

Αγγελο και Κωνσταντίνα

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Πίνακας περιεχομένων.....	5
<u>1. Βωξίτης.....</u>	<u>12</u>
<u>1.1 Ιστορική Αναδρομή.....</u>	<u>12</u>
<u>1.2 Χρήσεις του Βωξίτη.....</u>	<u>12</u>
<u>1.3 Η Χημική Σύσταση του Βωξίτη.....</u>	<u>13</u>
<u>1.4 Η Ορυκτολογική Σύσταση του Βωξίτη.....</u>	<u>15</u>
<u>1.5 Η μέθοδος Bayer.....</u>	<u>16</u>
<u>1.6 Τροφοδοσία.....</u>	<u>17</u>
<u>1.6.1 Το Κύκλωμα Εκχύλισης.....</u>	<u>18</u>
<u>1.6.2 Το Κύκλωμα Πύκνωσης, Έκπλυσης, Καυστικοποίησης.....</u>	<u>19</u>
<u>1.6.3 Διάσπαση Αλουμινούχου Διαλύματος.....</u>	<u>20</u>
<u>1.6.4 Περιεκτικότητα σε Διοξείδιο του Πυριτίου (SiO₂).....</u>	<u>20</u>
<u>1.6.5 Νερό Πλύσης.....</u>	<u>22</u>
<u>2. Ερυθρά Ιλύς.....</u>	<u>23</u>
<u>2.1 Εισαγωγή.....</u>	<u>23</u>
<u>2.2 Μέθοδοι Απόθεσης.....</u>	<u>23</u>
<u>2.2.1 Υγρές μέθοδοι.....</u>	<u>24</u>
<u>2.2.2 Ξηρές μέθοδοι.....</u>	<u>25</u>
<u>2.3 Επεξεργασία Ερυθράς ιλύος.....</u>	<u>26</u>
<u>2.3.1 Φυσικές Μέθοδοι.....</u>	<u>26</u>
<u>2.3.2 Βιολογικές Μέθοδοι.....</u>	<u>27</u>
<u>2.3.3 Χημικές Μέθοδοι.....</u>	<u>28</u>
<u>2.4 Βασικά Ζητήματα Κατά την Επεξεργασία Υπολειμμάτων Βωξίτη.....</u>	<u>28</u>
<u>2.4.1 Οικονομικά ζητήματα.....</u>	<u>28</u>
<u>2.4.2 Ζητήματα Ασφάλειας, Υγείας και Περιβάλλοντος.....</u>	<u>29</u>
<u>2.5 Εφαρμογές των Καταλοίπων Βωξίτη.....</u>	<u>29</u>

2.5.1 Απορροφητικό για την Επεξεργασία Αποβλήτων	30
2.5.2 Γεωργικές Χρήσεις.....	31
2.5.3 Αξιοποίηση της Ερυθράς Ιλύος για την Ανάπτυξη Εδαφικού Καλύμματος και τη Φυτοκάλυψη Χώρων Απόθεσης Στερεών Απορριμμάτων (Α.Ξ.Ε.Ρ.Ι.Δ.)	31
3. Υγειονομική Ταφή Απορριμμάτων.....	36
3.1 Γενικά.....	36
3.1.1 Πλεονεκτήματα του χώρου υγειονομικής ταφής.....	36
3.1.2 Μειονεκτήματα του χώρου υγειονομικής ταφής.....	37
3.2 Επιλογή Περιοχής.....	38
3.3 Διαθέσιμοι Χώροι	38
3.4 Αντίκτυπος της Αποκατάστασης του Εδάφους	38
3.5 Εδαφολογικές Συνθήκες και Τοπογραφία	39
3.6 Κλιματολογικές Συνθήκες.....	39
3.7 Υδρολογία Επιφανειακού Νερού.....	39
3.8 Γεωλογικές και Υδρογεωλογικές Συνθήκες	39
3.9 Τοπικές Περιβαλλοντικές Συνθήκες.....	40
3.10 Επόμενες Χρήσεις.....	40
3.11 Σχεδίαση των Χ.Υ.Τ.Α.....	40
3.12 Μέθοδοι Υγειονομικής Ταφής.....	42
3.12.1 Μέθοδος Τάφρων.....	43
3.12.2 Μέθοδος Περιοχής.....	43
3.12.3 Μέθοδος Συμπίεσης	44
3.13 Αντιδράσεις που Λαμβάνουν Χώρα στους Ολοκληρωμένους Χ.Υ.Τ.Α.	45
3.13.1 Αποσύνθεση.....	46
3.13.2 Αέρια.....	47
3.13.3 Υγρά Στραγγίσματα.....	47
3.14 Έλεγχος της Κίνησης των Αερίων και των Εκχυλισμάτων	48
3.15 Κίνηση Αερίων.....	48
3.15.1 Έλεγχος της Κίνησης Αερίων.....	49

3.15.2 Έλεγχος της Κίνησης των Αερίων με τις Στεγανές Μεθόδους.....	50
3.16 Έλεγχος της Μετακίνησης των Στραγγισμάτων.....	50
3.17 Σχέδιο Λειτουργίας των Χ.Υ.Τ.Α.....	51
3.17.1 Σχεδιάγραμμα Περιοχής.....	51
3.17.2 Λειτουργικό Σχέδιο.....	52
3.17.3 Σχέδιο Ταφής Στερεών Αποβλήτων.....	52
3.17.4 Απαιτήσεις Εξοπλισμού.....	52
4. Ιπτάμενη τέφρα.....	54
4.1 Γενικά.....	54
4.2 Ιπτάμενη Τέφρα στην Ελλάδα.....	56
4.3 Χαρακτηριστικά της Ιπτάμενης Τέφρας Πτολεμαΐδας.....	57
4.3.1 Χημική σύσταση.....	57
4.3.2 Κατάταξη Ιπταμένων Τεφρών.....	58
4.3.3 Κατηγοριοποίηση της Ιπτάμενης Τέφρας.....	58
4.3.4 Χαρακτηριστικά του χρησιμοποιηθέντος δείγματος.....	59
5. Μπεντονίτης.....	62
5.1 Ιστορία.....	62
5.2 Παραγωγή.....	63
5.3 Χρήσεις.....	64
5.3.1 Χυτήρια.....	64
5.3.2 Έργα Πολιτικού Μηχανικού.....	65
5.3.3 Παραγωγή Σιδήρου.....	65
5.3.4 Προσροφητικά Υλικά.....	65
5.3.5 Ραδιενέργεια.....	66
5.3.6 Βιομηχανία Χάρτου.....	66
5.3.7 Γεωτρήσεις Πετρελαίου.....	66
5.3.8 Ειδικές Εφαρμογές.....	67
5.4 Χαρακτηριστικά του μπεντονίτη των δοκιμών.....	67
6. Τσιμέντο.....	68

6.1 Εισαγωγή.....	68
6.2 Παραγωγή του τσιμέντου.....	68
6.3 Τύποι και κατηγορίες των ευρωπαϊκών τσιμέντων.....	70
6.4 Χρήσεις του τσιμέντου.....	74
6.5 Δείγμα τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές δοκιμές.....	75
7. Πειραματικές δοκιμές και αποτελέσματα.....	77
7.1 Δοκιμές Συμπίεσης.....	77
7.1.1 Σκοπός.....	77
7.2 Μέθοδος προσδιορισμού της σχέσεως υγρασίας - πυκνότητας εδαφών: πρότυπη μέθοδος Proctor.....	78
7.2.1 Εισαγωγή.....	78
7.2.2 Περιγραφή Εργαστηριακού εξοπλισμού.....	78
7.2.3 Περιγραφή εργασίας (Α' Μέθοδος).....	80
7.2.4 Υπολογισμοί — Τήρηση στοιχείων.....	82
7.2.5 Σχέση υγρασίας πυκνότητας.....	82
7.2.6 Σημαντική Παρατήρηση.....	83
7.3 Αποτελέσματα συμπίεσεων.....	84
7.3.1 Ερυθρά ιλύς.....	84
7.3.2 Ιπτάμενη Τέφρα.....	85
7.3.3 Μπεντονίτης.....	87
7.3.4 Τσιμέντο.....	89
7.4 Δοκιμές Διαπερατότητας.....	90
7.5 Προσδιορισμός του συντελεστή υδροπερατότητας στη συσκευή στερεοποιήσεως (Οιδήμετρο).....	91
7.5.1 Η συσκευή και τρόπος λειτουργίας.....	91
7.5.2 Τρόπος μέτρησης Υδροπερατότητας.....	92
7.6 Αποτελέσματα Δοκιμών.....	94
7.7 Ερυθρά ιλύς.....	94
7.7.1 Αποτελέσματα δοκιμών με προσθήκη Ιπτάμενης Τέφρας.....	95
7.7.2 Ερμηνεία και σχόλια.....	98

<u>7.7.3 Αποτελέσματα δοκιμών με προσθήκη Μπεντονίτη.....</u>	<u>98</u>
<u>7.7.4 Ερμηνεία και σχόλια.....</u>	<u>101</u>
<u>7.7.5 Συμπεράσματα.....</u>	<u>101</u>
<u>7.7.6 Αποτελέσματα δοκιμών με προσθήκη Τσιμέντου.....</u>	<u>102</u>
<u>7.7.7 Ερμηνεία και Σχόλια.....</u>	<u>104</u>
<u>7.7.8 Συμπεράσματα.....</u>	<u>104</u>
<u>7.8 Βαθμός καθίζησης.....</u>	<u>105</u>
<u>8. Συμπεράσματα.....</u>	<u>108</u>
<u>9. Xuede Qian,Robert M.Koerner,Donald H. Gray - Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction</u>	<u>110</u>

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1. Η μέθοδος Bayer.....	17
Σχήμα 1.2. Επίδραση της περιεκτικότητας σε οξείδιο του πυριτίου στην παραγωγή οξειδίου του αλουμινίου.....	21
Σχήμα 1.3. Μεταβολή της κατανάλωσης του οξειδίου του νατρίου με αύξηση της ποσότητας του νερού πλήσης.....	22
Σχήμα 2.4. Ξηρή απόθεση πάστας καταλοίπων βωξίτη.....	26
Σχήμα 3.5. Τελική Μορφή Ενός Πλήρως Αποκατεστημένου Χ.Υ.Τ.Α.....	50
Σχήμα 4.6. Κοκκομετρική κατανομή ιπτάμενης τέφρας.....	60
Σχήμα 5.7. Διόγκωση των δύο πιο σημαντικών τύπων μπεντονίτη.....	63
Σχήμα 5.8. Κοκκομετρική κατανομή μπεντονίτη.....	67
Σχήμα 6.9. Πρώτες ύλες, ενδιάμεσα προϊόντα και τελικό προϊόν στη διεργασία παραγωγής τσιμέντου.....	69
Σχήμα 6.10. Αναλυτικό διάγραμμα ροής διεργασιών παραγωγής τσιμέντου.....	70
Σχήμα 6.11. Ταχύτητα ενυδάτωσης των διαφόρων φάσεων του τσιμέντου και προϊόντα ενυδάτωσής τους.....	74
Σχήμα 6.12. Κοκκομετρική κατανομή τσιμέντου.....	75
Σχήμα 7.13. Σχεδιάγραμμα της διάταξης.....	80
Σχήμα 7.14. Καμπύλη βέλτιστης υγρασίας ερυθράς ιλύος.....	84
Σχήμα 7.15. Συγκριτικές καμπύλες βέλτιστης υγρασίας Τέφρας – Ερ.Ιλύος.....	85
Σχήμα 7.16. Συγκριτικές καμπύλες Μπεντονίτη – Ερ Ιλύος.....	87
Σχήμα 7.17. Συγκριτικές καμπύλες βέλτιστης υγρασίας Τσιμέντου – Ερ.Ιλύος.....	89
Σχήμα 7.18. Συγκριτικές καμπύλες Τάσης - Διαπερατότητας Ιπ.Τέφρας – Ερ Ιλύος.....	97
Σχήμα 7.19. Συγκριτικές καμπύλες Ιπ.Τέφρας – Ερ Ιλύος διαπερατότητας – Ποσοστού Πρόσθετου ανα τάση.....	97
Σχήμα 7.20. Καμπύλες διαπερατοτήτων τάσεων Μπεντονίτη – Ερ.Ιλύος ανα μείγμα	100
Σχήμα 7.21. Καμπύλες Διαπερατοτήτων – Ποσοστού μειγμάτων ανα τάση.....	101
Σχήμα 7.22. Καμπύλες Διαπερατοτήτων-Τάσεων Ερ.Ιλύος-Τσιμέντου ανα Μείγμα	103

Σχήμα 7.23. Καμπύλες Διαπερατοτήτων – Ποσοστού Τσιμέντου και Ερ.Ιλύος ανα τάση.....	103
Σχήμα 7.24. Καμπύλες ολικών καθιζήσεων ανα μείγμα και ερυθράς ιλύος.....	106

1. ΒΩΞΙΤΗΣ

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Ο βωξίτης είναι το σημαντικότερο μετάλλευμα από το οποίο λαμβάνεται με μεταλλουργική κατεργασία το αλουμίνιο. Ο όρος βωξίτης *beauixite* χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1845 από τον A.Dufrenoy για ένα αλουμινούχο πέτρωμα που είχε προηγουμένως ανακαλυφθεί από τον Pierre Berthier, το 1821, κοντά στο χωριό Les Beaux de Provence στην Arles της Ν. Γαλλίας. Το ορυκτό διάσπορο είχε ήδη ανακαλυφθεί το 1801 και ο γιββσίτης το 1822. Το 1885 το όνομα του χωριού άλλαξε σε Les Baux και τότε ο Γάλλος μεταλλουργός Henri Sainte-Claire Deville πρότεινε την γενικευμένη χρήση του ονόματος *bauxite* για τέτοιου τύπου μεταλλεύματα.

Η εκμετάλλευση του βωξίτη άρχισε το 1860 στην Augiol. Η παραγωγή αλουμίνας από βωξίτη, κατά τον 19^ο αιώνα, γινόταν αρχικά με την μέθοδο του Γάλλου μεταλλειολόγου Louis Le Chatelier (1815-1873), η οποία συνίστατο στην θερμική κατεργασία της πρώτης ύλης σε τρία στάδια. Η διεργασία κατέληγε στην καταβύθιση υδροξειδίου του αλουμινίου σχετικά χαμηλής καθαρότητας. Στην συνέχεια η παραγωγή του αλουμινίου από το $Al(OH)_3$ γινόταν με την μέθοδο Deville στο εργοστάσιο στην Salindres. Αρχικά η αλουμίνια χρησιμοποιείτο στην χρωματοβιομηχανία αλλά σταδιακά με την ανάπτυξη της μεθόδου Hall-Heroult έγινε η πρώτη ύλη για την ηλεκτρολυτική παρασκευή αλουμινίου. Παράλληλα ο εξορυσσόμενος λευκός βωξίτης προοριζόταν για την παραγωγή αλουμινίου, πυρότουβλων και τσιμέντου ταχείας πήξης δηλαδή για μη μεταλλουργικές χρήσεις. Στην εποχή μας για την παραγωγή άνυδρης αλουμίνας έχει πλέον επικρατήσει παγκοσμίως η μέθοδος Bayer η οποία χρησιμοποιεί ως πρώτη ύλη διάφορες ποιότητες βωξίτη. Η μέθοδος αναπτύχθηκε από τον Αυστριακό χημικό Karl Josef Bayer (1847-1904).

1.2 Χρήσεις του Βωξίτη

Σήμερα οι βωξίτες χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή αλουμίνας και δευτερευόντως για:

- ειδικά αλουμινούχα τσιμέντα και τσιμέντα τύπου Portland
- αλουμινούχες χημικές ενώσεις

- αλουμινούχα πυρίμαχα
- λειαντικά
- αντιτριβικά και αντιολισθητικά υλικά
- στην μεταλλουργία ως συλλίπασμα και
- στην πετροχημική βιομηχανία μετά από ειδική κατεργασία.

Περίπου 90% της σημερινής παγκόσμιας παραγωγής βωξίτη προορίζεται για την παραγωγή αλουμινίου με την μέθοδο Bayer, το 85% της οποίας κατευθύνεται στην παραγωγή μεταλλικού αλουμίνιου με ηλεκτρόλυση κατά την μέθοδο Hall-Heroult. Επειδή ο βωξίτης εκτός από το αλουμίνιο περιέχει ένα πλήθος άλλων στοιχείων, οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις τείνουν προς την ανάκτηση και άλλων μεταλλικών στοιχείων όπως: γάλλιο, βανάδιο κ.λ.π. που περιέχονται σε αυτόν σε μικρές ποσότητες.

1.3 Η Χημική Σύσταση του Βωξίτη

Ο βωξίτης είναι ένα μέταλλευμα που δεν έχει καθορισμένη χημική σύσταση περιέχει όμως σημαντική ποσότητα οξειδίου του αλουμινίου $Al_2O_3 > 30\%$. Τα κοιτάσματα βωξίτη που έχουν οικονομική αξία περιέχουν $Al_2O_3 > 45\%$ ενώ για να είναι μεταλλουργικά εκμεταλλεύσιμα πρέπει το ποσοστό αυτό να μην είναι μικρότερο του 50%. Χημικά χαρακτηρίζεται από το κύριο συστατικό του, που είναι τα ένυδρα οξείδια του αλουμινίου, ενώ περιέχει και οξείδια σιδήρου, πυριτίου και τιτανίου, ανθρακικό ασβέστιο στην μορφή του ασβεστίτη καθώς και ένα μεγάλο πλήθος από άλλες ενώσεις σε μικρές περιεκτικότητες. Στον πίνακα παρουσιάζονται τα σημαντικότερα στοιχεία που περιέχονται στο βωξίτη καθώς και μία συνήθης διακύμανση των αντίστοιχων περιεκτικότητων.

Πίνακας 1.1. Μέση χημική Σύσταση βωξίτη

Χημική Ένωση ή Στοιχείο	Περιεκτικότητα %
Απώλεια Πύρωσης	10 – 30
Al ₂ O ₃	40 – 60
SiO ₂	1 – 15
Fe ₂ O ₃	2 – 30
TiO ₂	1 – 5
CaO	0,2 – 4
Cr ₂ O ₃	0,01 - 0.25
Ga	~ 0,1
Mn ₂ O ₃	0,05 – 0,3
ZnO	0 – 0,04
P ₂ O ₅	0,04 – 0,3
V ₂ O ₅	0,01 – 0,14
Zr, Nb	~ 0,01

Μεγάλη σημασία για την κατεργασία του βωξίτη με διάλυμα καυστικού νατρίου σύμφωνα με τη μέθοδο Bayer, έχει η περιεκτικότητα του σε SiO₂, το οποίο βρίσκεται κυρίως στην μορφή του καολινίτη και του χαλαζία. Η περιεκτικότητα αυτή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5% ενώ βωξίτες με SiO₂ 6-8% θεωρούνται δυσκατέργαστοι και προτείνεται εμπλουτισμός τους. Η αιτία βρίσκεται στο γεγονός ότι κατά την εκχύλιση το διαλυόμενο SiO₂, δεσμεύει μέρος της διαλυθείσας αλουμίνας καθώς και καυστικό νάτριο μέσω της καταβύθισης νατριοαλουμινοπυριτικών ενώσεων, μειώνοντας έτσι την ανάκτηση αλουμίνας και αυξάνοντας την κατανάλωση του εκχυλιστικού μέσου.

Στην πράξη για τον καθορισμό της ποιότητας του βωξίτη χρησιμοποιείται η διαφορά $A = Al_2O_3 (\%) - a \cdot SiO_2 (\%)$ η οποία ονομάζεται διαθέσιμη αλουμίνα. Η τιμή του συντελεστή *a* καθορίζεται από την σχέση Al₂O₃/SiO₂ στις σχηματιζόμενες ενώσεις, οι οποίες ανιχνεύονται στην ερυθρά ιλύ, που είναι το στερεό απόβλητο της διεργασίας, καθώς και από την γενικότερη εμπειρία που υπάρχει σε κάθε μονάδα παραγωγής αλουμίνας ως προς την συμπεριφορά των διαφόρων βωξιτών.

Για την προκαταρκτική εκτίμηση της ποιότητας ενός βωξίτη η τιμή για τον συντελεστή *a* είναι 1. Στην πράξη κατά την διάρκεια της εκχύλισης προστίθεται CaO με συνέπεια

την μείωση των απωλειών σε αλουμίνα και καυστικό νάτριο. Τότε η τιμή του συντελεστή a λαμβάνεται ίση με 0.85, διότι οι ενώσεις νατρίου- αλουμινίου- πυριτίου που καταβυθίζονται έχουν τον χημικό τύπο $3\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{NaOH}$ στον οποίο η σχέση βαρών $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ είναι 0,85/1. Το SiO_2 και το Al_2O_3 που περιέχονται σε έναν βωξίτη δεν είναι πάντοτε πλήρως διαλυτά. Αυτό εξαρτάται από την ορυκτολογική μορφή στην οποία βρίσκονται και την συγκεκριμένη τεχνολογία της μονάδας παραγωγής αλουμίνας. Επειδή οι σχηματιζόμενες αδιάλυτες νατριοαλουμινοπυριτικές ενώσεις δεν έχουν πάντοτε τον ανωτέρω χημικό τύπο, η τιμή του a μεταβάλλεται ανάλογα με τον τύπο του βωξίτη.

1.4 Η Ορυκτολογική Σύσταση του Βωξίτη

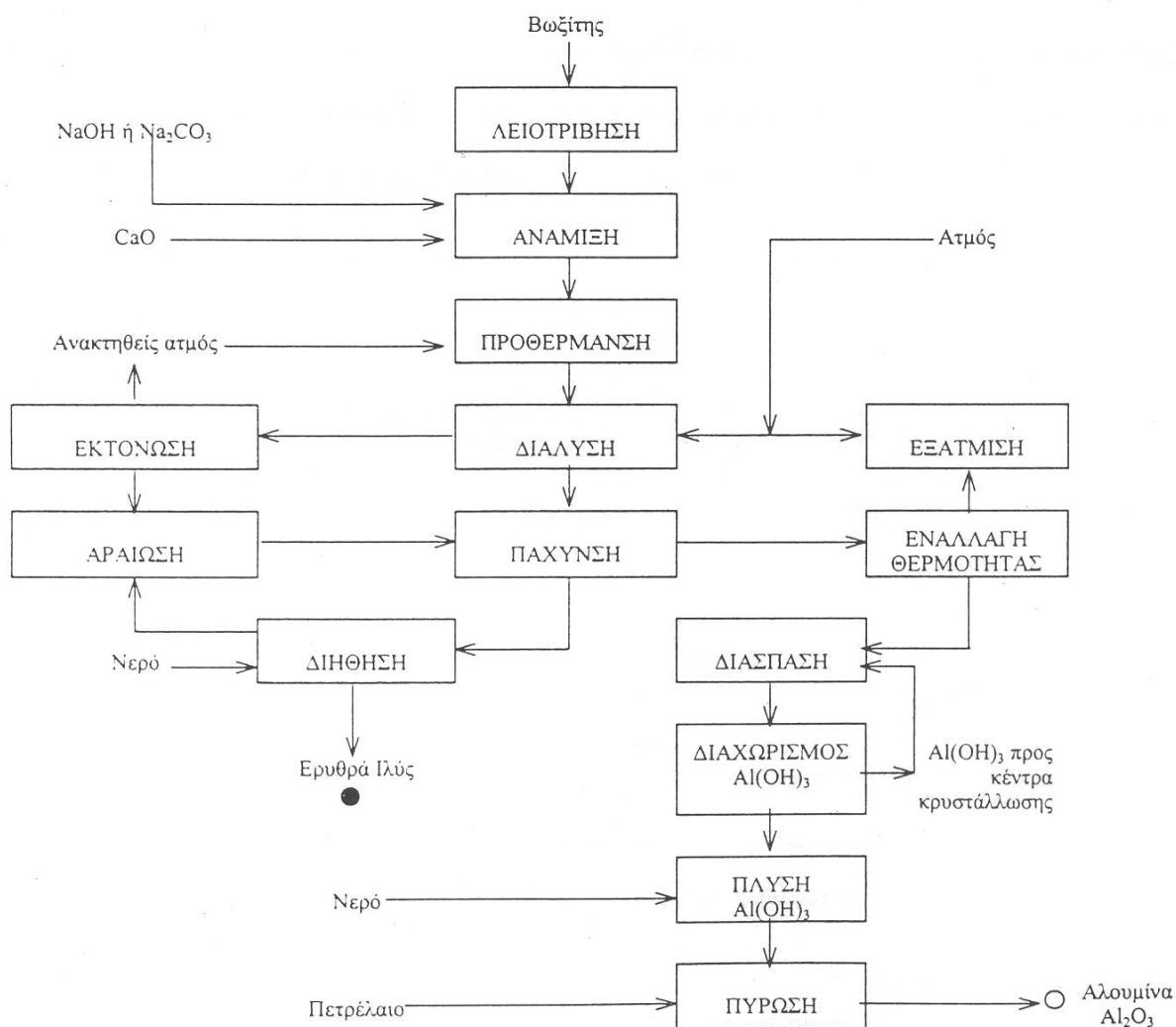
Η ορυκτολογική σύσταση του βωξίτη ποικίλλει ανάλογα με την προέλευση και την μεταλλογένεση του συγκεκριμένου βωξιτικού κοιτάσματος. Αυτό όμως που ενδιαφέρει περισσότερο την βιομηχανική πρακτική είναι η ορυκτολογική φάση, στην οποία βρίσκονται οι ενώσεις του αλουμινίου και, δευτερευόντως, του σιδήρου, διότι από αυτές καθορίζονται οι συγκεκριμένες συνθήκες εκχύλισης του βωξίτη με την μέθοδο Bayer, δηλαδή η θερμοκρασία, η σύσταση του διαλύματος εκχύλισης, ο χρόνος αντίδρασης, κ.λπ.. Ιδιαίτερη σημασία έχει ο κρυσταλλοχημικός τύπος των ορυκτών του αλουμινίου και κυρίως ο αριθμός και ο τρόπος σύνδεσης των OH^- , δηλαδή του κρυσταλλικού νερού, που αυτά περιέχουν. Ορισμένες φορές οι παράμετροι λειτουργίας των μονάδων παραγωγής αλουμίνας επηρεάζονται και από την ορυκτολογική φάση στην οποία συναντώνται οι ενώσεις του πυριτίου. Ουσιαστικά, η ορυκτολογική σύσταση του βωξίτη επηρεάζει καθοριστικά την τεχνολογία της κάθε μονάδας παραγωγής αλουμίνας ήδη από ο στάδιο σχεδιασμού της. Από τις τρεις κύριες κρυσταλλικές μορφές των ένυδρων οξειδίων του αλουμινίου η λιγότερο σταθερή θερμοδυναμικά είναι ο γιββίτης και η περισσότερο σταθερή το διάσπορο. Το γεγονός αυτό καθιστά τους βωξίτες, που περιέχουν το διάσπορο ως κύριο αλουμινούχο ορυκτό, δύσκολα εκχυλίσιμους καθώς απαιτούνται ιδιαίτερα έντονες συνθήκες κατεργασίας σε αντιδραστήρες διαφορετικής τεχνολογίας και υψηλού λειτουργικού κόστους. Αρνητική θεωρείται και η παρουσία αλουμινο-γκαιίτη σε διασπορικούς ή άλλους βωξίτες καθώς είναι επίσης δύσκολα εκχυλίσιμοι σε ήπιες συνθήκες.

1.5 Η μέθοδος Bayer

Η μέθοδος Bayer είναι μια υδρομεταλλουργική μέθοδος κατά την οποία ο βωξίτης τροφοδοτούμενος σε αυτόκλειστα υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, εκχυλίζεται με πυκνό διάλυμα NaOH με αποτέλεσμα να διαλυτοποιείται το περιεχόμενο στο μέταλλευμα ένυδρο οξείδιο του αλουμινίου και στην συνέχεια, σε επόμενο στάδιο, να καταβυθίζεται με την μορφή κρυστάλλων $Al(OH)_3$. Με πύρωση λαμβάνεται το τελικό προϊόν, η άνυδρη αλουμίνα $\alpha-Al_2O_3$.

Η μέθοδος Bayer βασίζεται στο γεγονός, ότι στους βωξίτες τα ένυδρα οξείδια του αλουμινίου είναι διαλυτά σε θερμά και πυκνά διαλύματα NaOH, ενώ οι σιδηρούχες, πυριτιούχες και τιτανιούχες ενώσεις παραμένουν αδιάλυτες. Ορισμένες από αυτές, ενώ αντιδρούν με τα συστατικά του διαλύματος εκχύλισης, σχηματίζουν εκ νέου στερεά προϊόντα, τα οποία απομακρύνονται με την ερυθρά ιλύ, που είναι το στερεό απόβλητο της διεργασίας.

Σχήμα 1.1. Η μέθοδος Bayer



1.6 Τροφοδοσία

Στην συσκευή ασβεστοποίησης όπου πραγματοποιείται η αντίδραση $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, διασπάται ο ασβεστόλιθος προς CaO και CO₂. Το οξείδιο του ασβεστίου αναμιγνύεται μέσω μικτών με το βωξίτη και αλουμινούχο διάλυμα (aluminate) του οποίου στο μίκτη συμπληρώνονται οι απώλειες σε καυστικό νάτριο.

Μετά την ανάμιξη ο πολφός οδηγείται σε εναλλάκτη θερμότητας όπου προθερμαίνεται μέχρι τη θερμοκρασία των 153° C με ατμό υψηλής πίεσης έτσι ώστε να τροφοδοτηθεί στα αυτόκλειστα όπου θα πραγματοποιηθεί η εκχύλιση.

Η χημική και η ορυκτολογική σύσταση του βωξίτη φαίνονται παρακάτω

Πίνακας 1.2. Χημική σύσταση βωξίτη

Χημική Ένωση ή Στοιχείο	Περιεκτικότητα %
Al ₂ O ₃	55%
Fe ₂ O ₃	21%
SiO ₂	3%
CaO	3%
TiO ₂	2%
Απώλεια Πύρωσης	11%-12%

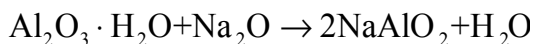
Πίνακας 1.3. Ορυκτολογική σύσταση βωξίτη

Συμβατικός Χημικός Τύπος	Ορυκτολογική Φάση
α-Al ₂ O ₃ · H ₂ O ή AlO-OH	Διάσπορο
α-Fe ₂ O ₃	Αιματίτης
SiO ₂	Χαλαζίας
TiO ₂	Ρουτίλιο
CaCO ₃	Ασβεστίτης

1.6.1 Το Κύκλωμα Εκχύλισης

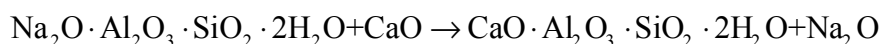
Μετά την προθέρμανση η τροφοδοσία αποστέλλεται στα αυτόκλειστα τα οποία θερμαίνονται μέσω ατμού υψηλής πίεσης. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας των αυτοκλείστων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της τροφοδοσίας και είναι 240° C.

Στα αυτόκλειστα αυτά λαμβάνει χώρα η εξής αντίδραση:



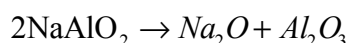
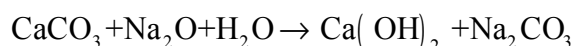
μέσω της οποίας το αλουμίνιο μεταβαίνει στο διάλυμα υπό μορφή NaAlO₂. Τα οξείδια του σιδήρου και του τιτανίου δεν προσβάλλονται και παραμένουν αδιάλυτα ενώ μέρος του οξειδίου του πυριτίου αντιδρά με το NaAlO₂ μέσω της αντίδρασης $\text{SiO}_2 + 2\text{NaAlO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ από όπου προκαλείται απώλεια καυστικού νατρίου και αλουμίνας.

Μέσα στα αυτόκλειστα επίσης πραγματοποιείται και η αντίδραση:



Το CaO προστίθεται για να αυξήσει την ανάκτηση της αλουμίνας και για να μειώσει τις απώλειες σε εκχυλιστικό μέσο διαμέσου της παραπάνω αντίδρασης. Επίσης οδηγεί σε καλύτερο καθαρισμό και ευκολότερη καταβύθιση της σχηματιζόμενης ερυθράς ίλως.

Τέλος μέσα στα αυτόκλειστα πραγματοποιούνται και οι παρακάτω αντιδράσεις:



Η τελευταία αντίδραση δεν συμβαίνει πραγματικά αλλά χρησιμοποιείται γιατί η απόδοση της μεθόδου ορίζεται από την παραγωγή Al_2O_3 και την κατανάλωση Na_2O .

Η αντίδραση αυτή είναι αναγκαία για την εξαγωγή διάφορων παρατηρήσεων όσον αφορά τη μέθοδο.

1.6.2 Το Κύκλωμα Πύκνωσης, Έκπλυσης, Καυστικοποίησης

Μετά την κατεργασία στα αυτόκλειστα ο πολφός ψύχεται μέχρι τη θερμοκρασία των 55°C και αναμιγνύεται με την υπερχειλίση του πρώτου πυκνωτή του κυκλώματος έκπλυσης. Ο σκοπός της αραιώσης είναι η αποφυγή της πρόωρης διάσπασης του αλουμινούχου διαλύματος. Ο πολφός αυτός υποβάλλεται σε πύκνωση έτσι ώστε να διαχωριστεί η ερυθρά ίλως από το αλουμινούχο διάλυμα. Το αλουμινούχο διάλυμα λαμβάνεται από την υπερχειλίση του πυκνωτή ενώ η ερυθρά ίλως από την απορροή του. Η ερυθρά ίλως ονομάζεται έτσι λόγω του χρώματος που της προσδίδουν σε αυτήν τα περιεχόμενα οξειδία του σιδήρου. Το μεγαλύτερο μέρος της αποτελείται από πολύ λεπτομερή κοκκομετρικά κλάσματα.

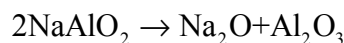
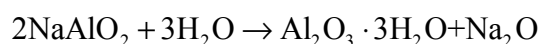
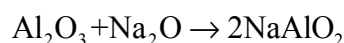
Στη συνέχεια η ερυθρά ίλως πλένεται με νερό με σκοπό την περαιτέρω απομάκρυνση των διαλυμένων συστατικών, έτσι ώστε να μειωθούν οι απώλειες σε καυστικό νάτριο και αλουμίνα. Η πλύση αυτή πραγματοποιείται κατ' αντιρροή (counter current decantation) στους πυκνωτές. Η υπερχειλίση κάθε επόμενου πυκνωτή τροφοδοτείται στον προηγούμενο, ενώ η απορροή κάθε προηγούμενου πυκνωτή τροφοδοτείται στον επόμενο. Το νερό έκπλυσης τροφοδοτείται στον τελευταίο πυκνωτή αφού εκεί βρίσκεται και ο πυκνότερος πολφός.

Η καυστικοποίηση παρεμβάλλεται στην διεργασία της έκπλυσης με σκοπό τον έλεγχο

της συγκέντρωσης των ανθρακικών ιόντων στο διάλυμα της κατεργασίας και την μείωση των απωλειών σε εκχυλιστικό μέσο. Το CO₂ εισέρχεται στο διάλυμα του κυκλώματος τόσο μέσω του βωξίτη όσο και από την ατμόσφαιρα και πρέπει να απομακρυνθεί. Η υπερχειλίση του δεύτερου πυκνωτή τροφοδοτείται στον αντιδραστήρα καυστικοποίησης όπου το περιεχόμενο στο διάλυμα CO₂, καταβυθίζεται ως CaCO₃ μέσω της προσθήκης Ca(OH)₂ και την πραγματοποίησης της αντίδρασης $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$. Το διάλυμα διαχωρίζεται από τα στερεά που παράγονται μέσω πυκνωτή και τροφοδοτείται στο πρώτο πλυντήριο του κυκλώματος πλύσης. Τα στερεά απορρίπτονται.

1.6.3 Διάσπαση Αλουμινούχου Διαλύματος

Το αλουμινούχο διάλυμα που λαμβάνεται από την υπερχειλίση του πυκνωτή οδηγείται στη συνέχεια σε αυτόκλειστο όπου πραγματοποιούνται οι παρακάτω αντιδράσεις:



Στη συνέχεια ο εκ των παραπάνω αντιδράσεων παραγόμενος γιββσίτης διαχωρίζεται στο και οδηγείται στο αυτόκλειστο όπου πυρώνεται σε θερμοκρασία 1200°C και μετατρέπεται σε α-Al₂O₃. Η διάσπαση είναι πλήρης ήδη από τους 550°C όμως η παραγομένη γ-Al₂O₃ είναι υγροσκοπική και κατ' ανάγκη η κατεργασία ολοκληρώνεται στους 1200°C.

Το διάλυμα που διέρχεται από τη φιλτρόπρεσσα αποτελείται από αλουμίνα, νερό και καυστικό νάτριο. Αφού υποστεί συμπύκνωση χρησιμοποιείται εκ νέου για την προσβολή του βωξίτη. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μερική ανάκτηση των αντιδραστηρίων, τα οποία ανακυκλούνται στο μίκτη όπου και συμπληρώνονται οι απώλειες του αλουμινούχου διαλύματος σε καυστικό νάτριο.

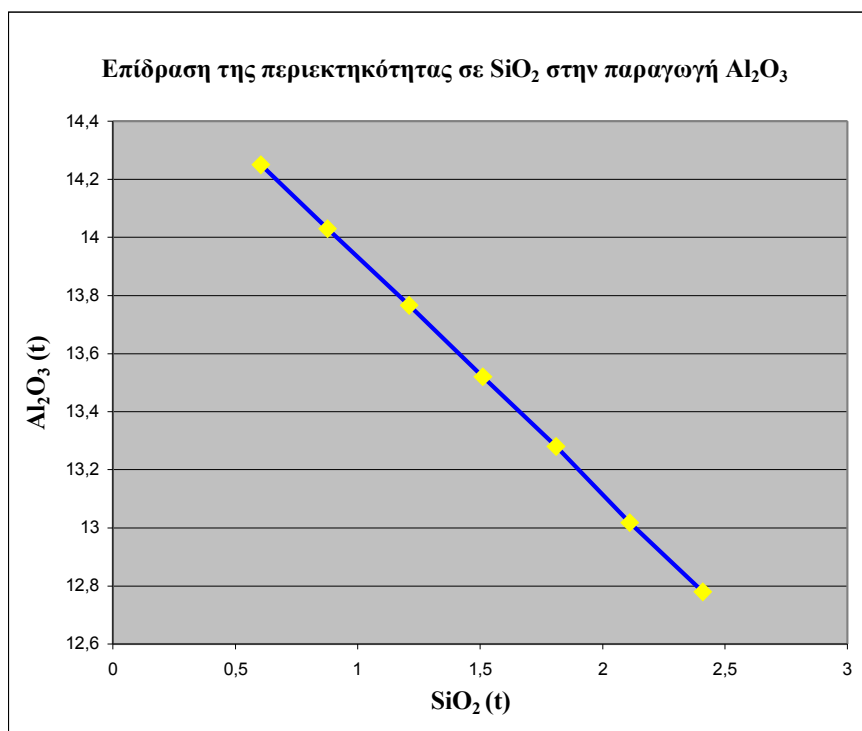
1.6.4 Περιεκτικότητα σε Διοξείδιο του Πυριτίου (SiO₂)

Για τη δεδομένη χημική σύσταση του βωξίτη η οποία φαίνεται στον Πίνακα 4, η κατανάλωση σε εκχυλιστικό μέσο είναι 3,5 kg Na₂O/t παραγόμενου Al₂O₃ και

παράγονται συνολικά από 30 τόνους ανά ώρα βωξίτη 14,03 τόνοι ανά ώρα αλουμίνας ενώ η κατανάλωση σε νερό ανέρχεται σε 69,9 τόνους ανά ώρα.

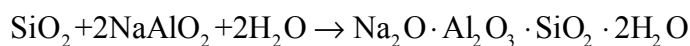
Η περιεκτικότητα σε διοξείδιο του πυριτίου του βωξίτη της τροφοδοσίας έχει σοβαρή επίδραση στην κατανάλωση εκχυλιστικού μέσου και την παραγωγή αλουμίνας. Σε εργασία προσομοίωσης που έγινε (Τσαρουχάς, 2006) με τη χρήση του προγράμματος EnviroPro για να μελετηθεί η επίδραση αυτή του διοξειδίου του πυριτίου ελήφθησαν μετρήσεις από το EnviroPro όσον αφορά την κατανάλωση σε Na₂O και την παραγωγή σε αλουμίνα για περιεκτικότητα σε διοξείδιο του πυριτίου της τροφοδοσίας από 2% - 8%

Τα παρακάτω δυο διαγράμματα είναι αποτέλεσμα των παραπάνω:



Σχήμα 1.2. Επίδραση της περιεκτικότητας σε οξείδιο του πυριτίου στην παραγωγή οξειδίου του αλουμινίου

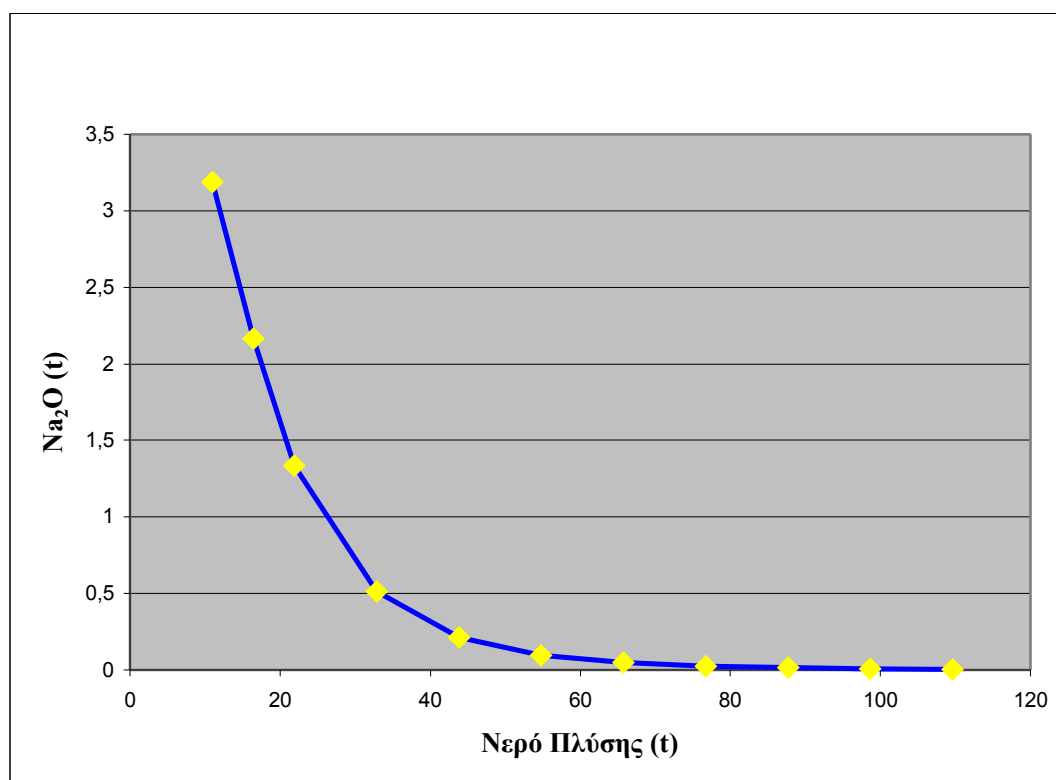
Από το διάγραμμα αυτό παρατηρείται πως η αύξηση της περιεκτικότητας σε διοξείδιο του πυριτίου του βωξίτη οδηγεί σε αύξηση της κατανάλωσης σε εκχυλιστικό μέσο και συνακόλουθη μείωση της παραγόμενης αλουμίνας λόγω της πραγματοποίησης της αντίδρασης:



1.6.5 Νερό Πλύσης

Το νερό που χρησιμοποιείται στο κύκλωμα πλύσης της ερυθράς ιλύος έχει επίσης επίπτωση στην κατανάλωση εκχυλιστικού μέσου. Άλλωστε η πλύσης της ερυθράς ιλύος πραγματοποιείται με σκοπό την μείωση της συγκέντρωσής της σε καυστικό νάτριο και αλούμινα.

Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει την μεταβολή της κατανάλωσης σε Na_2O σε σχέση με την ποσότητα του νερού πλύσης. Παρατηρείται πως η κατανάλωση του Na_2O μειώνεται σημαντικά καθώς αυξάνεται το νερό πλύσης και αυτό συμβαίνει γιατί η πλύση της ερυθράς ιλύος γίνεται όλο και πιο αποτελεσματική.



Σχήμα 1.3. Μεταβολή της κατανάλωσης του οξειδίου του νατρίου με αύξηση της ποσότητας του νερού πλύσης

2. ΕΡΥΘΡΑ ΙΛΥΣ

2.1 Εισαγωγή

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η ερυθρά ιλύς (E.I.) είναι το στερεό απόβλητο που προκύπτει κατά την κατεργασία των βωξιτών με τη μέθοδο Bayer για την παραγωγή της αλουμίνας. Επειδή οι παραγόμενες ποσότητες E.I. είναι τεράστιες, η απόρριψη τους δημιουργεί μεγάλο οικολογικό πρόβλημα. Στην Ευρώπη και στην Ιαπωνία η E.I. απορρίπτεται στη θάλασσα, ενώ στα Η.Π.Α. σε μερικά εργοστάσια αποτίθενται σε φράγματα στην ξηρά. Και οι δύο λύσεις, αλλά ιδιαίτερα η πρώτη, δημιουργούν σοβαρά προβλήματα μόλυνσης του περιβάλλοντος. Εξ'άλλου η E.I. περιέχει χρήσιμα συστατικά, όπως Fe_2O_3 , Al_2O_3 (μη αντιδράσαν κατά την προσβολή), Na_2O , TiO_2 κ.λ.π. που την καθιστούν ενδιαφέρουσα πρώτη ύλη για την ανάκτηση τους. Επίσης έχει ιδιότητες τέτοιες που την καθιστούν ενδιαφέρουσα για άλλες μη μεταλλουργικές χρήσεις.

Για τους παραπάνω λόγους έχει αναπτυχθεί διεθνώς μεγάλη ερευνητική δραστηριότητα για την αξιοποίηση της E.I. και υπάρχει πλουσιότατη βιβλιογραφία. Οι έρευνες έχουν γίνει σε εργαστηριακή, ημιβιομηχανική και μερικές ακόμα και σε βιομηχανική κλίμακα. Παρόλα αυτά δεν φαίνεται να υπάρχει ακόμα οριστική λύση.

2.2 Μέθοδοι Απόθεσης

Για κάθε τόνο αλουμίνας παράγονται περίπου 1 με 2 τόνους (ξηρό βάρος) υπολείμματα Ερυθράς Ιλύος. Αυτό το υπόλειμμα είναι ιδιαίτερα αλκαλικό, σχετικά μεγάλης επιφάνειας ($13-22 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) και περιέχει διάφορα χημικά και ορυκτολογικά είδη. Κατά συνέπεια η διάθεση της E.I. μπορεί να αποτελεί ένα σημαντικό ποσοστό του γενικού κόστους παραγωγής της αλουμίνας και είναι ένα μόνιμο πρόβλημα για τις μονάδες παραγωγής αλουμίνας παγκοσμίως.

Ελλείψει αποτελεσματικής λύσεως για τη χρήση της ερυθράς ιλύος σε σημαντικό ποσοστό, δημιουργείται η ανάγκη απόθεσής της. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα χωρίζονται σε υγρές και ξηρές.

2.2.1 Υγρές μέθοδοι:

2.2.1.1 Απόρριψη στη θάλασσα

Η Ε.Ι. σε μορφή πολφού ,μέσω ενός αγωγού ο οποίος συνήθως εκτείνεται σε αρκετή απόσταση από την ξηρά και συχνά εφάπτεται στον πυθμένα, απορρίπτεται ελεύθερα στο θαλάσσιο περιβάλλον αφού πρώτα διέλθει από το κύκλωμα πλύσης και πύκνωσης για τη μείωση της καυστικότητας αλλά και την αύξηση των στερεών στο ρευστό.

Η απόρριψη στη θάλασσα σήμερα θεωρείται η έσχατη λύση. Αποτελεί την παλιότερη μέθοδο απόρριψης μαζί με την απόρριψη σε λίμνη τελμάτων. Μάλιστα είναι η μόνη μέθοδος όπου η χρήση της ισοδυναμεί με αδυναμία πιθανής μελλοντικής εκμετάλλευσης της Ε.Ι. Χρησιμοποιείται σε εργοστάσια τα οποία έχουν κατασκευαστεί πριν το 1970,μεταξύ αυτών και το “Αλουμίνιο της Ελλάδος” αν και τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να υιοθετεί την ξηρή απόθεση ως ένα βαθμό, στοχεύοντας σε μόνιμη διακοπή της θαλάσσιας απόθεσης στο μέλλον.

2.2.1.2 Απόρριψη σε λίμνη τελμάτων (Lagooning)

Η ιλύς αποτίθεται σε λίμνες αμέσως μετά την έξοδό της από το κύκλωμα πλύσης. Τέτοιες λίμνες τελμάτων μπορούν να δημιουργηθούν όταν το επιτρέπει η μορφολογία του εδάφους σχηματίζοντας φυσικές λεκάνες οι οποίες τελειοποιούνται με την προσθήκη φραγμάτων και εξασφαλίζουν τη συγκράτηση του πολφού. Εναλλακτικά οι λίμνες μπορούν να δημιουργηθούν εξαρχής με μηχανικά μέσα ακόμη και όταν η μορφολογία δεν είναι ευνοϊκή. Εν πάσει περιπτώσει για τη στεγανοποίηση του πυθμένα χρησιμοποιείται στρώμα αργίλου ιδιαίτερα χαμηλής διαπερατότητας για την αποτροπή διαρροής του ιδιαίτερα βασικού νερού του πολφού στο υπέδαφος. Για μεγαλύτερη ασφάλεια μπορούν στο εδαφικό κάλυμμα μπορούν να προστεθούν και γεωμεμβράνες όπως επίσης μπορεί να γίνει και η άντληση του νερού της λίμνης από τον πυθμένα μειώνοντας έτσι την υδροστατική πίεση. Ένα στρώμα νερού κατακρατείται στην επιφάνεια της λάσπης, ενώ σε ορισμένα σημεία η λίμνη ψεκάζεται περιοδικά με νερό για να περιοριστεί ο κίνδυνος σκόνης στο ελάχιστο. Ένα μέρος του νερού της λίμνης εξατμίζεται και το υπόλοιπο ανακυκλοφορείται στη διαδικασία προσβολής. Εν τέλει, οι λίμνες τελμάτων μπορούν να καλυφθούν με ένα στρώμα εδάφους όταν κλείσουν

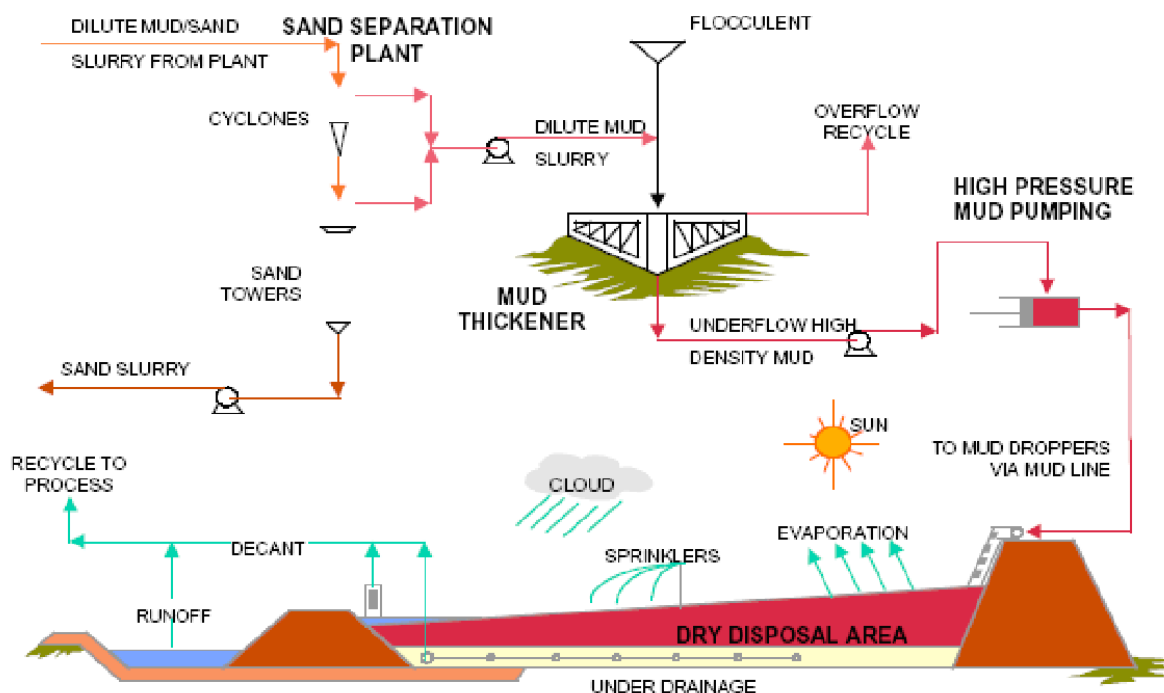
2.2.2 Ξηρές μέθοδοι

2.2.2.1 Ξηρή απόθεση

Ο πολφός μετά την έξοδο του από το σύστημα πλύσης διηθείται μηχανικά σε μια ξηρή σχετικά πάστα με ποσοστό στερεών >65%. Συνήθως μάλιστα ξεπλένεται με νερό και ατμό για την αύξηση της ανάκτησης του καυστικού νατρίου αλλά και τη μείωση της αλκαλικότητας του καταλοίπου. Ο πλακούντας αυτός είναι υπερβολικά πυκνός για τη μεταφορά του με σωλήνες στο χώρο απόθεσης, έτσι μεταφέρεται με φορτηγά ή μεταφορικές ταινίες. Επίσης δεν υπάρχει σημαντική περεταιίρω προσπάθεια ξήρανσης μετά την απόθεση.

2.2.2.2 Ξηρή απόθεση σε αναχώματα

Τα Κ.Β. μετά την πλύση τους πυκνώνονται σε μία πάστα με 48-55% στερεά. Η πάστα αυτή είναι θιξοτροπική και έτσι είναι δυνατή η μεταφορά της μέσω σωληνώσεων στο χώρο απόθεσης. Αμέσως μετά την έξοδο από τον αγωγό, η πάστα ρέει ακολουθώντας την κλίση της ήδη υπάρχουσας απόθεσης χωρίς να διαχωριστεί και χωρίς να στερεοποιηθεί κατά τη ροή, σχηματίζοντας έτσι ομοιοπαχείς στρώσεις κλίσεως 2-6 μοιρών. Η απόθεση παίρνει μορφή σωρού με τη σταδιακή απόρριψη στρωμάτων ιλύος τα οποία αφήνονται να στραγγίσουν και να ξηρανθούν από τον αέρα πριν την απόθεση του επόμενου στρώματος. Στερεοποίηση συμβαίνει όταν επιτευχθούν περιεκτικότητες 62-65% σε στερεά με ταυτόχρονη αύξηση της διατμητικής αντοχής. Διατμητικές αντοχές της τάξεως των 25 kPa μπορούν να επιτευχθούν. Συχνά μάλιστα προστίθενται στον σωρό και σωλήνες αποστράγγισης για να επιταχύνουν την ξήρανση. Η μέθοδος είναι έτσι σχεδιασμένη ώστε η πάστα να γίνεται τελικά αυτοστηριζόμενη σε σημαντικό βαθμό και να μπορεί να αποτεθεί σε σωρούς με μεγάλο ύψος, μειώνοντας έτσι το αποτύπωμα του αποβλήτου στην γύρω περιοχή.



Σχήμα 2.4. Ξηρή απόθεση πάστας καταλοίπων βωξίτη

Το 1965 το 30% περίπου των εργοστασίων απέρριπτε τα Κ.Β. στη θάλασσα και τα υπόλοιπα σε λίμνες τελμάτων. Το 1970 όμως λόγω κυρίως της ραγδαίας αύξησης του αριθμού των εργοστασίων, οδήγησε στις ξηρές μεθόδους απόθεσης οι οποίες έγιναν με το πέρασμα του χρόνου η προτιμώμενη μέθοδος για κάθε καινούριο εργοστάσιο αλλά και παλιότερων ύστερα από μετατροπή τους. Το 2007 το 70% των εργοστασίων αλουμίνας χρησιμοποιούσε ξηρές μεθόδους απόρριψης.

2.3 Επεξεργασία Ερυθράς ιλύος

Στην επεξεργασία των αποβλήτων, οι φυσικές μέθοδοι γενικά χρησιμοποιούνται πρώτες επειδή είναι απλούστερες σε λειτουργία και επομένως φτηνότερες στην εφαρμογή τους. Δεύτερες σε χρήση είναι οι βιολογικές μέθοδοι που στηρίζονται στους μικροοργανισμούς και έπονται οι χημικές μέθοδοι που είναι συνήθως ακριβότερες από τις φυσικές και τις βιολογικές μεθόδους.

2.3.1 Φυσικές Μέθοδοι

2.3.1.1 Έκπλυση με γλυκό νερό

Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, οι επαναλαμβανόμενες πλύσεις μπορεί να μειώσουν την αλατότητα των καταλοίπων βωξίτη αλλά όχι το pH. Επιπλέον, είναι δύσκολο να πλυθεί

η λάσπη λόγω της διασποράς των κομματιών αργίλου. Η πλύση από τις βροχοπτώσεις θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, αλλά λόγω της χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας της συσσωρευμένης κόκκινης λάσπης απαιτούνται πολλά χρόνια για να μειώσει την αλατότητα.

Η περίπτωση της εφαρμογής της Ε.Ι. σε αμμώδη εδάφη είναι διαφορετική δεδομένου ότι ένα 30% της Ε.Ι. σε μίγμα της με αμμώδες έδαφος έχει περίπου συμπιεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα 1 m/ημέρα και μια χειμερινή βροχόπτωση έχει αποδειχθεί ότι ξεπλένει τα περισσότερα από τα άλατα σε ένα βάθος 20 εκατ. της άμμου που έχει τροποποιηθεί από την κόκκινη λάσπη.

2.3.1.2 Ανάμειξη με θαλασσινό νερό

Το θαλασσινό νερό χρησιμοποιείται μερικές φορές για τη μεταφορά της ερυθράς ιλύος με αγωγούς στις λίμνες τελμάτων. Αυτό γινόταν για λόγους οικονομίας του γλυκού νερού. Παρατηρήθηκε λοιπόν πως με την προσθήκη του θαλασσινού νερού τα υδροξείδια, τα ανθρακικά και τα αλουμινούχα ιόντα αφαιρούνται από τον πολφό αντιδρώντας με τα Mg^{2+} και Ca^{2+} για να σχηματίσουν αλκαλικά στερεά, όπως $(Mg_6Al_2(CO_3)(OH)_{16} \cdot 4(H_2O))$ και $CaCO_3$. Αυτό μπορεί να μειώσει το pH σε 8 με 9

Επίσης η δυνατότητα απορρόφησης φωσφορικών έδειξε να αυξάνεται και τα στερεά έχουν αυξημένη δυνατότητα παγίδευσης ιχνοστοιχείων, πράγμα πολύ χρήσιμο για την μελλοντική προσπάθεια αποκατάστασης των αποθέσεων Ε.Ι. με φυτοκάλυψη.

2.3.2 Βιολογικές Μέθοδοι

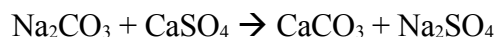
Προφανώς, οι φυσικές μέθοδοι δεν είναι από μόνες τους ικανοποιητικές δεδομένου ότι το pH των Κ.Β. είναι ακόμα υψηλό. Η ενσωμάτωση της ενεργούς ιλύος βιολογικού καθαρισμού λυμάτων, λιπάσματος και αλγών στη λάσπη ενθαρρύνει την ανάπτυξη των μικροοργανισμών και επομένως τη μετατροπή των Κ.Β. σε κανονικό έδαφος που να μπορεί να καλλιεργηθεί. Η ιδέα είναι να παραχθούν οργανικά οξέα από την αποσύνθεση των οργανικών αποβλήτων που θα μπορούσαν να εξουδετερώσουν την αλκαλικότητα των Κ.Β. Παρ' όλα αυτά, η επιτυχής μετατροπή σε κανονικό έδαφος θα απαιτούσε μια τεράστια ποσότητα οργανικών αποβλήτων (αναλογία περισσότερο από 1:1). Είναι προφανές ότι η προσθήκη οργανικών αποβλήτων δεν ήταν πολύ επιτυχής αφού η κύρια αιτία για το υψηλό pH είναι το υψηλά προσροφημένο Na και η παρουσία υπολειπόμενου CaO . Οι χημικές μέθοδοι είναι οι αποτελεσματικότερες στην

αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος.

2.3.3 Χημικές Μέθοδοι

2.3.3.1 Γύψος

Η προσθήκη γύψου στα Κατάλοιπα Βωξίτη αποδείχθηκε ότι μειώνει το pH της σε 8.3, στα ασβεστούχα χώματα. Η χημική αντίδραση που πραγματοποιήθηκε ήταν η εξής:



Ο σχηματισμός του αδιάλυτου ανθρακικού άλατος ασβεστίου ωθεί την αντίδραση προς τα δεξιά. Αν και αυτό είναι σωστό για την εξουδετέρωση της αλκαλικότητας, ένας πρόσθετος ρόλος της γύψου είναι η αντικατάσταση του νατρίου από τις εναλλάξιμες θέσεις στην επιφάνεια των Κ.Β.

Ένα πλεονέκτημα της χρήσης γύψου είναι ότι είναι διαθέσιμη ως απόβλητο από την παραγωγή υπερφωσφορικών λιπασμάτων από τα κοιτάσματα φωσφορικών. Ένα άλλο απόβλητο που θα μπορούσε να ενεργήσει με όμοιο τρόπο με τη γύψο για την εξουδετέρωση της Ερυθράς Ιλύος είναι το απόβλητο σιδηρούχου θεικού άλατος (cooperas) από τη δημιουργία του διοξειδίου του τιτανίου από ιλμενίτη.

2.4 Βασικά Ζητήματα Κατά την Επεξεργασία Υπολειμμάτων Βωξίτη

Τα ζητήματα που παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των Καταλοίπων Βωξίτη είναι τα εξής:

2.4.1 Οικονομικά ζητήματα

1. Φτωχά οικονομικά οφέλη από την χρήση των υποπροϊόντων
2. Χαμηλή οικονομική αξία της πλειοψηφίας των χρήσιμων προϊόντων που παράγονται από το Κ.Β.
3. Απαγορευτικά υψηλές μεταφορικές δαπάνες
4. Πιέσεις από ανταγωνιστικά υλικά τα χαμηλότερου κόστους
5. Πιθανές υψηλές δαπάνες για τον κύκλο ζωής της μελλοντικής απόθεσης και των απαιτούμενων συστημάτων ελέγχου
6. Αβεβαιότητα (και πιθανώς υποτίμηση) των συνολικών δαπανών της απόθεσης των υπολειμμάτων

7. Ιδιαιτερότητες κάθε περιοχής, όπως είναι οι τοπικές αγορές και οι ανάγκες τους, η θέση και η εγγύτητά τους

2.4.2 Ζητήματα Ασφάλειας, Υγείας και Περιβάλλοντος

1. Μεγάλοι όγκοι μεγάλης ηλικίας, μη χρησιμοποιήσιμων αποβλήτων
2. Υψηλή αλκαλικότητα
3. Δυνατότητα για μελλοντική επαναταξινόμηση χαρακτηριζόμενα ως επιβλαβή απόβλητα στο μέλλον
4. Δυνατότητα για διύλιση/ διείσδυση όμβριων υδάτων
5. Χαρακτηρισμός των αποβλήτων ως επικίνδυνα
6. Αυστηρότεροι περιβαλλοντικοί κανονισμοί στο μέλλον
7. Πιθανή ρύπανση υπόγειων νερών
8. Ξεσκόνισμα κατά τη διάρκεια της ξήρασης
9. Λήψη καδμίου από τις εγκαταστάσεις
10. Υψηλή ακτινοβολία
11. Μελλοντικές απαιτήσεις που αποκλείουν την εγκατάλειψη
12. Μακροπρόθεσμα προβλήματα στη χρησιμοποίηση σε ένα προϊόν λόγω της περιεκτικότητας του υπολείμματος σε νάτριο (~5%)
13. Προσωρινή φύση της ουδετεροποίησης (το pH μπορεί να επανέλθει με την πάροδο του χρόνου σε ένα συγκεκριμένο σημείο)
14. Διάφορα κατά τόπους ζητήματα, συμπεριλαμβανομένων των ιδιοτήτων του υπολείμματος

2.5 Εφαρμογές των Κατάλοιπων Βωξίτη

Σημαντικός χρόνος και πόροι έχουν δαπανηθεί για την αναζήτηση οικονομικά βιώσιμων λύσεων για την αξιοποίηση του μεγάλου όγκου των Κ.Β. Δυστυχώς, παρά τις τρέχουσες έρευνες, οι οικονομικές χρήσεις για τα κατάλοιπα βωξίτη είναι περιορισμένες.

Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές επιτυχείς προσπάθειες για την ανάκτηση αλουμίνας και σόδας από τα Κατάλοιπα Βωξίτη. Εντούτοις, λαμβάνοντας υπόψη τη (σχετικά) υψηλή

ποιότητα του βωξίτη που είναι γενικά διαθέσιμη στις βιομηχανίες ραφινάρισματος, αυτές οι διαδικασίες δεν θα μπορούσαν να είναι οικονομικά αποτελεσματικές. Η ανάκτηση σιδήρου, διοξειδίου τιτανίου και άλλων δευτερευόντων στοιχείων (π.χ. βανάδιο), έχει επίσης επιχειρηθεί, πάλι όμως χωρίς εμπορική επιτυχία. Γενικά, οι χημικές διαδικασίες που στοχεύουν στην ανάκτηση ενός συστατικού της Ε.Ι. πάσχουν οικονομικά και από τη δημιουργία περαιτέρω προβλημάτων διάθεσης.

Η αργλική δομή του υπολείμματος βωξίτη έχει υπάρξει αντικείμενο μελέτης από διάφορους ερευνητές, οι οποίοι έχουν καταδείξει ότι, όταν πυρώνεται, η κόκκινη λάσπη γίνεται ένα χρήσιμο κεραμικό υλικό. Το υπόλειμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή των κεραμιδιών, των τούβλων, και των μονωτικών υλικών, με την προϋπόθεση ότι το υπόλειμμα πρέπει να πλυθεί λεπτομερώς και να υποστεί ξήρανση πριν από τη χρήση, προκαλώντας έτσι αύξηση του κόστους της διαδικασίας ανακύκλωσης. Η κόκκινη λάσπη και ο βωξίτης έχουν χρησιμοποιηθεί και για την παραγωγή του $Al_2O_3-Fe_2O_3$ κεραμικών ινών. Στον βιομηχανικό τομέα, έχουν γίνει προσπάθειες για τη χρήση των Καταλοίπων Βωξίτη στην αφαίρεση των ενώσεων θείου από την κηροζίνη, την υδρογόνωση του ανθρακένιου, των ανθράκων και των αρωματικών ενώσεων και ως χρωστική ουσία στα αντιδιαβρωτικά χρώματα που χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική.

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει προσπάθειες για τη χρήση Καταλοίπων Βωξίτη σε γεωργικές εργασίες. Η Ερυθρά Ιλύς έχει εξεταστεί για τη δυνατότητα χρήσης της στα όξινα χρώματα (λόγω της αλκαλικής φύσης της) και έχει χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια ως υποκατάστατο του γεωργικού ασβεστόλιθου, αλλά και ως τροποποιητής στις όξινες αμμώδεις ζώνες. Επίσης, τοξικά βαρέα μέταλλα έχουν αφαιρεθεί από το υδατικό διάλειμμα χρησιμοποιώντας παράγωγα της Ε.Ι. ως προσροφητικά.

2.5.1 Απορροφητικό για την Επεξεργασία Αποβλήτων

Δεδομένου ότι η ερυθρά ιλύς είναι αλκαλικής φύσεως λεπτά ταξινομημένη κατέχοντας μεγάλη ειδική επιφάνεια και εκθέτοντας τις σημαντικές ιονεναλλακτικές ιδιότητες, αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο υλικό. Ο καθαρισμός των αερίων που προέρχονται από τις πόλεις αλλά και από τη βιομηχανία, που έχει ως συνέπεια τον περιορισμό της περιβαλλοντικής ρύπανσης είναι μια άλλη εφαρμογή (αέρια που περιέχουν S σε διάφορες συνδυασμούς με P, As, CO_2 κ.λπ. μπορεί να περιοριστούν αποτελεσματικά). Η επεξεργασία των αποβλήτων αποχέτευσης από τους δήμους (λύματα), τα

γαλακτοκομεία, τα χοιροστάσια κ.λπ. είναι ακόμα ένας τομέας εφαρμογής . Διάφορες τοξικές ουσίες συμπεριλαμβανομένων των βαρέων και δηλητηριωδών στοιχείων μπορούν να εξουδετερωθούν με τη χρήση Ερυθράς Ιλύος. Μια τέτοια χρήση θα μπορούσε κάλλιστα να δοκιμαστεί κοντά σε μια εγκατάσταση αλουμίνας ώστε να διερευνηθεί αποτελεσματικότερα και ευκολότερα εάν η Ερυθρά Ιλύς εκπληρώνει τις προϋποθέσεις .

2.5.2 Γεωργικές Χρήσεις

Ο συγκεκριμένος τομέας δεν έχει λάβει σημαντική προσοχή στη χώρα μας. Οι εκτενείς μελέτες στην Αυστραλία και την Ουγγαρία έχουν δείξει ότι τα Κ.Β. μπορεί να χρησιμοποιηθούν εποικοδομητικά για τη βελτίωση της εδαφικής παραγωγικότητας. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις άριστες και αποδεδειγμένες δυνατότητες της τροποποιημένης με γύψο Ε.Ι (RMG) που έχουν τη μορφή κόκκων σκόνης. Σε σύγκριση με το κανονικό έδαφος, τα εδάφη στα οποία έχει προστεθεί τροποποιημένη με γύψο Ε.Ι. έχει αποδειχθεί ότι αυξάνουν τη διατήρηση του ύδατος κατά 50%, μειώνουν την απώλεια θρεπτικών ουσιών όπως το φώσφορο και το άζωτο, παρέχουν και απελευθερώνουν αργά τα μικρο-θρεπτικά συστατικά (Mg, Mn, Zn, Cr, Cu, Ni, As, Sb, S, P κ.λπ.) και επίσης δεσμεύουν τα ανεπιθύμητα βαρέα μέταλλα (π.χ. Cd, Pb). Οι δοκιμές στη χρήση των αποκαλούμενων κόκκων RMG σε δόσεις, για παράδειγμα, 4-5 τόνων/εκτάριο έδειξαν ότι είναι εφικτό να βελτιωθεί η παραγωγικότητα του εδάφους, δηλαδή να ενισχυθεί η παραγωγή διάφορων κοινών φρούτων και λαχανικών και να μειωθεί ταυτόχρονα το ποσοστό χρήσης φωσφορούχων και αζωτούχων λιπασμάτων. Είναι εφικτό να υπάρχουν οφέλη για τουλάχιστον 5 έτη μετά από την πρώτη προσθήκη RMG στα γεωργικά χώματα. Στα πλαίσια της «Πράσινης Επανάστασης» και της αυξανόμενης ζήτησης για την παραγωγή τροφίμων με περιορισμένη χρήση λιπασμάτων, αυτή η εφαρμογή αξίζει μεγάλη εκμετάλλευση δεδομένου ότι η R.M.G. έχει μια απέραντη δυνατότητα αγοράς ως υποκατάστατο λιπάσματος σε μια κυρίως γεωργική χώρα όπως η Ελλάδα.

2.5.3 Αξιοποίηση της Ερυθράς Ιλύος για την Ανάπτυξη Εδαφικού Καλύμματος και τη Φυτοκάλυψη Χώρων Απόθεσης Στερεών Απορριμμάτων (Α.Ε.Ε.Ρ.Ι.Λ.)

Για την ανάπτυξη ενός εδαφικού καλύμματος, το οποίο θα μπορεί να υποστηρίξει βλάστηση, θα πρέπει να γίνει προσθήκη υλικών τα οποία:

α) Θα μειώνουν το pH του εδάφους

Η μείωση του pH θα βελτιώσει δύο παράγοντες. Πρώτον, θα ευνοήσει την ανάπτυξη των φυτών. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, κοινά φυτά αναπτύσσονται σε pH όχι μεγαλύτερο από 8,5. Υπάρχουν όμως και ορισμένα φυτά, τα οποία μπορούν να αντέξουν σε περισσότερο αλκαλικά περιβάλλοντα.

Επιπλέον, η μείωση του pH σε ουδέτερες ή ελαφρώς αλκαλικές περιοχές θα περιορίσει τη διαλυτότητα λόγω καταβύθισης ορισμένων στοιχείων του εδαφικού διαλύματος, όπως του Al. Σημειώνεται ότι στο ευδιάλυτο κλάσμα του Al βρέθηκε περίπου 1 mg/kg, ενώ το όριο τοξικότητας για ανάπτυξη φυτών είναι περίπου 0,5 mg/kg.

β) Θα παρέχουν οργανική ύλη

Η ερυθρά ιλύς στερείται οργανικής ύλης και ουσιωδών στοιχείων (K, P, N κ.λ.π.) για την ανάπτυξη των φυτών.

γ) Θα βελτιώσουν το πορώδες του μίγματος

Η ερυθρά ιλύς είναι ένα λεπτόκοκκο υλικό με μικρό πορώδες και μεγάλη ικανότητα συγκράτησης υγρασίας. Λόγω αυτών των ιδιοτήτων της αυτών, απαιτείται η προσθήκη υλικού που θα βελτιώσει το πορώδες και θα επιτρέπει να «αναπνέουν» οι ρίζες των φυτών.

Με βάση τα ανωτέρω, σε πειράματα που έλαβαν χώρα στο Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, εξετάστηκαν διάφορα εγχώρια απόβλητα που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά προσθήκης στην Ερυθρά Ιλύ. Τα υλικά αυτά είναι:

α) Γύψος

Απόβλητα γύψου παράγονται από πολλές διεργασίες εξουδετέρωσης θεϊκών υγρών αποβλήτων. Ανάλογα με την περίπτωση μπορεί να έχει μικρές ή μεγάλες συγκεντρώσεις άλλων στοιχείων. Μεγάλες ποσότητες γύψου παράγονται από βιομηχανίες φωσφορικών λιπασμάτων. Χαρακτηρίζεται από χαμηλές τιμές pH (2 έως 4). Η προσθήκη γύψου στα Κ.Β. έχει τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Αρχική μείωση του pH του μίγματος .
- Μείωση της συγκέντρωσης του ελεύθερου Al, λόγω καταβύθισής του.
- Αύξηση της συγκέντρωσης Na στο διάλυμα λόγω αντικατάστασής του από το Ca. Το γεγονός αυτό δεν ευνοεί την ανάπτυξη των φυτών. Εντούτοις μπορεί

ευκολότερα να εκπλυθεί και να απομακρυνθεί το Na της Κ.Β.

- Απελευθέρωση του Mg της Κ.Β. λόγω αντικατάστασής του από το Ca. Το γεγονός αυτό καθιστά το Mg περισσότερο διαθέσιμο στα φυτά.
- Προσθήκη φωσφορικών απαραίτητων για την ανάπτυξη των φυτών.
- Αύξηση του πορώδους της ερυθράς ιλύος .

Στην Ελλάδα υπάρχουν βιομηχανίες παραγωγής λιπασμάτων και κατ' επέκταση παραγωγής γύψου ως αποβλήτου, που αποτελεί σημαντικό πρόβλημα διάθεσης. Σημαντικό στοιχείο όμως αποτελεί η περιεκτικότητά του σε ραδιενεργά στοιχεία, η οποία εξαρτάται άμεσα από την προέλευση της πρώτης ύλης. Στην περίπτωση που επιλεγεί η γύψος σαν υλικό προσθήκης στα Κ.Β. θα πρέπει να εξασφαλισθεί η απουσία ραδιενεργών στοιχείων.

β) Βιολογική Ιλύς

Βιολογικά συστήματα καθαρισμού αστικών λυμάτων υπάρχουν σε πολλές πόλεις της Ελλάδας, όπου χρησιμοποιούν αερόβιες ή αναερόβιες συνθήκες κατεργασίας. Η χρήση βιολογικής ιλύος ως πρόσθετου στα Κ.Β. μελετήθηκε από πολλούς ερευνητές, αλλά και από τη πρώτη μητρική εταιρία του Αλουμινίου της Ελλάδος , «Aluminium Pechiney» σε πιλοτική κλίμακα για τη χρήση της Ερυθράς Ιλύος ως βασικού υλικού για την αποκατάσταση χώρων ταφής αστικών απορριμμάτων (κάλυψη και φυτοκάλυψη).

Πειράματα προσθήκης βιολογικής ιλύος έγιναν σε εργαστηριακή και πιλοτική κλίμακα. Οι συνήθεις λόγοι προσθήκης βιολογικής ιλύος ήταν περίπου 15% κ.β. (στην εφαρμογή στο πεδίο χρησιμοποιήθηκε βιολογική ιλύς σε ποσοστό 25% κ.ό.).

Η βιολογική λάσπη είναι πλούσια σε οργανικό υλικό και θρεπτικά συστατικά. Έχει pH που κυμαίνεται γύρω από την ουδέτερη περιοχή (6-8), το οποίο εξαρτάται από το είδος της βιολογικής κατεργασίας των υγρών αποβλήτων καθώς και από την ενδεχόμενη προκατεργασία της. Η προσθήκη της Βιολογικής Λάσπης στην Ερυθρά Ιλύ, έχει τα εξής αποτελέσματα:

- Μείωση του pH του μίγματος (όχι σημαντική)
- Μειώνει το ποσοστό του εναλλάξιμου Na λόγω προσρόφησής του στην βιολογική λάσπη.
- Αυξάνει τη διαθεσιμότητα Κκαι Μn.

- Αυξάνει ελαφρά τη διαθεσιμότητα του Al.
- Προσθήκη οργανικής ύλης απαραίτητης για την ανάπτυξη των φυτών.
- Προσθήκη θρεπτικών στοιχείων (P, N).
- Αυξάνει το πορώδες του υλικού.

Γ) Τύρφη και Ποζολάνη

Τα δύο υλικά μελετήθηκαν μαζί ως μίγμα σε αναλογία όγκων 50%, σε εργαστηριακή κλίμακα και με χρήση γλαστρών 3 λίτρων. Οι αναλογίες του μίγματος με την Ερυθρά Ιλύ κυμαίνονταν από 0 έως 100%.

Θεωρείται ότι η μεν τύρφη παρέχει οργανικό υλικό ενώ η ποζολάνη αποτελεί μέσο τροποποιητικό για να αυξήσει το πορώδες του μίγματος.

Τα κύρια συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη που έγινε ήταν τα εξής:

- Η προσθήκη του μίγματος μειώνει το pH και το διαθέσιμο Na.
- Η προσθήκη μίγματος βελτιώνει την ανάπτυξη των φυτών.
- Η ερυθρά ιλύς στο μίγμα δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 50%.

Πρέπει πριν τη φύτευση το έδαφος να έχει τις εξής ιδιότητες:

- $pH < 9$
- Η αγωγιμότητα του εκχυλίσματος σε λόγο 1/5 πρέπει να είναι μικρότερη από 0,8 mS/cm.
- Το ολικό Na πρέπει να είναι μικρότερο από 2 % του ξηρού βάρους.
- Το ευδιάλυτο Na πρέπει να είναι μικρότερο από 0,8 % του ξηρού βάρους.
- Η τύρφη και η πορζελάνη πρέπει να εξετασθούν αρχικά βιβλιογραφικά ως προς τις ιδιότητές τους.

Φυτά

Οι εργασίες που έγιναν για την ανάπτυξη φυτών σε τεχνητά υποστρώματα (μίγμα ερυθράς ιλύς με πρόσθετα), αφορούν τόσο την μελέτη χαμηλής βλάστησης(γρασίδι), όσο και μέσης (θάμνοι) και υψηλής(δένδρα) βλάστησης.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονισθεί ότι πρέπει να αποφασισθεί τι είδους βλάστηση

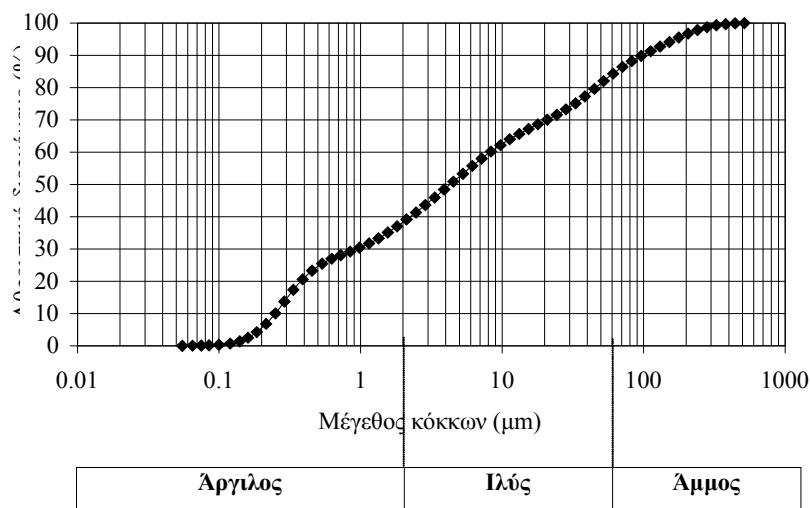
επιθυμείται στην τελική αποκατάσταση για να επιλεγούν τα απαραίτητα φυτά..

Σε όλες τις περιπτώσεις, επιλέγονται φυτά τα οποία θα μπορούν να αναπτυχθούν σε αλκαλικά υλικά με αυξημένη αλατότητα. Επίσης, τα φυτά πρέπει να ευδοκιμούν στις περιοχές που θα γίνει τελικά η πιλοτική δοκιμή αλλά και η τελική διάθεση της ερυθράς ιλύος.

Λιπάσματα

Η επιλογή των λιπασμάτων γίνεται ανάλογα με την περιεκτικότητα των προηγούμενων μιγμάτων σε ουσιώδη συστατικά (N, P, K). Εφαρμόστηκαν δύο είδη λιπασμάτων: τα βασικά (κατά τη διάρκεια της φύτευσης) και τα επιφανειακά (κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των φυτών).

Χαρακτηριστικά του δείγματος ερυθράς ιλύος



Σχήμα 2.2 : Κοκκομετρική κατανομή του εξεταζόμενου δείγματος ερυθράς ιλύος

3. ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΤΑΦΗ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ

3.1 Γενικά

Βασισμένη στην προηγούμενη εμπειρία από πόλεις τόσο στις Ηνωμένες Πολιτείες όσο και στον υπόλοιπο κόσμο, η υγειονομική ταφή απορριμμάτων αποτελεί σήμερα την πλέον οικονομική και αποδεκτή μέθοδο διάθεσης στερεών αποβλήτων. Ο όρος "Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.)" σημαίνει μια περιοχή όπου τα απόβλητα ξεφορτώνονται, συμπιέζονται και καλύπτονται με ένα στρώμα εδάφους στο τέλος του κύκλου λειτουργίας της κάθε ημέρας. Όταν οι διαδικασίες απόθεσης ολοκληρωθούν, τοποθετείται ένα τελικό στρώμα πάχους τουλάχιστον 0,6 m υλικού κάλυψης. Η πρακτική της ανοικτής και ανεξέλεγκτης διάθεσης απορριμμάτων χρησιμοποιείται ακόμα σε πολλά μέρη της χώρας, αλλά δεν είναι πλέον ένας αποδεκτός τρόπος διάθεσης από αισθητική, περιβαλλοντική και υγειονομική σκοπιά.

3.1.1 Πλεονεκτήματα του χώρου υγειονομικής ταφής

Τα κύρια πλεονεκτήματα ενός χώρου υγειονομικής ταφής απορριμμάτων είναι:

- Η αρχική επένδυση κεφαλαίου είναι χαμηλότερη από εκείνη που απαιτείται για την εφαρμογή είτε αποτέφρωσης ή μεθόδους λιπασματοποίησης.
- Χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης.
- Πρόκειται για μια πλήρη και οριστική μέθοδο που μπορεί να δέχεται όλους τους τύπους των αστικών στερεών αποβλήτων, την εξάλειψη του προβλήματος της τέφρας από την καύση και τα υλικά που δεν διασπώνται κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης.
- Παράγει απασχόληση για τους ανειδίκευτους εργάτες των τοπικών κοινωνιών
- Σε μεγάλους ΧΥΤΑ που λαμβάνουν πάνω από 200 τόνους απορριμμάτων ημερησίως, το φυσικό αέριο μεθάνιο μπορεί να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική πηγή ενέργειας.
- Μπορεί να βρίσκεται κοντά σε μια αστική περιοχή, αν υπάρχει διαθέσιμη γη. Το κόστος της μεταφοράς έτσι μειώνεται και ο χώρος ταφής μπορεί να είναι καλύτερη εποπτεία.

- Μετά την πλήρωση γίνεται αποκατάσταση και ο χώρος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή πάρκων, χώρων αναψυχής ή αθλητικά πεδία.
- Ο Χ.Υ.Τ.Α. μπορεί να αρχίσει να λειτουργεί σε σύντομο χρονικό διάστημα.
- Είναι πολύ ευέλικτος, δεδομένου ότι δεν απαιτεί μόνιμη ούτε οι σταθερές εγκαταστάσεις και μπορεί να δεχθεί επιπλέον ποσότητες απορριμμάτων με λίγες αυξήσεις προσωπικού.

3.1.2 Μειονεκτήματα του χώρου υγειονομικής ταφής

Τα κύρια μειονεκτήματα χώρων υγειονομικής ταφής είναι:

- Η απόκτηση της γης είναι το πρώτο εμπόδιο για την κατασκευή χώρου υγειονομικής ταφής η αντίδραση από το κοινό μπορεί να είναι ισχυρή οφείλεται σε παράγοντες όπως:
 - Έλλειψη γνώσης των τεχνικών υγειονομικής ταφής.
 - Ο όρος "ΧΥΤΑ" συνδέεται με ένα την ανεξέλεγκτη απόθεση απορριμμάτων.
 - Η έλλειψη εμπιστοσύνης των τοπικών διοικήσεων.
 - Η ραγδαία αστικοποίηση προκαλεί αύξηση στο κόστος της γης. Αυτό σημαίνει ότι ο ΧΥΤΑ πρέπει να βρίσκεται μακριά από τους τρόπους συλλογής οπότε αυξάνεται το κόστος μεταφοράς.
- Οι κατασκευές πρέπει συνεχώς να επιβλέπονται προκειμένου να διατηρήσει ένα υψηλό επίπεδο ποιότητας. Στις μικρές κοινότητες, η υπηρεσία καθαρισμού πρέπει να κάνει την καθημερινή παρακολούθηση, αλλά θα πρέπει να υπάρχει και η εποπτεία ενός πεπειραμένου επαγγελματία για να επιβλέπει την πρόοδο των εργασιών από καιρό σε καιρό.
- Ο χώρος ταφής μπορεί να γίνει μια ανοιχτή χωματερή αν οι δημοτικές αρχές είναι απρόθυμες να επενδύσουν σε λειτουργία και τη συντήρηση.
- Η ρύπανση των γύρω επιφανειακών και υπόγειων υδάτων μπορεί να εμφανιστεί εάν δεν έχουν ληφθεί οι κατάλληλες προφυλάξεις.

- Η πιο σημαντική καθίζηση γίνεται σε δύο πρώτα χρόνια μετά την ολοκλήρωση της ταφής κάνοντας τη χρήση της γης δύσκολη. Διευθέτηση του χρόνου θα εξαρτηθεί από το βάθος του χώρου υγειονομικής ταφής, το είδος των στερεών αποβλήτων, βαθμός συμπίκνωσης, καθώς και το ύψος των βροχοπτώσεων στην περιοχή.

3.2 Επιλογή Περιοχής

Η λήψη της απόφασης κατασκευής ενός Χ.Υ.Τ.Α είναι απόρροια προσεκτικής ανάλυσης και σχεδιασμού ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης απορριμμάτων στην οποία λαμβάνονται υπόψη επιστημονικοί, κοινωνικοί, οικονομικοί και τεχνικοί παράγοντες.

Πρώτο μέλημα είναι η επιλογή της κατάλληλης περιοχής κατασκευής του Χ.Υ.Τ.Α. πράγμα που απαιτεί την αξιολόγηση των παρακάτω παραγόντων.

3.3 Διαθέσιμοι Χώροι

Στην επιλογή των πιθανών περιοχών διάθεσης απορριμμάτων είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί ότι η ενδεδειγμένη περιοχή είναι διαθέσιμη για τέτοια χρήση. Αν και δεν υπάρχει κανένας σταθερός κανόνας σχετικά με την επιλογή μιας περιοχής, είναι απαραίτητο να υπάρξει ένας χώρος, που θα λειτουργήσει για τουλάχιστον 1 έτος επί ενός δεδομένου τόπου. Για μικρότερες χρονικές περιόδους λειτουργίας, το κόστος διάθεσης γίνεται αρκετά ακριβό. Πιο συγκεκριμένα, το συνολικό κόστος είναι συνάρτηση και των έργων προετοιμασίας των επί μέρους περιοχών, της δημιουργίας βοηθητικών εγκαταστάσεων και την τελική κάλυψη της απόθεσης.

3.4 Αντίκτυπος της Αποκατάστασης του Εδάφους

Στην αρχική αξιολόγηση των πιθανών περιοχών διάθεσης, είναι σημαντικό να προβλεφθεί η έκταση πιθανών μελλοντικών δραστηριοτήτων επεξεργασίας των απορριμμάτων και να καθοριστεί η επίδρασή τους στην ποσότητα και τη μορφή των υπόλοιπων υλικών που πρέπει να αποθεθούν. Παραδείγματος χάριν, εάν το 50% του χαρτιού που απορρίπτεται ανακυκλώνεται, το βάρος των υλικών που θα έπρεπε να αποθεθούν στον Χ.Υ.Τ.Α. θα μειώνονταν. Είναι επίσης σημαντικό να είναι γνωστό εάν οι εγκαταστάσεις ανακύκλωσης πρόκειται να βρεθούν πλησίον του τόπου διάθεσης της χωματερής .

3.5 Εδαφολογικές Συνθήκες και Τοπογραφία

Επειδή κατά τη λειτουργία ενός Χ.Υ.Τ.Α. είναι απαραίτητη η χρήση εδαφικού υλικού για την καθημερινή κάλυψη απορριμμάτων και επίσης μετά την πλήρωση του Χ.Υ.Τ.Α. είναι απαραίτητη η τοποθέτηση εδαφικού υλικού ως στρώμα κάλυψης, θα πρέπει να αναλυθούν τα χαρακτηριστικά των εδαφών της περιοχής και να ελεγχθεί η διαθεσιμότητά τους. Εάν το έδαφος κάτω από την προτεινόμενη περιοχή πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως υλικό κάλυψης, τα στοιχεία θα είναι διαθέσιμα από τη γεωλογική και υδρογεωλογική έρευνα. Εάν το υλικό λαμβάνεται από άλλο σημείο, απαιτείται να γίνουν ποικίλες δοκιμές για να διερευνηθούν όλα τα χαρακτηριστικά του υλικού. Η τοπογραφία της περιοχής πρέπει να εξεταστεί επειδή έχει επιπτώσεις στον τρόπο λειτουργίας του Χ.Υ.Τ.Α., στην επιλογή του εξοπλισμού, και στην έκταση της εργασίας που πρέπει να πραγματοποιηθεί για να καταστήσει την περιοχή χρησιμοποιήσιμη.

3.6 Κλιματολογικές Συνθήκες

Οι τοπικές καιρικές συνθήκες πρέπει να εξεταστούν επίσης κατά την αξιολόγηση των υποψήφιων περιοχών. Σε πολλές θέσεις, η πρόσβαση στην περιοχή θα επηρεαστεί από τις δυσκολίες που θα παρουσιαστούν τους χειμερινούς μήνες. Όταν και όπου δημιουργείται πάγος, το υλικό κάλυψης του Χ.Υ.Τ.Α. πρέπει να είναι διαθέσιμο σε σωρούς όταν η εκσκαφή είναι αδύνατη. Η διεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου πρέπει επίσης να εξεταστούν προσεκτικά. Για να αποφευχθεί η διασπορά χαρτιού και άλλων «ελαφρών» υλικών λόγω του αέρα, πρέπει να καθιερωθεί η χρήση ανεμοφραχτών. Η μορφή του ανεμοφράχτη που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τις κατά τόπους συνθήκες.

3.7 Υδρολογία Επιφανειακού Νερού

Η υδρολογία του επιφανειακού νερού της περιοχής είναι πολύ σημαντική γιατί υποδεικνύει τα φυσικά χαρακτηριστικά των αποξηράνσεων και των απορροών που πρέπει να εξεταστούν. Πρέπει επίσης να προσδιοριστούν οι λοιποί υδρολογικοί παράγοντες εάν υπάρχουν.

3.8 Γεωλογικές και Υδρογεωλογικές Συνθήκες

Οι γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες είναι ίσως οι σημαντικότεροι παράγοντες που καθορίζουν την περιβαλλοντική καταλληλότητα μιας περιοχής για τη λειτουργία ενός Χ.Υ.Τ.Α. Η στατιστική ανάλυση σε αυτές τις περιπτώσεις χρειάζεται για να

αξιολογηθούν οι πιθανότητες ρύπανσης της προτεινόμενης περιοχής και για να διαπιστωθεί η δυνατότητα ρύπανσης της προτεινόμενης περιοχής. Επιπλέον είναι απαραίτητη για να γίνει αντιληπτό τι πρέπει να γίνει στην περιοχή ώστε να εξασφαλιστεί ότι η μετακίνηση των υγρών εκχυλισμάτων ή των αερίων από τη χωματερή δεν θα μειώσει την ποιότητα των τοπικών υπόγειων νερών ή δεν θα μολύνει άλλα υδροφόρα επιφανειακά στρώματα .

3.9 Τοπικές Περιβαλλοντικές Συνθήκες

Ενώ είναι δυνατό να δημιουργηθεί και να λειτουργήσει ένας Χ.Υ.Τ.Α. κοντά σε κατοικημένες και βιομηχανικές περιοχές πρέπει να ληφθεί μεγάλη προσοχή κατά τη λειτουργία του ώστε να είναι περιβαλλοντικά εναρμονισμένη όσον αφορά το θόρυβο, τη μυρωδιά και τη σκόνη.

3.10 Επόμενες Χρήσεις

Ένα από τα πλεονεκτήματα ενός Χ.Υ.Τ.Α., είναι ότι μόλις ολοκληρωθεί, μια αρκετά μεγάλη περιοχή του εδάφους διατίθεται για άλλους λόγους. Επειδή η τελευταία χρήση έχει επιπτώσεις στο σχεδιασμό και τη λειτουργία της χωματερής, αυτό το ζήτημα πρέπει να επιλυθεί προτού να αρχίσει η σχεδίαση της. Εάν ο Χ.Υ.Τ.Α. πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως πάρκο ή γήπεδο γκολφ, πρέπει να υπάρξει ένα οργανωμένο πρόγραμμα φύτευσης από την έναρξη λειτουργίας του Χ.Υ.Τ.Α.

Η τελική επιλογή μιας περιοχής διάθεσης είναι συνήθως βασισμένη στα αποτελέσματα μιας προκαταρκτικής έρευνας διαφόρων περιοχών, στα αποτελέσματα του σχεδιασμού και των μελετών κόστους καθώς επίσης και σε μια εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

3.11 Σχεδίαση των Χ.Υ.Τ.Α.

Μόλις επιλεγεί ένας περιορισμένος αριθμός πιθανών περιοχών δημιουργία Χ.Υ.Τ.Α. βάσει μιας αξιολόγησης των διαθέσιμων πληροφοριών που έχουν , είναι συνήθως απαραίτητο να γίνει ένας σχεδιασμός για κάθε περιοχή ώστε να εκτιμηθεί το κόστος που χρειάζεται για τις δαπάνες που συνδέονται με την προετοιμασία της περιοχής για την πλήρωση, την τοποθέτηση των στερεών αποβλήτων και την ολοκλήρωση του κομματιού της χωματερής μόλις ολοκληρωθεί ο κύκλος ταφής. Η σχετική έκθεση είναι προκαταρκτικής φύσεως, καθώς διακρίνεται από μια πλήρη που απαιτείται για την τελική επιλογή μιας περιοχής, η οποία περιλαμβάνει και περιβαλλοντικές εκτιμήσεις.

Ανάμεσα στα σημαντικά θέματα που πρέπει να εξεταστούν σε ένα σχέδιο εφαρμογής, είναι τα ακόλουθα:

- Οι απαιτήσεις του εδάφους.
- Οι τύποι των αποβλήτων που πρέπει να ταφούν.
- Η αξιολόγηση της δυνατότητας διήθησης.
- Η σχεδίαση των εγκαταστάσεων ελέγχου αποξηράνσεων και διήθησης.
- Η ανάπτυξη ενός γενικού σχεδίου λειτουργίας.
- Η σχεδίαση ενός προγράμματος ταφής των στερεών αποβλήτων.
- Ο προσδιορισμός των απαιτήσεων εξοπλισμού.

Οι σημαντικότεροι μεμονωμένοι παράγοντες που πρέπει να εξεταστούν αναφέρονται στον Πίνακα. Κατά την ανάπτυξη του σχεδίου εφαρμογής, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην τελική χρήση ή χρήσεις της αποκατασταθείσας ολοκληρωμένης περιοχής. Το έδαφος που θα χρησιμοποιηθεί για διοικητικά γραφεία, κτήρια και ως χώρος στάθμευσης πρέπει να γεμίσει μόνο με απορρίμματα και πρέπει να σφραγιστεί ώστε να υπάρξει διαρροή αερίων.

Ο βαθμός στον οποίο οι υπολογισμοί θα πρέπει να ολοκληρωθούν σε κάθε περιοχή θα εξαρτηθεί από τα συμπεράσματα που εξάγονται σε κάθε βήμα. Παραδείγματος χάριν, εάν διαπιστώνεται ότι το ποσοστό κατείδυσης είναι πάρα πολύ μεγάλο χωρίς να υπάρχει καθόλου άργιλος και εάν δεν είναι διαθέσιμη ούτε άργιλος αλλά ούτε και άλλο κατάλληλο υλικό, ίσως και να μην είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν περαιτέρω υπολογισμοί για την εν λόγω περιοχή.

Πίνακας 3.4. Σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να εξεταστούν κατά τη σχεδίαση και τη λειτουργία των Χ.Υ.Τ.Α

Παράγοντες	Παρατηρήσεις
Σχεδίαση	
Πρόσβαση	Υφιστάμενοι οδοί πρόσβασης στην περιοχή του Χ.Υ.Τ.Α.. Προσωρινοί δρόμοι στις περιοχές εκφόρτωσης
Σχέδιο και Κατασκευή Δομικής Μονάδας	Ποικίλει ανάλογα με εάν το αέριο πρόκειται να ανακτηθεί. Από τα απόβλητα κάθε ημέρας πρέπει να διαμορφώνεται ένα δομικό κύτταρο .Μέγιστο βάθος 3 μ Κάλυψη στο τέλος της ημέρας με 15 εκατ. γης. Η διέξοδος του αερίου στο αμμοχάλικο πρέπει να εγκαθίσταται κάθε 18 έως 61 μ.
Υλικό Κάλυψης	Μεγιστοποίηση της χρήσης των εδαφικών υλικών .Περίπου 1m ³ του υλικού κάλυψης απαιτείται για κάθε 4 έως 6 m ³ των στερεών αποβλήτων.Αναμιγνύεται με στεγανωτικές ουσίες για τον έλεγχο της επιφανειακής διήθησης.

Αποξήρανση	Εγκατάσταση των τάφρων αποξηράνσεως για την εκτροπή της επιφανειακής απορροής. Διατήρηση του 1 έως 2 τοις εκατό του βαθμού στην τελική μορφή για να αποτραπεί η συγκέντρωση.
Απαιτήσεις Εξοπλισμού	Ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος της χωματερής
Πρόληψη Πυρκαγιάς	Εσωτερικά ύδατα. Εάν δεν είναι πόσιμα οι έξοδοι πρέπει να είναι ευδιάκριτοι. Αν τα εδαφικά κομμάτια είναι σωστά χωρισμένα αποτρέπεται η συνεχής εσωτερική καύση όταν αυτή εμφανίζεται.
Προστασία Υπόγειων Νερών	Εκτροπή οποιουδήποτε υπόγειου καναλιού. Αν είναι απαραίτητο, εγκαθίστανται φρεάτια για τον έλεγχο των αερίων και των υπόγειων νερών.
Περιοχή Χ.Υ.Τ.Α.	Η περιοχή πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη να κρατήσει όλα τα κοινοτικά απόβλητα για τουλάχιστον 1 έτος αλλά κατά προτίμηση 5 έως 10 έτη.
Μέθοδος Επιχωμάτωσης	Η επιλογή της μεθόδου ποικίλει ανάλογα με την έκταση και το διαθέσιμο υλικό κάλυψης.
Έλεγχος Απορριμμάτων	Χρήση κινητών φρακτών στις περιοχές εκφόρτωσης. Τα πληρώματα πρέπει να πάρουν τα απορρίμματα τουλάχιστον μια φορά το μήνα ή όσο απαιτείται.
Σχέδιο Λειτουργίας	Με ή χωρίς τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων και αποκατάστασης των αερίων.
Συμπίεση	Επίστρωση και συμπίεση των αποβλήτων σε στρώματα λιγότερο από 0,60 m πάχος.
Περιοχή Εκφόρτωσης	Παραμένει μικρή. Γενικά κάτω από 30 m ανά πλευρά. Προτιμάται να λειτουργούν χωριστές περιοχές εκφόρτωσης για τα αυτοκίνητα και τα εμπορικά φορτηγά.
Λειτουργία	
Επικοινωνίες	Τηλέφωνο έκτακτης ανάγκης
Ημέρες και Ώρες Λειτουργίας	Η συνηθισμένη πρακτική είναι 5 έως 6 ημέρες/εβδομάδα και 8 έως 10 ώρες/ημέρα
Υπάλληλοι	Πρέπει να υπάρχουν χώροι ανάπαυσης και πόσιμο νερό
Συντήρηση Εξοπλισμού	Πρέπει να υπάρχει υπόστεγο για τη συντήρηση του εξοπλισμού.
Αρχεία Λειτουργίας	Χωρητικότητα, συναλλαγές, και τιμολόγια εάν πρέπει.
Κλίμακες	Απαραίτητη για την τήρηση αρχείων εάν τα φορτηγά μεταφέρουν απορρίμματα έως 45 τόνους

3.12 Μέθοδοι Υγειονομικής Ταφής

Για την ορθή λειτουργία ενός Χ.Υ.Τ.Α. , θα πρέπει να εκπονηθεί ένα πλήρες σχέδιο λειτουργίας για την απόθεση των στερεών αποβλήτων. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι κατασκευής και λειτουργίας Χ.Υ.Τ.Α., που είναι διαφορετικές για ξηρές και για υγρές περιοχές.

Οι κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τις ξηρές περιοχές υγειονομικής ταφής απορριμμάτων μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με:

- 1) την περιοχή,

2) την τάφρο, και

3) την πίεση.

3.12.1 Μέθοδος Τάφρων

Η μέθοδος τάφρων επιχωμάτωσης ταιριάζει ιδανικά στις περιοχές όπου υπάρχει επαρκής ποσότητα υλικού κάλυψης και που η στάθμη νερού είναι κοντά στην επιφάνεια. Αναλυτικότερα, τα στερεά απόβλητα τοποθετούνται στις τάφρους που έχουν μήκος από 30.5 έως 122 m , βάθος 0.9 έως 1.8 m και πλάτος 4.5 έως 7.5m. Για να αρχίσει η διαδικασία, ένα κομμάτι της τάφρου σκάβεται και τοποθετείται λίγο από το υλικό κάλυψης για να διαμορφωθεί ένα ανάχωμα πίσω από την πρώτη τάφρο. Τα απόβλητα τοποθετούνται στη συνέχεια στην τάφρο, απλώνονται σε λεπτά στρώματα (συνήθως 45 έως 60 cm.) και συμπιέζονται. Η λειτουργία συνεχίζεται έως ότου επιτυγχάνεται το επιθυμητό ύψος. Το μήκος της τάφρου που χρησιμοποιείται κάθε ημέρα πρέπει να είναι τέτοιο που το τελικό ύψος του σωρού να επιτυγχάνεται στο τέλος της λειτουργίας κάθε ημέρας. Το μήκος πρέπει επίσης να είναι επαρκές ώστε να αποφεύγονται οι δαπανηρές καθυστερήσεις των οχημάτων συλλογής που περιμένουν να ξεφορτώσουν. Το υλικό κάλυψης λαμβάνεται με την ανασκαφή μιας παρακείμενης τάφρου ή με τη συνέχιση της εκσκαφής της περιοχής που λαμβάνει χώρα η ταφή.

3.12.2 Μέθοδος Περιοχής

Η μέθοδος περιοχής χρησιμοποιείται όταν η έκταση είναι ακατάλληλη για την ανασκαφή των τάφρων στις οποίες θα τοποθετηθούν τα στερεά απόβλητα. Από λειτουργικής πλευράς τα απόβλητα ξεφορτώνονται και μεταφέρονται στις μεγάλου μήκους στενές λωρίδες στην επιφάνεια του εδάφους σε μία σειρά στρωμάτων που ποικίλλουν σε βάθος. Κάθε στρώμα συμπιέζεται καθώς η πλήρωση προχωρεί κατά τη διάρκεια της ημέρας έως ότου φθάσει το πάχος των συμπιεσμένων αποβλήτων από 182 έως 304 cm. Τότε, στο τέλος της λειτουργίας κάθε ημέρας, ένα στρώμα 15-30 cm εδαφικού υλικού κάλυψης τοποθετείται πάνω από την επιφάνεια απορριμμάτων. Το υλικό κάλυψης πρέπει να μεταφερθεί με φορτηγά ή με ταινίες μεταφοράς από μια παρακείμενη περιοχή ή γενικά από την περιοχή που γίνεται η εξόρυξή του.

Η πλήρωση του Χ.Υ.Τ.Α. συνήθως αρχίζει με την κατασκευή ενός αναχώματος με εδαφικό υλικό, δίπλα στο οποίο τα απόβλητα τοποθετούνται σε λεπτά στρώματα και συμπιέζονται. Το μήκος της περιοχής εκφόρτωσης ποικίλλει ανάλογα με τις συνθήκες

της περιοχής. Το ύψος των αποβλήτων που συμπιέζονται ποικίλλει από 2,5 έως 6 m ανάλογα με την έκταση. Ένας ολοκληρωμένος κύκλος ταφής, συμπεριλαμβανομένου και του υλικού ενδιάμεσης κάλυψης, καλείται *κύτταρο*. Τα διαδοχικά στρώματα τοποθετούνται το ένα πάνω από το άλλο έως ότου επιτυγχάνεται η δημιουργία της τελικής βαθμίδας που είχε σχεδιαστεί στο αρχικό σχέδιο. Το μήκος της περιοχής εκφόρτωσης πρέπει να είναι τέτοιο που το τελικό ύψος κάθε λόφου σκουπιδιών να επιτυγχάνεται στο τέλος της κάθε ημέρας.

Εάν ένα μικρό ποσό χρησιμοποιήσιμου υλικού ενδιάμεσης κάλυψης είναι διαθέσιμο δίπλα στην περιοχή ταφής χρησιμοποιούνται συχνά η παραλλαγή κεκλιμένων ραμπών της μεθόδου περιοχής. Σε αυτήν την μέθοδο, τα στερεά απόβλητα τοποθετούνται, συμπιέζονται και καλύπτονται μερικώς ή πλήρως με το εδαφικό υλικό που εξορύσσεται από τη βάση της κεκλιμένης ράμπας. Το πρόσθετο πρέπει να μεταφερθεί, όπως στη μέθοδο περιοχής. Λόγω των αυξανόμενων δαπανών και των προβλημάτων που συνδέονται με τη λήψη του χρησιμοποιήσιμου υλικού κάλυψης, η χρήση της μεθόδου κεκλιμένων ραμπών πρέπει να βασιστεί σε μια λεπτομερή οικονομική μελέτη.

3.12.3 Μέθοδος Συμπίεσης

Στις θέσεις όπου υπάρχουν φυσικά ή τεχνητά ανοίγματα συχνά χρησιμοποιούνται για απόθεση απορριμμάτων. Φαράγγια, ξηρά επιφανειακά κοιλάματα και λατομεία έχουν χρησιμοποιηθεί για αυτόν το λόγο. Οι τεχνικές για την τοποθέτηση και τη συμπίεση των στερεών αποβλήτων στους Χ.Υ.Τ.Α. ποικίλλουν ανάλογα με τη γεωμετρία της περιοχής, τα χαρακτηριστικά του υλικού κάλυψης, την υδρολογία και τη γεωλογία της περιοχής, καθώς επίσης και την πρόσβαση σε αυτήν.

Εάν το έδαφος ενός φαραγγιού είναι επίπεδο, ο πρώτος κύκλος σε μια περιοχή φαραγγιών μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας τη μέθοδο τάφρων που αναλύθηκε προηγουμένως. Μόλις ολοκληρωθεί το επίπεδο, η πλήρωση αρχίζει στο τέλος του φαραγγιού και τελειώνει στην κορυφή του στομίου. Αυτή η πρακτική αποτρέπει τη συσσώρευση του ύδατος πίσω από τη χωματερή. Τα απόβλητα συνήθως τοποθετούνται στο βάθος των φαραγγιών και από εκεί ωθούνται προς τα πάνω κόντρα στην είσοδο του φαραγγιού σε μια κλίση περίπου 2 προς 1. Κατ' αυτό τον τρόπο, μπορεί να επιτευχθεί ένας υψηλός βαθμός συμπίεσης.

Οι κοίλες περιοχές και τα λατομεία είναι σχεδόν πάντα χαμηλότερα από την περιβάλλουσα έκταση. Έτσι ο έλεγχος της ξηρότητας της επιφάνειας είναι συχνά ο

κρίσιμος παράγοντας για την ανάπτυξη τέτοιων περιοχών. Όπως με τα φαράγγια, έτσι και οι περιοχές κοιλωμάτων και λατομείων δουλεύουν σε πολλαπλά επίπεδα και η μέθοδος λειτουργίας τους είναι ουσιαστικά η ίδια. Το κλειδί για την επιτυχή χρήση των κοιλωμάτων ή των λατομείων είναι η διαθεσιμότητα επαρκούς υλικού κάλυψης για να καλύψει τα μεμονωμένα επίπεδα καθώς αυτά ολοκληρώνονται και για να παρέχουν τελική κάλυψη πάνω από όλη τη χωματερή όταν επιτυγχάνεται το τελικό ύψος. Λόγω της τακτοποίησης, είναι συνήθως επιθυμητό να πληρωθούν οι περιοχές κοιλωμάτων και λατομείων σε ένα επίπεδο ελαφρώς πάνω από αυτό της περιβάλλουσας έκτασης.

3.13 Αντιδράσεις που Λαμβάνουν Χώρα στους Ολοκληρωμένους Χ.Υ.Τ.Α.

Για να προγραμματιστούν και να σχεδιαστούν οι Χ.Υ.Τ.Α. αποτελεσματικά, είναι σημαντικό να γίνει κατανοητό τι γίνεται μέσα σε μια χωματερή αφότου έχουν ολοκληρωθεί όλες οι διαδικασίες ταφής. Τα στερεά απόβλητα που τοποθετούνται στις χωματερές υποβάλλονται σε διάφορες βιολογικές, φυσικές, και χημικές αλλαγές ταυτοχρόνως. Οι πλέον αξιοσημείωτες από αυτές τις αλλαγές είναι οι ακόλουθες:

- η βιολογική αποσύνθεση του οργανικού υλικού, αερόβια ή αναερόβια, με τη δημιουργία αερίων και υγρών,
- η χημική οξείδωση των υλικών,
- η διαφυγή των αερίων από το χώρο της ταφής και η πλευρική διάχυση των αερίων μέσω της ταφής,
- η μετακίνηση των υγρών που προκαλείται από τις διάφορες πιέσεις ,
- η εκχύλιση των οργανικών και ανόργανων υλικών από την οσμωτική συγκέντρωση και
- η ανώμαλη καθίζηση που προκαλείται από τη συμπύκνωση και μείωση των κενών του υλικού

Η αποσύνθεση και η σταθεροποίηση στις χωματερές εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως το είδος των αποβλήτων, ο βαθμός συμπίεσης, το ποσοστό της υγρασίας, την παρουσία υλικών παρεμπόδισης, το ποσοστό της μετακίνησης των υδάτων και τέλος τη θερμοκρασία.

Λόγω του μεγάλου αριθμού αλληλεπιδράσεων, είναι δύσκολο να καθοριστούν οι συνθήκες που θα υπάρξουν σε μια χωματερή σε κάποιο συγκεκριμένο χρόνο. Γενικά, μπορεί να ειπωθεί ότι τα ποσοστά χημικών και βιολογικών αντιδράσεων στους Χ.Υ.Τ.Α. αυξάνονται ανάλογα με τη θερμοκρασία και το ποσοστό υγρασίας μέχρι ένα

ανώτερο όριο σε κάθε περίπτωση. Η αποσύνθεση, ο σχηματισμός των αερίων και η εκχύλιση, καθώς επίσης η καθίζηση και τα ομικά χαρακτηριστικά των Χ.Υ.Τ.Α. περιγράφονται περαιτέρω παρακάτω.

3.13.1 Αποσύνθεση

Τα οργανικά βιοαποικοδομήσιμα συστατικά στα στερεά απόβλητα αρχίζουν να υποβάλλονται σε βακτηριακή αποσύνθεση μόλις τοποθετούνται στον Χ.Υ.Τ.Α. Αρχικά, η βακτηριακή αποσύνθεση εμφανίζεται υπό αεροβικές συνθήκες, επειδή ένα ορισμένο ποσό αέρα είναι παγιδευμένο μέσα στη χωματερή. Εντούτοις, το οξυγόνο στον παγιδευμένο αέρα εξαντλείται γρήγορα, με αποτέλεσμα να προχωρά η αναερόβια αποδόμηση των οργανικών ενώσεων.

Το συνολικό ποσοστό στο οποίο τα οργανικά υλικά αποσυντίθενται εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά τους και, σε μεγάλο βαθμό, από την περιεκτικότητα σε υγρασία. Γενικά, τα οργανικά υλικά που υπάρχουν στα αστικά στερεά απόβλητα μπορούν να διαιρεθούν σε τρεις σημαντικές κατηγορίες:

- εκείνα που περιέχουν κυτταρίνη ή τα παράγωγά της
- εκείνα που δεν περιέχουν κυτταρίνη ή τα παράγωγά της και
- τα πλαστικά, το λάστιχο και το δέρμα.

Η κυτταρίνη είναι ένα σημαντικό συστατικό των οργανικών αποβλήτων, όπως είναι τα χαρτιά και τα παλιά ρούχα. Με εξαίρεση τα πλαστικά, οι κύριες μη κυτταρικές οργανικές ουσίες είναι οι πρωτεΐνες, οι υδατάνθρακες, και τα λίπη. Τα ορυκτά άλατα σε πολύ περιορισμένες ποσότητες και η υγρασία σχεδόν πάντα συνδέονται με αυτά τα υλικά. Τα πλαστικά που μπορούν να βρεθούν στα στερεά απόβλητα είναι τόσα πολλά και σε τόσο μεγάλη ποικιλία ώστε κανένας γενικός κατάλογος δεν είναι δυνατό να υπάρξει με αυτό το αντικείμενο.

Με τα ανωτέρω απόβλητα, τα κύρια τελικά προϊόντα της αναερόβιας αποσύνθεσης είναι μερικώς σταθεροποιημένα οργανικά υλικά, ενδιάμεσα πτητικά οργανικά οξέα, και διάφορα αέρια (συμπεριλαμβανομένου του διοξειδίου του άνθρακα, του μεθανίου, του αζώτου και του υδρογόνου). Υπό κανονικές συνθήκες το ποσοστό αποσύνθεσης, όπως μετριέται από την παραγωγή αερίου, φθάνει σε ένα ανώτατο σημείο μέσα στα πρώτα 2 έτη και έπειτα σιγά σιγά ελαττώνεται και συνεχίζεται σε πολλές περιπτώσεις για μια περίοδο μέχρι 25 έτη ή και περισσότερο, Εάν η υγρασία δεν προστίθεται στα απόβλητα σε μια καλά συμπιεσμένη χωματερή, είναι συνηθισμένο το φαινόμενο να βρίσκονται τα

υλικά στην αρχική τους μορφή πολλά χρόνια μετά την ταφή τους.

3.13.2 Αέρια

Τα αέρια που εκλύονται από τους Χ.Υ.Τ.Α. περιλαμβάνουν αέρα, αμμωνία, διοξείδιο του άνθρακα, μονοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο, υδρόθειο, μεθάνιο, άζωτο, και οξυγόνο. Το διοξείδιο του άνθρακα και το μεθάνιο είναι τα κύρια αέρια που παράγονται από την αναερόβια αποσύνθεση των οργανικών τμημάτων των στερεών αποβλήτων. Το υψηλό αρχικό ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα είναι το αποτέλεσμα της αναερόβιας αποσύνθεσης. Η αερόβια αποσύνθεση συνεχίζει να εμφανίζεται έως ότου μειωθεί το οξυγόνο στον αέρα που είχε αρχικά εμφανισθεί στα συμπιεσμένα απόβλητα. Από εκεί και πέρα, η αποσύνθεση προχωράει αναερόβια. Όπως φαίνεται, από μετρήσεις που έχουν γίνει, μετά από περίπου 18 μήνες η σύνθεση του αερίου παραμένει σταθερή. Εάν η χωματερή δεν αερίζεται, θα αναμενόταν ότι το ποσοστό του μεθανίου θα αυξανόταν μακροπρόθεσμα, επειδή το διοξείδιο του άνθρακα θα διαχεόταν στα στρώματα κάτω από τη χωματερή.

Ο όγκος των αερίων που απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια της αναερόβιας αποσύνθεσης μπορεί να υπολογιστεί με διάφορους τρόπους. Μια από τις μεθόδους είναι να υποθεθεί ότι: 1) το πτητικό μέρος του συνολικού οργανικού φορτίου των αποβλήτων είναι περίπου 95% , 2) το 50% του πτητικού υλικού είναι άνθρακας, και 3) ο μισός άνθρακας καταλήγει σε μεθάνιο και ο άλλος μισός σε διοξείδιο του άνθρακα. Και στις δύο μεθόδους, πρέπει να υποθέσουμε ότι κάποιο ποσοστό του οργανικού υλικού δεν αποσυντίθεται.

3.13.3 Υγρά Στραγγίσματα

Το στράγγισμα μπορεί να οριστεί ως το υγρό που έχει διηθηθεί μέσω των στερεών αποβλήτων και έχει εξαγάγει διαλυμένα ή ανασταλμένα υλικά από αυτή. Στους περισσότερους Χ.Υ.Τ.Α το μεγαλύτερο τμήμα του στραγγίσματος προέρχεται από το υγρό που παράγεται από την αποσύνθεση των αποβλήτων και το υγρό που έχει εισαχθεί στη χωματερή από εξωτερικούς παράγοντες, όπως είναι η αποξήρανση, οι βροχοπτώσεις, τα υπόγεια νερά και τα επιφανειακά ύδατα που προέρχονται από υπόγεια ρεύματα.

Όταν το στράγγισμα διηθείται μέσω των στερεών αποβλήτων που υποβάλλονται σε αποσύνθεση, διαλύει τόσο βιολογικά υλικά όσο και χημικά συστατικά. Η σειρά των

τιμών συγκέντρωσης για τα διάφορα συστατικά είναι μάλλον ακραία. Για αυτόν τον λόγο, καμία μέση αξία δεν μπορεί να δοθεί για τα εκχυλίσματα.

Γενικά, έχει διαπιστωθεί ότι η ποσότητα των στραγγισμάτων είναι συνάρτηση της ποσότητας του νερού που εισέρχεται στη χωματερή. Στην πραγματικότητα, εάν η χωματερή κατασκευάζεται κατάλληλα, η παραγωγή των εκχυλισμάτων μπορεί να περιορισθεί. Όταν η ιλύς καθαρισμού λυμάτων πρόκειται να προστεθεί στα στερεά απόβλητα για να αυξηθεί το ποσό μεθανίου που παράγεται, πρέπει να δημιουργηθούν παράλληλα και εγκαταστάσεις ελέγχου εκχυλισμάτων. Υπό κανονικές συνθήκες, τα υγρά εκχυλίσματα βρίσκονται στο κατώτατο σημείο των Χ.Υ.Τ.Α. Από εκεί η μετακίνησή τους γίνεται μέσω των υποκείμενων στρωμάτων, αν και κάποια πλευρική μετακίνηση μπορεί επίσης να εμφανιστεί, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος υλικού.

3.14 Έλεγχος της Κίνησης των Αερίων και των Εκχυλισμάτων

Υπό ιδανικές συνθήκες, τα αέρια που παράγονται στις χωματερές πρέπει είτε να απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα ή (στους μεγαλύτερους Χ.Υ.Τ.Α.) να συλλεχθούν για την παραγωγή ενέργειας. Το υγρό εκχύλισμα πρέπει είτε να ανακυκλωθεί στον Χ.Υ.Τ.Α. ή να οδηγηθεί σε μονάδες βιολογικού καθαρισμού. Δυστυχώς, αυτές οι συνθήκες επικρατούν μόνο σε μερικούς σύγχρονους Χ.Υ.Τ.Α., και έτσι η μετανάστευση εκχυλισμάτων και η μετακίνηση αερίων στις ανεξέλεγκτες χωματερές είναι ένα σημαντικό πρόβλημα.

3.15 Κίνηση Αερίων

Στις περισσότερες περιπτώσεις, πάνω από το 90% του αερίου που παράγεται από την αποσύνθεση των στερεών αποβλήτων αποτελείται από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Όταν το μεθάνιο είναι παρόν στον αέρα στις συγκεντρώσεις μεταξύ 5 και 15 τοις εκατό, είναι εκρηκτικό. Εντούτοις, δεν υπάρχει οξυγόνο στον Χ.Υ.Τ.Α. όταν οι συγκεντρώσεις μεθανίου φθάνουν σε αυτό το κρίσιμο επίπεδο, και έτσι δεν υπάρχει κανένας κίνδυνος έκρηξης. Αν και το μεγαλύτερο μέρος του μεθανίου διαρρέει στην ατμόσφαιρα, τόσο το μεθάνιο όσο και το διοξείδιο του άνθρακα έχουν βρεθεί σε συγκεντρώσεις μέχρι 40% σε αποστάσεις μέχρι 120m. από τις άκρες των Χ.Υ.Τ.Α. Για τις χωματερές, η έκταση αυτής της πλευρικής μετανάστευσης ποικίλλει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του υλικού κάλυψης και του περιβάλλοντος εδάφους. Εάν το μεθάνιο απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα κατά τρόπο ανεξέλεγκτο, μπορεί να συσσωρευτεί

(επειδή η συγκεκριμένη πυκνότητά του είναι λιγότερο από αυτή του αέρα) κάτω από κτίρια ή σε άλλες κλειστές περιοχές μέσα ή κοντά σε ένα χώρο υγειονομικής ταφής.

Με τον κατάλληλο εξαερισμό, το μεθάνιο δεν θα πρέπει να δημιουργεί κανένα πρόβλημα. Το διοξείδιο του άνθρακα, από τη άλλη, είναι ενοχλητικό λόγω της πυκνότητάς του. Το CO₂ είναι περίπου 1,5 φορές πυκνότερο από τον αέρα και 2,8 φορές πυκνότερο από το μεθάνιο και επομένως τείνει να κινηθεί προς το κατώτατο σημείο της χωματερής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στις χαμηλότερες βαθμίδες να είναι συνήθως υψηλή για χρόνια.

Τελικά, λόγω της πυκνότητάς του, το διοξείδιο του άνθρακα θα κινηθεί επίσης προς τα κάτω έως ότου φθάσει στα υπόγεια νερά. Επειδή το διοξείδιο του άνθρακα είναι εύκολα διαλυτό στο νερό, συνήθως μειώνει το pH, το οποίο μπορεί στη συνέχεια να αυξήσει τη σκληρότητα και το ορυκτό περιεχόμενο των υπόγειων νερών μέσω της διαλυτότητας.

3.15.1 Έλεγχος της Κίνησης Αερίων

Η πλευρική μετακίνηση των αερίων που παράγονται στις χωματερές μπορεί να ελεγχθεί με τη δημιουργία διεξόδων που κατασκευάζονται από υλικά που είναι πιο διαπερατά από το περιβάλλον έδαφος. Χαρακτηριστικά, οι διέξοδοι αερίου κατασκευάζονται από αμμοχάλικο. Το διάστημα των διεξόδων εξαρτάται από το πλάτος των κομματιών των αποβλήτων αλλά συνήθως ποικίλλει από 18 έως 61m. Το πάχος του στρώματος αμμοχάλικου πρέπει να είναι τέτοιο που θα παραμείνει συνεχές ακόμα κι αν μπορεί να υπάρξει διαφορική καθίζηση και θα είναι 30 έως 46 cm. Οι διέξοδοι με εμπόδια μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να ελέγξουν την πλευρική μετακίνηση των αερίων. Οι καλές διέξοδοι χρησιμοποιούνται συχνά από κοινού με τις διεξόδους των πλευρικών επιφανειών που θάβονται στο βυθό σε μια τάφρο αμμοχάλικου.

Όπου χρησιμοποιούνται οι διατάξεις αερισμού, εγκαθίστανται συνήθως οι καυστήρες αποβλήτων. Το ύψος του καυστήρα αποβλήτων μπορεί να ποικίλει από

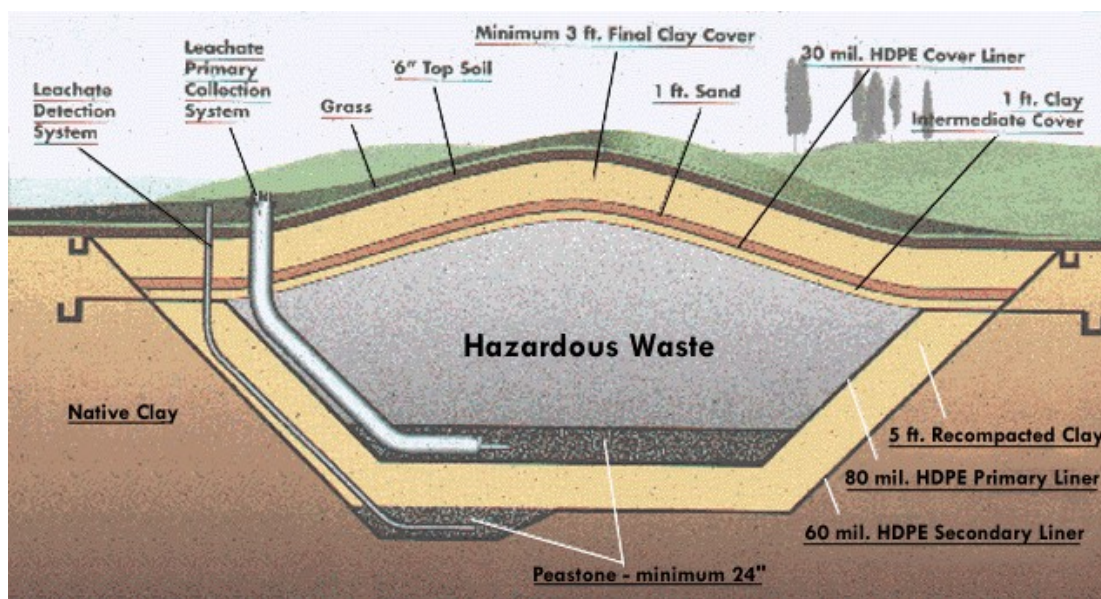
3 έως 6m επάνω από την ολοκληρωμένη επιφάνεια του Χ.Υ.Τ.Α.

Ο έλεγχος της από κάτω μετακίνησης των αερίων μπορεί να ολοκληρωθεί με την εγκατάσταση των διάτρητων σωλήνων στο στρώμα αμμοχάλικου στο κατώτατο σημείο του Χ.Υ.Τ.Α. Εάν τα αέρια δεν μπορούν να απελευθερωθούν πλευρικά, ίσως να είναι απαραίτητο να εγκατασταθούν φρεάτια αερίου και από εκεί να βγει το αντλημένο αέριο στην ατμόσφαιρα. Ένα στρώμα αμμοχάλικου χρησιμοποιείται συχνά από κοινού με μια

ή περισσότερες από τις στεγανές μεθόδους ελέγχου.

3.15.2 Έλεγχος της Κίνησης των Αερίων με τις Στεγανές Μεθόδους

Η μετακίνηση των αερίων των Χ.Υ.Τ.Α. μέσω των παρακείμενων εδαφολογικών σχηματισμών μπορεί να ελεγχθεί με την κατασκευή φραγμάτων από υλικά που είναι πιο στεγανά από το έδαφος. Η πιο κοινή στεγανωτική ουσία στους Χ.Υ.Τ.Α. για αυτήν την χρήση είναι η συμπιεσμένη άργιλος. Το πάχος ποικίλει ανάλογα με τον τύπο της αργίλου και το βαθμό ελέγχου που απαιτείται. Το πάχος που έχει χρησιμοποιηθεί κυμαίνεται από 15 έως 121 cm. Εάν χρησιμοποιείται στεγάνωση πυθμένα με άργιλο, πρέπει να κατασκευαστεί γεμίζοντας τον Χ.Υ.Τ.Α. προοδευτικά για να αποφευχθεί η ξήρανσή της από τον αέρα, η οποία οδηγεί στη ρωγμάτωση της αργίλου. Μια άλλη αποτελεσματική μέθοδος είναι να εγκατασταθεί στρώμα αργίλου αρχικά και στη συνέχεια να καλυφθεί με 0.30 m ή περισσότερο καλά συμπιεσμένο χώμα. Η εγκατάσταση στεγανών φραγμών είναι ιδιαίτερης σπουδαιότητας όπου το αέριο των Χ.Υ.Τ.Α. πρόκειται να ανακτηθεί.



Σχήμα 3.5. Τελική Μορφή Ενός Πλήρως Αποκατεστημένου Χ.Υ.Τ.Α.

3.16 Έλεγχος της Μετακίνησης των Στραγγισμάτων

Δεδομένου ότι τα στραγγίσματα διηθούνται μέσω των υποκειμένων στρωμάτων, πολλά από τα χημικά και βιολογικά συστατικά που συνήθως περιέχονται σε αυτά θα

αφαιρεθούν με το φιλτράρισμα και την προσροφητική δράση του υλικού που συνθέτει τα στρώματα. Γενικά, η έκταση αυτής της δράσης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των χωμάτων, ειδικά από την περιεκτικότητα σε άργιλο. Σε μερικά συστήματα ανάκτησης αερίου, αυτό το εκχύλισμα συλλέγεται και ανακυκλώνεται στην κορυφή της χωματερής και επανεισάγεται μέσω των διάτρητων σωλήνων που βρίσκονται στις τάφρους αποξηράνσεων. Συγκεκριμένα, το ποσοστό παραγωγής αερίου είναι μεγαλύτερο στα συστήματα επανακυκλοφορίας εκχυλισμάτων. Τελικά, ανεξάρτητα από το σύστημα που χρησιμοποιείται, μπορεί να είναι απαραίτητο να συλλεχθεί και να επεξεργασθεί όλο το υγρό εκχύλισμα. σημαντικός στον έλεγχο των στραγγισμάτων είναι ο περιορισμός της κατείδυσης των επιφανειακών υδάτων, η οποία συνεισφέρει τα μέγιστα στο συνολικό όγκο των υγρών εκχυλισμάτων. Με τη χρήση ενός στρώματος αργίλου ως υλικού κάλυψης και κατάλληλης κλίσης επιφάνειας (1 έως 2 %), η κατείδυση νερού μπορεί να ελεγχθεί αποτελεσματικά.

3.17 Σχέδιο Λειτουργίας των Χ.Υ.Τ.Α.

Το σχεδιάγραμμα της περιοχής και η ανάπτυξη ενός εφαρμόσιμου προγράμματος λειτουργίας είναι τα κύρια χαρακτηριστικά γνωρίσματα του σχεδίου λειτουργίας ενός Χ.Υ.Τ.Α.

3.17.1 Σχεδιάγραμμα Περιοχής

Στον προγραμματισμό του σχεδιαγράμματος μιας περιοχής Χ.Υ.Τ.Α., πρέπει να είναι καθορισμένη η θέση των:

- 1) δρόμων πρόσβασης,
- 2) αποθήκη φύλαξης εξοπλισμού,
- 3) κλιμάκων, εάν χρησιμοποιούνται,
- 4) περιοχών αποθήκευσης για τα κοινωνικά απόβλητα,
- 5) περιοχών αποθεμάτων των υλικών ταφής,
- 6) περιοχών ταφής, και
- 7) των ήδη φυτεμένων περιοχών

3.17.2 Λειτουργικό Σχέδιο

Οι παράγοντες που πρέπει να εξεταστούν στην ανάπτυξη των λειτουργικών προγραμμάτων περιλαμβάνουν :

- 1) τη συχνότητα αφίξεων των οχημάτων συλλογής,
- 2) τα σχέδια κυκλοφορίας ανά περιοχή,
- 3) τη συχνότητα που ακολουθείται στις διαδικασίες γεμίματος,
- 4) την επιρροή του αέρα και άλλων κλιματολογικών όρων, και
- 5) την εμπορική και δημόσια πρόσβαση.

Για παράδειγμα, λόγω της κυκλοφορίας βαριών φορτηγών τις πρώτες πρωινές ώρες , μπορεί να είναι απαραίτητο να περιοριστεί η δημόσια πρόσβαση στην περιοχή μέχρι αργότερα το πρωί. Επίσης, λόγω των δυσμενών καιρικών συνθηκών το χειμώνα, η συχνότητα πλήρωσης πρέπει να είναι τέτοια ώστε οι εργασίες στη χωματερή να μην παρενοχλούνται.

3.17.3 Σχέδιο Ταφής Στερεών Αποβλήτων

Μόλις σχεδιασθεί το γενικό σχεδιάγραμμα της περιοχής του Χ.Υ.Τ.Α., θα πρέπει να επιλεχθεί η μέθοδος τοποθέτησης που θα χρησιμοποιηθεί και να σχεδιασθούν οι μεμονωμένες μονάδες ταφής των στερεών αποβλήτων. Η συγκεκριμένη μέθοδος θα εξαρτηθεί από τα χαρακτηριστικά της περιοχής, όπως το ποσό διαθέσιμου υλικού κάλυψης, η τοπογραφία, και οι τοπικές υδρογεωλογικές συνθήκες. Για να αξιολογηθούν τα μελλοντικά αναπτυξιακά προγράμματα, είναι απαραίτητο να προετοιμαστεί ένα λεπτομερές σχέδιο για το σχεδιάγραμμα των μεμονωμένων κομματιών ταφής των στερεών αποβλήτων.

Βάσει των χαρακτηριστικών της περιοχής ή της μεθόδου λειτουργίας (π.χ. συγκομιδή αερίων), μπορεί να είναι απαραίτητο να ενσωματωθούν τα ειδικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα για τον έλεγχο της μετακίνησης των αερίων και των εκχυλισμάτων στη χωματερή. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν τη χρήση αγωγών άμμου, πλαστικών ταινιών ή/και αργιλικών υλικών.

3.17.4 Απαιτήσεις Εξοπλισμού

Ο τύπος εξοπλισμού που έχει χρησιμοποιηθεί στου Χώρους Υγειονομικής Ταφής

Απορριμμάτων περιλαμβάνει τόσο τρακτέρ με λαστιχένιες ρόδες όσο και μεταλλικές «ξύστρες», συμπίεστες, graders κ.λ.π.. Από αυτά, συνηθέστερα χρησιμοποιούνται η αντιολισθητική αλυσίδα ή τα τρακτέρ με λάστιχα. Κατάλληλα εξοπλισμένοι τράκτορες μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να εκτελεστούν όλες οι απαραίτητες διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα σε μια χωματερή, συμπεριλαμβανομένων την εξάπλωση, τη συμπίεση, την κάλυψη, ακόμη και τη μεταφορά. Η επιλογή μεταξύ τρακτέρ ή grader πρέπει να βασιστεί σε μια ανάλυση των τοπικών συνθηκών.

Το μέγεθος και το ποσό του εξοπλισμού εξαρτάται πρώτιστα από το μέγεθος και τη λειτουργία της χωματερής. Οι τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζουν εξίσου το μέγεθος του εξοπλισμού.



Εικόνα 3.1. Χώρος υγειονομικής ταφής αστικών απορριμμάτων

4. ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ

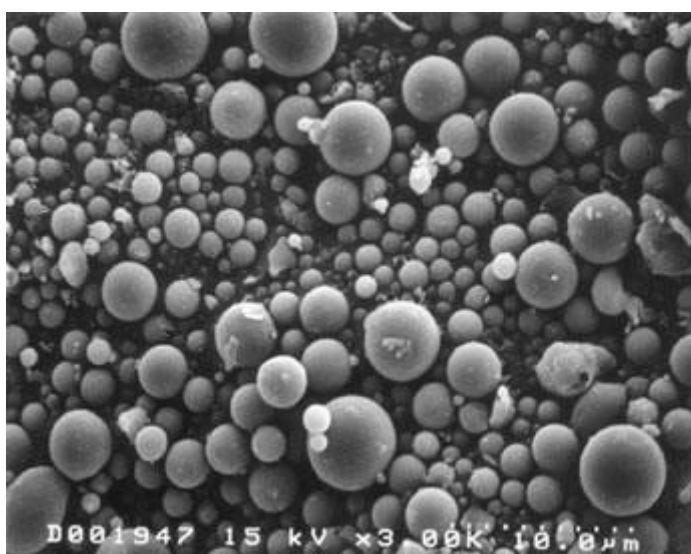
4.1 Γενικά

Η Ιπτάμενη τέφρα αποτελεί είναι στερεό και κονιώδες υλικό το οποίο παράγεται κατά την καύση των κονιοποιημένων στερεών καυσίμων (λιθάνθρακες, λιγνίτες, τύρφη) στους λέβητες των θερμοηλεκτρικών σταθμών (ΘΗΣ). Στη συνέχεια, συμπαρασύρεται από το ρεύμα των καυσαερίων και συλλέγεται στις εγκαταστάσεις αποκονίωσης (ηλεκτροστατικά φίλτρα).

Η τέφρα αυτή χωρίζεται γενικά σε δύο κατηγορίες:

- Στην Τέφρα Βάσης ή Υγρή Τέφρα (bottom ή wet ash), που αποτελείται από συσσωματώματα άκαυστου καυσίμου και ανόργανα υπολείμματα της καύσης που καταπίπτουν στην τεφρολεκάνη κάτω από την εστία.
- Στην Ιπτάμενη Τέφρα (fly ash), που αποτελείται από τα υπολείμματα της καύσης που συμπαρασύρονται από τα καυσαέρια. Η Ιπτάμενη Τέφρα κατακρατείται σε πολύ μεγάλο ποσοστό, έως και πάνω από 99%, από τις συσκευές κατακράτησης σωματιδίων.

Τα στερεά σωματίδια που διαφεύγουν από τα φίλτρα και εκπέμπονται από τις καπνοδόχους στο περιβάλλον αποτελούν την τέφρα καπναερίων, η οποία αποτελεί ένα μικρό κλάσμα της παραγόμενης Ιπτάμενης Τέφρας.



Εικόνα 4.2. Μορφή ιπτάμενης τέφρας

Η καύση στερεών ορυκτών καυσίμων αποτελεί μια από τις κυριότερες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας ανά τον πλανήτη. Η ετήσια εξόρυξη στερεών καυσίμων παγκοσμίως φτάνει τους 3.8 Gt (IAEA 2003). Η ετήσια παραγωγή Τέφρας εκτιμάται στους 600 Mt, από τα οποία 500 Mt περίπου είναι Ιπτάμενη Τέφρα (Joshi 1997).

Ήδη από το 1914 έχει διαπιστωθεί ότι η Ιπτάμενη Τέφρα εμφανίζει ποζολανικές ιδιότητες και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετο στην παραγωγή τσιμέντου (Joshi 1997). Η ποζολάνη είναι ένα πυριτικό ή αργιλικό υλικό το οποίο αν και μόνο του δεν έχει υδραυλικές ιδιότητες, όταν αλεσθεί και παρουσία νερού αντιδρά με την υδράσβεστο που προκύπτει από τις αντιδράσεις ενυδάτωσης των κύριων συστατικών του τσιμέντου σε συνθήκη θερμοκρασία και σχηματίζει ενώσεις που έχουν υδραυλικές ιδιότητες. Οι υδραυλικές ιδιότητες είναι οι ιδιότητες που έχουν ορισμένα υλικά, όπως για παράδειγμα το τσιμέντο, να σχηματίζουν κάτω από την επίδραση νερού σταθερές ένυδρες ενώσεις που είναι ελάχιστα υδατοδιαλυτές και έχουν μεγάλη συνάφεια μεταξύ των και με τα αδρανή (Τσίμας 1999).

Από τότε και μέχρι σήμερα η Ιπτάμενη Τέφρα έχει χρησιμοποιηθεί αυτούσια ή ως πρόσθετο σε πολλές εφαρμογές. Ορισμένες από τις σημαντικότερες εφαρμογές της είναι:

- Σε δομικές κατασκευές, σαν πρόσθετο στην παραγωγή τσιμέντων και μπετόν, λίνθων και κεραμικών ειδών.
- Στην οδοποιία, για τη θεμελίωση οδοστρωμάτων, ως αδρανές υλικό και σε ειδικά κονιάματα.
- Στη βιομηχανία πλαστικών και χρωμάτων, ως φορέας καταλυτών.
- Στη γεωργία, για την εξουδετέρωση όξινων εδαφών και εμπλουτισμό με ιχνοστοιχεία
- Στη φυσική αποθείωση καυσαερίων.
- Στην κατεργασία υγρών βιομηχανικών απόβλητων, όπως για παράδειγμα στην κατακρήμνιση μολύβδου.
- Στην σταθεροποίηση και στεγανοποίηση εδαφών
- Σαν υλικό πλήρωσης κενών σε διάφορα έργα
- Σαν υδραυλικό συνδετικό υλικό σε μίγμα με CaO

- Στην κατασκευή ελαφροβαρών τσιμεντολίθων και αδρανών
- Στο αεριομετόν και ασφαλτομετόν
- Στην κεραμική και πλινθοποιία
- Στην ανάκτηση ιχνοστοιχείων (Ge,V,Ga,Ni κ.α.)
- Στη χημεία για προσροφητικές και καταλυτικές δράσεις
- Στην κατασκευή κυλινδρούμενου σκυροδέματος

Από όσα αναφέρθηκαν φαίνεται ότι έχει διαπιστωθεί μεγάλο εύρος τεχνικών δυνατοτήτων αξιοποίησης της ιπτάμενης τέφρας, και έτσι σήμερα οι ερευνητικές προσπάθειες στρέφονται περισσότερο προς την αξιοποίηση των ήδη γνωστών και λιγότερο στην εξεύρεση νέων εφαρμογών



Εικόνα 4.3. Πλίνθοι ιπτάμενης τέφρας

4.2 Ιπτάμενη Τέφρα στην Ελλάδα

Οι λιγνιτικοί σταθμοί καλύπτουν σήμερα περισσότερο από το 65% των εγχώριων ενεργειακών απαιτήσεων. δύο κύρια λιγνιτικά πεδία είναι υπό εκμετάλλευση στην Ελλάδα:

- Το λιγνιτικό πεδίο Πτολεμαΐδας - Αμύνταιου στην Βόρεια Ελλάδα με εκτιμώμενα αποθέματα λιγνίτη περίπου 2700Mt, όπου βρίσκονται εγκατεστημένοι πέντε σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με 17 Μονάδες και συνολική εγκατεστημένη ισχύς 4000MW.

- Το λιγνιτικό πεδίο Μεγαλόπολης, με εκτιμώμενα αποθέματα λιγνίτη περίπου 370Mt, όπου βρίσκονται εγκατεστημένοι δύο σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με 4 Μονάδες και συνολική εγκατεστημένη ισχύ 850MW. Η συνολική παραγωγή Ιπτάμενης Τέφρας από τους σταθμούς αυτούς φθάνει τους 10 Mt ετησίως, από τους οποίους το 80% περίπου προέρχεται από το λιγνιτικό πεδίο Πτολεμαΐδας (Skodras 2007).

Το μεγαλύτερο ποσοστό από την Ιπτάμενη Τέφρα που παράγεται στην Ελλάδα καταλήγει σε οργανωμένες αποθέσεις, συνήθως σε εξαντλημένα ορυχεία. Οι προσπάθειες για την αξιοποίηση των ελληνικών ιπτάμενων τεφρών και των δύο πεδίων ξεκίνησαν την δεκαετία του '70. Οι ερευνητικές προσπάθειες από τότε μέχρι σήμερα σε μεγάλο βαθμό αφορούν την αξιοποίηση των ιπτάμενων τεφρών των ενεργειακών σταθμών της Δυτικής Μακεδονίας η καθώς παράγουν το μεγαλύτερο ποσοστό ιπτάμενης τέφρας.

Μικρό ποσοστό της παραγόμενης τέφρας, το οποίο δεν ξεπερνά το 20%, απορροφάται από τη βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου.

Οι προτάσεις για την αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας Πτολεμαΐδας αφορούν στη χρησιμοποίηση της σαν υδραυλικό υλικό σε πρόσμιξη με κλίνκερ τσιμέντου εφ' όσον έχει λόγο $\text{CaO} / \text{SiO}_2 \geq 1$ και συνεπώς παρουσιάζει υδραυλικές ιδιότητες.

Επίσης χρησιμοποιήθηκε (1995-1997) σαν κυλινδρούμενο σκυρόδεμα στην κατασκευή από τη Δ.Ε.Η. του φράγματος της Πλατανόβρυσης (Δράμα).

4.3 Χαρακτηριστικά της Ιπτάμενης Τέφρας Πτολεμαΐδας

4.3.1 Χημική σύσταση

Η Ιπτάμενη Τέφρα αποτελείται από πλήθος συστατικών, τα κυριότερα των οποίων είναι οξείδια του Πυριτίου, του Αλουμινίου, του Σιδήρου και του Ασβεστίου (Joshi 1997). Τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται η τέφρα μπορούν να χωριστούν σε:

- Κύρια στοιχεία, με κατά βάρος περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 1%.
- Δευτερεύοντα στοιχεία, με κατά βάρος περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 0,1%-1%.
- Ιχνοστοιχεία με κατά βάρος περιεκτικότητα μικρότερη από 0,1%.

Επισημαίνεται ότι η σύσταση της Ιπτάμενης Τέφρας εμφανίζει μεγάλη μεταβλητότητα,

τόσο λόγω διαφοροποιήσεων στη σύσταση του αρχικού καυσίμου όσο και λόγω των διαφορών μεθόδων και συνθηκών καύσης.

4.3.2 Κατάταξη Ιπταμένων Τεφρών

Η βασική διάκριση των Ιπτάμενων Τεφρών. αφορά την χημική σύστασή τους η οποία εξαρτάται από το είδος του χρησιμοποιούμενου καυσίμου και από την ορυκτολογική σύσταση των γαιωδών προσμίξεων που συνοδεύουν το καύσιμο στην εξόρυξη.

Γενικά οι συγκεντρώσεις των οξειδίων που αποτελούν τις τέφρες μετά την καύση του περιεχόμενου άνθρακα και την διάσπαση των ανθρακικών του στερεού καυσίμου παρουσιάζονται αισθητά αυξημένες στο υλικό (I.T.) από τις αρχικές (στον εξορυσσόμενο λιγνίτη) λόγω συμπύκνωσης (εμπλουτισμού). Αυτό οδήγησε και σε προτάσεις για την αξιοποίηση αρκετών ιπτάμενων τεφρών σαν Α΄ ύλη για την ανάκτηση ιχνοστοιχείων (κυρίως Ge και Ga).

Η βασικότερη διάκριση λόγω της χημικής σύστασης είναι αυτή που προκύπτει από την τιμή του λόγου CaO/SiO_2 που κατατάσσει τις τέφρες σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- α) Τέφρες βασικές ή υψηλής ασβέστου (HA ή Calcareous fly ashes)
- β) Τέφρες όξινης ή χαμηλής ασβέστου (LA ή Siliceous fly ash)

Τέφρες που χαρακτηρίζονται βασικές, έχουν συντελεστή $\text{CaO/SiO}_2 \geq 1$ ενώ τέφρες με $\text{CaO/SiO}_2 < 0.3$ χαρακτηρίζονται ως όξινης. Στην χώρα μας, στους ενεργειακούς σταθμούς της Δυτικής Μακεδονίας παράγονται κατά κανόνα βασικές τέφρες ($\text{CaO/SiO}_2 = 0,86-1,40$), ενώ στους σταθμούς της Μεγαλόπολης όξινης ($\text{CaO/SiO}_2 = 0,25-0,38$).

4.3.3 Κατηγοριοποίηση της Ιπτάμενης Τέφρας

Η σύσταση της Ιπτάμενης Τέφρας παίζει καθοριστικό ρόλο για την περαιτέρω αξιοποίησή της. Για την καλύτερη εκμετάλλευσή της έχουν θεσπιστεί συστήματα ταξινόμησης ως εξής:

- Το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN197-1 (Cement, Composition, Specifications and conformity criteria for low heat common cements) διαχωρίζει τις τέφρες σε δύο μεγάλες κατηγορίες:
 - α) Στις πυριτικές τέφρες (V), οι οποίες περιέχουν λιγότερο από 10% CaO
 - β) Στις ασβεστολιθικές τέφρες (W), η οποίες περιέχουν 10-35% CaO

Οι τέφρες της πρώτης κατηγορίας παρουσιάζουν ποζολανικές ιδιότητες, ενώ της δεύτερης κατηγορίας μπορεί να έχουν και υδραυλικές ιδιότητες.

- Το Αμερικάνικο πρότυπο ASTM C 618 (Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete), με βάση το οποίο οι τέφρες διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

α) Στις τέφρες τύπου N, οι οποίες περιλαμβάνουν ακατέργαστες ποζολάνες με τουλάχιστον 70% SiO₂, Al₂O₃ και Fe₂O₃.

β) Στις τέφρες τύπου F που παράγονται από την καύση ανθρακίτη ή βιτουμειούχου κάρβουνου με τουλάχιστον 70% SiO₂, Al₂O₃ και Fe₂O₃,

γ) Στις τέφρες τύπου C, που είναι εκείνες που παράγονται από την καύση λιγνίτη και ημιβιτουμειούχου κάρβουνου και περιέχουν τουλάχιστον 50% αλλά λιγότερο από 70% SiO₂, Al₂O₃ και Fe₂O₃.

Οι τέφρες τύπου F περιέχουν συνήθως λιγότερο από 5% CaO, ενώ οι τέφρες τύπου C περιέχουν μεγάλη ποσότητα CaO (10-35%).

Οι ελληνικές τέφρες ανήκουν στην κατηγορία των ασβεστολιθικών τεφρών (W) σύμφωνα με το EN197-1 και στην κατηγορία C σύμφωνα με το ASTM C 618, λόγω των υψηλών ποσοστών CaO που περιέχουν (ΙΤΕΣΚ 2008).

4.3.4 Χαρακτηριστικά του χρησιμοποιηθέντος δείγματος.

Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα ήταν ιπτάμενη τέφρα προερχόμενη από το ατμοηλεκτρικό σταθμό Πτολεμαΐδας. Η χημική ανάλυση παρουσιάζεται στον Πίνακα ??1. Όπως φαίνεται από τον πίνακα αυτόν, η ιπτάμενη τέφρα παρουσιάζει πολύ υψηλό ποσοστό CaO και ταξινομείται ως προς το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN197-1 ως τέφρα υψηλής ασβέστου (W) και ως τύπου C κατά το Αμερικανικό πρότυπο ASTM C 618. Επίσης, η ιπτάμενη τέφρα περιέχει 25,15% SiO₂, 5,2 % Fe₂O₃, 11,05% Al₂O₃ και 3,5% MgO, ενώ το περιεχόμενο S είναι επίσης υψηλό

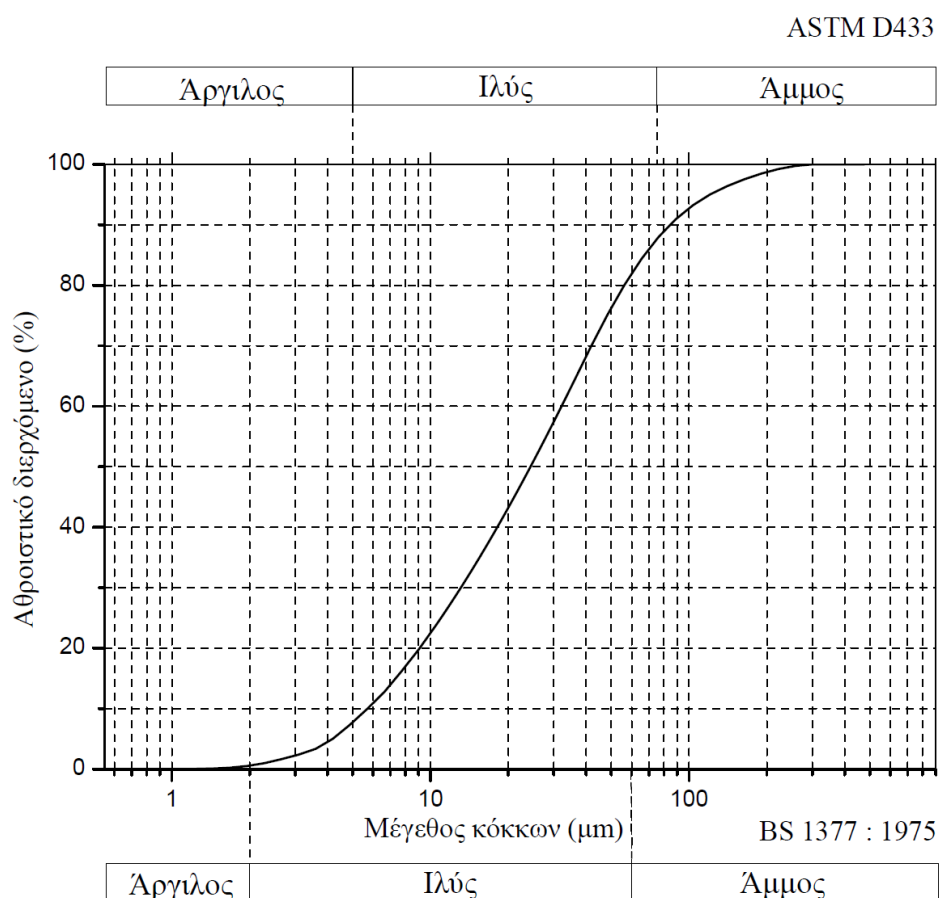
Τα χαρακτηριστικά της δίνονται παρακάτω.

Πίνακας 4.5. Χημική ανάλυση της τέφρας κατά ASTM C-618

SiO ₂ , %	25,15
Fe ₂ O ₃ , %	5,254
Al ₂ O ₃ , %	11,05
CaO, %	38,47
MgO, %	3,544
Na ₂ O, %	0,342
K ₂ O, %	1,27
P ₂ O ₅ , %	0,3434
TiO ₂ , %	0,6275
SO ₃ , %	6,608
Απώλεια πύρωσης	6,422
Ειδικό Βάρος gr/cm ³	2.255

4.3.4.1 Κοκκομετρική ανάλυση

Η κοκκομετρική ανάλυση της ιπτάμενης τέφρας δίδεται στο επόμενο σχήμα



Σχήμα 4.6. Κοκκομετρική κατανομή ιπτάμενης τέφρας

Παρατηρείται ότι το 80% της ιπτάμενης τέφρας είναι ιλύς, το 12% είναι άμμος και το υπόλοιπο 8% είναι άργιλος.

Από την κοκκομετρία ήταν προφανές πως η ιπτάμενη τέφρα πιθανώς να μην επιφέρει μείωση της διαπερατότητας καθώς η ευθρά ιλύς είναι πολύ πιο λεπτόκοκκη. Παρόλα αυτά οι τέφρες αυτού του τύπου έχουν και ποζολανικές αλλά και υδραυλικές ιδιότητες, έτσι αποφασίστηκε να συνεχιστούν οι δοκιμές για τη διερεύνηση πιθανών ευεργετικών αποτελεσμάτων στη διαπερατότητα λόγω αυτών των ιδιοτήτων της τέφρας.

Εξάλλου αποτελεί το μόνο από τα τρία πρόσθετα που είναι επίσης απόβλητο, πράγμα που την κάνει πιο δελεαστική για χρήση από οικονομικής άποψης.

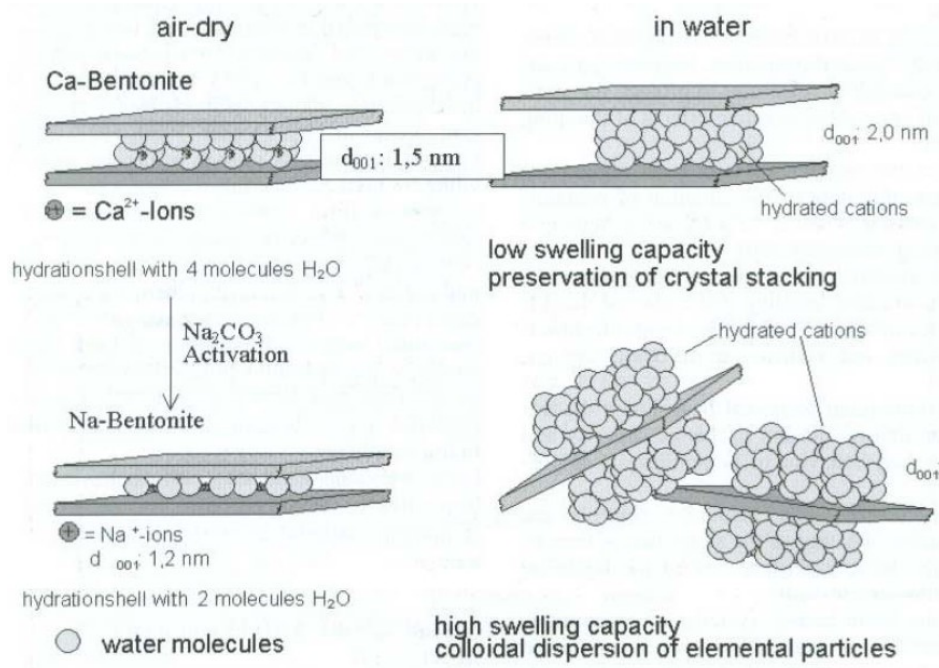
5. ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗΣ

5.1 Ιστορία

Ο μπεντονίτης, γνωστός αρχικά και ως ορυκτό σαπούνι ή σαπωνώδης άργιλος πήρε το όνομά του από την τοποθεσία Fort Benton της πολιτείας Montana των Η.Π.Α., όπου πρωτοανακαλύφθηκε και άρχισε να εξορύσσεται είναι πλαστική άργιλος που προέρχεται από την *in situ* μετατροπή ηφαιστειακής τέφρας. Αποτελείται από ορυκτά της ομάδας των σμεκτιτών, με κύριο συστατικό το ορυκτό του μοντμοριλλονίτη.

Ο μπεντονίτης είναι πλαστική άργιλος που προέκυψε από την αποσάθρωση και τη χημική εξαλλοίωση του υαλώδους ιστού ηφαιστειακών πετρωμάτων, όπως τόφων και ηφαιστειακής σποδού, σε αλκαλικό περιβάλλον. Ορυκτολογικά αποτελείται κυρίως από μοντμοριλλονίτη (που ανήκει στην ευρύτερη ομάδα των ορυκτών του σμεκτίτη), ενώ σε κάποιες περιπτώσεις περιέχει σε μικρή αναλογία μπαϊντελλίτη ή άλλα ορυκτά της ομάδας του μοντμοριλλονίτη και σε κάποιο ποσοστό μη αργιλώδη ορυκτά. Οι πιο συνηθισμένες προσμίξεις του είναι: καολινίτης και άλλα αργιλικά ορυκτά, αλουνίτης, χαλαζίας, χριστοβαλίτης, άστριοι, μοσχοβίτης, πυρόξενοι κ.ά.

Οι κυριότερες ιδιότητές του, που καθορίζουν και τα πεδία εφαρμογής του, είναι: η πλαστικότητα, η μεγάλη ειδική επιφάνεια, η απορροφητικότητα, οι κολλοειδείς ιδιότητες, η θιξοτροπική και ιοντοεναλλακτική ικανότητα, οι στεγανοποιητικές και συνδετικές ιδιότητες. Ο μπεντονίτης είναι το πλέον διογκούμενο αργιλικό υλικό, καθώς ο αρχικός του όγκος μπορεί να αυξηθεί έως και 20 φορές λόγω προσρόφησης νερού.



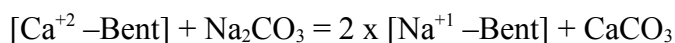
Σχήμα 5.7. Διόγκωση των δύο πιο σημαντικών τύπων μπεντονίτη

Υπάρχουν διάφορα είδη μπεντονίτη, τα πιο ευρέως γνωστά είναι δύο. Ο ένας ονομάζεται διογκούμενος μπεντονίτης ή μπεντονίτης νατρίου και ο άλλος μπεντονίτης ασβεστίου, ή μη διογκούμενος. Ο πρώτος έχει μονή στοιβάδα ενυδάτωσης με το Na⁺ σαν ανταλλάξιμο κατιόν, ο δεύτερος έχει διπλή στοιβάδα με Ca⁺⁺ σαν ανταλλάξιμο κατιόν. Έχει επίσης βρεθεί και τύπος με καμία στοιβάδα ενυδάτωσης και είναι πιθανών ηλεκτροστατικά ουδέτερη. Η απορρόφηση νερού από τον μπεντονίτη νατρίου είναι πολύ μεγαλύτερη από κάθε άλλο αργιλικό υλικό και συνοδεύεται από αύξηση του όγκου του μέχρι και 14 φορές το αρχικό του μέγεθος δημιουργώντας ένα παχύρρευστο τζέλ με εξαιρετικές ιδιότητες, ειδικά σε εφαρμογές όπως οι λάσπες γεωτρυπάνων, ενέματα κλπ. Η διαφορά του μπεντονίτη από τις άλλες αργίλους είναι στη δικτυωτή δομή του. Το φύλλο των ατόμων στο μπεντονίτη είναι πολύ λεπτότερο και πολύ πιο εύκολα διαχωριζόμενο στο νερό, ιδιότητα γνωστή και ως διασπορικότητα και είναι μοναδική για τον μπεντονίτη νατρίου.

5.2 Παραγωγή

Ο τύπος μπεντονίτη που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα εξορύσσεται στη Μηλο και είναι τύπου ασβεστίου που έχει υποστεί ενεργοποίηση και μετατροπή του έτσι σε μπεντονίτη νατρίου με την παρακάτω διαδικασία.

Αμέσως μετά την εξόρυξη ο μπεντονίτης με μέγεθος μέχρι και 1000mm και υγρασία 30% μεταφέρεται απευθείας σε θραυστήρα και υπόκειται σε μείωση μεγέθους με κοκκομετρία -80mm. Η ενεργοποίηση γίνεται με ανθρακικό νάτριο που προστίθεται απευθείας στη ροή του υλικού κατά βάρος. Η διαδικασία της ενεργοποίησης διαρκεί περίπου 15-20 ημέρες με ξήρανση στον ήλιο, η ενεργοποίηση έχει τη μορφή της παρακάτω αντίδρασης



Στόχος είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη ομογενοποίηση του υλικού και ο βέλτιστος υπολογισμός του προστιθέμενου ανθρακικού νατρίου.

Η διαδικασία ενεργοποίησης αλλάζει τις βασικές ιδιότητες του μπεντονίτη ασβεστίου, όπως η απορροφητικότητα, η διόγκωση, το pH και το ιζώδες.

5.3 Χρήσεις

Χρησιμοποιήθηκε αρχικά στις γεωτρήσεις πετρελαίου και στη συνέχεια αποδείχτηκε ένα ιδιαίτερα σημαντικό συστατικό για την παραγωγή χυτών μετάλλων και για τη σφαιροποίηση σιδηρομεταλλεύματος με αντίστοιχες εφαρμογές στα χυτήρια και την παραγωγή σιδήρου. Επιπλέον, ο μπεντονίτης χρησιμοποιείται σε έργα πολιτικού μηχανικού, στη βιομηχανία των προσροφητικών υλικών, καθώς και μεταξύ άλλων στην χαρτοβιομηχανία, στην βιομηχανία παραγωγής χρωμάτων και στη βιομηχανία τροφίμων και κεραμικών.

Στις επόμενες παραγράφους αναλύεται κάθε μια από τις παραπάνω χρήσεις::

5.3.1 Χυτήρια

Στα χυτήρια χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι χύτευσης των μετάλλων, ανάλογα με τον τύπο του κράματος και το μέγεθος των χυτών. Ο μπεντονίτης χρησιμοποιείται σε μείγματα προϊόντων με ανθρακικά υλικά και άλλα πρόσθετα κατά την παραδοσιακή και πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο της άμμου καλουπιών χυτηρίων. Χρησιμοποιείται ως συνδετικό υλικό της άμμου για την κατασκευή των καλουπιών. Τα περισσότερα προϊόντα των χυτηρίων προορίζονται για τον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας, καθώς επίσης και για την παραγωγή βιομηχανικών και γεωργικών μηχανημάτων. Έτσι, η ζήτηση μπεντονίτη για εφαρμογές σε χυτήρια καθορίζεται έμμεσα από τη ζήτηση για διαρκή καταναλωτικά αγαθά (π.χ. αυτοκίνητα)

και από την αναμενόμενη αύξηση της παραγωγής στους προαναφερθέντες τομείς

5.3.2 Έργα Πολιτικού Μηχανικού

Ο μπεντονίτης χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο σε έργα πολιτικού μηχανικού, κατά κύριο λόγο ως θιξοτροπικό πρόσθετο, υποστηρικτικό και λιπαντικό μέσο σε διαφραγματικά τοιχώματα και θεμελιώσεις, σε σήραγγες, σε γεωτρήσεις οριζόντιας κατεύθυνσης και σε διάνοιξη μικροσυράγγων με τη μέθοδο προώθησης σωλήνων. Σύμφωνα με τις Οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ο μπεντονίτης συνιστάται ως υλικό στεγανοποίησης στην κατασκευή και αποκατάσταση των χώρων ταφής απορριμμάτων, διασφαλίζοντας μακροχρόνια προστασία των υπόγειων υδάτων από ρυπαίνουσες ουσίες. Ο μπεντονίτης χρησιμοποιείται ως υλικό χαμηλής διαπερατότητας για τη στεγανοποίηση της βάσης και της επικάλυψης των χωματερών, καθώς επίσης και για την κατασκευή περιφερειακών, κάθετων διαφραγματικών τοίχων. Τέλος, τα προϊόντα του μπεντονίτη είναι απαραίτητα για την κατασκευή Γεωσυνθετικών Αργιλικών Στρωμάτων χαμηλής διαπερατότητας (GCLs).

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, η αγορά του μπεντονίτη για έργα πολιτικού μηχανικού παρουσιάζει σημαντική ανάπτυξη, λόγω της αυξανόμενης ευαισθητοποίησης ως προς την καταλληλότητα του υλικού για τέτοιου είδους χρήσεις και την εντεινόμενη ανάγκη για έργα εξυγίανσης και προστασίας του περιβάλλοντος

5.3.3 Παραγωγή Σιδήρου

Μία από τις κύριες εφαρμογές του μπεντονίτη είναι και η χρήση του ως συνδετικού υλικού για την κατασκευή σφαιριδίων (pellets) σιδηρομεταλλεύματος ώστε το μέταλλευμα να αποκτήσει την κατάλληλη κοκκομετρία για να μπορεί να τροφοδοτηθεί στις υψικαμίνους για την παραγωγή χυτοσιδήρου. Η σφαιροποίηση σιδηρομεταλλεύματος συνδέεται άμεσα με τη βιομηχανία χάλυβα.

5.3.4 Προσροφητικά Υλικά

Σε αντίθεση με τις προαναφερθείσες εφαρμογές, η χρήση του μπεντονίτη ως προσροφητικό υλικό ενδιαφέρει κυρίως τους καταναλωτές και όχι τόσο την αγορά βιομηχανικών προϊόντων. Στην Ευρώπη, οι προτιμήσεις των καταναλωτών και η τακτική που χρησιμοποιείται από την πλευρά των κυρίαρχων παραγωγών για την προώθηση των προϊόντων τους καθιστούν την αγορά άμμου υγιεινής κατοικίδιων ζώων διαφορετική από χώρα σε χώρα ως προς τις πρώτες ύλες που επιλέγονται. Το

συγκριτικό πλεονέκτημα του μπεντονίτη είναι ότι απορροφά τα απορρίμματα σχηματίζοντας σβώλους που μπορούν εύκολα να απομακρυνθούν, επιτρέποντας έτσι στον καταναλωτή να ξαναχρησιμοποιήσει την υπόλοιπη άμμο υγιεινής. Χάρη στις εξαιρετικές ιδιότητές του, τα τελευταία χρόνια ο μπεντονίτης αποκτά ολοένα και μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς, αντικαθιστώντας άλλα προσροφητικά υλικά

5.3.5 Ραδιενέργεια

Χρησιμοποιείται στην απομάκρυνση ραδιενεργών στοιχείων, καθώς αυτά μπορούν να υποκαταστήσουν τα εναλλάξιμα ιόντα και στη συνέχεια με πύρωση να σταθεροποιηθούν σε αδιάλυτη μορφή. Επιπλέον στην ταφή των ραδιενεργών αποβλήτων μπορεί να κατασκευαστεί ένα προστατευτικό περίβλημα από μπεντονίτη, γύρω από τα χαλύβδινο δοχείο που περιέχει τα ραδιενεργά απόβλητα.

5.3.6 Βιομηχανία Χάρτου

Τα βιομηχανικά ορυκτά χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία χάρτου ως πληρωτικά υλικά που επηρεάζουν τις θεμελιώδεις ιδιότητες του χαρτιού, όπως η φωτεινότητα, η αδιαφάνεια και η συνοχή και η αντοχή του. Ο μπεντονίτης χρησιμοποιείται για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του χαρτιού καθώς συμβάλλει στην απομάκρυνση ινών, χρωμάτων, ρητινών και άλλων βλαπτικών ουσιών από τον χαρτοπολτό. Σε συνδυασμό με πολυμερή, μπορεί να συμβάλλει στη βελτίωση της συνοχής των συστατικών του πολφού αλλά και στον καθαρισμό του κυκλώματος του νερού. Η κατανάλωση μπεντονίτη από τις χαρτοβιομηχανίες παρουσιάζει σημαντική άνοδο κατά την τελευταία δεκαετία και με την κατάλληλη επεξεργασία, θα μπορούσε να παίξει σημαντικό ρόλο στη βελτίωση της γενικότερης ποιότητας του πολφού και τη μείωση του κόστους για την παραγωγή χαρτιού.

5.3.7 Γεωτρήσεις Πετρελαίου

Ο μπεντονίτης χρησιμοποιείται στον πολφό των γεωτρήσεων πετρελαίου και νερού. Ο ρόλος του μπεντονίτη είναι κατά κύριο λόγο να δρα σαν λειαντικό στα γεωτρήματα και να στεγανοποιεί τα τοιχώματα της γεώτρησης. Επίσης, λόγω της θιξοτροπίας του, χρησιμοποιείται στον καθαρισμό των τοιχωμάτων αυτών. Η ζήτηση μπεντονίτη για τη συγκεκριμένη χρήση συνδέεται κυρίως με τις δραστηριότητες παραγωγής πετρελαίου, αλλά χρησιμοποιείται και για τη γεώτρηση ύδατος.

5.3.8 Ειδικές Εφαρμογές

Πέρα από τις προαναφερθείσες χρήσεις, ο επεξεργασμένος μπεντονίτης έχει ποικίλες άλλες εφαρμογές στη βιομηχανία. Τα απορρυπαντικά, τα αφυγραντικά, τα καλλυντικά, τα χρώματα, τα πλαστικά, τα κεραμικά, η βιομηχανία τροφίμων είναι μόνο κάποιες από τις πολλές τελικές αγορές του μπεντονίτη.

Τα θετικά αποτελέσματα της χρήσεως του μπεντονίτη σαν αδιαπέρατο στρώμα σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων στο παρελθόν μόνος του ή σε μίξη με άλλα υλικά (Sharma et al) ήταν και ο σημαντικότερος λόγος για την επιλογή του σαν ένα από τα πρόσθετα της δοκιμής.

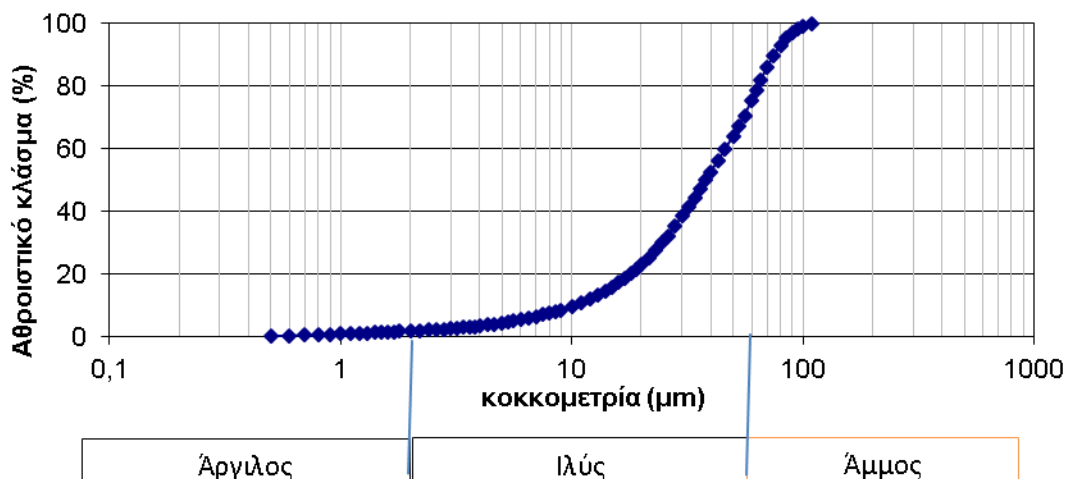
5.4 Χαρακτηριστικά του μπεντονίτη των δοκιμών

Ειδικό βάρος : 2,452 g/cm³

Πίνακας 5.6. Χημική ανάλυση του μπεντονίτη κατά ASTM C-618

	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	LOI* (%)	Σύνολο ο
Δείγμα μπεντονίτη	53,97	17,01	0,76	5,10	4,06	5,42	3,41	0,81	9,46	100,00

* LOI: Απόλεια πύρωσης



Σχήμα 5.8. Κοκκομετρική κατανομή μπεντονίτη

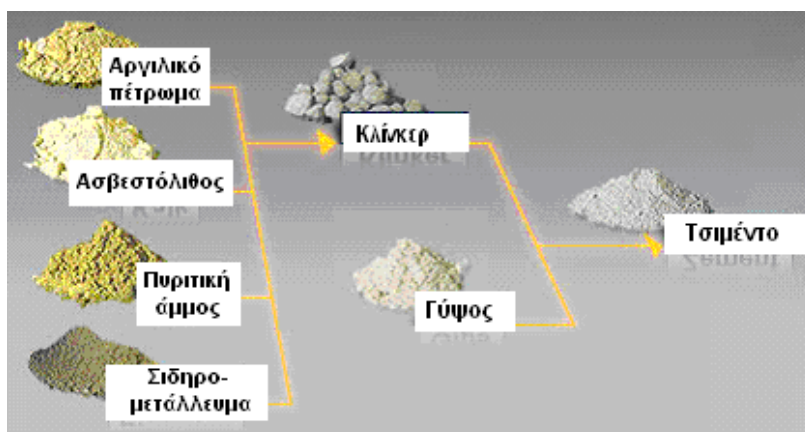
6. ΤΣΙΜΕΝΤΟ

6.1 Εισαγωγή

Το σκυρόδεμα είναι σήμερα το συνηθέστερο δομικό υλικό για τις κατασκευές κτιρίων και έργων κοινής ωφέλειας. Το τσιμέντο σε ανάμειξη με το νερό (τσιμεντόπαστα) είναι το συνδετικό υλικό, που χρησιμοποιείται στην παραγωγή του σκυροδέματος. Υπάρχουν πολλών ειδών (τύποι) τσιμέντα, με συνηθέστερο αυτό που καλείται κοινό τσιμέντο Portland (OPC, Ordinary Portland Cement). Το κοινό τσιμέντο είναι ένα γκριζολεπτομερές υλικό, που προκύπτει από τη λειοτρίβηση του κλίνκερ τσιμέντου. Ο λόγος τιμή (αξία) προς βάρος είναι πολύ μικρός για το τσιμέντο γεγονός που το κάνει να είναι πολύ ακριβό για μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις. Επίσης, επειδή οι πρώτες ύλες (θραυσμένος ασβεστόλιθος, αργιλικά πετρώματα, χαλαζιακά πετρώματα, σιδηρομετάλλευμα, βωξίτης) για την παραγωγή του τσιμέντου είναι ακόμη χαμηλότερης αξίας, για την ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς των πρώτων υλών οι μονάδες παραγωγής τσιμέντου χωροθετούνται πολύ κοντά στις πηγές πρώτων υλών (ιδιαίτερα κοντά στο λατομείο ασβεστολιθικού πετρώματος). Η μεγαλύτερη ποσότητα του παραγόμενου τσιμέντου, για τους παραπάνω λόγους, πρέπει να διατίθεται σε περιοχές και μονάδες παραγωγής σκυροδέματος σχετικώς κοντά στα εργοστάσια παραγωγής του.

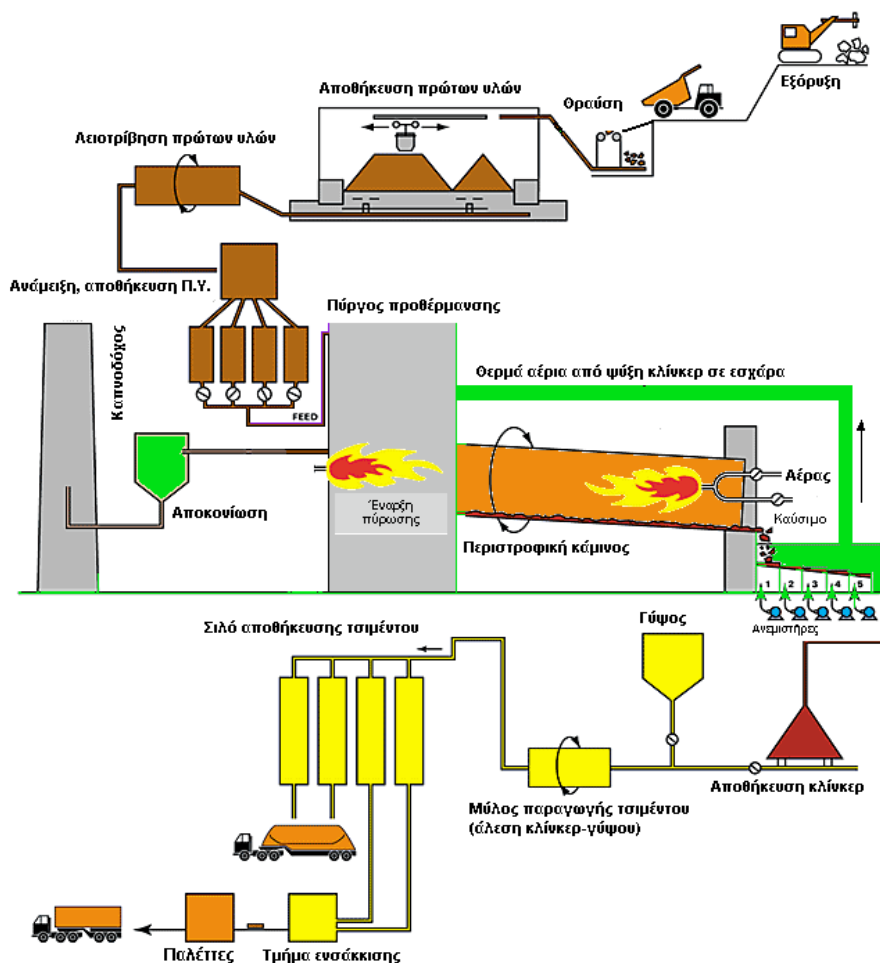
6.2 Παραγωγή του τσιμέντου

Η σημαντικότερη πρώτη ύλη για την παραγωγή του κλίνκερ τσιμέντου είναι τα ασβεστολιθικά πετρώματα, που εξορύσσονται επιφανειακά κοντά στη μονάδα παραγωγής του τσιμέντου. Επειδή, ποσοστό περίπου 80% από τους 1.50-1.65 τόννους πρώτων υλών, που απαιτούνται για την παραγωγή 1 τόννου κλίνκερ, είναι ασβεστολιθικό υλικό, είναι προφανής η αναγκαιότητα γειτνίασης της θέσης εξόρυξης ασβεστολιθικών πετρωμάτων και της μονάδας παραγωγής κλίνκερ τσιμέντου.



Σχήμα 6.9. Πρώτες ύλες, ενδιάμεσα προϊόντα και τελικό προϊόν στη διεργασία παραγωγής τσιμέντου.

Το μείγμα των πρώτων υλών (θραυσμένος ασβεστόλιθος, αργιλικά πετρώματα, χαλαζιακά πετρώματα, σιδηρομετάλλευμα, βωξίτης, κ.α.) αναμειγνύονται σε κατάλληλη αναλογία και λειοτριβούνται. Το λειοτριβημένο μείγμα («φαρίνα») υφίσταται πυρομεταλλουργική κατεργασία μέσα σε περιστροφική κάμινο (rotary kiln). Στην περιστροφική κάμινο οι λειοτριβημένες πρώτες ύλες, με χρήση καυσίμων (φυσικό αέριο, πετρέλαιο, γαιάνθρακες ή και εναλλακτικά καύσιμα), θερμαίνονται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι, με φυσικοχημικές διεργασίες, μετατρέπονται σε ένα υλικό γκριζοπράσινου χρώματος μορφής σφαιριδίων διαμέτρου 10-25 mm το οποίο ονομάζεται κλίνκερ τσιμέντου. Στη συνέχεια το κλίνκερ λειοτριβείται σε σφραιρόμυλο και προστίθεται γύψος σε ποσοστό ανάλογο με τις ανάγκες ρύθμισης της πήκτικότητας.



Σχήμα 6.10. Αναλυτικό διάγραμμα ροής διεργασιών παραγωγής τσιμέντου

6.3 Τύποι και κατηγορίες των ευρωπαϊκών τσιμέντων

Οι τύποι των τσιμέντων που παρασκευάζονται σε κάθε χώρα της Ευρωπαϊκής Ένωσης εξαρτώνται από τις διαθέσιμες πρώτες ύλες, όπως επίσης από τη ζήτηση κάθε τύπου τσιμέντου. Έτσι, ανάλογα με τις διαθέσιμες και χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες, δημιουργήθηκαν οι διάφοροι τύποι τσιμέντων που μπορούν να παραχθούν. Οι τύποι αυτοί είναι το κοινό τσιμέντο Portland, τα τσιμέντα με ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα

(πυριτική ή ασβεστιτική), τσιμέντα με σκωρία υψικαμίνου, τσιμέντα με πυριτική παιπάλη, με ασβεστόλιθο κλπ.

Τα σημαντικότερα δευτερεύοντα συστατικά, που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή σύνθετων τσιμέντων και εμφανίζονται στον αναλυτικό πίνακα του ευρωπαϊκού προτύπου EN 197-1 δίνονται παρακάτω με το χαρακτηριστικό κεφαλαίο λατινικό γράμμα που αναφέρεται σε κάθε ένα από αυτά:

S - blastfurnace slag (σκωρία υψικαμίνων)

D - silica fume (ατμοί πυριτίας)

P - natural pozzolana (φυσική ποζολάνη)

Q - natural calcined pozzolana (φυσική ποζολάνη μετά από πύρωση)

V - siliceous fly ash (πυριτική ιπτάμενη τέφρα)

W - calcareous fly ash (ασβεστιτική ιπτάμενη τέφρα)

L, LL - limestone (ασβεστόλιθος)

T - burnt shale (τέφρα καύσης βιτουμενιούχων σχιστολίθων)

M - two or more of the above (μείγμα των παραπάνω).

Τα άλλα πρόσθετα έχουν ιδιότητες πληρωτικών δηλαδή είναι φυσικές πρώτες ύλες (μεταλλευτικά ορυκτά π.χ. ποζολάνες ή λειοτριβημένος ασβεστόλιθος) ή βιομηχανικά παραπροϊόντα. Τα βιομηχανικά αυτά παραπροϊόντα είναι ανόργανες ενώσεις (ιπτάμενη τέφρα, λειοτριβημένες σκωρίες υψικαμίνων ή ατμοί πυριτίας), που λόγω των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων τους (π.χ. κοκκομετρική ανάλυση, ποζολανικότητα) είναι συμβατά με το τσιμέντο, βελτιώνουν τις ιδιότητές του στην παραγωγή σκυροδέματος (π.χ. την εργασιμότητα του σκυροδέματος, την απορροφητικότητά του σε νερό κλπ.) και μειώνουν το κόστος παραγωγής του.

Γι' αυτό το λόγο, το πρότυπο προβλέπει μεγάλο αριθμό προϊόντων τσιμέντου τα οποία, για προφανείς λόγους, όμως δεν κυκλοφορούν κατ' ανάγκη όλα σε κάθε χώρα μέλος. Στον Πίνακα δίνονται αναλυτικά, σύμφωνα με το πρότυπο, το είδος και το ποσοστό των συστατικών του τσιμέντου, τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή και καθορίζουν τα 27 διαφορετικά είδη τσιμέντων του Πίνακα. Όμως, το πρότυπο EN 197-1 προδιαγράφει σε γενική μορφή τους εξής πέντε τύπους τσιμέντου

Πίνακας 6.7. Βασικοί τύποι τσιμέντων ευρωπαϊκού προτύπου

ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
CEM I	Κοινό τσιμέντο Portland
CEM II	Σύνθετο τσιμέντο Portland
CEM III	Σκωριοτσιμέντο
CEM IV	Ποζολανικό τσιμέντο
CEM V	Σύνθετο τσιμέντο

Επίσης, το νέο πρότυπο προδιαγράφει και 6 κατηγορίες αντοχών, στις οποίες τα τσιμέντα κατατάσσονται ανάλογα με την αντοχή σε θλίψη κονιάματος πρότυπης σύνθεσης και τρόπου παρασκευής, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 196-1. Κάθε κατηγορία αντοχής ορίζεται από ένα κατώτερο και ένα ανώτερο όριο αντοχής. Το κατώτερο όριο αντοχής σε θλίψη (28 ημερών) χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη κατηγορία. Κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες περιλαμβάνει δύο υποκατηγορίες πρώιμης αντοχής N και R .

Πίνακας 6.8. Κατηγορίες αντοχών τσιμέντου

Κατηγορία αντοχής	Αντοχή σε θλίψη, MPa (N/mm ²)			Αρχικός χρόνος πήξης	Διόγκωση (Διαστολή)
	A ρχική αντοχή		Τυπική Αντοχή (Όρια)		
	2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες	min	mm
32,5 N	≥ -	≥ 16.0	≥ 32.5	≤52.5	≤10
32,5 R	≥ 10.0	-			
42,5 N	≥ 10.0	-	≥ 42.5	≤62.5	
42,5 R	≥ 20.0	-			
52,5 N	≥ 20.0	-	≥52.5	-	
52,5 R	≥ 30.0	-			

Ο συμβολισμός των διαφόρων τσιμέντων, σύμφωνα με το πρότυπο EN 197 καθορίζεται από:

- τον κύριο τύπο τσιμέντου,
- το ποσοστό clinker που περιέχεται στο τσιμέντο,
- τον τύπο του δεύτερου κύριου συστατικού,

- την κατηγορία αντοχής,
- το επίπεδο της πρώιμης αντοχής.

Όταν το τσιμέντο αναμειγνύεται με νερό τα συστατικά του, υποβάλλονται σε μια σειρά σύνθετων χημικών αντιδράσεων που προκαλούν τελικά τη σκλήρυνση του. Το σύνολο των χημικών αυτών αντιδράσεων με το νερό ονομάζεται "ενυδάτωση". Κάθε μία από αυτές τις αντιδράσεις συμβαίνει σε διαφορετικό χρόνο και ρυθμό. Μαζί, τα αποτελέσματα αυτών των αντιδράσεων καθορίζουν τον τρόπο σκληραίνει τσιμέντο Portland και αποκτά αντοχή.

Τα σημαντικότερα συστατικά που ευθύνονται για τις αντιδράσεις αυτές είναι τα παρακάτω

- **Πυριτικό τριασβέστιο (Tricalcium silicate, C3S, Alite)**

Το **C3S** ενυδατώνεται και σκληραίνει πολύ γρήγορα και είναι υπεύθυνο για την αρχική πήξη και την αρχική αντοχή. Γενικώς, η ανάπτυξη πρώιμης (αρχικής) αντοχής του σκυροδέματος είναι μεγαλύτερη, όσο αυξημένη είναι η περιεκτικότητα του τσιμέντου σε **C3S**.

- **Πυριτικό διασβέστιο (Dicalcium Silicate, C2S, Belite)**

Το δεύτερο από πλευράς περιεκτικότητας συστατικό του clinker, που κυμαίνεται από 10-60%. Το **C2S** ενυδατώνεται και σκληραίνει πολύ αργά και συμβάλλει κατά κύριο λόγο στην αύξηση της αντοχής μετά την πάροδο μιας εβδομάδας περίπου από την έναρξη της ενυδάτωσης. Είναι επίσης ανθεκτικό στην επίδραση θεικών ενώσεων.

- **Αργιλικό τριασβέστιο (Tricalcium Aluminate, C3A)**

Το **C3A** απελευθερώνει μεγάλη ποσότητα θερμότητας κατά το αρχικό χρονικό διάστημα της ενυδάτωσης και της πήξης. Συμβάλλει ελάχιστα στην αύξηση της αρχικής αντοχής.

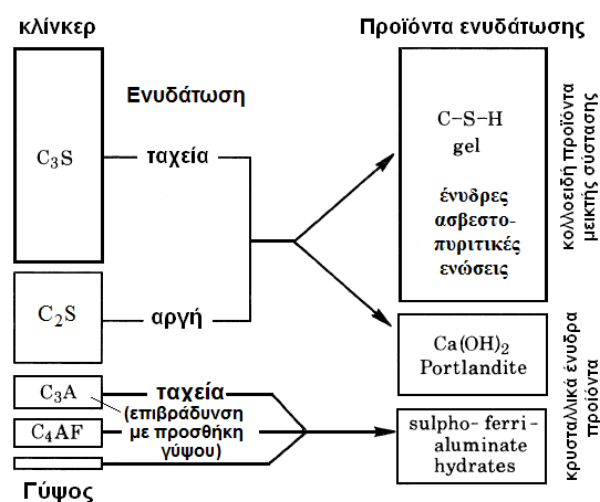
Η γύψος που προστίθεται κατά τη λειοτρίβηση του κλίνκερ, επειδή είναι υγροσκοπική δηλ. προσλαμβάνει εύκολα νερό, επιβραδύνει το ρυθμό (ταχύτητα) ενυδάτωσης του **C3A**. Χωρίς την προσθήκη γύψου, τα τσιμέντα που περιέχουν **C3A** θα έπηζαν πολύ γρήγορα. Τσιμέντα με χαμηλή

περιεκτικότητα σε **C3A** είναι ιδιαίτερος ανθεκτικά σε εδάφη και νερά που περιέχουν θεικές ενώσεις

- **Αργιλοσιδηρικό τετρασβέστιο (Tetracalcium Aluminoferrite, C4AF, Ferrite)**

Κυμαίνεται μεταξύ 5-10% στο τσιμέντο. Το C4AF μειώνει (ελαττώνει) τη θερμοκρασία μετατροπής σε κλίνκερ και έτσι συμβάλλει θετικά στην κατανάλωση ενέργειας κατά την παραγωγή του τσιμέντου.

Ενυδατώνεται και αυτό σχετικά γρήγορα, αλλά δεν συμβάλλει σχεδόν καθόλου στην ανάπτυξη αντοχής. Οι περισσότεροι χρωματισμοί του τσιμέντου οφείλονται στην παρουσία C4AF και των ένυδρων ενώσεών του.



Σχήμα 6.11. Ταχύτητα ενυδάτωσης των διαφόρων φάσεων του τσιμέντου και προϊόντα ενυδάτωσής τους.

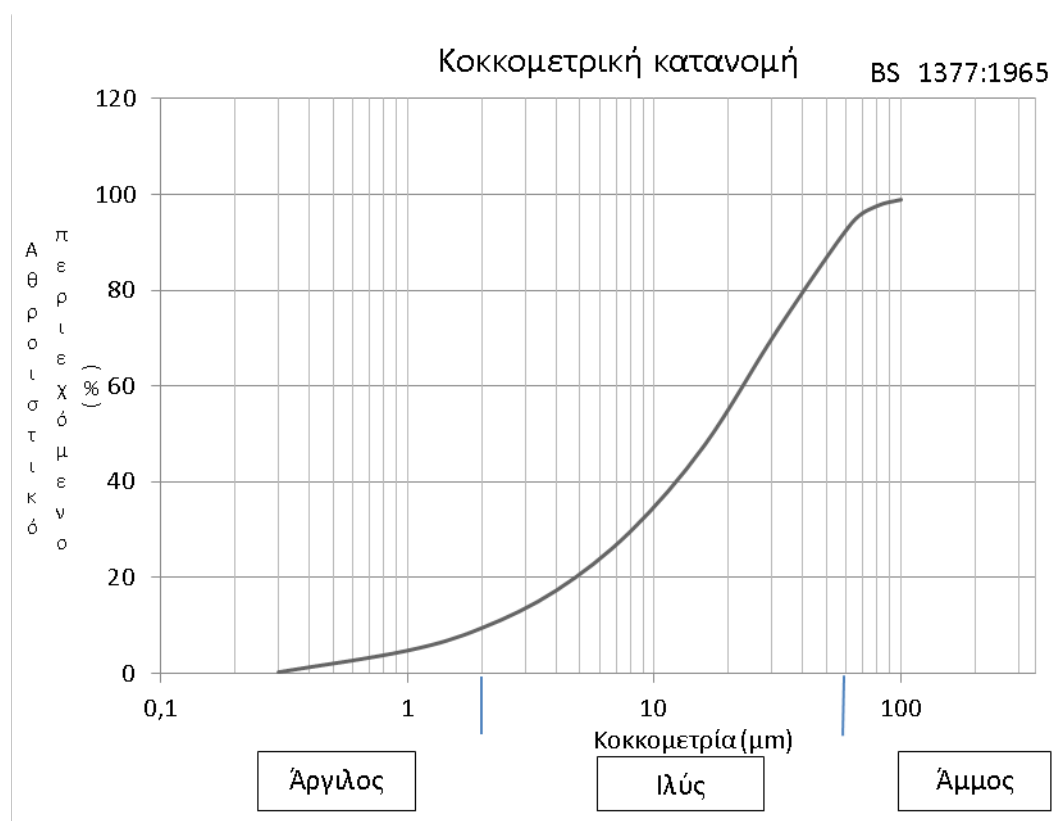
6.4 Χρήσεις του τσιμέντου

Όταν το τσιμέντο αναμιγνύεται με το νερό γίνεται ουσιαστικά ένα πλαστικό υλικό με τη δυνατότητα διαμόρφωσης στην επιθυμητή μορφή, και το πλεονέκτημα της εξασφάλισης ενός σκληρού, πυρίμαχου υλικού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δάπεδα καταστημάτων, κτίρια, βάσεις για τα βαρέα μηχανήματα, βάθρων για γέφυρες, πεζοδρόμια, φράγματα ύδρευσης, δεξαμενές, τοίχους, αποβάθρες, οχετούς, κλπ. Η κάλυψη με μπετόν προστατεύει το σίδηρο και τις ξυλινες κατασκευές από τη διάβρωση

του αέρα και του νερού, και προστατεύει τις σιδηρές κατασκευές από πυρκαγιά. Οποιαδήποτε κατασκευή που προορίζεται να συγκρατεί μεγάλα βάρη κατασκευάζεται με τσιμέντο, συγκεκριμένα με οπλισμένο σκυρόδεμα, μείγμα τσιμέντου, αδρανών και χαλύβδινων ράβδων. Αυτές οι κατασκευές μπορεί να είναι από ισόγεια πολυκατοικιών μέχρι ουρανοξύστες, θεμέλια γεφυρών και φράγματα. Λόγω της αντιδιαβρωτικής του ικανότητας αλλά και του μεγάλου ειδικού του βάρους χρησιμοποιείται και στη ναυπηγική σαν έρμα αλλά και σε μεταλλικές επιφάνειες που διαβρέχονται από θαλασσινό νερό.

6.5 Δείγμα τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές δοκιμές

Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε στις εργαστηριακές δοκιμές της διπλωματικής αυτής εργασίας παραχωρήθηκε από το εργοστάσιο ΑΓΕΤ – Lafarge Αλιβερίου. Πρόκειται για τσιμέντο τύπου CEM1 με τα παρακάτω χαρακτηριστικά.



Σχήμα 6.12. Κοκκομετρική κατανομή τσιμέντου

Πίνακας 6.9. Χημική ανάλυση τσιμέντου δοκιμής

Χημική ανάλυση	%
SiO ₂	18,28
Al ₂ O ₃	4,46
Fe ₂ O ₃	3,14
CaO	1,75
MgO	2,82
SO ₃	3,16
Na ₂ O	0,34
K ₂ O	0,48
Απώλεια Πύρωσης	2,69
C3S	55,15
C2S	2,05
C3A	6,51
C4AF	9,56

Πίνακας 6.10. Μηχανικά και Φυσικά χαρακτηριστικά

Μηχανικά χαρακτηριστικά	
Αντοχή σε θλίψη	
Μέρες	MPa (N/mm ²)
2	29
7	41,7
28	55
Χρόνος πήξης (Vicat)	
Αρχικός	105 min
Τελικός	130 min
Φυσικά χαρακτηριστικά	
Blaine (m ² *kg ⁻¹)	3760
Ειδικό βάρος (gr/cm ³)	3,15
Αρχική Υγρασία	0,28%

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

7.1 Δοκιμές Συμπίεσης

Συμπίεση είναι η εφαρμογή μηχανικής ενεργειας σε ένα εδαφικό δείγμα με σκοπό την αναδιοργάνωση των κόκκων του και την μείωση του πορώδους του.

7.1.1 Σκοπός

Κύριος σκοπός της συμπίεσης ενός εδάφους είναι :

- Η επακόλουθη συμπίεση του κάτω από το λειτουργικό του φορτίο.
- Η αύξηση της διατμητικής αντοχής
- Η αποφυγή συσσώρευσης μεγάλης υδραυλικής πίεσης η οποία μπορεί να ρευστοποιήσει το έδαφος σε σεισμούς
- Η μείωση του πορώδους του εδάφους, γεγονός που δυσκολεύει την υδραυλική ροή διαμέσου του. Αυτό είναι σημαντικό σε περιπτώσεις που το έδαφος χρησιμοποιείται σε εφαρμογές εδαφομηχανικής όπου η χαμηλή διαπερατότητα είναι απαραίτητη.

Είναι προφανές πως η συμπεριφορά των δειγμάτων σε συμπίεση είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για τα εδαφικά καλύμματα.

Παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπίεση

- Υγρασία του εδάφους
- Το είδος του εδάφους που συμπιέζεται
- Το μέγεθος της χρησιμοποιούμενης ενέργειας συμπίεσης

Υπάρχουν διάφορες δοκιμές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη των ιδιοτήτων συμπίεσης των εδαφών. Λόγω τη σημαντικότητας της συμπίεσης στις περισσότερες εφαρμογές εδαφομηχανικής έχουν δημιουργηθεί διάφορες τυποποιημένες μέθοδοι. Αυτές γενικά περιλαμβάνουν τη συμπίεση εδάφους σε ένα καλούπι σε διαφορετικά ποσοστά υγρασίας.

7.2 Μέθοδος προσδιορισμού της σχέσεως υγρασίας - πυκνότητας εδαφών: πρότυπη μέθοδος Proctor

7.2.1 Εισαγωγή

Οι δοκιμές αυτές έχουν σαν σκοπό τον προσδιορισμό της σχέσεως μεταξύ της περιεχόμενης υγρασίας και της πυκνότητας των εδαφών με συμπύκνωση αυτών μέσα σε τύπο ορισμένου μεγέθους με κόπανο βάρους 2,49 kg που πέφτει από ύψος 304,8mm.

Προβλέπονται τέσσερις διαφορετικές διαδικασίες ανάλογα με την κοκκομετρία του υλικού που περιγράφονται στη συνέχεια:

ΜΕΘΟΔΟΣ Α. Τύπος διαμέτρου 101,6mm

Το εδαφικό υλικό διέρχεται από κόσκινο Νο 4. (4,75mm)

ΜΕΘΟΔΟΣ Β. Τύπος διαμέτρου 152,4mm

Το εδαφικό υλικό διέρχεται από κόσκινο Νο 4. (4,75mm)

ΜΕΘΟΔΟΣ Γ. Τύπος διαμέτρου 101,6mm

Το εδαφικό υλικό διέρχεται από κόσκινο (19,0mm)

ΜΕΘΟΔΟΣ Δ. Τύπος διαμέτρου 152,4mm

Το εδαφικό υλικό διέρχεται από κόσκινο (19,0mm).

Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος θα πρέπει να καθορίζεται στις προδιαγραφές για το προς δοκιμή υλικό. Αν δεν προδιαγράφεται μέθοδος θα εφαρμόζεται η μέθοδος Α. Έτσι και σε αυτή την περίπτωση προτιμήθηκε η μέθοδος Α εφόσον οι δοκιμές ήταν καθαρά ερευνητικές.

7.2.2 Περιγραφή Εργαστηριακού εξοπλισμού

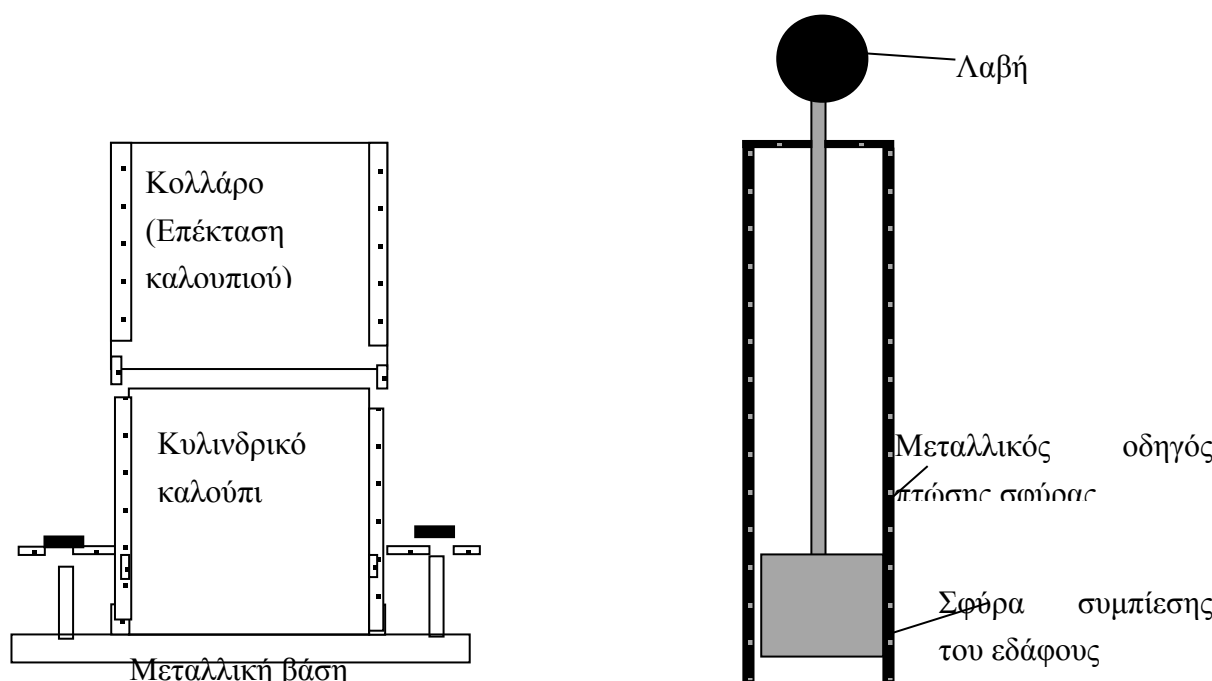
- Τύποι (Μήτρες): Οι τύποι είναι κυλινδρικού σχήματος, κατασκευασμένοι από μέταλλο και έχουν χωρητικότητα και διαστάσεις που δίνονται παρακάτω. Έχουν ένα πρόσθετο δακτύλιο ύψους περίπου 60,3mm. Ο τύπος και ο πρόσθετος δακτύλιος μαζί είναι έτσι κατασκευασμένοι, ώστε να μπορούν να συνδέονται σταθερά με την ανεξάρτητη πλάκα βάσεως. Η χωρητικότητα και οι διαστάσεις των τύπων είναι οι ακόλουθες:

α) Τύπος με χωρητικότητα: $(943 \pm 8) \times 10^3 \text{ mm}^3$ Εσωτερικής διαμέτρου: 101,6 $\pm 0,406\text{mm}$ και ύψους: 116,4+0.127mm

β) Τύπος που έχει χωρητικότητα: $(2124+21) \times 10^3 \text{ mm}^3$ Εσωτερικής διαμέτρου: 152,4±0,66mm και ύψους: 116,4±0,127mm

- Κόπανος: Ένας μεταλλικός κόπανος με κυκλική διατομή διαμέτρου 50,8±0,127mm και βάρους 2,49±0,01kg. Ο κόπανος είναι εφοδιασμένος με κατάλληλο οδηγό (διάταξη) για τον έλεγχο του ύψους πτώσεως, ώστε να πέφτει ελεύθερα από ύψος $304,8 \pm 1,524\text{mm}$ από τη στάθμη του εδαφικού δοκιμίου.
- Εξολκέας δείγματος (προαιρετικά): Μία κατάλληλη συσκευή για την εξαγωγή των συμπυκνωθέντων δοκιμίων από τον τύπο. Στις δοκιμές στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας ο εξολκέας αποτελούσε απαραίτητο εργαλείο καθώς το δείγμα έπρεπε να εξαχθεί αδιατάρακτο έτσι ώστε να γίνουν σε αυτό οι δοκιμές υδροπερατότητας.
- Ζυγοί: Ένας ζυγός ικανότητας τουλάχιστον 10kg και ακρίβειας ως 5g και ένας ζυγός ικανότητας τουλάχιστον 1kg και ακρίβειας ως 0,1g.
- Κλίβανος ξηράνσεως: Ένας θερμοστατικά ελεγχόμενος κλίβανος ξηράνσεως ικανός για τη διατήρηση της θερμοκρασίας σε $100 \pm 5^\circ\text{C}$ για την ξήρανση υγρών δειγμάτων.
- Κανόνας: Ένας χαλύβδινος κανόνας μήκους περίπου 300mm που έχει τη μια πλευρά λοξά κομμένη.
 - Κόσκινα: Κόσκινα 50mm, 19mm και No 4. (4,75mm).
- Εργαλεία αναμίξεως: Διάφορα εργαλεία όπως λεκάνη αναμίξεως, κουτάλα, μυστρί, σπάτουλα κλπ., ή κατάλληλη μηχανική συσκευή για την καλή ανάμιξη του δείγματος του εδάφους με τα προστιθέμενα ποσοστά του ύδατος.

Όγκος καλουπιού	Μάζα κοπάνου	Πτώση κοπάνου
1000 cm ³	2.5 kg	300 mm



Σχήμα 7.13. Σχεδιάγραμμα της διάταξης

7.2.3 Περιγραφή εργασίας (Α' Μέθοδος)

Εάν το δείγμα του εδάφους, είναι υγρό, ξηραίνεται μέχρι που να γίνει εύθρυπτο. Η ξήρανση μπορεί να γίνει με τον αέρα ή μέσα σε συσκευή ξηράνσεως τέτοια ώστε η θερμοκρασία του δείγματος να μην υπερβαίνει τους 60°C. Μετά θραύονται καλά τα συσσωματώματα με τρόπο που επιτρέπει, να αποφευχθεί η ελάττωση του φυσικού μεγέθους (θραύση) των κόκκων.

Κοσκινίζεται επαρκής ποσότητα αντιπροσωπευτικού κονιοποιηθέντος εδάφους με το κόσκινο Νο 4. Απορρίπτεται το χονδρόκοκκο υλικό που συγκρατήθηκε στο κόσκινο Νο 4, αν υπάρχει.

Σημείωση : Σε περίπτωση που το ποσοστό του υλικού που συγκρατείται στο κόσκινο Νο 4 είναι μεγαλύτερο από 7% τότε, συνίσταται να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Γ.

Λαμβάνεται αντιπροσωπευτικό δείγμα βάρους περίπου 3kg ή και περισσότερο, από το αρχικό δείγμα.

Το αντιπροσωπευτικό δείγμα που πάρθηκε αναμιγνύεται καλά με επαρκή ποσότητα νερού, για να υγρανθεί, κατά 4 περίπου μονάδες (επί τοις % του βάρους), κάτω από τη βέλτιστη υγρασία.

Σχηματίζεται ένα δοκίμιο με συμπίκνωση του παρασκευασθέντος εδάφους μέσα στον τύπο των 101,6mm, (με τον δακτύλιο προσαρμοσμένο), σε τρεις ίσες στρώσεις για την παρασκευή ενός υλικού συμπτυκνωμένου βάρους περίπου 127mm. Συμπυκνώνεται κάθε στρώση με 25 ομοιόμορφα διανεμημένους κτύπους με τον κόπανο. (Κατά τη διάρκεια της συμπίκνωσης, ο τύπος θα πρέπει να στηρίζεται σε σταθερό βάθρο). Μετά τη συμπίκνωση, απομακρύνεται από τον τύπο ο δακτύλιος, περικόπτεται με τον κανόνα με προσοχή το συμπτυκνωμένο έδαφος μέχρι τα χείλη του τύπου και ζυγίζεται. Πολλαπλασιάζεται το βάρος του συμπτυκνωμένου δοκιμίου μαζί με τον τύπο, μείον το βάρος του τύπου (σε kg), επί 1059. Αναφέρεται το αποτέλεσμα ως το υγρό φαινόμενο βάρος συμπτυκνωμένου εδάφους σε kg/m^3 .

Εξάγεται το δοκίμιο από τον τύπο και αποκόπτεται κάθετα με ένα επίπεδο που διέρχεται από το κέντρο του. Λαμβάνεται αντιπροσωπευτικό δείγμα του υλικού από μία από τις δύο επιφάνειες της τομής. Ζυγίζεται έπειτα και ξηραίνεται μέσα σε κλίβανο σε θερμοκρασία $100\pm 5^\circ\text{C}$ επί δώδεκα τουλάχιστον ώρες ή μέχρι σταθερού βάρους για τον προσδιορισμό της περιεχόμενης υγρασίας. Το βάρος του υγρού δείγματος δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 100g.

Το υπόλοιπο υλικό θραύεται τελείως μέχρι που να διέρχεται αυτό από το κόσκινο No 4. Προστίθεται νερό σε επαρκή ποσότητα ώστε να αυξηθεί η περιεχόμενη υγρασία του δείγματος του εδάφους κατά μία ή δύο μονάδες επί τοις % και επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία για κάθε νέα αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας. Συνεχίζεται η σειρά αυτή των προσδιορισμών μέχρι που να ελαττωθεί ή δεν μεταβληθεί το υγρό φαινόμενο βάρος του συμπτυκνωθέντος εδάφους.

Στις περιπτώσεις που το εδαφικό υλικό είναι εύθραυστο και θα ελαττωθεί σημαντικά το μέγεθος των κόκκων λόγω των επαναλαμβανόμενων συμπτυκνώσεων και στις περιπτώσεις όπου το έδαφος είναι αργιλώδες υλικό, εντός του οποίου είναι δύσκολο να ενσωματωθεί το νερό, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα ξεχωριστό και νέο δείγμα για κάθε δοκιμή συμπίκνωσης. Στις περιπτώσεις αυτές, ξεχωριστά δείγματα

αναμειγνύονται καλά με επαρκή ποσά νερού, για να προσδώσουν περιεχόμενες υγρασίες στα δείγματα, που διαφέρουν κατά περίπου 2 μονάδες επί τοις %.

Δεδομένου ότι τα δείγματα που εξετάστηκαν ήταν ιδιαίτερα λεπτόκοκκα και επίσης το καθένα από αυτά αντιδρούσε με το νερό με διαφορετικό τρόπο και σε συνάρτηση με το χρόνο, για κάθε δοκιμή χρησιμοποιούνταν πάντα καινούριο δείγμα. Αυτό είχε επιπτώσεις ως προς τη διάρκεια των πειραμάτων καθώς σε αντίθεση με τον μπεντονίτη, το τσιμέντο και την ιπτάμενη τέφρα που παραχωρήθηκαν έτοιμα, εκτός από την ανάγκη ξήρανσης τους, έπρεπε να θραυτούν μεγάλες ποσότητες ερυθράς ιλύος, πράγμα ιδιαίτερα επίπονο και χρονοβόρο.

7.2.4 Υπολογισμοί — Τήρηση στοιχείων

Υπολογίζεται η περιεχόμενη υγρασία και το ξηρό βάρος του εδάφους, όπως αυτό συμπυκνώθηκε για κάθε δοκιμή με τον ακόλουθο τρόπο:

Πρώτα υπολογίζεται το μεικτό ειδικό βάρος ρ_b από τον παρακάτω τύπο:

Όπου

M_1 = Βάρος τύπου (gr)

M_2 = Συνολικό βάρος (τύπος + δείγμα) (gr)

Γνωρίζοντας το ρ_b μπορεί να υπολογιστεί το ξηρό ειδικό βάρος ρ_d

$$\rho_d = \frac{\rho_b}{1 + w}$$

Όπου

w= περιεχόμενη υγρασία

7.2.5 Σχέση υγρασίας πυκνότητας

Οι υπολογισμοί γίνονται για τον προσδιορισμό της περιεχόμενης υγρασίας και του ξηρού φαινόμενου βάρους που αντιστοιχεί σ' αυτή για κάθε ένα από τα συμπυκνωμένα δείγματα εδάφους. Τα ξηρά βάρη ανά κυβικό μέτρο, (πυκνότητες), του εδάφους σημειώνονται σε σχετικό διάγραμμα, σαν τεταγμένες και οι αντίστοιχες περιεχόμενες

υγρασίες, σαν τετμημένες.

7.2.5.1 Βέλτιστη υγρασία

Όταν έχουν προσδιορισθεί και σχεδιαστεί, οι πυκνότητες και οι αντίστοιχες περιεχόμενες υγρασίες, παρατηρείται ότι, με σύνδεση των σχεδιασμένων σημείων με ομαλή γραμμή, σχηματίζεται μια καμπύλη. Η περιεχόμενη υγρασία που αντιστοιχεί στο ανώτατο σημείο της καμπύλης ορίζεται σαν «βέλτιστη υγρασία» του εδάφους για την ανωτέρω συμπίκνωση.

Πριν από κάθε δοκιμή προηγούνταν πάντα ξήρανση των δειγμάτων σε κλίβανο για 24 ώρες για να αποφευχθούν τα σφάλματα στην περιεχόμενη υγρασία.

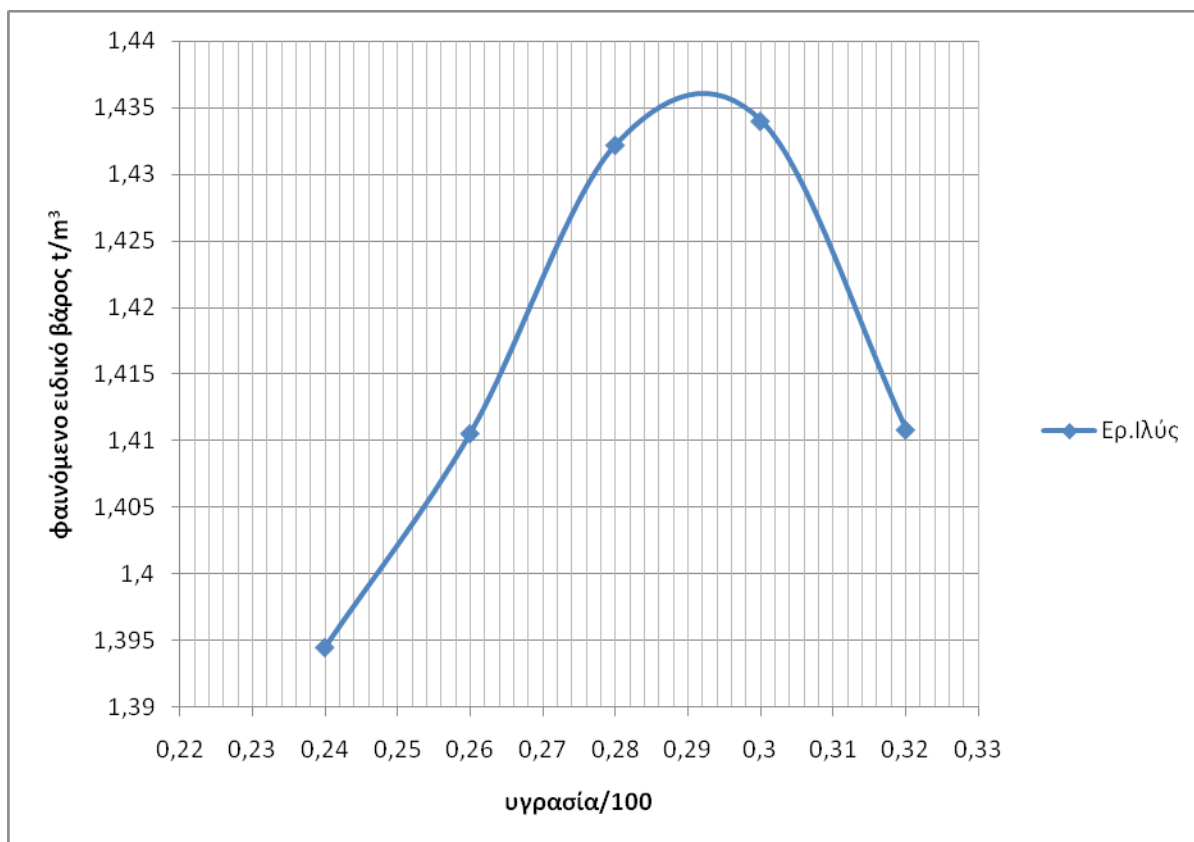
Στη συνέχεια γινόταν η ανάμειξη και η προσθήκη νερού και αμέσως μετά η συμπίεση έτσι ώστε μειωθεί στο ελάχιστο η πιθανότητα σφαλμάτων λόγω φαινομένων στερεοποίησης και διόγκωσης των υλικών.

7.2.6 Σημαντική Παρατήρηση

Από την αρχή ακόμη των πειραμάτων έγινε φανερό πως υπήρχε πρόβλημα μέτρησης της περιεχόμενης υγρασίας στα μείγματα του τσιμέντου καθώς παρουσίαζαν πολύ μεγάλες διαφορές περιεχόμενης-προστιθέμενης υγρασίας οι οποίες μάλιστα για το ίδιο δείγμα έδιναν διαφορετικό αποτέλεσμα σε περίπτωση καθυστέρησης τοποθέτησης τους στο φούρνο, παρόλο που φυλάσσονταν σε σφραγισμένη σακούλα και ελεγχόμενο περιβάλλον (Εργαστήριο μεταλλουργίας). Αυτό πιθανώς οφείλεται στις αντιδράσεις ενυδάτωσης του τσιμέντου. Έτσι αποφασίστηκε να μετράται μόνο η προστιθέμενη υγρασία σε όλα τα δείγματα. Εξάλλου και τα άλλα δύο πρόσθετα έχουν διαφορετικό μηχανισμό δράσης το καθένα κατά την ενυδάτωση. Η απόκλιση αυτή από το πρότυπο ίσως να οδηγεί σε κάποια σφάλματα, συγκεκριμένα όπως θα φανεί παρακάτω για την ερυθρά ιλύ ήταν 0,4% σε σχέση με παλαιότερα πειράματα, το σφάλμα αυτό όμως θα πρέπει να συγκριθεί με την δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων μεταξύ τους.

7.3 Αποτελέσματα συμπίεσεων.

7.3.1 Ερυθρά ιλύς



Σχήμα 7.14. Καμπύλη βέλτιστης υγρασίας ερυθράς ιλύος

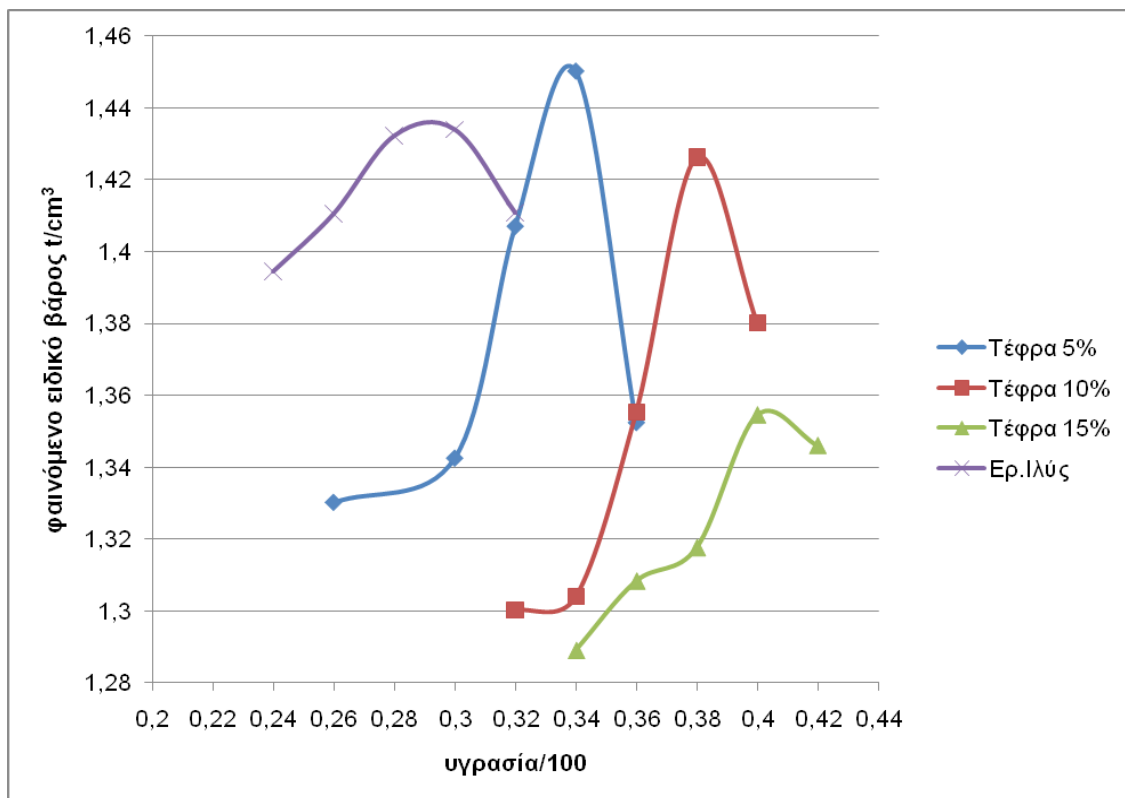
Πίνακας 7.11. Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεσης ερ.ιλύος

Υγρασία %	γ_{dry}
24	1,3945
26	1,410556
28	1,4322
30	1,434
32	1,410833

Η βέλτιστη υγρασία της ερυθράς ιλύος βρέθηκε να είναι 29,2% με ξηρή φαινόμενη πυκνότητα 1,436 t/m³. Παρατηρείται μια διαφορά με παλιότερη δοκιμή συμπίεσης στην οποία υπολογίστηκε ως βέλτιστη υγρασία το 28,8% κ.β. και ξηρή φαινόμενη πυκνότητα 1,503 t/m³ Παρόλα αυτά θα έπρεπε να αναμένεται διαφορά στο αποτέλεσμα για δύο βασικούς λόγους. Καταρχήν όπως αναφέρθηκε ήδη, οι υπολογισμοί εδώ έχουν γίνει

χρησιμοποιώντας την προστιθέμενη υγρασία και όχι την περιεχόμενη και επίσης, όπως και στα παλαιότερα πειράματα, έτσι κι εδώ η θραύση της ιλύος έγινε χειρονακτικά οπότε θα πρέπει να αναμένονται και μικροδιαφορές στην κοκκομετρία σε τέτοιες περιπτώσεις.

7.3.2 Ιπτάμενη Τέφρα



Σχήμα 7.15. Συγκριτικές καμπύλες βέλτιστης υγρασίας Τέφρας – Ερ.Ιλύος

Πίνακας 7.12. Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεσης μειγμάτων ιπτάμενης τέφρας-Ερ.Ιλύος

Υγρασία %	Ιπτάμενη τέφρα		
	5%	10%	15%
26	1,33		
30	1,342		
32	1,407	1,3	
34	1,45	1,303	1,289
36	1,352	1,355	1,308
38		1,426	1,317
40		1,38	1,354
42			1,345

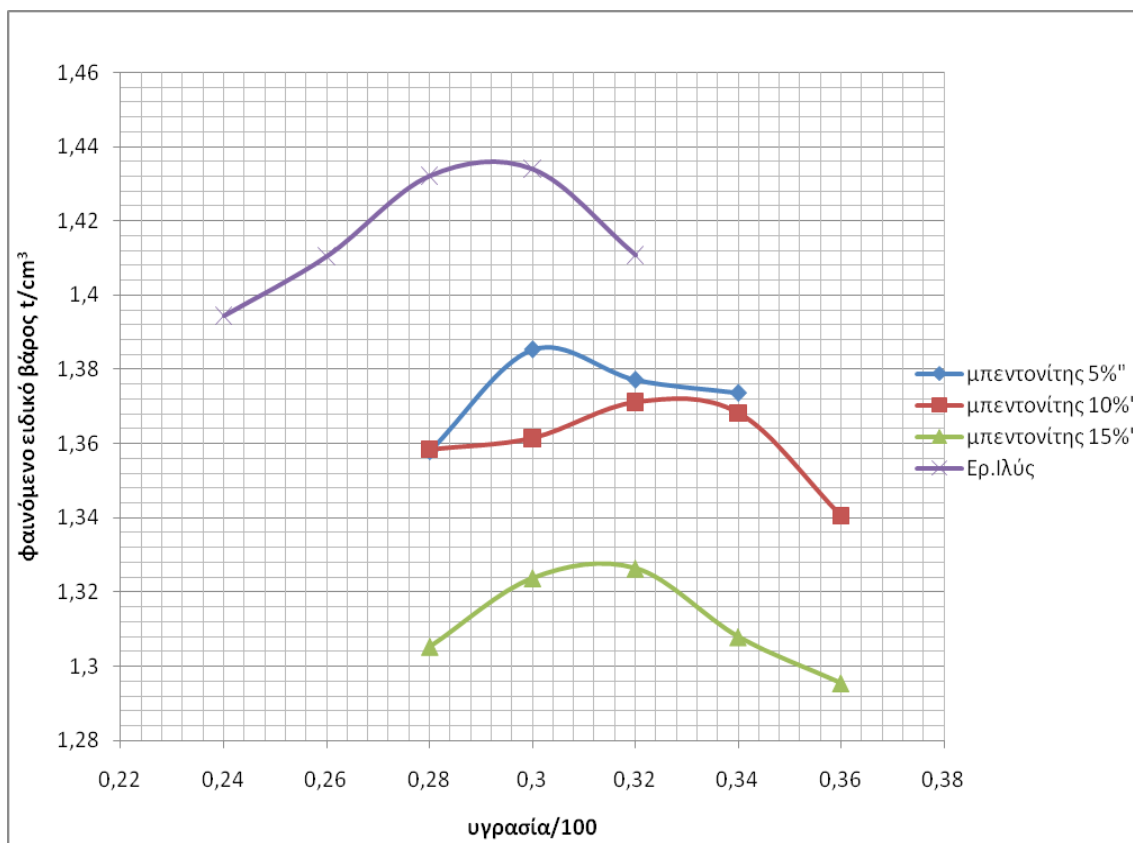
Οι βέλτιστες υγρασίες για κάθε περιεκτικότητα και αντίστοιχο ξηρό ειδικό βάρος δείχνονται παρακάτω

Πίνακας 7.13. Ευρεθείσες τιμές βέλτιστης υγρασίας – φαινόμενης πυκνότητας μειγμάτων ιπτάμενης τέφρας

Ιπτάμενη τέφρα %	5	10	15
Βέλτιση υγρασία %	33,8	38,9	40
Φαινόμενη πυκνότητα	1,452	1,425	1,356

Παρατηρείται μία αύξηση της βέλτιστης υγρασίας όσο το ποσοστό της τέφρας στο μείγμα αυξάνεται. Επίσης παρατηρείται και μείωση του ειδικού βάρους, γεγονός αναμενόμενο καθώς η τέφρα έχει μικρότερο ειδικό βάρος από την ερυθρά ιλύ. Παρατηρείται όμως ότι η βέλτιση υγρασία του μίγματος ερυθράς ιλύος και 5% τέφρας δείχνει να έχει μεγαλύτερο ειδικό βάρος από το αντίστοιχο σημείο της ερυθράς ιλύος. Παρόλα αυτά η διαφορά τους είναι πολύ μικρή.

7.3.3 Μπεντονίτης



Σχήμα 7.16.Συγκριτικές καμπύλες Μπεντονίτη – Ερ Ιλύος

Πίνακας 7.14. Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεσης μειγμάτων Μπεντονίτη – Ερ.Ιλύος

υγρασία %	Μπεντονίτης		
	5%	10%	15%
28	1,357	1,358	1,305
30	1,385	1,361	1,323
32	1,377	1,371	1,326
34	1,373	1,368	1,307
36		1,34	1,295

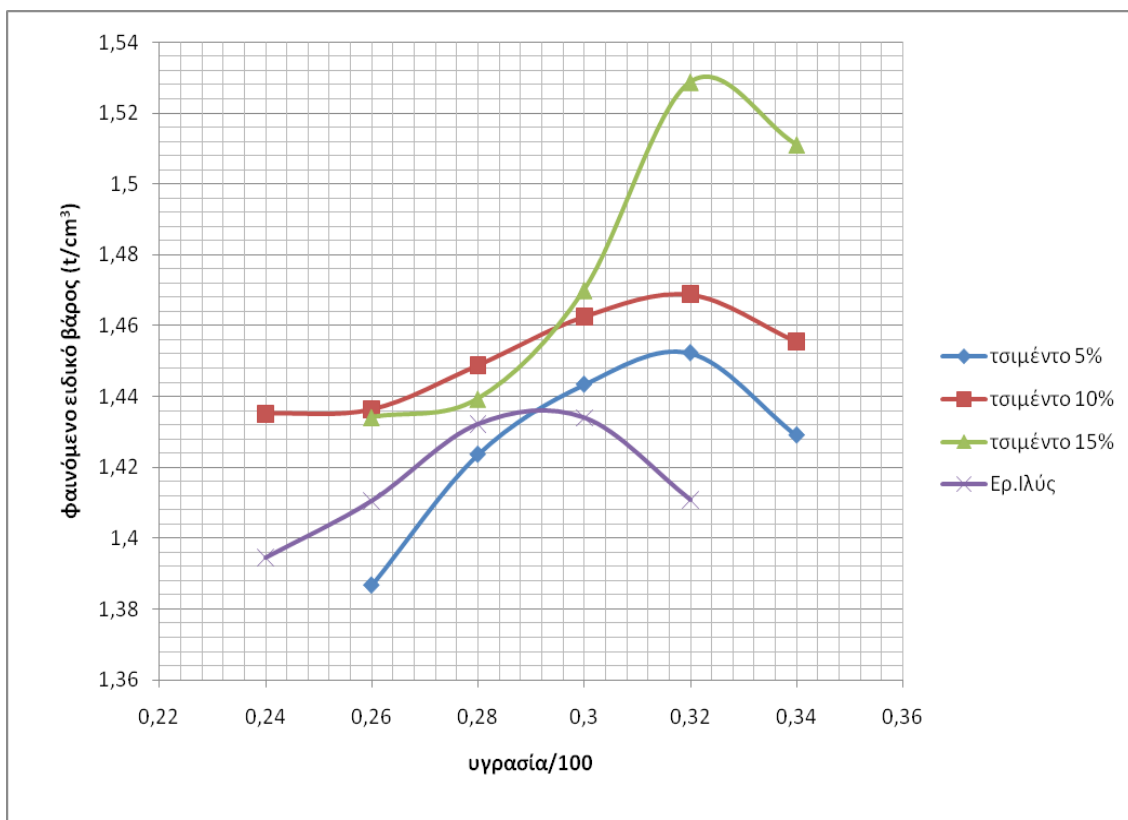
Οι βέλτιστες υγρασίες των δειγμάτων μπεντονίτη είναι οι ακόλουθες

Πίνακας 7.15. Ευρεθείσες τιμές βέλτιστης υγρασίας-φαινόμενης πυκνότητας μειγμάτων μπεντονίτη

Μπεντονίτης %	5	10	15
Βέλτιστη υγρασία %	31,3	33	30,2
Φαινόμενη πυκνότητα gr/cm ²	1,328	1,372	1,386

Παρατηρείται μεγάλη μείωση στην ξηρή φαινόμενη πυκνότητα των συμπιεσμένων δειγμάτων η οποία μάλιστα μειώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό μπεντονίτη στο μείγμα. Η μείωση της ξηρής φαινόμενης πυκνότητας είναι μεγαλύτερη από αυτήν της ιπτάμενης τέφρας παρόλο που ο μπεντονίτης έχει μεγαλύτερο ειδικό βάρος. Λόγω ειδικού βάρους του μπεντονίτη που είναι μικρότερο της E.I. ήταν αναμενόμενη ως ένα βαθμό η μείωση αυτή. Το γεγονός πως είναι συγκριτικά μεγαλύτερη από αυτήν της ιπτάμενης τέφρας οφείλεται στα φαινόμενα διόγκωσης που λαμβάνουν μέρος κατά την ενυδάτωσή του μπεντονίτη, τα οποία μάλιστα κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, ειδικά κατά τα πρώτα λεπτά των μετρήσεων διαπερατότητας που θα περιγραφούν στη συνέχεια ήταν δυνατόν να παρατηρηθούν κατά την εξέλιξη της δοκιμής στο μυκησιόμετρο, και μάλιστα γίνονταν και πιο έντονα όσο μεγάλωνε το ποσοστό μπεντονίτη.

7.3.4 Τσιμέντο



Σχήμα 7.17. Συγκριτικές καμπύλες βέλτιστης υγρασίας Τσιμέντου – Ερ.ιλύς

Πίνακας 7.16. Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεσης μειγμάτων τσιμέντου – Ερ.ιλύς

	Τσιμέντο		
Υγρασία%	5%	10%	15%
26	1,386	1,436	1,434
28	1,423	1,448	1,439
30	1,443	1,462	1,469
32	1,452	1,468	1,528
34	1,429	1,455	1,511

Πίνακας 7.17. Ευρεθείσες τιμές βέλτιστης υγρασίας-φαινομένης πυκνότητας μειγμάτων τσιμέντου

Τσιμέντο%	5	10	15
Βέλτιση υγρασία	31,8	31,7	32,3
ξηρή φαινομενη πυκνότητα	1,453	1,469	1,53

Εδώ παρατηρείται καταρχήν αύξηση του ειδικού βάρους, πράγμα αναμενόμενο λόγω μεγαλύτερου ειδικού βάρους του τσιμέντου. Άξιο παρατήρησης είναι επίσης το γεγονός πως οι βέλτιστες υγρασίες είναι περίπου ίδιες για όλα τα ποσοστά προσθήκης τσιμέντου στην ερυθρά ιλύ. Παρόλα αυτά δεν πρέπει να αγνοείται το γεγονός πως οι δοκιμές με το τσιμέντο ήταν από την αρχή οι δυσχερέστερες και αυτό διότι οι χημικές αντιδράσεις ενυδάτωσης, η παραγωγή θερμότητας από αυτήν και οι αλληλεπιδράσεις με τα άλλα στοιχεία της ιλύος είναι πολύ πιθανό να επηρεάζουν την κινητικότητα των κόκκων κατά τη διάρκεια των δοκιμών συμπίεσης και σε συνάρτηση με το χρόνο. Δηλαδή αν μετά την ενυδάτωση του υλικού μεσολαβούσε κάποιο χρονικό διάστημα πριν γίνει η συμπίεση τότε ίσως να παρατηρούνταν διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων.

7.4 Δοκιμές Διαπερατότητας

Αρχικά οι δοκιμές διαπερατότητας των δειγμάτων επρόκειτο να πραγματοποιηθούν σε διαπερατόμετρο της Σχολής Μηχανικού Μεταλλείων - Μεταλλουργών. Λόγω όμως σοβαρού τεχνικού προβλήματος και κατόπιν συνεννόησης με την εταιρεία “Εδαφομηχανική Α.Ε.” οι δοκιμές διεξήχθησαν στο εργαστήριο της εταιρείας.

Ο συσκευές ικανές για τη μέτρηση της υδροπερατότητας της “Εδαφομηχανικής” αποτελούνταν από 2 διαπερατόμετρα τα οποία λειτουργούσαν με νερό σε ατμοσφαιρική πίεση και 9 οιδήμετρα.

Αποφασίστηκε τελικά οι δοκιμές να πραγματοποιηθούν στα οιδήμετρα καθώς ήταν διαθέσιμα για δοκιμές μέχρι και 3 δοκίμια κάθε φορά, ώστε να μην δημιουργείται πρόβλημα ροής και των υπολοίπων εργασιών του εργαστηρίου, σε αντίθεση με το διαπερατόμετρο ασυμπίεστης ροής όπου υπήρχαν μόνο 2 διαθέσιμα και έτσι η χρήση τους ίσως να δημιουργούσε πρόβλημα στο προσωπικό. Ένας άλλος λόγος ήταν πως ο χρόνος των πειραμάτων στα διαπερατόμετρα ασυμπίεστης ροής θα ήταν πολύ μεγαλύτερος, πιθανώς αρκετές εβδομάδες ανά δείγμα, λόγω της λειτουργίας του διαπερατομέτρου σε χαμηλή πίεση η οποία δεν επαρκεί για την μέτρηση πολύ μικρών τιμών διαπερατότητας σε σύντομο χρονικό διάστημα. Αξίζει να αναφερθεί ότι έγινε προσπάθεια χρήσης του διαπερατόμετρου ασυμπίεστης ροής για ένα εκ των δειγμάτων (Ερ.Ιλύς – Τσιμέντο 5%) και ύστερα από 10 ημέρες το δείγμα δεν είχε ακόμη διαπεραθεί.

7.5 Προσδιορισμός του συντελεστή υδροπερατότητας στη συσκευή στερεοποίησης (Οιδήμετρο)

7.5.1 Η συσκευή και τρόπος λειτουργίας

Το οιδιμετρικό τεστ, γνωστό και ως δοκιμή μονοαξονικής θλίψης είναι ένα συνηθισμένο τεστ που μας επιτρέπει το χαρακτηρισμό ενός εδάφους ως προς την συμπεριφορά του σε θλίψη-εφελκυσμό κατά τη διάρκεια μονοδιάστατης συμπίεσης ή διόγκωσης. Επίσης μας επιτρέπει να μετράμε και την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας ενός εδάφους και την μεταβολή αυτής κάτω από διαφορετικά φορτία.

Το σύνηθες τεστ γίνεται με κυλινδρικό δείγμα με πάχος συνήθως 25 mm και διαμέτρου 75mm. Το συμπιεσμένο από τη δοκιμή συμπίεσης Proctor στη βέλτιστη υγρασία εδαφικό δείγμα, αφού εξαχθεί αρχικά με τη βοήθεια μηχανικού εξολκέα από τη μήτρα συμπίεσης αποκόπτεται με μαχαίρι και μεταλλική φόρμα τμήμα κατάλληλου μεγέθους και υπο πίεση τοποθετείται στην μικρότερη σε διαστάσεις μήτρα του οιδιμέτρου. Αυτή με τη σειρά της τοποθετείται στη βάση του οιδιμέτρου στην οποία υπάρχει πορόλιθος. Το σύνολο της κατασκευής συγκρατείται με βίδες και η διαρροή ύδατος αποφεύγεται με την τοποθέτηση στις επαφές της βάσης και της κορυφής ελαστικών δακτυλίων (O-rings).

Στη συνέχεια το δείγμα τοποθετείται στη βάση μέτρησης όπου και τοποθετείται το σύστημα που του εφαρμόζει πίεση όπως επίσης και το μηκυνσιόμετρο που μετρά τη μεταβολή του ύψους του δείγματος. Νερό προστίθεται στο δείγμα έτσι ώστε να είναι κορεσμένο 100% καθ'ολη τη διάρκεια της μέτρησης.

Στην εικόνα φαίνεται η συναρμολογημένη μήτρα του δοκιμίου, πάνω στην οποία εφαρμόζει πίεση το σύστημα βαρών (γκρίζα κατασκευή), όπως επίσης διακρίνεται και το μηκυνσιόμετρο.



Εικόνα 7.4. Το οιδήμετρο

Στη δοκιμή αυτή, αφού το δείγμα τοποθετηθεί αρχικά για μέτρηση, εφαρμόζεται επάνω του η μικρότερη δυνατή τάση μέχρι τη σταθεροποίηση του, το σημείο δηλαδή πέρα από το οποίο δεν υπάρχει αλλαγή στο ύψος του δείγματος. Έπειτα εφαρμόζονται όλο και μεγαλύτερα κάθετα στατικά βάρη και καταγράφεται κάθε φορά η αλλαγή του ύψους. Η διάρκεια της εφαρμογής των βαρών κάθε φορά εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους. Τα βάρη εφαρμόζονται έως ότου επιτευχθεί ισορροπία. Μόλις αυτή επιτευχθεί τότε μπορεί να γίνει δοκιμή διαπερατότητας. Μετά το πέρας της το επόμενο βάρος φορτώνεται.

7.5.2 Τρόπος μέτρησης Υδροπερατότητας

Για τη μέτρηση της υδροπερατότητας στο οιδήμετρο, προσαρμόζεται σε αυτό μανομετρικός σωλήνας γνωστής διαμέτρου ο οποίος συνδέεται με τον κάτω πορόλιθο. Στο τέλος της κάθε βαθμίδας φορτίσεως ο σωλήνας γεμίζεται με αποσταγμένο νερό και

έτσι προκαλείται ροή από τον σωλήνα προς το δοκίμιο.

Ο υπολογισμός της τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας μπορεί να γίνει με 2 μεθόδους.

A) Μέθοδος Σταθερού Ύψους

Στην περίπτωση αυτή ο σωλήνας γεμίζεται με αποσταγμένο νερό και συνδέεται με δεξαμενή νερού, όπου η στάθμη διατηρείται σταθερή και το ύψος της σε σχέση με το δοκίμιο είναι γνωστό.

Επειδή η υδροπερατότητα αργλικού δοκιμίου είναι πολύ μικρή κρίνεται σκόπιμη η εφαρμογή πρόσθετης πίεσεως στη δεξαμενή νερού, έτσι ώστε το υδροδυναμικό ύψος να είναι σχετικά μεγάλο και να μην απαιτείται υπερβολικά πολύς χρόνος για τη δοκιμή.

Ο συντελεστής διαπερατότητας προκύπτει από τη σχέση

$$K=Q * L/A * t * h$$

Όπου:

k = Συντελεστής υδροπερατότητας (cm/sec)

Q = Ποσότητα ροής νερού (cm³)

L = απόσταση μεταξύ των μανομέτρων (cm)

A = Επιφάνεια διατομής του δοκιμίου (cm²)

t = Ολικός χρόνος ροής (sec)

Οι υπολογισμοί γίνονται σύμφωνα με τον τρόπο που περιγράφονται στη δοκιμή υδροπερατότητας σταθερού ύψους για την Προδιαγραφή E105 - 86 -- 17

B) Μέθοδος Μεταβλητού Ύψους

Εδώ ο σωλήνας γεμίζεται με απεσταγμένο νερό και μετράται το αρχικό του ύψος του νερού στο μανομετρικό σωλήνα. Έπειτα το νερό αφήνεται να διαπεράσει το δείγμα με το ύψος νερού στο μανομετρικό σωλήνα να πέφτει διαρκώς. Στο τέλος της δοκιμής μετράται το τελικό ύψος του νερού στον μανομετρικό σωλήνα και σημειώνεται ο συνολικός χρόνος της δοκιμής.

Οι υπολογισμοί του συντελεστή της υδροπερατότητας γίνονται με τον τρόπο που περιγράφεται στη δοκιμή υδροπερατότητας μεταβλητού ύψους για τα συνηθισμένα υδροπερατόμετρα από τον τύπο: (Προδιαγραφή E105 - 86 - 18).

$$K = \frac{2.3aL}{At} \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right)$$

Όπου

K = συντελεστής υδροπερατότητας (cm/sec)

L = μήκος δοκιμίου (cm)

A = Διατομή δοκιμίου (cm²)

a = Διατομή μανομετρικού σωλήνα (cm²)

h_1 = Αρχική στάθμη νερού στο μανομετρικό σωλήνα (cm)

h_2 = Τελική στάθμη νερού στο μανομετρικό σωλήνα (cm)

t = Χρόνος δοκιμής (sec)

Οι διαστάσεις των μητρών των οιδημέτρων όπως και οι μανομετρικοί σωλήνες τους είναι τυποποιημένοι οπότε είναι γνωστά εξαρχής τα παρακάτω μεγέθη τα οποία λαμβάνονται όπως παρακάτω για όλους τους υπολογισμούς της υδροπερατότητας:

$$A = 31,470 \text{ cm}^2$$

$$a = 0,5027 \text{ cm}^2$$

Οι δοκιμές υδροπερατότητας στα δείγματά έγιναν με τη μέθοδο μεταβλητού ύψους καθώς δεν υπήρχε διαθέσιμη δεξαμενή νερού και κατάλληλη αντλία εφαρμογής πίεσεως. Ακόμη κι έτσι όμως ο χρόνος κάθε μέτρησης ήταν σχετικά μικρός (3 ημέρες μέγιστο για τις μικρότερες διαπερατότητες). Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως το δείγμα έχει πολύ μικρότερο μήκος από αυτό που χρησιμοποιείται στα συνηθισμένα διαπερατόμετρα.

Να σημειωθεί εδώ πως λόγω της έκθεσης του δείγματος σε όλο και αυξανόμενα κάθετα φορτία, το ύψος του δείγματος αλλάζει όσο αυξάνεται η τάση, έτσι χρησιμοποιήθηκε μηκυνσιόμετρο για την διόρθωση του μήκους του δοκιμίου πριν από τη έναρξη της κάθε δοκιμής.

7.6 Αποτελέσματα Δοκιμών

7.7 Ερυθρά ιλύς

Η πρώτη δοκιμή που έγινε αφορούσε το δείγμα της ερυθράς ιλύος χωρίς πρόσθετα. Ο

κυριότερος λόγος είναι πως τα αποτελέσματα που θα αντλούνταν θα αποτελούσαν το μέτρο σύγκρισης για όλα τα υπόλοιπα δείγματα. Εξάλλου, παρόλο που η τιμή της διαπερατότητας του συγκεκριμένου τύπου ερυθράς ιλύος είναι γνωστή, ήταν άγνωστη η μεταβολή αυτής υπο φορτίο όπως και ο βαθμός καθίζησης της.

Η δοκιμή διαπερατότητας στο οιδήμετρο μας έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$L_{αρχ} = 2,48 \text{ cm}$$

Πίνακας 7.18. Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας ερυθράς ιλύος στο οιδήμετρο

ΤΑΣΗ(KN/m ²)	ΚΑΘΙΖΗΣΗ	L(cm)	H1(cm)	H2(cm)	ΔT(sec)	K(cm/sec)
25,00	0,033	2,4470	60,0	53,0	1080	4,49E-06
50,00	0,08	2,4000	62,0	56,5	1080	3,30E-06
100,00	0,114	2,3660	60,0	41,0	4380	3,29E-06
200,00	0,196	2,2840	60,0	39,5	7200	2,12E-06
400,00	0,259	2,2210	62,0	47,0	6900	1,42E-06
800,00	0,320	2,1600	60,0	54,0	21600	1,68E-07

Παρατηρείται πως η τιμή της υδροπερατότητας στη μικρότερη δυνατή τάση είναι παρόμοια με τα αποτελέσματα προηγούμενων πειραμάτων ,μικροδιαφορές είναι μάλλον φυσιολογικές και μπορεί να οφείλονται στις λειτουργικές διαφορές οιδημέτρου και διαπερατομέτρου, στην εφαρμογή τάσεων, όπως επίσης και στις μικρές κοκκομετρικές διαφορές που μπορεί να υπάρχουν καθώς όπως και στα προηγούμενα πειράματα η θραύση έγινε χειρονακτικά.

Η καμπύλη διαπερατότητας-τάσεως και ειδικά διαπερατότητας-περιεκτικότητας αποκτά νόημα μόνο σε σύγκριση με τα υπόλοιπα πρόσθετα. Έτσι η χάραξη των καμπυλών της ερυθράς ιλύος μόνο είναι περιττή καθώς θα σχολιαστεί σε σχέση με κάθε πρόσθετο υλικό ξεχωριστά παρακάτω

7.7.1 Αποτελέσματα δοκιμών με προσθήκη Ιπτάμενης Τέφρας

Τα αποτελέματα των δοκιμών προσδιορισμού διαπερατότητας με την προσθήκη Ιπτάμενης Τέφρας δίδεται στους επόμενους πίνακες και διαγράμματα

Πίνακας 7.19. Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας μείγματος Ερ.Ιλύος – Τέφρας 5% στο οιδήμετρο

Τέφρα 5% (F5) $L_{αρχ} = 2,49$ cm

ΤΑΣΗ(KN/m ²)	ΚΑΘΙΖΗΣΗ	L(cm)	H1(cm)	H2(cm)	ΔT(sec)	K(cm/sec)
25,00	0,027	2,4630	62,0	28,0	1080	2,89E-05
50,00	0,036	2,4540	62,0	32,0	1080	2,39E-05
100,00	0,062	2,4280	62,0	15,0	4380	1,25E-05
200,00	0,099	2,3910	60,0	24,5	7200	4,74E-06
400,00	0,154	2,3360	62,0	55,0	6900	6,46E-07
800,00	0,230	2,2600	60,0	51,5	21600	2,54E-07

Πίνακας 7.20. Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας μείγματος Ερ.Ιλύος – Τέφρας 10% στο οιδήμετρο

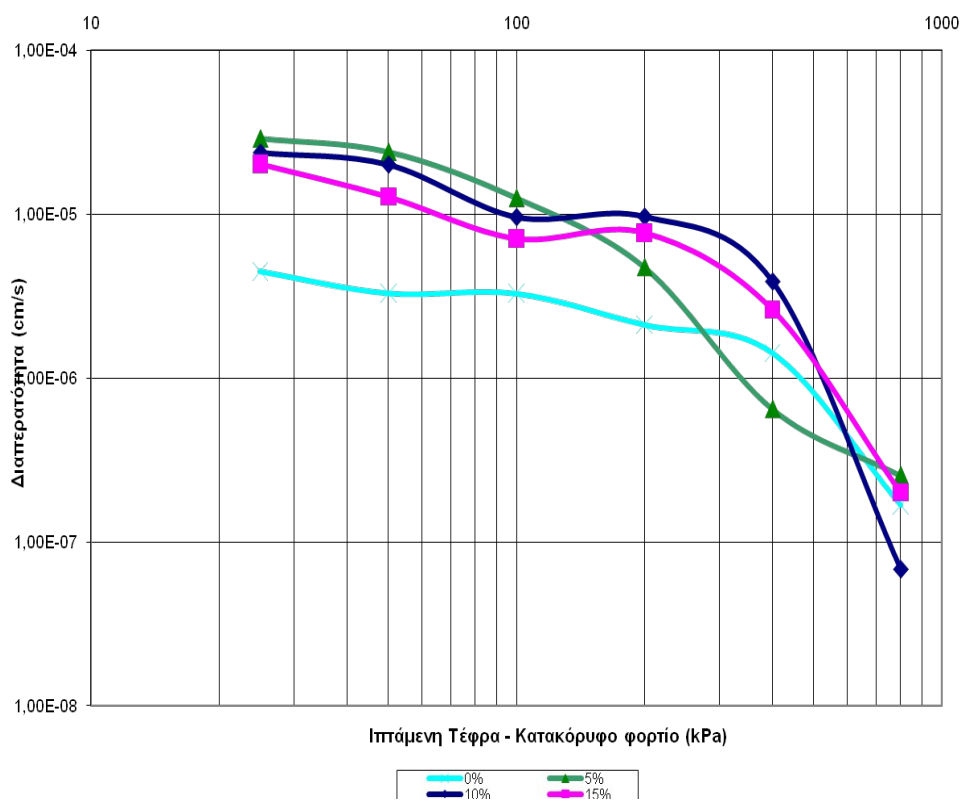
Τέφρα 10% (F10) $L_{αρχ} = 2,56$ cm

ΤΑΣΗ(KN/m ²)	ΚΑΘΙΖΗΣΗ	L(cm)	H1(cm)	H2(cm)	ΔT(sec)	K(cm/sec)
25,00	0,0005	2,5595	56,0	30,0	1080	2,36E-05
50,00	0,004	2,5560	56,0	33,0	1080	2,00E-05
100,00	0,011	2,5490	56,0	20,0	4380	9,57E-06
200,00	0,04	2,5200	56,0	18,0	4740	9,64E-06
400,00	0,086	2,4740	56,0	27,0	7440	3,87E-06
800,00	0,013	2,5471	56,0	54,0	21600	6,85E-08

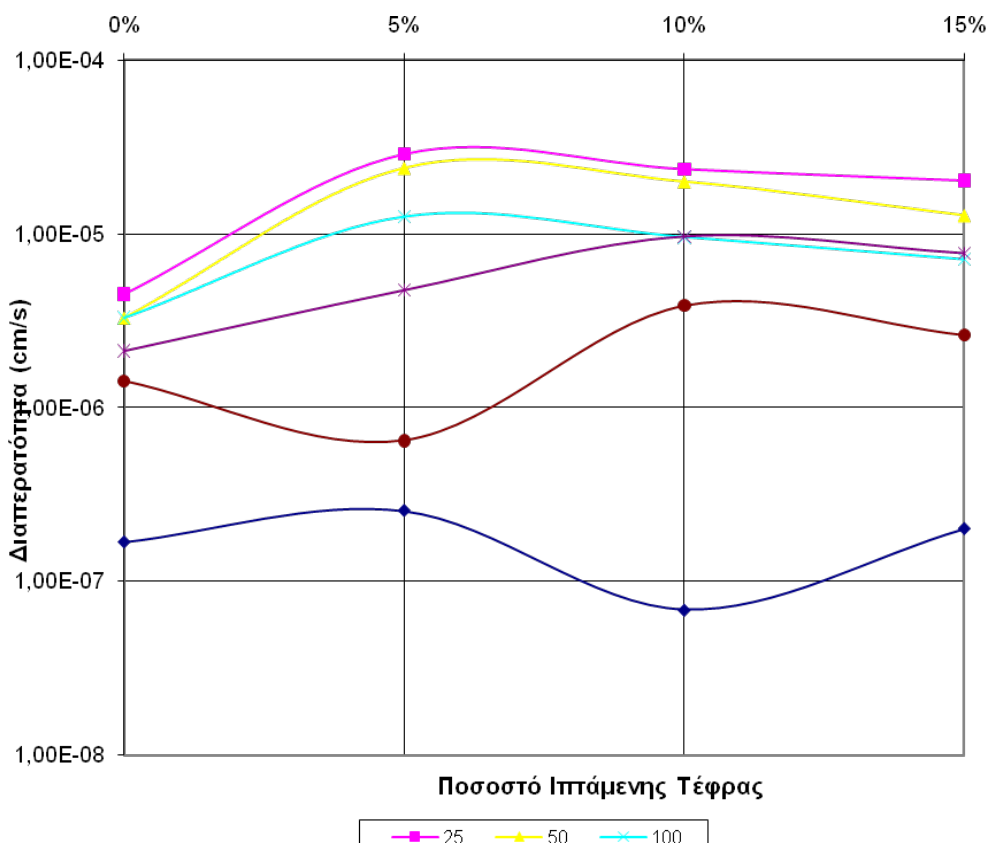
Πίνακας 7.21. Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας μείγματος Ερ.Ιλύος – Τέφρας 15% στο οιδήμετρο

Τέφρα 15% (F15) $L_{αρχ} = 2,54$ cm

ΤΑΣΗ(KN/m ²)	ΚΑΘΙΖΗΣΗ	L(cm)	H1(cm)	H2(cm)	ΔT(sec)	K(cm/sec)
25,00	0,0120	2,5280	57,0	33,0	1080	2,03E-05
50,00	0,0130	2,5270	60,0	42,5	1080	1,28E-05
100,00	0,0150	2,5250	61,0	28,0	4380	7,12E-06
200,00	0,0210	2,5190	50,0	20,0	4740	7,73E-06
400,00	0,0460	2,4940	60,0	34,0	8580	2,62E-06
800,00	0,1400	2,4000	60,5	54,0	21600	2,00E-07



Σχήμα 7.18. Συγκριτικές καμπύλες Τάσης - Διαπερατότητας Ιπ.Τέφρας – Ερ Ιλός



Σχήμα 7.19. Συγκριτικές καμπύλες Ιπ.Τέφρας – Ερ Ιλός διαπερατότητας – Ποσοστού Πρόσθετου ανα τάση

7.7.2 Ερμηνεία και σχόλια

Παρατηρείται πως η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας δεν επέφερε την επιθυμητή μείωση της διαπερατότητας, αντίθετα σημειώθηκε άυξησή της στις περισσότερες τάσεις. Το αποτέλεσμα ήταν σχετικά αναμενόμενο λόγω της κοκκομετρίας της τέφρας, η οποία είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτήν της ερυθράς ιλύος.

Αξιοσημείωτο εδώ βέβαια είναι πως στην τάση 800 KN/m² για όλα τα δείγματα παρατηρείται μια απότομη μείωση της διαπερατότητας.

Παρόλα αυτά οι υπόλοιπες τιμές παραμένουν αρκετά μεγάλες οπότε το μίγμα Ε.Ι.-τέφρας δεν θεωρείται ότι καλύπτει τις προδιαγραφές για στρώματα χαμηλής διαπερατότητας της εθνικής και Ευρωπαϊκής νομοθεσίας που ορίζουν ως όριο συντελεστή διαπερατότητας το 1×10^{-9} cm/s. Ωστόσο, καθώς είναι απόβλητο, και άρα φθηνότερη από τα άλλα 2 πρόσθετα, όπως επίσης και η διαπερατότητα της σαν απόλυτη τιμή παραμένει αρκετά χαμηλή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί με την ερυθρά ιλύ σε άλλες εφαρμογές που θα απαιτούσαν τροποποίηση των χαρακτηριστικών της ιλύος, ιδιαίτερα σε περιβάλλον υψηλών φορτίσεων καθώς έχουμε περιγράψει ήδη την χρησιμότητα της ιπτάμενης τέφρας σε εφαρμογές εδαφομηχανικής.

7.7.3 Αποτελέσματα δοκιμών με προσθήκη Μπεντονίτη

Πίνακας 7.22. Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας μείγματος Ερ.Ιλύος – Μπεντονίτη 5% στο οιδήμετρο

Μπεντονίτης 5% (B5) $L_{αρχ} = 2,49$ cm

ΤΑΣΗ(KN/m ²)	ΚΑΘΙΖΗΣΗ	L(cm)	H1(cm)	H2(cm)	ΔΤ(sec)	K(cm/sec)
25,00	-0,013	2,5030	59,2	43,5	17220	7,13E-07
50,00	0,005	2,4850	59,0	42,5	18600	6,98E-07
100,00	0,024	2,4660	59,2	44,5	23460	4,78E-07
200,00	0,058	2,4320	59,8	53,0	23100	2,02E-07
400,00	0,072	2,4180	59,5	55,3	19080	1,48E-07
800,00	0,084	2,4060	60,0	46,0	93480	1,09E-07

Πίνακας 7.23. Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας μείγματος Ερ.Ιλύος – Μπεντονίτη 10% στο οιδήμετρο

Μπεντονίτης 10% (B10)

$L_{αρχ} = 2,49 \text{ cm}$

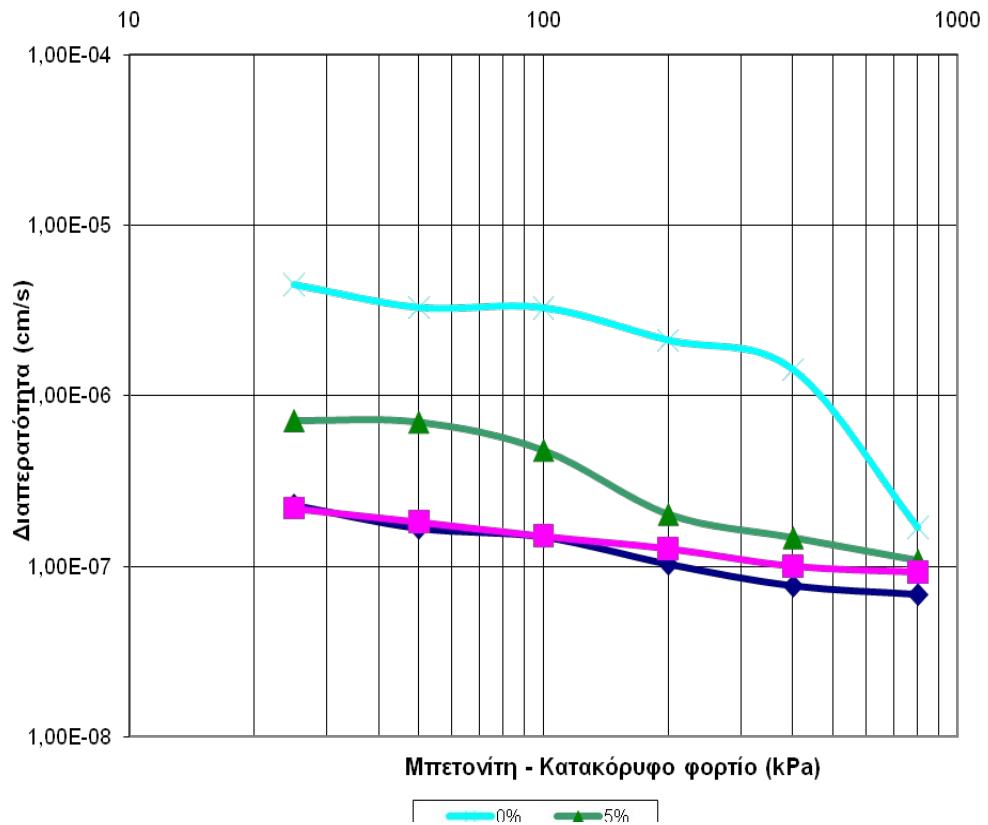
ΤΑΣΗ(KN/m ²)	ΚΑΘΙΖΗΣΗ	L(cm)	H1(cm)	H2(cm)	ΔT(sec)	K(cm/sec)
25,00	-0,061	2,5510	59,5	54,0	17220	2,29E-07
50,00	0,0105	2,4795	59,5	55,0	18600	1,67E-07
100,00	0,0275	2,4625	59,3	53,8	25740	1,48E-07
200,00	0,0455	2,4445	59,3	55,8	23100	1,03E-07
400,00	0,077	2,4130	59,2	57,0	19080	7,63E-08
800,00	0,0965	2,3935	60,0	50,8	93480	6,79E-08

Πίνακας 7.24. Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας μείγματος Ερ.Ιλύος – Μπεντονίτη 15% στο οιδήμετρο

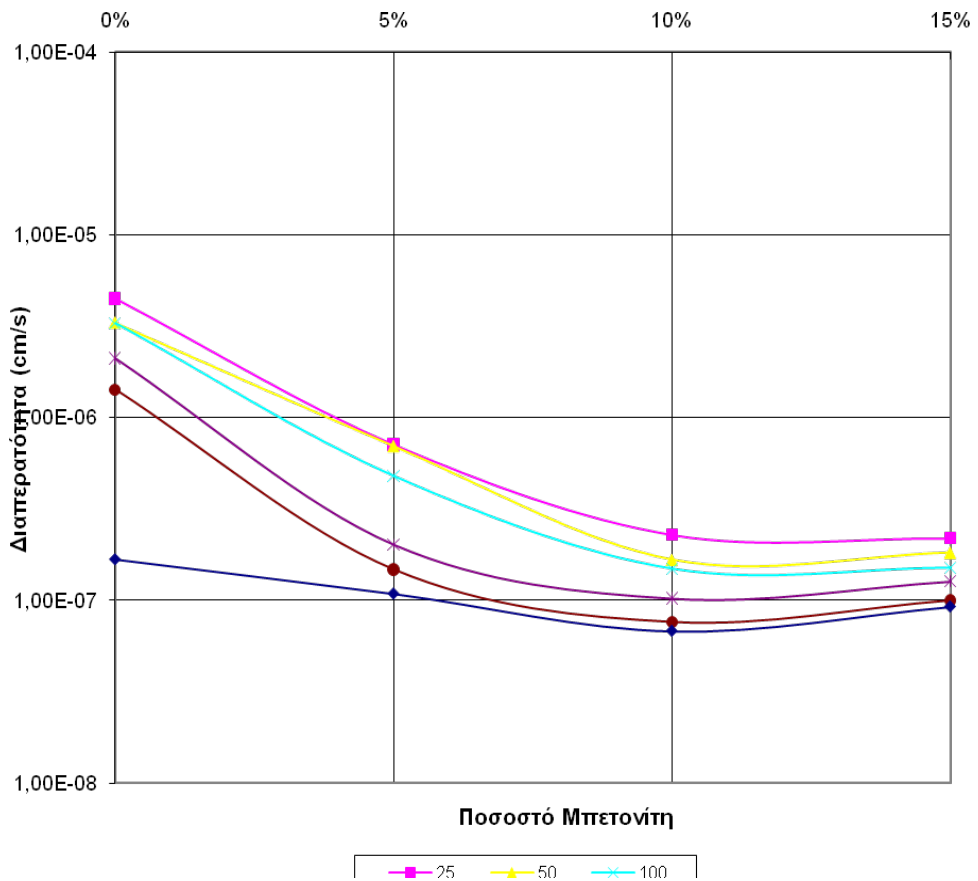
Μπεντονίτης 15% (B15)

$L_{αρχ} = 2,49 \text{ cm}$

ΤΑΣΗ(KN/m ²)	ΚΑΘΙΖΗΣΗ	L(cm)	H1(cm)	H2(cm)	ΔT(sec)	K(cm/sec)
25,00	-0,1636	2,6536	55,0	50,3	17220	2,19E-07
50,00	0,0007	2,4893	54,8	50,3	18600	1,83E-07
100,00	0,0904	2,3996	55,0	49,7	25740	1,50E-07
200,00	0,0475	2,4425	55,0	51,0	23100	1,27E-07
400,00	0,0835	2,4065	55,5	52,8	19080	1,00E-07
800,00	0,1165	2,3735	55,3	44,0	93480	9,24E-08



Σχήμα 7.20. Καμπύλες διαπερατοτήτων τάσεων Μπετονίτη – Ερ.Ιλύος ανα μείγμα



Σχήμα 7.21. Καμπύλες Διαπερατοτήτων – Ποσοστού μειγμάτων ανα τάση

7.7.4 Ερμηνεία και σχόλια

7.7.4.1 Μπεντονίτης 5%

Παρατηρείται μια αξιόλογη μείωση της διαπερατότητας ήδη από τις χαμηλές τάσεις, μέχρι δηλαδή και τα 100 KN/m² η οποία μάλιστα μειώνεται πιο έντονα από τα 200 KN/m² και μετά. Παρόλα αυτά το όριο πληρείται μόνο στα 800 KN/m² κάνοντας έτσι το δείγμα μάλλον ακατάλληλο για χρήση.

7.7.4.2 Μπεντονίτης 10%

Εδώ η υδροπερατότητα βρίσκεται κοντά στο όριο από την αρχή, Από τα 200 KN/m² και μετά μάλιστα πληρεί τις προϋποθέσεις υδροπερατότητας. Απο το διάγραμμα τάσεων-περιεκτικότητας φαίνεται επίσης πώς μικραίνει και η διασπορά των τιμών υδροπερατότητας ανα τάση. Εξάλλου και σε άλλες παρόμοιες εφαρμογές όπου μπεντονίτης αναμείχθηκε με εδάφη, η βελτίωση έγινε ορατή από περιεκτικότητες της τάξεως του 10% και άνω.(Sharma 1994)

7.7.4.3 Μπεντονίτης 15%

Από το διάγραμμα τάσης-υδροπερατότητας παρατηρείται πως το μείγμα 15% παίρνει σχεδόν τις ίδιες τιμές με το μείγμα 10% τουλάχιστον για τις τιμές μέχρι και 100 KN/m² μετά όμως η διαπερατότητα αυξάνει και παρόλο που πληρεί τις προϋποθέσεις για τάσεις πάνω από 400 KN/m², το μείγμα 10% έχει καλύτερα αποτελέσματα. Ίσως λόγω εντονότερων φαινομένων διόγκωσης όσο αυξάνει η περιεκτικότητα του μπεντονίτη, καθώς ως ένα βαθμό μπορεί η διόγκωση αυτή να μειώνει το πορώδες αλλά να φέρει αντίθετα αποτελέσματα όταν γίνεται έντονα. Απο το διάγραμμα υδροπερατότητας – Περιεκτικότητας επίσης παρατηρείται πως το μείγμα παρουσιάζει ακόμη μικρότερο εύρος τιμών από τα υπόλοιπα.

7.7.5 Συμπεράσματα.

Έχοντας ήδη απορρίψει το μείγμα μπεντονίτη 5%, παρατηρείται από το διάγραμμα υδροπερατότητας-περιεκτικότητας πώς οι καμπύλες για τις τάσεις άνω των 100 KN/m² παρουσιάζουν ελάχιστο στο μείγμα 10% και για τάσεις 25 και 50 KN/m² οι τιμές για τα μείγματα 10% και 15% είναι σχεδόν ίσες. Δεδομένου πως τα αποτελέσματα του μείγματος μπεντονίτη 10% είναι τα πιο ενθαρρυντικά αλλά και πως ο πρωταρχικός

στόχος είναι η χρήση όσο το δυνατόν μεγαλύτερου ποσοστού ερυθράς ιλύος, το μείγμα μπετονίτη 10% χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

7.7.6 Αποτελέσματα δοκιμών με προσθήκη Τσιμέντου

Πίνακας 7.25. Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας μείγματος Ερ.Ιλύος – Τσιμέντου 5% στο οιδήμετρο

Τσιμέντο 5% (C5) $L_{αρχ} = 2,56$ cm

ΤΑΣΗ(KN/m ²)	ΚΑΘΙΖΗΣΗ	L(cm)	H1(cm)	H2(cm)	ΔΤ(sec)	K(cm/sec)
25,00	-0,0025	2,5625	54,0	48,0	19740	2,44E-07
50,00	0,0005	2,5595	54,0	50,0	22500	1,40E-07
100,00	0,001	2,5590	54,0	51,0	21600	1,08E-07
200,00	0,003	2,5570	56,0	45,5	84000	1,01E-07
400,00	0,007	2,5530	55,0	43,5	87300	1,10E-07
800,00	0,025	2,5350	55,0	29,5	241800	1,04E-07

Πίνακας 7.26. Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας μείγματος Ερ.Ιλύος – Τσιμέντου 10% στο οιδήμετρο

Τσιμέντο 10% (C10) $L_{αρχ} = 2,48$ cm

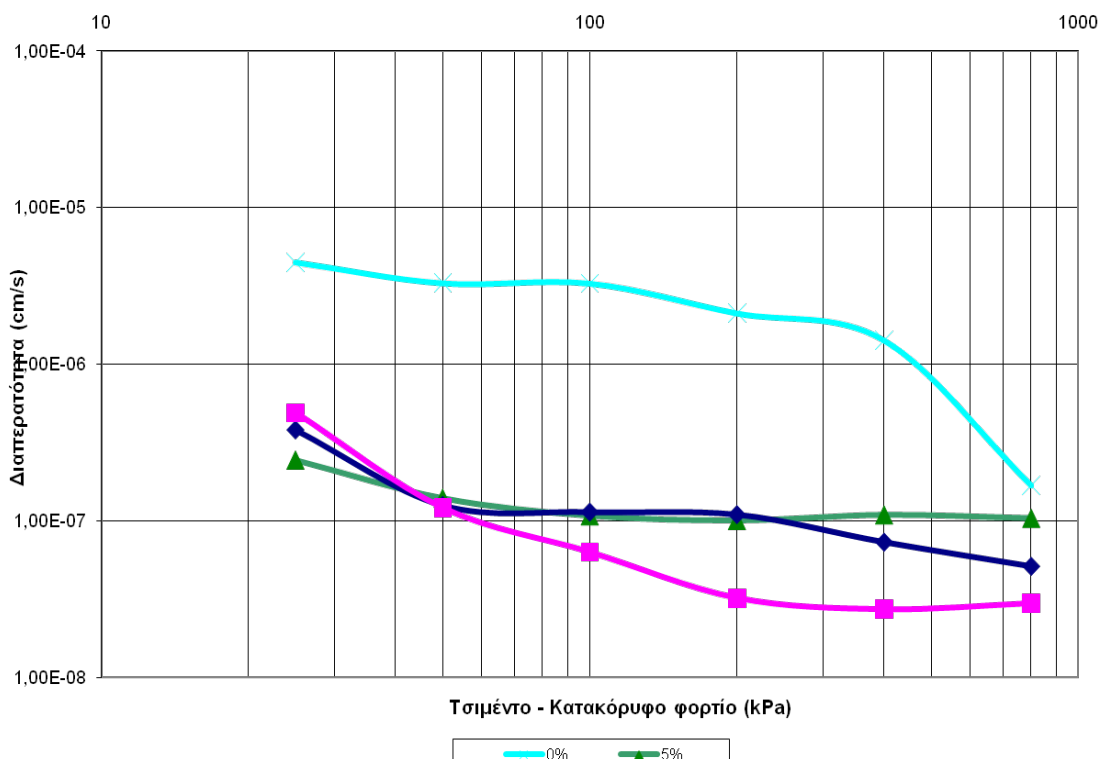
ΤΑΣΗ(KN/m ²)	ΚΑΘΙΖΗΣΗ	L(cm)	H1(cm)	H2(cm)	ΔΤ(sec)	K(cm/sec)
25,00	0	2,4800	58,0	48,0	19740	3,80E-07
50,00	0,001	2,4790	58,0	54,0	22500	1,26E-07
100,00	0,001	2,4790	58,0	54,5	21600	1,14E-07
200,00	0,003	2,4770	60,0	47,5	84000	1,10E-07
400,00	0,006	2,4740	60,0	51,0	87300	7,36E-08
800,00	0,01	2,4700	59,0	43,0	241800	5,16E-08

Πίνακας 7.27. Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας μείγματος Ερ.Ιλύος – Τσιμέντου 15% στο οιδήμετρο

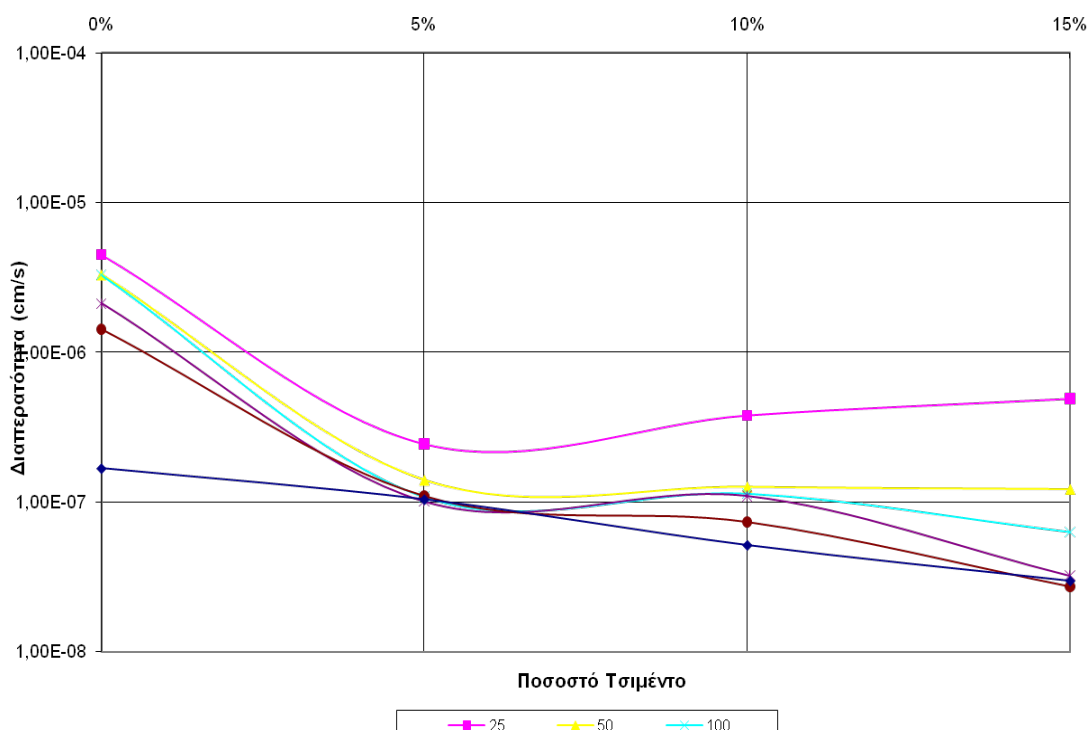
Τσιμέντο 15% (C15) $L_{αρχ} = 2,49$ cm

ΤΑΣΗ(KN/m ²)	ΚΑΘΙΖΗΣΗ	L(cm)	H1(cm)	H2(cm)	ΔΤ(sec)	K(cm/sec)
25,00	0,022	2,4680	59,5	46,5	19740	4,91E-07
50,00	0,0055	2,4845	60,0	56,0	22500	1,21E-07
100,00	0,0045	2,4855	59,0	57,0	21600	6,32E-08
200,00	0,005	2,4850	60,5	56,5	84000	3,22E-08
400,00	0,004	2,4860	60,0	56,5	87300	2,73E-08

800,00	0,009	2,4810	60,0	50,0	241800	2,98E-08
--------	-------	--------	------	------	--------	----------



Σχήμα 7.22. Καμπύλες Διαπερατοτήτων-Τάσεων Ερ.Ιλός-Τσιμέντου ανα Μείγμα



Σχήμα 7.23. Καμπύλες Διαπερατοτήτων – Ποσοστού Τσιμέντου και Ερ.Ιλός ανα τάση

7.7.7 Ερμηνεία και Σχόλια

7.7.7.1 Τσιμέντο 5% (C5)

Παρατηρείται πως το δείγμα παρουσιάζει πολύ μικρή υδροπερατότητα, ήδη από τα 50 KN/cm² βρίσκεται πολύ κοντά στο όριο και το πληρεί από τα 100 KN/cm². Αξιοσημείωτο εδώ είναι από το διάγραμμα υδροπερατότητας – περιεκτικότητας το πολύ μικρό εύρος τιμών του μείγματος 5% από τα 50 KN/cm² και μετά όπου η τιμή της υδροπερατότητας παραμένει σχεδόν αμετάβλητη ανεξάρτητα από την αύξηση των τάσεων. Θα μπορούσε να θεωρηθεί ένδειξη πως το υλικό έχει αυξημένη αντοχή σε θλίψη. Τα δύο αυτά κριτήρια το κάνουν κατάλληλο για περεταίρω διερεύνηση.

7.7.7.2 Τσιμέντο 10% (C10)

Αρχικά στο 10% παρατηρείται αύξηση της διαπερατότητας στην τάση 25 KN/cm², από τα 50 KN/cm² και μέχρι τα 200 KN/cm² ήταν πρακτικά οι ίδιες με τις τιμές του μείγματος 5%, ουσιαστικά στο όριο και το ξεπέρασαν στις τάσεις 400 και 800 KN/cm². Θα πρέπει να αναφερθεί εδώ πως και στις δοκιμές συμπίεσης τα δύο αυτά μείγματα είχαν παρόμοιες καμπύλες αλλά και πολύ μικρή διαφορά στην φαινόμενη πυκνότητα.

7.7.7.3 Τσιμέντο 15% (C15)

Για το μείγμα 15% στη αρχική τάση παρατηρήθηκε περεταίρω αύξηση της υδροπερατότητας σε σχέση με τα άλλα δύο μείγματα. Παρόλα αυτά από τα 50 KN/cm² οι τιμές πληρούν ουσιαστικά τις προδιαγραφές και μάλιστα εμφανίζει τα καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με όλα τα υπόλοιπα δείγματα.

7.7.8 Συμπεράσματα

Παρατηρείται πως όλα τα μείγματα με το τσιμέντο παρήγαγαν αποτελέσματα τα οποία χρήζουν περεταίρω διερεύνησης.

Ένα ενδιαφέρον φαινόμενο που παρατηρήθηκε, και είναι εμφανές στο διάγραμμα υδροπερατότητας-περιεκτικότητας είναι η αρχική αύξηση της διαπερατότητας με την αύξηση του ποσοστού τσιμέντου στο δείγμα για την αρχική τάση 25 KN/cm² αλλά για όλες τις υπόλοιπες δοκιμές παρατηρήθηκε μείωση της υδροπερατότητας αναλογικά με την αύξηση του τσιμέντου. Επίσης παρατηρήθηκε από το ίδιο διάγραμμα πως το εύρος τιμών της υδροπερατότητας παρουσιάζει ένα ελάχιστο στο μείγμα 5% και στη συνέχεια

αυξάνει όσο αυξάνει η περιεκτικότητα του τσιμέντου στο μείγμα.

Αν και σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας δεν είναι η μικροσκοπική μελέτη των φαινομένων που επηρεάζουν την υδροπερατότητα σε αυτά τα μείγματα, η σχετική αύξηση της διαπερατότητας αναλογικά με την αύξηση του ποσοστού τσιμέντου στην αρχική τάση 25 KN/cm^2 όπως επίσης και η αυξανόμενη διασπορά των τιμών είναι στοιχεία που σίγουρα χρήζουν προσεκτικότερης διερεύνησης καθώς και τα τρία δείγματα του τσιμέντου είχαν αξιόλογα αποτελέσματα και έτσι πιθανή μελλοντική χρήση τους θα απαιτούσε καλύτερη κατανόηση αυτού του φαινομένου έτσι ώστε να γίνει όσο γίνεται πιο αποδοτική η χρήση τους σαν στρώματα χαμηλής διαπερατότητας.

Μία πιθανότητα πάντως για την συμπεριφορά αυτή του υλικού είναι πως το τσιμέντο τείνει να αποκτήσει τις ιδιότητες του σε συνάρτηση με το χρόνο όπως επίσης και ύστερα από συνεχή διαβροχή με νερό. Έτσι κάθε φορά που το δείγμα διαπερνούνταν από νερό ολοκληρώνονταν οι χημικές αντιδράσεις μέσα στο δείγμα προσδίδοντας του όλο και καλύτερες ιδιότητες. Με τα φαινόμενα αυτά να γίνονται πιο έντονα όσο το ποσοστό του τσιμέντου άρχισε να αυξάνεται στο δείγμα. Φυσικά δεν θα πρέπει να αγνοείται και η πιθανότητα αντιδράσεων των συστατικών της ερυθράς ίλυος με το τσιμέντο.

7.8 Βαθμός καθίζησης

Αν και ο σκοπός της διπλωματικής αυτής ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας μείωσης ή όχι της υδροπερατότητας της Ερυθράς Ίλυος, κατά την επεξεργασία των δεδομένων έγινε φανερό πως πέρα από τις υδραυλικές της ιδιότητες μπορούσαμε να αντλήσουμε και ένα ποιοτικό στοιχείο για τον επηρεασμό των μηχανικών χαρακτηριστικών της ερυθράς ίλυος από τα πρόσθετα.

Το οιδήμετρο καθ'όλη τη διάρκεια των πειραμάτων ήταν εφοδιασμένο με μηκυνσιόμετρο, κύριος ρόλος του οποίου είναι η μέτρηση της μεταβολής του ύψους ενός δοκιμίου κατά την δοκιμή μονοδιαστατης στερεοποίησης. Στη δική μας περίπτωση το μηκυνσιόμετρο χρησιμοποιείτο για να παρέχει την μεταβολή του ύψους του δοκιμίου με σκοπό να γίνεται διόρθωση του μήκους του δοκιμίου κάθε φορά που αυξανόταν η τάση καθώς το L μειώνεται.

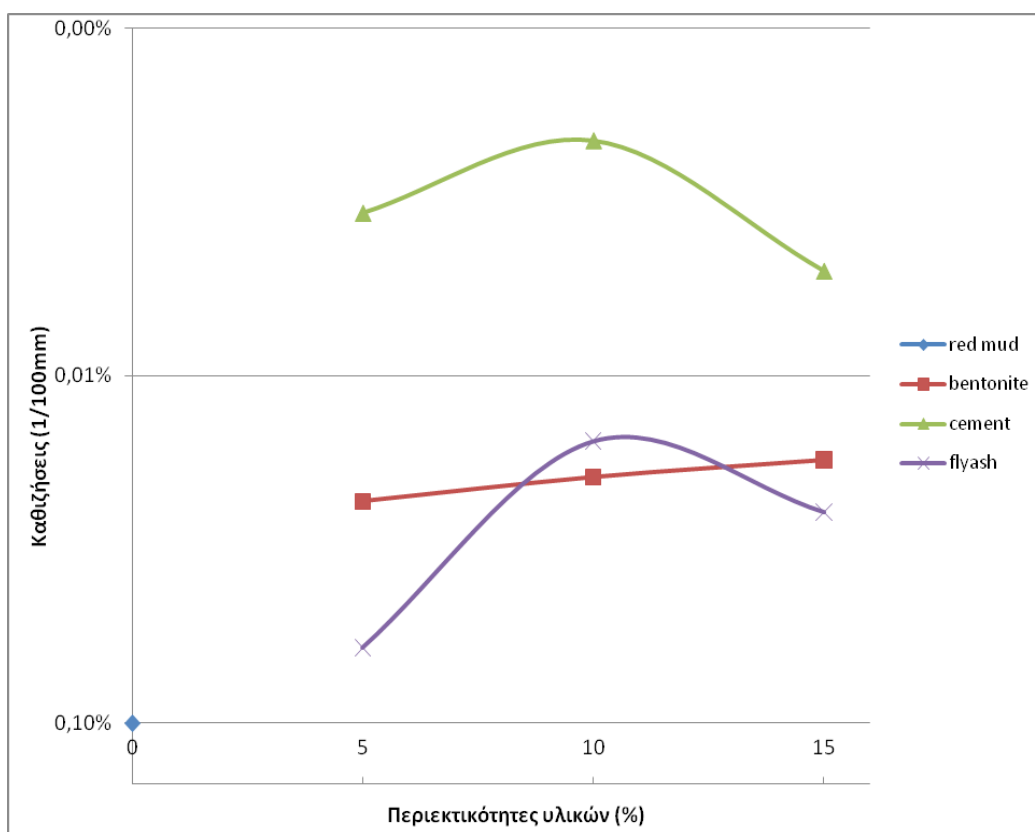
Η μέτρηση του βαθμού στερεοποίησης είναι μία τυποποιημένη μέθοδος η οποία δεν εφαρμόστηκε στα πειράματά μας. Παρόλα αυτά, καθώς κάθε πείραμα ολοκληρωνόταν όταν πλέον είχε επέλθει ισορροπία στο δοκίμιο όσον αφορά το μήκος του, αυτό σημαίνει πως η τιμή της συνολικής καθίζησης μπορεί να θεωρείται αρκετά αξιόπιστη για

σχολιασμό.

Οι συνολικές καθιζήσεις των υλικών δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 7.28. Συνολική καθίζηση του κάθε μείγματος μετά το πέρας της δοκιμής διαπερατότητας στο οιδήμετρο

Περιεκτικότητες %	Συνολική Καθίζηση (1/100 mm)			
	Ερ Ιλύς	Ιππ. Τέφρα	Τσιμέντο	Μπεντονίτης
0	1,002			
5		0,608	0,034	0,23
10		0,1544	0,021	0,196
15		0,247	0,05	0,175



Σχήμα 7.24. Καμπύλες ολικών καθιζήσεων ανα μείγμα και ερυθράς ιλύος.

Από τις τιμές αλλά και από τον πίνακα μπορούμε να αντλήσουμε κάποια ενδιαφέροντα συμπεράσματα για την μηχανική αλλά πιθανώς και τη χημική συμπεριφορά των υλικών.

Είναι προφανές κατ'αρχήν πως η προσθήκη οποιουδήποτε από τα 3 πρόσθετα μειώνει το βαθμό καθιζήσεως. Απο αυτά το τσιμέντο παρουσιάζει την μικρότερη, μία τάξη

μεγέθους περίπου μικρότερη από τα άλλα 2.

Παρατηρούμε επίσης πως υπάρχει μία γραμμική μείωση της διαπερατότητας ανάλογη της αύξησης του μπεντονίτη στη ερυθρά ιλύ. Αντίθετα το τσιμέντο και η ιπτάμενη τέφρα σχηματίζουν καμπύλες με την χαμηλότερη τιμή να εμφανίζεται στο μείγμα 10% και για τα 2 υλικά. Ίσως αυτό να οφείλεται και στη συγγένεια των 2 υλικών καθώς η ιπτάμενη τέφρα είναι σύνηθες πρόσθετο στο τσιμέντο πόρτλαντ.

Δεδομένης της μικρής κλίμακας της καθίζησης μπορούμε να πούμε επίσης πως ο μπεντονίτης με την ιπτάμενη τέφρα παρουσιάζουν σχεδόν την ίδια καθίζηση στα μείγματά τους 10% και 15%.

Τέλος, δεδομένης της μεγάλης διαφοράς της καθίζησης του τσιμέντου με τα άλλα 2 υλικά, και έχοντας υποψην πως τα αποτελέσματα της διαπερατότητας μεταξύ τσιμέντου – μπεντονίτη δεν διέφεραν θεαματικά τελικά σημαίνει πως ο μηχανισμός μείωσης της διαπερατότητας στα 2 αυτά υλικά είναι διαφορετικός.

Αυτά τα στοιχεία αποτελούν ενδείξεις πως με την προσθήκη των 3 υλικών έχουμε τροποποίηση των μηχανικών και πιθανώς και ορισμένων χημικών της ιδιοτήτων.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το πιο σημαντικό συμπέρασμα των διεξαχθέντων πειραμάτων είναι η απόδειξη πως η μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας της ερυθράς ύλης σε τιμές που αγγίζουν η και υπερκαλύπτουν τα όρια της νομοθεσίας είναι εφικτή με τη χρήση μικρού σχετικά ποσοστού πρόσθετου υλικού.

Επίσης παρατηρήθηκε πως η κοκκομετρία σε αντίθεση με τα εδάφη δεν παίζει τον μεγαλύτερο ρόλο στη μείωση της διαπερατότητας όταν πρόκειται για πρόσθετα όπως το τσιμέντο και ο μπεντονίτης καθώς είναι εύκολα παρατηρήσιμο από την κοκκομετρική τους κατανομή πως είναι πιο χονδρόκοκκα από την ερυθρά ύλη.

Όμοια προκύπτει και για το βαθμό καθίζησης, ενώ η ερυθρά ύλη καθιζάνει και παράλληλα η διαπερατότητά της μειώνεται, στα υπόλοιπα υλικά και ειδικά στο τσιμέντο παρατηρείται σχεδόν μηδενική καθίζηση και επίσης για το δείγμα 5% αμετάβλητη υδροπερατότητα, ανεξάρτητα από το την τάση.

Προτάσεις περαιτέρω έρευνας.

Η διαπερατότητα ίσως να θεωρείται πολύ σημαντικός παράγοντας για ένα στρώμα χαμηλής διαπερατότητας, ωστόσο υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που πρέπει να ερευνηθούν όπως η μηχανική αντοχή του κάθε υλικού και η αλληλεπίδραση των μειγμάτων με τα στραγγίσματα

Επίσης η τιμή της διαπερατότητας έχει αποδειχθεί πως επηρεάζεται από την υγρασία συμπίεσης. Δηλαδή σε μερικά εδάφη έχουν παρατηρηθεί πολύ μειωμένες διαπερατότητες όταν αυτά συμπίεστηκαν σε υγρασίες μεγαλύτερες, της τάξεως του 2-4% της βέλτιστης. Το πλήθος των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν δεν επέτρεψε να πραγματοποιηθούν τέτοιες δοκιμές.

Ακόμη προκύπτει από τα αποτελέσματα πως ο μηχανισμός ο οποίος μείωσε το πορώδες στα δείγματα δεν οφείλεται στην κοκκομετρία. Θα είχε ενδιαφέρον μια έρευνα σε μικροσκοπικό επίπεδο για το μηχανισμό δράσης του τσιμέντου και του μπεντονίτη. Στο τσιμέντο ιδιαίτερα λόγω των πολύ μεγάλων διαφορών σε σχέση με τα άλλα δείγματα.

Βιβλιογραφία

-
- Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, **Τελική έκθεση προγράμματος ΠΑΒ ΕΤ 2000 “Αξιοποίηση της Ερυθράς Ιλύος για την Ανάπτυξη Εδαφικού Καλύμματος και τη Φυτοκάλυψη Χώρων Απόθεσης Στερεών Απορριμμάτων (Α.Ξ.Ε.Ρ.Ι.Α.)”**,
- Κοντόπουλος Αντώνης, **“Δυνατότητες και Προοπτικές Αξιοποίησης της Ερυθράς Ιλύος” ΤΕΕ.**
- Τσαρουχάς Δημήτρης, **“Μέθοδος Bayer”**, 2006
- Τσομπανόγλου, Theissen, Eliassen, **“ SOLID WASTE: Engineering Principles And Management Issue”**Mc Grew Hill,1996
- Energetics Inc., **“Technology Roadmap for Bauxite Residue Treatment and Utilization”**, Φεβρουάριος 2000
- Goen E. Ho, **“Overcoming the Salinity and Sodicity of Red Mud for Rehabilitation and Reuse”**,1989
- A.R.Hind, **“Colloids and Surfaces”**,1999
- P.M. Prasad and S.Subramanian, **“Problems and Prospects of Red Mud Utilisation”**,Οκτώβριος 1997
- Craig Klauber,markus Grafe,Greg Power,”Review of Bauxite Residue Re-use options,August 2009”
- Craig Klauber,markus Grafe,Greg Power,”Review of current bauxite residue management,disposal and storage:practices,engineering and science
- ” Jorge Jaramillo "Guidelines for the design, construction, and operation of manual sanitary landfills" 2003
- ISWA Landfill Operational Guidelines - 2nd Edition
- "SOLID WASTE: Engineering Principles And Management Issue” Mc Grew Hill,1996
- UNEP - "Solid Waste Management"
- S&B - site
- Wyoming state geological survey

- <http://www.mineralco.net/bentonite/bentonite-mineral.php>
- Φιλιππακοπούλου θεοδώρα - The paper cycle/ο κυκλος του χαρτιού 2009

- S&B,Bentonite Division Upstream Operations - Bentonite operations,Milos Island,Greece

- *E. Στιβανάκης-*”ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΝΕΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟ ΣΤΕΡΕΑ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΛΙΓΝΙΤΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ” *Πάτρα 2003*

- Τσακαλακης Κωνσταντίνος – “**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΚΑΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**” – 2010
- Skodras G,Karangelos D.Anagnostakis M,Hinis,E Granmelis,kakaraS E – **Coal Fly-ash Utilisation in Greece**

**9. XUEDE QUIAN,ROBERT M.KOERNER,DONALD H. GRAY -
GEOTECHNICAL ASPECTS OF LANDFILL DESIGN AND
CONSTRUCTION**