

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

***ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΔΕΣΜΗΣ,
ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ
ΤΟΥ ΟΛΙΚΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗΣ μ
ΦΩΤΟΝΙΩΝ ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ***

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΔΗΜΗΤΡΗ ΚΕΚΚΑΤΟΥ

Σπουδαστή της Σχολής
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επίβλεψη: Αν. Καθηγητής Μ.Ι. Αναγνωστάκης
Συνεργασία: Μ.Ι. Σάββα, Δρ. Δ.Ι. Καράγγελος

ΑΘΗΝΑ 2014

Πρόλογος

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία (ΔΕ) εκπονήθηκε στο Εργαστήριο του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας από τον Μάρτιο του 2013 έως τον Απρίλιο του 2014.

Από τη θέση αυτή επιθυμώ να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Αν. Καθηγητή Μ.Ι. Αναγνωστάκη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την παρούσα Διπλωματική Εργασία, καθώς επίσης και για την πολύτιμη βοήθειά του στην ολοκλήρωση αυτής, αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον διδάκτορα κ. Δ. Καραγγελο για τη συμβολή του στην πραγματοποίηση της συγκεκριμένης ΔΕ. Τον ευχαριστώ για τον προσωπικό χρόνο που αφιέρωσε, για την υπομονή του, για την καθοδήγηση και τις συμβουλές του.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα Μ. Σάββα, για την συνεργασία και τις συμβουλές της καθώς και για τον χρόνο που αφιέρωσε.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω όλο το προσωπικό του ΕΠΤ- ΕΜΠ, για το κλίμα συνεργασίας και τη βοήθεια που μου προσέφεραν.

Αθήνα, Απρίλιος 2014

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 2: γ-φασματοσκοπική ανάλυση φωτονίων χαμηλών ενεργειών.....	6
2.1 Εισαγωγή.....	6
2.2 Η γ-φασματοσκοπική διάταξη του ΕΠΤ-ΕΜΠ με ανιχνευτή τύπου LEGe.....	8
2.2.1 Ο ανιχνευτής LEGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ.....	8
2.2.2 Η θωράκιση του ανιχνευτή LEGe.....	10
2.2.3 Η ανιχνευτική διάταξη του ΕΠΤ-ΕΜΠ, με ανιχνευτή LEGe.....	10
2.3 Το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση στην περιοχή χαμηλών ενεργειών.....	12
2.3.1 Βασικές έννοιες.....	12
2.3.2 Ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης φωτονίων (μ)...	15
2.3.3 Αλληλεπίδραση των φωτονίων με την ύλη.....	15
2.3.4 Ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης.....	18
2.4 Ο συντελεστής αναγωγής της απόδοσης (η).....	19
2.4.1 Βαθμονόμηση απόδοσης ανιχνευτή.....	19
2.4.2 Το πρόβλημα αναγωγής της απόδοσης εξαιτίας διαφορετικής αυτοαπορρόφησης στο δείγμα και την πηγή βαθμονόμησης.....	22
2.5 Βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθόδων αντιμετώπισης του φαινομένου της αυτοαπορρόφησης στη γ-φασματοσκοπική ανάλυση.....	26
2.5.1 Μέθοδοι που βασίζονται στην παρασκευή προτύπων πηγών βαθμονόμησης της ίδιας γεωμετρίας και σύστασης ίδιας ή όμοιας με αυτή των αναλυόμενων δειγμάτων.	27
2.5.2 Μέθοδοι που βασίζονται στη βαθμονόμηση απόδοσης με πρότυπη πηγή και εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης.....	28

2.5.3	Μέθοδοι που βασίζονται στην απευθείας εκτίμηση της απόδοσης για τη γεωμετρία και τη συγκεκριμένη σύσταση του υλικού που ενδιαφέρει.....	32
2.6	Βιβλιογραφική ανασκόπηση μεθόδων υπολογισμού του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ.....	37
2.6.1	Εμπειρικές σχέσεις προσδιορισμού του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης.	37
2.6.2	Βιβλιογραφικές πηγές προσδιορισμού του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης.	39
	Κεφάλαιο 3: Πειραματικός προσδιορισμός της βέλτιστης γεωμετρίας για τον προσδιορισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ.....	42
3.1	Εισαγωγή.....	42
3.2	Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας προσδιορισμού των συντελεστών μ και μ_m	43
3.2.1	Ραδιενεργές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων	47
3.3	Ανασκόπηση των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για προσδιορισμό της κατάλληλης γεωμετρίας δέσμης φωτονίων.....	48
3.3.1	Γεωμετρία 1	49
3.3.2	Γεωμετρία 2	54
3.3.3	Γεωμετρία 3	57
3.3.4	Γεωμετρία 4	62
3.3.5	Γεωμετρία 5	66
3.3.6	Γεωμετρία 6	69
3.3.7	Γεωμετρία 7	73
3.3.8	Γεωμετρία 8	77

3.3.9	Γεωμετρία 9.....	80
3.3.10	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα.....	87
3.4	Διερεύνηση της ακρίβειας προσδιορισμού των συντελεστών μ και μ_m με χρήση υλικών γνωστής σύστασης.....	89
3.4.1	Μετρήσεις με απορροφητή οξείδιο του τιτανίου (TiO_2).....	91
3.1.1	Μετρήσεις με απορροφητή ένυδρο θεικό μαγνήσιο ($MgSO_4 - 7 \cdot H_2O$) 97	
3.1.2	Μετρήσεις με απορροφητή μείγμα θεικού καλίου - ένυδρου θεικού μαγνησίου ($K_2SO_4- MgSO_4- 7 \cdot H_2O$).....	100
3.1.3	Μετρήσεις με απορροφητή θεικό κάλιο (K_2SO_4).....	104
3.1.4	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα.....	110
3.2	Συμπεράσματα κεφαλαίου	115
	Κεφάλαιο 4: Εφαρμογή της μεθοδολογίας υπολογισμού σε δείγματα χωμάτων και εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης.....	117
4.1	Εισαγωγή.....	117
4.2	Εφαρμογή της μεθοδολογίας ανάλυσης σε δείγματα χώματος.....	119
4.2.1	Πειραματικά αποτελέσματα για τους συντελεστές εξασθένισης (μ και μ/ρ) 119	
4.2.2	Υπολογισμός του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η από το πρόγραμμα factor	129
4.3	Εφαρμογή της μεθοδολογίας προσδιορισμού του συντελεστή μ σε κοκκομετρικά κλάσματα του ίδιου δείγματος χώματος	139
4.3.1	Πειραματικά αποτελέσματα για τους συντελεστές εξασθένισης μ και μ/ρ 140	
4.3.2	Αποτελέσματα υπολογισμό των συντελεστών μ και η από κώδικες H/Y 169	

4.4	Εφαρμογή της μεθοδολογίας προσδιορισμού των συντελεστών εξασθένησης σε άλλα υλικά.....	182
4.4.1	Πειραματικός προσδιορισμός συντελεστών εξασθένησης μ και μ/ρ 183	
4.4.2	Αποτελέσματα υπολογισμού των συντελεστών μ και η από κώδικες H/Y 193	
4.5	Συμπεράσματα κεφαλαίου	199
	Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	201
5.1	Συμπεράσματα ΔΕ.....	201
5.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	204
	Παράρτημα Α: Πιστοποιητικό ανιχνευτή LEGe.....	206
	Παράρτημα Β: Επίδραση του προσδιορισμού της πυκνότητας στη μέτρηση του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης.....	208
	Παράρτημα Γ: Διαδικασία διεξαγωγής t –test.....	211
	Βιβλιογραφία.....	214

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Ένα από τα προβλήματα που προκύπτουν κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση είναι το πρόβλημα της αυτοαπορρόφησης φωτονίων. Αυτοαπορρόφηση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο, φωτόνια τα οποία εκπέμπονται από ένα δείγμα όγκου, απορροφώνται μέσα στο ίδιο το δείγμα και δεν ανιχνεύονται από τον ανιχνευτή. Η αυτοαπορρόφηση φωτονίων εξαρτάται σημαντικά από το υλικό του δείγματος, με συνέπεια η ένταση του φαινομένου κατά την ανάλυση ενός δείγματος να είναι διαφορετική από αυτήν που εμφανίζεται μέσα στην πρότυπη πηγή κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης της απόδοσης του ανιχνευτή. Συνέπεια αυτού είναι ότι η απόδοση ανίχνευσης των φωτονίων που προκύπτει από την πηγή βαθμονόμησης διαφέρει από την απόδοση που πρέπει να χρησιμοποιηθεί κατά την ανάλυση του δείγματος. Το συγκεκριμένο πρόβλημα γίνεται ακόμα πιο έντονο στις χαμηλές ενέργειες φωτονίων. Η αντιμετώπιση του γίνεται με την εισαγωγή κατάλληλου συντελεστή αναγωγής της απόδοσης από την πηγή βαθμονόμησης στο δείγμα.

Για τον υπολογισμό του συγκεκριμένου συντελεστή, είναι απαραίτητη η γνώση του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ του υλικού του δείγματος. Για υλικά γνωστής σύστασης, ο συντελεστής μ μπορεί να αναζητηθεί στη βιβλιογραφία. Ωστόσο, σε περιβαλλοντικά δείγματα ο προσδιορισμός πρέπει να γίνει πειραματικά, καθώς δεν υπάρχουν δεδομένα στη βιβλιογραφία για αυτά. Αυτό είναι λογικό να συμβαίνει, καθώς κάθε περιβαλλοντικό δείγμα (π.χ. χώμα) είναι διαφορετικό από όλα τα υπόλοιπα και η σύσταση του δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων, οπότε είναι πρακτικά αδύνατον να συγκροτηθεί κατάλληλη βάση δεδομένων.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή μ στο ΕΠΤ –ΕΜΠ, χρησιμοποιείται πειραματική-αριθμητική μεθοδολογία, η οποία βασίζεται στη χρήση ανοιχτής δέσμης φωτονίων και εισήχθη από [ΔΔ Αναγνωστάκης, 1998]. Η μεθοδολογία αυτή απαιτεί την επιλογή κατάλληλης γεωμετρίας πειράματος για το καλύτερο δυνατό προσδιορισμό του μ , για κάθε εξεταζόμενη ενέργεια φωτονίων. Στα πλαίσια της [ΔΕ Φωτεινάκη, 2012] έγινε μελέτη και βελτίωση της γεωμετρίας πειράματος για τις ενέργειες των 32.19keV, 59.54keV, 121.78keV και 186.25keV. Μελετήθηκε επίσης

και η ενέργεια των 46keV, χωρίς όμως ικανοποιητικά αποτελέσματα, καθώς επιτεύχθηκαν αποκλίσεις μεγαλύτερες το 10%.

Στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ, εξετάστηκαν διάφορες γεωμετρίες για τον ακριβέστερο πειραματικό προσδιορισμό του συντελεστή μ , με έμφαση στην περιοχή των 46 keV. Η περιοχή αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω των φωτονίων του ^{210}Pb στα 46.52 keV. Ο ^{210}Pb είναι μακρόβιο ($T_{1/2} = 22.2$ y) θυγατρικό της σειράς του ^{238}U , και παρουσιάζει ιδιαίτερο ραδιολογικό ενδιαφέρον λόγω της σχέσης του με το βραχύβιο πατρικό του ^{222}Rn , το οποίο ως ευγενές αέριο εκλύεται συνεχώς από το έδαφος και γενικά τα περιβαλλοντικά υλικά και παρουσιάζει ιδιαίτερα δυναμική συμπεριφορά. Η μελέτη της ραδιενεργού ισορροπίας μεταξύ των ^{226}Ra , ^{222}Rn και ^{210}Pb έχει ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον, τόσο για την κατανόηση της συμπεριφοράς του ^{222}Rn όσο και για πιθανή αξιοποίηση σε εφαρμογές. Από τη μελέτη της βιβλιογραφίας διαπιστώνεται ότι η αξιοποίηση του ^{210}Pb συναντάται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε διάφορους τομείς όπως: Υδροβιολογία [Owen, R.B.Crossley, R.Johnson T.C.Tweddle, D.Kornfield, I.Davison, S.Eccles, D.H. Engstrom, D.E, 1990], Οικολογία [M.J. Anagnostakis, E.P. Hinis and S.E. Simopoulos,2005], [Cáceres C.E., 1998], [Feng H. , Han X., Zhang W., Yu L.,2004], Χημεία [Zwolsman, J.J.G., Berger, G.W., Van Eck, G.T.M., 1993] κλπ.

Στα πλαίσια της ΔΕ πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων σε διάφορες γεωμετρίες, χρησιμοποιώντας ως απορροφητή νερό. Για κάθε γεωμετρία, η τιμή που προέκυψε για το συντελεστή μ συγκρίθηκε με την αντίστοιχη τιμή της βιβλιογραφίας και εντοπίστηκε αυτή που δίνει μικρότερη απόκλιση.

Στη συνέχεια, η γεωμετρία η οποία επιλέχθηκε δοκιμάστηκε σε υλικά διαφόρων πυκνοτήτων, γνωστού μ για την επιβεβαίωση της. Επιλέχθηκαν για το σκοπό αυτό χημικές ενώσεις υψηλής καθαρότητας ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, TiO_2 , K_2SO_4 και μείγματά τους), διότι η σύστασή τους είναι γνώστη, άρα είναι γνωστός και ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης από τη βιβλιογραφία. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν επιλέχθηκαν να καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα πυκνοτήτων, λόγω της έντονης εξάρτησης του φαινομένου της αυτοαπορρόφησης, άρα και του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ , από την πυκνότητα του υλικού του δείγματος.

Η γεωμετρία που υιοθετήθηκε, εφαρμόστηκε σε δείγματα χρώματος για τον πειραματικό υπολογισμό του συντελεστή μ , ώστε να δοκιμαστεί σε πραγματικές συνθήκες, αλλά και να συγκριθούν τα αποτελέσματα με αυτά που εκτιμώνται από τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες στο ΕΠΤ-ΕΜΠ καμπύλες προσαρμογής. Τέλος, για τα δείγματα χρωμάτων, στα οποία έγινε ο πειραματικός υπολογισμός του συντελεστή εξασθένισης μ , υπολογίστηκε ο συντελεστής αναγωγής της απόδοσης η , μέσω υπολογιστικού κώδικα που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ- ΕΜΠ και εισήχθη από [ΔΔ Αναγνωστάκης,1998], και συγκρίθηκε με τον αντίστοιχο συντελεστή που προκύπτει χρησιμοποιώντας τις τιμές του μ που δίνονται από τις καμπύλες προσαρμογής.

Η παρούσα ΔΕ αποτελείται από πέντε κεφάλαια, το περιεχόμενο των οποίων παρουσιάζεται συνοπτικά στη συνέχεια:

Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης με έμφαση στην περιοχή των χαμηλών ενεργειών, καθώς αυτές ενδιαφέρουν στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ. Αρχικά, γίνεται μια περιγραφή της ανιχνευτικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε, δηλαδή του ανιχνευτή LEGe και της θωράκισή του. Στη συνέχεια θεμελιώνεται θεωρητικά το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης και περιγράφονται οι τρόποι αλληλεπίδρασης ενός φωτονίου με την ύλη με σκοπό να οριστεί ο συντελεστής εξασθένισης μ , παράμετρο του οποίου αποτελούν τα παραπάνω. Αναλύεται το πρόβλημα της διαφορετικής αυτοαπορρόφησης μεταξύ πηγής βαθμονόμησης και δείγματος και εξηγείται η ανάγκη εισαγωγής του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η . Τέλος γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθόδων που έχουν μέχρι τώρα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του συντελεστή εξασθένισης μ καθώς και για τον υπολογισμό του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η .

Το 3^ο Κεφάλαιο αναφέρεται στις μεθόδους προσδιορισμού του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ , καθώς και του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένισης μ_m . Αρχικά γίνεται περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας, η οποία ακολουθήθηκε σε όλα τα πειράματα, τα οποία διενεργήθηκαν στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου της ΔΕ. Ακόμη γίνεται μια παρουσίαση των ραδιενεργών πηγών που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ, για τον προσδιορισμό των συντελεστών εξασθένισης μ και μ_m . Στη συνέχεια, περιγράφονται αναλυτικά οι εννέα

γεωμετρικές πειράματος οι οποίες εξετάστηκαν για τον βέλτιστο προσδιορισμό των συντελεστών εξασθένησης. Οι ενέργειες φωτονίων που εξετάστηκαν είναι στα 46.52keV (^{210}Pb) και στα 46.6keV (^{152}Eu). Για λόγους πληρότητας, εξετάζονται και φωτόνια μεγαλύτερης ενέργειας τα οποία εκπέμπονται από τις ίδιες πηγές. Ακολούθως, η γεωμετρία η οποία επιλέχθηκε από την προηγούμενη σειρά πειραμάτων, μελετάται σε διάφορα υλικά γνωστής σύστασης διαφόρων πυκνοτήτων. Οι συντελεστές εξασθένησης, με τους οποίους συγκρίνονται οι πειραματικά υπολογισμένοι συντελεστές προέρχονται από τη βάση δεδομένων NIST X-Com.

Στο 4^ο Κεφάλαιο γίνεται εφαρμογή της μεθόδου υπολογισμού που βρέθηκε και επιβεβαιώθηκε στο 3^ο Κεφάλαιο σε περιβαλλοντικά δείγματα, καθώς επίσης και προσδιορισμός του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η . Αρχικά, η μεθοδολογία μελετάται σε χρώματα, τα οποία συλλέχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ από την περιοχή της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου. Γίνεται προσδιορισμός των συντελεστών εξασθένησης μ και μ_m και στη συνέχεια γίνεται υπολογισμός του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης, μέσω υπολογιστικού κώδικα. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η ίδια μεθοδολογία υπολογισμού των συντελεστών εξασθένησης και του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης σε κοκκομετρικά κλάσματα χρώματος και σε υλικά, τα οποία θα μπορούσαν να προσομοιωθούν με χρώμα. Για κάθε σειρά υλικών, γίνεται ανάλυση της σχέσης των πειραματικών τιμών των συντελεστών εξασθένησης, με αυτούς που προκύπτουν από τον υπολογιστικό κώδικα, καθώς επίσης και ανάλυση της ευαισθησίας του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης σε μεταβολές του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης.

Στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα, που προέκυψαν στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα πάνω σε προβλήματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια διεξαγωγής της ΔΕ.

Η ΔΕ ολοκληρώνεται με 3 Παραρτήματα και συγκεκριμένα:

Παράρτημα Α: Πιστοποιητικό ανιχνευτή LEGe

Παράρτημα Β: Επίδραση του προσδιορισμού της πυκνότητας στη μέτρηση του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης

Παράρτημα Γ: Διαδικασία διεξαγωγής t test

Κεφάλαιο 2: γ-φασματοσκοπική ανάλυση φωτονίων χαμηλών ενεργειών

2.1 Εισαγωγή

Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση είναι μια μη καταστροφική μέθοδος ανάλυσης δειγμάτων για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των περιεχομένων σε αυτά γ-ραδιενεργών ισοτόπων. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην επεξεργασία του ενεργειακού φάσματος των φωτονίων που εκπέμπονται κατά τη διάσπαση των ραδιενεργών πυρήνων και ανιχνεύονται με τη βοήθεια κατάλληλου ανιχνευτή, σχηματίζοντας το αντίστοιχο ενεργειακό φάσμα. Με τον όρο ποιοτικός προσδιορισμός, εννοείται η εκτίμηση του είδους των πυρήνων που διασπώνται. Η συγκεκριμένη εκτίμηση μπορεί να γίνει, κάθε ισότοπο, διασπώμενο εκπέμπει φωτόνια συγκεκριμένης ενέργειας, τα οποία υποδηλώνουν και την ύπαρξη του αντίστοιχου ισοτόπου, ακόμα κι αν αυτό βρίσκεται σε ελάχιστη ποσότητα μέσα στο δείγμα. Με τον όρο ποσοτικός προσδιορισμός εννοείται η εκτίμηση του πλήθους των πυρήνων που διασπώνται ανά μονάδα χρόνου, για κάθε είδους πυρήνα, δηλαδή της ραδιενέργειας του προς ανάλυση δείγματος. Η γ-φασματοσκοπία είναι μια ευρύτατα χρησιμοποιούμενη μέθοδος προσδιορισμού ραδιενεργών ισοτόπων, καθώς τα περισσότερα ραδιενεργά ισότοπα εκπέμπουν γ-ακτινοβολία. Ένα πλεονέκτημα της γ-φασματοσκοπίας είναι η δυνατότητα ταυτόχρονης ανάλυσης όλων των γ-ραδιενεργών ισοτόπων που περιέχονται στο δείγμα. Τέλος, η γ-φασματοσκοπία δεν είναι καταστροφική για το δείγμα, καθώς δεν απαιτεί χημική προετοιμασία του δείγματος για την ανάλυση του, όπως σε άλλες μορφές ανάλυσης (π.χ. α-φασματοσκοπία). Όσον αφορά στο είδος των δειγμάτων που αναλύονται με την τεχνική αυτή, πρέπει να αναφερθεί ότι μπορούν να αναλυθούν πρακτικά πάσης φύσεως δείγματα (στερεά, υγρά ή αέρια). Μία κατηγορία δειγμάτων που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι τα δείγματα τα οποία προέρχονται από το περιβάλλον, τα οποία συνήθως έχουν και πολύ χαμηλά επίπεδα ραδιενέργειας.

Ένα από τα προβλήματα της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης με χρήση φωτονίων χαμηλών ενεργειών είναι η απορρόφηση των φωτονίων από το ίδιο το δείγμα από το οποίο εκπέμπονται. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αυτοαπορρόφηση, εξαρτάται από την ενέργεια των φωτονίων και το υλικό του δείγματος και θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο.

Κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση χρησιμοποιούνται σήμερα ημιαγωγοί ανιχνευτές γερμανίου (Ge), υψηλής διακριτικής ικανότητας. Διαμορφώνοντας κατάλληλα τη γεωμετρία και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κρυστάλλου του Ge μπορούν να κατασκευαστούν ανιχνευτές κατάλληλοι για διαφόρων τύπων αναλύσεις, όπως με εκμετάλλευση φωτονίων χαμηλών ενεργειών κλπ.

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της ανιχνευτικής διάταξης LGe (Low Energy Germanium Detector) του ΕΠΤ-ΕΜΠ, η οποία χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, για τις ανάγκες της συγκεκριμένης ΔΕ και αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά της. Στη συνέχεια, επιχειρείται η θεωρητική θεμελίωση του φαινομένου της αυτοαπορρόφησης και η εισαγωγή του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης φωτονίων (μ), καθώς και του μαζικού συντελεστή εξασθένησης (μ_m), οι οποίοι αποτελούν τους βασικούς δείκτες του φαινομένου της αυτοαπορρόφησης για ένα δείγμα σε μια συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων. Για λόγους πληρότητας παρουσιάζονται συνοπτικά και τα είδη αλληλεπίδρασης ενός φωτονίου κατά τη διέλευσή του μέσα από την ύλη, από τα οποία προκύπτει η εξασθένηση και στη συνέχεια οι παράγοντες από του οποίους εξαρτάται ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης, καθώς και οι σημαντικότερες βιβλιογραφικές πηγές για την αναζήτηση του.

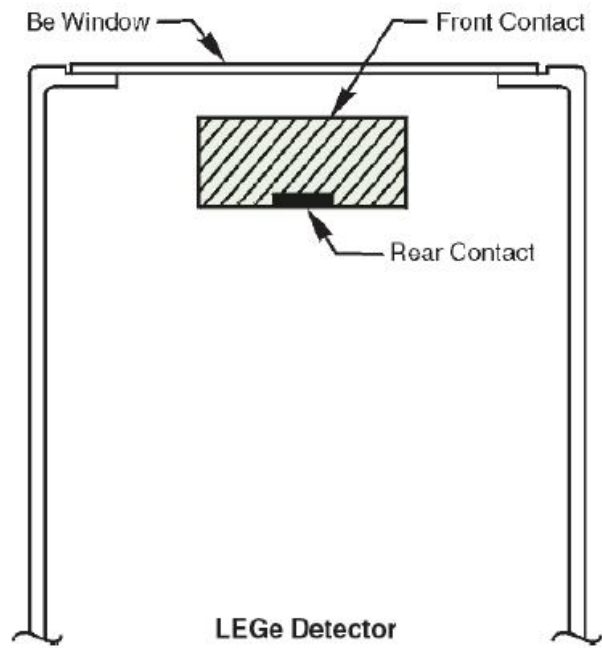
Ακολούθως, εισάγεται ο συντελεστής αναγωγής της απόδοσης (η) και αναλύονται τα προβλήματα που υπάρχουν στην γ-φασματοσκοπική ανάλυση φωτονίων χαμηλής ενέργειας. Τέλος, παρατίθεται μια σειρά μεθόδων που συναντώνται στη βιβλιογραφία για την αντιμετώπιση του φαινομένου της αυτοαπορρόφησης στην περιοχή των χαμηλών ενεργειών.

2.2 Η γ-φασματοσκοπική διάταξη του ΕΠΤ-ΕΜΠ με ανιχνευτή τύπου LEGe

2.2.1 Ο ανιχνευτής LEGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, από το 1988 είναι εγκατεστημένη και λειτουργεί γ-φασματοσκοπική διάταξη με ανιχνευτή Ge χαμηλών ενεργειών (Low Energy Germanium Detector - LEGe), η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 2.1 . Πρόκειται για τον ανιχνευτή LEGe τύπου GL2020-7500 της Canberra Industries (CI), με s/n b87547. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δίνονται στο σχετικό πιστοποιητικό, το οποίο παρατίθεται στο παράρτημα Α. Πρόκειται για έναν επίπεδο ανιχνευτή γερμανίου κυλινδρικού σχήματος και μικρού πάχους, ενεργού διαμέτρου 50.5mm, ενεργού επιφανείας 2000mm² και ύψους 20mm. Η συνιστώμενη τάση λειτουργίας για το σχηματισμό πεδίου επαρκούς έντασης μέσα στον ανιχνευτή είναι 2000V. Ο ανιχνευτής είναι τοποθετημένος από τον κατασκευαστή μέσα σε κατακόρυφο κρυοστάτη τύπου 7500 της CI. Το παράθυρο του κρυοστάτη είναι κατασκευασμένο από Be πάχους 0.5mm, με συνέπεια τη μικρή εξασθένηση των φωτονίων χαμηλών ενεργειών. Λόγω του μικρού πάχους του παραθύρου, αλλά και της ύπαρξης κενού μέσα στον κρυοστάτη, το παράθυρο Be καθίσταται ιδιαίτερα ευαίσθητο. Για το λόγο αυτό έχει τοποθετηθεί στον ανιχνευτή κατάλληλο κάλυμμα από plexiglass, επάνω στο οποίο τοποθετούνται τα προς ανάλυση δείγματα [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998] (Σχήμα 2.2 . Επιπλέον του ανιχνευτή, μέσα στον κρυοστάτη βρίσκεται και το τμήμα του προενισχυτή, έτσι ώστε με την ψύξη του να επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία του. Ο ανιχνευτής ψύχεται σε θερμοκρασία υγρού αζώτου. Το δοχείο Dewar που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό είναι χωρητικότητας 30L και πληρούται με υγρό άζωτο κάθε 7 ημέρες. Η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή, όπως δίνεται στο πιστοποιητικό του κατασκευαστή, σε όρους εύρους ημίσειας ύψους είναι:

- για ενέργεια φωτονίων **5.9keV, FWHM=341eV**
- για ενέργεια φωτονίων **122keV, FWHM=530eV και FWTM=996eV**



Σχήμα 2.1 Σχηματική απεικόνιση του ανιχνευτή LEGe



Σχήμα 2.2 Ο ανιχνευτής LEGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ μέσα στη θωράκιση του

2.2.2 Η θωράκιση του ανιχνευτή LEGe

Η θωράκιση του ανιχνευτή παίζει πολύ σημαντικό ρόλο κατά την ανάλυση ενός δείγματος, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για την περιοχή χαμηλών ενεργειών. Ο ανιχνευτής ιδανικά θα πρέπει να προσβάλλεται μόνο από φωτόνια προερχόμενα από το δείγμα, και όχι από εκείνα που προέρχονται από τον περιβάλλοντα χώρο και αποτελούν το υπόστρωμα της διάταξης. Στην πραγματικότητα, δεν είναι εφικτό να εξαλειφθεί τελείως το υπόστρωμα, αφού σε αυτό συνεισφέρει και η ίδια η θωράκιση, καθώς και τα υλικά που αποτελούν τον ανιχνευτή, με τις προσμειξίξεις ισοτόπων, που έστω και σε ελάχιστα ποσά διαθέτει. Επιπλέον, η ύπαρξη της θωράκισης οδηγεί σε αύξηση των φωτονίων του αναλυόμενου δείγματος που προσβάλλουν τον ανιχνευτή λόγω προηγούμενης σκέδασης με τη θωράκιση. Ωστόσο, το υπόστρωμα μπορεί να μειωθεί σημαντικά, με μια προσεκτική σχεδίαση και κατασκευή της θωράκισης.

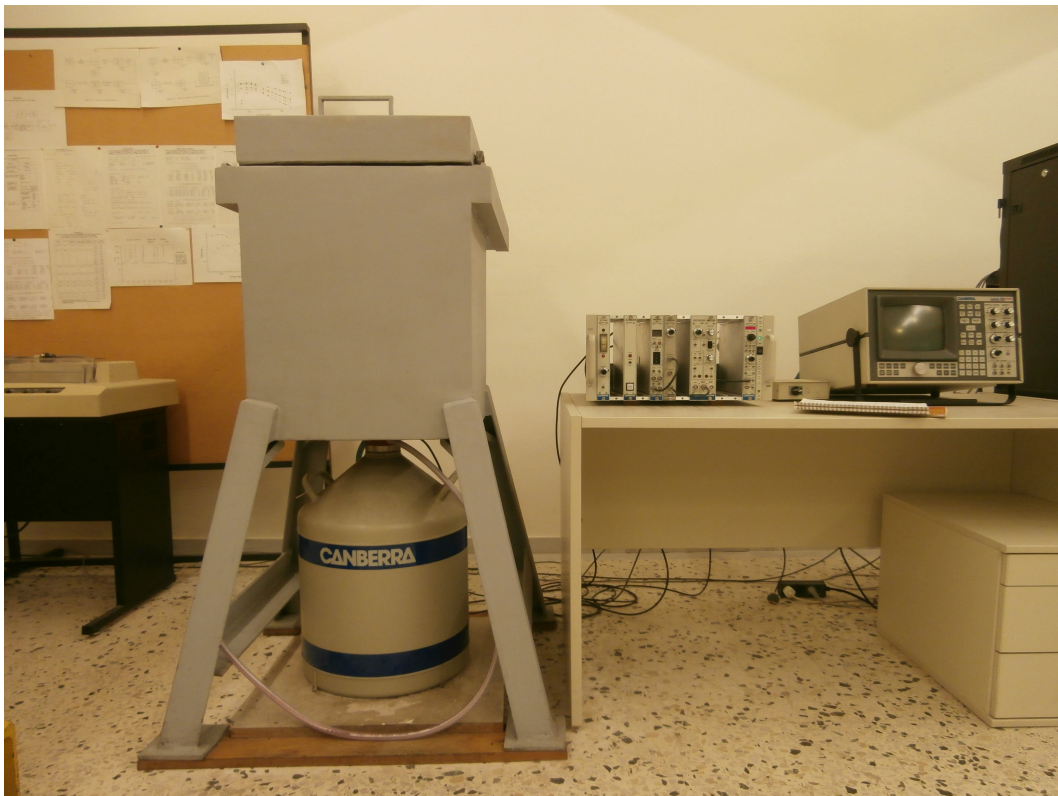
Η θωράκιση που χρησιμοποιείται στον ανιχνευτή LEGe έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί στον Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ (ΕΠΤ-ΕΜΠ). Αποτελείται από ατσάλι πάχους 100mm, το οποίο έχει εσωτερική επένδυση από φύλλα καδμίου (Cd) και χαλκού (Cu), πάχους 1mm το καθένα. Οι εσωτερικές διαστάσεις της θωράκισης είναι 30x30x50cm.

2.2.3 Η ανιχνευτική διάταξη του ΕΠΤ-ΕΜΠ, με ανιχνευτή LEGe

Η ανιχνευτική διάταξη του ΕΠΤ-ΕΜΠ (Σχήμα 2.3 είναι βαθμονομημένη για την ανίχνευση φωτονίων σε δύο ενεργειακές περιοχές. Αρχικά, η διάταξη βαθμονομήθηκε για την ενεργειακή περιοχή 0-2000keV, η οποία αποτελεί τον ανιχνευτή “3”, σύμφωνα με την κωδικοποίηση που έχει γίνει στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, και αργότερα για την ενεργειακή περιοχή 0-200keV, [Δ.Δ. Αναγνωστάκης Μ., 1998], που αποτελεί τον ανιχνευτή “6”. Τα πειράματα στην παρούσα ΔΕ έγιναν με τον ανιχνευτή LEGe ρυθμισμένο και στις δύο περιοχές, ανάλογα με το εκάστοτε πείραμα. Η διάταξη – πέραν του ανιχνευτή – αποτελείται από:

- Προενισχυτή τύπου, 2001CP της CI, ενσωματωμένο στον κρυστάτη.
- Ενισχυτή ύψος παλμών, τύπου 2020 της CI.

- Διαχωριστή ύψους παλμών, τύπου 1432 της CI.
- Καταμετρητή παλμών, τύπου 2071 της CI.
- Αναλογοψηφιακό μετατροπέα, τύπου 8075 της CI.
- Πολυκαναλικό αναλυτή, τύπου AIM 556A της CI.
- Τροφοδοτικό υψηλής τάσης, τύπου 3105 της CI.
- Δοχείο υγρού αζώτου όγκου 30l, στο οποίο είναι εμβαπτισμένος ο κρυστάτης.
- Ελεγκτή στάθμης του αζώτου, τύπου 1786 της CI.
- Θωράκιση του ανιχνευτή, σχεδιασμένη στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.
- Μονάδα NIM-BIN, τύπου 2100 της CI.



Σχήμα 2.3 Ανιχνευτική διάταξη LEGe του ΕΠΤ ΕΜΠ

Ο πολυκαναλικός αναλυτής είναι συνδεδεμένος σε δικτυακό MCA, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται πρόσβαση σε αυτόν από κατάλληλο H/Y που χρησιμοποιείται για τη συλλογή του φάσματος. Για λόγους προστασίας της διάταξης από αυξομειώσεις τάσης του δικτύου ή διακοπές ρεύματος, η διάταξη τροφοδοτείται μέσω μονάδας αδιάλειπτης παροχής τάσης (UPS), ικανής να εξασφαλίσει τη λειτουργία των γ-φασματοσκοπικών διατάξεων του ΕΠΤ-ΕΜΠ για χρονική διάρκεια περίπου 15'.

2.3 Το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση στην περιοχή χαμηλών ενεργειών

2.3.1 Βασικές έννοιες

Καταρχήν πρέπει να επισημανθεί ότι περιοχή χαμηλών ενεργειών δεν έχει μονοσήμαντα καθορισμένο άνω όριο στη βιβλιογραφία. Το εύρος της περιοχής υιοθετείται από κάθε ερευνητή ανάλογα με την εμπειρία του και τη μέθοδο ανάλυσης που χρησιμοποιεί. Για τη συγκεκριμένη ΔΕ θα χρησιμοποιηθεί η ενεργειακή περιοχή 0-200keV η οποία έχει υιοθετηθεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ [ΔΔ Αναγνώστáκη,1998].

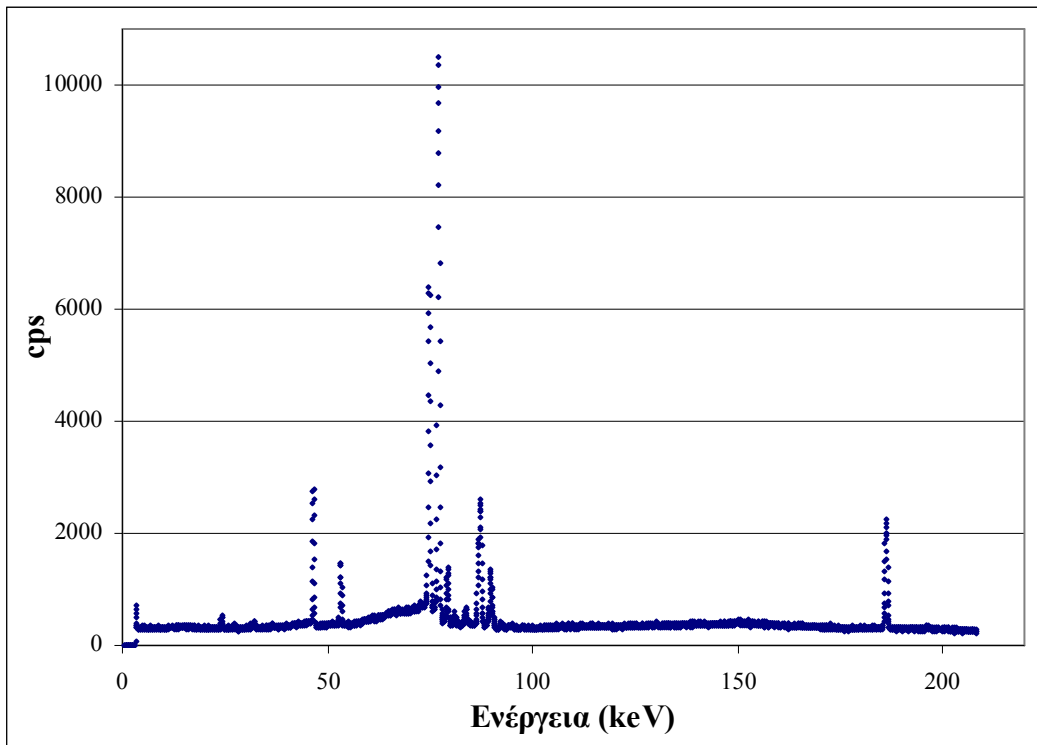
Τρία είναι τα βασικά προβλήματα που αντιμετωπίζονται κατά την γ-φασματοσκοπική ανάλυση στην περιοχή χαμηλών ενεργειών:

- η ισχυρή εξασθένιση των φωτονίων, κατά τη διέλευσή τους μέσα από την ύλη (υλικό δείγματος και υλικά μεταξύ πηγής και ανιχνευτή),
- το μεγάλο πλήθος ακτίνων-γ και κυρίως ακτίνων-X που ανιχνεύονται στην περιοχή χαμηλών ενεργειών, καθώς και το συνήθως αυξημένο συνεχές υπόστρωμα της διάταξης,
- το χαμηλό ποσοστό εκπομπής (yield) που συχνά έχουν φωτόνια χαμηλής ενέργειας που παρουσιάζουν ενδιαφέρον.

Το πρώτο πρόβλημα κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση είναι η εξασθένιση των φωτονίων, η οποία συνίσταται:

- Από την εξασθένηση κατά τη διέλευση μέσα από τα υλικά που παρεμβάλλονται μεταξύ της πηγής των φωτονίων και της ευαίσθητης περιοχής του ανιχνευτή, όπου και ανιχνεύονται. Η εξασθένηση αυτή οδηγεί σε χαμηλή απόδοση ανίχνευσης. Το συγκεκριμένο πρόβλημα έχει σε κάποιο βαθμό αντιμετωπιστεί με την κατασκευή ανιχνευτών για τους οποίους η εξασθένηση των φωτονίων στα ενδιάμεσα στρώματα είναι μειωμένη.
- Από την εξασθένηση των φωτονίων που εκπέμπονται, μέσα στο δείγμα, λόγω του υλικού του δείγματος, δηλαδή την αυτοαπορρόφηση, στην περίπτωση που το δείγμα έχει σχετικά μεγάλο όγκο. Σύμφωνα με τον [Joshi S.R., 1988] το πρόβλημα της αυτοαπορρόφησης είναι το σημαντικότερο κατά τις γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις για ενέργειες φωτονίων κάτω των 300keV, όριο με το οποίο συμφωνεί και ο [Yang I.C., 1982]. Η αυτοαπορρόφηση εξαρτάται από:
 - την ενέργεια των φωτονίων
 - από τη σύσταση και την πυκνότητα του αναλυόμενου υλικού.

Ένα δεύτερο πρόβλημα είναι η εκπομπή χαρακτηριστικών ακτίνων-X, οι οποίες καθιστούν το ενεργειακό φάσμα (σχήμα 2.4) πολύπλοκο και δυσκολεύουν την ανάλυσή του. Αυτό το πρόβλημα γίνεται εντονότερο κατά την ανάλυση φωτονίων ενέργειας κάτω από 100keV. Το πρόβλημα αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στη συγκεκριμένη ενεργειακή περιοχή εκπέμπονται ακτίνες-X οι οποίες προέρχονται, είτε από το δείγμα που αναλύεται, είτε από υλικά που περιβάλλουν τον ανιχνευτή (όπως ο κρυστάτης και η θωράκιση). Ακόμη, στην περιοχή χαμηλών ενεργειών παρατηρούνται και οι αιχμές Compton των φωτονίων υψηλών ενεργειών που κάνουν την ανάλυση ακόμα πιο πολύπλοκη. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί ανιχνευτές με υψηλή διακριτική ικανότητα που επιτρέπουν την καλύτερη διάκριση των φωτονίων στην περιοχή των χαμηλών ενεργειών.



Σχήμα 2.4 Ενεργειακό φάσμα φωτονίων ανιχνευτή LEGe

Το τελευταίο πρόβλημα που προκύπτει κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση με φωτόνια χαμηλών ενεργειών είναι το συχνά χαμηλό ποσοστό εκπομπής τους (yield). Ενδεικτικά αναφέρεται η περίπτωση του ^{210}Pb , που εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 46.52keV με ποσοστό εκπομπής (4.05%) και του ^{234}Th που εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 63.29keV με ποσοστό εκπομπής (3.81%).

Από τα παραπάνω γίνεται αρκετά σαφές, ότι κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση στην περιοχή των χαμηλών ενεργειών δημιουργούνται πολλά προβλήματα και παρουσιάζονται ιδιαίτερες δυσκολίες. Η συγκεκριμένη ΔΕ ασχολείται με την αντιμετώπιση του φαινομένου της αυτοαπορρόφησης των φωτονίων σε περιβαλλοντικά δείγματα. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες μέθοδοι για την αντιμετώπιση του προβλήματος της αυτοαπορρόφησης, οι οποίες θα αναφερθούν σε επόμενη παράγραφο.

2.3.2 Ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης φωτονίων (μ)

Μια μονοενεργειακή δέσμη φωτονίων κατά τη διέλευσή της μέσα από ένα υλικό υφίσταται εξασθένηση. Ως εξασθένηση των φωτονίων εννοείται η απομάκρυνση των φωτονίων από τη δέσμη λόγω μιας σειράς αλληλεπιδράσεων των φωτονίων με το υλικό του απορροφητή, οι οποίες θα αναφερθούν στην παράγραφο 2.3.3. Ένας δείκτης αυτής της εξασθένησης που υφίσταται η δέσμη φωτονίων είναι ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης $\mu(\text{cm}^{-1})$. Για παράλληλη μονοενεργειακή δέσμη φωτονίων με ένταση I_0 (φωτόνια· cm^{-2} · s^{-1}) που προσπίπτει κάθετα σε απορροφητή πάχους x , το υλικό του οποίου έχει ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένησης μ , η ένταση I της εξερχόμενης από τον απορροφητή δέσμης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (2.1)$$

Για ένα συγκεκριμένο υλικό και για μια συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων, ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ εξαρτάται μόνο από την εκάστοτε πυκνότητα του υλικού. Το γεγονός ότι η εξασθένηση των φωτονίων εξαρτάται μόνο από τη ποσότητα της ύλης μέσα από την οποία διέρχονται τα φωτόνια οδηγεί στον ορισμό του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένησης μ_m . Ο συντελεστής αυτός είναι ανεξάρτητος της πυκνότητας, ορίζεται ως ο λόγος μ/ρ και οι μονάδες του είναι $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. Ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ καθώς και ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης μ_m διαμορφώνονται ως το άθροισμα των μερικών συντελεστών εξασθένησης, οι οποίοι οφείλονται στα διάφορα φαινόμενα εξασθένησης και θα αναφερθούν στην παράγραφο 2.3.3.

2.3.3 Αλληλεπίδραση των φωτονίων με την ύλη

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 2.3.2, τα φωτόνια μιας δέσμης φωτονίων κατά τη διέλευσή τους μέσα από το υλικό ενός απορροφητή υφίστανται εξασθένηση. Οι κυριότερες από αυτές τις αλληλεπιδράσεις είναι οι εξής:

- Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ή φωτοηλεκτρική απορρόφηση. Πρόκειται για το μηχανισμό αλληλεπίδρασης φωτονίων ενέργειας E_γ (συνήθως κάτω των 100keV) συνήθως με ένα από τα ισχυρά συνδεδεμένα ηλεκτρόνια ατόμου μέσου

ή μεγάλου ατομικού αριθμού Z . Κατά το φαινόμενο αυτό απορροφάται ολόκληρη η ενέργεια E_γ του φωτονίου από το ηλεκτρόνιο, οπότε αυτό αποσπάται από το άτομο με κινητική ενέργεια T που είναι ίση με την ενέργεια του φωτονίου, μειωμένη κατά την ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου στη στιβάδα. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι το φαινόμενο μέσω του οποίου απορροφάται η ενέργεια ενός φωτονίου στον ανιχνευτή, ενώ είναι πιθανότερο να συμβεί με υλικά μέτριου ή μεγάλου ατομικού αριθμού Z και φωτόνια ενέργειας χαμηλότερης των 100keV, όπου μάλιστα χαρακτηρίζεται και ως το κυρίαρχο φαινόμενο αλληλεπίδρασης. Για κάθε υλικό ορίζεται ο **μερικός γραμμικός συντελεστής λόγω φωτοηλεκτρικού φαινομένου μ_{ph} (cm^{-1})** ως η πιθανότητα ανά μονάδα μήκους διαδρομής του φωτονίου αυτό να υποστεί απομάκρυνση από τη δέσμη λόγω φωτοηλεκτρικού φαινομένου μέσα στο υλικό. Με αντίστοιχο τρόπο ορίζεται και ο **μερικός μαζικός συντελεστής λόγω φωτοηλεκτρικού φαινομένου μ_{ph}/ρ (cm^2/gr)**. Μία εμπειρική σχέση που συνδέει τον συντελεστή μ_{ph} με την ενέργεια φωτονίων E_γ και τον ατομικό αριθμό Z του υλικού του απορροφητή είναι [Debertin K.M, 1988]:

$$\mu_{ph} = const \cdot Z^{4.5} \cdot E_\gamma^{-3} \quad (2.2)$$

- Φαινόμενο ή σκέδαση Compton. Πρόκειται για το μηχανισμό αλληλεπίδρασης φωτονίου με ένα περιφερειακό ηλεκτρόνιο ατόμου – συνήθως ένα από τα ασθενέστερα συνδεδεμένα στο άτομο. Κατά τη σκέδαση απελευθερώνεται το ηλεκτρόνιο με κινητική ενέργειας T , ενώ το αρχικό φωτόνιο διατηρεί το υπόλοιπο της αρχικής ενέργειας του. Ο μηχανισμός της συγκεκριμένης αλληλεπίδρασης γίνεται κυρίαρχος για ενέργεια φωτονίου περί τα 511 keV. Και σε αυτήν την περίπτωση ορίζεται ο **μερικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης φωτονίων λόγω σκέδασης Compton μ_{sc} (cm^{-1})** και ο **μερικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης λόγω σκέδασης Compton μ_{sc}/ρ (cm^2/gr)**. Μία εμπειρική σχέση που συνδέει τον μερικό γραμμικό συντελεστή εξασθένησης λόγω σκέδασης Compton με τη ενέργεια του φωτονίου και τον ατομικό αριθμό του υλικού του απορροφητή είναι [Debertin K.M, 1988]:

$$\mu_{sc} = const \cdot Z \cdot E_\gamma^{-1} \quad (2.3)$$

Η σκέδαση Compton είναι το κυρίαρχο φαινόμενο αλληλεπίδρασης για φωτόνια ενέργειας από 50-150keV έως και ~10MeV.

➤ Δίδυμη γέννηση. Πρόκειται για το μηχανισμό αλληλεπίδρασης φωτονίου ενέργειας E_γ μεγαλύτερης ή ίσης προς $2m_0c_0^2$ (1022 keV), όπου m_0 : η μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου και c_0 : η ταχύτητα του φωτός στο κενό, με το ηλεκτρικό πεδίο πυρήνα, κατά τον οποίο εξαφανίζεται το φωτόνιο και στη θέση του εμφανίζονται δύο υλικά σωματίδια: ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο τα οποία κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Η ολική ενέργεια του ζεύγους (ηλεκτρόνιο, ποζιτρόνιο) είναι ίση με την ενέργεια του αρχικού φωτονίου. Για τη συγκεκριμένη αλληλεπίδραση ορίζεται ο **μερικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης λόγω δίδυμης γέννησης $\mu_{\text{pair}} (\text{cm}^{-1})$** και ο μερικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης λόγω δίδυμης γέννησης $\mu_{\text{pair}} (\text{cm}^2/\text{gr})$, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις αλληλεπίδρασης. Για να συμβεί η συγκεκριμένη αλληλεπίδραση πρέπει η ενέργεια του φωτονίου να είναι τουλάχιστον 1.02MeV. Λόγω του ενεργειακού αυτού «κατωφλίου», στις περιοχές χαμηλών ενεργειών η αλληλεπίδραση αυτή δεν απασχολεί.

➤ Σκέδαση Rayleigh. Πρόκειται για τον μηχανισμό αλληλεπίδρασης φωτονίου με δεσμευμένο ηλεκτρόνιο ατόμου, χωρίς το άτομο να υποστεί διέγερση ή ιονισμό [Hubbell J.H.,1969] και χωρίς το φωτόνιο να υποστεί αντίστοιχη απώλεια ενέργειας [Debertin K.M.,1988]. Η αλληλεπίδραση αυτή είναι αξιόλογη κυρίως για φωτόνια χαμηλών ενεργειών σε υλικά με μεγάλο ατομικό αριθμό Z . Για φωτόνια υψηλών ενεργειών, η σκέδαση Rayleigh οδηγεί σε πολύ μικρές γωνίες εκτροπής. Για χαμηλότερες ενέργειες φωτονίων και ιδιαίτερα για υλικά με υψηλό ατομικό αριθμό Z , η γωνιακή κατανομή των σκεδαζόμενων φωτονίων είναι αρκετά μεγάλη. Για την εκτίμηση της γωνιακής κατανομής σκεδαζόμενων φωτονίων ενέργειας E_γ σε υλικό με ατομικό αριθμό Z χρησιμοποιείται η εμπειρική σχέση: [Hubbell J.H., 1969]

$$\theta_c = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{0.0133 \cdot Z^{1/3}}{E_\gamma}\right) \quad (2.4)$$

Όπου: θ_c η ημιγωνία ενός κώνου μέσα στον οποίο εμπίπτει τουλάχιστον το 75% των φωτονίων που υφίστανται σκέδαση Rayleigh και E_γ η ενέργεια των φωτονίων σε MeV. Όπως και για τις προηγούμενες αλληλεπιδράσεις, έτσι και εδώ ορίζεται ο **μερικός γραμμικός συντελεστή εξασθέσεως λόγω σκέδασης Rayleigh** μ_{scR} (cm^{-1}) και ο μερικός μαζικός συντελεστής εξασθέσεως λόγω σκέδασης Rayleigh μ_{scR}/ρ (cm^2/gr).

Για φωτόνια χαμηλών ενεργειών η φωτοηλεκτρική απορρόφηση είναι πολύ πιο πιθανή από τη σκέδαση Rayleigh και γι αυτό το λόγο πολλές φορές η τελευταία αμελείται κατά τη μελέτη εξασθέσεως φωτονίων. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι για φωτόνια ενέργειας 100keV η πιθανότητα να συμβεί σκέδαση Rayleigh είναι 1-2 τάξεις μεγέθους χαμηλότερη από τη σκέδαση Compton [Fano U, 1953]. Παρόλα αυτά, επειδή κατά τη σκέδαση Rayleigh δεν παρατηρείται απώλεια ενέργειας του φωτονίου, αυτό σημαίνει ότι το φωτόνιο που θα την υποστεί είναι δυνατόν να συνεισφέρει στη δημιουργία της αντίστοιχης φωτοκορυφής στο γ -φάσμα. Κατά συνέπεια, κατά τη γ -φασματοσκοπική ανάλυση, η παρουσία υλικών στην περιοχή περί τον ανιχνευτή (συμπεριλαμβανομένου του υλικού του αναλυόμενου δείγματος) στα οποία μπορούν να γίνουν ελαστικές σκεδάσεις φωτονίων χαμηλών ενεργειών, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

2.3.4 Ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθέσεως

Στις συνήθεις εφαρμογές δεν ενδιαφέρει η πιθανότητα ένα φωτόνιο να υποστεί μία συγκεκριμένη από τις παραπάνω αλληλεπιδράσεις, αλλά η πιθανότητα να υποστεί οποιαδήποτε από αυτές. Στην περίπτωση που το φωτόνιο υποστεί μια από τις παραπάνω αλληλεπιδράσεις, θα αλλάξει διεύθυνση, θα μειωθεί η ενέργειά του ή θα εξαφανιστεί. Το μέγεθος, το οποίο κατ' εξοχήν περιγράφει την εξασθένηση μιας μονοενεργειακής δέσμης φωτονίων, λόγω αλληλεπιδράσεων με την ύλη μέσα από την οποία διέρχεται, είναι ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθέσεως μ (cm^{-1}) του υλικού του απορροφητή. Ο συντελεστής αυτός περιλαμβάνει όλους τους προηγούμενους μερικούς συντελεστές, δηλαδή ισχύει:

$$\mu = \mu_{ph} + \mu_{scC} + \mu_{scR} + \mu_{pair} \quad (2.5)$$

Ο συντελεστής μ εκφράζει την ανά μονάδα μήκους πιθανότητα ένα φωτόνιο, που κινείται μέσα στο υλικό του απορροφητή, να υποστεί μια από τις παραπάνω αλληλεπιδράσεις, που οδηγεί στην αλλαγή της κατεύθυνσής του, τη μείωση της ενέργειάς του ή την εξαφάνισή του.

Στην περίπτωση που το υλικό είναι μείγμα ή χημική ένωση με γνωστή κατά βάρος σύσταση, τότε ο υπολογισμός του συντελεστή μ δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\mu_m = \sum w_i \mu_{mi} \quad (2.6)$$

όπου:

w_i : κατά βάρος αναλογία της κάθε συνιστώσας του μείγματος

μ_{mi} : ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης της κάθε συνιστώσας του μείγματος

2.4 Ο συντελεστής αναγωγής της απόδοσης (η)

2.4.1 Βαθμονόμηση απόδοσης ανιχνευτή

Κατά τη γ -φασματοσκοπική ανάλυση ενός δείγματος, τα φωτόνια του δείγματος τα οποία αλληλεπιδρούν για πρώτη φορά με τον ανιχνευτή με φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, αποδίδοντας έτσι όλη την ενέργειά τους σε αυτόν, σχηματίζουν στο φάσμα αιχμή (γνωστή και ως φωτοκορυφή) στην αντίστοιχη ενέργεια. Κατά την εν συνεχεία ανάλυση του φάσματος, στις αιχμές αυτές αποδίδεται η αντίστοιχη ενέργεια του φωτονίου, που επιτρέπει την ταυτοποίηση του ισότοπου που εκπέμπει τα φωτόνια της ενέργειας αυτής, δηλαδή τον ποιοτικό προσδιορισμό των ισότοπων του δείγματος. Στη συνέχεια, είναι δυνατόν για κάθε ισότοπο που έχει ανιχνευθεί να υπολογιστεί η ραδιενέργεια του, δηλαδή να γίνει ο ποσοτικός προσδιορισμός του. Προκειμένου να είναι δυνατός ο ποσοτικός προσδιορισμός ενός ραδιενεργού ισότοπου πρέπει να έχει προηγηθεί κατάλληλη βαθμονόμηση της ανιχνευτικής διάταξης, που είναι γνωστή ως βαθμονόμηση απόδοσης φωτοκορυφής.

Ως απόδοση φωτοκορυφής (full energy peak efficiency) ορίζεται ο λόγος των γεγονότων που καταγράφονται από την ανιχνευτική διάταξη κάτω από μία φωτοκορυφή και τα οποία οφείλονται σε πλήρη απορρόφηση φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας, προς το συνολικό πλήθος των φωτονίων της ίδιας ενέργειας που εκπέμπονται από την πηγή.

Με τον όρο βαθμονόμηση απόδοσης εννοείται τη διαδικασία εύρεσης της συσχέτισης μεταξύ της απόδοσης ανίχνευσης φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας από την ανιχνευτική διάταξη, με την ενέργεια των φωτονίων.

Η απόδοση φωτοκορυφής δίνεται από τον τύπο:

$$eff_{peak} = \frac{cps}{gps} \quad (2.7)$$

Όπου:

eff_{peak} : η απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή (peak efficiency)

cps: ο ρυθμός των κρούσεων που καταγράφονται (counts per second). Πρόκειται για το λόγο της επιφάνειας της φωτοκορυφής προς τον αντίστοιχο χρόνο συλλογής του φάσματος.

gps: ο ρυθμός των εκπεμπόμενων από την πηγή ακτίνων-γ (gammas per second). Πρόκειται για το γινόμενο της ραδιενέργειας της πηγής επί το αντίστοιχο ποσοστό εκπομπής των φωτονίων της συγκεκριμένης ενέργειας.

Η απόδοση φωτοκορυφής εξαρτάται από τον ανιχνευτή, τη γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή και την ενέργεια των φωτονίων. Στη συνέχεια, περιγράφονται τα βήματα που ακολουθούνται για τη βαθμονόμηση απόδοσης μιας ανιχνευτικής διάταξης:

- i. Προετοιμασία εργαστηριακών προτύπων πηγών της συγκεκριμένης γεωμετρίας, με χρήση πιστοποιημένων πηγών (Certified Reference Sources). Προτείνεται οι πρότυπες πηγές να εκπέμπουν φωτόνια σε όλο το εύρος της ενεργειακής περιοχής που ενδιαφέρει.

- ii. Τοποθέτηση των προτύπων πηγών στην προκαθορισμένη θέση-γεωμετρία και συλλογή του φάσματος για επαρκές χρονικό διάστημα, προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική στατιστική.
- iii. γ-φασματοσκοπική ανάλυση του φάσματος και προσδιορισμός των επιφανειών των φωτοκορυφών που ενδιαφέρουν.
- iv. Για κάθε ενέργεια E_i φωτονίων γίνεται υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής eff_i με βάση τη σχέση:

$$eff = \frac{area}{time \cdot yield \cdot activity} \quad (2.8)$$

όπου:

eff : η απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή για την υπόψη ενέργεια,

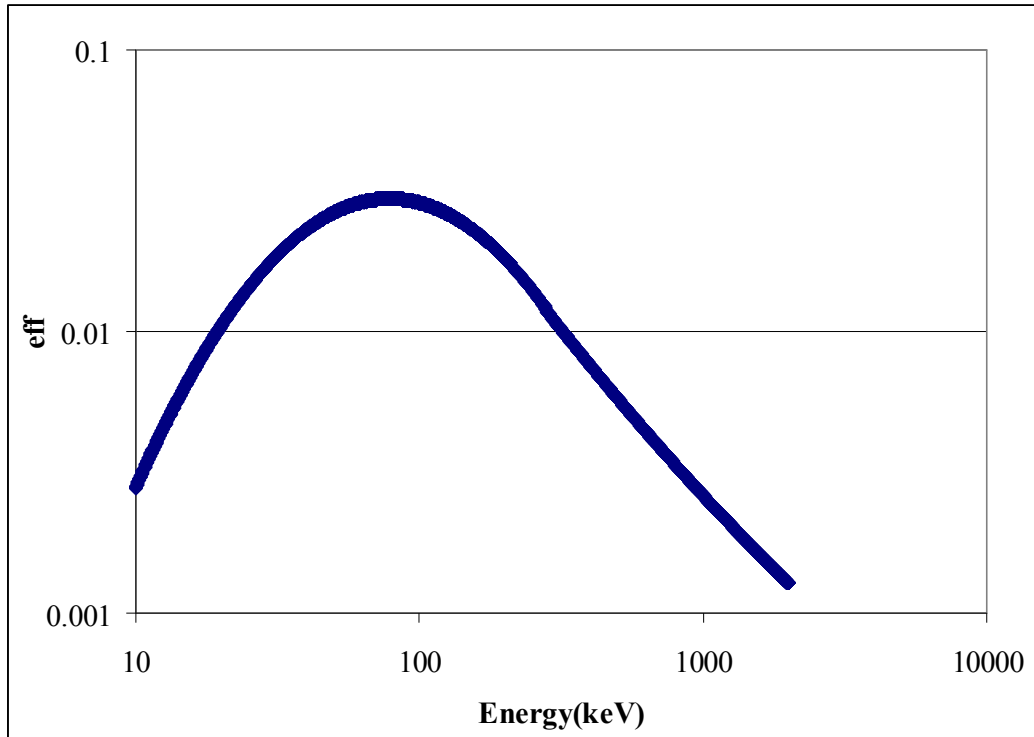
$area$: η καθαρή επιφάνεια της αντίστοιχης φωτοκορυφής στο φάσμα,

$time$: ο χρόνος συλλογής του φάσματος (live time) σε sec,

$yield$: το ποσοστό εκπομπής των φωτονίων που εκπέμπει η πηγή,

$activity$: η ραδιενέργεια του εξεταζόμενου ισοτόπου (Bq) στην πηγή βαθμονόμησης.

- v. Επανάληψη των προηγούμενων βημάτων για κάθε πηγή, στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται περισσότερες από μία πρότυπες πηγές.
- vi. Η βαθμονόμηση απόδοσης ολοκληρώνεται με τοποθέτηση των πειραματικών σημείων (E_i, eff_i) γράφημα με σε λογαριθμικές κλίμακες και προσαρμογή κατάλληλης συνάρτησης στα πειραματικά σημεία. Ανάλογα με την ενεργειακή περιοχή βαθμονόμησης και τον ανιχνευτή, ενδεχομένως είναι απαραίτητη η προσαρμογή περισσότερων της μίας συναρτήσεων αναδρομής στα πειραματικά σημεία. Συνήθως προσαρμόζονται δύο συναρτήσεις αναδρομής, μία για χαμηλές και μεσαίες ενέργειες ($< \sim 200 \text{keV}$) και μία για υψηλές ενέργειες ($> 200 \text{keV}$). Η καμπύλη βαθμονόμησης του ανιχνευτή LEGe, που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ απεικονίζεται στο σχήμα 2.5



Σχήμα 2.5 Καμπύλη βαθμονόμησης ανιχνευτή LEGe

Μετά την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης απόδοσης, η ραδιενέργεια (activity) ενός ισότοπου που ανιχνεύεται σε δείγμα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$activity = \frac{area}{time \cdot yield \cdot eff} \quad (2.9)$$

όπου όλες οι άλλες παράμετροι είναι γνωστές.

2.4.2 Το πρόβλημα αναγωγής της απόδοσης εξαιτίας διαφορετικής αυτοαπορρόφησης στο δείγμα και την πηγή βαθμονόμησης.

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, το σημαντικότερο πρόβλημα που παρουσιάζεται κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση με φωτόνια χαμηλών ενεργειών είναι η αυτοαπορρόφηση των φωτονίων μέσα στο δείγμα. Η ένταση της αυτοαπορρόφησης ποικίλλει από υλικό σε υλικό με αποτέλεσμα η απόδοση ανίχνευσης να διαφέρει από την απόδοση ανίχνευσης φωτονίων της πηγής βαθμονόμησης. Η εκτίμηση της απόδοσης της φωτοκορυφής δίνεται από τη σχέση:

$$eff_{a\pi} = \frac{area_{a\pi}}{time \cdot yield \cdot activity} \quad (2.10)$$

όπου,

$eff_{a\pi}$: η φαινόμενη απόδοση, η οποία ορίζεται ως η απόδοση φωτοκορυφής που προσδιορίζεται μέσω της πρότυπου πηγής βαθμονόμησης και θεωρείται ότι ισχύει για τη συγκεκριμένη γεωμετρία, ανεξαρτήτως του υλικού του δείγματος (κάτι τέτοιο θα συνέβαινε εάν η αυτοαπορρόφηση του αναλυόμενου δείγματος ήταν ίδια με την αυτοαπορρόφηση της πηγής βαθμονόμησης),

$area_{a\pi}$: η επιφάνεια της φωτοκορυφής που αντιστοιχεί σε φωτόνια ενέργειας E, τα οποία εκπέμπονται από την πρότυπο πηγή, όπως εκτιμάται από την ανάλυση του φάσματος,

$time$: η διάρκεια συλλογής του φάσματος (s) (μέγεθος ανεξάρτητο της γεωμετρίας ανίχνευσης και του υλικού της πηγής),

$yield$: το ποσοστό εκπομπής φωτονίων της υπόψιν ενέργειας (μέγεθος ανεξάρτητο της γεωμετρίας ανίχνευσης και του υλικού της πηγής),

$activity$: η ονομαστική ραδιενέργεια του ισοτόπου που περιέχεται στην πρότυπο πηγή βαθμονόμησης και το οποίο εκπέμπει φωτόνια ενέργειας E, κατά το χρόνο συλλογής του φάσματος (Bq).

Η σχέση, η οποία θα οδηγούσε σε εκτίμηση της απόδοσης, στην ιδανική περίπτωση που δεν θα υπήρχε αυτοαπορρόφηση θα ήταν:

$$eff_{0\pi} = \frac{area_{0\pi}}{time \cdot yield \cdot activity} \quad (2.11)$$

όπου,

$eff_{0\pi}$: η απόδοσης φωτοκορυφής για τη συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής – ανιχνευτή, εάν δεν υπήρχε αυτοαπορρόφηση φωτονίων στο υλικό της πηγής,

$area_{0\pi}$: η επιφάνεια που θα είχε η φωτοκορυφή που αντιστοιχεί σε φωτόνια ενέργειας E, εάν δεν υπήρχε αυτοαπορρόφηση φωτονίων στο υλικό της πηγής.

Είναι προφανές ότι τόσο η επιφάνεια $area_{0\pi}$, όσο και η απόδοση $eff_{0\pi}$ είναι ιδεατά μεγέθη και δεν προκύπτουν με κανένα τρόπο πειραματικά, διότι πάντα θα υπάρχει αυτοαπορρόφηση φωτονίων μέσα στην πηγή.

Οι επιφάνειες $area_{a\pi}$ (πραγματική) και η $area_{0\pi}$ (ιδεατή) μπορούν να συνδεθούν μέσω ενός συντελεστή ϕ , ο οποίος χρησιμοποιείται για να ληφθεί υπόψιν η αυτοαπορρόφηση των φωτονίων μέσα στην πρότυπη πηγή βαθμονόμησης. Ο συντελεστής ϕ ορίζεται ως το ποσοστό των φωτονίων που εκπέμπονται από την πηγή, αλλά δεν υφίστανται απορρόφηση μέσα σε αυτήν και παίρνει τιμές στο διάστημα (0,1). Πιο συγκεκριμένα:

$$\phi = \frac{area_{a\pi}}{area_{0\pi}} \quad (2.12)$$

Συνδέοντας τις σχέσεις 2.10, 2.11 και 2.12 προκύπτει η παρακάτω σχέση μεταξύ ϕ , $eff_{a\pi}$ και $eff_{0\pi}$:

$$eff_{0\pi} = eff_{a\pi} / \phi, \quad (2.13)$$

η οποία δίνει την ιδεατή απόδοση συναρτήσει της πραγματικής απόδοσης και του συντελεστή ϕ .

Κατά τη γ -φασματοσκοπική ανάλυση ενός αγνώστου δείγματος, για τον ποσοτικό προσδιορισμό ενός ισοτόπου που εκπέμπει φωτόνια ενέργειας E , η ραδιενέργεια (activity) του ισοτόπου υπολογίζεται από την επιφάνεια κάτω από τη φωτοκορυφή, η οποία αντιστοιχεί στα φωτόνια ενέργειας E ,

$$activity_{\delta} = \frac{area_{\delta}}{eff_{a\pi} \cdot time \cdot yield} \quad (2.14)$$

Όπου:

$activity_{\delta}$: η εκτιμώμενη ραδιενέργεια του δείγματος, μέσω των φωτονίων ενέργειας E , κατά το χρόνο συλλογής του φάσματος (Bq),

$area_{\delta}$: η επιφάνεια της φωτοκορυφής που αντιστοιχεί σε φωτόνια ενέργειας E , όπως εκτιμάται από την ανάλυση του φάσματος,

time : η διάρκεια συλλογής του φάσματος (s) (μέγεθος ανεξάρτητο της γεωμετρίας ανίχνευσης και του υλικού της πηγής),

yield : το ποσοστό εκπομπής φωτονίων της υπόψιν ενέργειας (μέγεθος ανεξάρτητο της γεωμετρίας ανίχνευσης και του υλικού της πηγής).

Κατά την εφαρμογή της παραπάνω σχέσης, αγνοείται η διαφορά της αυτοαπορρόφησης μεταξύ δείγματος και πηγής βαθμονόμησης. Γίνεται δηλαδή η παραδοχή ότι η αυτοαπορρόφηση είναι ίδια και στο αναλυόμενο δείγμα και στην πηγή βαθμονόμησης. Προκειμένου να βρεθεί μια σχέση, η οποία θα προσδιορίζει την πραγματική ραδιενέργεια του δείγματος και θα λαμβάνει υπόψη και τη διαφορά της αυτοαπορρόφησης ανάμεσα στο αναλυόμενο δείγμα και την πηγή βαθμονόμησης, εισάγεται ένας συντελεστής ω , ο οποίος εκφράζει το ποσοστό των φωτονίων που εκπέμπονται προς τον ανιχνευτή, τα οποία δεν υφίστανται αυτοαπορρόφηση μέσα στο δείγμα:

$$\omega = \frac{area_{\delta}}{area_{0\delta}} \quad (2.15)$$

Ο συντελεστής ω – όπως είναι προφανές – λαμβάνει τιμές στο διάστημα [0,1]. Μετά την εισαγωγή του συντελεστή ω , η πραγματική ραδιενέργεια του δείγματος δίνεται από τη σχέση:

$$activity_{0\delta} = \frac{area_{0\delta}}{eff_{0\pi} \cdot time \cdot yield} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{area_{\delta}}{\left(\frac{eff_{a\pi}}{\varphi}\right) \cdot time \cdot yield} \quad (2.16)$$

όπου:

activity_{0δ}: η πραγματική ραδιενέργεια του δείγματος

area_{0δ}: η επιφάνεια που θα είχε η φωτοκορυφή εάν δεν υπήρχε αυτοαπορρόφηση μέσα στο αναλυόμενο δείγμα.

Αν ορισθεί ως πραγματική απόδοση **eff_e** κατά τη διάρκεια ανάλυσης ενός δείγματος, ο λόγος του πλήθους των φωτονίων ενέργειας E που ανιχνεύονται, προς το πλήθος των

εκπεμπόμενων από το αναλυόμενο δείγμα φωτονίων της ίδιας ενέργειας, τότε αυτή συνδέεται με τη φαινόμενη απόδοση $eff_{a\pi}$ με τη σχέση:

$$eff_e = \frac{\omega}{\phi} \cdot eff_{a\pi} = \eta \cdot eff_{a\pi} \quad (2.17)$$

Όπου ο συντελεστής η δίδεται από τη σχέση:

$$\eta = \omega / \phi \quad (2.18)$$

Ο συντελεστής η είναι ο συντελεστής αναγωγής της απόδοσης μεταξύ πηγής βαθμονόμησης και αναλυόμενου δείγματος, για τη συγκεκριμένη γεωμετρία, το συγκεκριμένο ζεύγος υλικών της προτύπου πηγής βαθμονόμησης και του αναλυόμενου δείγματος, και για την υπόψιν ενέργεια φωτονίων E. Ο συντελεστής αναγωγής απόδοσης, σε συνδυασμό με την απόδοση που έχει ευρεθεί για την πρότυπη πηγή βαθμονόμησης, επιτρέπουν την εκτίμηση της απόδοσης ανίχνευσης των φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας του ανάλυση δείγματος.

Έτσι, τελικά, η πραγματική ραδιενέργεια του δείγματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$activity_0 = \frac{area}{eff_e \cdot (time \cdot yield)} \quad (2.19)$$

2.5 Βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθόδων αντιμετώπισης του φαινομένου της αυτοαπορρόφησης στη γ-φασματοσκοπική ανάλυση

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκύπτουν κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση, εξαιτίας της διαφορετικής αυτοαπορρόφησης των φωτονίων χαμηλών ενεργειών, μεταξύ του υλικού του δείγματος και του υλικού της πηγής βαθμονόμησης, έχουν προταθεί και αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

2.5.1 Μέθοδοι που βασίζονται στην παρασκευή προτύπων πηγών βαθμονόμησης της ίδιας γεωμετρίας και σύστασης ίδιας ή όμοιας με αυτή των αναλυόμενων δειγμάτων.

Μια πρώτη μέθοδος που έχει ακολουθηθεί από διάφορους ερευνητές [Postendoerfer J., 1995], [Taskaev E., 1996] βασίζεται στην παρασκευή πηγών με ίδια γεωμετρία και ίδιας ή όμοιας σύστασης, ως προς την απορρόφηση φωτονίων, με αυτή των αναλυόμενων δειγμάτων και στη συνέχεια εκτίμηση του βαθμού απόδοσης για καθεμιά από αυτές.

Μια δεύτερη μέθοδος, που προτείνεται από τον [Yang I.C., 1982], είναι η παρασκευή προτύπων από υλικό που παίζει τον ρόλο του απορροφητή και η ομοιόμορφη κατανομή σε αυτό ποσότητας του ραδιενεργού ισότοπου που ενδιαφέρει. Αυτή η μέθοδος έχει πολλές δυσκολίες, όπως η παρασκευή μεγάλου πλήθους προτύπων [Taskaev E., 1996], η πολυπλοκότητα της διαδικασίας παρασκευής προτύπων [Bland C.J., 1995].

Μια τρίτη μέθοδος, που προτείνεται από τον [Nemeth W.K, 1992] είναι η ανάμιξη μεικτού ραδιενεργού παρασκευάσματος με μια σειρά από υλικά που παίζουν το ρόλο του απορροφητή και στη συνέχεια η εκτίμηση της καμπύλης βαθμονόμησης και όχι σημειακής απόδοσης για συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων.

Μία τέταρτη μέθοδος είναι αυτή που αναπτύχθηκε από τον [Bland C.J, 1995]. Σε αυτή τη μέθοδο γίνεται αρχική εκτίμηση της επιφάνειας κάτω από μια φωτοκορυφή συγκεκριμένης ενέργειας, στη συνέχεια προστίθεται σταδιακά στο δείγμα ραδιενεργό ισότοπο, που εκπέμπει φωτόνια στη συγκεκριμένη ενέργεια και τέλος γίνεται εκτίμηση της ραδιενέργειας του δείγματος κάθε φορά που προσθέτουμε μια ποσότητα ραδιενεργού ισότοπου. Η συσχέτιση των επιφανειών που προκύπτουν από τις προηγούμενες αναλύσεις μας δίνουν την αρχική περιεκτικότητα του δείγματος σε ραδιενέργεια.

Τέλος, στη βιβλιογραφία αναφέρονται και μέθοδοι που είναι εξειδικευμένες σε ανίχνευση ορισμένων ισότοπων, οι οποίες βασίζονται στην εκμετάλλευση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του συγκεκριμένου ισότοπου π.χ. [Coles D.G., 1976] για το ²³⁸U.

2.5.2 Μέθοδοι που βασίζονται στη βαθμονόμηση απόδοσης με πρότυπη πηγή και εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης

Η κατηγορία αυτή των μεθόδων στηρίζεται στη διερεύνηση του βαθμού αυτοαπορρόφησης των φωτονίων μέσα στο αναλυόμενο δείγμα, για την συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη στην τελική εκτίμηση της ραδιενέργειας των δειγμάτων. Η εφαρμογή των σχέσεων που προκύπτουν οδηγούν στην εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης, λόγω διαφορετικής αυτοαπορρόφησης ανάμεσα στην πηγή βαθμονόμησης και το αναλυόμενο δείγμα. Ο συντελεστής αναγωγής της απόδοσης, σε συνδυασμό με την απόδοση φωτοκορυφής που έχει εκτιμηθεί πειραματικά μέσω της πηγής βαθμονόμησης, οδηγούν τελικά στην εκτίμηση της απόδοσης του αναλυόμενου δείγματος. Οι συγκεκριμένες μέθοδοι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν εκείνες οι μέθοδοι που βασίζονται σε αναλυτική σχέση για την εκτίμηση του βαθμού αυτοαπορρόφησης μέσα στο δείγμα και στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι μέθοδοι εκείνες που στηρίζονται σε εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής απόδοσης από το υλικό της πηγής βαθμονόμησης στο υλικό του αναλυόμενου δείγματος, λόγω της διαφορετικής αυτοαπορρόφησης μεταξύ των δύο υλικών:

2.5.2.1 Μέθοδοι που βασίζονται σε αναλυτική σχέση, για την εκτίμηση του βαθμού απόδοσης μέσα στο δείγμα.

Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στη σχέση αυτοαπορρόφησης που εισήχθη από τον [Miller K.M., 1987]:

$$A/O = \frac{1 - e^{-\mu \cdot H}}{\mu \cdot H} \quad (2.20)$$

Σε αυτή τη σχέση ο λόγος A/O εκφράζει το ποσοστό των φωτονίων που εξέρχονται από την πηγή παρθενικά και προσβάλλουν κάθετα τον ανιχνευτή, σε σχέση με εκείνα που θα εξέρχονταν εάν η πηγή δεν παρουσίαζε αυτοαπορρόφηση. Προϋπόθεση για να εφαρμοστεί η παραπάνω σχέση είναι ότι τα φωτόνια που εξέρχονται από την πηγή και προσβάλλουν το ανιχνευτή παρθενικά, συνιστούν παράλληλη δέσμη, η οποία προσπίπτει κάθετα στον ανιχνευτή. Η συνολική εξασθένιση των φωτονίων που προέρχονται από την πηγή πάχους H προκύπτει ολοκληρώνοντας την σχέση:

$$I(h) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot h} \quad (2.21)$$

όπου:

$I(h)$: Η ένταση που θα είχε η παράλληλη δέσμης εάν δεν είχε υποστεί εξασθένηση μέσα στο υλικό της πηγής (φωτόνια/cm²s).

μ : Ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του υλικού της πηγής (cm⁻¹), όπως έχει οριστεί στην παράγραφο 2.3.4.

h : Το πάχος του υλικού της πηγής, στο οποίο υφίστανται εξασθένηση τα φωτόνια που εκπέμπονται από το στοιχειώδη όγκο. Τα πάχος αυτό ισοδυναμεί με το μήκος διαδρομής των φωτονίων μέσα στην πηγή (cm), και μεταβάλλεται από 0 έως H .

Η σχέση 2.21 έχει προκύψει θεωρώντας πηγή φωτονίων όγκου, τοποθετημένη κεντρικά σε άπειρο ύψος πάνω από τον ανιχνευτή έτσι ώστε η δέσμη να εξασφαλίζεται ότι τα φωτόνια που προσπίπτουν στον ανιχνευτή έχουν την ίδια πιθανότητα να απορροφηθούν από αυτόν ανεξάρτητα από τη θέση από την οποία εκπέμφθηκαν μέσα στην πηγή. Στην πραγματικότητα, μπορεί να εφαρμοστεί και σε περιπτώσεις που η διαστάσεις της πηγής και του ανιχνευτή μπορούν να θεωρηθούν πολύ μικρότερες της μεταξύ τους απόστασης. Η πηγή μπορεί να είναι είτε δείγμα υπό ανάλυση, είτε πηγή βαθμονόμησης. Στην περίπτωση αυτή, από τη σχέση 2.21 προκύπτει η εξασθένηση των φωτονίων που εκπέμπονται από ένα στοιχειώδη όγκο της πηγής, και τα οποία διανύουν παρθενικά απόσταση h μέσα στην πηγή, συνιστώντας παράλληλη δέσμη φωτονίων με διεύθυνση κάθετη προς τον ανιχνευτή.

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία για την εκτίμηση της αυτοαπορρόφησης έχει χρησιμοποιηθεί πολλές φορές στη βιβλιογραφία, οδηγώντας σε:

- μεθόδους που στηρίζονται στη σχέση της αυτοαπορρόφησης και στη σχέση εξασθένησης δέσμης μονοενεργειακών φωτονίων από εξωτερική πηγή [Cutshall N.H., 1983], [Joshi S.R., 1988], [Oresugan M.O., 1993],
- μεθόδους προσδιορισμού του βαθμού αυτοαπορρόφησης, μέσω της εκτίμησης της επίδρασης του υλικού του δείγματος στη μεταβολή της ενεργού στερεάς γωνίας μεταξύ δείγματος ανιχνευτή [Gilmore G., 1996].

2.5.2.2 Μέθοδοι που στηρίζονται σε εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής απόδοσης.

Η μέθοδος που θα περιγραφεί στη συνέχεια οδηγεί σε εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής απόδοσης από το υλικό της πηγής βαθμονόμησης στο υλικό του αναλυόμενου δείγματος, λόγω της διαφορετικής αυτοαπορρόφησης μεταξύ των δύο υλικών. Η μέθοδος εισήχθη από τον [Debertin K., 1988] και είναι εφαρμόσιμη για κυλινδρική γεωμετρία δειγμάτων, χωρίς τους κατά το ύψος περιορισμούς που υφίστανται για τη σχέση αυτοαπορρόφησης.

Πρώτο βήμα για την εφαρμογή της μεθόδου είναι ο υπολογισμός ενός διπλού ολοκληρώματος, το οποίο είναι ανάλογο της απόδοσης φωτοκορυφής, για τη χρησιμοποιούμενη κυλινδρική γεωμετρία και υλικό με ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης μ [Αναγνωστάκης Μ., 1988]:

$$J(\mu) = \int_0^R \int_0^t \frac{e^{-\mu \cdot z}}{r^2 + (x+d)^2} \cdot r \cdot dx \cdot dr \quad (2.22)$$

όπου:

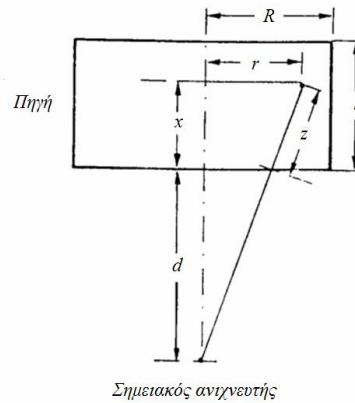
d: Η ιδεατή απόσταση μεταξύ της πηγής και ανιχνευτή (cm), η οποία ορίζεται ως η απόσταση από την επιφάνεια του δείγματος που βρίσκεται απέναντι από τον ανιχνευτή, ως έναν ιδανικό σημειακό ανιχνευτή, που βρίσκεται μέσα στον ανιχνευτή. Η απόσταση εισάγεται έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη ότι τα φωτόνια δεν απορροφώνται στην επιφάνεια του ανιχνευτή αλλά μέσα σε αυτόν.

R: Ακτίνα της πηγής (cm).

t: Ύψος της πηγής (cm).

z: Μήκος εντός της πηγής που διανύει ένα φωτόνιο, το οποίο φτάνει στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή, χωρίς προηγουμένως να έχει υποστεί κάποια αλληλεπίδραση μέσα στην πηγή ή στα ενδιάμεσα υλικά που παρεμβάλλονται και αποδίδει όλη την ενέργειά του στον ανιχνευτή με φωτοηλεκτρική απορρόφηση. Για τον υπολογισμό του μεγέθους αυτούς χρησιμοποιείται η σχέση:

$$z = x \cdot [r^2 + (x + d)^2]^{0.5} / (x + d) \quad (2.23)$$



Σχήμα 2.6 Μήκος διαδρομής φωτονίων στο εσωτερικό της πηγής

Αν το παραπάνω ολοκλήρωμα $J(\mu)$ (σχέση 2.22) υπολογιστεί δύο φορές, μία για το υλικό της πηγής βαθμονόμησης, με ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένησης μ_c και μία για το υλικό του δείγματος, με ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένησης μ_s , τότε ο συντελεστής αναγωγής της απόδοσης η από το υλικό της πηγής βαθμονόμησης στο υλικό του αναλυόμενου δείγματος δίδεται από τη σχέση :

$$\eta = J(\mu_c) / J(\mu_s) \quad (2.24)$$

Η μοναδική παραδοχή που χρειάζεται για την εφαρμογή της παραπάνω σχέσης είναι η παραδοχή σημειακού ανιχνευτή σε βάθος d_e , το οποίο εκτιμάται και πειραματικά. Κατά τα άλλα δεν υπάρχουν περιορισμοί για το πάχος του δείγματος ή την απόσταση του δείγματος από τον ανιχνευτή, πράγμα το οποίο αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου. Από τις σχέσεις 2.22 και 2.24 είναι προφανές ότι για τον υπολογισμό του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης, υπάρχει ανάγκη γνώσης του ολικού συντελεστή εξασθένησης μ για τα υλικά της πηγής βαθμονόμησης και του δείγματος. Το γεγονός ότι στη βιβλιογραφία υπάρχουν ελάχιστα δεδομένα για το συντελεστή μ των περιβαλλοντικών υλικών, τα οποία συνήθως αναλύονται στο ΕΠΤ, είναι ίσως και ο λόγος που η παραπάνω μέθοδος εκτίμησης του συντελεστή αναγωγής δεν συναντάται συχνά στη βιβλιογραφία.

2.5.3 Μέθοδοι που βασίζονται στην απευθείας εκτίμηση της απόδοσης για τη γεωμετρία και τη συγκεκριμένη σύσταση του υλικού που ενδιαφέρει

Στις μεθόδους αυτές εκτιμάται απ' ευθείας η απόδοση για την ανίχνευση φωτονίων που εκπέμπονται από πηγή του υλικού του δείγματος. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει ανάγκη εισαγωγής διόρθωσης απόδοσης. Η συγκεκριμένη κατηγορία μεθόδων περιλαμβάνει 3 υποκατηγορίες μεθόδων εκτίμησης της απόδοσης. Αυτές είναι:

- μέθοδοι Monte Carlo,
- μέθοδοι αριθμητικού υπολογισμού της απόδοσης για κυλινδρική πηγή και συγκεκριμένο υλικό, μέσω της απόδοσης για σημειακές πηγές τοποθετημένες μέσα στην κυλινδρική πηγή,
- μέθοδοι υπολογισμού της απόδοσης για γεωμετρία όγκου, μέσω του υπολογισμού της ενεργού στερεάς γωνίας για τη συγκεκριμένη γεωμετρία και υλικό και σημειακή πηγή μονοενεργειακών φωτονίων σε θέση αναφοράς.

2.5.3.1 Μέθοδοι Monte- Carlo (M-C)

Η μέθοδος αυτή εκτίμησης βασίζεται στην υπολογιστική προσομοίωση της ιστορίας κάθε φωτονίου το οποίο εκπέμπεται από την πηγή. Κάθε φωτόνιο παρακολουθείται από τη στιγμή που εκπέμπεται από την πηγή μέχρι την εισαγωγή του στον ανιχνευτή, όπου αλληλεπιδρά με φωτοηλεκτρική απορρόφηση, σκέδαση Compton ή δίδυμη γένεση, ενώ παρακολουθούνται και τα φωτόνια ή σωματίδια που παράγονται από τις προηγούμενες αλληλεπιδράσεις. Με παρακολούθηση ενός μεγάλου πλήθους φωτονίων (π.χ. 10^8 - 10^9) είναι δυνατή η εκτίμηση της απόδοσης φωτοκορυφής. Η ακρίβεια προσδιορισμού της απόδοσης φωτοκορυφής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, μεταξύ των οποίων και το πλήθος των φωτονίων που προσομοιώνονται. Οι κώδικες που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι:

- GEANT4: Ο κώδικας αυτός είναι ο διάδοχος του κώδικα GEANT, ο οποίος αποτελεί σειρά εργαλείων λογισμικού που αναπτύχθηκε από το CERN, Αποτελεί κώδικα με ευρύ πεδίο εφαρμογών.

- PENELOPE: Ο κώδικας PENELOPE είναι γραμμένος σε γλώσσα Fortran και αναπτύχθηκε το 1996 στο Πανεπιστήμιο της Βαρκελώνης [Francesc Salvat, José M. Fernández-Varea, 1996]. Προσομοιώνει τη μετάδοση ποζιτρονίων, ηλεκτρονίων και φωτονίων μέσα στην ύλη, μέσα από σύνθετες κατασκευές αποτελούμενες από σύνθετα υλικά. Ο συγκεκριμένος κώδικας είναι αυτός που χρησιμοποιείται και στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.
- MCNP : Πρόκειται για πακέτο λογισμικού για την προσομοίωση πυρηνικών διαδικασιών, το οποίο έχει αναπτυχθεί στο Los Alamos National Laboratory των ΗΠΑ. Χρησιμοποιείται κυρίως για την προσομοίωση των πυρηνικών διεργασιών, όπως η σχάση, αλλά έχει την ικανότητα να προσομοιώνει και τις αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων που αφορούν νετρόνια, φωτόνια και ηλεκτρόνια. [L.L. Carter, E.D. Cashwell, 1975].

Πέραν από τους παραπάνω κώδικες που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση ποικιλίας προβλημάτων αλληλεπιδράσεων ακτινοβολίας 7 ύλης, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί κώδικες οι οποίοι εξειδικεύονται στον υπολογισμό απόδοσης ανιχνευτών γ-ακτινοβολίας, είναι ταχύτεροι και φιλικότεροι προς το χρήστη. Δύο τέτοιοι κώδικες είναι ο GESPECOR και ο DETEFF.

- GESPECOR : Ο κώδικας GESPECOR [O.Sima, D. Arnold, 1996] αρχικά αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό των διορθώσεων που απαιτούνται λόγω των φαινομένων αυτοαπορρόφησης και πραγματικής σύμπτωσης - τυχαίας άθροισης, και είναι εμπορικά διαθέσιμος από τη CID Media GmbH. Αργότερα, προστέθηκε και η δυνατότητα υπολογισμού της ολικής απόδοσης φωτοκορυφής. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στον κώδικα GESPECOR είναι θεωρητικά τεκμηριωμένες, ενώ τα αποτελέσματα έχουν ελεγχθεί διεξοδικά, μετά από συγκρίσεις με πειραματικές μετρήσεις, που πραγματοποιήθηκαν στο Ινστιτούτο PTB (Physikalisch Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany). Σε γενικές γραμμές, για τις γεωμετρίες και δείγματα που συνήθως χρησιμοποιούνται, η αβεβαιότητα των υπολογισμών αυτοαπορρόφησης είναι μικρότερη (συχνά πολύ μικρότερη) από 5% για ενέργειες φωτονίων μεταξύ 50keV και 100keV, και κάτω από 1% για ενέργειες φωτονίων πάνω από 100keV. Ακόμη και στις περιπτώσεις όπου το

φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης είναι υπεύθυνο για σημαντική μείωση της απόδοσης κατά 10-20 φορές, οι υπολογισμοί αναπαράγουν πολύ καλά τις μετρούμενες τιμές, εντός των ορίων των πειραματικών σφαλμάτων.

- DETEFF: Πρόκειται για κώδικα προσομοίωσης Monte Carlo, ο οποίος χρησιμοποιείται για βαθμονόμηση απόδοσης σε τυπικό ομοαξονικό ανιχνευτή ακτίνων-γ [N.C. Diaz, M.J. Vargas, 2008]. Η γλώσσα που χρησιμοποιείται είναι Borland Delphi 3, ενώ ο κώδικας αποτελείται από επτά βασικές ενότητες, με σαφώς καθορισμένα καθήκοντα. Το πρόγραμμα παρέχει ένα απλό εργαλείο για να διευκολυνθεί ο υπολογισμός των συντελεστών αυτοαπορρόφησης, για ορισμένα τυπικά υλικά που συναντώνται στους ανιχνευτές ακτίνων-γ και σε περιβαλλοντικά δείγματα. Το πρόγραμμα δίνει και τη δυνατότητα προσομοίωσης της χρήσης φίλτρου μεταξύ πηγής και του ανιχνευτή.

2.5.3.2 Μέθοδος αριθμητικού υπολογισμού της απόδοσης για πηγή όγκου, μέσω της απόδοσης για σημειακές πηγές.

Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόστηκε από τον [Miller K.M., 1987] και αφορά στη βαθμονόμηση κυλινδρικής πηγής. Υπό την προϋπόθεση αξονικής συμμετρίας του συστήματος πηγής ανιχνευτή, η απόδοση για τη γεωμετρία της πηγής όγκου του σχήματος .7 μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{2}{R^2 \cdot H} \int_0^H \int_0^R \varepsilon(h,r) \cdot r \cdot dr \cdot dh \quad (2.25)$$

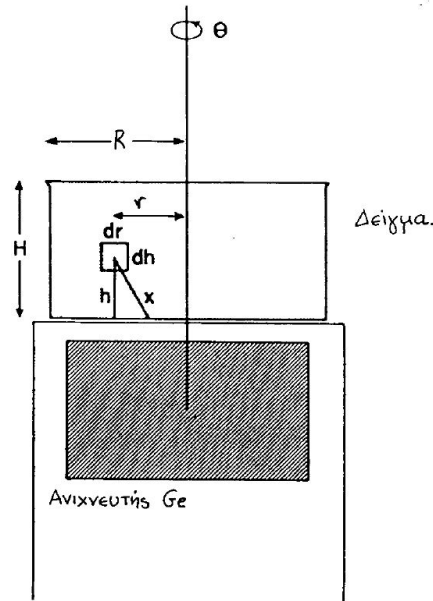
όπου:

ε : απόδοση της γεωμετρίας κυλινδρικής πηγής – ανιχνευτή

$\varepsilon(h,r)$: απόδοση για σημειακή πηγή τοποθετημένη μέσα στο δείγμα, σε θέση που ορίζεται από ύψος h από την βάση της πηγής και την ακτίνα r από τον άξονά της

H : συνολικό ύψος κυλινδρικής πηγής

R : ακτίνα της κυλινδρικής πηγής



Σχήμα 2.7 Γεωμετρία ολοκλήρωσης για τον αριθμητικό υπολογισμό της απόδοσης σε κυλινδρική πηγή

Ο υπολογισμός του ολοκληρώματος γίνεται αριθμητικά. Για την εφαρμογή της παραπάνω σχέσης απαιτείται η γνώση των γεωμετρικών στοιχείων της πηγής και της απόδοσης για φωτόνια που εκπέμπονται σε διάφορες θέσεις μέσα στο δείγμα. Η εκτίμηση της απόδοσης αυτής μπορεί να γίνει πειραματικά, με τοποθέτηση σημειακής πηγής σε επιλεγμένες θέσεις μέσα στο δείγμα. Με την προϋπόθεση αξονικής συμμετρίας του συστήματος πηγή-ανιχνευτής, αρκεί η τοποθέτηση της πηγής σε επιλεγμένες θέσεις πάνω σε μια ακτίνα του κυλινδρικού δείγματος σε διάφορα ύψη. Με την προσθήκη στρώματος απορροφητή είναι δυνατή η εκτίμηση της απόδοσης για δείγμα της κυλινδρικής γεωμετρίας από το υλικό του απορροφητή.

Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει δυο βασικά μειονεκτήματα, την παραδοχή αξονικής συμμετρίας μεταξύ πηγής και ανιχνευτή, πράγμα που δεν είναι εξασφαλισμένο στους ανιχνευτές Ge, όπως και στον ανιχνευτή LGe του ΕΠΤ-ΕΜΠ [ΔΔ Αναγνωστάκη, 1998], και το γεγονός ότι για τον υπολογισμό της απόδοσης για κάθε υλικό απαιτείται μεγάλο πλήθος μετρήσεων της απόδοσης με σημειακές πηγές. Γι αυτούς τους λόγους η μέθοδος εφαρμόζεται συνήθως για τον έλεγχο της ορθότητας των αποτελεσμάτων κάποιας άλλης – ταχύτερης μεθόδου – εκτίμησης της απόδοσης.

2.5.3.3 Μέθοδοι υπολογισμού της απόδοσης για γεωμετρία όγκου μέσω του υπολογισμού της ενεργού στερεάς γωνίας σημειακής πηγής.

Η συγκεκριμένη μέθοδος αναπτύχθηκε από τον [Moens L., 1981] και υλοποιείται με τα παρακάτω βήματα:

- Υπολογισμός της «ενεργού στερεάς γωνίας» για τη συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή και το υλικό της πηγής. Η στερεά γωνία αυτή εκτιμάται από κατάλληλες σχέσεις που έχουν αναπτυχθεί για διάφορες γεωμετρίες, με αριθμητική ολοκλήρωση. Κατά τον υπολογισμό της στερεάς γωνίας λαμβάνεται υπόψη, πέρα από τα γεωμετρικά στοιχεία και η εξασθένιση των φωτονίων μέσα στο υλικό της πηγής και σε όλα τα μεταξύ πηγής και ανιχνευτή παρεμβαλλόμενα υλικά. Γι αυτό το λόγο πρέπει να είναι γνωστές οι τιμές του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης όλων των υλικών για την ενέργεια που ενδιαφέρει, οι γεωμετρικές διαστάσεις πηγής ανιχνευτή και η μεταξύ τους απόσταση.
- Πειραματικός προσδιορισμός της απόδοσης φωτοκορυφής για τα φωτόνια της ενέργειας που ενδιαφέρει, με σημειακή πηγή τοποθετημένη σε απόσταση αναφοράς πάνω από τον ανιχνευτή.
- Υπολογισμός της στερεάς γωνίας αναφοράς Ω_{ref} για τη σημειακή πηγή τοποθετημένη στην θέση αναφοράς.

Η απόδοση φωτοκορυφής ε_p , για τη συγκεκριμένη κυλινδρική γεωμετρία και υλικό δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{p,ref} (\Omega / \Omega_{ref}) \quad (2.26)$$

όπου:

$\varepsilon_{p,ref}$: η απόδοση φωτοκορυφής που έχει εκτιμηθεί για τη γεωμετρία αναφοράς, δηλαδή με σημειακή πηγή τοποθετημένη στην θέση αναφοράς

Ω : η στερεά γωνία που έχει εκτιμηθεί για την υπόψιν κυλινδρική γεωμετρία

Ω_{ref} : η στερεά γωνία που έχει εκτιμηθεί για τη σημειακή πηγή στη θέση αναφοράς.

Η παραδοχή που πρέπει να γίνει για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής είναι ότι ο λόγος P/T (peak to total), που ορίζεται ως ο λόγος της απόδοσης φωτοκορυφής προς τη συνολική απόδοση του ανιχνευτή είναι χαρακτηριστικό του ανιχνευτή, ανεξάρτητο της γεωμετρίας δείγματος ανιχνευτή. Στην πραγματικότητα, ο συγκεκριμένος λόγος εξαρτάται από το δείγμα και τη γεωμετρία δείγματος-ανιχνευτή, αφού στη δημιουργία της συνολικής επιφάνειας του φάσματος συνεισφέρουν και τα φωτόνια που έχουν υποστεί ελάττωση της ενέργειάς τους, λόγω σκέδασης στα περιβάλλοντα του ανιχνευτή υλικά. Άρα, η παραπάνω σχέση πρέπει να θεωρείται προσεγγιστική.

2.6 Βιβλιογραφική ανασκόπηση μεθόδων υπολογισμού του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ εκφράζει την ανά μονάδα μήκους πιθανότητα ένα φωτόνιο που κινείται μέσα σε υλικό απορροφητή να υποστεί οποιαδήποτε αλληλεπίδραση. Οι κυριότεροι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται ο συντελεστής μ είναι η ενέργεια των φωτονίων, η σύσταση και η πυκνότητα του υλικού του απορροφητή. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πίνακες που δίδουν το συντελεστή μ για ορισμένα υλικά – κυρίως στοιχεία, χημικές ενώσεις και ορισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται στη δοσιμετρία & ακτινοπροστασία – καθώς και σχέσεις (συνήθως εμπειρικές) που επιτρέπουν τον υπολογισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης.

2.6.1 Εμπειρικές σχέσεις προσδιορισμού του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης.

Για τον προσδιορισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης, έχει προταθεί [Oresugan M.O.,1993] η παρακάτω εμπειρική σχέση:

$$\mu(E, Z) = R(Z)^{-3.15} + S(Z) \cdot \exp\left[0.408 \cdot (\ln E) - 0.066 \cdot (\ln E)^2\right] \quad (2.27)$$

όπου:

$\mu(E,Z)$: ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ (cm^{-1}) του υλικού με ατομικό αριθμό Z και ενέργεια φωτονίων $E(\text{keV})$

$R(Z)$, $S(Z)$: σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό και την πυκνότητά του.

Όπως προέκυψε από διερεύνηση που έγινε [ΔΔ Αναγνωστάκης,1998] η παραπάνω σχέση 2.27 δεν οδηγεί σε ικανοποιητική εκτίμηση του συντελεστή μ για φωτόνια στην περιοχή χαμηλών ενεργειών (40 –200keV), όπου παρατηρείται έντονη μεταβολή της τιμής του μ με την ενέργεια. Αντίθετα, για φωτόνια με ενέργειες υψηλότερες των 200keV, όπου η μεταβολή της τιμής του μ σε συνάρτηση με τη μεταβολή της ενέργειας δεν είναι τόσο έντονη η παραπάνω εμπειρική σχέση οδηγεί σε ικανοποιητική εκτίμηση του μ .

Στα πλαίσια της [ΔΔ Αναγνωστάκης, 1998] έγινε προσπάθεια για τη εύρεση μιας μορφής κατάλληλης συνάρτησης αναδρομής για την ικανοποιητική προσαρμογή πειραματικών σημείων (E_i, μ_i), προκειμένου να είναι δυνατή η εκτίμηση του μ για ένα υλικό, για ορισμένη ενέργεια φωτονίων. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα και υπολογισμοί για διάφορα υλικά όπως: νερό, πολυαιθυλένιο, mylar, KCl, 4M HCl, 0.5M HCl, SiO₂ και γυαλί. Τα αποτελέσματα της διερεύνησης έδειξαν ότι τα δεδομένα από τα συγκεκριμένα υλικά στην περιοχή των 40-200keV προσαρμόζονται πολύ ικανοποιητικά σε συνάρτηση της μορφής :

$$\ln(\mu) = a_0 + a_1 \cdot \ln(E) + a_2 \cdot (\ln(E))^2 \quad (2.28)$$

με τους συντελεστές a_0 , a_1 και a_2 να εξαρτώνται από το υλικό του απορροφητή. Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιείται και στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Ένα ακόμη είδος σχέσεων που χρησιμοποιούνται στο ΕΠΤ- ΕΜΠ είναι αυτές της μορφής $\mu = f(E,\rho)$, οι οποίες αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της [ΔΔ Αναγνωστάκης, 1998] για μία σειρά από υλικά. Οι συγκεκριμένες πολλαπλές συσχετίσεις μεταξύ του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης, της ενέργειας και της πυκνότητας του υλικού δείχνουν την έντονη εξάρτηση του μ από αυτά τα δύο μεγέθη. Ενδεικτικά αναφέρονται ορισμένες από αυτές τις συσχετίσεις για συγκεκριμένο εύρος ενεργειών και εύρος πυκνοτήτων.

- Για χώμα, πυκνότητας $0.54 - 1.95 \text{ gr/cm}^3$ και ενέργειες φωτονίων 45-186keV:

$$\mu = 0.01 \cdot \exp(3.022004 \cdot (\ln E)^{-1.283368} \cdot (\ln 100\rho)^{1.278268}) \quad (2.29)$$

- Για λιγνίτη, πυκνότητας $0.72-1.17 \text{ gr/cm}^3$ και ενέργειες φωτονίων 45-121keV:

$$\mu = 0.01 \cdot \exp(1.016926 \cdot (\ln E)^{-1.143787} \cdot (\ln 100\rho)^{1.818483}) \quad (2.30)$$

- Για ιπτάμενη τέφρα, πυκνότητας $0.72 - 1.19\text{gr/cm}^3$ και ενέργειες φωτονίων 45-186keV:

$$\mu = 0.01 \cdot \exp(7.529048 \cdot (\ln E)^{-1.723823} \cdot (\ln 100\rho)^{1.100737}) \quad (2.31)$$

- Για σκωρία, πυκνότητας $0.74-1.19\text{gr/cm}^3$ και ενέργειες φωτονίων 45-121keV:

$$\mu = 0.01 \cdot \exp(1.387226 \cdot (\ln E)^{-1.440420} \cdot (\ln 100\rho)^{1.920543}) \quad (2.32)$$

2.6.2 Βιβλιογραφικές πηγές προσδιορισμού του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης.

Η χρήση των θεωρητικών και εμπειρικών σχέσεων που υπάρχουν για τον προσδιορισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης, επέτρεψε τη δημιουργία πινάκων και γραφημάτων για όλα τα στοιχεία του Περιοδικού Πίνακα με τους επιμέρους συντελεστές εξασθένησης μ_{ph}/ρ , μ_{sc}/ρ , μ_{pair}/ρ , μ_{scR}/ρ , για κάθε μια από τις κυριότερες αλληλεπιδράσεις, καθώς επίσης και για τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένησης. Από τους πληρέστερους πίνακες που υπάρχουν στη βιβλιογραφία είναι αυτοί στο δημοσίευμα [Hubell J.H, 1982]. Το συγκεκριμένο δημοσίευμα περιέχει δεδομένα για τον συντελεστή μ_m για:

- Τα στοιχεία του περιοδικού συστήματος.
- Υλικά που παρουσιάζουν ενδιαφέρον στην ακτινοπροστασία, όπως μπετόν, μολυβδύαλος, αέρας, νερό κλπ
- Υλικά που παρουσιάζουν ενδιαφέρον στη δοσιμετρία, όπως ιστοί διαφόρων ειδών

- Ορισμένα πλαστικά όπως PVC, mylar, nylon
- Συνθετικά υλικά και χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή διαφόρων ειδών ανιχνευτών ακτινοβολιών, όπως NaI, CsI κλπ

Τα δεδομένα των πινάκων για φωτόνια ενέργειας από 10eV έως 20MeV και για τα στοιχεία του περιοδικού πίνακα έχουν προκύψει από θεωρητικές σχέσεις, η ακρίβεια των οποίων έχει ελεγχθεί πειραματικά [Hubbell J.H.,1982]. Για τα υπόλοιπα υλικά γνωστή σύστασης έχουν προκύψει με βάση τη σχέση:

$$\mu_m = \sum w_i \mu_{mi} \quad (2.33)$$

όπου:

μ_{mi} : ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης του κάθε συστατικού

w_i : η κατά βάρος περιεκτικότητα του συστατικού στο υλικό.

Οι αβεβαιότητες που συνοδεύουν τις τιμές των παραπάνω πινάκων είναι τις τάξης του $\pm 5\%$ για ενέργειες μικρότερες των 5keV και $\pm 2\%$ για ενέργειες στην περιοχή 5keV έως 10MeV.

Για μια σειρά υλικά όπως: διάφορα είδη μπετόν και διάφορα πετρώματα, τα οποία παρουσιάζουν ενδιαφέρον λόγω των ιδιοτήτων θωράκισης φωτονίων που έχουν, διατίθενται στη βιβλιογραφία [Etherington H., 1958], [Hubbell J.H.,1969] τιμές του συντελεστή μ_m για ενέργειες φωτονίων υψηλότερες των 100keV.

Επιπλέον των πινάκων, στη βιβλιογραφία διατίθενται και γραφήματα τόσο του συντελεστή μ_m όπως και των επιμέρους συντελεστών κάθε μιας από τις πιθανές αλληλεπιδράσεις, συναρτήσει της ενέργειας φωτονίων, για διάφορα υλικά, όπως τα στοιχεία του περιοδικού πίνακα, νερό, αέρας, ζωικοί ιστοί κλπ [Rockwell T., 1956], [Λεωνίδου Δ., 1984], [Debertin K.M., 1988]. Τέλος, διατίθενται πίνακες οι οποίοι περιέχουν θεωρητικά όσο και πειραματικά δεδομένα για τα παραπάνω υλικά, μετά από κατάλληλη αξιολόγηση [Greagh D., 1990]

Από το 1999 το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας των ΗΠΑ (NIST) δημιούργησε μια ιδιαίτερα πλούσια και εύχρηστη πηγή συντελεστών

εξασθένισης. Η βάση δεδομένων του περιλαμβάνει τους μερικούς μαζικούς συντελεστές εξασθένισης, για κάθε πιθανή αλληλεπίδραση καθώς και ολικούς μαζικούς συντελεστές εξασθένισης για ενέργειες από 1keV έως 100GeV, σε μορφή πινάκων. Ακόμη μπορεί να υπολογίσει τους προαναφερθέντες συντελεστές για όλα τα στοιχεία του περιοδικού πίνακα (από $Z=1$ έως $Z=100$), για χημικές ενώσεις και για μείγματα, εφόσον είναι γνωστή η κατά βάρος σύστασή τους. Η βάση δεδομένων είναι προσβάσιμη από την ιστοσελίδα του NIST, στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/>.

Παρόλο το μεγάλο πλούτο δεδομένων που διατίθενται στη βιβλιογραφία για τον γραμμικό και μαζικό συντελεστή εξασθένισης, διαπιστώνεται ότι για τους συντελεστές μ και μ_m περιβαλλοντικών υλικών, που συχνά ενδιαφέρει η ανάλυσή τους, οι πληροφορίες που διατίθενται στη βιβλιογραφία είναι ελάχιστες. Αυτό συμβαίνει γιατί κάθε περιβαλλοντικό δείγμα, όπως το χώμα, είναι μοναδικό σε κάθε δειγματοληψία και κατ'επέκταση είναι αδύνατον να υπάρχουν δεδομένα για όλα τα χώματα. Λόγω της έλλειψης δεδομένων, συχνά παρατηρείται να προσομοιώνονται υλικά όπως το χώμα, με άλλα υλικά ίδιας πυκνότητας. Τα αποτελέσματα αυτά, όπως έχει αποδειχτεί [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998] δεν είναι ακριβή για φωτόνια χαμηλών ενεργειών. Η λύση η οποία συχνά επιλέγεται είναι ο προσδιορισμός του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ για το υπό ανάλυση υλικό, μέσω πειραματικής διαδικασίας. Οι δυσκολίες της επιλογής αυτής δεν πρέπει να παραβλέπονται, κυρίως, διότι θα πρέπει να διατίθεται κατάλληλη πειραματική διάταξη, η οποία να δίνει σε εύλογο χρονικό διάστημα στατιστικά ικανοποιητικά αποτελέσματα, για το εύρος των ενεργειών φωτονίων που εξετάζονται, αλλά και των πυκνοτήτων των υλικών που χρησιμοποιούνται.

Κεφάλαιο 3: Πειραματικός προσδιορισμός της βέλτιστης γεωμετρίας για τον προσδιορισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ

3.1 Εισαγωγή

Στόχος της παρούσας ΔΕ ήταν η εύρεση κατάλληλης γεωμετρίας δέσμης φωτονίων για τον πειραματικό υπολογισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ και του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένησης μ_m , στην περιοχή των χαμηλών ενεργειών ($>200\text{keV}$) και ειδικότερα των πολύ χαμηλών ενεργειών ($<100\text{keV}$). Η συγκεκριμένη περιοχή εκλέχθηκε, διότι σε αυτήν το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης είναι πιο έντονο. Ένας συνήθης τρόπος υπολογισμού των συντελεστών εξασθένησης περιβαλλοντικών υλικών είναι ο πειραματικός, καθώς δεν υπάρχουν ικανοποιητικά δεδομένα στη βιβλιογραφία για τα υλικά αυτά. Αυτό σημαίνει ότι ο προσδιορισμός των συντελεστών πρέπει να είναι όχι μόνο επαρκώς ακριβής αλλά και ταχύς. Στην παρούσα διπλωματική επιλέχθηκε ως ανώτερη χρονική διάρκεια πειραμάτων για τον προσδιορισμό των συντελεστών μ και μ_m για ένα υλικό και μία ενέργεια φωτονίων η μία ημέρα.

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό της βέλτιστης γεωμετρίας για τον υπολογισμό των συντελεστών μ και μ_m . Στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ ενδιέφεραν συγκεκριμένες ενέργειες φωτονίων και για αυτό το λόγο επιλέχθηκαν και οι κατάλληλες πηγές. Στη συνέχεια, η συγκεκριμένη γεωμετρία δέσμης που επιλέχθηκε χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των συντελεστών μ και μ_m για διάφορα υλικά, με σκοπό τον έλεγχο της ακρίβειας της μεθόδου. Αυτό κρίθηκε σκόπιμο να γίνει λόγω της έντονης εξάρτησης του συντελεστή μ από την πυκνότητα και το είδος του υλικού. Οι αρχικές μετρήσεις έγιναν για απιονισμένο νερό, ενώ οι μετρήσεις επιβεβαίωσης έγιναν για άλατα και οξείδια μετάλλων.

3.2 Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας προσδιορισμού των συντελεστών μ και μ_m

Ένας συνήθης τρόπος υπολογισμού των συντελεστών εξασθένησης μ και μ_m είναι ο πειραματικός, καθώς δεν υπάρχουν αρκετά δεδομένα στη βιβλιογραφία για περιβαλλοντικά υλικά. Στη βιβλιογραφία, έχουν προταθεί αρκετές τεχνικές για τον πειραματικό προσδιορισμό τους, όπως η χρήση λεπτής μονοενεργειακής δέσμης φωτονίων (narrow beam) και η χρήση ανοικτής μονοενεργειακής δέσμης φωτονίων (broad beam).

Σε κάθε περίπτωση, τα πειράματα τα οποία προτείνονται βασίζονται στη διέλευση μονοενεργειακής δέσμης φωτονίων μέσα από συγκεκριμένα πάχη του υλικού του απορροφητή και τον προσδιορισμό κάθε φορά της εξασθένησης των φωτονίων μέσα από το υλικό, με απλή εφαρμογή του νόμου της εξασθένησης φωτονίων (σχέση 2.1). Πρέπει να επισημανθεί ότι ο νόμος αυτός (i) ισχύει για φωτόνια τα οποία δεν έχουν υποστεί καμία αλληλεπίδραση με το υλικό του απορροφητή και κατά συνέπεια δεν έχουν υποστεί απώλεια ενέργειας και (ii) ισχύει μόνο για παράλληλη (στενή) δέσμη φωτονίων. Η χρήση της ανοικτής δέσμης μονοενεργειακών φωτονίων παρουσιάζει δυσκολίες, καθώς το πάχος υλικού που διέρχονται στην περίπτωση αυτή τα φωτόνια εξαρτάται από τη γωνία εκπομπής του κάθε φωτονίου. Επιπλέον, ο ανιχνευτής είναι δυνατό να ανιχνεύει και φωτόνια τα οποία έχουν υποστεί σκέδαση στο υλικό του απορροφητή με μικρή απώλεια ενέργειας. Παρόλα αυτά η χρήση ανοικτής δέσμης φωτονίων είναι σε ορισμένες περιπτώσεις δυνατή, καθώς φωτόνια τα οποία έχουν υποστεί σκέδαση στο υλικό του απορροφητή με μικρή απώλεια ενέργειας, μπορεί να καταγραφούν στον ανιχνευτή ως φωτόνια με ενέργεια ίση με την αρχική, όπως τα φωτόνια που προβλέπει ο εκθετικός νόμος εξασθένησης. Κατά συνέπεια, είναι δυνατόν – υπό προϋποθέσεις – με χρήση ανοικτής δέσμης φωτονίων και εφαρμογή του εκθετικού νόμου της εξασθένησης να εκτιμηθούν με ικανοποιητική ακρίβεια οι συντελεστές μ και μ_m . Η ακρίβεια κατά τον προσδιορισμό των συντελεστών μ και μ_m εξαρτάται από τη γεωμετρία της δέσμης, την ενέργεια των φωτονίων και το υλικό του απορροφητή.

Στην παρούσα ΔΕ χρησιμοποιήθηκε, και αναλύεται παρακάτω, η τεχνική που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998] για τον πειραματικό προσδιορισμό του μ για περιβαλλοντικά υλικά. Στα πλαίσια της τεχνικής αυτής, χρησιμοποιήθηκαν και αναλύθηκαν διάφορες γεωμετρίες δέσμης φωτονίων για τον προσδιορισμό της βέλτιστης γεωμετρίας, που είτε υπήρχαν στη βιβλιογραφία είτε προτάθηκαν και δοκιμάσθηκαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης ΔΕ.

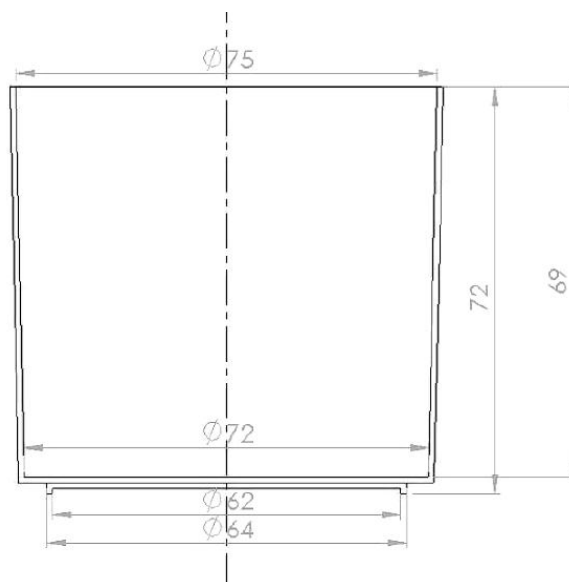
Για τα πειράματα που διεξήχθησαν στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ, για την τοποθέτηση του υλικού του απορροφητή χρησιμοποιήθηκε κυλινδρικό δοχείο, όγκου 282ml και ύψους 69mm το οποίο παρουσιάζει ελαφρά κωνικότητα (σχήμα 3.1). Η ακτίνα R που αντιστοιχεί σε ύψος h δίδεται από τη σχέση [ΔΕ Βασιλοπούλου Θ., 2008] :

$$R(cm) = 0.029 \cdot h(cm) + 3.54(cm) \quad (3.1)$$

Το εμβαδόν της βάσης (S) του δίδεται από τον τύπο:

$$S(cm^2) = \pi \cdot d(cm)^2 / 4 \quad (3.2)$$

όπου d : η εσωτερική διάμετρος του κυλινδρικού δοχείου. Για το δοχείο αυτό το εμβαδόν της βάσης είναι $S = 40.715cm^2$.



Σχήμα 3.1: Κυλινδρικό δοχείο όγκου 282cm³

Τα πειραματικά αποτελέσματα αναλύθηκαν με δύο διαφορετικούς τρόπους, με στόχο (i) τον προσδιορισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ και (ii) τον προσδιορισμό του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένησης μ_m . Περισσότερες λεπτομέρειες για τη μεθοδολογία ανάλυσης παρατίθενται στο παράρτημα Β.

Συνοπτικά, για κάθε υλικό για το οποίο προσδιορίστηκαν και ο ολικός γραμμικός και ο μαζικός συντελεστής εξασθένησης, ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

- Εκτίμηση της πυκνότητας του υπό εξέταση υλικού
- Υπολογισμός της μάζας υλικού που απαιτείται να τοποθετηθεί στο δοχείο όγκου 282cm^3 των για να επιτευχθεί συγκεκριμένο πάχος του υλικού
- Πλήρωση του δοχείου με απορροφητή σε διάφορα ύψη
- Προσδιορισμός της εξασθένησης των φωτονίων της δέσμης μέσα από τα διάφορα πάχη υλικού
- Επεξεργασία των αποτελεσμάτων της εξασθένησης για τα διάφορα πάχη και προσδιορισμός των συντελεστών μ και μ_m .

Η εκτίμηση της πυκνότητας για κάθε υλικό γινόταν με πλήρωση δοχείου γνωστού όγκου με το εκάστοτε υλικό και ζύγιση. Χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό αυτό διάφορα δοχεία, με όγκους από 27.4cm^3 έως 88.5cm^3 , ανάλογα με τη διαθέσιμη ποσότητα υλικού. Επειδή ο συντελεστής μ έχει έντονη εξάρτηση από την πυκνότητα, τα υλικά με υψηλή συμπίεστικότητα χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής, διότι μπορεί τα διαδοχικά στρώματα υλικού τα οποία διαμορφώνονται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων να εμφανίζουν διαφορετική πυκνότητα, απλά και μόνο λόγω διαφορετικού βαθμού συμπίεσης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι το χόμα, το τσιμέντο και η ιπτάμενη τέφρα, καθώς και διάφορα άλατα που χρησιμοποιήθηκαν για ανάλυση στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ. Για το λόγο αυτό, προκειμένου να σχηματισθεί μέσα στο δοχείο όγκου 282cm^3 στρώμα ορισμένου πάχους από ένα υλικό, πρέπει κάθε φορά να υπολογίζεται ο όγκος που πρέπει να καταλαμβάνει στο δοχείο το στρώμα αυτό και να πολλαπλασιάζεται με την πυκνότητα του υλικού που έχει εκτιμηθεί. Έτσι, προκύπτει η μάζα υλικού που πρέπει να τοποθετηθεί στο δοχείο, προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος υλικού.

Αναλυτικά, η διαδικασία που ακολουθήθηκε για κάθε πείραμα με διαφορετικό πάχος απορροφητή ήταν η εξής:

- Τοποθέτηση του δοχείου πάνω στον ανιχνευτή και της εξωτερικής πηγής φωτονίων πάνω από το δοχείο και ομοαξονικά προς αυτό, σε καθορισμένη απόσταση, ανάλογα με το είδος της πηγής, την ενέργεια των φωτονίων που εκπέμπει και την γεωμετρία πειράματος, η οποία εξετάζεται.
- Για κάθε πάχος x_i απορροφητή και μάζα m_i , συλλογή του αντίστοιχου φάσματος των φωτονίων της εξωτερικής πηγής για επαρκή χρόνο, έτσι ώστε οι σχηματιζόμενες φωτοκορυφές που αντιστοιχούν στα φωτόνια που ενδιαφέρουν να έχουν σχηματιστεί με καλή στατιστική και το επιθυμητό κατά περίπτωση σφάλμα.
- Μεταφορά του φάσματος σε αρχείο H/Y και γ-φασματοσκοπική ανάλυσή του, για προσδιορισμό της επιφάνειας των φωτοκορυφών, που αντιστοιχούν στις ενέργειες των φωτονίων της πηγής που ενδιαφέρουν. Η μεταφορά και η ανάλυση των φασμάτων πραγματοποιείται με τον κώδικα SPUNAL, ο οποίος έχει αναπτυχθεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ και χρησιμοποιείται για τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση.
- Για κάθε ενέργεια φωτονίων που ενδιαφέρει, εκτίμηση του λόγου της επιφάνειας της αντίστοιχης φωτοκορυφής προς τη διάρκεια συλλογής του φάσματος ($\text{counts} \cdot \text{s}^{-1}$, cps). Η ποσότητα αυτή είναι ανάλογη του ρυθμού I_i των καταμετρούμενων από τον ανιχνευτή φωτονίων ($\text{φωτόνια} \cdot \text{s}^{-1}$) για το πάχος x_i του απορροφητή.
- Προσαρμογή των πειραματικών σημείων (x_i , $\ln I_i$) σε γραμμική συνάρτηση αναδρομής. Η κλίση της ευθείας αναδρομής είναι η ζητούμενη εκτίμηση του συντελεστή μ για το υλικό του απορροφητή και τη συγκεκριμένη ενέργεια.
- Απεικόνιση σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα, των σημείων (x_i , I_i) και της αντίστοιχης ευθείας αναδρομής, για κάθε ενέργεια φωτονίων.

Τα δύο τελευταία βήματα της μεθοδολογίας υπολογισμού διαφοροποιούνται στην περίπτωση που αντί για τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης υπολογίζεται ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης, ως εξής:

- Υπολογισμός για κάθε πάχος απορροφητή του λόγου της μάζας υλικού στο δοχείο προς την επιφάνεια του δοχείου (m_i/S), δηλαδή της ποσότητας υλικού ανά cm^2 μέσα στο δοχείο. Προσαρμογή των πειραματικών σημείων ($m_i/S, \ln I_i$) σε γραμμική συνάρτηση αναδρομής. Η κλίση της ευθείας αναδρομής είναι η ζητούμενη εκτίμηση του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένισης για το υλικό του απορροφητή και τη συγκεκριμένη ενέργεια.
- Απεικόνιση σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα, των σημείων ($m_i/S, I_i$) και της αντίστοιχης ευθείας αναδρομής, για κάθε ενέργεια φωτονίων.

Το τελευταίο βήμα και στις δύο περιπτώσεις είναι ο υπολογισμός της αβεβαιότητας του ολικού γραμμικού και του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένισης, ως η αβεβαιότητα της κλίσης της κάθε ευθείας. Όλες οι αβεβαιότητες υπολογίστηκαν σε επίπεδο 1σ .

3.2.1 Ραδιενεργές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων

Στα πλαίσια της ΔΕ ενδιαφέρει η περιοχή χαμηλών ενεργειών (0-200keV), και ειδικότερα οι ενέργειες μικρότερες των 100keV, διότι σε αυτές τις περιοχές το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης είναι πιο έντονο και δεν έχει μέχρι τώρα προσδιοριστεί κατάλληλη γεωμετρία για τον πειραματικό προσδιορισμό του μ . Γι αυτό το λόγο επιλέχθηκαν οι παρακάτω πηγές:

- Σημειακή πηγή ^{226}Ra , της Amersham International, ενεργότητας 57.1kBq
- Πηγή όγκου ^{226}Ra , διάλυμα όγκου 282ml σε 0.5M HNO_3 ενεργότητας 45kBq.
- Σημειακή πηγή ^{152}Eu , της Amersham International 1 μCi
- Αβαθμονόμητη επιφανειακή πηγή ^{210}Pb
- Επιφανειακές πηγές φυσικού Ουρανίου (foils) διαμέτρου 1cm

Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν εξετάστηκαν όλες οι φωτοκορυφές που δημιουργούνται από τα φωτόνια των παραπάνω πηγών, αλλά μόνον οι φωτοκορυφές που δημιουργούνται από φωτόνια ενέργειας μικρότερης των 200keV, έχουν σχετικά υψηλά ποσοστά εκπομπής και να είναι σχετικά απομονωμένες, ώστε να μη

δημιουργείται σύγχυση με τη δημιουργία πολλαπλών φωτοκορυφών από γειτονικές. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω ενέργειες φωτονίων:

- Για τη σημειακή πηγή του ^{226}Ra έγινε καταγραφή μόνο των φωτοκορυφών στα 46.54keV και 186.25keV βασιζόμενοι στις παρατηρήσεις του [Δ.Δ Αναγνωστάκης Μ., 1998],
- Για την πηγή όγκου του ^{226}Ra έγινε καταγραφή μόνο των φωτοκορυφών στα 46.54keV και 186.25 keV.
- Για τη σημειακή πηγή ^{152}Eu έγινε καταγραφή μόνο των κορυφών στα 45.36keV, στα 46.63keV και στα 121.78keV.
- Για τη σημειακή πηγή του ^{210}Pb έγινε καταγραφή μόνο της φωτοκορυφής στα 46.54keV.
- Για τις επιφανειακές πηγές ουρανίου έγινε καταγραφή των φωτοκορυφών του ^{234}Th στα 63.36keV και του ^{235}U στα 185.72 keV.

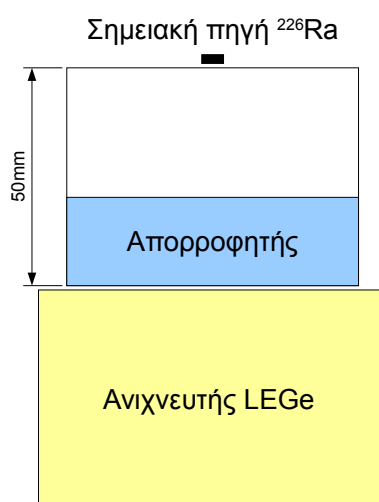
3.3 Ανασκόπηση των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για προσδιορισμό της κατάλληλης γεωμετρίας δέσμης φωτονίων

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με στόχο την εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας δέσμης φωτονίων, για τον πειραματικό υπολογισμό του ολικού γραμμικού και μαζικού συντελεστή εξασθένισης. Στη σειρά αυτή των πειραμάτων δοκιμάστηκαν εννέα διαφορετικές γεωμετρίες, με σκοπό την εκτίμηση των συντελεστών με όσο το δυνατόν μικρότερη απόκλιση από την αντίστοιχη τιμή της βιβλιογραφίας, αλλά και την ταχύτητα του πειράματος. Η αποδεκτή απόκλιση για το μ και το μ/ρ από τις τιμές που δίνει το NIST, για την αποδοχή μιας γεωμετρίας, ορίστηκε στο $\pm 10\%$. Ο απορροφητής που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη σειρά πειραμάτων ήταν απιονισμένο νερό. Ο ανιχνευτής φωτονίων είχε βαθμονομηθεί στην περιοχή 0-2000keV (ανιχνευτής «3») εκτός από τα πειράματα στην γεωμετρία 9, όπου ο ανιχνευτής είχε βαθμονομηθεί στην περιοχή 0-200keV (ανιχνευτής «6»). Τα πρώτα πειράματα έγιναν με σκοπό την

εξοικείωση με την πειραματική διαδικασία και τον έλεγχο της γεωμετρίας που είχε υιοθετηθεί στα πλαίσια προηγούμενης ΔΕ [ΔΕ Φωτεινάκη, 2012].

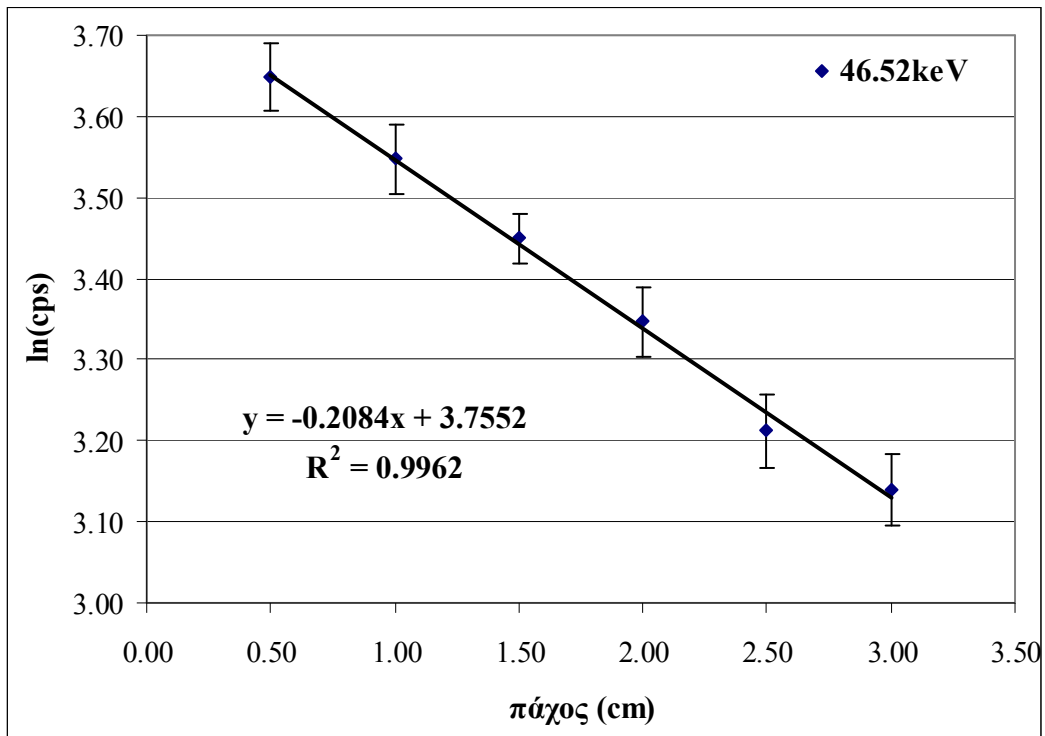
3.3.1 Γεωμετρία 1

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στο πρώτο πείραμα είχε προταθεί από [ΔΕ Φωτεινάκη, 2012] και η γεωμετρία της φαίνεται στο σχήμα 3.2:

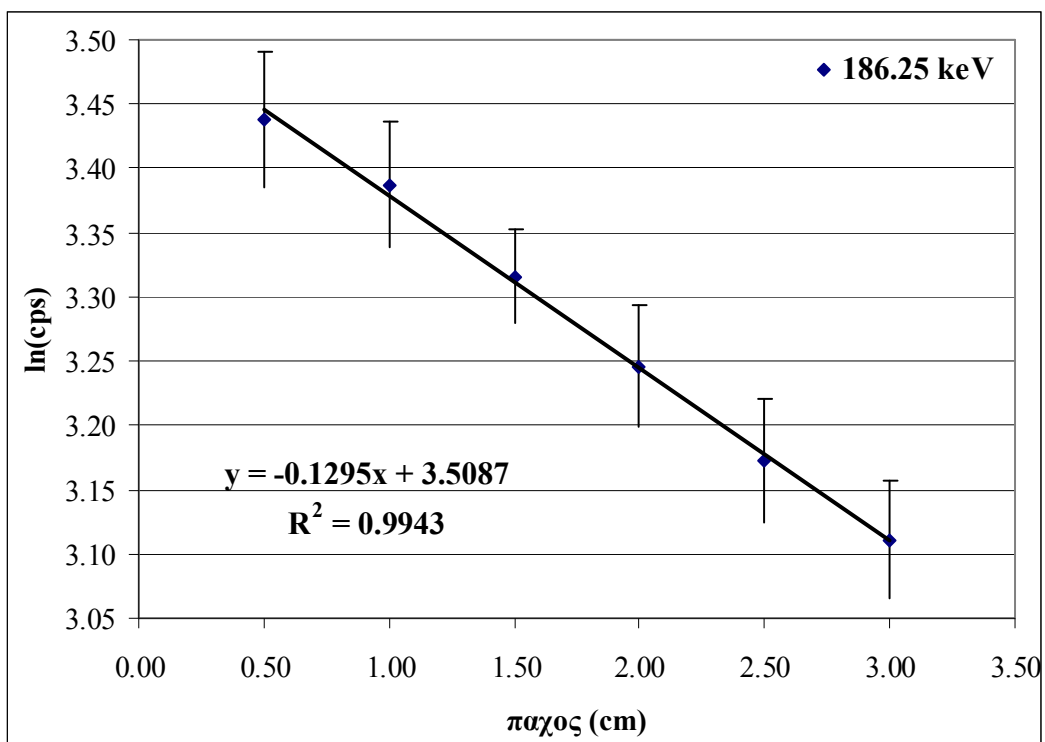


Σχήμα 3.2: Πειραματική διάταξη γεωμετρίας 1

Οι μετρήσεις έγιναν με σημειακή πηγή ^{226}Ra και για πάχη 5, 10, 15, 20, 25 και 30 mm και ανιχνευτή «3». Ακολουθώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2, δημιουργήθηκαν τα ημιλογαριθμικά διάγραμμα υπολογισμού του μ που φαίνονται στα σχήματα 3.3 και 3.4:



Σχήμα 3.3: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV.

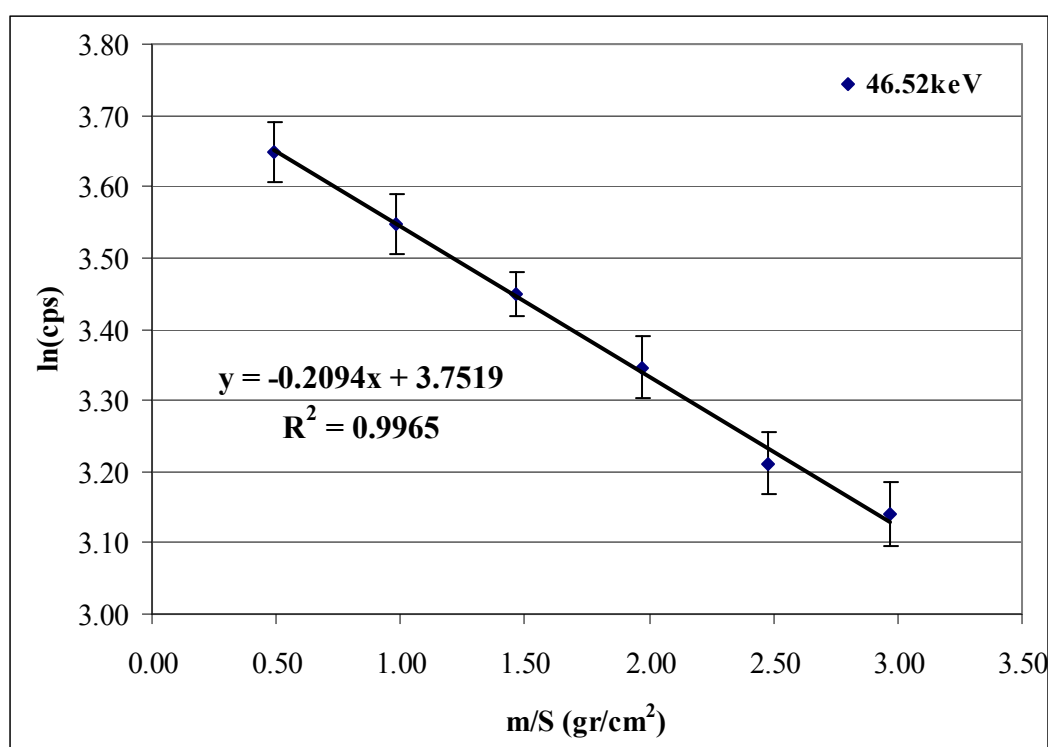


Σχήμα 3.4: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV.

Ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης είναι η απόλυτη τιμή της κλίσης της ευθείας αναδρομής που προέκυψε από τα δύο πρώτα διαγράμματα. Για τα 46.52keV προέκυψε ότι $\mu=0.2004\text{cm}^{-1}$ και για τα 186.25keV, $\mu=0.1295\text{cm}^{-1}$. Οι συγκεκριμένες τιμές συγκρίθηκαν με τις τιμές της βιβλιογραφίας και συγκεκριμένα με αυτές που προτείνει το NIST¹, δηλαδή για 46.52keV $\mu=0.2464\text{cm}^{-1}$ και για 186.25keV $\mu=0.1344\text{cm}^{-1}$. Η σύγκριση των τιμών έγινε με υπολογισμό της απόκλισης της πειραματικής από την τιμή της βιβλιογραφίας, από τη σχέση:

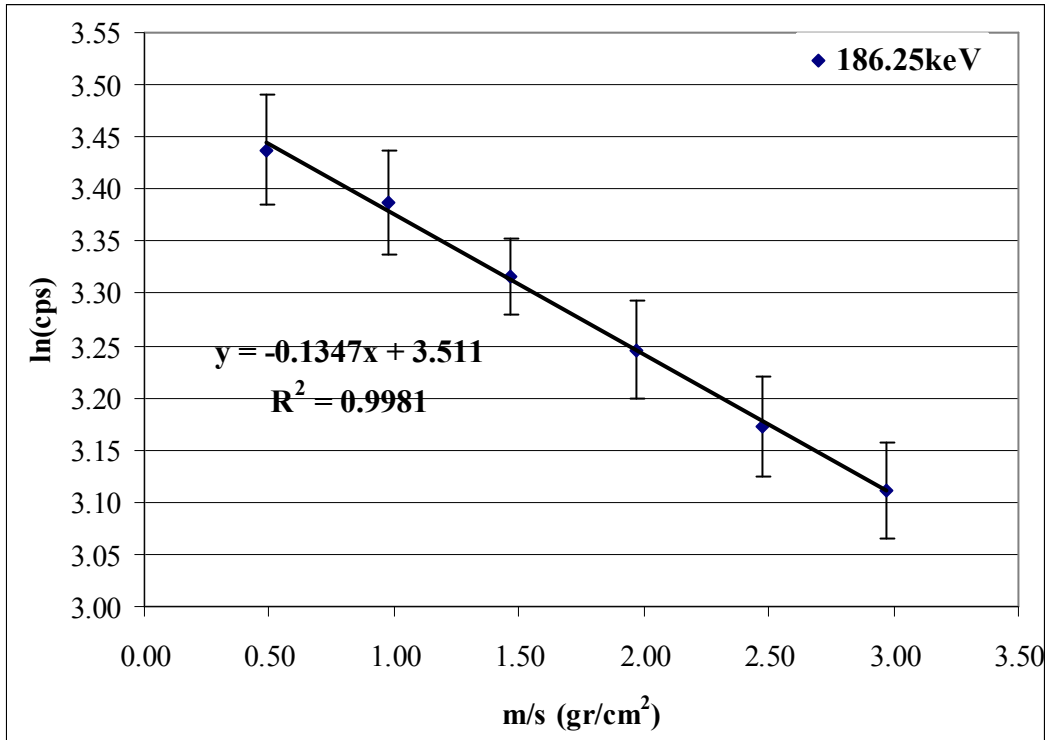
$$\% \text{απόκλιση} = \frac{\mu_{\text{πειραματικό}} - \mu_{\text{NIST}}}{\mu_{\text{NIST}}} \quad (3.3)$$

Η απόκλιση για τα 46.52keV βρέθηκε: -18.67% και για τα 186.25keV: -3.65%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1 . Ακόμη δημιουργήθηκαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα υπολογισμού του μ_m τα οποία φαίνονται στα σχήματα 3.5 και 3.6:



Σχήμα 3.5: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV.

¹ Η βάση δεδομένων XCOM του NIST περιέχει τιμές για τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένησης όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (2.6.1), και βρίσκεται στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>.



Σχήμα 3.6: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV.

Ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης είναι η απόλυτη τιμή της κλίσης της ευθείας αναδρομής που προέκυψε από τα διαγράμματα. Για τα 46.52keV προέκυψε ότι $\mu=0.2094\text{cm}^2/\text{gr}$ και για τα 186.25keV, $\mu=0.1347\text{cm}^2/\text{gr}$. Οι συγκεκριμένες τιμές συγκρίθηκαν με τις τιμές της βιβλιογραφίας και συγκεκριμένα με αυτές που προτείνει το NIST, δηλαδή για 46.52keV $\mu=0.2464\text{cm}^2/\text{gr}$ και για 186.25keV $\mu=0.1344\text{cm}^2/\text{gr}$. Η σύγκριση των τιμών έγινε με υπολογισμό της απόκλισης της πειραματικής από την τιμή της βιβλιογραφίας, από τη σχέση:

$$\% \text{απόκλιση} = \frac{\mu_{m,\text{πειραματικό}} - \mu_{m,\text{NIST}}}{\mu_{m,\text{NIST}}} \quad (3.4)$$

Η απόκλιση για τα 46.52keV βρέθηκε: -15.02% και για τα 186.25keV: 0.22%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1

Ενέργεια		Πείραμα	NIST	απόκλιση
46.52keV	μ (cm^{-1})	0.2004 \pm 0.0091	0.2464	-18.67%
	μ/ρ (cm^2/gr)	0.2094 \pm 0.0088	0.2464	-15.02%
186.25keV	μ (cm^{-1})	0.1295 \pm 0.0062	0.1344	-3.65%
	μ/ρ (cm^2/gr)	0.1347 \pm 0.0041	0.1344	0.22%

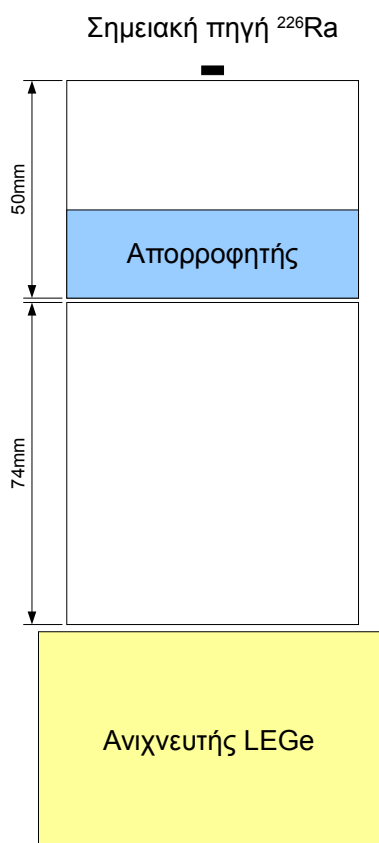
Πίνακας 3.1 Αποτελέσματα πειράματος σε γεωμετρία 1

Τα αποτελέσματα, τα οποία προέκυψαν επιβεβαιώνουν τις μετρήσεις που είχαν γίνει στο παρελθόν [ΔΕ Φωτεινάκη, 2012]. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η συγκεκριμένη γεωμετρία δίνει πολύ καλά αποτελέσματα για τα 186.25keV και προτείνεται για την ενέργεια 186.25keV να χρησιμοποιείται η υπόψη γεωμετρία δέσμης. Για την ενέργεια 46.52keV, η απόκλιση από τη θεωρητική τιμή δεν είναι σε αποδεκτά επίπεδα. Ακόμη, προκύπτει ότι η απόκλιση για τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένισης μ_m είναι μικρότερη από την απόκλιση του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ . Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι, στην περίπτωση του υπολογισμού του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ , χρησιμοποιούνται ύψη απορροφητή τα οποία βασίζονται στη γεωμετρία του κυλινδρικού δοχείου², η οποία αβεβαιότητα αναφορικά με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοχείου², μεταφέρεται στο ύψος του απορροφητή μέσα στο δοχείο και κατά συνέπεια στον προσδιορισμό του μ . Στην περίπτωση του υπολογισμού του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένισης μ_m , το μέγεθος που χρησιμοποιείται είναι μόνον η μάζα του απορροφητή.

² Όπως η εξάρτηση της διαμέτρου του δοχείου με το ύψος του δοχείου

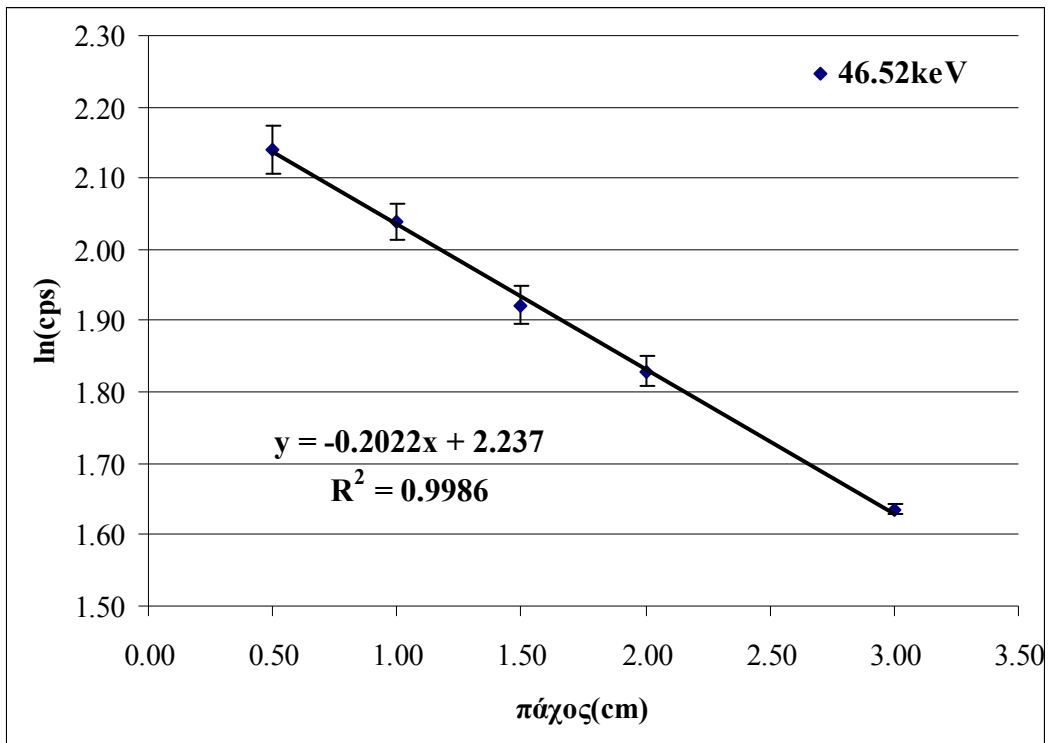
3.3.2 Γεωμετρία 2

Η πειραματική διάταξη, η οποία χρησιμοποιήθηκε στο δεύτερο πείραμα φαίνεται στο σχήμα 3.7:

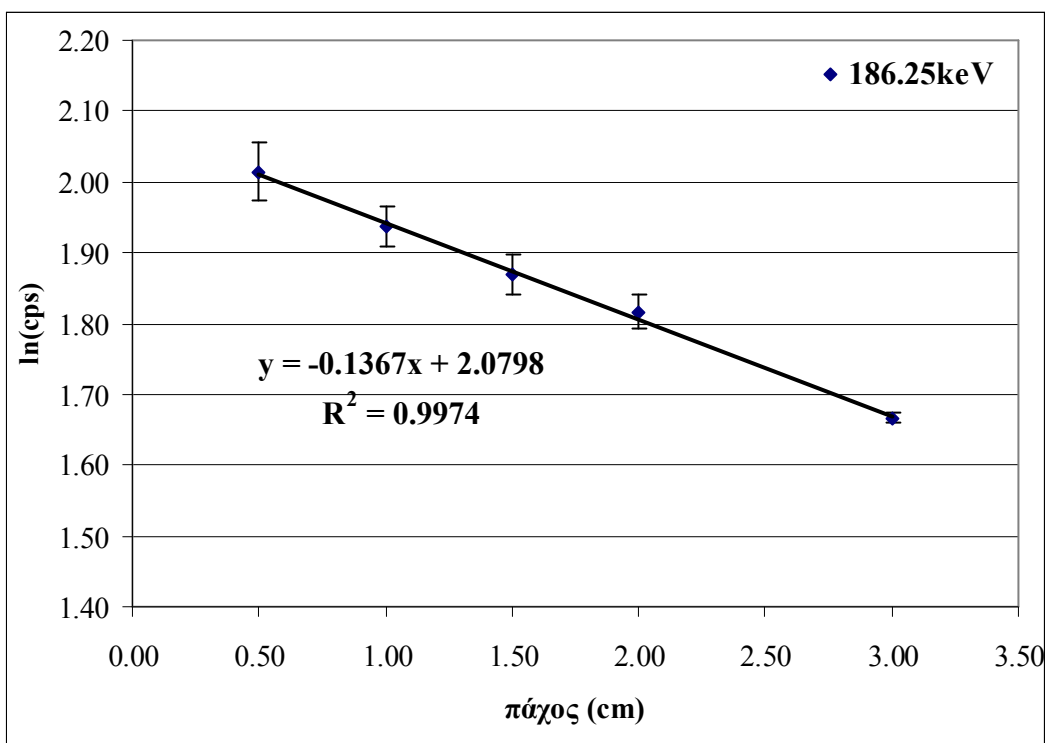


Σχήμα 3.7: Πειραματική διάταξη γεωμετρίας 2

Οι μετρήσεις έγιναν με σημειακή πηγή ^{226}Ra για πάχη απορροφητή 5, 10, 15, 20 και 30mm στον ανιχνευτή «3». Ακολουθώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2, όπως πριν προέκυψαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα για τον προσδιορισμό του μ :

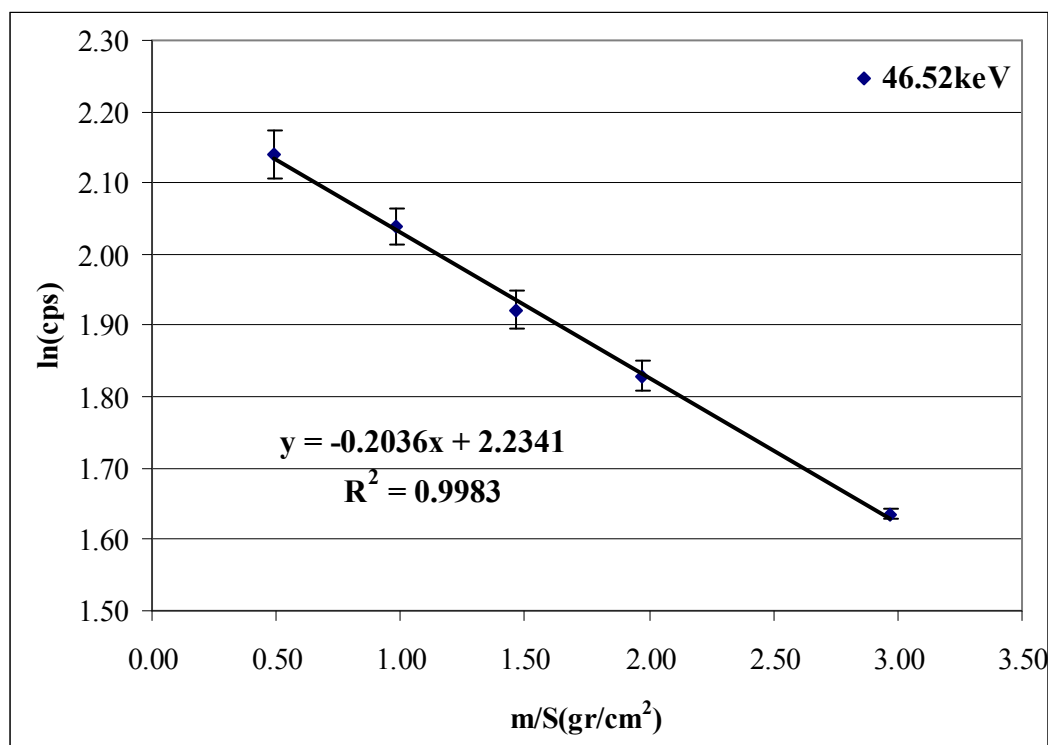


Σχήμα 3.8: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV.



Σχήμα 3.9: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV.

Από τα διαγράμματα αυτά εκτιμήθηκε ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ . Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2. Αντίστοιχα, προέκυψαν και τα διαγράμματα για τον υπολογισμό του μ_m , τα οποία παρουσιάζονται στα σχήματα 3.10 και 3.11 :

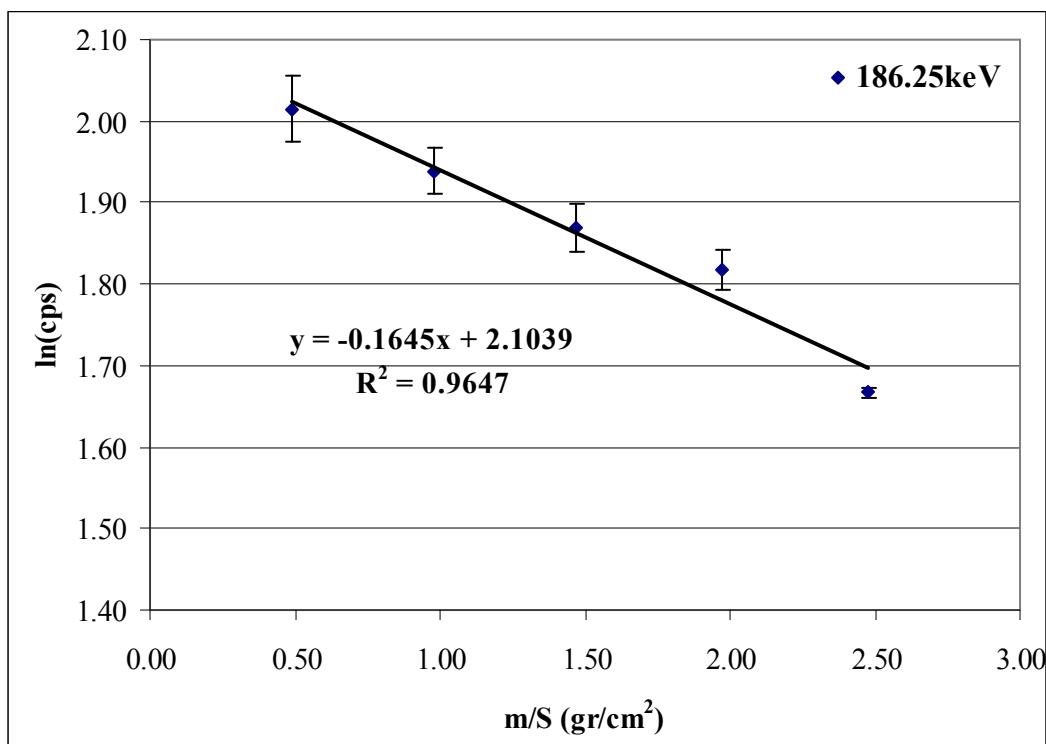


Σχήμα 3.10: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV.

Από τα διαγράμματα, υπολογίστηκε όπως και πριν ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης μ_m . Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2

Ενέργεια		Πείραμα	NIST	απόκλιση
46.52keV	μ (cm ⁻¹)	0.2022±0.0053	0.2464	-17.94%
	μ/ρ (cm ² /gr)	0.2036±0.0061	0.2464	-17.37%
186.25keV	μ (cm ⁻¹)	0.1367±0.0050	0.1344	-1.14%
	μ/ρ (cm ² /gr)	0.1645±0.0240	0.1344	22.40%

Πίνακας 3.2 Αποτελέσματα πειράματος σε γεωμετρία 2

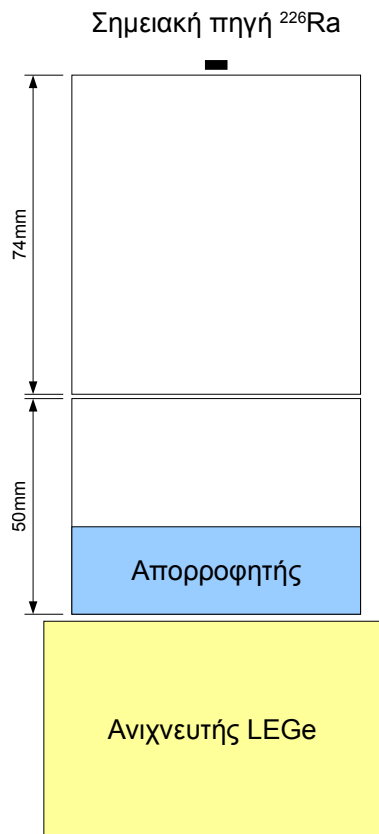


Σχήμα 3.11: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV.

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η απομάκρυνση της πηγής από τον ανιχνευτή δεν δίνει καλύτερα αποτελέσματα για την ενέργεια των 46.52keV, ενώ τα αποτελέσματα για την ενέργεια των 186.25keV είναι σαφώς χειρότερα.

3.3.3 Γεωμετρία 3

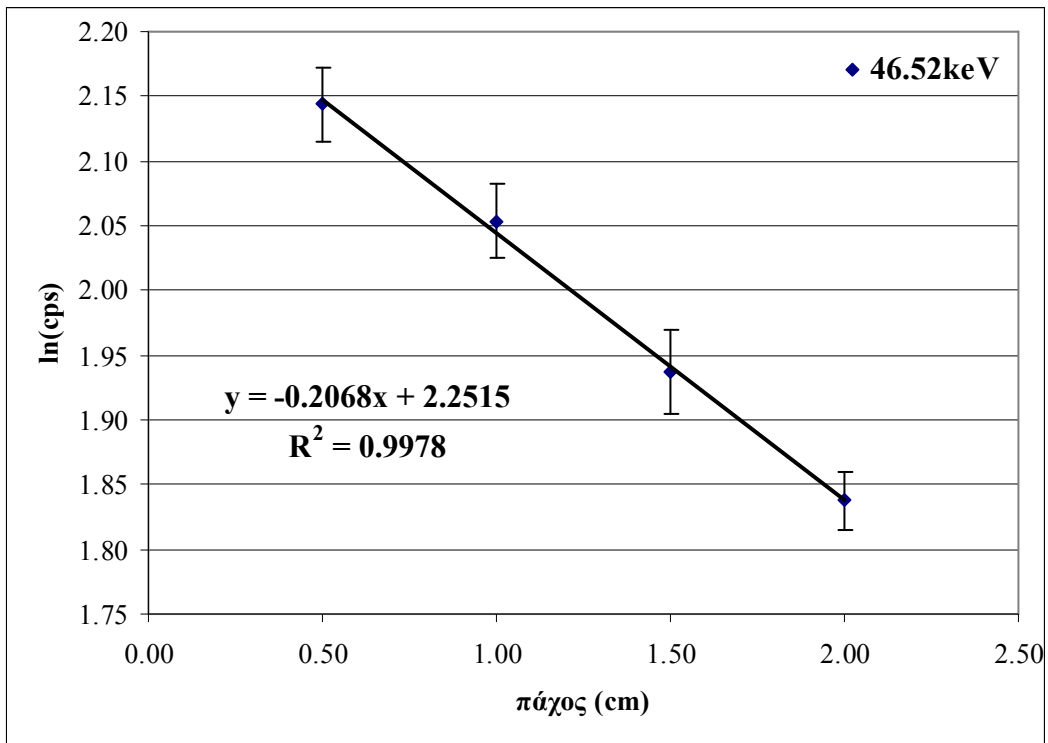
Η τρίτη πειραματική διάταξη η οποία εξετάστηκε, φαίνεται στο σχήμα 3.14. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε η σημειακή πηγή ²²⁶Ra, για πάχη απορροφητή 5, 10, 15 και 20mm στον ανιχνευτή «3». Ακολουθώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2, όπως πριν προέκυψαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα για τον προσδιορισμό του μ , τα οποία παρουσιάζονται στο σχήμα 3.12 και σχήμα 3.13.



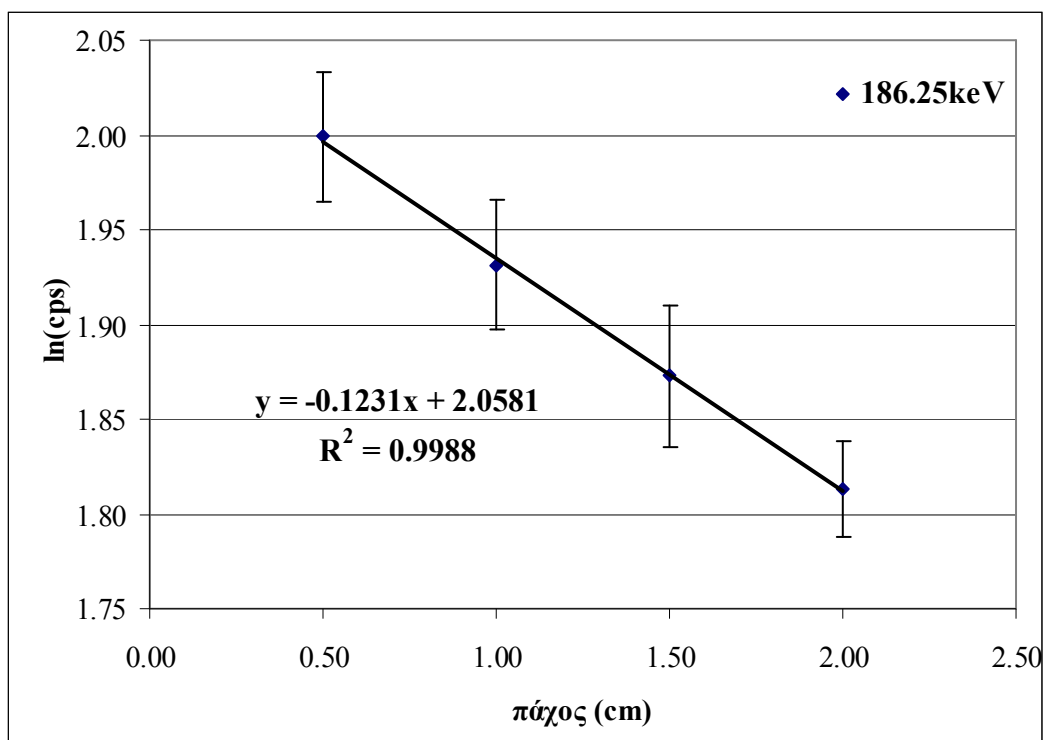
Σχήμα 3.14: Πειραματική διάταξη γεωμετρίας 3

Από τα διαγράμματα, όπως και για τις προηγούμενες γεωμετρίες, υπολογίστηκε ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης.

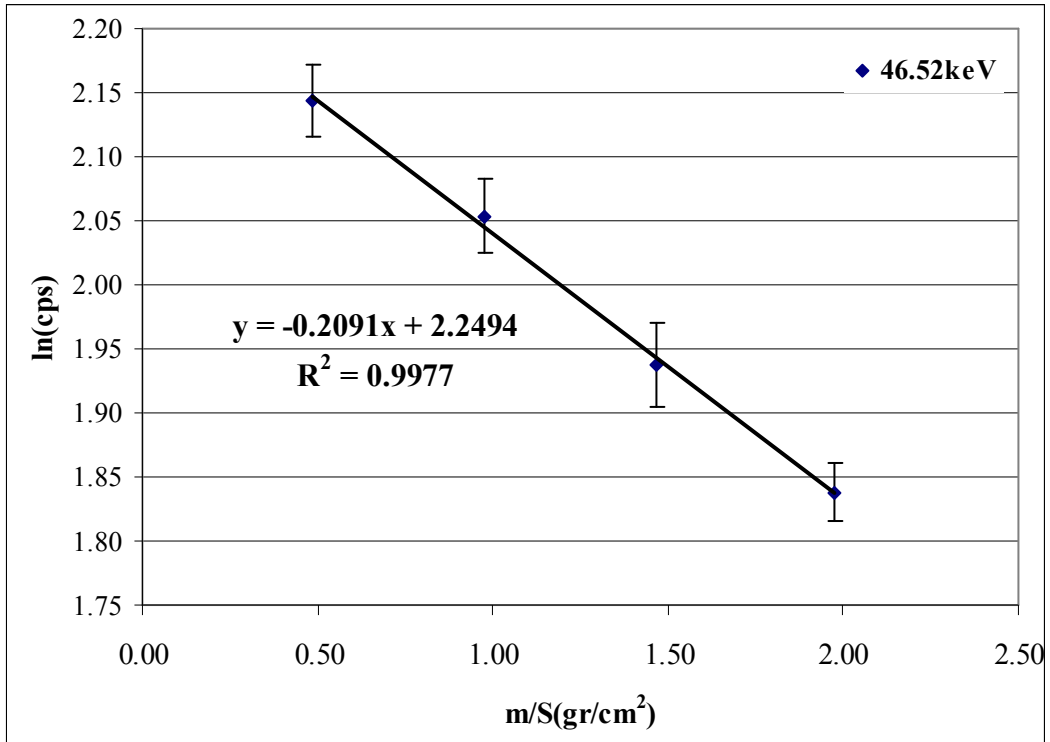
Αντίστοιχα υπολογίστηκαν και τα διαγράμματα για τον υπολογισμό του μ_m , τα οποία παρουσιάζονται στα σχήματα 3.17 και 3.18:



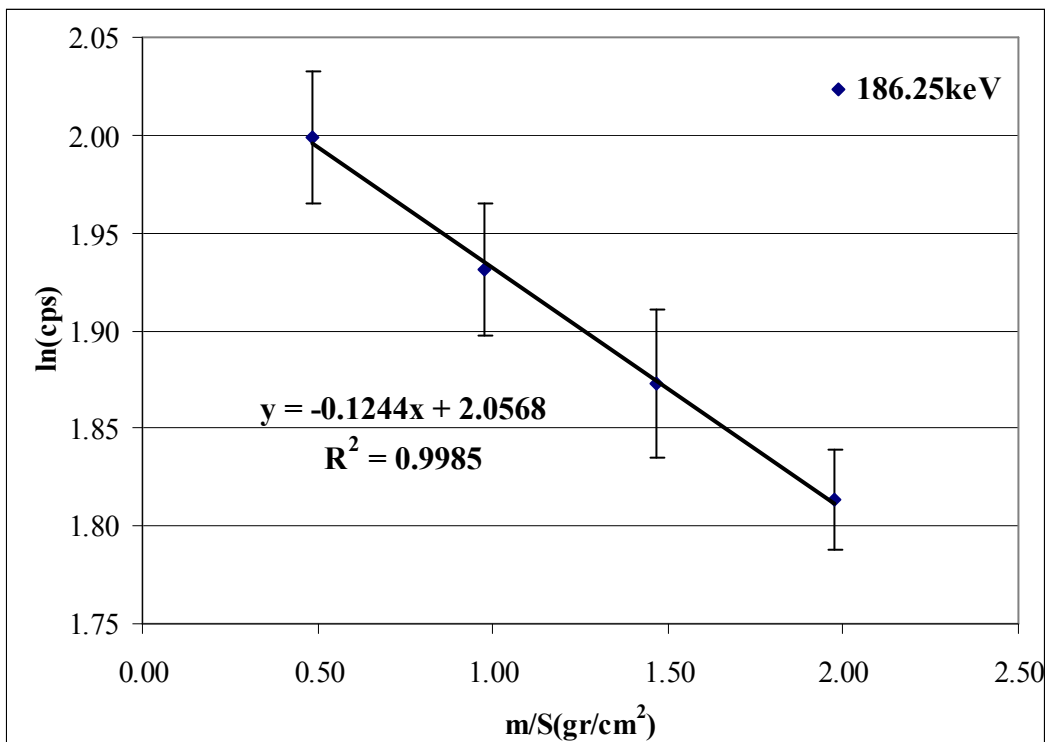
Σχήμα 3.15: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV.



Σχήμα 3.16: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV.



Σχήμα 3.17: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV.



Σχήμα 3.18: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV.

Από τα διαγράμματα αυτά υπολογίζεται ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης. Τα αποτελέσματα για το γραμμικό και το μαζικό συντελεστή εξασθένησης παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στον πίνακα 3.3.

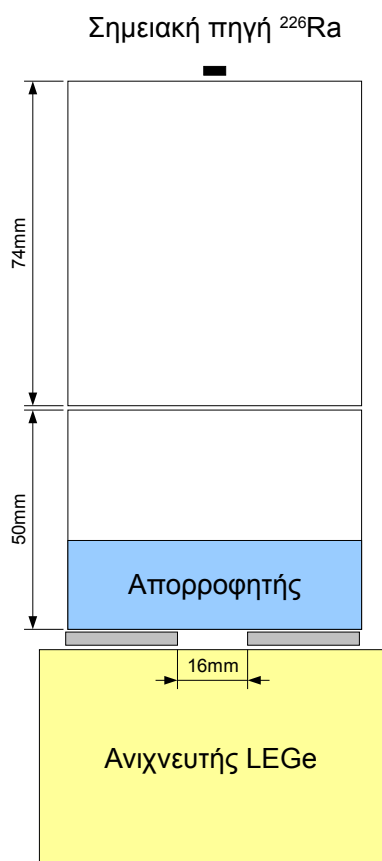
Ενέργεια		Πείραμα	NIST	απόκλιση
46.52keV	μ (cm^{-1})	0.2068 \pm 0.0068	0.2464	-16.07%
	μ/ρ (cm^2/gr)	0.2091 \pm 0.0071	0.2464	-15.14%
186.25keV	μ (cm^{-1})	0.1231 \pm 0.0030	0.1344	-8.41%
	μ/ρ (cm^2/gr)	0.1244 \pm 0.0034	0.1344	7.44%

Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα πειράματος σε γεωμετρία 3

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η απομάκρυνση της πηγής από το δείγμα και τον ανιχνευτή δίνει λίγο καλύτερα αποτελέσματα από τις προηγούμενες γεωμετρίες, αλλά πάλι σε μη αποδεκτά επίπεδα. Από μία προκαταρκτική σύγκριση των γεωμετριών 1, 2 και 3, διαπιστώνεται ότι, ενώ οι αποκλίσεις του μ και του μ/ρ για την ενέργεια των 46.52keV είναι παρόμοιες (απόκλιση 15%-18%), για την ενέργεια των 186.25keV υπάρχει μεγάλη διακύμανση στις αποκλίσεις (από 1<, έως 22%). Τέλος, παρατηρείται ότι ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης μ_m έχει πάντα μικρότερη απόκλιση από την τιμή της βιβλιογραφίας.

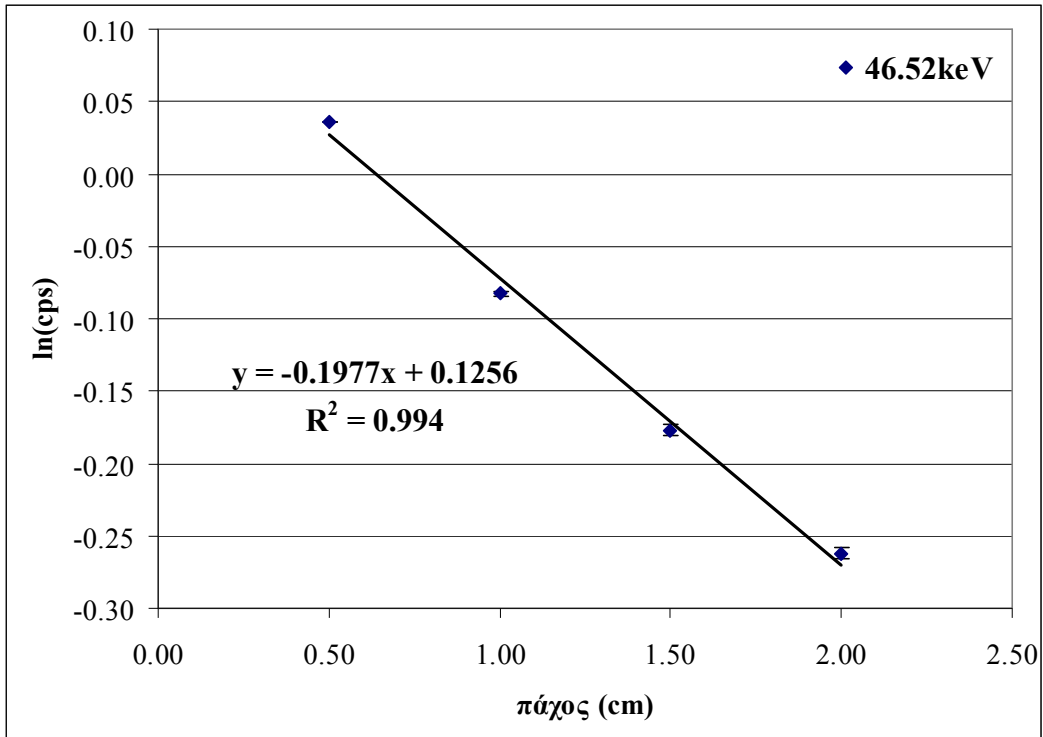
3.3.4 Γεωμετρία 4

Η τέταρτη πειραματική διάταξη η οποία εξετάστηκε, φαίνεται στο σχήμα 3.19.

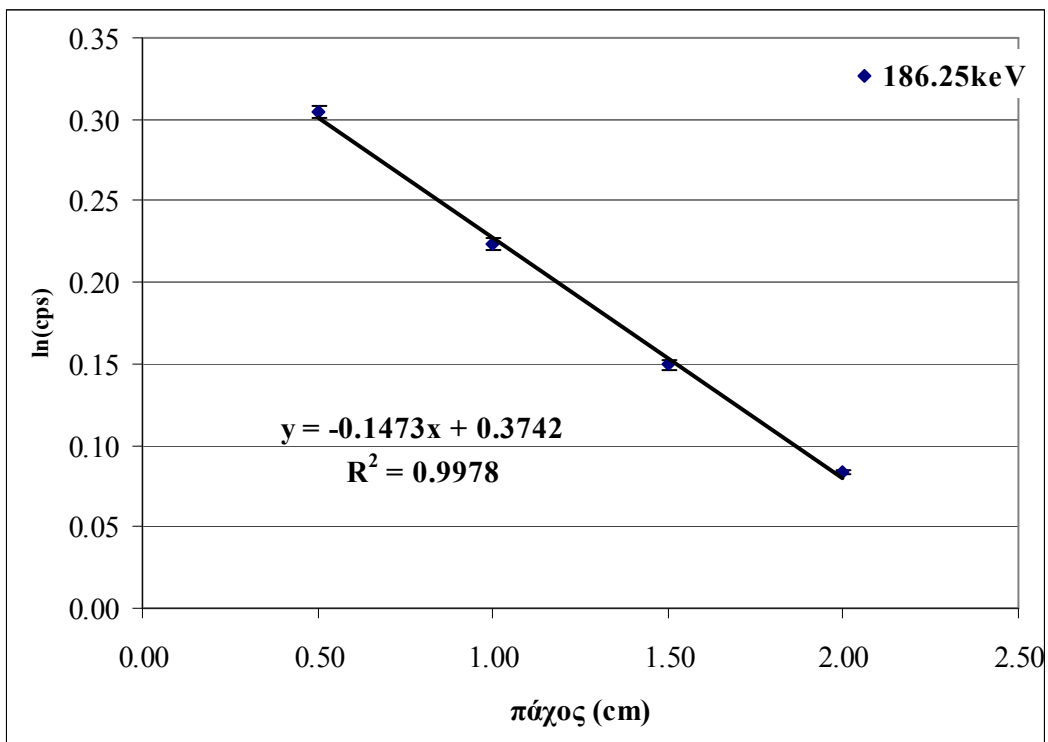


Σχήμα 3.19: Πειραματική διάταξη γεωμετρίας 4

Οι μετρήσεις έγιναν με σημειακή πηγή ^{226}Ra για πάχη απορροφητή 5, 10, 15 και 20mm στον ανιχνευτή «3». Ακολουθώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2, προέκυψαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα για τον προσδιορισμό του μ :



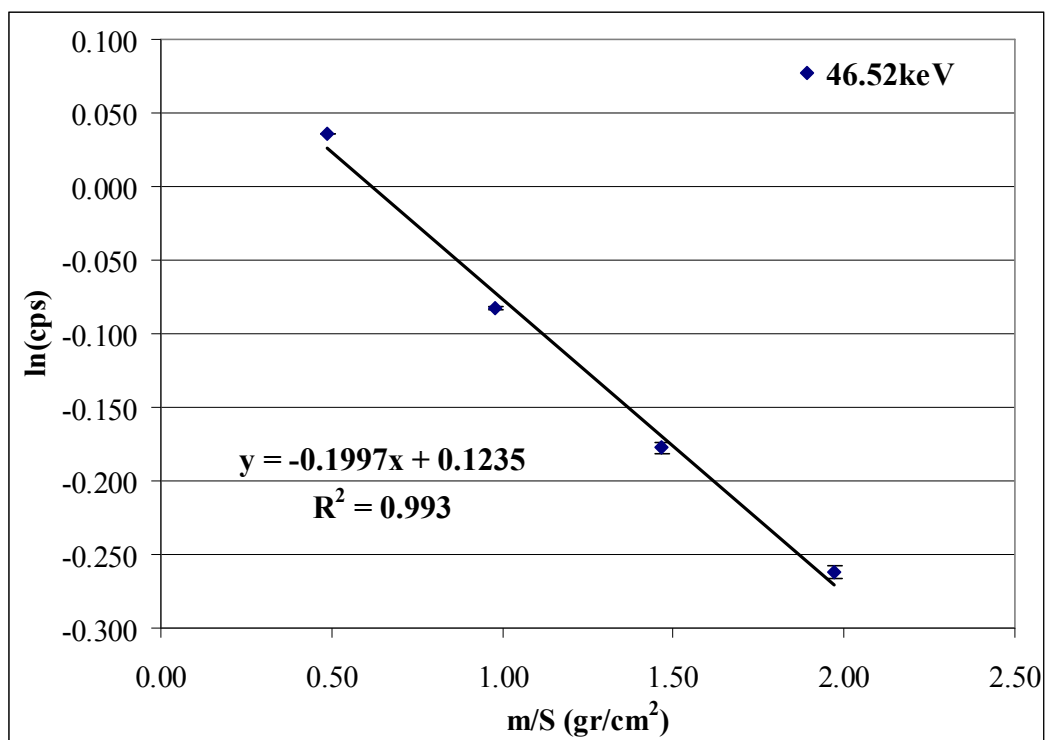
Σχήμα 3.20: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV.



Σχήμα 3.21: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV.

Από τα διαγράμματα, όπως και για τις προηγούμενες γεωμετρίες, υπολογίζεται ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης.

Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκαν και τα διαγράμματα για τον υπολογισμό του μ_m , τα οποία παρουσιάζονται στα σχήματα 3.22 και 3.23:

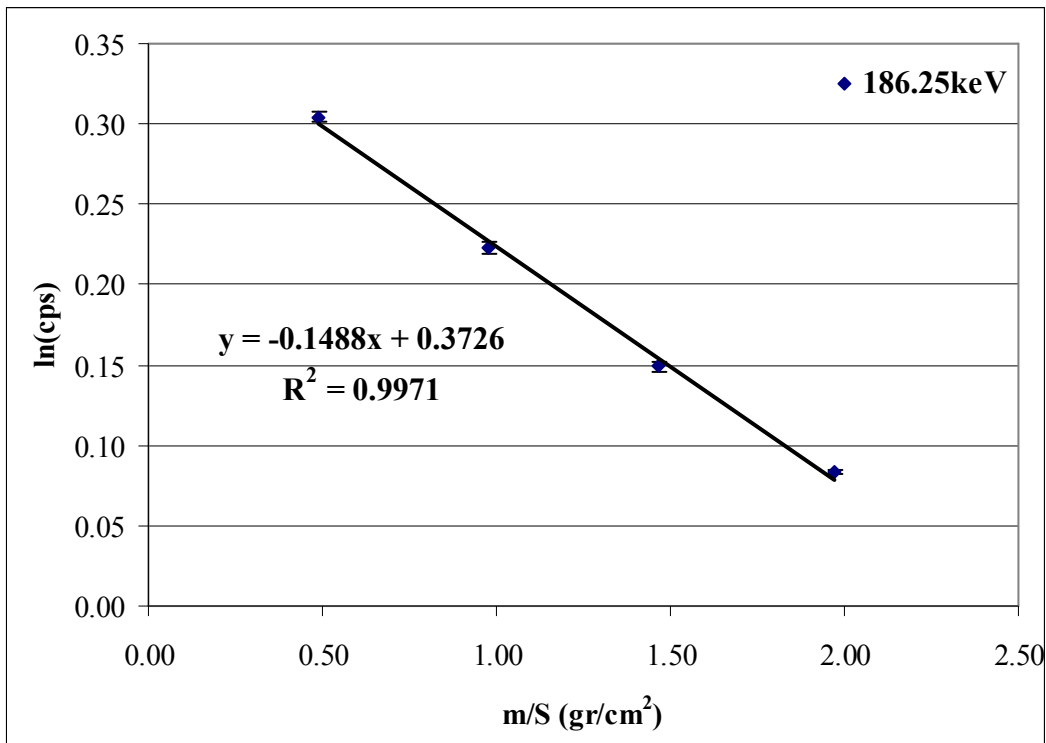


Σχήμα 3.22: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV.

Από τα διαγράμματα, υπολογίζεται όπως και πριν ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης μ_m . Τα αποτελέσματα για το γραμμικό και το μαζικό συντελεστή εξασθένησης παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στον πίνακα 3.4.

Ενέργεια		Πείραμα	NIST	απόκλιση
46.52keV	μ (cm ⁻¹)	0.1997±0.0118	0.2464	-19.76%
	μ/ρ (cm ² /gr)	0.1997±0.0118	0.2464	-18.95%
186.25keV	μ (cm ⁻¹)	0.1473±0.0049	0.1344	9.60%
	μ/ρ (cm ² /gr)	0.1488±0.0057	0.1344	-10.71%

Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα πειράματος σε γεωμετρία 4



Σχήμα 3.23: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η χρήση κατευθυντή δέσμης έδωσε μεγαλύτερες αποκλίσεις από τις προηγούμενες γεωμετρίες. Επίσης ο χρόνος διεξαγωγής του πειράματος αυξήθηκε σημαντικά με τη χρήση του κατευθυντή σε σχέση με αυτόν του πειράματος σε γεωμετρία 3 που δεν είχε κατευθυντή, όπως φαίνεται και από τον πίνακα 3.5.

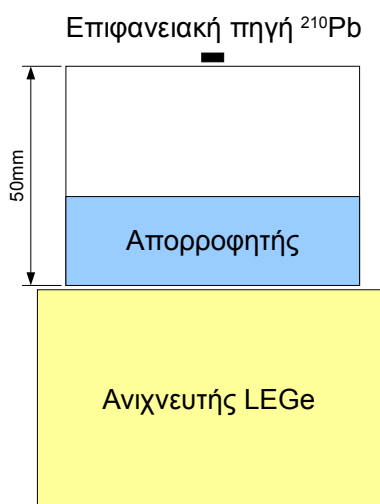
x (cm)	Χρόνος για γεωμετρία 3 (s)	Χρόνος για γεωμετρία 4 (s)
0.50	2025	62861
1.00	2177	29492
1.50	1799	22278
2.00	4122	57153

Πίνακας 3.5: Σύγκριση χρόνου διεξαγωγής πειράματος με χρήση ή όχι κατευθυντή δέσμης

Και σε αυτή τη γεωμετρία, η απόκλιση του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένισης είναι μικρότερη από την απόκλιση του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης.

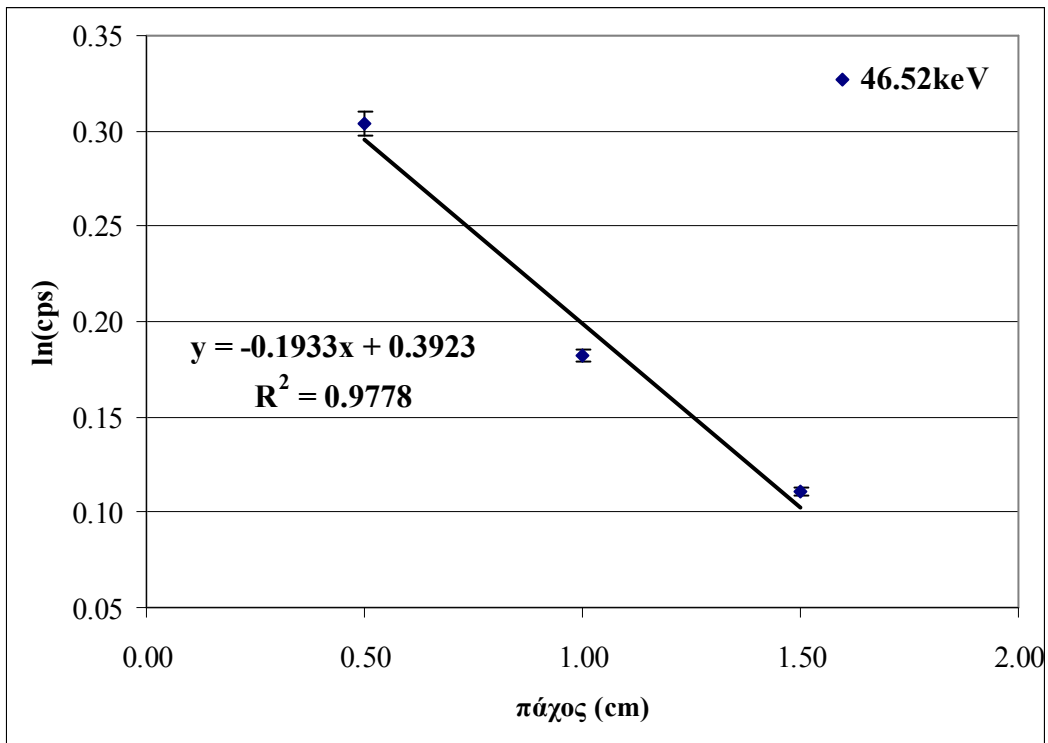
3.3.5 Γεωμετρία 5

Η πέμπτη διάταξη δέσμης η οποία εξετάστηκε, φαίνεται στο σχήμα 3.24:



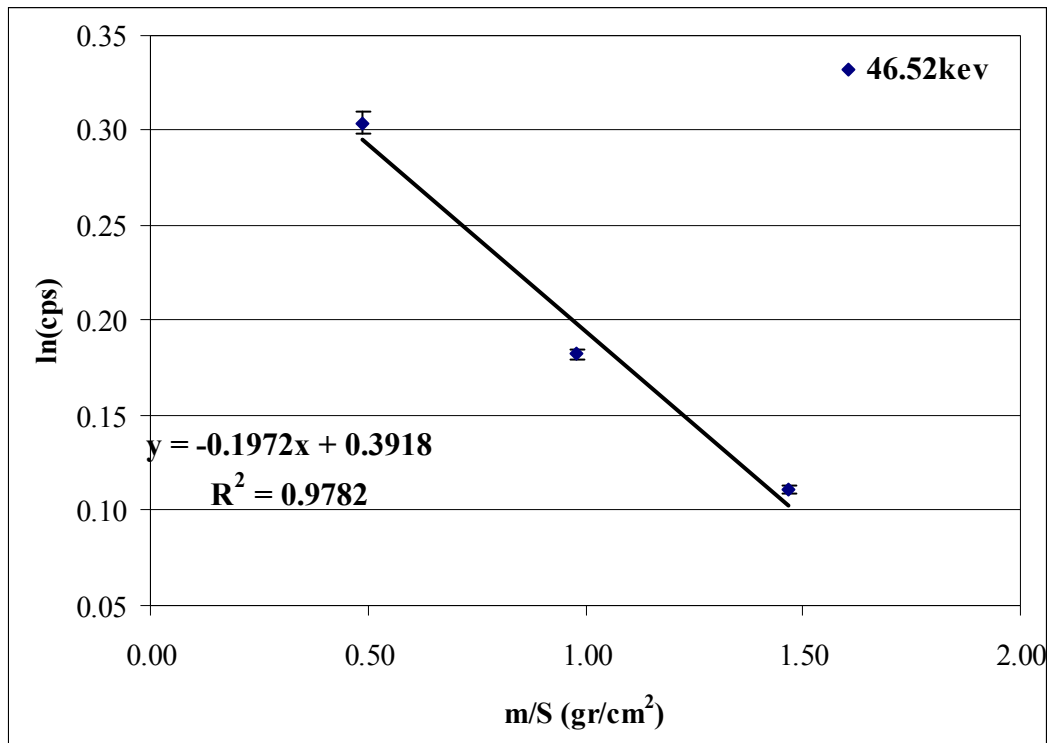
Σχήμα 3.24: Πειραματική διάταξη γεωμετρίας 5

Οι μετρήσεις έγιναν με επιφανειακή πηγή ^{210}Pb για πάχη απορροφητή 5, 10 και 15mm στον ανιχνευτή «3». Στη συγκεκριμένη γεωμετρία δεν κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί και τέταρτο σημείο, καθώς μετά τους υπολογισμούς για τα τρία πρώτα σημεία η απόκλιση βρέθηκε πολύ μεγάλη, όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.6. Ακόμη, η πηγή ήταν πολύ αδύναμη, πράγμα που καθυστέρωσε την διεξαγωγή των πειραμάτων. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2, προέκυψαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα για τον προσδιορισμό του μ :



Σχήμα 3.25: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV.

Από το διάγραμμα, όπως και για τις προηγούμενες γεωμετρίες, υπολογίζεται ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης μ . Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκαν και τα διαγράμματα για τον υπολογισμό του μ_m , τα οποία παρουσιάζονται στο σχήμα 3.26 και υπολογίστηκε ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης μ_m . Τα αποτελέσματα για το γραμμικό και το μαζικό συντελεστή εξασθένισης παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στον πίνακα 3.7.



Σχήμα 3.26: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV.

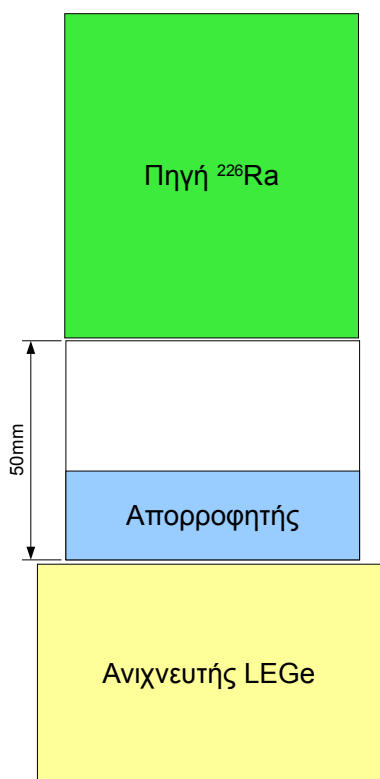
Ενέργεια		Πείραμα	NIST	απόκλιση
46.52keV	μ (cm ⁻¹)	0.1933±0.0206	0.2464	-21.55%
	μ/ρ (cm ² /gr)	0.1972±0.0208	0.2464	-19.97%

Πίνακας 3.7: Αποτελέσματα πειράματος σε γεωμετρία 5

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η χρήση επιφανειακής πηγής ²¹⁰Pb έδωσε χειρότερα αποτελέσματα από την αντίστοιχη γεωμετρία με πηγή ²²⁶Ra, οπότε δεν έγινε περαιτέρω διερεύνηση για διαφορετικές γεωμετρίες με χρήση της επιφανειακής πηγής ²¹⁰Pb. Ακόμη, παρατηρούνται και εδώ διαφορές ανάμεσα στην απόκλιση του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένισης και του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης.

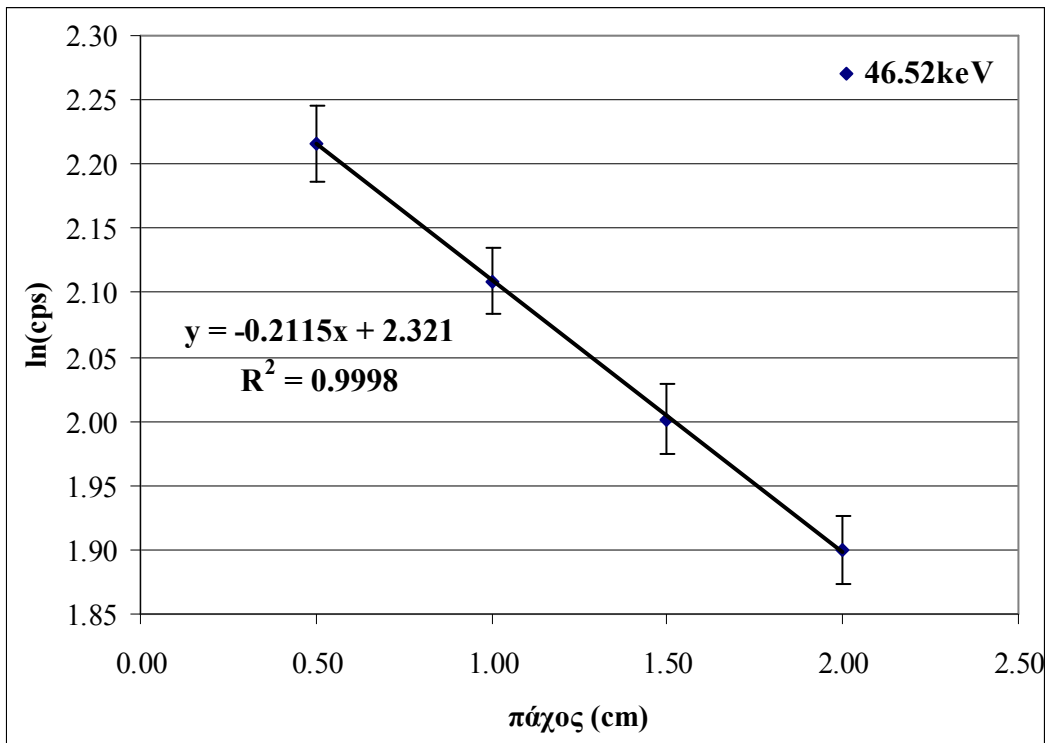
3.3.6 Γεωμετρία 6

Η έκτη πειραματική διάταξη η οποία εξετάστηκε, φαίνεται στο σχήμα 3.27:

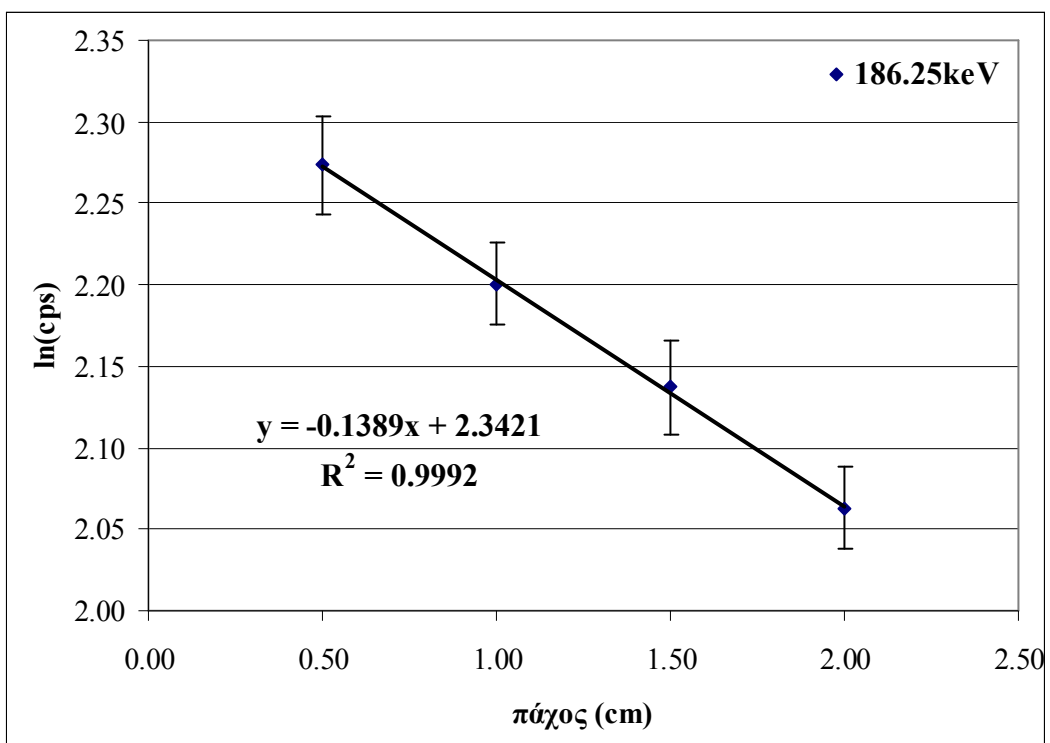


Σχήμα 3.27: Πειραματική διάταξη γεωμετρίας 6

Οι μετρήσεις έγιναν με πηγή όγκου ^{226}Ra για πάχη απορροφητή 5, 10, 15 και 20mm στον ανιχνευτή «3». Ακολουθώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2 κατασκευάστηκαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα για τον προσδιορισμό του μ :

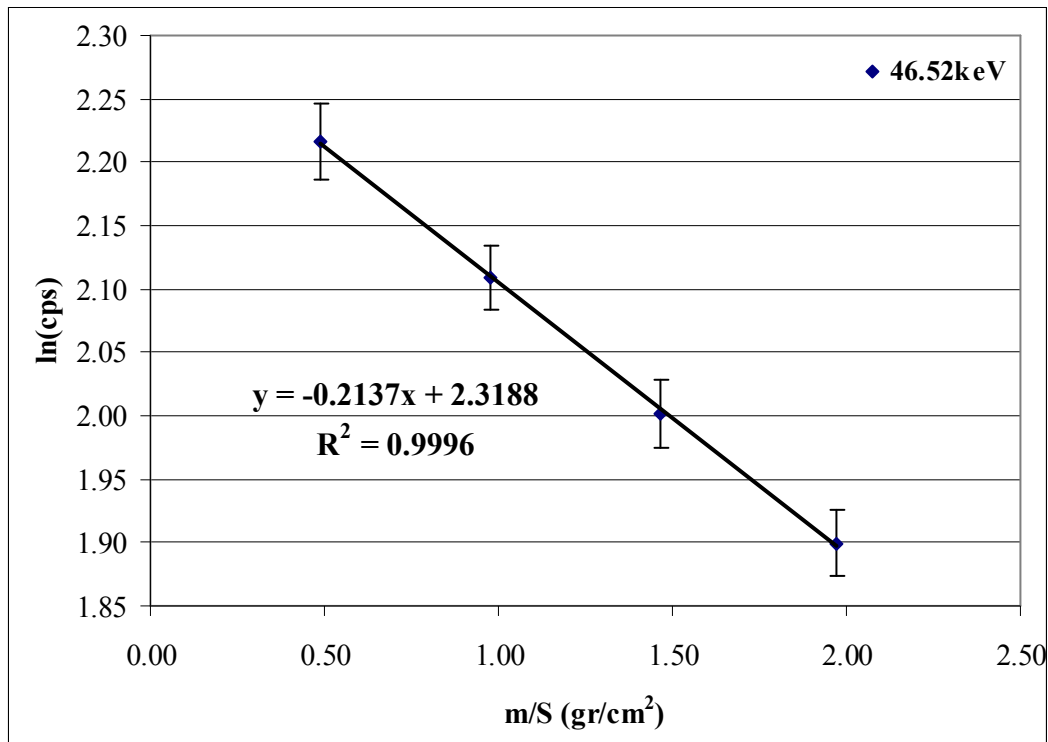


Σχήμα 3.28: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV.

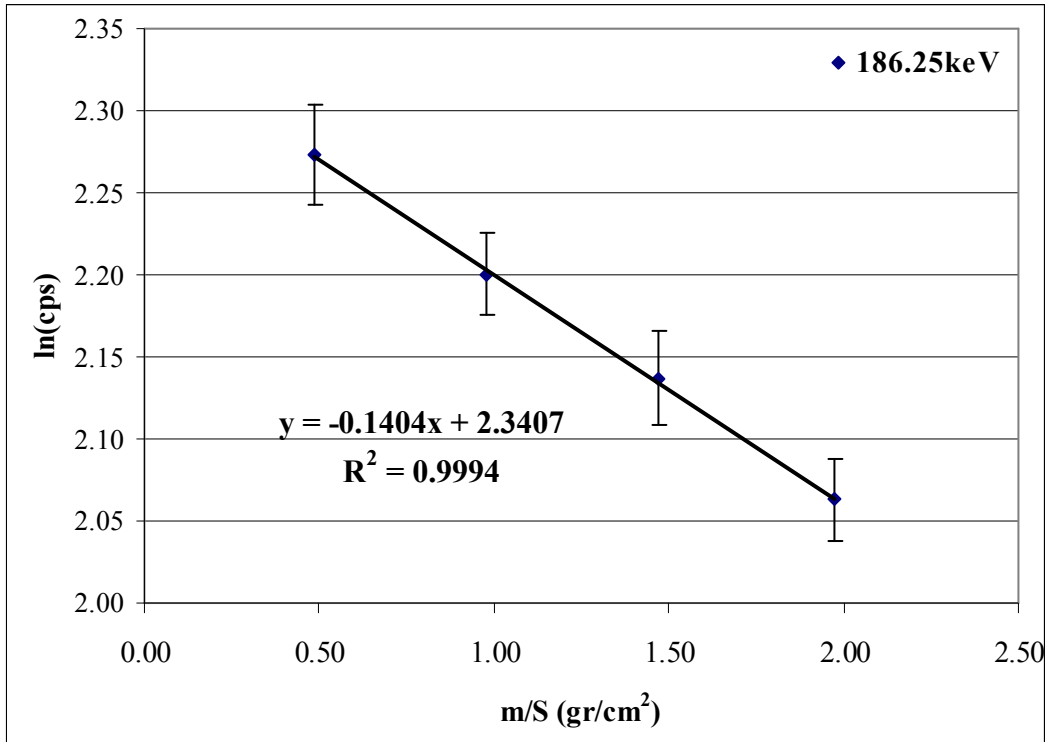


Σχήμα 3.29: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV.

Από τα διαγράμματα αυτά εκτιμήθηκε ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης. Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκαν και τα διαγράμματα για τον υπολογισμό του μ_m , τα οποία παρουσιάζονται στα σχήματα 3.30 και 3.31, από τα οποία εκτιμήθηκε ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης μ_m . Τα αποτελέσματα για το γραμμικό και το μαζικό συντελεστή εξασθένησης παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στον πίνακα 3.8.



Σχήμα 3.30: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV.



Σχήμα 3.31: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV.

Ενέργεια		Πείραμα	NIST	απόκλιση
46.52keV	μ (cm ⁻¹)	0.2115±0.0019	0.2464	-14.16%
	μ/ρ (cm ² /gr)	0.2137±0,0030	0.2464	-13.27%
186.25keV	μ (cm ⁻¹)	0.1389±0.0028	0.1344	3.35%
	μ/ρ (cm ² /gr)	0.1404±0,0024	0.1344	4.46%

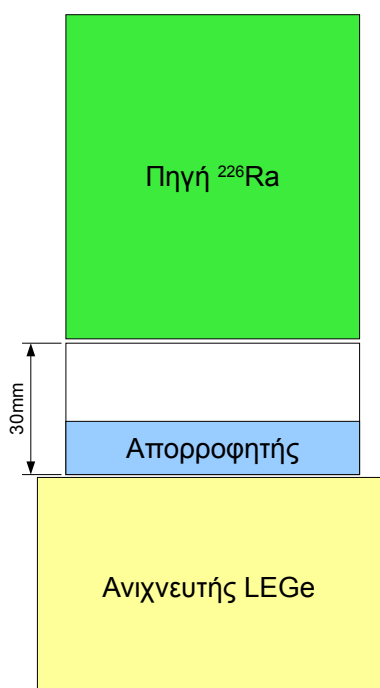
Πίνακας 3.8 : Αποτελέσματα πειράματος σε γεωμετρία β

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η χρήση πηγής όγκου ²²⁶Ra δίνει μικρότερες αποκλίσεις και για τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης αλλά και για τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένισης από την προηγούμενη γεωμετρία, στην οποία γινόταν χρήση πηγής ²¹⁰Pb, στην ίδια απόσταση μεταξύ πηγής και ανιχνευτή. Και στην περίπτωση αυτή η απόκλιση του συντελεστή μ_m είναι μικρότερη από την

απόκλιση του συντελεστή μ , πράγμα που παρατηρείται σε όλες τις μέχρι τώρα εξεταζόμενες γεωμετρίες.

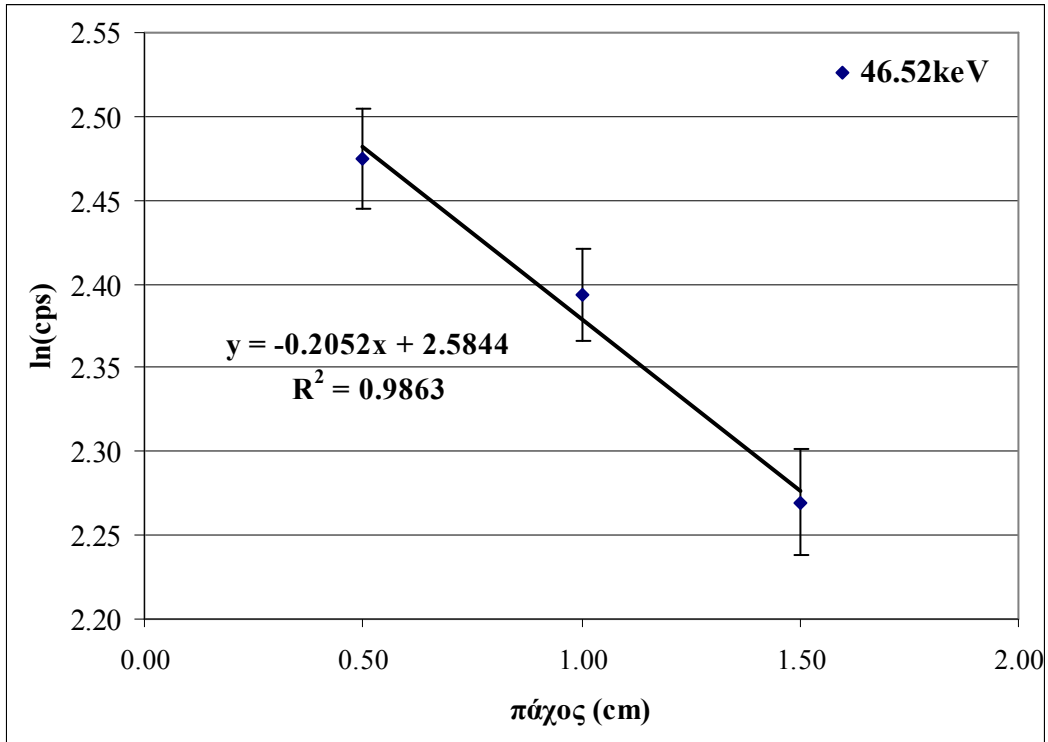
3.3.7 Γεωμετρία 7

Η έβδομη πειραματική διάταξη η οποία εξετάστηκε, φαίνεται στο σχήμα 3.32:

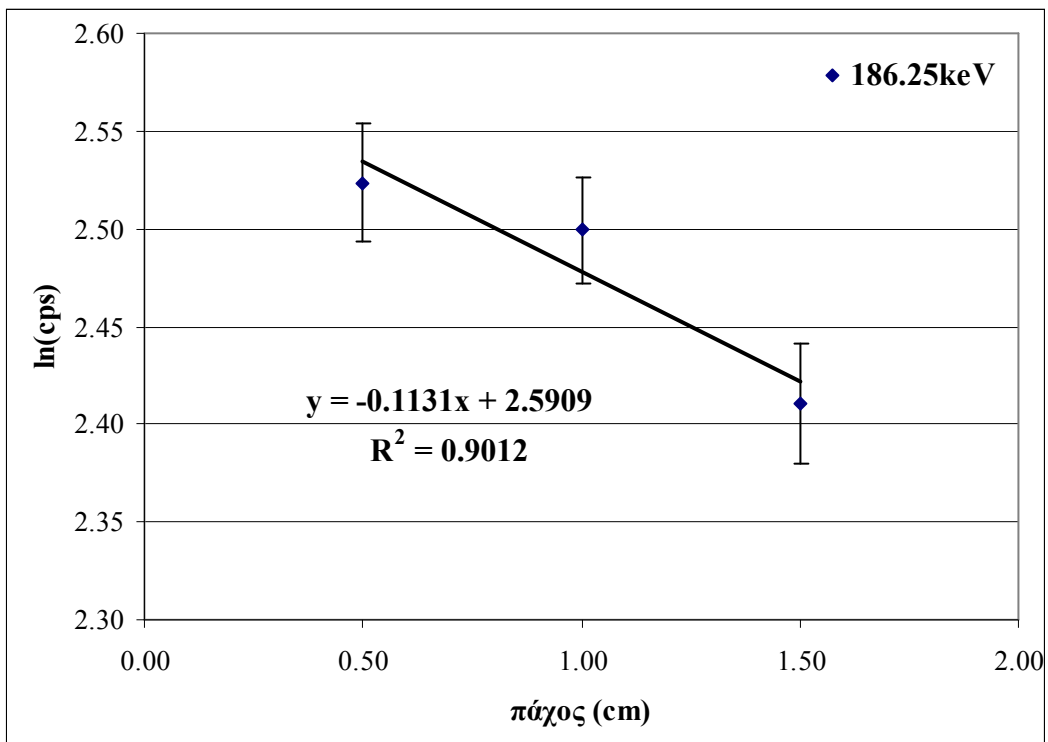


Σχήμα 3.32: Πειραματική διάταξη γεωμετρίας 7

Οι μετρήσεις έγιναν με πηγή όγκου ^{226}Ra για πάχη απορροφητή 5, 10 και 15mm στον ανιχνευτή «3». Ακολουθώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2 κατασκευάστηκαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα για τον προσδιορισμό του μ :

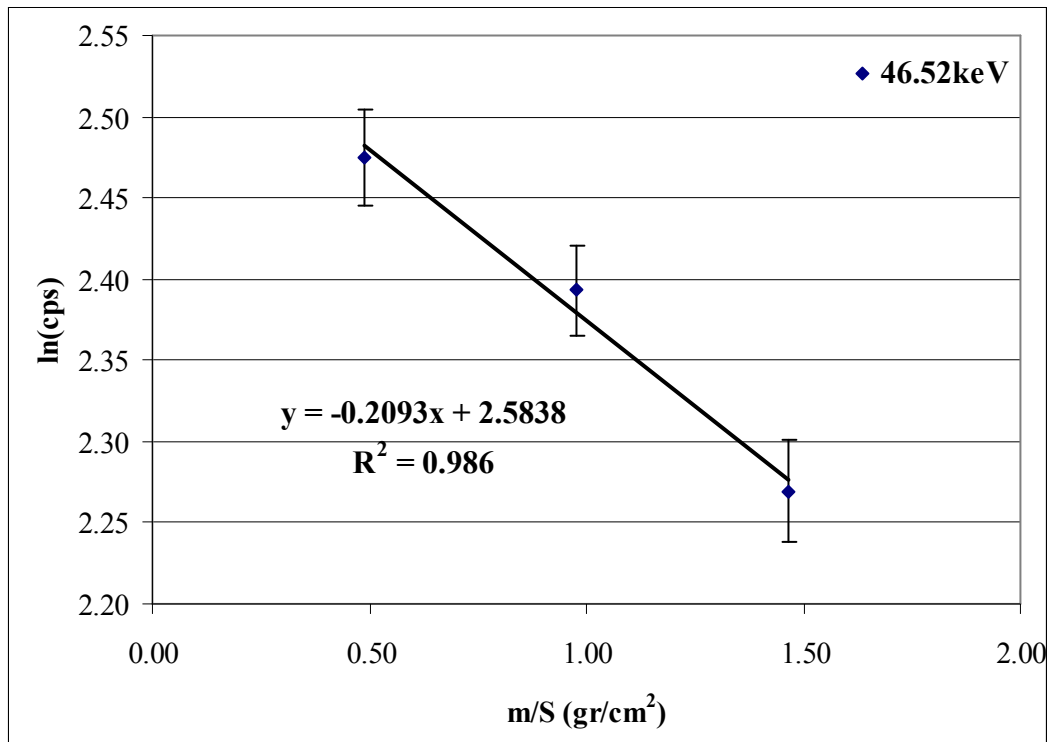


Σχήμα 3.33: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV.

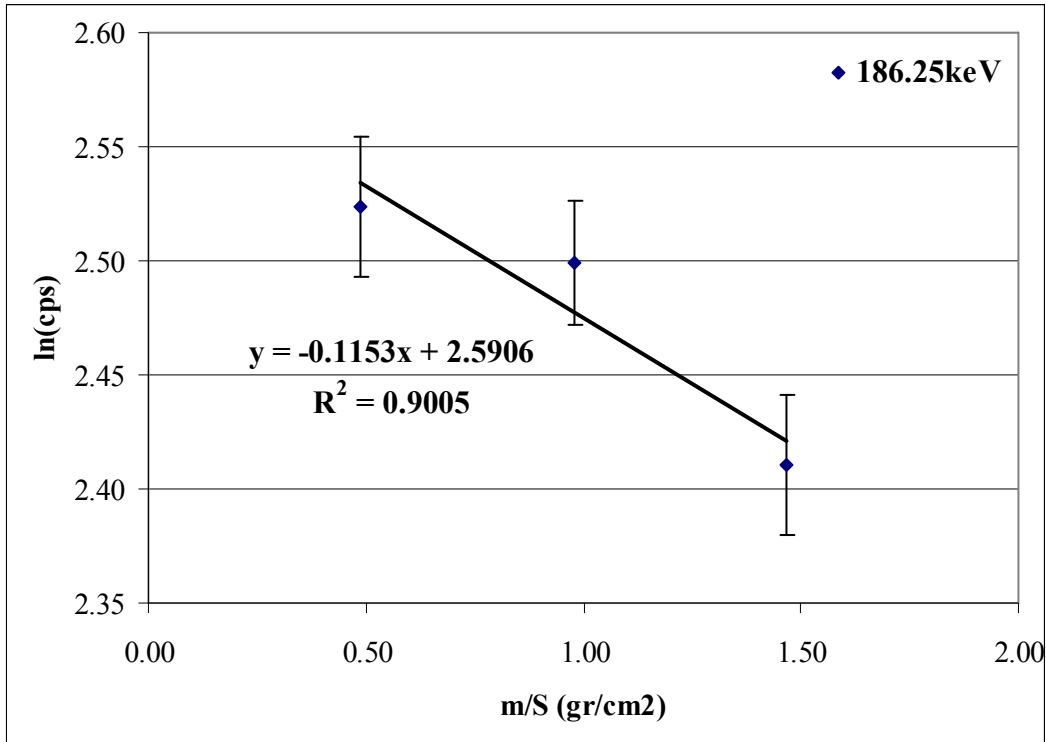


Σχήμα 3.34: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV.

Από τα διαγράμματα, όπως και για τις προηγούμενες γεωμετρίες, υπολογίσθηκε ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης. Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκαν και τα διαγράμματα για τον υπολογισμό του μ_m , τα οποία παρουσιάζονται στα σχήματα 3.35 και 3.36, από τα οποία εκτιμήθηκε ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης μ_m . Τα αποτελέσματα για το γραμμικό και το μαζικό συντελεστή εξασθένησης παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στον πίνακα 3.9.



Σχήμα 3.35: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV.



Σχήμα 3.36: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV.

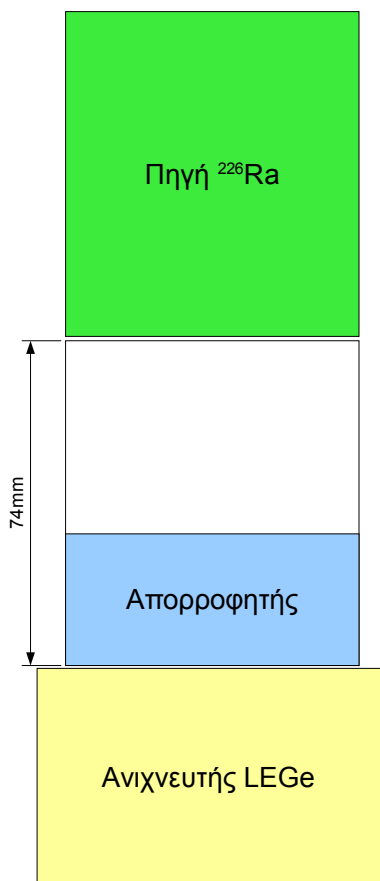
Ενέργεια		Πείραμα	NIST	απόκλιση
46.52keV	μ (cm ⁻¹)	0.2052±0.0171	0.2464	-16.72%
	μ/ρ (cm ² /gr)	0.2093±0.01762	0.2464	-15.06%
186.25keV	μ (cm ⁻¹)	0.1131±0.0265	0.1344	-15.85%
	μ/ρ (cm ² /gr)	0.1153±0.02710	0.1344	-14.21%

Πίνακας 3.9: Αποτελέσματα πειράματος σε γεωμετρία 7

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η μείωση της απόστασης ανάμεσα στην πηγή και τον ανιχνευτή δίνει λίγο μεγαλύτερες αποκλίσεις από την προηγούμενη γεωμετρία. Ακόμη προκύπτει ότι η απόκλιση του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένισης είναι μικρότερη από την απόκλιση του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης.

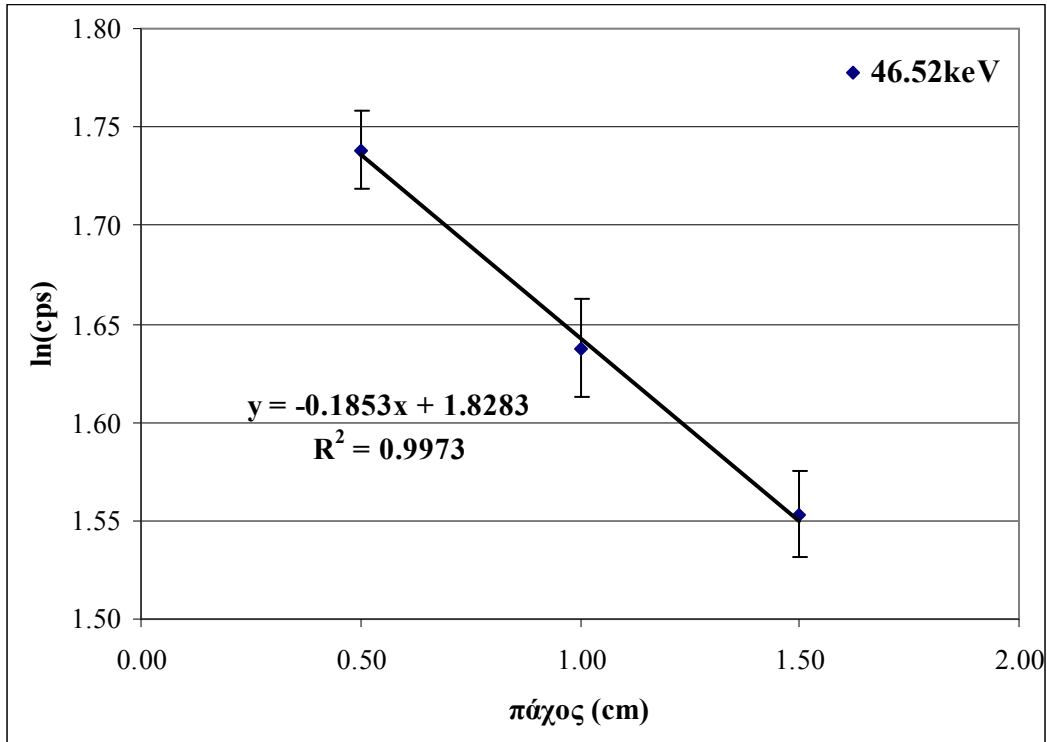
3.3.8 Γεωμετρία 8

Η όγδοη γεωμετρία δέσμης η οποία εξετάστηκε, φαίνεται στο σχήμα 3.37:

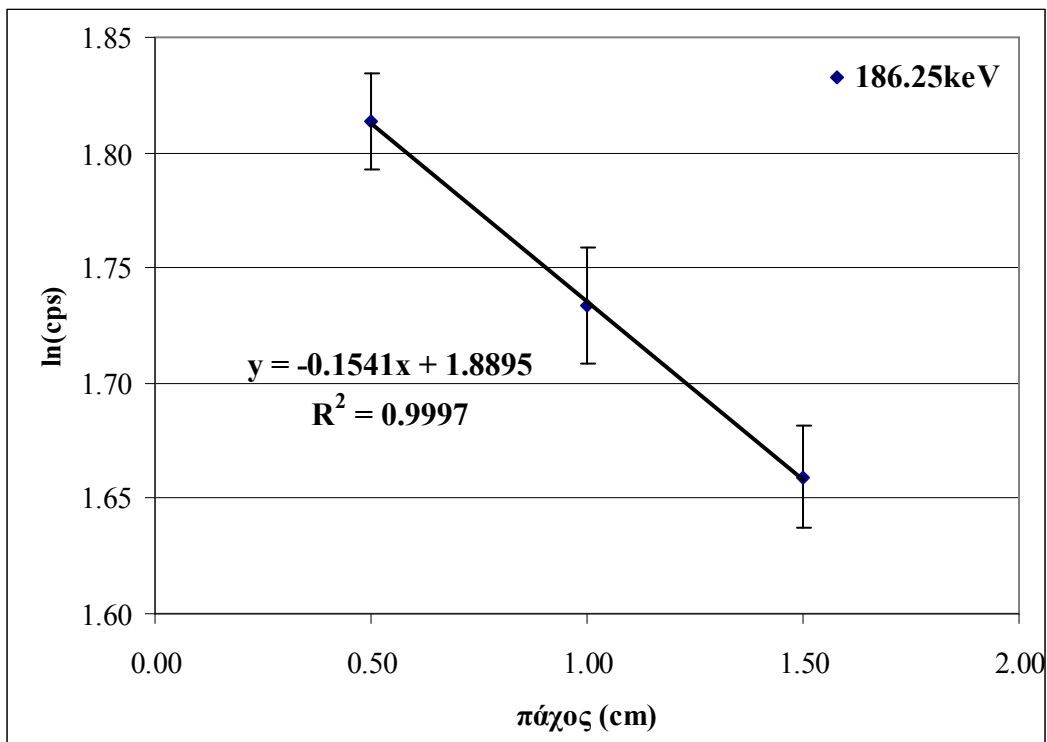


Σχήμα 3.37: Πειραματική διάταξη γεωμετρίας 8

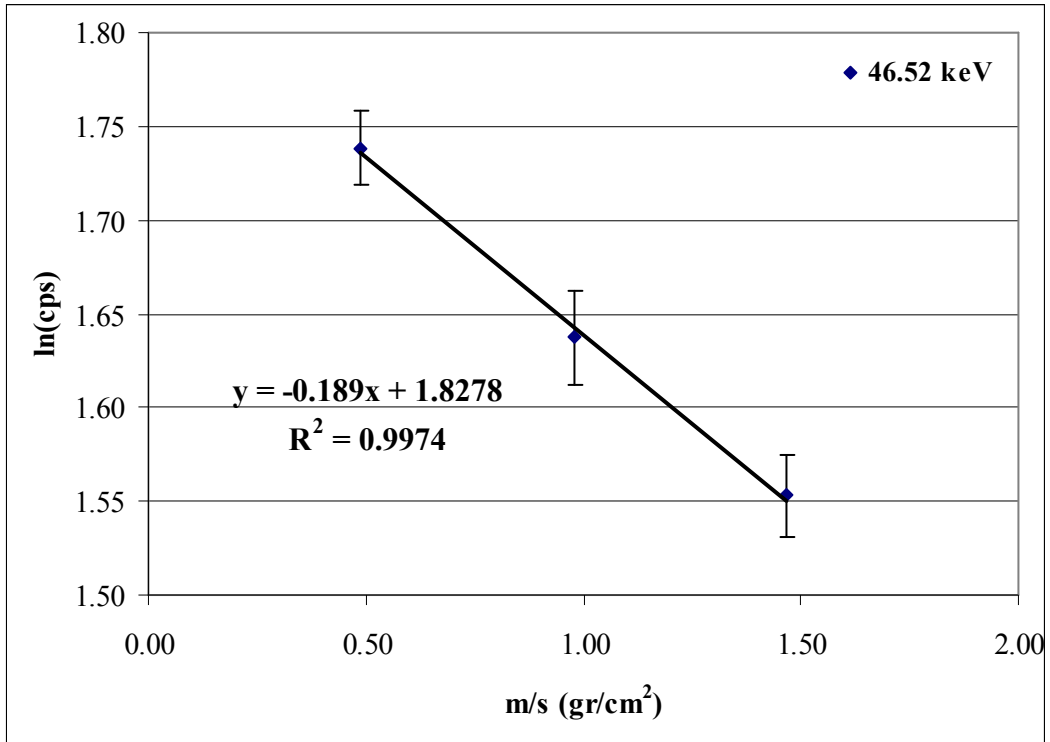
Οι μετρήσεις έγιναν με πηγή όγκου ^{226}Ra για πάχη απορροφητή 5, 10 και 15mm στον ανιχνευτή «3». Ακολουθώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2 κατασκευάστηκαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα για τον προσδιορισμό του μ (σχήματα 3.38 και 3.39) και εκτιμήθηκε ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης. Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκαν και τα διαγράμματα για τον υπολογισμό του μ_m , τα οποία παρουσιάζονται στα σχήματα 3.42 και 3.43, από τα οποία εκτιμήθηκε ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης μ_m . Όλα τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στον πίνακα 3.10



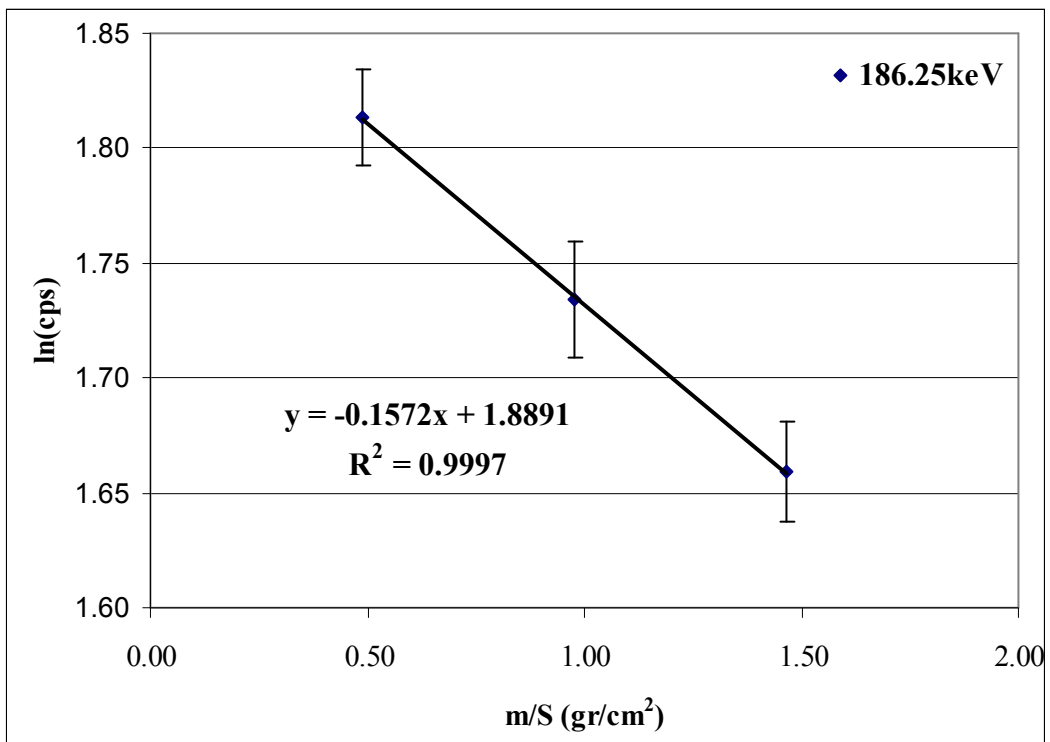
Σχήμα 3.40: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV.



Σχήμα 3.41: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV.



Σχήμα 3.42: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV.



Σχήμα 3.43: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV.

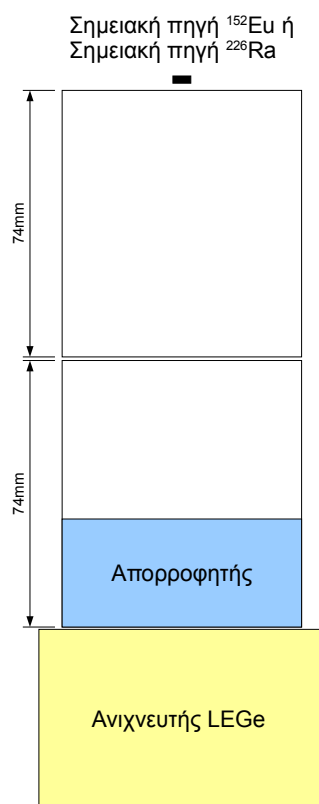
Ενέργεια		Πείραμα	NIST	απόκλιση
46.52keV	μ (cm ⁻¹)	0.1853±0.0068	0.2464	-24.80%
	μ/ρ (cm ² /gr)	0.189±0.0068	0.2464	-23.30%
186.25keV	μ (cm ⁻¹)	0.1541±0.0020	0.1344	14.66%
	μ/ρ (cm ² /gr)	0.1572±0.0019	0.1344	16.96%

Πίνακας 3.10: Αποτελέσματα πειράματος σε γεωμετρία δ

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι για τα 46.52keV η απομάκρυνση της πηγής όγκου Ra²²⁶ δίνει πολύ μεγαλύτερες αποκλίσεις από τις άλλες δύο . Επίσης μεγάλη απόκλιση παρατηρείται και για την ενέργεια των 186.25keV.

3.3.9 Γεωμετρία 9

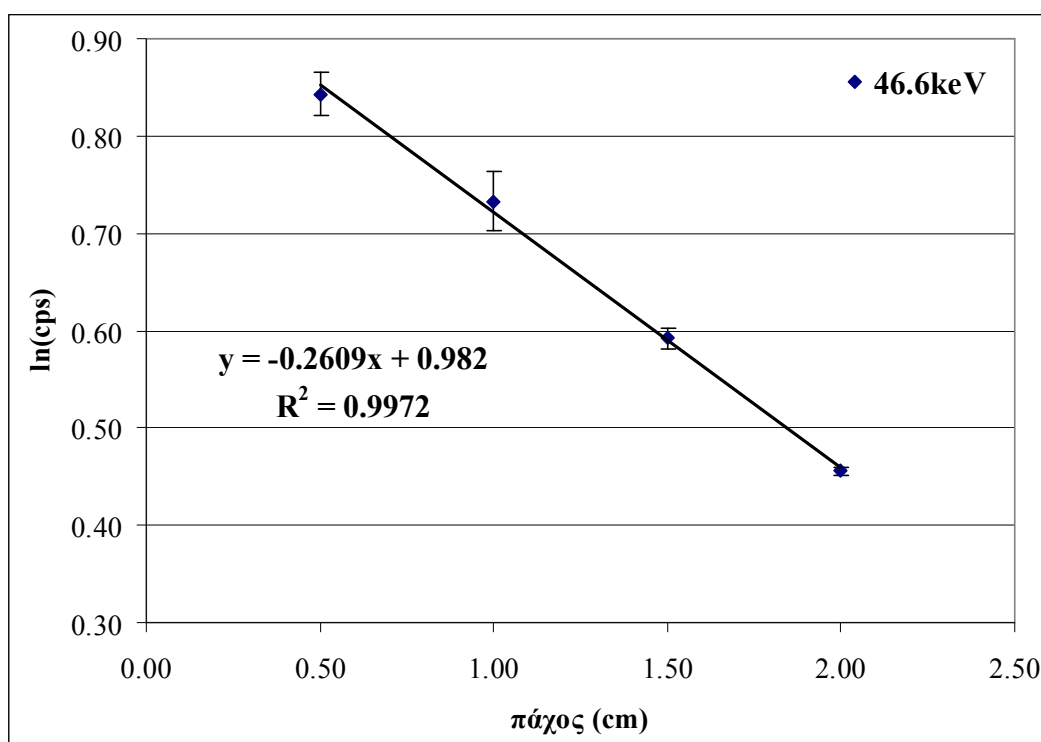
Η ένατη πειραματική διάταξη που εξετάστηκε φαίνεται στο σχήμα 3.44. Η συγκεκριμένη γεωμετρία είχε προταθεί από [ΔΔ Αναγνωστάκης, 1998].



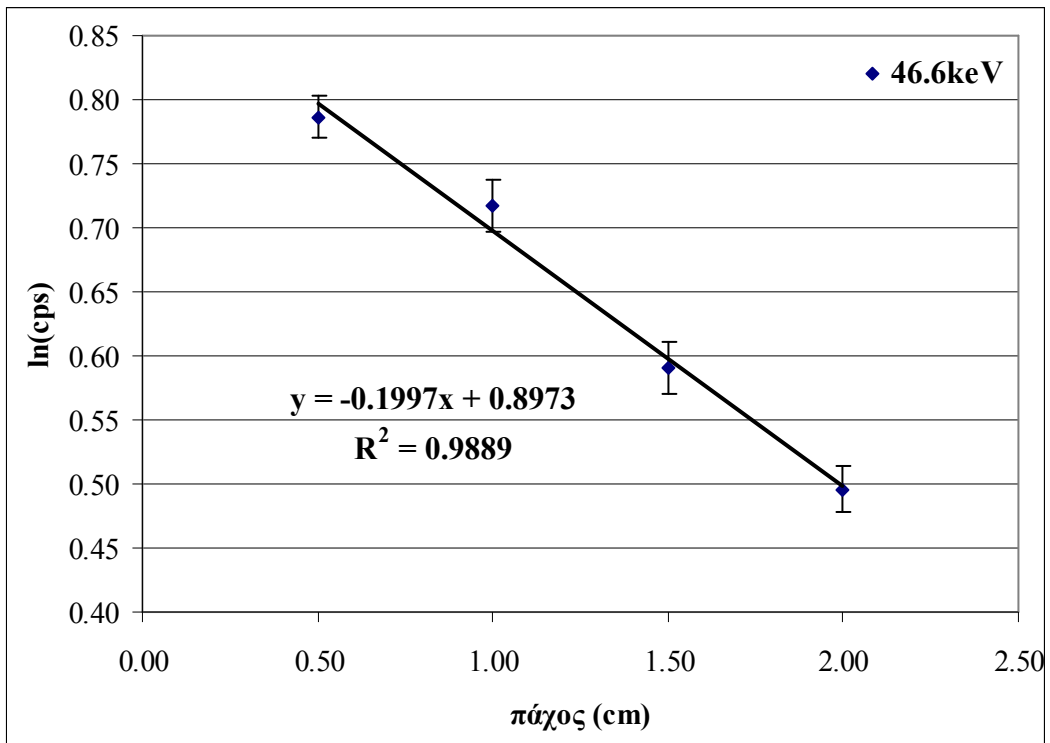
Σχήμα 3.44: Πειραματική διάταξη γεωμετρίας 9

Για αυτή τη γεωμετρία δέσμης, οι μετρήσεις έγιναν (i) με σημειακή πηγή ^{152}Eu και (ii) με σημειακή πηγή ^{226}Ra , για πάχη απορροφητή 5, 10, 15 και 20mm στον ανιχνευτή «6». Ακολουθώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2 προέκυψαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα για τον προσδιορισμό του μ .

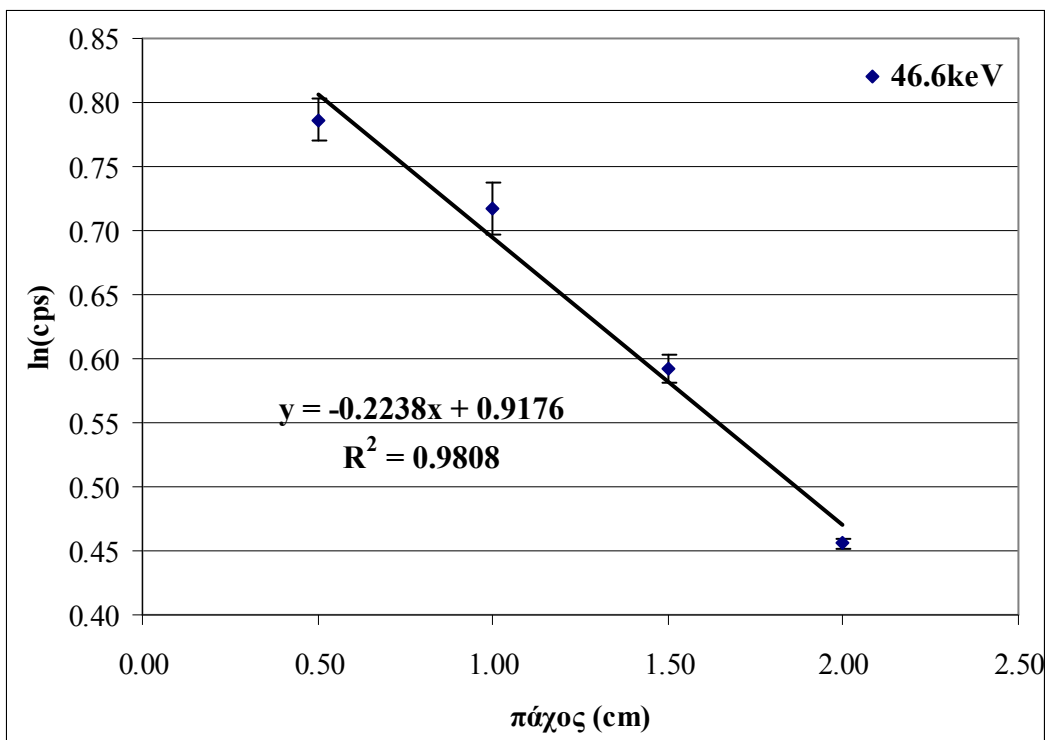
Για σημειακή πηγή ^{152}Eu τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχήματα 3.45, 3.46 και 3.47. Από τα διαγράμματα αυτά εκτιμήθηκε ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης. Το ^{152}Eu έχει πλήθος φωτοκορυφών, από τις οποίες μελετήθηκε μόνο η κορυφή στα 46.6keV, διότι αυτή βρίσκεται στην ενεργειακή περιοχή που ενδιαφέρει. Το συγκεκριμένο πείραμα επαναλήφθηκε δύο φορές. Αυτό συνέβη, διότι το αρχικό πείραμα έδωσε την μικρότερη απόκλιση. Στην πρώτη επανάληψη του πειράματος, για να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα της πρώτης μέτρησης τα αποτελέσματα ήταν μη αποδεκτά. Οπότε χρειάστηκε και τρίτο πείραμα. Τα αποτελέσματα των τριών διαφορετικών μετρήσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 3.11



Σχήμα 3.45: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.6keV.



Σχήμα 3.46: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.6keV (2)

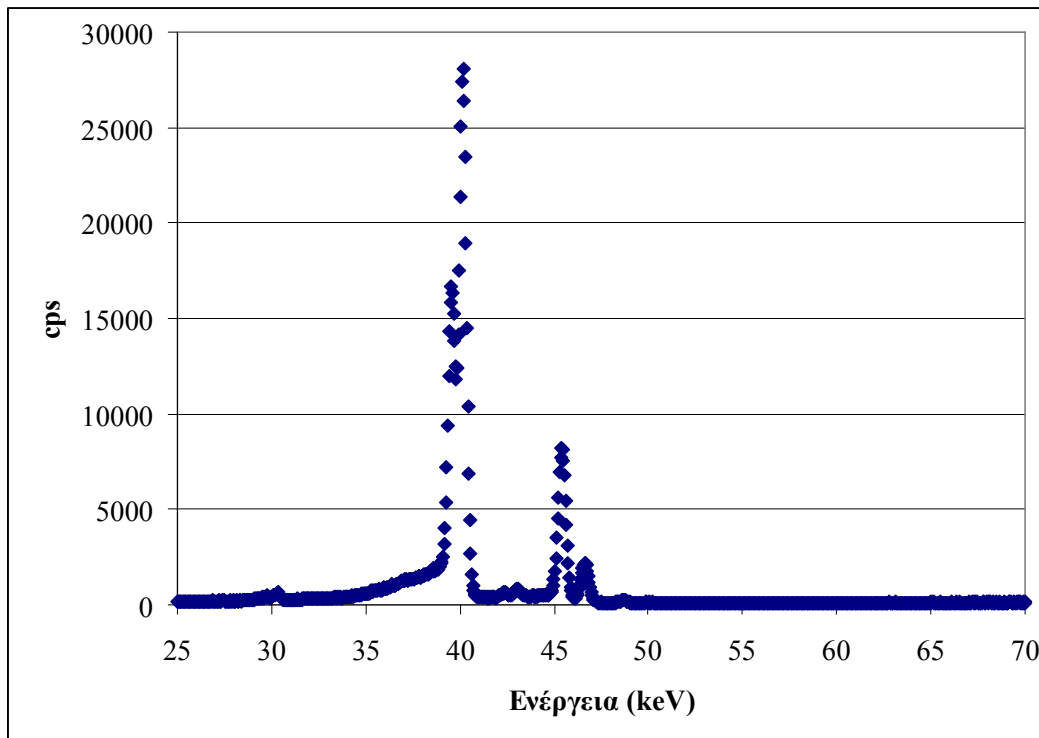


Σχήμα 3.47: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.6keV (3)

Ενέργεια	μ πειράματος (cm-1)	μ NIST (cm-1)	απόκλιση
46.6keV	0.2609±0.0097	0.2464	5.88%
46.6keV	0.1997±0.0150	0.2464	-18.95%
46.6keV	0.2238±0.0222	0.2464	-9.17%

Πίνακας 3.11: Αποτελέσματα πειράματος σε γεωμετρία 9 με πηγή ^{152}Eu

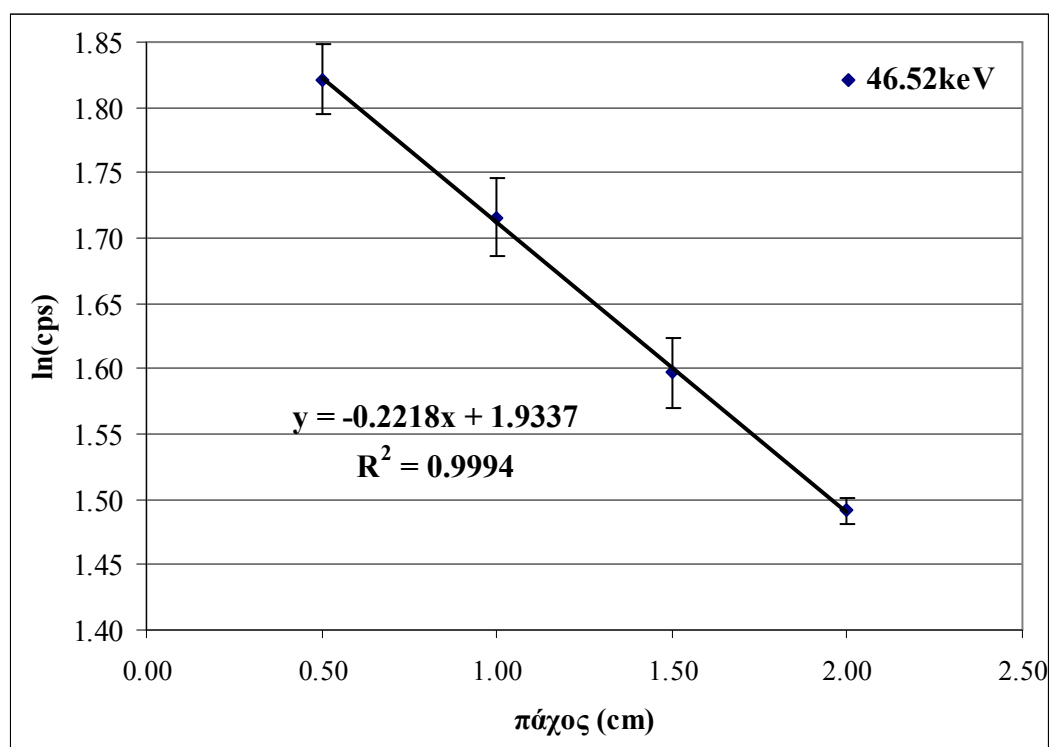
Όπως παρατηρείται, οι τιμές του μ εμφανίζουν σημαντική απόκλιση μεταξύ τους. Αυτό αποδίδεται στην ανάλυση της πολλαπλής φωτοκορυφής στα 46.6keV που σχηματίζεται από τα φωτόνια που εκπέμπει ^{152}Eu , η οποία στις δύο πρώτες περιπτώσεις αναλύθηκε σε τρεις συνιστώσες. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη παράγραφο, το ^{152}Eu εκπέμπει φωτόνια στις ενέργειες 45.36keV, στα 46.6keV, τα οποία κανονικά σχηματίζουν στο φάσμα διπλή φωτοκορυφή (σχήμα 3.48). Η ανάλυση της φωτοκορυφής αυτής στις δύο συνιστώσες της εξαρτάται από τον ανιχνευτή που χρησιμοποιείται και το αντίστοιχο λογισμικό.



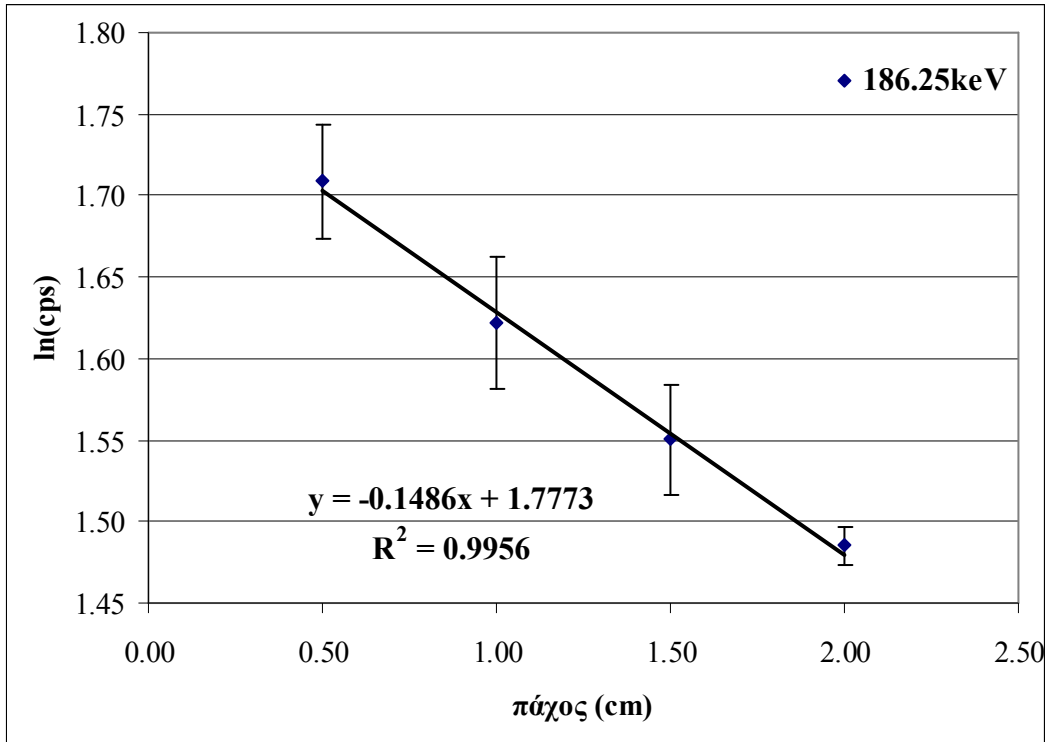
Σχήμα 3.48: Φάσμα εκπομπής φωτονίων ^{152}Eu

Στα πλαίσια της ΔΕ χρησιμοποιήθηκε ο ανιχνευτής LEGe, ο οποίος για την περίπτωση αυτή ήταν βαθμονομημένος στην περιοχή 0-200keV (ανιχνευτής «6») προκειμένου να αντιστοιχεί μεγαλύτερο πλήθος καναλιών στην πολλαπλή φωτοκορυφή, κάτι που θα διευκολύνει την ανάλυση στις συνιστώσες της. Επισημαίνεται ότι ο χαμηλός ρυθμός εκπομπής των φωτονίων των παραπάνω ενεργειών από την πηγή έχει συνέπεια στο σχηματισμό διπλής φωτοκορυφής καλής στατιστικής και τελικά στην ορθή ανάλυσή της. Σε κάθε περίπτωση, η ανάλυση της φωτοκορυφής στις δύο συνιστώσες της έχει άμεση επίδραση στον προσδιορισμό της αντίστοιχης επιφάνειας και του ρυθμού καταγραφομένων φωτονίων. Για το λόγο αυτό η επαναληψιμότητα των μετρήσεων αυτών δεν ήταν καλή, κάτι που αποτυπώνεται στα αντίστοιχα γραφήματα (συντελεστές συσχέτισης σχετικά χαμηλοί) και τελικά στον προσδιορισμό των συντελεστών μ και μ_m .

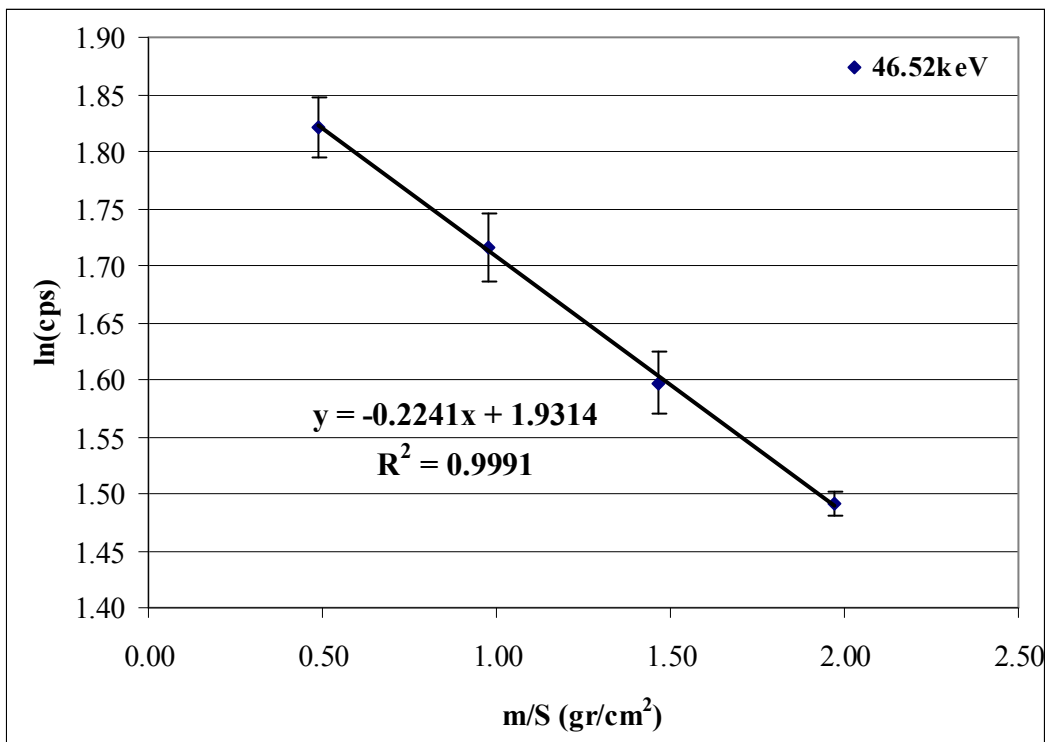
Για σημειακή πηγή ^{226}Ra τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχήματα 3.49, 3.50 για το συντελεστή μ και 3.51, 3.52, για το συντελεστή μ_m .



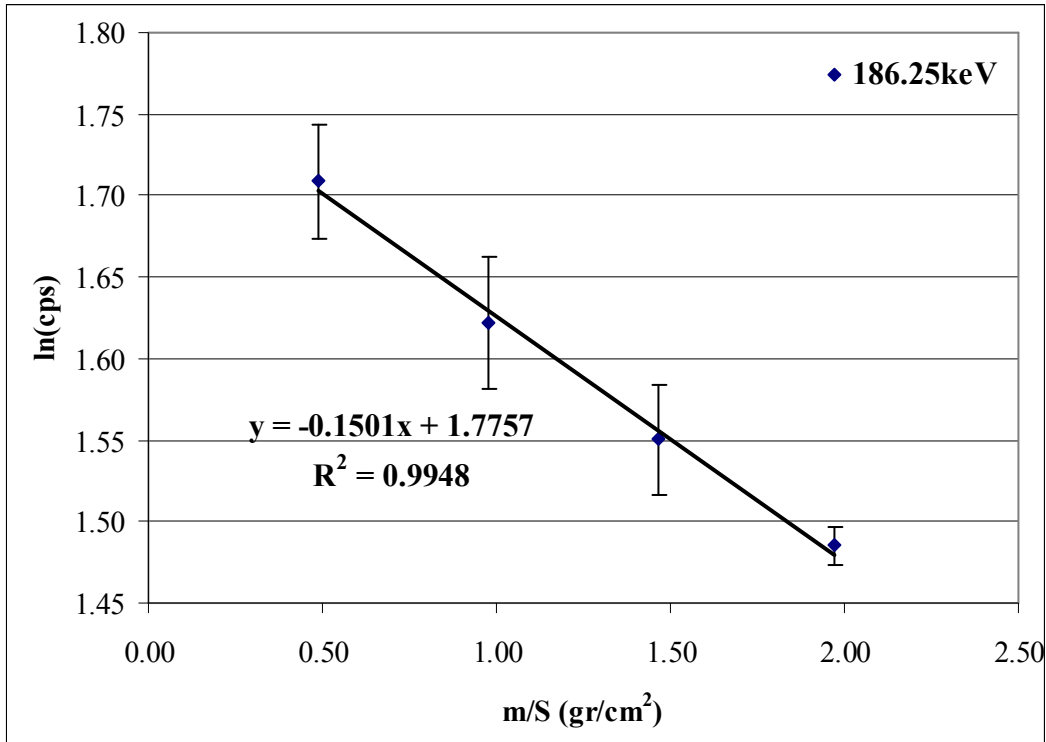
Σχήμα 3.49: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV.



Σχήμα 3.50: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV.



Σχήμα 3.51: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV.



Σχήμα 3.52: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV.

Από τα παραπάνω διαγράμματα εκτιμάται ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στον πίνακα 3.12

Ενέργεια		Πείραμα	NIST	απόκλιση
46.52keV	μ (cm ⁻¹)	0.2218±0.0040	0.2464	-9.98%
	μ/ρ (cm ² /gr)	0.2241±0.0047	0.2464	-9.05%
186.25keV	μ (cm ⁻¹)	0.1486±0.0070	0.1344	10.19%
	μ/ρ (cm ² /gr)	0.1496±0.0077	0.1344	11.31%

Πίνακας 3.12: Αποτελέσματα πειράματος σε γεωμετρία 9 με πηγή ²²⁶Ra

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η αποκλίσεις των συντελεστών εξασθένισης είναι σε αποδεκτά επίπεδα για την ενέργεια των 46.52keV (<10%). Ακόμη προκύπτει ότι για τα 46.52keV η απόκλιση του ολικού μαζικού συντελεστή είναι μικρότερη από την απόκλιση του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης.

Καθώς η συγκεκριμένη γεωμετρία δέσμη έδωσε τα καλύτερα έως τώρα αποτελέσματα, ακολούθησε σειρά πειραμάτων για έλεγχο της επαναληψιμότητας της μεθόδου. Τα αποτελέσματα του ελέγχου παρουσιάζονται στον πίνακα 3.13.

Ενέργεια		Πείραμα	NIST	απόκλιση
46.52keV	μ (cm ⁻¹)	0.2176±0.0038	0.2464	-11.69%
	μ/ρ (cm ² /gr)	0.2199±0.0045	0.2464	-10.75%
186.25keV	μ (cm ⁻¹)	0.1481±0.0073	0.1344	10.19%
	μ/ρ (cm ² /gr)	0.1496±0.0077	0.1344	11.31%

Πίνακας 3.13: Αποτελέσματα πειράματος σε γεωμετρία 9 με πηγή ²²⁶Ra (επανάληψη)

3.3.10 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των πειραμάτων για την εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας δέσμης φωτονίων εμφανίζονται στους πίνακες 3.14 έως 3.16

Γεωμ.	Πηγή	Ενέργεια	μ NIST (cm ⁻¹)	μ πειράματος (cm ⁻¹)	Απόκλιση ως προς NIST (%)
1	Ra (point)	46.52keV	0.2464	0.2004	-18.67
2	Ra (point)	46.52keV	0.2464	0.2022	-17.94
3	Ra (point)	46.52keV	0.2464	0.2068	-16.07
4	Ra (point)	46.52keV	0.2464	0.1977	-19.76
5	Pb (point)	46.52keV	0.2464	0.1933	-21.55
6	Ra (vol)	46.52keV	0.2464	0.2115	-14.16
7	Ra (vol)	46.52keV	0.2464	0.2052	-16.72
8	Ra (vol)	46.52keV	0.2464	0.1853	-24.80
9	Eu (point)	46.63keV	0.2464	0.2238	-9.17
9	Ra (point)	46.52keV	0.2464	0.2218	-9.98

Πίνακας 3.14: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τον γραμμικού συντελεστή εξασθένισης για ενέργεια περί τα 46keV.

Γεωμ.	Πηγή	Ενέργεια	μ/ρ NIST (cm ² /gr)	μ/ρ πειράματος (cm ² /gr)	Απόκλιση ως προς μ/ρ NIST (%)
1	Ra (point)	46.52keV	0.2464	0.2094	-15.02%
2	Ra (point)	46.52keV	0.2464	0.2036	-17.37%
3	Ra (point)	46.52keV	0.2464	0.2091	-15.14%
4	Ra (point)	46.52keV	0.2464	0.1997	-18.95%
5	Pb (point)	46.52keV	0.2464	0.1972	-19.97%
6	Ra (vol)	46.52keV	0.2464	0.2137	-13.27%
7	Ra (vol)	46.52keV	0.2464	0.2093	-15.06%
8	Ra (vol)	46.52keV	0.2464	0.1890	-23.30%
9	Eu (point)	46.63keV	0.2464	0.2638	7.06%
9	Ra (point)	46.52keV	0.2464	0.2241	-9.05%

Πίνακας 3.15: Συγκενρωτικά αποτελέσματα για τον μαζικό συντελεστή εξασθένησης για ενέργεια περί τα 46keV.

Γεωμετρία	Πηγή	μ NIST (cm ⁻¹)	μ πειραματος (cm ⁻¹)	Απόκλιση ως προς NIST (%)
1	²²⁶ Ra(point)	0.1344	0.1295	-3.65
2	²²⁶ Ra(point)	0.1344	0.1325	-1.41
3	²²⁶ Ra(point)	0.1344	0.1231	-8.41
4	²²⁶ Ra(point)	0.1344	0.1473	9.60
6	²²⁶ Ra (vol)	0.1344	0.1389	3.35
7	²²⁶ Ra (vol)	0.1344	0.1131	-15.85
8	²²⁶ Ra (vol)	0.1344	0.1541	14.66
9	²²⁶ Ra(point)	0.1344	0.1481	10.19

Πίνακας 3.16 Συγκενρωτικά αποτελέσματα για το γραμμικό συντελεστή εξασθένησης για τα 186.25keV

Από τους πίνακες 3.14 και 3.15: φαίνεται ότι η μικρότερη απόκλιση από την τιμή της βιβλιογραφίας (NIST) στην περιοχή των 46 keV επιτυγχάνεται με τη γεωμετρία δέσμης φωτονίων «9». Η παρατήρηση αυτή ισχύει τόσο για τον προσδιορισμό του μ όσο και για τον προσδιορισμό του μ/ρ, με παρόμοιες αποκλίσεις

για τις δύο χρησιμοποιούμενες πηγές. Για το λόγο αυτό, ως βέλτιστη γεωμετρία δέσμης επιλέχθηκε τελικά η γεωμετρία «9» με πηγή ^{226}Ra .

Γεωμετρία	Πηγή	μ/ρ NIST (cm ² /gr)	μ/ρ πειράματος (cm ² /gr)	Απόκλιση ως προς μ/ρ NIST(%)
1	$^{226}\text{Ra}(\text{point})$	0.1344	0.1347	0.22%
2	$^{226}\text{Ra}(\text{point})$	0.1344	0.1645	22.40%
3	$^{226}\text{Ra}(\text{point})$	0.1344	0.1244	-7.44%
4	$^{226}\text{Ra}(\text{point})$	0.1344	0.1488	10.71%
6	$^{226}\text{Ra}(\text{vol})$	0.1344	0.1404	4.46%
7	$^{226}\text{Ra}(\text{vol})$	0.1344	0.1153	-14.21%
8	$^{226}\text{Ra}(\text{vol})$	0.1344	0.1572	16.96%
9	$^{226}\text{Ra}(\text{point})$	0.1344	0.1496	11.31%

Πίνακας 3.17 Συγκενρωτικά αποτελέσματα για τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένισης για τα 186.25keV

Όπως φαίνεται από τον πίνακα 3.16 για τα 186.25keV, η μικρότερη απόκλιση επιτυγχάνεται με τη γεωμετρία «1», η οποία είναι και η ήδη χρησιμοποιούμενη γεωμετρία στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Επομένως, δεν προκύπτει από την παρούσα ΔΕ ανάγκη τροποποίησης στη διαδικασία προσδιορισμού του συντελεστή μ για την ενέργεια αυτή.

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρατίθενται τα πειράματα που έγιναν στα πλαίσια της ΔΕ, με στόχο την ενδελεχή διερεύνηση της ακρίβειας της μεθοδολογίας προσδιορισμού των συντελεστών μ και μ_m για την ενέργεια των 46.52keV, η οποία υιοθετήθηκε. Η διερεύνηση αυτή έγινε με χρήση διαφόρων υλικών με ποικιλία πυκνοτήτων.

3.4 Διερεύνηση της ακρίβειας προσδιορισμού των συντελεστών μ και μ_m με χρήση υλικών γνωστής σύστασης

Αφού υιοθετήθηκε η γεωμετρία «9», αποφασίστηκε η διενέργεια πειραμάτων για την επιβεβαίωση της καταλληλότητας της συγκεκριμένης γεωμετρίας σε υλικά

διαφόρων συστάσεων και πυκνοτήτων και την εκτίμηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων της.

Η επιλογή των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη ενότητα πειραμάτων έγινε με κριτήριο τη διαθεσιμότητά, την καθαρότητα, τις υγροσκοπικές ιδιότητες, την πυκνότητά αλλά και τη χρονική διάρκεια των σχετικών πειραμάτων. Η υγροσκοπικότητα είναι σημαντική διότι κατά τη διάρκεια του πειράματος ενδεχομένως μεταβάλλεται η σύστασή του υλικού εξαιτίας της προσροφηθείσας υγρασίας. Η καθαρότητα είναι επίσης σημαντική, καθώς η πρόσμιξη ενός στοιχείου με διαφορετικό ατομικό αριθμό (Z) αλλάζει τις ιδιότητες εξασθένησης του υλικού, με συνέπεια να μην είναι γνωστοί οι συντελεστές εξασθένησης του υλικού. Το κριτήριο της πυκνότητας εισήχθη έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν απορροφητές με πυκνότητες σε μεγάλο εύρος, που να καλύπτει επαρκώς την περιοχή πυκνοτήτων των υλικών που συνήθως αναλύονται. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν υλικά με πυκνότητα παρόμοια με το απιονισμένο νερό, υλικά με μεγαλύτερη πυκνότητα, σχεδόν διπλάσια, υλικά με ενδιάμεση πυκνότητα, αλλά και υλικά με μικρότερη πυκνότητα από το νερό.

Το κυριότερο πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων αυτών ήταν ο υπολογισμός της πυκνότητάς τους, καθώς ο τρόπος με τον οποίο υπολογιζόταν πειραματικά η πυκνότητα του κάθε άλατος που χρησιμοποιήθηκε έδινε τιμή η οποία διέφερε σημαντικά από τη θεωρητική τιμή η οποία αναγραφόταν στο φύλλο προδιαγραφών ασφαλείας του (Material Safety Data Sheet, MSDS). Για την αντιμετώπιση του προβλήματος υιοθετήθηκε η πυκνότητα η οποία υπολογιζόταν πειραματικά και γινόταν προσπάθεια για την όσο το δυνατόν καλύτερη συμπίεσή του.

Τα υλικά που τελικά αποκτήθηκαν στα πλαίσια της ΔΕ και χρησιμοποιήθηκαν ήταν:

- Οξείδιο του τιτανίου (TiO_2) με πυκνότητα 0.904gr/cm^3
- Ένυδρο θεικό μαγνήσιο ($\text{MgSO}_4 - 7\cdot\text{H}_2\text{O}$) με πυκνότητα 1.05gr/cm^3
- Μείγμα ένυδρου θεικού μαγνησίου και θεικού καλίου ($\text{MgSO}_4 - 7\cdot\text{H}_2\text{O} - \text{K}_2\text{SO}_4$) με πυκνότητα 1.353gr/cm^3
- Θεικό κάλιο (K_2SO_4) με πυκνότητα 1.778gr/cm^3

Παρόλο που πρωταρχικός στόχος των πειραμάτων που παρουσιάζονται στην παράγραφο αυτή είναι ο έλεγχος της μεθοδολογίας προσδιορισμού των συντελεστών

μ και μ_m για την ενέργεια 46.52keV, αποφασίσθηκε – για ορισμένα υλικά – να ελεγχθούν και οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για τον προσδιορισμό των συντελεστών αυτών και για τις ενέργειες των 63.29keV, 185.72 keV και 186.25 keV. Ειδικά για την ενέργεια 63.29keV, πρέπει να επισημανθεί ότι μέχρι την πραγματοποίηση της παρούσας ΔΕ δεν υπήρχαν στο ΕΠΤ-ΕΜΠ μετρήσεις για τον πειραματικό προσδιορισμό του συντελεστή μ , ο οποίος για την ενέργεια 63.29keV εκτιμάται από καμπύλη της μορφής $\mu=f(\rho,E)$ που είχε προταθεί από [ΔΔ Αναγνωστάκη, 1998] με βάση μετρήσεις στις ενέργειες 46.52keV (^{226}Ra), 59.54keV (^{241}Am). Η γεωμετρία δέσμης που χρησιμοποιήθηκε για τις ενέργειες 63.29keV και 185.72keV ήταν η γεωμετρία «9», με επιφανειακές πηγές (foils) φυσικού ουρανίου.

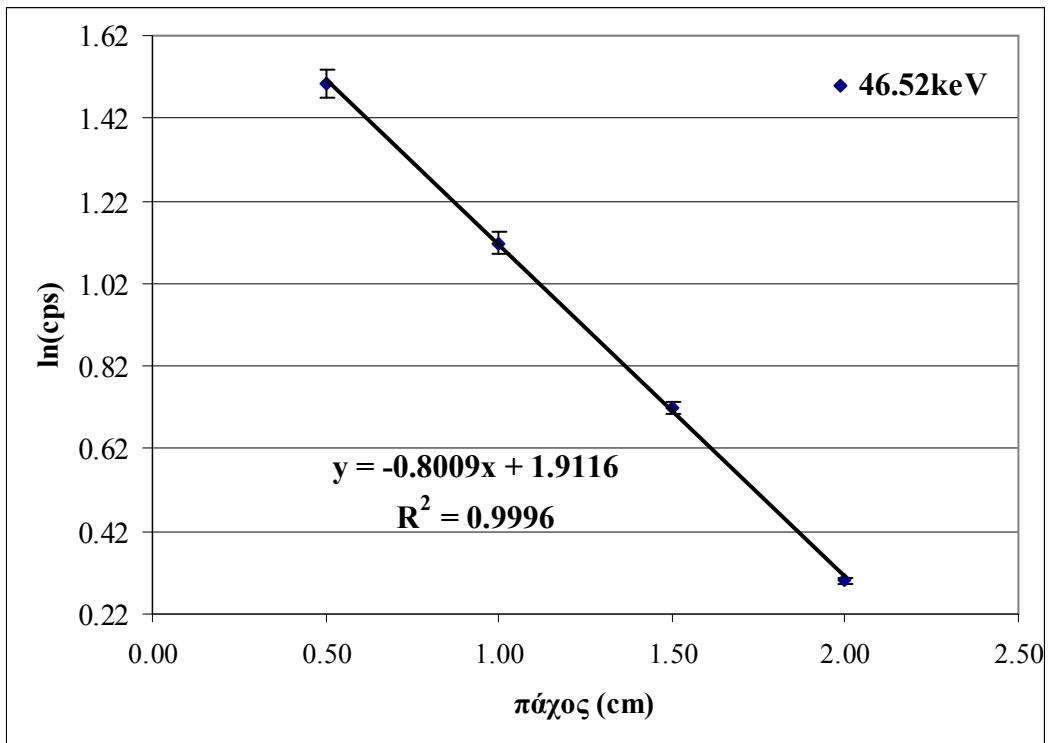
3.4.1 Μετρήσεις με απορροφητή οξείδιο του τιτανίου (TiO₂)

Οι μετρήσεις έγιναν με σημειακή πηγή ^{226}Ra και πηγή foils φυσικού ουρανίου σε γεωμετρία «9» για πάχη απορροφητή 5, 10, 15, 20mm στον ανιχνευτή «6». Ακολουθώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού που αναφέρεται στην παράγραφο 3.2 προέκυψαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα 3.51, 3.52, 3.53 και 3.54 για τον υπολογισμό του μ .

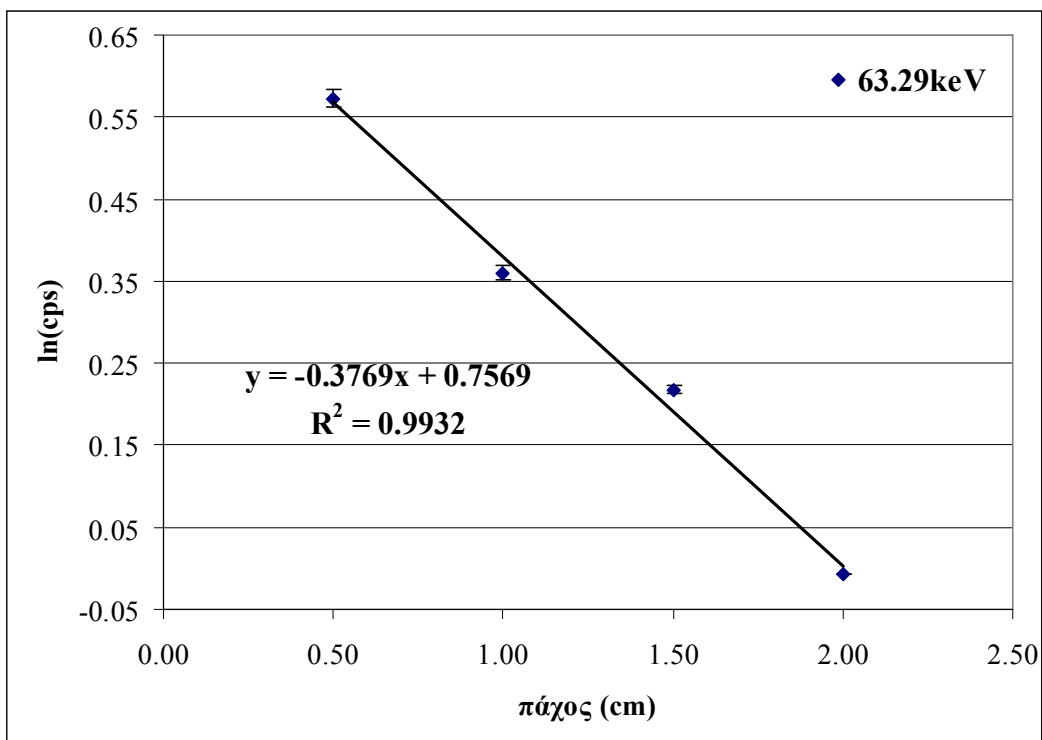
Από τα διαγράμματα εκτιμήθηκε ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης. Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης μ , για υλικό απορροφητή TiO₂ εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Ενέργεια	Πηγή	μ NIST (cm ⁻¹)	μ πειράματος (cm ⁻¹)	Απόκλιση ως προς NIST (%)
46.52keV	Ra(point)	0.874	0.8009±0.0108	-8.36
63.29keV	U(foils)	0.432	0.3769±0.0220	-12.75
185.74keV	U(foils)	0.1210	0.1139±0.0138	-5.87
186.25keV	Ra(point)	0.1210	0.1175±0.0023	-2.89

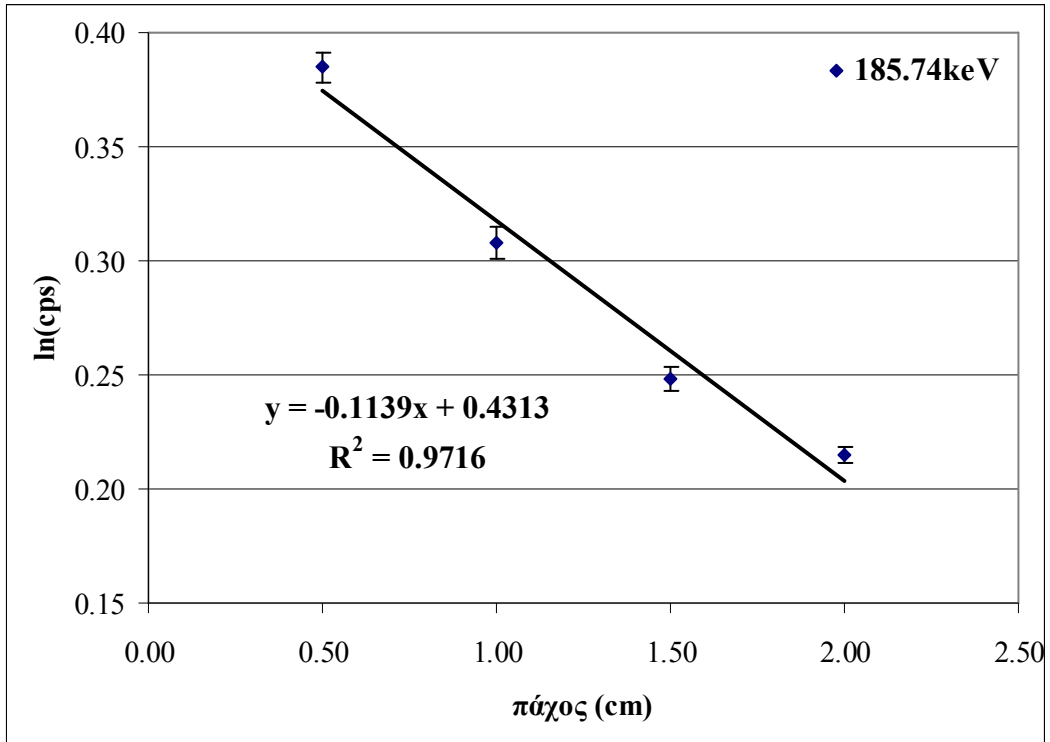
Πίνακας 3.18: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων για τον συντελεστή μ με απορροφητή TiO₂



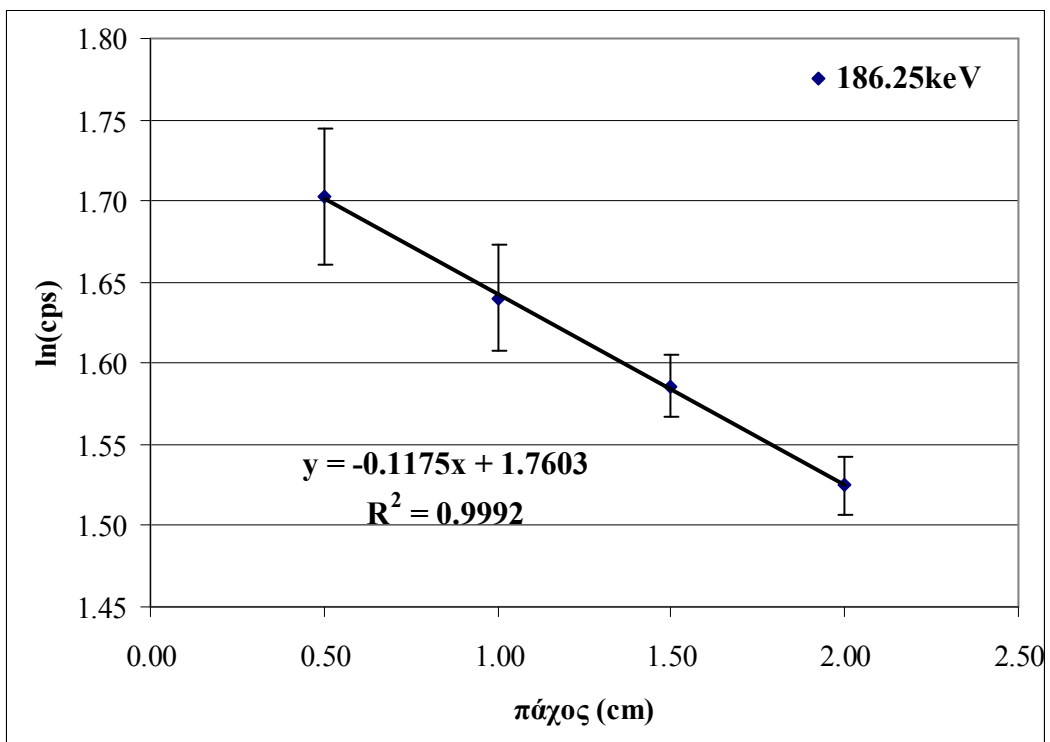
Σχήμα 3.53: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV και απορροφητή TiO_2 .



Σχήμα 3.54: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 63.29keV και απορροφητή TiO_2 .



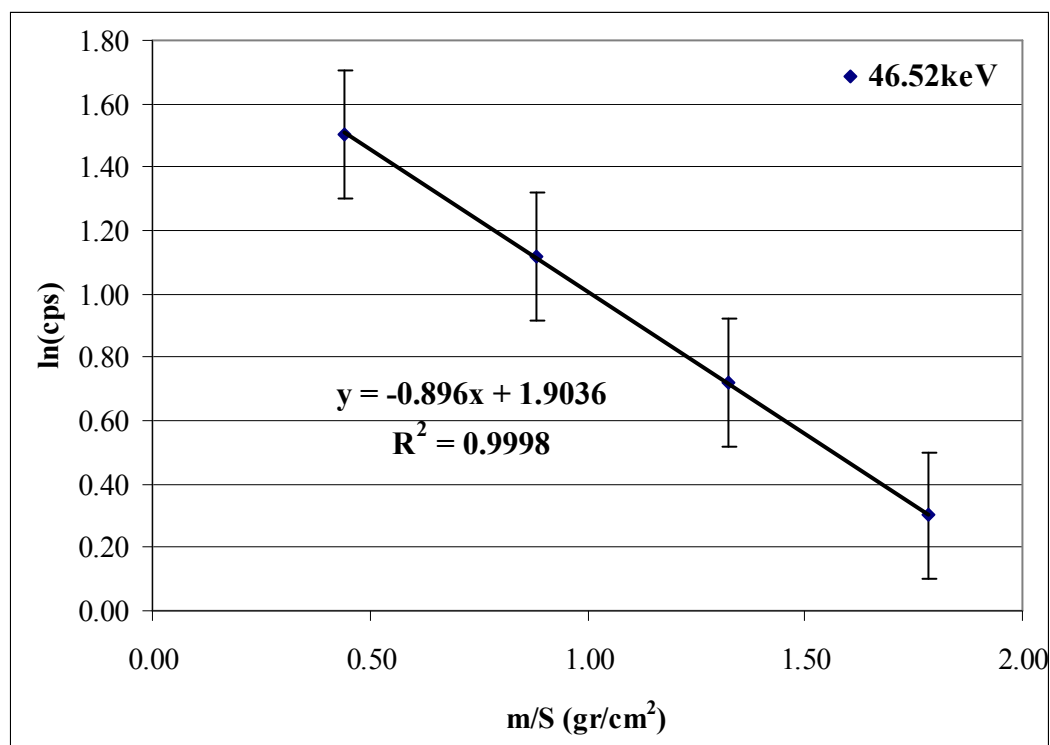
Σχήμα 3.55: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 185.74keV και απορροφητή TiO_2 .



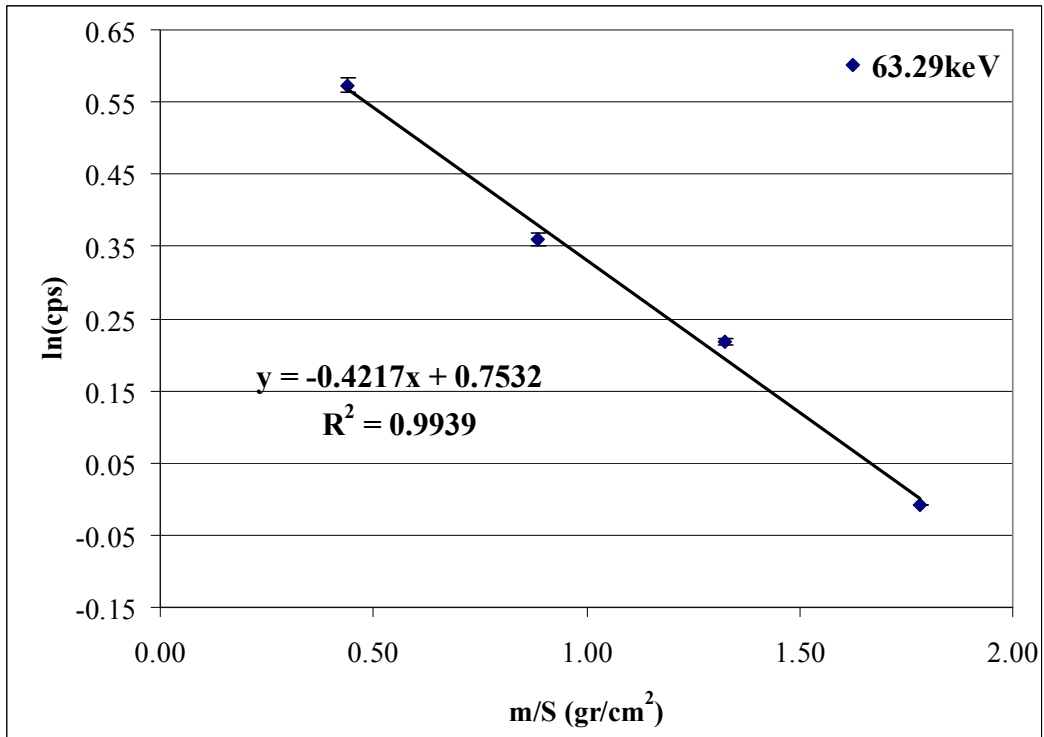
Σχήμα 3.56: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV και απορροφητή TiO_2 .

Από τον πίνακα 3.26 προκύπτει ότι οι αποκλίσεις για τις ενέργειες των 185.74keV και για τα 186.25keV είναι σε αποδεκτά επίπεδα. Για τα 46.52keV, η απόκλιση είναι μικρότερη από αυτήν του νερού. Για τα 63.29keV η απόκλιση είναι οριακά αποδεκτή. Συμπερασματικά, λοιπόν σε TiO_2 – ένα υλικό χαμηλότερης πυκνότητας του νερού – η γεωμετρία που υιοθετήθηκε δίνει αποδεκτά αποτελέσματα.

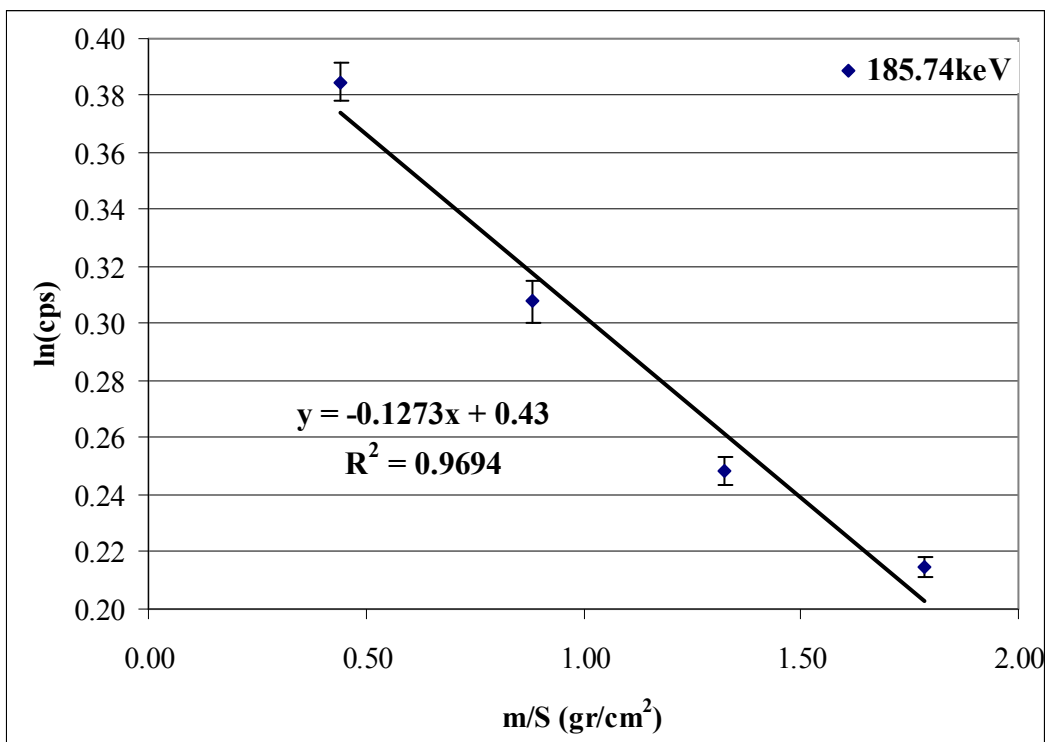
Ακολουθώντας την παραλλαγή της μεθόδου υπολογισμού που αναφέρεται στην παράγραφο 3.2 κατασκευάστηκαν και τα διαγράμματα για τον υπολογισμό του μ_m , τα οποία παρουσιάζονται στα σχήματα 3.56, 3.57, 3.58 και 3.59.



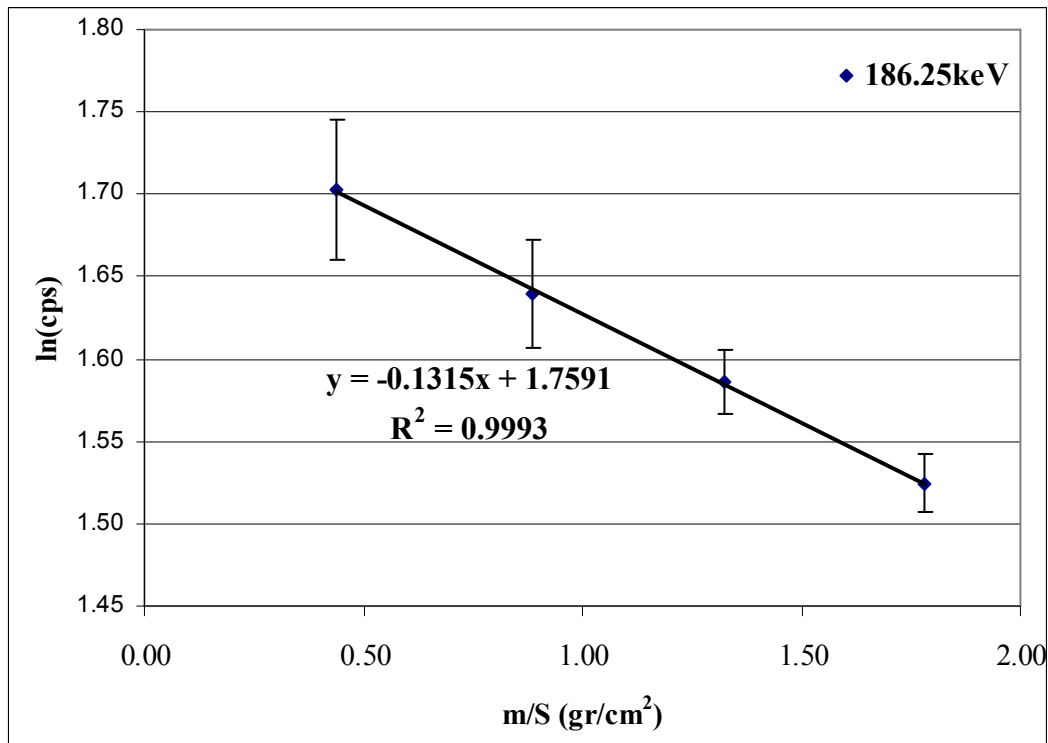
Σχήμα 3.57: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV και απορροφητή TiO_2 .



Σχήμα 3.58: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 63.29keV και απορροφητή TiO_2 .



Σχήμα 3.59: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 185.74keV και απορροφητή TiO_2 .



Σχήμα 3.60: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV και απορροφητή TiO_2 .

Από τα παραπάνω διαγράμματα, εκτιμάται ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης μ_m . Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένισης, για απορροφητή TiO_2 εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Ενέργεια φωτονίων	Πηγή	μ/ρ NIST (cm ² /g)	μ/ρ πειράματος (cm ² /g)	Απόκλιση ως προς μ/ρ NIST (%)
46.52keV	Ra(point)	0.9670	0.8960±0.0081	-7.34%
63.29keV	U(foils)	0.4781	0.4217±0.0233	-11.80%
185.74keV	U foils)	0.1337	0.1273±0.0160	-4.79%
186.25keV	Ra(point)	0.1335	0.1315±0.0320	-1.50%

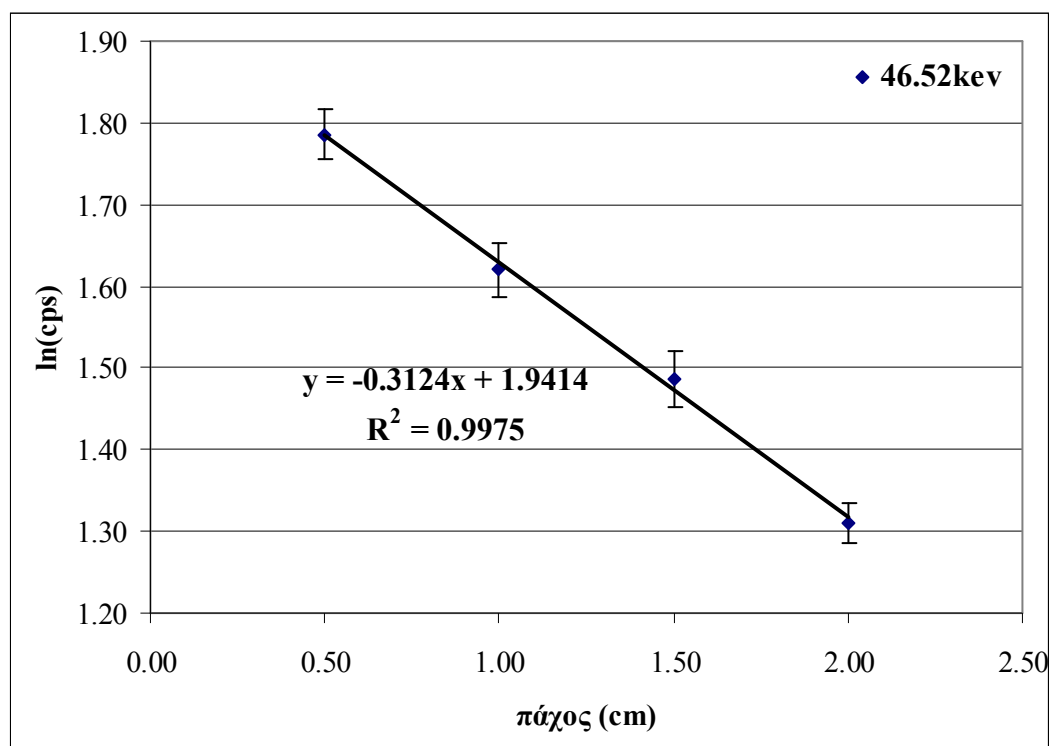
Πίνακας 3. 19: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων για το μ/ρ με απορροφητή TiO_2

Από τον πίνακα προκύπτει ότι οι αποκλίσεις για τις ενέργειες 46.52keV, 185.74keV και 186.25keV είναι σε αποδεκτά επίπεδα. Για τα 63.29keV η απόκλιση

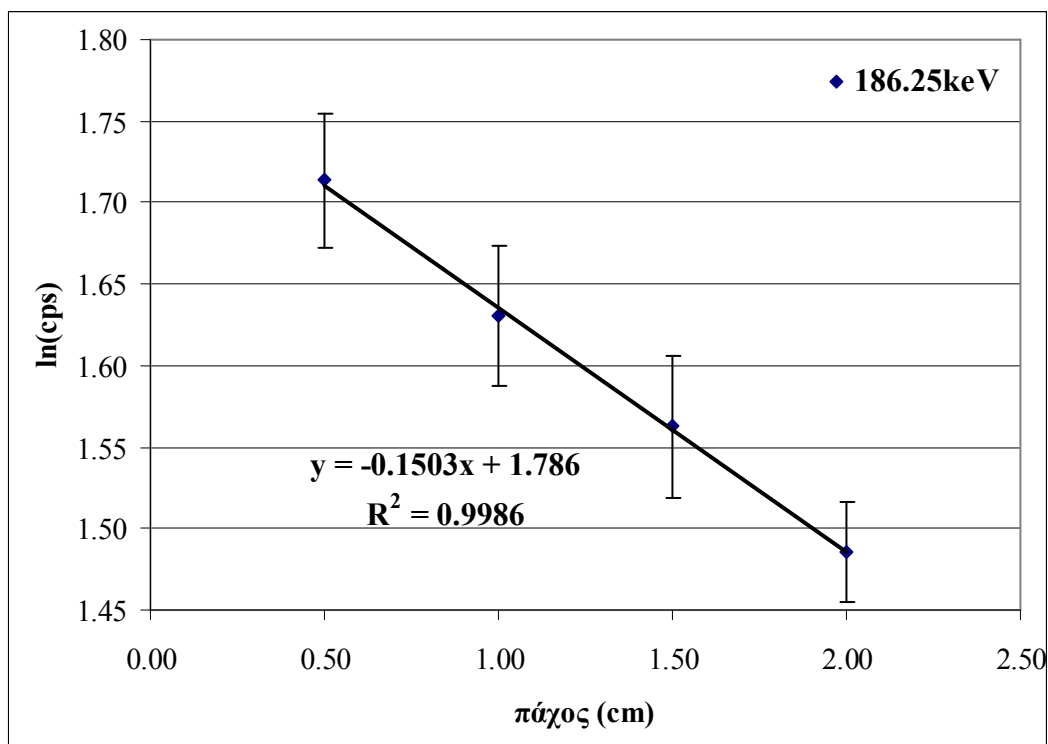
είναι οριακά αποδεκτή. Ακόμη παρατηρείται ότι στον υπολογισμό του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένισης οι αποκλίσεις είναι μικρότερες από αυτές για τον υπολογισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης. Συμπερασματικά, λοιπόν σε ένα υλικό πυκνότητας λίγο μικρότερης του νερού (πυκνότητα $\text{TiO}_2: 0.904 \text{ gr/cm}^3$), η γεωμετρία που υιοθετήθηκε δίνει αποδεκτά αποτελέσματα.

3.1.1 Μετρήσεις με απορροφητή ένυδρο θειικό μαγνήσιο ($\text{MgSO}_4 - 7 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

Οι μετρήσεις έγιναν με σημειακή πηγή ^{226}Ra σε γεωμετρία «9», για πάχη απορροφητή 5, 10, 15, 20mm στον ανιχνευτή «6». Ακολουθώντας την μεθοδολογία υπολογισμού που αναφέρεται στην παράγραφο 3.2 προέκυψαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα για τον υπολογισμό του μ , τα οποία παρουσιάζονται στα σχήματα 3.60 και 3.61.



Σχήμα 3.61: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52 keV και απορροφητή ένυδρο MgSO_4 .



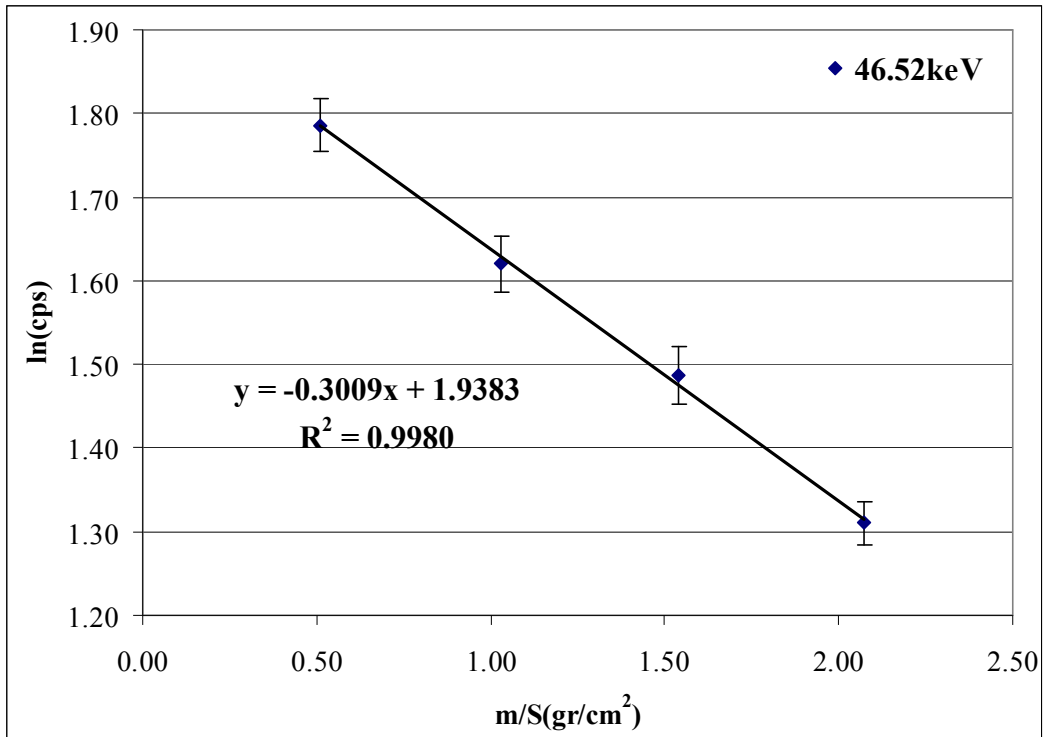
Σχήμα 3.62: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV και απορροφητή ένυδρο $MgSO_4$.

Από τα παραπάνω διαγράμματα, εκτιμήθηκε ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης μ . Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης, για υλικό απορροφητή $MgSO_4$ εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα:

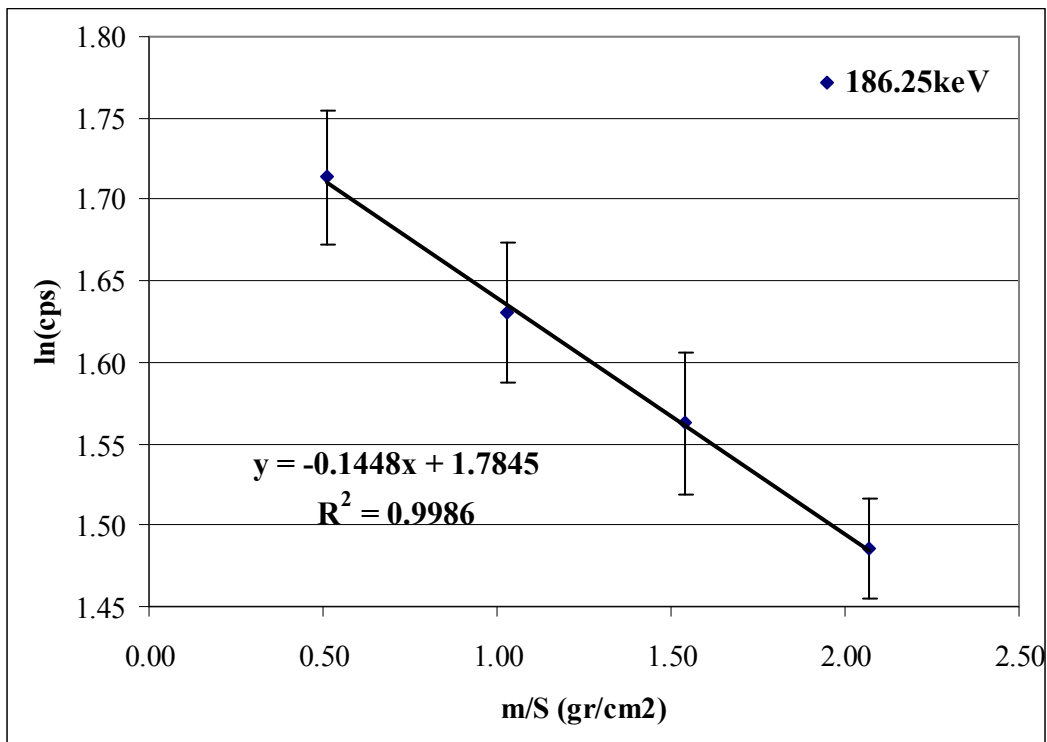
Ενέργεια φωτονίων	Πηγή	μ NIST (cm^{-1})	μ πειράματος (cm^{-1})	Απόκλιση ως προς NIST (%)
46.52keV	Ra(point)	0.288	0.3124 ± 0.0111	8.47
186.25keV	Ra(point)	0.1390	0.1503 ± 0.0039	8.13

Πίνακας 3. 20: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων για το μ με απορροφητή ένυδρο $MgSO_4$

Ακολουθώντας την παραλλαγή της μεθόδου υπολογισμού που αναφέρεται στην παράγραφο 3.2 κατασκευάστηκαν και τα διαγράμματα για τον υπολογισμό του μ_m , τα οποία παρουσιάζονται στα σχήματα 3.62 και 3.63.



Σχήμα 3.63: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV και απορροφητή ένυδρο $MgSO_4$.



Σχήμα 3.64: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV και απορροφητή ένυδρο $MgSO_4$.

Από τα παραπάνω διαγράμματα, υπολογίζεται ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης μ_m . Συγκεντρωτικά, τα αποτελέσματα για τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένισης, για απορροφητή $MgSO_4 \cdot 7 \cdot H_2O$ εμφανίζονται στον πίνακα 3.21.

Ενέργεια φωτονίων	Πηγή	μ/ρ NIST (cm^2/g)	μ/ρ πειράματος (cm^2/g)	Απόκλιση ως προς μ/ρ NIST (%)
46.52keV	Ra(point)	0.3061	0.3009 ± 0.0096	-1.70%
186.25keV	Ra(point)	0.1324	0.1448 ± 0.0038	9.37%

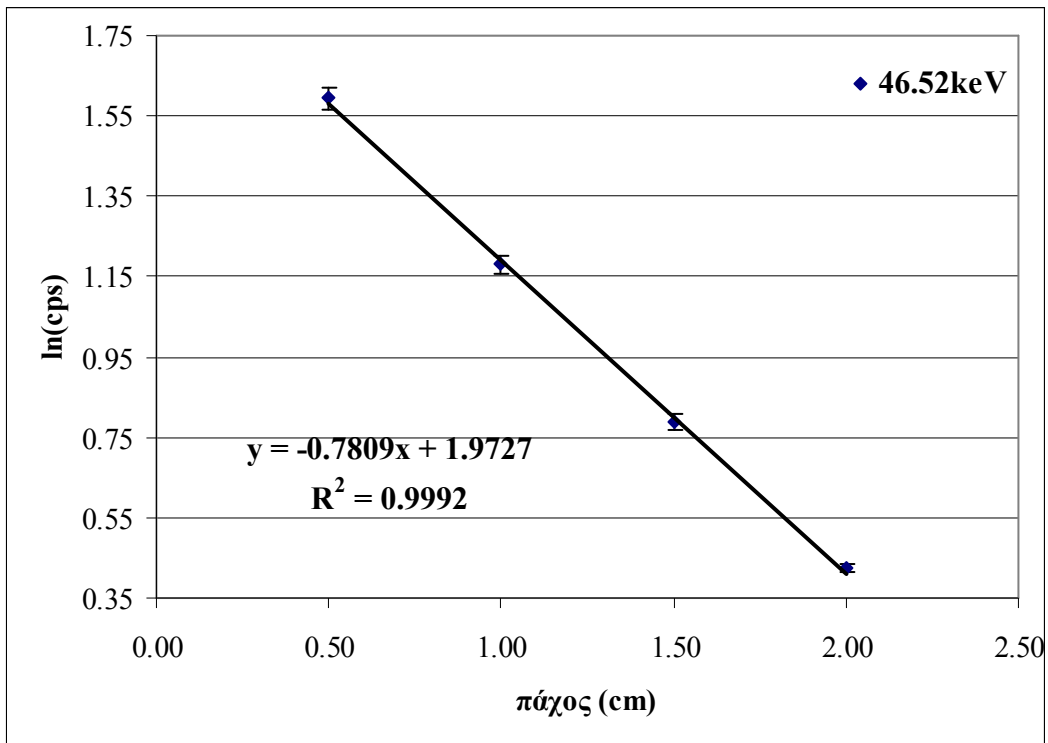
Πίνακας 3. 21: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων για το μ/ρ με απορροφητή ένυδρο $MgSO_4$

Από τον πίνακα 3.21 προκύπτει ότι οι αποκλίσεις τόσο για τα 46.52keV, όσο και για την ενέργεια των 186.25keV είναι σε αποδεκτά επίπεδα. Ακόμη παρατηρείται ότι για τα 46.52 keV η απόκλιση του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένισης από την τιμή αναφοράς είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη απόκλιση του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης. Συμπερασματικά, σε υλικό πυκνότητας ελαφρώς μεγαλύτερης από αυτή του νερού (πυκνότητα ένυδρου $MgSO_4$: 1.05 gr/cm^3), η γεωμετρία που υιοθετήθηκε δίνει αποδεκτά αποτελέσματα.

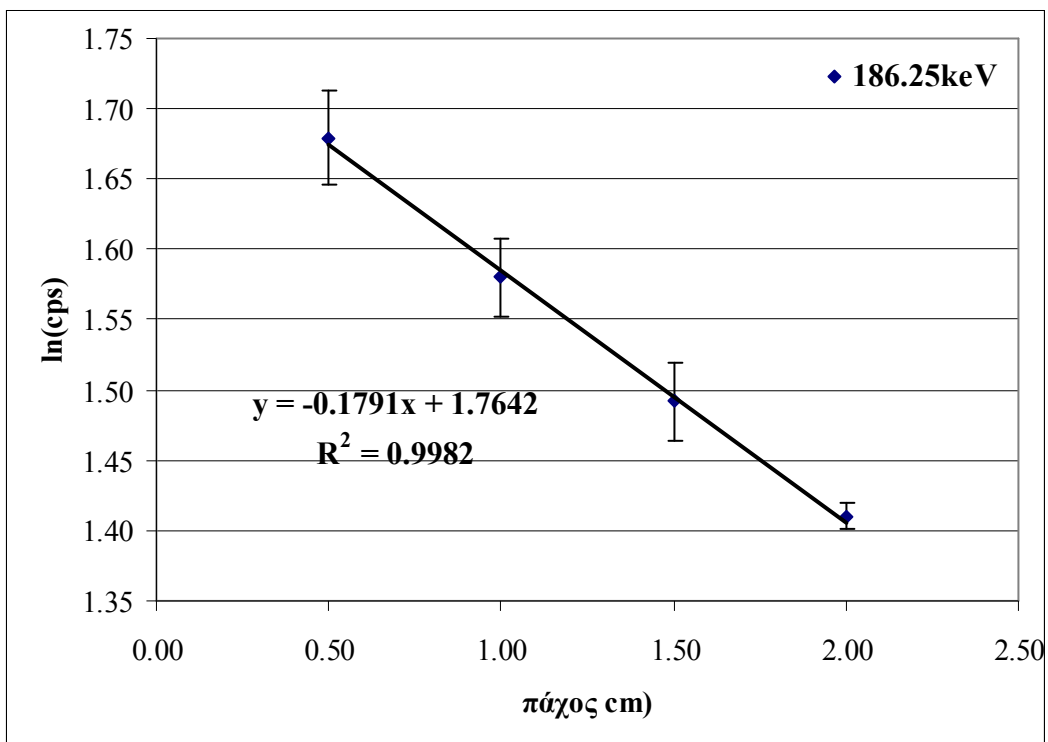
3.1.2 Μετρήσεις με απορροφητή μείγμα θεικού καλίου - ένυδρου θεικού μαγνησίου (K_2SO_4 - $MgSO_4$ - $7 \cdot H_2O$)

Για το συγκεκριμένο πείραμα, χρησιμοποιήθηκε μείγμα K_2SO_4 - $MgSO_4$ - $7H_2O$ με συγκεκριμένη αναλογία μαζών $m_{K_2SO_4} / m_{MgSO_4} = 9.082$. Το μείγμα δημιουργήθηκε για να προσομοιώσει υλικό με πυκνότητα ενδιάμεση των δύο αλάτων. Η σύσταση του συγκεκριμένου μείγματος είναι γνωστή, αφού είναι γνωστή η αναλογία των συστατικών του, κάτι που επιτρέπει τον προσδιορισμό των συντελεστών μ και μ/ρ από τη βάση δεδομένων του NIST.

Οι μετρήσεις έγιναν με σημειακή πηγή ^{226}Ra σε γεωμετρία «9», για πάχη απορροφητή 5, 10, 15 και 20mm, στον ανιχνευτή «6». Ακολουθώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού που αναφέρεται στην παράγραφο 3.2 προέκυψαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα για τον υπολογισμό του μ που παρουσιάζονται στα σχήματα 3.64 και 3.65.



Σχήμα 3.65: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV και απορροφητή μείγμα ένυδρου $MgSO_4$ και K_2SO_4 .



Σχήμα 3.66: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV και απορροφητή μείγμα ένυδρου $MgSO_4$ και K_2SO_4 .

Από τα παραπάνω διαγράμματα εκτιμήθηκε ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης. Συγκεντρωτικά, τα αποτελέσματα για τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένησης, για υλικό απορροφητή μείγμα $MgSO_4 \cdot 7 \cdot H_2O - K_2SO_4$ παρουσιάζονται στον πίνακα 3.22.

Ενέργεια φωτονίων	Πηγή	μ NIST (cm^{-1})	μ πειράματος (cm^{-1})	Απόκλιση ως προς NIST (%)
46.52keV	Ra(point)	0.834	0.7809±0.0069	-6.37
186.25keV	Ra(point)	0.1800	0.1791±0.0030	-0.50

Πίνακας 3.22: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων για το μ με απορροφητή μείγμα ενυδρού $MgSO_4$ και K_2SO_4 .

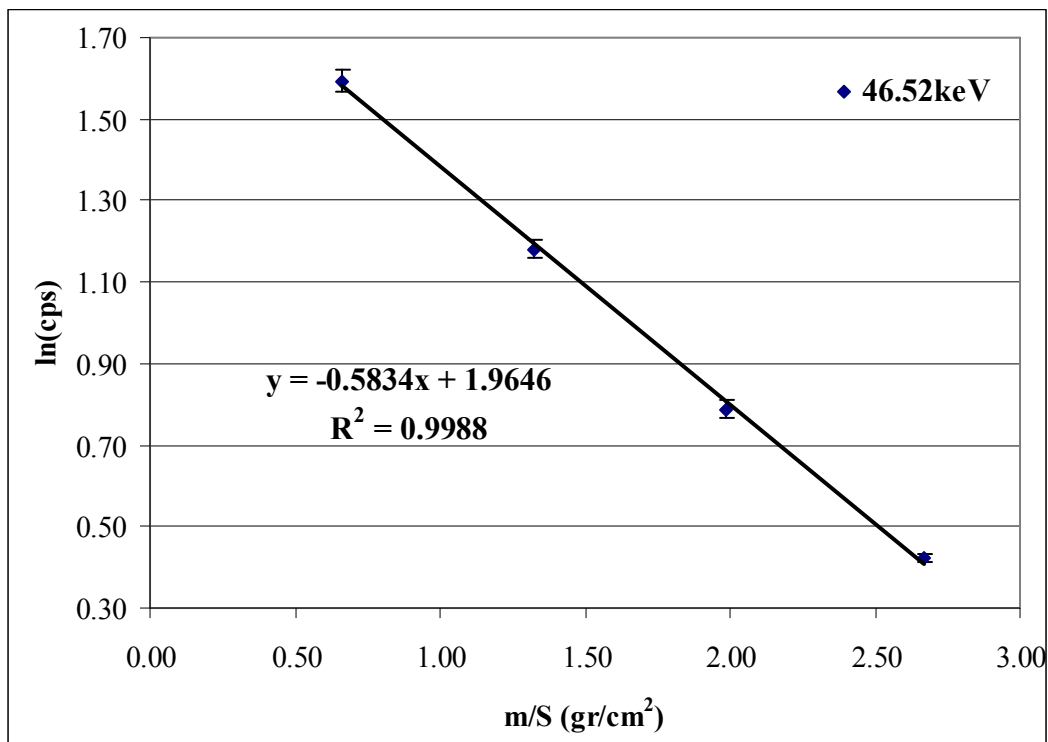
Από τον πίνακα προκύπτει ότι οι αποκλίσεις για την ενέργεια των 186.25keV είναι σε αποδεκτά επίπεδα και μάλιστα η τιμή του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης σχεδόν ταυτίζεται με την βιβλιογραφική τιμή του NIST. Για τα 46.52keV, η απόκλιση είναι μικρότερη από αυτήν του νερού. Συμπερασματικά, σε υλικό πυκνότητας λίγο μεγαλύτερης από αυτήν του νερού, η γεωμετρία που υιοθετήθηκε δίνει αποδεκτά αποτελέσματα.

Ακολουθώντας την παραλλαγή της μεθόδου υπολογισμού που αναφέρεται στην παράγραφο 3.2 υπολογίστηκαν και τα διαγράμματα για τον υπολογισμό του μ_m , τα οποία παρουσιάζονται στα σχήματα 3.66 και 3.67.

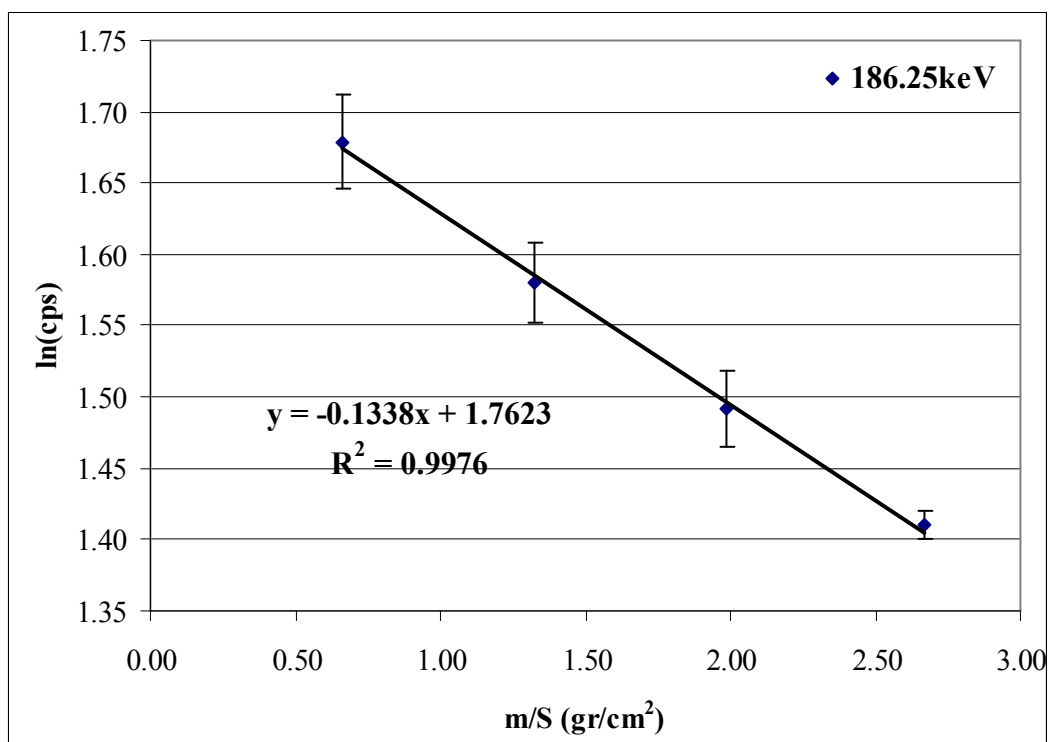
Από τα διαγράμματα εκτιμήθηκε ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης μ_m . Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένησης, για απορροφητή $MgSO_4 \cdot 7 \cdot H_2O - K_2SO_4$ εμφανίζονται στον πίνακα 3.23.

Ενέργεια φωτονίων	Πηγή	μ/ρ NIST (cm^2/g)	μ/ρ πειράματος (cm^2/g)	Απόκλιση ως προς μ/ρ NIST (%)
46.52keV	Ra(point)	0.6162	0.5834±0.0071	-5.32%
186.25keV	Ra(point)	0.1332	0.1338±0.0034	0.45%

Πίνακας 3. 23: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων για το μ/ρ με απορροφητή μείγμα ενυδρού $MgSO_4$ και K_2SO_4 .



Σχήμα 3.67: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV και απορροφητή μείγμα ένδρου $MgSO_4$ και K_2SO_4 .

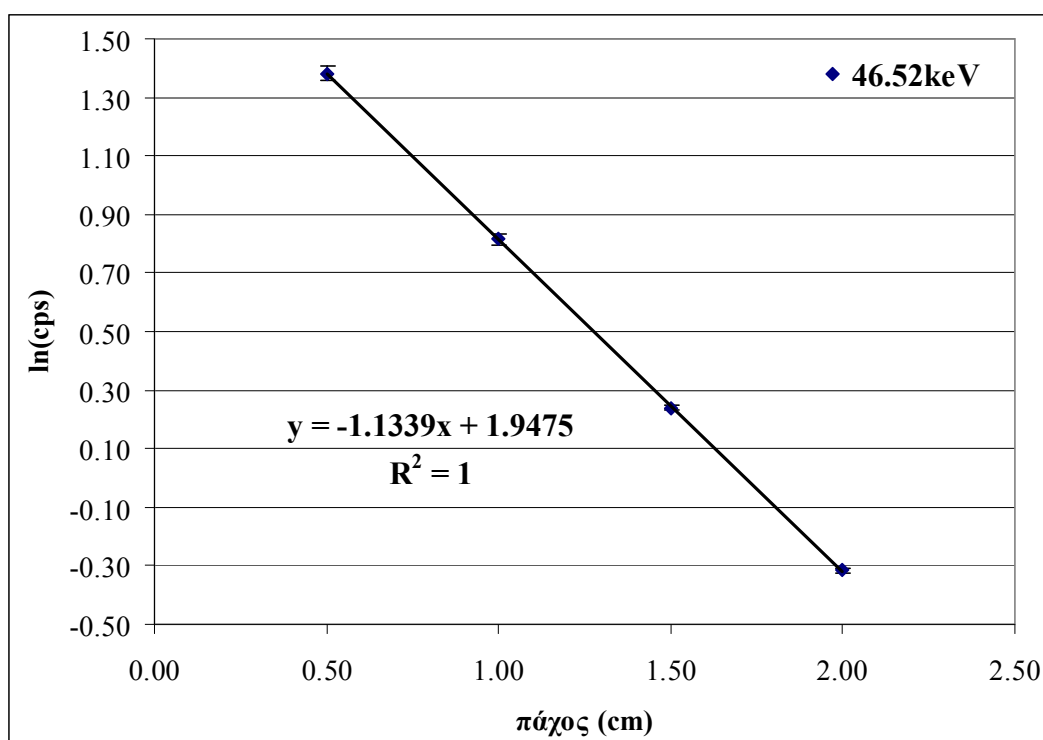


Σχήμα 3.68: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV και απορροφητή μείγμα ένδρου $MgSO_4$ και K_2SO_4 .

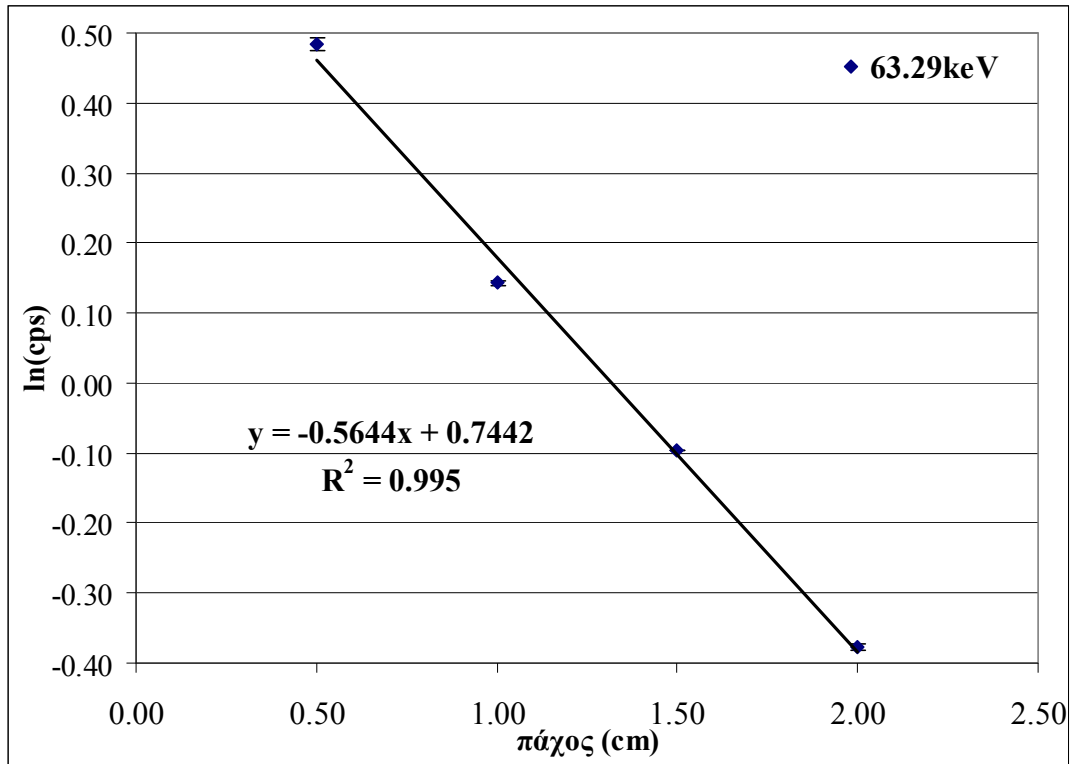
Από τον πίνακα 3.23 προκύπτει ότι οι αποκλίσεις για την ενέργεια των 186.25keV είναι σε αποδεκτά επίπεδα και μάλιστα η τιμή του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένισης πρακτικά ταυτίζεται με την βιβλιογραφική τιμή του NIST. Για τα 46.52keV, η απόκλιση είναι μικρότερη από αυτήν του νερού. Ακόμη παρατηρείται ότι οι αποκλίσεις του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένισης είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες αποκλίσεις του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης. Συμπερασματικά, σε υλικό πυκνότητας λίγο μεγαλύτερης από αυτή του νερού (πυκνότητα μείγματος ένυδρου $MgSO_4$ και K_2SO_4 : 1.353gr/cm^3), η γεωμετρία που υιοθετήθηκε δίνει αποδεκτά αποτελέσματα.

3.1.3 Μετρήσεις με απορροφητή θειικό κάλιο (K_2SO_4)

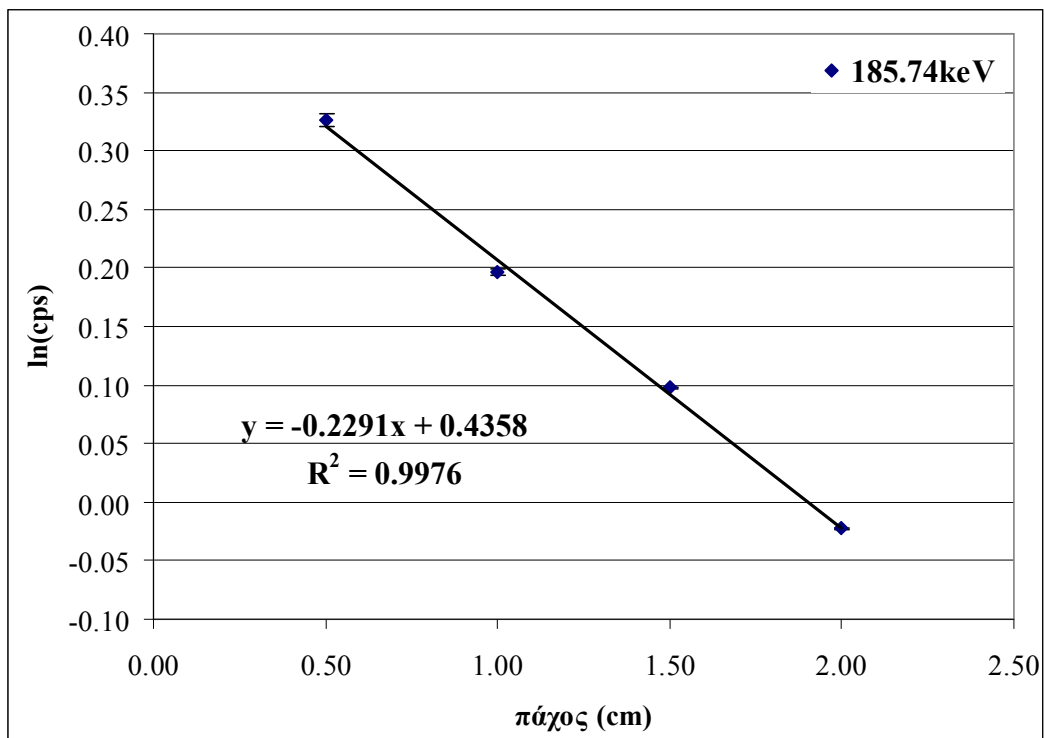
Οι μετρήσεις έγιναν με σημειακή πηγή ^{226}Ra και επιφανειακές πηγές ουρανίου, σε γεωμετρία «9», για πάχη απορροφητή 5, 10, 15 και 20mm, στον ανιχνευτή «6». Ακολουθώντας την μεθοδολογία υπολογισμού που αναφέρεται στην παράγραφο 3.2 προέκυψαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα για τον υπολογισμό του μ που παρουσιάζονται στα σχήματα 3.68, 3.69, 3.70 και 3.71.



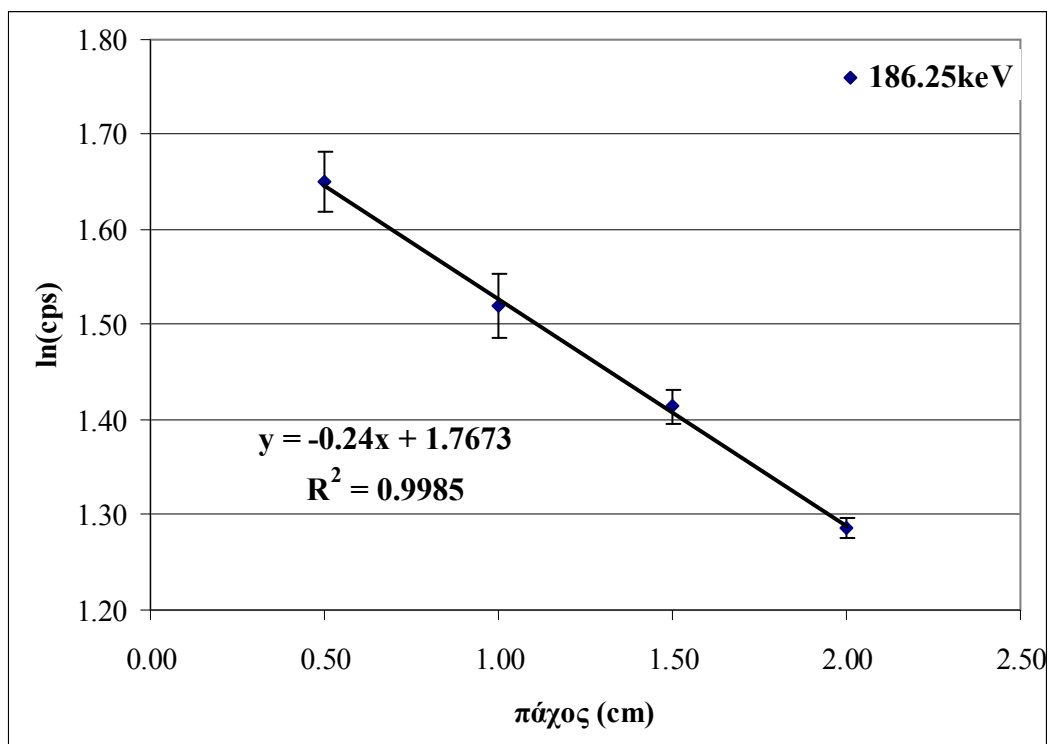
Σχήμα 3.69: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV και απορροφητή K_2SO_4 .



Σχήμα 3.70: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 63.29keV και απορροφητή K_2SO_4 .



Σχήμα 3.71: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 185.74keV και απορροφητή K_2SO_4 .



Σχήμα 3.72: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV και απορροφητή K_2SO_4 .

Από τα παραπάνω διαγράμματα εκτιμήθηκε ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης. Συγκεντρωτικά, τα αποτελέσματα για τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης, για υλικό απορροφητή K_2SO_4 εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα:

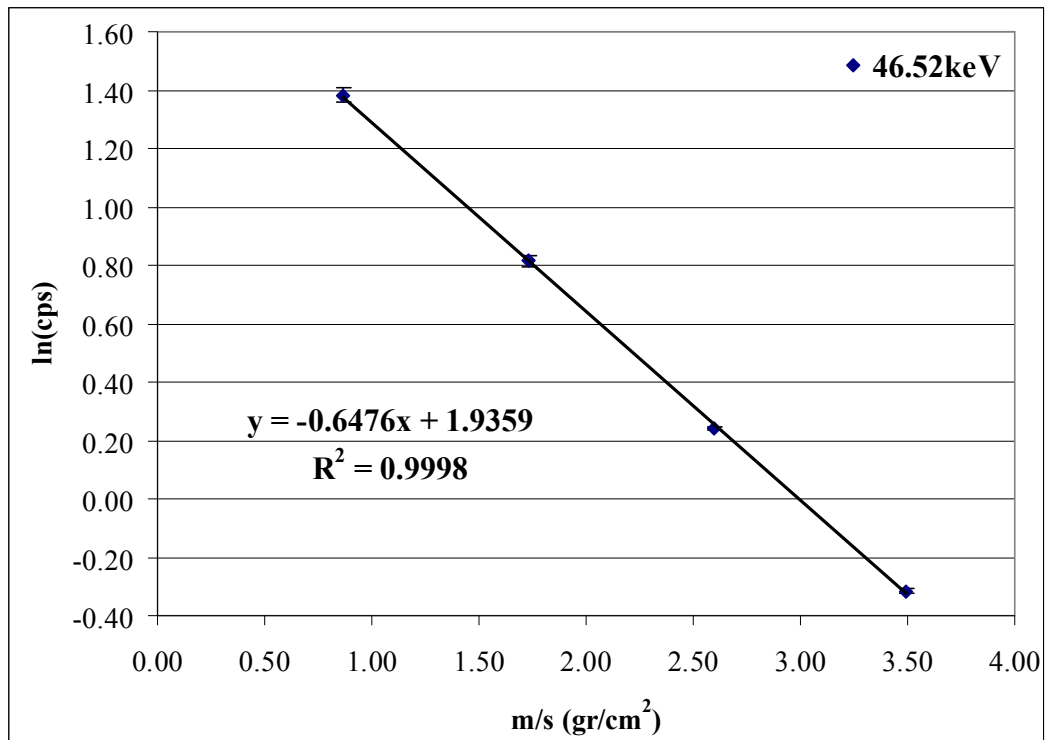
Ενέργεια φωτονίων	Πηγή	μ NIST (cm^{-1})	μ πειράματος (cm^{-1})	Απόκλιση ως προς NIST (%)
46.52keV	Ra(point)	1.218	1.1339 \pm 0.0047	-6.90
63.29keV	U(foils)	0.646	0.5644 \pm 0.0282	-12.63
185.74keV	U (foils)	0.2370	0.2291 \pm 0.0080	-3.33
186.25keV	Ra(point)	0.2370	0.2400 \pm 0.0066	1.27

Πίνακας 3. 24: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων για το μ με απορροφητή K_2SO_4

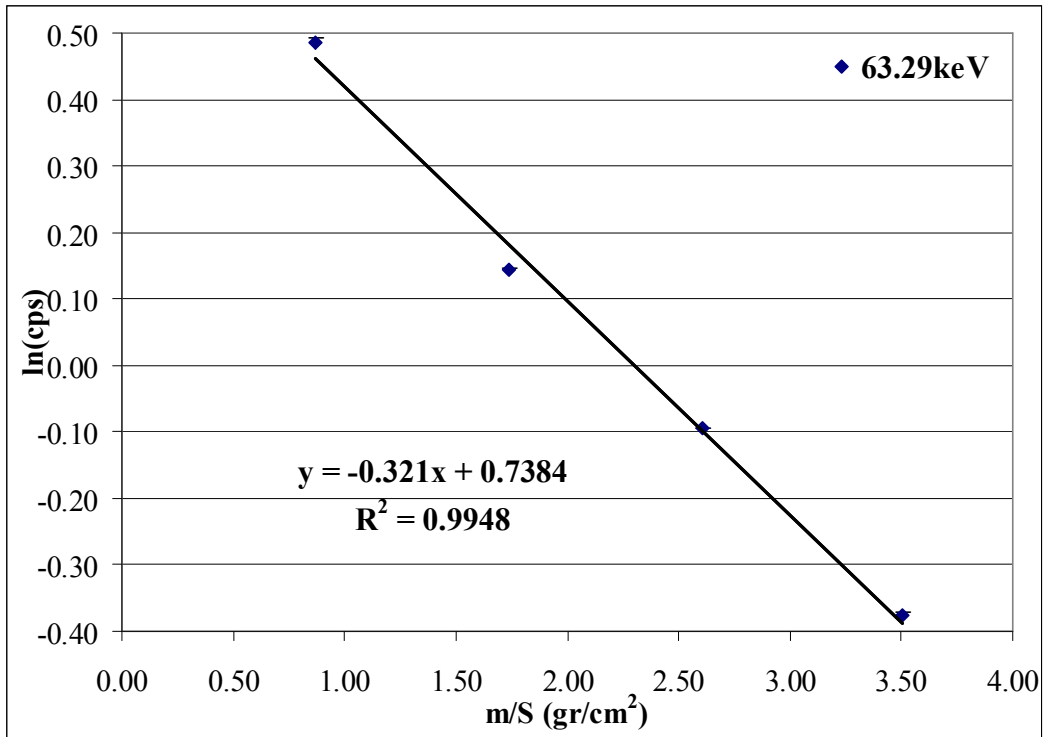
Από τον πίνακα 3.24 προκύπτει ότι οι αποκλίσεις για τις ενέργειες 46.52keV, 185.74keV και 186.25keV είναι σε αποδεκτά επίπεδα. Για τα 63.29keV η απόκλιση

είναι οριακά αποδεκτή. Συμπερασματικά, σε υλικό πυκνότητας σχεδόν διπλάσιας του νερού, η γεωμετρία που υιοθετήθηκε δίνει αποδεκτά αποτελέσματα.

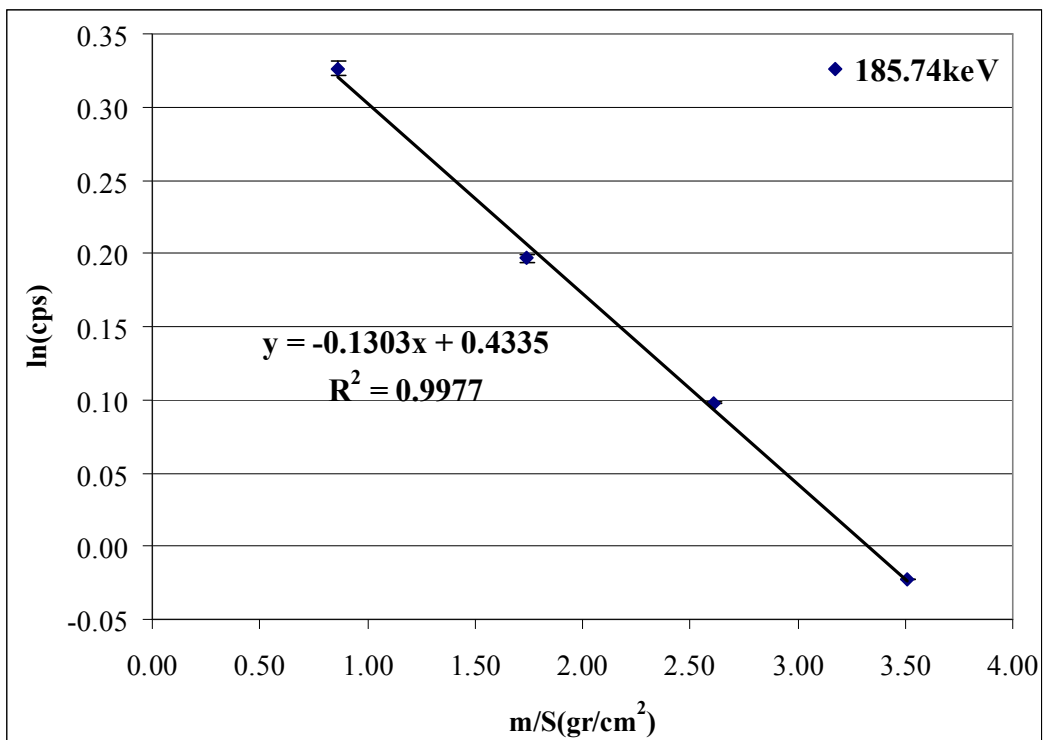
Ακολουθώντας την παραλλαγή της μεθόδου υπολογισμού που αναφέρεται στην παράγραφο 3.2 κατασκευάστηκαν και τα διαγράμματα για τον υπολογισμό του μ_m , τα οποία παρουσιάζονται στα σχήματα 3.72, 3.73, 3.74 και 3.75.



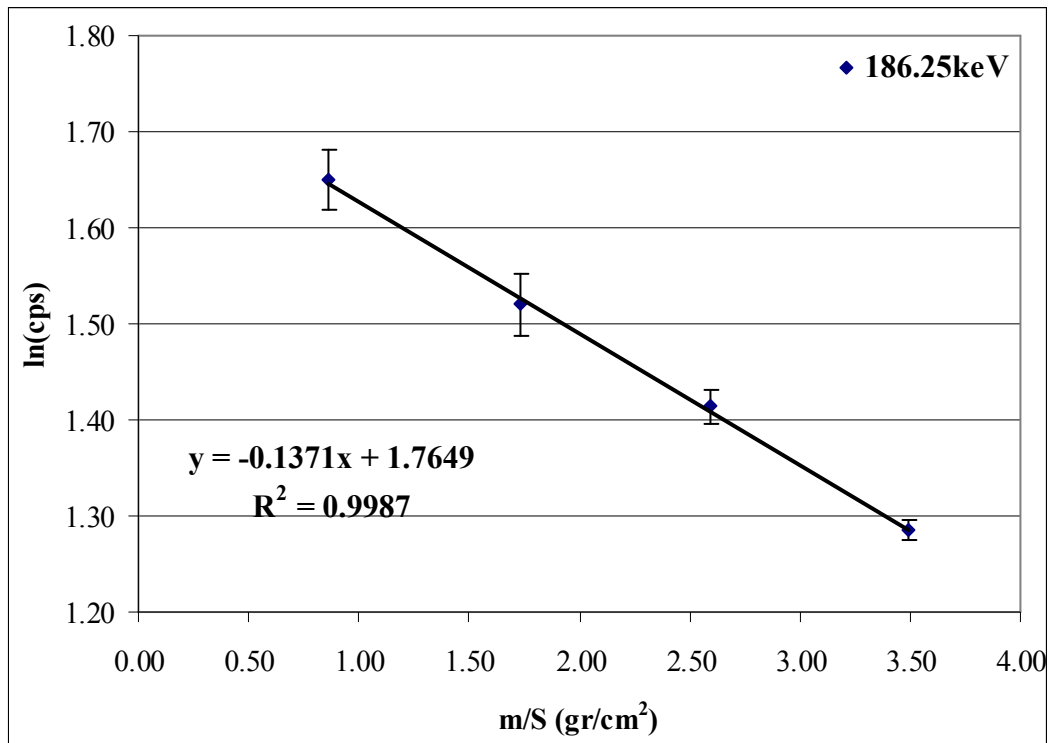
Σχήμα 3.73: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV και απορροφητή K_2SO_4 .



Σχήμα 3.74: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 63.29keV και απορροφητή K_2SO_4 .



Σχήμα 3.75: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 185.74keV και απορροφητή K_2SO_4 .



Σχήμα 3.76: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV και απορροφητή K_2SO_4 .

Από τα προηγούμενα διαγράμματα εκτιμήθηκε ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης. Συγκεντρωτικά, τα αποτελέσματα για τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένισης για απορροφητή K_2SO_4 εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Ενέργεια φωτονίων	Πηγή	μ/ρ NIST (cm ² /g)	μ/ρ πειράματος (cm ² /g)	Απόκλιση ως προς μ/ρ NIST (%)
46.52keV	Ra(point)	0.6753	0.6476±0.006	-4.10%
63.29keV	U(foils)	0.3629	0.3210±0.0167	-11.55%
185.74keV	U (foils)	0.1331	0.1303±0.0046	-2.10%
186.25keV	Ra(point)	0.1333	0.1371±0.004	2.85%

Πίνακας 3. 25: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων για το μ/ρ με απορροφητή K_2SO_4 .

Από τον πίνακα 3.25 προκύπτει ότι οι αποκλίσεις για τις ενέργειες 46.52keV, 185.74keV και 186.25keV είναι σε αποδεκτά επίπεδα. Για τα 63.29keV η απόκλιση είναι οριακά αποδεκτή. Ακόμη παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις του ολικού μαζικού

συντελεστή εξασθένησης είναι μικρότερες από αντίστοιχες αποκλίσεις του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης. Συμπερασματικά, σε υλικό πυκνότητας σχεδόν διπλάσιας του νερού πυκνότητα K_2SO_4 : 1.778gr/cm^3), η γεωμετρία που υιοθετήθηκε δίνει αποδεκτά αποτελέσματα.

3.1.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

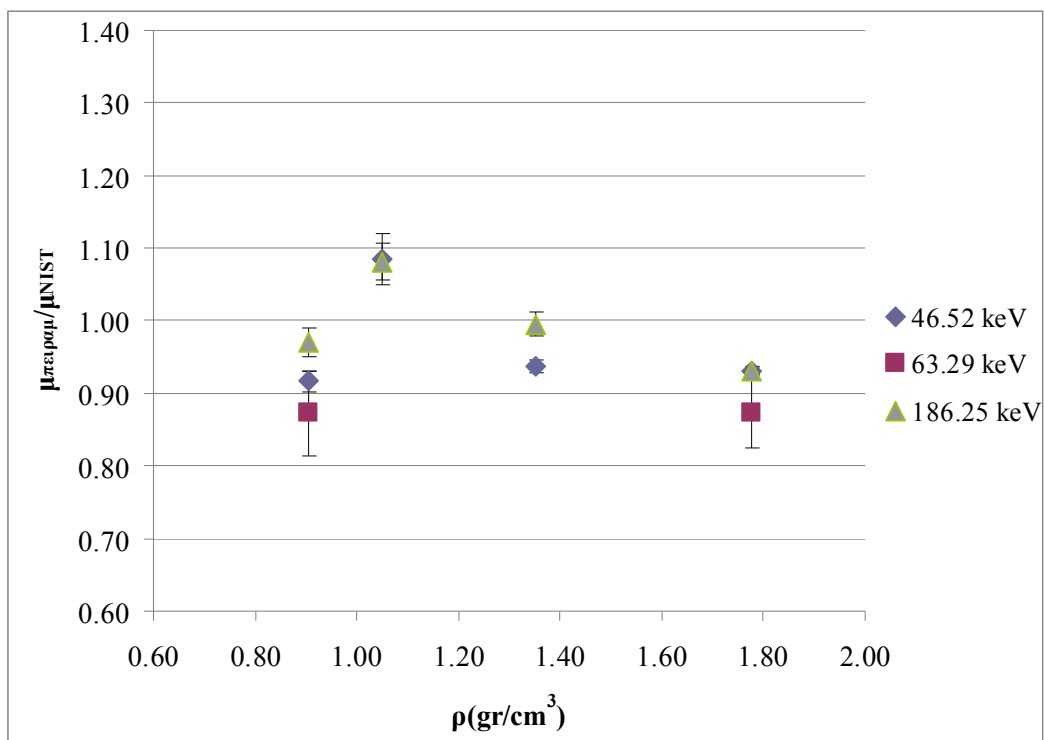
Στην παράγραφο αυτή γίνεται σύνοψη των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις μετρήσεις που έγιναν με χρήση της γεωμετρίας δέσμης φωτονίων «9» για διάφορα υλικά.

- Οξείδιο του τιτανίου (TiO_2). Το συγκεκριμένο οξείδιο έχει πυκνότητα 0.904gr/cm^3 . Τα αποτελέσματα για τα 46.52keV έδειξαν ότι η απόκλιση του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης είναι αποδεκτή (-8.36%) άρα η συγκεκριμένη γεωμετρία επιβεβαιώνεται για την ενέργεια των 46.52keV . Η απόκλιση του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένησης υπολογίστηκε μικρότερη από αυτήν του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης (7.34%) επίσης αποδεκτή. Για τα 63.29keV η απόκλιση ήταν -12.75% , για το γραμμικό συντελεστή εξασθένησης και λίγο μικρότερη (-11.80%) για τον μαζικό συντελεστή εξασθένησης. Οι αποκλίσεις αυτές χρειάζονται περαιτέρω διερεύνηση για την εύρεση καλύτερης γεωμετρίας για την συγκεκριμένη ενέργεια.
- Ένυδρο θεικό μαγνήσιο ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$). Το συγκεκριμένο άλας έχει πυκνότητα 1.05gr/cm^3 . Τα αποτελέσματα για τα 46.52keV έδειξαν ότι οι αποκλίσεις και για τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένησης και για τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένησης είναι σε αποδεκτά όρια (8.47% και -1.70% , αντίστοιχα). Και στο συγκεκριμένο υλικό παρατηρούνται διαφορές ανάμεσα στις αποκλίσεις των δύο συντελεστών αλλά στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι πολύ έντονες πράγμα που ίσως χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Για την ενέργεια των 63.29keV δεν έγιναν μετρήσεις.
- Μείγμα ένυδρου θεικού μαγνησίου – θεικού καλίου ($MgSO_4 \cdot 7H_2O - K_2SO_4$). Το συγκεκριμένο μείγμα έχει πυκνότητα 1.353gr/cm^3 . Τα αποτελέσματα για τα 46.52keV έδειξαν ότι οι αποκλίσεις και για τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένησης και για τον ολικό μαζικό εξασθένησης είναι

αποδεκτές (-6.37% και -5.32%, αντίστοιχα), άρα και για το συγκεκριμένο υλικό η γεωμετρία που υιοθετήθηκε είναι αποδεκτή. Για την ενέργεια των 63.29keV δεν έγιναν μετρήσεις.

- Θειικό κάλιο (K_2SO_4). Το συγκεκριμένο άλας έχει πυκνότητα 1.778gr/cm^3 . Τα αποτελέσματα για τα 46.52keV έδειξαν ότι οι αποκλίσεις και για τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης και για τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένισης είναι σε αποδεκτά όρια (6.90% και 4.10%, αντίστοιχα). Και στο συγκεκριμένο υλικό παρατηρούνται μικρές διαφορές ανάμεσα στις αποκλίσεις των δύο συντελεστών. Για τα 63.29keV παρατηρείται, όπως και για το οξείδιο του τιτανίου (TiO_2) ότι οι αποκλίσεις και του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης αλλά και του ολικού μαζικού εξασθένισης είναι υψηλές (12.63% και 11.55%, αντίστοιχα).

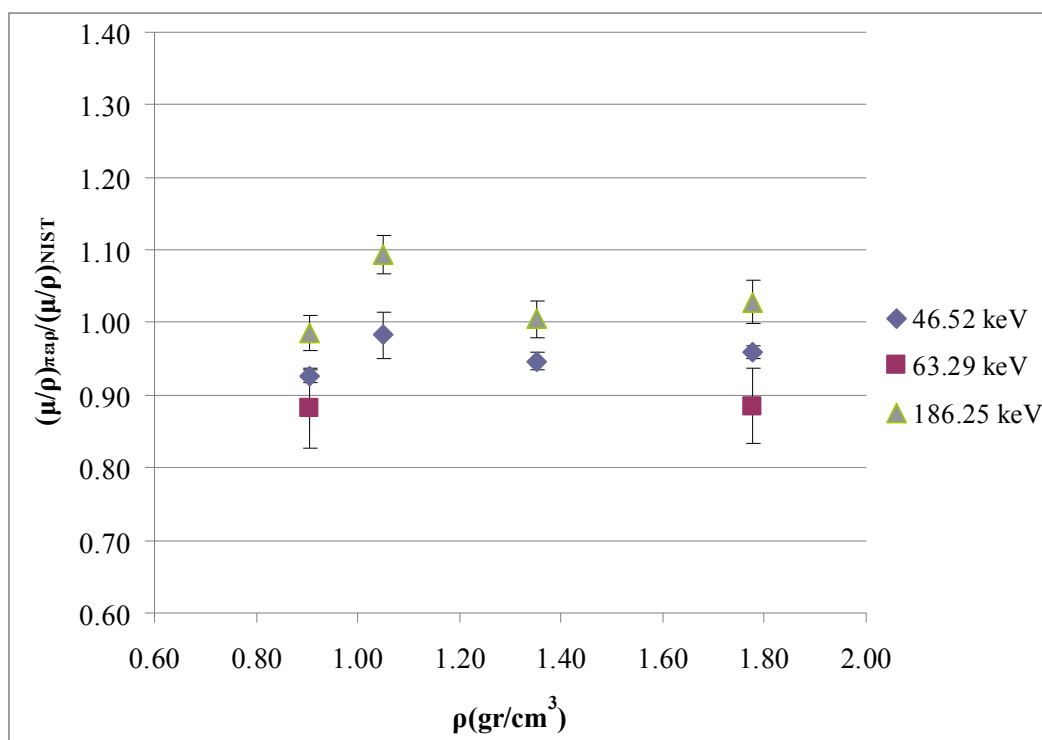
Ακολούθησε σύγκριση των θεωρητικών τιμών και των αντίστοιχων πειραματικών τιμών του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης για τα διάφορα υλικά που εξετάστηκαν, υπολογίζοντας το λόγο της πειραματικής τιμής προς την τιμή αναφοράς της βιβλιογραφίας (NIST). Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 3.77.



Σχήμα 3.77: Σύγκριση του λόγου $\mu_{\text{πειραματικό}}/\mu_{\text{NIST}}$ σε σχέση με την πυκνότητα για διάφορες ενέργειες .

Από το διάγραμμα του σχήματος 3.77 διαπιστώνεται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η μέθοδος πειραματικού προσδιορισμού του συντελεστή μ υποεκτιμά τον συντελεστή εξασθένισης. Ειδικότερα για την ενέργεια των 46 keV η τιμή του συντελεστή μ υποεκτιμάται σε κάθε περίπτωση. Η υποεκτίμηση αυτή κυμαίνεται από 2 έως 8%, με την τιμή του λόγου να είναι πλησιέστερη στη μονάδα για πυκνότητα υλικού λίγο μεγαλύτερη της μονάδας.

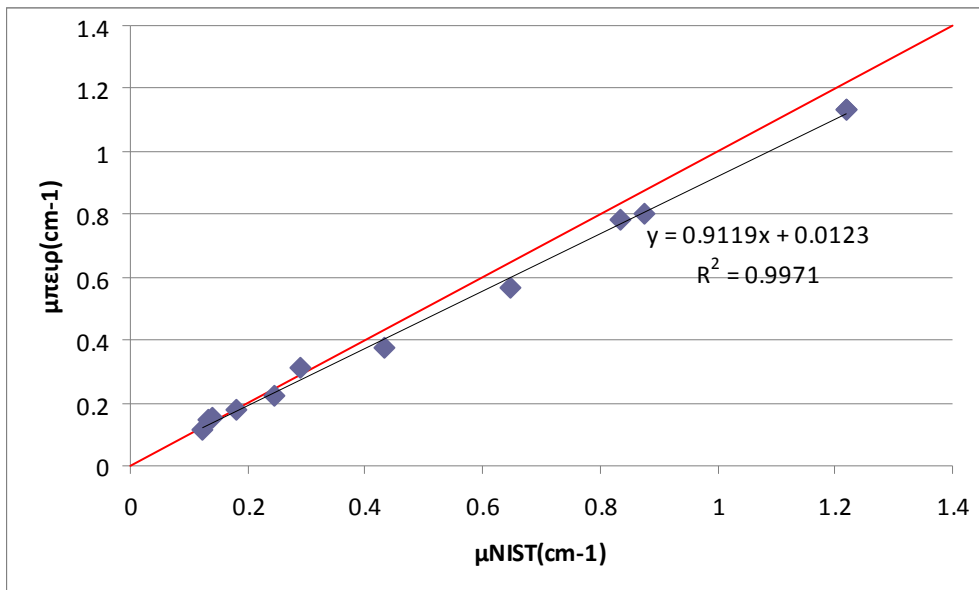
Στο σχήμα 3.78 φαίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα για τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένισης.



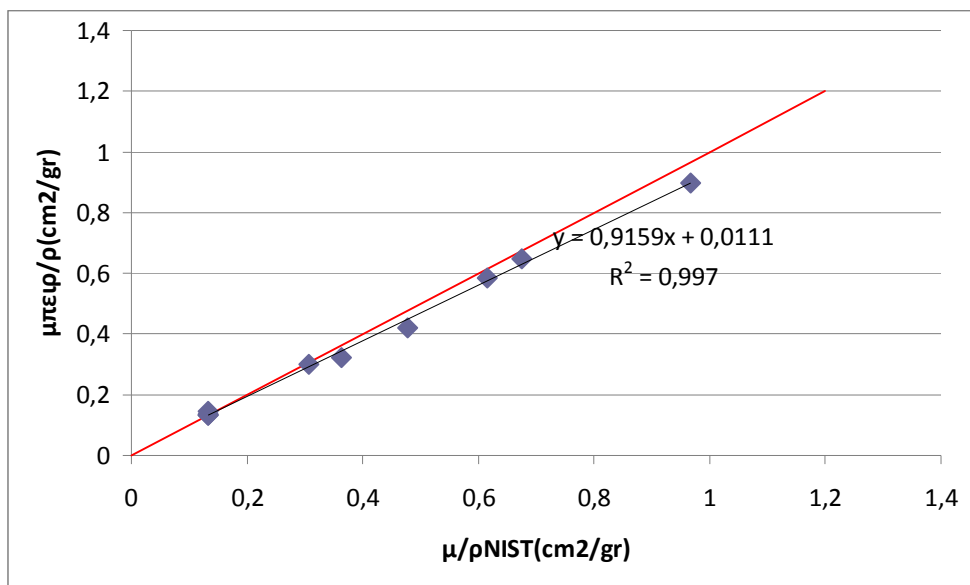
Σχήμα 3.78: Σύγκριση του λόγου $(\mu/\rho)_{\text{πειραματικό}}/(\mu/\rho)_{\text{NIST}}$ σε σχέση με την πυκνότητα για διάφορες ενέργειες.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το διάγραμμα του σχήματος 3.78 για τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένισης μ_m είναι παρόμοια.

Στα σχήματα 3.79 και 3.80 παρουσιάζονται συσχετίσεις του πειραματικού και του θεωρητικού συντελεστή εξασθένισης για τις ενέργειες των 46.52keV και των 186.25keV.



Σχήμα 3.79: Συσχέτιση του $\mu_{πειραματικό}$ με το μ_{NIST} για τα $46.52keV$ και για τα $186.25keV$.



Σχήμα 3.80: Συσχέτιση του $\mu/\rho_{πειραματικό}$ με το μ/ρ_{NIST} για τα $46.52keV$ και για τα $186.25keV$.

Για τα διαγράμματα των σχημάτων 3.79 και 3.80 και προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσον προκύπτει συσχέτιση μεταξύ του μ και του μ/ρ που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία με τις αντίστοιχες θεωρητικές τιμές (NIST) ακολούθησε κατάλληλο στατιστικό τεστ (t-test). Στόχος του τεστ ήταν να ελεγχθεί το κατά πόσον [113]

η κλίση της ευθείας αναδρομής διαφέρει στατιστικά σημαντικά από τη μονάδα και το κατά πόσον ο σταθερός όρος της αναδρομής διαφέρει στατιστικά από το μηδέν. Η διαδικασία του t-test περιγράφεται αναλυτικά στο παράρτημα Γ.

	Συντελεστής διεύθυνσης ευθείας a_1	Τιμή σύγκρισης a_{10}	t_0	Τιμή t σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%	Τιμή t σε επίπεδο εμπιστοσύνης 99%
Διάγραμμα 3.78	0.9119	1	5.454	2.447	3.707
Διάγραμμα 3.79	0.9159	1	6.623	2.447	3.707

Πίνακας 3.26: Δεδομένα για την διεξαγωγή του t-τεστ για τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης για τον συντελεστή διεύθυνσης της ευθείας αναδρομής

	Διάστημα εμπιστοσύνης άνω άκρο (95%)	Διάστημα εμπιστοσύνης κάτω άκρο (95%)	Διάστημα εμπιστοσύνης άνω άκρο (99%)	Διάστημα εμπιστοσύνης κάτω άκρο (99%)
Διάγραμμα 3.78	0.9514	0.8724	0.9718	0.8520
Διάγραμμα 3.79	0.9470	0.8848	0.9630	0.8688

Πίνακας 3. 27 Διαστήματα εμπιστοσύνης για τον υπολογισμό της κλίσης της ευθείας αναγωγής για τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης

	Σταθερός όρος ευθείας a_0	Τιμή σύγκρισης a_{00}	t_0	Τιμή t σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%	Τιμή t σε επίπεδο εμπιστοσύνης 99%
Διάγραμμα 3.78	0.0123	0	1.185	2.447	3.707
Διάγραμμα 3.79	0.0111	0	1.883	2.447	3.707

Πίνακας 3. 28: Δεδομένα για τη διεξαγωγή του t-τεστ για τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένισης για τον σταθερό όρο της ευθείας αναδρομής

	Διάστημα εμπιστοσύνης άνω άκρο (95%)	Διάστημα εμπιστοσύνης κάτω άκρο (95%)	Διάστημα εμπιστοσύνης άνω άκρο (99%)	Διάστημα εμπιστοσύνης κάτω άκρο (99%)
Διάγραμμα 3.78	0.0377	-0.0131	0.0508	-0.0262
Διάγραμμα 3.79	0.0255	-0.0033	0.0330	-0.0108

Πίνακας 3. 29 Διαστήματα εμπιστοσύνης για τον υπολογισμό του σταθερού όρου της ευθείας αναγωγής για τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένισης

Από το t-test προέκυψε ότι ο σταθερός όρος της ευθείας αναδρομής μπορεί στατιστικά να θεωρηθεί μηδέν, αλλά η κλίση της ευθείας δεν μπορεί να θεωρηθεί στατιστικά ίση με τη μονάδα. Αυτό σημαίνει ότι η απόκλιση πειραματικών και θεωρητικών τιμών είναι κάτι συστηματικό και ανεξάρτητο από την πυκνότητα του υλικού του απορροφητή.

Ένα ακόμη συμπέρασμα, που προκύπτει από τα διαγράμματα είναι ότι η συγκεκριμένη μέθοδος υποεκτιμά και τους δύο συντελεστές μ και μ_m , αλλά όπως ειπώθηκε και προηγουμένως μέσα στα αποδεκτά επίπεδα που ετέθησαν (>10%).

3.2 Συμπεράσματα κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο που προηγήθηκε έγινε προσπάθεια διερεύνησης της πειραματικής μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για τον πειραματικό προσδιορισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ . Ακόμη, έγινε προσπάθεια επέκτασης της μεθοδολογίας για συγκεκριμένες ενέργειες φωτονίων, πιο συγκεκριμένα για τα 46.52keV και για τα 63.29keV. Για τα 46.52keV η μεθοδολογία, που χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα στο ΕΠΤ-ΕΜΠ έδινε πολύ μεγάλες αποκλίσεις του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης από την τιμή που δίνει το NIST. Για τα 63.36keV δεν είχαν γίνει μέχρι τώρα πειραματικός προσδιορισμός και η εκτίμηση του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης γινόταν με προσαρμογή της συγκεκριμένης ενέργειας στις πειραματικές καμπύλες των υπόλοιπων ενεργειών. Επιπλέον, έγινε προσπάθεια για τον υπολογισμό και του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένισης, γεγονός που έδινε μικρότερες αποκλίσεις.

Γενικά, από τις πειραματικές μετρήσεις προέκυψε μια γεωμετρία πειράματος, η οποία δίνει αποδεκτά αποτελέσματα – μέσα στα όρια που ετέθησαν – για υλικά

διαφόρων πυκνοτήτων για την ενέργεια των 46.52keV, αλλά γενικά υποεκτιμά τον συντελεστή εξασθένισης. Παρατηρείται ότι οι αποκλίσεις για υλικά διαφορετικά από το νερό, οι αποκλίσεις είναι αισθητά μικρότερες από αυτές του νερού. Ακόμη παρατηρείται ότι ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης μ_m εμφανίζει μικρότερες αποκλίσεις από τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης. Αυτό, πιθανώς, να οφείλεται στο ότι ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης εξαρτάται έντονα από την πυκνότητα ενώ ο μαζικός όχι. Συνδυάζοντας το προηγούμενο σχόλιο με το γεγονός ότι υπάρχει σχετική δυσκολία στον πειραματικό προσδιορισμό της πυκνότητας των διαφόρων υλικών, ενδεχομένως δίνεται μία πιθανή ερμηνεία για την αιτία της διαφοράς στις αποκλίσεις που παρουσιάζονται κατά τον προσδιορισμό των δύο συντελεστών. Τέλος, παρατηρείται ότι για τα 63.29keV, η αποκλίσεις που υπολογίστηκαν δεν επιβεβαιώνουν ότι η γεωμετρία που υιοθετήθηκε είναι και η πλέον κατάλληλη, πράγμα που προτείνεται και για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 4: Εφαρμογή της μεθοδολογίας υπολογισμού σε δείγματα χωμάτων και εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης

4.1 Εισαγωγή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ αναζητήθηκε η βέλτιστη γεωμετρία για τον προσδιορισμό του ολικού γραμμικού και του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένισης φωτονίων στην περιοχή των χαμηλών ενεργειών. Η γνώση των συγκεκριμένων συντελεστών με ικανοποιητική ακρίβεια μπορεί να οδηγήσει στον υπολογισμό του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η μεταξύ δείγματος και πηγής βαθμονόμησης. Ο υπολογισμός του συντελεστή η επιτρέπει τη διόρθωση της απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης, λόγω της διαφορετικής έντασης του φαινομένου της αυτοαπορρόφησης η οποία εμφανίζεται μεταξύ της πηγής βαθμονόμησης και του αναλυόμενου δείγματος. Ο υπολογισμός του συντελεστή αναγωγής απόδοσης με την ολοκληρωτική μέθοδο έχει περιγραφεί αναλυτικά στην παράγραφο 2.5.2.2. Υπενθυμίζεται ότι πρόκειται για μία μέθοδο η οποία οδηγεί στην εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής απόδοσης η σε περιπτώσεις κυλινδρικής γεωμετρίας πηγής ανιχνευτή, χωρίς περιορισμό ύψους και βασίζεται στη σχέση:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_p(0, d) \cdot \frac{2 \cdot d^2}{R^2 \cdot H} \cdot \int_0^R \int_0^t \frac{e^{-\mu z}}{r^2 + (x+d)^2} \cdot r \cdot dx \cdot dr \quad (4.1)$$

η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της απόδοσης μίας ανιχνευτικής διάταξης. Τα μεγέθη της παραπάνω σχέσης περιγράφονται στην παράγραφο 2.5.2 της παρούσης ΔΕ. Στην σχέση αυτή το μέγεθος $J(\mu)$ που περιγράφεται από τη σχέση:

$$J(\mu) = \int_0^R \int_0^t \frac{e^{-\mu z}}{r^2 + (x+d)^2} r \cdot dx \cdot dr \quad (4.2)$$

εξαρτάται από το υλικό της πηγής, ενώ όλες οι υπόλοιπες συνιστώσες της σχέσης (4.1) εξαρτώνται μόνο από καθαρά γεωμετρικά χαρακτηριστικά που παραμένουν τα ίδια για το δείγμα και την πηγή βαθμονόμησης.

Σύμφωνα με τον [Debertin K., 1988] ένας συντελεστής αναγωγής της απόδοσης η που να λαμβάνει υπόψη τη διαφορά της αυτοαπορρόφησης μεταξύ δείγματος και πηγής βαθμονόμησης μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση:

$$\eta = \frac{J(\mu_s)}{J(\mu_c)} \quad (4.3)$$

όπου :

μ_s : ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης για το υλικό του δείγματος,

μ_c : ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης για την πηγή βαθμονόμησης.

Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά, γίνεται εφαρμογή της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στην ΔΕ για τον υπολογισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ και του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένησης μ_m σε δείγματα χωμάτων που συλλέχθηκαν στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου του ΕΜΠ. Στη συνέχεια, εξετάστηκαν τα διαφορετικά κοκκομετρικά κλάσματα ενός δείγματος χώματος, το οποίο είχε συλλεχθεί και υποστεί επεξεργασία σε προηγούμενη ΔΕ [ΔΕ Παλαμάρα, 2008]. Αυτό έγινε προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της διαφορετικής κοκκομετρίας του ίδιου δείγματος στους συντελεστές εξασθένησης μ και μ_m . Ακόμη έγινε υπολογισμός του γραμμικού και μαζικού συντελεστή εξασθένησης με κατάλληλο πρόγραμμα H/Y το οποίο βασίζεται σε καμπύλες αναδρομής που έχουν προσδιοριστεί από το ΕΠΤ-ΕΜΠ, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2, για υλικό δείγματος χόμα και συγκρίθηκαν οι τιμές που προέκυψαν από τον κώδικα και την πειραματική διαδικασία. Ακολούθως, με γνωστές τις τιμές των συντελεστών εξασθένησης και την πυκνότητα του κάθε δείγματος έγινε υπολογισμός του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η με το πρόγραμμα factor, το οποίο παρουσιάζεται στη [ΔΕ Φωτεινάκη, 2012]. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε πειραματικός προσδιορισμός των συντελεστών εξασθένησης για υλικά άγνωστης σύστασης, και εξετάστηκε η δυνατότητα προσομοίωσής τους με κάποιο από τα υλικά για τα οποία υπάρχουν διαθέσιμες καμπύλες αναδρομής του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης.

4.2 Εφαρμογή της μεθοδολογίας ανάλυσης σε δείγματα χώματος

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε προσπάθεια βελτίωσης της γεωμετρίας που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για τον υπολογισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ και του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένησης μ_m . Στο παρόν κεφάλαιο η συγκεκριμένη μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση δείγματος χωμάτων με στόχο τον προσδιορισμό των συντελεστών εξασθένησης. Τα χώματα που χρησιμοποιήθηκαν για ανάλυση ήταν χώματα τα οποία συλλέχθηκαν από την Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου ΕΜΠ και μελετήθηκαν, αφενός μεν χωρίς καμία επεξεργασία και αφετέρου μετά από κοσκίνισμα και επιλογή του κλάσματος $>2\text{mm}$. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό των συντελεστών εξασθένησης μ και μ_m παρατίθεται αναλυτικά στην παράγραφο 3.2.

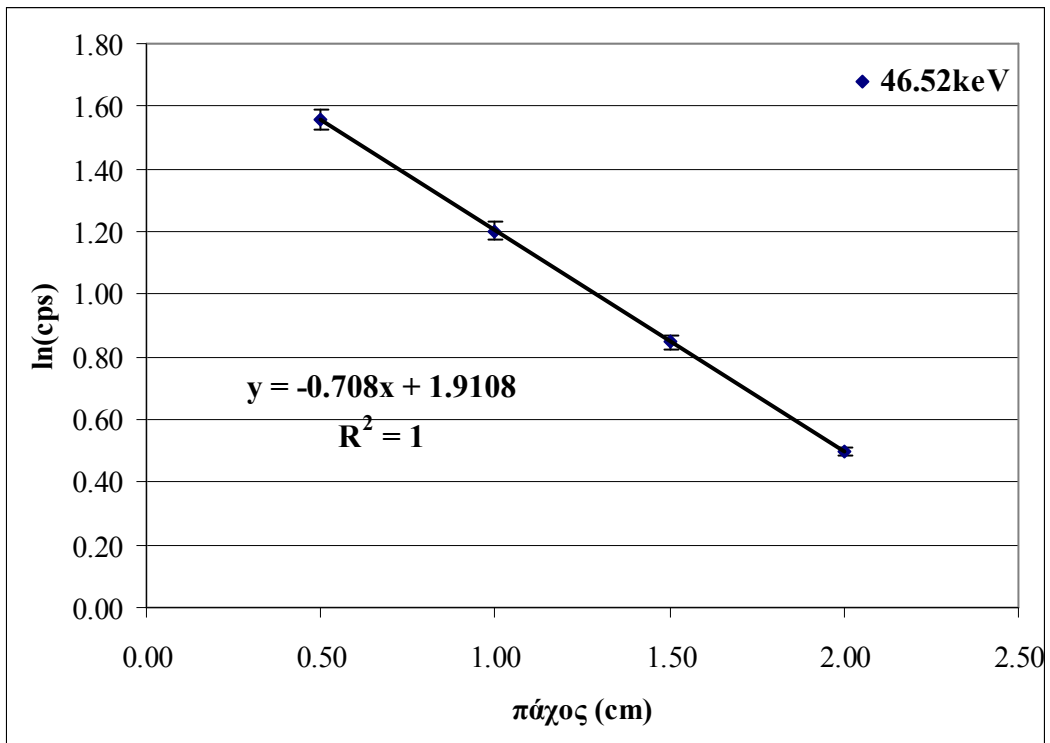
4.2.1 Πειραματικά αποτελέσματα για τους συντελεστές εξασθένησης (μ και μ/ρ)

4.2.1.1 Χώμα από τον κήπο του κτιρίου Κ' στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

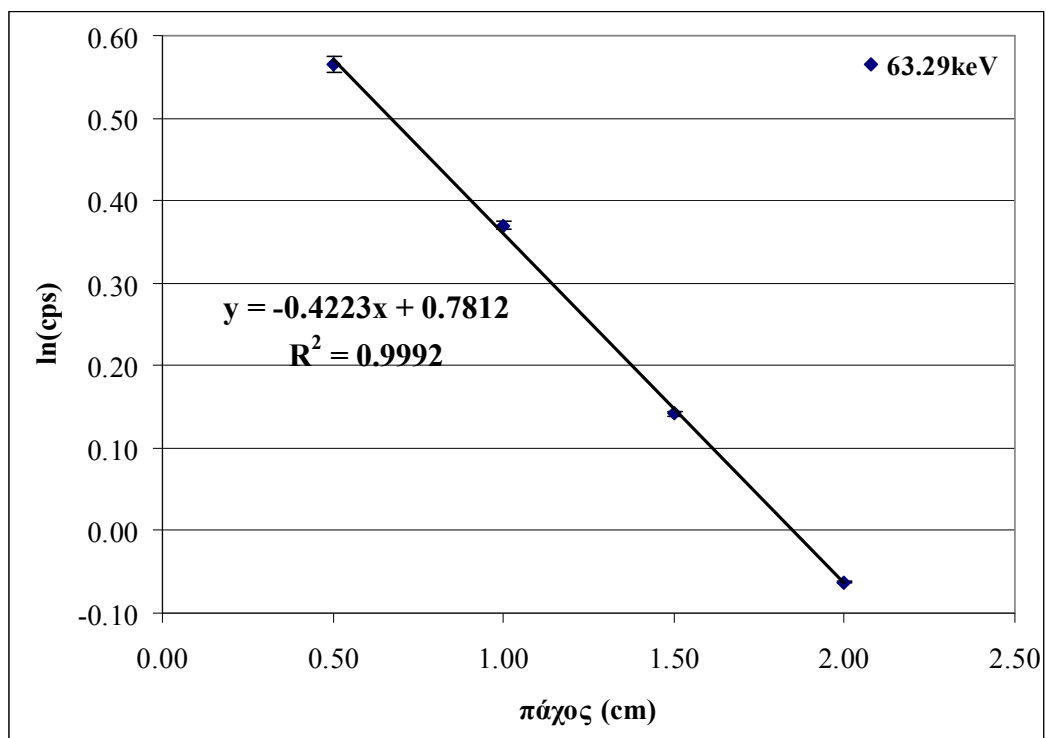
Το πρώτο δείγμα χώματος που αναλύθηκε και έχει την κωδική ονομασία MS663 συλλέχθηκε από τον κήπο μπροστά από το κτίριο Κ (ΕΠΤ-ΕΜΠ), με πυκνότητα 1.427 gr/cm^3 . Οι μετρήσεις έγιναν στον ανιχνευτή «6» με σημειακή πηγή ^{226}Ra και foils φυσικού ουρανίου για πάχη απορροφητή 5, 10, 15 και 20mm. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2, προέκυψαν τα σχετικά ημιλογαριθμικά διαγράμματα 4.1, 4.2 και 4.3 για τον προσδιορισμό του μ .

Από τα διαγράμματα 4.1, 4.2 και 4.3 προσδιορίζεται ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ , ως η κλίση της ευθείας αναδρομής. Για την ενέργεια των 46.52keV προέκυψε ότι $\mu = 0.708 \text{ cm}^{-1}$, για την ενέργεια των 63.29keV, $\mu = 0.4223 \text{ cm}^{-1}$ και για την ενέργεια των 186.25keV, $\mu = 0.2042 \text{ cm}^{-1}$.

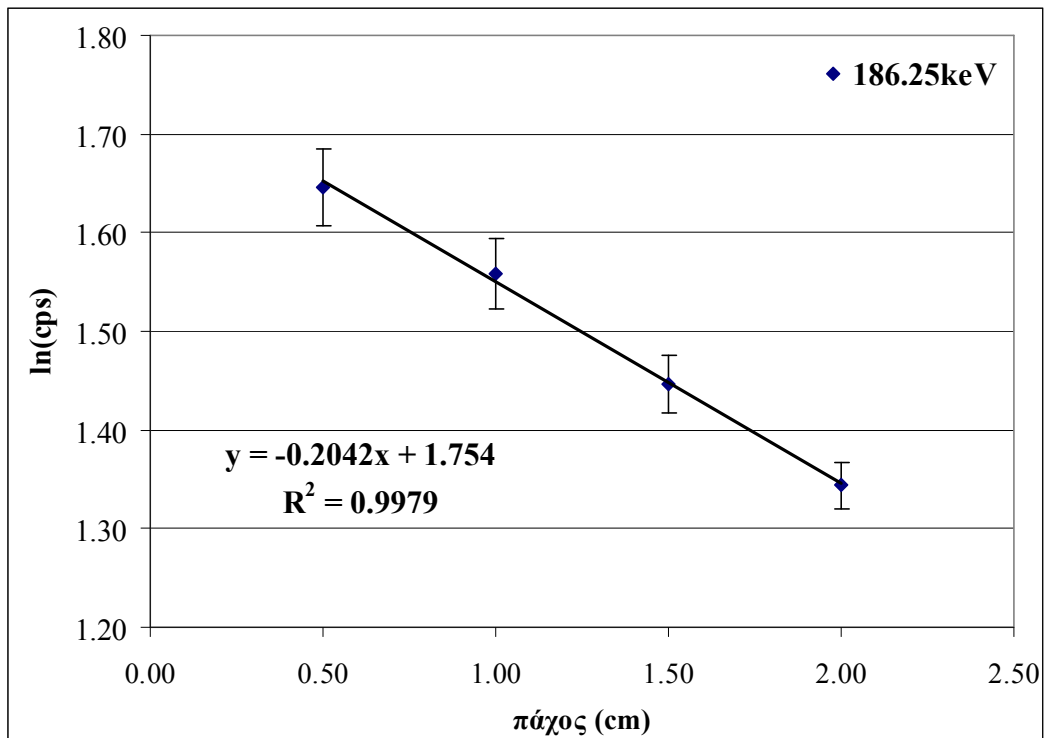
Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκαν και τα διαγράμματα 4.4, 4.5 και 4.6 για τον υπολογισμό του μ_m .



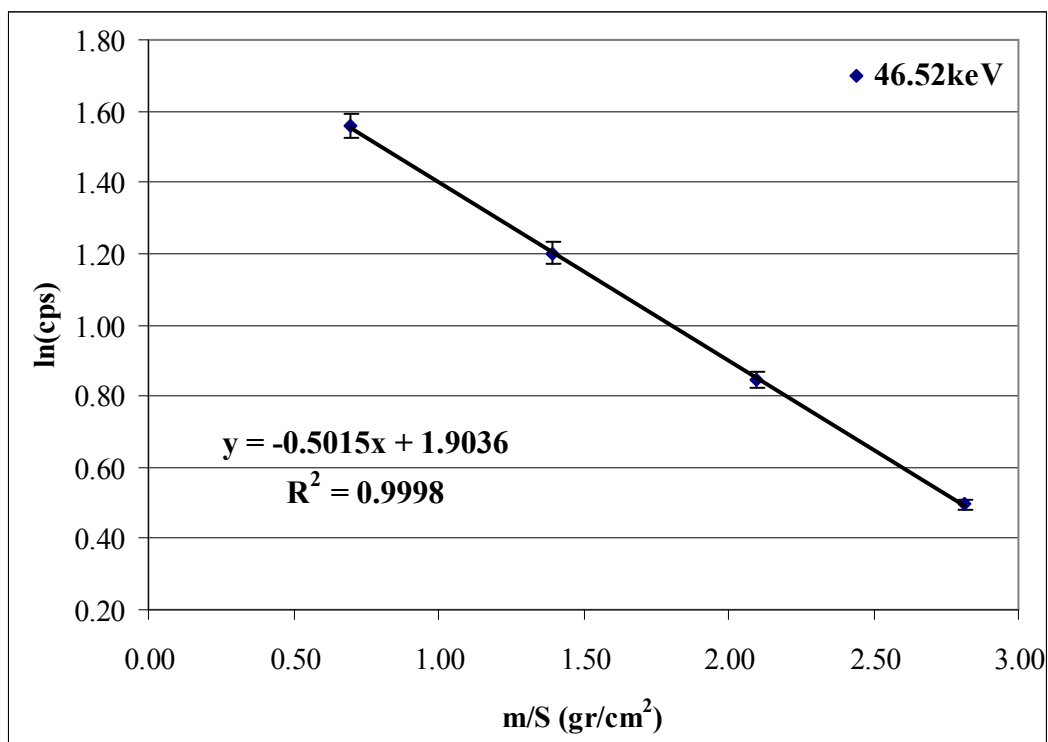
Σχήμα 4.1: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV.



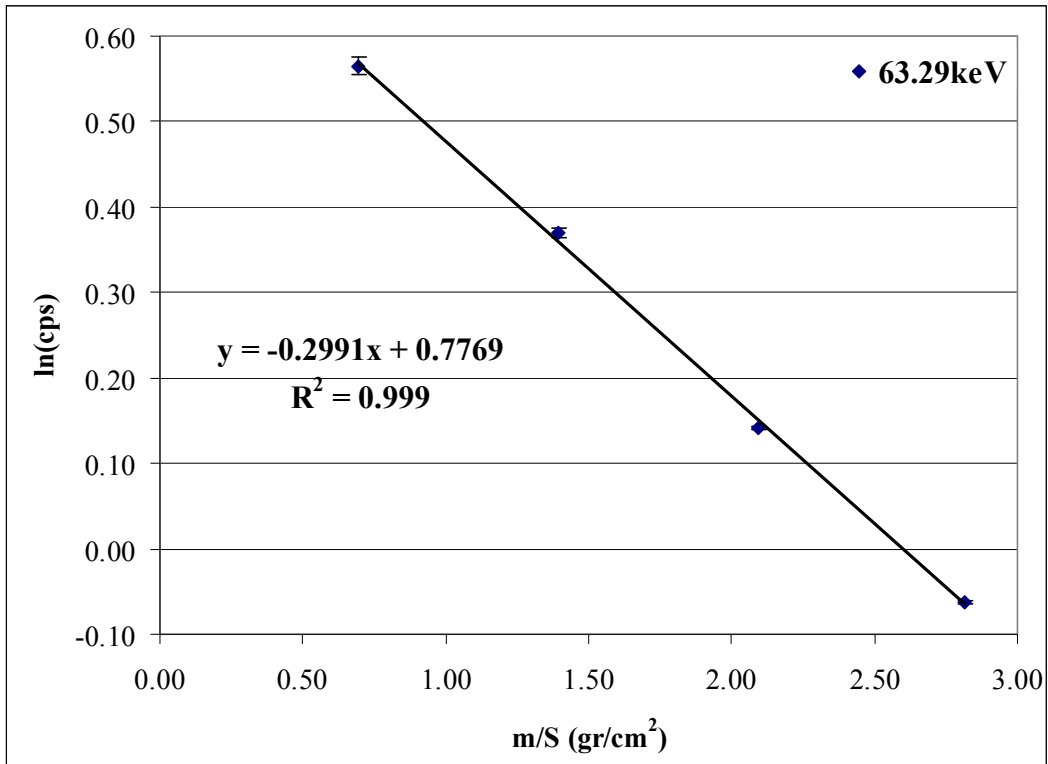
Σχήμα 4.2: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 63.29keV.



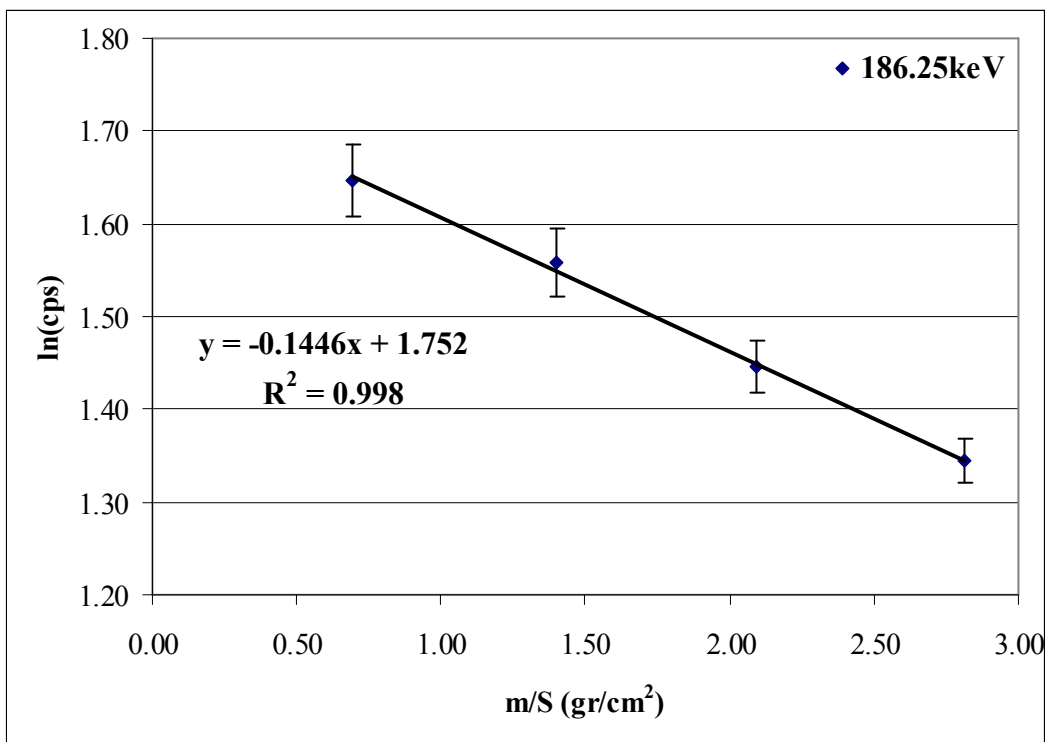
Σχήμα 4.3: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV.



Σχήμα 4.4: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV.



Σχήμα 4.5: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 63.29keV.



Σχήμα 4.6: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV.

Από τα παραπάνω διαγράμματα προσδιορίζεται ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης μ_m , ως η κλίση της ευθείας αναδρομής. Για την ενέργεια των 46.52keV προέκυψε ότι $\mu_m = 0.5015 \text{ cm}^2/\text{gr}$, για την ενέργεια των 63.29keV $\mu_m = 0.2991 \text{ cm}^2/\text{gr}$ και για την ενέργεια των 186.25keV $\mu_m = 0.1446 \text{ cm}^2/\text{gr}$.

Η χρονική διάρκεια του πειράματος και για τις τρεις ενέργειες ήταν μία ημέρα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 4.1.

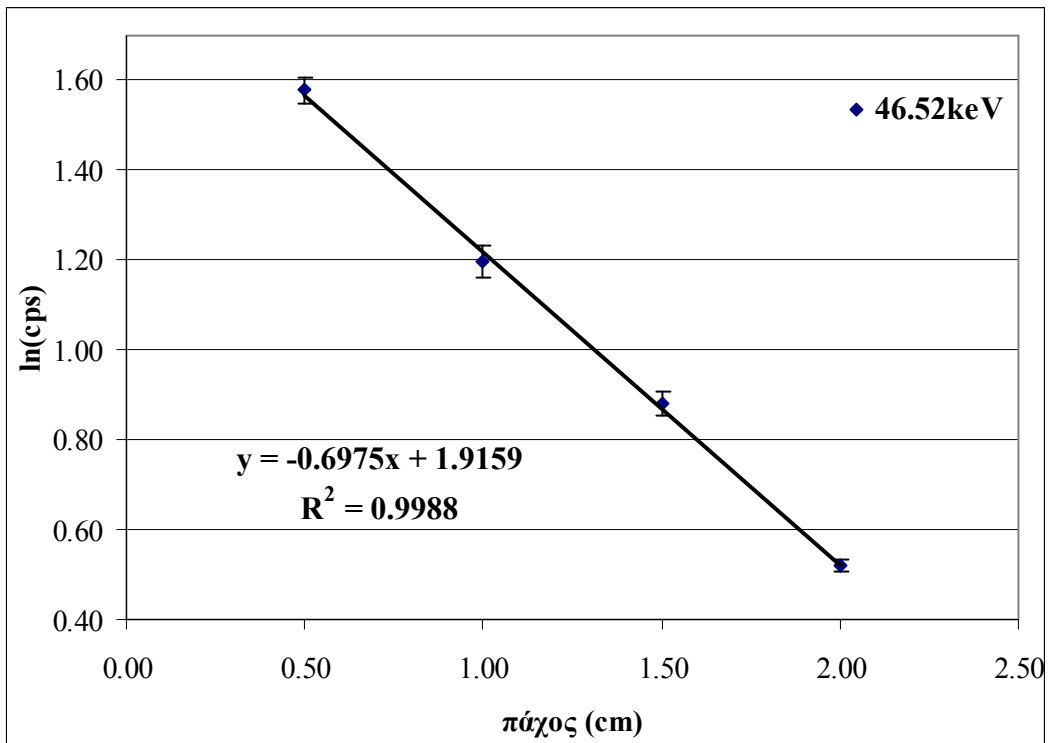
Ενέργεια Φωτονίων	Πηγή	μ πειράματος (cm^{-1})	μ/ρ πειράματος (cm^2/gr)
46.52keV	Ra(point)	0.7080 ± 0.0029	0.5015 ± 0.0046
63.29keV	U(foils)	0.4223 ± 0.0087	0.2991 ± 0.0066
186.25keV	Ra(point)	0.2042 ± 0.0066	0.1446 ± 0.0046

Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπολογισμού του μ και του μ/ρ για το χώμα από τον κήπο του κτιρίου K (MS663)

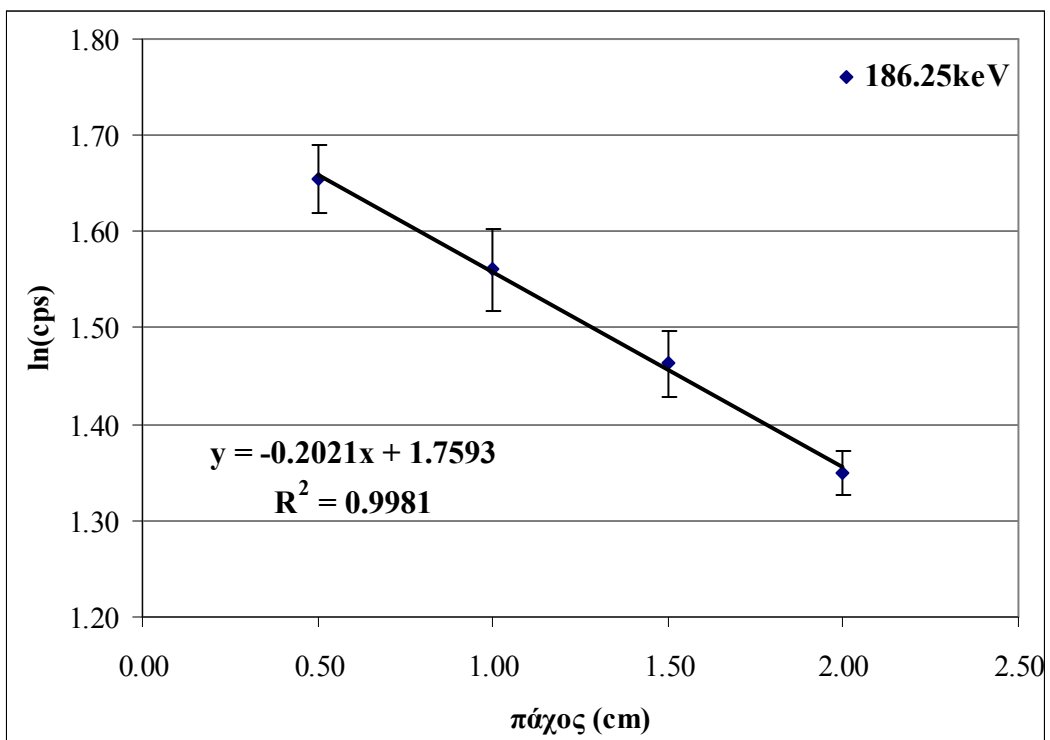
Επισημαίνεται ότι τα αποτελέσματα στον Πίνακα 4.1, όπως και σε όλους τους αντίστοιχους πίνακες που ακολουθούν, δίνονται με τέσσερα δεκαδικά ψηφία ανεξάρτητα από την αβεβαιότητα που τα συνοδεύει, γιατί οι συντελεστές αυτοί πρόκειται εν συνεχεία να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του συντελεστή διόρθωσης η (βλ 4.2.2).

4.2.1.2 Χώμα από τον κήπο του κτιρίου K στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, κλάσμα <2mm

Το δεύτερο δείγμα χώματος που αναλύθηκε είναι το κλάσμα του υλικού MS663 που αναλύθηκε στην προηγούμενη υποπαράγραφο, με μέγεθος κόκκου μικρότερο από 2mm. Το δείγμα αυτό, με κωδικό MS656, είχε πυκνότητα 1.577 gr/cm^3 . Το συγκεκριμένο μέγεθος κόκκου επιλέχθηκε διότι θεωρήθηκε ότι με κοσκίνισμα σε αυτή την κοκκομετρία απομακρύνονται όλα τα ξένα υλικά που υπάρχουν στο χώμα (π.χ. πέτρες, ρίζες κλπ). Οι μετρήσεις έγιναν με σημειακή πηγή ^{226}Ra στον ανιχνευτή «6», για πάχη απορροφητή 5, 10, 15, 20mm. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2, προέκυψαν τα διαγράμματα 4.7 και 4.8 για τον προσδιορισμό του μ .



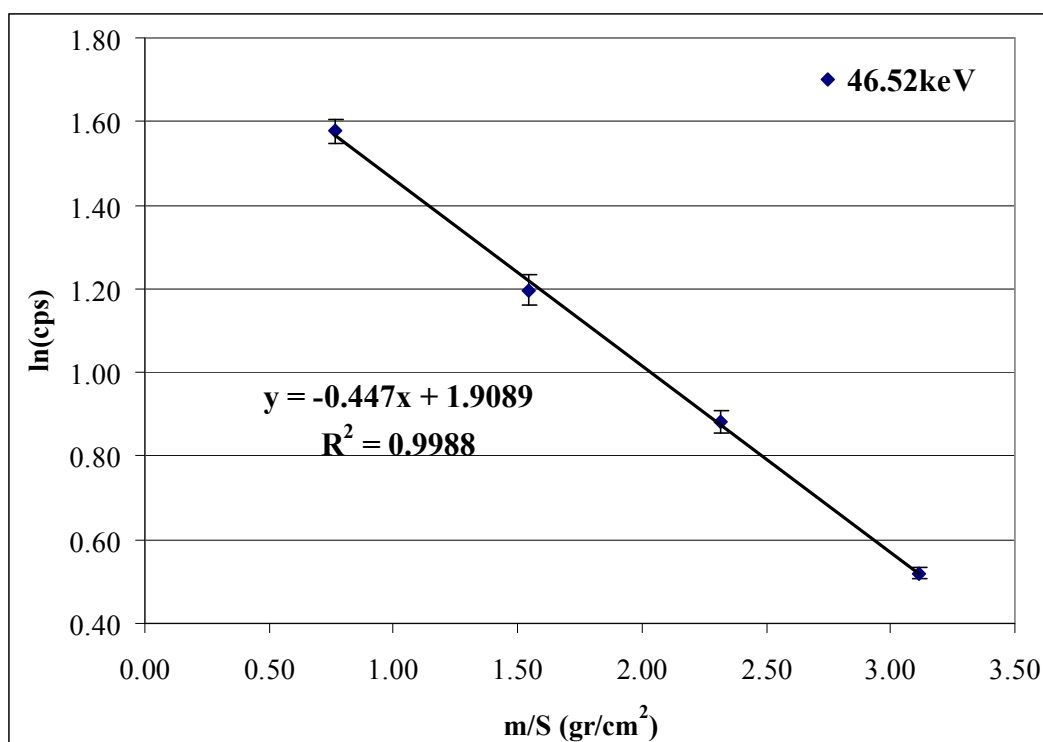
Σχήμα 4.7: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV.



Σχήμα 4.8: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV.

Από τα παραπάνω διαγράμματα προσδιορίζεται ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ , ως η κλίση της ευθείας αναδρομής. Για την ενέργεια των 46.52keV προέκυψε ότι $\mu = 0.6975\text{cm}^{-1}$ και για την ενέργεια των 186.25keV, $\mu = 0.2021\text{cm}^{-1}$.

Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκαν και τα διαγράμματα 4.9 και 4.10 για τον υπολογισμό του μ_m .

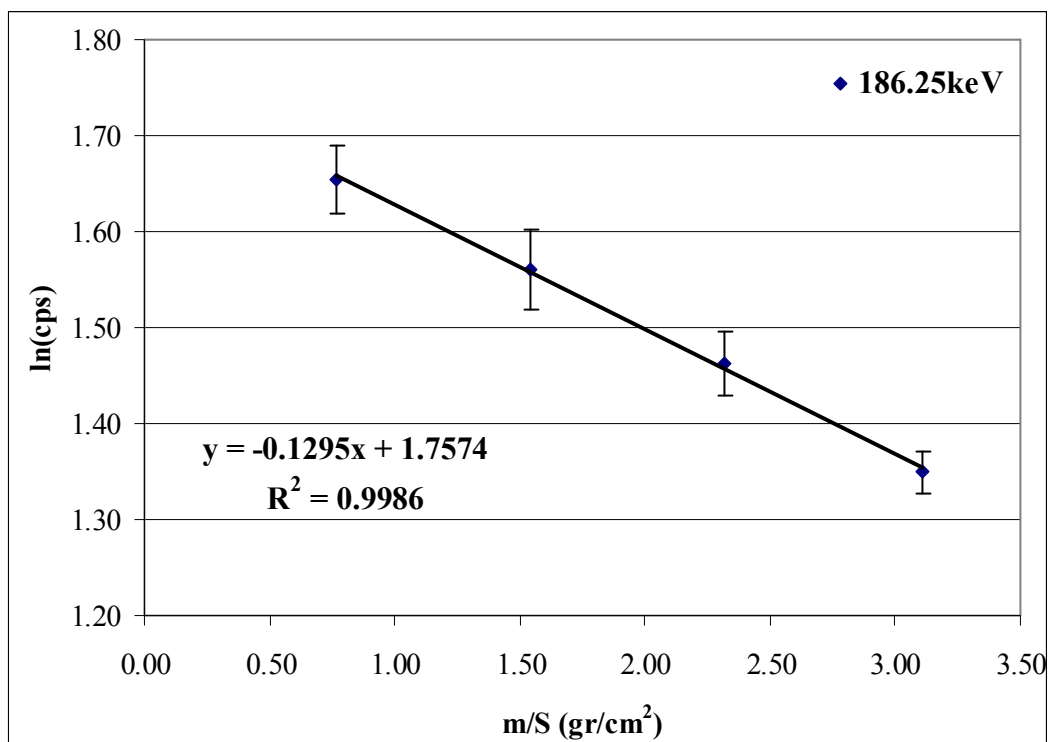


Σχήμα 4.9: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV.

Από τα διαγράμματα 4.9 και 4.10 υπολογίζεται όπως και πριν ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης. Για την ενέργεια των 46.52keV προέκυψε ότι $\mu_m = 0.447\text{cm}^2/\text{gr}$ και για την ενέργεια των 186.25keV, $\mu_m = 0.1295\text{cm}^2/\text{gr}$.

Η χρονική διάρκεια ολοκλήρωσης του πειράματος και για τις δύο ενέργειες ήταν μία ημέρα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 4.2.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από το κοκκομετρικό κλάσμα που εξετάστηκε σε αυτήν την παράγραφο, με τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το ολόκληρο χόμα στην προηγούμενη παράγραφο παρατηρείται ότι οι συντελεστές εξασθένησης δεν εμφανίζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές σε καμία περίπτωση.



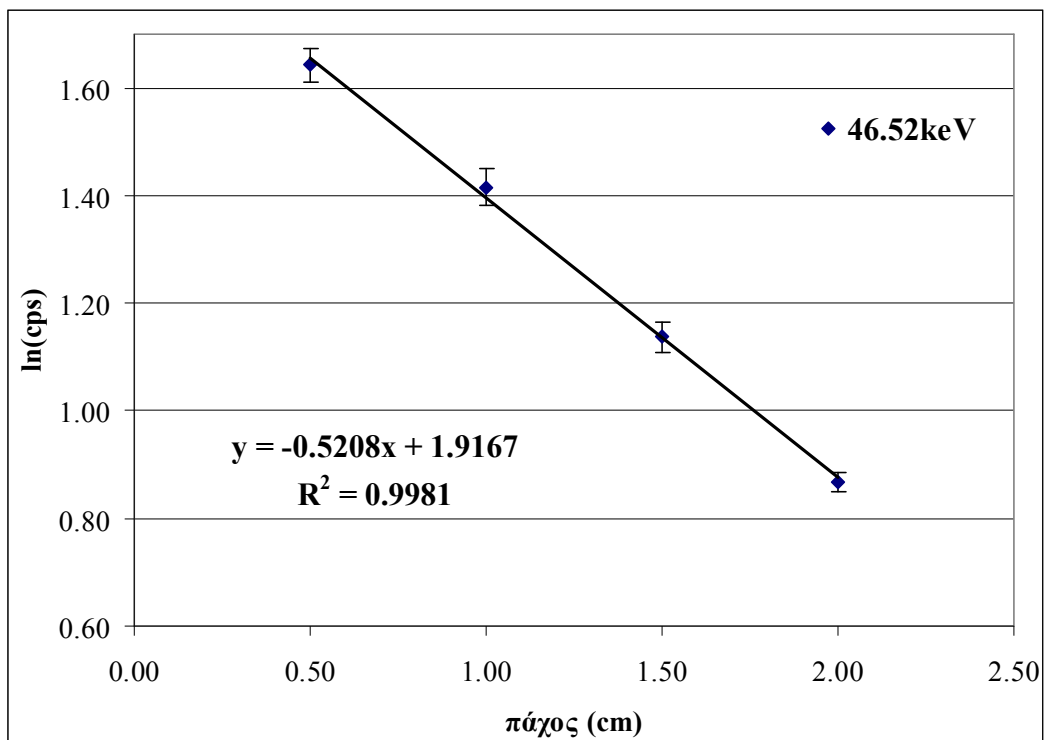
Σχήμα 4.10: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV.

Ενέργεια φωτονίων	Πηγή	μ πειράματος (cm ⁻¹)	μ/ρ πειράματος (cm ² /g)
46.52keV	Ra(point)	0.6975±0.0170	0.4470±0.0110
186.25keV	Ra(point)	0.2021±0.0063	0.1295±0.0034

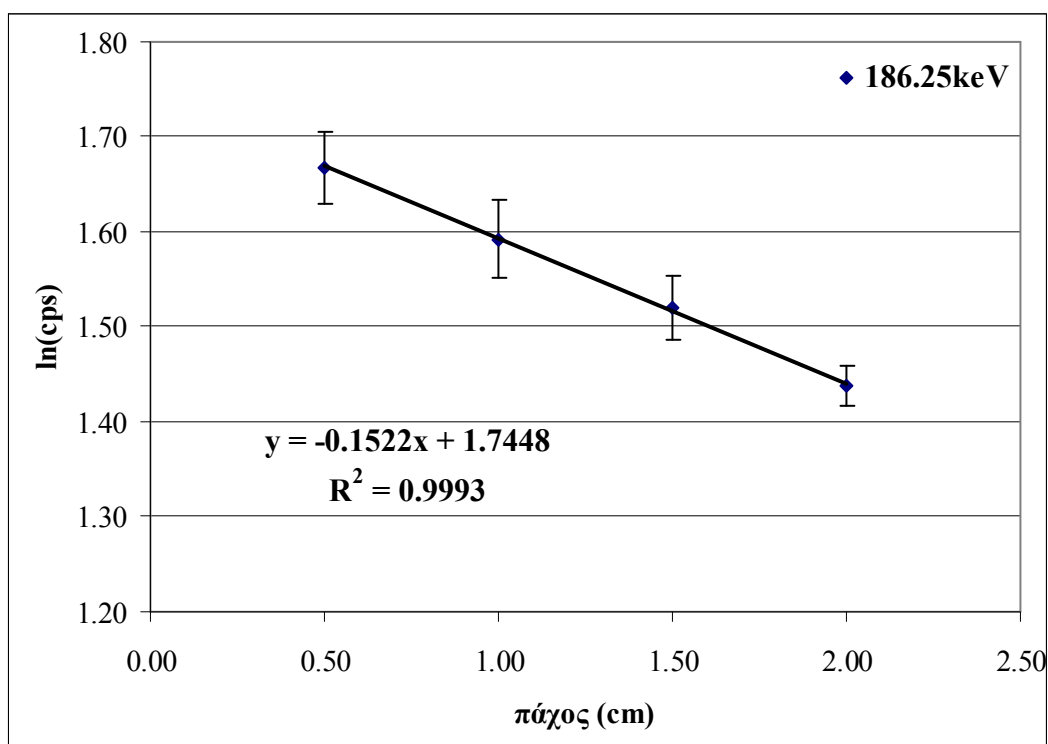
Πίνακας 4.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπολογισμού του μ και του μ/ρ για το υλικό MS656 (χώμα από τον κήπο του κτιρίου K με κοκκομετρία <2mm)

4.2.1.3 Χώμα από τον κήπο του κτιρίου ANYM στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, κλάσμα <2mm

Το τρίτο χώμα πεδίου που αναλύθηκε είναι χώμα το οποίο συλλέχθηκε από τον κήπο του κτιρίου ANYM και κοσκινίστηκε, με μέγεθος κόκκου μικρότερο από 2mm (δείγμα MS657). Η πυκνότητα του δείγματος αυτού ήταν 1.229gr/cm³. Οι μετρήσεις έγιναν με σημειακή πηγή ²²⁶Ra στον ανιχνευτή «6» για πάχη απορροφητή 5, 10, 15 και 20mm. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2, προέκυψαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα 4.11 και 4.12 για τον προσδιορισμό του μ .



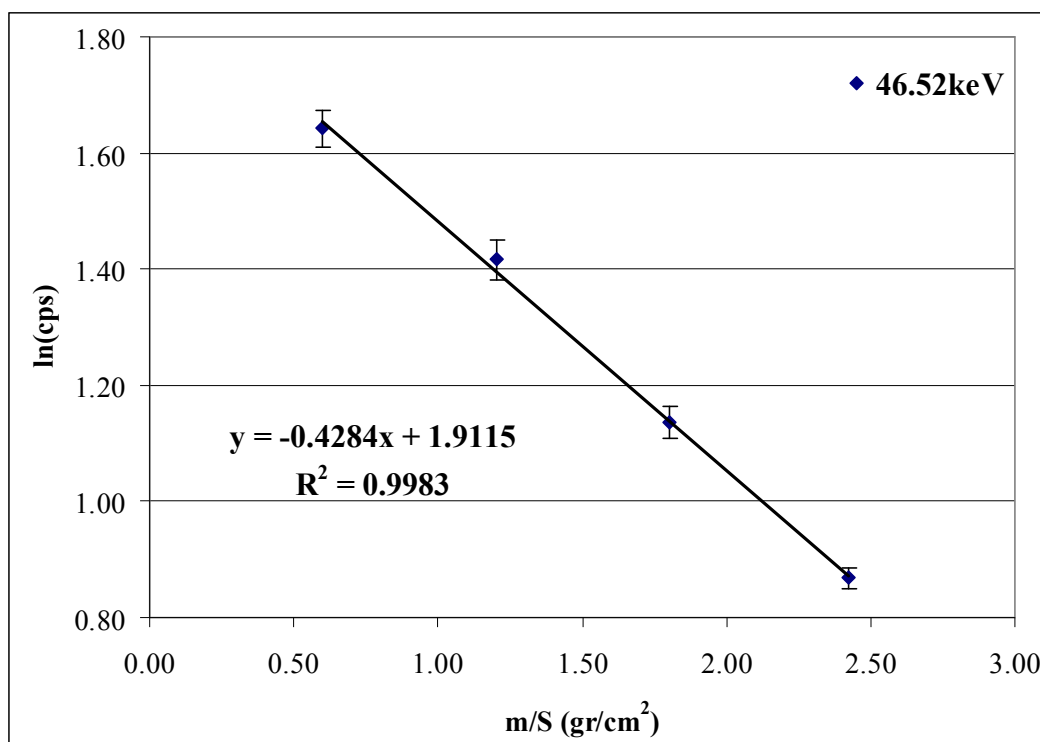
Σχήμα 4.11: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV.



Σχήμα 4.12: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV.

Από τα διαγράμματα 4.11 και 4.12 εκτιμάται ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης, ως η κλίση της ευθείας. Για την ενέργεια των 46.52keV προέκυψε ότι $\mu = 0.5208\text{cm}^{-1}$ και για την ενέργεια των 186.25keV, $\mu = 0.1522\text{cm}^{-1}$.

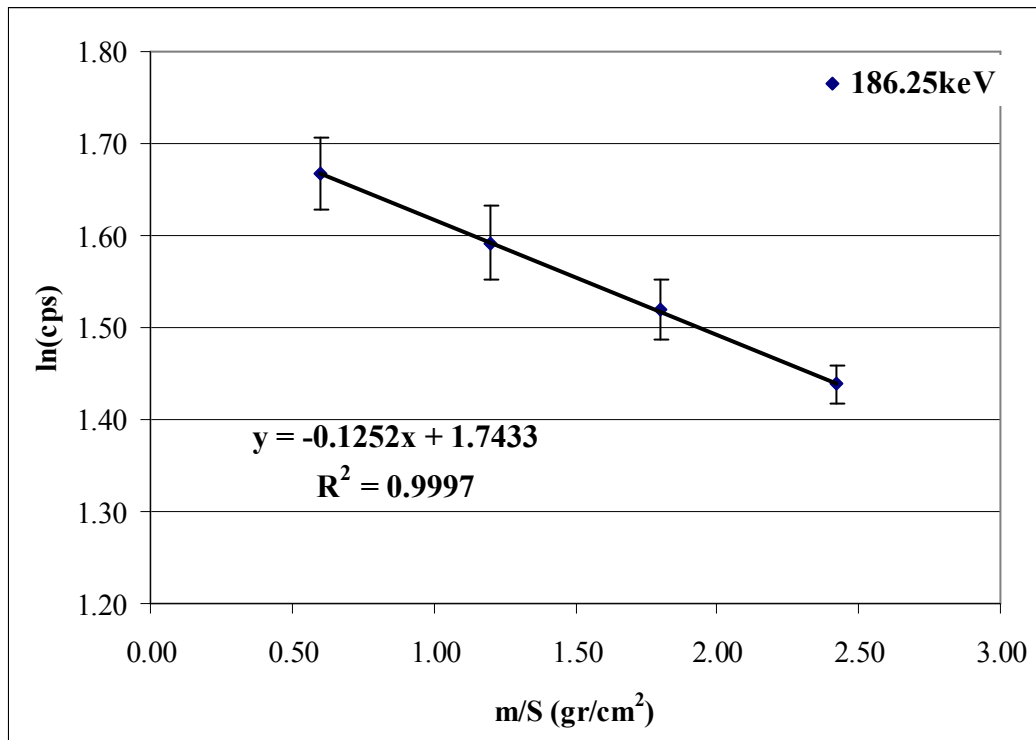
Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκαν και τα διαγράμματα 4.13 και 4.14 για τον προσδιορισμό του μ_m .



Σχήμα 4.13: Ημολογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV.

Από τα διαγράμματα 4.13 και 4.14 εκτιμήθηκε ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης. Για την ενέργεια των 46.52keV προέκυψε ότι $\mu_m = 0.4284\text{cm}^2/\text{gr}$ και για την ενέργεια των 186.25keV, $\mu_m = 0.1252\text{cm}^2/\text{gr}$.

Η διάρκεια ολοκλήρωσης των πειραμάτων και για τα δύο ενέργειες ήταν μία ημέρα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3.



Σχήμα 4.14: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV.

Ενέργεια φωτονίων	Πηγή	μ πειράματος (cm ⁻¹)	μ/ρ πειράματος (cm ² /gr)
46.52keV	Ra(point)	0.5208±0.0161	0.4284±0.0124
186.25keV	Ra(point)	0.1522±0.0028	0.1252±0.0017

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα υπολογισμού του μ και του μ/ρ για κοκκομετρικό κλάσμα <2mm από τον κήπο του κτιρίου ANYM (MS657)

4.2.2 Υπολογισμός του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η από το πρόγραμμα factor

Για τον υπολογισμό του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η στο ΕΠΤ-ΕΜΠ χρησιμοποιείται το πρόγραμμα H/Y **factor** σε γλώσσα FORTRAN [ΔΔ Αναγνωστάκης Μ., 1998]. Το πρόγραμμα αποτελείται – εκτός από το κυρίως πρόγραμμα (**factor**) – από δύο υπορουτίνες (**integ1**, **integ2**) και δύο functions (**fun**, **sf**). Η έκδοση του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας

ΔΕ έχει τροποποιηθεί στα πλαίσια προηγούμενης ΔΕ [Φωτεινάκη, 2012] και παρατίθεται ολόκληρο σε αυτήν. Κατά την εκτέλεση του προγράμματος, αρχικά, ο χρήστης καλείται να επιλέξει:

- τον ανιχνευτή, ο οποίος χρησιμοποιείται, με δυνατότητα επιλογής μεταξύ του ανιχνευτή «3» και του ανιχνευτή «4» του ΕΠΤ-ΕΜΠ.
- τη γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή για την οποία ζητείται η εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής απόδοσης η . Υπάρχει δυνατότητα επιλογής, είτε της γεωμετρίας «2» (default), είτε περιγραφής άλλης επιθυμητής κυλινδρικής γεωμετρίας.
- τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένησης μ_c του υλικού της πηγής βαθμονόμησης. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα, είτε να επιλέξει το υλικό 4M HCl που είναι το υλικό της πηγής βαθμονόμησης που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ (QCY44 ή QCY48) είτε να εισάγει την επιθυμητή τιμή του συντελεστή μ_c και την αντίστοιχη αβεβαιότητα.
- τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένησης μ_s του υλικού για το οποίο ζητείται ο συντελεστής αναγωγής της απόδοσης και την αντίστοιχη αβεβαιότητα. Ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μπορεί να δοθεί είτε απ' ευθείας από το χρήστη, είτε επιλέγοντας ένα από τα προκαθορισμένα υλικά, για τα οποία υπάρχουν καμπύλες αναδρομής, και δίνοντας την πυκνότητά του.
- την ενέργεια φωτονίων για την οποία γίνεται η εκτίμηση του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης.

Το πρόγραμμα καλεί τις δύο υπορουτίνες κάθε μία από τις οποίες υπολογίζει την τιμή του ολοκληρώματος $J(\mu_c)$ και $J(\mu_s)$, καθώς και τις αντίστοιχες αβεβαιότητές τους. Ακολούθως, υπολογίζεται η τιμή του συντελεστή αναγωγής η και η αβεβαιότητά του, και εκτυπώνονται.

Ο συντελεστής διόρθωσης λόγω αυτοαπορρόφησης η εκτιμήθηκε για:

- Τον ανιχνευτή LEGe «3»
- Τη γεωμετρία «2» πηγής-ανιχνευτή που συνήθως χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, και η οποία αντιστοιχεί σε κυλινδρικό δοχείο και όγκο δείγματος 282ml.

- Πηγή βαθμονόμησης QCY44. Οι τιμές του συντελεστή που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε ενέργεια, ελήφθησαν από τη βάση δεδομένων NIST για υλικό 4M HCl. Ο υπολογισμός έγινε για τις τιμές του συντελεστή μ_c που χρησιμοποιεί ο κώδικας SPUNAL που χρησιμοποιείται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για την ανάλυση γ-φασμάτων.
- Για υλικό χώμα. Για την επιλογή του συγκεκριμένου υλικού στο πρόγραμμα factor επιλέγεται ο κωδικός υλικού «1». Τα δεδομένα του συντελεστή μ για το χώμα υπολογίζονται αυτόματα από τις αντίστοιχες συναρτήσεις αναδρομής της μορφής $\mu=f(E,\rho)$ οι οποίες είναι ενσωματωμένες στο πρόγραμμα factor [ΔΔ Αναγνωστάκης, 1998]. Οι τιμές του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ που υπολογίζει και χρησιμοποιεί το πρόγραμμα factor με τη μέθοδο αυτή εμφανίζονται στα αποτελέσματα του προγράμματος.
- Για τις ενέργειες φωτονίων για τις οποίες έχει υπολογιστεί στο προηγούμενο κεφάλαιο ο ολικός γραμμικός μ και ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης μ_m , δηλαδή 46.52keV και 186.25keV και – κατά περίπτωση – 63.29keV και 185.74keV.

Στον πίνακα 4.4 παρατίθενται οι τιμές του μ που (i) προσδιορίστηκαν πειραματικά άμεσα στα πλαίσια της ΔE και περιγράφονται στις παραγράφους 4.2.1.1 – 4.2.1.3, και συμβολίζονται ως μ_π (ii) προσδιορίστηκαν πειραματικά έμμεσα στα πλαίσια της ΔE , μέσω του συντελεστή μ/ρ που προσδιορίστηκε πειραματικά και της πυκνότητας του υλικού και συμβολίζονται ως $(\mu/\rho)_\pi \cdot \rho$ και (iii) οι τιμές του συντελεστή μ που εκτιμήθηκαν από τη συνάρτηση αναδρομής $\mu=f(E,\rho)$ για υλικό χώμα της ίδιας πυκνότητας, από το πρόγραμμα factor και συμβολίζονται ως μ_a .

Στον πίνακα 4.5 παρατίθενται οι τιμές του συντελεστή η οι οποίες υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα factor για τις τιμές του μ που (i) προσδιορίστηκαν πειραματικά άμεσα στα πλαίσια της ΔE και περιγράφονται στις παραγράφους 4.2.1.1 – 4.2.1.3 και συμβολίζονται ως η_π , (ii) προσδιορίστηκαν πειραματικά έμμεσα στα πλαίσια της ΔE , μέσω του συντελεστή μ/ρ που προσδιορίστηκε πειραματικά και της πυκνότητας του υλικού και συμβολίζονται ως η_{π^*} , καθώς και (iii) οι τιμές του συντελεστή η που υπολογίζονται από το πρόγραμμα factor για τιμές του συντελεστή μ από τη συνάρτηση αναδρομής $\mu=f(E,\rho)$ για υλικό χώμα της ίδιας πυκνότητας και συμβολίζονται ως η_a .

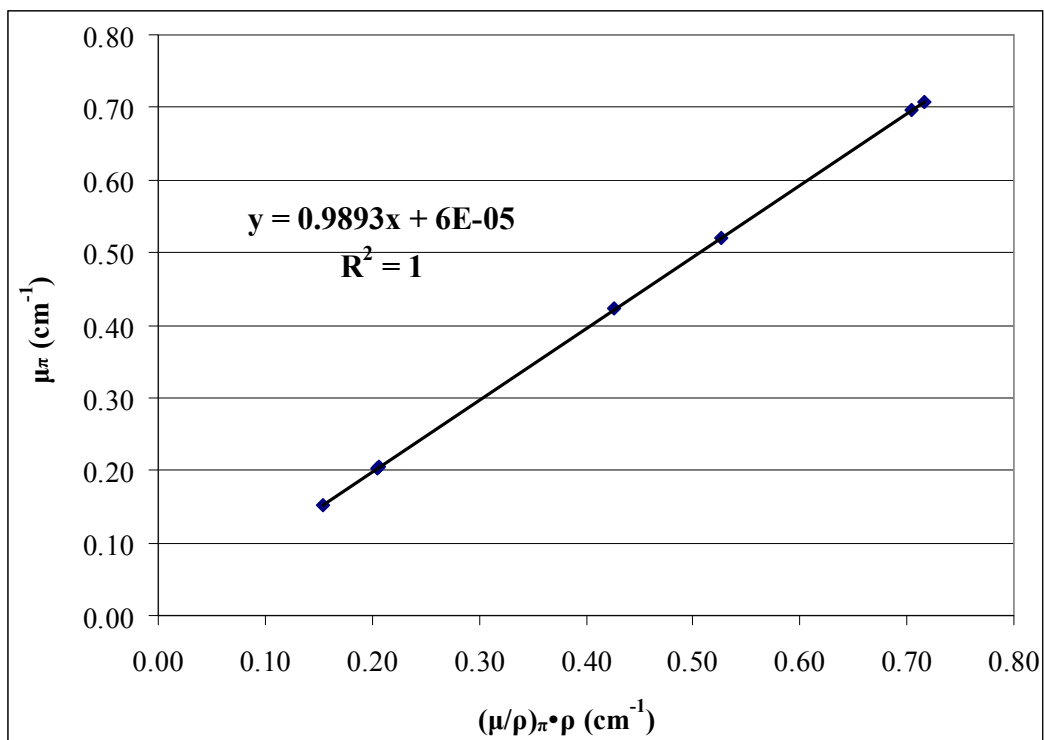
Χώμα	Ενέργεια (keV)	μ_{π} (cm ⁻¹)	$(\mu/\rho)_{\pi} \cdot \rho$ (cm ⁻¹)	μ_{α} (cm ⁻¹)
MS663	46.52	0.7080±0.0029	0.7156±0.0034	0.6432
MS663	63.29	0.4223±1.2648	0.4268±0.0066	0.4342
MS663	186.25	0.2042±0.0066	0.2063±0.0046	0.1649
MS656	46.52	0.6975±0.0170	0.7049±0.0110	0.7162
MS656	186.25	0.2021±0.0063	0.2042±0.0034	0.1773
MS657	46.52	0.5208±0.0161	0.5265±0.0124	0.5483
MS657	186.25	0.1522±0.0028	0.1538±0.0017	0.1481

Πίνακας 4.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τον γραμμικό και μαζικό συντελεστή εξασθένισης για χώμα

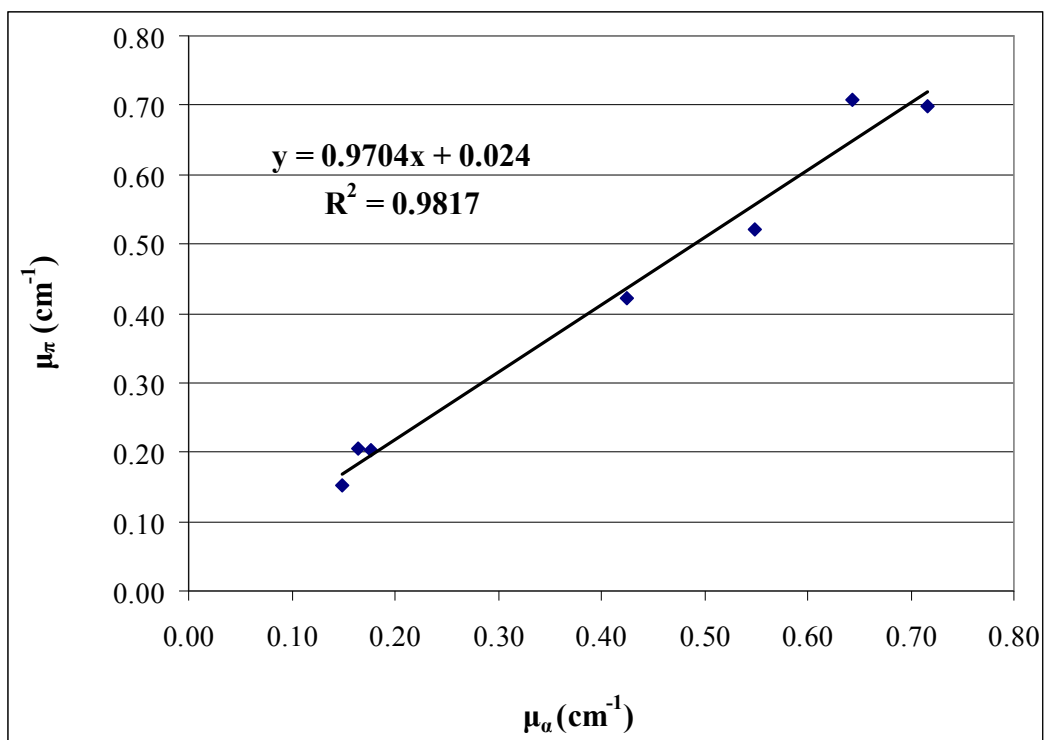
Χώμα	Ενέργεια (keV)	Ποκνότητα (g cm ⁻³)	η_{π}	η_{π^*}	η_{α}
MS656	46.52	1.577	0.6309	0.6262	0.6192
MS656	186.25	1.577	0.9000	0.8964	0.9427
MS657	46.52	1.229	0.7673	0.7620	0.7423
MS657	186.25	1.229	0.9898	0.9865	0.9979
MS663	46.52	1.427	0.6243	0.6196	0.6673
MS663	63.29	1.427	0.7658	0.7611	0.7535
MS663	186.25	1.427	0.8964	0.8930	0.9655

Πίνακας 4.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τον συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η για χώμα

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους πίνακες 4.4 και 4.5 προκύπτουν τα διαγράμματα 4.15 έως 4.18.



Σχήμα 4.15: Συσχέτιση μεταξύ του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης που προέκυψε απ' ευθείας (μ_{π}) και μέσω του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένισης $(\mu/\rho)_{\pi} \cdot \rho$ που προέκυψαν πειραματικά για χρώμα.

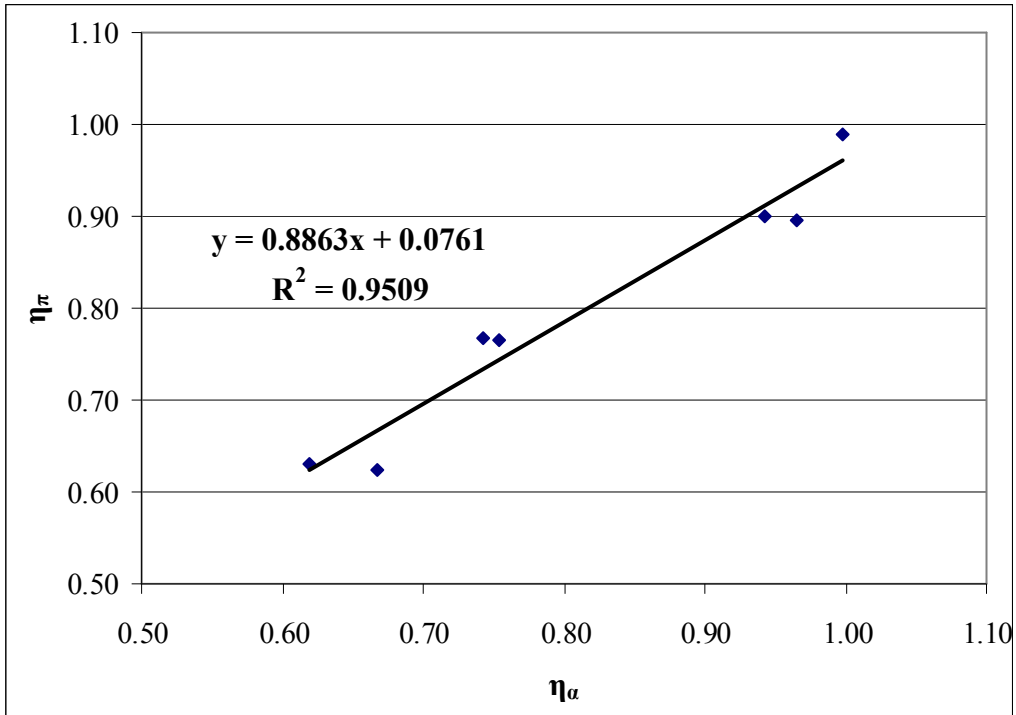


Σχήμα 4.16: Συσχέτιση του συντελεστή μ_a που εκτιμήθηκε από αναδρομή με το μ_{π} που προέκυψε πειραματικά.

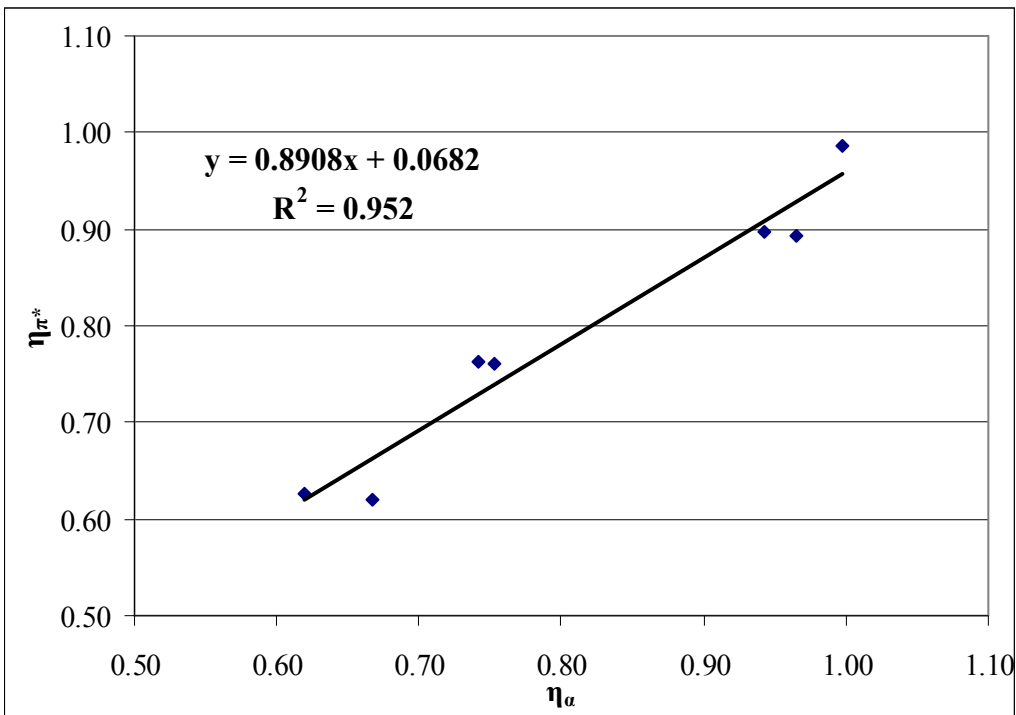
Προκειμένου να ελεγχθεί το κατά πόσον διαφέρουν οι συντελεστές μ και η που υπολογίζονται με τις διάφορες μεθόδους (πειραματικά και από τη συνάρτηση $\mu=f(E,\rho)$) θα ελεγχθεί το κατά πόσον η κλίση και ο σταθερός όρος της αντίστοιχης συνάρτησης γραμμικής αναδρομής διαφέρουν στατιστικά από τη μονάδα και το 0 αντίστοιχα. Ο έλεγχος αυτός θα γίνει με στατιστικό τεστ (t-test). Τα αποτελέσματα των τεστ παρατίθενται στους πίνακες 4.6: έως 4.9, ενώ η σχετική διαδικασία του τεστ παρουσιάζεται στο παράρτημα Γ. Από τα αποτελέσματα του τεστ διαπιστώνεται ότι σε κάθε περίπτωση, ο συντελεστής διεύθυνσης της ευθείας αναδρομής δεν διαφέρει στατιστικά σημαντικά από τη μονάδα. Ομοίως, προκύπτει ότι και ο σταθερός όρος δεν διαφέρει στατιστικά σημαντικά από το μηδέν. Το συμπέρασμα που προκύπτει από τους δύο παραπάνω ελέγχους είναι ότι και οι δύο μέθοδοι πειραματικού προσδιορισμού του συντελεστή εξασθένισης μ (απευθείας του μ και μέσω του μ/ρ) δίνει πρακτικά τα ίδια αποτελέσματα.

Όσον αφορά στη σύγκριση του συντελεστή μ που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία με το μ που υπολογίζεται από τη συνάρτηση αναδρομής $\mu=f(E,\rho)$, το t-test έδειξε ότι ο συντελεστής διεύθυνσης της ευθείας αναδρομής δε διαφέρει στατιστικά σημαντικά από τη μονάδα και ο σταθερός όρος από το μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι η συνάρτηση αναδρομής $\mu=f(E,\rho)$ για χρώμα δίνει αποτελέσματα για το συντελεστή εξασθένισης μ συμβατά με τα πειραματικά.

Στο διάγραμμα 4.17 επιχειρείται η συσχέτιση του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η_{π} , οι οποίοι προκύπτουν με δεδομένο το μ_{π} από την πειραματική διαδικασία με τον συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η_a , ο οποίος προκύπτει με δεδομένο το μ_a που προκύπτει από την συνάρτηση αναδρομής. Στο διάγραμμα 4.18 επιχειρείται η συσχέτιση του συντελεστή η_{π^*} που προκύπτει με δεδομένο το $(\mu/\rho)_{\pi} \cdot \rho$ με αυτόν που προκύπτει με δεδομένο το μ_a που προκύπτει από την συνάρτηση αναδρομής. Για να ελεγχθεί η ταύτιση των δύο συντελεστών έγιναν δύο t-test, ένα για κάθε διάγραμμα, στα οποία εξετάστηκε το κατά πόσον ο συντελεστής διεύθυνσης των ευθειών αναδρομής ταυτίζεται με τη μονάδα και ο σταθερός όρος με το μηδέν.



Σχήμα 4.17: Συσχέτιση του η_π που προέκυψε από το πειραματικό μ_π με το η_α που από το μ_α από τη συνάρτηση αναδρομής



Σχήμα 4.18: Συσχέτιση του η_{π^*} που προέκυψε με δεδομένο το $(\mu/\rho)_{\pi^*}$ με το η_α που προέκυψε με δεδομένο το μ_α από την συνάρτηση αναδρομής

Για το διάγραμμα 4.17 από το t-test προέκυψε ότι ο συντελεστής αναγωγής η_{π} που προέκυψε από το πειραματικό μ_{π} με τον η_{α} που προέκυψε από το μ_{α} από τη συνάρτηση αναδρομής δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Για το διάγραμμα 4.18 από το t-test προέκυψε ότι ο συντελεστής αναγωγής της απόδοσης η_{α} που προκύπτει με δεδομένο τον πειραματικό ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης μ_{π} δεν διαφέρει στατιστικά σημαντικά από τον η_{α} που προκύπτει, με δεδομένο τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης μ_{α} που προκύπτει από τη συνάρτηση αναδρομής. Αυτό είναι αρκετά λογικό, καθώς πιο πάνω αποδείχθηκε ότι τα δύο δεδομένα που εισάγονται ταυτίζονται στατιστικά.

Τα αποτελέσματα για τα t test που έγιναν για την ευθεία αναδρομής $y = a_1 \cdot x + a_0$ παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στους πίνακες 4.6: έως 4.9:

	Συντελεστής διεύθυνσης ευθείας a_1	Τιμή σύγκρισης a_{10}	t_0	Τιμή t σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%	Τιμή t σε επίπεδο εμπιστοσύνης 99%
$\mu_{\pi} - (\mu/\rho)_{\pi} \cdot \rho$ (4.15)	0.9893	1	0.7016	2.571	4.032
$\mu_{\pi} - \mu_{\alpha}$ (4.16)	0.9704	1	0.4992	2.571	4.032
$\eta_{\pi} - \eta_{\alpha}$ (4.17)	0.8863	1	1.2623	2.571	4.032
$\eta_{\pi^*} - \eta_{\alpha}$ (4.18)	0.891	1	1.221	2.571	4.032

Πίνακας 4.6: Δεδομένα για την διεξαγωγή του t-τεστ για τον συντελεστή διεύθυνσης της ευθείας αναδρομής

	Διάστημα εμπιστοσύνης άνω άκρο (95%)	Διάστημα εμπιστοσύνης κάτω άκρο (95%)	Διάστημα εμπιστοσύνης άνω άκρο (99%)	Διάστημα εμπιστοσύνης κάτω άκρο (99%)
$\mu_{\pi} - (\mu/\rho)_{\pi} \cdot \rho$ (4.15)	1.029	0.950	1.051	0.928
$\mu_{\pi} - \mu_{\alpha}$ (4.16)	1.123	0.818	1.209	0.731
$\eta_{\pi} - \eta_{\alpha}$ (4.17)	1.118	0.655	1.249	0.523
$\eta_{\pi^*} - \eta_{\alpha}$ (4.18)	1.121	0.661	1.252	0.530

Πίνακας 4.7: Διαστήματα εμπιστοσύνης του συντελεστή διεύθυνσης της ευθείας αναδρομής

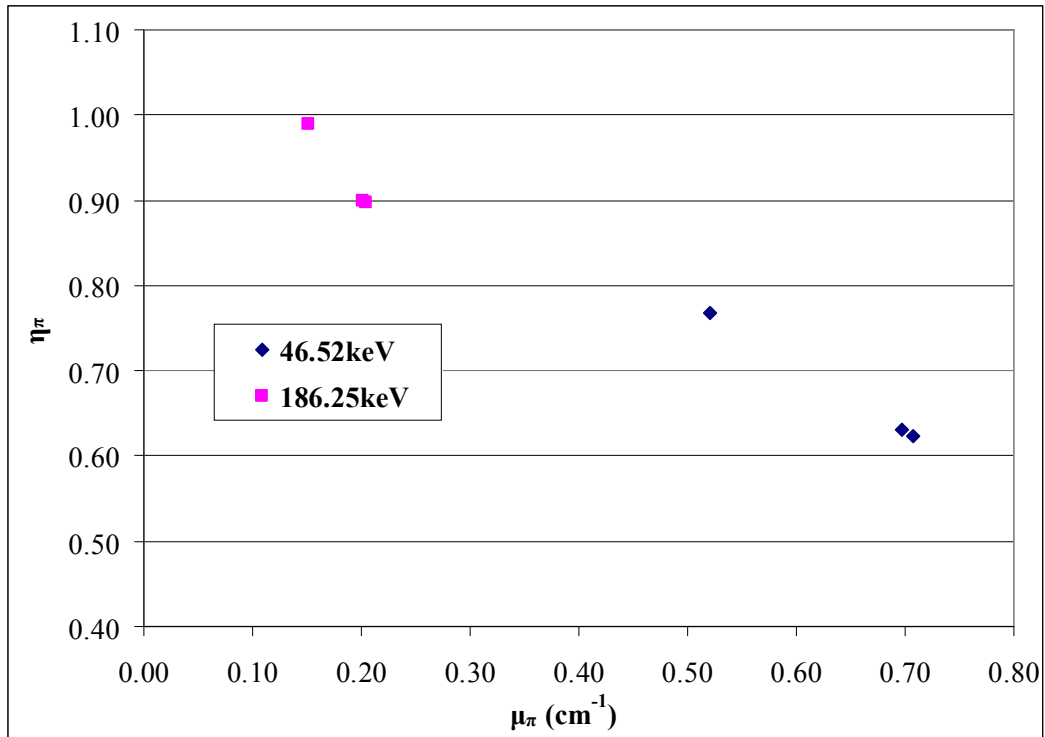
	Σταθερός όρος ευθείας a_0	Τιμή σύγκρισης a_{00}	t_0	Τιμή t σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%	Τιμή t σε επίπεδο εμπιστοσύνης 99%
$\mu_\pi - (\mu/\rho)_\pi \cdot \rho$ (4.15)	0.00006	0	0.00726	2.571	4.032
$\mu_\pi - \mu_\alpha$ (4.16)	0.02400	0	0.87793	2.571	4.032
$\eta_\pi - \eta_\alpha$ (4.17)	0.07610	0	1.02408	2.571	4.032
$\eta_{\pi^*} - \eta_\alpha$ (4.18)	0.06820	0	0.92401	2.571	4.032

Πίνακας 4.8: Δεδομένα για την διεξαγωγή του t-τεστ για τον σταθερό όρο της ευθείας αναδρομής

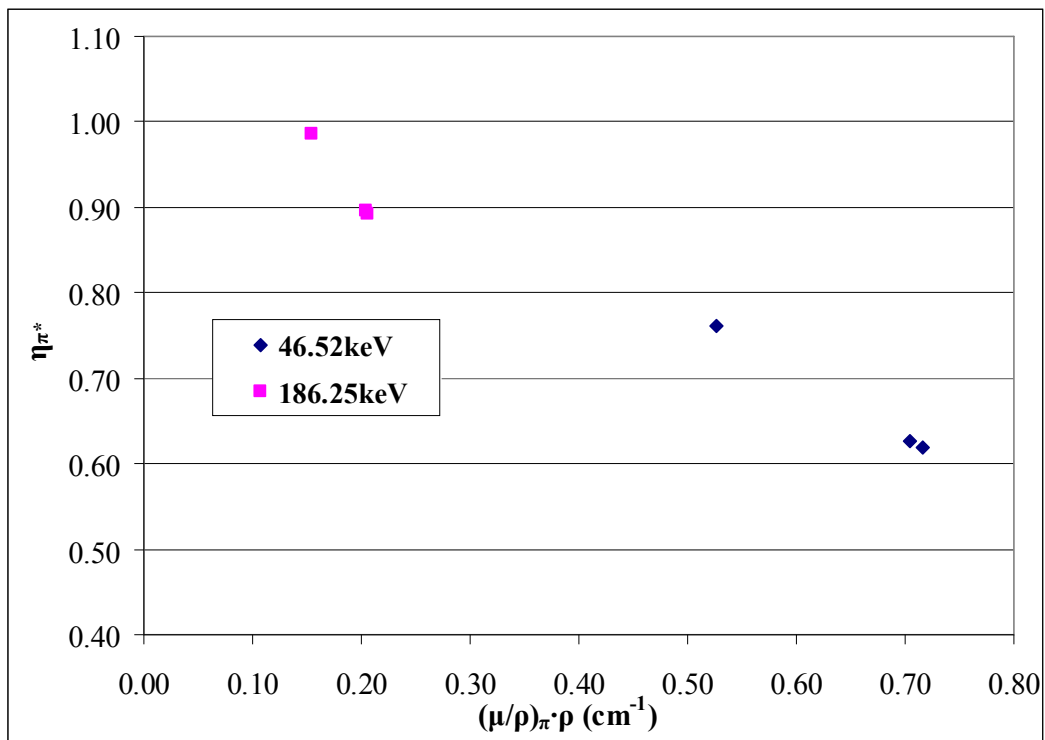
	Διάστημα εμπιστοσύνης άνω άκρο (95%)	Διάστημα εμπιστοσύνης κάτω άκρο (95%)	Διάστημα εμπιστοσύνης άνω άκρο (99%)	Διάστημα εμπιστοσύνης κάτω άκρο (99%)
$\mu_\pi - (\mu/\rho)_\pi \cdot \rho$ (4.15)	0.0213	-0.0212	0.033	-0.0333
$\mu_\pi - \mu_\alpha$ (4.16)	0.0943	-0.0463	0.1342	-0.0862
$\eta_\pi - \eta_\alpha$ (4.17)	0.2672	-0.1150	0.3757	-0.2235
$\eta_{\pi^*} - \eta_\alpha$ (4.18)	0.2580	-0.1216	0.3658	-0.2294

Πίνακας 4.9: Διαστήματα εμπιστοσύνης του σταθερού όρου της ευθείας αναδρομής

Στα διαγράμματα 4.19 και 4.20 γίνεται συσχέτιση του η που προέκυψε από τον κώδικα factor με το μ που εισήχθη σε κάθε περίπτωση για τον υπολογισμό του η . Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι για τα 186.25keV οι τιμές του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης βρίσκονται πολύ κοντά στη μονάδα, πράγμα που σημαίνει ότι στη συγκεκριμένη περιοχή ενεργειών δεν απαιτείται μεγάλη διόρθωση. Παρόλα αυτά εμφανίζεται μια πτωτική τάση των μετρήσεων όσο αυξάνει ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης. Για τα 46.52 keV, παρατηρείται ότι ο συντελεστής αναγωγής της απόδοσης είναι μικρότερος της μονάδας και γενικά εμφανίζει μια πτωτική τάση όσο αυξάνει ο γραμμικός συντελεστής αναγωγής της απόδοσης.



Σχήμα 4.19: Συσχέτιση του η_{π} με το πειραματικό μ_{π} που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του



Σχήμα 4.20: Συσχέτιση του η_{π^*} με το πειραματικό $(\mu/\rho)_{\pi} \cdot \rho$ που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του

Επίσης, παρατηρείται μια ταύτιση των σημείων των δύο διαγραμμάτων. Αυτό συμβαίνει, λόγω του γεγονότος ότι ο ολικός γραμμικός συντελεστής που υπολογίστηκε κατά την πειραματική διαδικασία μ_{π} ταυτίζεται στατιστικά με τον συντελεστή που υπολογίστηκε από τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένησης $(\mu/\rho)_{\pi}\cdot\rho$, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω. Έτσι οι τιμές του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης, θα είναι παρόμοιες για τα δύο διαγράμματα.

4.3 Εφαρμογή της μεθοδολογίας προσδιορισμού του συντελεστή μ σε κοκκομετρικά κλάσματα του ίδιου δείγματος χώματος

Στην προηγούμενη παράγραφο περιγράφηκε η ανάλυση ενός δείγματος χώματος όπως συλλέχθηκε, μετά από απλό κοσκίνισμα προκειμένου να αφαιρεθούν ξένα υλικά όπως πέτρες, ρίζες κτλ. (μέγεθος κόκκου $< 2\text{mm}$). Στην παράγραφο αυτή μελετάται η επίδραση της κοκκομετρίας, δηλαδή το μέγεθος του κόκκου του χώματος, στον προσδιορισμό των συντελεστών εξασθένησης μ και μ/ρ . Η συγκεκριμένη ανάλυση κρίθηκε σκόπιμο να γίνει, καθώς οι συγκεντρώσεις του ^{210}Pb διαφέρουν σε κάθε κοκκομετρικό κλάσμα του χώματος και για το λόγο αυτό συχνά είναι ανάγκη να αναλύονται χώματα με διαφορετικές κοκκομετρίες. Αυτό που εξετάστηκε είναι το κατά πόσον τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα του ίδιου δείγματος παρουσιάζουν διαφορές αναφορικά με το συντελεστή εξασθένησης και κατ' επέκταση το συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η . Για τη συγκεκριμένη σειρά πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε χώμα από την περιοχή της Μεγαλόπολης, το οποίο είχε διαχωριστεί σε κοκκομετρικά κλάσματα στα πλαίσια προηγούμενης ΔΕ [Παλαμάρα,2008]. Στον πίνακα 4.10 παρατίθεται η αντιστοιχία μεταξύ των κωδικών και του μεγέθους κόκκου των επιμέρους κλασμάτων του χώματος.

Κωδικός Χώματος	Κοκκομετρικό κλάσμα (mm)
MS535	<0.045
MS536	0.045 - 0.063
MS537	0.063 - 0.125
MS538	0.125 - 0.25
MS539	0.25 - 0.5
MS540	0.5 - 1
MS541	1 - 2
MS542	>2

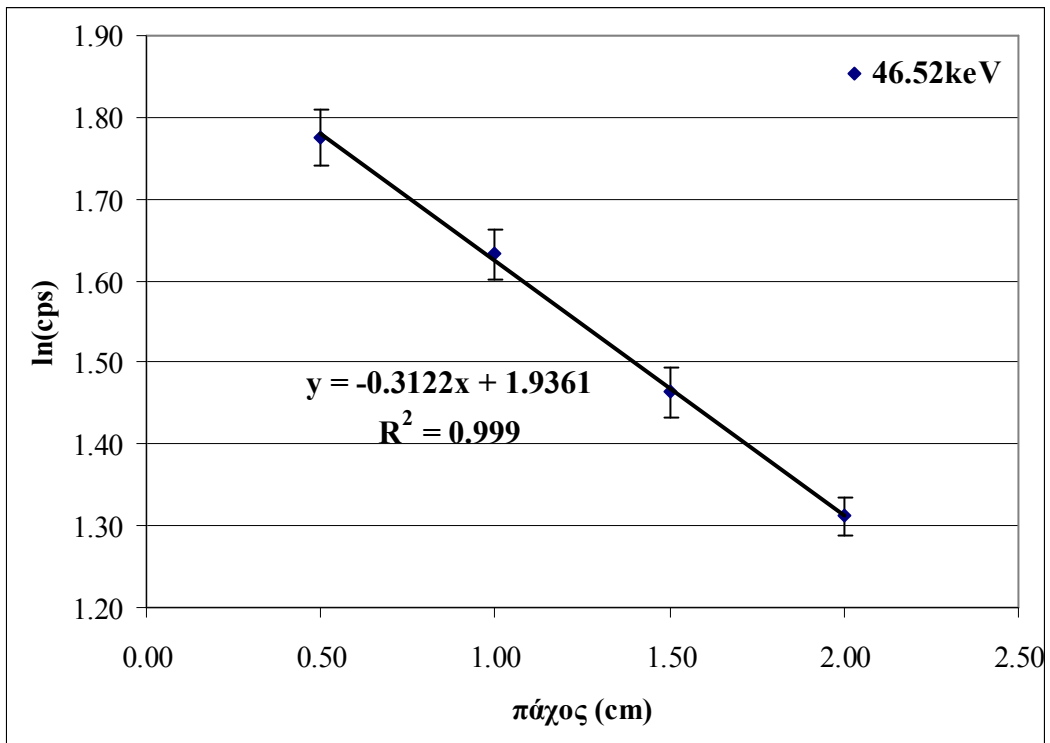
Πίνακας 4.10: Αντιστοίχιση κωδικών χωμάτων με το μέγεθος του κόκκου τους

Η συγκεκριμένη σύγκριση είναι η πρώτη φορά που γίνεται στο ΕΠΤ- ΕΜΠ, καθώς μέχρι σήμερα χρησιμοποιείται ο ίδιος συντελεστής διόρθωσης για όλα τα κλάσματα χώματος της ίδιας πυκνότητας.

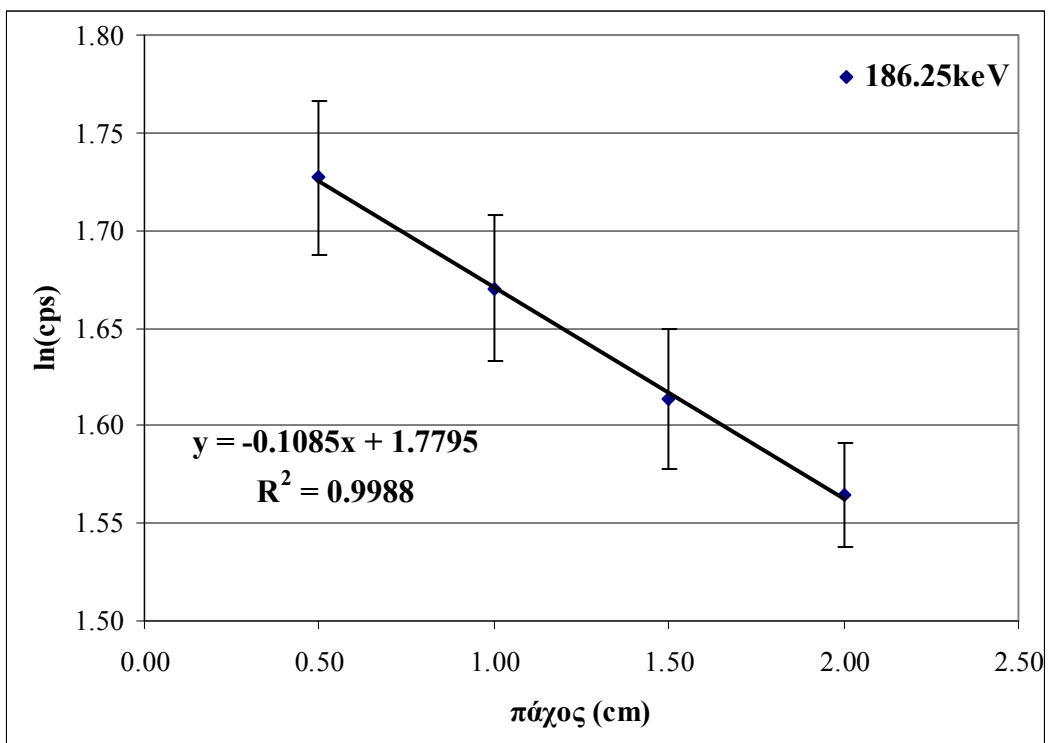
4.3.1 Πειραματικά αποτελέσματα για τους συντελεστές εξασθένισης μ και μ/ρ

4.3.1.1 Κοκκομετρικό κλάσμα <0.045mm

Το πρώτο κλάσμα χώματος που αναλύθηκε ήταν το MS535, το οποίο είναι κλάσμα χώματος, με μέγεθος κόκκου μικρότερο από 0.045mm, με πυκνότητα 0.763gr/cm³. Οι μετρήσεις έγιναν στον ανιχνευτή «6», με σημειακή πηγή ²²⁶Ra για πάχη απορροφητή 5, 10, 15 και 20mm. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2 προέκυψαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα 4.21 και 4.22 για τον προσδιορισμό του συντελεστή μ .



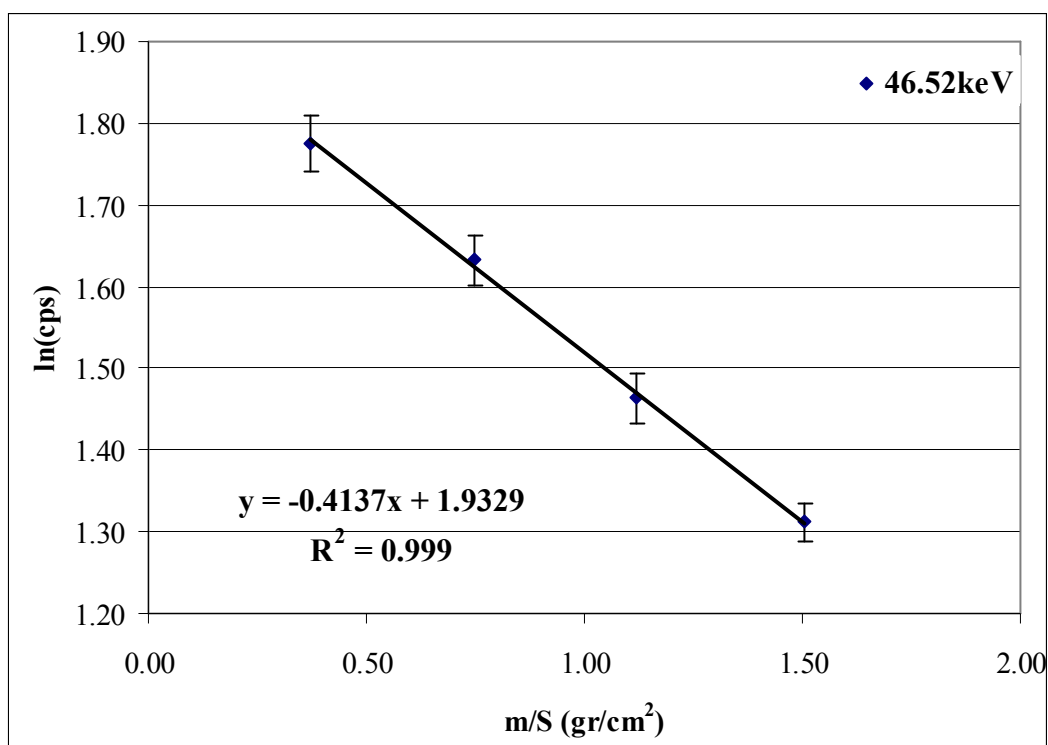
Σχήμα 4.21: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV.



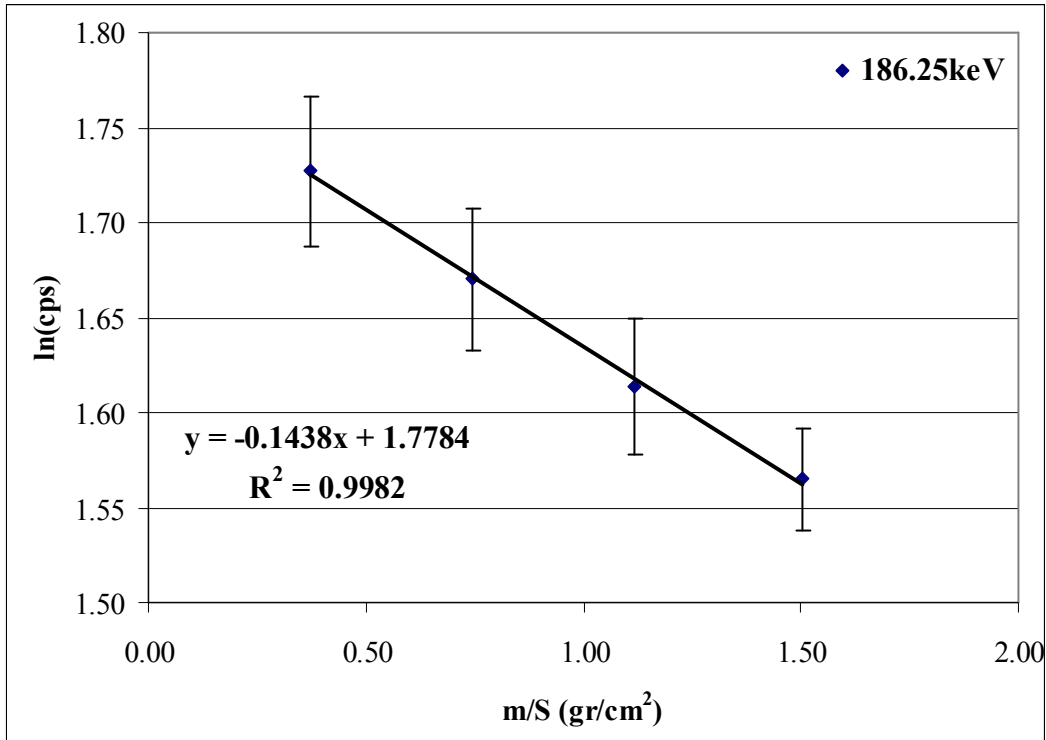
Σχήμα 4.22: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV

Από τα διαγράμματα 4.21 και 4.22 εκτιμήθηκε ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης μ , ως η κλίση της ευθείας αναδρομής των μετρήσεων. Για τα 46.52keV προέκυψε ότι $\mu = 0.3122\text{cm}^{-1}$ και για τα 186.25keV, $\mu = 0.1085\text{cm}^{-1}$.

Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκαν και τα διαγράμματα 4.23 και 4.24 για τον υπολογισμό του μ_m .



Σχήμα 4.23 : Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV



Σχήμα 4.24: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV

Από τα διαγράμματα 4.23 και 4.24 εκτιμήθηκε ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης μ_m . Για την ενέργεια των 46.52keV προέκυψε ότι $\mu_m = 0.4137 \text{ cm}^2/\text{gr}$ και για την ενέργεια 186.25keV, $\mu_m = 0.1438 \text{ cm}^2/\text{gr}$.

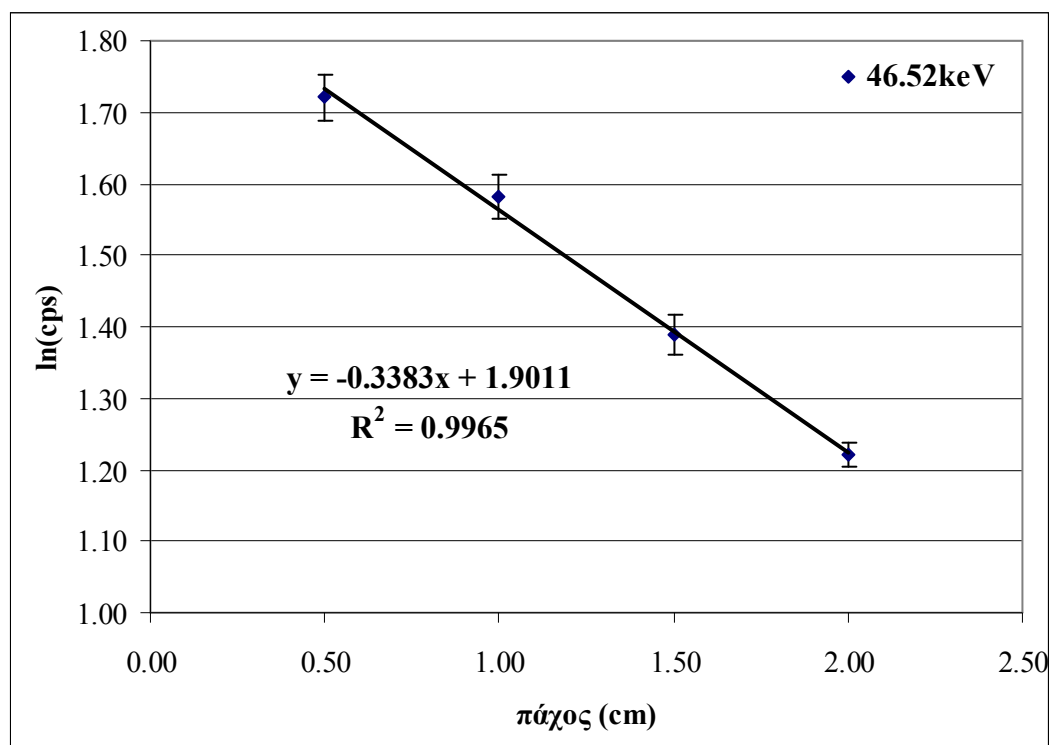
Η συνολική διάρκεια του πειράματος ήταν μία ημέρα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 4.11.

Ενέργεια φωτονίων	Πηγή	μ πειράματος (cm^{-1})	μ/ρ πειράματος (cm^2/gr)
46.52keV	Ra(point)	0.3122 ± 0.0069	0.4137 ± 0.0094
186.25keV	Ra(point)	0.1085 ± 0.0027	0.1438 ± 0.0043

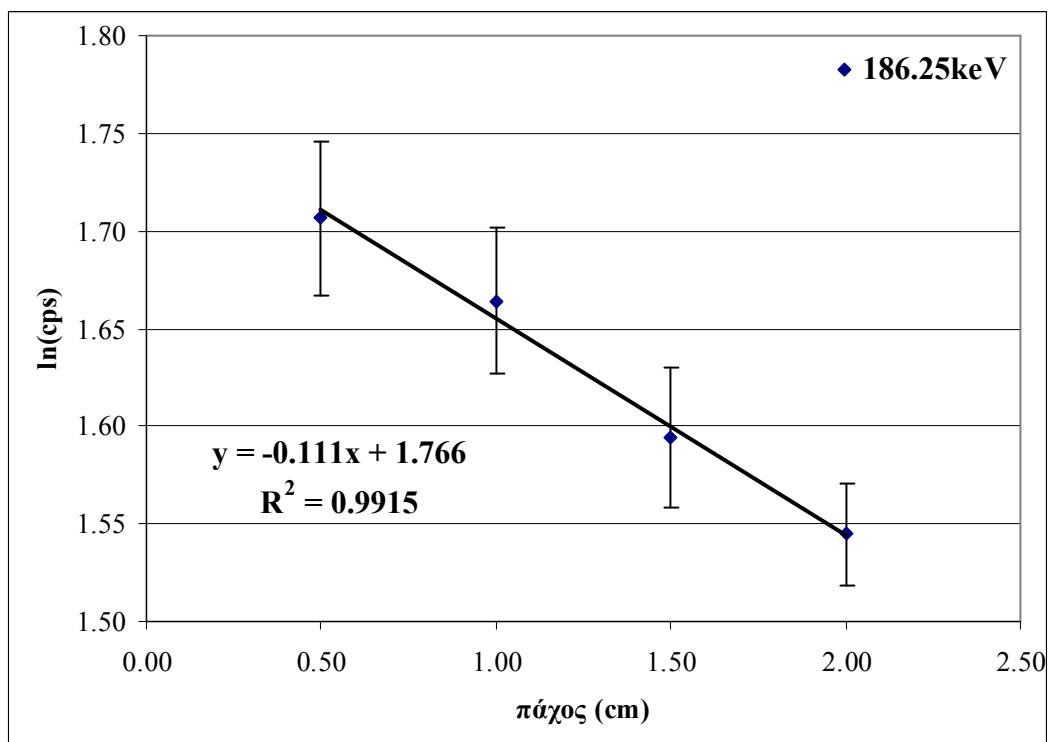
Πίνακας 4.11: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων για το μ και το μ/ρ με απορροφητή MS-535 ($< 0.045 \text{ mm}$)

4.3.1.2 Κοκκομετρικό κλάσμα 0.045 - 0.063mm

Το δεύτερο κλάσμα χόματος που αναλύθηκε ήταν αυτό με μέγεθος κόκκου μεταξύ 0.045mm και 0.063mm και πυκνότητα 0.846gr/cm³ (δείγμα MS536). Οι μετρήσεις έγιναν στον ανιχνευτή «6», με σημειακή πηγή ²²⁶Ra για πάχη απορροφητή 5, 10, 15 και 20mm. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2, προέκυψαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα 4.25 και 4.26 για τον προσδιορισμό του μ .



Σχήμα 4.25: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα προσδιορισμού του μ για ενέργεια 46.52keV



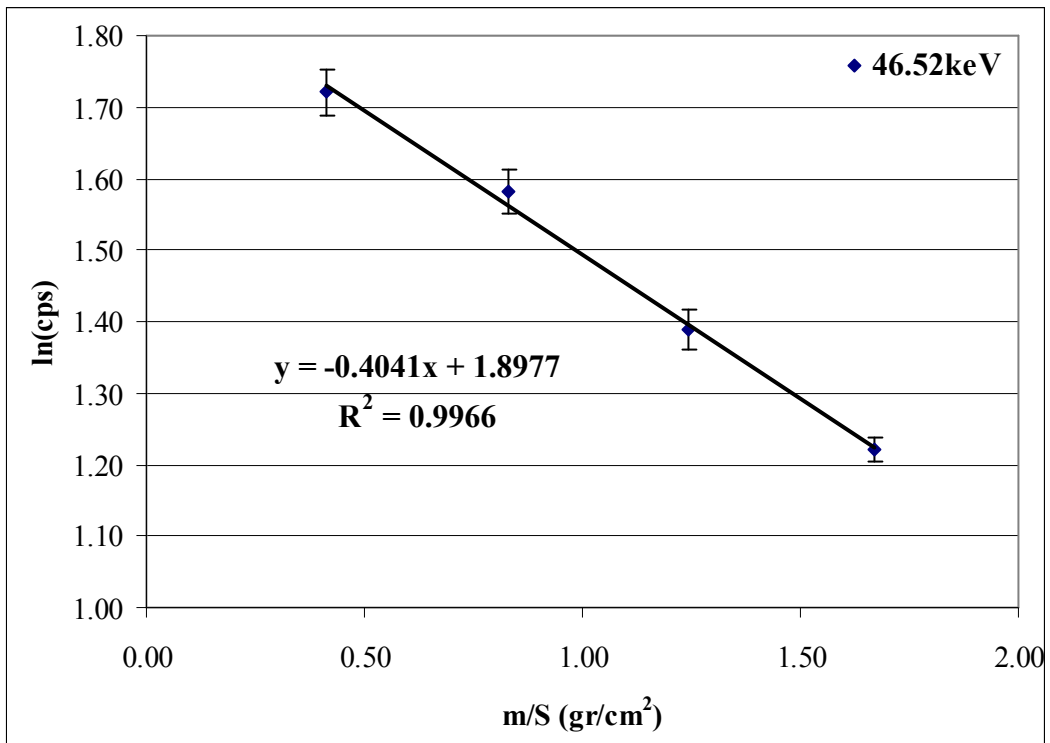
Σχήμα 4.26: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV

Από τα διαγράμματα 4.25 και 4.26 εκτιμήθηκε ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης μ , ως η κλίση της ευθείας αναδρομής των μετρήσεων. Για τα 46.52keV προέκυψε ότι $\mu = 0.3383\text{cm}^{-1}$ και για τα 186.25keV, $\mu = 0.111\text{cm}^{-1}$.

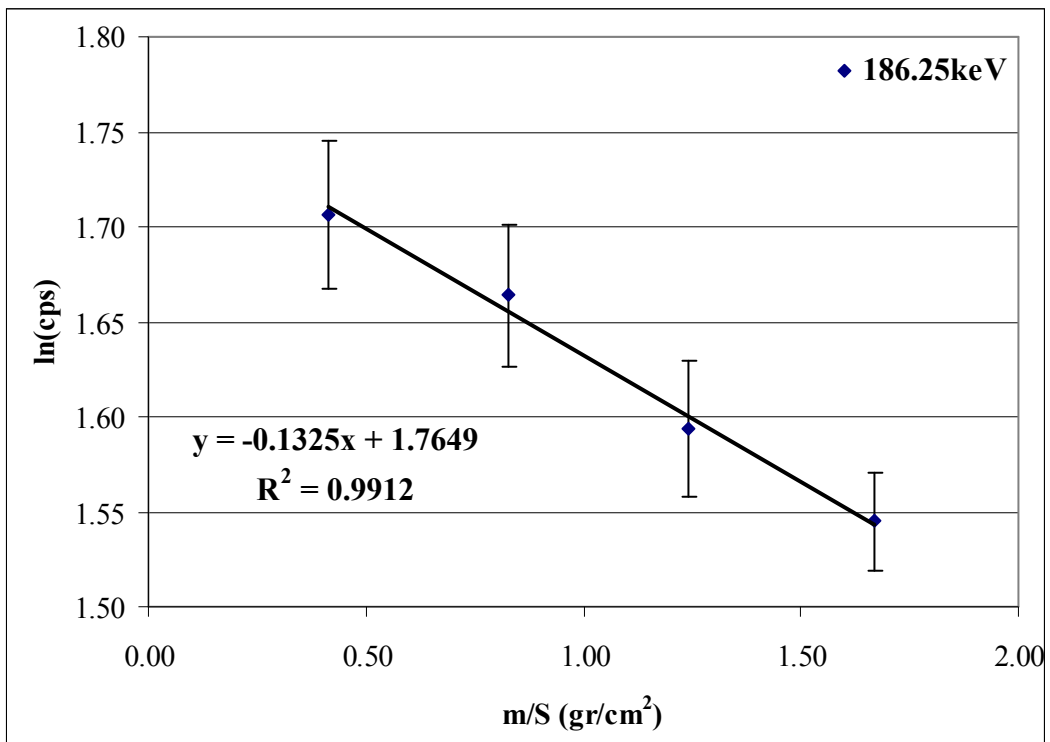
Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκαν και τα διαγράμματα 4.27 και 4.28 για τον προσδιορισμό του μ_m .

Από τα διαγράμματα 4.27 και 4.28 εκτιμήθηκε ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης. Για τα 46.52keV προέκυψε ότι $\mu_m = 0.4041\text{cm}^2/\text{gr}$ και για τα 186.25keV, $\mu_m = 0.1325\text{cm}^2/\text{gr}$.

Η συνολική διάρκεια ολοκλήρωσης του πειράματος ήταν μία ημέρα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 4.12.



Σχήμα 4.27: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV



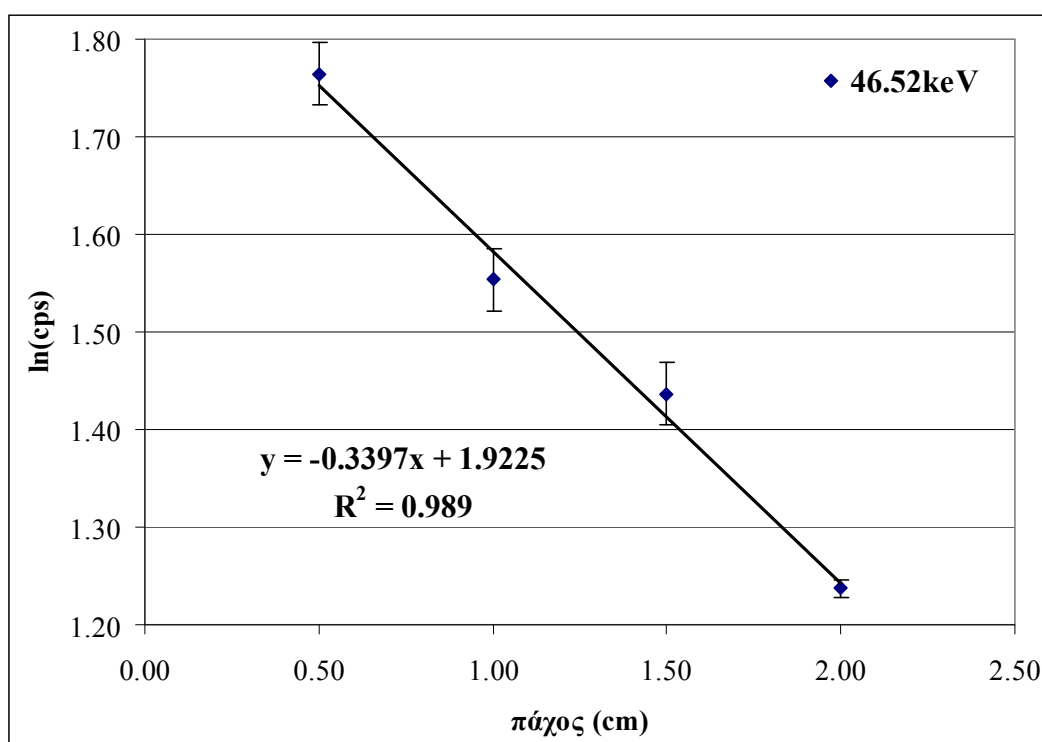
Σχήμα 4.28: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV

Ενέργεια φωτονίων	Πηγή	μ πειράματος (cm ⁻¹)	μ/ρ πειράματος (cm ² /gr)
46.52keV	Ra(point)	0.3383±0.0142	0.4041±0.0167
186.25keV	Ra(point)	0.1110±0.0073	0.1325±0.0088

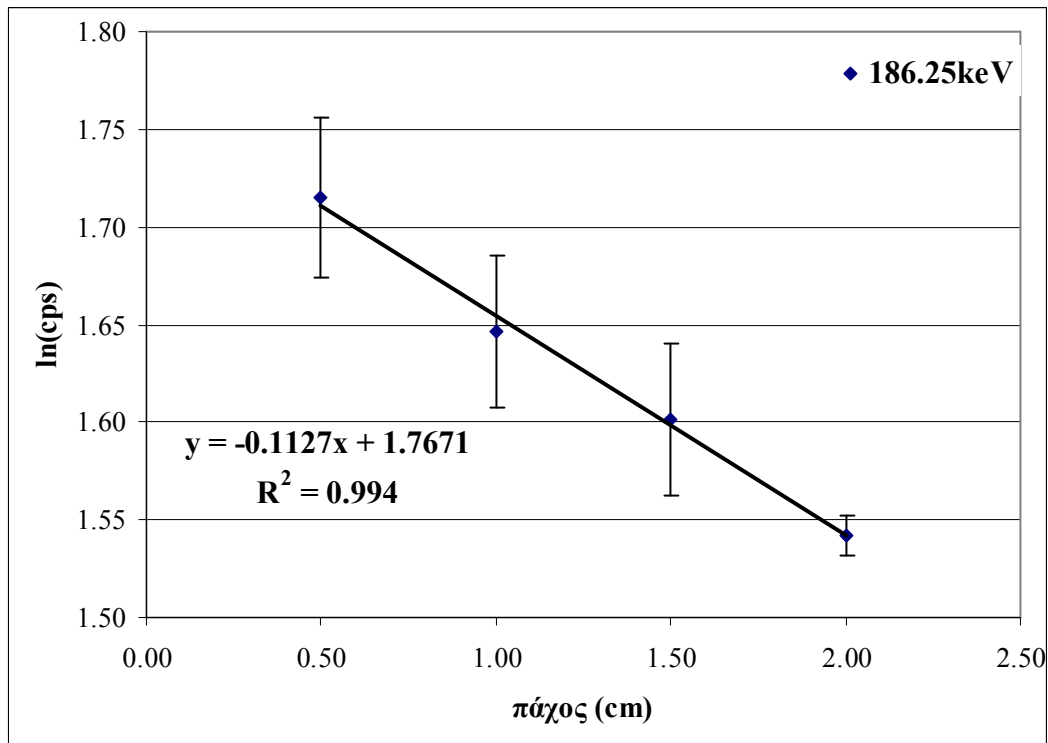
Πίνακας 4.12: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπολογισμού του μ και του μ/ρ με απορροφητή MS-536 (0.045-0.063mm)

4.3.1.3 Κοκκομετρικό κλάσμα 0.063 - 0.125mm

Το τρίτο κλάσμα χώματος που αναλύθηκε ήταν αυτό με μέγεθος κόκκου μεταξύ 0.063mm και 0.125mm και πυκνότητα 0.865gr/cm³ (δείγμα MS537). Οι μετρήσεις έγιναν με τον ανιχνευτή «6», με σημειακή πηγή ²²⁶Ra για πάχη απορροφητή 5, 10, 15 και 20mm. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2, προέκυψαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα 4.29 και 4.30 για τον προσδιορισμό του μ.



Σχήμα 4.29: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV



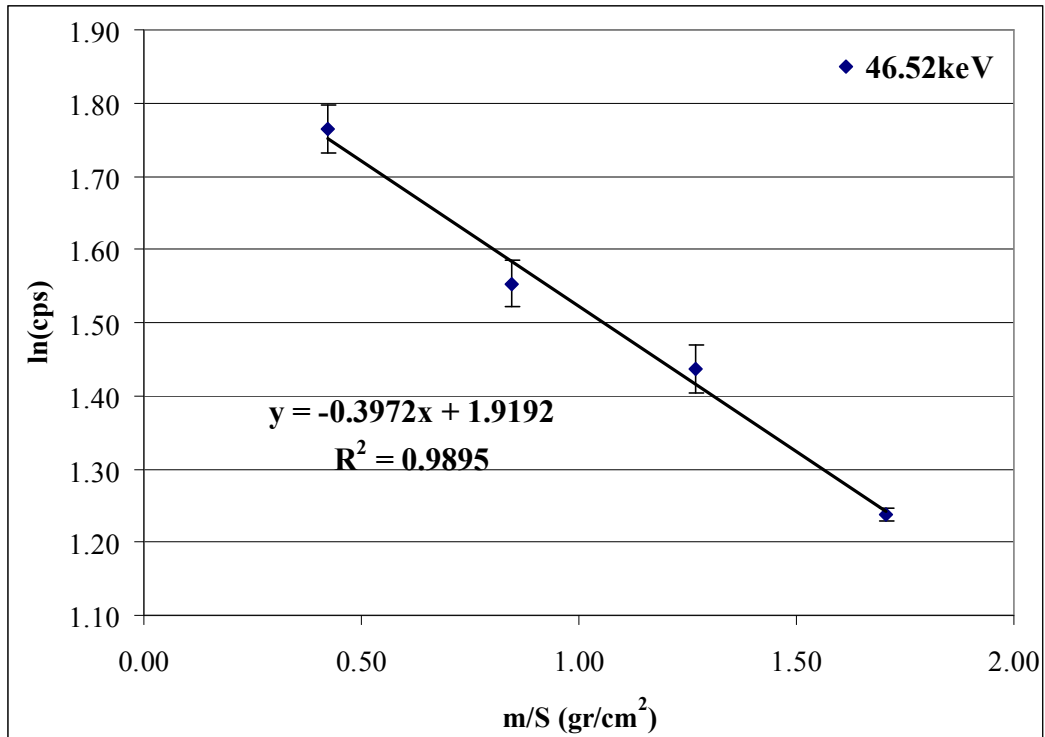
Σχήμα 4.30: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV

Από τα διαγράμματα 4.29 και 4.30 εκτιμήθηκε ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ , ως η κλίση της ευθείας αναδρομής των μετρήσεων. Για τα 46.52keV προέκυψε ότι $\mu = 0.3397\text{cm}^{-1}$ και για τα 186.25keV, $\mu = 0.1127\text{cm}^{-1}$.

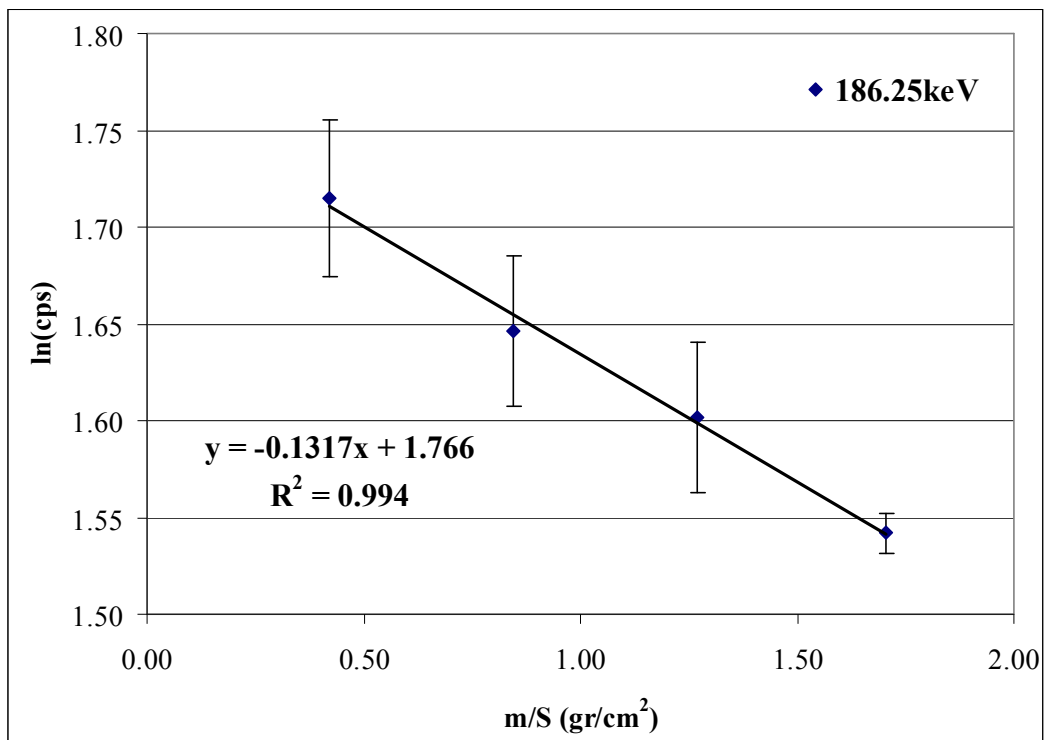
Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκαν και τα διαγράμματα 4.31 και 4.32 για τον υπολογισμό του μ_m .

Από τα διαγράμματα 4.31 & 4.32 εκτιμήθηκε ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης. Για τα 46.52keV προέκυψε ότι $\mu_m = 0.3972\text{cm}^2/\text{gr}$ και για τα 186.25keV, $\mu_m = 0.1317\text{cm}^2/\text{gr}$.

Η συνολική διάρκεια ολοκλήρωσης του πειράματος ήταν μία ημέρα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 4.13.



Σχήμα 4.31: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV



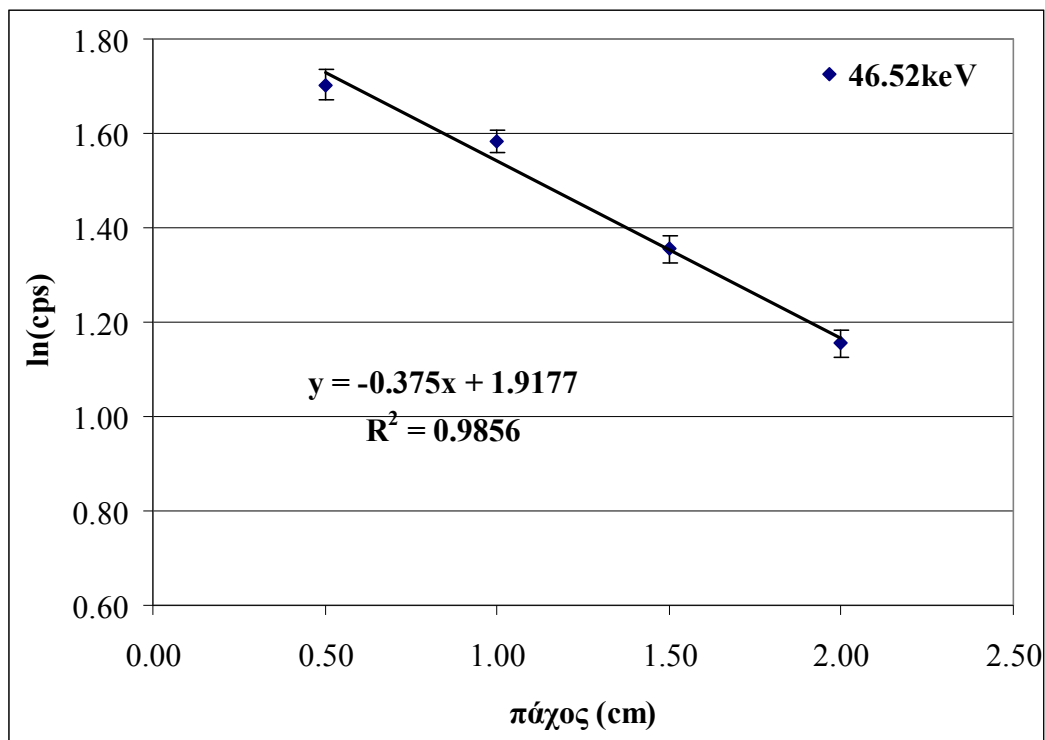
Σχήμα 4.32: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV

Ενέργεια φωτονίων	Πηγή	μ πειράματος (cm ⁻¹)	μ/ρ πειράματος (cm ² /gr)
46.52keV	Ra(point)	0.3397±0.0253	0.3972±0.0289
186.25keV	Ra(point)	0.1127±0.0062	0.1317±0.0072

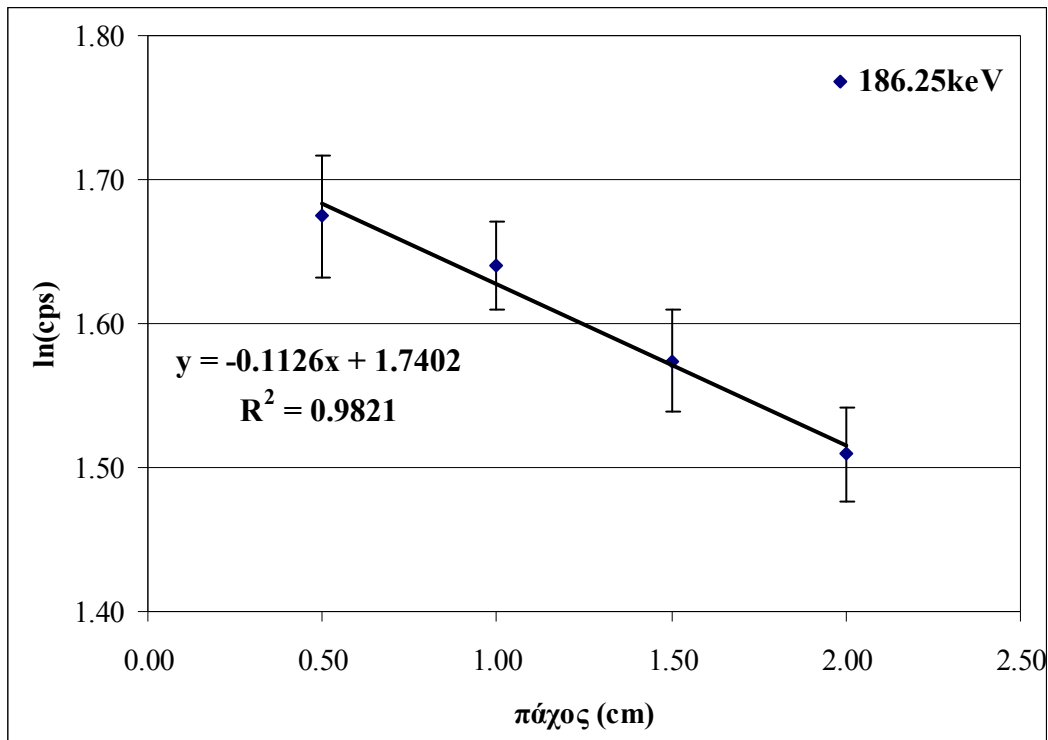
Πίνακας 4.13: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπολογισμού του μ και του μ/ρ με απορροφητή MS-537 (0.063-0.125mm)

4.3.1.4 Κοκκομετρικό κλάσμα 0.125mm – 0.25mm

Το τέταρτο κλάσμα χόματος που αναλύθηκε ήταν αυτό με μέγεθος κόκκου μεταξύ 0.125mm και 0.25mm, με πυκνότητα 0.841gr/cm³ (δείγμα MS538). Οι μετρήσεις έγιναν στον ανιχνευτή «6», με σημειακή πηγή ²²⁶Ra για πάχη απορροφητή 5, 10, 15 και 20mm. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2, προέκυψαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα 4.33 και 4.34 για τον προσδιορισμό του μ.



Σχήμα 4.33: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV



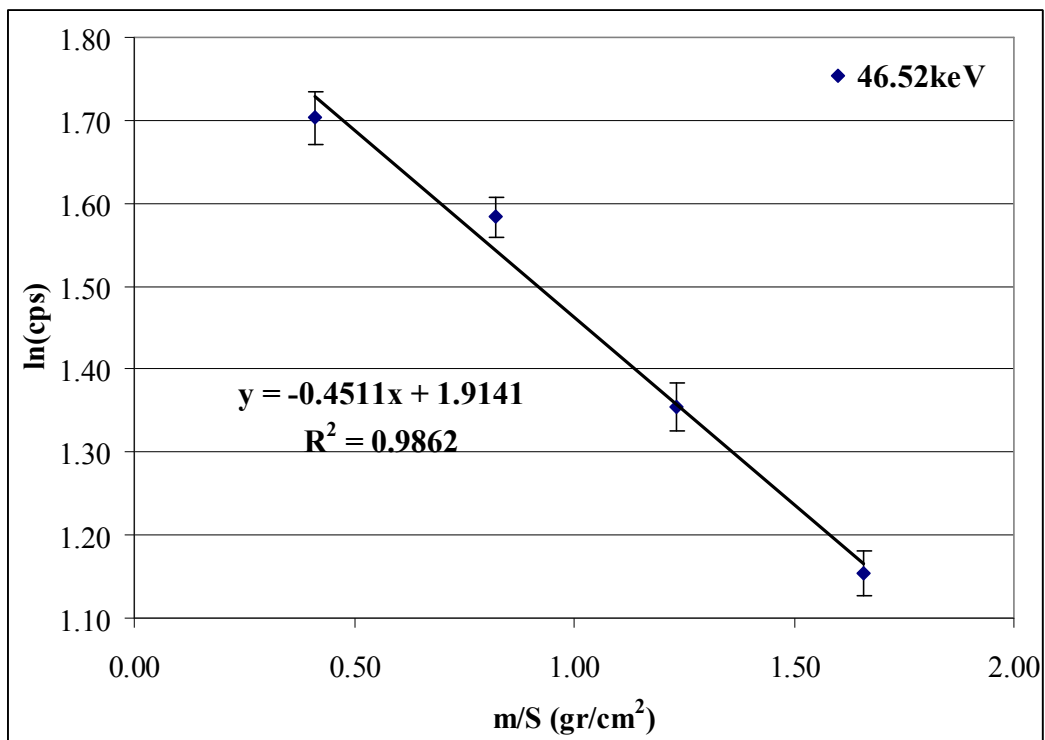
Σχήμα 4.34: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV

Από τα διαγράμματα 4.33 και 4.34 εκτιμήθηκε ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης, ως η κλίση της ευθείας αναδρομής των μετρήσεων. Για τα 46.52keV προέκυψε ότι $\mu = 0.375\text{cm}^{-1}$. Για τα 186.25keV, προέκυψε ότι $\mu = 0.1126\text{cm}^{-1}$.

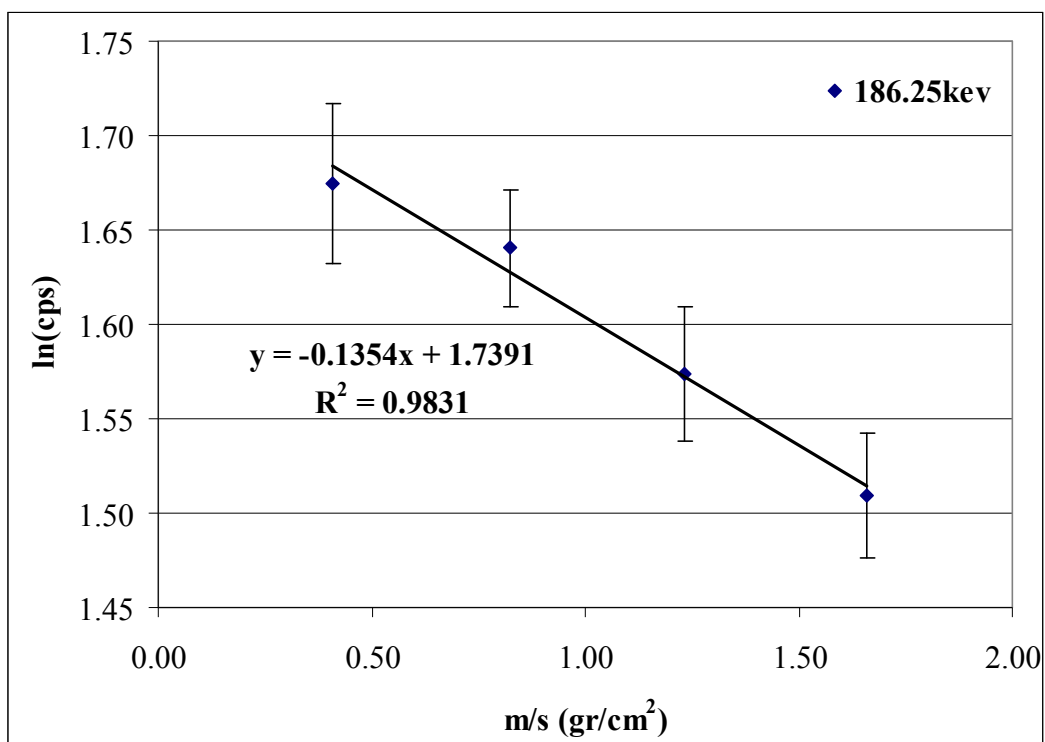
Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκαν και τα διαγράμματα 4.35 και 4.36 για τον υπολογισμό του μ_m .

Από τα διαγράμματα 4.35 και 4.36 εκτιμήθηκε ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης. Για τα 46.52keV προέκυψε ότι $\mu_m = 0.4511\text{cm}^2/\text{gr}$ και για τα 186.25keV, $\mu_m = 0.1354\text{cm}^2/\text{gr}$.

Η συνολική διάρκεια ολοκλήρωσης του πειράματος ήταν μία ημέρα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 4.14.



Σχήμα 4.35: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV



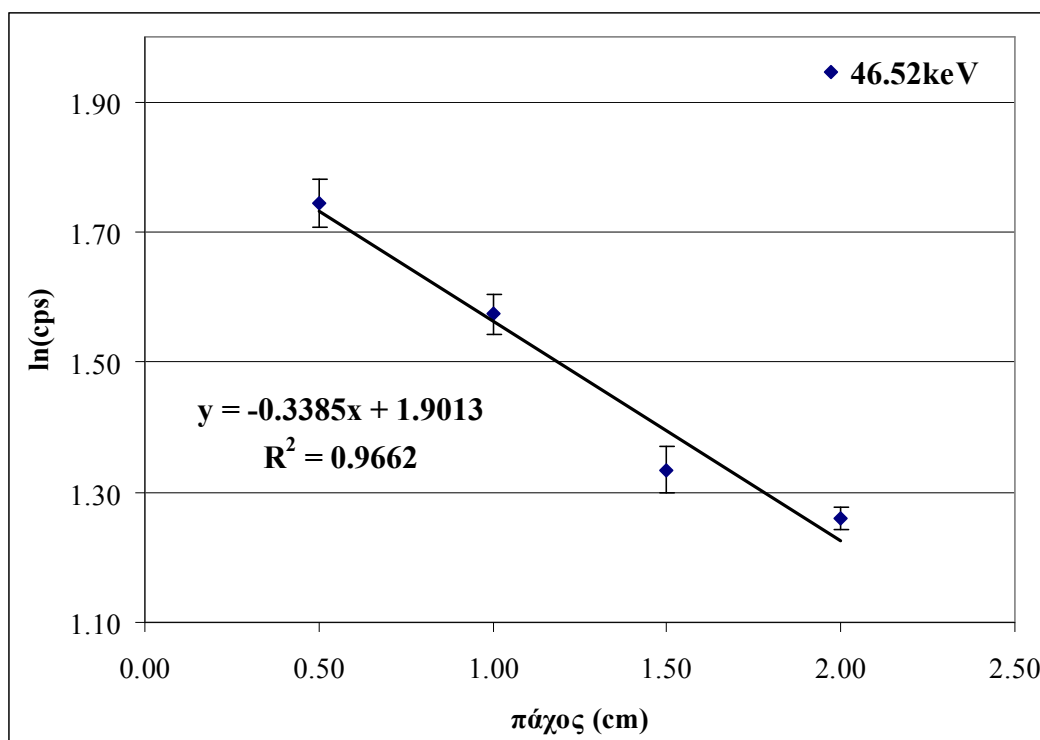
Σχήμα 4.36: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV

Ενέργεια φωτονίων	Πηγή	μ πειράματος (cm ⁻¹)	μ/ρ πειράματος (cm ² /gr)
46.52keV	Ra(point)	0.3750±0.0320	0.4511±0.0400
186.25keV	Ra(point)	0.1126±0.0113	0.1354±0.0133

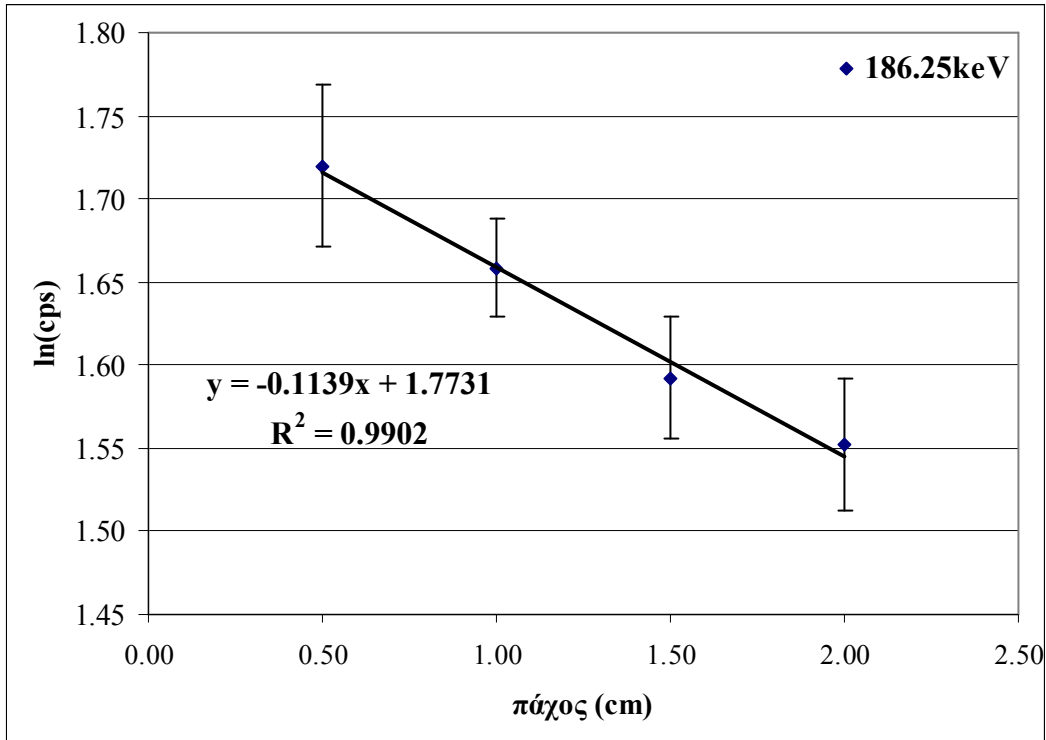
Πίνακας 4.14: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπολογισμού του μ και του μ/ρ με απορροφητή MS538 (0.125-0.25mm)

4.3.1.5 Κοκκομετρικό κλάσμα 0.25–0.5mm

Το πέμπτο κλάσμα χόματος που αναλύθηκε ήταν αυτό με μέγεθος κόκκου μεταξύ 0.25mm και 0.5mm και πυκνότητα 0.7449gr/cm³ (δείγμα MS539). Οι μετρήσεις έγιναν με τον ανιχνευτή «6» για σημειακή πηγή ²²⁶Ra και πάχη απορροφητή 5, 10, 5 και 20mm. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2, προέκυψαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα 4.37 και 4.38 για τον προσδιορισμό του.



Σχήμα 4.37: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV



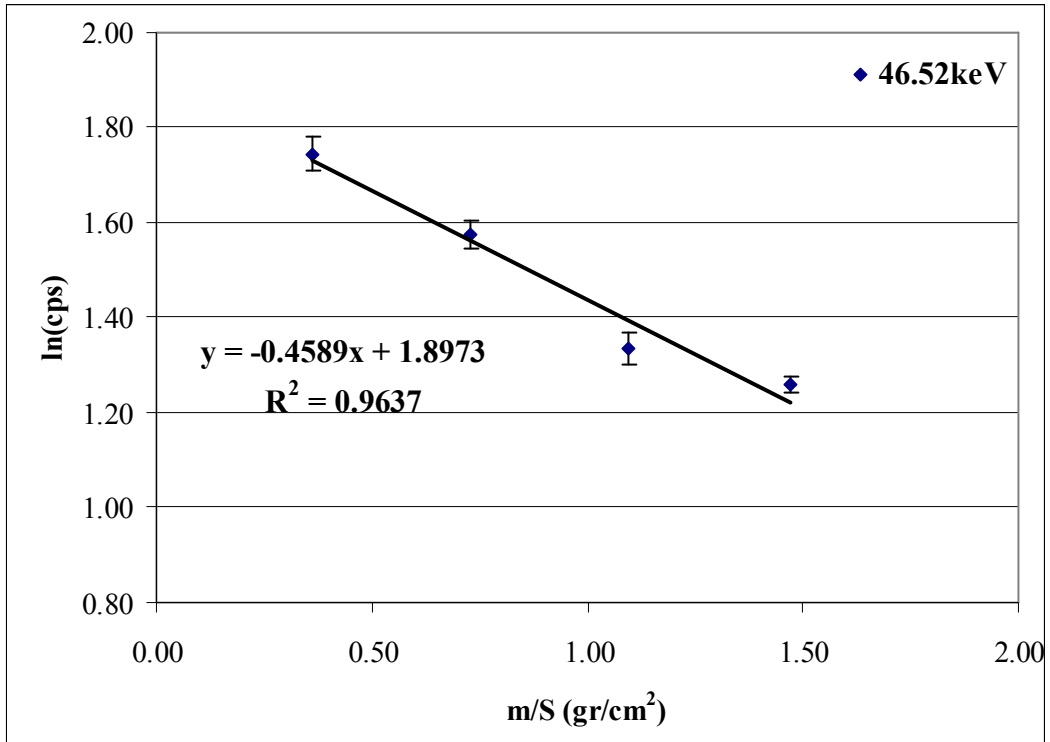
Σχήμα 4.38: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV

Από τα διαγράμματα 4.37 και 4.38 εκτιμήθηκε ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ , ως η κλίση της ευθείας αναδρομής των μετρήσεων. Για τα 46.52keV προέκυψε ότι $\mu = 0.3385\text{cm}^{-1}$ και για τα 186.25keV, $\mu = 0.1139\text{cm}^{-1}$.

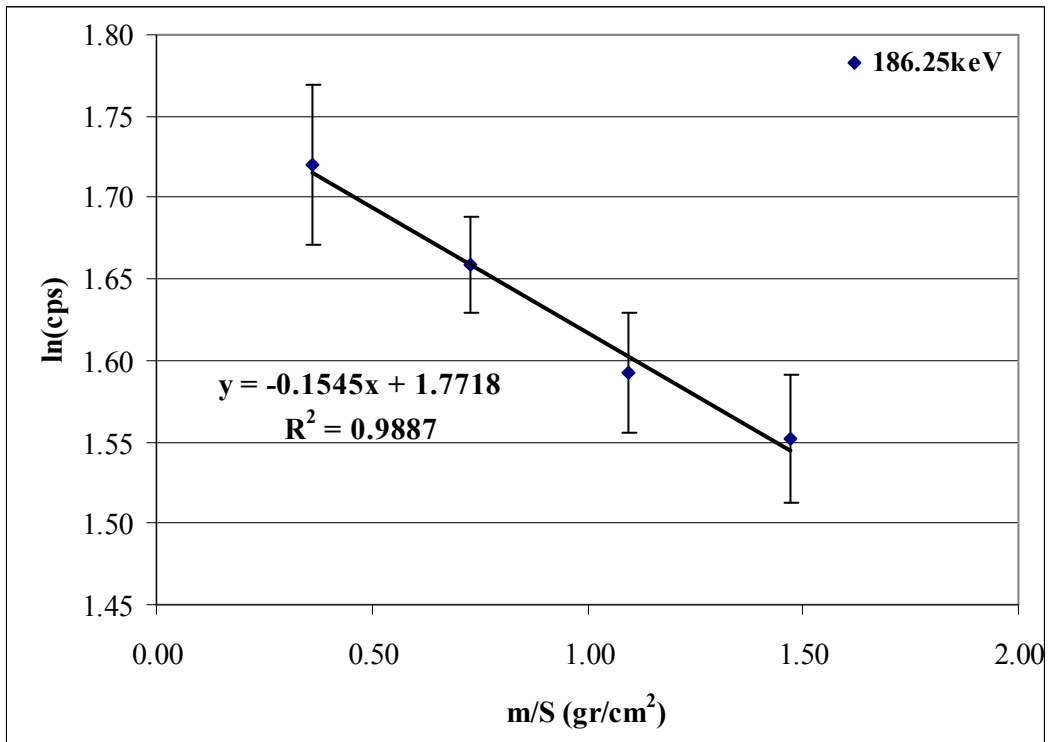
Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκαν και τα διαγράμματα 4.39 και 4.40 για τον προσδιορισμό του μ_m .

Από τα διαγράμματα 4.39 και 4.40 εκτιμήθηκε ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης. Για τα 46.52keV προέκυψε ότι $\mu_m = 0.4589\text{cm}^2/\text{gr}$ και για τα 186.25keV, $\mu_m = 0.1545\text{cm}^2/\text{gr}$.

Η συνολική διάρκεια ολοκλήρωσης του πειράματος ήταν μία ημέρα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 4.15.



Σχήμα 4.39: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV



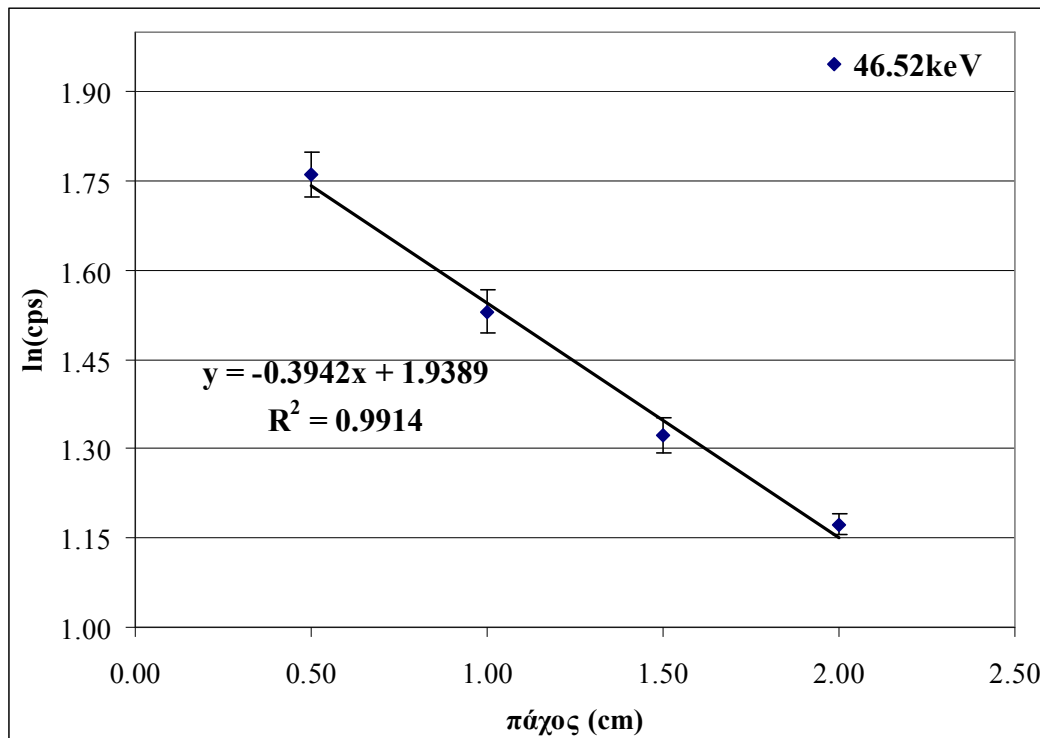
Σχήμα 4.40: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV

Ενέργεια φωτονίων	Πηγή	μ πειράματος (cm ⁻¹)	μ/ρ πειράματος (cm ² /gr)
46.52keV	Ra(point)	0.3385±0.0448	0.4589±0.0630
186.25keV	Ra(point)	0.1139±0.0080	0.1545±0.0117

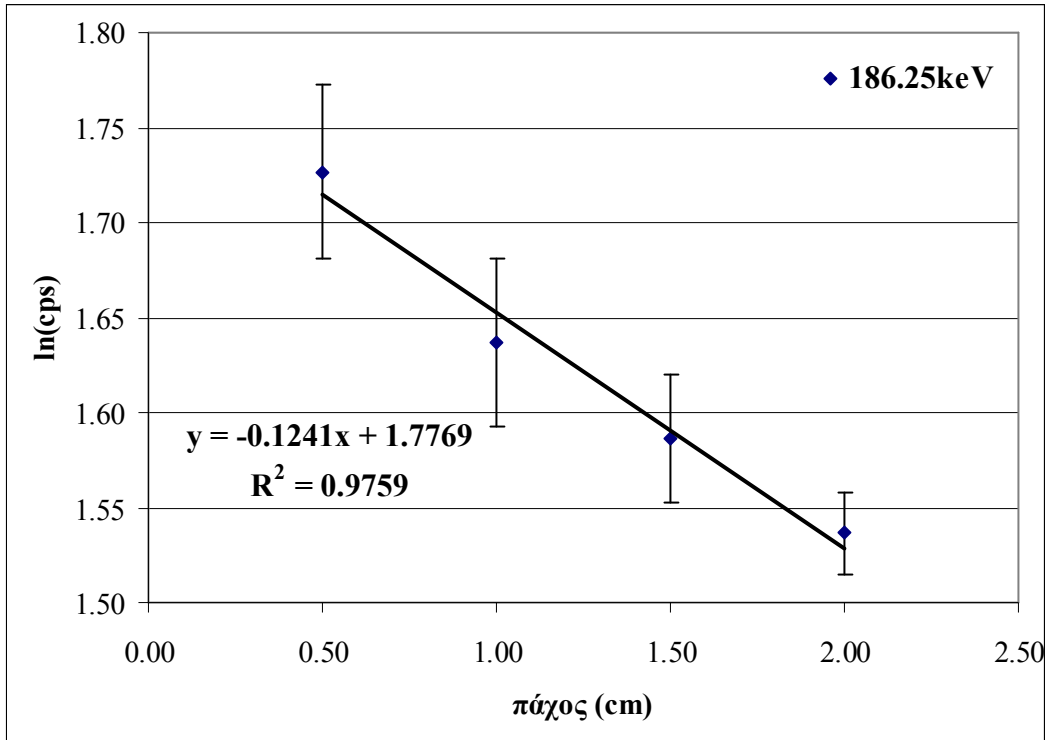
Πίνακας 4.15: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπολογισμού του μ και του μ/ρ με απορροφητή MS-539 (0.25-0.5mm)

4.3.1.6 Κοκκομετρικό κλάσμα 0.5– 1mm

Το έκτο κλάσμα χώματος που αναλύθηκε ήταν αυτό με μέγεθος κόκκου μεταξύ 0.5mm και 1mm και πυκνότητα 0.836gr/cm³ (δείγμα MS540). Οι μετρήσεις έγιναν στον ανιχνευτή «6», με σημειακή πηγή ²²⁶Ra για πάχη απορροφητή 5, 10, 15 και 20mm. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2 προέκυψαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα 4.41 και 4.42 για τον προσδιορισμό του μ.



Σχήμα 4.41: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV



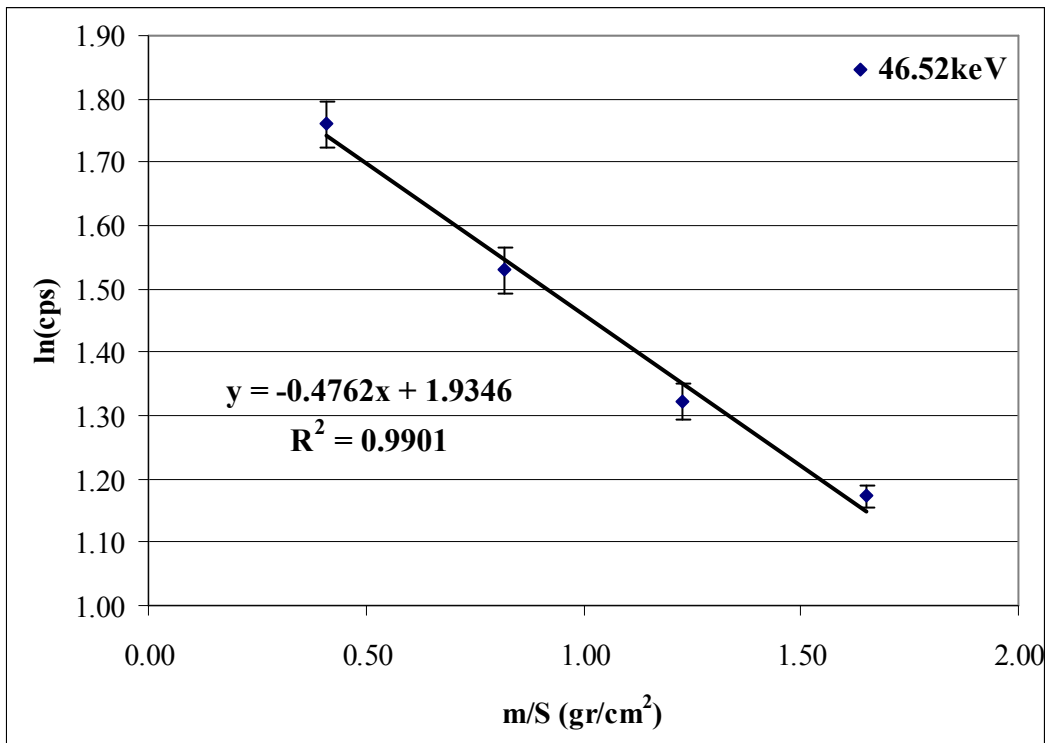
Σχήμα 4.42: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV

Από τα διαγράμματα 4.41 και 4.42 εκτιμήθηκε ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης ως η κλίση της ευθείας αναδρομής των μετρήσεων. Για τα 46.52keV προέκυψε ότι $\mu = 0.3942\text{cm}^{-1}$ και για τα 186.25keV, $\mu = 0.1241\text{cm}^{-1}$.

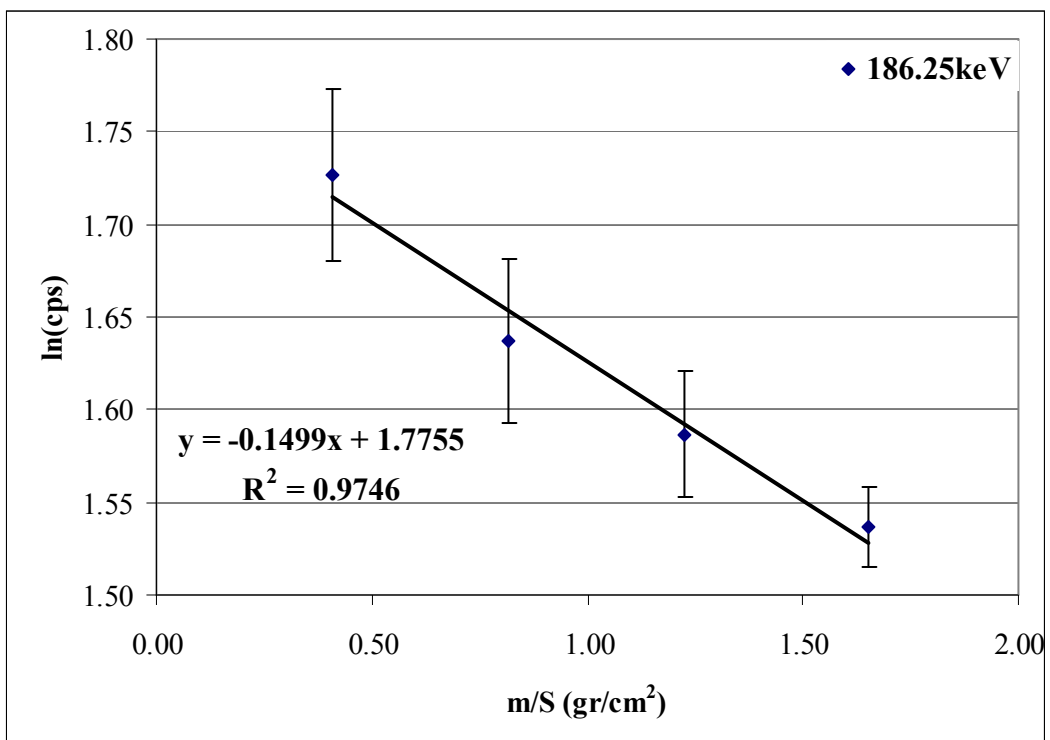
Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκαν και τα διαγράμματα 4.43 και 4.44 για τον προσδιορισμό του μ_m .

Από τα διαγράμματα 4.43 και 4.44 υπολογίζεται ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης. Για τα 46.52keV προέκυψε ότι $\mu_m = 0.4762\text{cm}^2/\text{gr}$ και για τα 186.25keV, $\mu_m = 0.1499\text{cm}^2/\text{gr}$.

Η συνολική διάρκεια ολοκλήρωσης του πειράματος ήταν μία ημέρα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 4.16:



Σχήμα 4.43: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV



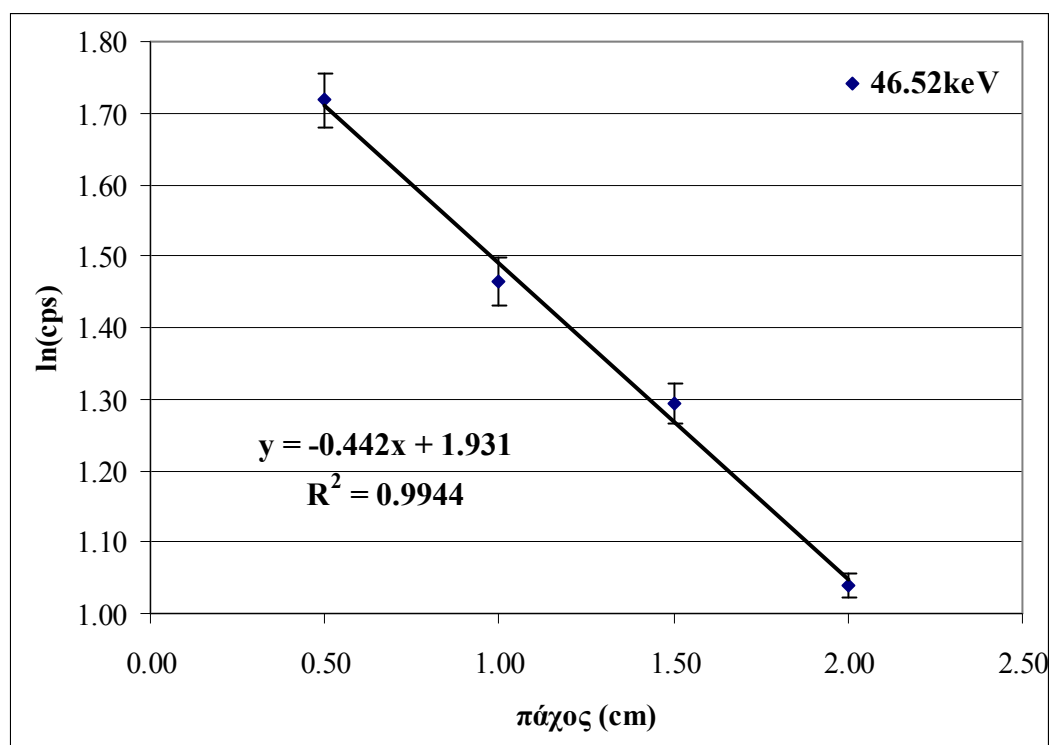
Σχήμα 4.44: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV

Ενέργεια φωτονίων	Πηγή	μ πειράματος (cm ⁻¹)	μ/ρ πειράματος (cm ² /gr)
46.52keV	Ra(point)	0.3942±0.0259	0.4762±0.0138
186.25keV	Ra(point)	0.1241±0.0138	0.1499±0.0171

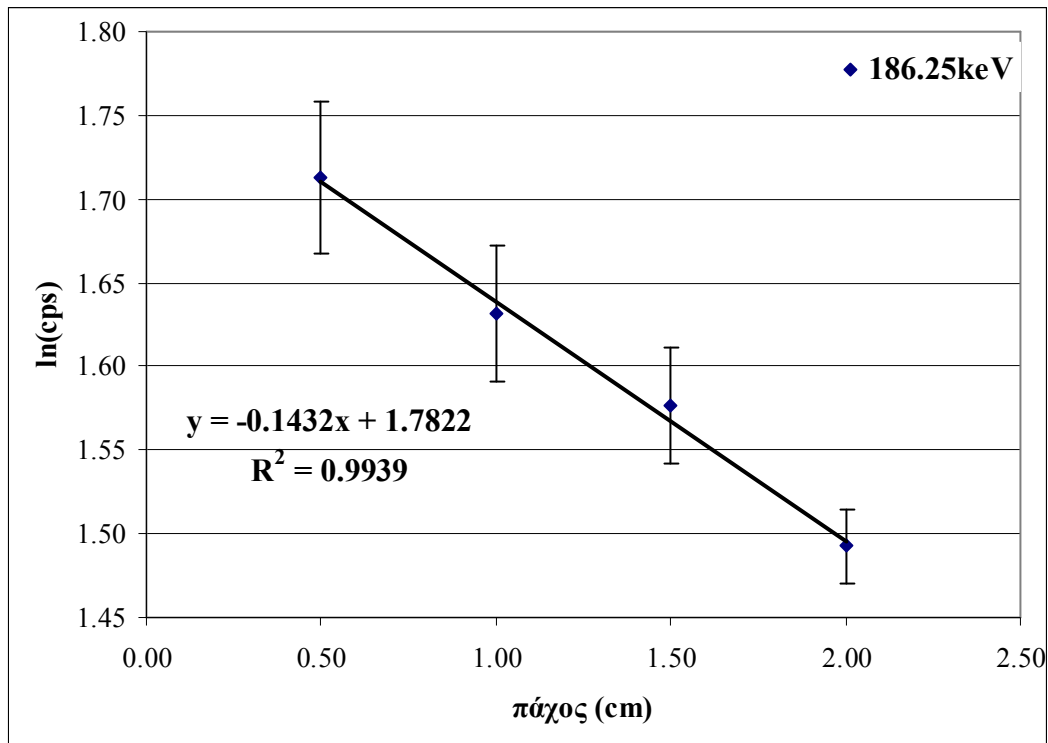
Πίνακας 4.16: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπολογισμού του μ και του μ/ρ με απορροφητή MS540 (0.5 – 1mm)

4.3.1.7 Κοκκομετρικό κλάσμα 1mm – 2mm

Το έβδομο κλάσμα χόματος που αναλύθηκε ήταν αυτό με μέγεθος κόκκου μεταξύ 1mm και 2mm και πυκνότητα 0.882gr/cm³ (δείγμα MS541). Οι μετρήσεις έγιναν με τον ανιχνευτή «6», σημειακή πηγή ²²⁶Ra για πάχη απορροφητή 5, 10, 15 και 20mm. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2, προέκυψαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα 4.45 και 4.46 για τον προσδιορισμό του μ.



Σχήμα 4.45: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV



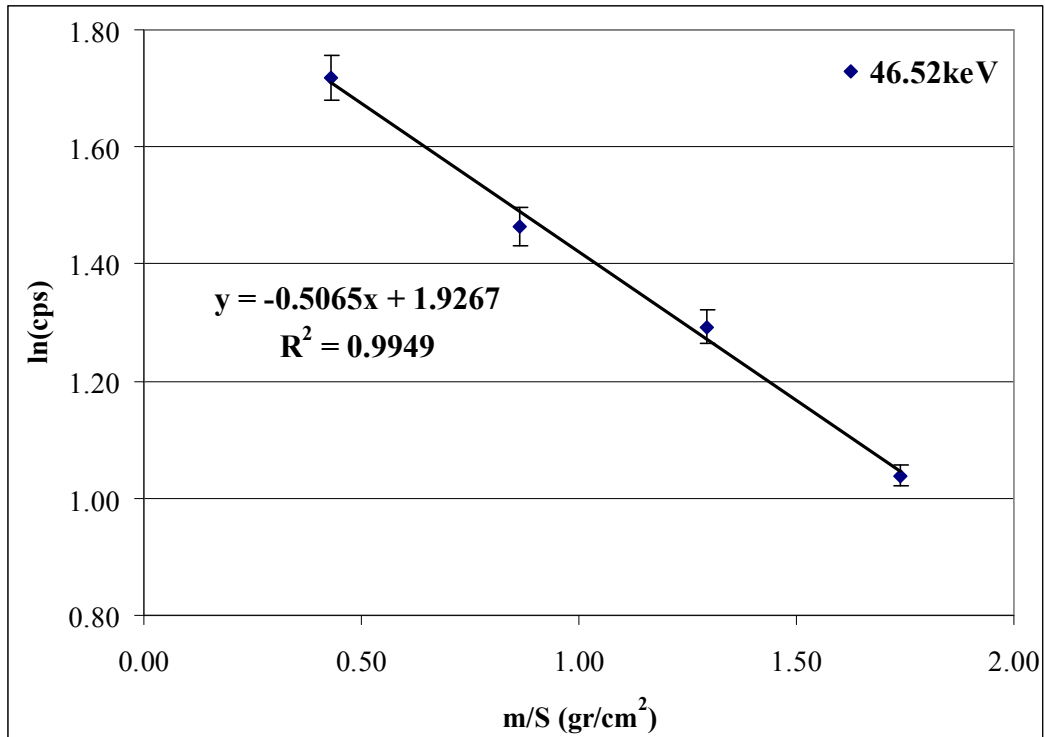
Σχήμα 4.46: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV

Από τα διαγράμματα 4.45 και 4.46 εκτιμήθηκε ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης, ως η κλίση της ευθείας αναδρομής των μετρήσεων. Για τα 46.52keV προέκυψε ότι $\mu = 0.442\text{cm}^{-1}$ και για τα 186.25keV , $\mu = 0.1432\text{cm}^{-1}$.

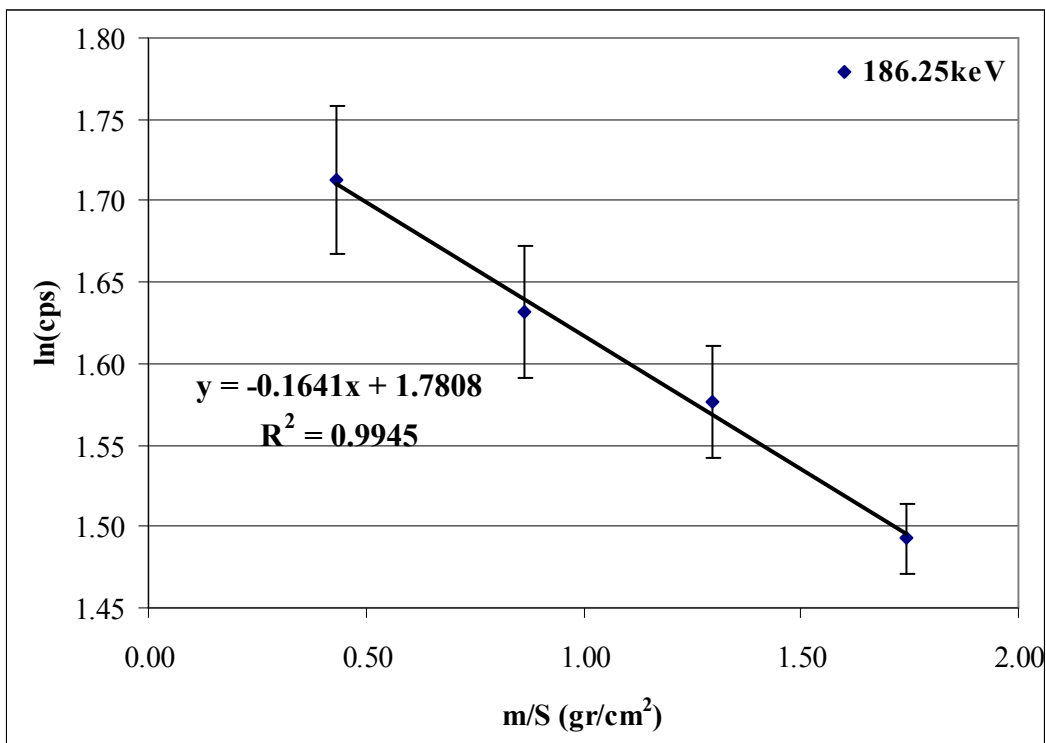
Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκαν και τα διαγράμματα 4.47 και 4.48 για τον προσδιορισμό του μ_m .

Από τα διαγράμματα 4.47 και 4.48 εκτιμήθηκε ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης μ . Για τα 46.52keV προέκυψε ότι $\mu_m = 0.5065\text{cm}^2/\text{gr}$ και για τα 186.25keV , $\mu_m = 0.1641\text{cm}^2/\text{gr}$.

Η συνολική διάρκεια ολοκλήρωσης του πειράματος ήταν μία ημέρα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 4.17:



Σχήμα 4.47: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV



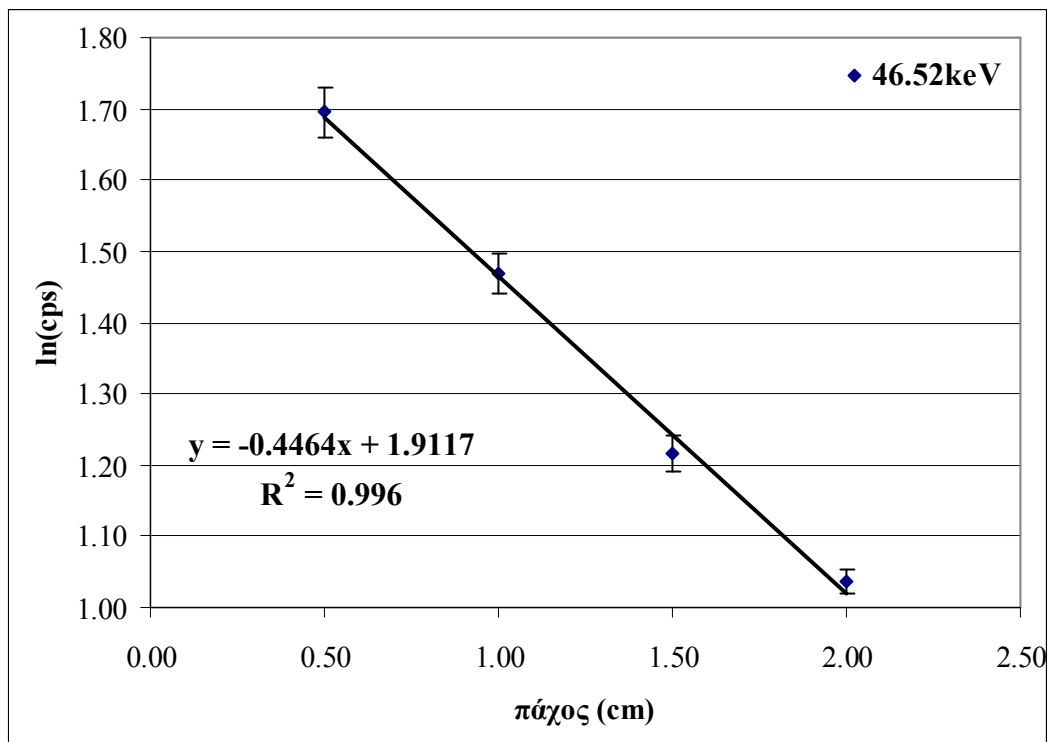
Σχήμα 4.48: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV

Ενέργεια φωτονίων	Πηγή	μ πειράματος (cm^{-1})	μ/ρ πειράματος (cm^2/gr)
46.52keV	Ra(point)	0.4420 ± 0.0234	0.5065 ± 0.0256
186.25keV	Ra(point)	0.1432 ± 0.0080	0.1641 ± 0.0087

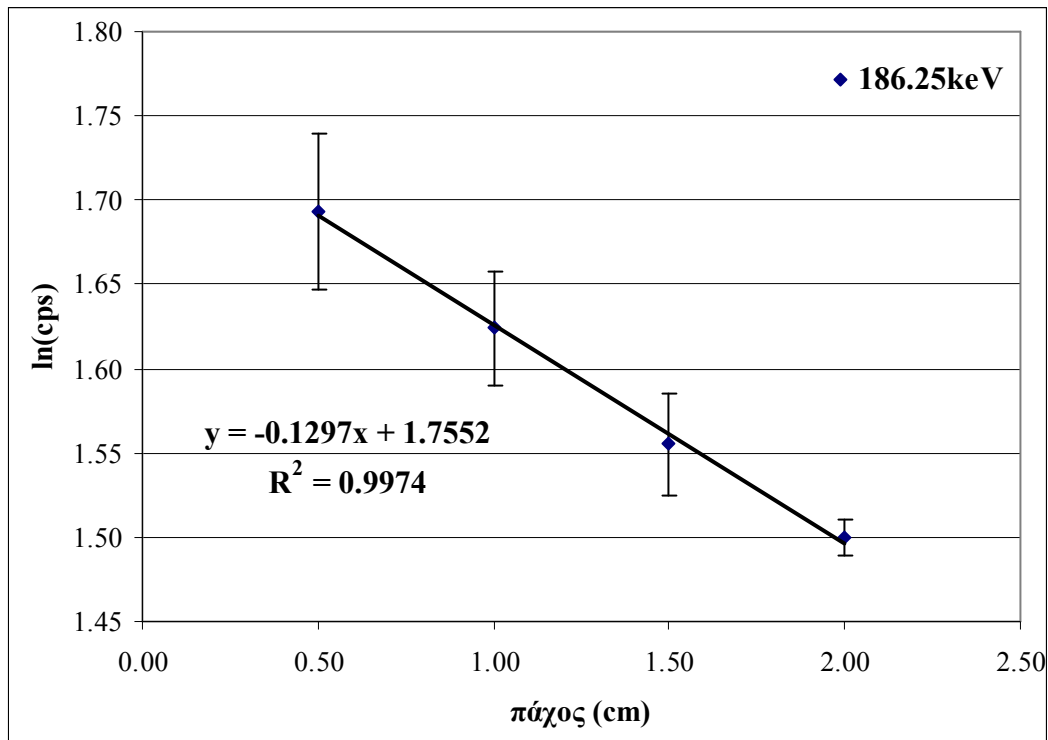
Πίνακας 4.17: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων για το μ και το μ/ρ με απορροφητή MS541 (1-2mm)

4.3.1.8 Κοκκομετρικό κλάσμα > 2mm

Το όγδοο κλάσμα χώματος που αναλύθηκε ήταν αυτό με μέγεθος κόκκου μεγαλύτερο από 2mm και πυκνότητα $1.042\text{gr}/\text{cm}^3$ (δείγμα MS542). Οι μετρήσεις έγιναν στον ανιχνευτή «6», με σημειακή πηγή ^{226}Ra , για πάχη απορροφητή 5, 10, 15 και 20mm. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2 κατασκευάστηκαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα 4.49 και 4.50 για τον προσδιορισμό του μ .



Σχήμα 4.49: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV



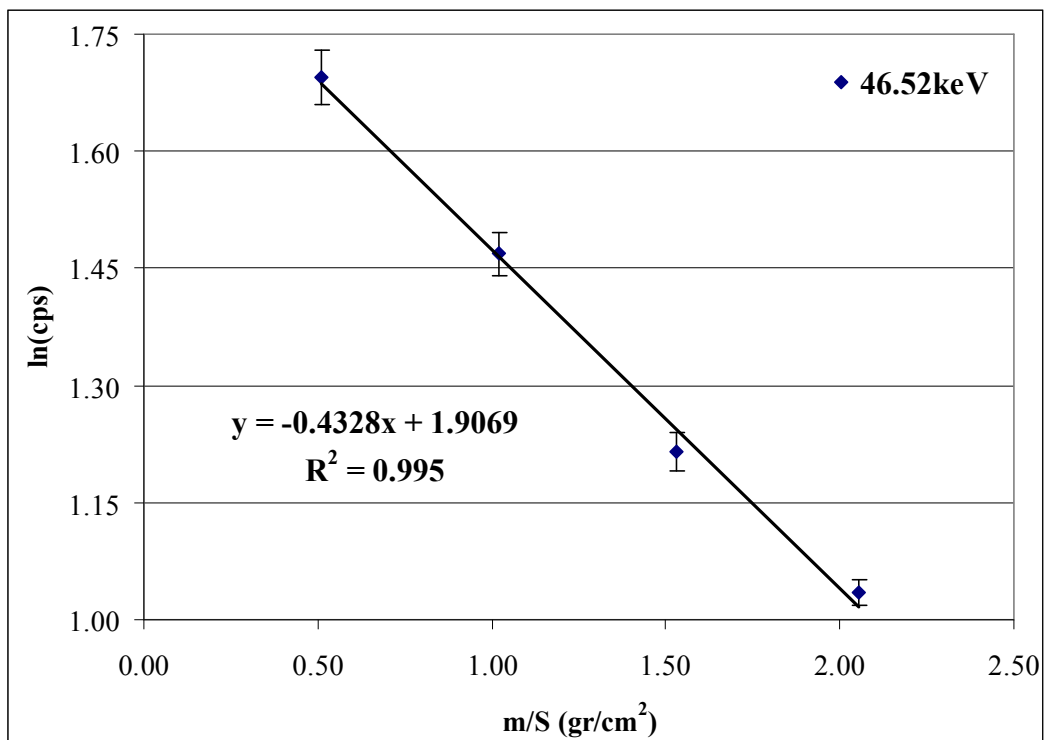
Σχήμα 4.50: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV

Από τα διαγράμματα 4.49 και 4.50 εκτιμήθηκε ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης, ως η κλίση της ευθείας αναδρομής των μετρήσεων. Για τα 46.52keV προέκυψε ότι $\mu = 0.4464\text{cm}^{-1}$ και για τα 186.25keV, $\mu = 0.1297\text{cm}^{-1}$.

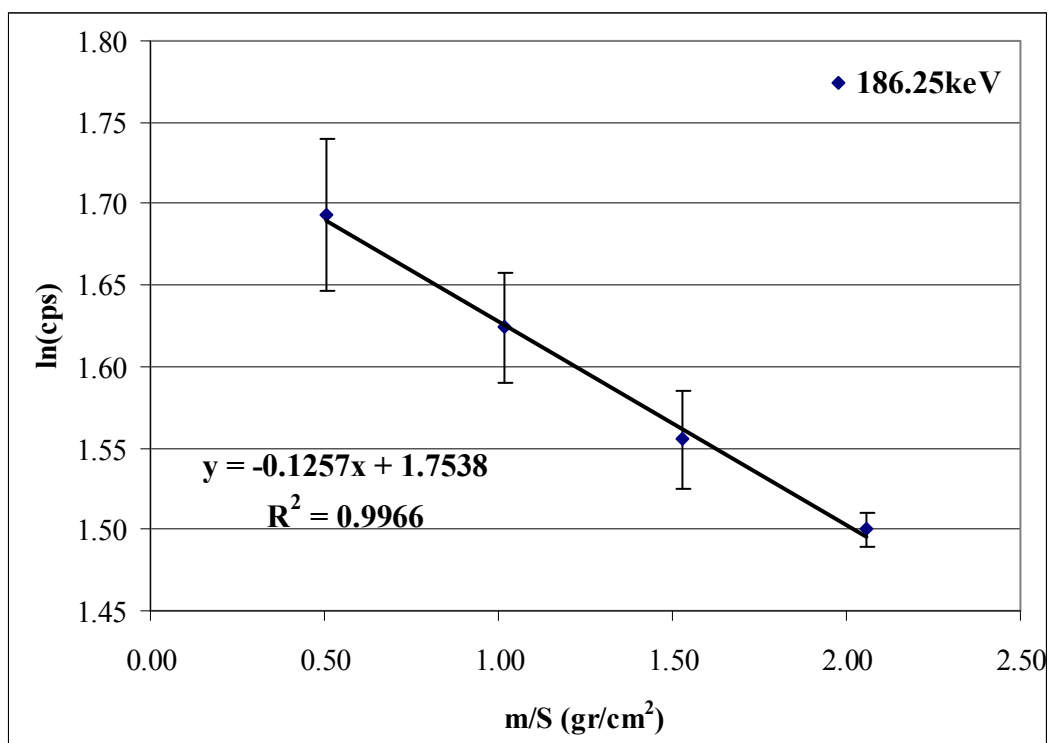
Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκαν και τα διαγράμματα 4.51 και 4.52 για τον προσδιορισμό του μ_m .

Από τα διαγράμματα 4.51 και 4.52 εκτιμήθηκε ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης. Για τα 46.52keV προέκυψε ότι $\mu_m = 0.4328\text{cm}^2/\text{gr}$ και για τα 186.25keV, $\mu_m = 0.1257\text{cm}^2/\text{gr}$.

Η συνολική διάρκεια ολοκλήρωσης του πειράματος ήταν μία ημέρα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 4.18:



Σχήμα 4.51: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV



Σχήμα 4.52: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV

Ενέργεια φωτονίων	Πηγή	μ πειράματος (cm ⁻¹)	μ/ρ πειράματος (cm ² /gr)
46.52keV	Ra(point)	0.4464±0.0200	0.4328±0.0050
186.25keV	Ra(point)	0.1297±0.0220	0.1257±0.0050

Πίνακας 4.18: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπολογισμού του μ και του μ/ρ με απορροφητή MS542 (>2mm)

4.3.1.9 Μελέτη της επίδρασης της φυσικής ραδιενέργειας του δείγματος στον προσδιορισμό των συντελεστών μ και μ/ρ.

Κατά τον πειραματικό προσδιορισμό των συντελεστών εξασθένισης ενός περιβαλλοντικού υλικού – όπως το χώμα – στην παρούσα ΔΕ χρησιμοποιούνται πηγές φυσικών ραδιοϊσοτόπων, τα οποία απαντώνται και στο ίδιο το δείγμα. Αυτό έχει ως συνέπεια, η φωτοκορυφή που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των συντελεστών να διαμορφώνεται αθροιστικά, τόσο από φωτόνια της εξωτερικής πηγής, όσο και από φωτόνια που εκπέμπονται από το ίδιο το δείγμα. Δεδομένου ότι κατά τη διάρκεια του πειράματος, η χρησιμοποιούμενη ποσότητα υλικού του δείγματος μεταβάλλεται, η συνεισφορά του δεν είναι σταθερή και επομένως μπορεί να επηρεάσει τον προσδιορισμό των συντελεστών.

Υπό κανονικές συνθήκες, η ραδιενέργεια της χρησιμοποιούμενης πηγής θα είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτή της μικρής ποσότητας του δείγματος. Αναμένεται επομένως, η συνεισφορά των φωτονίων του δείγματος να είναι αμελητέα. Στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ μελετήθηκε πειραματικά η υπόθεση αυτή, ώστε να επιβεβαιωθεί. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το χώμα MS538, του οποίου η ειδική ραδιενέργεια ²¹⁰Pb έχει προσδιοριστεί στα 200±5 Bq/kg [Δ.Ε. Παλαμάρα, 2008]. Για το προσδιορισμό της συνεισφοράς της ακτινοβολίας του δείγματος ακολουθήθηκε η ίδια μεθοδολογία που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2, χωρίς όμως την προσθήκη της πηγής, έτσι ώστε να καταμετράται η συνεισφορά της ραδιενέργειας του δείγματος για κάθε πάχος. Προέκυψε με τον τρόπο αυτό ο ρυθμός καταμέτρησης φωτονίων ενέργειας 46.52 keV και 186.25 keV, τα οποία οφείλονται στο υλικό του δείγματος για κάθε στάθμη πλήρωσης του δοχείου. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ο προσδιορισμός των συντελεστών εξασθένισης μ και μ/ρ, όπως

περιγράφεται στην παράγραφο 3.2. Στους πίνακες 4.19 και 4.20 παρουσιάζεται ο ρυθμός καταμέτρησης φωτονίων (i) από το δείγμα, (ii) το συνδυασμό πηγής και δείγματος και (iii) ο καθαρός ρυθμός καταγραφής φωτονίων της πηγής για τις ενέργειες 46.52keV και για τα 186.25keV.

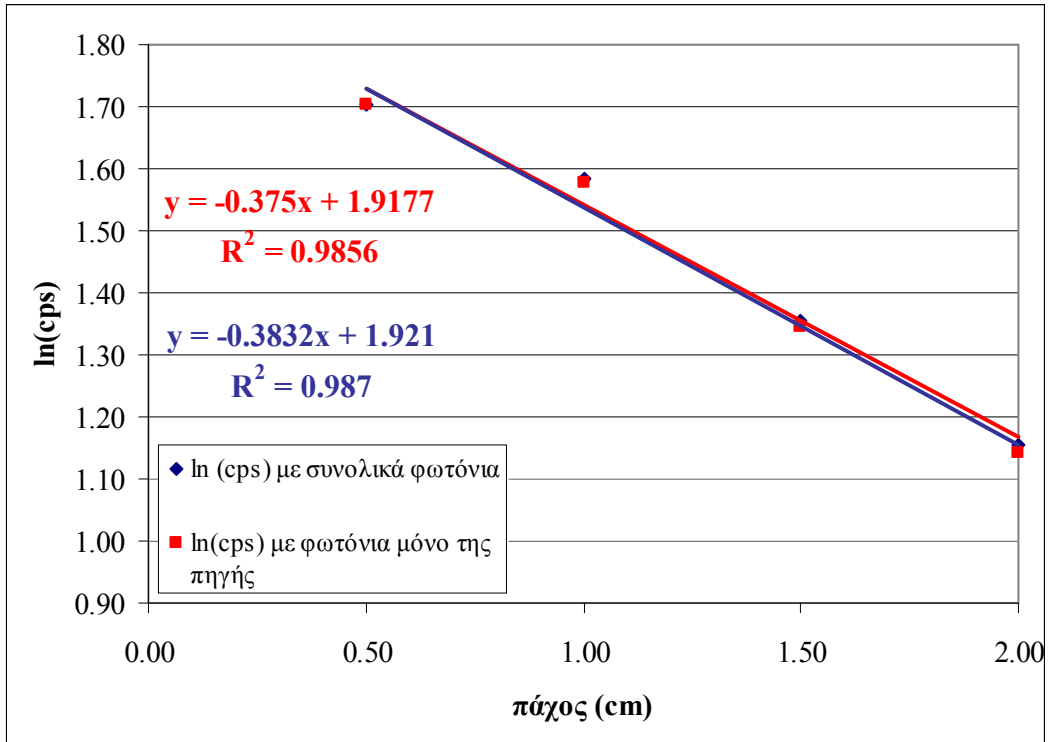
πάχος δείγματος (cm)	Φωτόνια του δείγματος (cps)	Συνολικά Φωτόνια (cps)	Φωτόνια της πηγής μόνο (cps)
0.50	Δ/Α	5.490±0.103	5.492±0.103
1.00	0.030±0.006	4.870±0.074	4.842±0.074
1.50	0.040±0.007	3.880±0.082	3.839±0.082
2.00	0.04±0.002	3.170±0.075	3.133±0.075

Πίνακας 4.19: Ρυθμός καταμέτρησης φωτονίων από την πηγή και από το δείγμα για ενέργεια 46.52keV

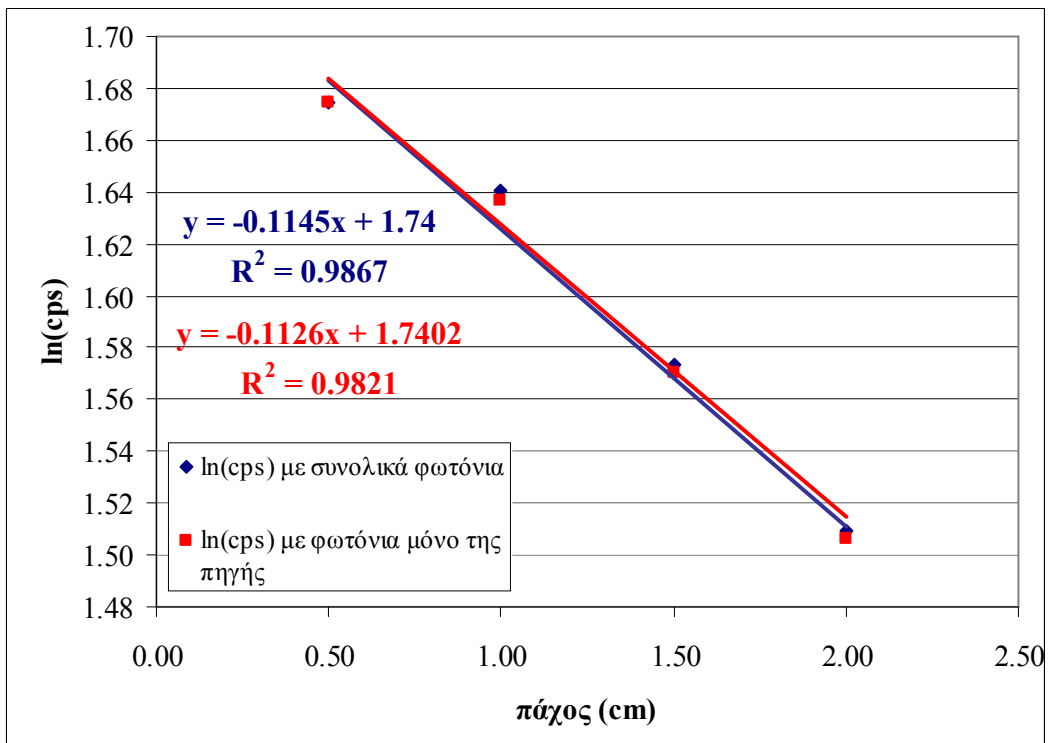
πάχος δείγματος (cm)	Φωτόνια του δείγματος (cps)	Συνολικά Φωτόνια (cps)	Φωτόνια της πηγής μόνο (cps)
0.50	Δ/Α	5.340±0.136	5.337±0.136
1.00	0.020±0.007	5.16±0.097	5.138±0.097
1.50	0.020±0.008	4.820±0.108	4.806±0.108
2.00	0.010±0.002	4.520±0.099	4.509±0.099

Πίνακας 4.20: Ρυθμός καταμέτρησης φωτονίων από την πηγή και από το δείγμα για ενέργεια 186.25keV

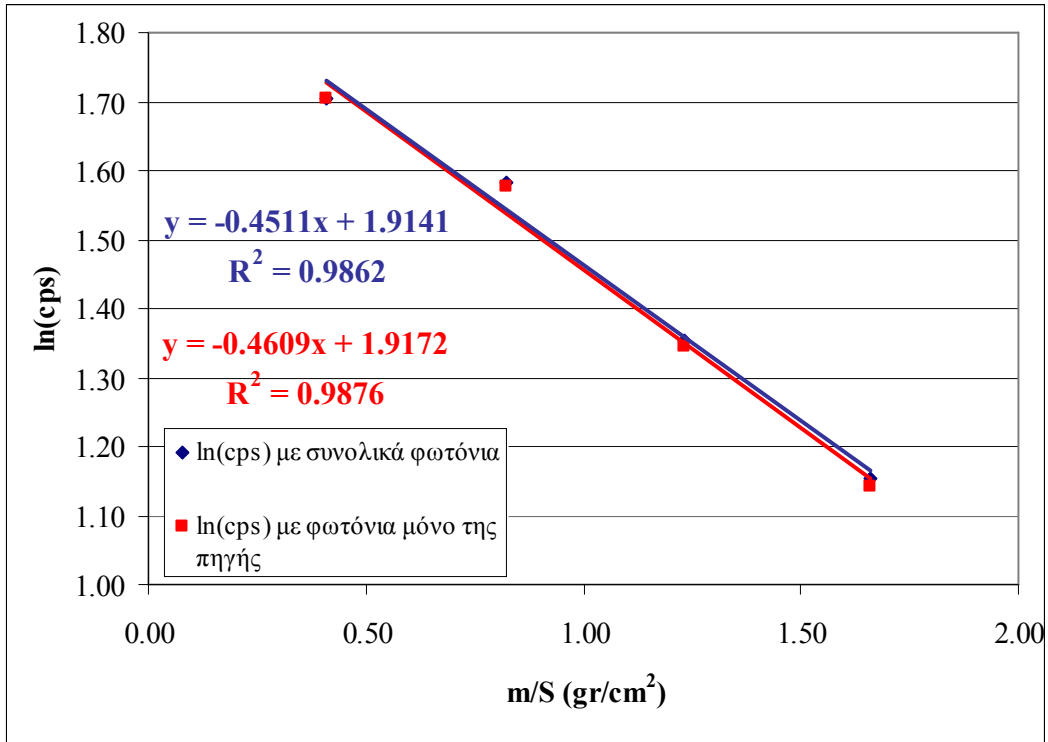
Στα σχήματα 4.53 έως 4.56 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν και στα οποία γίνεται σύγκριση των συντελεστών μ και μ/ρ για τις δύο ενέργειες, όπως υπολογίζονται με και χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η συνεισφορά των φωτονίων του δείγματος.



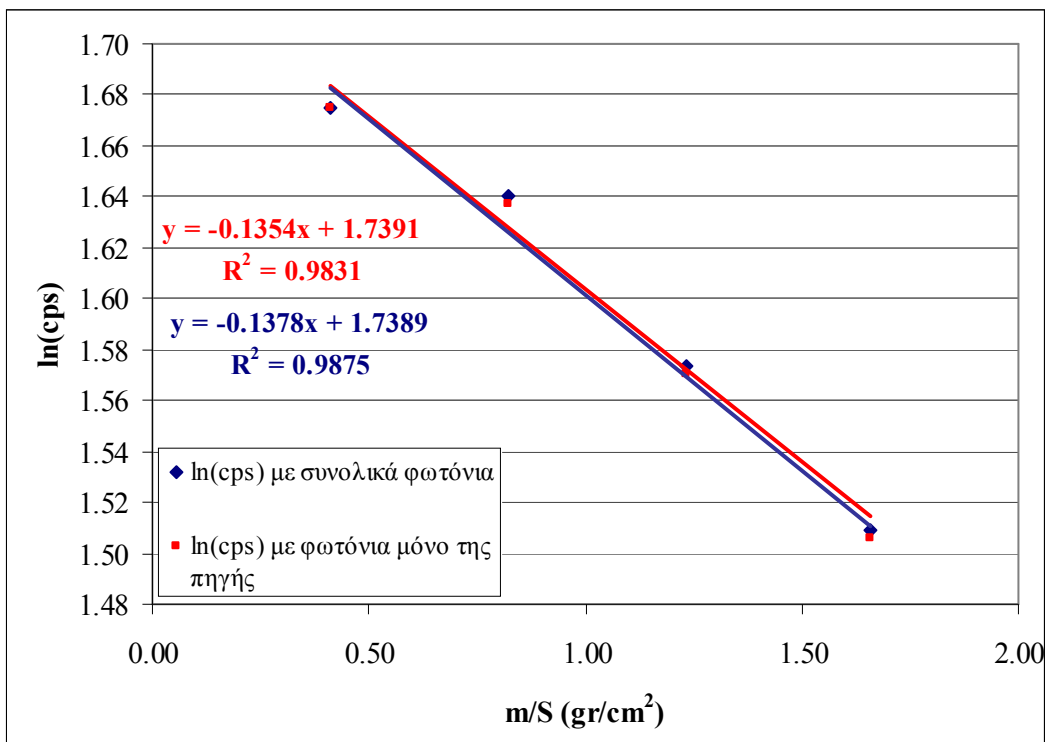
Σχήμα 4.53: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV (με συνολικά φωτόνια και φωτόνια μόνο της πηγής)



Σχήμα 4.54: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV (με συνολικά φωτόνια και φωτόνια μόνο της πηγής)



Σχήμα 4.55: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV (με συνολικά φωτόνια και φωτόνια μόνο της πηγής)



Σχήμα 4.56: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV (με συνολικά φωτόνια και φωτόνια μόνο της πηγής)

Η συνολική διάρκεια των πειραμάτων ήταν μία ημέρα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 4.21 :

Ενέργεια φωτονίων	μ πειράματος με συνολικά φωτόνια(cm^{-1})	μ πειράματος με φωτόνια μόνο της πηγής (cm^{-1})	μ/ρ πειράματος με συνολικά φωτόνια (cm^2/gr)	μ/ρ πειράματος με φωτόνια μόνο της πηγής (cm^2/gr)
46.52keV	0.3750±0.0320	0.3832±0.0330	0.4511±0.0400	0.4609±0.0390
186.25keV	0.1126±0.0113	0.1145±0.0114	0.1354±0.0133	0.1378±0.0133

Πίνακας 4.21 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων για το μ και το μ/ρ με απορροφητή MS538 με συνολικά φωτόνια και φωτόνια μόνο της πηγής

Όπως φαίνεται και από τον πίνακα 4.21 , οι διαφορές μεταξύ των συντελεστών που προσδιορίζονται με τη συνεισφορά του δείγματος και των αντίστοιχων συντελεστών από την καθαρή ακτινοβολία της πηγής είναι κάθε φορά μικρότερες από την αντίστοιχη αβεβαιότητα. Επιβεβαιώνεται επομένως ότι, για υλικά με τυπικά επίπεδα ραδιενέργειας και πηγές επαρκούς ισχύος, δεν υπάρχει ανάγκη προσδιορισμού και αφαίρεσης της συνεισφοράς της φυσικής ραδιενέργειας του δείγματος.

4.3.2 Αποτελέσματα υπολογισμού των συντελεστών μ και η από κώδικες H/Y

Με τον ίδιο τρόπο που περιγράφεται στην παράγραφο 4.2.2, υπολογίζονται από το πρόγραμμα factor οι συντελεστές μ_α , η_α , η_π και η_{π^*} . Για τον υπολογισμό των συντελεστών η_π και η_{π^*} , οι συντελεστές εξασθένισης είναι αυτοί που υπολογίστηκαν στις παραγράφους 4.3.1.1 – 4.3.1.8. Τα αποτελέσματα για τα κοκκομετρικά κλάσματα χρώματος εμφανίζονται στον πίνακα 4.22 και 4.23 :

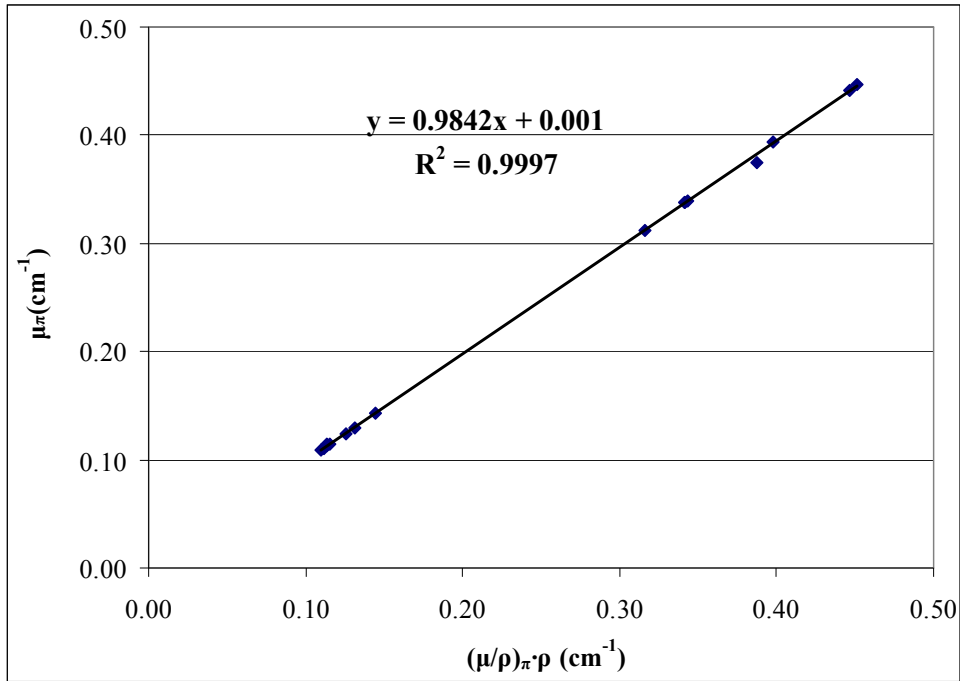
Δείγμα	Ενέργεια (keV)	Πυκνότητα (g cm ⁻³)	μ_{π} (cm ⁻¹)	$(\mu/\rho)_{\pi} \cdot \rho$ (cm ⁻¹)	μ_{α} (cm ⁻¹)
MS535	46.52	0.763	0.3122±0.0069	0.3157±0.0094	0.3326
MS535	186.25	0.763	0.1085±0.0027	0.1097±0.0043	0.1058
MS536	46.52	0.846	0.3383±0.0142	0.3419±0.0167	0.3702
MS536	186.25	0.846	0.1110±0.0073	0.1121±0.0088	0.1137
MS537	46.52	0.865	0.3397±0.0253	0.3436±0.0289	0.3788
MS537	186.25	0.865	0.1127±0.0062	0.1139±0.0072	0.1155
MS538	46.52	0.841	0.3750±0.0320	0.3876±0.0400	0.3679
MS538	186.25	0.841	0.1145±0.0113	0.1131±0.0133	0.1132
MS539	46.52	0.745	0.3385±0.0448	0.3418±0.0630	0.3244
MS539	186.25	0.745	0.1139±0.0080	0.1151±0.0117	0.1040
MS540	46.52	0.836	0.3942±0.0259	0.3981±0.0138	0.3656
MS540	186.25	0.836	0.1241±0.0138	0.1253±0.0171	0.1128
MS541	46.52	0.882	0.4420±0.0234	0.4467±0.0256	0.3866
MS541	186.25	0.882	0.1432±0.0080	0.1447±0.0087	0.1171
MS542	46.52	1.042	0.4464±0.0200	0.4510±0.0050	0.4604
MS542	186.25	1.042	0.1297±0.0200	0.1310±0.0050	0.1317

Πίνακας 4.22 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του γραμμικού και μαζικού συντελεστή εξασθένισης για κοκκομετρικά κλάσματα χόματος

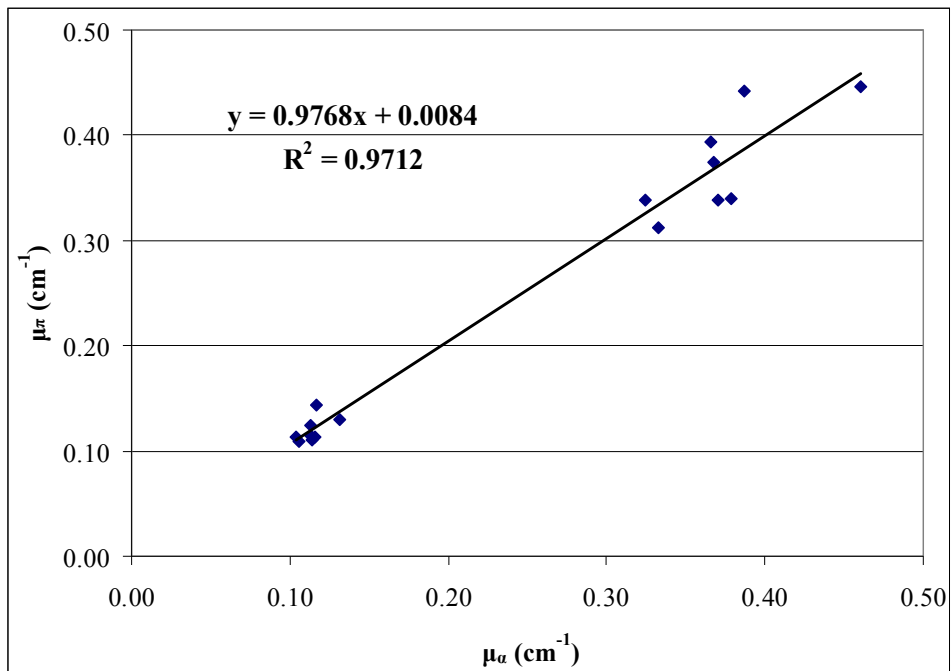
Δείγμα	Ενέργεια (keV)	Πυκνότητα (g cm ⁻³)	η_{π}	η_{π^*}	η_{α}
MS535	46.52	0.763	1.0256	1.0199	0.9934
MS535	186.25	0.763	1.0821	1.0794	1.0883
MS536	46.52	0.846	0.9847	0.9793	0.9388
MS536	186.25	0.846	1.0765	1.0740	1.0704
MS537	46.52	0.865	0.9826	0.9768	0.9270
MS537	186.25	0.865	1.0726	1.0699	1.0664
MS538	46.52	0.841	0.9322	0.9153	0.9419
MS538	186.25	0.841	1.0686	1.0717	1.0715
MS539	46.52	0.745	0.9844	0.9795	1.0060
MS539	186.25	0.745	1.0699	1.0673	1.0924
MS540	46.52	0.836	0.9067	0.9017	0.9451
MS540	186.25	0.836	1.0476	1.0450	1.0725
MS541	46.52	0.882	0.8487	0.8434	0.9166
MS541	186.25	0.882	1.0077	1.0047	1.0630
MS542	46.52	1.042	0.8437	0.8386	0.8282
MS542	186.25	1.042	1.0356	1.0329	1.0314

Πίνακας 4.23 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η για κοκκομετρικά κλάσματα χώματος

Από τους πίνακες 4.22 και 4.23 προκύπτουν τα διαγράμματα 4.57 έως 4.62:



Σχήμα 4.57: Συσχέτιση μεταξύ του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης που προέκυψε απ' ευθείας (μ_{π}) και μέσω του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένισης $(\mu/\rho)_{\pi} \cdot \rho$ που προέκυψαν πειραματικά για κοκκομετρικά κλάσματα χρώματος



Σχήμα 4.58: Συσχέτιση του συντελεστή μ_{α} που εκτιμήθηκε από αναδρομή με το μ_{π} που προέκυψε πειραματικά.

Στα συγκεκριμένα διαγράμματα παρατηρείται ότι εμφανίζονται δύο περιοχές. Η μία περιοχή αφορά στα 46.52keV και η άλλη περιοχή αφορά στα 186.25keV. Προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσον υπάρχει συστηματική διαφορά μεταξύ των τιμών των συντελεστών που προσδιορίζονται πειραματικά και από το πρόγραμμα factor, στις συναρτήσεις αναδρομής που παρουσιάζονται στα γραφήματα 4.57 & 4.58, έγινε στατιστικό τεστ της κλίσης της συνάρτησης αναδρομής (σύγκριση με τη μονάδα) και του σταθερού όρου της αναδρομής (σύγκριση με το μηδέν). Η διαδικασία του τεστ (t-test) παρουσιάζεται στο παράρτημα Γ.

Από το t-test που έγινε για τη συνάρτηση αναδρομής στο γράφημα του σχήματος 4.57 προέκυψε ότι ο συντελεστής διεύθυνσης είναι στατιστικά ίσος με τη μονάδα και ο σταθερός όρος της ευθείας αναδρομής είναι στατιστικά ίσος με το μηδέν. Άρα, η μέθοδος υπολογισμού των συντελεστών εξασθένισης – απευθείας του μ ή μέσω του συντελεστή μ/ρ – δίνει αποτελέσματα που δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά.

Από το t-test που έγινε για τη συνάρτηση αναδρομής στο γράφημα του σχήματος 4.58 προέκυψε ότι ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης που υπολογίστηκε πειραματικά μ_{π} δεν διαφέρει στατιστικά σημαντικά από τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης μ_{α} που υπολογίζεται από τη συνάρτηση αναδρομής $\mu=f(E,\rho)$. Άρα, τουλάχιστον για τα δείγματα χρώματος που αναλύθηκαν δεν είναι απαραίτητος ο πειραματικός προσδιορισμός του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ_{π} , καθώς οι χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις αναδρομής της μορφής $\mu=f(E,\rho)$ δίνουν πρακτικά το ίδιο αποτέλεσμα.

Από τα διαγράμματα 4.59 και 4.60 προκύπτει ότι τόσο για τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης όσο και για τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένισης, για τα 186.25keV, η σύμπτωση των συντελεστών για τις διάφορες κοκκομετρίες είναι αρκετά καλή. Για τα 46.52 keV, ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης έχει την τάση να αυξάνει καθώς η πυκνότητα αυξάνει, πράγμα που δεν παρατηρείται για τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένισης. Για να τεκμηριωθούν αυτές οι παρατηρήσεις, υπολογίστηκε ο γραμμικός συντελεστής συσχέτισης r μεταξύ της πυκνότητας και κάθε ενός από τα παρακάτω μεγέθη, και εξετάστηκε αν διαφέρει

στατιστικά σημαντικά από το μηδέν. Για τον υπολογισμό του r χρησιμοποιήθηκε η σχέση (4.4)

$$r = \frac{\sum x_i \cdot y_i - \frac{(\sum x_i)(\sum y_i)}{n}}{\sqrt{(\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n})(\sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n})}} \quad (4.4)$$

όπου x_i είναι οι τιμές της πυκνότητας και y_i οι τιμές του αντίστοιχου συντελεστή εξασθένισης που υπολογίζεται και n το πλήθος των μετρήσεων σε κάθε περίπτωση, δηλαδή 8. Έτσι υπολογίστηκαν τέσσερις τιμές του r οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 4.24

Ενέργεια	Συντελεστής εξασθένισης	r
46.52keV	μ	0.769
186.25keV	μ	0.564
46.52keV	μ/ρ	-0.04
186.25keV	μ/ρ	-0.492

Πίνακας 4.24 Αποτελέσματα για τον συντελεστή συσχέτισης για ενέργειες 46.52keV και 186.25keV

Για τον έλεγχο της μηδενικής υπόθεσης ($r = 0$) υπολογίστηκε η ανηγμένη μεταβλητή t από τη σχέση 4.5:

$$t = r \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (4.5),$$

όπου r ο συντελεστής συσχέτισης που υπολογίστηκε για κάθε ενέργεια και για κάθε συντελεστή εξασθένισης και n το πλήθος των μετρήσεων για κάθε περίπτωση δηλαδή 8.

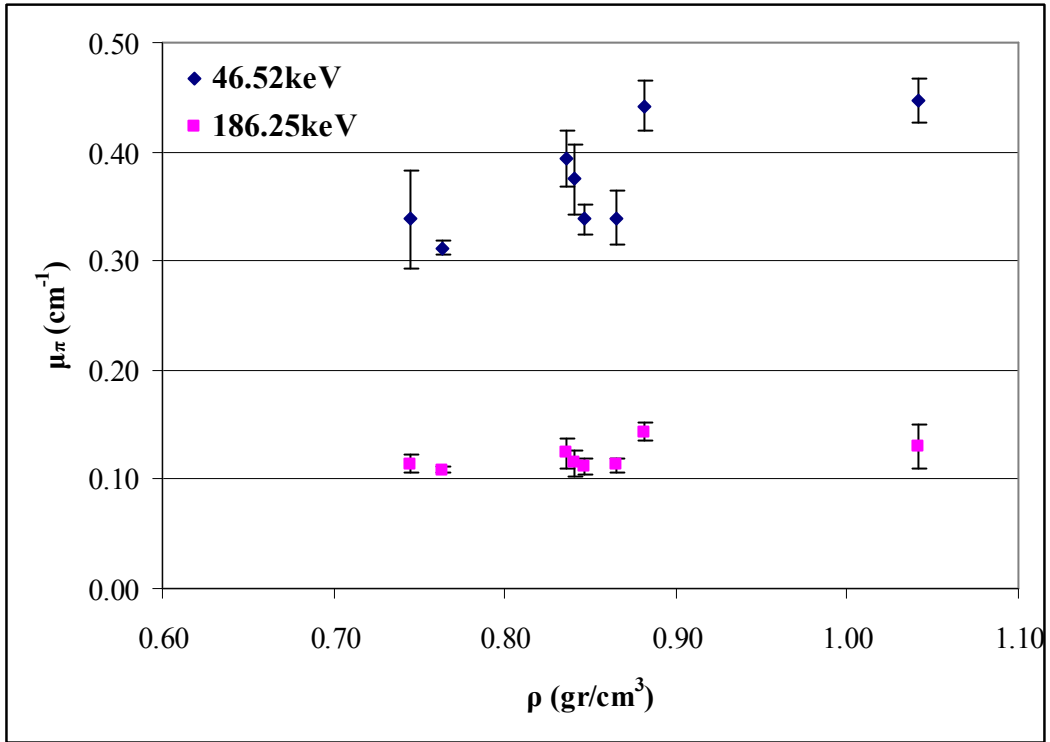
Τα αποτελέσματα του t test παρουσιάζονται στον πίνακα 4.25

Ενέργεια	Συντελεστής εξασθένισης	r	t _{σύγκρισης}	t _{0,975,8}	t _{0,99,8}
46.52keV	μ	0.769	2.946	1.86	2.896
186.25keV	μ	0.564	1.674	1.86	2.896
46.52keV	μ/ρ	-0.040	-0.009	1.86	2.896
186.25keV	μ/ρ	-0.492	-1.384	1.86	2.896

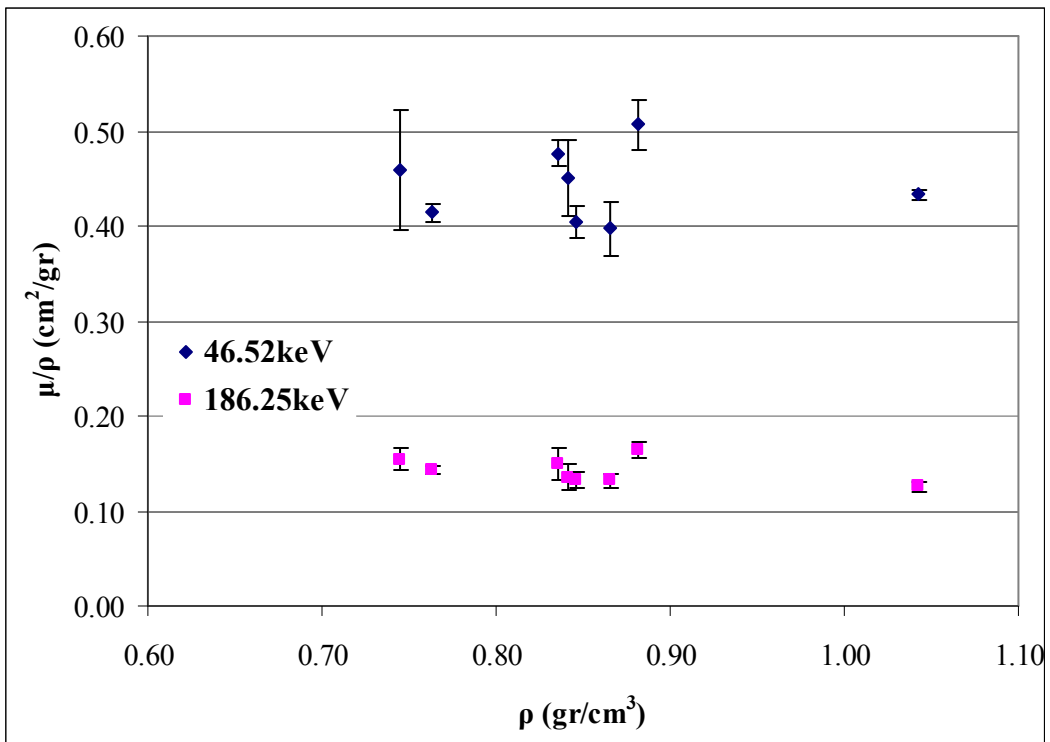
Πίνακας 4.25 Αποτελέσματα *t test* για τις διάφορες τιμές του συντελεστή συσχέτισης *r*

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 4.25 παρατηρείται ότι για τον συντελεστή μ και ενέργεια 46.52keV, η τιμή σύγκρισης είναι εκτός του διαστήματος εμπιστοσύνης. Άρα η αρχική υπόθεση απορρίπτεται. Για όλες τις υπόλοιπες τιμές, για τους ίδιους λόγους, οι αρχικές μας υποθέσεις επιβεβαιώνονται. Προκύπτει ότι για τα 186.25keV ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ πυκνότητας και συντελεστών εξασθένισης είναι μηδέν, άρα όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών. Το ίδιο συμβαίνει και για τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένισης στα 46.52keV, όχι όμως και για τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης.

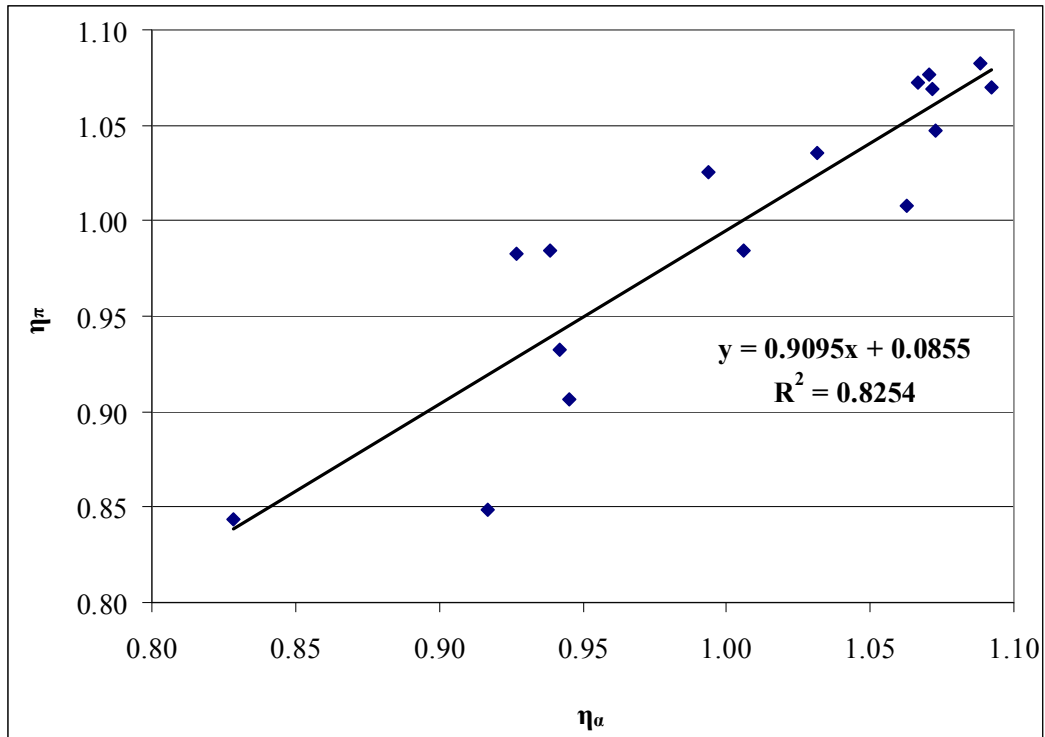
Το γεγονός ότι ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης δε φαίνεται να εξαρτάται από την πυκνότητα, ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις οι αποκλίσεις μεταξύ των σημείων δεν είναι στατιστικά σημαντικές αποτελεί ένδειξη ότι όλα τα κλάσματα έχουν την ίδια σύσταση, άρα προέρχονται από το ίδιο αρχικό υλικό, και η διαφοροποίηση της κοκκομετρίας έχει προκύψει από μηχανικές διεργασίες. Επομένως, για την ανάλυση των κλασμάτων ενός τέτοιου δείγματος η μέθοδος που προτείνεται είναι η μελέτη ενός κοκκομετρικού κλάσματος και ο υπολογισμός είτε του ολικού γραμμικού είτε του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένισης και στη συνέχεια η αναγωγή μέσω της πυκνότητας για τον υπολογισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης του κάθε κλάσματος.



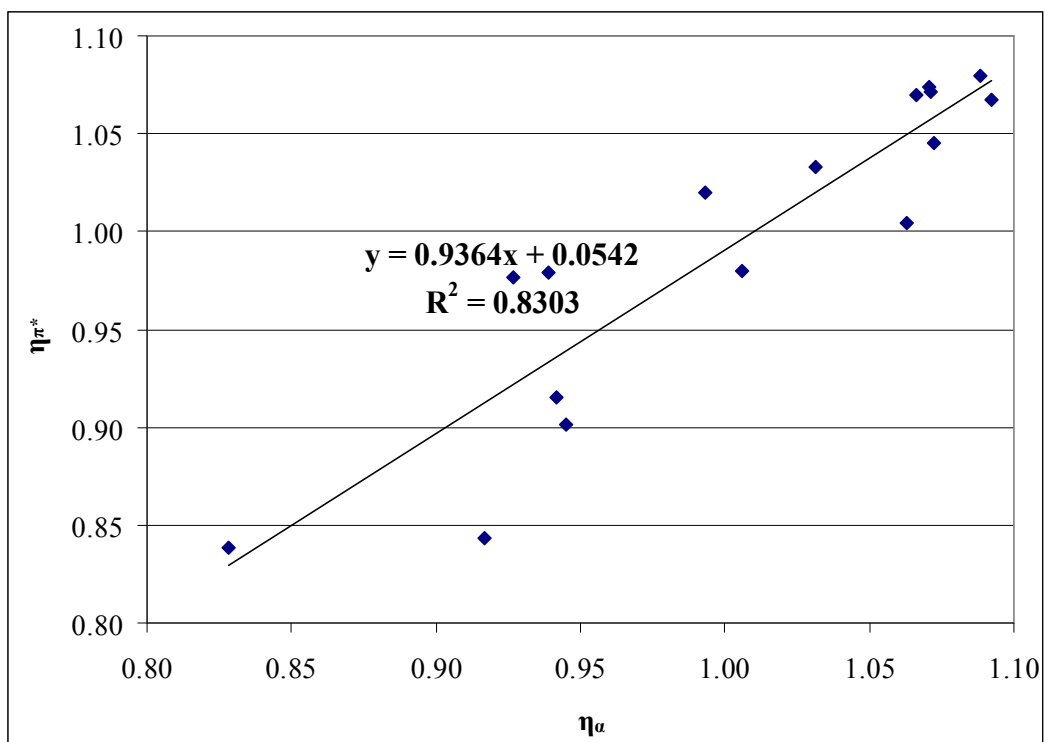
Σχήμα 4.59: Συσχέτιση του μ_{π} με την πυκνότητα



Σχήμα 4.60: Συσχέτιση του μ/ρ με την πυκνότητα



Σχήμα 4.61: Συσχέτιση του η_π που προέκυψε από το πειραματικό μ_π με το η_α που από το μ_α από τη συνάρτηση αναδρομής



Σχήμα 4.62: Συσχέτιση του η_{π^*} που προέκυψε με δεδομένο το $(\mu/\rho)_{\pi^*}$ με το η_α που προέκυψε με δεδομένο το μ_α από την συνάρτηση αναδρομής

Στο διάγραμμα 4.61 επιχειρείται να συσχετιστούν οι συντελεστές αναγωγής της απόδοσης η_{π} , οι οποίοι προκύπτουν με δεδομένο το μ_{π} από την πειραματική διαδικασία με τον συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η_{α} , ο οποίος προκύπτει με δεδομένο το μ_{α} που προκύπτει από την συνάρτηση αναδρομής. Στο διάγραμμα 4.62 επιχειρείται η συσχέτιση του συντελεστή η_{π^*} που προκύπτει με δεδομένο το $(\mu/\rho)_{\pi} \cdot \rho$ με αυτόν που προκύπτει με δεδομένο το μ_{α} που προκύπτει από την συνάρτηση αναδρομής. Για το λόγο αυτό έγιναν δύο στατιστικά τεστ (t-test) σε κάθε μία από τις συναρτήσεις αναδρομής που εμφανίζονται στα διαγράμματα 4.61 και 4.62, για με την κλίση και το σταθερό όρο των δύο συναρτήσεων.

Για το διάγραμμα 4.62 από το t test προέκυψε ότι ο συντελεστής αναγωγής της απόδοσης η_{α} που προκύπτει με δεδομένο τον πειραματικό ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης μ_{π} δεν διαφέρει στατιστικά σημαντικά από τον συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η_{α} που προκύπτει, με δεδομένο τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης μ_{α} που προκύπτει από τη συνάρτηση αναδρομής. Αυτό είναι αρκετά λογικό, καθώς πιο πάνω αποδείχθηκε ότι τα δύο δεδομένα που εισάγονται ταυτίζονται στατιστικά.

Τα αποτελέσματα για τα t test που έγιναν για την ευθεία αναδρομής $y = a_1 \cdot x + a_0$ παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στους πίνακες 4.26: έως 4.29 .

	Συντελεστής διεύθυνσης ευθείας a_1	Τιμή σύγκρισης a_{10}	t_0	Τιμή t σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%	Τιμή t σε επίπεδο εμπιστοσύνης 99%
Σύγκριση $\mu_{\pi} - (\mu/\rho)_{\pi} \cdot \rho$ (4.53)	0.9842	1	0.2658	2.145	2.977
Σύγκριση $\mu_{\pi} - \mu_{\alpha}$ (4.54)	0.9768	1	0.5157	2.145	2.977
Σύγκριση $\eta_{\pi} - \eta_{\alpha}$ (4.57)	0.9075	1	0.8292	2.145	2.977
Σύγκριση $\eta_{\pi^*} - \eta_{\alpha}$ (4.58)	0.9364	1	0.5078	2.145	2.977

Πίνακας 4.26: Δεδομένα για την διεξαγωγή του t τεστ για κοκκομετρικά κλάσματα για τον συντελεστή διεύθυνσης της ευθείας αναδρομής

	Διάστημα εμπιστοσύνης άνω άκρο (95%)	Διάστημα εμπιστοσύνης κάτω άκρο (95%)	Διάστημα εμπιστοσύνης άνω άκρο (99%)	Διάστημα εμπιστοσύνης κάτω άκρο (99%)
Σύγκριση $\mu_{\pi} - (\mu/\rho)_{\pi} \cdot \rho$ (4.53)	1.112	0.857	1.161	0.807
Σύγκριση $\mu_{\pi} - \mu_{\alpha}$ (4.54)	1.073	0.880	1.111	0.843
Σύγκριση $\eta_{\pi} - \eta_{\alpha}$ (4.57)	1.147	0.668	1.240	0.575
Σύγκριση $\eta_{\pi^+} - \eta_{\alpha}$ (4.58)	1.205	0.668	1.309	0.564

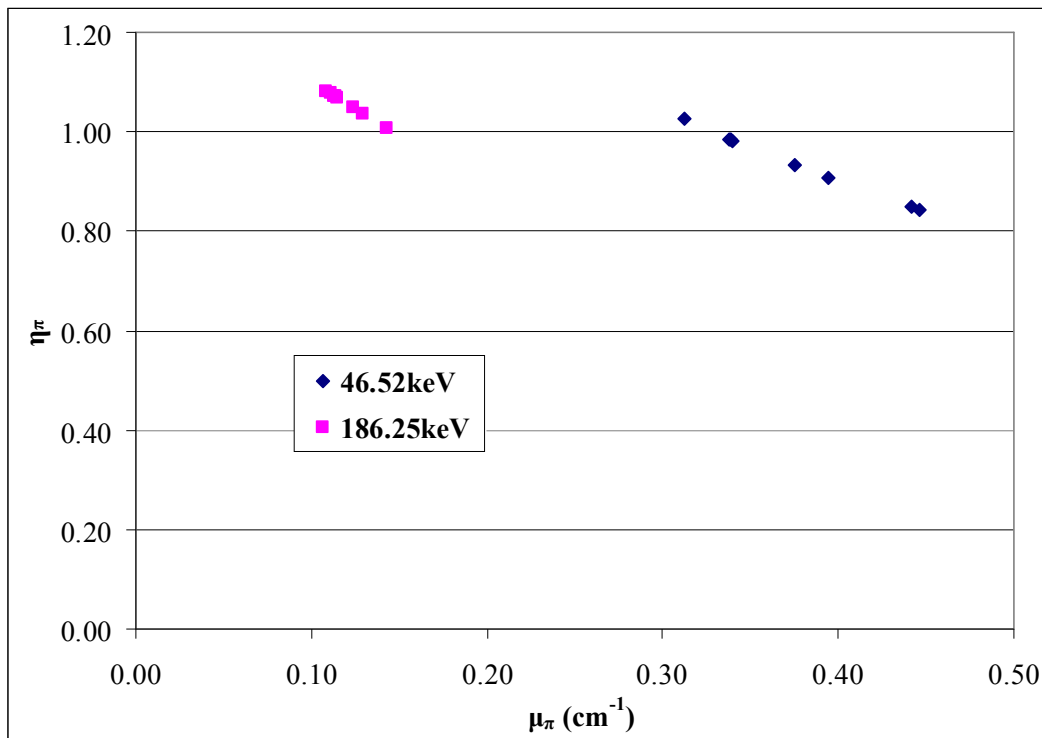
Πίνακας 4.27: Διαστήματα εμπιστοσύνης για τον υπολογισμό του συντελεστή διεύθυνσης της ευθείας αναγωγής για κοκκομετρικά κλάσματα χόματος

	Σταθερός όρος ευθείας a_0	Τιμή σύγκρισης a_{00}	t_0	Τιμή t σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%	Τιμή t σε επίπεδο εμπιστοσύνης 99%
Σύγκριση $\mu_{\pi} - (\mu/\rho)_{\pi} \cdot \rho$ (4.53)	1.0E-03	0	0.690	2.145	2.977
Σύγκριση $\mu_{\pi} - \mu_{\alpha}$ (4.54)	2.4E-02	0	1.923	2.145	2.977
Σύγκριση $\eta_{\pi} - \eta_{\alpha}$ (4.57)	7.6E-02	0	0.682	2.145	2.977
Σύγκριση $\eta_{\pi^+} - \eta_{\alpha}$ (4.58)	6.8E-02	0	0.546	2.145	2.977

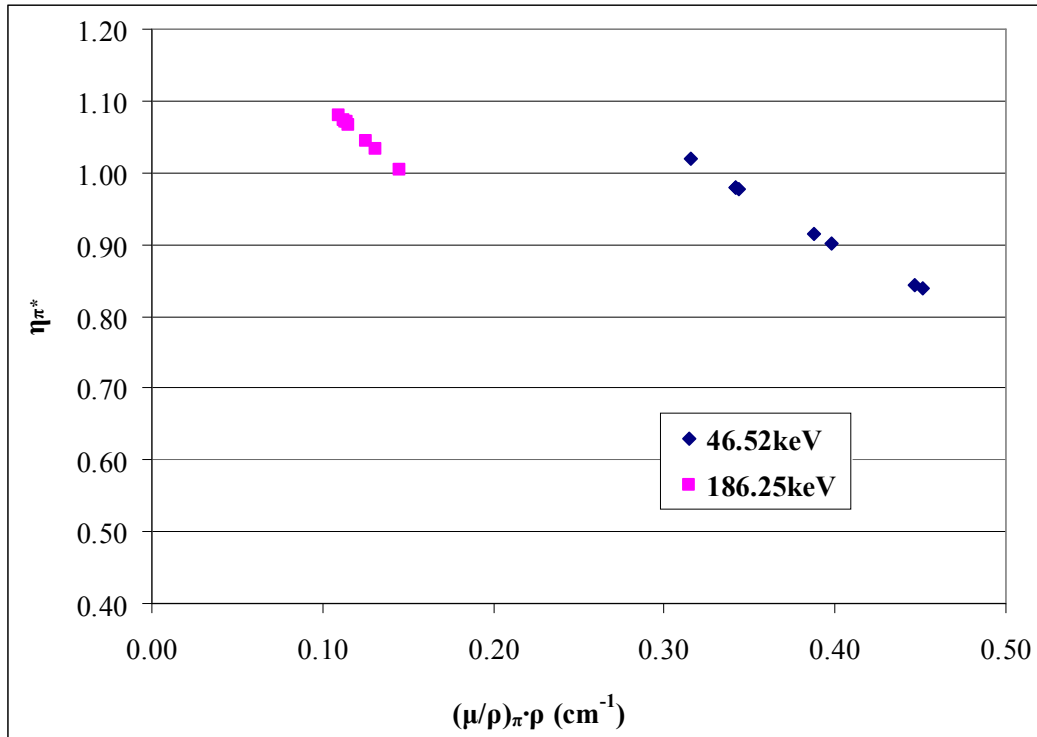
Πίνακας 4.28 Δεδομένα για την διεξαγωγή του t τεστ για κοκκομετρικά κλάσματα χόματος για τον σταθερό όρο της ευθείας αναδρομής

	Διάστημα εμπιστοσύνης άνω άκρο (95%)	Διάστημα εμπιστοσύνης κάτω άκρο (95%)	Διάστημα εμπιστοσύνης άνω άκρο (99%)	Διάστημα εμπιστοσύνης κάτω άκρο (99%)
Σύγκριση $\mu_\pi - (\mu/\rho)_\pi \cdot \rho$ (4.53)	0.0321	-0.0301	0.0442	-0.0422
Σύγκριση $\mu_\pi - \mu_\alpha$ (4.54)	0.0508	-0.0028	0.0612	-0.0132
Σύγκριση $\eta_\pi - \eta_\alpha$ (4.57)	0.3156	-0.1634	0.4085	-0.2563
Σύγκριση $\eta_{\pi^+} - \eta_\alpha$ (4.58)	0.3360	-0.1996	0.4398	-0.3034

Πίνακας 4.29 Διαστήματα εμπιστοσύνης για τον υπολογισμό του σταθερού όρου της ευθείας αναγωγής για κοκκομετρικά κλάσματα χρώματος



Σχήμα 4.63: Συσχέτιση του η που προέκυψε από τον κώδικα factor με το μ πειραματικό που εισήχθη για τον υπολογισμό του



Σχήμα 4.64: Συσχέτιση του η που προέκυψε από τον κώδικα factor με το μ πειραματικό* που εισήχθη για τον υπολογισμό του

Στα διαγράμματα 4.63 και 4.64 γίνεται συσχέτιση του η που προέκυψε από τον κώδικα factor με το μ που εισήχθη σε κάθε περίπτωση για τον υπολογισμό του η . Από το διάγραμμα 4.63 προκύπτει ότι για την ενέργεια των 186.25keV ο συντελεστής αναγωγής της απόδοσης είναι λίγο μεγαλύτερος της μονάδας, αλλά πολύ κοντά σε αυτήν, πράγμα που σημαίνει ότι ο ολικός γραμμικός συντελεστής αναγωγής της απόδοσης του δείγματος είναι πολύ κοντά σε αυτόν του δείγματος. Παρόλα αυτά φαίνεται μια ξεκάθαρη τάση όσο αυξάνει ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης να μειώνεται ο συντελεστής αναγωγής της απόδοσης. Για τα 46.52keV, βρισκόμαστε πολύ κοντά στη μονάδα αλλά λίγο πιο κάτω από αυτήν την τιμή. Είναι φανερό ότι και για τα 46.52keV υπάρχει μια ξεκάθαρη πτωτική τάση όσο αυξάνει ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης.

4.4 Εφαρμογή της μεθοδολογίας προσδιορισμού των συντελεστών εξασθένισης σε άλλα υλικά

Στις προηγούμενες δύο παραγράφους έγινε μελέτη δειγμάτων χώματος και ανάλυση της επίδρασης της κοκκομετρίας τους στον υπολογισμό των συντελεστών εξασθένισης μ και μ/ρ . Διαπιστώθηκε μάλιστα ότι για το χώμα, η χρήση των τιμών του συντελεστή μ που υπολογίζονται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ από τις συναρτήσεις αναδρομής της μορφής $\mu=f(E,\rho)$, δίνουν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα κατά συνέπεια δεν είναι αναγκαίος ο πειραματικός προσδιορισμός του συντελεστή μ για το εκάστοτε δείγμα χώματος.

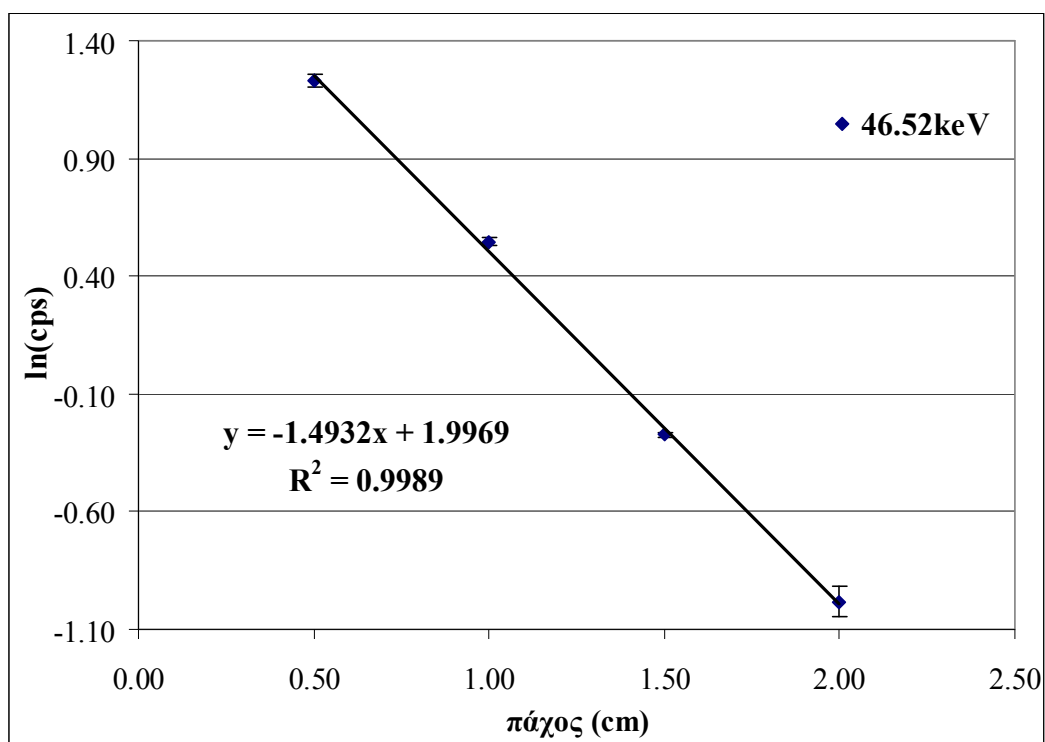
Για την ανάλυση δειγμάτων άγνωστης ή ιδιαίτερης σύστασης, για τα οποία δεν διατίθεται συνάρτηση αναδρομής της μορφής $\mu=f(E,\rho)$, καθώς δεν αναλύονται τακτικά από το ΕΠΤ-ΕΜΠ, γίνεται, είτε απ' ευθείας πειραματικός προσδιορισμός του μ , είτε οι τιμές του μ υπολογίζονται από τη συνάρτηση $\mu=f(E,\rho)$ υλικού με την κατ' εκτίμηση παραπλήσια σύσταση.

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η ανάλυση δύο δειγμάτων διαφορετικών από χώμα. Τα δείγματα που αναλύθηκαν ήταν (i) ένα δείγμα παραπροϊόντος της επεξεργασίας μεταλλεύματος για την εξαγωγή σπάνιων γαιών, προέλευσης Σουηδίας, με κωδικό MS654 και, (ii) δείγμα παραπροϊόντος επεξεργασίας βωξίτη (red mud) με κωδικό MS655. Για τα συγκεκριμένα υλικά προσδιορίστηκαν οι συντελεστές μ και μ/ρ και συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από τις διαθέσιμες καμπύλες αναδρομής διαφόρων υλικών, ώστε να εξετασθεί αν τα δύο υλικά προσεγγίζονται επαρκώς από κάποια από τις διαθέσιμες καμπύλες. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι συντελεστές αναγωγής της απόδοσης η , (i) χρησιμοποιώντας τους συντελεστές μ που προσδιορίστηκαν πειραματικά και (ii) χρησιμοποιώντας τους συντελεστές μ_a που προέκυψαν από τις διάφορες καμπύλες αναδρομής.

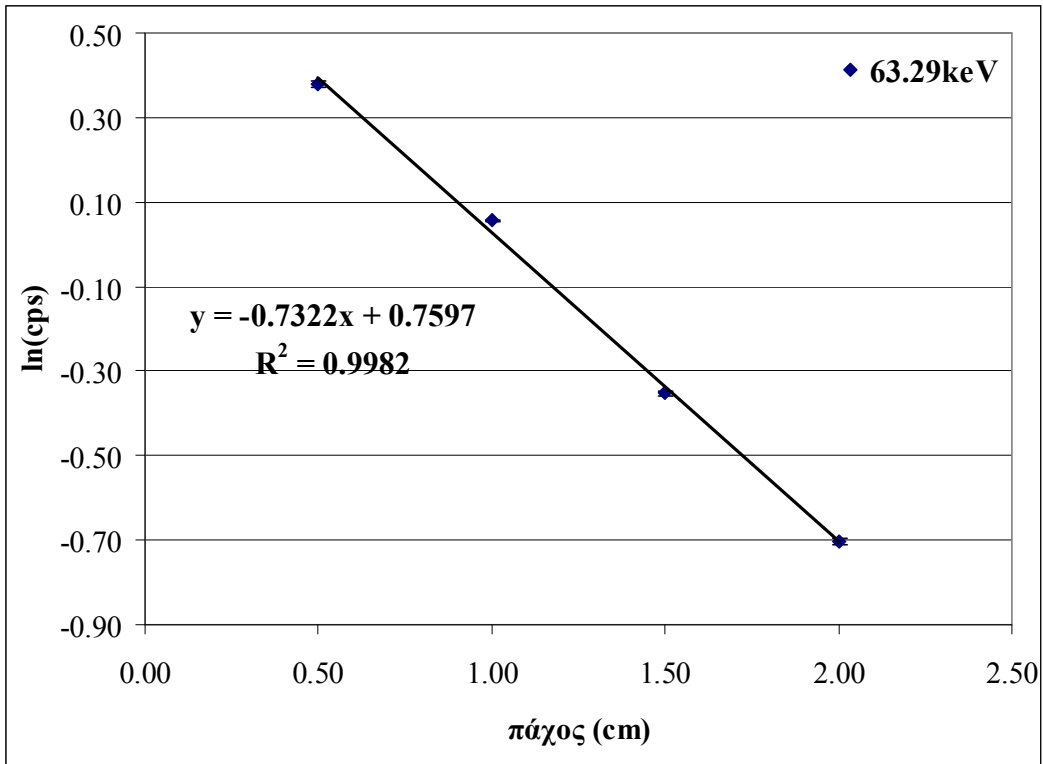
4.4.1 Πειραματικός προσδιορισμός συντελεστών εξασθένησης μ και μ/ρ

4.4.1.1 Παραπροϊόν επεξεργασίας σπάνιων γαιών

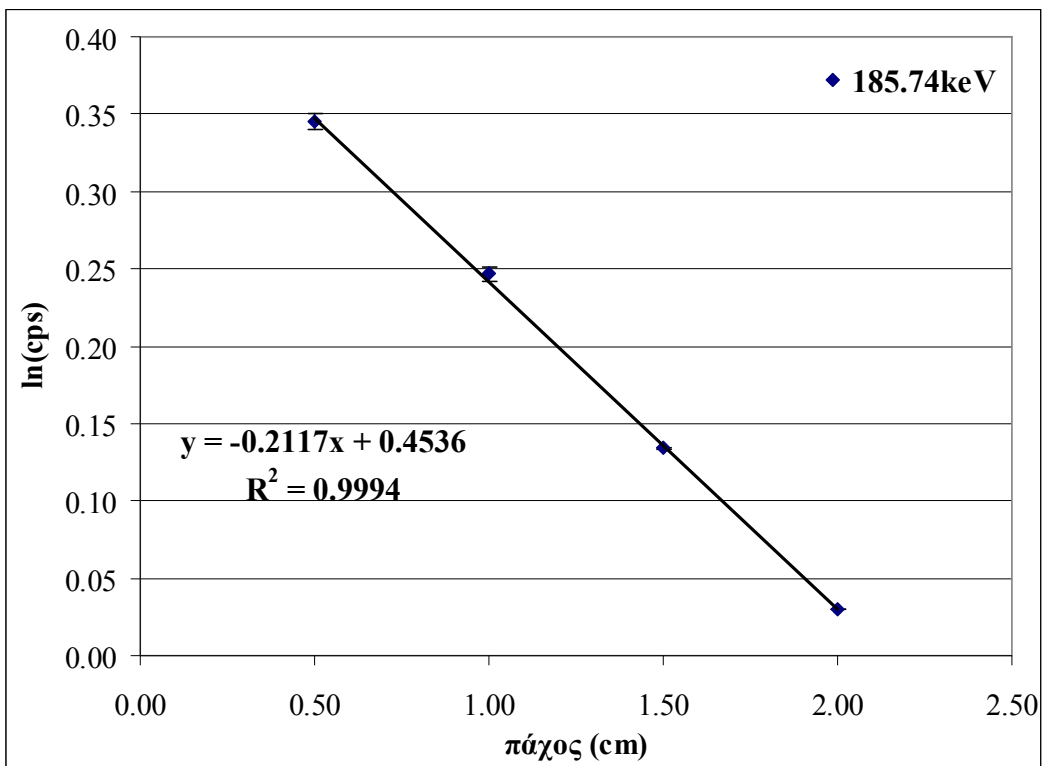
Το πρώτο υλικό που αναλύθηκε είναι δείγμα από επεξεργασία σπάνιων γαιών Σουηδίας, με πυκνότητα $1.726\text{gr}/\text{cm}^3$ (κωδικός MS654). Οι μετρήσεις έγιναν στον ανιχνευτή «6» με σημειακή πηγή ^{226}Ra και foils φυσικού ουρανίου, για πάχη απορροφητή 5, 10, 15 και 20mm. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2, προέκυψαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα 4.65, 4.66, 4.67 και 4.68 για τον προσδιορισμό του μ .



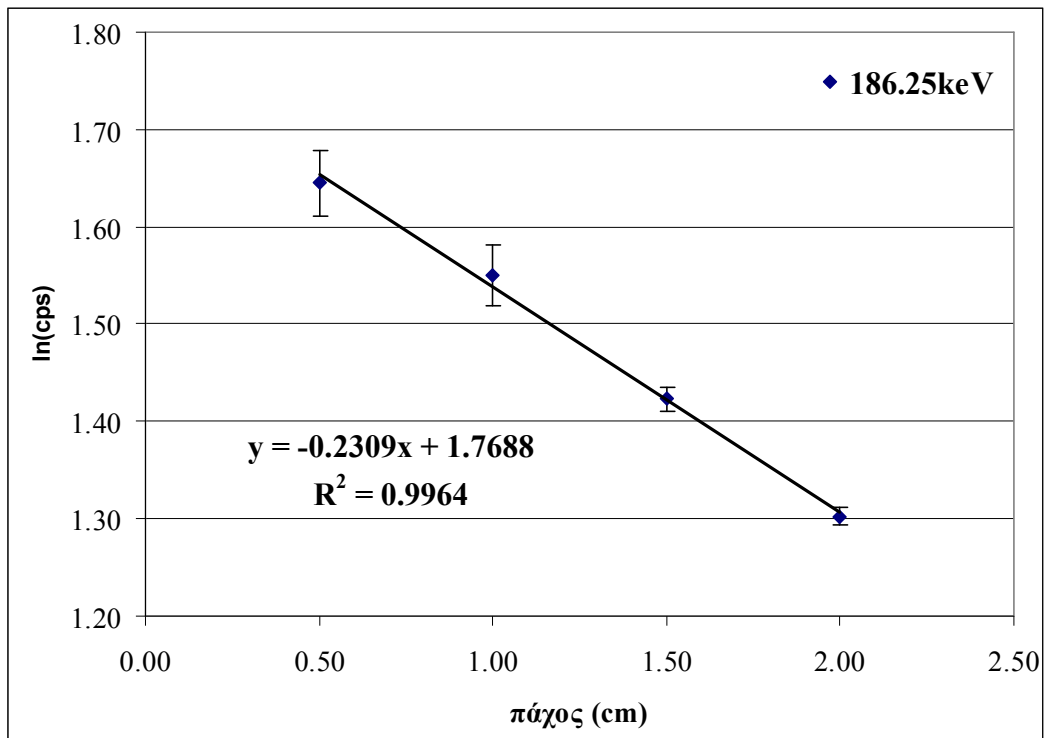
Σχήμα 4.65: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV



Σχήμα 4.66: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 63.29keV



Σχήμα 4.67: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 185.74keV
 [184]



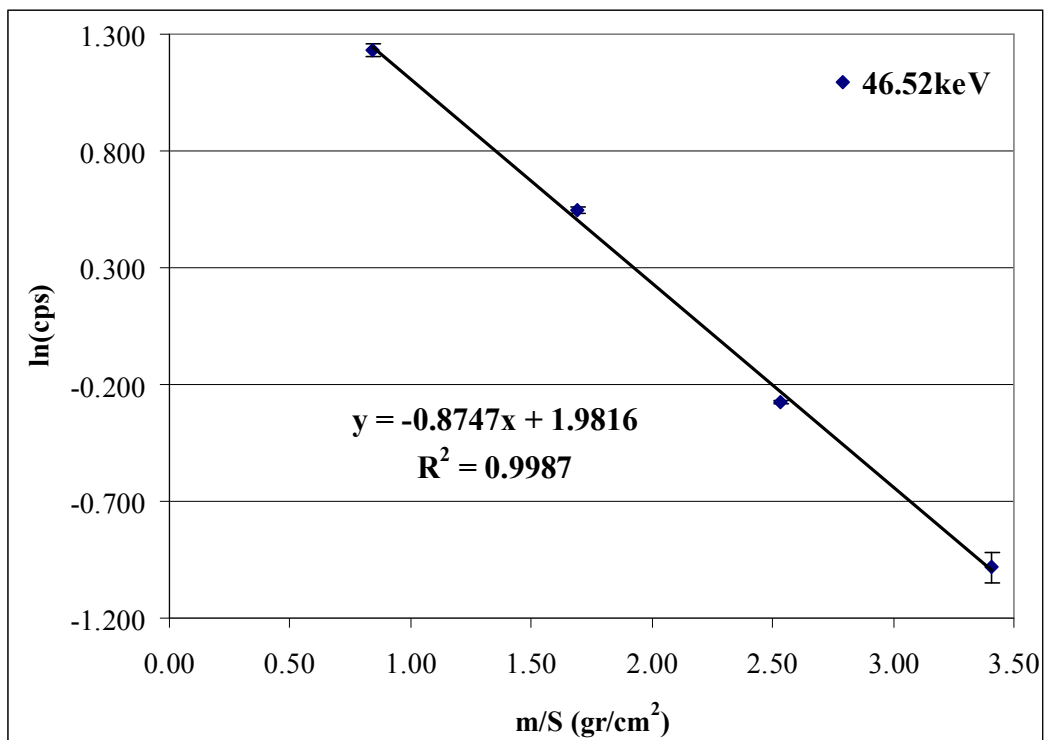
Σχήμα 4.68: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV

Από τα διαγράμματα, εκτιμάται ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης, ως η κλίση της ευθείας αναδρομής των μετρήσεων. Για τα 46.52keV προέκυψε ότι $\mu = 1.4932 \text{ cm}^{-1}$, για τα 63.29keV, $\mu = 0.7322 \text{ cm}^{-1}$, για τα 185.74keV, $\mu = 0.2117 \text{ cm}^{-1}$ και για τα 186.25keV, $\mu_m = 0.2309 \text{ cm}^{-1}$.

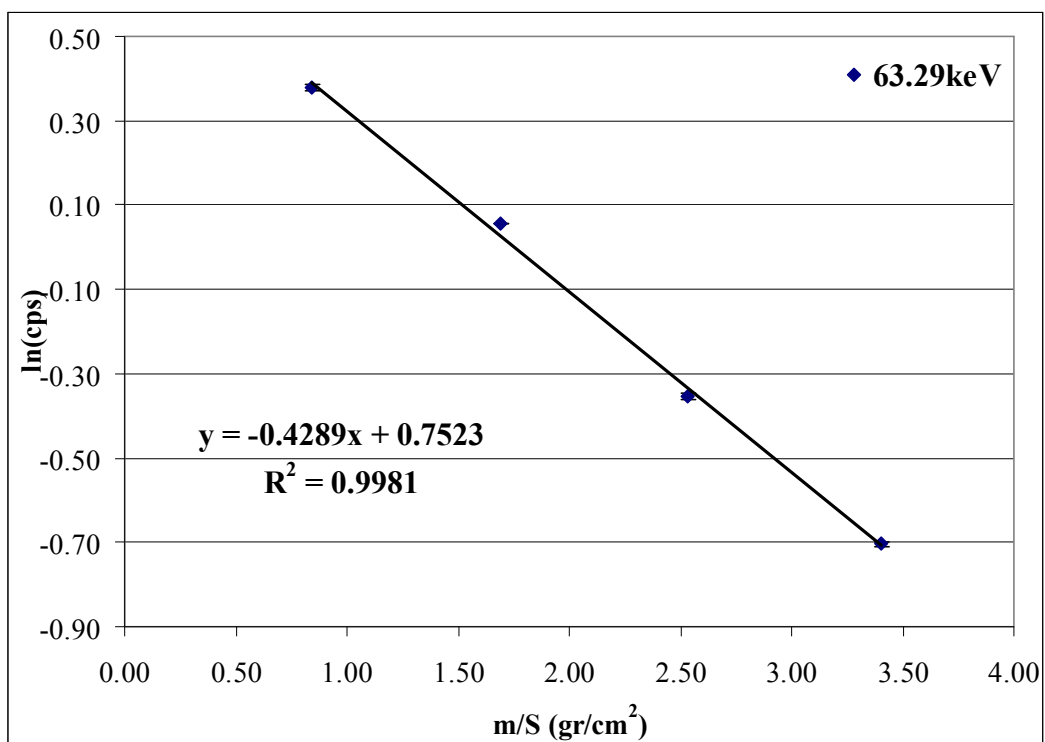
Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκαν και τα διαγράμματα 4.69, 4.70, 4.71 και 4.72 για τον προσδιορισμό του μ_m .

Από τα διαγράμματα 4.69, 4.70, 4.71 και 4.72, υπολογίζεται όπως και πριν ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης. Για τα 46.52keV προέκυψε ότι $\mu_m = 0.8747 \text{ cm}^2/\text{gr}$, για τα 63.29keV, $\mu_m = 0.4289 \text{ cm}^2/\text{gr}$, για τα 185.74keV, $\mu_m = 0.124 \text{ cm}^2/\text{gr}$ και για τα 186.25keV, $\mu_m = 0.1353 \text{ cm}^2/\text{gr}$.

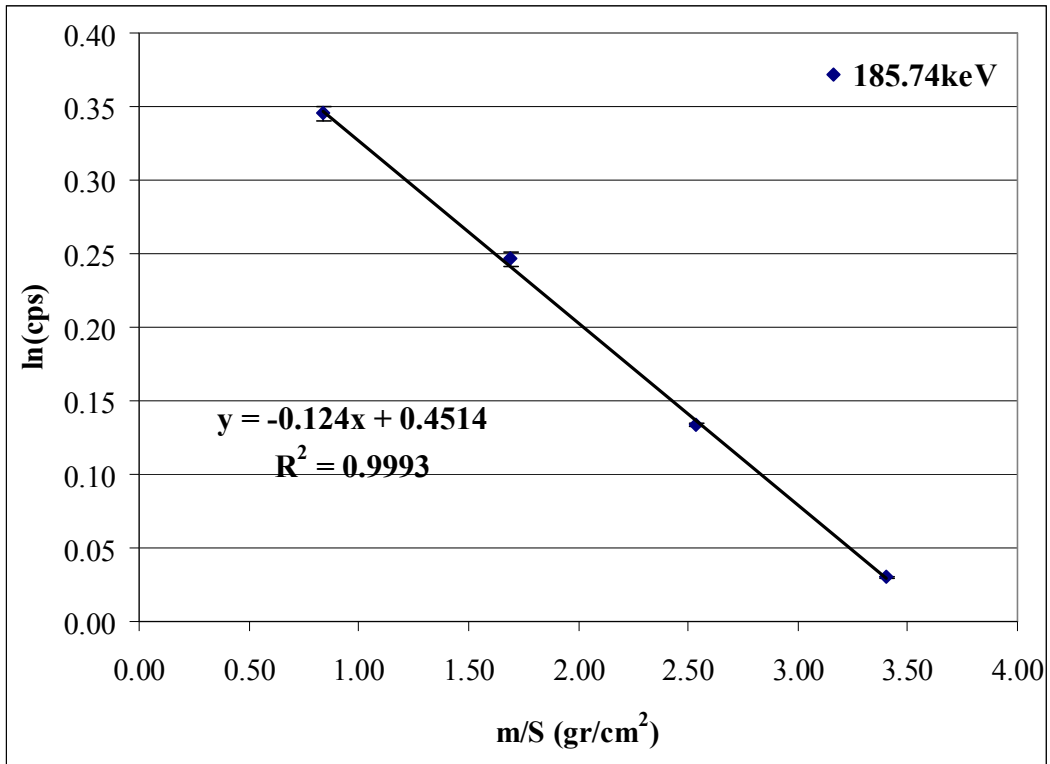
Η συνολική διάρκεια ολοκλήρωσης του πειράματος ήταν μία ημέρα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 4.30.



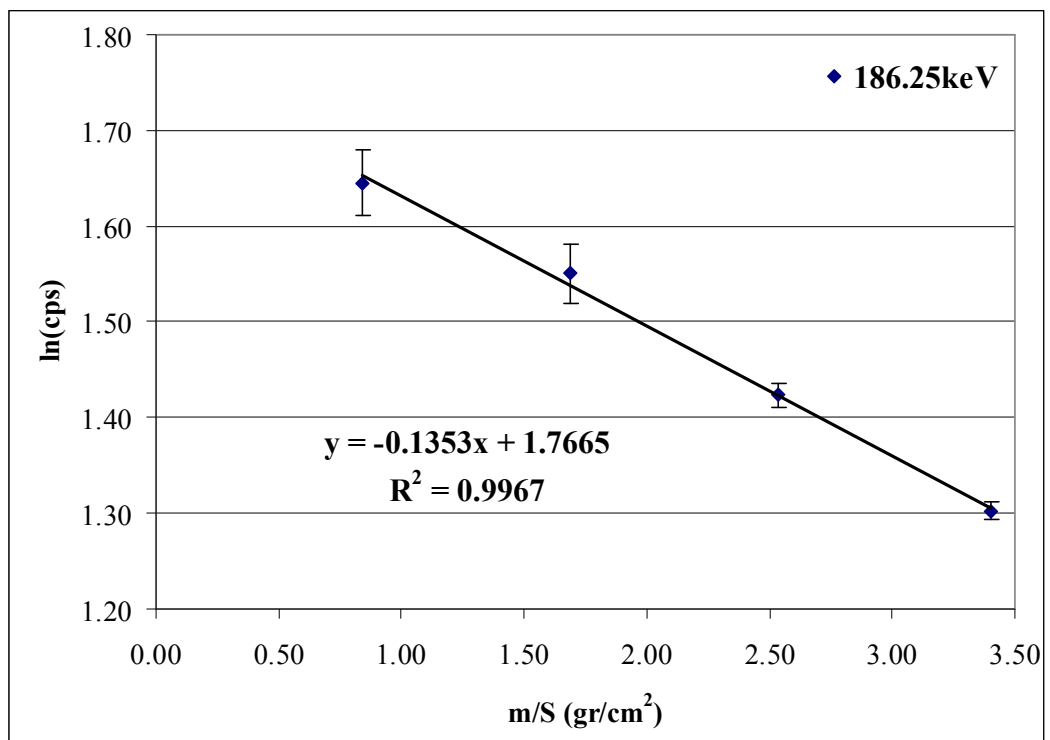
Σχήμα 4.69: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV



Σχήμα 4.70: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 63.29keV



Σχήμα 4.71: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 185.74keV



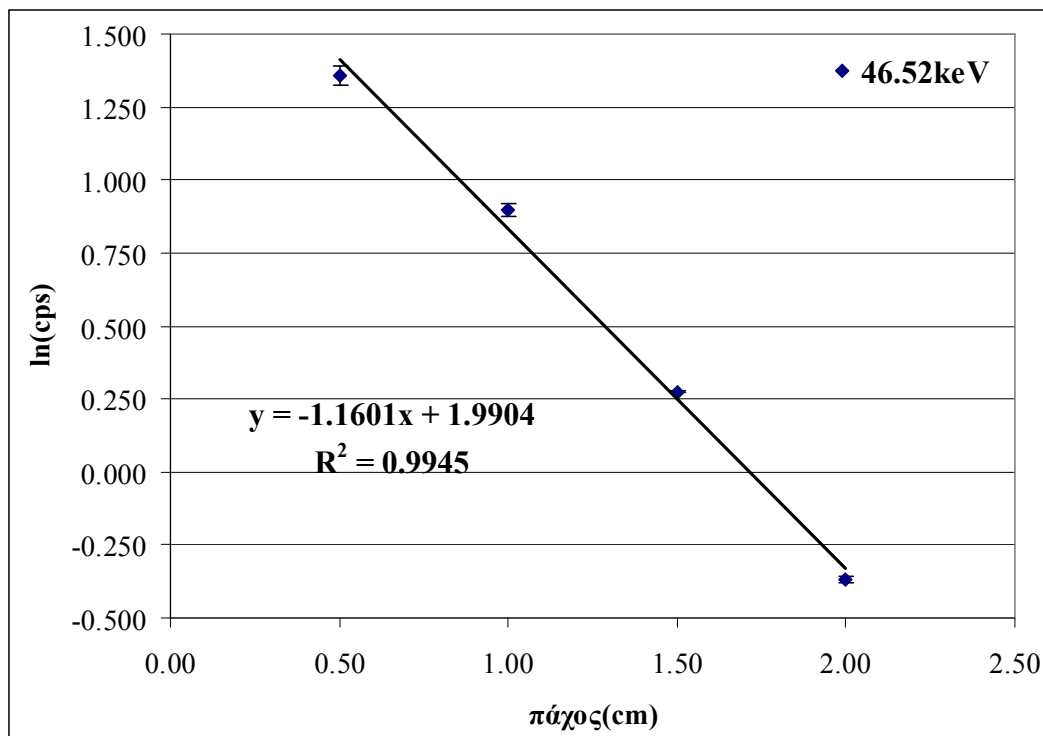
Σχήμα 4.72: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV

Ενέργεια	Πηγή	μ πειράματος (cm ⁻¹)	μ/ρ πειράματος (cm ² /gr)
46.52keV	Ra(point)	1.4932±0.0355	0.8747±0.0226
63.29keV	U(foils)	0.7322±0.0220	0.4289±0.0133
185.74keV	U(foils)	0.2117±0.0040	0.1240±0.0023
186.25keV	Ra(point)	0.2309±0.0098	0.1353±0.0055

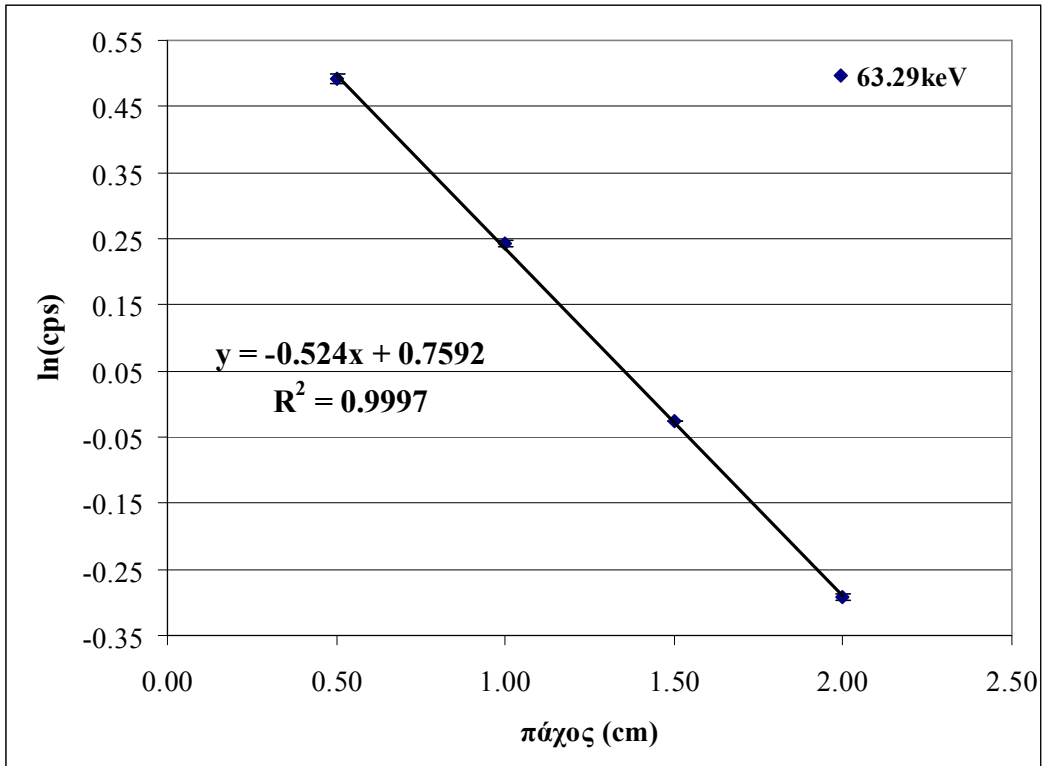
Πίνακας 4.30: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το μ και το μ/ρ για υλικό «παραπροϊόν επεξεργασίας σπανίων γαιών».

4.4.1.2 Παραπροϊόν επεξεργασίας βωξίτη (red mud)

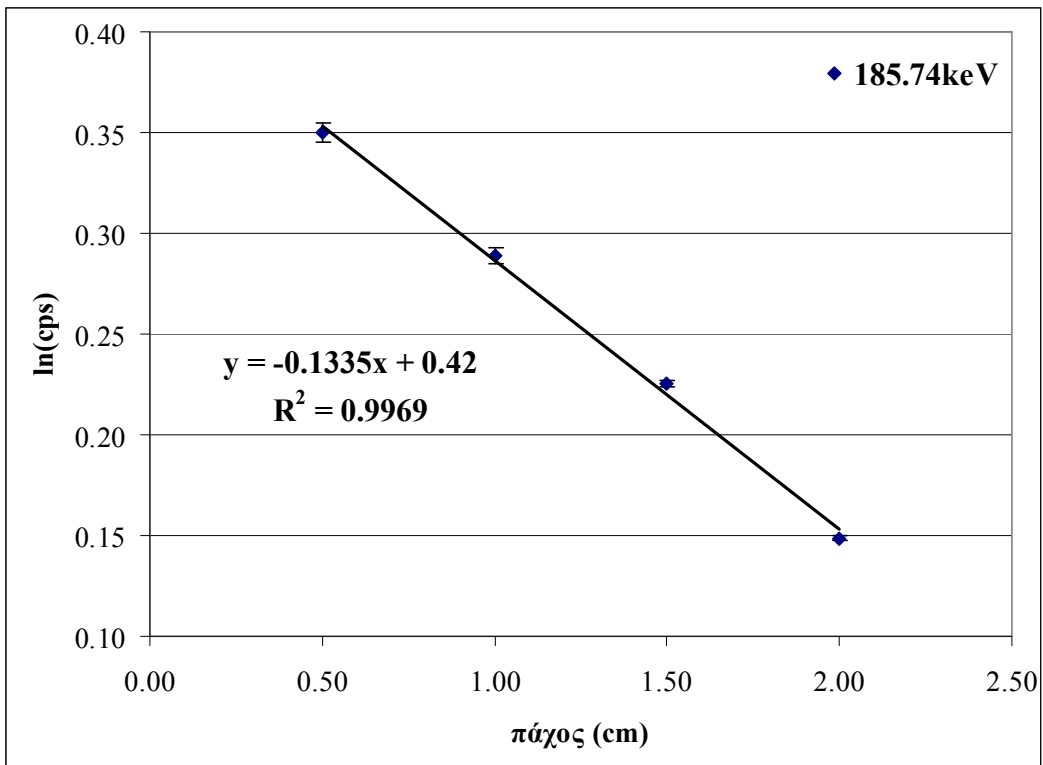
Το δεύτερο υλικό που αναλύθηκε είναι το παραπροϊόν επεξεργασίας βωξίτη (red mud) με πυκνότητα 1.174gr/cm³ και κωδικό MS655. Οι μετρήσεις έγιναν με τον ανιχνευτή «6», σημειακή πηγή ²²⁶Ra και foils φυσικού ουρανίου για πάχη απορροφητή 5, 10, 15 και 20mm. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2, προέκυψαν τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα 4.73, 4.74, 4.75 και 4.76 για τον προσδιορισμό του μ.



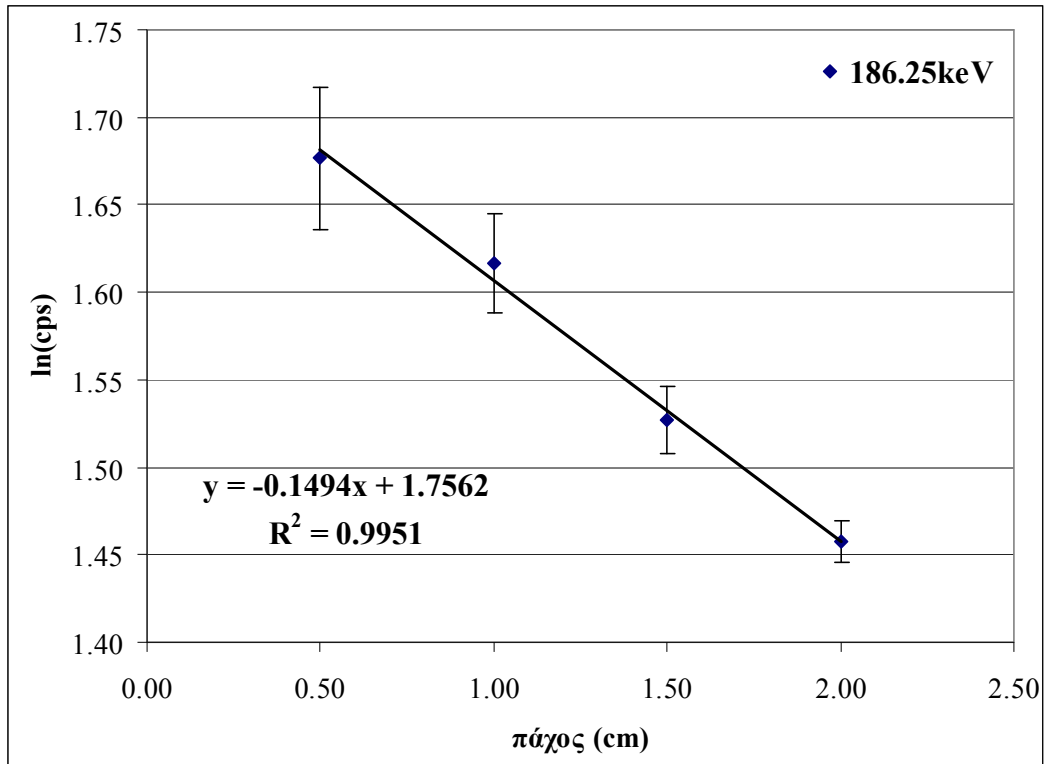
Σχήμα 4.73: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 46.52keV



Σχήμα 4.74: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 63.29keV



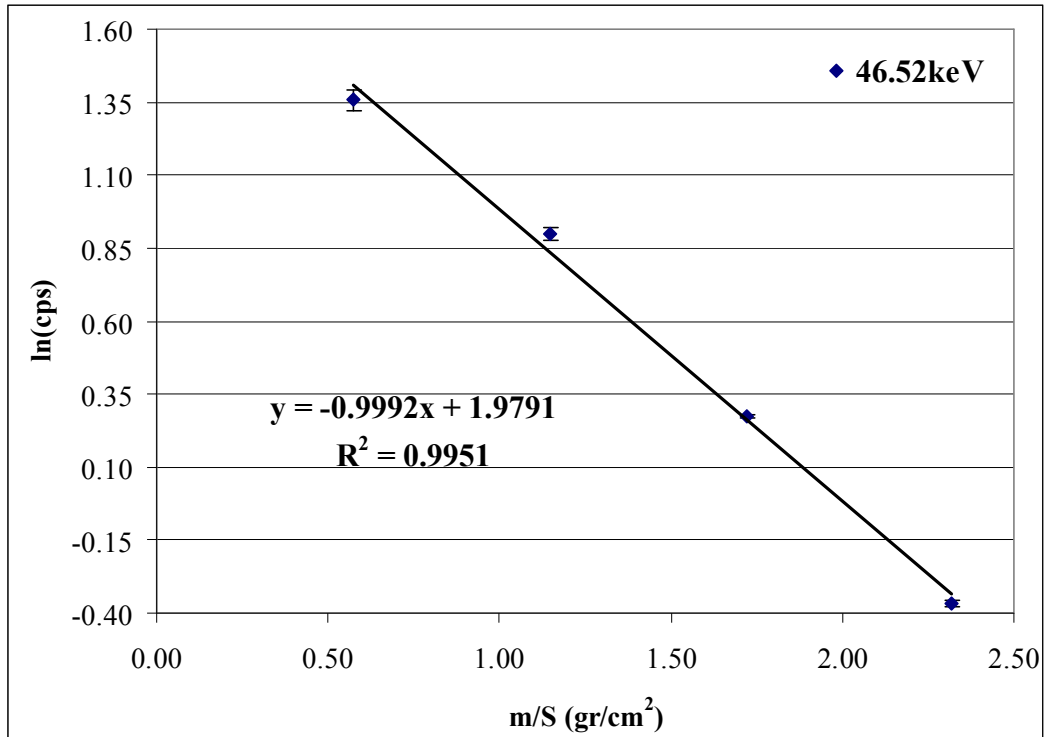
Σχήμα 4.75: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 185.74keV
 [189]



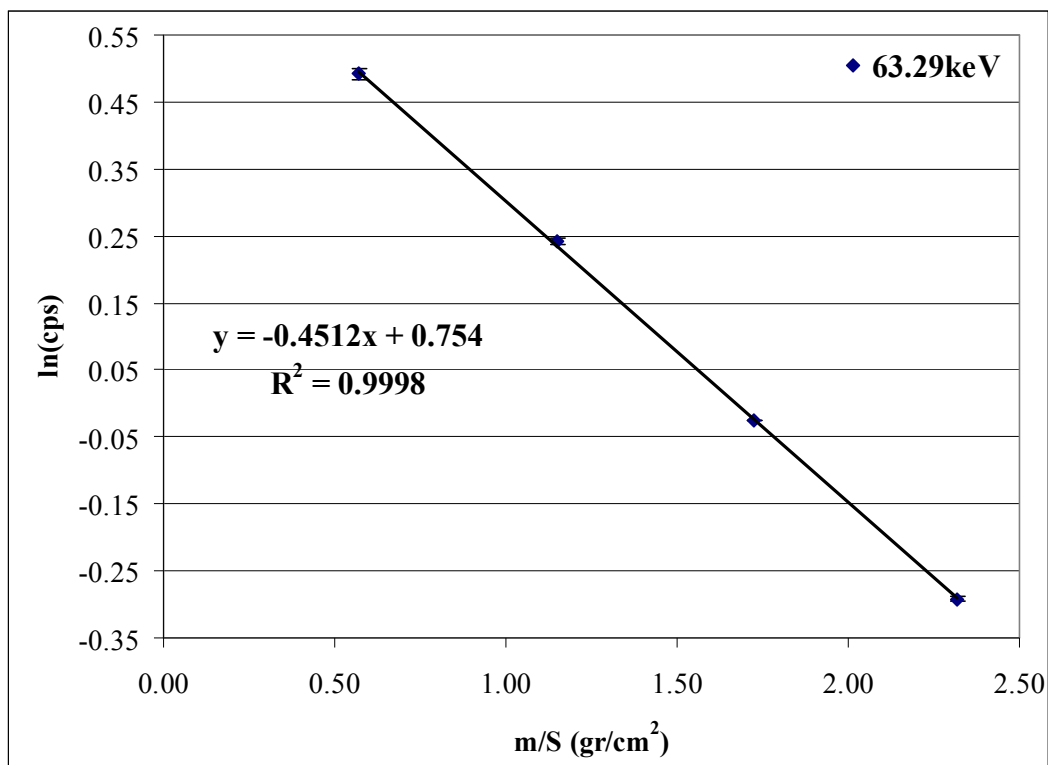
Σχήμα 4.76: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ για ενέργεια 186.25keV

Από τα διαγράμματα 4.73, 4.74, 4.75 και 4.76 εκτιμήθηκε ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης, ως η κλίση της ευθείας αναδρομής των μετρήσεων. Για τα 46.52keV προέκυψε ότι $\mu = 1.1601 \text{ cm}^{-1}$, για τα 63.29keV, $\mu = 0.524 \text{ cm}^{-1}$, για τα 185.74keV, $\mu = 0.1335 \text{ cm}^{-1}$ και για τα 186.25keV, $\mu = 0.1494 \text{ cm}^{-1}$.

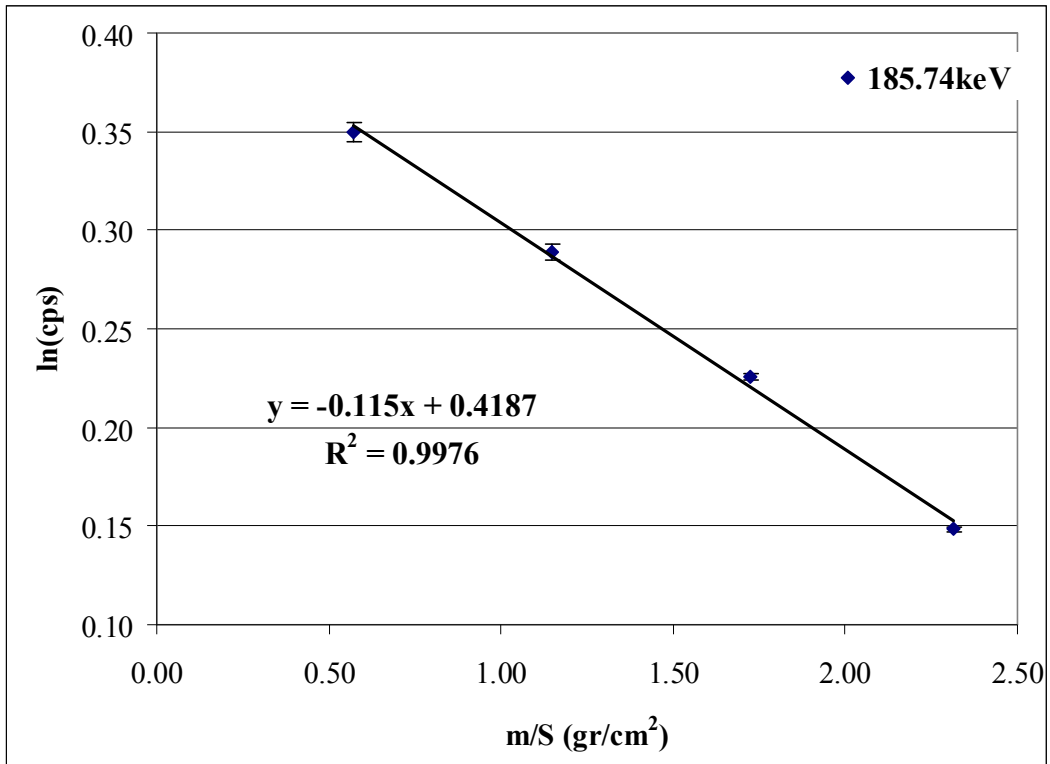
Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκαν και τα διαγράμματα 4.77, 4.78, 4.79 και 4.80 για τον υπολογισμό του μ_m .



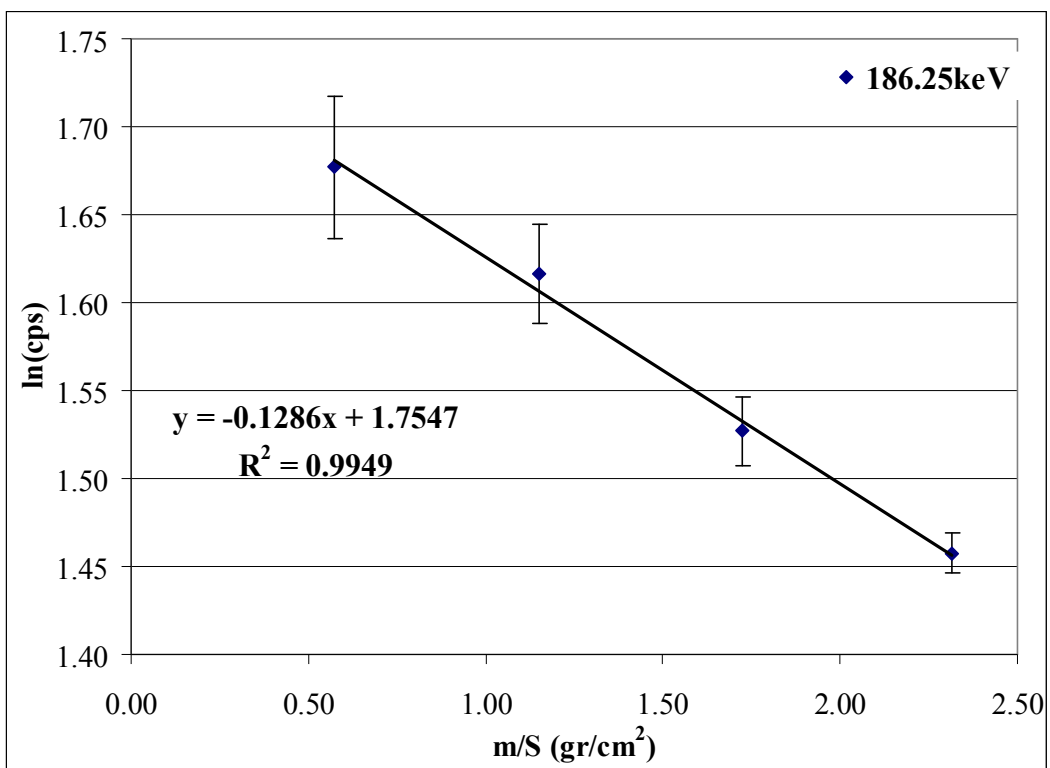
Σχήμα 4.77: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 46.52keV



Σχήμα 4.78: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 63.29keV



Σχήμα 4.79: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 185.74keV



Σχήμα 4.80: Ημιλογαριθμικό διάγραμμα υπολογισμού του μ/ρ για ενέργεια 186.25keV
 [192]

Από τα διαγράμματα 4.77, 4.78, 4.79 και 4.80 εκτιμήθηκε ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης. Για τα 46.52keV προέκυψε ότι $\mu_m = 0.9992\text{cm}^2/\text{gr}$, για τα 63.29keV, $\mu_m = 0.4512\text{cm}^2/\text{gr}$, για τα 185.72keV, $\mu_m = 0.115\text{cm}^2/\text{gr}$ και για τα 186.25keV, $\mu_m = 0.1286\text{cm}^2/\text{gr}$.

Η συνολική διάρκεια ολοκλήρωσης του πειράματος ήταν μία ημέρα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 4.31.

Ενέργεια φωτονίων	Πηγή	μ πειράματος (cm^{-1})	μ/ρ πειράματος (cm^2/gr)
46.52keV	Ra(point)	1.1601±0.0610	0.9992±0.0494
63.29keV	U(foils)	0.5240±0.0064	0.4512±0.0049
185.74keV	U(foils)	0.1335±0.0053	0.1150±0.0040
186.25keV	Ra(point)	0.1494±0.0074	0.1286±0.0065

Πίνακας 4.31: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το μ και το μ/ρ για υλικό «red mud» (MS 655).

4.4.2 Αποτελέσματα υπολογισμού των συντελεστών μ και η από κώδικες H/Y

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην παράγραφο 4.2.2 υπολογίσθηκαν οι συντελεστές μ_a , η_a , η_π και η_{π^*} . Για τον υπολογισμό των συντελεστών η_π και η_{π^*} , οι συντελεστές εξασθένισης (ολικός γραμμικός και ολικός μαζικός) που χρειάζονται για τον υπολογισμό, είναι αυτοί που υπολογίσθηκαν στις παραγράφους 4.6.1 και 4.6.2. Επειδή η σύσταση των συγκεκριμένων δειγμάτων είναι άγνωστη, θα συγκριθούν με όλα τα υλικά για τα οποία έχουν διατίθενται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ καμπύλες αναδρομής, για να διαπιστωθεί με ποιο θα μπορούσαν να προσομοιωθούν.

Στον πίνακα 4.32 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένισης για τα συγκεκριμένα δείγματα.

Δείγμα	Ενέργεια (keV)	μ_{π} (cm^{-1})	μ_{α} χώματος (cm^{-1})	μ_{α} τσιμέντο (cm^{-1})	μ_{α} υγρή τέφρα (cm^{-1})	μ_{α} ιπτ. Τέφρα (cm^{-1})
Παραπροϊόν επεξεργασίας σπανίων γαιών Σουηδίας	46.52	1.4932±0.0355	0.7897	1.0486	0.6215	0.8990
	63.29	0.7322±0.0220	0.5229	0.6425	0.3714	0.5131
	185.74	0.2117±0.0040	0.1897	0.1981	0.1135	0.1410
	186.25	0.2309±0.0098	0.1893	0.1976	0.1132	0.1406
Red Mud	46.52	1.1601±0.0610	0.5223	0.7549	1.1134	0.5499
	63.29	0.5240±0.0064	0.3596	0.4608	0.6502	0.3606
	185.74	0.1335±0.0053	0.1436	0.1440	0.1830	0.1309
	186.25	0.1494±0.0074	0.1433	0.1437	0.1826	0.1306

Πίνακας 4.32: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τον μ_{π} και τον μ_{α} για διάφορα υλικά

Από τον πίνακα 4.32 προέκυψε ο πίνακας 4.33, ο οποίος παρουσιάζει την απόκλιση από την πειραματική τιμή της τιμής που προκύπτει για κάθε υλικό.

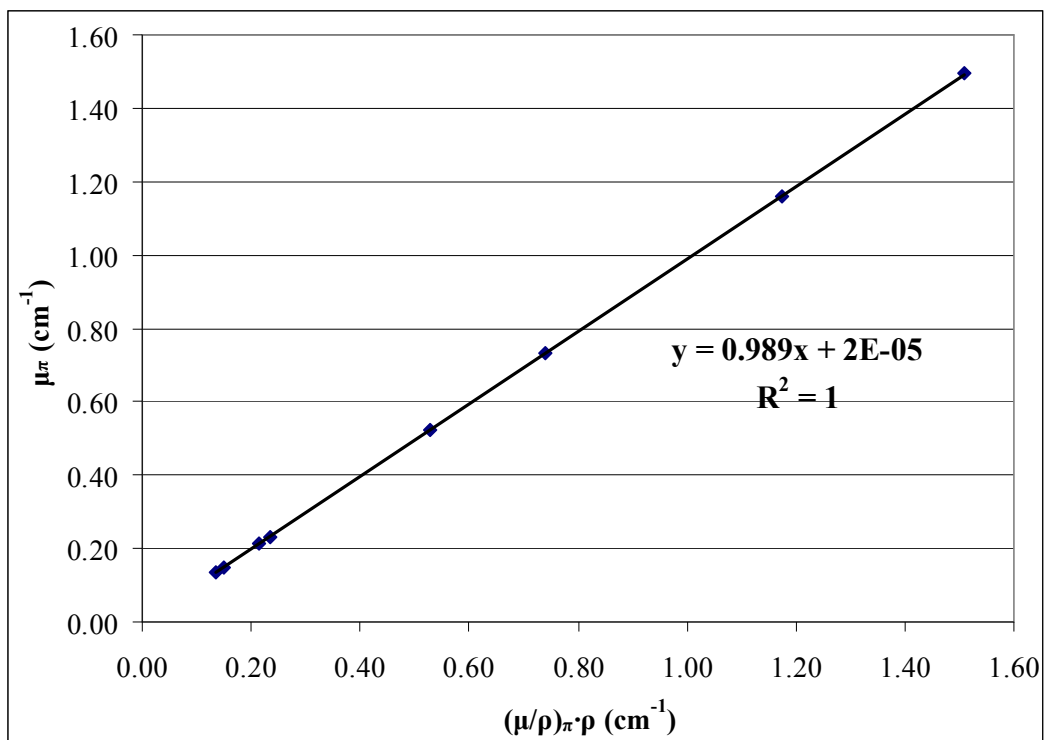
Δείγμα	Ενέργεια (keV)	Απόκλιση			
		Χώμα	Υγρή τέφρα	Τσιμέντο	Ιπτάμενη Τέφρα.
Παραπροϊόν επεξεργασίας σπανίων γαιών Σουηδίας	46.52	-47.11%	-58.38%	-29.77%	-39.79%
	63.29	-28.59%	-49.28%	-12.25%	-29.92%
	185.74	-10.39%	-46.39%	-6.42%	-33.40%
	186.25	-18.02%	-50.97%	-14.42%	-39.11%
Red Mud	46.52	-54.98%	-4.03%	-34.93%	-52.60%
	63.29	-31.37%	24.08%	-12.06%	-31.18%
	185.74	7.57%	37.08%	7.87%	-1.95%
	186.25	-4.08%	22.22%	-3.82%	-12.58%

Πίνακας 4.33: Συγκεντρωτικός πίνακας αποκλίσεων για τον μ_{π} σε σχέση με τον μ_{α} για διάφορα υλικά

Από το πίνακα 4.33 προκύπτει ότι κανένα από τα δύο δείγματα δεν μπορούν να προσομοιωθούν ικανοποιητικά – σε όρους εξασθένησης φωτονίων – με κάποιου από τα υλικά για τα οποία διατίθενται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ συναρτήσεις αναδρομής της μορφής $\mu=f(E,\rho)$, καθώς οι διαφορές των μ τους είναι πολύ μεγάλες. Οι παρατηρούμενες σε ορισμένες περιπτώσεις μικρές αποκλίσεις θα πρέπει να αποδίδονται μάλλον σε τυχαίους λόγους. Ένα σημείο που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι οι σχετικά μεγάλες αποκλίσεις των τιμών του μ που προσδιορίστηκαν για τα δύο υλικά για τις παραπλήσιες ενέργειες 185.72keV και 186.25keV, πράγμα που πιθανώς να οφείλεται στις διαφορετικές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για τον πειραματικό προσδιορισμό του μ για τις δύο ενέργειες.

Επιβεβαιώνοντας τα αποτελέσματα που είχαν προκύψει και στα πειράματα που είχαν προηγηθεί, παρατηρείται ότι υπάρχει ταύτιση των αποτελεσμάτων κατά τον προσδιορισμό του μ_{π} και του $(\mu/\rho)_{\pi}\cdot\rho$, πράγμα που επιβεβαιώνει ότι και οι δύο μέθοδοι εξάγουν στατιστικά το ίδιο αποτέλεσμα. Από τα αποτελέσματα προέκυψε το διάγραμμα 4.81.

Στο διάγραμμα 4.81 παρατηρείται ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ_{π} που προέκυψε από το πείραμα και του ολικού γραμμικού συντελεστή που προέκυψε από τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένησης πολλαπλασιασμένο με την πυκνότητα $(\mu/\rho)_{\pi}\cdot\rho$. Προκειμένου να ελεγχθεί το κατά πόσον ταυτίζονται και στατιστικά οι συντελεστές θα πρέπει η κλίση της ευθείας αναδρομής να έχει συντελεστή διεύθυνσης ίσο με τη μονάδα και να τέμνει τον άξονα $y'y$ στο σημείο μηδέν. Για να ελέγξουμε την συγκεκριμένη υπόθεση θα κάνουμε ένα t test. Η διαδικασία που ακολουθήσαμε παρουσιάζεται στο παράρτημα Γ. Τα αποτελέσματα του t test εμφανίζονται στους πίνακες 4.34: έως 4.37:



Σχήμα 4.81: Συσχέτιση μεταξύ του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης που προέκυψε απ' ευθείας (μ_{π}) και μέσω του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένησης $(\mu/\rho)_{\pi} \cdot \rho$ που προέκυψαν πειραματικά για υλικά που προσομοιώνονται με χρώμα

	Συντελεστής διεύθυνσης ευθείας a_1	Τιμή σύγκρισης a_{10}	t_0	Τιμή t σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%	Τιμή t σε επίπεδο εμπιστοσύνης 99%
Σύγκριση $\mu_{\pi} - (\mu/\rho)_{\pi} \cdot \rho$ (4.81)	0.989	1	190.816	2.447	3.707

Πίνακας 4.34: Δεδομένα για την διεξαγωγή του t τεστ για τα υλικά MS654 και MS655 για τον συντελεστή διεύθυνσης της ευθείας αναδρομής

	Διάστημα εμπιστοσύνης άνω άκρο (95%)	Διάστημα εμπιστοσύνης κάτω άκρο (95%)	Διάστημα εμπιστοσύνης άνω άκρο (99%)	Διάστημα εμπιστοσύνης κάτω άκρο (99%)
	0.989	0.989	0.989	0.989
Σύγκριση $\mu_{\pi} - (\mu/\rho)_{\pi} \cdot \rho$ (4.81)	2.226	2.003	2.284	1.946

Πίνακας 4.35: Διαστήματα εμπιστοσύνης για τον υπολογισμό του συντελεστή διεύθυνσης της ευθείας αναγωγής για τα υλικά MS654 και MS655

	Σταθερός όρος ευθείας a_0	Τιμή σύγκρισης a_{00}	t_0	Τιμή t σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%	Τιμή t σε επίπεδο εμπιστοσύνης 99%
	-2.00E-05	0	0.51746	2.447	3.707
Σύγκριση $\mu_\pi - (\mu/\rho)_\pi \cdot \rho$ (4.81)	0.1769	0	3.05751	2.447	3.707

Πίνακας 4.36: Δεδομένα για την διεξαγωγή του t test για τα υλικά MS654 και MS655 για τον σταθερό όρο της ευθείας αναδρομής

	Σταθερός όρος ευθείας a_0	Τιμή σύγκρισης a_{00}	t_0	Τιμή t σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%	Τιμή t σε επίπεδο εμπιστοσύνης 99%
	-2.00E-05	0	0.51746	2.447	3.707
Σύγκριση $\mu_\pi - (\mu/\rho)_\pi \cdot \rho$ (4.81)	0.1769	0	3.05751	2.447	3.707

Πίνακας 4.37: Διαστήματα εμπιστοσύνης για τον υπολογισμό του σταθερού όρου της ευθείας αναγωγής για τα υλικά MS654 και MS655

Από το t test προέκυψε ότι οι δύο συντελεστές δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά.

Καθώς οι δύο συντελεστές ταυτίζονται στατιστικά δεν υπολογίσθηκε ο συντελεστής η_π και με τους δύο, αλλά μόνο με τον έναν από τους δύο. Έτσι, για τα διάφορα υλικά προέκυψαν οι συντελεστές αναγωγής της απόδοσης και παρουσιάζονται στον πίνακα 4.38:

Από τον πίνακα 4.38: προέκυψαν οι αποκλίσεις για κάθε ενέργεια και για κάθε υλικό. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.39

Όπως παρατηρείται, παρουσιάζονται σημαντικές αποκλίσεις σε πολλές περιπτώσεις, και μάλιστα μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες αποκλίσεις μεταξύ των ολικών γραμμικών συντελεστών εξασθένισης. Παρόλα αυτά αξίζει να παρατηρηθεί ότι οι

αποκλίσεις αυτές είναι πολύ μικρότερες για τις υψηλότερες ενέργειες (185.74keV,186.25keV).

Δείγμα	Ενέργεια (keV)	Πυκνότητα (g cm ⁻³)	η_{π}	η_{α} χόμα	η_{α} υγρή τέφρα	η_{α} τσιμέντο	η_{α} ιπτ. τέφρα
Red Mud	46.52	1.726	0.3574	0.5774	0.6831	0.4677	0.5251
	63.29	1.726	0.5355	0.6723	0.8231	0.5867	0.6804
	185.74	1.726	0.8845	0.9212	1.0713	0.9069	1.0126
	186.25	1.726	0.8543	0.9215	1.0715	0.9074	1.0129
Παραπροϊόν επεξεργασίας σπανίων γαιών Σουηδίας	46.52	1.174	0.4331	0.7659	0.4469	0.5965	0.7409
	63.29	1.174	0.6714	0.8377	0.5819	0.7272	0.8364
	185.74	1.174	1.0279	1.0072	0.9328	1.0064	1.0334
	186.25	1.174	0.9953	1.0074	0.9333	1.0067	1.0336

Πίνακας 4.38: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τον συντελεστή η_{π} από την πειραματική τιμή μ_{π} σε σχέση με τον συντελεστή η_{α} από την τιμή από τις καμπύλες μ_{α} για διάφορα υλικά

Δείγμα	Ενέργεια (keV)	Απόκλιση			
		Χόμα	Υγρή τέφρα	Τσιμέντο	Ιπτάμενη τέφρα.
Παραπροϊόν από σπάνιες γαίες	46.52	-47.11%	91.11%	30.86%	46.90%
	63.32	-28.59%	53.71%	9.55%	27.06%
	185.74	-10.39%	21.11%	2.53%	14.47%
	186.25	-18.02%	25.42%	6.21%	18.57%
Red mud	46.52	-54.98%	3.18%	37.72%	71.07%
	63.32	-31.37%	-13.34%	8.30%	24.57%
	185.74	7.57%	-9.25%	-2.10%	0.53%
	186.25	-4.08%	-6.23%	1.14%	3.85%

Πίνακας 4.39: Συγκεντρωτικός πίνακας αποκλίσεων για τον συντελεστή η_{π} από την πειραματική τιμή μ_{π} σε σχέση με τον συντελεστή η_{α} από την τιμή από τις καμπύλες μ_{α} για διάφορα υλικά

Συμπερασματικά, όπως προκύπτει από τα πειράματα που έγιναν για τα δύο υλικά, στην περίπτωση που ένα υλικό δεν εντάσσεται σαφώς σε κάποια κατηγορία (π.χ χρώμα) θα πρέπει να ακολουθείται πειραματική διαδικασία για τον υπολογισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης, και με το δεδομένο αυτό να υπολογίζεται ο συντελεστής αναγωγής της απόδοσης. Η οποιαδήποτε προσπάθεια να προσομοιωθούν οι ιδιότητες εξασθένησης ενός υλικού με κάποιο άλλο υλικό διαφορετικής σύστασης ενέχει τον κίνδυνο εισαγωγής μεγάλης απόκλισης στην τιμή του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης και κατά συνέπεια του αντίστοιχου συντελεστή αναγωγής της απόδοσης.

4.5 Συμπεράσματα κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό εφαρμόστηκε η μεθοδολογία πειραματικού προσδιορισμού του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ , καθώς και του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένησης μ/ρ , η οποία αναπτύχθηκε και επιλέχθηκε στο Κεφάλαιο 3, δείγματα χρώματος και άλλα υλικά. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε η εφαρμογή της μεθοδολογίας σε χρώματα που είχαν συλλεχθεί από την Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, κοκκομετρικά κλάσματα χρώματος που είχαν συλλεχθεί από την περιοχή της Μεγαλόπολης, καθώς και ορισμένα παραπροϊόντα βιομηχανικών διεργασιών. Εν συνεχεία, έγινε σύγκριση των τιμών που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία με αυτές που προκύπτουν από τις καμπύλες αναδρομής $\mu=f(E,\rho)$ για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων. Τέλος, έγινε συγκριτική ανάλυση των συντελεστών εξασθένησης μ και μ/ρ με τον συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η που προκύπτει από τον κώδικα factor για διάφορα υλικά.

Γενικά, προέκυψε ότι οι τιμές του συντελεστή μ που εκτιμώνται άμεσα πειραματικά, δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά από τις τιμές του συντελεστή μ που προκύπτει έμμεσα, ως γινόμενο του πειραματικά εκτιμούμενου συντελεστή μ/ρ και της πυκνότητας, κάτι που άλλωστε ήταν και αναμενόμενο. Όπως διαπιστώθηκε, η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε οδηγεί σε ικανοποιητική ακρίβεια, τόσο του συντελεστή μ όσο και του συντελεστή μ/ρ . Ειδικότερα, κατά την ανάλυση των διαφόρων κοκκομετρικών κλασμάτων του ίδιου δείγματος χρώματος, διαπιστώθηκε

ότι, ενώ η τιμή του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ παρουσιάζει σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα διάφορα κλάσματα, η τιμή του ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένισης, παρουσιάζουν πολύ μικρές διαφορές. Αυτό σημαίνει, ότι για τον προσδιορισμό των συντελεστών εξασθένισης κοκκομετρικών κλασμάτων, μπορεί να υπολογίζεται ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης για ένα κοκκομετρικό κλάσμα και στη συνέχεια, μέσω αυτού και της πυκνότητας κάθε κλάσματος να υπολογίζονται οι συντελεστές μ .

Όσον αφορά στη σύγκριση των τιμών του συντελεστή μ που εκτιμάται πειραματικά, με τις αντίστοιχες τιμές του συντελεστή μ που υπολογίζονται για χρώμα από τη συνάρτηση αναδρομής της μορφής $\mu=f(E,\rho)$, προέκυψε ότι δεν διαπιστώνεται στατιστικά σημαντική διαφορά και κατά συνέπεια κρίνεται ότι για την περίπτωση του χρώματος δεν είναι αναγκαίος ο πειραματικός προσδιορισμός του μ , τουλάχιστον στην περιοχή ισχύος της συνάρτησης $\mu=f(E,\rho)$.

Αναφορικά με το συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η , διαπιστώθηκε ότι η απόκλιση μεταξύ της τιμής που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας πειραματική τιμή και τιμή υπολογιζόμενη από τη συνάρτηση αναδρομής $\mu=f(E,\rho)$ για χρώμα, ήταν εν γένει στην περιοχή από 1% έως 7% .

Η διερεύνηση που έγινε αναφορικά με τους συντελεστές μ και η για τα δύο παραπροϊόντα βιομηχανικών διεργασιών, έδειξε ότι δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται κανένα υλικό από αυτά που εξετάστηκαν (ιπτάμενη τέφρα, τέφρα βάσης και τσιμέντο) προκειμένου να προσομοιώνονται οι ιδιότητες εξασθένισης των παραπροϊόντων βιομηχανικών διεργασιών. Στην περίπτωση που απαιτείται η ανάλυση τέτοιων υλικών είναι απαραίτητος ο πειραματικός προσδιορισμός του μ και εν συνεχεία ο υπολογισμός του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η . Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η προσομοίωση του υλικού red mud με ιπτάμενη τέφρα μπορεί να οδηγήσει σε σφάλμα μέχρι και 71% κατά την εκτίμηση του συντελεστή μ (%) και 70% του συντελεστή η (%).

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στο παρόν Κεφάλαιο γίνεται μια σύνοψη των πεπραγμένων στη παρούσα ΔΕ. Συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα όλων των Κεφαλαίων, υπογραμμίζονται τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν και τέλος επισημαίνονται τα αποτελέσματα της ΔΕ που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για περαιτέρω διερεύνηση στο μέλλον, η οποία όμως ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας ΔΕ.

5.1 Συμπεράσματα ΔΕ

Αρχικός στόχος της παρούσας ΔΕ ήταν η εύρεση βελτιωμένης γεωμετρίας πειράματος για τον προσδιορισμό του συντελεστή εξασθένισης μ για χαμηλές ενέργειες φωτονίων και πιο συγκεκριμένα για την περιοχή ενέργειας φωτονίων περί τα 46keV. Η συγκεκριμένη περιοχή ενέργειας εκλέχθηκε, καθώς δεν υπήρχαν ικανοποιητικά αποτελέσματα για τον προσδιορισμό του συντελεστή εξασθένισης μ από την [ΔΕ Φωτεινάκη, 2012], όπως υπήρχαν για άλλες ενέργειες.

Η πρώτη σειρά πειραμάτων έγινε με απορροφητή νερό για διάφορες γεωμετρίες πειράματος με στόχο τον προσδιορισμό του συντελεστή εξασθένισης με απόκλιση όχι μεγαλύτερη $\pm 10\%$. Η σύγκριση έγινε με την τιμή, η οποία προτείνεται από τη βάση δεδομένων XCOM του NIST. Εκτός από τον συντελεστή εξασθένισης μ , έγινε και προσδιορισμός του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένισης μ_m . Ο λόγος για τον οποίο έγινε η μελέτη του συντελεστή μ_m είναι το γεγονός ότι δεν εξαρτάται από τον υπολογισμό της πυκνότητας του υλικού του απορροφητή. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων, φάνηκε ότι η αποκλίσεις του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένισης μ_m είναι γενικά μικρότερες από τις αποκλίσεις του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης μ , πράγμα που πιθανόν οφείλεται στην εισαγωγή πρόσθετης αβεβαιότητας κατά τον προσδιορισμό του ύψους του απορροφητή στο δοχείο. Η γεωμετρία δέσμης φωτονίων, η οποία εκλέχθηκε για τον προσδιορισμό του ολικού γραμμικού και μαζικού συντελεστή εξασθένισης, ήταν εκείνη με τη σημειακή πηγή του ^{226}Ra σε απόσταση 148mm από τον ανιχνευτή, καθώς έδινε αποτελέσματα μέσα στα όρια της αποδεκτής απόκλισης 10%.

Αφού εκλέχθηκε η κατάλληλη γεωμετρία δέσμης φωτονίων, ακολούθησε μελέτη σε υλικά γνωστής σύστασης αλλά διαφορετικών πυκνοτήτων. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης σειράς πειραμάτων έδειξαν ότι η γεωμετρία που υιοθετήθηκε στην προηγούμενη σειρά πειραμάτων δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, δηλαδή απόκλιση έως $\pm 10\%$, για υλικά διαφόρων πυκνοτήτων και ενέργεια φωτονίων 46.52keV . Στη συγκεκριμένη σειρά πειραμάτων εξετάστηκαν και φωτόνια 63.29keV , που εκπέμπονται από πηγή φυσικού ουρανίου και μέχρι τώρα δεν είχαν εξεταστεί πειραματικά. Από τα αποτελέσματα προέκυψε, ότι για τα φωτόνια των 63.29keV , η συγκεκριμένη γεωμετρία δίνει οριακά αποδεκτά αποτελέσματα και υπάρχει περιθώριο βελτίωσης της.

Μετά την επιβεβαίωση σε δείγματα γνωστής σύστασης, η γεωμετρία η οποία επιλέχθηκε, εφαρμόστηκε σε περιβαλλοντικά δείγματα. Εκτός από τον πειραματικό προσδιορισμό των συντελεστών εξασθένησης μ και μ_m , χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας factor για τον υπολογισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης, που προκύπτει από τις καμπύλες αναδρομής της μορφής $\mu=f(E,\rho)$ και τον υπολογισμό του συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η . Τα είδη δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν χρώματα, που είχαν συλλεχθεί στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ από την Πολυτεχνειούπολη και κοκκομετρικά κλάσματα χρώματος που έχει συλλεχθεί στην περιοχή της Μεγαλόπολης.

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων για τα χρώματα που συλλέχθηκαν από τη Πολυτεχνειούπολη, προέκυψε ότι ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης, ο οποίος προσδιορίζεται πειραματικά, ταυτίζεται στατιστικά με τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένησης που προσδιορίζεται πειραματικά πολλαπλασιασμένο με την πυκνότητα. Αυτό σημαίνει ότι η συγκεκριμένη μεθοδολογία υπολογισμού των συντελεστών εξασθένησης δίνει κοινά αποτελέσματα για τους δύο συντελεστές. Ακόμη προέκυψε ότι ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης ο οποίος υπολογίζεται από τις καμπύλες αναδρομής ταυτίζεται στατιστικά με τους συντελεστές εξασθένησης που προσδιορίζονται πειραματικά. Αυτό σημαίνει ότι για υλικό δείγματος χρώμα, ανεξαρτήτως της ακριβούς σύστασης του, οι καμπύλες από συναρτήσεις αναδρομής της μορφής $\mu=f(E,\rho)$ δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα για τον προσδιορισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης. Συνεπώς, για

γρήγορη εξαγωγή αποτελέσματος για υλικό απορροφητή χρώμα, δεν είναι απαραίτητο να ακολουθηθεί πειραματική διαδικασία. Για τον συντελεστή αναγωγής της απόδοσης η στα 46.52keV, προέκυψε ότι είναι μικρότερος της μονάδας και εμφανίζει γενικά μια πτωτική τάση όσο αυξάνεται ο συντελεστής εξασθένησης μ . Αυτό είναι λογικό να συμβαίνει καθώς για τα συγκεκριμένα δείγματα ο συντελεστής εξασθένησης μ που υπολογίστηκε πειραματικά είναι μεγαλύτερος από τον συντελεστή εξασθένησης που έχει η πρότυπη πηγή βαθμονόμησης – 4M HCl.

Για τα επιμέρους κοκκομετρικά κλάσματα χρώματος, από τα αποτελέσματα των πειραμάτων προέκυψε ότι οι συντελεστές εξασθένησης που υπολογίζονται πειραματικά ταυτίζονται στατιστικά, άρα και εδώ η μέθοδος υπολογισμού δίνει κοινά αποτελέσματα για τους δύο συντελεστές. Ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα που προέκυψε από την μελέτη των κοκκομετρικών κλασμάτων χρώματος είναι το γεγονός ότι για τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένησης μ φαίνεται ότι οι τιμές επηρεάζονται από την κοκκομετρία, πρακτικά δηλαδή από την πυκνότητα του δείγματος, καθώς η πυκνότητα κάθε κοκκομετρίας ήταν ελαφρώς διαφοροποιημένη από τις υπόλοιπες. Όμως, αυτές οι διαφορές στην πυκνότητα δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα για τον ολικό μαζικό συντελεστή εξασθένησης μ_m . Αυτό σημαίνει ότι για τα συγκεκριμένα δείγματα, για κάθε κοκκομετρία υπό εξέταση, μπορεί να υπολογίζεται ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης για ένα κοκκομετρικό κλάσμα, και στη συνέχεια, γνωρίζοντας την πυκνότητα του κάθε κλάσματος να υπολογίζεται και ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ , χωρίς να χρειάζεται πειραματική διαδικασία για όλα τα κοκκομετρικά κλάσματα. Για τον συντελεστή αναγωγής της απόδοσης τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν όμοια με αυτά που προέκυψαν από τα χρώματα πεδίου.

Επιπλέον των χωμάτων, η μέθοδος εφαρμόστηκε και σε δύο παραπροϊόντα βιομηχανικών διεργασιών, για τα οποία δεν έχει προσδιοριστεί καμπύλη αναδρομής για τον ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένησης. Για τα υλικά αυτά προέκυψε ότι, ενώ τα αποτελέσματα για τους γραμμικούς και μαζικούς συντελεστές εξασθένησης μ και μ_m είναι συμβατά, αυτά σε κάθε περίπτωση διαφέρουν σημαντικά από τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις διαθέσιμες στο ΕΠΤ-ΕΜΠ συναρτήσεις αναδρομής της μορφής $\mu=f(E,\rho)$. Ως αποτέλεσμα, οι αποκλίσεις στο συντελεστή

διόρθωσης αναγωγής της απόδοσης έφταναν έως και 70%, γεγονός που σημαίνει ότι για υλικά, των οποίων δε είναι γνωστή η σύσταση, δεν αποτελεί ασφαλή προσέγγιση η χρήση κάποιας από τις διαθέσιμες συναρτήσεις αναδρομής της μορφής $\mu=f(E,\rho)$, αλλά πρέπει να ακολουθείται πειραματική διαδικασία για τον υπολογισμό των συντελεστών εξασθένησης μ και μ_m .

5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Ορισμένα σημεία τα οποία έχει ενδιαφέρον να διερευνηθούν περαιτέρω σε μελλοντική εργασία είναι τα εξής:

- I. Βελτίωση της γεωμετρίας δέσμης φωτονίων για τον προσδιορισμό του ολικού και μαζικού συντελεστή εξασθένησης για τα 63.29keV. Για τον υπολογισμό του συντελεστή εξασθένησης μ στα 63.29keV, στο ΕΠΤ ΕΜΠ χρησιμοποιούνται συναρτήσεις αναδρομής της μορφής $\mu=f(E,\rho)$ [ΔΔ Αναγνωστάκης, 1998]. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης ΔΕ έγινε προσπάθεια για πειραματικό υπολογισμό του μ στη συγκεκριμένη ενέργεια και από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η τιμή που προσδιορίστηκε πειραματικά είναι οριακά αποδεκτή σε σχέση με αυτήν που προτείνει η βάση δεδομένων NIST XCOM.
- II. Εφαρμογή/μελέτη της βελτιωμένης γεωμετρίας που προτείνεται στην παρούσα ΔΕ σε άλλα υλικά, και ιδιαίτερα ιπτάμενη τέφρα από θερμικούς σταθμούς, στην οποία απαντώνται υψηλές συγκεντρώσεις ^{210}Pb .
- III. Επέκταση των καμπυλών που προέκυψαν [ΔΔ Αναγνωστάκης, 1998] και για άλλα υλικά. Από τα αποτελέσματα της παρούσα ΔΕ προέκυψε ότι η προσομοίωση άλλων υλικών με χόμα δεν οδηγεί σε ικανοποιητικά αποτελέσματα από τον κώδικα factor και την υπορουτίνα abscor.
- IV. Χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo για τη διερεύνηση πιθανών βελτιστοποιήσεων της γεωμετρίας προσδιορισμού του μ , ώστε να μειωθεί ο απαιτούμενος αριθμός πειραμάτων.
- V. Επέκταση της μελέτη της επίδρασης της κοκκομετρίας στον προσδιορισμό του ολικού μαζικού συντελεστή εξασθένησης, προκειμένου να διερευνηθεί περαιτέρω η παρατήρηση που έγινε στα πλαίσια της ΔΕ σχετικά με την ανεξαρτησία του

συντελεστή μ/ρ από το κοκκομετρικό κλάσμα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον από αυτή την άποψη παρουσιάζουν υλικά στα οποία αναμένεται να υπάρχει διαφοροποίηση στη χημική σύσταση σε σχέση με την κοκκομετρία, όπως για παράδειγμα η ιπτάμενη τέφρα.

Παράρτημα Α: Πιστοποιητικό ανιχνευτή LEGe

Ο ανιχνευτή LEGe είναι εγκατεστημένος στο ΕΠΤ–ΕΜΠ και έχει περιγραφεί πλήρως στην παράγραφο 2.2. Ο συγκεκριμένος ανιχνευτής χρησιμοποιήθηκε καθ’ όλη τη σειρά πειραμάτων στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ και στο συγκεκριμένο παράρτημα παρατίθεται το πιστοποιητικό του.

Section 7

DETECTOR SPECIFICATIONS AND PERFORMANCE DATA

7.1 SPECIFICATIONS Model GL2020-7500 Serial Number b 87547

The purchase specifications and therefore the warranted performance of this detector are as follow:

Energy	5.9 keV	122 keV	
Resolution [eV (FWHM)]	400	680	

Cryostat Description or Drw. No. if special Vertical dipstick, type 7500 + 4" CFE + PHW

7.2 PHYSICAL/PERFORMANCE DATA Date September 16th, 1988

Actual performance of this detector when tested is given below.

Active Diameter 50.5 mm
 Active Area 2000 mm²
 Thickness 20 mm
 Distance from Window 5 mm
 Window Thickness .5 mm

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Depletion Voltage (-)1500 Vdc.
 Recommended Bias Voltage (-)2000 Vdc.
 Reset Rate at Recommended Bias / sec. (PO Preamp only)
 Preamplifier Test Point Voltage at Recommended Bias + .4 Vdc. (RC Preamp only)

RESOLUTION AND EFFICIENCY - With Amp. Time Constant of 4 microseconds.

Isotope	Fe ⁵⁵	Co ⁵⁷	Co ⁵⁷		
Energy (keV)	5.9	6.4 *	122		
FWHM (eV)	341		530		
FWTM (eV)			996		

* Substitutes for Fe-55 in some cases where Fe-55 peaks are not well separated.

Παράρτημα Β: Επίδραση του προσδιορισμού της πυκνότητας στη μέτρηση του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων για κάθε ενέργεια και για κάθε υλικό υπολογιζόταν ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ και ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης μ/ρ . Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε ο υπολογισμός και των δύο ήταν η παρατήρηση ότι, για τον ολικό μαζικό συντελεστή οι αποκλίσεις από τις δεδομένες τιμές που έδινε το NIST ήταν πάντα μικρότερες, σε σχέση με τις αποκλίσεις που παρουσίαζε ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης. Στο συγκεκριμένο παράρτημα εξετάζεται μια πιθανή ερμηνεία του φαινομένου αυτού, με βάση τη δυσκολία ακριβούς προσδιορισμού της πυκνότητας, και κατ' επέκταση του πάχους του απορροφητή, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων προσδιορισμού των συντελεστών μ και μ/ρ .

Από τη θεωρία, που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.3.2 είναι γνωστό ότι για παράλληλη μονοενεργειακή δέσμη φωτονίων ενέργειας I_0 (φωτόνια·cm⁻²·s⁻¹) που προσπίπτει κάθετα σε υλικό πάχους x , το οποίο έχει ολικό γραμμικό συντελεστή εξασθένησης μ , η ένταση της εξερχόμενης από το υλικό δέσμης είναι

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (B.1)$$

όπου:

I_0 : η ένταση που θα είχε η παράλληλη δέσμη εάν δεν είχε υποστεί εξασθένηση μέσα στο υλικό (φωτόνια/cm²·s).

x : το πάχος του υλικού, στο οποίο υφίστανται εξασθένηση τα φωτόνια που εκπέμπονται από την πηγή. Το πάχος αυτό ισοδυναμεί με το μήκος διαδρομής των φωτονίων μέσα στο υλικό. (cm).

Για την εφαρμογή της σχέσης B.1 για τον προσδιορισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή μ , πρέπει να είναι γνωστά τα διάφορα πάχη απορροφητή x_i . Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, το πάχος x_i προσδιορίζεται από τη μάζα του m_i υλικού που τοποθετείται στο δοχείο και την πυκνότητα του υλικού ρ , η οποία έχει

μετρηθεί πειραματικά. Αν για λόγους απλότητας θεωρηθεί ότι το δοχείο είναι κυλινδρικό με εμβαδό βάσης S , το εκάστοτε πάχος απορροφητή προκύπτει από τη σχέση:

$$x_i = \frac{m_i}{\rho \cdot S} \quad (\text{B.2})$$

Αν όμως, κατά την πραγματοποίηση του πειράματος για ένα ορισμένο πάχος, το υλικό δεν έχει συμπιεστεί στον ίδιο βαθμό με αυτόν που είχε κατά τη μέτρηση της πυκνότητας, και εμφανίζει διαφορετική πυκνότητα ρ' , το προσδιοριζόμενο πάχος απορροφητή δεν είναι το πραγματικό, αλλά έχει κάποια άλλη τιμή x_i' , που δίνεται από τη σχέση:

$$x_i' = \frac{m_i}{\rho' \cdot S} \quad (\text{B.3})$$

Επειδή και στις δύο περιπτώσεις το m_i θα είναι ίδιο θα ισχύει:

$$m = x \cdot S \cdot \rho = x' \cdot S \cdot \rho' \Rightarrow x' = \frac{x \cdot \rho}{\rho'} \quad (\text{B.4})$$

Η τιμή του πάχους x_i που χρησιμοποιείται για την προσαρμογή, δεν ακολουθεί πλέον τη σχέση (B.1), αλλά μια τροποποιημένη σχέση:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} = I_0 \cdot e^{-\mu x (\rho/\rho')} \quad (\text{B.5})$$

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, η τιμή που προσδιορίζεται από την κλίση της ευθείας αναδρομής είναι ίση με $\mu \cdot (\rho/\rho')$ και επηρεάζεται από την απόκλιση μεταξύ της πυκνότητας που μετρήθηκε αρχικά και αυτής που πραγματικά επικρατεί για κάθε πάχος απορροφητή. Αυτό συμβαίνει διότι κατά τη διάρκεια μέτρησης της πυκνότητας οι κόκκοι του υλικού ήταν πολύ συμπιεσμένοι, ενώ κατά τη διεξαγωγή του πειράματος οι κόκκοι συμπίεστηκαν λιγότερο και έτσι διαφοροποιήθηκε η πυκνότητα.

Στην περίπτωση που προσδιορίζεται απ' ευθείας ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένισης μ/ρ , η χρησιμοποιούμενη σχέση είναι:

$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{\mu}{\rho} \left(\frac{m}{S}\right)} \quad (\text{B.6})$$

Στη σχέση αυτή, το μεταβαλλόμενο μέγεθος πλέον είναι το m , το οποίο προσδιορίζεται με ακρίβεια από τη ζύγιση και δεν επηρεάζεται από πιθανές διαφοροποιήσεις στο βαθμό συμπίεσης του υλικού.

Παράρτημα Γ: Διαδικασία διεξαγωγής t –test

Στη συγκεκριμένη ΔΕ διενεργήθηκαν μία σειρά από t-test προκειμένου να συγκριθούν διάφορα μεγέθη μεταξύ τους. Η σύγκριση έγινε βάζοντας τα δύο μεγέθη στο ίδιο διάγραμμα για τις αντίστοιχες ενέργειες. Κατά συνέπεια, η ευθεία αναδρομής των σημείων που προέκυπταν θα έπρεπε να ταυτίζεται στατιστικά με την $y=x$, δηλαδή ο συντελεστής διεύθυνσής της να ταυτίζεται με την μονάδα και ο σταθερός όρος με το μηδέν. Στο συγκεκριμένο παράρτημα παρατίθεται ο τρόπος με τον οποίο διεξήχθησαν τα t test, για κάθε περίπτωση [Σιμόπουλος, 1990].

Για μια ευθεία αναδρομής $y = a_1 \cdot x + a_0$ το εκτιμώμενο τυπικό σφάλμα της κλίσης a_1 δίνεται από τον τύπο:

$$se(a_1) = \frac{s}{\sqrt{\sum x_i^2 - n \cdot \bar{x}^2}},$$

Όπου:

s : είναι η τετραγωνική ρίζα της μεταβλητότητας της αναδρομής που ορίζεται από τη σχέση:

$$s^2 = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 2}$$

\hat{y}_i : η εκτιμώμενη από την ευθεία αναδρομής τιμή του εκάστοτε μεγέθους,

y_i : η αντίστοιχη πειραματική τιμή του μεγέθους,

$\sum x_i^2$: το άθροισμα των τετραγώνων των γνωστών τιμών που υπάρχουν στον εκάστοτε άξονα x.

n : συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων (x,y) σε κάθε περίπτωση.

\bar{x} : η μέση τιμή των γνωστών μας τιμών που βρίσκονται στον εκάστοτε άξονα x.

Το διάστημα εμπιστοσύνης της a_1 σε επίπεδο εμπιστοσύνης $100\% \cdot p$ δίνεται από τη σχέση :

$$a_1 \pm t_{\frac{1+p}{2}, n-2} \cdot se(a_1)$$

όπου t : η ανηγμένη μεταβλητή Student που δίνεται από πίνακες για συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης p και βαθμούς ελευθερίας $n-2$.

Κατά την εκτέλεση του t -test, ελέγχεται το κατά πόσον η τιμή a_1 της κλίσης της αναδρομής βρίσκεται μέσα στο διάστημα εμπιστοσύνης για επίπεδα εμπιστοσύνης 95% και 99%. Για κάθε στατιστικό τεστ που διενεργήθηκε στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ προσδιορίστηκε η ανηγμένη μεταβλητή Student t , για τα αντίστοιχα επίπεδα εμπιστοσύνης και συνολικού αριθμού παρατηρήσεων. Η τιμή της εμφανίζεται στους πίνακες του εκάστοτε t -test. Τα επίπεδα εμπιστοσύνης 95% και 99% επιλέχθηκαν έτσι ώστε να απορριφθεί ή να επιβεβαιωθεί η αρχική υπόθεση.

Για κάθε test διατυπώνεται η μηδενική υπόθεση H_0 , η οποία ελέγχεται προκειμένου να απορριφθεί ή να γίνει αποδεκτή. Σε κάθε test η H_0 ήταν $a_1=1$. Αν η τιμή 1 βρίσκεται εντός της περιοχής $a_1 \pm t_{\frac{1+p}{2}, n-2} \cdot se(a_1)$ για επίπεδο εμπιστοσύνης $p=95\%$, τότε η αρχική υπόθεση γίνεται αποδεκτή. Αν η τιμή 1 βρίσκεται εκτός της περιοχής $a_1 \pm t_{\frac{1+p}{2}, n-2} \cdot se(a_1)$ για επίπεδο εμπιστοσύνης $p=99\%$, τότε η αρχική υπόθεση απορρίπτεται έναντι της εναλλακτικής υπόθεσης $H_1: a_1 \neq 1$. Σε κάθε άλλη περίπτωση δεν μπορεί να προκύψει συμπέρασμα από το test.

Όσον αφορά στο test για το κατά πόσον η συνάρτηση αναδρομής διέρχεται από την αρχή των αξόνων, αυτό γίνεται με έλεγχο της παραμέτρου a_0 της αναδρομής. Το εκτιμώμενο τυπικό σφάλμα της σταθεράς a_0 της ευθείας αναδρομής δίνεται από τον τύπο:

$$se(a_0) = s \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n \sum (x_i - \bar{x})^2}} = s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}}$$

όπου:

s : η τετραγωνική ρίζα της μεταβλητότητας της αναδρομής που ορίστηκε παραπάνω,

n : συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων (x,y) σε κάθε περίπτωση.

\bar{x} : η μέση τιμή των γνωστών μας τιμών που βρίσκονται στον εκάστοτε άξονα x .

$\sum x_i^2$: το άθροισμα των τετραγώνων των γνωστών μας τιμών που υπάρχουν στον εκάστοτε άξονα x .

Το διάστημα εμπιστοσύνης της a_0 σε επίπεδο εμπιστοσύνης 100% ρ είναι:

$$a_0 \pm t_{\frac{1+\rho}{2}, n-2} \cdot se(a_0)$$

Όπως και προηγουμένως, ο έλεγχος αφορά στο κατά πόσον η τιμή της a_0 βρίσκεται μέσα στο διάστημα εμπιστοσύνης για επίπεδα εμπιστοσύνης 95% και 99%. Η μηδενική υπόθεση είναι $H_0: a_0 = 0$ και η εναλλακτική $H_1: a_0 \neq 0$. Με τον ίδιο τρόπο που αναλύθηκε και προηγουμένως, γίνεται η σύγκριση της τιμής με το εύρος ανάλογα με το επίπεδο εμπιστοσύνης.

Βιβλιογραφία

1. Αναγνωστάκης Μ., “*γ-φασματοσκοπική ανάλυση δειγμάτων χαμηλών ραδιενεργειών στην περιοχή χαμηλών ενεργειών*”, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Ε.Μ.Π., Αθήνα 1998.
2. Αναγνωστάκης Μ., βοήθημα στο μάθημα “*Πυρηνικά Μετρητικά Συστήματα και Αναλύσεις*”, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2005.
3. Βασιλοπούλου Θ., “*Προσδιορισμός Συντελεστών Διόρθωσης Απόδοσης Ανιχνευτή HPGe Λόγω Του Φαινομένου της Πραγματικής Σύμπτωσης μέσω Προσομοίωσης Monte Carlo*”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2008.
4. Λεωνίδου Δ., “*Αλληλεπιδράσεις Ακτινοβολιών & Ύλης- Δοσιμετρία-Θωράκιση*”, 1984.
5. Σιμόπουλος Σ.Ε., “*Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών*”, β έκδοση, Βιβλιοθήκη Ε.Μ.Π., 1990.
6. Φωτεινάκη Κ., “*Προσδιορισμός του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένισης φωτονίων μ με χρήση πειραματικών τεχνικών και τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo*”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 2012.
7. Anagnostakis M.J., Hinis E.P. and Simopoulos S.E., “*Uranium-238 and its daughter products in Greek surface soils*”, Radioactivity In the Environment 7:175-186, 2005
8. Browne, E., “*Nuclear data sheets for A = 210*”, Nuclear Data Sheets Volume 99, Issue 3, Pages 649-753, 2003
9. Carter L. L., Cashwell E. D., C. J. Everett, C. A. Forest, R. G. Schrandt, W. M. Taylor, W. L. Thompson, and G. D. Turner, “*Monte Carlo Code Development at Los Alamos*”, LA-5903-MS, Los Alamos Scientific laboratory, 1975.

10. Cáceres, C.E, “*Interspecific variation in the abundance, production, and emergence of Daphnia diapausing eggs*”, Ecology Volume 79, Issue 5 pages 1669 – 1710, 1998.
11. Cornejo Diaz N., Jurado Vargas M., “*An improved Monte Carlo computer program for evaluating the efficiency in coaxial gamma-ray detectors*”, 2008.
12. Cutshall N.H., Larsen I.L and Olsen C.R., “*Direct analysis of Pb-210 in sediment samples: self-absorption corrections*”, Nuclear Instruments and Methods, (309-312), 1983.
13. Debertin K. and Helmer R.G., “*Gamma- And X-ray Spectrometry with Semiconductor Detectors*”, 1988.
14. Etherington H., “*Nuclear Engineering Handbook*”, McGraw-Hill Book Company, 1958.
15. Feng, H., Han, X., Zhang, W., Yu, L., “*A preliminary study of heavy metal contamination in Yangtze River intertidal zone due to urbanization*”, Marine Pollution Bulletin Volume 49, Issue 11-12, Pages 910-915, 2004.
16. Gilmore G. and Hemingway J.D., “*Practical gamma-ray spectrometry*”, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-95150-1, 1995.
17. Greagh D., “*Tables of X-ray absorption corrections and dispersion corrections: The new versus the old*”, Nuclear Instruments and methods in physics research, A295 pp 417-434, 1990.
18. Hubbell J.H., “*Photon Cross Sections, Attenuation coefficients and energy absorption coefficients from 10 keV to 100 GeV*” . National Standard Reference Data System, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce , NSRDS-NBS 29, 1969.
19. Hubbell J.H., “*Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV*”. International Journal of Applied Radiation and Isotopes 33 (11): (1269-1290), 1982.

20. Joshi S.R., “*Direct determination of geochronologically radionuclides in sediments by low-energy photon analysis*”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A263, pp 529-536, 1988.
21. Miller K.M., “*Self-absorption corrections for gamma ray spectral measurements of Pb-210 in environmental samples*”, Nuclear Instruments and Methods, A258 pp.281-285, 1987.
22. Moens L. et al, “*Calculation of the absolute peak efficiency of gamma-ray detectors for different counting geometries*”, Nuclear Instruments and Methods, 187 pp 451-472, 1981.
23. Oresugan M.O., “*Determination of self-absorption corrections by computation in routine gamma-ray spectrometry for typical environmental samples*”, Radioactivity and Radiochemistry, 1993.
24. Owen, R.B., Crossley, R., Johnson, T.C., Tweddle, D., Kornfield, I., Davison, S., Eccles, D.H., Engstrom, D.E., “*Major low levels of Lake Malawi and their implications for speciation rates in cichlid fishes*” Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences Volume 240, Issue 1299, Pages 519-553, 1990.
25. Salvat F, Fernández-Varea J.M., J. Sempau, “*Penelope 2011: A code system for Monte Carlo Simulation of electron and photon transport*”, OECD Nuclear Energy Agency, Issy- les- Moulineaux, 2011.
26. Sima O., Arnold D., “*Self-attenuation and coincidence-summing corrections calculated by Monte Carlo simulations for Gamma-spectrometric measurements with well-type germanium detectors*”. Appl. Radiat. Isot. Vol. 47 No. 9/10,1996.
27. Yang I.C., Ambats E., “*Gamma- emitting radionuclide measurements at the US Geological Survey National Water Quality Laboratory, Denver, Colorado*”, Nuclear Instruments and Methods, 193 pp 197-201, 1982.
28. Zwolsman, J.J.G., Berger, G.W., Van Eck, G.T.M. “*Sediment accumulation rates, historical input, postdepositional mobility and retention of major elements and trace metals in salt marsh sediments of the Scheldt estuary, SW Netherlands*”, Marine Chemistry Volume 44, Issue 1, Pages 73-94, 1993.

29. Βάση Δεδομένων από National Institute of Standards and Technology (NIST),1999. [<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/>]. (πρόσβαση Μάρτιος 2014)