

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

**ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ
ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΛΕΙΟΤΡΙΒΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ
ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΡΑΔΙΟΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ
ΑΝΑΛΥΣΗ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ της

ΛΟΥΚΙΑΣ Κ. ΠΡΕΝΤΖΑ

Σπουδάστριας της Σχολής

Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επίβλεψη: Επ. Καθηγητής Μ.Ι.Αναγνωστάκης

Συνεργασία: Δ.Ι.Καράγγελος

ΑΘΗΝΑ 2009

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Κατά την ανάλυση περιβαλλοντικών υλικών με μεθόδους πυρηνικής τεχνολογίας απαιτείται συχνά ένα ή περισσότερα στάδια προετοιμασίας και ομογενοποίησης του υλικού πριν την ανάλυση. Στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας (ΔΕ) εξετάστηκε η λειοτριβίση ως μέθοδος προετοιμασίας δειγμάτων από περιβαλλοντικά υλικά.

Το ΕΠΤ-ΕΜΠ πρόσφατα προμηθεύτηκε εξοπλισμό λειοτριβίσης ο οποίος περιλαμβάνει θραυστήρα σιαγόνων τύπου BB51 και πλανητικό μύλο τύπου PM100 της εταιρείας Retsch. Στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ ο εξοπλισμός αυτός τέθηκε για πρώτη φορά σε λειτουργία, μελετήθηκε και χρησιμοποιήθηκε για την προετοιμασία δειγμάτων από οικοδομικά υλικά και Ιπτάμενη Τέφρα για ανάλυση με μεθόδους γ-φασματοσκοπίας

Η ΔΕ εκπονήθηκε στον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ κατά το χρονικό διάστημα Οκτώβριος 2008-Ιούλιος 2009. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Μ.Ι Αναγνωστάκη, ο οποίος κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών, με τις γνώσεις του και τη συνεχή και ουσιαστική επαφή με τους φοιτητές, προκάλεσε το ενδιαφέρον μου για την Πυρηνική Τεχνολογία. Θα ήθελα επίσης να τον ευχαριστήσω για την ευκαιρία που μου έδωσε με την ανάθεση της παρούσας ΔΕ να ασχοληθώ με θέματα που με ενδιαφέρουν.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον διδάκτορα Δ.Καράγγελο, για την επίβλεψη κάθε σταδίου εκπόνησης της παρούσας ΔΕ και για την ουσιαστική του βοήθεια για την επίλυση κάθε προβλήματος που παρουσιάστηκε. Η παρούσα ΔΕ δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς την καθοριστική συμβολή του.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Κ. Καρφόπουλο για τις γνώσεις του σε θέματα σχετικά με την αυταπορρόφηση και για την βοήθεια του στην εφαρμογή του κώδικα selfabs. Σημαντικές υπήρξαν και οι πάντα εύστοχες παρατηρήσεις του Λέκτορα κ. Ν. Πετρόπουλου για την αντιμετώπιση δυσκολιών που προέκυψαν.

Αθήνα, Ιούλιος 2009

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | |
|---|----|
| Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή | 1 |
| Κεφάλαιο 2: Λειοτριβίση εργαστηριακών δειγμάτων | 4 |
| 2.1. Εισαγωγή | 4 |
| 2.2. Γενικές αρχές λειοτριβίσης..... | 4 |
| 2.3. Κατηγοριοποίηση εξοπλισμού λειοτριβίσης | 6 |
| 2.4. Ο Θραυστήρας Retsch BB51 | 8 |
| 2.4.1. Περιγραφή..... | 8 |
| 2.4.2. Διαδικασία λειτουργίας του θραυστήρα BB51 | 9 |
| 2.4.3. Δοκιμές λειτουργίας..... | 10 |
| 2.4.4. Παρατηρήσεις από τη λειτουργία του θραυστήρα..... | 12 |
| 2.5. Ο Πλανητικός Μύλος Retsch PM 100..... | 13 |
| 2.5.1. Περιγραφή..... | 13 |
| 2.5.2. Διαδικασία λειτουργίας του μύλου PM100 | 15 |
| 2.5.3. Δοκιμές λειτουργίας..... | 16 |
| 2.5.3.1. Επίδραση Στροφών (Δείγμα 2) | 16 |
| 2.5.3.2. Επίδραση χρόνου λειοτριβίσης (Δείγμα 3)..... | 17 |
| 2.5.3.3. Επίδραση μεγέθους σφαιρών (Δείγμα 4, 5)..... | 20 |
| 2.5.3.4. Επίδραση φορτίου (Δείγμα 6)..... | 21 |
| 2.5.3.5. Επίδραση διακοπής ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και αλλαγής φοράς (Δείγμα 7,8) | 22 |
| 2.5.4. Παρατηρήσεις από τη λειτουργία του μύλου | 23 |

| | |
|--|----|
| Πίνακες Κεφαλαίου | 25 |
| Σχήματα Κεφαλαίου | 26 |
| Κεφάλαιο 3: Μελέτη των ραδιολογικών χαρακτηριστικών οικοδομικών υλικών | 34 |
| 3.1. Εισαγωγή | 34 |
| 3.2. Φυσική ραδιενέργεια οικοδομικών υλικών | 34 |
| 3.3. Οδηγίες σχετικά με την προστασία από τη φυσική ραδιενέργεια των οικοδομικών υλικών | 36 |
| 3.4. Προετοιμασία δειγμάτων οικοδομικών υλικών | 37 |
| 3.4.1. Τσιμεντόλιθος | 38 |
| 3.4.2. Χαλίκι | 38 |
| 3.4.3. Μάρμαρο..... | 39 |
| 3.4.4. Γρανίτες | 39 |
| 3.5. Ανάλυση οικοδομικών υλικών με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας..... | 39 |
| 3.6. Αυταπορρόφηση οικοδομικών υλικών | 42 |
| 3.6.1. Θεωρητικό Υπόβαθρο..... | 42 |
| 3.6.2. Μεθοδολογία διόρθωσης αυταπορρόφησης | 43 |
| 3.6.3. Μεθοδολογία πειραματικού προσδιορισμού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ | 45 |
| 3.6.4. Προσδιορισμός γραμμικού συντελεστή εξασθένισης του νερού..... | 46 |
| 3.6.5. Προσδιορισμός γραμμικού συντελεστή εξασθένισης οικοδομικών υλικών | 48 |
| 3.6.5.1. Προσδιορισμός του γραμμικού συντελεστή εξασθένισης γρανίτη | 49 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 3.6.5.2. | Προσδιορισμός του γραμμικού συντελεστή εξασθένισης τούβλου | 51 |
| 3.6.5.3. | Προσδιορισμός του γραμμικού συντελεστή εξασθένισης τσιμεντόλιθου..... | 51 |
| 3.6.5.4. | Προσδιορισμός της σχέσης μ -E..... | 52 |
| 3.6.6. | Μελέτη αυταπορρόφησης οικοδομικών υλικών για περιοχή ενεργειών >200 keV..... | 53 |
| 3.7. | Αποτελέσματα αναλύσεων | 56 |
| 3.7.1. | Υπολογισμός συντελεστή διόρθωσης αυταπορρόφησης και εκτίμηση της αβεβαιότητάς του..... | 57 |
| 3.7.2. | Αποτελέσματα γ -φασματοσκοπικής ανάλυσης | 57 |
| | Πίνακες Κεφαλαίου | 61 |
| | Σχήματα Κεφαλαίου | 86 |
| | Κεφάλαιο 4: Επίδραση της ανομοιογένειας των δειγμάτων στα αποτελέσματα της γ - φασματοσκοπικής ανάλυσης. | 105 |
| 4.1. | Εισαγωγή | 105 |
| 4.2. | Μηχανισμός επίδρασης της ανομοιογένειας δειγμάτων στη γ - φασματοσκοπική ανάλυση..... | 106 |
| 4.3. | Γενικά στοιχεία για την Τέφρα..... | 107 |
| 4.4. | Προετοιμασία δειγμάτων και διαχωρισμός κοκκομετρικών κλασμάτων.. | 108 |
| 4.4.1. | Παραγωγή αντιπροσωπευτικών δειγμάτων Ιπτάμενης Τέφρας..... | 109 |
| 4.4.2. | Διαχωρισμός και συσκευασία κοκκομετρικών κλασμάτων | 110 |
| 4.5. | Ανάλυση γ -φασματοσκοπίας δειγμάτων I.T..... | 111 |
| 4.6. | Αποτελέσματα αναλύσεων | 111 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 4.7. | Ισοζύγια ραδιενέργειας..... | 112 |
| 4.8. | Διερεύνηση της επίδρασης της κοκκομετρίας Ι.Τ στη γ-φασματοσκοπική ανάλυση | 114 |
| 4.8.1. | Εξέταση της δόνησης του συσκευασμένου δείγματος | 114 |
| 4.8.2. | Εξέταση ακραίας περίπτωσης διαστρωμάτωσης..... | 115 |
| 4.8.3. | Εξέταση δείγματος με ανακατανομή κόκκων με δόνηση..... | 117 |
| 4.8.4. | Λειοτρίβιση Ιπτάμενης Τέφρας | 117 |
| | Πίνακες Κεφαλαίου | 122 |
| | Σχήματα Κεφαλαίου | 131 |
| | Κεφάλαιο 5: Επίλογος | 139 |
| 5.1. | Σύνοψη της Εργασίας | 139 |
| 5.2. | Προοπτικές μελλοντικής έρευνας..... | 142 |
| | Παράρτημα Α: Παράδειγμα ανάλυσης οικοδομικού υλικού από τον κώδικα SPUNAL | 145 |
| | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 147 |

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Κατά την ανάλυση περιβαλλοντικών δειγμάτων με μεθόδους πυρηνικής τεχνολογίας απαιτείται μικρότερης ή μεγαλύτερης κλίμακας προετοιμασία. Τα δείγματα προς ανάλυση είναι προτιμότερο να είναι σε μορφή σκόνης, ώστε να διευκολύνεται η συσκευασία τους σε τυποποιημένη γεωμετρία. Επιπλέον, επειδή τα περιβαλλοντικά υλικά είναι συχνά ανομοιογενή, απαιτείται ομογενοποίηση του δείγματος. Για τους λόγους αυτούς, εφαρμόζεται η λειοτρίβιση με κατάλληλο εξοπλισμό ως μέθοδος προετοιμασίας δειγμάτων από περιβαλλοντικά υλικά.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία παρουσιάζεται αναλυτικά ο εξοπλισμός λειοτρίβισης του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ (ΕΠΤ-ΕΜΠ), τον οποίο αποτελούν ο πλανητικός μύλος Retsch PM100 και ο θραυστήρας με σιαγόνες Retsch BB51. Οι συσκευές λειοτρίβισης χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ, όπου πραγματοποιήθηκε σειρά πειραμάτων για την εξοικείωση με τις διατάξεις αλλά και την εξέταση των παραμέτρων λειτουργίας τους.

Στα πλαίσια της εργασίας διερευνήθηκε η δυνατότητα χρήσης του εξοπλισμού λειοτρίβισης κατά την προετοιμασία δειγμάτων περιβαλλοντικών υλικών, προκειμένου να ακολουθήσει η ραδιολογική ανάλυσή τους. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν ορισμένα κοινώς χρησιμοποιούμενα στην Ελλάδα οικοδομικά υλικά καθώς και Ιπτάμενη Τέφρα προερχόμενη από το λιγνιτικό σταθμό της Μεγαλόπολης. Από τα υλικά αυτά και με τη χρήση του εξοπλισμού λειοτρίβισης δημιουργήθηκαν τυποποιημένα δείγματα, τα οποία αναλύθηκαν με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας. Για τον διαχωρισμό των αρχικών ποσοτήτων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος διαχωρισμού με περιστροφικό διαχωριστή.

Τα οικοδομικά υλικά που εξετάστηκαν βρίσκονται σε συμπαγή μορφή, η οποία δυσκολεύει τη συσκευασία τους σε τυποποιημένη γεωμετρία. Με κατάλληλη χρήση των διατάξεων λειοτρίβισης τα υλικά μετατράπηκαν σε μορφή σκόνης, ώστε να διευκολυνθεί η συσκευασία τυποποιημένων δειγμάτων και να αναλυθούν με μεθόδους γ-φασματοσκοπίας.

Επιπλέον, για ορισμένα από τα οικοδομικά υλικά πραγματοποιήθηκε μελέτη του φαινομένου αυταπορρόφησης φωτονίων χαμηλών ενεργειών, με σκοπό να υπολογιστεί κατάλληλος συντελεστής διόρθωσης και να εφαρμοστεί στις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις. Η χρήση του νέου εξοπλισμού λειοτρίβισης και των συντελεστών διόρθωσης που προσδιορίστηκαν στα πλαίσια της ΔΕ επιτρέπει στο ΕΠΤ-ΕΜΠ την ανάλυση νέων κατηγοριών οικοδομικών υλικών.

Ένα υλικό για το οποίο έχει στο παρελθόν διεξαχθεί αρκετή έρευνα στο ΕΠΤ-ΕΜΠ είναι η Ιπτάμενη Τέφρα. Η Ι.Τ, όπως έχει επιβεβαιωθεί σε προηγούμενες εργασίες στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, είναι ανομοιογενές υλικό, γεγονός το οποίο δημιουργεί ορισμένους προβληματισμούς, σχετικά με την ορθότητα της ανάλυσής της με πυρηνικές μεθόδους, ειδικότερα όσον αφορά στη διαδικασία δειγματοληψίας και προετοιμασίας των δειγμάτων. Στην παρούσα εργασία τα φαινόμενα αυτά εξετάστηκαν με περισσότερη λεπτομέρεια και μελετήθηκε η χρήση του εξοπλισμού λειοτρίβισης για τον περιορισμό τους. Η Ι.Τ η οποία μελετήθηκε, διαχωρίστηκε με τη χρήση της διάταξης ανάλυσης κοκκομετρίας σε 7 επιμέρους κοκκομετρικά κλάσματα με όρια 32–500 μm. Ακολούθως, αναλύθηκε το κάθε ένα από αυτά με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των επιμέρους κλασμάτων συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της ανάλυσης της αρχικής τέφρας. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη της λειοτρίβισης Ιπτάμενης Τέφρας με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για την επίδραση της κοκκομετρίας ενός υλικού σε μεθόδους ραδιολογικής ανάλυσης.

Η Διπλωματική Εργασία αποτελείται από 5 κεφάλαια.

Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για την λειοτρίβιση και τον σχετικό εξοπλισμό. Περιγράφονται αναλυτικά ο πλανητικός μύλος Retsch PM100 και ο θραυστήρας με σιαγόνες Retsch BB51 του ΕΠΤ-ΕΜΠ, οι οποίοι τέθηκαν για πρώτη φορά σε λειτουργία στα πλαίσια της ΔΕ. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι δοκιμές λειτουργίας οι οποίες πραγματοποιήθηκαν και διατυπώνονται συμπεράσματα για τις κατάλληλες συνθήκες λειοτρίβισης.

Στο 3^ο κεφάλαιο δίνεται αρχικά μία γενική περιγραφή για την φυσική ραδιενέργεια των οικοδομικών υλικών καθώς και αναφέρονται συνοπτικά οι συστάσεις ακτινοπροστασίας για την ασφαλή χρήση τους. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στο ότι η

χρήση του εξοπλισμού λειοτριβίσης καθιστά δυνατή την ανάλυση ανομοιογενών υλικών, από τα οποία ήταν δύσκολο να παρασκευαστούν δείγματα τυποποιημένης γεωμετρίας. Εξετάζεται η εφαρμογή του εξοπλισμού λειοτριβίσης για την προετοιμασία και ανάλυση πέντε κατηγοριών οικοδομικών υλικών (μάρμαρο, γρανίτης, τούβλο, τσιμεντόλιθος, χαλίκι). Παρουσιάζεται η διαδικασία προετοιμασίας των δειγμάτων και συγκρίνονται τα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσής τους, με τυπικές τιμές της ραδιενέργειας από τη βιβλιογραφία αλλά και οι σχετικές οδηγίες ακτινοπροστασίας. Προκειμένου να καταστεί δυνατή η φασματοσκοπική ανάλυση για ορισμένα από τα οικοδομικά υλικά, προσδιορίστηκε με κατάλληλη πειραματική διαδικασία συντελεστής διόρθωσης αυτοαπορρόφησης, ώστε να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης για τα φωτόνια χαμηλών ενεργειών.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρατίθεται η διερεύνηση που έγινε στα πλαίσια της ΔΕ, με στόχο να διαπιστωθεί η επίδραση που μπορεί να έχει η ανομοιογένεια ενός υλικού, στα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσής του. Περιγράφονται οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα κοκκομετρικά κλάσματα του δείγματος Ι.Τ, τα πειράματα λειοτριβίσης που έγιναν και η σχετική παραμετρική μελέτη. Για όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζονται αποτελέσματα και συμπεράσματα. Εξετάζονται ιδιαίτερα οι διαφοροποιήσεις στα ισοζύγια ραδιενέργειας πριν και μετά τη λειοτριβίση της τέφρας και μελετάται το ενδεχόμενο αλλοίωσης των αποτελεσμάτων της φασματοσκοπικής ανάλυσης της τέφρας, λόγω ανομοιογενούς συσκευασίας.

Στο 5^ο κεφάλαιο το οποίο αποτελεί τον Επίλογο, συνοψίζεται η Διπλωματική Εργασία και συγκεντρώνονται συνολικά συμπεράσματα και παρατηρήσεις, καθώς και προοπτικές μελλοντικής έρευνας σε συναφή θέματα.

Κεφάλαιο 2: Λειοτρίβιση εργαστηριακών

δειγμάτων

2.1. Εισαγωγή

Για τη μελέτη των ραδιολογικών χαρακτηριστικών περιβαλλοντικών υλικών, τα οποία συχνά είναι ανομοιογενή, με μεθόδους πυρηνικής τεχνολογίας, είναι επιθυμητή η προετοιμασία ομοιογενών δειγμάτων τυποποιημένης γεωμετρίας. Πρακτικά, αυτό επιτυγχάνεται μετατρέποντας το δείγμα σε μορφή σκόνης, εφαρμόζοντας κάθε φορά κατάλληλες μεθόδους λειοτρίβισης και χρησιμοποιώντας εξοπλισμό προσαρμοσμένο στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε δείγματος.

Το ΕΠΤ-ΕΜΠ πρόσφατα προμηθεύτηκε εξοπλισμό για τη λειοτρίβιση περιβαλλοντικών υλικών, με σκοπό την προετοιμασία δειγμάτων, ο οποίος περιλαμβάνει θραυστήρα σιαγόνων τύπου BB51 και πλανητικό μύλο τύπου PM100 της εταιρείας Retsch. Στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ ο εξοπλισμός αυτός τέθηκε για πρώτη φορά σε λειτουργία, μελετήθηκε και χρησιμοποιήθηκε για την προετοιμασία δειγμάτων για ανάλυση με μεθόδους γ-φασματοσκοπίας.

Στο παρόν κεφάλαιο διατυπώνονται συνοπτικά οι γενικές αρχές της διαδικασίας της λειοτρίβισης. Στη συνέχεια, περιγράφεται αναλυτικά ο εξοπλισμός λειοτρίβισης που διαθέτει το ΕΠΤ-ΕΜΠ και παρουσιάζεται σειρά δοκιμών λειτουργίας και πειραμάτων, τα οποία πραγματοποιήθηκαν με σκοπό την εξοικείωση με τον εξοπλισμό λειοτρίβισης και τη μελέτη των παραμέτρων λειτουργίας του. Τέλος, εξάγονται συμπεράσματα όσον αφορά τη λειτουργία του εξοπλισμού, τα οποία εφαρμόστηκαν και σε επόμενα κεφάλαια.

2.2. Γενικές αρχές λειοτρίβισης

Η λειοτρίβιση με μηχανικά μέσα, επίσης γνωστή ως άλεση (grinding), αποτελεί μία από τις σημαντικότερες διεργασίες για πολλούς τομείς της βιομηχανικής

δραστηριότητας. Η παραγωγική διαδικασία πολλών διαφορετικών προϊόντων (χημικά, φαρμακευτικά, χαρτικά, μεταλλεύματα) απαιτεί ένα ή περισσότερα στάδια μείωσης της κοκκομετρίας.

Στην παρούσα ΔΕ, δεν θα μελετηθεί η λειοτρίβιση βιομηχανικής κλίμακας, αλλά η χρήση των συσκευών λειοτρίβισης τις οποίες προμηθεύτηκε το ΕΠΤ-ΕΜΠ, οι οποίες είναι κατάλληλες για εργαστηριακής κλίμακας επεξεργασία. Η λειοτρίβιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ραδιολογική μελέτη υλικών όπως μεταλλεύματα, ορυκτά ή οικοδομικά υλικά, καθώς διευκολύνει την προετοιμασία δειγμάτων τυποποιημένης γεωμετρίας και εξασφαλίζει την ομοιογένεια. Ιδιαίτερα σε αναλύσεις που περιλαμβάνουν ραδιοχημική επεξεργασία, η λειοτρίβιση είναι απαραίτητη για την αύξηση της ειδικής επιφάνειας του δείγματος, αν και τέτοιες μέθοδοι δεν εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ.

Η διαδικασία της λειοτρίβισης είναι ένα σύνθετο φαινόμενο, το οποίο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, με αποτέλεσμα η μελέτη του να είναι συνήθως εμπειρική και να αναφέρεται σε συγκεκριμένη διάταξη λειοτρίβισης.

Ένας από τους κυριότερους παράγοντες που καθορίζουν τη συμπεριφορά ενός υλικού κατά τη λειοτρίβιση είναι η σκληρότητα. Η σκληρότητα αποτελεί δείκτη της δυσκολίας θραύσης του υλικού και μετράται με την κλίμακα Mohs. Στην κλίμακα Mohs τα υλικά κατατάσσονται με αρίθμηση από 1 έως 10, με αυξανόμενη σκληρότητα. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι ο τάλκης βρίσκεται στον αριθμό 1, ο ασβεστίτης στον αριθμό 3, ο χαλαζίας στον αριθμό 7, και το διαμάντι στον αριθμό 10.

Η συμπεριφορά ενός υλικού κατά τη λειοτρίβιση περιγράφεται μακροσκοπικά με τη βοήθεια της ικανότητας λειοτρίβισης (grindability). Η ικανότητα λειοτρίβισης εκφράζει το ρυθμό παραγωγής υλικού συγκεκριμένης κοκκομετρίας για μία συγκεκριμένη διαδικασία λειοτρίβισης.

Η διαδικασία της λειοτρίβισης μπορεί να μελετηθεί ενεργειακά, εξετάζοντας την απαιτούμενη ενέργεια για τη θραύση δεδομένης ποσότητας υλικού. Από την άποψη αυτή, μία εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της λειοτρίβισης για συγκεκριμένο υλικό και μέθοδο λειοτρίβισης, δίδεται από τον νόμο του Bond, ο οποίος διατυπώνεται ως εξής:

$$E_B = C_B(10/\sqrt{x_p} - 10/\sqrt{x_f}) \quad (1)$$

Στον παραπάνω τύπο τα x_p και x_f είναι το μέγιστο μέγεθος του 80% των κόκκων για το εξερχόμενο και εισερχόμενο υλικό αντίστοιχα, και E_B η απαιτούμενη για τη λειοτρίβιση ενέργεια. Ο συντελεστής C_B συχνά αναφέρεται και ως Bond Work Index (Wi) (Klimpel 1997).

Οι τιμές του συντελεστή Wi εκτιμώνται μέσω μίας τυποποιημένης εργαστηριακής δοκιμής με χρήση συγκεκριμένης συσκευής λειοτρίβισης. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή, τόσο δυσκολότερη είναι η μείωση κοκκομετρίας για το συγκεκριμένο υλικό. Ο συντελεστής Work Index χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανία με σκοπό τον σχεδιασμό εξοπλισμού λειοτρίβισης, και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς διαφόρων υλικών.

2.3. Κατηγοριοποίηση εξοπλισμού λειοτρίβισης

Οι συσκευές θραύσης και λειοτρίβισης διατίθενται σε μεγάλη ποικιλία. Ο εξοπλισμός αυτός μπορεί αρχικά να ταξινομηθεί στις εξής κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο πρόσδοσης της απαιτούμενης ενέργειας (Snow 1999):

- Λειοτρίβιση ανάμεσα σε δύο στέρεες επιφάνειες.
- Λειοτρίβιση με πρόσκρουση σε μία επιφάνεια ή μεταξύ των κόκκων του υλικού.
- Λειοτρίβιση με εφαρμογή διατμητικής τάσης μεταξύ της επιφάνειας της συσκευής και των κόκκων του υλικού.
- Λειοτρίβιση με μη μηχανικά μέσα πρόσδοσης ενέργειας (θερμικό σοκ κ.τ.λ).

Δύο από τις κυριότερες κατηγορίες εξοπλισμού λειοτρίβισης είναι οι θραυστήρες και οι μύλοι λειοτρίβισης. Οι κατηγορίες αυτές θα αναλυθούν περαιτέρω, καθώς σε αυτές ανήκει ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ΔΕ.

Οι θραυστήρες με σιαγόνες χρησιμοποιούνται συνήθως για προκαταρκτική θραύση υλικών υψηλής σκληρότητας σε μικρότερα κομμάτια. Συχνά ακολουθεί θραύση με θραυστήρες άλλου τύπου ή λειοτρίβιση με μύλο. Συνήθως αποτελούνται από έναν σταθερό βραχίονα και έναν κινητό βραχίονα που πραγματοποιεί έκκεντρη κίνηση.

Παράδειγμα θραυστήρα τέτοιου τύπου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1. Σε πολλούς θραυστήρες το ελάχιστο άνοιγμα των σιαγόνων είναι δυνατό να ρυθμίζεται, για την παραγωγή υλικού στο επιθυμητό τελικό μέγεθος κόκκου. Το προς επεξεργασία υλικό εισάγεται στο χώρο μεταξύ των βραχιόνων και στη συνέχεια ο κινητός βραχίονας συνθλίβει το υλικό και επιτρέπει τη διέλευση του από το άνοιγμα των σιαγόνων όταν μία από τις διαστάσεις του κόκκου γίνει μικρότερη από το ελάχιστο άνοιγμα. Οι θραυστήρες με σιαγόνες αξιολογούνται συνήθως ανάλογα με το μέγεθος του χώρου θραύσης. Το μέγεθος του χώρου θραύσης εξαρτάται από το πλάτος των σιαγόνων και από τη μέγιστη απόσταση μεταξύ του σταθερού και του κινητού βραχίονα κατά τη διαδικασία τροφοδοσίας με υλικό.

Οι πλανητικοί μύλοι λειοτριβίσης με σφαίρες, είναι ένα από τα πολλά διαφορετικά είδη των μύλων λειοτριβίσης. Η αρχή λειτουργίας ενός πλανητικού μύλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2. Το υλικό προς λειοτριβίση τοποθετείται σε κυλινδρικό δοχείο μαζί με σφαίρες από κατάλληλο υλικό. Το δοχείο προσαρμόζεται σε περιστρεφόμενο φορέα, σε θέση μακριά από τον άξονά περιστροφής, και εκτελεί σύνθετη κίνηση καθώς ακολουθεί την περιστροφή του φορέα και ταυτόχρονα περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του. Για τη ζυγοστάθμιση του συστήματος, ο φορέας διαθέτει κατάλληλο σύστημα με κινούμενο αντίβαρο.

Καθώς το δοχείο περιστρέφεται σε υψηλές ταχύτητες, αυξάνει τη φυγόκεντρη δύναμη που δέχονται οι σφαίρες, κινούνται μέσα στο προς λειοτριβίση υλικό και προσκρούουν στα τοιχώματα του δοχείου. Η κίνηση των σφαιρών και η πρόσκρουση τους στο υλικό του δοχείου έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων του υλικού τόσο μέσω της τριβής όσο και μέσω της θραύσης του υλικού ανάμεσα στην επιφάνεια της σφαίρας και του δοχείου. Η επιλογή του είδους και αριθμού σφαιρών εξαρτάται από το μέγεθος κόκκου του υλικού προς λειοτριβίση αλλά και από το ίδιο το υλικό. Οι μύλοι λειοτριβίσης με σφαίρες δεν είναι ωστόσο αρκετά αποτελεσματικοί, για άλεση υλικών μεγάλου μεγέθους κόκκου, αλλά και για λειοτριβίση υψηλής λεπτότητας, για παράδειγμα για τελικό μέγεθος κόκκου μικρότερο των 20 μm (Klimpel 1997).

2.4. Ο Θραυστήρας Retsch BB51

2.4.1. Περιγραφή

Ο θραυστήρας με σιαγόνες, τύπου BB51, που διαθέτει το ΕΠΤ-ΕΜΠ τέθηκε για πρώτη φορά σε λειτουργία στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ. Πρόκειται για θραυστήρα σιαγόνων με ένα κινητό και ένα σταθερό βραχίονα. Πάνω στους δύο βραχίονες θραύσης βρίσκονται τοποθετημένες σιαγόνες θραύσης μεταξύ των οποίων πραγματοποιείται ο τεμαχισμός του υλικού. Η έκκεντρη κίνηση του κινούμενου βραχίονα θραύσης έχει ως αποτέλεσμα συνεχή μεταφορά υλικού μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή λεπτότητα, έτσι ώστε να περάσει το υλικό από το άνοιγμα των σιαγόνων. Το πλάτος της σχισμής μεταξύ των σιαγόνων μπορεί να ρυθμιστεί από 0 έως περίπου 10 mm με τη βοήθεια χειροτροχού, με βήματα 0.1 mm.

Ο θραυστήρας αποτελείται από τα παρακάτω επιμέρους τμήματα (Retsch 1998):

- Χώρος άλεσης με τη μορφή χοάνης, ο οποίος στενεύει προς το άκρο εξόδου ανάλογα με το ρυθμισμένο πλάτος της σχισμής ανάμεσα στις σιαγόνες.
- Σταθερό μεταλλικό κέλυφος που περικλείει τον χώρο άλεσης.
- Ένα σταθερό βραχίονα θραύσης και ένα κινητό βραχίονα.
- Συρταρωτό δοχείο συγκέντρωσης του επεξεργασμένου υλικού χωρητικότητας περίπου 1000 ml.
- Οθόνη ένδειξης του ρυθμισμένου πλάτους σχισμής.

Το Σχήμα 2.3 απεικονίζει τον θραυστήρα BB51 με σιαγόνες, του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Στο Σχήμα 2.4 απεικονίζονται οι σιαγόνες του θραυστήρα. Οι σιαγόνες του θραυστήρα BB51 είναι κατασκευασμένες από καρβίδιο του τιτανίου, ένα υλικό υψηλής σκληρότητας, και μπορούν να αφαιρεθούν και να αντικατασταθούν σε περίπτωση φθοράς.

Ο θραυστήρας BB51 μπορεί να τεμαχίσει οποιοδήποτε σκληρό και εύθρυπτο υλικό με σκληρότητα μεγαλύτερη του 3 στην κλίμακα Mohs. Κατά την επεξεργασία υγρών και λιπαρών υλικών ή υλικών μικρής σκληρότητας (<3) είναι δυνατόν να

σχηματιστούν συσσωματώματα μέσα στο χώρο άλεσης, λόγω της πίεσης που ασκούν οι σιαγόνες, τα οποία εμποδίζουν τη λειτουργία της συσκευής.

Μερικά από τα υλικά που μπορούν να τεμαχιστούν με χρήση του θραυστήρα BB51 είναι τα εξής: Βακελίτης, βωξίτης, σκυρόδεμα, μεταλλεύματα, γρανίτης, γυαλί, ασβεστόλιθος, άνθρακας, κορούνδιο, χαλαζίας, σκουριά, κεραμικά υλικά και άλλα. Τα υλικά που τοποθετούνται στον θραυστήρα BB51 πρέπει να έχουν τεμαχιστεί προηγουμένως σε κομμάτια μικρότερα των 35 mm, ώστε να είναι δυνατή η διέλευση τους από το άνοιγμα μέσω του οποίου πραγματοποιείται η τροφοδοσία του χώρου άλεσης με υλικό.

2.4.2. Διαδικασία λειτουργίας του θραυστήρα BB51

Ο χειρισμός της συσκευής γίνεται με χρήση των εξής στοιχείων:

- Γενικός διακόπτης ON/OFF.
- Χειροτροχός για την ρύθμιση του πλάτους της σχισμής.
- Πλήκτρο μηδενικής ρύθμισης της σχισμής θραύσης.
- Πλήκτρο εκκίνησης (START) και πλήκτρο παύσης STOP.

Πριν από κάθε χρήση, είναι απαραίτητος ο μηδενισμός σύμφωνα με τη διαδικασία που αναφέρεται στο εγχειρίδιο λειτουργίας, έτσι ώστε να συμφωνεί η ένδειξη της οθόνης με το πραγματικό άνοιγμα των σιαγόνων. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- Στροφή του χειροτροχού προς τα αριστερά κατά δύο ολόκληρες περιστροφές ώστε να απομακρυνθούν οι σιαγόνες μεταξύ τους.
- Εκκίνηση του θραυστήρα με το πλήκτρο START.
- Στροφή του χειροτροχού προς τα δεξιά μέχρι να ακουστεί χαρακτηριστικός ήχος επαφής των σιαγόνων θραύσης, έτσι ώστε να είναι μηδενικό το άνοιγμα των σιαγόνων.

- Τερματισμός της λειτουργίας του θραυστήρα με το πλήκτρο STOP, και πάτημα του πλήκτρου μηδενισμού της ένδειξης οθόνης. Έτσι, η ένδειξη της οθόνης ταυτίζεται με το πραγματικό άνοιγμα των σιαγόνων θραύσης.

Επίσης απαραίτητος είναι και ο τακτικός καθαρισμός του θραυστήρα. Ένας πρόχειρος καθαρισμός πραγματοποιείται με χρήση μαλακού πινέλου καθαρίζοντας εξωτερικά το άνοιγμα τροφοδοσίας αλλά και το συρτάρι συγκέντρωσης υλικού. Για τον καθαρισμό των σιαγόνων θραύσης και του χώρου άλεσης, είναι δυνατή η αφαίρεση του προστατευτικού καπακιού, αλλά και των σιαγόνων. Απαραίτητη προϋπόθεση για τον καθαρισμό του θραυστήρα αποτελεί η αποσύνδεση του από την ηλεκτρική τροφοδοσία, για λόγους ασφαλείας. Το άδειασμα του δοχείου συγκέντρωσης φυσικά είναι δυνατόν να γίνει ενώ η συσκευή είναι συνδεδεμένη με την τροφοδοσία αλλά όχι κατά τη διαδικασία της άλεσης.

2.4.3. Δοκιμές λειτουργίας

Ο θραυστήρας BB51, όπως ήδη αναφέρθηκε, τέθηκε για πρώτη φορά σε λειτουργία στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές λειτουργίας, ώστε να διαπιστωθεί η καλή λειτουργία της συσκευής, αλλά και με σκοπό την εξοικείωση με τις απαραίτητες ρυθμίσεις για τη λειτουργία της. Για τον προκαταρκτικό έλεγχο της συσκευής χρησιμοποιήθηκε δείγμα κεραμικού τούβλου από το αρχείο δειγμάτων του ΕΠΤ-ΕΜΠ, με κωδική ονομασία YT003. Επιλέχθηκε ως υλικό για τις δοκιμές αυτές το τούβλο, καθώς είναι εύκολα διαθέσιμο αλλά και γιατί είναι ένα υλικό μεσαίας σκληρότητας.

Αρχικά, το τούβλο έσπασε με χρήση σφυριού σε κομμάτια μικρότερα των 35 mm, σύμφωνα με το εγχειρίδιο οδηγιών χρήσης της συσκευής. Τοποθετήθηκε το δείγμα τούβλου στον θραυστήρα, έχοντας ρυθμίσει το άνοιγμα σιαγόνων ίσο με 0.5 mm. Συνολικά, ο θραυστήρας τροφοδοτήθηκε με 825 gr υλικού. Παρατηρήθηκε ότι η τροφοδοσία του υλικού πρέπει να γίνεται σε μικρά κομμάτια και με αργό ρυθμό, ώστε να αποφευχθεί δυσλειτουργία της συσκευής.

Μετά την παραλαβή του υλικού από το συρτάρι συλλογής, παρατηρήθηκε ότι τα σωματίδια είναι μικρότερα των 0.5 mm μόνο ως προς τη μία τους διάσταση. Δηλαδή, στο συρτάρι υπήρχαν κόκκοι τούβλου με μία τουλάχιστον διάσταση αρκετά μεγαλύτερη των 0.5 mm. Η παρατήρηση αυτή είναι αναμενόμενη αφού ο τεμαχισμός

με τη χρήση των σιαγόνων γίνεται ως προς μία μόνο διάσταση, όπως έχει ήδη αναφερθεί.

Για την επιβεβαίωση της παρατήρησης αυτής μέσω ανάλυσης κοκκομετρίας, κρίθηκε απαραίτητη η ανάλυση του δείγματος με τη συσκευή ανάλυσης κοκκομετρίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ (AS-200 Control, Retsch). Προκειμένου να γίνει η ανάλυση κοκκομετρίας του δείγματος, κρίθηκε απαραίτητο να προηγηθεί διαχωρισμός της ποσότητας τούβλου που προέκυψε από το θραυστήρα σε επιμέρους αντιπροσωπευτικά δείγματα. Επιχειρήθηκε για το σκοπό αυτό να χρησιμοποιηθεί η μηχανή περιστροφικού διαχωριστή, η οποία κατασκευάστηκε σε προηγούμενη ΔΕ (Πέππας 2008). Παρατηρήθηκε όμως ότι το συγκεκριμένο υλικό δεν ρέει ελεύθερα και ο διαχωρισμός δεν είναι αποτελεσματικός. Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε να εφαρμοστεί η μέθοδος του «κώνου και υποδιαίρεσης στα τέσσερα» (cone and quartering), η οποία είναι πιο κατάλληλη για το διαχωρισμό μη ρεόντων υλικών (Πέππας 2008). Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκε σταυρός από λαμαρίνα ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 2.5, και το αρχικό δείγμα χωρίστηκε σε τέσσερα μέρη. Τα αντιδιαμετρικά μέρη ενώθηκαν ανά δύο για να παραχθούν τελικά δύο δείγματα, με μάζες 428 gr και 397 gr αντίστοιχα.

Το πρώτο από τα δύο δείγματα που προέκυψαν τοποθετήθηκε στη συσκευή ανάλυσης κοκκομετρίας και αναλύθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος EasySieve. Πλήρης περιγραφή της μεθόδου ανάλυσης κοκκομετρίας είναι διαθέσιμη σε προηγούμενη ΔΕ (Πέππας 2008).

Επιλέχθηκε για την κοκκομετρική ανάλυση αρχικός χρόνος κοσκίνισματος 10 min και πλάτος κοσκίνισματος 2 mm και στη συνέχεια το κοσκίνισμα επαναλήφθηκε με τις ίδιες ρυθμίσεις για ακόμα τέσσερα διαστήματα των 2min. Τα δεδομένα που καταγράφηκαν κατά τη διαδικασία περιέχονται στα αρχεία INITIAL_001, REPEAT_005-008, ενώ η κατανομή κοκκομετρίας που προέκυψε παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6.

Στον αριστερό άξονα του διαγράμματος παρουσιάζεται το ποσοστό μάζας του δείγματος που περιέχεται σε κάθε κοκκομετρικό κλάσμα, το οποίο συμβολίζεται τυπικά ως p3%. Ο συμβολισμός αυτός είναι τυποποιημένος για αναλύσεις κοκκομετρίας και ο δείκτης 3 υποδηλώνει ότι η κατανομή αναφέρεται στα ποσοστά

μάζας κάθε κοκκομετρικής κλάσης. Στο δεξιό άξονα παρουσιάζεται το αθροιστικό ποσοστό μάζας των κοκκομετρικών κλασμάτων κάτω του δεδομένου μεγέθους, το οποίο συμβολίζεται ως Q3%. Αυτός ο τρόπος παρουσίασης κατανομών κοκκομετρίας είναι τυποποιημένος και ακολουθείται συστηματικά στην παρούσα ΔΕ. Επισημαίνεται ότι στην τελευταία κοκκομετρική κλάση μεγέθους >500 μm είναι απαραίτητος ο καθορισμός ενός άνω ορίου, ώστε να μπορεί να παρασταθεί γραφικά η κατανομή μάζας, το οποίο λαμβάνεται συμβατικά ίσο με 0.7 mm.

Η κατανομή κοκκομετρίας επιβεβαιώνει την παρατήρηση σχετικά με την ύπαρξη σωματιδίων με διαστάσεις μεγαλύτερες από 0.5 mm. Συγκεκριμένα 38.3% των σωματιδίων συγκεντρώθηκε στο κόσκινο διάστασης 0.5 mm.

Παρατηρείται επίσης ότι η μορφή της αθροιστική κατανομή σε λογαριθμικό διάγραμμα προσεγγίζει την ευθεία. Η μορφή αυτή είναι τυπική για τα προϊόντα διαδικασιών λειοτρίβισης, όπως είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία (Klimpel 1997).

2.4.4. Παρατηρήσεις από τη λειτουργία του θραυστήρα

Από τις δοκιμές λειτουργίας του θραυστήρα BB51 προέκυψαν συμπεράσματα τα οποία μπορούν να εφαρμοσθούν και σε επόμενες δοκιμές.

- Πριν από κάθε χρήση του θραυστήρα είναι απαραίτητος ο μηδενισμός του ανοίγματος σιαγόνων σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.4.2.
- Η τροφοδοσία του θραυστήρα με υλικό θα πρέπει να πραγματοποιείται με αργό ρυθμό.
- Τα τμήματα υλικού που εισέρχονται στον θραυστήρα θα πρέπει να είναι μικρότερα των 35 mm. Για το λόγο αυτό, απαιτείται τεμαχισμός του υλικού με σφυρί ή άλλη μέθοδο πριν την εισαγωγή του στο θραυστήρα.
- Ο τεμαχισμός με το θραυστήρα με σιαγόνες γίνεται ως προς μία διάσταση και στα προϊόντα μπορεί να υπάρχουν σωματίδια με μία ή δύο διαστάσεις πολύ μεγαλύτερες από το άνοιγμα των σιαγόνων.

- Ανά ορισμένα χρονικά διαστήματα και αν είναι απαραίτητο, μπορεί να αφαιρεθεί το προστατευτικό κέλυφος και να καθαρισθούν σχολαστικά οι σιαγόνες με τη χρήση πινέλου.
- Η μορφή της αθροιστικής κατανομής μάζας των προϊόντων της θραύσης προσεγγίζει την ευθεία σε λογαριθμικό διάγραμμα. Η μορφή αυτή είναι τυπική για τα προϊόντα λειοτρίβισης.

2.5. Ο Πλανητικός Μύλος Retsch PM 100

2.5.1. Περιγραφή

Ο πλανητικός μύλος PM100 χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ. Για το λόγο αυτό, στην παράγραφο που ακολουθεί δίνεται αναλυτική περιγραφή των επιμέρους τμημάτων που τον αποτελούν καθώς και βασικών στοιχείων που αφορούν τη λειτουργία του.

Ο πλανητικός μύλος λειοτρίβισης PM100 απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7. και αποτελείται από τα εξής τμήματα (Retsch 2005):

- Δοχείο τοποθέτησης υλικού προς λειοτρίβιση, χωρητικότητας 500 ml.
- Σύστημα συγκράτησης του δοχείου λειοτρίβισης.
- Σύστημα ζυγοστάθμισης του δοχείου με αντίβαρο.
- Προστατευτικό περίβλημα, το οποίο καλύπτει τα κινούμενα μέρη της συσκευής κατά τη λειτουργία.
- Σύστημα Interlock που δεν επιτρέπει την έναρξη της λειοτρίβισης σε περίπτωση που δεν έχει ασφαλιστεί το περίβλημα.
- Διακόπτης έκτακτης απασφάλισης του περιβλήματος σε περίπτωση διακοπής ηλεκτρικής τροφοδοσίας.
- Πλήκτρο για το άνοιγμα του περιβλήματος.
- Διακόπτης έναρξης ή διακοπής λειτουργίας ON-OFF.

- Πλήκτρο εκκίνησης και πλήκτρο διακοπής λειοτρίβισης.
- Οθόνη πολλαπλών επιλογών και πλήκτρο για τη ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας.

Τον πλανητικό μύλο PM100 συνοδεύουν σφαίρες λειοτρίβισης και ειδικό κλειδί για ασφάλιση του δοχείου τοποθέτησης υλικού, τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 2.8. Κατά την λειοτρίβιση με το μύλο PM 100 χρησιμοποιούνται σφαίρες από διάφορα υλικά οι οποίες είναι διαθέσιμες σε διάφορες διαμέτρους. Το εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ διαθέτει σφαίρες από κορούνδιο (Al_2O_3) το οποίο είναι ένα υλικό με σκληρότητα 9 στην κλίμακα Mohs. Οι σφαίρες διατίθενται σε τρία μεγέθη:

- 20 σφαίρες των 20 mm, συνολικού βάρους 327.40 gr
- 8 σφαίρες των 30 mm (449.75gr)
- 4 σφαίρες των 40 mm (536.75 gr).

Η επιλογή του κατάλληλου μεγέθους και αριθμού σφαιρών γίνεται με κριτήριο την ποσότητα υλικού προς λειοτρίβιση και το μέγεθος κόκκου του υλικού, και θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο.

Επισημαίνεται ότι ο μύλος PM100 μπορεί να χρησιμοποιηθεί με δοχεία λειοτρίβισης διαφορετικών διαστάσεων και υλικών (Retsch 2005). Τα δοχεία που διαθέτει το ΕΠΤ-ΕΜΠ καλύπτεται εσωτερικά από κορούνδιο, το ίδιο υλικό δηλαδή με των σφαιρών λειοτρίβισης. Στον μύλο PM100 είναι δυνατό να λειοτριβθούν υλικά με μέγεθος κόκκου μέχρι 10 mm, ανάλογα κάθε φορά με το υλικό.

Ορισμένα από τα υλικά τα οποία μπορούν να λειοτριβθούν με το μύλο PM100 είναι τα εξής: Γυαλί, κεραμικά υλικά, χώμα, διάφορα κράματα, μεταλλεύματα, ορυκτά, φυτικές ουσίες, οικιακά ή βιομηχανικά απόβλητα και άλλα. Η μέγιστη ποσότητα υλικού με την οποία μπορεί να τροφοδοτηθεί το δοχείο που διαθέτει το ΕΠΤ-ΕΜΠ είναι 300 ml, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι σφαίρες λειοτρίβισης.

Η συσκευή δίνει τη δυνατότητα ρύθμισης, μέσω της οθόνης πολλαπλών ενδείξεων, των παρακάτω παραμέτρων.

- Στροφές από 100 έως 650 rpm.

- Χρόνος λειοτρίβισης από 00:00:01 έως 99:99:99 h:min:sec.
- Δυνατότητα διακοπής λειτουργίας για συγκεκριμένο χρόνο από 00:01 έως 99:99 min:sec.
- Δυνατότητα αλλαγής φοράς περιστροφής ανά προκαθορισμένο χρονικό διάστημα που ρυθμίζεται από 00:01 έως 99:99 min:sec.

2.5.2. Διαδικασία λειτουργίας του μύλου PM100

Ο χειρισμός του μύλου PM100 πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή, λόγω των υψηλών ταχυτήτων περιστροφής και της μεγάλης μάζας του περιστρεφόμενου συστήματος. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στη ζυγοστάθμιση και ασφάλιση του δοχείου λειοτρίβισης. Αναλυτικά, η διαδικασία λειτουργίας του μύλου περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- Πλήρωση του δοχείου με το προς λειοτρίβιση υλικό και τις σφαίρες κατάλληλου μεγέθους.
- Ζύγιση του δοχείου συμπεριλαμβανομένου, του καλύμματος, των σφαιρών και του υλικού, όχι όμως της αρπάγης συγκράτησης. Τα βάρη των επί μέρους τμημάτων για τη διάταξη του ΕΠΤ-ΕΜΠ περιέχει ο Πίνακας 2.1.
- Μετακίνηση του αντίβαρου στη θέση που αντιστοιχεί στο βάρος που μετρήθηκε στο προηγούμενο βήμα.
- Τοποθέτηση του δοχείου στον περιστρεφόμενο φορέα στην κατάλληλη υποδοχή, ευθυγραμμίζοντας την οπή στο κάτω μέρος του δοχείου με τον αντίστοιχο άξονα του φορέα.
- Τοποθέτηση της αρπάγης συγκράτησης στις αντίστοιχες εγχοπές.
- Ασφάλιση της αρπάγης, τραβώντας τον ειδικό δακτύλιο προς τα πάνω και περιστρέφοντας τη χειρολαβή με τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Για τη διευκόλυνση της ασφάλισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το ειδικό εργαλείο (Σχήμα 2.8).
- Ασφάλιση του προστατευτικού περιβλήματος.

- Ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας μέσω της οθόνης πολλαπλών επιλογών και του πλήκτρου ρύθμισης.
- Εκκίνηση του μύλου λειοτριβίσης.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας, ακολουθείται η αντίστροφη σειρά βημάτων για την απασφάλιση του δοχείου και την παραλαβή του υλικού.

2.5.3. Δοκιμές λειτουργίας

Για να διαπιστωθεί η επίδραση των παραμέτρων λειτουργίας στην διαδικασία της λειοτριβίσης, κρίθηκε απαραίτητη η πραγματοποίηση δοκιμών. Εκτός από τις παραπάνω παραμέτρους, μελετήθηκε και η επίδραση του φορτίου υλικού και του είδους των σφαιρών που χρησιμοποιούνται κατά την λειοτριβίση. Χρησιμοποιήθηκε ως υλικό προς λειοτριβίση άμμος θαλάσσης, ως ένα υλικό εύκολα διαθέσιμο, μεσαίας σκληρότητας.

Αρχικά χρησιμοποιήθηκε ο περιστροφικός διαχωριστής, για να διαμοιραστεί η συνολικά διαθέσιμη άμμου σε 8 αριθμημένα δείγματα, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφόρων δοκιμών. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές, μεταβάλλοντας κάθε φορά μία παράμετρο λειτουργίας και διατηρώντας σταθερές τις υπόλοιπες έτσι ώστε να μελετηθεί η επίδραση της κάθε μίας.

Το πρώτο από τα δείγματα που παρασκευάστηκαν (Δείγμα 1) τοποθετήθηκε στην μηχανή κοσκινίσματος ώστε να προσδιοριστεί η αρχική κατανομή της άμμου, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.9. Τα υπόλοιπα δείγματα (Δείγματα 2-8) χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές λειτουργίας που περιγράφονται στα επόμενα.

2.5.3.1. Επίδραση Στροφών (Δείγμα 2)

Πραγματοποιήθηκε δοκιμή με τις εξής ρυθμίσεις λειτουργίας:

- Φορτίο (gr) : 216
- Σφαίρες (mm) : 30
- Στροφές (rpm) : 300

- Χρόνος (min) : 3
- Αναστροφή : όχι
- Διάλειμμα : όχι
- Διακοπή : όχι

Αρχικά, τέθηκε σε λειτουργία ο μύλος για λίγα δευτερόλεπτα με ρύθμιση στροφών ίσες με 300 rpm. Παρατηρήθηκαν έντονοι κραδασμοί κατά τη λειτουργία και αποφασίστηκε να μειωθούν οι στροφές λειτουργίας από 300 σε 200 rpm. Οι κραδασμοί αυτοί ίσως οφείλονται σε αστάθεια της επιφάνειας πάνω στην οποία έχει τοποθετηθεί ο μύλος.

Η λειτουργία του μύλου σε ταχύτητα περιστροφής 300 rpm, διακόπηκε μετά από λίγα δευτερόλεπτα, έτσι δεν μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ των δύο ταχυτήτων. Παρόλα αυτά είναι αναμενόμενο οι αυξημένες στροφές να αυξάνουν την αποδοτικότητα της λειοτρίβισης, όμως για λόγους ασφαλείας οι επόμενες δοκιμές έγιναν με ρυθμό περιστροφής ίσο με 200 rpm.

2.5.3.2. Επίδραση χρόνου λειοτρίβισης (Δείγμα 3)

Πραγματοποιήθηκε αρχικά δοκιμή με τις εξής ρυθμίσεις:

- Φορτίο (gr) : 215.69
- Σφαίρες (mm) : 30
- Στροφές (rpm) : 200
- Χρόνος (min) : 3
- Αναστροφή : όχι
- Διάλειμμα : όχι
- Διακοπή : όχι

Μετά την ολοκλήρωση της λειοτριβίσης, η άμμος αφαιρέθηκε από το δοχείο και προσδιορίστηκε η κατανομή κοκκομετρίας της.

Στη συνέχεια, η άμμος συγκεντρώθηκε από τα κόσκινα, τοποθετήθηκε και πάλι στο δοχείο του μύλου PM100 και πραγματοποιήθηκαν συνολικά ακόμη τρεις δοκιμές, διάρκειας 3 λεπτών η καθεμία. Συνολικά δηλαδή η συνολική διάρκεια λειοτριβίσης για το δείγμα αυτό ήταν 12 min. Στο τέλος κάθε δοκιμής τοποθετήθηκε το δείγμα στη μηχανή κοσκίνισματος έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί ανάλυση κοκκομετρίας με τη βοήθεια του προγράμματος EasySieve.

Το κοσκίνισμα του Δείγματος 3 πραγματοποιήθηκε ως εξής:

- Μετά από λειοτριβίση 3min, κοσκίνισμα 20 λεπτών και επαναληπτικό κοσκίνισμα για επιπλέον 5 min. (Αρχεία INITIAL_012, REPEAT_027).
- Μετά από λειοτριβίση 6min, κοσκίνισμα 20 λεπτών και επαναληπτικό κοσκίνισμα για επιπλέον 5 min. (Αρχεία INITIAL_013, REPEAT_029).
- Μετά από λειοτριβίση 9min, κοσκίνισμα 20 λεπτών και επαναληπτικό κοσκίνισμα για επιπλέον 5 min. (Αρχεία INITIAL_014, REPEAT_030).
- Μετά από λειοτριβίση 12min, κοσκίνισμα 20 λεπτών και επαναληπτικό κοσκίνισμα για επιπλέον 5 min. (Αρχεία INITIAL_015, REPEAT_031).

Το επαναληπτικό κοσκίνισμα είναι απαραίτητο για την ολοκλήρωση της διαδικασίας, όπως έχει προκύψει και από την παραμετρική μελέτη λειτουργίας της συσκευής ανάλυσης κοκκομετρίας (Πέππας 2008).

Για να μελετηθεί η επίδραση του χρόνου στη διαδικασία της λειοτριβίσης συγκρίθηκαν τα ποσοστά μάζας σε κάθε κοκκομετρικό κλάσμα σε συνάρτηση με το χρόνο λειοτριβίσης. Ο Πίνακας 2.2 περιέχει τα αθροιστικά ποσοστά μάζας, για σωματίδια μικρότερα από κάθε διάσταση κόσκινου της συσκευής κοκκομετρίας, για χρόνους λειοτριβίσης 3,6,9 και 12 λεπτά, ενώ οι κατανομές έχουν παρασταθεί γραφικά στο Σχήμα 2.10. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι, καθώς ο χρόνος λειοτριβίσης αυξάνει, το ποσοστό μάζας των χονδρότερων κλασμάτων μειώνεται και η αθροιστική κατανομή μετακινείται προς τα αριστερά.

Η μελέτη της χρονικής εξέλιξης των λεπτότερων κλασμάτων κατά τη λειοτρίβιση περιπλέκεται από το γεγονός ότι τα σωματίδια των κλασμάτων αυτών καταστρέφονται από τη λειτουργία του μύλου αλλά και παράγονται από τη διάσπαση των μεγαλύτερων σωματιδίων. Για το λόγο αυτό, στα επόμενα εξετάζεται απλουστευτικά μόνο η συμπεριφορά του ποσοστού μάζας άνω των 250 μm. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται πιο σύνθετα μοντέλα για τη συνολική ανάλυση του φαινομένου, τα οποία ξεφεύγουν από τα πλαίσια της παρούσης ΔΕ (Klimpel 1997).

Σύμφωνα με την θεωρία, ο ρυθμός εξαφάνισης ενός κοκκομετρικού κλάσματος μπορεί να θεωρηθεί ανάλογος του ποσοστού μάζας που του αντιστοιχεί. Επομένως, αν w_i είναι το ποσοστό μάζας που αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο εξεταζόμενο κοκκομετρικό κλάσμα, ισχύει:

$$\frac{dw_i}{dt} = -S_i w_i \quad (2)$$

Ο συντελεστής S_i ονομάζεται ειδικός ρυθμός θραύσης. Η διαφορική εξίσωση αυτή έχει την απλή λύση:

$$w_i(t) = w_i(0) \cdot e^{-S_i t} \quad (3)$$

Στο Σχήμα 2.11 έχει παρασταθεί γραφικά η χρονική εξέλιξη του αθροιστικού ποσοστού μάζας του δείγματος με μέγεθος κόκκου >250 μm και >125 μm αντίστοιχα. Διαπιστώνεται ότι τα σημεία σε λογαριθμικό διάγραμμα προσεγγίζονται ικανοποιητικά από ευθείες, με υψηλούς συντελεστές συσχέτισης 0.989 και 0.997 αντίστοιχα, γεγονός που σημαίνει ότι η προσέγγιση της εξίσωσης (2) μπορεί να εφαρμοστεί ικανοποιητικά. Εφαρμόζοντας προσαρμογή ελαχίστων τετραγώνων, ο ειδικός ρυθμός θραύσης για το κλάσμα >250 μm προκύπτει ίσος με 0.133 min^{-1} , και αυτός για το >125 μm ίσος με 0.061 min^{-1} .

Από τον ειδικό ρυθμό θραύσης προκύπτει ότι το ποσοστό μάζας της άμμου, με μέγεθος κόκκου > 250 μm θα μειώνεται στο μισό κάθε 5.2 min λειοτρίβισης. Κρίθηκε επομένως ότι χρόνος λειοτρίβισης 6 min είναι επαρκής για την παρατήρηση των αποτελεσμάτων της λειοτρίβισης. Όλες οι επόμενες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με χρόνο ίσο με 6 min.

2.5.3.3. Επίδραση μεγέθους σφαιρών (Δείγμα 4, 5)

Για να μελετηθεί η επίδραση του είδους των σφαιρών πραγματοποιήθηκε αρχικά δοκιμή με 20 σφαίρες διαμέτρου 20 mm χρησιμοποιώντας το Δείγμα 4. Ο χρόνος λειοτρίβισης ήταν 6 min, σύμφωνα με τα συμπεράσματα που προέκυψαν για την επίδραση του χρόνου από την προηγούμενη δοκιμή.

- Φορτίο (gr) : 216.16
- Σφαίρες (mm) : 20
- Στροφές (rpm) : 200
- Χρόνος (min) : 6
- Αναστροφή : όχι
- Διάλειμμα : όχι
- Διακοπή : όχι

Αντίστοιχη δοκιμή πραγματοποιήθηκε με το Δείγμα 5, χρησιμοποιώντας τις σφαίρες διαμέτρου 40 mm:

- Φορτίο (gr) : 216.09
- Μπίλιες (mm) : 40
- Στροφές (rpm) : 200
- Χρόνος (min) : 6
- Αναστροφή : όχι
- Διάλειμμα : όχι
- Διακοπή : όχι

Οι κατανομές κοκκομετρίας των Δειγμάτων 4 και 5 προσδιορίστηκαν με τη μηχανή ανάλυσης κοκκομετρίας, τα δεδομένα της οποίας καταγράφηκαν στα αρχεία

INITIAL_016, REPEAT_032, REPEAT_033 (Δείγμα 4) και INITIAL_017 REPEAT_034-036 (Δείγμα 5).

Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζονται τα ποσοστά κάθε κοκκομετρικού κλάσματος για τις δοκιμές με τα δύο είδη σφαιρών. Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται και η κοκκομετρική κατανομή που προέκυψε από τη δοκιμή με τις μεσαίες σφαίρες διαμέτρου 30 mm και το Δείγμα 3, και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα. Διαπιστώνεται ότι η αθροιστική κατανομή που αντιστοιχεί στα 20mm είναι περισσότερο μετατοπισμένη προς τα αριστερά από αυτές των 30 mm και 40 mm, γεγονός που σημαίνει ότι οι μικρότερες σφαίρες είναι πιο αποτελεσματικές.

Η παρατήρηση αυτή αναφέρεται και στη βιβλιογραφία, σύμφωνα με την οποία οι μικρότερες σφαίρες με ικανό μέγεθος για τη λειοτρίβιση ενός δεδομένου υλικού εμφανίζουν τη μεγαλύτερη απόδοση (Snow 1999). Αποφασίστηκε επομένως όλες οι υπόλοιπες δοκιμές να πραγματοποιηθούν με τις σφαίρες διαμέτρου 20mm.

2.5.3.4. Επίδραση φορτίου (Δείγμα 6)

Στη δοκιμή αυτή αυξήθηκε η ποσότητα υλικού που τοποθετείται στον μύλο, έτσι ώστε να μελετηθεί η επίδραση αλλαγής του φορτίου στη διαδικασία της λειοτρίβισης. Έτσι, τοποθετήθηκε στον μύλο ποσότητα 376 gr, η οποία προέκυψε από το δείγμα 5 και από υπόλοιπη ποσότητα που είχε περισσέψει από την αρχική ποσότητα άμμου. Οι σφαίρες που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτές των 20 mm σύμφωνα με τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις προηγούμενες δοκιμές. Πραγματοποιήθηκε δοκιμή με τις εξής ρυθμίσεις:

- Φορτίο (gr) : 376
- Σφαίρες (mm) : 20
- Στροφές (rpm) : 200
- Χρόνος (min) : 6
- Αναστροφή : όχι
- Διάλειμμα : όχι

- Διακοπή : όχι

Το δείγμα τοποθετήθηκε στη συνέχεια στην μηχανή κοσκινίσματος για τον απαιτούμενο χρόνο, και προσδιορίστηκε η κατανομή κοκκομετρίας (INITIAL_018, REPEAT_037-039). Από το συγκριτικό διάγραμμα (Σχήμα 2.13) της δοκιμής του Δείγματος 4, και της δοκιμής με αυξημένο φορτίο (Δείγμα 6) παρατηρείται ότι, όσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο, τόσο λιγότερο αποδοτική είναι η λειοτρίβιση, για συγκεκριμένο πάντα χρονικό διάστημα. Προκύπτει λοιπόν το συμπέρασμα ότι, για μεγαλύτερα φορτία θα πρέπει να αυξηθεί και ο χρόνος λειοτρίβισης.

2.5.3.5. Επίδραση διακοπής ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και αλλαγής φοράς (Δείγμα 7,8)

Ο πλανητικός μύλος PM100 έχει δυνατότητα αυτόματης διακοπής της λειτουργίας σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Πραγματοποιήθηκε δοκιμή της δυνατότητας αυτής με το Δείγμα 7, με τα ακόλουθα στοιχεία:

- Φορτίο (gr) : 216
- Σφαίρες (mm) : 20
- Στροφές (rpm) : 200
- Χρόνος (min) : 6
- Αναστροφή : όχι
- Διάλειμμα : όχι
- Διακοπή (sec) : 30

Μετά την ολοκλήρωση της λειοτρίβισης, προσδιορίστηκε η κατανομή κοκκομετρίας με τη μηχανή κοσκινίσματος (INITIAL_019, REPEAT_040-041).

Επιπλέον, ο μύλος PM100 διαθέτει δυνατότητα αναστροφής της φοράς περιστροφής κατά τακτά χρονικά διαστήματα. Η δυνατότητα αυτή ελέγχθηκε με το Δείγμα 8, ως εξής:

- Φορτίο (gr) : 216

- Σφαίρες (mm) : 20
- Στροφές (rpm) : 200
- Χρόνος (min) : 6
- Αναστροφή : ναι
- Διάλειμμα : όχι
- Διακοπή (sec) : 30

Η επίδραση της αλλαγής φοράς περιστροφής αλλά και της διακοπής λειτουργίας ανά ορισμένα χρονικά διαστήματα, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.14. Παρατηρείται ότι το αποτέλεσμα και η αποδοτικότητα της λειοτρίβισης με τις ρυθμίσεις αυτές διαφέρουν ελάχιστα, από τη αντίστοιχη δοκιμή χωρίς αυτές (Δείγμα 4). Αποφασίστηκε επομένως να μην χρησιμοποιηθούν σε επόμενα πειράματα.

2.5.4. Παρατηρήσεις από τη λειτουργία του μύλου

Από τις δοκιμές λειτουργίας του μύλου PM100 προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα, τα οποία εφαρμόστηκαν σε πειράματα που αναφέρονται σε επόμενα κεφάλαια:

- Για το υλικό που δοκιμάστηκε, διαπιστώθηκε ότι οι μικρότερες σφαίρες είναι πιο αποδοτικές.
- Για αποδοτικότερη λειοτρίβιση απαιτείται όσο το δυνατόν μεγαλύτερος αριθμός στροφών. Παρά το γεγονός αυτό, η συσκευή είναι προτιμότερο να λειτουργεί στις 200 rpm για να αποφεύγονται κραδασμοί που παρατηρήθηκαν σε λειτουργία με υψηλότερο αριθμό στροφών.
- Οι ρυθμίσεις διακοπόμενης λειτουργίας και αναστροφής δεν επηρεάζουν σημαντικά στην αποδοτικότητα της συσκευής. Έτσι, δεν θα χρησιμοποιηθούν σε επόμενες δοκιμές. Η ρύθμιση αυτή ίσως είναι απαραίτητη σε λειοτρίβιση υλικών κατά την οποία αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες.
- Το φορτίο του δείγματος προς λειοτρίβιση επιδρά σημαντικά στην αποδοτικότητα του μύλου.

- Είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του κατάλληλου χρόνου έτσι ώστε να μειωθεί η κοκκομετρία του δείγματος κάτω από ένα επιθυμητό όριο. Ο χρόνος λειοτρίβισης κάθε υλικού, μπορεί να καθοριστεί μετά από δοκιμές για διαφορετικούς χρόνους, όπως έγινε και με την περίπτωση της άμμου θαλάσσης.
- Ένας εύκολος καθαρισμός του μύλου πραγματοποιείται με χρήση μαλακού πινέλου, απομακρύνοντας τυχόν υπολείμματα υλικού από την επιφάνεια των σφαιρών και του δοχείου.
- Ο καθαρισμός μπορεί να γίνει πιο σχολαστικά και με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα με την τοποθέτηση θραυσμάτων γυαλιού στον μύλο και λειτουργία του για μερικά λεπτά (περίπου 5 min).
- Παρατηρήθηκε ότι μετά τον καθαρισμό οι μάζες του δοχείου λειοτρίβισης και των σφαιρών παραμένουν ίσες με τις μάζες πριν τη διαδικασία λειοτρίβισης. Έτσι προκύπτει το συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει σημαντική προσκόλληση υπολειμμάτων υλικού ή φθορά στο υλικό του δοχείου και των σφαιρών.

Πρέπει να τονισθεί ότι οι ανωτέρω βέλτιστες συνθήκες αφορούν την άμμο θαλάσσης και είναι ενδεικτικές. Για τη βέλτιστη επεξεργασία διαφορετικών υλικών πρέπει να πραγματοποιείται αντίστοιχη διερεύνηση, λαμβάνοντας υπ' όψιν και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα ΔΕ.

Πίνακες Κεφαλαίου

Πίνακας 2.1: Βάρη επιμέρους τμημάτων μύλου PM100

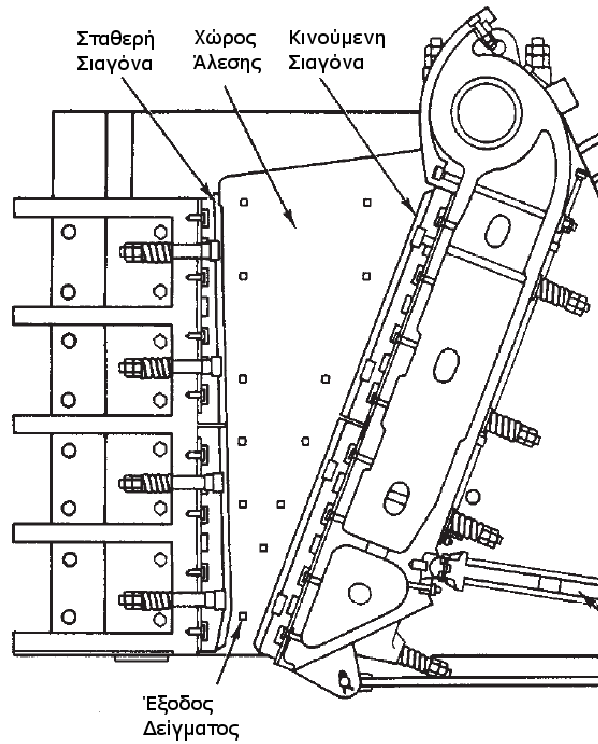
| Τμήμα | Βάρος (gr) |
|---------------------|------------|
| Δοχείο Λειοτρίβισης | 5,680 gr |
| Σφαίρες 20mm | 327.40 gr |
| Σφαίρες 30mm | 449.75gr |
| Σφαίρες 40mm | 536.75 gr |

Πίνακας 2.2: Επίδραση του χρόνου λειοτρίβισης στην κοκκομετρική κατανομή του δείγματος άμμου

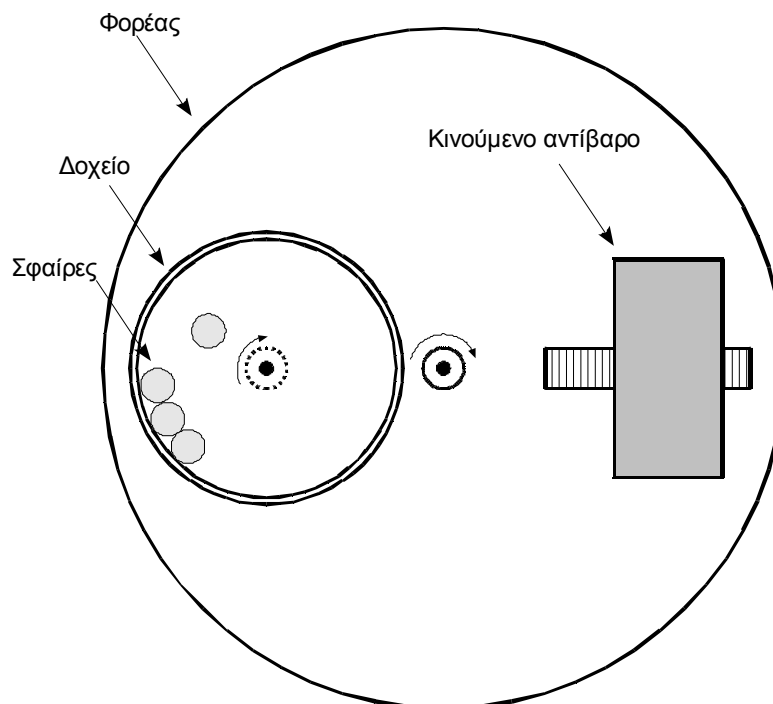
| Χρόνος (min) | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 |
|--------------------------|-------------------|------|------|------|------|
| Κοκκομετρικό Κλάσμα (μm) | Ποσοστό Μάζας (%) | | | | |
| >500 | 6.0 | 2.9 | 1.5 | 0.5 | 0.2 |
| >250 | 45.8 | 33.6 | 24.9 | 15.9 | 9.0 |
| >125 | 87.6 | 74.4 | 63.6 | 51.4 | 41.7 |
| >63 | 98.6 | 89.9 | 82.4 | 72.7 | 64.9 |
| >45 | 99.2 | 96.0 | 91.2 | 87.4 | 82.3 |
| >32 | 99.5 | 99.9 | 99.5 | 98.6 | 97.3 |

Σχήματα Κεφαλαίου

Σχήμα 2.1: Αρχή λειτουργίας θραυστήρα με σιαγόνες



Σχήμα 2.2 : Αρχή λειτουργίας πλανητικού μύλου



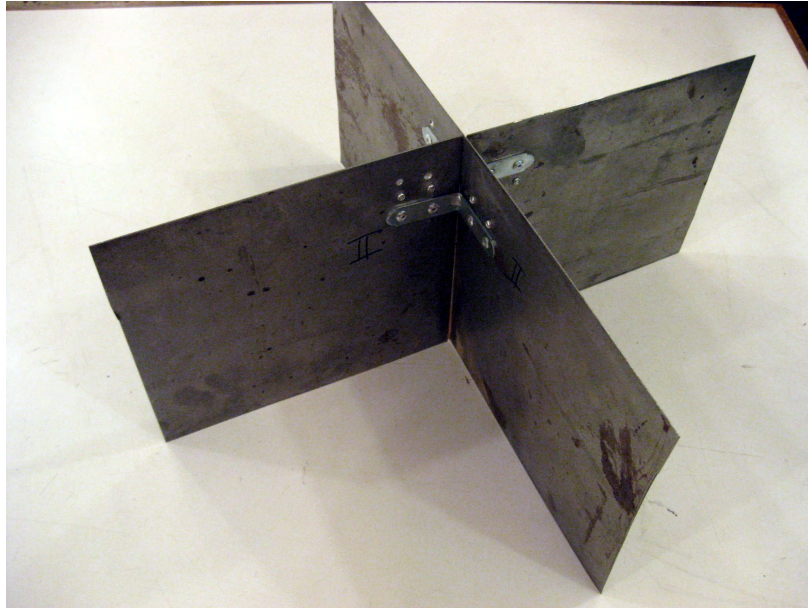
Σχήμα 2.3 : Ο θραυστήρας με σιαγόνες τύπου BB51



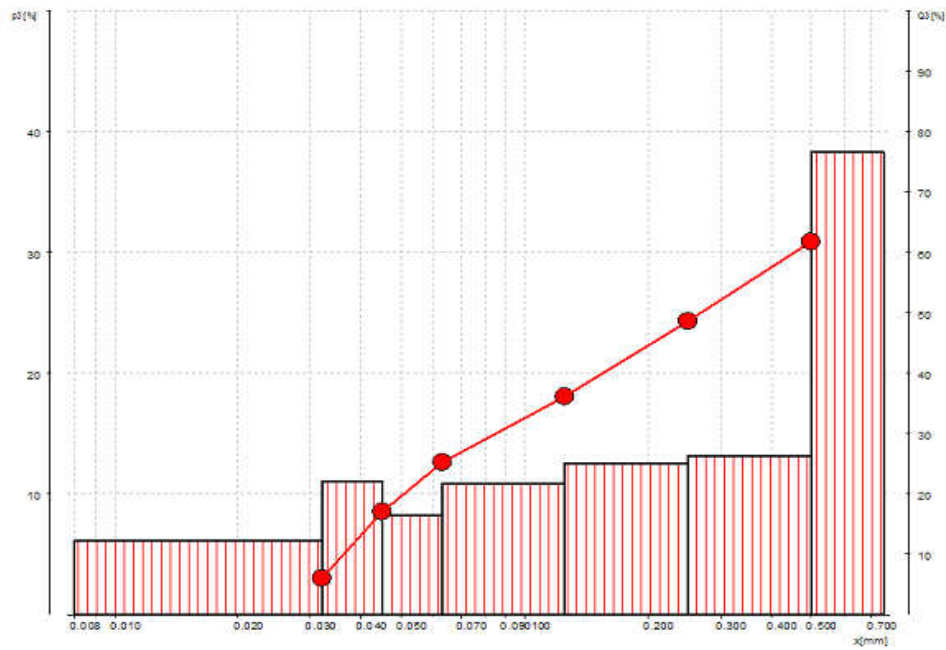
Σχήμα 2.4: Σιαγόνες θραυστήρα BB51



Σχήμα 2.5: Σταυρός από λαμαρίνα για το διαχωρισμό δειγμάτων



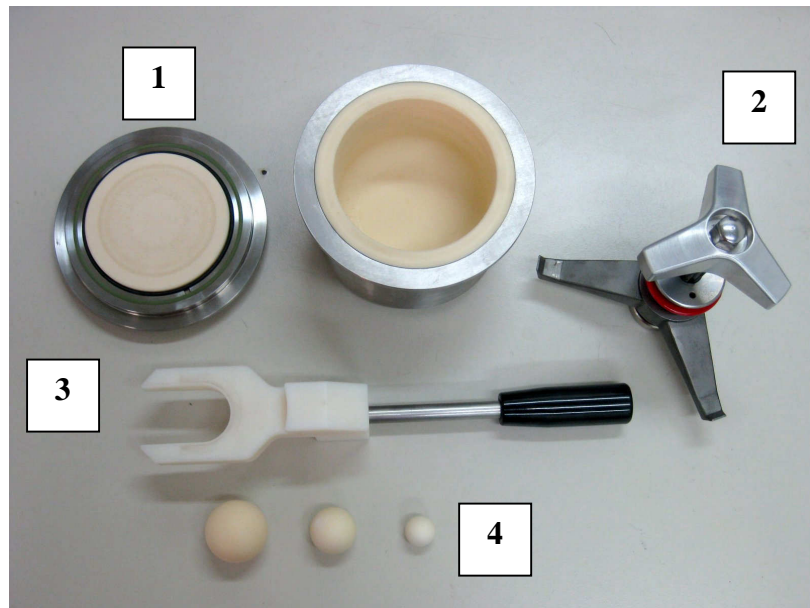
Σχήμα 2.6: Κοκκομετρική κατανομή τούβλου μετά από τον θραυστήρα



Σχήμα 2.7: Ο πλανητικός μύλος PM100

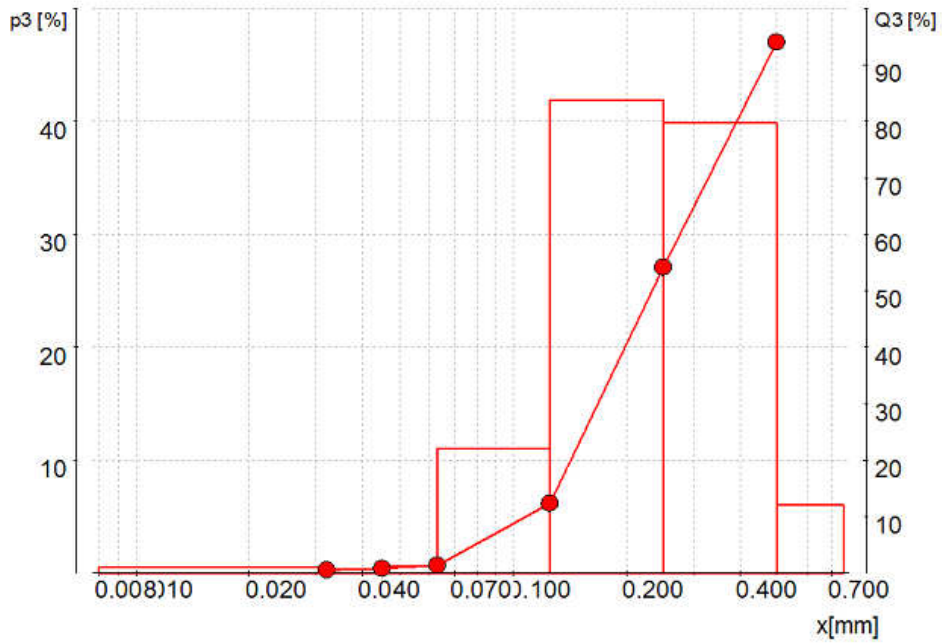


Σχήμα 2.8 : Παρελκόμενα του πλανητικού μύλου PM100

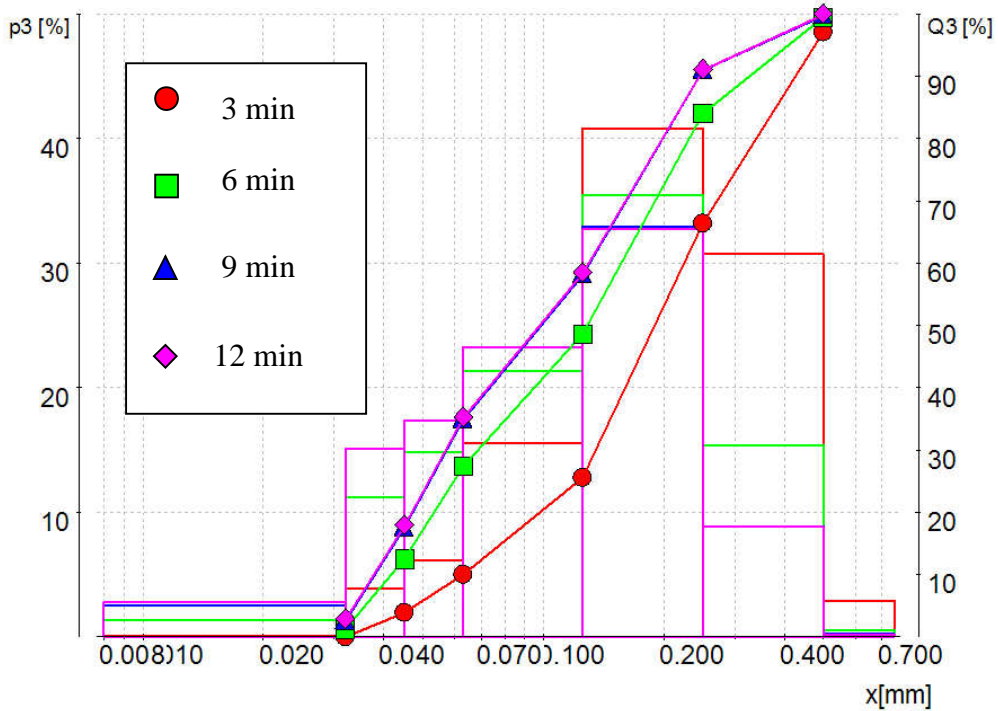


- 1:** Δοχείο λειοτρίβισης και καπάκι, με επένδυση από κορούνδιο
- 2:** Αρπάγη ασφάλισης δοχείου
- 3:** Λαβίδα ασφάλισης δοχείου
- 4:** Σφαίρες λειοτρίβισης από κορούνδιο

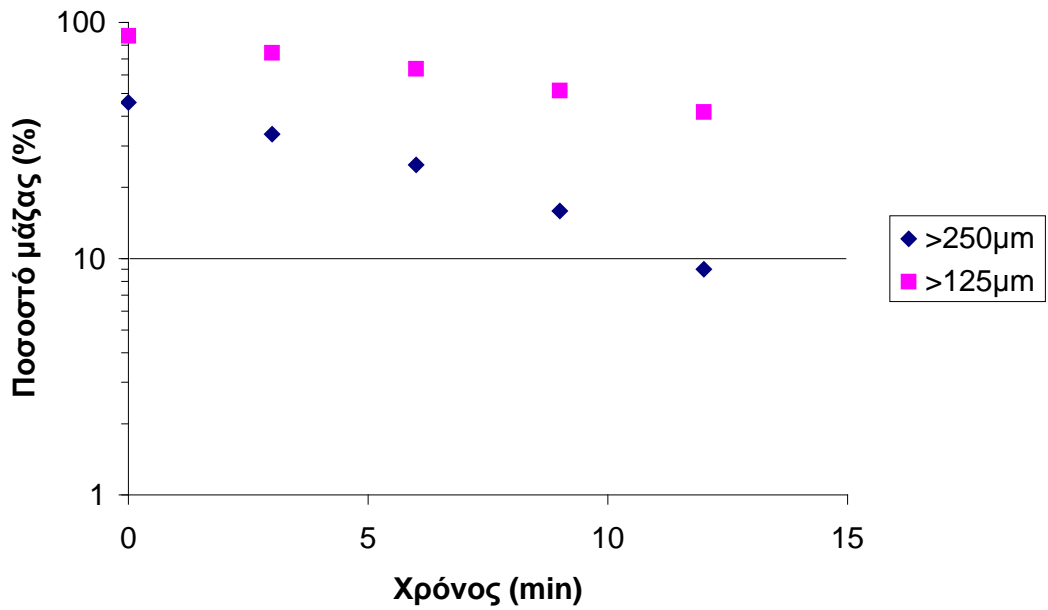
Σχήμα 2.9: Αρχική κατανομή άμμου



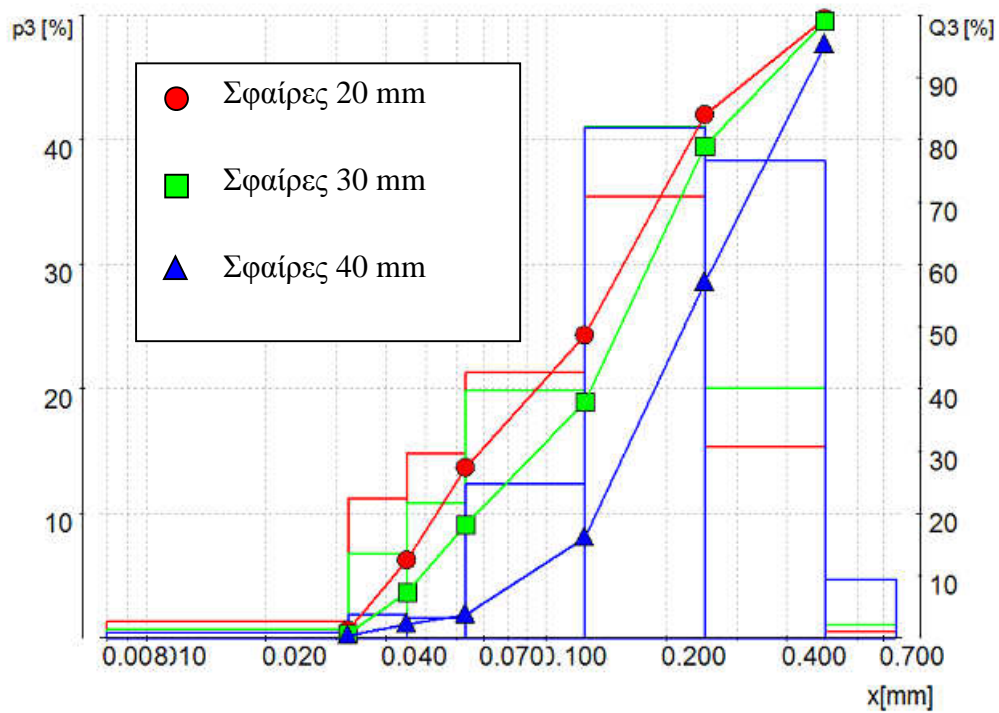
Σχήμα 2.10: Επίδραση του χρόνου λειοτρίβισης στην κοκκομετρική κατανομή του δείγματος άμμου



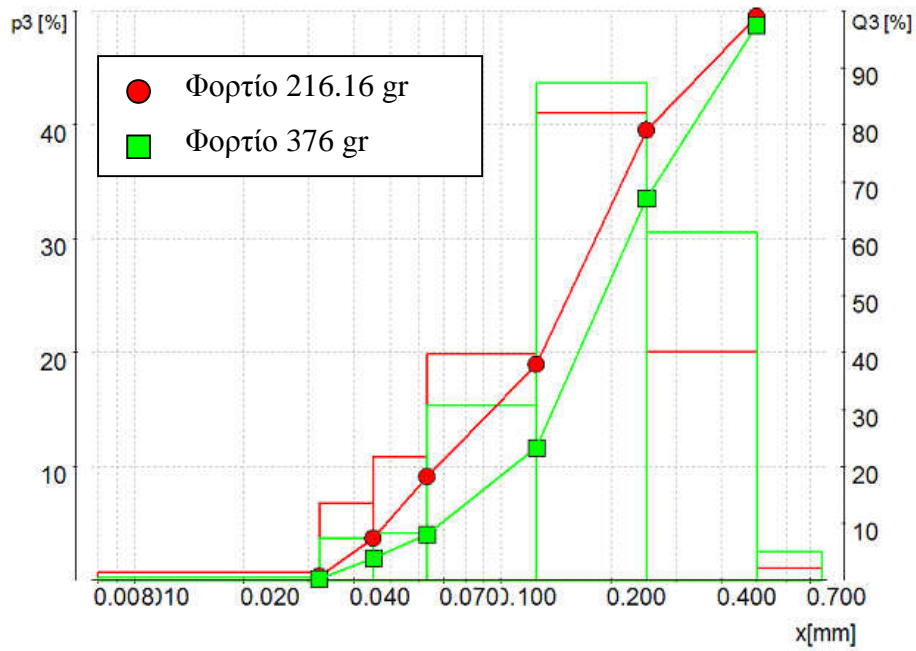
Σχήμα 2.11: Επίδραση χρόνου για τα κλάσματα >250 μ m και >125 μ m



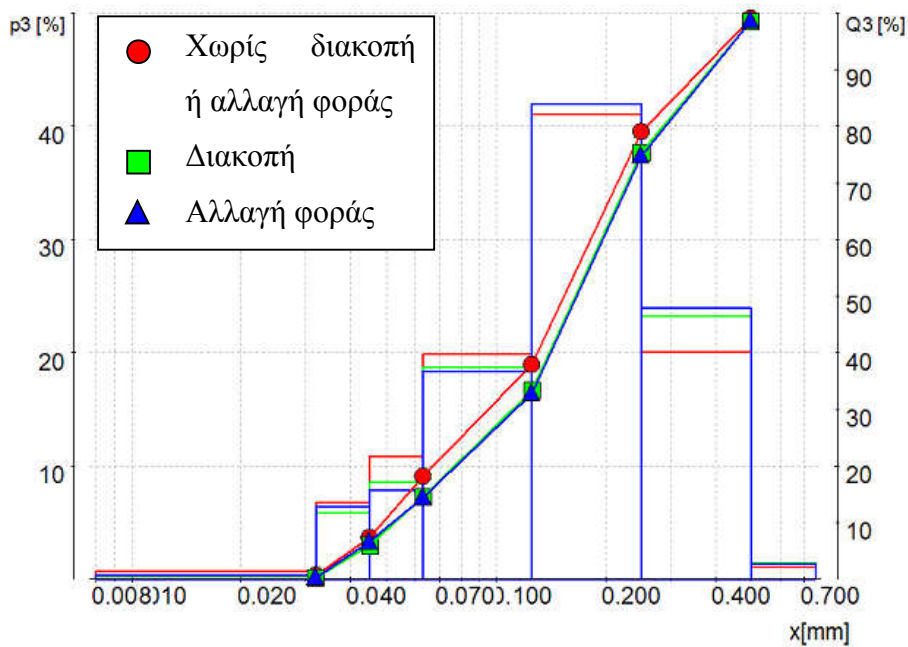
Σχήμα 2.12: Σύγκριση μεταξύ των σφαιρών λειοτρίβισης για άμμο



Σχήμα 2.13: Επίδραση αύξησης φορτίου στην λειοτριβίση άμμου



Σχήμα 2.14: Επίδραση ρυθμίσεων διακοπής και αλλαγής φοράς στη λειοτριβίση άμμου



Κεφάλαιο 3: Μελέτη των ραδιολογικών χαρακτηριστικών οικοδομικών υλικών

3.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό μελετώνται τα ραδιολογικά χαρακτηριστικά οικοδομικών υλικών, αξιοποιώντας τις συσκευές λειοτρίβισης που περιγράφηκαν στο 2^ο κεφάλαιο. Με τη χρήση του εξοπλισμού λειοτρίβισης έγινε δυνατή η παρασκευή ομογενών δειγμάτων τυποποιημένης γεωμετρίας από στερεά οικοδομικά υλικά, όπως ο γρανίτης και το μάρμαρο. Τα δείγματα που παρασκευάστηκαν αναλύθηκαν με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας με σκοπό την ποιοτική και ποσοτική ανάλυση των φυσικών ραδιοϊσοτόπων που περιέχουν. Για ορισμένα από τα οικοδομικά υλικά υπολογίστηκε με κατάλληλη πειραματική διαδικασία, ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ , ώστε να υπολογιστεί συντελεστής διόρθωσης του φαινομένου της αυταπορρόφησης. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που προέκυψαν, συγκρίνονται με τυπικές τιμές ειδικής ραδιενέργειας από τη βιβλιογραφία, αλλά και με τις συστάσεις ακτινοπροστασίας, όπως αυτές προκύπτουν από αρμόδιους φορείς.

3.2. Φυσική ραδιενέργεια οικοδομικών υλικών

Η έκθεση του ανθρώπινου οργανισμού σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες που προέρχονται από φυσικές ραδιενεργές πηγές, είναι συνεχής και αναπόφευκτο χαρακτηριστικό της ζωής στη Γη. Ο όρος *φυσική ραδιενέργεια* συμπεριλαμβάνει την κοσμική ακτινοβολία, τη ραδιενέργεια που προκαλείται από ραδιενεργούς πυρήνες που βρίσκονται στον φλοιό της Γης, αλλά και την ακτινοβολία από ισότοπα που βρίσκονται μέσα στον ίδιο τον οργανισμό. Πλήθος ραδιοϊσοτόπων συναντώνται στο έδαφος, σε πετρώματα αλλά και μέσα στον ανθρώπινο οργανισμό. Η ακτινοβολία που δέχεται το ανθρώπινο σώμα από εξωτερικές πηγές είναι κυρίως ακτινοβολία- γ από ραδιοϊσότοπα που προέρχονται από τις ραδιενεργές σειρές του ^{238}U και του ^{232}Th καθώς και από το ραδιενεργό ισότοπο ^{40}K . Οι παγκόσμιες μέσες συγκεντρώσεις

^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K στο φλοιό της Γης είναι περίπου 30 Bq kg^{-1} , 35 Bq kg^{-1} και 400 Bq kg^{-1} αντίστοιχα (UNSCEAR 2000). Ιδιαίτερα μεγάλης ραδιοβιολογικής σημασίας θεωρείται το ισότοπο ραδίου ^{226}Ra , που ανήκει στην ραδιενεργό σειρά του ^{238}U , εξαιτίας του βραχύβιου θυγατρικού του, ^{222}Rn το οποίο είναι αέριο και διαφεύγει εύκολα, εισέρχεται στον ανθρώπινο οργανισμό με την εισπνοή, και προκαλεί εσωτερική ακτινοβόληση.

Καθώς οι άνθρωποι περνούν το 80% του χρόνου τους στο εσωτερικό των κατοικιών, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα υλικά που χρησιμοποιούνται σαν οικοδομικά, και τα οποία συχνά χαρακτηρίζονται από σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις ραδιοϊσοτόπων ραδιοβιολογικής σημασίας. Τα οικοδομικά υλικά συμβάλλουν στην έκθεση σε φυσική ραδιενέργεια με δύο τρόπους. Πρώτον, τα ισότοπα των σειρών ^{238}U και ^{232}Th και το ^{40}K και οι θυγατρικοί τους πυρήνες προκαλούν εξωτερική έκθεση. Δεύτερον, η εκροή ραδονίου και η εναπόθεση αυτού και των θυγατρικών του πυρήνων στο αναπνευστικό σύστημα, προκαλούν εσωτερική ακτινοβόληση. Παρόλα αυτά, μόνο ένα μέρος του ραδονίου που παράγεται, φθάνει τελικά στην εξωτερική επιφάνεια των οικοδομικών υλικών και εισέρχεται τελικά στον αέρα σε εσωτερικούς χώρους. Έτσι, ως κυριότερη πηγή ραδονίου σε κτίρια θεωρείται το έδαφος.

Όσον αφορά στη ραδιενέργεια των οικοδομικών υλικών, αυτή μπορεί να είναι τεχνητά επαυξημένη, εξαιτίας της χρήσεως ως πρόσθετων, διαφόρων υλικών τα οποία είναι παραπροϊόντα βιομηχανικών διεργασιών. Η αύξηση της ραδιενέργειας ενός φυσικά ραδιενεργού υλικού με τεχνητούς τρόπους οδηγεί στη δημιουργία υλικών τα οποία χαρακτηρίζονται ως TENORM (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material). Για παράδειγμα, Ιπτάμενη Τέφρα από λιγνιτικούς σταθμούς, με συγκεντρώσεις ^{226}Ra έως και 1000 Bq.Kg^{-1} , χρησιμοποιείται ήδη από τις αρχές του 1980 στην Ελλάδα ως πρόσθετο συστατικό για την παραγωγή τσιμέντου (Skodras 2007).

Οι Πίνακες 3.1-3.6 περιέχουν τυπικές τιμές ειδικής ραδιενέργειας για οικοδομικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα, εισαγόμενα ή μη. Στους πίνακες αυτούς οι συντομογραφίες Δ/Α και Δ/Μ σημαίνουν «Δεν Ανιχνεύτηκε» και «Δεν Μετρήθηκε» αντίστοιχα.

Ειδικότερα στους γρανίτες έχουν μετρηθεί αυξημένες συγκεντρώσεις φυσικών ραδιοϊσοτόπων. Οι γρανίτες είναι πυριγενή πετρώματα, τα οποία βρίσκονται σε αφθονία στο υπέδαφος. Εξαιτίας των ιδιοτήτων τους (μεγάλη σκληρότητα, ποικιλία χρωμάτων, ανθεκτικότητα σε μεγάλες θερμοκρασίες), χρησιμοποιούνται πολύ συχνά ως διακοσμητικές επιφάνειες ή επιφάνειες εργασίας σε κατοικίες. Έτσι κρίνεται σκόπιμη η μέτρηση της ειδικής ραδιενέργειας του γρανίτη, αφού η τοποθέτηση του στις κατοικίες σε μεγάλες ποσότητες, μπορεί να οδηγήσει σε υπολογίσιμες δόσεις ($>1 \text{ mSv y}^{-1}$ Koroneos 2005). Ωστόσο, οι πιθανές επιπτώσεις από τη χρήση του γρανίτη μετριάζονται, αν ληφθεί υπόψη η μικρή - συνήθως - συνεισφορά του στο σύνολο της κατασκευής.

3.3. Οδηγίες σχετικά με την προστασία από τη φυσική ραδιενέργεια των οικοδομικών υλικών

Όπως ήδη αναφέρθηκε, σε πολλά από τα οικοδομικά υλικά παρατηρούνται αυξημένες συγκεντρώσεις ραδιοϊσοτόπων, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε υπολογίσιμες δόσεις. Έτσι, κρίνεται απαραίτητη η θέσπιση περιορισμών οι οποίοι ορίζουν τη μέγιστη ειδική ραδιενέργεια και αντίστοιχη δόση για κάθε υλικό.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, στα πλαίσια του Άρθρου 31 της συνθήκης Euratom, έχει εκδώσει οδηγίες σχετικά με την προστασία από τη ραδιενέργεια των οικοδομικών υλικών (Ευρωπαϊκή Επιτροπή 1999). Με βάση τις οδηγίες αυτές, και τη σχετική Ευρωπαϊκή νομοθεσία, τα κράτη-μέλη της Ε.Ε έχουν καθιερώσει συγκεκριμένους κανονισμούς σχετικά με τη ραδιενέργεια των οικοδομικών υλικών.

Σκοπός της θεσμοθέτησης τέτοιων κανονισμών είναι ο περιορισμός της έκθεσης σε φυσική ραδιενέργεια, λόγω υλικών με αυξημένες συγκεντρώσεις φυσικών ραδιοϊσοτόπων. Επειδή όλα τα οικοδομικά υλικά εκπέμπουν ένα ποσό ακτινοβολίας, οι πολύ μικρές εκθέσεις οι οποίες είναι και αναπόφευκτες, εξαιρούνται από τους περιορισμούς. Επιπλέον, ο περιορισμός της χρήσης ορισμένων οικοδομικών υλικών μπορεί να έχει σημαντικές οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές συνέπειες. Τέτοιες επιπτώσεις είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη κατά την θέσπιση κανονισμών. Στα πλαίσια των ευρωπαϊκών κανόνων ακτινοπροστασίας, η δόση ακτινοβολίας- γ εξαιτίας των οικοδομικών υλικών πρέπει να εξετάζεται όταν ξεπερνά το 1 mSv y^{-1} .

Καθώς στην συνολική δόση συμβάλουν περισσότερα από ένα ραδιοϊσότοπα, έχει προταθεί ένας πρακτικός τρόπος έκφρασης του ορίου δόσης, υπολογίζοντας κατάλληλο δείκτη I (activity concentration index). Η ποσότητα I ορίζεται ως εξής (Ευρωπαϊκή Επιτροπή 1999):

$$I = \frac{C_{Ra}}{300Bqkg^{-1}} + \frac{C_{Th}}{200Bqkg^{-1}} + \frac{C_K}{3000Bqkg^{-1}} \quad (1)$$

όπου C_{Ra} , C_{Th} , C_K , οι συγκεντρώσεις ειδικής ραδιενέργειας για κάθε ισότοπο αντίστοιχα, στο οικοδομικό υλικό. Ο Πίνακας 3.7 παρουσιάζει όρια αποδέσμευσης για το I, λαμβάνοντας υπόψη τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται ένα υλικό στο κτήριο. Όταν η τιμή του I είναι μικρότερη από το αντίστοιχο όριο, το υλικό μπορεί να θεωρηθεί ασφαλές, χωρίς περαιτέρω μελέτη.

Στην Ελλάδα, σύμφωνα με τον Κανονισμό Ακτινοπροστασίας και την υπ' αριθμόν Π/105/241 – 03.08.2006 εγκύκλιο της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενεργείας, ένα οικοδομικό υλικό αποδεσμεύεται όταν εκτιμάται ότι η χρήση του δεν μπορεί να οδηγήσει σε δόσεις μεγαλύτερες από $300 \mu Sv y^{-1}$.

3.4. Προετοιμασία δειγμάτων οικοδομικών υλικών

Στην παρούσα ΔΕ παρασκευάστηκαν δείγματα για γ-φασματοσκοπική ανάλυση από διάφορα οικοδομικά υλικά διαθέσιμα στο εμπόριο. Τα υλικά που εξετάστηκαν έχουν μόνο περιορισμένα μελετηθεί στο παρελθόν από το ΕΠΤ-ΕΜΠ, λόγω της δυσκολίας προετοιμασίας τους χωρίς τον κατάλληλο εξοπλισμό. Ο Πίνακας 3.8 περιέχει τα χαρακτηριστικά των δειγμάτων που παρασκευάστηκαν από οικοδομικά υλικά στα πλαίσια της ΔΕ. Η διαδικασία προετοιμασίας των δειγμάτων περιγράφεται στις επόμενες παραγράφους.

Όλα τα δείγματα συσκευάστηκαν σε τυποποιημένη γεωμετρία και παρέμειναν σφραγισμένα για επαρκές χρονικό διάστημα ώστε να εξασφαλιστεί ραδιενεργός ισορροπία. Η συνηθέστερη τυποποιημένη γεωμετρία η οποία χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ είναι η γεωμετρία 2, στην οποία το δείγμα γεμίζει πλήρως ένα πλαστικό κυλινδρικό δοχείο, όγκου 282 ml, με ελαφρά κωνικότητα και τοποθετείται πάνω στο καπάκι του ανιχνευτή. Το Σχήμα 3.1 παρουσιάζει τις διαστάσεις του δοχείου γεωμετρίας 2.

3.4.1. Τσιμεντόλιθος

Το δείγμα αυτό επιλέχθηκε από το αρχείο δειγμάτων του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Το δείγμα αρχικά τεμαχίστηκε με σφυρί, σε κομμάτια μικρότερα των 35 mm, ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί με ασφάλεια στον θραυστήρα BB51, όπως αναφέρει το εγχειρίδιο χρήσης του θραυστήρα.

Στη συνέχεια, το υλικό τοποθετήθηκε στον θραυστήρα έχοντας ρυθμίσει το άνοιγμα των σιαγόνων ίσο με 2 mm. Παραλήφθηκε η ποσότητα θρυμματισμένου τσιμεντόλιθου από το συρτάρι συλλογής και χωρίστηκε με τη μέθοδο του κώνου, με τη χρήση σταυρού από λαμαρίνα. Μετά το διαχωρισμό της αρχικής ποσότητας σε τέσσερα τμήματα, χρησιμοποιώντας τα 2 από αυτά δημιουργήθηκε αντιπροσωπευτικό δείγμα γεωμετρίας 2, με κωδική ονομασία YMS005. Στη συνέχεια το δείγμα σφραγίστηκε αεροστεγώς, ώστε να αποφεύγεται η διαρροή των αερίων ισοτόπων του ραδονίου (^{222}Rn και ^{226}Rn). Το δείγμα αποθηκεύτηκε για κατάλληλο χρόνο (περίπου 25 μέρες) ώστε να επιτευχθεί ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ του ^{226}Ra και των θυγατρικών του.

Η υπόλοιπη ποσότητα που προέκυψε από το θραυστήρα, βάρους 407.58 gr, τοποθετήθηκε στη συσκευή ανάλυσης κοκκομετρίας. Η κοκκομετρική κατανομή του τσιμεντόλιθου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2. Για την κοκκομετρική ανάλυση των υλικών που τεμαχίστηκαν στον θραυστήρα προστέθηκαν στην συσκευή επιπλέον δύο κόσκινα μεγέθους οπών 1 mm και 2 mm.

Η ανάλυση κοκκομετρίας πραγματοποιήθηκε ως εξής:

- Αρχικό κοσκίνισμα 20 min (αρχείο INITIAL_022).
- Επαναληπτικό κοσκίνισμα 5 min (αρχείο REPEAT_048).
- Ακόμη 2 επαναληπτικά κοσκίνισματα διάρκειας 5 min το καθένα (αρχεία REPEAT_049-050).

3.4.2. Χαλίκι

Το δείγμα αυτό προέρχεται επίσης από το αρχείο δειγμάτων του ΕΠΤ-ΕΜΠ και έχει αναλυθεί στο παρελθόν με τον κωδικό YH003. Το δείγμα τοποθετήθηκε στο θραυστήρα με ρύθμιση ανοίγματος σιαγόνων 2 mm. Αφού παραλήφθηκε το υλικό

από το συρτάρι συλλογής, συσκευάστηκε δείγμα γεωμετρίας 2 με κωδικό YH006, το οποίο σφραγίστηκε αεροστεγώς και αποθηκεύτηκε για κατάλληλο χρόνο.

3.4.3. Μάρμαρο

Πρόκειται για κομμάτι λευκού μαρμάρου από το εμπόριο, το οποίο χρησιμοποιείται σε οικοδομές. Το αρχικό δείγμα φαίνεται στο Σχήμα 3.3 με την αρίθμηση I. Το μάρμαρο αρχικά τεμαχίστηκε με σφυρί και στη συνέχεια τοποθετήθηκε στο θραυστήρα με ρύθμιση ανοίγματος σιαγόνων 2mm. Δημιουργήθηκε δείγμα γεωμετρίας 2 με κωδικό YM015, το οποίο στη συνέχεια σφραγίστηκε αεροστεγώς.

3.4.4. Γρανίτες

Επιλέχθηκαν 3 είδη γρανιτών από το εμπόριο, τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3 με την αρίθμηση II, III και IV, αντίστοιχα. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν στον θραυστήρα με άνοιγμα σιαγόνων 2mm. Από την ποσότητα που τοποθετήθηκε στον θραυστήρα, παρασκευάστηκαν δείγματα γεωμετρίας 2, τα οποία ονομάστηκαν YGR007, YGR008 και YGR009 αντίστοιχα. Αφού σφραγίστηκαν, αποθηκεύτηκαν ώστε να αναλυθούν μετά την εξασφάλιση ραδιενεργού ισορροπίας, με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας.

3.5. Ανάλυση οικοδομικών υλικών με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας

Η ανάλυση για προσδιορισμό ραδιενεργών ισοτόπων στα δείγματα από οικοδομικά υλικά πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας. Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση είναι μία μη καταστροφική μέθοδος ποιοτικού και ποσοτικού προσδιορισμού ραδιενεργών ισοτόπων. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην επεξεργασία του φάσματος των ακτίνων -γ που εκπέμπονται κατά την διάσπαση των ραδιενεργών πυρήνων. Με τον ποιοτικό προσδιορισμό επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός του είδους των πυρήνων που διασπώνται, δηλαδή του αντίστοιχου ραδιοϊσοτόπου. Με τον ποσοτικό προσδιορισμό επιτυγχάνεται η εκτίμηση του πλήθους των πυρήνων που διασπώνται στην μονάδα του χρόνου, για κάθε είδος πυρήνα, που οδηγεί σε εκτίμηση της ραδιενέργειας του δείγματος.

Η γ-φασματοσκοπία είναι μία από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες ραδιομετρικές τεχνικές, καθώς τα περισσότερα ραδιενεργά ισότοπα που συνήθως ενδιαφέρουν εκπέμπουν ακτίνες-γ. Έχει το σημαντικό πλεονέκτημα ότι είναι μη καταστροφική και αναλύει ταυτόχρονα όλα τα γ-ραδιενεργά ισότοπα που περιέχονται σε ένα δείγμα, χωρίς να απαιτείται ειδική διαδικασία για το κάθε ένα από αυτά. Επιπλέον, παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι τα δείγματα δεν χρειάζονται ιδιαίτερη προετοιμασία, όπως συμβαίνει με μεθόδους όπως η α-φασματοσκοπία, η οποία απαιτεί προηγουμένως ραδιοχημική επεξεργασία. Συνήθως αρκεί η απλή συλλογή και συσκευασία του δείγματος σε δοχείο καθορισμένης γεωμετρίας και η εν συνεχεία τοποθέτηση του πάνω στον ανιχνευτή.

Για την γ-φασματοσκοπική ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν οι ανιχνευτές HPGe και LEGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Σύμφωνα με την κωδικοποίηση των ανιχνευτών, η οποία χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, ο HPGe είναι ο ανιχνευτής 2 και ο LEGe ο ανιχνευτής 3.

Ο ανιχνευτής LEGe (Low Energy Germanium) είναι κατασκευασμένος από Γερμάνιο υψηλής καθαρότητας και είναι σχεδιασμένος για αναλύσεις φωτονίων χαμηλών ενεργειών ($E < 200 \text{ keV}$), επιτυγχάνοντας εύρος ημίσειας ύψους 0.53 keV στα 122 keV . Ο κρύσταλλος του έχει μεγάλη επιφάνεια και μικρό πάχος, ώστε να βελτιστοποιείται η απόδοση αλλά και η διακριτική ικανότητα στην περιοχή των χαμηλών ενεργειών. Ταυτόχρονα, το περίβλημά του διαθέτει παράθυρο από Βηρύλλιο, ώστε να ελαχιστοποιείται η απορρόφηση φωτονίων χαμηλών ενεργειών. Ο ανιχνευτής LEGe χρησιμοποιείται με δύο διαφορετικές ρυθμίσεις ενίσχυσης: Σε χαμηλή ενίσχυση ο πολυκαναλικός αναλυτής καλύπτει την περιοχή $0-2000 \text{ keV}$, όπως τυπικά γίνεται στους ανιχνευτές Γερμανίου, ενώ σε υψηλή ενίσχυση το φάσμα περιορίζεται στην περιοχή $0-200 \text{ keV}$. Ο ανιχνευτής είναι τοποθετημένος σε ατσάλινη θωράκιση, ελληνικής κατασκευής.

Ο ανιχνευτής HPGe (High Purity Germanium) είναι κατασκευασμένος από Γερμάνιο υψηλής καθαρότητας. Έχει σχετική απόδοση 33.8% και διακριτική ικανότητα 1.78 keV στα 1.33 MeV . Διαθέτει περίβλημα από Αλουμίνιο, με συνέπεια να μην είναι κατάλληλος για την ανίχνευση φωτονίων χαμηλών ενεργειών. Είναι τοποθετημένος σε ατσάλινη θωράκιση, κατασκευής της εταιρείας Gamma Products Inc.

Κατά την γ-φασματοσκοπική ανάλυση των οικοδομικών υλικών μετρήθηκαν οι τιμές ραδιενέργειας για ορισμένα ισότοπα των φυσικών ραδιενεργών σειρών καθώς και του ραδιενεργού ισότοπου του καλίου. Συγκεκριμένα, σε όλα τα δείγματα προσδιορίστηκαν:

- Το ^{226}Ra , από τα θυγατρικά του σε ισορροπία ^{214}Pb και ^{214}Bi , τα οποία εκπέμπουν φωτόνια στις ενέργειες 295.22 keV, 351.99 keV, 609.32 keV, 1120.28 keV και 1764.51 keV.
- Το ^{232}Th , από τα θυγατρικά του σε ισορροπία ^{228}Ac , ^{212}Pb , και ^{208}Tl , τα οποία εκπέμπουν φωτόνια στις ενέργειες 338.40 keV, 911.07 keV, 238.63 keV και 583.14 keV. Για την ανάλυση αυτή θεωρήθηκε ότι όλη η σειρά διάσπασης του ^{232}Th βρίσκεται σε ισορροπία όταν διαπιστώνεται ότι τα ^{228}Ra και ^{228}Th έχουν ίσες ραδιενέργειες.
- Το ^{40}K , απευθείας από τα φωτόνια του στα 1460.75 keV.

Επιπλέον, σε ορισμένα από τα δείγματα, τα οποία αναλύθηκαν στον ανιχνευτή LEGe, προσδιορίστηκαν και τα ακόλουθα ισότοπα, τα οποία εκπέμπουν φωτόνια χαμηλών ενεργειών:

- Ο ^{210}Pb , ο οποίος εκπέμπει φωτόνια στα 46.52 keV.
- Το ^{238}U , το οποίο προσδιορίζεται από το θυγατρικό του ^{234}Th , το οποίο εκπέμπει φωτόνια στα 63.29 keV.

Η διάρκεια συλλογής των φασμάτων ήταν από 100000 έως 500000 sec για όλα τα οικοδομικά υλικά που αναλύθηκαν. Η ανάλυση των φασμάτων πραγματοποιήθηκε με χρήση του κώδικα SPUNAL, ο οποίος έχει αναπτυχθεί εξολοκλήρου στο ΕΠΤ-ΕΜΠ σε γλώσσα FORTRAN 77. Ενδεικτικός πίνακας αποτελεσμάτων ανάλυσης οικοδομικού υλικού από τον κώδικα SPUNAL δίνεται στο Παράρτημα Α. Ο Πίνακας 3.9 περιέχει τα χαρακτηριστικά όλων των φασμάτων που προέκυψαν από την γ-φασματοσκοπική ανάλυση των οικοδομικών υλικών.

3.6. Αυταπορρόφηση οικοδομικών υλικών

Για τη γ -φασματοσκοπική ανάλυση ραδιοϊσοτόπων που εκπέμπουν φωτόνια χαμηλών ενεργειών, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη το φαινόμενο της αυταπορρόφησης. Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ έχει αναπτυχθεί και εφαρμόζεται σχετική μεθοδολογία διόρθωσης για διάφορα υλικά περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος. Στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ μελετήθηκε η επέκταση της μεθοδολογίας αυτής στους νέους τύπους οικοδομικών υλικών, η ανάλυση των οποίων έγινε δυνατή με τη βοήθεια του εξοπλισμού λειοτρίβισης.

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζεται εν συντομία το σχετικό θεωρητικό υπόβαθρο και στη συνέχεια περιγράφονται τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης.

3.6.1. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Κάθε μηχανισμός αλληλεπίδρασης φωτονίων και ύλης οδηγεί στην εξαφάνιση του αρχικού φωτονίου, αλλαγή της κατεύθυνσής του ή στην απώλεια ενός μέρους της ενέργειάς του. Το γεγονός αυτό προκαλεί εξασθένηση της ακτινοβολίας φωτονίων που προσπίπτει σε ένα υλικό-απορροφητή. Η εξασθένηση παράλληλης δέσμης μονοενεργειακών φωτονίων που διέρχεται μέσα από επίπεδο απορροφητή εκφράζεται μέσα από τη σχέση:

$$I/I_0 = e^{-\mu x}, \quad (2)$$

όπου I η ένταση της τελικής δέσμης φωτονίων, I_0 η ένταση της αρχικής δέσμης, x το πάχος του απορροφητή και μ ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης.

Κάθε απορροφητής ακτινοβολίας χαρακτηρίζεται από τον γραμμικό συντελεστή εξασθένησης μ (cm^{-1}). Το μέγεθος αυτό εξαρτάται έντονα από την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας αλλά και από τη σύσταση και την πυκνότητα του υλικού του απορροφητή.

Όταν μια πηγή πεπερασμένου όγκου εκπέμπει φωτόνια, εξασθένηση φωτονίων πραγματοποιείται και μέσα στο ίδιο το υλικό που εκπέμπει την ακτινοβολία, το οποίο λειτουργεί ως απορροφητής για τα φωτόνια που εκπέμπονται από αυτό. Το φαινόμενο αυτό, δηλαδή η εξασθένηση των εκπεμπόμενων φωτονίων μέσα στο ίδιο το υλικό της πηγής ονομάζεται *αυταπορρόφηση*. Η έκταση της αυταπορρόφησης εξαρτάται σημαντικά από το γραμμικό συντελεστή εξασθένησης μ .

Το φαινόμενο της αυταπορρόφησης εμφανίζεται και κατά την πραγματοποίηση γ-φασματοσκοπικών αναλύσεων, όπου τα φωτόνια που εκπέμπονται από το δείγμα απορροφώνται από το υλικό του πριν ακόμα το εγκαταλείψουν. Μάλιστα, ο βαθμός αυταπορρόφησης μπορεί να διαφέρει σημαντικά μεταξύ των δειγμάτων που αναλύονται και των προτύπων πηγών οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση απόδοσης της διάταξης. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε λανθασμένα αποτελέσματα και συμπεράσματα, και είναι ένα από τα βασικά προβλήματα τα οποία παρουσιάζονται κατά την γ-φασματοσκοπική ανάλυση στην περιοχή χαμηλών ενεργειών, όπου και είναι εντονότερο το φαινόμενο. Πρακτικά, ως ανώτερο όριο ενέργειας για την εμφάνιση σημαντικών φαινομένων αυταπορρόφησης τίθενται συνήθως τα 200 keV.

Για την αντιμετώπιση της αυταπορρόφησης έχουν αναπτυχθεί διάφορες πειραματικές και υπολογιστικές μέθοδοι. Στην παρούσα ΔΕ, εφαρμόστηκε διαδικασία υπολογισμού κατάλληλου συντελεστή διόρθωσης, η οποία έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ (Αναγνωστάκης 1998).

Η μέθοδος υπολογισμού του συντελεστή διόρθωσης προϋποθέτει τη γνώση του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης για το υλικό του δείγματος. Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, και σε προηγούμενες μελέτες έχει υπολογιστεί ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης διαφόρων υλικών όπως τσιμέντο, άμμος, σκωρία και άλλα. Στα πλαίσια της παρούσης εργασίας, προσδιορίστηκε πειραματικά ο συντελεστής αυταπορρόφησης για νέες κατηγορίες οικοδομικών υλικών τα οποία αναλύθηκαν. Για όσα υλικά ο συντελεστής αυταπορρόφησης υλικών δεν έχει υπολογιστεί, προσεγγίζεται ως ίσος με τον συντελεστή υλικού παραπλήσιας πυκνότητας και σύστασης. Η διαδικασία υπολογισμού του συντελεστή διόρθωσης αυταπορρόφησης που εφαρμόστηκε, περιγράφεται στη συνέχεια.

3.6.2. Μεθοδολογία διόρθωσης αυταπορρόφησης

Ο υπολογισμός του συντελεστή διόρθωσης αυταπορρόφησης πραγματοποιήθηκε με χρήση του προγράμματος selfabs το οποίο έχει συνταχθεί σε γλώσσα FORTRAN 77 (Αναγνωστάκης 1998). Στο πρόγραμμα εισάγονται η ενέργεια για την οποία είναι επιθυμητός ο υπολογισμός του συντελεστή διόρθωσης και ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του υλικού για την ενέργεια αυτή. Το πρόγραμμα selfabs, με την επίλυση κατάλληλου ολοκληρώματος, υπολογίζει το λόγο της απόδοσης για

συγκεκριμένη ενέργεια, ο οποίος αντιστοιχεί σε δείγμα του υλικού το οποίο ενδιαφέρει, προς την απόδοση διαλύματος 4M HCl που θεωρείται ως υλικό αναφοράς. Το διάλυμα 4M HCl επιλέγεται ως υλικό αναφοράς, καθώς είναι το υλικό της πρότυπης πηγής βαθμονόμησης απόδοσης του ανιχνευτή LEGe. Η διαδικασία περιγράφεται πιο αναλυτικά σε σχετική ΔΔ (Αναγνωστάκης 1998).

Μετά τον υπολογισμό του συντελεστή διόρθωσης με χρήση του κώδικα selfabs, η τελική διορθωμένη απόδοση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{eff}_{\text{cor}} = \text{eff} \cdot f \quad (3)$$

όπου eff_{cor} η διορθωμένη απόδοση, eff η αρχική απόδοση και f ο συντελεστής διόρθωσης αυταπορρόφησης.

Επομένως, η ειδική ραδιενέργεια του δείγματος προκύπτει από τη σχέση:

$$R = \frac{A - B}{\text{eff}_{\text{cor}} \cdot t \cdot \varepsilon \cdot m} = \frac{1}{f} \frac{A - B}{\text{eff} \cdot t \cdot \varepsilon \cdot m} \quad (4)$$

όπου R η ειδική ραδιενέργεια σε Bq kg^{-1} , A η επιφάνεια της φωτοκορυφής, B η επιφάνεια του υπόβαθρου, t ο χρόνος συλλογής του φάσματος, ε το ποσοστό εκπομπής του φωτονίου και m η μάζα του δείγματος.

Με χρήση της σχέσης (4) ο κώδικας SPUNAL εφαρμόζει αυτόματα διόρθωση αυταπορρόφησης για γνωστά υλικά, για τα οποία έχει υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για να υπολογισθεί ο συντελεστής διόρθωσης. Για τα υλικά που εξετάστηκαν στην παρούσα ΔΕ δεν εφαρμόστηκε η αυτοματοποιημένη διόρθωση, αλλά υπολογίστηκε ανεξάρτητα ο συντελεστής διόρθωσης f και εν συνεχεία, η τιμή ειδικής ραδιενέργειας που προέκυψε από τον κώδικα διαιρέθηκε με τον συντελεστή f .

Από τα παραπάνω συνεπάγεται ότι για τον προσδιορισμό του συντελεστή διόρθωσης έπρεπε να είναι γνωστός ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ του υπό ανάλυση υλικού, συναρτήσει της ενέργειας των φωτονίων. Ο συντελεστής μ εκτιμάται από κατάλληλη πειραματική διαδικασία που περιγράφεται σε επόμενη παράγραφο. Για περιορισμένο αριθμό υλικών γνωστής σύστασης (π.χ. μετόν) ο συντελεστής μ διατίθεται σε πίνακες στη βιβλιογραφία (Hubbel 1981).

3.6.3. Μεθοδολογία πειραματικού προσδιορισμού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ

Όπως ήδη αναφέρθηκε, απαραίτητη για την συγκεκριμένη μεθοδολογία υπολογισμού του συντελεστή διόρθωσης αυταπορρόφησης, είναι η γνώση του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ . Πραγματοποιήθηκε μία σειρά πειραμάτων με σκοπό τον υπολογισμό του μ για διάφορα υλικά, ακολουθώντας την διαδικασία που περιγράφεται στη σχετική βιβλιογραφία (Αναγνωστάκης 1998).

Λόγω της έντονης εξάρτησης του μ από την πυκνότητα του υλικού, πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στην περίπτωση στερεών απορροφητών, οι οποίοι ενδεχομένως παρουσιάζουν υψηλή συμπίεστικότητα. Αυτό παρατηρείται συχνά στα περιβαλλοντικά υλικά και ιδιαίτερα στον λιγνίτη, τις τέφρες και το τσιμέντο. Έτσι, στα πειράματα είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της φαινόμενης πυκνότητας του υλικού. Ο όρος φαινόμενη πυκνότητα ορίζεται ως η πυκνότητα του υλικού κατά την συσκευασία του σε δοχείο τυποποιημένων διαστάσεων. Έχοντας υπολογίσει τη φαινόμενη πυκνότητα ενός υλικού, είναι δυνατός ο υπολογισμός της κατάλληλης μάζας m_i , που πρέπει να προστεθεί σε ένα κυλινδρικό δοχείο για τη δημιουργία συγκεκριμένου πάχους στρώματος του υλικού απορροφητή x_i .

Τα βήματα που ακολουθούνται για τον προσδιορισμό του συντελεστή μ ενός υλικού είναι (Αναγνωστάκης 1998):

1. Εκτίμηση της φαινόμενης πυκνότητας του υλικού με πλήρωση δοχείου όγκου 282 ml και ζύγιση του περιεχομένου υλικού.
2. Εκτίμηση της μάζας m_i του υλικού, η οποία απαιτείται να τοποθετηθεί στο δοχείο ώστε να προκύψει το επιθυμητό πάχος x_i του υλικού. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλα τα επιθυμητά πάχη του απορροφητή.
3. Τοποθέτηση υλικού στο κυλινδρικό δοχείο μέχρι συγκεκριμένο ύψος. Αυτό επιτυγχάνεται με τοποθέτηση στο δοχείο της αντίστοιχης μάζας του υλικού.
4. Τοποθέτηση του δοχείου πάνω στον ανιχνευτή.

5. Τοποθέτηση εξωτερικής πηγής φωτονίων πάνω από το δοχείο και ομοαξονικά προς αυτό, σε απόσταση που έχει καθοριστεί από προηγούμενα πειράματα ανάλογα με το είδος και την ενέργεια φωτονίων της πηγής.
6. Συλλογή του αντίστοιχου φάσματος των φωτονίων της εξωτερικής πηγής για κάθε πάχος, για επαρκή χρόνο έτσι ώστε οι σχηματιζόμενες φωτοκορυφές που αντιστοιχούν στα φωτόνια της ενέργειας που ενδιαφέρει να έχουν σχηματισθεί με καλή στατιστική και με το επιθυμητό κατά περίπτωση σφάλμα.
7. Ανάλυση του φάσματος με χρήση του κώδικα SPUNAL, για τον προσδιορισμό της επιφάνειας των φωτοκορυφών που ενδιαφέρουν.
8. Για κάθε ενέργεια φωτονίων, εκτίμηση του ρυθμού I των καταμετρούμενων φωτονίων από τον ανιχνευτή (φωτόνια s^{-1}), για κάθε πάχος απορροφητή. Η ποσότητα αυτή εκτιμάται ως ο λόγος της επιφάνειας κάθε φωτοκορυφής προς το χρόνο συλλογής φάσματος.
9. Προσαρμογή των πειραματικών σημείων ($x_i, \ln I_i$), σε γραμμική συνάρτηση αναδρομής. Η κλίση της ευθείας αναδρομής είναι μία εκτίμηση του συντελεστή μ για το υλικό απορροφητή και για συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων.

3.6.4. Προσδιορισμός γραμμικού συντελεστή εξασθένισης του νερού

Παρόλο που η τιμή του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ για το νερό είναι γνωστή από τη βιβλιογραφία, στα πλαίσια της ΔΕ προσδιορίστηκε και πειραματικά, προκειμένου να ελεγχθεί η πειραματική διαδικασία προσδιορισμού ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της. Η διαδικασία προσδιορισμού του συντελεστή μ πραγματοποιήθηκε για το νερό και ενέργεια 59.54 keV και η πειραματική τιμή που προέκυψε, συγκρίθηκε με την τιμή που είχε υπολογισθεί για τις ίδιες συνθήκες της πειραματικής διαδικασίας (Αναγνωστάκης 1998). Η διαδικασία αυτή επέτρεψε επιπλέον και την εξοικείωση με την πειραματική διαδικασία.

Για την εκτέλεση των πειραμάτων, είναι απαραίτητο να προσδιορίζεται με ακρίβεια το ύψος του νερού μέσα στο δοχείο τυποποιημένης γεωμετρίας. Το δοχείο

γεωμετρίας 2 που χρησιμοποιήθηκε είναι ελαφρώς κωνικό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, για το λόγο αυτό ο προσδιορισμός του ύψους έγινε με τη βοήθεια ζυγού, μετρώντας τη μάζα του νερού που περιείχε το δοχείο για συγκεκριμένα ύψη.

Συγκεκριμένα, πληρώθηκε το δοχείο με διάφορα ύψη νερού και μετρήθηκαν οι αντίστοιχες μάζες. Στη συνέχεια, από τις μάζες που μετρήθηκαν για κάθε ύψος, υπολογίστηκαν οι αντίστοιχοι όγκοι, εκτιμώντας την πυκνότητα του νερού ίση με 1 g/cm^3 στους 17°C . Από προσαρμογή προέκυψε ότι, ο όγκος $V \text{ (cm}^3\text{)}$ του δοχείου σε ύψος $h \text{ (mm)}$ δίνεται από τον τύπο:

$$V(h)=3.7509h+0.001321h^2-0.00012h^3 \quad (5)$$

Για να γίνει επαλήθευση της τιμής του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης (μ) του νερού, χρησιμοποιήθηκε κυλινδρική πηγή όγκου διαλύματος ^{241}Am , με κωδικό AMZ.44, η οποία εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 59.54 keV . Πρόκειται για την ίδια πηγή φωτονίων η οποία είχε χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενο πείραμα (Αναγνωστάκης 1998). Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στον ανιχνευτή LEGe. Επισημαίνεται ότι, για όλα τα πειράματα προσδιορισμού μ σε ενέργειες μικρότερες των 200 keV , ο ανιχνευτής ρυθμίστηκε σε ενεργειακή βαθμονόμηση $0\text{-}200 \text{ keV}$.

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν είναι τα εξής:

1. Πληρώθηκε το δοχείο γεωμετρίας 2, τα χαρακτηριστικά του οποίου περιγράφηκαν στην Παράγραφο 3.4, με ύψος νερού 5 mm και τοποθετήθηκε στον ανιχνευτή LEGe και πάνω από αυτό η πηγή ^{241}Am .
2. Λήφθηκε το φάσμα φωτονίων για κατάλληλο χρόνο, τέτοιο ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητικό σφάλμα, μικρότερο από 0.5% όπως αναφέρεται από το λογισμικό του πολυκαναλικού αναλυτή.
3. Απομακρύνθηκε το δοχείο και η πηγή από τον ανιχνευτή και συμπληρώθηκε στο δοχείο ποσότητα νερού ώστε η συνολική μάζα να αντιστοιχεί σε ύψος 10 mm . Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε το δοχείο και η πηγή με τον ίδιο τρόπο στον ανιχνευτή και λήφθηκε το αντίστοιχο φάσμα.
4. Επαναλήφθηκε η ίδια διαδικασία προσθέτοντας κάθε φορά 5 mm σε κάθε μέτρηση, για ύψη μέχρι τα 40 mm .

Η ανάλυση των φασμάτων πραγματοποιήθηκε με χρήση του κώδικα SPUNAL. Ο Πίνακας 3.10 παρουσιάζει τους χρόνους συλλογής φάσματος και τις αντίστοιχες επιφάνειες φωτοκορυφών. Αντίστοιχα, ο Πίνακας 3.11 περιέχει τα αποτελέσματα της διαδικασίας υπολογισμού του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης. Ο υπολογισμός του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης έγινε από την σχέση (2). Τα πειραματικά σημεία (x_i , $\ln I_i$) που προέκυψαν τοποθετήθηκαν σε γράφημα με ημιλογαριθμική κλίμακα και σχεδιάστηκε η ευθεία προσαρμογής (Σχήμα 3.4). Η κλίση αυτής της ευθείας εκτιμάται ως ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του νερού και προέκυψε ίσος με $\mu_{\text{νερού}} = 0.0195 \pm 0.0002 \text{ mm}^{-1}$, όπου η τιμή του μ συνοδεύεται από τυπικό σφάλμα, όπως υπολογίστηκε από την προσαρμογή. Η τιμή αυτή δεν παρουσιάζει στατιστικά σημαντική διαφορά από την τιμή $\mu = 0.0198 \pm 0.00027 \text{ mm}^{-1}$ που έχει προσδιοριστεί σε προηγούμενα πειράματα (Αναγνωστάκης 1998). Τόσο η νέα, όσο και η παλαιότερη τιμή, παρουσιάζουν μικρή μόνο απόκλιση, της τάξης του 5%, από τη θεωρητικά υπολογισμένη $\mu_{\text{θεωρ}} = 0.0205 \text{ mm}^{-1}$ (Hubbel 1981).

3.6.5. Προσδιορισμός γραμμικού συντελεστή εξασθένησης οικοδομικών υλικών

Ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης προσδιορίστηκε για ορισμένα από τα οικοδομικά υλικά που μελετήθηκαν, ώστε να εφαρμοστεί κατάλληλη διόρθωση αυταπορρόφησης στα αποτελέσματα της γ -φασματοσκοπικής ανάλυσης. Η μελέτη αυτή είχε σκοπό την εξέταση του φαινομένου της αυταπορρόφησης στους τύπους οικοδομικών υλικών που εξετάζονται στη ΔΕ οι οποίοι - όπως είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία - αναμένεται να έχουν τη μεγαλύτερη ραδιοβιολογική σημασία. Η επέκτασή της στο σύνολο των υλικών που εξετάστηκαν κρίθηκε ότι ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσης ΔΕ.

Η διαδικασία που πραγματοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του μ για το νερό, επαναλήφθηκε για 3 οικοδομικά υλικά (τσιμεντόλιθος, γρανίτης, τούβλο). Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, προσδιορίστηκε ο συντελεστής μ για φωτόνια διαφόρων ενεργειών, τα οποία εκπέμπονται από τις διαθέσιμες στο ΕΠΤ-ΕΜΠ πηγές. Στόχος των πειραμάτων ήταν να προκύψει συνάρτηση που να συσχετίζει το συντελεστή μ με την ενέργεια των φωτονίων. Η συνάρτηση αυτή θα επιτρέψει να εκτιμηθούν οι τιμές του μ και για τις ενέργειες φωτονίων που χρησιμοποιούνται κατά τη γ -φασματοσκοπική ανάλυση. Πρέπει να επισημανθεί ότι η γεωμετρία των

πειραμάτων που έγιναν και των πηγών που χρησιμοποιήθηκαν δεν ήταν η ίδια για κάθε ενέργεια. Λεπτομέρειες για τη μεθοδολογία των πειραμάτων που έγιναν για κάθε ενέργεια φωτονίων μπορούν να βρεθούν αλλού (Αναγνωστάκης 1998).

Χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές πηγές φωτονίων :

- Κυλινδρική πηγή ^{241}Am όγκου 282 ml, συνολικής ραδιενέργειας 228 kBq, η οποία εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 59.54 keV. Η πηγή αυτή τοποθετείται απευθείας πάνω στο δοχείο του δείγματος.
- Σημειακή πηγή ^{152}Eu 1μCi με κωδική ονομασία DE401, με φωτόνια τα οποία μελετήθηκαν, ενεργειών 45.6 keV, 46.63 keV, 121.78 keV. Η πηγή αυτή τοποθετείται σε απόσταση 72mm πάνω από το δοχείο του δείγματος.
- Σημειακή πηγή ^{226}Ra με κωδική ονομασία RAR8121, ονομαστική ραδιενέργεια 57.1 kBq και φωτόνια τα οποία θα μελετηθούν, ενέργειας 186.25 keV. Η πηγή αυτή τοποθετείται σε απόσταση 72mm πάνω από το δοχείο του δείγματος.

Η γεωμετρία του πειράματος στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται σημειακές πηγές παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5.

3.6.5.1. Προσδιορισμός του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης γρανίτη

Αρχικά πραγματοποιήθηκε η πειραματική διαδικασία για τον προσδιορισμό του συντελεστή μ για το γρανίτη IV. Οι γρανίτες II και III δεν εξετάστηκαν λόγω του περιορισμένου διαθέσιμου χρόνου. Για τον πειραματικό προσδιορισμό του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

- Υπολογισμός της πυκνότητας του γρανίτη. Γνωρίζοντας τον όγκο του δοχείου μέσα στο οποίο βρίσκεται το δείγμα γρανίτη, και τη συνολική μάζα του δείγματος, υπολογίστηκε η πυκνότητα του γρανίτη.
 - Βάρος δείγματος(g): 580.1
 - Όγκος δοχείου(cm^3): 282
 - Πυκνότητα(g/cm^3): 2.057

- Από την ογκομέτρηση του δοχείου που είχε πραγματοποιηθεί για το πείραμα υπολογισμού του μ του νερού, και από την υπολογισμένη πυκνότητα προσδιορίστηκε η μάζα γρανίτη που πρέπει να προστεθεί στο δοχείο ώστε να υπάρχει συγκεκριμένο ύψος υλικού, δηλαδή πάχος απορροφητή.
- Στη συνέχεια προστέθηκε στο κενό δοχείο ποσότητα που αντιστοιχεί σε ύψος γρανίτη ίσο με 5 mm.
- Τοποθετήθηκε το δοχείο στον ανιχνευτή LEGe, και πάνω από το δοχείο αυτό η πηγή όγκου ^{241}Am .
- Λήφθηκε το ενεργειακό φάσμα για κατάλληλο χρόνο ώστε να επιτευχθεί σχετικό σφάλμα περίπου 1% όπως αυτό προκύπτει από το λογισμικό του πολυκαναλικού αναλυτή.
- Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε για ύψη γρανίτη 10,15 και 20 mm, προσθέτοντας κάθε φορά την κατάλληλη μάζα γρανίτη που αντιστοιχεί στο επιθυμητό ύψος.
- Στη συνέχεια επαναλήφθηκε η πειραματική διαδικασία, αφού τοποθετήθηκαν πάνω από το δοχείο οι πηγές ^{152}Eu και ^{226}Ra διαδοχικά. Στις μετρήσεις με τις ανωτέρω πηγές, διαπιστώθηκε ότι ο απαιτούμενος χρόνος ώστε να μειωθεί το σφάλμα στα επίπεδα της μέτρησης με ^{241}Am είναι σημαντικά αυξημένος. Έτσι όπως ήδη αναφέρθηκε, το φάσμα λήφθηκε για χρόνο τέτοιο ώστε το σφάλμα που προκύπτει από το λογισμικό του πολυκαναλικού αναλυτή να μειωθεί περίπου κάτω από 1%.
- Με γνωστά, την επιφάνεια κάθε φωτοκορυφής και το χρόνο συλλογής φάσματος, υπολογίστηκε ο ρυθμός καταμέτρησης φωτονίων I (counts /sec).
- Τοποθετήθηκαν σε άξονες τα σημεία ($x_i, \ln I_i$), όπου x το ύψος γρανίτη στο δοχείο. Σχεδιάστηκε κατάλληλη ευθεία προσαρμογής. Η κλίση της ευθείας ισούται με τον γραμμικό συντελεστή εξασθένησης γρανίτη για κάθε ενέργεια.

Οι Πίνακες 3.12-3.16 περιέχουν τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας για το δείγμα γρανίτη, και ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης για κάθε ενέργεια εκτιμάται ως η κλίση της ευθείας προσαρμογής στα Σχήματα 3.6-3.10. Ο Πίνακας 3.27 συγκεντρώνει τις αριθμητικές τιμές του συντελεστή μ για όλα τα υλικά που εξετάστηκαν.

3.6.5.2. Προσδιορισμός του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης τούβλου

Η διαδικασία που περιγράφηκε για το γρανίτη εφαρμόστηκε και σε δείγμα τούβλου, με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Βάρος δείγματος(*g*): 383.24
- Όγκος δοχείου(*cm*³): 282
- Πυκνότητα(*g/cm*³): 1.359

Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας για το τούβλο περιέχονται στους Πίνακες 3.17-3.21. Η τιμή του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης τούβλου για κάθε ενέργεια δίνεται από την κλίση της ευθείας προσαρμογής στα ακόλουθα σχήματα 3.11-3.15. Ο Πίνακας 3.27 συγκεντρώνει τις αριθμητικές τιμές του συντελεστή μ για όλα τα υλικά που εξετάστηκαν.

3.6.5.3. Προσδιορισμός του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης τσιμεντόλιθου

Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε και για τσιμεντόλιθο ως απορροφητή, με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Βάρος δείγματος(*g*): 289.1
- Όγκος δοχείου(*cm*³): 282
- Πυκνότητα(*g/cm*³): 1.025

Για τον τσιμεντόλιθο τα αποτελέσματα των αναλύσεων περιέχουν οι Πίνακες 3.22-3.26, και οι τιμές του μ κάθε ενέργειας εκτιμήθηκαν ως η κλίση των ευθειών στα Σχήματα 3.16-3.20. Ο Πίνακας 3.27 συγκεντρώνει τις αριθμητικές τιμές του συντελεστή μ για όλα τα υλικά που εξετάστηκαν.

3.6.5.4. Προσδιορισμός της σχέσης μ -E

Στα δεδομένα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία που περιγράφηκε για κάθε υλικό, προσαρμόστηκαν καμπύλες της μορφής:

$$\ln\mu = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(E) + \alpha_2 (\ln(E))^2 \quad (6)$$

όπου E η ενέργεια φωτονίων, μ ο γραμμικός συντελεστής εξασθένισης και α_0 , α_1 και α_2 , οι συντελεστές που προκύπτουν από την προσαρμογή. Οι συντελεστές των καμπυλών που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.28.

Οι καμπύλες αυτές παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.21-3.23, όπου συγκρίνονται με την καμπύλη μ -E του 4M HCl, το οποίο αποτελεί το υλικό αναφοράς της βαθμονόμησης του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Συγκρίνονται επίσης με καμπύλες μ -E παραπλήσιων κάθε φορά περιβαλλοντικών υλικών, οι οποίες έχουν προσδιοριστεί σε προηγούμενα πειράματα του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Πιο συγκεκριμένα, ο γρανίτης και το τούβλο συγκρίθηκαν με χόμα παραπλήσιας κάθε φορά πυκνότητας (ρ) και ο τσιμεντόλιθος με μαύρο τσιμέντο. Οι καμπύλες των υλικών χόμα και τσιμέντο προσδιορίστηκαν με βάση συναρτήσεις πολλαπλής συσχέτισης της μορφής $\mu=f(E,\rho)$ (Αναγνωστάκης 1998).

Από τη μελέτη των διαγραμμάτων αυτών προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Για την περιοχή ενεργειών κάτω των 200 keV, παρατηρείται ότι ο γρανίτης έχει συστηματικά υψηλότερη τιμή του μ από το υλικό χόμα παραπλήσιας πυκνότητας. Συγκρίνοντας τον γρανίτη με το διάλυμα 4M HCl, παρατηρείται ότι υπάρχει μεγάλη απόκλιση (έως ~ 82%) για το συντελεστή μ , ακόμα και για ενέργεια φωτονίων περί τα 200 keV. Μάλιστα φαίνεται ότι η διαφορά αυτή παραμένει μεγάλη ακόμα και για υψηλότερες ενέργειες. Επισημαίνεται ότι μεγάλη διαφορά μεταξύ του συντελεστή μ ενός υλικού από το συντελεστή μ για 4M HCl συνεπάγεται και μεγάλη τιμή του συντελεστή διόρθωσης λόγω αυταπορρόφησης. Η παρατήρηση αυτή δημιουργεί ενδιαφέρον για περαιτέρω μελέτη του φαινομένου αυταπορρόφησης από το γρανίτη, για περιοχή ενεργειών άνω των 200 keV. Όπως είναι γνωστό και από τη σχετική βιβλιογραφία, το άνω όριο εφαρμογής διορθώσεων αυταπορρόφησης συνήθως λαμβάνεται

στην περιοχή των 200keV, αλλά δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί με ακρίβεια και πρέπει να μελετάται εμπειρικά (Αναγνωστάκης 1998).

- Για το υλικό τούβλο παρατηρήθηκε ότι η καμπύλη $\mu=f(E)$ πρακτικά συμπίπτει με την αντίστοιχη καμπύλη για χόμα παραπλήσιας πυκνότητας. Επίσης, η καμπύλη του μ για το τούβλο συγκλίνει με την καμπύλη του 4M HCl, στην περιοχή κοντά στα 200 keV καλύτερα από ότι η αντίστοιχη καμπύλη του γρανίτη (διαφορά ~27%).
- Για το υλικό τσιμεντόλιθος παρατηρείται ότι υπάρχει πολύ καλή σύμπτωση του συντελεστή μ με αυτόν του υλικού 4M HCl για ενέργεια περί τα 200keV. Όσον αφορά στη σύγκριση των καμπυλών για τα υλικά τσιμέντο και τσιμεντόλιθος παρατηρούνται πολύ μεγάλες διαφορές σε ολόκληρη την ενεργειακή περιοχή έως 200keV.

Για να εξετάσουμε αν οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν για όλα τα υλικά από την καμπύλη του 4M HCl αντιστοιχούν σε σημαντικές διορθώσεις αυταπορρόφησης, οι συντελεστές εξασθένισης μ για ενέργεια φωτονίων ίση με 200 keV, όπως προέκυψαν από τις καμπύλες προσαρμογής, εισήχθησαν στον κώδικα selfabs. Έτσι, υπολογίσθηκαν οι αντίστοιχοι συντελεστές διόρθωσης αυταπορρόφησης για τα 200 keV για τα τρία υλικά που περιγράφηκαν. Ο Πίνακας 3.29 περιέχει τις τιμές του συντελεστή κάθε υλικού. Από τις τιμές αυτές συμπεραίνουμε ότι η διόρθωση είναι σημαντική για το γρανίτη ακόμα και σε αυτή την ενεργειακή περιοχή (~22%). Για το τούβλο η διόρθωση αυταπορρόφησης είναι μικρότερη (~8%), ενώ ο τσιμεντόλιθος παρουσιάζει την μικρότερη ανάγκη διόρθωσης στην περιοχή των 200 keV (~2%).

3.6.6. Μελέτη αυταπορρόφησης οικοδομικών υλικών για περιοχή ενεργειών >200 keV

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μελέτη του φαινομένου της αυταπορρόφησης περιορίζεται συνήθως στην περιοχή <200 keV, αν και το όριο αυτό δεν προσδιορίζεται με αυστηρά κριτήρια. Με βάση τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα πειράματα αυταπορρόφησης των οικοδομικών υλικών στην παρούσα ΔΕ, κρίθηκε απαραίτητη μία στοιχειώδης επέκταση της μελέτης για περιοχή ενεργειών άνω των 200 keV. Η μελέτη αυτή, η οποία είναι σημαντική ειδικά για υλικά μεγάλης

πυκνότητας, περιορίστηκε μόνο στο γρανίτη, ο οποίος παρουσίασε τις μεγαλύτερες αποκλίσεις στην περιοχή των 200 keV.

Η εφαρμογή της μεθόδου του ΕΠΤ-ΕΜΠ για τον προσδιορισμό του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης και υπολογισμό του συντελεστή διόρθωσης για αυτή την περιοχή ενεργειών γίνεται για πρώτη φορά στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ. Για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμο να γίνουν αρχικά δοκιμές σε ενέργειες >200 keV με υλικά γνωστού μ . Έτσι, πραγματοποιήθηκε δοκιμή σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην Παράγραφο 3.6.3, με απορροφητή νερό, για ενέργειες φωτονίων 295.22 keV και 351.99 keV, οι οποίες εκπέμπονται από διαθέσιμη σημειακή πηγή ^{226}Ra . Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν υπό τις ίδιες συνθήκες, για τα ίδια ύψη νερού και γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή με τα πειράματα σε ενέργεια 59.54 keV που περιγράφονται στην Παράγραφο 3.6.4.

Ο Πίνακας 3.30 περιέχει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του κώδικα SPUNAL για ενέργεια φωτονίων 295.22 keV. Ο Πίνακας 3.31 περιέχει τις τιμές των σημείων ($x_i, \ln I_i$) για την ίδια ενέργεια. Στα πειραματικά σημεία ($x_i, \ln I_i$) προσαρμόστηκε ευθεία αναδρομής με $R^2 = 0.9982$, η κλίση της οποίας εκτιμάται ως ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης για τη συγκεκριμένη ενέργεια, και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.24. Η απόκλιση της τιμής του μ που υπολογίστηκε, $\mu_{\text{πειρ.}} = 0.0124 \pm 0.0002 \text{ mm}^{-1}$ από τη θεωρητικά υπολογισμένη τιμή $\mu_{\text{θεωρ.}} = 0.01187 \text{ mm}^{-1}$ (Hubbel 1981) είναι ίση με 4.5%.

Για ενέργεια φωτονίων 351.99 keV, ο Πίνακας 3.32 περιέχει τα αποτελέσματα του SPUNAL, ενώ ο Πίνακας 3.33 τα σημεία ($x, \ln I$). Από τις τιμές ($x, \ln I$) σχεδιάστηκε ευθεία προσαρμογής με $R = 0.9990$, η κλίση της οποίας εκτιμάται ως ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης για τη συγκεκριμένη ενέργεια, και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.25. Η τιμή του μ που υπολογίστηκε, $\mu_{\text{πειρ.}} = 0.01075 \pm 0.0151 \text{ mm}^{-1}$ εμφανίζει μικρή απόκλιση από τη θεωρητικά υπολογισμένη τιμή $\mu_{\text{θεωρ.}} = 0.01122 \text{ mm}^{-1}$ (Hubbel, 1981), ίση με 4.2%.

Οι τιμές που προσδιορίστηκαν πειραματικά και για τις δύο ενέργειες εμφανίζουν μικρές αποκλίσεις από αυτές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία, αντίστοιχες με την απόκλιση που είχε παρατηρηθεί σε προηγούμενες μελέτες για την ενέργεια των 59.54 keV. Μπορεί επομένως να θεωρηθεί ότι η μεθοδολογία προσδιορισμού του μ

για τις ενέργειες αυτές είναι επαρκώς ακριβής. Έτσι, για όλες τις ενέργειες για τις οποίες υπολογίστηκε το μ του νερού (59.54 keV, 295.22 keV, 351.99 keV). Στο Σχήμα 3.26 σχεδιάστηκαν τα πειραματικά σημεία (E_i, μ_i) και συγκρίνονται με καμπύλη που προέκυψε από προσαρμογή σε θεωρητικές τιμές από τη βιβλιογραφία (Hubbel 1981).

Για περαιτέρω διερεύνηση της μεθοδολογίας προσδιορισμού του συντελεστή μ αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί πείραμα προσδιορισμού του συντελεστή μ και για KCl, ώστε να εξετασθεί και ένα υλικό μεγαλύτερης πυκνότητας από το νερό. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε υπό τις ίδιες συνθήκες με το νερό, για ύψη υλικού από 5 έως 40mm, με πηγή ^{226}Ra . Υπολογίστηκε ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης για ενέργειες: 186.25 keV, 295.22 keV και 351.99 keV. Τις τιμές από την ανάλυση του SPUNAL, περιέχουν οι Πίνακες 3.34-3.39. Από τις τιμές του μ που προέκυψαν για κάθε ενέργεια, τοποθετήθηκαν σε άξονες τα σημεία (E_i, μ_i) και σχεδιάστηκε η καμπύλη $\mu=f(E)$ (Σχήμα 3.27) από θεωρητικές τιμές (Καρφόπουλος χ.χ) που προκύπτουν από τη βιβλιογραφία (Hubbel 1981). Διαπιστώνεται ότι οι αποκλίσεις μεταξύ της πειραματικής και θεωρητικά υπολογισμένης τιμής κυμαίνονται από 1-4%, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.40.

Μετά την επιτυχή δοκιμή της μεθόδου για το νερό και το KCl, επαναλήφθηκε η διαδικασία για τον γρανίτη, ο οποίος στην αρχική δοκιμή παρουσίασε αποκλίσεις από το 4M HCl, στην περιοχή περί τα 200 keV. Χρησιμοποιήθηκε πηγή ^{226}Ra , και πραγματοποιήθηκε γ-φασματοσκοπική ανάλυση για τα ίδια ύψη γρανίτη με αυτά της δοκιμής για ενέργειες κάτω των 200 keV. Υπολογίστηκε ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ για γρανίτη και για ενέργειες 295.22 keV και 351.99 keV. Τα αποτελέσματα του κώδικα SPUNAL περιέχουν οι Πίνακες 3.41-3.44. Ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ εκτιμάται ως η κλίση των ευθειών προσαρμογής στα διαγράμματα ($x_i, \ln I_i$) (Σχήμα 3.28 και Σχήμα 3.29). Ο Πίνακας 3.45 περιέχει συγκεντρωτικά τις τιμές του μ για γρανίτη για τις ενέργειες αυτές. Στον ίδιο πίνακα περιέχονται και οι τιμές που προέκυψαν από τη σχέση προσαρμογής η οποία είχε υπολογιστεί στην ενεργειακή περιοχή < 200 keV, αν την προεκτείνουμε για τις ενέργειες αυτές. Έχοντας υπολογίσει το μ και για τις ενέργειες αυτές είναι δυνατόν να επεκταθεί η καμπύλη $\mu=f(E)$ και για ενέργειες άνω των 200 keV (Σχήμα 3.30).

Από τη μελέτη του σχήματος παρατηρείται ότι η απόκλιση του συντελεστή εξασθένισης μ του γρανίτη από την καμπύλη του 4M HCl παραμένει και για ενέργειες πολύ υψηλότερες, και φτάνει έως και 80%. Για τα φωτόνια των 295.22 keV και 351.99 keV που εξετάστηκαν, ο συντελεστής διόρθωσης αυταπορρόφησης προκύπτει από τον κώδικα selfabs ίσος με 0.818 και 0.813 αντίστοιχα.

Οι υπάρχουσες προσαρμογές για το χόμα παραπλήσιας πυκνότητας, προβλέπουν μείωση του φαινομένου αυταπορρόφησης αν επεκταθούν μετά τα 200 keV, αφού η καμπύλη του χόματος παρουσιάζει μικρές αποκλίσεις από αυτή του 4M HCl. Οι συντελεστές διόρθωσης για τα 295.22 keV και 351.99 keV προκύπτουν 0.928 και 0.943 αντίστοιχα. Προκύπτει επομένως ότι η τεχνική διόρθωσης που εφαρμόζεται προβλέπει υπολογίσιμες διορθώσεις μετά τα 200 keV και για υλικά όπως το χόμα, όταν η πυκνότητα είναι υψηλή. Επισημαίνεται ότι η επέκταση της καμπύλης του τούβλου έγινε καταχρηστικά για την περιοχή ενεργειών >200 keV, παρά το γεγονός ότι δεν έχουν προσδιοριστεί πειραματικά σημεία για τη συγκεκριμένη ενεργειακή περιοχή.

Προκύπτει επομένως το συμπέρασμα ότι, για υλικά μεγάλης πυκνότητας όπως ο γρανίτης, το φαινόμενο της αυταπορρόφησης πρέπει να εξετάζεται και σε ενέργειες υψηλότερες από τα 200 keV. Σημειώνεται ωστόσο ότι η σύντομη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της ΔΕ δεν μπορεί να θεωρηθεί εξαντλητική και το θέμα πρέπει να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής έρευνας. Για το λόγο αυτό, στις παραγράφους που ακολουθούν δεν εφαρμόστηκαν διορθώσεις στα αποτελέσματα αναλύσεων ενεργειών > 200 keV.

3.7. Αποτελέσματα αναλύσεων

Από την γ -φασματοσκοπική ανάλυση των οικοδομικών υλικών που αναφέρθηκαν και οι οποίες έγιναν με τον κώδικα SPUNAL, προσδιορίστηκαν οι τιμές της ειδικής ραδιενέργειας ($Bq \cdot kg^{-1}$) των φυσικών ραδιοϊσοτόπων για κάθε υλικό. Οι τιμές αυτές διορθώθηκαν με χρήση του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης, για όσα υλικά ήταν αναγκαία η διόρθωση και για τα οποία δεν γίνεται αυτοματοποιημένη διόρθωση από το πρόγραμμα SPUNAL. Με βάση τα τελικά αποτελέσματα ειδικής ραδιενέργειας, υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη ακτινοπροστασίας I και προέκυψαν τα σχετικά συμπεράσματα. Όλη η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται στη συνέχεια.

3.7.1. Υπολογισμός συντελεστή διόρθωσης αυταπορρόφησης και εκτίμηση της αβεβαιότητάς του

Όπως αναφέρθηκε ο γραμμικός συντελεστής εξασθένισης για τις ενέργειες: 46.52 keV, 63.29 keV, 185.72 keV και 186.25 keV υπολογίστηκε από τις καμπύλες $\mu=f(E)$ που παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 3.6.5.4. Στη συνέχεια γνωρίζοντας τον συντελεστή μ , υπολογίστηκε με χρήση του κώδικα selfabs, ο συντελεστής διόρθωσης αυταπορρόφησης για κάθε οικοδομικό υλικό για τις συγκεκριμένες ενέργειες φωτονίων, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην Παράγραφο 3.6.2.

Ο συντελεστής αυτός συνοδεύεται από μία αβεβαιότητα, η οποία προφανώς μεταφέρεται στο τελικό αποτέλεσμα προσδιορισμού της ειδικής ραδιενέργειας. Στην παρούσα ΔΕ επιχειρήθηκε η εκτίμηση αυτής της αβεβαιότητας, με βάση την καμπύλη προσαρμογής $\mu=f(E)$. Για το σκοπό αυτό υπολογίστηκε αρχικά η μέση τετραγωνική σχετική απόκλιση (RMS) της καμπύλης προσαρμογής από τα πειραματικά σημεία. Το σφάλμα του γραμμικού συντελεστή εξασθένισης σε επίπεδο 1σ θεωρήθηκε ίσο την τιμή του RMS. Χρησιμοποιώντας το τυπικό σφάλμα αυτό υπολογίστηκε η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του συντελεστή μ για κάθε ενέργεια που ενδιαφέρει (μ_{\max} και μ_{\min} αντίστοιχα), οι οποίες αντιστοιχούν σε επίπεδο σημαντικότητα σφάλματος ίσο με 3σ. Στη συνέχεια, οι τιμές μ_{\max} και μ_{\min} χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα στο πρόγραμμα selfabs, από όπου υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές του συντελεστή διόρθωσης αυταπορρόφησης (f). Τελικά, το τυπικό σφάλμα του συντελεστή διόρθωσης σ_f υπολογίστηκε από τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή του f από τον εξής τύπο (ISO/DTR 14253-2 1997):

$$\sigma_f = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2\sqrt{3}} \quad (7)$$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα selfabs, και από τον υπολογισμό του σφάλματος παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.46-3.49.

3.7.2. Αποτελέσματα γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης

Ο Πίνακας 3.50 περιέχει τα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης για τα οικοδομικά υλικά που αναφέρθηκαν. Επισημαίνεται ότι ο κώδικας SPUNAL για ορισμένα υλικά τα οποία έχουν ήδη μελετηθεί, εφαρμόζει αυτόματα διόρθωση αυταπορρόφησης για ενέργειες κάτω των 200 keV. Ωστόσο, στις αναλύσεις των

οικοδομικών υλικών που παρουσιάζονται στην παρούσα ΔΕ οι τιμές του συντελεστή δεν έχουν καταχωρηθεί στον κώδικα και επομένως δεν εφαρμόστηκε η αυτοματοποιημένη διόρθωση αυταπορρόφησης του προγράμματος. Στις αναλύσεις των ισοτόπων ^{210}Pb και ^{238}U , όπου είναι απαραίτητη η διόρθωση αυταπορρόφησης, αυτή έχει εφαρμοσθεί όπως εξηγήθηκε στην Παράγραφο 3.6.2. Ειδικότερα, για όλους τους γρανίτες, χρησιμοποιήθηκε καταχρηστικά η διόρθωση αυταπορρόφησης του γρανίτη IV, παρόλο που η πυκνότητα και η σύστασή τους δεν ήταν η ίδια.

Οι τιμές της ειδικής ραδιενέργειας του Πίνακα 3.50 συνοδεύονται για κάθε υλικό από τη συνολική αβεβαιότητα σε επίπεδο 1σ , η οποία υπολογίστηκε από τις εξής επιμέρους αβεβαιότητες:

- Σχετική αβεβαιότητα του προσδιορισμού της επιφάνειας φωτοκορυφής από τον κώδικα SPUNAL $\sigma(\text{SP})$. Λαμβάνεται κατευθείαν από την αναφορά του SPUNAL, αλλά πρέπει να τονιστεί ότι η ανωτέρω αβεβαιότητα δίνεται σε επίπεδο 1.65σ . Είναι έτσι απαραίτητη η αναγωγή της σε επίπεδο 1σ .
- Αβεβαιότητα της πηγής βαθμονόμησης σ_{standard} σε επίπεδο 1σ , η οποία λαμβάνεται ως εξής:

1.6% για ενέργεια φωτονίων $E > 279.2 \text{ keV}$

3.1% για ενέργεια φωτονίων $E < 279.2 \text{ keV}$

- Αβεβαιότητα προσαρμογής της καμπύλης βαθμονόμησης σ_{fit} , η οποία εξαρτάται από τον ανιχνευτή και λαμβάνεται ως εξής:

Ανιχνευτής HPGE

1.8% για ενέργεια φωτονίων $E > 279.2 \text{ keV}$

3.8% για ενέργεια φωτονίων $E < 279.2 \text{ keV}$

Ανιχνευτής LEGe

0.9% για ενέργεια φωτονίων $E > 279.2 \text{ keV}$

6.7% για ενέργεια φωτονίων $E < 279.2 \text{ keV}$

- Αβεβαιότητα του υπολογισμού του συντελεστή διόρθωσης αυταπορρόφησης σ_{ab} , όπου αυτή έχει πραγματοποιηθεί (για ενέργειες μικρότερες των 200 keV). Η διαδικασία υπολογισμού αυτής της αβεβαιότητας έχει ήδη περιγραφεί.

Η συνολική αβεβαιότητα (combined standard uncertainty) της ειδικής ραδιενέργειας κάθε ισοτόπου προκύπτει από τον ακόλουθο τύπο:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{sp}^2 + \sigma_{sr}^2 + \sigma_{fit}^2 + \sigma_{ab}^2} \quad (8)$$

Οι τιμές ειδικής ραδιενέργειας που μετρήθηκαν για τα διάφορα οικοδομικά υλικά συγκρίθηκαν με τιμές από την βιβλιογραφία. Όλα τα οικοδομικά υλικά που μελετήθηκαν βρίσκονται εντός του εύρους των τυπικών τιμών της βιβλιογραφίας, όπως αυτά αναφέρονται στους Πίνακες 3.1-3.6. Από τις τιμές αυτές διαπιστώνεται ότι στον τσιμεντόλιθο και το τούβλο υπάρχει ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ των ισοτόπων της σειράς του ^{238}U . Στον γρανίτη II παρατηρήθηκε ισορροπία μεταξύ του ^{210}Pb και του ^{238}U , ενώ υπάρχει έλλειμμα ^{226}Ra . Από τις τιμές ραδιενέργειας του γρανίτη III και του γρανίτη IV, παρατηρείται ελαφρά διαταραγμένη ισορροπία ^{226}Ra - ^{210}Pb και πλεόνασμα ^{238}U . Συνολικά για όλους τους γρανίτες παρατηρήθηκαν σχετικά χαμηλά επίπεδα ραδιενέργειας ^{226}Ra και των θυγατρικών του, καθώς και αρκετά υψηλές συγκεντρώσεις ^{40}K .

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε ο δείκτης ακτινοπροστασίας (I) για κάθε υλικό. Ο Πίνακας 3.51 περιέχει τις τιμές του I που προέκυψαν από εφαρμογή της σχέσης (1). Όπως έχει αναφερθεί στην Παράγραφο 3.3, η ΕΕΑΕ έχει ορίσει για την αποδέσμευση των οικοδομικών υλικών όριο δόσης ίσο με 0.3 mSv y^{-1} . Συγκρίνοντας τις τιμές του I με τα όρια αποδέσμευσης που περιέχει ο Πίνακας 3.7 για το όριο δόσης αυτό, διαπιστώνεται ότι, ως υλικά επιφανειακής χρήσης, όλα τα οικοδομικά υλικά που εξετάστηκαν μπορούν να αποδεσμευτούν ($I \leq 2$). Εξετάζοντας το όριο χρήσης που αντιστοιχεί σε υλικά που χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες υλικού ($I \leq 0.5$), διαπιστώνεται ότι οι γρανίτες, το τούβλο και ο τσιμεντόλιθος υπερβαίνουν το όριο αποδέσμευσης και επομένως πρέπει να μελετηθούν περαιτέρω. Επισημαίνεται ωστόσο ότι, το αποτέλεσμα αυτό προκύπτει εφαρμόζοντας το αυστηρότερο όριο δόσης που είναι τα 0.3 mSv y^{-1} . Σε περίπτωση που εφαρμοσθεί το όριο ($I \leq 1$) το

οποίο αντιστοιχεί σε ετήσιο όριο δόσης ίσο με 1 mSv y^{-1} , όλα τα υλικά μπορούν να αποδεσμευτούν, ακόμα και για χρήση σε μεγάλες ποσότητες.

Πίνακες Κεφαλαίου

Πίνακας 3.1: Μετρήσεις ειδικής ραδιενέργειας μαρμάρων

| Υλικό | Ειδική ραδιενέργεια (Bq kg ⁻¹) | | | | |
|---------------------------|--|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| | ²³⁸ U | ²²⁶ Ra | ²¹⁰ Pb | ²³² Th | ⁴⁰ K |
| Μαρμαρόσκονη ¹ | Δ/M | <1 | Δ/M | < 1 | < 25 |
| Μαρμαρόσκονη ² | Δ/M | 1.8 ±1 | Δ/M | 2.2 ±0.5 | < 20 |

1: Anagnostakis 2001, 2: Papaefthymiou 2007

Πίνακας 3.2: Μετρήσεις ειδικής ραδιενέργειας τσιμέντου

| Υλικό | Ειδική ραδιενέργεια (Bq kg ⁻¹) | | | | |
|----------------------------------|--|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| | ²³⁸ U | ²²⁶ Ra | ²¹⁰ Pb | ²³² Th | ⁴⁰ K |
| Λευκό τσιμέντο ¹ | Δ/M | 14-26 | Δ/M | 7-13 | 5-67 |
| Μαύρο τσιμέντο ¹ | < 173 | 29-147 | < 183 | 13-30 | 172-331 |
| Τσιμέντο Ι ³ | 22 ±7 | 20 ±5 | Δ/M | 13 ±3 | 310 ±60 |
| Τσιμέντο ΙΙ ³ | 104 ±38 | 92 ±33 | Δ/M | 31 ±10 | 247 ±68 |
| Ποζολανικό Τσιμέντο ² | Δ/M | 28 ±9 | Δ/M | 16 ±3 | 32 ±18 |

1: Anagnostakis 2001, 2: Papaefthymiou 2007, 3: Stoulos 2003

Πίνακας 3.3: Μετρήσεις ειδικής ραδιενέργειας άμμου

| Υλικό | Ειδική ραδιενέργεια (Bq kg ⁻¹) | | | | |
|-----------------------------|--|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| | ²³⁸ U | ²²⁶ Ra | ²¹⁰ Pb | ²³² Th | ⁴⁰ K |
| Άμμος θαλάσσης ¹ | Δ/M | 7-13 | Δ/M | 8-16 | 145-302 |
| Άμμος ¹ | Δ/A | 1-5 | Δ/M | < 3 | 1-37 |
| Άμμος ³ | 17 ±7 | 18 ±7 | Δ/M | 17 ±10 | 367 ±204 |
| Άμμος ² | Δ/M | 12 ±3 | Δ/M | 2.6 ±3.6 | Δ/A |

1: Anagnostakis 2001, 2: Papaefthymiou 2007, 3: Stoulos 2003

Πίνακας 3.4: Μετρήσεις ειδικής ραδιενέργειας τούβλου

| Υλικό | Ειδική ραδιενέργεια τούβλου (Bq kg ⁻¹) | | | | |
|-------------------------|--|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| | ²³⁸ U | ²²⁶ Ra | ²¹⁰ Pb | ²³² Th | ⁴⁰ K |
| Τούβλο1 | Δ/Μ | 25-48 | Δ/Μ | 27-56 | 476-895 |
| Κεραμικό τούβλο2 | 39 ±16 | 35 ±11 | Δ/Μ | 45 ±15 | 710 ±165 |

1: Anagnostakis 2001, 2: Stoulos 2003

Πίνακας 3.5: Τοπικές τιμές ειδικής ραδιενέργειας γρανιτών

| Είδος γρανίτη | Ειδικής ραδιενέργειας (Bq kg ⁻¹) | | | |
|-------------------------------|--|-------------------|-------------------|-----------------|
| | ²³⁸ U | ²²⁶ Ra | ²³² Th | ⁴⁰ K |
| Μέση τιμή 16 γρανιτών1 | 35 | 35 | 30 | 400 |
| Γρανίτης2 | Δ/Μ | 1-588 | 1-906 | 50-1606 |
| Πλακίδια Γρανίτη3 | 79 ±68 | 67 ±98 | 95 ±98 | 1200 ±650 |

1: Koroneos 2006, 2: Tzortzis 2003, 3: Stoulos 2003

Πίνακας 3.6: Τυπικές και μέγιστες τιμές ειδικής ραδιενέργειας σε οικοδομικά υλικά και βιομηχανικά παραπροϊόντα που χρησιμοποιούνται στην Ε.Ε (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 1999)

| Υλικό | Τυπική ειδική ραδιενέργεια (Bq kg ⁻¹) | | | Μέγιστη ειδική ραδιενέργεια (Bq kg ⁻¹) | | |
|---------------------------------|---|-------------------|-----------------|--|-------------------|-----------------|
| | ²²⁶ Ra | ²³² Th | ⁴⁰ K | ²²⁶ Ra | ²³² Th | ⁴⁰ K |
| Οικοδομικά υλικά | | | | | | |
| Τσιμέντο | 40 | 30 | 400 | 240 | 190 | 1600 |
| Κεραμικό τούβλο | 50 | 50 | 670 | 200 | 200 | 2000 |
| Οικοδομική πέτρα | 60 | 60 | 640 | 500 | 310 | 4000 |
| Γύψος | 10 | 80 | 80 | 70 | 100 | 200 |
| Βιομηχανικά παραπροϊόντα | | | | | | |
| Φωσφογύψος | 390 | 20 | 60 | 1100 | 160 | 300 |
| Ιπτάμενη τέφρα | 180 | 100 | 650 | 1100 | 300 | 1500 |

Πίνακας 3.7: Συντελεστής I ανάλογα με το κριτήριο δόσης

| Κριτήριο δόσης | 0.3mSv y ⁻¹ | 1 mSv y ⁻¹ |
|---|------------------------|-----------------------|
| Υλικά χρησιμοποιούμενα σε μεγάλες ποσότητες (π.χ. τσιμέντο) | $I \leq 0.5$ | $I \leq 1$ |
| Υλικά χρησιμοποιούμενα σε περιορισμένη ποσότητα ή επιφανειακή μορφή (π.χ. πλακάκια) | $I \leq 2$ | $I \leq 6$ |

Πίνακας 3.8: Χαρακτηριστικά δειγμάτων οικοδομικών υλικών τα οποία αναλύθηκαν με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας

| Υλικό | Δείγμα | Γεωμετρία | Βάρος(g) | Ημερομηνία Στεγάνωσης |
|----------------------|--------|-----------|----------|-----------------------|
| Μάρμαρο I | YM015 | 2 | 564.0 | 16-12-08 |
| Γρανίτης II | YGR007 | 2 | 498.7 | 13-01-09 |
| Γρανίτης III | YGR008 | 2 | 518.8 | 13-01-09 |
| Γρανίτης IV | YGR009 | 2 | 580.1 | 13-01-09 |
| Χαλίκι | YH006 | 2 | 517.4 | 02-12-08 |
| Τούβλο | YT014 | 2 | 383.5 | 16-12-08 |
| Τσιμεντόλιθος | YMS005 | 2 | 289.1 | 13-01-09 |

Πίνακας 3.9: γ-Φάσματα SPUNAL οικοδομικών υλικών

| Δείγμα | Φάσμα | Χρόνος συλλογής φάσματος (s) | Θέση Φάσματος | Ανιχνευτής |
|---------------|---------|------------------------------|---------------|------------|
| YGR007 | YGR007A | 500000 | 11/2.225 | 3 |
| YGR008 | YGR008A | 500000 | 11/2.227 | 3 |
| YGR009 | YGR009A | 500000 | 11/2.217 | 3 |
| YH006 | YH006A | 335315 | 11/2.216 | 2 |
| YM015 | YM015A | 177482 | 11/2.211 | 2 |
| YT014 | YT014A | 500000 | 11/2.228 | 3 |
| YMS005 | YMS005A | 167728 | 11/2.243 | 3 |

**Πίνακας 3.10: Αποτελέσματα κώδικα SPUNAL από το πείραμα
αυταπορρόφησης νερού για ενέργεια 59.54 keV**

| Ύψος νερού (mm) | Επιφάνεια φωτοκορυφής | Σφάλμα(%) | Χρόνος(s) | Φάσμα |
|----------------------------|----------------------------------|------------------|------------------|--------------|
| 5 | 55125 | 0.48 | 119.17 | WAM05D |
| 10 | 52717 | 0.48 | 125.35 | WAM10D |
| 15 | 54076 | 0.49 | 141.94 | WAM15D |
| 20 | 54369 | 0.49 | 156.34 | WAM20D |
| 25 | 61311 | 0.46 | 195.73 | WAM25D |
| 30 | 55991 | 0.49 | 195.64 | WAM30D |
| 35 | 55794 | 0.49 | 215.13 | WAM35D |
| 40 | 54758 | 0.49 | 235.98 | WAM40D |

**Πίνακας 3.11: Αποτελέσματα διαδικασίας υπολογισμού του μ νερού για ενέργεια
59.54 keV**

| Ύψος νερού (mm) | I : Ρυθμός φωτονίων (counts/s) | ln (I) |
|----------------------------|---|---------------|
| 5 | 462.57 | 6.137 |
| 10 | 420.56 | 6.042 |
| 15 | 380.98 | 5.943 |
| 20 | 347.76 | 5.852 |
| 25 | 313.24 | 5.747 |
| 30 | 286.19 | 5.657 |
| 35 | 259.35 | 5.558 |
| 40 | 232.05 | 5.447 |

**Πίνακας 3.12: Πειραματικά δεδομένα προσδιορισμού μ γρανίτη για ενέργεια
59.54 keV**

| Ύψος(mm) | Επιφάνεια | Σφάλμα(%) | Χρόνος(sec) | Φάσμα |
|-----------------|------------------|------------------|--------------------|--------------|
| 5 | 92793 | 1.3 | 255 | YGR9AM05A |
| 10 | 45448 | 1.2 | 181 | YGR9AM10A |
| 15 | 44902 | 1.3 | 250 | YGR9AM15A |
| 20 | 14958 | 2.4 | 131 | YGR9AM20A |

**Πίνακας 3.13: Πειραματικά δεδομένα προσδιορισμού μ γρανίτη για ενέργεια
45.36 keV**

| Ύψος(mm) | Επιφάνεια | Σφάλμα(%) | Χρόνος(sec) | Φάσμα |
|-----------------|------------------|------------------|--------------------|--------------|
| 5 | 21481 | 2.7 | 3288 | YGR9EU05A |
| 10 | 14132 | 3.9 | 3948 | YGR9EU10A |
| 15 | 21572 | 3.8 | 10800 | YGR9EU15A |
| 20 | 12948 | 6.2 | 13557 | YGR9EU20A |

**Πίνακας 3.14: Πειραματικά δεδομένα προσδιορισμού μ γρανίτη για ενέργεια
46.63 keV**

| Ύψος(mm) | Επιφάνεια | Σφάλμα(%) | Χρόνος(sec) | Φάσμα |
|-----------------|------------------|------------------|--------------------|--------------|
| 5 | 5580 | 4.4 | 3288 | YGR9EU05A |
| 10 | 3832 | 5.9 | 3948 | YGR9EU10A |
| 15 | 5945 | 4.9 | 10800 | YGR9EU15A |
| 20 | 3840 | 7.5 | 13557 | YGR9EU20A |

Πίνακας 3.15: Πειραματικά δεδομένα προσδιορισμού μ γρανίτη ενέργειας 121.78

keV

| Ύψος(mm) | Επιφάνεια | Σφάλμα(%) | Χρόνος(sec) | Φάσμα |
|-----------------|------------------|------------------|--------------------|--------------|
| 5 | 74902 | 1.1 | 3288 | YGR9EU05A |
| 10 | 75728 | 0.9 | 3948 | YGR9EU10A |
| 15 | 181110 | 0.8 | 10800 | YGR9EU15A |
| 20 | 182416 | 0.7 | 13557 | YGR9EU20A |

Πίνακας 3.16: Πειραματικά δεδομένα προσδιορισμού μ γρανίτη για ενέργεια

186.25 keV

| Ύψος(mm) | Επιφάνεια | Σφάλμα(%) | Χρόνος(sec) | Φάσμα |
|-----------------|------------------|------------------|--------------------|--------------|
| 5 | 19212 | 4.7 | 3860 | YGR9RA05A |
| 10 | 39763 | 3.4 | 8970 | YGR9RA10A |
| 15 | 41931 | 3.5 | 10800 | YGR9RA15A |
| 20 | 18936 | 5.5 | 5767 | YGR9RA20A |

Πίνακας 3.17: Πειραματικά δεδομένα προσδιορισμού μ τούβλου για ενέργεια

59.54 keV

| Ύψος(mm) | Επιφάνεια | Σφάλμα(%) | Χρόνος(sec) | Φάσμα |
|-----------------|------------------|------------------|--------------------|--------------|
| 5 | 49889 | 1.1 | 116 | YT14AM05A |
| 10 | 46690 | 1.2 | 136 | YT14AM10A |
| 15 | 83893 | 0.9 | 308 | YT14AM15A |
| 20 | 46888 | 1.3 | 217 | YT14AM20A |

**Πίνακας 3.18: Πειραματικά δεδομένα προσδιορισμού μ τούβλου για ενέργεια
45.36 keV**

| Ύψος(mm) | Επιφάνεια | Σφάλμα(%) | Χρόνος(sec) | Φάσμα |
|----------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| 5 | 25882 | 2.4 | 3045 | YT14EU05A |
| 10 | 22437 | 4.8 | 3600 | YT14EU10A |
| 15 | 9767 | 4.7 | 2413 | YT14EU15A |
| 20 | 16145 | 3.8 | 5400 | YT14EU20A |

**Πίνακας 3.19 Πειραματικά δεδομένα προσδιορισμού μ τούβλου για ενέργεια
46.63 keV**

| Ύψος(mm) | Επιφάνεια | Σφάλμα(%) | Χρόνος(sec) | Φάσμα |
|----------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| 5 | 6774 | 3.4 | 3045 | YT14EU05A |
| 10 | 5834 | 5.7 | 3600 | YT14EU10A |
| 15 | 2525 | 6.3 | 2413 | YT14EU15A |
| 20 | 4342 | 5.9 | 5400 | YT14EU20A |

**Πίνακας 3.20: Πειραματικά δεδομένα προσδιορισμού μ τούβλου για ενέργεια
121.78 keV**

| Ύψος(mm) | Επιφάνεια | Σφάλμα(%) | Χρόνος(sec) | Φάσμα |
|----------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| 5 | 75137 | 1.0 | 3045 | YT14EU05A |
| 10 | 79685 | 1.1 | 3600 | YT14EU10A |
| 15 | 47378 | 1.4 | 2413 | YT14EU15A |
| 20 | 96251 | 1.0 | 5400 | YT14EU20A |

Πίνακας 3.21: Πειραματικά δεδομένα προσδιορισμού μ τούβλου για ενέργεια 186.25 keV

| Ύψος(mm) | Επιφάνεια | Σφάλμα(%) | Χρόνος(sec) | Φάσμα |
|----------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| 5 | 26699 | 3.9 | 5016 | YT14RA05A |
| 10 | 25845 | 4.2 | 5400 | YT14RA10A |
| 15 | 23694 | 4.4 | 5400 | YT14RA15A |
| 20 | 22017 | 4.7 | 5400 | YT14RA20A |

Πίνακας 3.22: Πειραματικά δεδομένα προσδιορισμού μ τσιμεντόλιθου για ενέργεια 59.54 keV

| Ύψος(mm) | Επιφάνεια | Σφάλμα(%) | Χρόνος(sec) | Φάσμα |
|----------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| 5 | 51722 | 1.0 | 114 | YMS5AM05A |
| 10 | 49613 | 1.1 | 129 | YMS5AM10A |
| 15 | 47528 | 1.7 | 146 | YMS5AM15A |
| 20 | 68324 | 1.9 | 245 | YMS5AM20A |

Πίνακας 3.23: Πειραματικά δεδομένα προσδιορισμού μ τσιμεντόλιθου για ενέργεια 45.36 keV

| Ύψος(mm) | Επιφάνεια | Σφάλμα(%) | Χρόνος(sec) | Φάσμα |
|----------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| 5 | 51074 | 3.0 | 5400 | YMS5EU05A |
| 10 | 38994 | 2.0 | 5400 | YMS5EU10A |
| 15 | 21140 | 3.3 | 3767 | YMS5EU15A |
| 20 | 18649 | 3.2 | 4144 | YMS5EU20A |

Πίνακας 3.24: Πειραματικά δεδομένα προσδιορισμού μ τσιμεντόλιθου για ενέργεια 46.63 keV

| Ύψος(mm) | Επιφάνεια | Σφάλμα(%) | Χρόνος(sec) | Φάσμα |
|----------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| 5 | 13042 | 4.0 | 5400 | YMS5EU05A |
| 10 | 10089 | 2.9 | 5400 | YMS5EU10A |
| 15 | 5674 | 3.9 | 3767 | YMS5EU15A |
| 20 | 4971 | 5.3 | 4144 | YMS5EU20A |

Πίνακας 3.25: Πειραματικά δεδομένα προσδιορισμού μ τσιμεντόλιθου για ενέργεια 121.78 keV

| Ύψος(mm) | Επιφάνεια | Σφάλμα(%) | Χρόνος(sec) | Φάσμα |
|----------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| 5 | 134010 | 9.6 | 5400 | YMS5EU05A |
| 10 | 124323 | 0.8 | 5400 | YMS5EU10A |
| 15 | 77343 | 0.9 | 3767 | YMS5EU15A |
| 20 | 78647 | 0.9 | 4144 | YMS5EU20A |

Πίνακας 3.26: Πειραματικά δεδομένα προσδιορισμού μ τσιμεντόλιθου για ενέργεια 186.25 keV

| Ύψος(mm) | Επιφάνεια | Σφάλμα(%) | Χρόνος(sec) | Φάσμα |
|----------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| 5 | 21573 | 4.3 | 4011 | YMS5RA05A |
| 10 | 18478 | 4.8 | 3701 | YMS5RA10A |
| 15 | 25293 | 4.1 | 5400 | YMS5RA15A |
| 20 | 24193 | 4.4 | 5655 | YMS5RA20A |

Πίνακας 3.27: Γραμμικός συντελεστής εξασθένισης μ συναρτήσει της ενέργειας φωτονίων για τα τρία οικοδομικά υλικά

| Ενέργεια φωτονίων (keV) | Γρανίτης | Τούβλο | Τσιμεντόλιθος |
|----------------------------|---------------------------|---------------|---------------|
| | μ (mm ⁻¹) | | |
| 59.54 | 0.0762±0.0034 | 0.0459±0.0002 | 0.0325±0.0004 |
| 45.36 | 0.1270±0.0050 | 0.0713±0.0035 | 0.0496±0.0016 |
| 46.63 | 0.1188±0.0036 | 0.0698±0.0045 | 0.0463±0.0012 |
| 121.78 | 0.0343±0.0023 | 0.0219±0.0006 | 0.0184±0.0011 |
| 186.25 | 0.0276±0.0017 | 0.0177±0.0010 | 0.0150±0.0007 |

Πίνακας 3.28: Συντελεστές καμπυλών προσαρμογής E (keV) – μ (mm⁻¹)

| Υλικό | α_0 | α_1 | α_2 |
|---------------|------------|------------|------------|
| Γρανίτης | 14.19098 | -6.59715 | 0.61155 |
| Τούβλο | 11.68850 | -5.77279 | 0.52917 |
| Τσιμεντόλιθος | 8.89408 | -4.80831 | 0.44112 |

Πίνακας 3.29: Συντελεστές διόρθωσης αυταπορρόφησης για τα 200 keV

| Υλικό | Συντελεστής εξασθένισης μ (mm ⁻¹) | Συντελεστής διόρθωσης αυταπορρόφησης 200 keV |
|---------------|--|--|
| Γρανίτης | 0.027453 | 0.77815 |
| Τούβλο | 0.017551 | 0.92942 |
| Τσιμεντόλιθος | 0.015015 | 0.97670 |

**Πίνακας 3.30: Αποτελέσματα κώδικα SPUNAL από το πείραμα
αυταπορρόφησης νερού για ενέργεια 295.22 keV**

| Ύψος νερού (mm) | Επιφάνεια | Σφάλμα Επιφάνειας(%) | Χρόνος συλλογής (s) | Φάσμα | Θέση φάσματος |
|--------------------------------|------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------|--------------------------|
| 5 | 12832 | 1.7 | 866 | WRA05A | 111/2.230 |
| 10 | 12958 | 1.8 | 920 | WRA10A | 111/2.231 |
| 15 | 24833 | 1.3 | 1893 | WRA15A | 111/2.232 |
| 20 | 19004 | 1.5 | 1518 | WRA20A | 111/2.233 |
| 25 | 15895 | 1.6 | 1358 | WRA25A | 111/2.234 |
| 30 | 24578 | 1.3 | 2236 | WRA30A | 111/2.235 |
| 35 | 13978 | 1.8 | 1366 | WRA35A | 111/2.236 |
| 40 | 14372 | 1.8 | 1491 | WRA40A | 111/2.238 |

**Πίνακας 3.31: Αποτελέσματα διαδικασίας υπολογισμού του μ νερού για ενέργεια
295.22 keV**

| Ύψος νερού (mm) | I : Ρυθμός φωτονίων (counts/s) | ln (I) |
|----------------------------|---|---------------|
| 5 | 14.82 | 2.696 |
| 10 | 14.09 | 2.645 |
| 15 | 13.12 | 2.574 |
| 20 | 12.52 | 2.527 |
| 25 | 11.71 | 2.460 |
| 30 | 10.99 | 2.397 |
| 35 | 10.23 | 2.326 |
| 40 | 9.64 | 2.266 |

**Πίνακας 3.32: Αποτελέσματα κώδικα SPUNAL από το πείραμα
αυταπορρόφησης νερού για ενέργεια 351.99 keV**

| Ύψος νερού (mm) | Επιφάνεια | Σφάλμα Επιφάνειας(%) | Χρόνος συλλογής (s) | Φάσμα | Θέση φάσματος |
|--------------------------------|------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------|--------------------------|
| 5 | 19058 | 1.4 | 865 | WRA05A | 111/2.230 |
| 10 | 19337 | 1.3 | 920 | WRA10A | 111/2.231 |
| 15 | 37666 | 1.0 | 1893 | WRA15A | 111/2.232 |
| 20 | 28781 | 1.1 | 1518 | WRA20A | 111/2.233 |
| 25 | 24331 | 1.2 | 1358 | WRA25A | 111/2.234 |
| 30 | 37636 | 1.0 | 2236 | WRA30A | 111/2.235 |
| 35 | 21872 | 1.3 | 1366 | WRA35A | 111/2.236 |
| 40 | 22644 | 1.3 | 1491 | WRA40A | 111/2.238 |

**Πίνακας 3.33: Αποτελέσματα διαδικασίας υπολογισμού του μ νερού για ενέργεια
351.99 keV**

| Ύψος νερού (mm) | I : Ρυθμός φωτονίων (counts/s) | ln (I) |
|----------------------------|---|---------------|
| 5 | 22.01 | 3.091 |
| 10 | 21.02 | 3.045 |
| 15 | 19.90 | 2.991 |
| 20 | 18.96 | 2.942 |
| 25 | 17.92 | 2.886 |
| 30 | 16.83 | 2.823 |
| 35 | 16.01 | 2.773 |
| 40 | 15.19 | 2.720 |

**Πίνακας 3.34: Αποτελέσματα κώδικα SPUNAL από το πείραμα
αυταπορρόφησης KCl για ενέργεια 186.25 keV**

| Ύψος νερού (mm) | Επιφάνεια | Σφάλμα Επιφάνειας(%) | Χρόνος συλλογής (s) | Φάσμα |
|-----------------------|-----------|-------------------------|---------------------------|----------|
| 5 | 4464 | 5.4 | 872 | KCLRA05A |
| 10 | 8139 | 3.9 | 1628 | KCLRA10A |
| 15 | 5501 | 5.0 | 1247 | KCLRA15A |
| 20 | 4725 | 5.4 | 1102 | KCLRA20A |
| 25 | 6312 | 4.9 | 1647 | KCLRA25A |
| 30 | 6383 | 4.9 | 1774 | KCLRA30A |
| 35 | 6153 | 5.2 | 1821 | KCLRA35A |
| 40 | 4693 | 6.0 | 1484 | KCLRA40A |

**Πίνακας 3.35: Αποτελέσματα διαδικασίας υπολογισμού του μ KCl για ενέργεια
186.25 keV**

| Ύψος νερού (mm) | I : Ρυθμός φωτονίων (counts/s) | ln (I) |
|--------------------|-----------------------------------|--------|
| 5 | 5.12 | 1.633 |
| 10 | 5.00 | 1.609 |
| 15 | 4.41 | 1.484 |
| 20 | 4.29 | 1.456 |
| 25 | 3.83 | 1.344 |
| 30 | 3.60 | 1.280 |
| 35 | 3.38 | 1.218 |
| 40 | 3.16 | 1.151 |

**Πίνακας 3.36: Αποτελέσματα κώδικα SPUNAL από το πείραμα
αυταπορρόφησης KCl για ενέργεια 295.22 keV**

| Ύψος νερού (mm) | Επιφάνεια | Σφάλμα Επιφάνειας(%) | Χρόνος συλλογής (s) | Φάσμα |
|-----------------------|-----------|-------------------------|---------------------------|----------|
| 5 | 12813 | 1.7 | 872 | KCLRA05A |
| 10 | 22365 | 1.3 | 1628 | KCLRA10A |
| 15 | 16195 | 1.6 | 1247 | KCLRA15A |
| 20 | 13392 | 1.8 | 1102 | KCLRA20A |
| 25 | 19290 | 1.5 | 1647 | KCLRA25A |
| 30 | 18655 | 1.5 | 1774 | KCLRA30A |
| 35 | 18607 | 1.5 | 1821 | KCLRA35A |
| 40 | 14125 | 1.8 | 1484 | KCLRA40A |

Πίνακας 3.37: Αποτελέσματα διαδικασίας υπολογισμού του μ KCl για ενέργεια 295.22 keV

| Ύψος νερού (mm) | I : Ρυθμός φωτονίων (counts/s) | ln (I) |
|--------------------------------|---|---------------|
| 5 | 14.70 | 2.687 |
| 10 | 13.74 | 2.620 |
| 15 | 12.99 | 2.564 |
| 20 | 12.15 | 2.498 |
| 25 | 11.71 | 2.461 |
| 30 | 10.52 | 2.353 |
| 35 | 10.22 | 2.324 |
| 40 | 9.52 | 2.253 |

**Πίνακας 3.38: Αποτελέσματα κώδικα SPUNAL από το πείραμα
αυταπορρόφησης KCl για ενέργεια 351.99 keV**

| Ύψος νερού (mm) | Επιφάνεια | Σφάλμα Επιφάνειας(%) | Χρόνος συλλογής (s) | Φάσμα |
|-----------------------|-----------|-------------------------|---------------------------|----------|
| 5 | 19235 | 1.3 | 872 | KCLRA05A |
| 10 | 33854 | 1.0 | 1628 | KCLRA10A |
| 15 | 24742 | 1.2 | 1247 | KCLRA15A |
| 20 | 20423 | 1.3 | 1102 | KCLRA20A |
| 25 | 29310 | 1.1 | 1647 | KCLRA25A |
| 30 | 29058 | 1.1 | 1774 | KCLRA30A |
| 35 | 28460 | 1.1 | 1821 | KCLRA35A |
| 40 | 21683 | 1.3 | 1484 | KCLRA40A |

Πίνακας 3.39: Αποτελέσματα διαδικασίας υπολογισμού του μ KCl για ενέργεια 351.99 keV

| Ύψος νερού (mm) | I : Ρυθμός φωτονίων (counts/s) | ln (I) |
|------------------------|---------------------------------------|---------------|
| 5 | 22.06 | 3.094 |
| 10 | 20.80 | 3.035 |
| 15 | 19.84 | 2.988 |
| 20 | 18.53 | 2.920 |
| 25 | 17.80 | 2.879 |
| 30 | 16.38 | 2.796 |
| 35 | 15.63 | 2.749 |
| 40 | 14.61 | 2.682 |

Πίνακας 3.40: Γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ KCl

| Ενέργεια (keV) | Γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ (mm^{-1}) | |
|-----------------------|---|-------------------------------|
| | Πειραματική τιμή | Προσαρμογή >200 keV |
| 186.25 | 0.0144 | 0.0142 |
| 295.22 | 0.0124 | 0.0120 |
| 351.99 | 0.0117 | 0.0113 |

**Πίνακας 3.41: Αποτελέσματα κώδικα SPUNAL από το πείραμα
αυταπορρόφησης γρανίτη για ενέργεια 295.22 keV**

| Ύψος νερού | Επιφάνεια | Σφάλμα Επιφάνειας(%) | Χρόνος συλλογής (s) | Φάσμα |
|---------------|-----------|-------------------------|---------------------------|-----------|
| 5 | 22359 | 1.3 | 1598 | YGR9RA05A |
| 10 | 13783 | 1.7 | 1111 | YGR9RA10A |
| 15 | 19135 | 1.5 | 1699 | YGR9RA15A |
| 20 | 20851 | 1.5 | 2095 | YGR9RA20A |

**Πίνακας 3.42: Αποτελέσματα διαδικασίας υπολογισμού του μ γρανίτη για
ενέργεια 295.22 keV**

| Ύψος νερού (mm) | I : Ρυθμός φωτονίων (counts/s) | ln (I) |
|--------------------|-----------------------------------|--------|
| 5 | 13.99 | 2.638 |
| 10 | 12.41 | 2.518 |
| 15 | 11.26 | 2.421 |
| 20 | 9.95 | 2.298 |

**Πίνακας 3.43: Αποτελέσματα κώδικα SPUNAL από το πείραμα
αυταπορρόφησης γρανίτη για ενέργεια 351.99 keV**

| Ύψος νερού (mm) | Επιφάνεια | Σφάλμα Επιφάνειας(%) | Χρόνος συλλογής (s) | Φάσμα |
|-----------------------|-----------|-------------------------|---------------------------|-----------|
| 5 | 34290 | 1598 | 1598 | YGR9RA05A |
| 10 | 21195 | 1111 | 1111 | YGR9RA10A |
| 15 | 29323 | 1699 | 1699 | YGR9RA15A |
| 20 | 32269 | 2095 | 2095 | YGR9RA20A |

**Πίνακας 3.44: Αποτελέσματα διαδικασίας υπολογισμού του μ γρανίτη για
ενέργεια 351.99 keV**

| Ύψος νερού (mm) | I : Ρυθμός φωτονίων (counts/s) | ln (I) |
|-----------------------|--------------------------------------|--------|
| 5 | 21.46 | 3.066 |
| 10 | 19.08 | 2.949 |
| 15 | 17.26 | 2.848 |
| 20 | 15.40 | 2.735 |

Πίνακας 3.45: Γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ γρανίτη για ενέργειες >200 keV

| Ενέργεια (keV) | Γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ (mm^{-1}) | |
|-------------------|--|-----------------------|
| | Πειραματική τιμή | Προσαρμογή <200 keV |
| 295.22 | 0.0224 | 0.0288 |
| 351.99 | 0.0219 | 0.0313 |

Πίνακας 3.46: Αποτελέσματα κώδικα selfabs για συντελεστή αναγωγής της απόδοσης, για υλικό γρανίτη

| E (keV) | μ (mm^{-1}) | μ_{max} | μ_{min} | f | f_{max} | f_{min} |
|------------|----------------------------|--------------------|--------------------|--------|------------------|------------------|
| 46.52 | 0.1954 | 0.1250 | 0.1141 | 0.4170 | 0.4322 | 0.4030 |
| 63.29 | 0.0706 | 0.0738 | 0.0673 | 0.5372 | 0.5550 | 0.5203 |
| 185.7 | 0.0278 | 0.0291 | 0.0265 | 0.7790 | 0.7958 | 0.7628 |
| 186.2 | 0.0278 | 0.0290 | 0.0265 | 0.7790 | 0.7958 | 0.7628 |

Πίνακας 3.47: Αποτελέσματα κώδικα selfabs για συντελεστή αναγωγής της απόδοσης, για υλικό τούβλο

| E (keV) | μ (mm^{-1}) | μ_{max} | μ_{min} | f | f_{max} | f_{min} |
|------------|----------------------------|--------------------|--------------------|--------|------------------|------------------|
| 46.52 | 0.0688 | 0.0721 | 0.0656 | 0.6277 | 0.6488 | 0.6077 |
| 63.29 | 0.0428 | 0.0448 | 0.0408 | 0.7435 | 0.7645 | 0.7236 |
| 185.7 | 0.0178 | 0.0187 | 0.0160 | 0.9309 | 0.9460 | 0.9162 |
| 186.2 | 0.0178 | 0.0186 | 0.0160 | 0.9308 | 0.9460 | 0.9161 |

Πίνακας 3.48: Αποτελέσματα κώδικα selfabs για συντελεστή αναγωγής της απόδοσης, για υλικό τσιμεντόλιθος

| E (keV) | $\mu(\text{mm}^{-1})$ | μ_{max} | μ_{min} | f | f_{max} | f_{min} |
|--------------------------|---|--------------------------------------|--------------------------------------|----------|------------------------------------|------------------------------------|
| 46.52 | 0.0466 | 0.0510 | 0.0423 | 0.8108 | 0.7672 | 0.8594 |
| 63.29 | 0.0314 | 0.0343 | 0.0285 | 0.8792 | 0.8401 | 0.9218 |
| 185.7 | 0.0152 | 0.0166 | 0.0138 | 0.9796 | 0.9528 | 1.0078 |
| 186.2 | 0.0152 | 0.0166 | 0.0138 | 0.9795 | 0.9526 | 1.0077 |

Πίνακας 3.49: Συντελεστές αναγωγής της απόδοσης για τα οικοδομικά υλικά για διάφορες ενέργειες

| E (keV) | Γρανίτης | | Τσιμεντόλιθος | | Τούβλο | |
|--------------------------|-----------------|------------------------------|----------------------|------------------------------|---------------|------------------------------|
| | f | σ_f | f | σ_f | f | σ_f |
| 46.52 | 0.4170 | 0.0084 | 0.81075 | 0.0266 | 0.6277 | 0.0119 |
| 63.29 | 0.5371 | 0.0100 | 0.87921 | 0.0236 | 0.7435 | 0.0118 |
| 185.7 | 0.7790 | 0.0095 | 0.97962 | 0.0160 | 0.9309 | 0.0086 |
| 186.2 | 0.7790 | 0.0095 | 0.97950 | 0.0160 | 0.9308 | 0.0086 |

Πίνακας 3.50: Αποτελέσματα γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης οικοδομικών υλικών

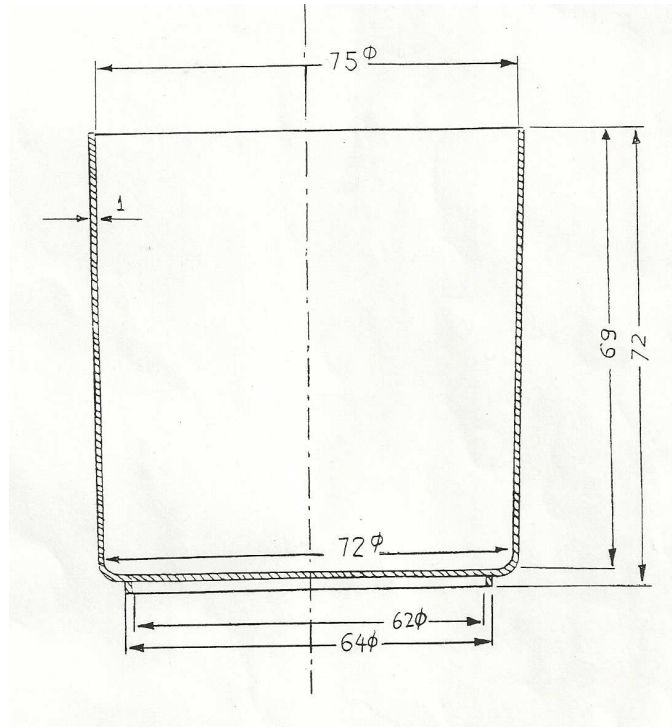
| Υλικό | Ειδική ραδιενέργεια (Bq kg ⁻¹ , ± 1σ) | | | | |
|---------------|--|-------------------|-----------------|-------------------|------------------|
| | ²²⁶ Ra | ²³² Th | ⁴⁰ K | ²¹⁰ Pb | ²³⁸ U |
| Χαλίκι | 3.8±0.12 | Δ/Α | Δ/Α | Δ/Μ | Δ/Μ |
| Μάρμαρο | 1.9±0.092 | Δ/Α | Δ/Α | Δ/Μ | Δ/Μ |
| Τσιμεντόλιθος | 38.6±0.88 | 41.24±1.15 | 790±18 | 39.4±4.1 | 42.9±3.8 |
| Τούβλο | 30.4±0.06 | 39.39±0.83 | 723±14 | 31.63±2.80 | 32±2.5 |
| Γρανίτης II | 24.4±0.05 | 35.25±0.76 | 1435±27 | 45.89±4.26 | 44.34±3.67 |
| Γρανίτης III | 22.3±0.5 | 93.10±1.78 | 848±16 | 18.34±1.74 | 43.36±3.66 |
| Γρανίτης IV | 14.8±0.3 | 23.16±0.5 | 283±5.8 | 16.37±1.60 | 20.66±1.69 |

Πίνακας 3.51: Δείκτης ακτινοπροστασίας οικοδομικών υλικών

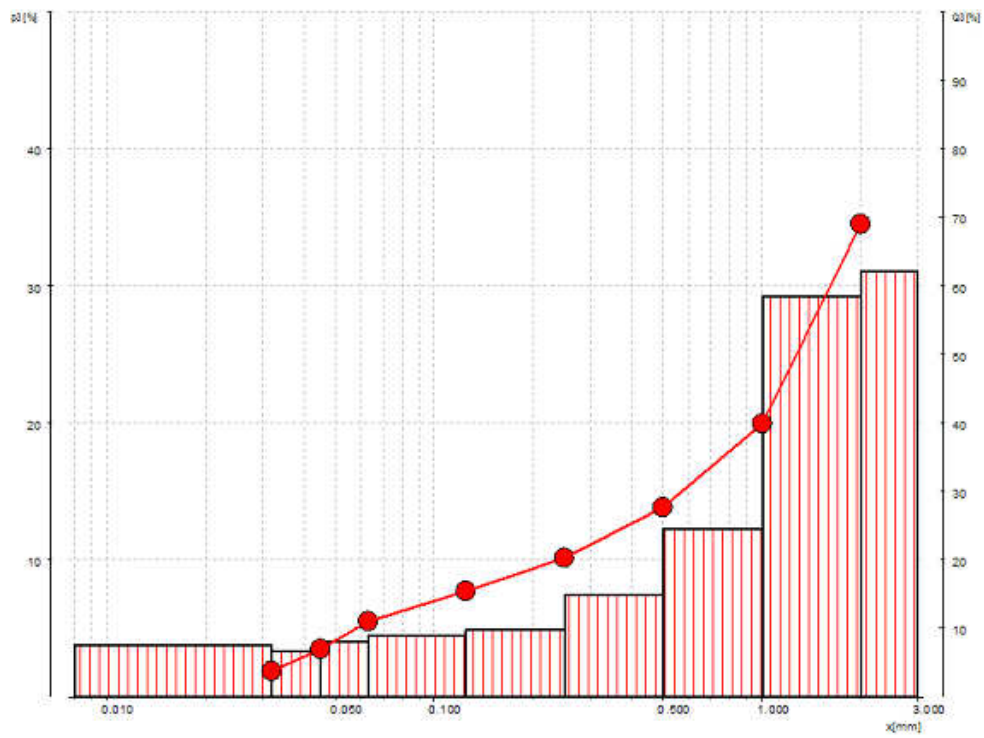
| Υλικό | Δείκτης ακτινοπροστασίας I |
|---------------|-------------------------------|
| Χαλίκι | 0.01 |
| Γρανίτης II | 0.74 |
| Γρανίτης III | 0.82 |
| Γρανίτης IV | 0.26 |
| Μάρμαρο | 0.01 |
| Τούβλο | 0.54 |
| Τσιμεντόλιθος | 0.60 |

Σχήματα Κεφαλαίου

Σχήμα 3.1: Πλαστικό κυλινδρικό δοχείο γεωμετρίας 2 του ΕΠΤ-ΕΜΠ



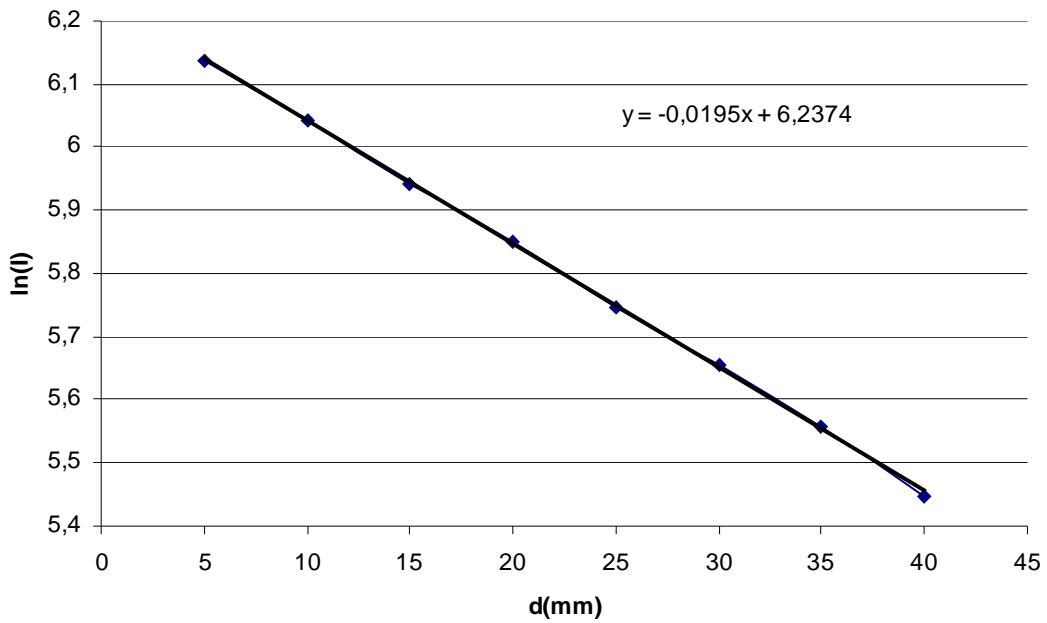
Σχήμα 3.2: Κοκκομετρική κατανομή τσιμεντόλιθου μετά από θραυστήρα



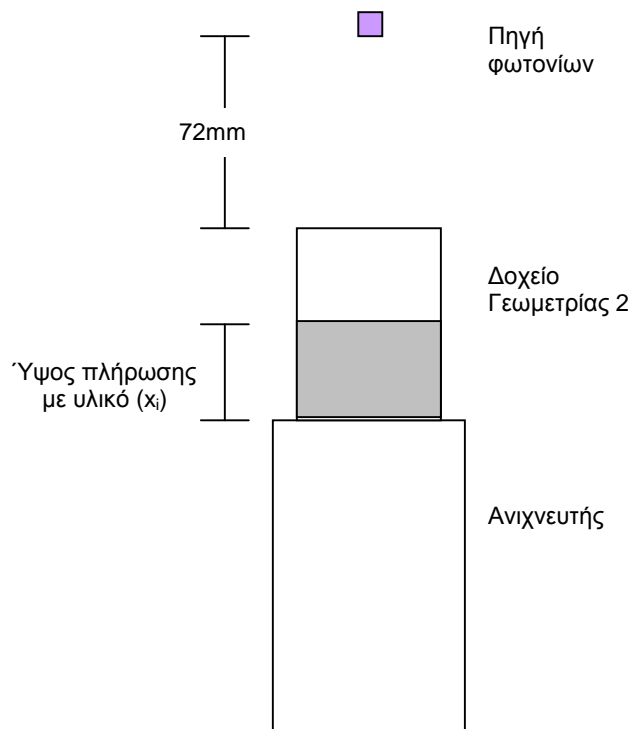
Σχήμα 3.3: Οικοδομικά υλικά



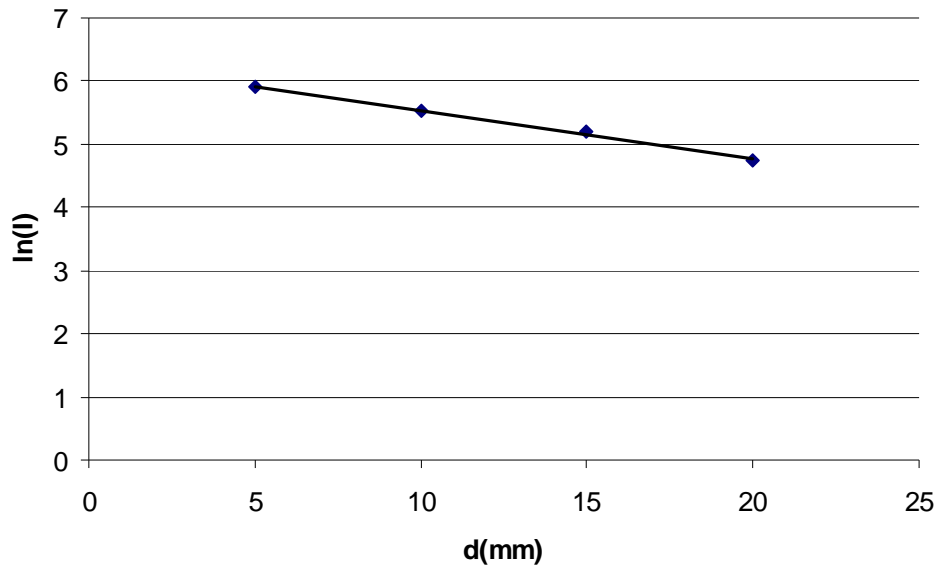
Σχήμα 3.4: Προσδιορισμός γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ νερού για ενέργεια φωτονίων 59.54 keV



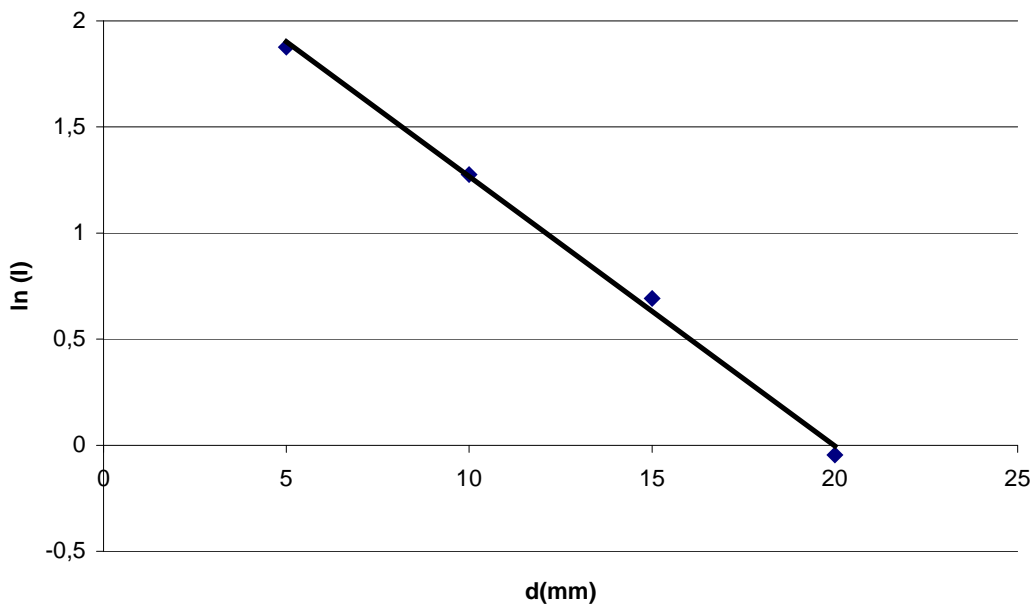
Σχήμα 3.5: Γεωμετρία προσδιορισμού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης με σημειακή πηγή



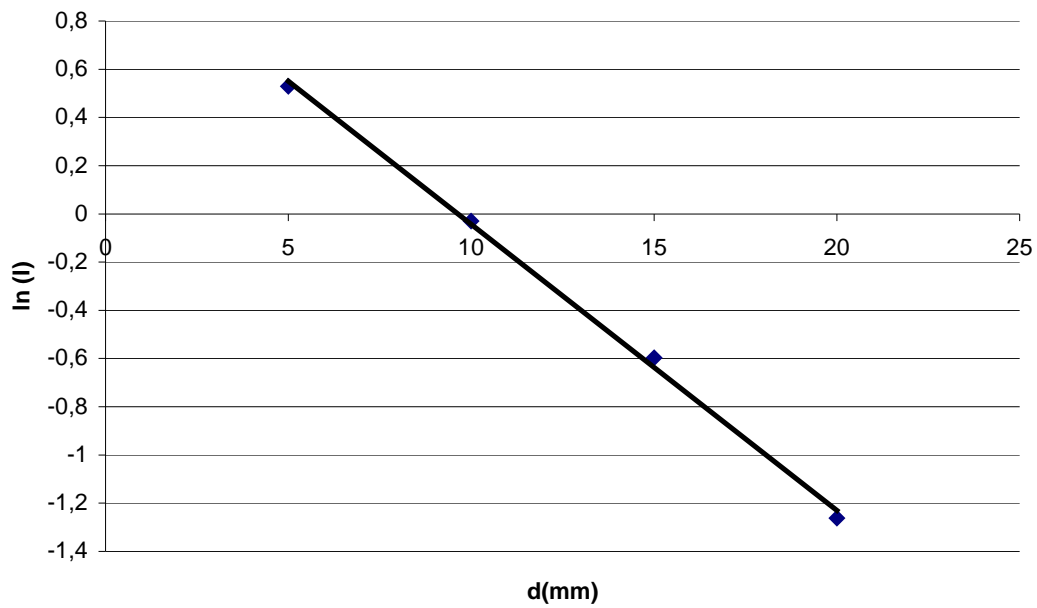
Σχήμα 3.6: Προσδιορισμός γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ γρανίτη για ενέργεια 59.54 keV



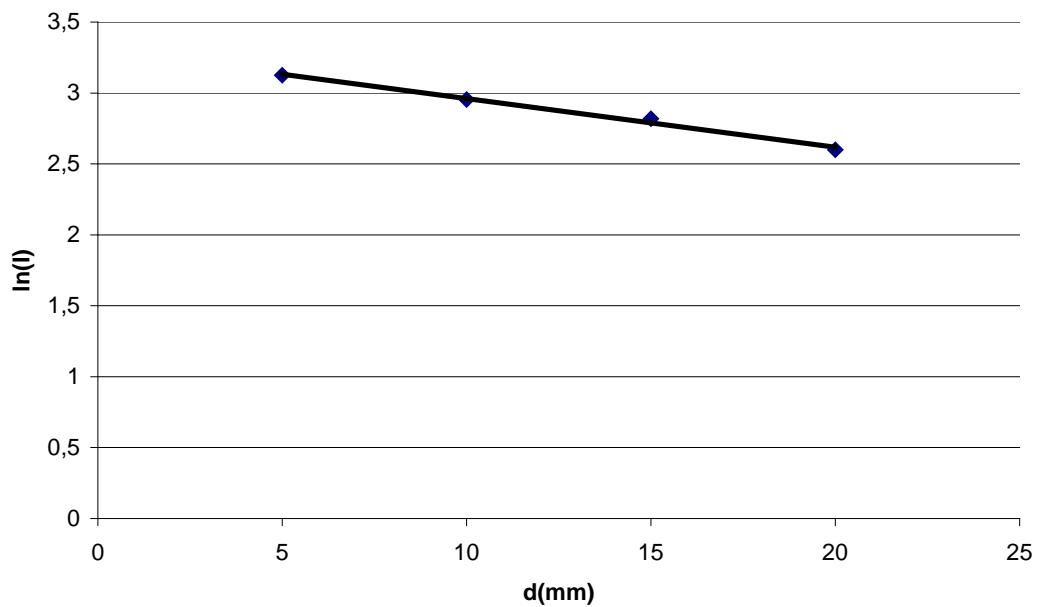
Σχήμα 3.7: Προσδιορισμός γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ γρανίτη για ενέργεια 45.36 keV



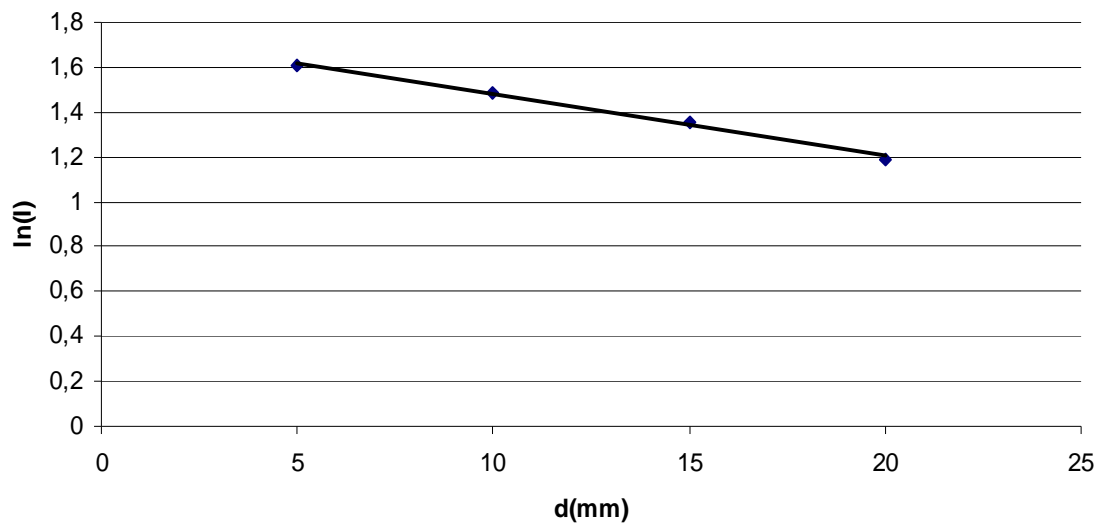
Σχήμα 3.8: Προσδιορισμός γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ γρανίτη για ενέργεια 46.63 keV



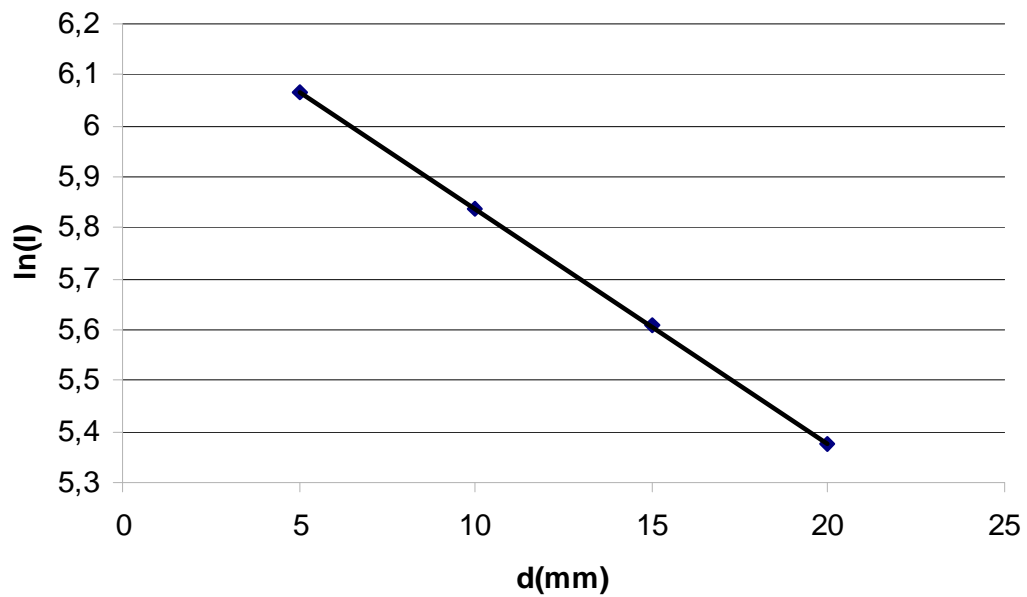
Σχήμα 3.9: Προσδιορισμός γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ γρανίτη για ενέργεια 121.78 keV



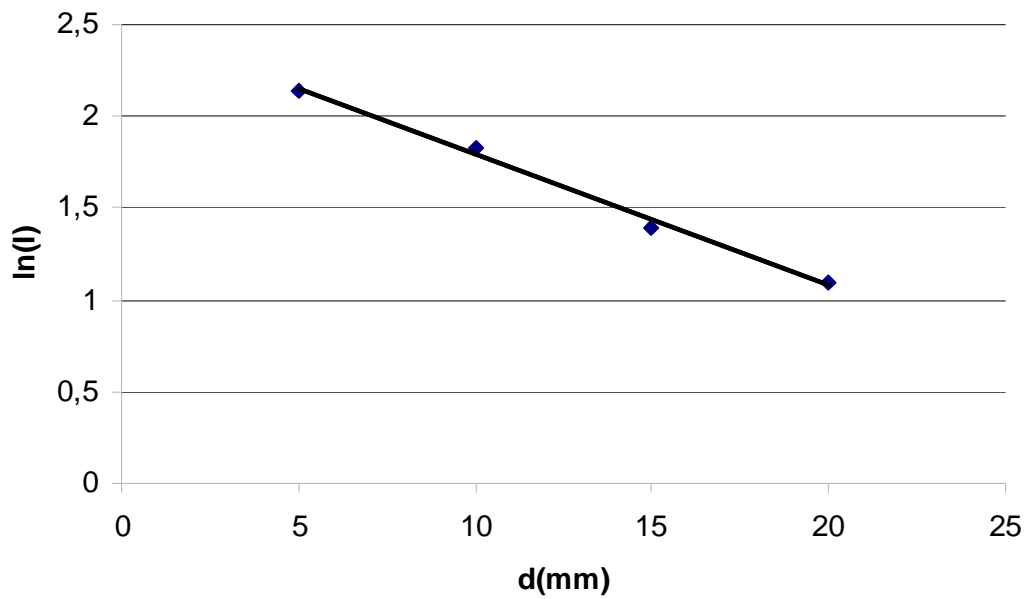
Σχήμα 3.10: Προσδιορισμός γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ γρανίτη για ενέργεια 186.25 keV



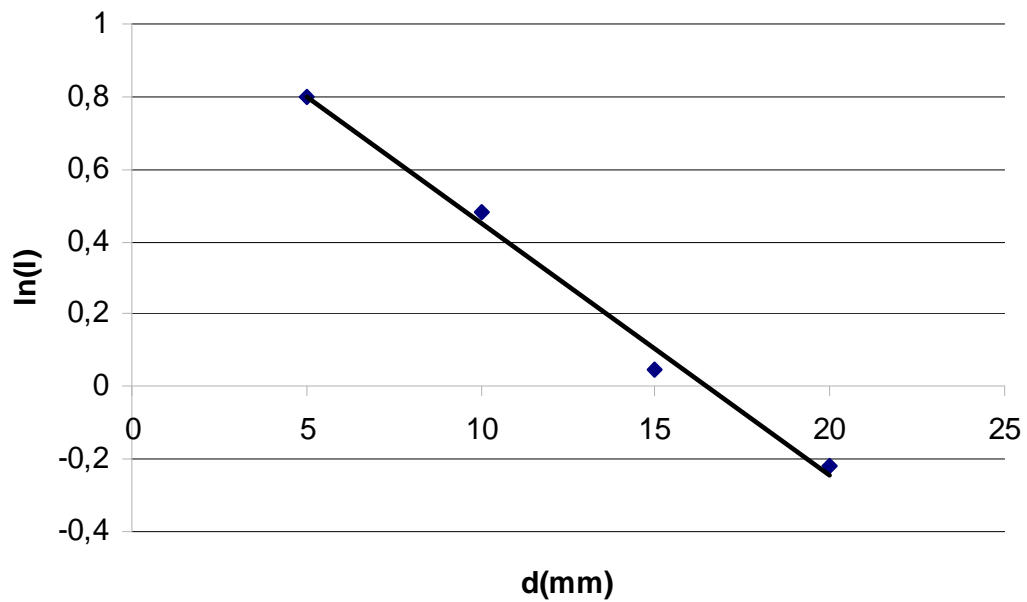
Σχήμα 3.11: Προσδιορισμός γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ τούβλου για ενέργεια 59.54 keV



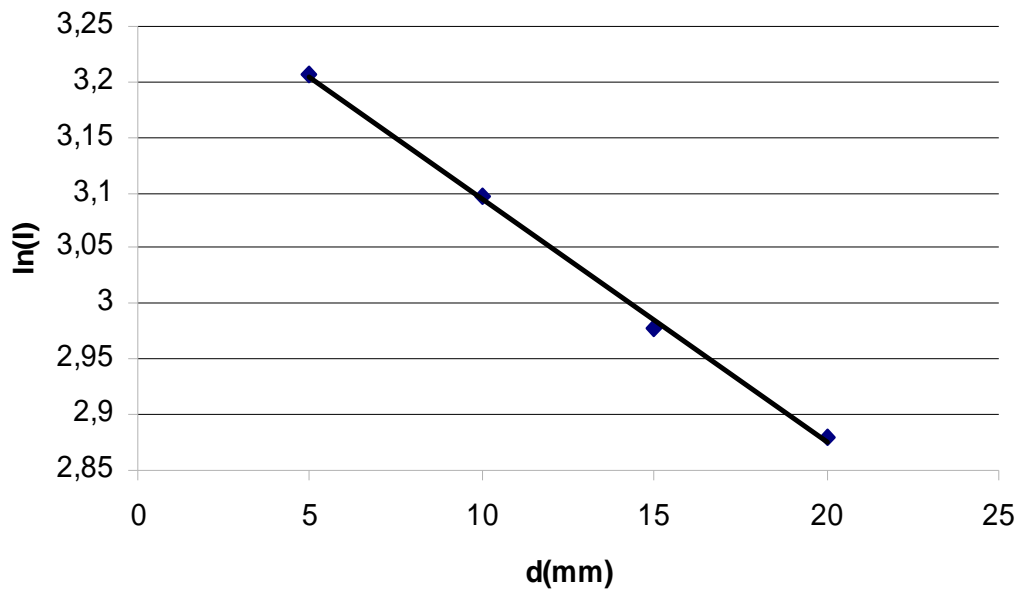
Σχήμα 3.12: Προσδιορισμός γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ τούβλου για ενέργεια 45.36 keV



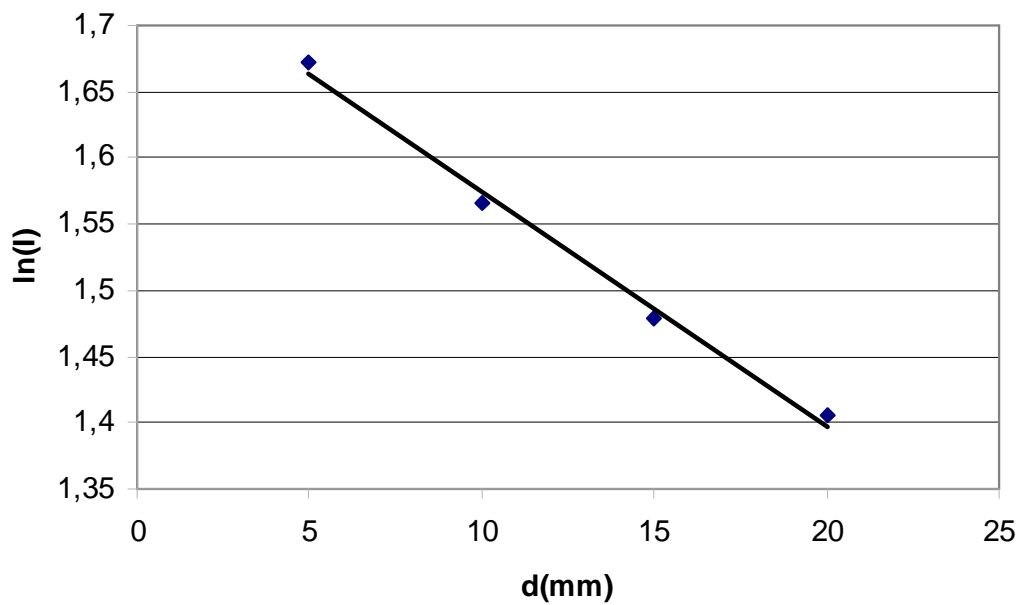
Σχήμα 3.13: Προσδιορισμός γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ τούβλου για ενέργεια 46.63 keV



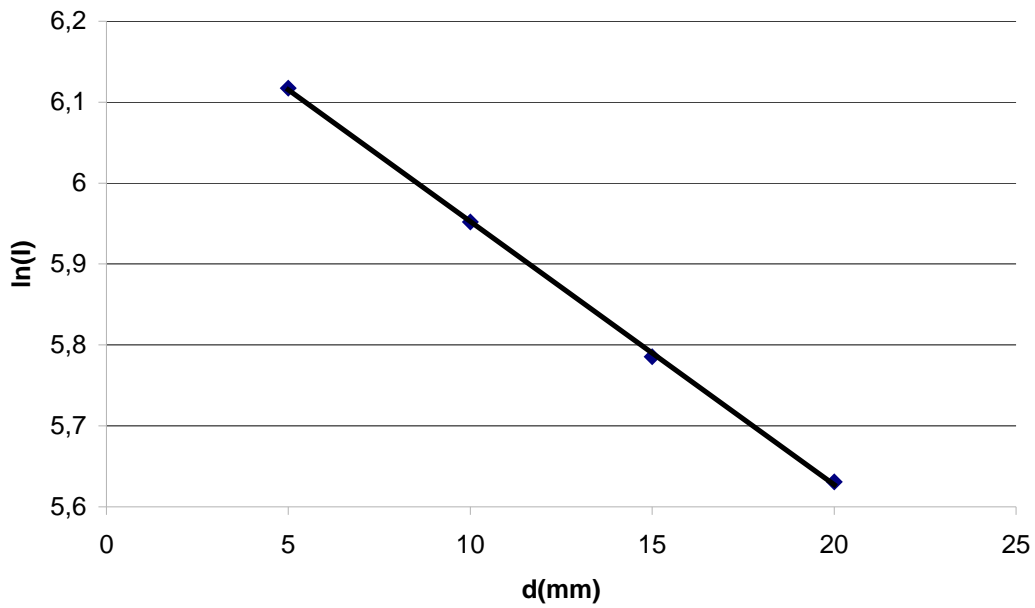
Σχήμα 3.14: Προσδιορισμός γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ τούβλου για ενέργεια 121.78 keV



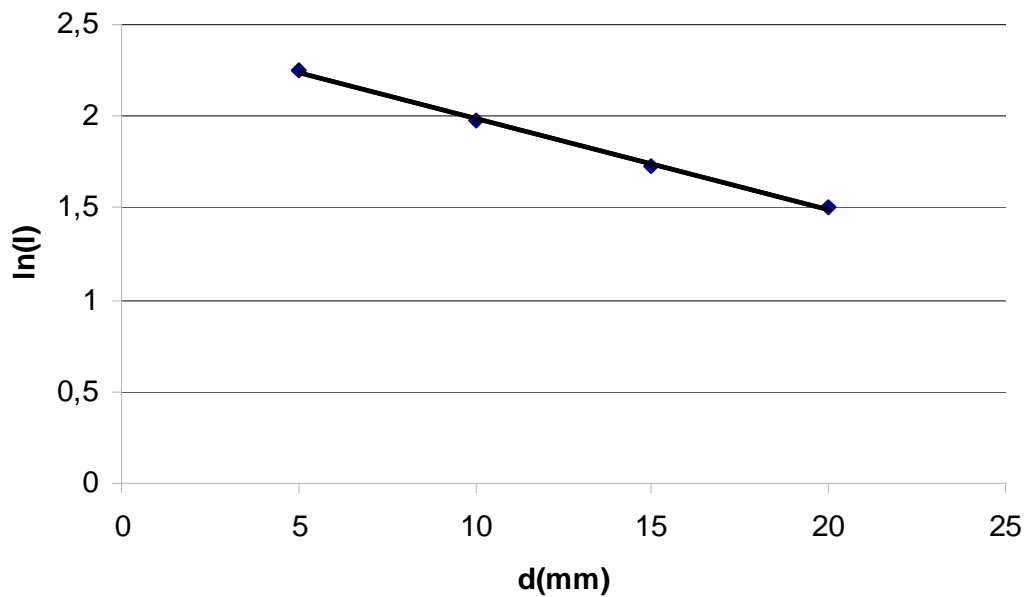
Σχήμα 3.15: Προσδιορισμός γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ τούβλου για ενέργεια 186.25 keV



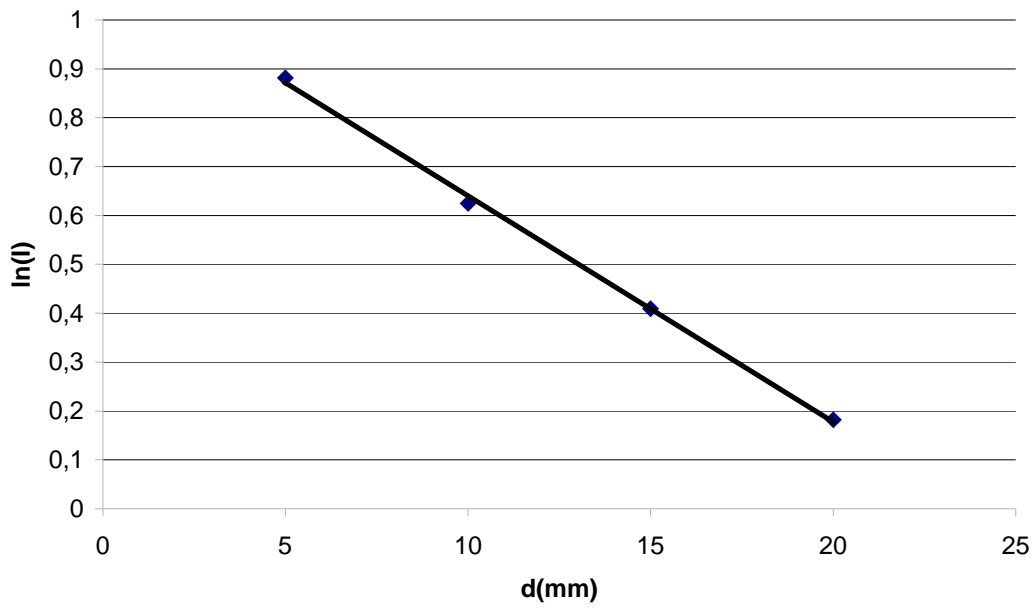
Σχήμα 3.16: Προσδιορισμός γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ τσιμεντόλιθου για ενέργεια 59.54 keV



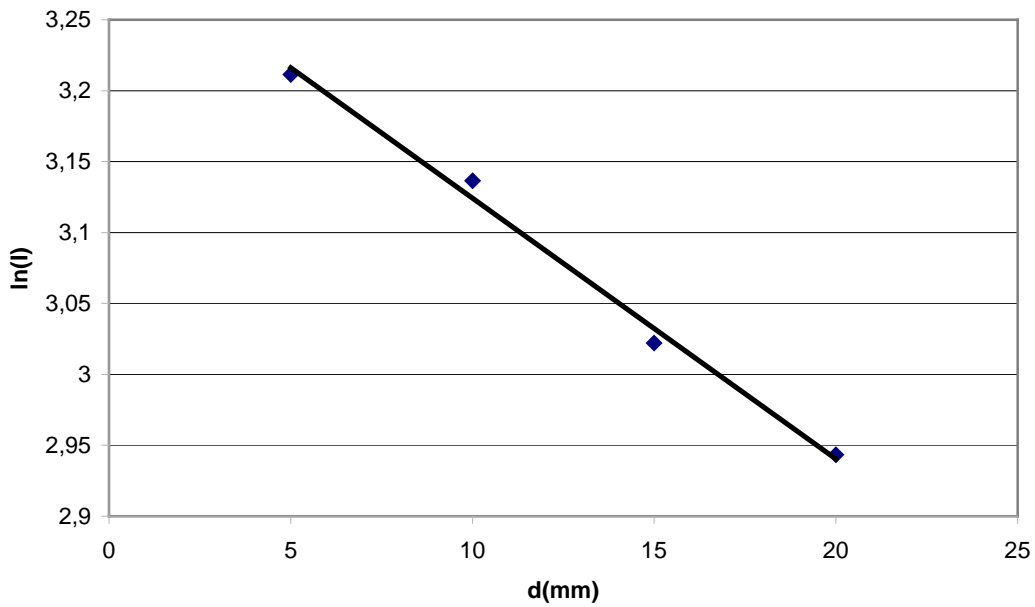
Σχήμα 3.17: Προσδιορισμός γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ τσιμεντόλιθου για ενέργεια 45.36 keV



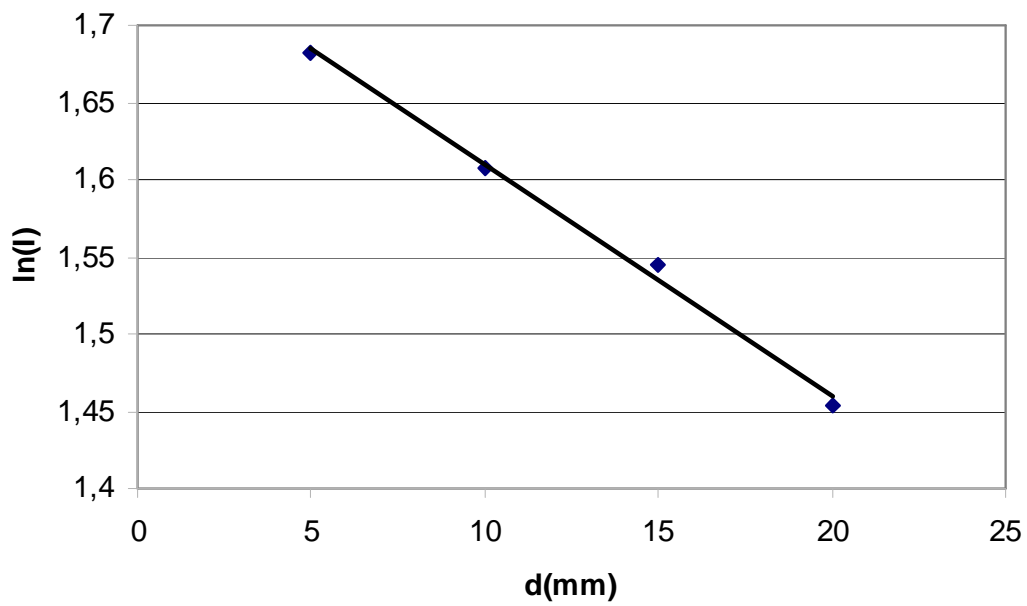
Σχήμα 3.18: Προσδιορισμός γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ τσιμεντόλιθου για ενέργεια 46.63 keV



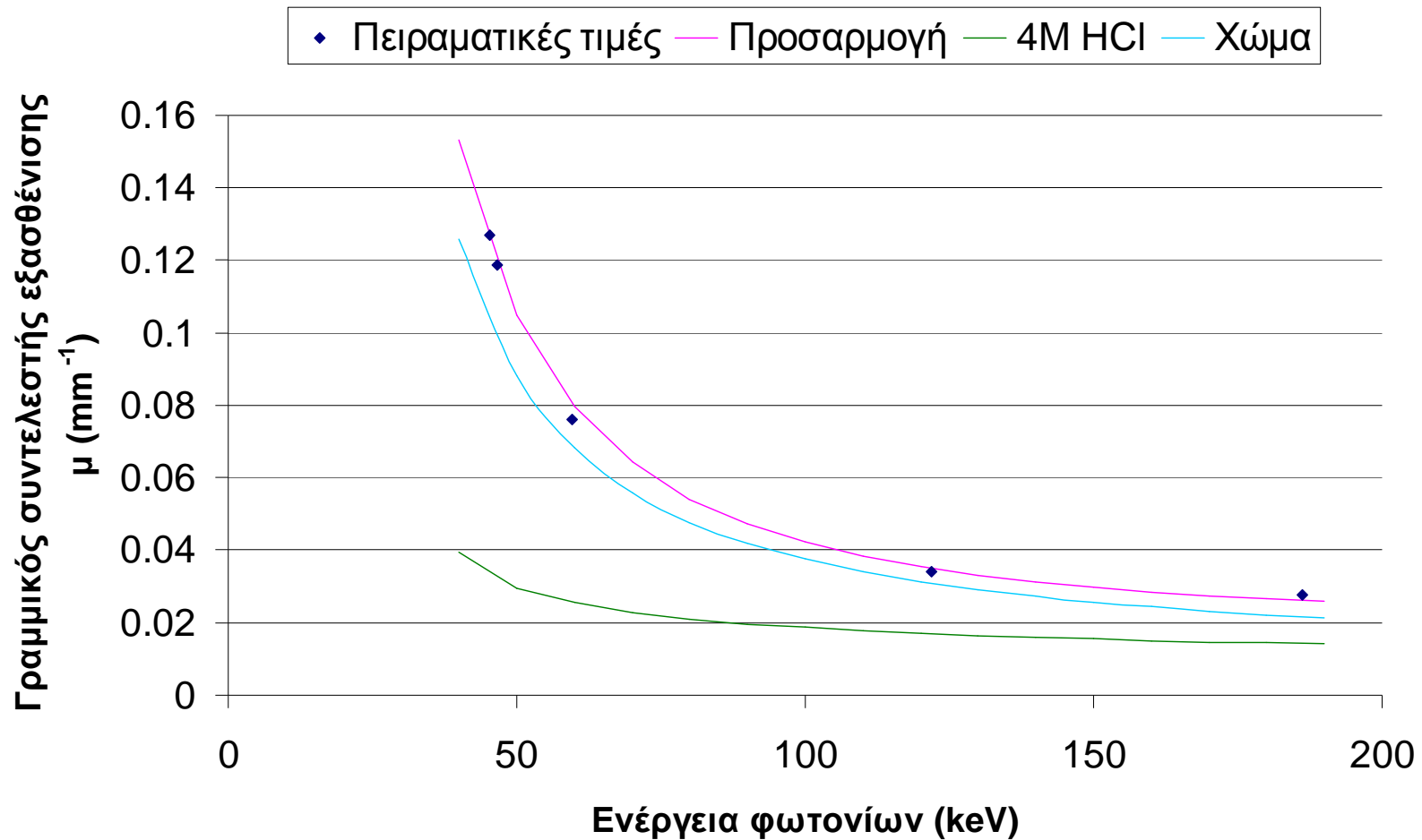
Σχήμα 3.19: Προσδιορισμός γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ τσιμεντόλιθου για ενέργεια 121.78 keV



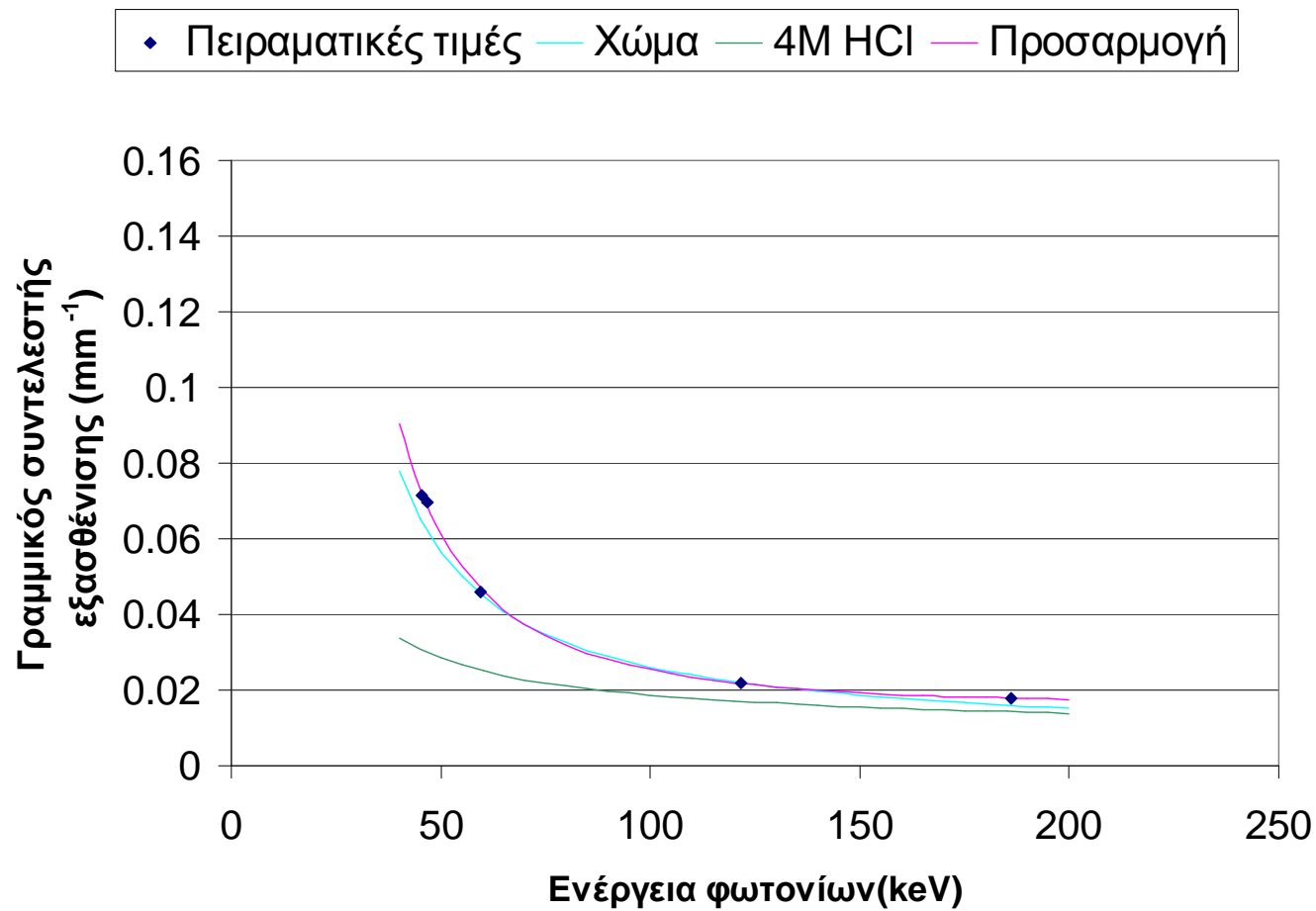
**Σχήμα 3.20: Προσδιορισμός γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ
τσιμεντόλιθου για ενέργεια 186.25 keV**



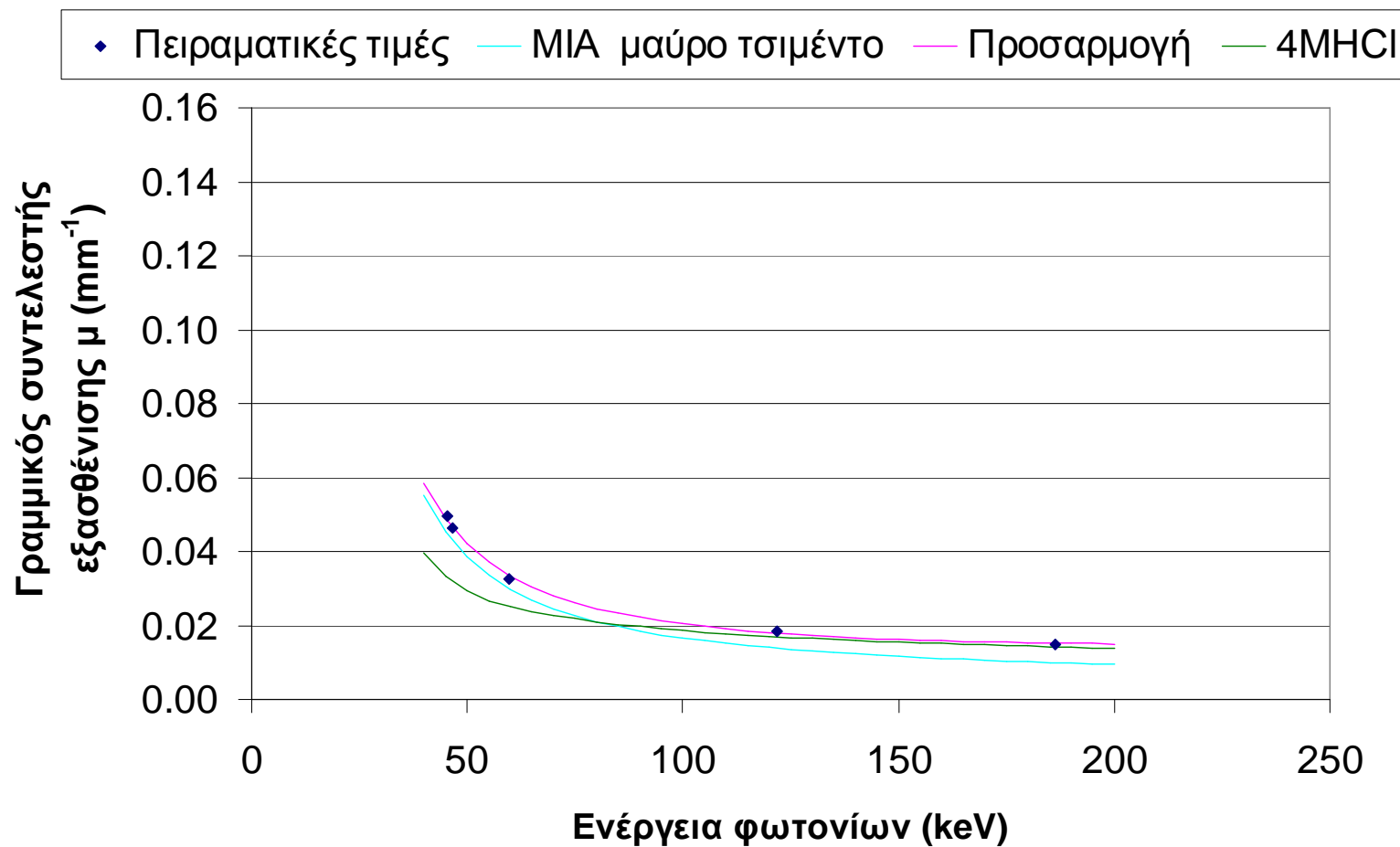
Σχήμα 3.21: Συσχέτιση γραμμικού συντελεστή εξασθένησης-ενέργειας φωτονίων για τον γρανίτη



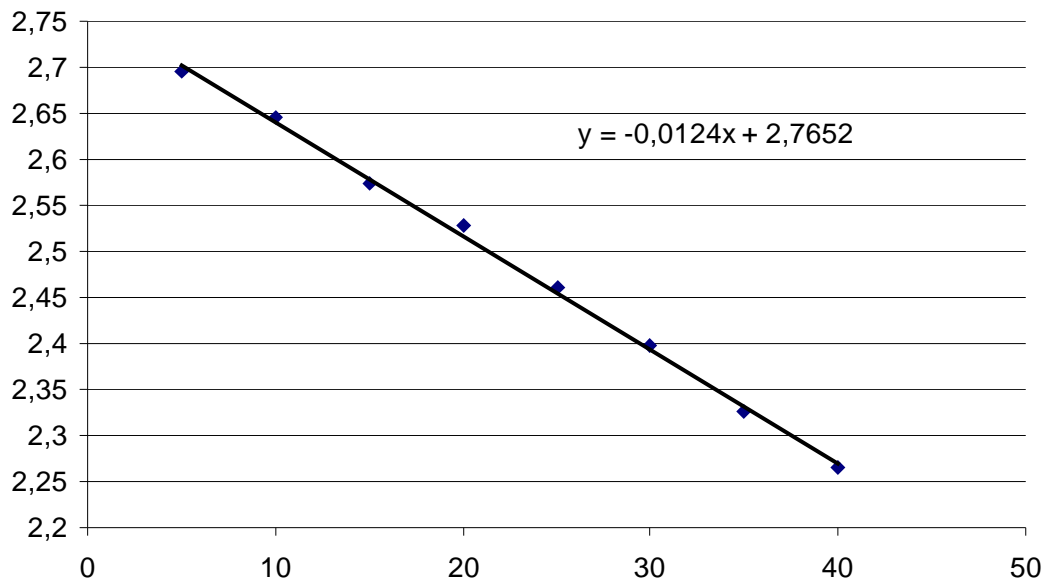
Σχήμα 3.22: Συσχέτιση γραμμικού συντελεστή εξασθένησης-ενέργειας φωτονίων για το τούβλο



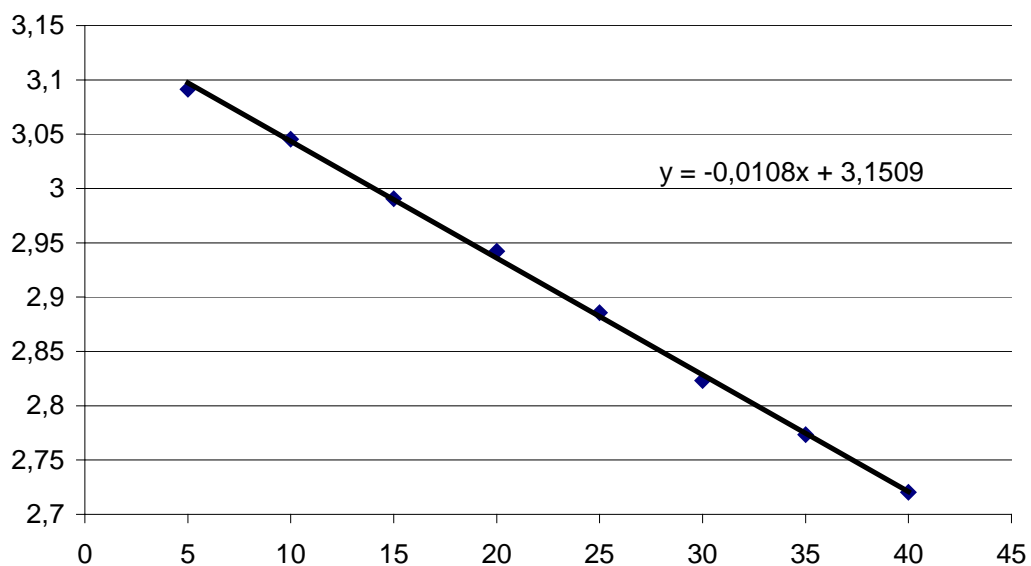
Σχήμα 3.23: Συσχέτιση γραμμικού συντελεστή εξασθένησης-ενέργειας φωτονίων για τον τσιμεντόλιθο



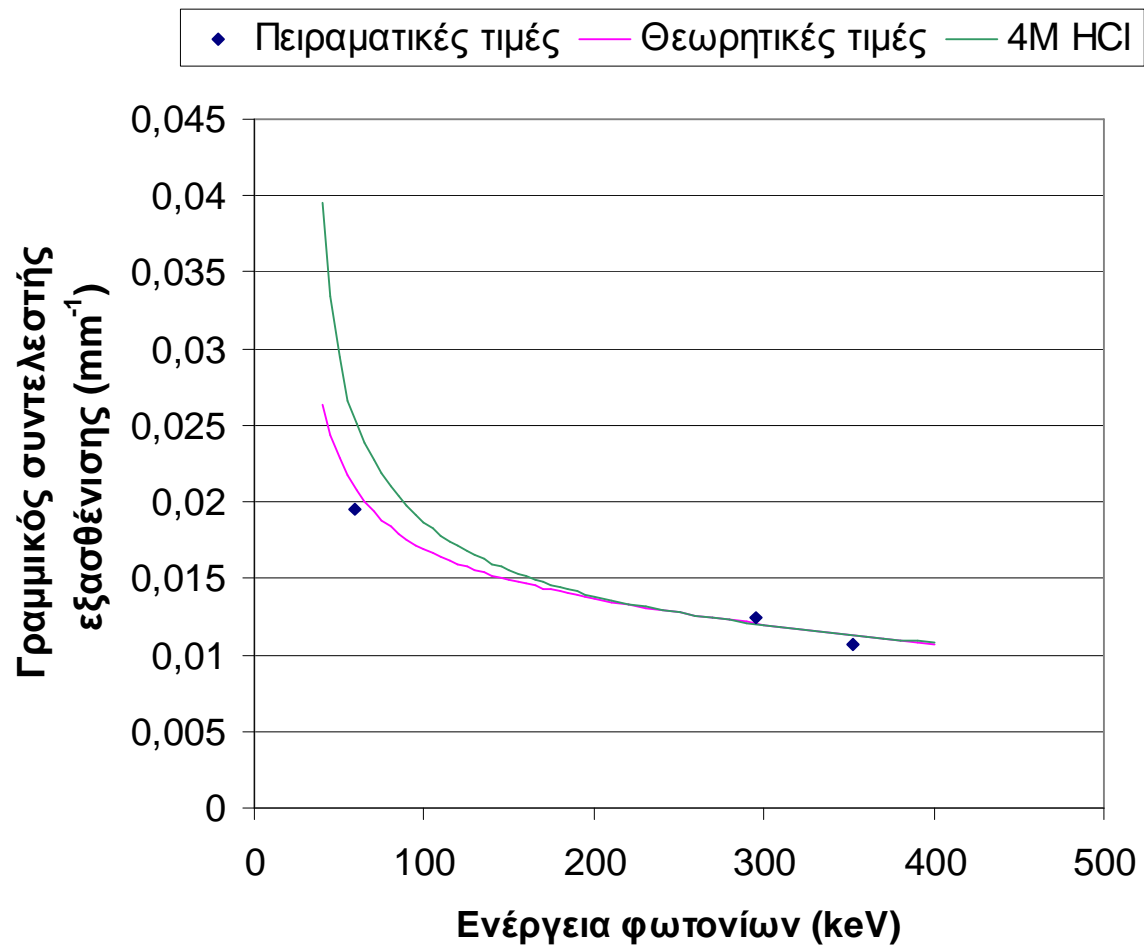
**Σχήμα 3.24: Γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ νερού για ενέργεια φωτονίων
295.22 keV**



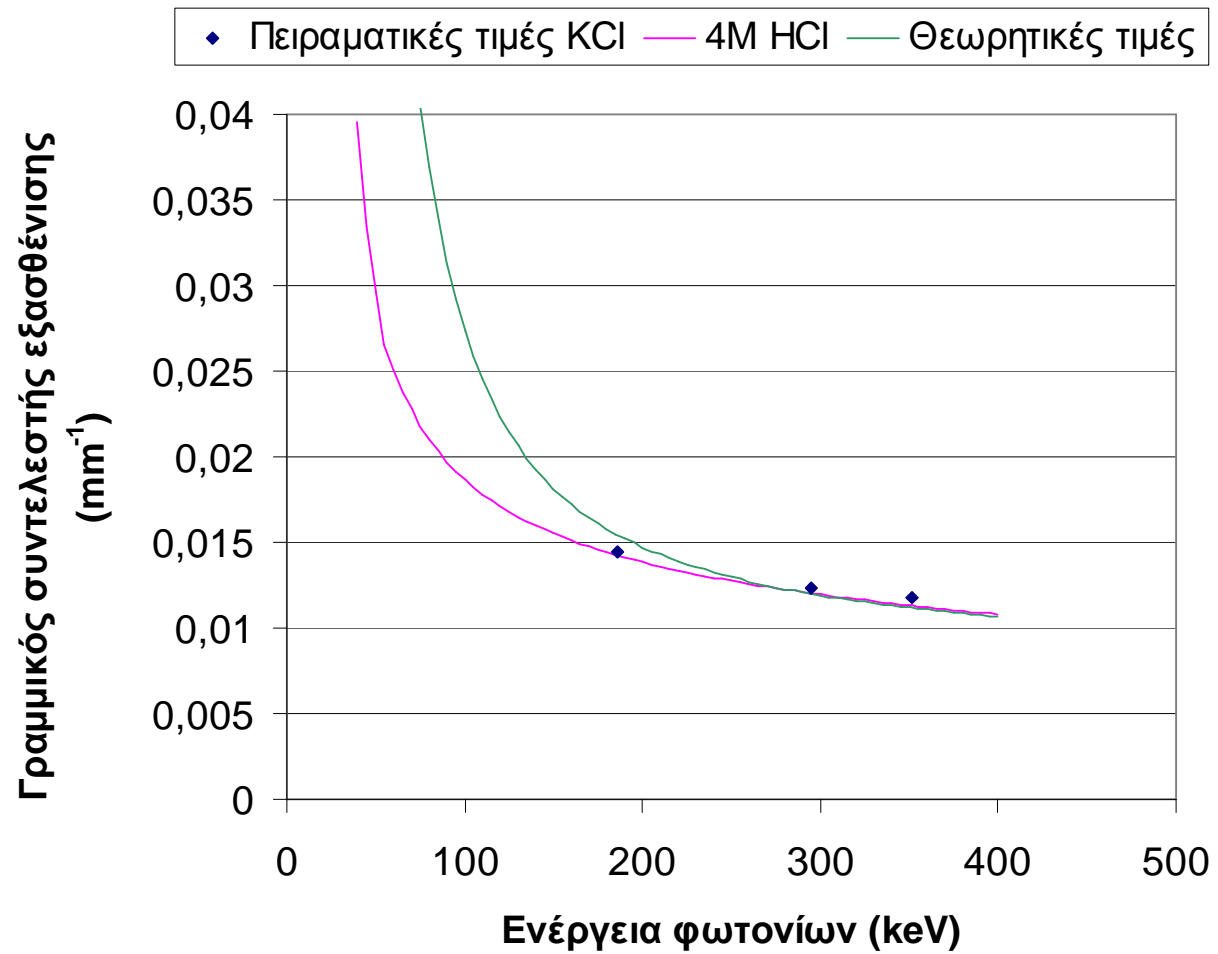
**Σχήμα 3.25: Γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ νερού για ενέργεια φωτονίων
351.99 keV**



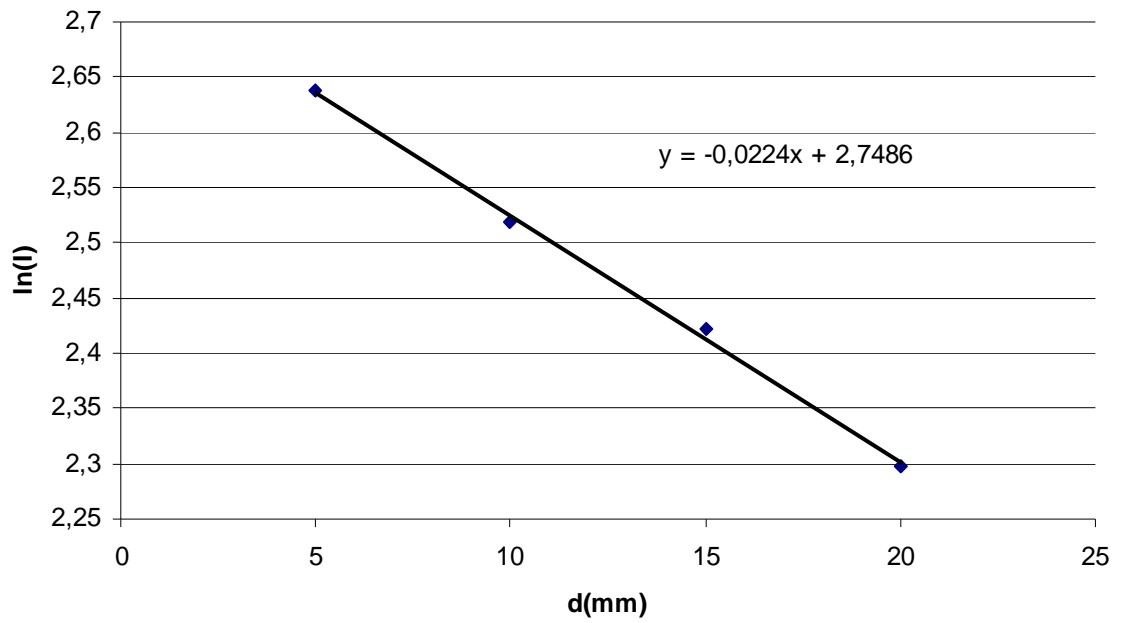
Σχήμα 3.26: Συσχέτιση γραμμικού συντελεστή εξασθένησης-ενέργειας φωτονίων για νερό



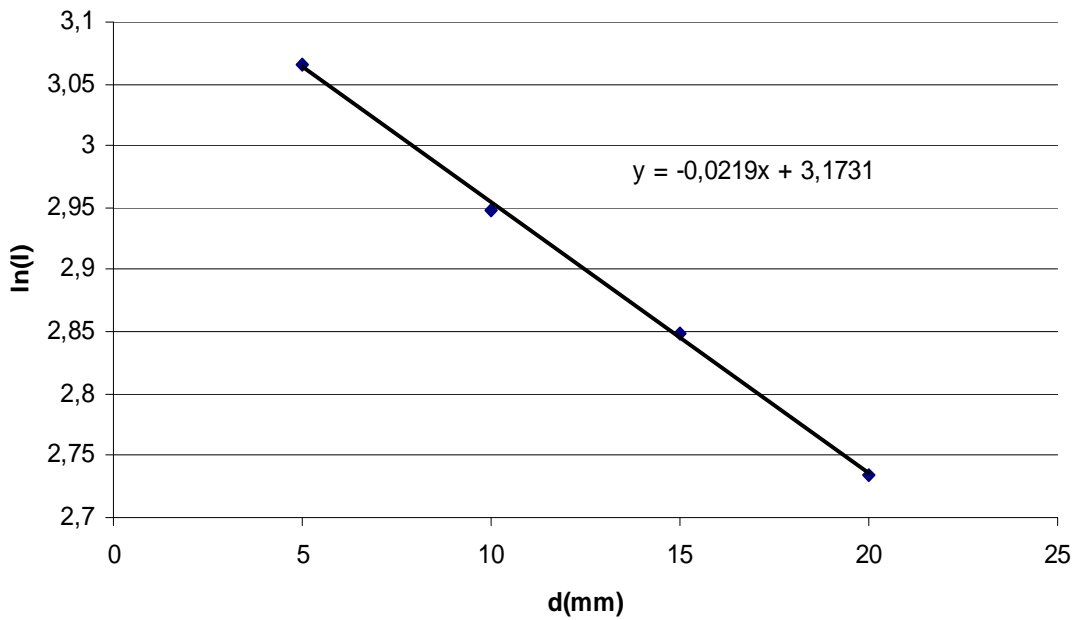
Σχήμα 3.27: Συσχέτιση ενέργειας-μ KCl



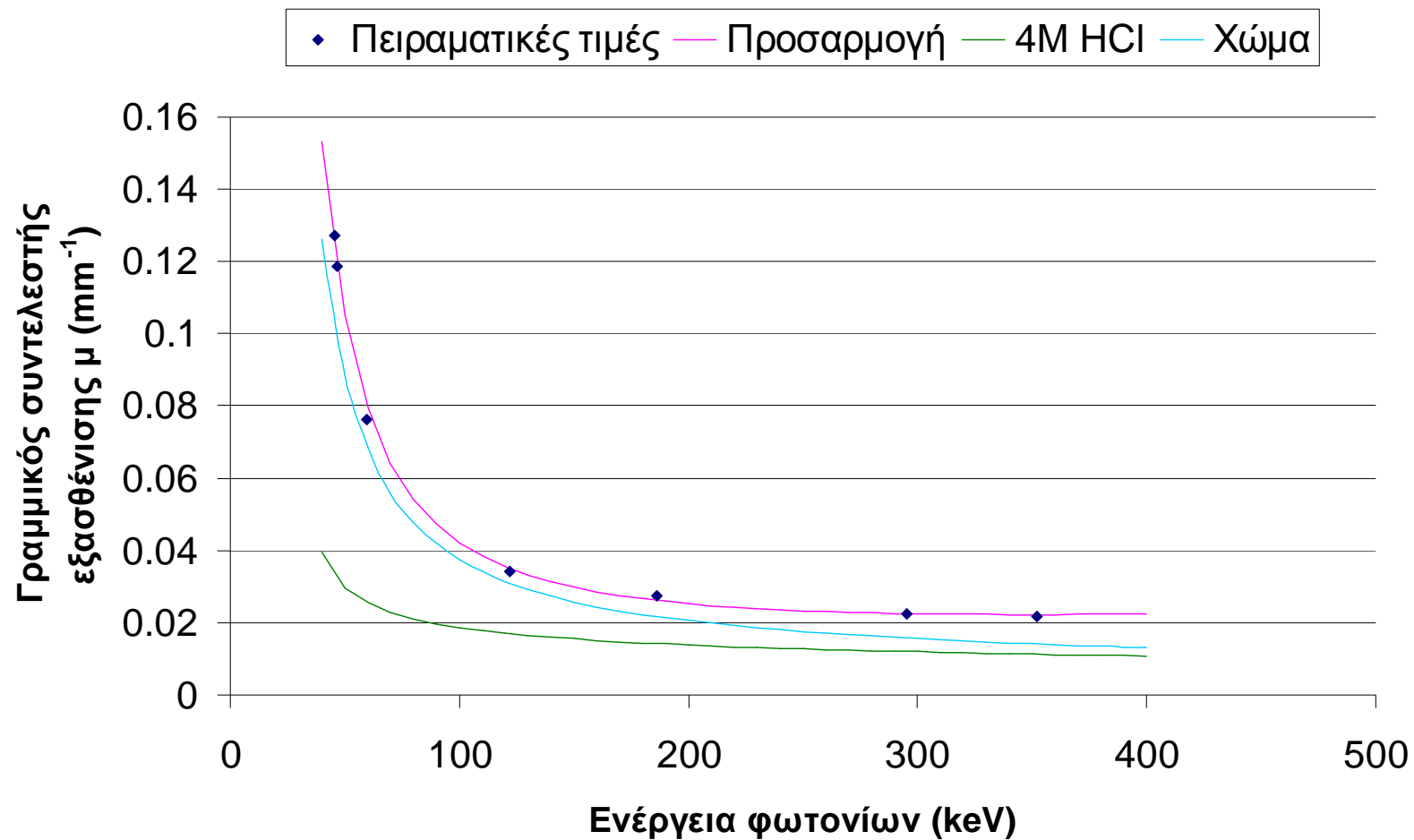
**Σχήμα 3.28: Γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ γρανίτη για ενέργεια
295.22keV**



**Σχήμα 3.29: Γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ γρανίτη για ενέργεια
351.99keV**



Σχήμα 3.30: Συσχέτιση ενέργειας-μ γρανίτη



Κεφάλαιο 4: Επίδραση της ανομοιογένειας των δειγμάτων στα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσής.

4.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η επίδραση της ανομοιογένειας περιβαλλοντικών δειγμάτων σε μορφή σκόνης στα αποτελέσματα της ραδιολογικής ανάλυσής τους. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε Ιπτάμενη Τέφρα, στην οποία όπως είναι γνωστό από τη σχετική βιβλιογραφία και προηγούμενες μελέτες του ΕΠΤ-ΕΜΠ, παρατηρείται τάση ορισμένων ραδιοϊσοτόπων να συγκεντρώνονται στα λεπτόκοκκα ή στα χονδρόκοκκα κλάσματα τέφρας αντίστοιχα.

Σε προηγούμενη ΔΕ που εκπονήθηκε στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, δημιουργήθηκε προβληματισμός ως προς την πιθανότητα αλλοίωσης των αποτελεσμάτων της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης, λόγω της κατά μέγεθος ανακατανομής των σωματιδίων της Ι.Τ στη μάζα του δείγματος (Πέππας 2008).

Με σκοπό να διερευνηθεί το φαινόμενο αυτό, παρασκευάστηκε μία σειρά από δείγματα κοκκομετρικών κλασμάτων Ι.Τ τα οποία αναλύθηκαν με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας. Χρησιμοποιώντας τα κοκκομετρικά κλάσματα αυτά, πραγματοποιήθηκε μια σειρά δοκιμών επεξεργασίας και συσκευασίας δειγμάτων για να μελετηθούν οι πιθανές επιδράσεις της ανομοιογένειας. Επιπλέον, εξετάστηκε η συμπεριφορά της Ι.Τ κατά τη λειοτρίβιση, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί ως μέθοδος αντιμετώπισης πιθανών προβλημάτων λόγω ανομοιογένειας.

4.2. Μηχανισμός επίδρασης της ανομοιογένειας δειγμάτων στη γ-φασματοσκοπική ανάλυση

Τα περιβαλλοντικά υλικά συχνά χαρακτηρίζονται από ανομοιογένεια μικρής ή μεγαλύτερης κλίμακας. Κατά την ραδιολογική ανάλυση τέτοιων υλικών η ανομοιογένεια μπορεί να επιδράσει σημαντικά στα αποτελέσματα. Η ανομοιογένεια των δειγμάτων προς ανάλυση είναι πιθανό να επιδράσει και κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας, όμως η περίπτωση αυτή δεν θα εξεταστεί στην παρούσα ΔΕ.

Κατά την ανάλυση με μεθόδους πυρηνικής τεχνολογίας, και συγκεκριμένα κατά την γ-φασματοσκοπική ανάλυση, η κατανομή της ραδιενέργειας στο αναλυόμενο δείγμα θεωρείται ομοιόμορφη. Επιπλέον, κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση, τα τμήματα του δείγματος που βρίσκονται πλησιέστερα στον ανιχνευτή συνεισφέρουν σημαντικότερα στην διαμόρφωση των αντίστοιχων φωτοκορυφών. Κατά συνέπεια, στην περίπτωση που ένα δείγμα είναι ανομοιογενές και αποτελείται από κλάσματα τα οποία έχουν διαφορετική τιμή ειδικής ραδιενέργειας για ένα συγκεκριμένο ισότοπο, το αποτέλεσμα της ανάλυσης ενδεχομένως θα εξαρτάται από τη σχετική θέση που έχουν τα κλάσματα αυτά μέσα στο δείγμα. Το πρόβλημα αυτό αναμένεται να είναι πιο έντονο για φωτόνια χαμηλών ενεργειών, καθώς λόγω της αυταπορρόφησης, τα φωτόνια που εκπέμπονται από τις περιοχές του δείγματος κοντά στον ανιχνευτή είναι αυτά που κυρίως συνεισφέρουν στο φάσμα.

Στα υλικά τα οποία βρίσκονται σε μορφή σκόνης, η ανομοιογένεια ενδεχομένως σχετίζεται με την κοκκομετρία, δηλαδή, ενδεχομένως παρατηρούνται διαφορετικές συγκεντρώσεις του ίδιου ραδιοϊσοτόπου στα διαφορετικά κοκκομετρικά κλάσματα του υλικού. Όταν τα κοκκομετρικά κλάσματα δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένα στη μάζα του δείγματος, πράγμα που φυσιολογικά συμβαίνει σε ελεύθερα ρέουσες σκόνες, η ανομοιογένεια μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Ένας τρόπος αντιμετώπισης του φαινομένου είναι η ομογενοποίηση του υλικού. Στην παρούσα ΔΕ, εξετάστηκε η ομογενοποίηση των δειγμάτων με τη μέθοδο της λειοτριβίσης, με σκοπό να εξομαλυνθούν οι διαφορές κοκκομετρίας.

4.3. Γενικά στοιχεία για την Τέφρα

Η τέφρα ορίζεται ως το λεπτόκοκκο υλικό αποτελούμενο κυρίως από σφαιρικά, υαλώδη σωματίδια προερχόμενα από τη διαδικασία της καύσης στερεών ορυκτών καυσίμων. Σημαντικές ποσότητες τέφρας παράγονται από τους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας, οι οποίοι χρησιμοποιούν στερεά καύσιμα, όπως ο λιγνίτης και ο ανθρακίτης.

Η τέφρα που παράγεται από τους λιγνιτικούς σταθμούς χωρίζεται γενικά σε δύο κατηγορίες:

- Στην Υγρή Τέφρα (bottom ή wet ash), που αποτελείται από συσσωματώματα άκαυστου καυσίμου και ανόργανα υπολείμματα της καύσης που καταπίπτουν 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.

Η χημική σύσταση της Ιπτάμενης και Υγρής Τέφρας παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία, ανάλογα με την προέλευση του καυσίμου και τις συνθήκες λειτουργίας του σταθμού. 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

Τα ορυκτά καύσιμα, όπως όλα τα γεωλογικά υλικά, περιέχει ραδιοϊσότοπα των φυσικών ραδιενεργών σειρών του ^{238}U , του ^{235}U και του ^{232}Th , καθώς και ^{40}K . Λόγω του εμπλουτισμού των ιχνοστοιχείων κατά την καύση, τα ραδιενεργά ισότοπα που υπάρχουν στο αρχικό καύσιμο παρουσιάζονται εμπλουτισμένα στην Ιπτάμενη και Υγρή Τέφρα, όπου και παραμένουν. Κατά συνέπεια, η τέφρα μπορεί να

χαρακτηριστεί ως Υλικό Τεχνολογικά Επαυξημένης Φυσικής Ραδιενέργειας (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactivity Material, TENORM).

Στην Ι.Τ. ανιχνεύονται όλα τα παραπάνω ραδιοϊσότοπα. Τα ισότοπα των σειρών του ^{238}U , του ^{235}U και του ^{232}Th συνήθως βρίσκονται σε ραδιενεργό ισορροπία στα ορυκτά καύσιμα. Ωστόσο, ακόμα και όταν η ισορροπία αυτή υπάρχει αρχικά, συχνά κατά την καύση διαταράσσεται, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται σημαντικές διαφορές μεταξύ των ειδικών ραδιενεργειών των ραδιοϊσοτόπων της κάθε σειράς στα διάφορα κλάσματα της τέφρας.

Δύο κύρια λιγνιτικά πεδία είναι υπό εκμετάλλευση στην Ελλάδα:

- Το λιγνιτικό πεδίο Πτολεμαΐδας-Αμύνταιου στην Βόρεια Ελλάδα με εκτιμώμενα αποθέματα λιγνίτη περίπου 2700Mt και συνολική εγκατεστημένη ισχύ 4000MW.
- Το λιγνιτικό πεδίο Μεγαλόπολης, με εκτιμώμενα αποθέματα λιγνίτη περίπου 370Mt και συνολική εγκατεστημένη ισχύ 850MW.

Στην παρούσα ΔΕ παρασκευάστηκαν και μελετήθηκαν δείγματα μόνο από Ιπτάμενη Τέφρα, προερχόμενη από το λιγνιτικό σταθμό της Μεγαλόπολης. Η Ι.Τ. της Μεγαλόπολης κατατάσσεται στις ασβεστολιθικές (W), ενώ χαρακτηρίζεται και από σχετικά υψηλά επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας. Πιο αναλυτικά στοιχεία για τη σύσταση και τα ραδιολογικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης Ιπτάμενης Τέφρας από τους σταθμούς της Μεγαλόπολης αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Πέππας 2008).

4.4. Προετοιμασία δειγμάτων

Στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ, πραγματοποιήθηκαν πειράματα για τη μελέτη της επίδρασης της κοκκομετρίας της τέφρας στα τελικά αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης. Για το σκοπό αυτό παρασκευάστηκαν δείγματα από ιπτάμενη τέφρα από ποσότητα τέφρας από το αρχείο δειγμάτων του ΕΜΠ-ΕΠΤ. Η ιπτάμενη τέφρα που χρησιμοποιήθηκε προέρχεται από τη μονάδα IV του ΑΗΣ Β' Μεγαλόπολης και έχει συλλεχθεί από τη ΔΕΗ στα πλαίσια συνεργασίας με το ΕΠΤ-ΕΜΠ το Νοέμβριο του 1996.

Επειδή τα φαινόμενα που ενδιέφεραν να μελετηθούν στα πλαίσια της ΔΕ εξαρτώνται από την κοκκομετρία, πολύ σημαντική ήταν η λήψη αντιπροσωπευτικών υποδειγμάτων από τη συνολικά διαθέσιμη ποσότητα τέφρας, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση και εξαγωγή συμπερασμάτων. Σύμφωνα με το σχεδιασμό της ΔΕ, κρίθηκε απαραίτητη η παρασκευή οκτώ όμοιων δειγμάτων, η διαδικασία λήψης των οποίων περιγράφεται στην Παράγραφο 4.4.1.

Από τα οκτώ συνολικά δείγματα που λήφθηκαν, τα τέσσερα διαχωρίστηκαν σε κοκκομετρικά κλάσματα, όπως περιγράφεται στην Παράγραφο 4.4.2, ενώ τα υπόλοιπα τέσσερα χρησιμοποιήθηκαν για δοκιμές και πειράματα λειοτρίβισης της συνολικής τέφρας.

4.4.1. Παραγωγή αντιπροσωπευτικών δειγμάτων Ιπτάμενης Τέφρας

Για τη λήψη αντιπροσωπευτικών δειγμάτων από τη συνολικά διαθέσιμη ποσότητα τέφρας, σχεδιάστηκε και ακολουθήθηκε μία αρκετά σύνθετη διαδικασία προετοιμασίας, η οποία παρουσιάζεται με τη μορφή διαγράμματος στο Σχήμα 4.1.

Εκτιμήθηκε ότι η συνολική ποσότητα που απαιτείται για τα σχεδιασμένα πειράματα είναι ίση με περίπου 4 kg τέφρας. Επειδή η ποσότητα αυτή είναι πολύ μεγάλη για επεξεργασία με τον περιστροφικό διαχωριστή σε ένα βήμα, λήφθηκαν από το δοχείο του δείγματος τέσσερις διαδοχικές ποσότητες 980 g. Κάθε μία από τις ποσότητες αυτές, χωρίστηκε με τη βοήθεια του περιστροφικού διαχωριστή σε δύο μικρότερα δείγματα. Έτσι προέκυψαν συνολικά 8 δείγματα, τα βάρη των οποίων περιέχει ο Πίνακας 4.1.

Για να παρασκευαστεί ένα δείγμα γεωμετρίας 2, αντιπροσωπευτικό του συνόλου των οκτώ όμοιων δειγμάτων του Πίνακα, ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

- Χωρίστηκε το δείγμα 1 στον περιστροφικό διαχωριστή σε τέσσερα τμήματα.
- Λήφθηκε το $\frac{1}{4}$ της συνολικής ποσότητας που χωρίστηκε.
- Επαναλήφθηκε η ίδια διαδικασία και για τα δείγματα 3,5 και 7, έτσι ώστε κάθε δείγμα να διαχωριστεί σε δύο μέρη, με αναλογία μάζας 1:3.

- Τα μικρότερα από τα δύο μέρη κάθε δείγματος, με μάζα ίση με $\frac{1}{4}$ της αρχικής, συνενώθηκαν και προέκυψε συνολική μάζα ίση με 456.04 gr.
- Επειδή η ποσότητα είναι αρκετά μεγάλη για τη δημιουργία δείγματος γεωμετρίας 2, το δείγμα χωρίστηκε ξανά και λήφθηκαν τα $\frac{3}{4}$ της ποσότητας.
- Η ποσότητα που συλλέχθηκε, χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή δείγματος για γ-φασματοσκοπική ανάλυση, με κωδική ονομασία PM002AZ1 και βάρος 277.44 gr.

4.4.2. Διαχωρισμός και συσκευασία κοκκομετρικών κλασμάτων

Πραγματοποιήθηκε ανάλυση κοκκομετρίας στα υπόλοιπα $\frac{3}{4}$ των δειγμάτων 1,3,5 και 7, τα αποτελέσματα της οποίας περιέχει ο Πίνακας 4.2. Το Σχήμα 4.2 παρουσιάζει την κοκκομετρική κατανομή του Δείγματος 1, όπως προέκυψε από το πρόγραμμα EasySieve. Από την ανάλυση του EasySieve παρατηρήθηκε ότι οι διαφορές των ποσοστών μάζας ανάμεσα στα κοκκομετρικά κλάσματα είναι περίπου της τάξης του 2.5%. Αυτό σημαίνει ότι τα δείγματα μπορούν να θεωρηθούν όμοια μεταξύ τους και αντιπροσωπευτικά της αρχικής ποσότητας.

Κατά την ανάλυση κοκκομετρίας, η αρχική ποσότητα των δειγμάτων αυτών διαχωρίστηκε σε κλάσματα ανάλογα με το μέγεθος κόκκου. Μετά την ανάλυση, τα κλάσματα όμοιου μεγέθους από κάθε δείγμα συλλέχθηκαν και συσκευάστηκαν σε δοχεία γεωμετρίας 2. Από το κλάσμα κοκκομετρίας 250 – 500 μm, η ποσότητα που συγκεντρώθηκε επαρκούσε μόνο για τη συσκευασία σε γεωμετρία 5. Από το κλάσμα κοκκομετρίας άνω των 500 μm δεν δημιουργήθηκε δείγμα για γ-φασματοσκοπία, γιατί δε συγκεντρώθηκε αρκετή ποσότητα τέφρας.

Αφού σφραγίστηκαν όλα τα δείγματα καλύπτοντας τα με ένα λεπτό στρώμα κατάλληλης ρητίνης, αποθηκεύτηκαν για κατάλληλο χρόνο (περίπου 25 μέρες) ώστε να αποκατασταθεί η ραδιενεργός ισορροπία. Ο Πίνακας 4.3 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά των δειγμάτων Ι.Τ τα οποία αναλύθηκαν με γ-φασματοσκοπία.

4.5. Ανάλυση γ-φασματοσκοπίας δειγμάτων Ι.Τ

Τα δείγματα που παρασκευάστηκαν από την τέφρα Μεγαλόπολης αναλύθηκαν με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας, ώστε να μελετηθούν τα ραδιολογικά τους χαρακτηριστικά. Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε ο ανιχνευτής XtRa, ο οποίος είναι ένας ανιχνευτής Γερμανίου. Είναι ένας από τους μεγαλύτερους ανιχνευτές αυτού του είδους, με σχετική απόδοση 105%. Η διακριτική ικανότητα του είναι 2.1 keV στα 1.33 MeV. Εκτός του μεγάλου του μεγέθους του που τον καθιστά κατάλληλο για αναλύσεις χαμηλών επιπέδων ραδιενέργειας, το παράθυρό του είναι κατασκευασμένο από Βηρύλλιο ώστε να είναι δυνατή η ανάλυση φωτονίων χαμηλών ενεργειών. Ο ανιχνευτής είναι τοποθετημένος σε θωράκιση της εταιρείας Canberra, κατασκευασμένη από ατσάλι μεγάλης ηλικίας.

Κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση των δειγμάτων προσδιορίστηκαν τα ίδια ισότοπα που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 3 κατά την ανάλυση των οικοδομικών υλικών, δηλαδή ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{210}Pb και ^{238}U . Τα ισότοπα αυτά προσδιορίστηκαν είτε απ' ευθείας μέσω των φωτονίων που εκπέμπουν, είτε μέσω των θυγατρικών τους, όπως αναφέρεται στην Παράγραφο 3.5. Ο Πίνακας 4.4 περιέχει τα χαρακτηριστικά των φασμάτων για όλα τα δείγματα Ι.Τ, τα οποία συσκευάστηκαν κατά την παρούσα ΔΕ. Η ανάλυση των φασμάτων πραγματοποιήθηκε με χρήση του κώδικα SPUNAL.

4.6. Αποτελέσματα αναλύσεων

Ο Πίνακας 4.5 και περιέχει τα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης για τα επιμέρους κοκκομετρικά κλάσματα καθώς και για την αρχική ποσότητα Ι.Τ. χωρίς διαχωρισμό. Οι τιμές ειδικής ραδιενέργειας, συνοδεύονται από συνολική αβεβαιότητα σε επίπεδο 1σ, η οποία υπολογίστηκε από τον τύπο:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{sp}^2 + \sigma_{sr}^2 + \sigma_{fit}^2 + \sigma_{ab}^2} \quad (1)$$

όπου οι επιμέρους αβεβαιότητες υπολογίστηκαν σύμφωνα με την Παράγραφο 3.7.2. Ο Πίνακας 4.6 περιέχει τη σχετική αβεβαιότητα λόγω συνάρτησης βαθμονόμησης απόδοσης του ανιχνευτή XtRa για διάφορες γεωμετρίες πηγής-ανιχνευτή.

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων διαπιστώνεται ότι η ειδική ραδιενέργεια για τα ισότοπα που μελετήθηκαν βρίσκεται εντός των αναμενόμενων ορίων, όπως προκύπτουν από τη βιβλιογραφία και προηγούμενες αντίστοιχες μελέτες του ΕΠΤ-ΕΜΠ (Πέππας 2008). Οι συγκεντρώσεις των ^{234}Th , ^{226}Ra και ^{210}Pb , είναι αρκετά υψηλές, της τάξης του 1 kBq kg^{-1} . Η ειδική ραδιενέργεια του ^{232}Th και του ^{40}K , είναι αρκετά χαμηλότερες, με μικρότερη εκείνη του ^{232}Th , γύρω στην τιμή των 50 Bq kg^{-1} .

Οι ειδικές ραδιενέργειες των κοκκομετρικών κλασμάτων συγκρίνονται μεταξύ τους στα Σχήματα 4.3-4.7. Παρατηρούνται έντονες διαφοροποιήσεις μεταξύ των κοκκομετρικών κλασμάτων, οι οποίες εμφανίζουν συστηματική σχέση με το μέγεθος κόκκου. Για τα ισότοπα ^{234}Th , ^{226}Ra και ^{210}Pb , παρατηρείται μεγαλύτερη συγκέντρωσή τους στα λεπτόκοκκα κλάσματα. Για το ^{40}K , παρατηρήθηκε ότι η ειδική ραδιενέργεια αυξάνεται καθώς το μέγεθος κόκκου αυξάνεται. Θετική συσχέτιση της ειδικής ραδιενέργειας με το μέγεθος κόκκου παρατηρήθηκε και για το ισότοπο ^{232}Th , αν και οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των κοκκομετρικών κλασμάτων είναι μικρές. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν προηγούμενες αναλύσεις δειγμάτων που είχαν παρασκευαστεί από την ίδια ποσότητα Ι.Τ (Πέππας 2008).

Παρατηρώντας τις τιμές ειδικής ραδιενέργειας της Ι.Τ. χωρίς διαχωρισμό, διαπιστώθηκε ότι υπάρχει ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ του ^{238}U και του ^{226}Ra , καθώς και μεταξύ του ^{226}Ra και του ^{210}Pb . Για τα επιμέρους κοκκομετρικά κλάσματα αντίθετα, η ραδιενεργός ισορροπία παρουσιάζεται διαταραγμένη. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι το ^{238}U πλησιάζει τη ραδιενεργό ισορροπία με το ^{226}Ra στα λεπτόκοκκα κλάσματα, ενώ όσο αυξάνεται το μέγεθος κόκκου, το ^{238}U υπολείπεται του ^{226}Ra . Για τα ισότοπα ^{226}Ra και ^{210}Pb , η ραδιενεργός ισορροπία είναι διαταραγμένη σε όλα τα κοκκομετρικά κλάσματα. Όπως επιβεβαιώνεται και από τη σχετική βιβλιογραφία (Karangelos 2004), το ^{226}Ra παρουσιάζει έλλειμμα στα λεπτόκοκκα ενώ ο ^{210}Pb στα χονδρόκοκκα.

4.7. Ισοζύγια ραδιενέργειας

Με γνωστή πλέον τη ραδιενέργεια των διαφόρων κλασμάτων της ιπτάμενης τέφρας, ήταν δυνατό να διερευνηθεί κατά πόσον η τιμή της ραδιενέργειας ενός δείγματος τέφρας, όπως υπολογίζεται για κάθε ισότοπο, από τις μετρήσεις των επιμέρους κλασμάτων της, διαφέρει από τις αντίστοιχες τιμές της ραδιενέργειας όπως

προσδιορίζονται πειραματικά από το πραγματικό δείγμα τέφρας. Για το λόγο αυτό υπολογίστηκε η ειδική ραδιενέργεια των διαφόρων ισοτόπων στην αρχική ποσότητα Ιπτάμενης τέφρας, ως σταθμισμένο άθροισμα των επιμέρους ραδιενεργειών των κοκκομετρικών κλασμάτων. Η στάθμιση έγινε σύμφωνα με το μέσο όρο των τεσσάρων κατανομών που προσδιορίστηκαν στην Παράγραφο 4.4.2, ο οποίος παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.7.

Κατά τον υπολογισμό του ισοζυγίου, η τιμή ειδικής ραδιενέργειας του κοκκομετρικού κλάσματος με διάμετρο >500 μm, εκτιμήθηκε ως ίση με του κλάσματος των 250-500 μm, καθώς δεν πραγματοποιήθηκε ανάλυση του, λόγω ανεπαρκούς διαθέσιμης ποσότητας για δημιουργία δείγματος. Εκτιμάται όμως ότι η παραδοχή αυτή είναι αποδεκτή, λόγω της μικρής συμμετοχής του τελευταίου κλάσματος στο σύνολο της μάζας του δείγματος.

Ο Πίνακας 4.8 περιέχει τις τιμές ειδικής ραδιενέργειας του δείγματος χωρίς διαχωρισμό, καθώς και το σταθμισμένο άθροισμα των κοκκομετρικών κλασμάτων. Από τις τιμές του Πίνακα παρατηρείται ότι, η ανάλυση χωρίς διαχωρισμό δίνει ελαφρά χαμηλότερη συγκέντρωση από το άθροισμα των επιμέρους κλασμάτων, για τα ισότοπα ^{226}Ra και ^{232}Th . Στην περίπτωση του ^{210}Pb , του ^{40}K και του ^{234}Th , η τιμή της ειδικής ραδιενέργειας που προκύπτει από την ανάλυση χωρίς διαχωρισμό είναι ελαφρώς υψηλότερη της τιμής που προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους κοκκομετρικών κλασμάτων.

Πραγματοποιήθηκε στατιστικό τεστ, ώστε να διαπιστωθεί αν η διαφορές αυτές είναι σημαντικές. Η σύγκριση των δύο τιμών ειδικής ραδιενέργειας, πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια της μεταβλητής σύγκρισης u :

$$u = \frac{R_1 - R_2}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad (2)$$

όπου R_1, R_2 , οι τιμές ειδικής ραδιενέργειας για κάθε ισότοπο, και σ_1, σ_2 , τα αντίστοιχα σφάλματα. Οι τιμές θεωρείται ότι διαφέρουν σημαντικά όταν $|u| > 1,96$. Ο Πίνακας 4.8 περιέχει τις τιμές R_1, R_2 και τις μεταβλητές σύγκρισης u για κάθε ραδιοϊσότοπο. Όπως προκύπτει από τις μεταβλητές σύγκρισης, για κανένα από τα ισότοπα που μελετήθηκαν, η διαφορά των δύο αποτελεσμάτων δεν είναι στατιστικά σημαντική.

Σε προηγούμενη ΔΕ (Πέππας 2008) στην οποία είχε ακολουθηθεί παρόμοια διαδικασία διαχωρισμού κοκκομετρικών κλασμάτων, παρατηρήθηκαν ενδείξεις αποκλίσεων κατά τον υπολογισμό του ισοζυγίου ραδιενέργειας, για Ιπτάμενη Τέφρα Μεγαλόπολης. Οι διαφορές αυτές μάλιστα ήταν στατιστικά σημαντικές μόνο για το ισότοπο ^{40}K . Για το λόγο αυτό, είχε διατυπωθεί η ανάγκη περαιτέρω μελέτης, όσον αφορά στην επίδραση της ανομοιογένειας, ιδιαίτερα επειδή η τιμή ραδιενέργειας που προέκυψε ως άθροισμα των επιμέρους κοκκομετρικών κλασμάτων ήταν μικρότερη από την τιμή του δείγματος χωρίς διαχωρισμό, για όλα τα ισότοπα. Στην παρούσα εργασία δεν παρατηρούνται παρόμοια φαινόμενα, εκτιμάται επομένως ότι η προσεκτική προετοιμασία του δείγματος έχει εξασφαλίσει την αντιπροσωπευτικότητα.

4.8. Διερεύνηση της επίδρασης της κοκκομετρίας Ι.Τ στη γ-φασματοσκοπική ανάλυση

Από τα πειράματα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως διαπιστώνεται ότι, πάρα τους προβληματισμούς που είχαν διατυπωθεί στο παρελθόν, δεν κατέστη δυνατό να διαπιστωθεί επίδραση της ανομοιογένειας στα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης. Μετά την παρατήρηση αυτή, πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων για να διαπιστωθεί αν είναι δυνατό, υπό κατάλληλες συνθήκες να υπάρξουν τέτοιες επιδράσεις. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον από την άποψη αυτή παρουσιάζει η ανάλυση του ^{210}Pb , καθώς έχει έντονη τάση να συγκεντρώνονται στα λεπτόκοκκα σωματίδια, σε μεγαλύτερο βαθμό από μη πτητικά ραδιοϊσότοπα, όπως ^{228}Th και ^{40}K , και ταυτόχρονα εκπέμπει φωτόνια χαμηλών ενεργειών, τα οποία αναμένεται να είναι πιο ευαίσθητα σε φαινόμενα ανομοιογένειας. Στην περίπτωση αυτή, αν κατά την ανάλυση ενός δείγματος, για κάποιο λόγο, το λεπτόκοκκο κλάσμα το οποίο παρουσιάζει αυξημένη συγκέντρωση σε ^{210}Pb βρεθεί πλησιέστερα στον ανιχνευτή, τότε αναμένεται κατά την ανάλυση του δείγματος να προσδιορισθεί υψηλότερη τιμή της ραδιενέργειας ^{210}Pb από την πραγματική.

4.8.1. Εξέταση της δόνησης του συσκευασμένου δείγματος

Είναι γνωστό ότι, υπό την επίδραση δόνησης, τα λεπτόκοκκα σωματίδια μιας ανομοιογενούς ελεύθερα ρέουσας σκόνης έχουν την τάση να συγκεντρώνονται στη βάση του δοχείου που την περιέχει. Αφού δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές στατιστικά

διαφοροποιήσεις του σταθμισμένου αθροίσματος των κοκκομετρικών κλασμάτων από το δείγμα τέφρας χωρίς διαχωρισμό, πραγματοποιήθηκε ένα απλό πείραμα για να διαπιστωθεί αν τέτοια φαινόμενα μπορεί να εμφανιστούν στα συσκευασμένα δείγματα.

Το δείγμα PM002AZ δονήθηκε με το χέρι για διάστημα μερικών λεπτών, ώστε να πραγματοποιηθεί ανακατανομή των κόκκων και μετακίνηση των λεπτόκοκκων στη βάση του δοχείου. Το δείγμα αναλύθηκε εκ νέου (φάσμα PM002AZD) και συγκρίθηκε και πάλι με το σταθμισμένο άθροισμα των κοκκομετρικών κλασμάτων. Ο Πίνακας 4.9 περιέχει τις τιμές ειδικής ραδιενέργειας που προέκυψαν από την ανάλυση του φάσματος PM002AZD. Στον ίδιο Πίνακα έχουν υπολογιστεί οι μεταβλητές σύγκρισης u και συμπεραίνουμε ότι ούτε με δόνηση του δείγματος PM002AZ1 δεν παρουσιάζονται στατιστικά σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ του δείγματος χωρίς διαχωρισμό και του αθροίσματος των επιμέρους κλασμάτων.

4.8.2. Εξέταση ακραίας περίπτωσης διαστρωμάτωσης

Για να επιβεβαιωθεί ότι είναι δυνατόν, έστω υπό μη ρεαλιστικές συνθήκες, να παρατηρηθεί η επίδραση της ανομοιογένειας, δημιουργήθηκε ένα δείγμα με ακραία διαστρωμάτωση κατά μέγεθος. Το δείγμα αυτό παρασκευάστηκε ως εξής:

- Από το δείγμα 2 του Πίνακα 4.1, τοποθετήθηκε ποσότητα βάρους 283.73 gr, στην συσκευή ανάλυσης κοκκομετρίας, ώστε να διαχωριστούν τα διαφορετικά κλάσματα. Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί περίπου σε ένα τυποποιημένο δοχείο γεωμετρίας 2.
- Στη συνέχεια, τα κλάσματα συλλέχθηκαν και τοποθετήθηκαν κατά σειρά αυξανόμενου μεγέθους κόκκου σε δοχείο γεωμετρίας 2, έτσι ώστε στη βάση του δοχείου να βρίσκεται το πιο λεπτόκοκκο κλάσμα (<32 μm).

Παρατηρήθηκε ότι δεν χώρεσαν τελικά όλα τα κοκκομετρικά κλάσματα στο δοχείο γεωμετρίας 2, καθώς το δοχείο είχε ήδη πληρωθεί πριν ακόμα προστεθούν τα κλάσματα μεγέθους 250-500 μm , >500 μm και μέρους του 125-250 μm . Η παρατήρηση αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αφού ο υπολογισμός της ποσότητας που διαχωρίστηκε σε κλάσματα, είχε πραγματοποιηθεί έτσι ώστε να πληρωθεί ακριβώς το δοχείο τυποποιημένης γεωμετρίας 2. Το φαινόμενο αυτό

οφείλεται στο γεγονός ότι, όταν τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα είναι αναμειγμένα, τα μικρότερα σωματίδια παρεμβάλλονται στα κενά μεταξύ των μεγαλύτερων και επιτρέπουν πιο αποδοτική πλήρωση του διαθέσιμου χώρου.

Το τελικό δείγμα που παρασκευάστηκε έχει κωδική ονομασία PM002AZ4. Ο Πίνακας 4.10 περιέχει την ποσότητα τέφρας κάθε κλάσματος που αρχικά υπολογίστηκε ότι πρέπει να τοποθετηθεί στο δοχείο και τις ποσότητες που τελικά τοποθετήθηκαν.

Ο Πίνακας 4.11 περιέχει τις τιμές ειδικής ραδιενέργειας του διαστρωματωμένου δείγματος. Επειδή το δείγμα δεν αποθηκεύτηκε ώστε να αποκατασταθεί ραδιενεργός ισορροπία, μελετήθηκαν μόνο τα ισότοπα ^{40}K , ^{210}Pb και ^{238}U . Οι τιμές αυτές δεν ήταν δυνατό να συγκριθούν απευθείας με τις τιμές των κοκκομετρικών κλασμάτων αφού στο διαστρωματωμένο δείγμα υπάρχουν διαφορετικά ποσοστά μάζας σε κάθε κλάσμα. Από τα ποσοστά μάζας που έχουν τοποθετηθεί στο διαστρωματωμένο δείγμα έγινε αναγωγή των τιμών ραδιενέργειας των επιμέρους κλασμάτων και έτσι υπολογίστηκε το σταθμισμένο άθροισμα με το οποίο πραγματοποιήθηκε η σύγκριση.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της φασματοσκοπικής ανάλυσης παρατηρείται ότι το διαστρωματωμένο δείγμα παρουσιάζει έντονες αποκλίσεις από το άθροισμα των κλασμάτων στο ισότοπο του ^{210}Pb , του οποίου οι τιμές ραδιενέργειας στο PM002AZ4, είναι αυξημένες περίπου 60% σε σχέση με το σταθμισμένο άθροισμα. Η παρατήρηση αυτή είναι αναμενόμενη, αφού ο ^{210}Pb , έχει την τάση να συγκεντρώνεται στα λεπτόκοκκα κλάσματα, τα οποία βρίσκονται στη βάση του δοχείου στο συγκεκριμένο δείγμα, άρα και πιο κοντά στο παράθυρο του ανιχνευτή. Όσον αφορά τα υπόλοιπα ισότοπα, οι τιμές του δείγματος με ακραία διαστρωμάτωση είναι υψηλότερες από το άθροισμα των κοκκομετρικών κλασμάτων σε ποσοστό από 1-3%, ενδιαφέρον όμως παρουσιάζει το γεγονός ότι, ακόμα και στην περίπτωση αυτή, οι διαφορές δεν είναι στατιστικά σημαντικές.

Από την ανωτέρω πειραματική διαδικασία προκύπτει το συμπέρασμα ότι είναι δυνατό να παρατηρηθεί σημαντική επίδραση της ανομοιογένειας της κοκκομετρίας περιβαλλοντικών υλικών στη γ-φασματοσκοπική ανάλυση, αν και το φαινόμενο παρατηρήθηκε για μη ρεαλιστικό δείγμα. Ωστόσο, η επίδραση παρατηρείται κυρίως

στον ^{210}Pb , όπου υπάρχουν και οι μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις στις ειδικές ραδιενέργειες των κοκκομετρικών κλασμάτων.

4.8.3. Εξέταση δείγματος με ανακατανομή κόκκων με δόνηση

Η παρασκευή του διαστρωματωμένου δείγματος δεν αποτελεί μία ρεαλιστική περίπτωση και όπως αναμενόταν παρατηρήθηκαν έντονες διαφοροποιήσεις στα ισοζύγια ραδιενέργειας. Κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθεί μία πιο πιθανή περίπτωση ανακατανομής κόκκων.

Για το λόγο αυτό συσκευάστηκε δείγμα γεωμετρίας 2 που προέκυψε από το δείγμα 6 του Πίνακα 4.1. Το δείγμα που προέκυψε, με κωδική ονομασία PM002AZ5 και καθαρό βάρος ίσο με 276.25 gr, τοποθετήθηκε στη βάση της συσκευής ανάλυσης κοκκομετρίας, με ρύθμιση του πλάτους ίσο με 1 mm, για χρόνο 15 min, έτσι ώστε να αναδευτεί και να πραγματοποιηθεί ανακατανομή των κόκκων και μετακίνηση των λεπτόκοκκων κλασμάτων προς τη βάση του δοχείου.

Η παρασκευή αυτού του δείγματος, αποτελεί μια πιο ρεαλιστική εκδοχή του δείγματος με ακραία διαστρωμάτωση, καθώς τα δείγματα είναι πιθανό να ανακινηθούν κατά την μεταφορά ή την αποθήκευση, με αποτέλεσμα την συγκέντρωση των λεπτόκοκκων κλασμάτων στη βάση του δοχείου. Στην περίπτωση αυτή τα λεπτόκοκκα κλάσματα βρίσκονται και πιο κοντά στο παράθυρο του ανιχνευτή. Άρα μετρώνται ως υψηλότερες οι ραδιενέργειες των ισοτόπων που έχουν την τάση να συγκεντρώνονται στα λεπτόκοκκα κλάσματα.

Ο Πίνακας 4.12 περιέχει τις τιμές ειδικής ραδιενέργειας του δείγματος με ανακατανομή κόκκων, οι οποίες συγκρίθηκαν με το άθροισμα των επιμέρους κλασμάτων. Στο δείγμα παρατηρήθηκαν με χρήση της συσκευής ανάλυσης κοκκομετρίας, μικρές αποκλίσεις. Μόνο στην περίπτωση του ^{210}Pb η ειδική ραδιενέργεια του δείγματος είναι υψηλότερη από το άθροισμα των κλασμάτων. Σε κάθε περίπτωση, οι διαφορές που παρατηρήθηκαν δεν είναι στατιστικά σημαντικές.

4.8.4. Λειοτρίβιση Ιπτάμενης Τέφρας

Με βάση τα ανωτέρω πειράματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι η λειοτρίβιση ως μέθοδος προετοιμασίας δειγμάτων πριν την ραδιολογική ανάλυση προκειμένου να οδηγήσει σε ομογενοποιημένα δείγματα, δεν είναι σε όλες τις περιπτώσεις

απαραίτητη. Στα αποτελέσματα της ανάλυσης των κοκκομετρικών κλασμάτων δεν παρουσιάστηκαν σημαντικές αποκλίσεις στα ισοζύγια ραδιενέργειας, δηλαδή η λειοτρίβιση δεν ήταν απαραίτητη για τα συγκεκριμένα δείγματα.

Παρόλα αυτά πραγματοποιήθηκε μία παραμετρική μελέτη λειοτρίβισης Ιπτάμενης Τέφρας, για λόγους πληρότητας και με σκοπό να εξεταστεί η συμπεριφορά της κατά τη διαδικασία λειοτρίβισης. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής μπορούν να φανούν χρήσιμα σε επόμενα πειράματα.

Το δείγμα που υπέστη λειοτρίβιση παρασκευάστηκε ως εξής: αρχικά λήφθηκε ποσότητα 200.40 gr από το Δείγμα 8 του Πίνακα 4.1. Η ποσότητα τοποθετήθηκε στη συσκευή ανάλυσης κοκκομετρίας (αρχείο EasyiSieve, INITIAL_023 και REPEAT_051). Ο Πίνακας 4.13 περιέχει τα ποσοστά μάζας κάθε κοκκομετρικού κλάσματος του Δείγματος 8.

Στη συνέχεια, όλα τα κλάσματα συλλέχθηκαν και τοποθετήθηκαν μαζί στο δοχείο του πλανητικού μύλου για χρόνο ίσο με 3 min, με χρήση των σφαιρών διαμέτρου 20 mm, με ρυθμό περιστροφής ίσο με 200 rpm. Οι ρυθμίσεις αυτές επιλέχθηκαν με βάση τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές λειτουργίας του μύλου. Στόχος της διαδικασίας λειοτρίβισης ήταν να μειωθεί η κοκκομετρία του δείγματος κάτω από τα 63 μm.

Μετά την ολοκλήρωση της λειοτρίβισης πραγματοποιήθηκε ανάλυση κοκκομετρίας του δείγματος (αρχείο INITIAL_024) και συγκρίθηκε με την κατανομή τέφρας του Δείγματος 8. Παρατηρήθηκε ελάχιστη μείωση του ποσοστού μάζας των χονδρόκοκκων κλασμάτων, πράγμα που σημαίνει ότι απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος λειοτρίβισης. Έτσι, η τέφρα τοποθετήθηκε ξανά στο δοχείο του επαναλήφθηκε η λειοτρίβιση με τις ίδιες ρυθμίσεις, αλλά για χρόνο ίσο με 6 min. Πραγματοποιήθηκε και πάλι ανάλυση κοκκομετρίας (αρχείο INITIAL_025) , αλλά και πάλι δεν παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση των λεπτόκοκκων κλασμάτων. Στο Σχήμα 4.8 συγκρίνεται η κατανομή κοκκομετρίας μετά από λειοτρίβιση 3 min με αυτήν μετά από λειοτρίβιση 9 min συνολικά. Στο ίδιο Σχήμα φαίνεται και η αρχική κατανομή του Δείγματος 8.

Κρίθηκε έτσι απαραίτητη η δοκιμή λειοτρίβισης με χρήση των μεγαλύτερων σφαιρών, διαμέτρου 30 mm, για χρόνο ίσο με 9 min. Για την δοκιμή αυτή

χρησιμοποιήθηκε υπόλοιπο ιπτάμενης τέφρας από το δείγμα 8, βάρους 200 gr. Τοποθετήθηκε ίσο φορτίο με την προηγούμενη δοκιμή, και υπέστη λειοτρίβιση για συνολικό χρόνο 9 min, ώστε να μπορεί να συγκριθεί άμεσα η αποδοτικότητα των δύο μεγεθών σφαιρών. Το Σχήμα 4.9 παρουσιάζει τη σύγκριση της αποτελεσματικότητας των δύο ειδών σφαιρών. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη σύγκριση της ανάλυσης κοκκομετρίας, οι μικρότερες σφαίρες είναι πιο αποδοτικές, γεγονός που επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν με άμμο.

Επειδή, όπως παρατηρήθηκε, παραμένει αρκετά μεγάλη ποσότητα στα κόσκινα άνω των 63 μm , είναι απαραίτητη η εύρεση ενός αποδοτικού τρόπου λειοτρίβισης της τέφρας. Για να διευκολυνθεί η διαδικασία λειοτρίβισης αποφασίσθηκε να δημιουργηθεί δείγμα έχοντας αφαιρέσει τα λεπτόκοκκα κλάσματα μεγέθους < 63 μm .

Αρχικά, λήφθηκε ποσότητα ιπτάμενης τέφρας από το Δείγμα 4, και τοποθετήθηκε στα κόσκινα, ώστε να προσδιοριστεί η κοκκομετρία του αρχικού δείγματος, την οποία περιέχει ο Πίνακας 4.14. Επειδή είναι επιθυμητό να δημιουργηθεί δείγμα βάρους 200 gr κοκκομετρίας > 63 μm , υπολογίσθηκε από τα ποσοστά μάζας του Πίνακα 4.14, ότι πρέπει να τοποθετηθεί ποσότητα 357 gr στην συσκευή ανάλυσης κοκκομετρίας. Τελικά, προστέθηκε ολόκληρη η ποσότητα του Δείγματος 4, βάρους 444.25 gr.

Από το σύνολο της ποσότητας που αναλύθηκε, συλλέχθηκαν τα κοκκομετρικά κλάσματα άνω των 63 μm , συνολικού βάρους 248 gr. Όπως ήδη αναφέρθηκε, λήφθηκαν μόνο τα 200 gr, ώστε η λειοτρίβιση να πραγματοποιηθεί με το ίδιο φορτίο σε σχέση με την προηγούμενη δοκιμή και να είναι άμεσα συγκρίσιμα τα αποτελέσματα. Το δείγμα τοποθετήθηκε για χρόνο 9 min στο μύλο λειοτρίβισης με τις ίδιες ρυθμίσεις. Πραγματοποιήθηκε και πάλι ανάλυση κοκκομετρίας και προέκυψαν τα ποσοστά μάζας σε κάθε κοκκομετρικό κλάσμα. Η κατανομή αυτή δεν είναι δυνατό να συγκριθεί απευθείας με την αρχική κατανομή του Δείγματος 4 αφού το δείγμα πριν τοποθετηθεί στο μύλο περιέχει μόνο κόκκους μεγέθους >63 μm . Έτσι, από τα ποσοστά μάζας του αρχικού Δείγματος 4 υπολογίστηκε το ποσοστό των σωματιδίων μεγέθους <63 μm και πραγματοποιήθηκε αναγωγή της αρχικής κατανομής.

Από τις τιμές αυτές σχεδιάστηκε διάγραμμα σύγκρισης των δύο κατανομών πριν και μετά τη λειοτρίβιση, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 4.10. Διαπιστώθηκε ότι ούτε η αφαίρεση των λεπτόκοκκων κλασμάτων συντέλεσε σημαντικά στην αποδοτικότητα της λειοτρίβισης, για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Κρίθηκε έτσι απαραίτητη η αύξηση του χρόνου λειοτρίβισης, και τοποθετήθηκε το ίδιο δείγμα στον πλανητικό μύλο για χρόνο ίσο με 30 min. Και πάλι παρατηρήθηκε αρκετή ποσότητα υλικού με διάμετρο κόκκου μεγαλύτερη των 63 μm.

Για τους χρόνους για τους οποίους πραγματοποιήθηκαν δοκιμές λειοτρίβισης, υπολογίστηκε από τις αναλύσεις κοκκομετρίας, το ποσοστό των σωματιδίων με διάμετρο άνω των 63 μm. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία της παραγράφου 2.5.3.2 υπολογίστηκε η εξής εκθετική καμπύλη προσαρμογής:

$$y = 98.74e^{-0.0203x} \quad (3)$$

όπου y το ποσοστό μάζας των σωματιδίων μεγέθους άνω των 63 μm και x ο χρόνος λειοτρίβισης σε min. Η σχέση (3) εφαρμόστηκε με την παραδοχή ότι το υλικό πριν λειοτριβηθεί αποτελείται μόνο από κόκκους $> 63 \mu\text{m}$.

Από τη συνάρτηση (3) υπολογίστηκε ο απαιτούμενος χρόνος λειοτρίβισης, ώστε το ποσοστό μάζας ιπτάμενης τέφρας διαμέτρου πάνω από τα 63 μm, να μειωθεί περίπου στο 0.1% της συνολικής μάζας. Ο χρόνος αυτός εκτιμήθηκε περίπου ίσος με 2 ώρες. Ακολουθώντας, τοποθετήθηκε, η ίδια ποσότητα ιπτάμενης τέφρας βάρους 200 gr στον μύλο για χρόνο 90 min, αφού η συγκεκριμένη ποσότητα έχει ήδη λειοτριβηθεί για χρόνο ίσο με 30 min. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ανάλυση κοκκομετρίας.

Το Σχήμα 4.11 παρουσιάζει την κοκκομετρική κατανομή της τέφρας, όπως προσδιορίστηκε μετά από λειοτρίβιση συνολικού χρόνου 2 ωρών. Εκτιμάται ωστόσο ότι η κατανομή αυτή δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, παρατήρηση που ενισχύεται από το γεγονός ότι η αθροιστική κατανομή δεν έχει μορφή ευθείας σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα. Παρατηρήθηκε οπτικά, ότι παρά το ότι έχει επιτευχθεί η μείωση της κοκκομετρίας κάτω από το επιθυμητό όριο, αρκετή ποσότητα τέφρας παραμένει στα κόσκινα όλων των μεγεθών. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στην δημιουργία ενός στρώματος τέφρας πολύ υψηλής λεπτότητας στην επιφάνεια του κόσκινου, το οποίο συμπεριφέρεται ως συσσωμάτωμα και εμποδίζει την τέφρα να περάσει από τις οπές του κόσκινου.

Η επεξεργασμένη στο μύλο ποσότητα, λόγω απωλειών κατά των καθαρισμό των κόσκινων, είχε πλέον μάζα 196.7 gr. Στη συνέχεια, προστέθηκε ποσότητα μεγέθους < 63 μm η οποία είχε προκύψει από τον διαχωρισμό του Δείγματος 4, ώστε να αντιστοιχεί το ποσοστό μάζας < 63 μm στην αναλογία του αρχικού δείγματος. Η μάζα του υλικού δείγματος προέκυψε τελικά ίση με 353.9 gr. Από την ποσότητα αυτή δημιουργήθηκε δείγμα γεωμετρίας 2 (PM002AZ6), στο οποίο πραγματοποιήθηκε γ-φασματοσκοπική ανάλυση.

Παρατηρείται ότι με τη λειοτρίβιση, η φαινόμενη πυκνότητα της I.T. αυξήθηκε από 0.974 σε 1.255. Το γεγονός αυτό επιδρά θετικά στην ανάλυση, καθώς αυξάνει την ποσότητα του δείγματος που παρουσιάζεται στον ανιχνευτή.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της φασματοσκοπικής ανάλυσης του δείγματος με αυτά των επιμέρους κοκκομετρικών κλασμάτων προκύπτει το συμπέρασμα ότι δεν παρατηρούνται στατιστικά σημαντικές αποκλίσεις. Ο Πίνακας 4.15 περιέχει τις τιμές της μεταβλητής σύγκρισης u , η απόλυτη τιμή των οποίων είναι κάτω του ορίου σημαντικότητας 1.96.

Από την παραμετρική μελέτη της λειοτρίβισης I.T, και συγκεκριμένα για την λειοτρίβιση μεγάλης διάρκειας, προέκυψε το πρόβλημα της δυσκολίας κοκκομετρικής ανάλυσης υλικών πολύ υψηλής λεπτότητας. Το κοσκίνισμα τέτοιων υλικών μπορεί να διευκολυνθεί με τη χρήση βοηθημάτων κοσκινίσματος, όπως ειδικές σφαίρες μικρού μεγέθους οι οποίες τοποθετούνται στα κόσκινα μαζί με το υλικό. Παρόλα αυτά, η αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσης ΔΕ, όμως μπορεί να διερευνηθεί σε επόμενες μελέτες.

Πίνακες Κεφαλαίου

Πίνακας 4.1: Βάρη δειγμάτων 1-8 που προέκυψαν από την αρχική ποσότητα τέφρας Μεγαλόπολης

| Δείγμα | Βάρος (gr) |
|--------|------------|
| 1 | 386 |
| 2 | 596 |
| 3 | 494 |
| 4 | 446 |
| 5 | 456 |
| 6 | 496 |
| 7 | 475 |
| 8 | 475 |

Πίνακας 4.2: Κοκκομετρική κατανομή δειγμάτων 1,3,5,7

| Κοκκομετρικό κλάσμα | Ποσοστό Μάζας(%) | | | |
|---------------------|------------------|----------|----------|----------|
| | Δείγμα 1 | Δείγμα 3 | Δείγμα 5 | Δείγμα 7 |
| <32μm | 19.8 | 17.6 | 17.5 | 17.3 |
| 32-45μm | 11.2 | 13.1 | 13.4 | 12.9 |
| 45-63μm | 12.8 | 12.3 | 12.8 | 12.6 |
| 63-125μm | 27.0 | 26.4 | 26.7 | 27.4 |
| 125-250μm | 22.6 | 23.9 | 22.9 | 23.0 |
| 250-500μm | 5.8 | 6.1 | 6.0 | 6.2 |
| >500μm | 0.8 | 0.7 | 0.7 | 0.7 |

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά δειγμάτων ιπτάμενης τέφρας Μεγαλόπολης που αναλύθηκαν με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας

| A/A | Κωδικός δείγματος | Κλάσμα κοκκομετρίας | Γεωμετρία | Μάζα (gr) |
|-----|-------------------|---------------------|-----------|------------|
| 1 | PM002AB1 | <32μm | 2 | 275.51 |
| 2 | PM002BC1 | 32-45μm | 2 | 246.45 |
| 3 | PM002CD1 | 45-63μm | 2 | 236.89 |
| 4 | PM002DE1 | 63-125μm | 2 | 230.06 |
| 5 | PM002EF1 | 125-250μm | 2 | 209.62 |
| 6 | PM002FG1 | 250-500μm | 5 | 57.91 |
| 7 | PM002AZ1 | Χωρίς διαχωρισμό | 2 | 277.44 |

**Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά φασμάτων γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης
δειγμάτων Ι.Τ**

| Κωδικός δείγματος | Γεωμετρία | Φάσμα | Θέση Φάσματος |
|--------------------------|------------------|--------------|----------------------|
| PM002AB1 | 2 | PM002AB1A | 11/2.125 |
| PM002BC1 | 2 | PM002BC1A | 11/2.131 |
| PM002CD1 | 2 | PM002CD1A | 11/3.53 |
| PM002DE1 | 2 | PM002DE1A | 11/2.143 |
| PM002EF1 | 2 | PM002EF1A | 11/2.148 |
| PM002FG1 | 5 | PM002FG1A | 11/2.155 |
| PM002AZ1 | 2 | PM002AZ1B | 11/2.165 |
| PM002AZ1(δόνηση) | 2 | PM002AZ1D | 11/2.184 |
| PM002AZ4 | 2 | PM002AZ4A | 11/2.224 |
| PM002AZ5 | 2 | PM002AZ5A | 11/2.253 |
| PM002AZ6 | 2 | PM002AZ6A | 11/2.254 |

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης Ιπτάμενης Τέφρας Μεγαλόπολης

| Κοκκομετρικό κλάσμα | Ειδική ραδιενέργεια (Bq kg ⁻¹ , ± 1σ) | | | | |
|---------------------|--|-------------------|-----------------|-------------------|------------------|
| | ²²⁶ Ra | ²³² Th | ⁴⁰ K | ²¹⁰ Pb | ²³⁸ U |
| <32μm | 1028±34 | 48.7±1.67 | 447±15 | 1671.8±95.45 | 1046.8±56.95 |
| 32-45μm | 1037±34 | 49.7±1.73 | 475±16 | 1129.8±66.73 | 1040.5±58.79 |
| 45-63μm | 1005±33 | 50.6±1.76 | 505±17 | 887.1±54.24 | 935.2±51.31 |
| 63-125μm | 993±32 | 52.6±1.86 | 538±19 | 691.9±46.81 | 888.8±49.79 |
| 125-250μm | 944±31 | 52.2±1.82 | 550±18 | 512.6±34.33 | 791.6±43.43 |
| 250-500μm | 778±31 | 49.6±2.07 | 580±24 | 462.2±31.47 | 656.4±42.46 |
| >500μm | 778±31 | 49.6±2.07 | 580±24 | 462.2±31.47 | 656.4±42.46 |
| PM002AZ1B | 964±32 | 50.7±1.18 | 521±18 | 926.4±57.07 | 906.3±50.18 |

Πίνακας 4.6: Σχετική αβεβαιότητα λόγω συνάρτησης βαθμονόμησης απόδοσης του ανιχνευτή XtRa για διάφορες γεωμετρίες πηγής-ανιχνευτή, σε επίπεδο 1σ

| Γεωμετρία | Σχετική αβεβαιότητα (1σ) | |
|-----------|--------------------------|-------------|
| | E<279.19keV | E>279.19keV |
| 2 | 4.32% | 2.85% |
| 5 | 5.47% | 3.62% |

Πίνακας 4.7: Αρχική κατανομή Ι.Τ

| Κοκκομετρικό κλάσμα | Ποσοστό Μάζας(%) |
|----------------------------|-------------------------|
| <32μm | 18.1 |
| 32-45μm | 12.7 |
| 45-63μm | 12.6 |
| 63-125μm | 26.9 |
| 125-250μm | 23.1 |
| 250-500μm | 6.0 |
| >500μm | 0.6 |

Πίνακας 4.8: Στατιστικός έλεγχος των ισοζυγίων ειδικής ραδιενέργειας για τις αναλύσεις Ιπτάμενης τέφρας Μεγαλόπολης για το δείγμα PM002AZ1

| Ισότοπο | Ειδική Ραδιενέργεια (Bq kg⁻¹) | Μεταβλητή Σύγκρισης u | |
|-------------------------|---|--------------------------------|------|
| | Σταθμισμένο άθροισμα | PM002AZ1B | |
| ²²⁶Ra | 980±14 | 964±32 | 0.46 |
| ²³²Th | 50.9±0.79 | 50±1.2 | 0.13 |
| ²¹⁰Pb | 892±26 | 926±57 | 0.56 |
| ²³⁸U | 904±22 | 906±50 | 0.04 |
| ⁴⁰K | 514±7.9 | 521±18 | 0.33 |

Πίνακας 4.9: Στατιστικός έλεγχος των ισοζυγίων ειδικής ραδιενέργειας για τις αναλύσεις Ιπτάμενης τέφρας Μεγαλόπολης για το δείγμα PM002AZ1 (δόνηση)

| Ισότοπο | Ειδική Ραδιενέργεια (Bq kg ⁻¹) | | Μεταβλητή Σύγκρισης u |
|-------------------|--|-----------|------------------------|
| | Σταθμισμένο άθροισμα | PM002AZ1D | |
| ²²⁶ Ra | 980±14 | 956±31 | 0.69 |
| ²³² Th | 50.9±0.79 | 51±1.7 | 0.23 |
| ²¹⁰ Pb | 892±26 | 921±57 | 0.47 |
| ²³⁸ U | 904±22 | 847±50 | 1.09 |
| ⁴⁰ K | 514±7.9 | 516±18 | 0.05 |

Πίνακας 4.10: Μάζα κοκκομετρικών κλασμάτων στο δείγμα με ακραία περίπτωση διαστρωμάτωσης

| Κοκκομετρικό Κλάσμα | Μάζα (gr) | |
|---------------------|---------------------|---------------------------|
| | Αρχικός υπολογισμός | Ποσότητα που τοποθετήθηκε |
| <32μm | 49.65 | 49.65 |
| 32-45μm | 38.02 | 38.02 |
| 45-63μm | 36.32 | 36.32 |
| 63-125μm | 75.76 | 75.38 |
| 125-250μm | 64.97 | 44.36 |
| 250-500μm | 17.02 | 0 |
| > 500μm | 1.99 | 0 |

Πίνακας 4.11: Στατιστικός έλεγχος των ισοζυγίων ειδικής ραδιενέργειας για τις αναλύσεις Ιπτάμενης τέφρας Μεγαλόπολης για το διαστρωματωμένο δείγμα PM002AZ4

| Ισότοπο | Ειδική Ραδιενέργεια (Bq kg ⁻¹) | Μεταβλητή Σύγκρισης u |
|---------------------------------------|--|------------------------|
| Σταθμισμένο άθροισμα PM002AZ4A | | |
| ²¹⁰ Pb | 955±28 | 1505±86 |
| ²³⁸ U | 932±23 | 962±53 |
| ⁴⁰ K | 506±8.3 | 510±17 |

Πίνακας 4.12: Στατιστικός έλεγχος των ισοζυγίων ειδικής ραδιενέργειας για τις αναλύσεις Ιπτάμενης τέφρας Μεγαλόπολης για το δείγμα PM002AZ5

| Ισότοπο | Ειδική Ραδιενέργεια (Bq kg ⁻¹) | Μεταβλητή Σύγκρισης u |
|---------------------------------------|--|------------------------|
| Σταθμισμένο άθροισμα PM002AZ5A | | |
| ²¹⁰ Pb | 892±26 | 913±58 |
| ²³⁸ U | 904±22 | 850±49 |
| ⁴⁰ K | 514±7.9 | 501±18 |

Πίνακας 4.13: Κοκκομετρική κατανομή Δείγματος 8

| Κοκκομετρικό Κλάσμα | Μάζα (gr) |
|----------------------------|------------------|
| <32 μm | 21.5 |
| 32-45 μm | 9.8 |
| 45-63 μm | 13.1 |
| 63-125 μm | 27.1 |
| 125-250 μm | 21.8 |
| 250-500 μm | 6.0 |
| > 500 μm | 0.6 |

Πίνακας 4.14: Κοκκομετρική κατανομή Δείγματος 4

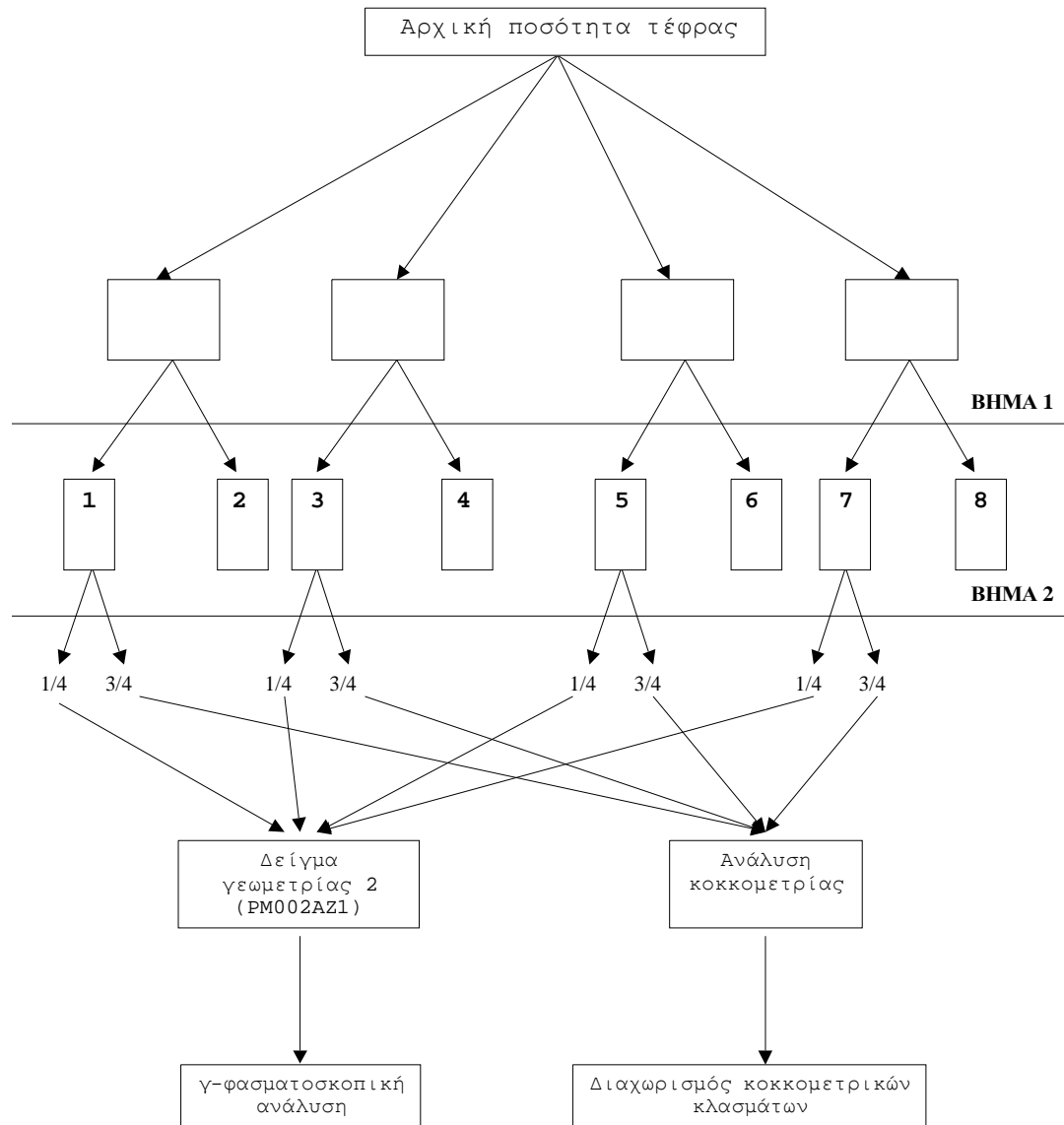
| Κοκκομετρικό Κλάσμα | Μάζα (gr) |
|----------------------------|------------------|
| <32 μm | 21.5 |
| 32-45 μm | 10 |
| 45-63 μm | 12.5 |
| 63-125 μm | 26.5 |
| 125-250 μm | 22 |
| 250-500 μm | 6.5 |
| > 500 μm | 1.0 |

Πίνακας 4.15: Στατιστικός έλεγχος ισοζυγίου ειδικής ραδιενέργειας για το δείγμα PM002AZ6

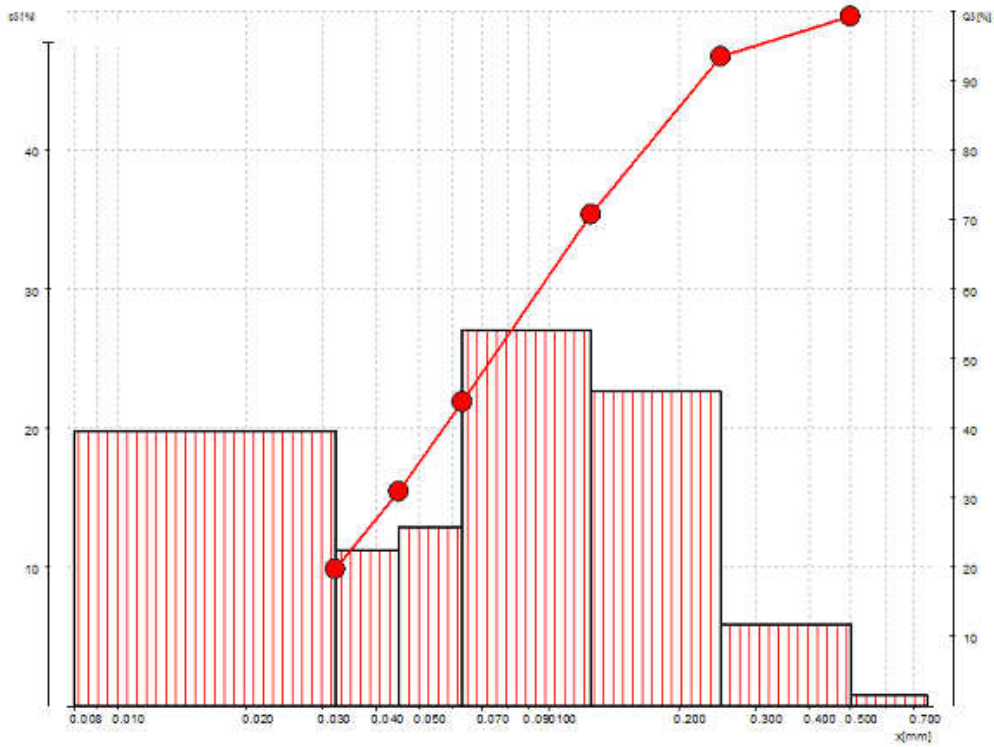
| Ισότοπο | Ειδική Ραδιενέργεια (Bq kg⁻¹) | | Μεταβλητή Σύγκρισης u |
|-------------------|---|--------|--------------------------------|
| | Σταθμισμένο άθροισμα PM002AZ6A | | |
| ²¹⁰ Pb | 891±26 | 917±56 | 0.42 |
| ²³⁸ U | 903±22 | 842±47 | 1.02 |
| ⁴⁰ K | 514±7.9 | 495±17 | 1.05 |

Σχήματα Κεφαλαίου

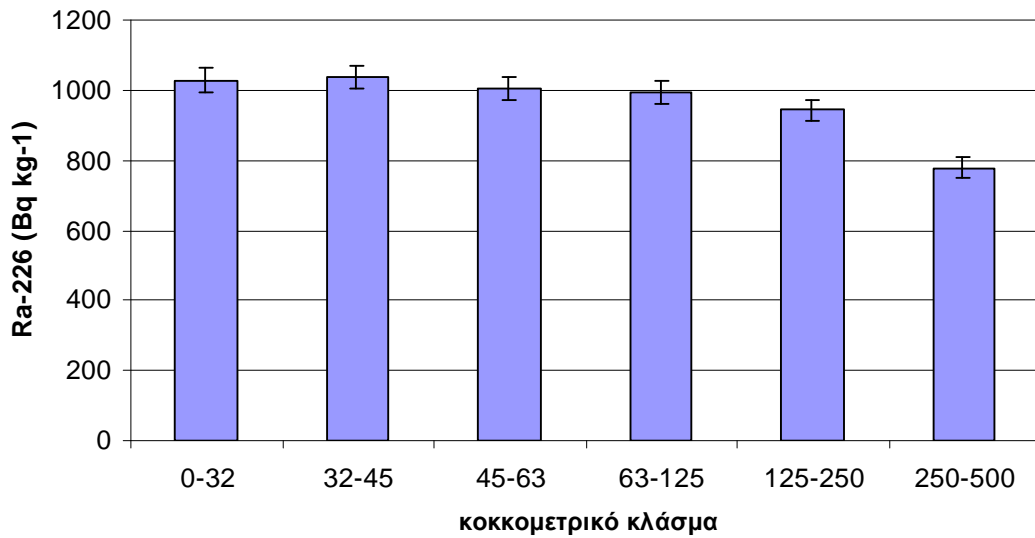
Σχήμα 4.1: Διαδικασία παρασκευής αντιπροσωπευτικών δειγμάτων Ι.Τ



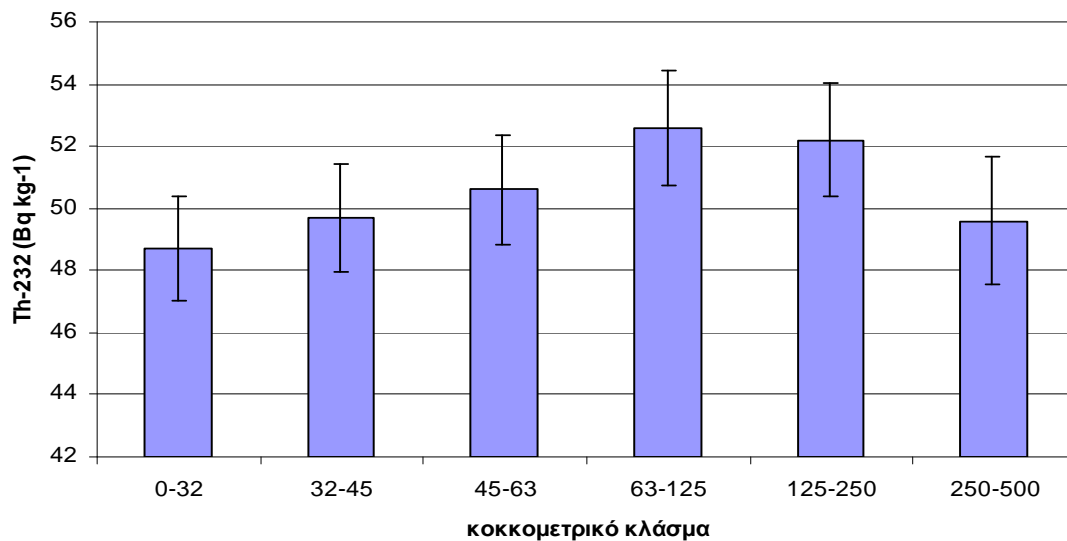
Σχήμα 4.2:Κοκκομετρική κατανομή Δείγματος 1



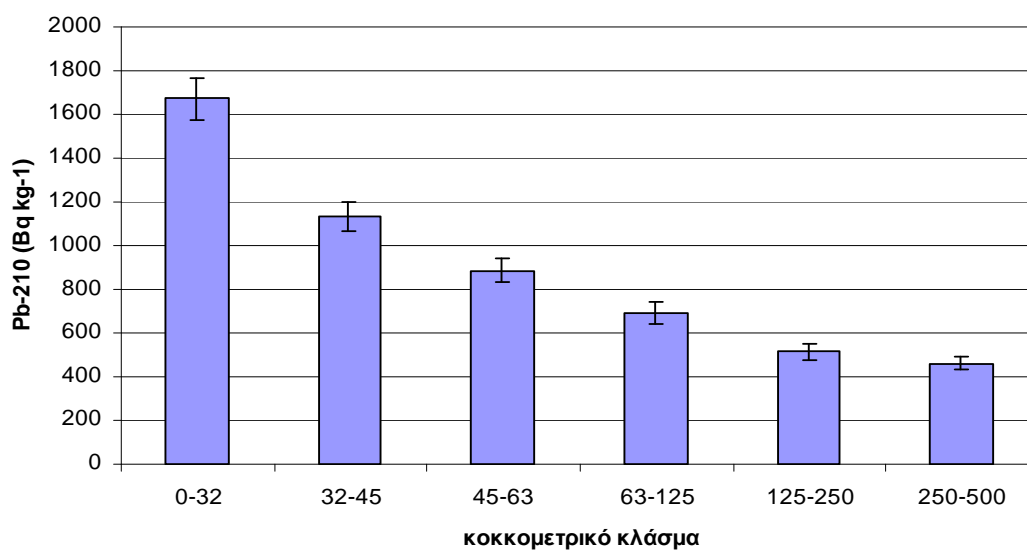
Σχήμα 4.3:Ειδική ραδιενέργεια Ra-226 για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα



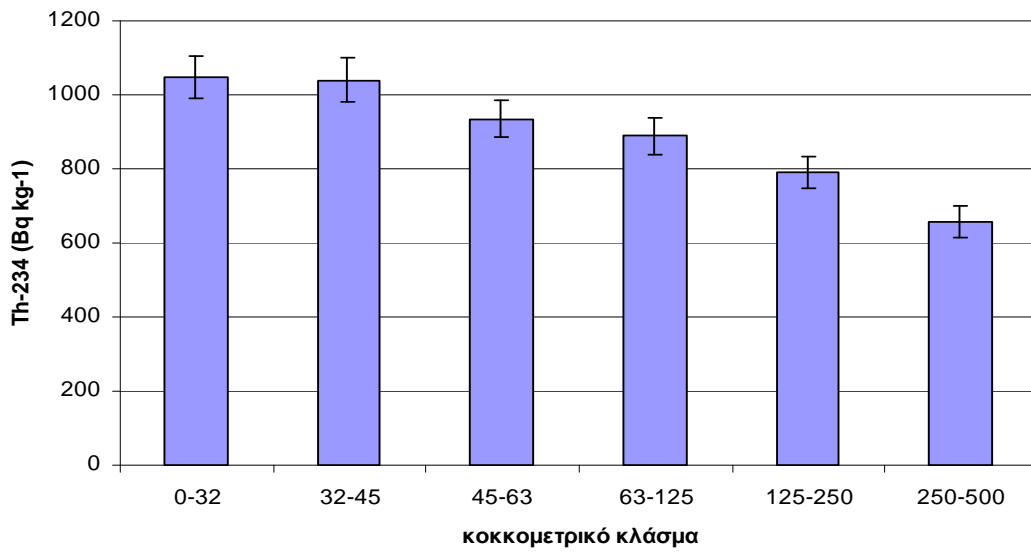
Σχήμα 4.4:Ειδική ραδιενέργεια Th-232 για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα



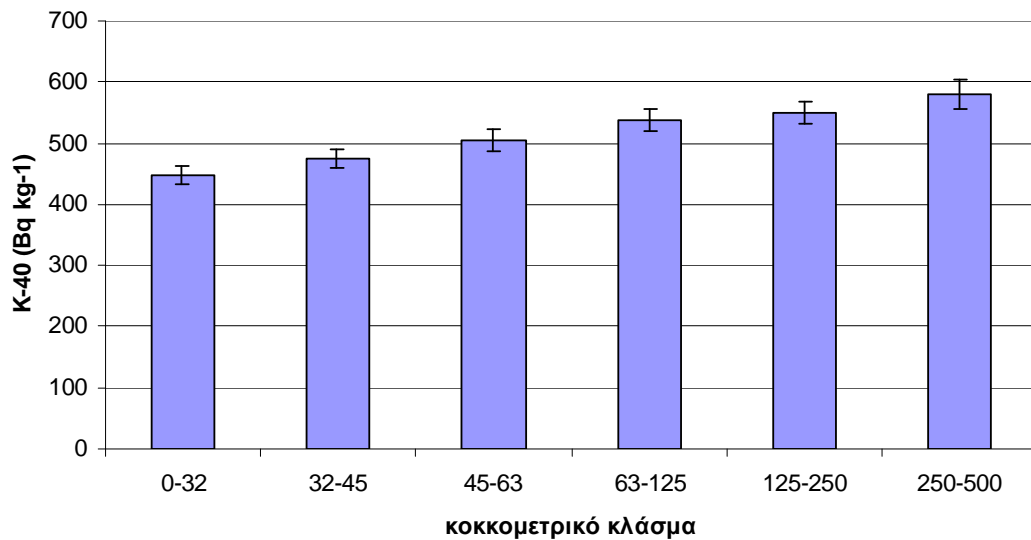
Σχήμα 4.5:Ειδική ραδιενέργεια Pb-210 για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα



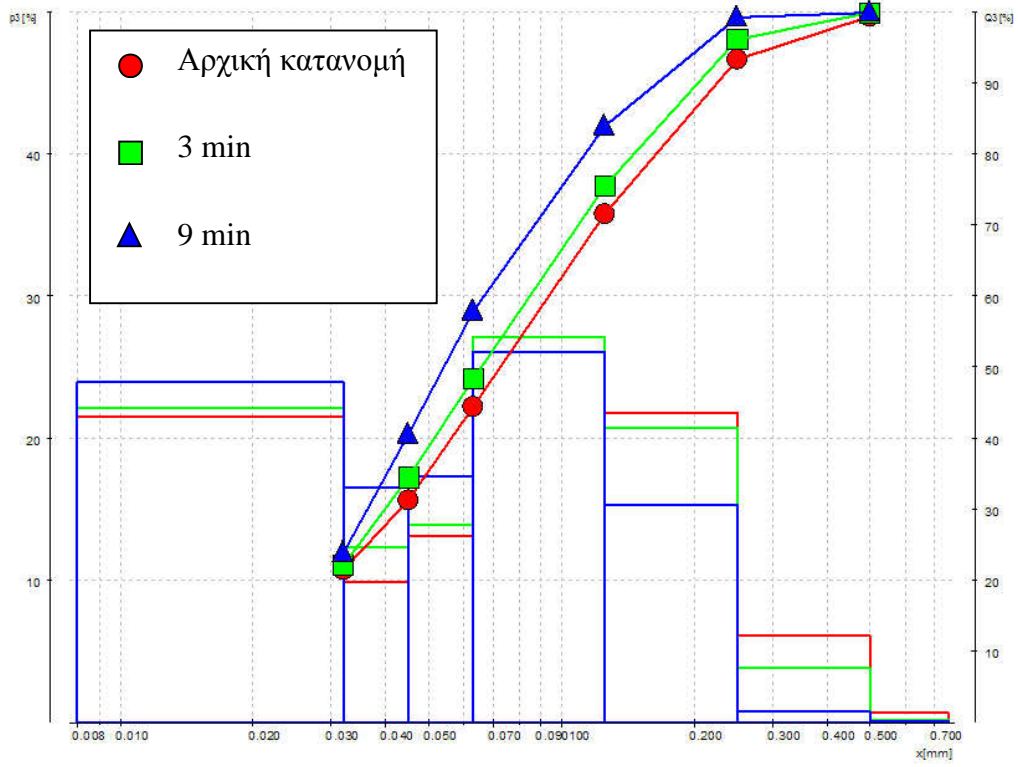
Σχήμα 4.6:Ειδική ραδιενέργεια Th-234 για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα



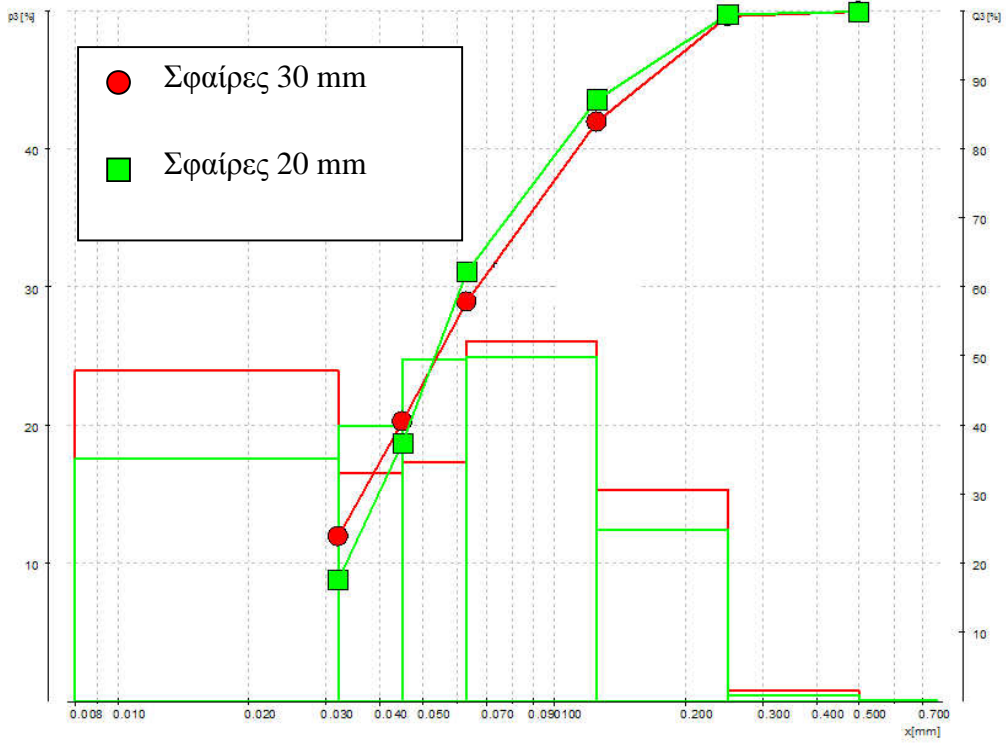
Σχήμα 4.7:Ειδική ραδιενέργεια K-40 για κάθε κοκκομετρικό κλάσμα



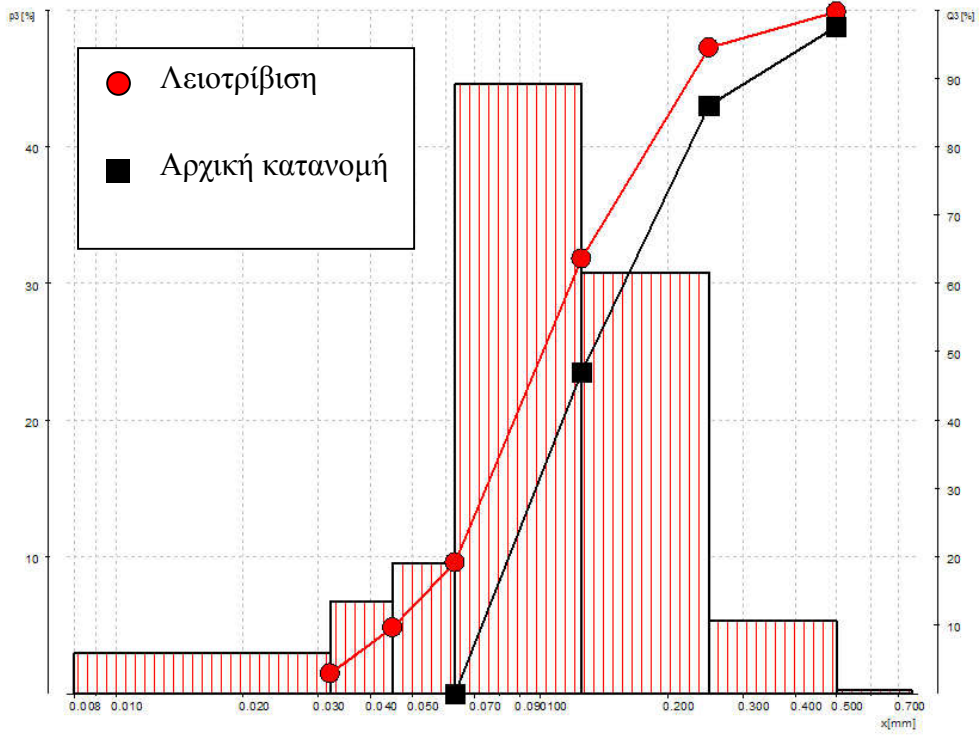
Σχήμα 4.8: Σύγκριση λειοτριβίσης I.T διάρκειας 3 min με 9 min



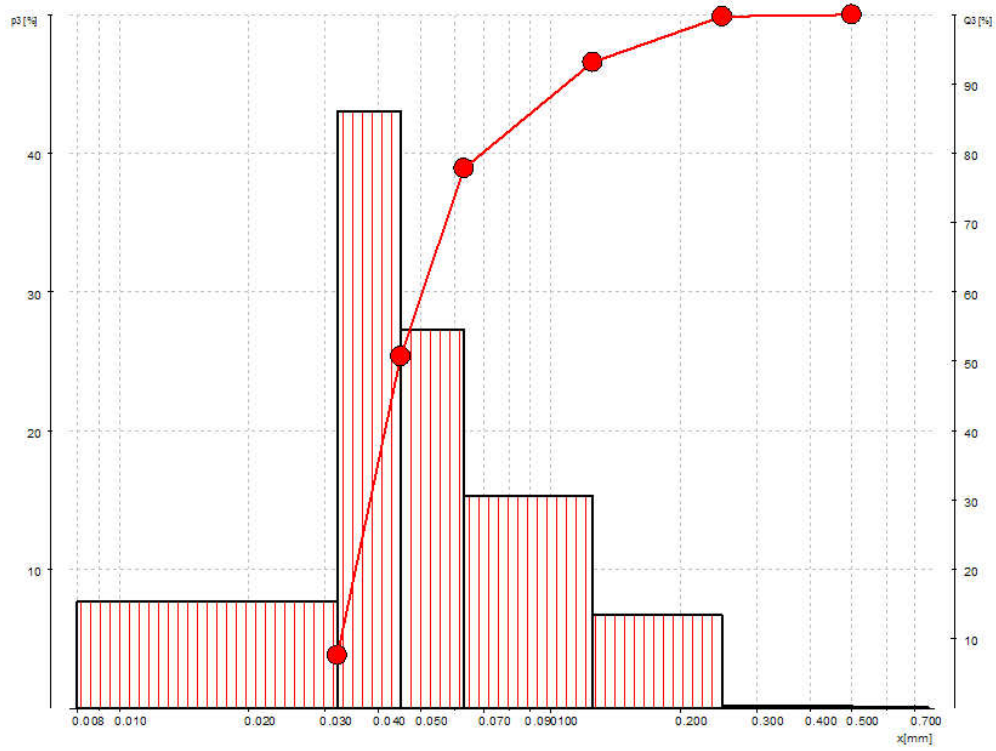
Σχήμα 4.9: Σύγκριση μεταξύ σφαιρών λειοτριβισης



Σχήμα 4.10: Λειοτριβίση Δείγματος 4 χωρίς τα <63μm



Σχήμα 4.11: Κοκκομετρική κατανομή Ι.Τ μετά από λειοτρίβιση 120 min



Κεφάλαιο 5: Επίλογος

5.1. Σύνοψη της Εργασίας

Στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ εγκαταστάθηκε για πρώτη φορά ο εξοπλισμός λειοτρίβισης του ΕΠΤ-ΕΜΠ, ο οποίος αποτελείται από ένα πλανητικό μύλο της εταιρείας Retsch τύπου PM100 και από ένα θραυστήρα με σιαγόνες της Retsch τύπου BB51. Οι διατάξεις λειοτρίβισης τέθηκαν σε λειτουργία και πραγματοποιήθηκαν δοκιμές της λειτουργίας τους. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή δειγμάτων από περιβαλλοντικά υλικά, συγκεκριμένα από οικοδομικά υλικά και Ιπτάμενη Τέφρα.

Στο 2ο κεφάλαιο παρουσιάστηκε αναλυτικά ο εξοπλισμός λειοτρίβισης που διαθέτει το ΕΠΤ-ΕΜΠ. Πραγματοποιήθηκαν με επιτυχία δοκιμές λειτουργίας με άμμο θαλάσσης και οικοδομικό τούβλο.

Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στον θραυστήρα Retsch BB51 με κεραμικό τούβλο, διαπιστώθηκε ότι η τροφοδοσία υλικού θα πρέπει να γίνεται με αργό ρυθμό και σε μικρά κομμάτια, ώστε να αποφευχθεί δυσλειτουργία της συσκευής. Επίσης, όπως παρατηρήθηκε από την ανάλυση κοκκομετρίας του επεξεργασμένου τούβλου, η θραύση γίνεται ως προς μία διάσταση. Αρκεί δηλαδή μία μόνο διάσταση να μειωθεί κάτω από το άνοιγμα των σιαγόνων για να επιτραπεί η διέλευση του υλικού. Κατά την ανάλυση κοκκομετρίας του υλικού μπορεί να παρατηρηθούν κόκκοι υλικού με διάσταση μεγαλύτερη από το ρυθμισμένο άνοιγμα σιαγόνων.

Οι δοκιμές λειτουργίας του πλανητικού μύλου Retsch PM100 πραγματοποιήθηκαν με άμμο θαλάσσης. Από τις δοκιμές διαπιστώθηκε ότι η μέγιστη ταχύτητα, η οποία επαρκεί για αποτελεσματική λειοτρίβιση είναι ίση με 200 rpm. Μεγαλύτερη ταχύτητα προκαλεί έντονους κραδασμούς και είναι προτιμότερο να αποφεύγεται. Από την παραμετρική μελέτη για τη λειτουργία του μύλου επιλέχθηκαν ως πιο αποτελεσματικές για λειοτρίβιση οι μικρότερες από τις διαθέσιμες σφαίρες, διαμέτρου 20 mm. Από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν επιβεβαιώνεται ο

εκθετικός ρυθμός θραύσης των σωματιδίων, ενώ παρατηρήθηκε ότι για αυξημένο φορτίο υλικού προς λειοτριβίση, απαιτείται και μεγαλύτερος χρόνος. Επίσης, η μείωση του ποσοστού μάζας είναι μεγαλύτερη για τα πιο χονδρόκοκκα κλάσματα. Τέλος, ο καθαρισμός του δοχείου αλλά και των σφαιρών από κορούνδιο, μπορεί να πραγματοποιηθεί με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα, θέτοντας σε λειτουργία τον μύλο για περίπου 5 min πληρώνοντας το δοχείο με θραύσματα γυαλιού.

Στο 3ο κεφάλαιο παρουσιάζεται εφαρμογή του εξοπλισμού λειοτριβίσης για την προετοιμασία και γ-φασματοσκοπική ανάλυση οικοδομικών υλικών. Τεμαχίστηκαν με επιτυχία στον θραυστήρα BB51 πέντε οικοδομικά υλικά (τούβλο, μάρμαρο, 3 είδη γρανιτών, χαλίκι, τσιμεντόλιθος). Η περαιτέρω επεξεργασία στον πλανητικό μύλο δεν κρίθηκε απαραίτητη αφού τα υλικά περιήλθαν σε λεπτότητα ικανοποιητική ώστε να είναι δυνατή η παρασκευή ομογενών τυποποιημένων δειγμάτων. Από την φασματοσκοπική ανάλυση των δειγμάτων διαπιστώθηκε ότι όλες οι ενεργότητες για τα ισότοπα που μελετήθηκαν βρέθηκαν εντός της σχετική βιβλιογραφίας. Ιδιαίτερα για τους γρανίτες, για τους οποίους στη βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί σχετικά υψηλές τιμές, οι ραδιενέργειες που μετρήθηκαν ήταν σχετικά χαμηλές.

Για 3 από τα υλικά αυτά (τούβλο, γρανίτης, τσιμεντόλιθος) προσδιορίστηκε ο γραμμικός συντελεστής εξασθένισης, με σκοπό τον προσδιορισμό κατάλληλου συντελεστή διόρθωσης αυταπορρόφησης, ακολουθώντας μεθοδολογία η οποία έχει αναπτυχθεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Από τον υπολογισμό του συντελεστή διόρθωσης διαπιστώθηκε ότι για το τούβλο η διόρθωση μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά από αυτήν που χρησιμοποιείται για το χώμα παραπλήσιας πυκνότητας. Για τον τσιμεντόλιθο παρατηρήθηκαν σημαντικές αποκλίσεις της έντασης του φαινομένου αυταπορρόφησης από το τσιμέντο ίσης πυκνότητας. Για το γρανίτη διαπιστώθηκε ότι δεν μπορεί να εφαρμοσθεί η διόρθωση χώματος ίσης πυκνότητας, αφού παρουσιάζει πολύ έντονα το φαινόμενο της αυταπορρόφησης.

Πραγματοποιήθηκε στοιχειώδης επέκταση της μελέτης για την αυταπορρόφηση στην ενεργειακή περιοχή $>200\text{keV}$. Χρησιμοποιήθηκαν νέες φωτοκορυφές φωτονίων, τα οποία εκπέμπονται από πηγή ^{226}Ra . Η διαδικασία προσδιορισμού του γραμμικού συντελεστή εξασθένισης και αντίστοιχου συντελεστή διόρθωσης πραγματοποιήθηκε με επιτυχία με νερό και KCl, ώστε να γίνει δοκιμή της μεθόδου. Στη συνέχεια, η μεθοδολογία επαναλήφθηκε με τον γρανίτη. Από τον προσδιορισμό της καμπύλης

που συσχετίζει τον γραμμικό συντελεστή εξασθένισης γρανίτη με την ενέργεια φωτονίων προέκυψε το συμπέρασμα ότι υπάρχουν φαινόμενα αυταπορρόφησης και στην περιοχή άνω των 200 keV. Το φαινόμενο αυτό χρειάζεται περαιτέρω μελέτη η οποία ξεφεύγει από τα όρια της παρούσης ΔΕ.

Στο 4ο κεφάλαιο μελετήθηκαν τα ραδιολογικά χαρακτηριστικά Ιπτάμενης Τέφρας και εξετάστηκε η εφαρμογή του εξοπλισμού λειοτρίβισης στην προετοιμασία δειγμάτων από ανομοιογενή περιβαλλοντικά υλικά όπως η τέφρα. Εφαρμόστηκε μία σύνθετη διαδικασία διαχωρισμού αντιπροσωπευτικών δειγμάτων από αρχική ποσότητα Ι.Τ Μεγαλόπολης ώστε να χρησιμοποιηθούν στις αναλύσεις. Διαχωρίστηκαν τα κοκκομετρικά κλάσματα της τέφρας και αναλύθηκαν με γ-φασματοσκοπία. Το σταθμισμένο άθροισμα της ειδικής ραδιενέργειας συγκρίθηκε με αυτή του συνόλου, και προέκυψε μη σημαντική διαφορά στο ισοζύγιο ραδιενέργειας.

Στη συνέχεια εξετάστηκαν πιθανότητες αλλοίωσης της ομοιογένειας του δείγματος και πιθανές επιδράσεις στις ραδιολογικές αναλύσεις. Μελετήθηκαν οι εξής περιπτώσεις:

- Εξέταση δείγματος ανακαταμεμημένου με χρήση δόνησης.
- Εξέταση δείγματος το οποίο συσκευάστηκε με διαστρωμάτωση κοκκομετρικών κλασμάτων.

Το φαινόμενο διαπιστώθηκε ότι μπορεί να υπάρξει αφού στην ακραία περίπτωση του διαστρωματωμένου δείγματος παρατηρήθηκαν μεγάλες διαφοροποιήσεις. Ωστόσο, στο δείγμα με δόνηση δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αποκλίσεις στο ισοζύγιο ραδιενέργειας, έτσι δεν τεκμηριώθηκε ανάγκη λειοτρίβισης πριν από τις αναλύσεις.

Παρόλα αυτά εξετάστηκε η λειοτρίβιση Ιπτάμενης Τέφρας για λόγους πληρότητας. Πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη λειοτρίβισης της Τέφρας στον πλανητικό μύλο. Από τις δοκιμές διαπιστώθηκε δυσκολία στην λειοτρίβιση, καθώς ο απαιτούμενος χρόνος ήταν αυξημένος. Επίσης προέκυψε εξαιρετικά λεπτόκοκκο τελικό προϊόν το οποίο δεν ήταν δυνατό να αναλυθεί στην συσκευή ανάλυσης κοκκομετρίας, αφού παρατηρήθηκε προσκόλληση του υλικού στα κόσκινα. Τέλος διαπιστώθηκε ότι η φαινόμενη πυκνότητα της τέφρας αυξάνεται μετά τη λειοτρίβιση,

γεγονός που επιτρέπει την πλήρωση του τυποποιημένου δοχείου με μεγαλύτερη ποσότητα υλικού.

5.2. Προοπτικές μελλοντικής έρευνας

Οι παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα που προέκυψαν στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για μελλοντική έρευνα.

- Ο εξοπλισμός λειοτριβίσης χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία για τα υλικά που περιγράφηκαν. Σε μελλοντικές έρευνες μπορεί να αξιοποιηθεί για επεξεργασία περισσότερων υλικών όπως χώμα, οργανικά υλικά, TENORM και άλλα.
- Στην παρούσα εργασία ο εξοπλισμός λειοτριβίσης χρησιμοποιήθηκε για την προετοιμασία δειγμάτων γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης. Σε επόμενη έρευνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέθοδος προετοιμασίας δειγμάτων για άλλες τεχνικές ανάλυσης, για παράδειγμα ραδιοχημικές ή αναλύσεις XRF και NAA.
- Στα πλαίσια της εργασίας εξετάστηκε ενδεικτικό μόνο πλήθος δειγμάτων οικοδομικών υλικών. Με τη χρήση του εξοπλισμού λειοτριβίσης είναι δυνατό να επιτευχθεί ένας ικανοποιητικός ρυθμός ανάλυσης δειγμάτων, ώστε να εξεταστεί ικανό πλήθος δειγμάτων για την ευρύτερη επισκόπηση των ελληνικών οικοδομικών υλικών.
- Με τη βοήθεια του εξοπλισμού λειοτριβίσης είναι δυνατό να προετοιμαστούν δείγματα για τον προσδιορισμό του συντελεστή διόρθωσης αυταπορρόφησης σε νέα υλικά. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια από ότι με τη χρήση καμπυλών παραπλήσιων υλικών.
- Από την επέκταση της μελέτης αυταπορρόφησης για ενέργειες > 200 keV, παρατηρήθηκε ότι για υλικά μεγάλης πυκνότητας, όπως ο γρανίτης, το φαινόμενο εξακολουθεί να υπάρχει και σε υψηλές ενέργειες. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητη η λεπτομερής εξέταση των φαινομένων αυταπορρόφησης για υψηλές ενέργειες σε υλικά μεγάλης πυκνότητας.

- Το πρόβλημα της ανομοιογένειας περιβαλλοντικών υλικών δεν παρουσιάζεται να είναι έντονο στην Ιπτάμενη Τέφρα, όπως προέκυψε από τις αναλύσεις που έγιναν. Ωστόσο, προτείνεται να λαμβάνεται υπ' όψιν στα πλαίσια του ελέγχου ποιότητας.
- Η επίδραση της ανομοιογένειας στις ραδιολογικές αναλύσεις μελετήθηκε μόνο για Ιπτάμενη Τέφρα. Μπορεί να εξετασθεί το πρόβλημα της ανομοιογένειας και σε άλλα υλικά, όπως το χώμα το οποίο παρουσιάζει έντονη ανομοιογένεια, η υγρή τέφρα κλπ.
- Κατά τη λειοτρίβιση Ι.Τ παρουσιάστηκε δυσκολία στην μείωση της κοκκομετρίας της, η οποία αντιμετωπίστηκε με τοποθέτησή της στον πλανητικό μύλο για αρκετό χρόνο. Αν ληφθούν υπ' όψιν τα συμπεράσματα που προέκυψαν για την επίδραση της ανομοιογένειας, κρίνεται σκόπιμο να μελετηθεί περαιτέρω αν υπάρχει αναγκαιότητα για λειοτρίβιση.
- Τέλος, η δυσκολία που παρουσιάστηκε κατά την ανάλυση υλικού πολύ υψηλής λεπτότητας θα πρέπει να αντιμετωπιστεί με κατάλληλες τεχνικές, όπως η χρήση ειδικών βοηθημάτων κοσκίνισματος ή υγρής κοσκίνισης

**Παράρτημα Α: Παράδειγμα ανάλυσης
οικοδομικού υλικού από τον κώδικα
SPUNAL**

| NATURAL RADIONUCLIDES ANALYSIS REPORT | | | | | | | |
|---------------------------------------|--------------|------------------|-------|--------|--|--|--|
| of sample YGR008A | | | | | | | |
| Remarks : | | | | | | | |
| Isotope | Energy (keV) | Activity | Bq/kg | pCi/gr | | | |
| Pb-210 | 46.52 | 17.65 +- 9.23 % | | 0.477 | | | |
| Pb-214A | 295.22 | 21.86 +- 4.65 % | | 0.591 | | | |
| Pb-214B | 351.99 | 22.65 +- 2.11 % | | 0.612 | | | |
| Pb-214 | (W.Mean) : | 22.50 +- 1.92 % | | 0.608 | | | |
| Bi-214A | 609.32 | 21.86 +- 2.81 % | | 0.591 | | | |
| Bi-214B | 1120.28 | 21.86 +- 13.41 % | | 0.591 | | | |
| Bi-214C | 1764.51 | 24.02 +- 9.31 % | | 0.649 | | | |
| Bi-214 | (W.Mean) : | 22.00 +- 2.64 % | | 0.595 | | | |
| Ra-226 | (W.Mean) : | 22.3 +- 1.55 % | | 0.603 | | | |
| Ra-226 | 186.25 | | | | | | |
| Th-234 | 63.29 | 23.29 +- 5.97 % | | 0.629 | | | |
| U-238 E | 185.99 | | | | | | |
| U-238 C | 185.99 | | | | | | |
| U-235 | 185.72 | | | | | | |
| U-238 L | | | | | | | |
| Ac-228A | 338.40 | | | | | | |
| Ac-228B | 911.07 | | | | | | |
| Ra-228 | (W.Mean) : | | | | | | |
| Pb-212B | 238.63 | 99.21 +- 2.72 % | | 2.681 | | | |
| Tl-208A | 583.14 | 93.15 +- 1.23 % | | 2.517 | | | |
| Th-228 | (W.Mean) : | 94.08 +- 1.12 % | | 2.543 | | | |
| Th-232 | (W.Mean) : | 94.1 +- 1.12 % | | 2.543 | | | |
| K-40 | 1460.75 | 848.32 +- 0.91 % | | 22.928 | | | |

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Chattopadhyay P.P., Manna I., Talapatra S., Pabi S.K. 2000.** *A mathematical analysis of milling mechanics in a planetary ball mill.* Materials Chemistry and Physics 68 (2001): 85-94.
2. **European Commission. 1999.** *Radiation protection 112, Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials.* Directorate-General. Environment, Nuclear Safety and Civil Protection.
3. **Hubbell J.H. 1981.** *Photon Mass Attenuation and Energy-absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV.* International Journal of Applied Radiation and Isotopes 33 (11): 1269-1290.
4. **Karangelos D.J., Petropoulos N.P., Anagnostakis M.J., Hinis E.P. και Simopoulos S.E. 2004.** *Radiological characteristics and investigation of the radioactive equilibrium in the ashes produced in lignite-fired power plants.* Journal of Environmental Radioactivity 77(2004): 233-246.
5. **Klimpel, R.R. 1997.** *Introduction to the Principles of Size Reduction of Particles by Mechanical Means.* Florida, University of Florida.
6. **Papaefthymiou H., Gouseti O. 2008.** *Natural radioactivity and associated radiation hazards in building materials used in Peloponnese, Greece.* Journal of Environmental Radioactivity 43 (2008) : 1453-1457.
7. **Pavlidou S., Koroneos A., Papastefanou C., Stoulos S., Christofides G., Vavelides M. 2006.** *Natural Radioactivity of granites used as building materials.* Journal of Environmental Radioactivity 89 (2006) :48-60.
8. **Petropoulos N.P, Anagnostakis M.J., Simopoulos S.E. 2002.** *Photon attenuation, natural radioactivity content and radon exhalation rate of building materials.* Journal of Environmental Radioactivity 61 (2002) : 257-269.

9. **Retsch 2005.** *Operating Instructions Ball Mills Type PM100/PM200.* Retsch GmbH, Haan. (Doc. Nr. D 98.540/640.9999).
10. **Retsch 1998.** *Operating Instructions for Jaw Crusher type BB51.* Retsch GmbH, Haan. (Doc. Nr. GR 98.056.9999)
11. **Simopoulos S.E., Angelopoulos. M.G., 1987.** *Natural Radioactivity releases from lignite power plants in Greece.* Journal of Environmental Radioactivity. 5(1987):379-389.
12. **Skodras G., Grammelis P., Kakaras E., Karangelos D., Anagnostakis M., Hinis E. 2006.** *Quality characteristics of Greek fly ashes and potential uses.* Fuel Processing Technology 88 (2007): 77-85.
13. **Snow R. 1999.** Size Reduction and Size Enlargement. Κεφάλαιο 20 στο *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, Perry, R.H. και Green, D.W (επ.). The McGraw-Hill Companies, Inc, Νέα Υόρκη.
14. **Stoulos S., Manolopoulou M., Papastefanou C. 2003.** *Assessment of natural radiation exposure and radon exhalation from building materials on Greece.* Journal of Environmental Radioactivity 69 (2003) : 225-240.
15. **Tzortzis M., Tsertos H., Christofides S., Christodoulides G. 2003.** *Gamma-ray measurements of naturally occurring radioactive samples from Cyprus characteristic geological rocks.* Radiation Measurements 37 (2003): 221-229.
16. **UNSCEAR. (2000).** *Sources and effects of ionizing radiation.* United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Βιέννη 2000.
17. **Αναγνωστάκης Ι.Μ 1998.** *Γ-φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων χαμηλών ραδιενεργειών στην περιοχή χαμηλών ενεργειών.* Διδακτορική διατριβή ΕΠΤ-ΕΜΠ. Αθήνα 1998.
18. **Καρφόπουλος Κ.Λ. χ.χ** *Ανάπτυξη και εφαρμογή μετρητικών τεχνικών για την ανάλυση της φυσικής και τεχνολογικά επαγόμενης ραδιενέργειας σε οικοσυστήματα.* Διδακτορική Διατριβή ΕΠΤ-ΕΜΠ (υπό εκπόνηση).

19. **Πέππας Θωμάς 2008.** *Εγκατάσταση και παραμετρική μελέτη διάταξης συσκευής ανάλυσης κοκκομετρίας- Εφαρμογή στην κοκκομετρική ανάλυση και τον προσδιορισμό των ραδιολογικών χαρακτηριστικών των διαφόρων κλασμάτων ιπτάμενης τέφρας.* Διπλωματική Εργασία ΕΠΤ-ΕΜΠ. Αθήνα 2008.
20. **Ινστιτούτο Τεχνολογίας και Εφαρμογών Στερεών Καυσίμων(ΙΤΕΣΚ), 2009.** *Το ελληνικό site για την Ιπτάμενη Τέφρα.* <http://www.flyash.gr/> (Πρόσβαση Μάιος 2009).