

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

Διευθυντής: Αν. Καθηγητής Μ.Ι. Αναγνωστάκης

**ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΙ ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ
ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑΣ ΠΑΧΟΥΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ
ΚΑΙ ΤΑ ΜΙΓΜΑΤΑ ΤΟΥΣ**

**APPROXIMATE RADIOGRAPHIC EQUIVALENCE
THICKNESS FACTORS FOR VARIOUS ELEMENTS
AND THEIR MIXTURES**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ
ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ
του Αποστόλου

Σπουδαστή της Σχολής
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επίβλεψη: Επικ. Καθηγητής Ν.Π. Πετρόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2014

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vii
ABSTRACT.....	ix
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1-1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	
2.1 Εισαγωγή.....	2-1
2.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση τιμών συντελεστών ισοδυναμίας.....	2-2
2.3 Σχόλια και συμπεράσματα.....	2-11
Πίνακες του 2 ^{ου} Κεφαλαίου.....	2-12
Διαγράμματα του 3 ^{ου} Κεφαλαίου.....	2-16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑΣ	
3.1 Εισαγωγή.....	3-1
3.2 Μονοενεργειακός συντελεστής ισοδυναμίας.....	3-2
3.3 Πολυενεργειακός συντελεστής ισοδυναμίας.....	3-3
3.3.1 Γενικά.....	3-3
3.3.2 Φωτόνια διακριτών ενεργειών.....	3-3
3.3.3 Συνεχές φάσμα φωτονίων.....	3-7
3.4 Φωτόνια διακριτών ενεργειών από ισοτοπικές πηγές.....	3-10
3.4.1 Γενικά.....	3-10
3.5 Φάσματα φωτονίων από μηχανές παραγωγής ακτίνων -x.....	3-14
3.5.1 Γενικά.....	3-14
3.5.2 Φάσματα φωτονίων -x με τη χρήση του <i>SpekCalc</i>	3-17
3.6 Δεδομένα γραμμικών συντελεστών εξασθένησης.....	3-18
3.6.1 Γενικά.....	3-18
3.6.2 Εξαγωγή δεδομένων μέσω ψηφιοποίησης.....	3-20
3.6.3 Εξαγωγή δεδομένων μέσω άλλων πηγών.....	3-24

3.7 Σύνοψη χαρακτηριστικών του λογισμικού XCOM.....	3-27
3.8 Χρήση του λογισμικού XCOM (v1.5/2010 on-line).....	3-28
3.9 Σχόλια και συμπεράσματα.....	3-29
Πίνακες του 3 ^{ου} Κεφαλαίου.....	3-30
Διαγράμματα του 3 ^{ου} Κεφαλαίου.....	3-36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑΣ

4.1 Εισαγωγή.....	4-1
4.2 Αλγοριθμική διαδικασία.....	4-2
4.3 Συνοπτική περιγραφή του περιβάλλοντος MATLAB.....	4-4
4.4 Κώδικες υπολογισμών.....	4-6
4.5 Παραδείγματα εφαρμογής.....	4-15
4.6 Διερεύνηση της τιμής του ε για τα κριτήρια σύγκλισης.....	4-16
4.7 Σύντομη σύγκριση βιβλιογραφίας και αποτελεσμάτων κωδίκων.....	4-22
4.8 Σχόλια και συμπεράσματα.....	4-25
Πίνακες του 4 ^{ου} Κεφαλαίου.....	4-27
Διαγράμματα 4 ^{ου} Κεφαλαίου.....	4-30

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Εισαγωγή.....	5-1
5.2 Επαλήθευση καλής λειτουργίας των κωδίκων.....	5-1
5.2.1 Φωτόνια ακτίνων -x	5-1
5.2.2 Φωτόνια από ισοτοπικές πηγές - A.....	5-4
5.2.3 Φωτόνια από ισοτοπικές πηγές - B.....	5-9
5.2.4 Φωτόνια από ισοτοπικές πηγές - Γ.....	5-9
5.3 Επικαιροποιημένα και συμπληρωματικά αποτελέσματα.....	5-10
5.4 Ραδιογραφική ισοδυναμία μιγμάτων	5-10
5.5 Ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας αερίων	5-13
5.5.1 Γενικά.....	5-13
5.5.2 Προγραμματιστική υλοποίηση για αέρια	5-13

5.5.3 Παραδείγματα συντελεστών ισοδυναμίας	5-14
5.6 Πίνακες αποτελεσμάτων ΡΣΙ μεταξύ στοιχείων	5-15
5.6.1 Γενικά.....	5-15
5.7 Συνοπτικοί πίνακες αποτελεσμάτων ΡΣΙ μεταξύ στοιχείων	5-17
5.8 Σχόλια και συμπεράσματα	5-20
Πίνακες του 5 ^{ου} Κεφαλαίου.....	5-24
Διαγράμματα 5 ^{ου} Κεφαλαίου	5-41
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	B-1
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	Π-1

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η βιομηχανική ραδιογραφία αποτελεί μια από τις βασικότερες εφαρμοζόμενες μεθόδους μη-καταστροφικού ελέγχου, ενώ θεωρείται από πολλούς ως η πιο ευέλικτη καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο αντικειμένων οποιουδήποτε μεγέθους, σύνθεσης και τρόπου κατασκευής. Πραγματοποιείται με τη χρήση φωτονίων δηλ. ακτίνων x από κατάλληλες μηχανές παραγωγής ή ακτίνων γ από τη διάσπαση ραδιενεργών πυρήνων, τα οποία έχουν κατάλληλη ενέργεια ώστε να διαπερνούν την ύλη του ραδιογραφούμενου δοκιμίου, χωρίς να το καταστρέφουν ή να το παραποιούν με οποιοδήποτε τρόπο. Η μέθοδος βασίζεται στον διαφορετικό βαθμό απορρόφησης της φωτονιακής ακτινοβολίας από την ύλη, ο οποίος εξαρτάται από το πάχος, την πυκνότητα και τα ατομικά χαρακτηριστικά των πυρήνων. Η φωτονιακή ακτινοβολία που διαπερνά ένα δοκίμιο μπορεί να καταγραφεί σε συνήθως δισδιάστατο μέσο αποτύπωσης όπως π.χ. σε φιλμ βιομηχανικής ραδιογραφίας ή φωτοευαίσθητο χαρτί, ή φθορίζουσα οθόνη. Η ποιότητα της ραδιογραφικής απεικόνισης εξαρτάται περεταίρω από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου, την απόστασή του από το εστιακό σημείο παραγωγής φωτονίων, τα φυσικά χαρακτηριστικά του μέσου αποτύπωσης, την τάση της πηγής εάν πρόκειται για ακτίνες x και τον χρόνο έκθεσης του δοκιμίου στη δέσμη. Τα τελευταία χρόνια, τα στοιχεία που εξήχθησαν από ελέγχους βιομηχανικής ραδιογραφίας, επέτρεψαν στην βιομηχανία να αυξήσει την αξιοπιστία των προϊόντων της, και παρείχαν τα μέσα για την πρόληψη μεγάλων ατυχημάτων με τελικό όφελος για τον άνθρωπο και το περιβάλλον.

Ειδικά για την απεικόνιση σε φιλμ, όσο εντονότερη είναι η διαπερνώσα ακτινοβολία τόσο εντονότερη είναι και η αντίστοιχη αμαύρωση του φιλμ, και ισοδύναμα, τόσο μεγαλύτερη είναι η παραγόμενη οπτική πυκνότητα. Οι κατασκευαστές μηχανών παραγωγής ακτίνων x ή ραδιοϊσοτόπων για βιομηχανική ραδιογραφία συνήθως προμηθεύουν τους ραδιογράφους με κατάλληλα εγχειρίδια και διαγράμματα, στα οποία περιέχονται οι προτεινόμενες ρυθμίσεις έκθεσης για διαφορετικά πάχη δοκιμίων και αποστάσεις από το εστιακό σημείο παραγωγής των φωτονίων, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη δυνατή απεικόνιση σε επιθυμητές τιμές της οπτικής πυκνότητας. Ωστόσο, οι οδηγίες και τα διαγράμματα αυτά αφορούν συνήθως ένα υλικό αναφοράς, τον χάλυβα (σπανιότερα και το αλουμίνιο).

Παρόλα αυτά, στον σύγχρονο βιομηχανικό κόσμο παρουσιάζεται συχνά η ανάγκη να ραδιογραφηθούν και αντικείμενα διαφορετικά από το χάλυβα ή το αλουμίνιο. Για το σκοπό αυτό έχουν δημιουργηθεί ενδεικτικοί πίνακες που επιτρέπουν τη μετατροπή του πάχους του προς ραδιογράφιση υλικού σε ισοδύναμο πάχος χάλυβα ή αλουμινίου και γενικά σε ισοδύναμο πάχος υλικού αναφοράς, με χρήση κατάλληλων συντελεστών διόρθωσης, οι οποίοι ονομάζονται ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας (radiographic equivalence factors). Βέβαια οι υπάρχοντες πίνακες αφορούν σε ένα πολύ περιορισμένο σετ υλικών που μπορούν να μετατρέπονται στα υλικά αναφοράς.

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία στοχεύει, όπως και ο τίτλος της προσδιορίζει, στην παρουσίαση θεωρητικών μεθόδων υπολογισμού και στον υπολογισμό προσεγγιστικών ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας πάχους για διάφορα στοιχεία και τα μίγματά τους με σκοπό τον εμπλουτισμό σχετικών πινάκων δεδομένων που δίνονται στην διεθνή βιβλιογραφία. Οι νέες υπολογιζόμενες τιμές όπως δίνονται σε κατάλληλους πίνακες μπορούν να βοηθήσουν σε προβλήματα υπολογισμών έκθεσης βιομηχανικής ραδιογραφίας για υλικά για τα οποία δεν υπάρχουν διαθέσιμα διαγράμματα έκθεσης και δευτερευόντως σε προβλήματα αναζήτησης θωρακίσεων ισοδύναμης εξασθένησης ακτινοβολίας από ύλη αποτελούμενη από διαφορετικά υλικά. Στα Κεφάλαια που απαρτίζουν την Διπλωματική αυτή Εργασία περιγράφονται με σαφήνεια οι απαραίτητες θεωρητικές σχέσεις που οδηγούν στον υπολογισμό των ζητούμενων ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας και συγκεντρώνονται και αναλύονται τα αναγκαία δεδομένα που απαιτούνται για τους υπολογισμούς με τις σχέσεις αυτές. Λόγω της πολυπλοκότητας των σχέσεων που πρέπει να χρησιμοποιούνται, του πλήθους των αναγκαίων δεδομένων που απαιτούνται, καθώς και λόγω του μεγάλου αριθμού των αναγκαίων επαναλήψεων αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν κώδικες H/Y, οι οποίοι υλοποιούν όλους τους υπολογισμούς που χρειάζονται και των οποίων το βασικό κείμενο (source) περιλαμβάνεται σε Παράρτημα. Τέλος, παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα από την εκτέλεση του υπόψη κώδικα σε μορφή κατάλληλων πινάκων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Επίκουρο Καθηγητή κ. Ν.Π. Πετρόπουλο για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής

της Διπλωματικής Εργασίας καθώς και για την πολύτιμη συμβολή του και βοήθειά του στην περάτωσή της. Ήταν πάντα διαθέσιμος και ιδιαίτερα συνεργάσιμος παρά την έλλειψη χρόνου. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ε.Π. Χίνη, ο οποίος υπήρξε Διευθυντής του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας για το μεγαλύτερο διάστημα της Διπλωματικής μου Εργασίας, για τη διάθεση αναγκαίων υποδομών που επέτρεψαν την υλοποίηση των απαραίτητων υπολογισμών στο κατάλληλο προγραμματιστικό περιβάλλον καθώς και τον Αναπληρωτή Καθηγητή και νυν Διευθυντή του Τομέα, κ. Μ.Ι. Αναγνωστάκη για τις συμβουλές του σε θέματα εξασθένησης ακτινοβολίας.

Οι ευχαριστίες επεκτείνονται στο συμφοιτητή και φίλο Μηχανολόγο Μηχανικό Τρύφωνα Ρουμπεδάκη για την αμέριστη βοήθεια που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, στην Κατερίνα Μητροπούλου για την αγάπη και την κατανόησή της, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των τελευταίων μηνών της προσπάθειάς μου και στους γονείς μου, στους οποίους είμαι ευγνώμων για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Η παρούσα Διπλωματική Εργασία είναι αφιερωμένη στα παραπάνω άτομα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΠΡΟΣΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΙ ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ

ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑΣ ΠΑΧΟΥΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΤΑ

ΜΙΓΜΑΤΑ ΤΟΥΣ

Διπλωματική Εργασία του Δ. Παπαδόπουλου

Τα κύρια αντικείμενα που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αφορούν συνοπτικά:

(α) στην λεπτομερή παρουσίαση του συνόλου των διαθέσιμων βιβλιογραφικών αναφορών που αφορούν σε ραδιογραφικούς συντελεστές ισοδυναμίας (ΡΣΙ) στοιχείων, μιγμάτων, ενώσεων και κραμάτων και στην συγκεντρωτική παράθεση των υπαρχόντων τιμών ΡΣΙ σε μορφή πινάκων.

(β) στην μελέτη και ανάπτυξη θεωρητικών και πρακτικών μεθόδων, οι οποίες να μπορούν να οδηγήσουν στον προσεγγιστικό υπολογισμό ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας μεταξύ υλικών για τα οποία δεν υπάρχουν σχετικές τιμές στις γνωστές βιβλιογραφικές πηγές και χωρίς να απαιτείται άμεσα πειραματική επαλήθευση. Για το σκοπό αυτό αναλύονται οι θεωρητικές σχέσεις, που μπορούν να χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς, τόσο για την περίπτωση που η δέσμη ακτινοβολίας είναι πολυενεργειακά φωτόνια από συνήθεις ισοτοπικές πηγές όσο και στην περίπτωση που η δέσμη ακτινοβολίας είναι πολυενεργειακά φωτόνια που εκπέμπονται από μηχανές παραγωγής ακτίνων $-x$. Κατά την ανάπτυξη των μεθόδων αυτών, εκτός από θεωρητικές σχέσεις χρειάστηκε να συγκεντρωθούν και να χρησιμοποιηθούν πολλά διαθέσιμα δεδομένα από την βιβλιογραφία και το διαδίκτυο που αφορούν κυρίως στην εξασθένιση φωτονίων στην ύλη και στα διακριτά ή συνεχή φάσματα φωτονίων από ισοτοπικές πηγές ή από μηχανές ακτίνων $-x$ αντίστοιχα.

(γ) στην ανάπτυξη μιας κατάλληλης αλγοριθμικής διαδικασίας, η οποία να μπορεί να οδηγήσει στον υπολογισμό ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας, με βάση τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν και τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν. Λόγω της ανάγκης επαναληπτικών υπολογισμών εντός της διαδικασίας καθώς και της απαίτησης για επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων, η υλοποίηση του αλγορίθμου έγινε εφικτή μόνο με τη χρήση κώδικα H/Y, ο οποίος αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB και τέλος

(δ) στην βελτιστοποίηση και στην διακρίβωση με ποιοτικά και ποσοτικά κριτήρια της ποιότητας των υπολογισμών και της καλής λειτουργίας του αλγορίθμου και του κώδικα, και την παραγωγή αποτελεσμάτων για ΡΣΙ σε μορφή πινάκων για μια πολυπληθή επιλογή από υλικά, για τα οποία οι ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας ενδιαφέρουν στην τεχνολογική πράξη.

ABSTRACT

APPROXIMATE RADIOGRAPHIC EQUIVALENCE THICKNESS FACTORS FOR VARIOUS ELEMENTS AND THEIR MIXTURES

Diploma Dissertation of D. Papadopoulos

The main objectives of this Diploma Dissertation may be summarized as it follows:

(a) To provide a detailed description of most available literature references relevant to the so-called radiographic equivalence factors (REF) for elements, mixtures, compounds and alloys and to present a summary listing of the existing REF data in tabular form.

(b) To study and develop theoretical and practical methods that could lead to the calculation of approximate radiographic equivalence factors between materials, for which relevant data are missing in the available references, without the immediate need of experimental verification. To this end, an analysis is presented for all the theoretical relations, which can be used for calculations, both in the case when the radiographic beam consists of multi-energetic photons emitted by a typical radioisotope source, and also in the case when the radiographic beam consists of multi-energetic photons produced by -x ray tubes. During the development of these methods and apart from the theoretical relations, it was necessary to collect data available both in the literature and also in the internet regarding mainly photon attenuation properties of matter and discrete and continuous spectra of photons due to radioisotopes or -x ray tubes.

(c) To develop a robust algorithmic process that could lead to the calculation of radiographic equivalence factors based on the presented theory and relations and the collected data. Due to the need for loop calculations within this process and the requirement for processing large amounts of data, the algorithm implementation was made possible with the use of a computer code, which was developed in a MATLAB programming environment, and finally

(d) To optimize and calibrate the good performance of both the algorithmic process and the produced code, using qualitative and quantitative criteria, and to produce results for REFs in tabular form for a wide selection of materials, for which

radiographic equivalence factors are of importance within today's technology applications.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας (ΔΕ) είναι η μελέτη, ο υπολογισμός και η παρουσίαση προσεγγιστικών αποτελεσμάτων για ραδιογραφικούς συντελεστές ισοδυναμίας πάχους για διάφορα στοιχεία και διάφορα μίγματα στοιχείων (συμπεριλαμβανομένων κραμάτων και ενώσεων), με βάση θεωρητικούς συλλογισμούς. Η Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού μαθήματος "Βιομηχανικές Εφαρμογές Πυρηνικής Τεχνολογίας" του 7^{ου} Εξαμήνου, το οποίο αποτελεί κατ' επιλογή μάθημα ομάδας που προσφέρεται από τον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ. Στην εργασία αυτή έγινε μια προσπάθεια εμπλουτισμού των διαθέσιμων στην βιβλιογραφία τιμών ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας με την προσθήκη τιμών για περισσότερα χημικά στοιχεία καθώς και για μια σειρά μιγμάτων, ενώσεων και κραμάτων για τα οποία οι ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας δεν έχουν υπολογιστεί ή βρεθεί πειραματικά μέχρι σήμερα (2014). Επισημαίνεται ότι οι ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας που προτείνονται τελικά στην παρούσα Διπλωματική Εργασία υπολογίστηκαν με θεωρητικό τρόπο και όχι με τη διεξαγωγή πειραματικών δοκιμών, κάτι που δεν φαίνεται να έχει επιχειρηθεί στο παρελθόν. Στο εδώ 1^ο Κεφάλαιο γίνεται μία σύνοψη του περιεχομένου των Κεφαλαίων 2 έως και 5, καθώς επίσης και μία σύντομη περιγραφή του Παραρτήματος.

Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται βασικοί ορισμοί και οι βιβλιογραφικές αναφορές που προέκυψαν από βιβλιογραφική έρευνα και περιλαμβάνουν διαθέσιμες τιμές ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας (ΡΣΙ) μεταξύ διαφόρων βασικών τεχνολογικών υλικών. Τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής έρευνας παρατίθενται σε συγκεντρωτικούς πίνακες στο τέλος του Κεφαλαίου. Οι πίνακες αυτοί αφορούν μία πολύ περιορισμένη ομάδα υλικών, παρουσιάζουν σημαντική αβεβαιότητα για ορισμένους από τους ραδιογραφικούς συντελεστές που αναφέρονται και δεν καλύπτουν μοντέρνα βασικά υλικά που ήδη συναντώνται σε πολλές βιομηχανικές ή άλλες εφαρμογές κυρίως λόγω της ανάπτυξης και της τεχνολογικής χρησιμοποίησης των συνθετικών, των οργανικών και των σύνθετων υλικών. Το περιορισμένο πλήθος τιμών ΡΣΙ στην υπάρχουσα βιβλιογραφία οφείλεται κυρίως στο ότι αυτές προέκυψαν από παλαιότερα πειράματα, τα οποία δεν επαναλήφθηκαν αργότερα για νεότερα υλικά. Συμπεραίνεται εμμέσως στο 2^ο Κεφάλαιο, ότι λείπει μια ολοκληρωμένη

διαδικασία με απλή θεωρητική βάση που να οδηγεί στον υπολογισμό ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας μεταξύ δύο υλικών με αλγοριθμικό τρόπο, ανεξάρτητα από πείραμα.

Στο 3^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται θεωρητικές μέθοδοι και αναγκαίες παραδοχές για τον προσεγγιστικό υπολογισμό ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας και αναλύεται με λεπτομέρεια η σειρά των σχέσεων που μπορούν να χρησιμοποιούνται για πολυενεργειακά φωτόνια τόσο στην περίπτωση φωτονίων που εκπέμπονται από συνήθεις ισοτοπικές πηγές όσο και από μηχανές παραγωγής ακτίνων -x. Για την ανάπτυξη των μεθόδων αυτών εκτός από θεωρητικές σχέσεις χρειάστηκε να συγκεντρωθούν και να επεξεργασθούν ώστε να γίνουν κατάλληλα προς χρήση και εκμετάλλευση, πολλά διαθέσιμα δεδομένα από την βιβλιογραφία και το διαδίκτυο με πλέον χαρακτηριστικά τα ακόλουθα: (α) τις ενέργειες και τα ποσοστά εκπομπής φωτονίων των ισοτόπων που τυπικά χρησιμοποιούνται στην βιομηχανική ραδιογραφία, (β) προσεγγιστικά ενεργειακά φάσματα μηχανών παραγωγής ακτίνων -x, για ονομαστικές μέγιστες ενέργειες από 50 έως 300 kV με βήμα 50 kV, και (γ) τις τιμές των γραμμικών συντελεστών εξασθένησης μ κάθε στοιχείου, συναρτήσει την ενέργειας φωτονίων. Οι μέθοδοι αυτές, όπως αναπτύχθηκαν χρησιμοποιήθηκαν με σκοπό ώστε στο επόμενο 4^ο Κεφάλαιο να επαληθευθούν οι πίνακες ΡΣΙ που παρουσιάστηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο και σε επόμενο βήμα να εμπλουτισθεί το πλήθος των υλικών που μπορούν να θεωρούνται ραδιογραφικά ισοδύναμου πάχους.

Στο 4^ο Κεφάλαιο, παρουσιάζεται ως συνέχεια του 3^{ου} Κεφαλαίου, η αλγοριθμική διαδικασία που μπορεί να οδηγήσει στον προσεγγιστικό θεωρητικό υπολογισμό ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας, με βάση τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν και τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν. Δεδομένου ότι η αλγοριθμική διαδικασία πρέπει να επεξεργάζεται σημαντικό όγκο δεδομένων και εμπεριέχει μεγάλο πλήθος επαναλήψεων η υλοποίησή της ήταν δυνατή μόνο σε κώδικα Η/Υ. Ο σχετικός κώδικας που βασίζεται στον αλγόριθμο αυτό αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB. Ο κώδικας αυτός παρουσιάζεται τόσο σε επίπεδο διαγράμματος ροής, όσο και ως κείμενο εντολών, μαζί με απλά παραδείγματα. Για την διακρίβωση της καλής λειτουργίας τόσο του αλγορίθμου όσο και του κώδικα, και στην ουσία δηλαδή του προσεγγιστικού θεωρητικού υπολογισμού ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας, πραγματοποιήθηκε στο 4^ο Κεφάλαιο, αναπαραγωγή και επαλήθευση σημαντικού μέρους των πινάκων με βιβλιογραφικές τιμές που παρουσιάστηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο.

Η επαλήθευση αυτή υπήρξε επιτυχής. Το πλέον σημαντικό συμπέρασμα στα πλαίσια του 4^{ου} Κεφαλαίου είναι ότι όταν γίνεται είτε πειραματικός, είτε θεωρητικός προσδιορισμός ενός ραδιογραφικού συντελεστή ισοδυναμίας μεταξύ δύο υλικών, πρέπει το αποτέλεσμα να συνοδεύεται με αναφορά στο πάχος τουλάχιστον ενός από τα ισοδύναμα υλικά ως ποσοστό του αντίστοιχου πάχους υποδιπλασιασμού. Δυστυχώς τέτοιες αναφορές λείπουν από την βιβλιογραφία, με αποτέλεσμα πολλοί από τους ραδιογραφικούς συντελεστές ισοδυναμίας που δίνονται εκεί να μην ερμηνεύονται εύκολα.

Στο 5^ο Κεφάλαιο, επαληθεύεται με επιπλέον ποσοτικούς τρόπους η καλή λειτουργία του κώδικα, αναπτύσσονται οι μέθοδοι εξαγωγής των ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας για αέρια και για μίγματα (ή κράματα ή ενώσεις), και τέλος εξετάζονται πλήρως οι δυνατότητες του κώδικα και δίνονται τα αποτελέσματά του για όλες τις δυνατές περιπτώσεις συνδυασμών επιλεγμένων υλικών, για τα οποία μπορεί να ζητούνται ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας. η επιλογή των υλικών αυτών έγινε ώστε να καλύπτονται και τα τρέχοντα νέα τεχνολογικά υλικά που έχουν προκύψει ως συνθετικά, οργανικά ή σύνθετα. Οι συγκεντρωτικοί πίνακες που προέκυψαν ως αποτελέσματα περιλαμβάνουν τους ραδιογραφικούς συντελεστές ισοδυναμίας για όλες τις δυνατές περιπτώσεις συνδυασμών των επιλεγμένων υλικών καθώς και τα βασικά κείμενα (source) των κωδίκων που είναι απαραίτητοι για τους υπολογισμούς, παρατίθενται στο Παράρτημα που βρίσκεται στο τέλος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Στο κυρίως κείμενο δίνονται αποσπάσματα των υπόψη πινάκων και πραγματοποιείται λεπτομερής σχολιασμός τους, και δίνονται υποδειγματικά παραδείγματα για την αξιοποίησή τους και την χρήση τους, τόσο με πράξεις όσο και με γραφικά μέσα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Εισαγωγή

Η βιομηχανική ραδιογραφία αποτελεί μια από τις βασικότερες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου. Πραγματοποιείται με τη χρήση φωτονίων δηλ. ακτίνων -x από κατάλληλες μηχανές παραγωγής ή ακτίνων γ από τη διάσπαση ραδιενεργών πυρήνων, τα οποία έχουν κατάλληλη ενέργεια ώστε να διαπερνούν την ύλη του ραδιογραφούμενου δοκιμίου. Η μέθοδος βασίζεται στον διαφορετικό βαθμό απορρόφησης της φωτονιακής ακτινοβολίας από την ύλη, ο οποίος εξαρτάται από το πάχος, την πυκνότητα και τα ατομικά χαρακτηριστικά των πυρήνων. Η φωτονιακή ακτινοβολία που διαπερνά ένα δοκίμιο μπορεί να καταγραφεί σε συνήθως δισδιάστατο μέσο αποτύπωσης όπως π.χ. σε φιλμ βιομηχανικής ραδιογραφίας ή φωτοευαίσθητο χαρτί, ή φθορίζουσα οθόνη. Η ποιότητα της ραδιογραφικής απεικόνισης εξαρτάται περαιτέρω από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου, την απόστασή του από το εστιακό σημείο παραγωγής φωτονίων, τα φυσικά χαρακτηριστικά του μέσου αποτύπωσης, την τάση της πηγής εάν πρόκειται για ακτίνες -x και τον χρόνο έκθεσης του δοκιμίου στη δέσμη.

Ειδικά για την απεικόνιση σε φιλμ, όσο εντονότερη είναι η διαπερνώσα ακτινοβολία τόσο εντονότερη είναι και η αντίστοιχη αμαύρωση του φιλμ, και ισοδύναμα, τόσο μεγαλύτερη είναι η παραγόμενη οπτική πυκνότητα. Οι κατασκευαστές μηχανών παραγωγής ακτίνων -x ή ραδιοϊσοτόπων για βιομηχανική ραδιογραφία συνήθως προμηθεύουν τους ραδιογράφους με κατάλληλα εγχειρίδια και διαγράμματα, στα οποία περιέχονται οι προτεινόμενες ρυθμίσεις έκθεσης για διαφορετικά πάχη δοκιμίων και αποστάσεις από το εστιακό σημείο παραγωγής των φωτονίων, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη δυνατή απεικόνιση σε επιθυμητές τιμές της οπτικής πυκνότητας. Ωστόσο, οι οδηγίες και τα διαγράμματα αυτά αφορούν συνήθως ένα υλικό αναφοράς, τον χάλυβα (σπανιότερα και το αλουμίνιο).

Παρόλα αυτά, στον σύγχρονο βιομηχανικό κόσμο παρουσιάζεται συχνά η ανάγκη να ραδιογραφηθούν και αντικείμενα διαφορετικά από το χάλυβα ή το αλουμίνιο. Για το σκοπό αυτό έχουν δημιουργηθεί ενδεικτικοί πίνακες που επιτρέπουν τη μετατροπή του πάχους του προς ραδιογράφιση υλικού σε ισοδύναμο πάχος χάλυβα ή αλουμινίου και γενικά σε ισοδύναμο πάχος υλικού αναφοράς, με χρήση κατάλληλων

συντελεστών διόρθωσης, οι οποίοι ονομάζονται ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας (radiographic equivalence factors). Βέβαια οι υπάρχοντες πίνακες αφορούν σε ένα πολύ περιορισμένο σετ υλικών που μπορούν να μετατρέπονται στα υλικά αναφοράς.

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι σχετικές βιβλιογραφικές αναφορές για την εύρεση των υπόψη διαθέσιμων ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας (ΡΣΙ) και παρατίθενται συγκεντρωτικοί πίνακες που περιέχουν όλους τους συντελεστές που συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία.

2.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση τιμών συντελεστών ισοδυναμίας

Η ακτινοβόληση ενός δοκιμίου με μια ομογενή και παράλληλη δέσμη από ακτίνες α ή γ για την παραγωγή μιας βιομηχανικής ραδιογραφίας, έχει ως αποτέλεσμα ένα τμήμα της ακτινοβολίας να απορροφηθεί από το υλικό και ένα άλλο διατηρώντας την κατεύθυνσή του, να το διαπεράσει και να προσβάλλει το φιλμ. Η διακύμανση της έντασης της δέσμης που διαπερνά το δοκίμιο διατηρώντας την κατεύθυνσή της είναι αυτή που σχηματίζει την εκμεταλλεύσιμη εικόνα μιας ραδιογραφίας. Η διακύμανση αυτή μπορεί να οφείλεται σε ατέλειες εντός του δοκιμίου όπως π.χ. πόρους ή κενούς θύλακες ή προσμίξεις από ξένα σκληρότερα ή μαλακότερα υλικά. Ωστόσο, υπάρχει και ένα ποσοστό της χρησιμοποιούμενης ακτινοβολίας, το οποίο περνώντας μέσα από το υλικό παρεκκλίνει της αρχικής του κατεύθυνσης και επίσης προσβάλλει το φιλμ. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται σκεδαζόμενη και παρεμβάλλει θόρυβο στην εικόνα που δημιουργεί πάνω στο φιλμ η δέσμη που διαπερνά το δοκίμιο διατηρώντας την κατεύθυνσή της, ελαττώνοντας την ποιότητα της ραδιογραφικής απεικόνισης.

Η ακριβής διατύπωση των νόμων της εξασθένησης της φωτονιακής ακτινοβολίας από ύλη δεδομένου πάχους, γίνεται ευκολότερα αν υποθεθεί ότι ένα δοκίμιο πρισματικού σχήματος από ένα είδος ατόμων πάχους " x ", προσβάλλεται από μονοενεργειακή ομογενή και παράλληλη δέσμη φωτονίων σε μία πλευρά, μέρος μόνο της οποίας απορροφάται, ενώ αγνοείται το φαινόμενο της σκέδασης. Η δέσμη αυτή ονομάζεται συνήθως πρωτεύουσα. Τα φωτόνια που παράγονται από τυχόν σκεδάσεις δημιουργούν δευτερεύουσες δέσμες.

Με αυτές τις προϋποθέσεις ισχύει η γνωστή σχέση εξασθένησης:

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

όπου:

$\mu = \mu(\rho, Z)$ ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης,

ρ η πυκνότητα,

Z ο ατομικός αριθμός

x το πάχος του υλικού,

I_0 η ένταση της πρωτεύουσας δέσμης φωτονίων που προσβάλλει το δοκίμιο (σε φωτόνια ανά μονάδα επιφανείας και χρόνου), και

I η ένταση της πρωτεύουσας δέσμης που εξέρχεται μετά από πάχος x (επίσης σε φωτόνια ανά μονάδα επιφανείας και χρόνου)

Το πάχος για το οποίο η ένταση της πρωτεύουσας δέσμης που έχει απομείνει είναι η μισή της αρχικής ονομάζεται πάχος υποδιπλασιασμού (half-value-layer, HVL ή $d_{0.5}$) και δίνεται από τη σχέση:

$$HVL = \frac{0.693}{\mu} \quad (2.2)$$

Αντίστοιχα, το πάχος για το οποίο η ένταση της πρωτεύουσας δέσμης που έχει απομείνει είναι το ένα δέκατο της αρχικής ονομάζεται πάχος υποδεκαπλασιασμού (tenth value layer, TVL ή $d_{0.1}$) και δίνεται από τη σχέση:

$$TVL = \frac{2.3}{\mu} \quad (2.3)$$

Η εξασθένηση της πρωτεύουσας δέσμης εξαρτάται φυσικά από το πάχος " x ", την πυκνότητα " ρ " και τα ατομικά χαρακτηριστικά του υλικού " Z ". Η επίδραση του πάχους και της πυκνότητας στην εξασθένηση είναι προφανής: Μεταξύ δύο υλικών διαφορετικού πάχους και πυκνότητας, το παχύτερο και πυκνότερο θα εξασθενήσει περισσότερο την ακτινοβολία σε σχέση με το λεπτότερο και λιγότερο πυκνό. Επομένως για ισοδύναμο ραδιογραφικό αποτέλεσμα (δηλ. όμοια οπτική πυκνότητα) το πυκνότερο και παχύτερο πρέπει να εκτεθεί σε ισχυρότερη δέσμη ή/και για περισσότερο χρόνο από το λεπτότερο και λιγότερο πυκνό. Όμως, η επίδραση των ατομικών χαρακτηριστικών του υλικού ασκεί συνήθως πολύ μεγαλύτερη επιρροή στην εξασθένηση της πρωτεύουσας δέσμης σε σχέση με την πυκνότητα και το πάχος.

Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι μετά από πειραματικές δοκιμές έχει βρεθεί (Quinn, 1980), ότι:

(α) ο μόλυβδος (ατομικού αριθμού 82) είναι 1.5 φορές πυκνότερος από τον χάλυβα (ατομικού αριθμού σιδήρου 26), ωστόσο εάν και τα δύο υλικά ακτινοβοληθούν από πηγή ακτίνων -x τάσης 220kV, 1cm μολύβδου εξασθενίζει μία πρωτεύουσα δέσμη όσο περίπου 12cm χάλυβα. Ομοίως,

(β) ο ορείχαλκος (ενεργού ατομικού αριθμού ~29) είναι 1.1 φορές πυκνότερος από τον χάλυβα (ατομικού αριθμού σιδήρου 26), ωστόσο εάν και τα δύο υλικά ακτινοβοληθούν από πηγή ακτίνων -x τάσης 150kV, 1cm ορείχαλκου απορροφά ίση ακτινοβολία με περίπου 1.4cm χάλυβα.

Το παραπάνω παράδειγμα δείχνει ότι δεν είναι εύκολη η διατύπωση απλών νόμων για την εύρεση του πάχους διαφορετικών υλικών που εξασθενούν την ένταση πρωτεύουσας δέσμης με τον ίδιο τρόπο. Το πρόβλημα γίνεται ακόμα πιο πολύπλοκο διότι πέρα από το πάχος, την πυκνότητα και τα ατομικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την εξασθένιση, τα φωτόνια που λαμβάνονται για το σκοπό της βιομηχανικής ραδιογραφίας είτε από μία μηχανή παραγωγής ακτίνων -x είτε από ένα ραδιοϊσότοπο, δεν είναι μοναδικής ενέργειας.

Για να αποδοθεί το πρόβλημα με μαθηματικό τρόπο ας υποθεθούν δύο υλικά "A" και "B" με πάχη x_A και x_B αντίστοιχα τα οποία προσβάλλονται από την ίδια πρωτεύουσα δέσμη εντάσεως I_0 . Τα υλικά αυτά θεωρούνται ραδιογραφικά ισοδύναμα αν τα πάχη τους είναι τέτοια ώστε η ένταση της πρωτεύουσας δέσμης που εξέρχεται από αυτά να είναι ίσης τιμής I . Στην περίπτωση αυτή και μόνο ορίζεται ο ραδιογραφικός συντελεστής ισοδυναμίας (PΣΙ) τέτοιος ώστε αν δίνεται το πάχος του υλικού "A", να μπορεί να υπολογίζεται το ραδιογραφικά ισοδύναμο πάχος του υλικού "B" από τη σχέση:

$$x_A = P\Sigma I \cdot x_B \quad (2.4)$$

Το υλικό "A" κατ' αυτή την έννοια θεωρείται εξ' ορισμού ως το υλικό αναφοράς και το υλικό "B" θεωρείται το υλικό ισοδυναμίας. Η (2.4) από τον ορισμό της ισχύει τόσο για μονοενεργειακές όσο και για πολυενεργειακές δέσμες φωτονίων.

Σύμφωνα με την εδώ βιβλιογραφική έρευνα, ο πρώτος που φαίνεται να αντιμετώπισε τον υπολογισμό συντελεστών PΣΙ με πρακτικό τρόπο, αλλά μόνο για ισοτοπικές

πηγές φωτονίων και μόνο για περιορισμένο αριθμό υλικών, ήταν ο Semyonov (1967). Η λύση που προτάθηκε είναι γραφική και στηρίχθηκε στα παρακάτω δεδομένα:

(i) Καταστρώθηκαν με τη βοήθεια πειραμάτων τα διαγράμματα έκθεσης (βλ. τα Διαγράμματα 2.1 έως και 2.22) για διάφορες ισοτοπικές πηγές φωτονίων και αρκετά διαφορετικά υλικά για την τυπική οπτική πυκνότητα 1.5. Είναι από την πράξη γνωστό εξάλλου, ότι οι βέλτιστες τιμές της οπτικής πυκνότητας για τα τυπικά φιλμ βιομηχανικής ραδιογραφίας κυμαίνονται μεταξύ 1.0 και 3.0. Σε μερικά από αυτά τα διαγράμματα ο κατακόρυφος άξονας δίνεται σε "ισοδύναμα γραμμάρια Ra-226 - hours" μονάδα που μπορεί να θεωρείται ίση με "Curie - hours".

(ii) Οι ισοτοπικές πηγές των διαγραμμάτων ήταν καίσιο (Cs-137), ιρίδιο (Ir-192), σελήνιο (Se-75), θούλιο (Tm-170), κοβάλτιο (Co-60), ευρόπιο (Eu-152, ή Eu-154, ή Eu-155), σαμάριο (Sm-145), Δημήτριο (Ce-144) και Γαδολίνιο (Gd-153).

(iii) Τα υλικά των διαγραμμάτων ήταν χάλυβας, τιτάνιο, αλουμίνιο, ντουραλουμίνιο και μαγνήσιο.

(iv) Οι τυπικές αποστάσεις εστιακού σημείου πηγής και φιλμ για τα διαγράμματα αυτά ήταν 25, 50, 75 και 100 cm

Ένα τυπικό τέτοιο διάγραμμα διακρίνεται για παράδειγμα στο Διάγραμμα 2.1. Για την εξασφάλιση της συγκρισιμότητας των διαγραμμάτων έκθεσης αυτού του τύπου ο οριζόντιος άξονας για το πάχος του υλικού δίνεται σε mm και ο κατακόρυφος άξονας της έκθεσης, δεν δίνεται σε [Bq ισοτόπου x ώρες] ή σε [gr ισοτόπου x ώρες] αλλά σε [γραμμάρια ισοδύναμου Ra-226 x ώρες] που μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμο με [Curie x ώρες].

Η εκτίμηση των ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας μπορεί να γίνεται όπως και για το επόμενο παράδειγμα:

Έστω το διάγραμμα έκθεσης 2.1 για πηγή Cs-137 και υλικό χάλυβα, ο οποίος ραδιογραφείται με έκθεση 1 [γραμμάρια ισοδύναμου Ra-226 x ώρες]. Αν η απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ είναι 75cm, τότε οπτική πυκνότητα 1.5 θα επιτευχθεί μόνο αν ο χάλυβας έχει πάχος ~26mm.

Έστω επίσης το διάγραμμα έκθεσης 2.2 για πηγή Cs-137 και υλικό ντουραλουμίνιο, το οποίο ραδιογραφείται με έκθεση 1 [γραμμάριο ισοδύναμου Ra-226 x ώρες]. Αν η απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ είναι 75cm, τότε οπτική πυκνότητα 1.5 θα επιτευχθεί μόνο αν το ντουραλουμίνιο έχει πάχος ~158mm.

Κατά συνέπεια υπό αυτές τις συνθήκες αν το μέταλλο αναφοράς είναι το ντουραλουμίνιο ο ραδιογραφικός συντελεστής ισοδυναμίας, ντουραλουμινίου - χάλυβα είναι $158/26 \approx 6$, με εφαρμογή της σχέσης (2.4). Ομοίως, υπό αυτές τις συνθήκες αν το μέταλλο αναφοράς είναι ο χάλυβας, ο ραδιογραφικός συντελεστής ισοδυναμίας, χάλυβα - ντουραλουμινίου είναι $26/158 \approx 0.16$, πάλι με εφαρμογή της σχέσης (2.4).

Δηλαδή αν χρειάζεται να ραδιογραφηθεί χάλυβας πάχους x cm, οι υπολογισμοί έκθεσης μπορούν να γίνονται με το διάγραμμα έκθεσης του ντουραλουμινίου για πάχος ντουραλουμινίου $6x$. Ομοίως, αν χρειάζεται να ραδιογραφηθεί ντουραλουμίνιο πάχους x cm, οι υπολογισμοί έκθεσης μπορούν να γίνονται με το διάγραμμα έκθεσης του χάλυβα για πάχος χάλυβα $0.16x$.

Για να αντιμετωπίσει το ίδιο πρόβλημα ο Quinn (1980) αντί για διαγράμματα συγκρότησε πίνακες με πειραματικές και εμπειρικές τιμές προσεγγιστικών ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας, οι οποίοι βασίζονται σε σύνθεση δεδομένων από πολλές πηγές που δεν αναφέρονται. Τα μέταλλα αναφοράς των πινάκων του Quinn (1980) είναι το αλουμίνιο και ο χάλυβας και οι πίνακες συντάχθηκαν τόσο για διάφορα ισότοπα όσο και -για πρώτη φορά- για διάφορες ενέργειες ακτίνων -x. Οι πίνακες του Quinn (1980) συναντώνται πανομοιότυποι στο τεχνικό εγχειρίδιο του Bryant (1985), στο εγχειρίδιο του Bossi (2002) και στο βιβλίο του Lang (2005). Ο Thompson (1993) στην προσπάθειά του να μοντελοποιήσει τον εντοπισμό ρωγμών σε πολυστρωματικές γεωμετρίες, επιχείρησε το μετασχηματισμό μιας διάταξης από διαφορετικά υλικά σε ισοδύναμη ενιαία χρησιμοποιώντας επίσης ραδιογραφικούς συντελεστές ισοδυναμίας. Για το σκοπό αυτό υπολόγισε πειραματικά τους συντελεστές ισοδυναμίας του τιτανίου και του χάλυβα τύπου SS304 συναρτήσει της τάσης μιας πηγής ακτίνων -x με μέταλλο αναφοράς το αλουμίνιο. Για τις ανάγκες της μελέτης χρησιμοποιήθηκε μηχανή παραγωγής ακτίνων -x τάσης 100kV, ενώ το πείραμα απεικονίζεται στο Διάγραμμα 2.23 και πραγματοποιήθηκε για διάφορες υψηλές τάσεις και έκθεση 600mAssec. Το Διάγραμμα 2.24 αποδίδει τους ΡΣΙ τιτανίου και χάλυβα με μέταλλο αναφοράς το αλουμίνιο. Οι συντελεστές που προκύπτουν από

το Διάγραμμα συμφωνούν ικανοποιητικά (όπου μπορεί να γίνει σύγκριση) με τους ΡΣΙ των πινάκων του Quinn (1980). Στο βιβλίο του Halmshaw (1995) παρουσιάζεται παρόμοιος πίνακας με αυτούς του Quinn (1980) αλλά με ένα μόνο μέταλλο αναφοράς, τον χάλυβα. επισημαίνεται η ανάγκη εύρεσης ΡΣΙ για μέταλλα πέραν του χάλυβα, προκειμένου να επιτυγχάνονται τα ίδια αποτελέσματα ραδιογραφικής απεικόνισης για κάθε υλικό. Ο πίνακας που έχει συντάξει ορίζει ως μέταλλο αναφοράς τον χάλυβα για δέσμη από ακτίνες -x διαφόρων υψηλών τάσεων και από διάφορα ισότοπα. Προσοχή χρειάζεται διότι οι ΡΣΙ όπως παρουσιάζονται από τον Halmshaw (1995) είναι αντίστροφοι (1/ΡΣΙ) των ΡΣΙ που παρουσιάζονται από τον Quinn (1980) αλλά και από κάθε άλλον σχετικό ερευνητή προγενέστερο ή μεταγενέστερο, ισοδύναμα δηλαδή ικανοποιούν τη σχέση:

$$x_A = \frac{x_B}{\text{ΡΣΙ}} \quad (2.5)$$

Στην ίδια κατεύθυνση με τον Halmshaw (1995) κινήθηκε και ο Prasad (2008), του οποίου ο αντίστοιχος πίνακας έχει παραπλήσιες τιμές με αυτόν του Halmshaw (1995). Ο πίνακας του Prasad (2008), συναντάται και στην ιστοσελίδα NDT (2014). Από την σύνθεση των πινάκων για ΡΣΙ των Quinn (1980), Halmshaw (1995) και Prasad (2008) καθώς και δεδομένων για ισοτοπικές πηγές από τον Semyonov (1967) σύμφωνα με τα Διαγράμματα 2.1 έως και 2.22, προέκυψαν οι Πίνακες 2.1, 2.2 και 2.3 της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Επισημαίνεται ότι οι ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας που προκύπτουν για ισοτοπικές πηγές με βάση τον Semyonov (1967) συμφωνούν ικανοποιητικά με αντίστοιχους ΡΣΙ από τους Quinn (1980), Halmshaw (1995) και Prasad (2008).

Η ανάγνωση των Πινάκων 2.1 έως 2.3 γίνεται μόνο κατακόρυφα. Προφανώς οι ΡΣΙ των μετάλλων αναφοράς είναι ίσοι με τη μονάδα. Για χαμηλές υψηλές τάσεις ακτίνων -x, μέταλλο αναφοράς θεωρείται συνήθως το αλουμίνιο, ενώ για υψηλότερες υψηλές τάσεις ακτίνων -x, και για ισοτοπικές πηγές φωτονίων, μέταλλο αναφοράς θεωρείται συνήθως ο χάλυβας.

Σε σημεία των πινάκων και κυρίως όταν πρόκειται για κράματα ή μέταλλα με προσμίξεις οι αναφερόμενες τιμές των συντελεστών παρουσιάζουν εύρος. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ο ορείχαλκος στη συμπεριφορά του οποίου μεγάλο ρόλο παίζει η περιεκτικότητα σε μόλυβδο. Επίσης τα παρατηρούμενα εύρη οφείλονται και

στην ποικιλία των πειραμάτων από τα οποία προέκυψαν οι τιμές των συντελεστών. Στην ποικιλία αυτή συνέβαλλαν η σύνθεση των δοκιμίων, οι μηχανές παραγωγής ακτίνων -x που χρησιμοποιήθηκαν, το είδος των φιλμ και ο τρόπος εμφάνισης, άλλα τυχόν μέσα απεικόνισης (π.χ. οθόνες φθορισμού), οι αποστάσεις πηγής - φιλμ και άλλοι άγνωστοι παράγοντες αβεβαιότητας.

Όπως φαίνεται από τους πίνακες, οι ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας διαφόρων υλικών δεν είναι σταθεροί αλλά εξαρτώνται γενικά από την ενέργεια της προσπίπτουσας δέσμης φωτονίων. Όσο μεγαλώνει η ενέργεια της δέσμης, τόσο μειώνονται οι διαφορές των συντελεστών των υλικών, δηλαδή το αποτέλεσμα της ραδιογραφικής απεικόνισης εξαρτάται ολοένα και λιγότερο από τους ατομικούς αριθμούς των στοιχείων. Για φωτόνια υψηλής ενέργειας (π.χ. για τάσεις ακτίνων -x μεγαλύτερες των 1000kV) και για υλικά των οποίων ο ατομικός αριθμός δε διαφέρει σημαντικά (π.χ. χάλυβας - χαλκός) η απορρόφηση της ακτινοβολίας είναι περίπου ανάλογη της πυκνότητας του υλικού για δεδομένο πάχος. Ωστόσο, αν ο ατομικός αριθμός δύο στοιχείων διαφέρει σημαντικά, ακόμα και για φωτόνια υψηλής ενέργειας, η επίδραση των ατομικών χαρακτηριστικών δε μπορεί να αγνοηθεί. Για παράδειγμα στα 1000kV η απορρόφηση φωτονίων στον μόλυβδο είναι 5 φορές μεγαλύτερη από εκείνη στον χάλυβα, ενώ η πυκνότητα του μολύβδου είναι μόλις 1.5 φορές μεγαλύτερη από εκείνη του χάλυβα.

Η χρήση των πινάκων μπορεί να εξηγηθεί με την επίλυση ερωτημάτων παρόμοιων με τα απλά ερωτήματα 3.9.3, 1 έως 5, του 7^{ου} Μαθήματος Προσομοίωσης Βιομηχανικής Ραδιογραφίας που αναφέρονται στην Διπλωματική Εργασία του Θεοδωρόπουλου (2009), σελ. 3-45:

Ερώτημα 1:

Τι πάχος αλουμινίου είναι αντίστοιχο σε 50mm των παρακάτω υλικών; (α) μαγνήσιο, (β) χάλυβας, (γ) χαλκός, (δ) αλουμίνιο 2024 και (ε) ζirkόνιο

Απάντηση:

(α)

Από Πίνακα 2.1 για 50 kV ζητούμενο ισοδύναμο πάχος αλουμινίου = 0.6x50mm, Από Πίνακα 2.1 για 100 kV ζητούμενο ισοδύναμο πάχος αλουμινίου = 0.6x50mm,

(β)

Από Πίνακα 2.1 για 100 kV ζητούμενο ισοδύναμο πάχος αλουμινίου = 12x50mm

(γ)

Από Πίνακα 2.1 για 100 kV ζητούμενο ισοδύναμο πάχος αλουμινίου = 18x50mm

(δ)

Από Πίνακα 2.1 για 50 kV ζητούμενο ισοδύναμο πάχος αλουμινίου = 2.2x50mm, Από Πίνακα 2.1 για 100 kV ζητούμενο ισοδύναμο πάχος αλουμινίου = 1.6x50mm,

(ε)

Από Πίνακα 2.2α για 100 kV μετατρέπονται πρώτα τα 50mm Ζirkονίου σε ισοδύναμο πάχος χάλυβα = 2.4x50mm και μετατρέπονται τα 2.4x50mm χάλυβα σε ισοδύναμο πάχος αλουμινίου = 2.4x50/0.08mm. Η δεύτερη μετατροπή μπορεί να γίνει ισοδύναμα με χρήση του Πίνακα 2.1, οπότε το ζητούμενο ισοδύναμο πάχος αλουμινίου θα είναι = 2.4x50x12mm.

Από Πίνακα 2.2α για 150 kV μετατρέπονται πρώτα τα 50mm Ζirkονίου σε ισοδύναμο πάχος χάλυβα = 2.3x50mm και μετατρέπονται τα 2.3x50mm χάλυβα σε ισοδύναμο πάχος αλουμινίου = 2.3x50/0.12mm.

Από Πίνακα 2.2α για 220 kV μετατρέπονται πρώτα τα 50mm Ζirkονίου σε ισοδύναμο πάχος χάλυβα = 2x50mm και μετατρέπονται τα 2x50mm χάλυβα σε ισοδύναμο πάχος αλουμινίου = 2x50/0.18mm.

Ερώτημα 2:

Λαμβάνοντας υπόψη το διάγραμμα έκθεσης του Διαγράμματος 2.25, αν 100 kV και 12 mA-min παράγουν την επιθυμητή οπτική πυκνότητα για πάχος 50mm αλουμινίου, να εκτιμηθεί η έκθεση που χρειάζεται για να ραδιογραφηθούν πάχη 50mm από τα παρακάτω υλικά: (α) Μαγνήσιο και (β) Αλουμίνιο 2024

Απάντηση:

(α)

Για μαγνήσιο από Πίνακα 2.1 για 100 kV ζητούμενο ισοδύναμο πάχος αλουμινίου = $0.6 \times 50 = 30\text{mm}$. Από Διάγραμμα 2.25 η ζητούμενη να εκτιμηθεί έκθεση υπολογίζεται σε $\sim 3.8 \text{ mA}\cdot\text{min}$

(β)

Για Αλουμίνιο 2024 από Πίνακα 2.1 για 100 kV ζητούμενο ισοδύναμο πάχος αλουμινίου = $1.6 \times 50 = 80\text{mm}$. Από Διάγραμμα 2.25 η ζητούμενη να εκτιμηθεί έκθεση υπολογίζεται σε $\sim 55 \text{ mA}\cdot\text{min}$

Ερώτημα 3:

Λαμβάνοντας υπόψη το διάγραμμα έκθεσης του Διαγράμματος 2.26, αν 200 kV και 12 mA·min παράγουν την επιθυμητή οπτική πυκνότητα για πάχος 30mm χάλυβα, να εκτιμηθεί η έκθεση που χρειάζεται για να ραδιογραφηθούν τα ισοδύναμα με 30mm χάλυβα πάχη από τα παρακάτω υλικά: (α) μαγνήσιο, (β) αλουμίνιο, (γ) χαλκός και (δ) ζirkόνιο.

Απάντηση:

(α)

Για μαγνήσιο από Πίνακα 2.2α για 200 kV ζητούμενο ισοδύναμο πάχος χάλυβα = $30/0.07 = 428.5\text{mm}$. Από Διάγραμμα 2.26 η ζητούμενη να εκτιμηθεί έκθεση δεν μπορεί να υπολογισθεί.

(β)

Για αλουμίνιο από Πίνακα 2.2α για 200 kV ζητούμενο ισοδύναμο πάχος χάλυβα = $30/0.16 = 187.5\text{mm}$. Από Διάγραμμα 2.26 η ζητούμενη να εκτιμηθεί έκθεση δεν μπορεί να υπολογισθεί.

(γ)

Για χαλκό από Πίνακα 2.2α για 200 kV ζητούμενο ισοδύναμο πάχος χάλυβα = $30/1.4 = 21.4\text{mm}$. Από Διάγραμμα 2.26 η ζητούμενη να εκτιμηθεί έκθεση υπολογίζεται σε $\sim 3.2 \text{ mA}\cdot\text{min}$

(δ)

Για ζirkόνιο από Πίνακα 2.2α για 200 kV ζητούμενο ισοδύναμο πάχος χάλυβα = $30/(\sim 2.0) = 15\text{mm}$. Από Διάγραμμα 2.26 η ζητούμενη να εκτιμηθεί έκθεση δεν μπορεί να υπολογισθεί.

Ερώτημα 4:

Λαμβάνοντας υπόψη το διάγραμμα έκθεσης του Διαγράμματος 2.25, αν 100 kV και 6 mA-min παράγουν την επιθυμητή οπτική πυκνότητα για πάχος 25mm αλουμινίου, να εκτιμηθεί η έκθεση που χρειάζεται για να ραδιογραφηθούν πάχη 25mm από τα παρακάτω υλικά: (α) μαγνήσιο και (β) αλουμίνιο 2024.

Απάντηση:

Όπως ερώτημα "1".

Ερώτημα 5

Να εξηγηθεί γιατί π.χ. στα 400 kV (βλ. και Πίνακα 2.2β) δεν δίνεται συντελεστής ισοδυναμίας για ραδιογραφία αλουμινίου ή μαγνησίου.

Απάντηση:

Με την αύξηση της ενέργειας των ακτίνων -x η διαπεραστικότητα της δέσμης αυξάνεται τόσο πολύ που σχεδόν οποιοδήποτε πάχος από ελαφρό μέταλλο πρακτικά χρησιμοποιούμενο σε κατασκευές είναι πλήρως διαπερατό από τις ακτίνες αυτές. Οπότε η διατύπωση τέτοιων συντελεστών δεν έχει πρακτικό νόημα.

2.3 Σχόλια και συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν με λεπτομέρεια οι σχετικές βιβλιογραφικές αναφορές για την εύρεση των υπόψη διαθέσιμων ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας (PΣΙ) και παρατέθηκαν συγκεντρωτικοί πίνακες που περιέχουν όλους τους συντελεστές που συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία και ήταν άμεσα διαθέσιμοι από διάφορες πηγές. Βέβαια οι πίνακες αυτοί αφορούν σε ένα πολύ περιορισμένο σετ υλικών που μπορούν να μετατρέπονται στα υλικά αναφοράς. Στο επόμενο 3^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται θεωρητικές και πρακτικές μέθοδοι για τον προσεγγιστικό υπολογισμό ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας με σκοπό να αναπτυχθούν εργαλεία λογισμικού χρήσιμα και κατάλληλα για να επαληθευθούν οι πίνακες PΣΙ που παρουσιάστηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο με υλικά αναφοράς χάλυβα και αλουμίνιο και σε επόμενο βήμα να εμπλουτισθεί το σετ των ισοδύναμων υλικών που μπορούν να μετατρέπονται στα υλικά αναφοράς χάλυβα και αλουμίνιο.

ΠΙΝΑΚΕΣ 2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

	50kV	100kV
Μαγνήσιο	0.6	0.6
Αλουμίνιο	1.0	1.0
Αλουμίνιο τύπου 2024	2.2	1.6
Χάλυβας	-	12
Ανοξείδωτος Χάλυβας 18-8	-	12
Χαλκός	-	18
Inconel	-	16

Πίνακας 2.1

ΡΣΙ για ακτίνες -x χαμηλών ενεργειών με μέταλλο αναφοράς το αλουμίνιο

	50kV	100kV	150kV	200kV	220kV	250kV	300kV
Μαγνήσιο	0.034	0.05	0.05	0.07	0.08	-	-
Αλουμίνιο	0.057	0.08	0.12	0.16	0.18	0.18	0.19
Αλουμίνιο τύπου 2024	-	-	0.16	-	0.22	-	-
Ντουραλουμίνιο (4% Cu)	0.077	0.09-0.10	0.13-0.14	0.18	0.18	0.18-0.21	0.19-0.21
Τιτάνιο	-	-	0.45-0.54	-	0.35-0.54	-	-
Χάλυβας	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Ανοξείδωτος χάλυβας 18-8	-	-	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Χαλκός	1.33	1.47-1.50	1.43-1.60	1.40	1.40	1.40-1.47	1.54
Ψευδάργυρος	-	-	1.4	-	1.3	-	-
Ορείχαλκος	-	-	1.25-1.40	1.25	1.3	1.25	1.25
Inconel	-	-	1.4	-	1.3	-	-
Monel	-	1.7	-	-	1.2	-	-
Ζιρκόνιο	-	2.4	2.3	-	2.0	1.7	-
Μόλυβδος	-	14	11-14	13.3	12	15.4	16.7
Άφνιο	-	-	-	-	14	12	-
Ουράνιο	-	-	-	-	20	16-25	-

Πίνακας 2.2α

ΡΣΙ με μέταλλο αναφοράς τον χάλυβα για πηγές ακτίνων -x διαφόρων ενεργειών μέχρι 300kV

	400kV	1MV	2MV	4-25MV
Μαγνήσιο	-	-	-	-
Αλουμίνιο	0.22	-	-	-
Αλουμίνιο τύπου 2024	-	-	-	-
Ντουραλουμίνιο (4% Cu)	0.22			0.3
Τιτάνιο	0.71	0.9	0.9	0.9
Χάλυβας	1.0	1.0	1.0	1.0
Ανοξειδωτος χάλυβας 18-8	1.0	1.0	1.0	1.0
Χαλκός	1.4-1.7	1.1	1.1	1.2-1.3
Ψευδάργυρος	1.3	-	-	1.2
Ορείχαλκος	1.3	1.2	1.1-1.2	1.0
Inconel	1.3	1.3	1.3	1.3
Monel	-	-	-	-
Ζιρκόνιο	1.5	1	1	1
Μόλυβδος		5	2.5	2.7-3.0
Άφνιο	9	3	-	-
Ουράνιο	12	4	-	3.9

Πίνακας 2.2β

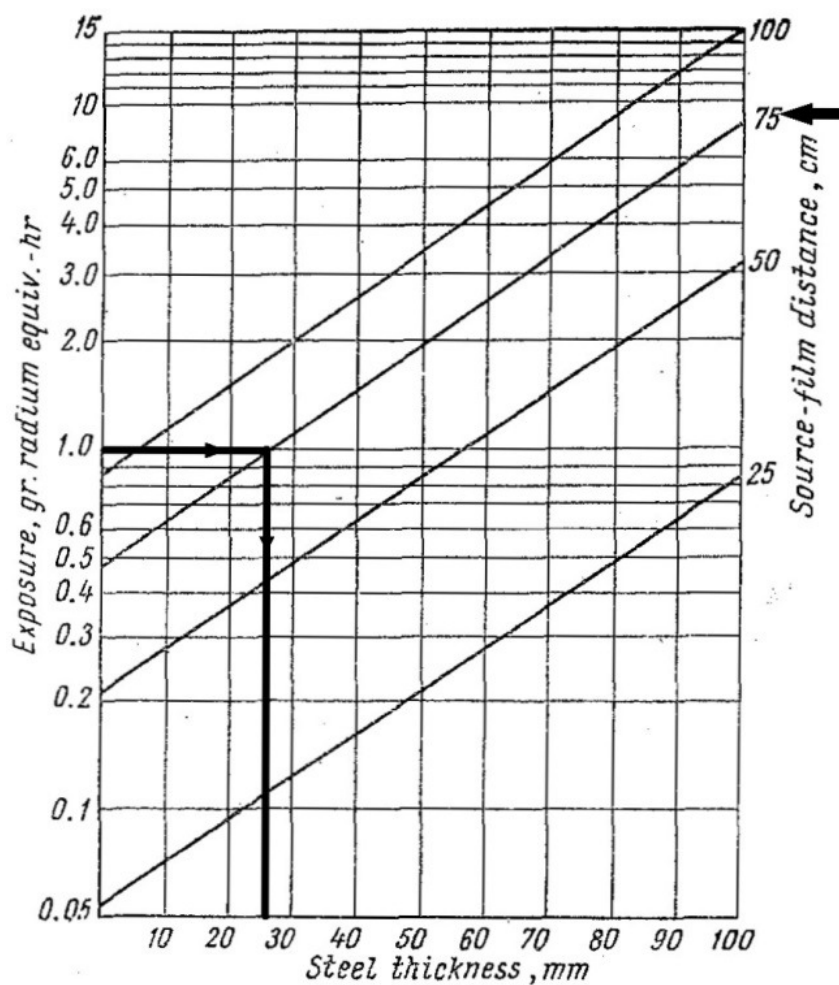
ΡΣΙ με μέταλλο αναφοράς τον χάλυβα για πηγές ακτίνων -x διαφόρων ενεργειών μεγαλύτερων από 300kV

	Ir-192	Co-60	Cs-137	Ra-226	Se-75
Μαγνήσιο	-	-	-	-	-
Αλουμίνιο	0.33-0.35	0.35	0.35	0.4	-
Αλουμίνιο τύπου 2024	0.35	0.35	0.35	-	-
Ντουραλουμίνιο (4% Cu)	0.33-0.35	0.35	0.16-0.35		0.3
Τιτάνιο	0.6-0.9	0.9	0.87		-
Χάλυβας	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Ανοξειδωτος χάλυβας 18-8	1.0	1.0	1.0	1.0	-
Χαλκός	1.1	1.1	1.1	1.1	-
Ψευδάργυρος	1.1	1.0	1.0	1.0	-
Ορείχαλκος	1.1	1.1	1.1	-	-
Inconel	1.3	1.3	1.3	1.3	-
Monel	-	-	-	-	-
Ζιρκόνιο	1.2	1.0	-	-	-
Μόλυβδος	4	1.5-2.3	2.0-3.2	-	-
Άφνιο	-	-	-	-	-
Ουράνιο	13	3.4	5.6	-	-

Πίνακας Π2.3

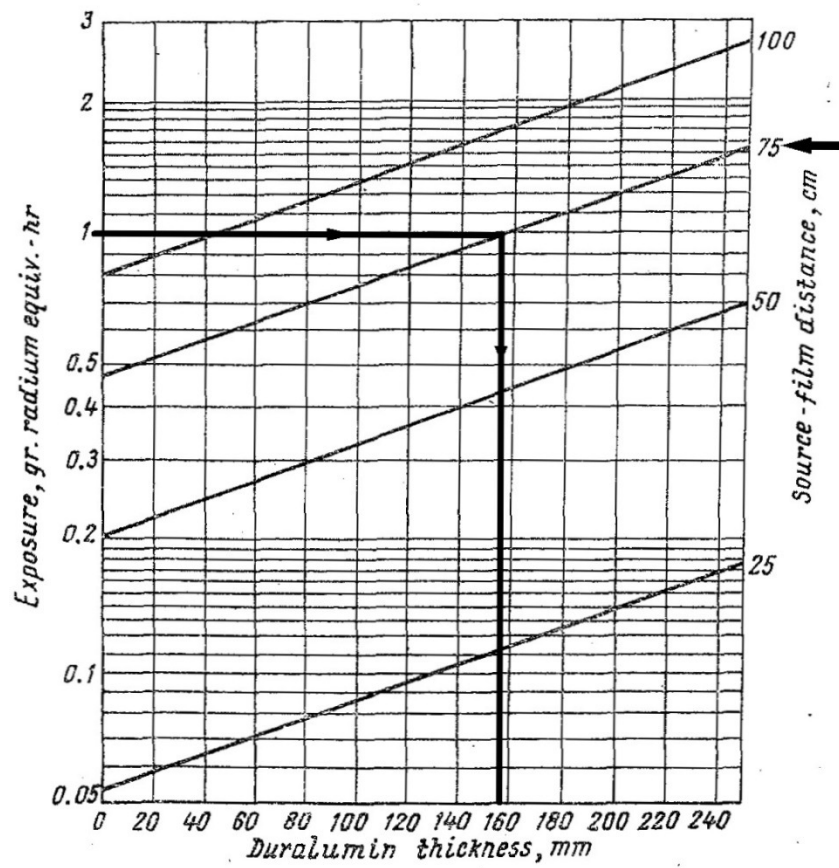
ΡΣΙ με μέταλλο αναφοράς τον χάλυβα για ισοτοπικές πηγές

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ 2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



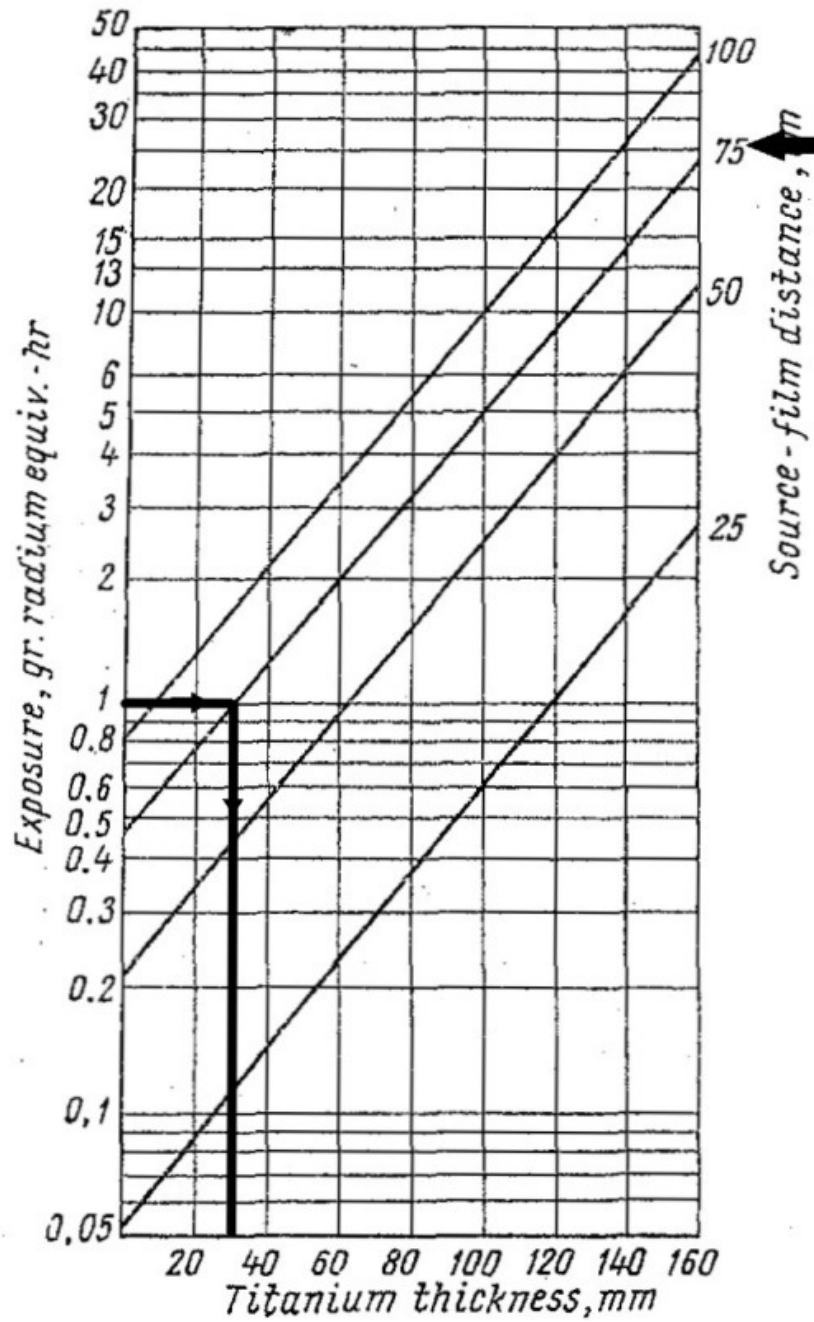
Διάγραμμα 2.1

Διάγραμμα έκθεσης χάλυβα για πηγή Cs-137, για $D = 1.5$
σύμφωνα με τον Semyonov (1967)



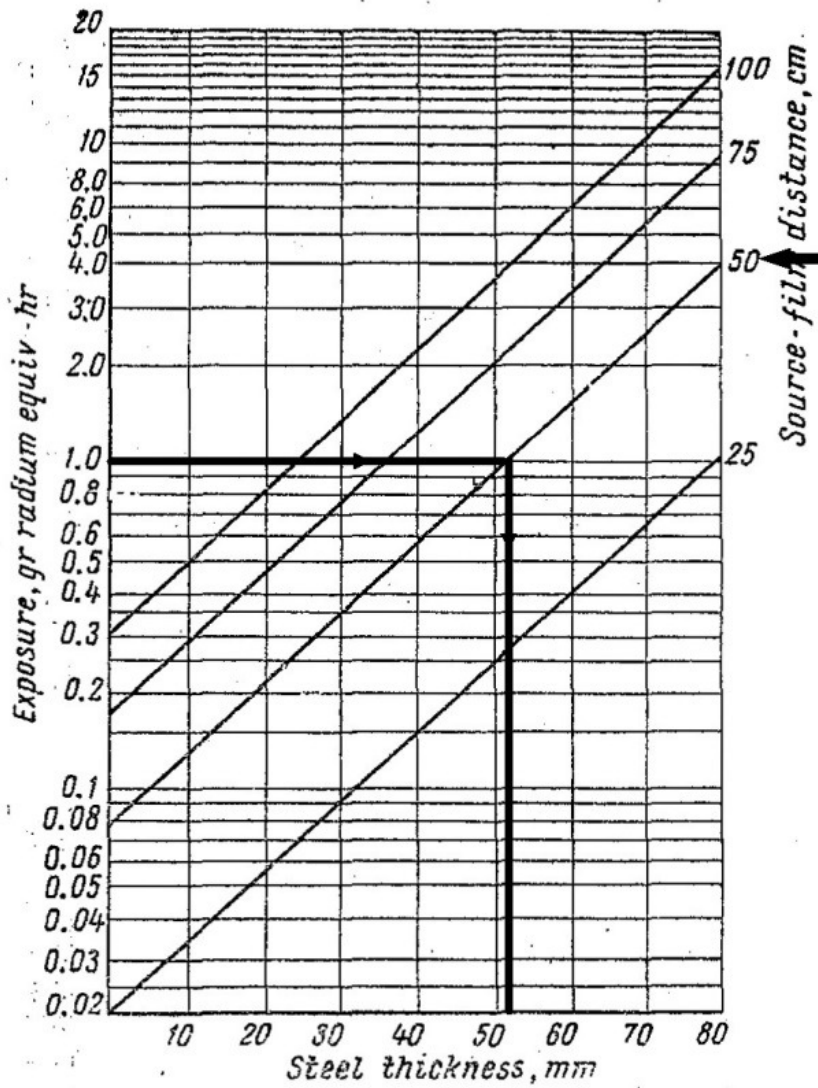
Διάγραμμα 2.2

Διάγραμμα έκθεσης ντουραλουμινίου για πηγή Cs-137, για $D = 1.5$ σύμφωνα με τον Semyonov (1967)



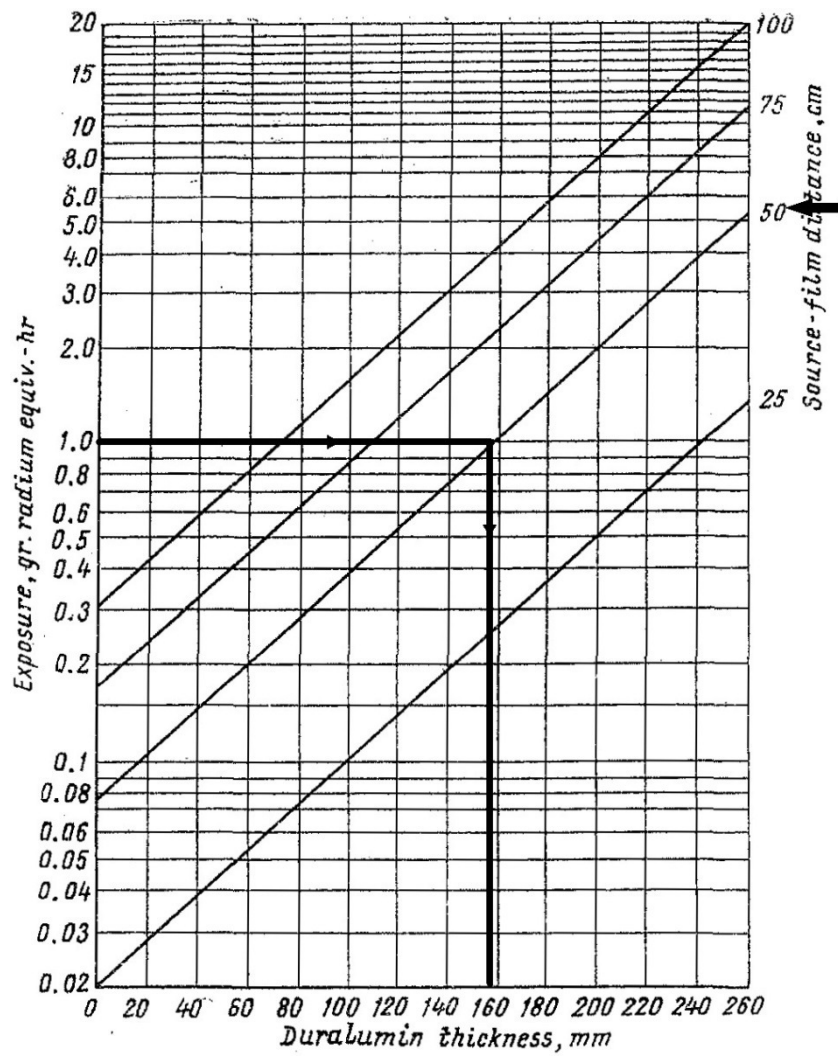
Διάγραμμα 2.3

Διάγραμμα έκθεσης τιτανίου για πηγή Cs-137, για $D = 1.5$ σύμφωνα με τον Semyonov (1967)



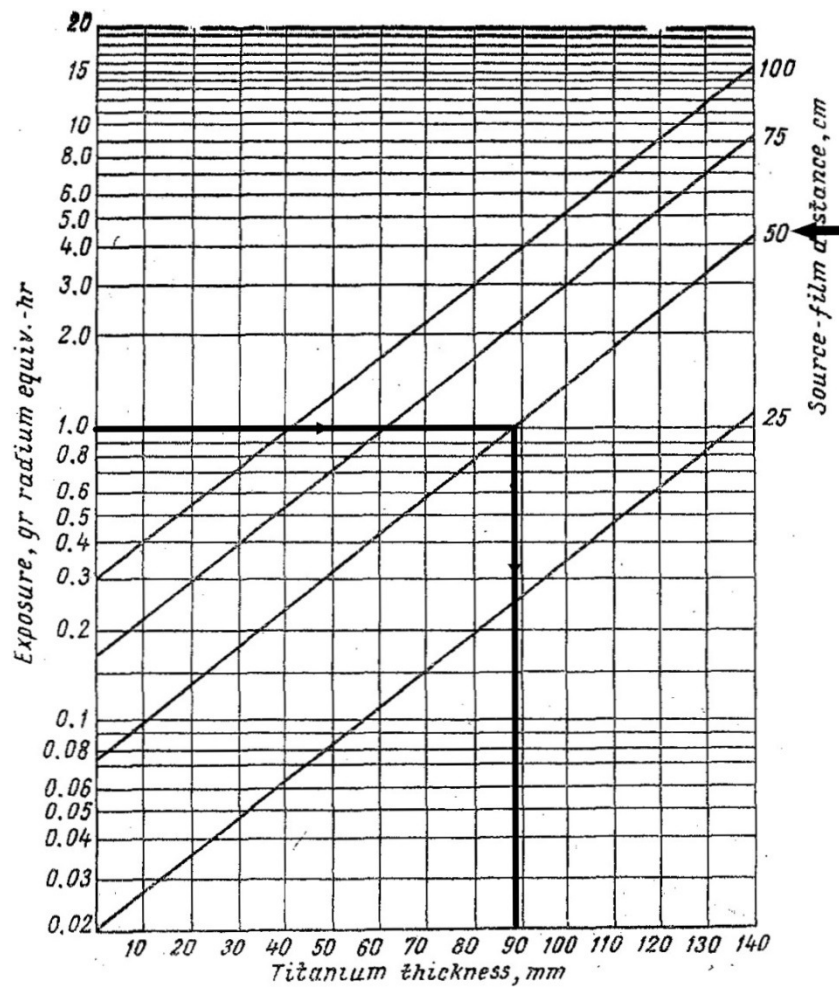
Διάγραμμα 2.4

Διάγραμμα έκθεσης χάλυβα για πηγή Ir-192, για $D = 1.5$ σύμφωνα με τον Semyonov (1967)



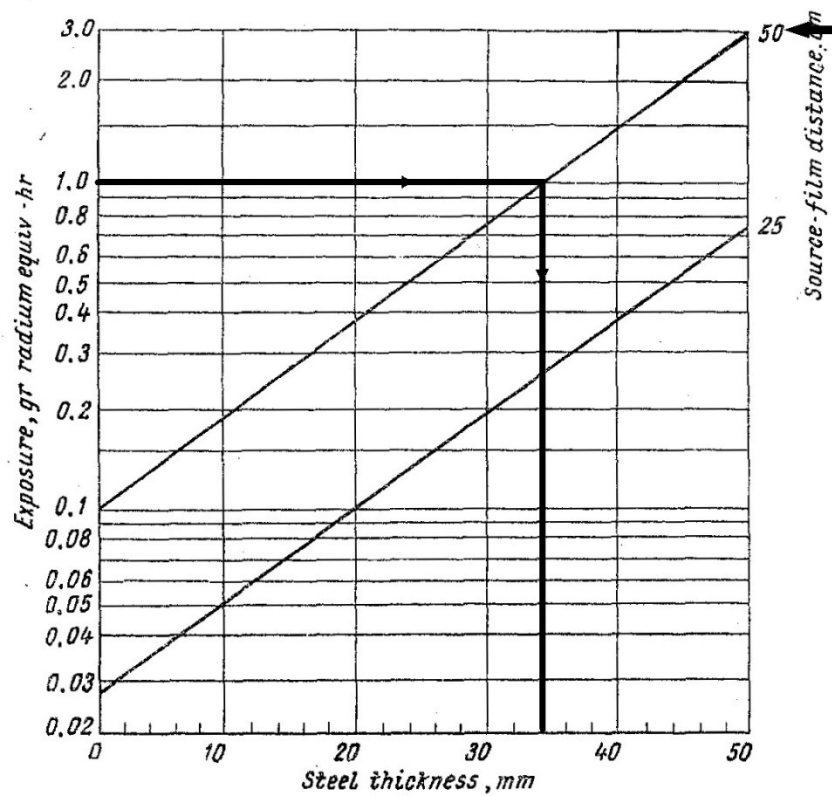
Διάγραμμα 2.5

Διάγραμμα έκθεσης ντουραλουμινίου για πηγή Ir-192, για $D = 1.5$ σύμφωνα με τον Semyonov (1967)



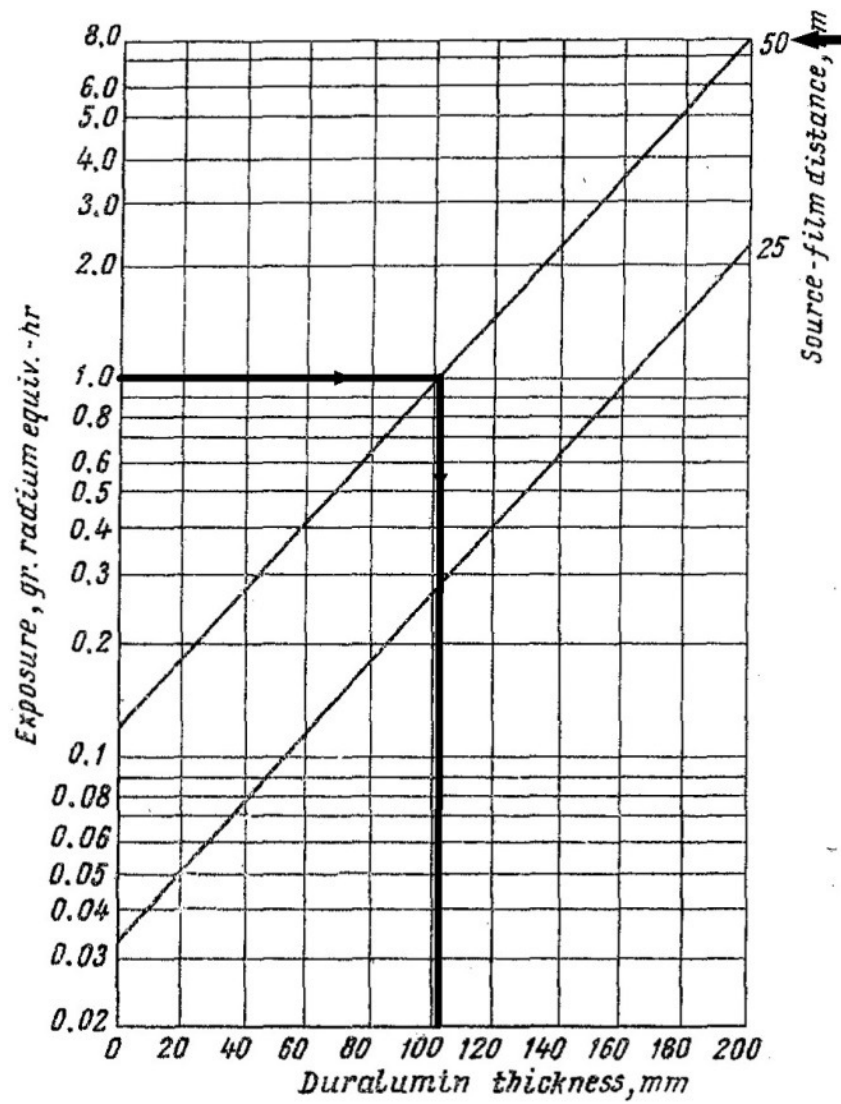
Διάγραμμα 2.6

Διάγραμμα έκθεσης τιτανίου για πηγή Ir-192, για $D = 1.5$ σύμφωνα με τον Semyonov (1967)



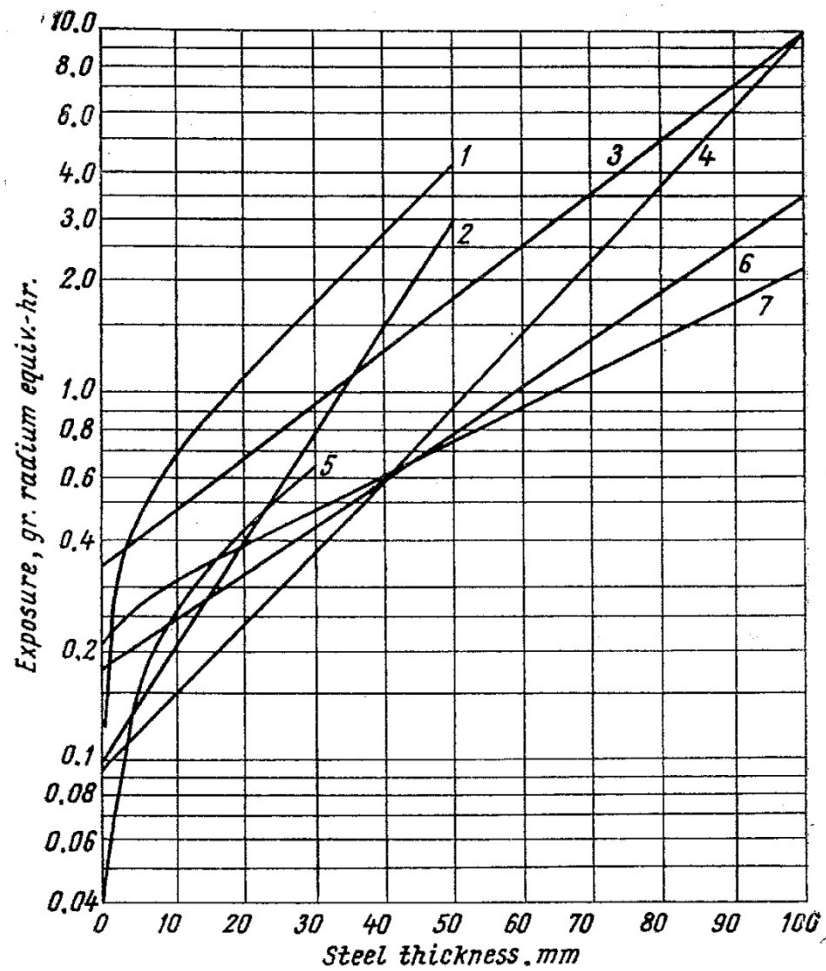
Διάγραμμα 2.7

Διάγραμμα έκθεσης χάλυβα για πηγή Se-75, για $D = 1.5$
σύμφωνα με τον Semjonov (1967)



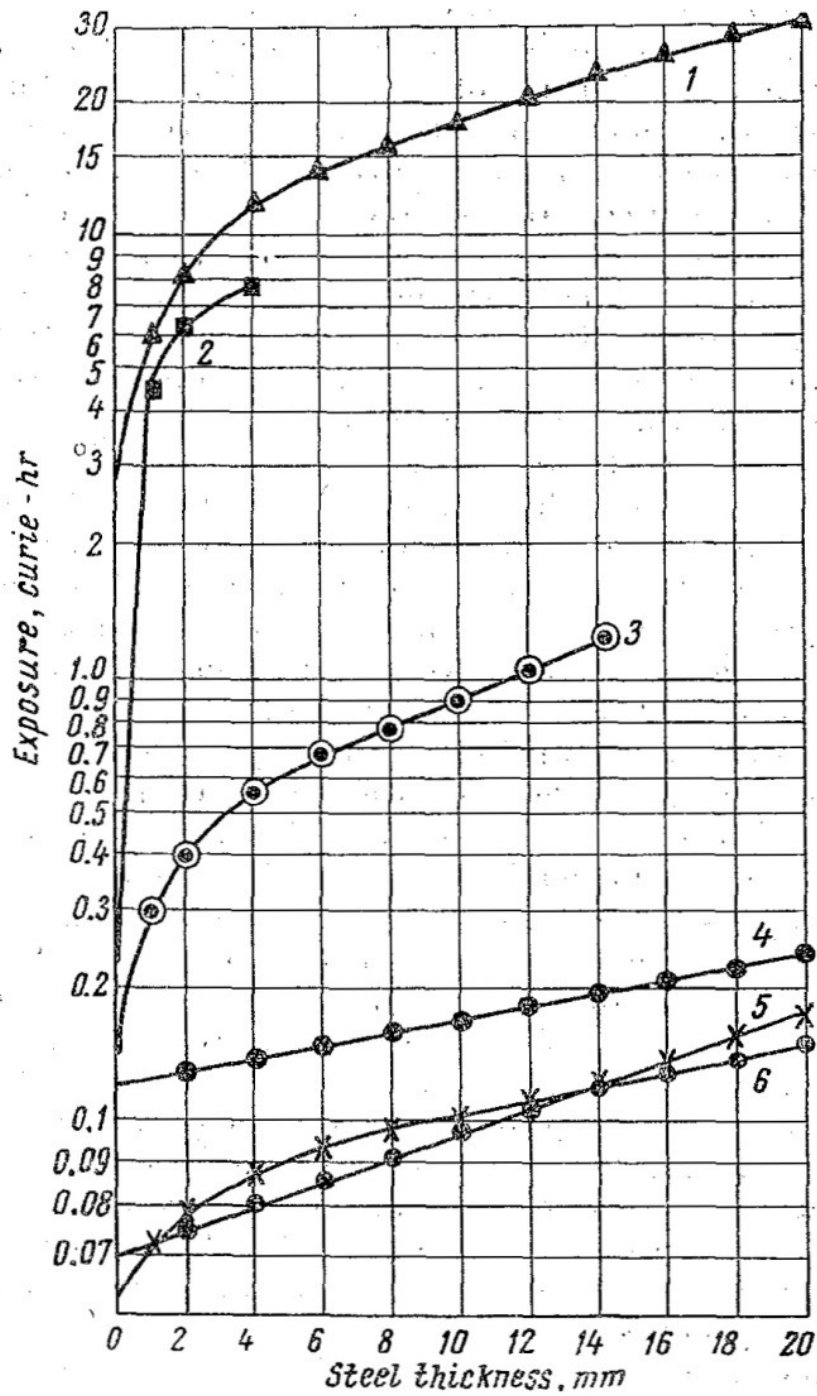
Διάγραμμα 2.8

Διάγραμμα έκθεσης για ντουραλουμινίου για πηγή Se-75, για $D = 1.5$ σύμφωνα με τον Semyonov (1967)



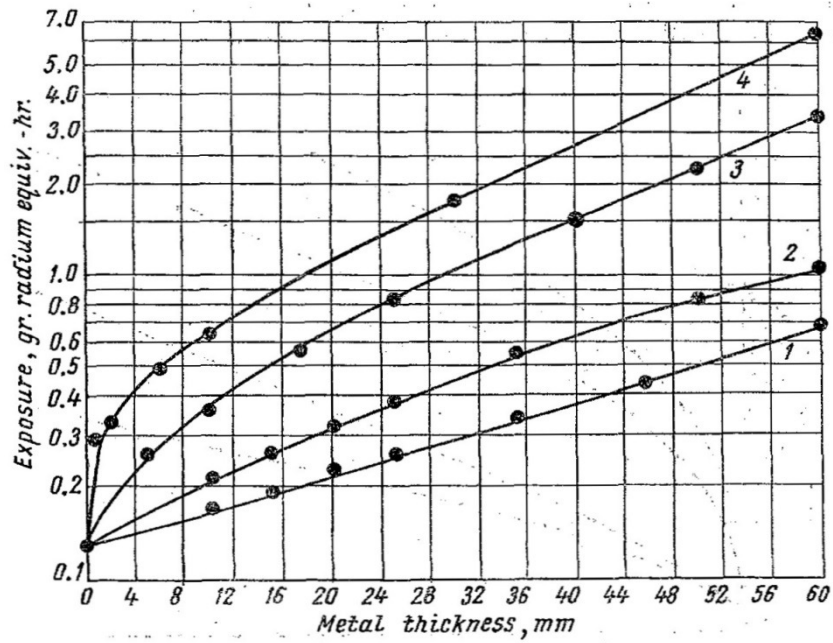
Διάγραμμα 2.9

Διάγραμμα έκθεσης χάλυβα για πηγές:
 1:Tm-170, 2:Ce-144, 3:Co-60, 4:Ir-192, 5:Eu-155, 6:Cs-137
 για απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ 50cm, για $D = 1.5$
 σύμφωνα με τον Semyonov (1967)



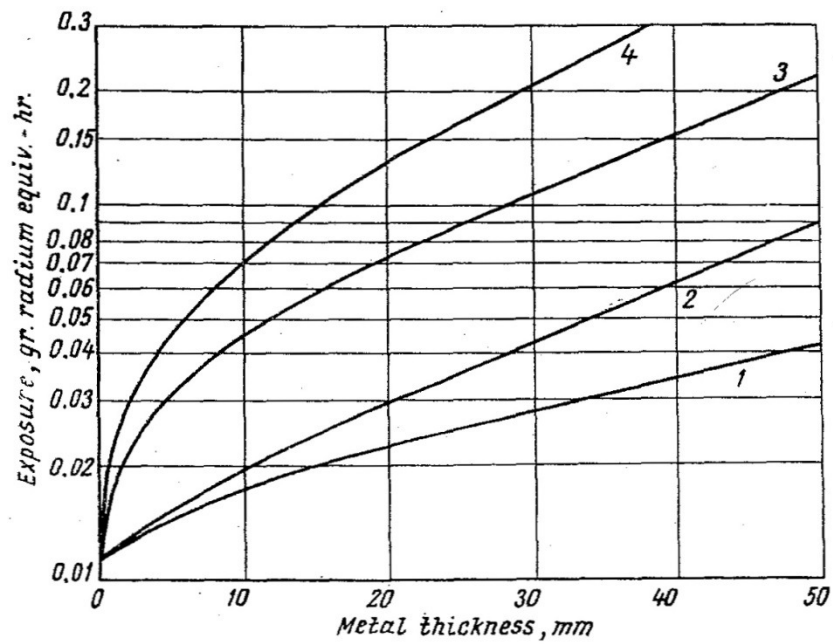
Διάγραμμα 2.10

Διάγραμμα έκθεσης χάλυβα για τις πηγές:
 1: Tm-170, 2: Ce-144 3: Eu-155, 4: Cs-137, 5: Ir-192, 6: Eu-152 & Eu-154
 για απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ 50cm, για $D = 1.5$
 σύμφωνα με τον Semjonov (1967)



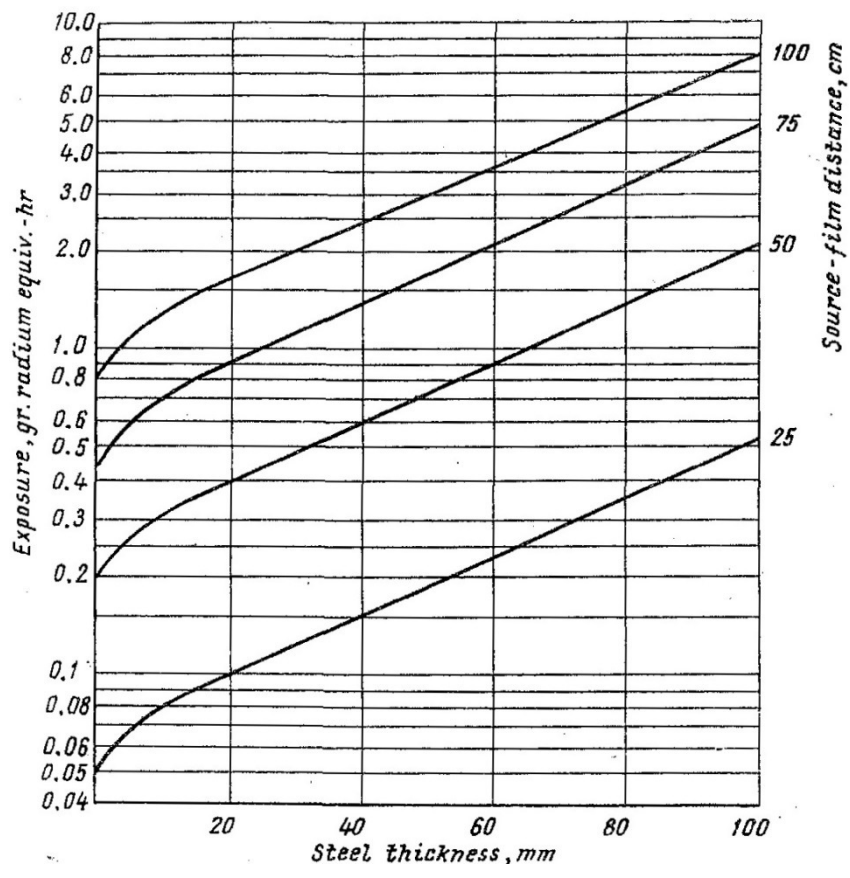
Διάγραμμα 2.11

Διάγραμμα έκθεσης για πηγή Tm-170 για υλικά:
 1: μαγνήσιο, 2: αλουμίνιο, 3: τιτάνιο, 4: χάλυβα
 για απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ 50cm, για $D = 1.5$
 σύμφωνα με τον Semjonov (1967)



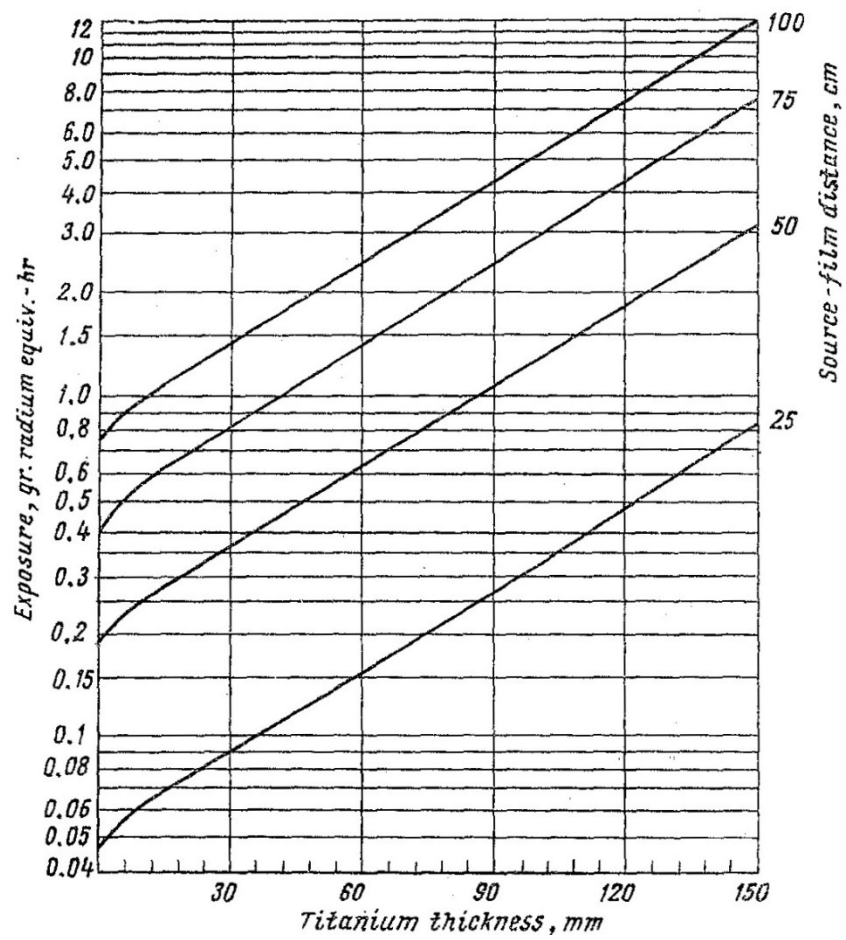
Διάγραμμα 2.12

Διάγραμμα έκθεσης για πηγή Eu-155 για υλικά:
 1: μαγνήσιο, 2: αλουμίνιο, 3: τιτάνιο, 4: χάλυβα
 για απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ 25cm, για $D = 1.5$
 σύμφωνα με τον Semyonov (1967)



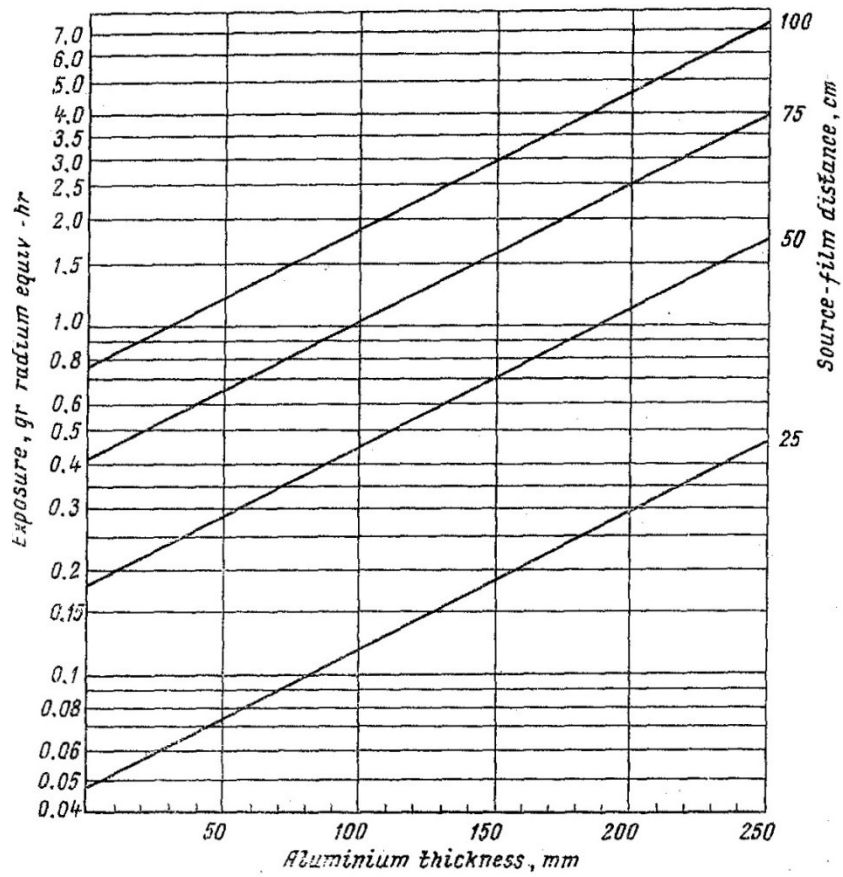
Διάγραμμα 2.13

Διάγραμμα έκθεσης χάλυβα για πηγή Eu-152 & Eu-154, για $D = 1.5$ σύμφωνα με τον Semyonov (1967)



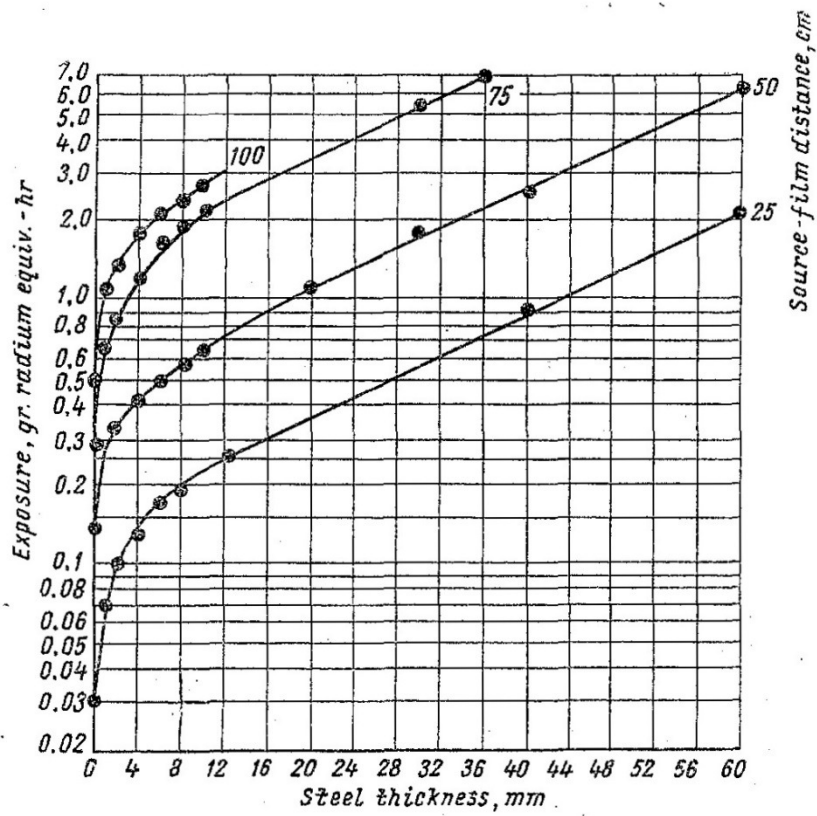
Διάγραμμα 2.14

Διάγραμμα έκθεσης τιτανίου για πηγή Eu-152 & Eu-154, για $D = 1.5$ σύμφωνα με τον Semjonov (1967)



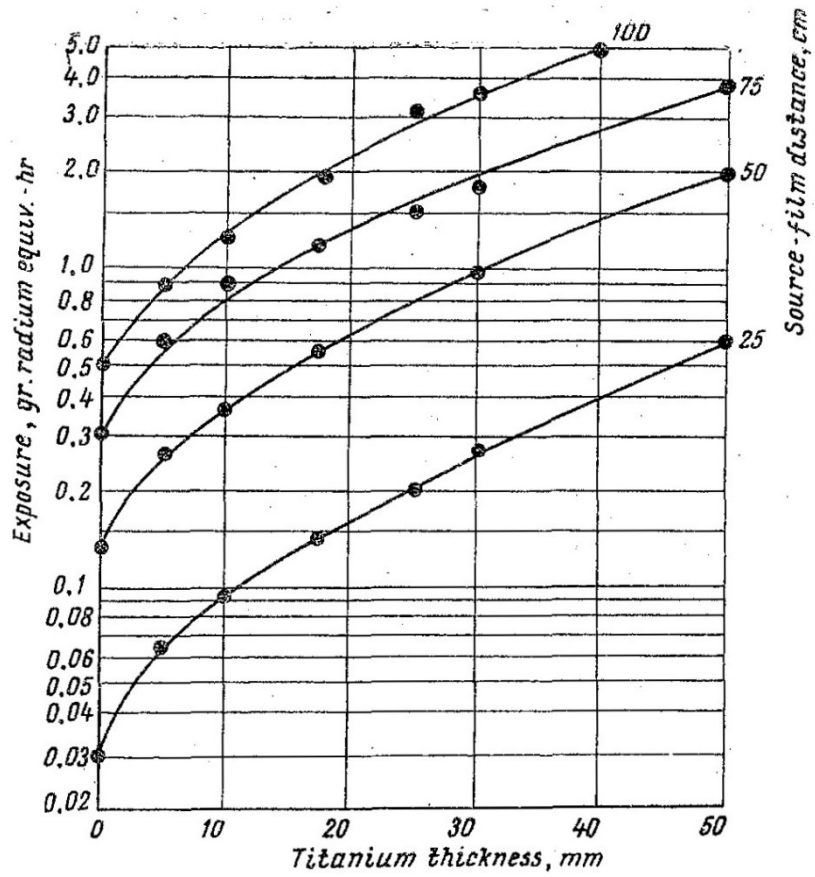
Διάγραμμα 2.15

Διάγραμμα έκθεσης αλουμινίου για πηγή Eu-152 & Eu-154, για $D = 1.5$ σύμφωνα με τον Semyonov (1967)



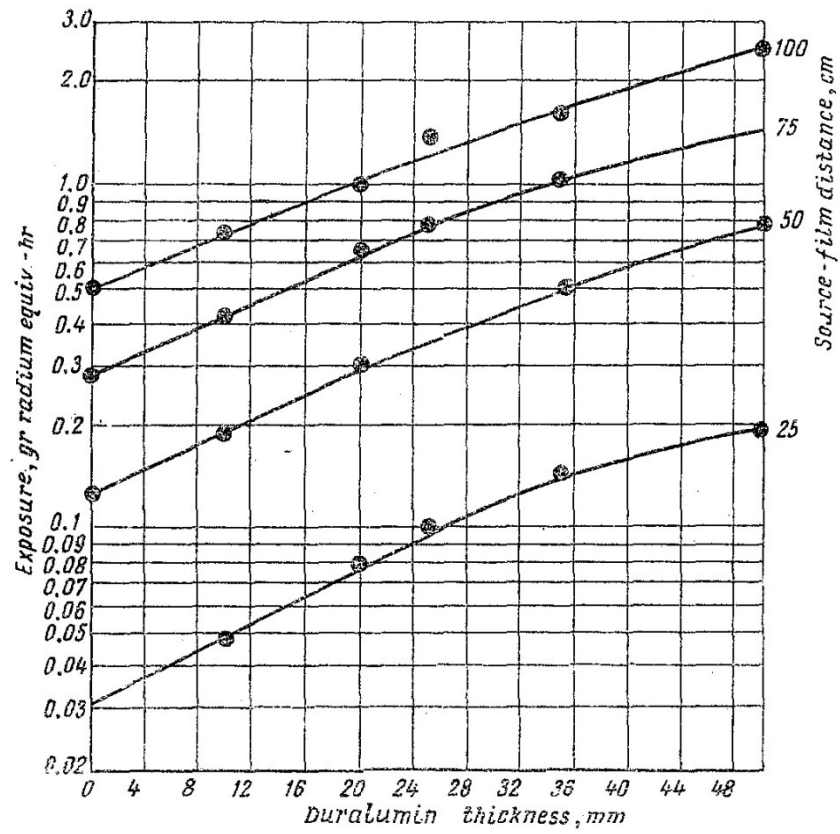
Διάγραμμα 2.16

Διάγραμμα έκθεσης χάλυβα για πηγή Tm-170, για $D = 1.5$ σύμφωνα με τον Semyonov (1967)



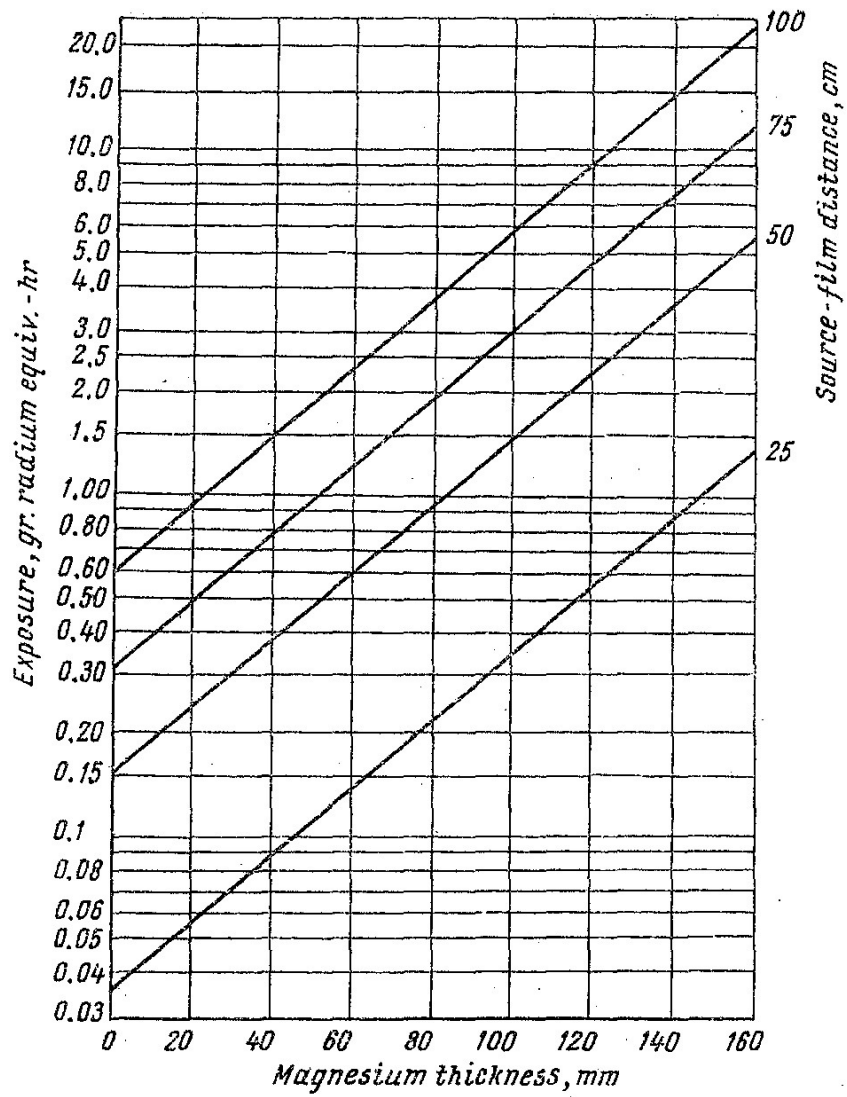
Διάγραμμα 2.17

Διάγραμμα έκθεσης τιτανίου για πηγή Tm-170, για $D = 1.5$ σύμφωνα με τον Semjonov (1967)



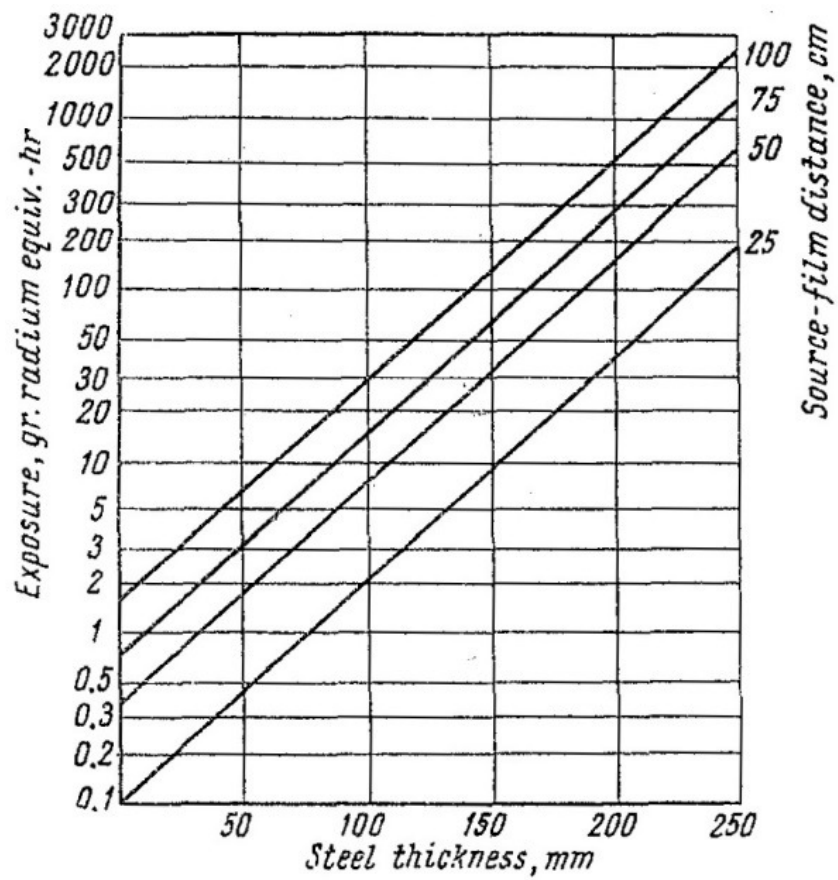
Διάγραμμα 2.18

Διάγραμμα έκθεσης ντουραλουμινίου για πηγή Tm-170, για $D = 1.5$ σύμφωνα με τον Semyonov (1967)



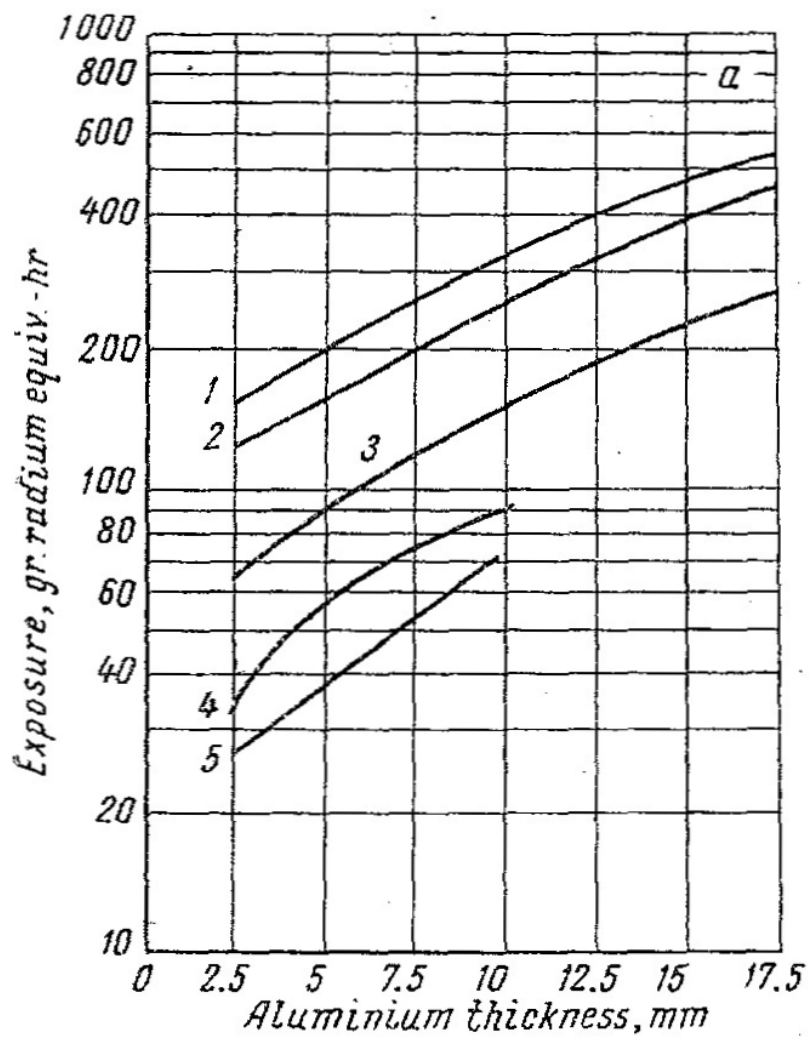
Διάγραμμα 2.19

Διάγραμμα έκθεσης μαγνησίου για πηγή Tm-170, για $D = 1.5$
σύμφωνα με τον Semjonov (1967)



Διάγραμμα 2.20

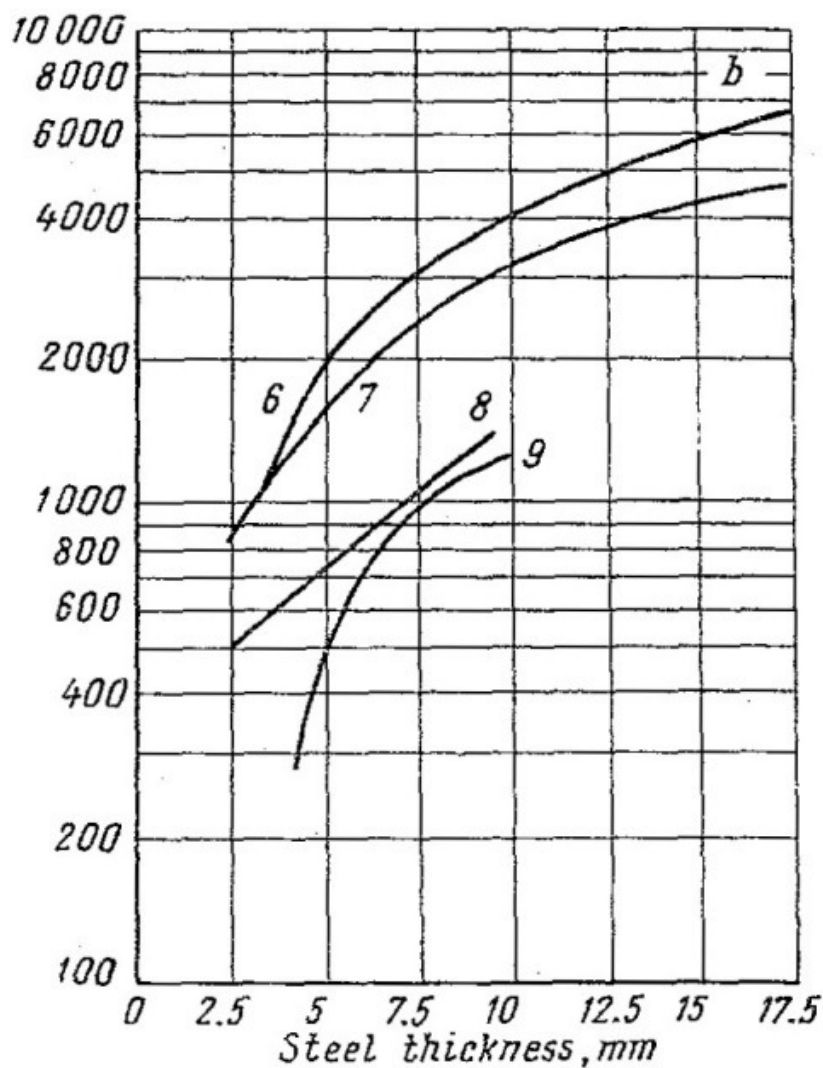
Διάγραμμα έκθεσης χάλυβα για πηγή Co-60, για $D = 1.5$
σύμφωνα με τον Semyonov (1967)



Διάγραμμα 2.21

Διάγραμμα έκθεσης αλουμινίου από πηγές:

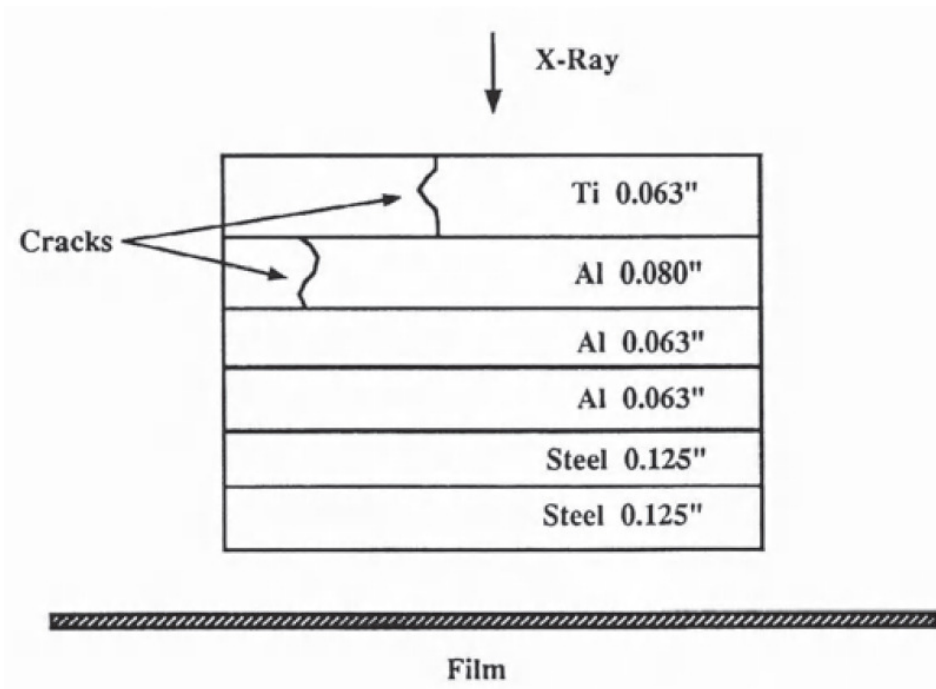
- 1: Sm-145 και απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ 50mm,
- 2: Gd-153 και απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ 50mm,
- 3: Tm-170 και απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ 50mm,
- 4: Gd-153 και απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ 25mm,
- 5: Tm-170 και απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ 25mm
για $D = 1.5$, σύμφωνα με τον Semyonov (1967)



Διάγραμμα 2.22

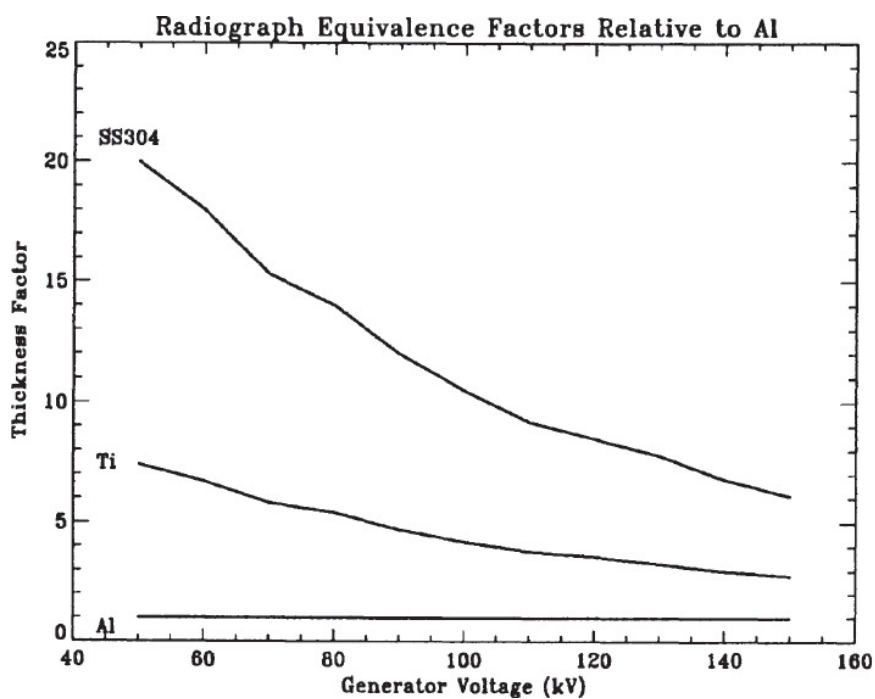
Διάγραμμα έκθεσης χάλυβα από πηγές:

- 6: Tm-170 και απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ 50mm,
 - 7: Gd-153 και απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ 50mm,
 - 8: Gd-153 και απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ 25mm,
 - 9: Tm-170 και απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ 25mm
- για $D = 1.5$, σύμφωνα με τον Semjonov (1967)



Διάγραμμα 2.23

Πολυστρωματική επιφάνεια μελέτης για το πείραμα του Thompson (1993)

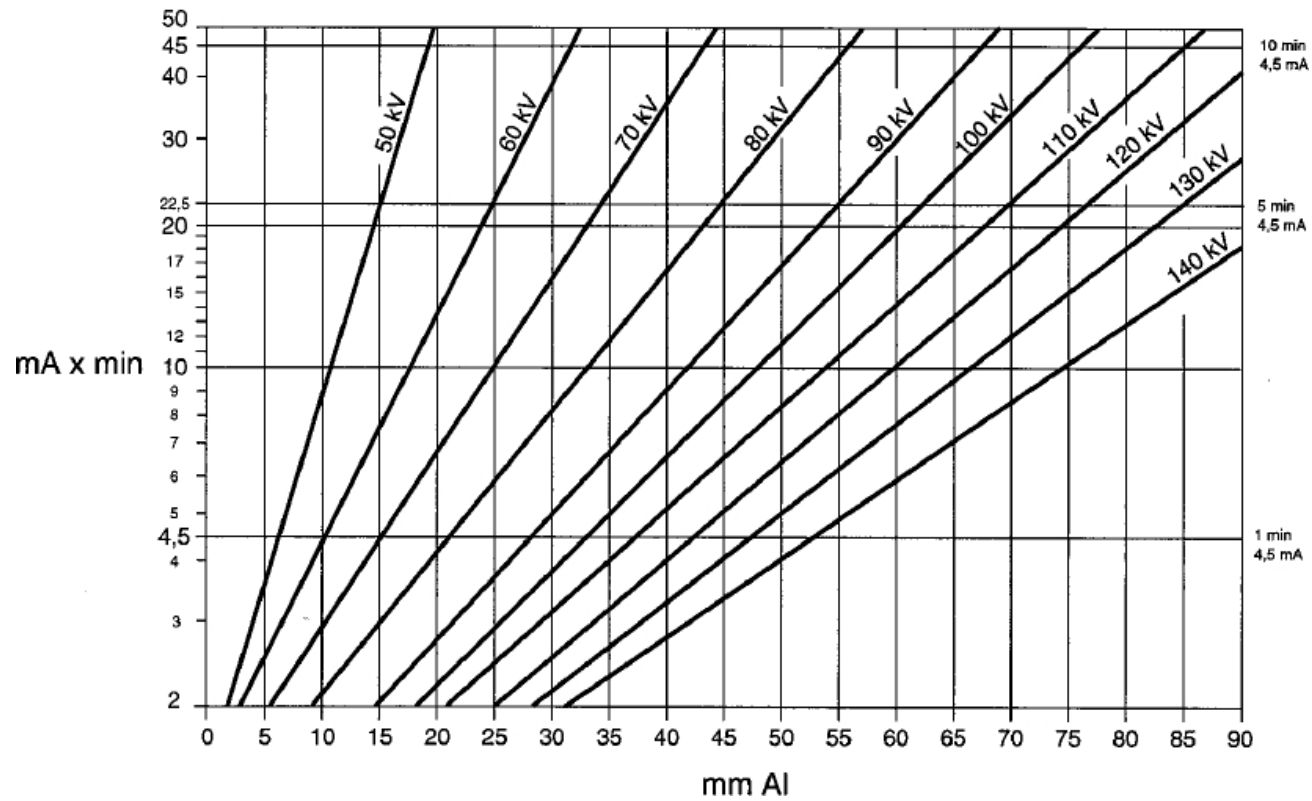


Διάγραμμα 2.24

Ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας για διάφορες τάσεις πηγής ακτίνων -x από τη μελέτη των Thompson (1993) για αλουμίνιο, τιτάνιο και χάλυβα

ERESCO 42 MF3

Exposure Diagram
FFD = 700 mm D4 D = 2.0

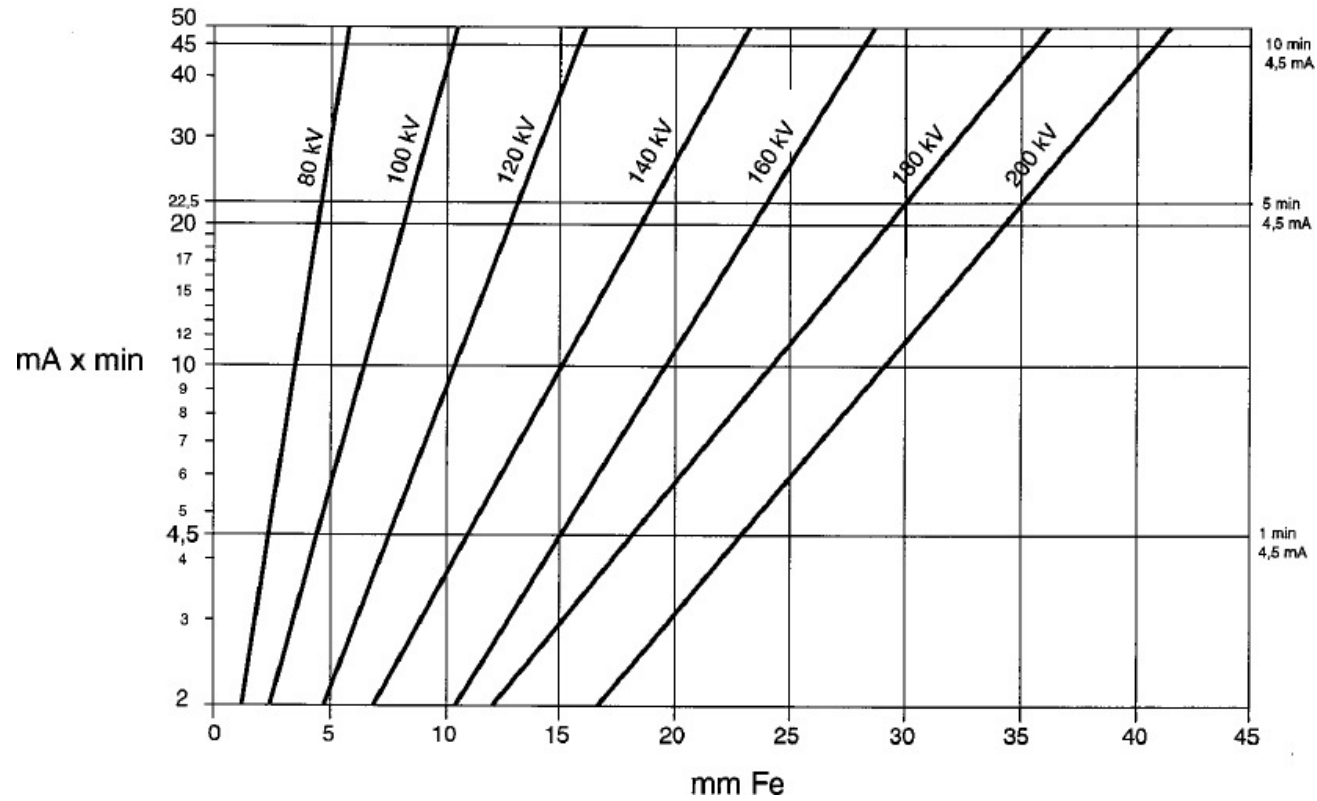


Διάγραμμα 2.25

Τυπικό διάγραμμα έκθεσης αλουμινίου από ακτίνες -x για διάφορες υψηλές τάσεις για την μηχανή παραγωγής ακτίνων -x τύπου ERESKO 42 MF3 της εταιρείας κατασκευής General Electric Sensing and Inspection Technologies

ERESCO 42 MF3

Exposure Diagram
FFD = 700 mm D7Pb D = 2.0



Διάγραμμα 2.26

Τυπικό διάγραμμα έκθεσης χάλυβα από ακτίνες -x για διάφορες υψηλές τάσεις για την μηχανή παραγωγής ακτίνων -x τύπου ERESKO 42 MF3 της εταιρείας κατασκευής General Electric Sensing and Inspection Technologies

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΚΩΝ

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑΣ

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζονται θεωρητικές και πρακτικές μέθοδοι για τον προσεγγιστικό υπολογισμό ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας με σκοπό σε επόμενο Κεφάλαιο να επαληθευθούν οι πίνακες ΡΣΙ που παρουσιάστηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο με υλικά αναφοράς χάλυβα και αλουμίνιο και σε επόμενο βήμα να εμπλουτισθεί το σετ των ισοδύναμων υλικών που μπορούν να μετατρέπονται στα υλικά αναφοράς χάλυβα και αλουμίνιο. Επιπλέον οι μέθοδοι αυτές, όπως θα αναπτυχθούν θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την αύξηση του πλήθους των υλικών αναφοράς. Για την ανάπτυξη των μεθόδων αυτών εκτός από θεωρητικές σχέσεις χρειάστηκε να συγκεντρωθούν και να χρησιμοποιηθούν πολλά διαθέσιμα δεδομένα από την βιβλιογραφία και το διαδίκτυο με πλέον χαρακτηριστικά τα ακόλουθα: (α) τις ενέργειες και τα ποσοστά εκπομπής φωτονίων των ισοτόπων που τυπικά χρησιμοποιούνται στην βιομηχανική ραδιογραφία, (β) προσεγγιστικά ενεργειακά φάσματα μηχανών παραγωγής ακτίνων x , για ονομαστικές μέγιστες ενέργειες από 50 έως 300 kV με βήμα 50 kV, και (γ) τις τιμές των γραμμικών συντελεστών εξασθένησης μ κάθε στοιχείου, συναρτήσει την ενέργειας φωτονίων. Η επεξεργασία των δεδομένων αυτών ώστε να έρθουν σε εκμεταλλεύσιμη μορφή που να εξυπηρετεί τους υπολογισμούς πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια κυρίως ελεύθερου λογισμικού άμεσα διαθέσιμου στο διαδίκτυο ή εμπορικού λογισμικού για το οποίο το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ διαθέτει νόμιμη άδεια χρήσης. Το λογισμικό αυτό παρουσιάζεται όσο αναλυτικά απαιτείται. Εννοείται φυσικά σε όλες τις περιπτώσεις λογισμικό κατάλληλο για Λειτουργικό Σύστημα MS[®] Windows, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά. Τονίζεται ότι στα σημεία που απαιτείται η εφαρμογή του νόμου της εξασθένησης φωτονίων λόγω αλληλεπιδράσεών τους με την ύλη, δεν γίνονται υπολογισμοί επαύξησης (build-up) της διαπερνώσας την ύλη δέσμης. Ο κυριότερος λόγος για αυτήν την παράλειψη είναι ότι τα φωτόνια επαύξησης είναι πολύ μικρότερης ενέργειας από εκείνα της πρωτεύουσας δέσμης με αποτέλεσμα να θεωρείται ότι δεν συμβάλλουν γενικά στην δημιουργία της ραδιογραφικής εικόνας.

3.2 Μονοενεργειακός συντελεστής ισοδυναμίας

Στην πραγματικότητα, είναι σπάνια η χρησιμοποίηση μονοενεργειακής δέσμης φωτονίων στη βιομηχανική ραδιογραφία. Εξαιρέση υπάρχει πρακτικά όταν χρησιμοποιείται πηγή Cs-137, η οποία εκπέμπει φωτόνια ενέργειας στην ουσία μόνο στα 662 keV και όταν χρησιμοποιείται πηγή Co-60, η οποία εκπέμπει φωτόνια ενέργειας στα 1173 keV και 1332 keV με το ίδιο ακριβώς ποσοστό εκπομπής, με αποτέλεσμα τα φωτόνια που προσβάλλουν το ραδιογραφούμενο δοκίμιο να έχουν μέση ενέργεια $(\sim 1173 + \sim 1332)/2 = \sim 1252$ keV.

Στη συνέχεια θα παρουσιασθεί με λεπτομέρεια ο τρόπος υπολογισμού του ραδιογραφικού συντελεστή ισοδυναμίας (ΡΣΙ) μεταξύ δύο δοκιμίων από υλικά "Α" και "Β".

Έστω ότι και τα δύο δοκίμια προσβάλλονται από μονοενεργειακή δέσμη φωτονίων εντάσεως I_0 (φωτόνια $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$). Σύμφωνα με την σχέση (2.1) θα ισχύει για τις δέσμες I_A και I_B που διαπερνούν τα δοκίμια πάχους x_A και x_B :

$$I_A = I_0 \cdot e^{-\mu_A \cdot x_A} \quad (3.1)$$

και

$$I_B = I_0 \cdot e^{-\mu_B \cdot x_B} \quad (3.2)$$

όπου οι γραμμικοί συντελεστές εξασθένησης μ_A και μ_B για την ενέργεια της δέσμης φωτονίων μπορούν να λαμβάνονται από κατάλληλες βάσεις δεδομένων.

Για να είναι ραδιογραφικά ισοδύναμα τα πάχη των δύο δοκιμίων θα πρέπει προφανώς:

$$I_0 \cdot e^{-\mu_A \cdot x_A} = I_0 \cdot e^{-\mu_B \cdot x_B} \quad (3.3)$$

το οποίο σημαίνει ότι:

$$\frac{\mu_B}{\mu_A} = \frac{x_A}{x_B} \quad (3.4)$$

Αν το υλικό αναφοράς είναι το "Α", τότε σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν και στο 2^ο Κεφάλαιο (σχέση 2.4) ο ορισμός του ραδιογραφικού συντελεστή ισοδυναμίας (ΡΣΙ) είναι:

$$P_{\Sigma I} = \frac{x_A}{x_B} \quad (3.5)$$

Επομένως για την περίπτωση μονοενεργειακής δέσμης φωτονίων ο ραδιογραφικός συντελεστής ισοδυναμίας υπολογίζεται άμεσα από τον λόγο των γραμμικών συντελεστών εξασθένησης, από τη σχέση:

$$P_{\Sigma I} = \frac{\mu_B}{\mu_A} \quad (3.6)$$

όπου πάντοτε ως "Α" ορίζεται το υλικό αναφοράς και ως "Β" ορίζεται το υλικό ισοδυναμίας.

3.3 Πολυενεργειακός συντελεστής ισοδυναμίας

3.3.1 Γενικά

Τα φωτόνια που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανική ραδιογραφία προέρχονται όπως είναι γνωστό είτε από διασπάσεις ραδιοϊσοτόπων, είτε από μηχανές παραγωγής ακτίνων -x. Στην πρώτη περίπτωση τα φωτόνια είναι συνήθως πολλών διαφορετικών αλλά διακριτών ενεργειών και στη δεύτερη περίπτωση είναι πολλών ενεργειών, οι οποίες ανήκουν σε ένα συνεχές φάσμα, ο τρόπος παραγωγής και η μορφή του οποίου δεν χρειάζεται να αναλυθούν εδώ. Θα ακολουθήσει η περιγραφή του τρόπου υπολογισμού ενός ραδιογραφικού συντελεστή ισοδυναμίας τόσο για την πρώτη όσο και για την δεύτερη περίπτωση.

3.3.2 Φωτόνια διακριτών ενεργειών

Θα παρουσιασθεί ο τρόπος υπολογισμού του ραδιογραφικού συντελεστή ισοδυναμίας μεταξύ δύο δοκιμίων από υλικά "Α" και "Β" που προσβάλλονται για τους σκοπούς βιομηχανικής ραδιογραφίας από φωτόνια διακριτών διαφορετικών ενεργειών παραγόμενα από μία ισοτοπική πηγή. Το πλήθος των ενεργειών θεωρείται ίσο με n . Αν η δέσμη φωτονίων ενέργειας i έχει ένταση I_{0i} , τότε για το δοκίμιο υλικού "Α" πάχους x_A , η δέσμη I_A που το διαπερνά υπολογίζεται ως:

$$I_A = \sum_{i=1}^n I_{Ai} = \sum_{i=1}^n I_{0i} \cdot e^{-\mu_{Ai} \cdot x_A} \quad (3.7)$$

Μπορεί να γίνει δεκτό ότι η (3.7) είναι δυνατόν να γραφτεί ισοδύναμα με τον ακόλουθο λογιστικό τρόπο:

$$I_A = I_0 \cdot e^{-\mu_{effA} \cdot x_A} \quad (3.8)$$

όπου

$$I_0 = \sum_{i=1}^n I_{0i} \quad (3.9)$$

και

μ_{eff} ένας ισοδύναμος γραμμικός συντελεστής εξασθένησης με κατάλληλη τιμή ώστε η (3.8) να υπολογίζει την ίδια I_A με την (3.7). Η εισαγωγή της (3.8) και η χρήση του ισοδύναμου γραμμικού συντελεστή μ_{eff} προτείνεται συχνά για την απλοποίηση της αναπαράστασης της εξασθένησης φωτονίων διακριτών ενεργειών που διασχίζουν την ύλη (βλ. π.χ. και Semyonov, 1967 και Halmshaw, 1995 και Rokrok, 2006).

Είναι προφανές ότι ο μ_{eff} είναι δυνατόν να υπολογίζεται με τη βοήθεια των (3.7), (3.8) και (3.9) από την εξίσωση:

$$\mu_{effA} = -\frac{1}{x_A} \cdot \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^n I_{0i} \cdot e^{-\mu_{Ai} \cdot x_A}}{\sum_{i=1}^n I_{0i}} \right) \quad (3.10)$$

Η (3.10) δείχνει ότι γενικά ο μ_{eff} και επομένως και η εξασθένηση γενικότερα, εξαρτάται από το πάχος του δοκιμίου, πράγμα που εμποδίζει τον υπολογισμό ενός πάχους x_A για σταθερό μ_{effA} και τελικά τον υπολογισμό ενός ΡΣΙ με άμεσο τρόπο.

Το Διάγραμμα 3.1 δείχνει την εξάρτηση του μ_{eff} και επομένως της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης φωτονίων εντάσεως I_A , από το πάχος του δοκιμίου για χάλυβα και ισοτοπική πηγή φωτονίων Ir-192, σύμφωνα με τον Rokrok (2006).

Ομοίως με την (3.7) μπορεί να γραφτεί για το δοκίμιο από υλικό "B" πάχους x_B ότι:

$$I_B = I_0 \cdot e^{-\mu_{effB} \cdot x_B} \quad (3.11)$$

Για να είναι ισοδύναμα τα πάχη των δύο δοκιμίων θα πρέπει προφανώς:

$$\sum_{i=1}^n I_{0i} \cdot e^{-\mu_{Ai} \cdot x_A} = \sum_{i=1}^n I_{0i} \cdot e^{-\mu_{Bi} \cdot x_B} \quad (3.12)$$

ή ισοδύναμα:

$$I_0 \cdot e^{-\mu_{effA} \cdot x_A} = \sum_{i=1}^n I_{0i} \cdot e^{-\mu_{Bi} \cdot x_B} \quad (3.13)$$

Η (3.13) ικανοποιείται πάντοτε μόνο όταν υπολογισθούν το πάχος x_{Amax} για το οποίο ο μ_{effA} δεν εξαρτάται πρακτικά από το πάχος, παραμένει δηλαδή σταθερός.

Μπορεί να θεωρηθεί ότι αυτό συμβαίνει όταν το πάχος x_A είναι αρκετά μεγάλο ώστε η (3.10) να μην εξαρτάται πλέον από την ποσότητα:

$$\frac{\sum_{i=1}^n I_{0i} \cdot e^{-\mu_{Ai} \cdot x_{Amax}}}{\sum_{i=1}^n I_{0i}}$$

Για το σκοπό αυτό μπορούν να δοκιμασθούν τρία κριτήρια:

1^ο κριτήριο όταν:

$$x_{Amax} \rightarrow \infty \text{ οπότε } \frac{\Delta \left(\sum_{i=1}^n I_{0i} \cdot e^{-\mu_{Ai} \cdot x_{Amax}} \right)}{\Delta x} \rightarrow 0 \quad (3.14\alpha)$$

Το κριτήριο αυτό ικανοποιείται όταν η παράγωγος (3.14α) πάρει τιμή πολύ κοντά στο μηδέν δηλαδή όταν η καμπύλη του Διαγράμματος 3.1 γίνει οριζόντια. Το κριτήριο αυτό μπορεί να οδηγήσει σε πολύ μεγάλες τιμές του x_{Amax} , οι οποίες να μην έχουν νόημα στην πράξη και το κυριότερο να μην μπορούν να επαληθευθούν από οποιοδήποτε πείραμα.

2^ο κριτήριο όταν:

x_{Amax} τέτοιο ώστε:

$$\frac{\sum_{i=1}^n I_{0i} \cdot e^{-\mu_{Ai} \cdot x_{Amax}} - \sum_{i=1}^n I_{0i} \cdot e^{-\mu_{Ai} \cdot (x_{Amax} + \Delta x)}}{\sum_{i=1}^n I_{0i} \cdot e^{-\mu_{Ai} \cdot x_{Amax}}} \rightarrow \delta \quad (3.14\beta)$$

Το κριτήριο (3.14β) ικανοποιείται όταν η κλίση της καμπύλης του Διαγράμματος 3.1 αρχίζει να γίνεται οριζόντια. Το σημείο που ορίζεται η αρχή της οριζοντίωσης καθορίζεται προφανώς από την τιμή του δ . Επειδή η καμπύλη θα είναι τόσο πιο "οριζόντια" όσο το δ είναι κοντύτερα στο μηδέν, το κριτήριο αυτό ομοίως μπορεί να οδηγήσει σε πολύ μεγάλες τιμές του x_{Amax} , οι οποίες να μην έχουν νόημα στην πράξη και το κυριότερο να μην μπορούν να επαληθευθούν από οποιοδήποτε πείραμα.

3^ο κριτήριο όταν:

$$x_{Amax} \text{ τέτοιο ώστε: } x_{Amax} \geq \varepsilon \frac{\ln 2}{\mu_{effA}} \quad (3.14\gamma)$$

Το κριτήριο (3.14γ) ικανοποιείται όταν το x_{Amax} (ισοδύναμα το ε) γίνει αρκετά μεγάλο ώστε να έχει πρακτικά εξασθενήσει το σύνολο της προσπίπτουσας πρωτεύουσας δέσμης αλλά όχι τόσο μεγάλο, ώστε η απομένουσα πρωτεύουσα δέσμη να γίνει ελάχιστη. Αυτό επιτυγχάνεται όταν το ε πάρει τιμή στην γειτονιά ~ 4 . Αν το x_{Amax} γίνει πολύ μεγαλύτερο από το κριτήριο (3.14γ) με $\varepsilon \approx 4$, η απομένουσα πρωτεύουσα δέσμη γίνεται ελάχιστη σε τιμές που δεν συναντώνται στην πράξη και δεν μπορούν επίσης να επαληθευθούν πειραματικά, εφόσον δέσμες μικρής έντασης δεν δημιουργούν εικόνα στα ραδιογραφικά φιλμ. Υπενθυμίζεται ότι η απομένουσα πρωτεύουσα δέσμη γίνεται ελάχιστη κατά αυτή την έννοια όταν:

$$x_{Amax} \geq (5 \div 7) \frac{\ln 2}{\mu_{effA}}$$

εφόσον το φαινόμενο εξασθένισης των φωτονίων στην ύλη ακολουθεί τον εκθετικό νόμο απομείωσης.

Επομένως κρίνεται ότι όταν ικανοποιείται το κριτήριο (3.14γ) τότε μπορεί να υπολογίζεται ο ζητούμενος ΡΣΙ πολυενεργειακής δέσμης φωτονίων ως:

$$P\Sigma I = \frac{x_{Amax}}{x_B} \quad (3.15)$$

όπου το x_B υπολογίζεται από την επίλυση της εξίσωσης:

$$I_B = I_A = \sum_{i=1}^n I_{0i} \cdot e^{-\mu_{Bi} \cdot x_B} \quad (3.16)$$

Τόσο οι μ_{Ai} όσο και οι μ_{Bi} θεωρούνται γνωστοί και λαμβάνονται από κατάλληλες βάσεις δεδομένων, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια.

Επίσης γνωστές θεωρούνται οι ποσότητες I_{0i} , οι οποίες λαμβάνονται από κατάλληλες βιβλιοθήκες ισοτόπων για τα ισότοπα που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανική ραδιογραφία όπως επίσης θα αναλυθεί στη συνέχεια.

3.3.3 Συνεχές φάσμα φωτονίων

Θα παρουσιασθεί ο τρόπος υπολογισμού του ραδιογραφικού συντελεστή ισοδυναμίας μεταξύ δύο δοκιμίων από υλικά "A" και "B" που προσβάλλονται για τους σκοπούς βιομηχανικής ραδιογραφίας από φωτόνια διαφορετικών ενεργειών συνεχούς φάσματος παραγόμενα από μία μηχανή παραγωγής ακτίνων -x. Σε αυτήν την περίπτωση για το δοκίμιο υλικού "A" πάχους x_A , η δέσμη I_A που το διαπερνά υπολογίζεται ως:

$$I_A = \int_0^{E_{max}} I_0(E) e^{-\mu_A(E)x_A} dE \quad (3.17)$$

όπου

E_{max} η μέγιστη δυνατή ενέργεια φωτονίων της δέσμης ακτίνων -x (δηλ. στην ουσία η υψηλή τάση που λειτουργεί η μηχανή παραγωγής ακτίνων -x επί το φορτίο ενός ηλεκτρονίου), και

$I_0(E)$ το πλήθος φωτονίων ενέργειας E που προσβάλλει το δοκίμιο.

Μπορεί να γίνει δεκτό ότι η (3.17) είναι δυνατόν να γραφτεί ισοδύναμα με τον ακόλουθο λογιστικό τρόπο:

$$I_A = I_0 \cdot e^{-\mu_{effA} \cdot x_A} \quad (3.18)$$

όπου

$$I_0 = \int_0^{E_{max}} I_0(E) dE \quad (3.19)$$

και

μ_{eff} ένας ισοδύναμος γραμμικός συντελεστής εξασθένησης με κατάλληλη τιμή ώστε η (3.18) να υπολογίζει την ίδια I_A με την (3.17).

Είναι προφανές ότι ο μ_{eff} είναι δυνατόν να υπολογίζεται με τη βοήθεια των (3.17), (3.18) και (3.19) από την εξίσωση:

$$\mu_{effA} = -\frac{1}{x_A} \cdot \ln \left[\frac{\int_0^{E_{max}} I_0(E) e^{-\mu_A(E)x_A} dE}{\int_0^{E_{max}} I_0(E) dE} \right] \quad (3.20)$$

Η (3.20), κατ' αναλογία με την (3.10), δείχνει ότι γενικά ο μ_{eff} εξαρτάται από το πάχος του δοκιμίου, και επομένως και η εξασθένηση γενικότερα, πράγμα που και πάλι εμποδίζει τον υπολογισμό ενός πάχους x_A για σταθερό μ_{effA} και τελικά τον υπολογισμό ενός ΡΣΙ με άμεσο τρόπο.

Ομοίως με την (3.17) μπορεί να γραφτεί για το δοκίμιο από υλικό "B" πάχους x_B ότι:

$$I_B = \int_0^{E_{max}} I_0(E) e^{-\mu_B(E)x_B} dE \quad (3.21)$$

Για να είναι ισοδύναμα τα πάχη των δύο δοκιμίων θα πρέπει προφανώς:

$$\int_0^{E_{max}} I_0(E) e^{-\mu_A(E)x_A} dE = \int_0^{E_{max}} I_0(E) e^{-\mu_B(E)x_B} dE \quad (3.22)$$

ή ισοδύναμα:

$$I_0 \cdot e^{-\mu_{effA} \cdot x_A} = \int_0^{E_{max}} I_0(E) e^{-\mu_B(E)x_B} dE \quad (3.23)$$

Η (3.23) ικανοποιείται πάντοτε μόνο όταν υπολογισθούν το πάχος x_{Amax} για το οποίο ο μ_{effA} δεν εξαρτάται πρακτικά από το πάχος, παραμένει δηλαδή σταθερός.

Μπορεί να θεωρηθεί ότι αυτό συμβαίνει όταν το πάχος x_A είναι αρκετά μεγάλο ώστε η (3.20) να μην εξαρτάται πλέον από την ποσότητα:

$$\frac{\int_0^{E_{max}} I_0(E) e^{-\mu_A(E)x_A} dE}{\int_0^{E_{max}} I_0(E) dE}$$

Για το σκοπό αυτό μπορούν να δοκιμασθούν τρία κριτήρια:

1^ο κριτήριο όταν:

$$x_{Amax} \rightarrow \infty \text{ οπότε } \frac{\Delta \left(\int_0^{E_{max}} I_0(E) e^{-\mu_A(E)x_{Amax}} dE \right)}{\Delta x} \rightarrow 0 \quad (3.24\alpha)$$

Το κριτήριο αυτό ικανοποιείται όταν η παράγωγος (3.24α) πάρει τιμή πολύ κοντά στο μηδέν δηλαδή όταν η καμπύλη του Διαγράμματος 3.1 γίνει οριζόντια. Το κριτήριο αυτό μπορεί να οδηγήσει σε πολύ μεγάλες τιμές του x_{Amax} , οι οποίες να μην έχουν νόημα στην πράξη και το κυριότερο να μην μπορούν να επαληθευθούν από οποιοδήποτε πείραμα.

2^ο κριτήριο όταν:

x_{Amax} τέτοιο ώστε:

$$\frac{\int_0^{E_{max}} I_0(E) e^{-\mu_A(E)x_{Amax}} dE - \int_0^{E_{max}} I_0(E) e^{-\mu_A(E)(x_{Amax} + \Delta x)} dE}{\int_0^{E_{max}} I_0(E) e^{-\mu_A(E)x_{Amax}} dE} \rightarrow \delta \quad (3.24\beta)$$

Το κριτήριο (3.24β) ικανοποιείται όταν η κλίση της καμπύλης του Διαγράμματος 3.1 αρχίζει να γίνεται οριζόντια. Το σημείο που ορίζεται η αρχή της οριζοντίωσης καθορίζεται προφανώς από την τιμή του δ . Επειδή η καμπύλη θα είναι τόσο πιο "οριζόντια" όσο το δ είναι κοντύτερα στο μηδέν, το κριτήριο αυτό ομοίως μπορεί να οδηγήσει σε πολύ μεγάλες τιμές του x_{Amax} , οι οποίες να μην έχουν νόημα στην πράξη και το κυριότερο να μην μπορούν να επαληθευθούν από οποιοδήποτε πείραμα.

3^ο κριτήριο όταν:

$$x_{Amax} \text{ τέτοιο ώστε: } x_{Amax} \geq \varepsilon \frac{\ln 2}{\mu_{effA}} \quad (3.24\gamma)$$

Το κριτήριο (3.24γ) ικανοποιείται όταν το x_{Amax} (ισοδύναμα το ε) γίνει αρκετά μεγάλο ώστε να έχει πρακτικά εξασθενίσει το σύνολο της προσπίπτουσας πρωτεύουσας δέσμης αλλά όχι τόσο μεγάλο, ώστε η απομένουσα πρωτεύουσα δέσμη να γίνει ελάχιστη. Αυτό επιτυγχάνεται όταν το ε πάρει τιμή στην γειτονιά ~ 4 . Αν το x_{Amax} γίνει πολύ μεγαλύτερο από το κριτήριο (3.24γ) με $\varepsilon \approx 4$, η απομένουσα πρωτεύουσα δέσμη γίνεται ελάχιστη σε τιμές που δεν συναντώνται στην πράξη και δεν μπορούν επίσης

να επαληθευθούν πειραματικά, εφόσον δέσμες μικρής έντασης δεν δημιουργούν εικόνα στα ραδιογραφικά φιλμ. Υπενθυμίζεται ότι η απομένουσα πρωτεύουσα δέσμη γίνεται ελάχιστη κατά αυτή την έννοια όταν:

$$x_{A\max} \geq (5 \div 7) \frac{\ln 2}{\mu_{\text{eff}A}}$$

εφόσον το φαινόμενο εξασθένισης των φωτονίων στην ύλη ακολουθεί τον εκθετικό νόμο απομείωσης.

Επομένως κρίνεται ότι όταν ικανοποιείται το κριτήριο (3.24γ) τότε μπορεί να υπολογίζεται ο ζητούμενος ΡΣΙ πολυενεργειακής δέσμης φωτονίων ως:

$$P\Sigma I = \frac{x_{A\max}}{x_B} \quad (3.25)$$

όπου το x_B υπολογίζεται από την επίλυση της εξίσωσης:

$$I_B = I_A = \int_0^{E_{\max}} I_0(E) e^{-\mu_B(E)x_B} dE \quad (3.26)$$

Τόσο οι $\mu_A(E)$ όσο και οι $\mu_B(E)$ θεωρούνται γνωστοί και λαμβάνονται από κατάλληλες βάσεις δεδομένων, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια.

Ομοίως η ποσότητα $I_0(E)$ θεωρείται γνωστή και στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας λαμβάνεται από μοντέλα προσομοίωσης μηχανών παραγωγής ακτίνων -x, όπως επίσης θα αναλυθεί στη συνέχεια.

3.4 Φωτόνια διακριτών ενεργειών από ισοτοπικές πηγές

3.4.1 Γενικά

Αν είναι I_0 η συνολική ένταση της δέσμης φωτονίων διακριτών ενεργειών που προκύπτουν από μία ισοτοπική πηγή θα ισχύει:

$$I_0 = \sum_{i=1}^n I_{0i} \quad (3.27)$$

Αν οι εντάσεις I_{0i} υπολογισθούν ως ποσοστά π_i της I_0 , η (3.27) μπορεί να γράφεται ως:

$$I_0 = \sum_{i=1}^n \pi_i I_{0i} \quad (3.28)$$

ή ισοδύναμα:

$$\pi_i = \frac{I_{0i}}{I_0} \quad (3.29)$$

Σύμφωνα με την (3.13):

$$e^{-\mu_{effA} \cdot x_{A \max}} = e^{-\mu_{effB} \cdot x_B} \quad (3.30)$$

ή ισοδύναμα:

$$-\mu_{effA} \cdot x_{A \max} = -\mu_{effB} \cdot x_B \quad (3.31)$$

ή

$$P\Sigma I = \frac{x_{A \max}}{x_B} = \frac{\mu_{effB}}{\mu_{effA}} \quad (3.32)$$

Σύμφωνα τώρα με την (3.10):

$$\mu_{effA} = -\frac{1}{x_{A \max}} \cdot \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^n I_{0i} \cdot e^{-\mu_{Ai} \cdot x_{A \max}}}{I_0} \right) \quad (3.33)$$

ο οποίος μπορεί να γράφεται ισοδύναμα:

$$\mu_{effA} = -\frac{1}{x_{A \max}} \cdot \ln \left(\sum_{i=1}^n \pi_i \cdot e^{-\mu_{Ai} \cdot x_{A \max}} \right) \quad (3.34)$$

Σύμφωνα ομοίως με την (3.10):

$$\mu_{effB} = -\frac{1}{x_B} \cdot \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^n I_{0i} \cdot e^{-\mu_{Bi} \cdot x_B}}{I_0} \right) \quad (3.35)$$

ο οποίος μπορεί να γράφεται ισοδύναμα:

$$\mu_{effB} = -\frac{1}{x_B} \cdot \ln \left(\sum_{i=1}^n \pi_i \cdot e^{-\mu_{Bi} \cdot x_B} \right) \quad (3.36)$$

Διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

- Στην ιδανική περίπτωση που ο ασταθής πυρήνας διασπάται και από τη διάσπαση προκύπτει διεγερμένος πυρήνας ο οποίος αποδιεγείρεται άμεσα μόνο με εκπομπή φωτονίων και τα ποσοστά εκπομπής των φωτονίων του αποδιεγειρόμενου πυρήνα αθροίζουν στο 100%, τα ζητούμενα ποσοστά π_i ταυτίζονται με τα ποσοστά εκπομπής φωτονίων του αποδιεγειρόμενου πυρήνα, τα οποία βέβαια μπορούν να δίνονται από ειδικές βιβλιοθήκες, όπως π.χ. η IAEA (2014). Εννοείται ότι σε αυτή την περίπτωση καθ' όλη τη διαδικασία διάσπασης και αποδιέγερσης δεν παράγονται άλλα φωτόνια από καμία άλλη αιτία (π.χ. φωτόνια -x). Αυτή η ιδανική περίπτωση είναι εξαιρετικά σπάνια.
- Στην άλλη περίπτωση που ο ασταθής πυρήνας διασπάται και από τη διάσπαση προκύπτει διεγερμένος πυρήνας ο οποίος αποδιεγείρεται άμεσα και καθ' όλη τη διαδικασία διάσπασης και αποδιέγερσης παράγονται και άλλα φωτόνια και από άλλες αιτίες (π.χ. φωτόνια -x). Αυτή η περίπτωση είναι η πλέον συνήθης. Μάλιστα για λόγους που εξηγούνται στην Πυρηνική Φυσική συνήθως τα ποσοστά εκπομπής των φωτονίων του αποδιεγειρόμενου πυρήνα δεν αθροίζουν στο 100%, μπορεί να αθροίζουν λιγότερο ή περισσότερο. Σε αυτή την περίπτωση, είναι φανερό ότι τα ζητούμενα ποσοστά π_i πρέπει να υπολογίζονται αφού ληφθούν υπόψη όλα τα φωτόνια που εκπέμπονται από όλες τις διεργασίες διάσπασης και αποδιέγερσης.

Γεννάται επομένως το ερώτημα πως θα υπολογισθούν τα ποσοστά π_i .

Δεδομένου ότι -με αλφαβητική σειρά- οι ασταθείς πυρήνες που χρησιμοποιούνται συνήθως ως πηγές φωτονίων για τις ανάγκες της βιομηχανικής ραδιογραφίας είναι οι:

Co-60, Cs-137, Ir-192, Ra-226 και Se-75

διαμορφώνεται με τη βοήθεια του IAEA (2014) ο Πίνακας 3.1 που παρουσιάζει τις ενέργειες των εκπεμπόμενων φωτονίων και τα αντίστοιχα ποσοστά εκπομπής για κάθε ένα από αυτά τα ισότοπα. Σημειώνεται ότι σε ό,τι αφορά το ισότοπο Ra-226, αυτό πρέπει να θεωρείται σε ισορροπία με τα θυγατρικά του που εκπέμπουν φωτόνια, δηλ. τα Pb-214 και Bi-214.

Είναι φανερό ότι ο Πίνακας 3.1 δεν παρέχει άλλες πληροφορίες σχετικά με άλλα φωτόνια από τις διασπάσεις αυτών των ασταθών πυρήνων, οι οποίες θα βοηθούσαν για τον κατάλληλο υπολογισμό των ποσοστών π_i .

Στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας διατίθεται με άδεια χρήσης το παραθυρικό λογισμικό *MicroShield v7.02* (32bit), το οποίο παρέχει τη δυνατότητα για το κατάλληλο υπολογισμό των ποσοστών π_i για κάθε ένα από τους υπόψη ασταθείς πυρήνες.

Η διαδικασία με το λογισμικό αυτό έχει ως εξής:

Τρέξιμο εκτελέσιμου Ms7.exe >

Geometry "point" >

Tab Source >

Tab Nuclides >

Αν πρόκειται για πηγή μοναδικού ισότοπου Xx-abc:

Επιλέγεται Xx-abc (double click, κοκκινίζει) & OK >

Η θέση becquerels πληρώνεται με την εικονική τιμή "1" & click στον άδειο χώρο >

και τέλος

Tab Group Photons

που αποδίδει τα ζητούμενα ποσοστά είτε βάσει των ενεργειών των διακριτών φωτονίων αν τα διακριτά φωτόνια είναι λιγότερα από 25 ή είτε βάσει συγκεκριμένων και σταθμισμένων ενεργειακών ομάδων αν τα διακριτά φωτόνια είναι περισσότερα από 25.

Ειδικά για την περίπτωση του Ra-226:

Επιλέγεται Ra-226 (double click, κοκκινίζει) >

Επιλέγεται Pb-214 (double click, κοκκινίζει) >

Επιλέγεται Bi-214 (double click, κοκκινίζει) >

OK >

Η θέση becquerels του Ra-226 πληρώνεται με την εικονική τιμή "1" >

Η θέση becquerels του Pb-214 πληρώνεται με την ίδια τιμή "I" (σε ισορροπία με το Ra-226) >

Η θέση becquerels του Bi-214 πληρώνεται με την ίδια τιμή "I" (σε ισορροπία με το Ra-226) >

click στον άδειο χώρο >

και τέλος

Tab Group Photons

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών με το *MicroShield v7.02* παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2. Παρατηρείται ότι είναι δυνατόν το άθροισμα των ποσοστών π_i του συνόλου των φωτονίων που μπορεί να δώσει μία ισοτοπική πηγή, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.2, να είναι λιγότερο από 100%, για πρακτικούς λόγους όταν δηλαδή αγνοούνται φωτόνια μικρού ποσοστού, ως μη συμβάλλοντα στο ραδιογραφικό αποτέλεσμα. Σε αυτήν την Διπλωματική Εργασία το όριο του ποσοστού αυτού κάτω από το οποίο τα φωτόνια αγνοούνται ορίστηκε σε 3%. Είναι φανερό ότι ένας ΡΣΙ υπολογιζόμενος με χρήση των (3.31), (3.32) και (3.35) μπορεί να υπολογίζεται ακόμα και αν τα ποσοστά π_i αθροίζουν και λιγότερο από 100%. Για κάθε ένα από τα ισότοπα του Πίνακα 3.2 δημιουργείται αρχείο κειμένου, που περιέχει τις πληροφορίες του Πίνακα, στο οποίο η πρώτη στήλη είναι οι ενέργειες σε keV και η δεύτερη στήλη οι αναλογίες τους.

3.5 Φάσματα φωτονίων από μηχανές παραγωγής ακτίνων -x

3.5.1 Γενικά

Όπως είναι γνωστό, οι μηχανές παραγωγής ακτίνων -x δεν εκπέμπουν μονοενεργειακή δέσμη φωτονίων αλλά φωτόνια με συνεχές φάσμα ενεργειών με διαφορετικό ποσοστό για κάθε ενέργεια. Αν είναι I_0 η συνολική ένταση της δέσμης φωτονίων διαφόρων ενεργειών που προκύπτουν από μία μηχανή παραγωγής ακτίνων -x θα ισχύει:

$$I_0 = \int_0^{E_{\max}} I_0(E) dE \quad (3.37)$$

Αν οι εντάσεις $I_0(E)$ υπολογισθούν ως ποσοστά $\pi(E)$ της I_0 , η (3.37) μπορεί να γράφεται ως:

$$I_0 = \int_0^{E_{\max}} \pi(E) I_0 dE \quad (3.38)$$

ή ισοδύναμα:

$$\pi(E) = \frac{I_0(E)}{\int_0^{E_{\max}} I_0(E) dE} \quad (3.39)$$

ή αν δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία για την ενέργεια E και είναι ΔE αρκετά μικρό:

$$\pi(E) = \frac{\int_{E-\Delta E/2}^{E+\Delta E/2} I_0(E) dE}{\int_0^{E_{\max}} I_0(E) dE} \quad (3.40)$$

Η (3.39) δεν μπορεί να εφαρμοσθεί στην πράξη διότι αν είναι ακριβώς γνωστή η $I_0(E)$ σε ένα φάσμα που περιέχει εκατοντάδες ή χιλιάδες άλλα φωτόνια διαφορετικών ενεργειών, τότε το $\pi(E)$ θα είναι πρακτικά πολύ μικρό και ίσως μη σημαντικά διάφορο από το μηδέν. Επομένως στην ουσία πρέπει πάντοτε να εφαρμόζεται η (3.40). Μάλιστα, ο αριθμητής της (3.40) μπορεί να προσεγγίζεται από ένα άθροισμα εντάσεων δεσμών φωτονίων διακριτών ενεργειών E' , οι οποίες βρίσκονται μέσα σε ένα διάστημα ενεργειών από E έως $E + \Delta E$, τέτοιο ώστε εφόσον το ΔE είναι αρκετά μικρό, να είναι δυνατό να γράφεται:

$$\pi(E) = \frac{\sum_{\Delta E} I_0(E')}{\int_0^{E_{\max}} I_0(E) dE} \quad (3.41)$$

Επομένως αν για κάποια μηχανή παραγωγής ακτίνων -x είναι γνωστή η I_0 , τότε οι $I_0(E)$ μπορούν να υπολογίζονται αν είναι γνωστά τα ποσοστά $\pi(E)$.

Σύμφωνα με την (3.23):

$$e^{-\mu_{\text{eff}A} \cdot x_{A \max}} = e^{-\mu_{\text{eff}B} \cdot x_B} \quad (3.42)$$

ή ισοδύναμα:

$$-\mu_{\text{eff}A} \cdot x_{A \max} = -\mu_{\text{eff}B} \cdot x_B \quad (3.43)$$

ή

$$P\Sigma I = \frac{x_{A\max}}{x_B} = \frac{\mu_{effB}}{\mu_{effA}} \quad (3.44)$$

Σύμφωνα τώρα με την (3.20):

$$\mu_{effA} = -\frac{1}{x_{A\max}} \cdot \ln \left[\frac{\int_0^{E_{\max}} I_0(E) e^{-\mu_A(E)x_A} dE}{I_0} \right] \quad (3.45)$$

ο οποίος μπορεί να γράφεται ισοδύναμα:

$$\mu_{effA} = -\frac{1}{x_{A\max}} \cdot \ln \int_0^{E_{\max}} \pi(E) \cdot e^{-\mu_A(E) \cdot x_{A\max}} dE \quad (3.46)$$

Σύμφωνα ομοίως με την (3.20):

$$\mu_{effB} = -\frac{1}{x_B} \cdot \ln \left[\frac{\int_0^{E_{\max}} I_0(E) e^{-\mu_B(E)x_B} dE}{I_0} \right] \quad (3.47)$$

ο οποίος μπορεί να γράφεται ισοδύναμα:

$$\mu_{effB} = -\frac{1}{x_B} \cdot \ln \int_0^{E_{\max}} \pi(E) \cdot e^{-\mu_B(E) \cdot x_B} dE \quad (3.48)$$

Διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

- Στην ιδανική περίπτωση που δίνεται το φάσμα φωτονίων μιας μηχανής παραγωγής ακτίνων -x για διάφορα kV (όπως π.χ. αυτό στο Διάγραμμα 3.2 που δίδεται ως παράδειγμα από την General Electric, 2007) με αρκετή λεπτομέρεια, τότε τα ζητούμενα $\pi(E)$ μπορούν να υπολογίζονται εύκολα.
- Στην περίπτωση της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας τέτοια φάσματα με υψηλή ανάλυση δεν διατίθενται διότι δεν είναι εύκολο να βρεθούν από τους κατασκευαστές μηχανών παραγωγής ακτίνων -x. Στη θέση τους χρησιμοποιήθηκε η ελεύθερη έκδοση του λογισμικού *SpekCalc v1.0*, (SpekCalc, 2014, Poludniowski 2007a, 2007b, 2009) που αναπαράγει με προσομοίωση αλληλεπιδράσεων πέδησης ηλεκτρονίων τέτοια τυπικά φάσματα σε γραφική μορφή και σε μορφή δεδομένων ASCII και του οποίου η λειτουργία περιγράφεται

συνοπτικά στην επόμενη παράγραφο. Ως εναλλακτική επιλογή για την αναπαραγωγή τυπικών φασμάτων μηχανών παραγωγής ακτίνων -x με προσομοίωση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθούν τα java applets που βρίσκονται στο διαδίκτυο (βλ. και NDT 2014). Αυτά τα java applets υστερούν πολύ σε σχέση με το *SpekCalc v1.0* διότι τα φάσματα αναπαράγονται μόνο σε γραφική μορφή.

3.5.2 Φάσματα φωτονίων -x με τη χρήση του *SpekCalc*

Το λογισμικό *SpekCalc v1.0* προσομοιώνει φάσματα φωτονίων -x για μηχανές παραγωγής ακτίνων -x με άνοδο βολφραμίου (δεν έχει άλλες επιλογές). Αποτελείται στην ουσία από ένα εκτελέσιμο που δεν χρειάζεται εγκατάσταση, μία βιβλιοθήκη ".dll", τρεις βιβλιοθήκες δεδομένων και ένα εγχειρίδιο χρήσης μίας σελίδας. Το λογισμικό αυτό δεν είναι πλέον ελεύθερα διαθέσιμο στο διαδίκτυο, διότι έχει κυκλοφορήσει νεότερη εμπορική έκδοση (*SpekCalc*, 2014). Η έκδοση v1.0 που χρησιμοποιείται στην παρούσα Διπλωματική βρίσκεται στο ηλεκτρονικό αρχείο της Διπλωματικής Εργασίας. Επισημαίνεται, τέλος, ότι το *Spekcalc v1.0* προορίζεται για χρήση μόνο σε Αγγλικό (US English) λειτουργικό σύστημα MS Windows® ή Mac OSX. Το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού *SpekCalc v1.0* φαίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 3.3. Το λογισμικό χρησιμοποιήθηκε κυρίως με τις εξ' ορισμού ρυθμίσεις του, κατάλογος και τιμές των οποίων στη σειρά που εμφανίζονται στο γραφικό περιβάλλον από πάνω προς τα κάτω, δίνονται στους Πίνακες 3.3α και 3.3β. Για δύο από τις ρυθμιζόμενες παραμέτρους επιλέχθηκαν ρυθμίσεις ως εξής:

- για την παράμετρο $T0$, δεδομένου ότι οι πίνακες ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας που συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία δίνονται συνήθως για μηχανές παραγωγής ακτίνων -x από 50kV έως 400kV, επιλέχθηκαν οι τιμές 50, 100, 150, 200, 250 και 300 keV, ώστε να καλύπτεται με τα αντίστοιχα παραγόμενα φάσματα και με καλή πυκνότητα η περιοχή μέγιστων ενεργειών -x από 50 έως 400 keV, και
- για την παράμετρο Dhv , το ενεργειακό δηλαδή βήμα υπολογισμού του φάσματος δέσμης -x, επιλέχθηκε το ελάχιστο επιτρεπόμενο 0.05 keV. Η επιλογή της ελάχιστης τιμής έγινε διότι ήταν επιδίωξη τα παραγόμενα προσομοιωμένα φάσματα -x, να έχουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ανάλυση. Παρόλα αυτά, σχολιάζεται ως αδυναμία του *SpekCalc v1.0* ότι, επειδή η παράμετρος Dhv είναι απόλυτη και όχι σχετική, η ανάλυση του φάσματος με $T0 = 50$ keV γίνεται σε

1000 βήματα ή 0.1%, ενώ στο άλλο άκρο η ανάλυση του φάσματος με $T0 = 300 \text{ keV}$ γίνεται σε 6000 βήματα ή ~0.02%.

Η τιμή της παραμέτρου $h\nu_{Min}$ δεν μπορεί να ρυθμισθεί χαμηλότερα από $0.1 \times T0$. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι από τα φάσματα ακτίνων -x που προσομοιώνονται με αυτό το λογισμικό λείπουν στοιχεία για τα χαμηλής ενέργειας φωτόνια. Δηλαδή από το φάσμα των 50kV λείπουν τα φωτόνια έως 5keV, από το φάσμα των 100kV λείπουν τα φωτόνια έως 10keV κ.ο.κ.

Αφού ρυθμισθούν όλες οι παράμετροι, το *SpekCalc v1.0* προσομοιώνει ένα ζητούμενο φάσμα με την επιλογή *Calculate*. Το φάσμα προκύπτει γραφικά, όπως διακρίνεται ήδη στο Διάγραμμα 3.3. Ένα φάσμα μπορεί να ληφθεί και ως ASCII αρχείο, αν μετά τον υπολογισμό και τη γραφική έξοδο του αποτελέσματος χρησιμοποιηθεί η επιλογή *View Data*. Σε αυτή την περίπτωση ανοίγει παράθυρο κειμένου ASCII, το οποίο μπορεί να αποθηκευθεί σε αρχείο κειμένου (.txt) αν ο χρήστης παραλάβει το περιεχόμενο του παραθύρου και το εισάγει σε αρχείο κειμένου με την διαδικασία "αντιγραφή > επικόλληση". Παράδειγμα με απόσπασμα τέτοιου αρχείου κειμένου δίνεται στον Πίνακα 3.4 για $T0 = 200 \text{ keV}$. Τα αποτελέσματα αποδίδονται σε δύο στήλες: αριστερά η ενέργεια των φωτονίων -x σε keV και δεξιά η αντίστοιχη ένταση δέσμης φωτονίων σε φωτόνια ανά ($\text{keV cm}^2 \text{ mAs}$). Τα παραγόμενα αρχεία για κάθε $T0$ που έχει επιλεγεί είναι προφανώς εκείνα που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των $\pi(E)$ που χρειάζονται για την παρούσα Διπλωματική Εργασία. Εννοείται ότι οι 18 πρώτες γραμμές σχολίων είναι άχρηστες για το σκοπό αυτό και δεν χρησιμοποιούνται. Στα Διαγράμματα 3.4 έως και 3.9 δίνονται τα γραφικά αποτελέσματα του *SpekCalc v1.0* για μέγιστες ενέργειες φωτονίων -x 50, 100, 150, 200, 250 και 300 keV (και ελάχιστες ενέργειες φωτονίων -x, σύμφωνα με τον περιορισμό της ρύθμισης $h\nu_{Min}$, 5, 10, 15, 20, 25 και 30 keV) αντίστοιχα. Τα γραφικά αποτελέσματα στα Διαγράμματα αυτά δίνονται σε μεγέθυνση, για να φαίνεται καλύτερα το φάσμα των ακτίνων -x. Σε αυτές τις μεγεθύνσεις δεν διακρίνονται φυσικά οι χαρακτηριστικές -x στο μέγιστο ύψος τους.

3.6 Δεδομένα γραμμικών συντελεστών εξασθένησης

3.6.1 Γενικά

Είναι φανερό από τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν στην § 3.4 ότι για τον υπολογισμό ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας απαιτούνται δεδομένα για τους γραμμικούς

συντελεστές εξασθένησης φωτονίων σε συνάρτηση με την ενέργεια των φωτονίων. Τα δεδομένα αυτά πρέπει να διατίθενται για τα στοιχεία που ενδιαφέρουν τις μηχανολογικές κατασκευές (π.χ. τα περισσότερα μέταλλα), τις κατασκευές πολιτικού μηχανικού (π.χ. μέταλλα, αλκαλικές γαίες κλπ), τις ιατρικές εφαρμογές, τις εφαρμογές θωρακίσεων, τις κατασκευές ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και βεβαίως τις κατασκευές βιομηχανικών προϊόντων από οργανικές ενώσεις ή σύνθετα υλικά. Μια πλήρης ως προς αυτά τα χαρακτηριστικά συλλογή από αυτά τα στοιχεία είναι (σε παρένθεση ο ατομικός αριθμός):

Υδρογόνο(1), Λίθιο(3), Βηρύλλιο(4), Βόριο(5), Άνθρακας(6), Άζωτο(7), Οξυγόνο(8), Νάτριο(11), Μαγνήσιο(12), Αλουμίνιο(13), Πυρίτιο(14), Φώσφορος(15), Θείο(16), Κάλιο(19), Ασβέστιο(20), Σκάνδιο(21), Τιτάνιο(22), Βανάδιο(23), Χρώμιο(24), Μαγγάνιο(25), Σίδηρος(26), Κοβάλτιο(27), Νικέλιο(28), Χαλκός(29), Ψευδάργυρος(30), Γάλλιο(31), Γερμάνιο(32), Αρσενικό(33), Ρουβίδιο(37), Στρόντιο(38), Ύτριο(39), Ζιρκόνιο(40), Νιόβιο(41), Μολυβδένιο(42), Τεχνητίο(43), Ρουθίνιο(44), Ρόδιο(45), Παλλάδιο(46), Άργυρος(47), Κάδμιο(48), Ίνδιο(49), Κασσίτερος(50), Αντιμόνιο(51), Τελλούριο(52), Καίσιο(55), Βάριο(56), Βολφράμιο(74), Όσμιο(76), Ιρίδιο(77), Λευκόχρυσος(78), Χρυσός(79), Υδράργυρος(80), Θάλλιο(81), Μόλυβδος(82), Βισμούθιο(83), Πολώνιο(84), Ράδιο(88), και Ουράνιο(92).

Το σύνολο των παραπάνω στοιχείων είναι 58, και σε αυτά μπορούν να προστεθούν η χημική ένωση του νερού και το μίγμα του ατμοσφαιρικού αέρα. Τα δεδομένα για τους γραμμικούς συντελεστές εξασθένησης $\mu(E)$ (συνήθως σε cm^{-1}) των παραπάνω στοιχείων ή ενώσεων μπορούν να αναζητούνται στην ιστοσελίδα του NIST (National Institute of Standards and Technology των ΗΠΑ, βλ. και NIST, 2014a), η οποία δίνει λίστες τιμών των μαζικών συντελεστών εξασθένησης για κάθε στοιχείο του περιοδικού πίνακα σε λίγες αντιπροσωπευτικές ενέργειες φωτονίων και λεπτομερείς γραφικές παραστάσεις των μαζικών συντελεστών εξασθένησης (σε cm^2g^{-1}) για κάθε στοιχείο και επομένως και για κάθε ένα από τα παραπάνω στοιχεία που ενδιαφέρουν σε αυτή τη Διπλωματική Εργασία καθώς για τον αέρα και το νερό αλλά και για ένα μικρό πλήθος χημικών ενώσεων και μιγμάτων. Οι τιμές στις λίστες και τις γραφικές παραστάσεις προκύπτουν μέσω του λογισμικού *XCOM (v1.5/2010 on-line)*, το οποίο έχει αναπτυχθεί στο NIST και για το οποίο θα δοθούν περισσότερες λεπτομέρειες στην συνέχεια. Τα αποτελέσματα στις λίστες μπορούν να καταφορτωθούν εύκολα με

τη διαδικασία "αντιγραφή και επικόλληση". Οι γραφικές αυτές παραστάσεις για τα υλικά που ενδιαφέρουν εδώ, μπορούν εύκολα να μεταφερθούν ως εικόνες στον τοπικό υπολογιστή στην οθόνη του οποίου εμφανίζονται με τη γνωστή διαδικασία "print screen" και επικόλληση σε γραφικό περιβάλλον εργασίας λογισμικού επεξεργασίας εικόνας, πράγμα το οποίο έγινε για όλα τα αναφερόμενα υλικά. Αφού κοπούν με τη διαδικασία "crop" οι περιττές επιφάνειες της εικόνας εκτός από το πλαίσιο της γραφικής παράστασης, η ανάλυση της παραλαμβανόμενης εικόνας προκύπτει μόλις 670x523 pixel (~12kB). Οι εικόνες αυτές στη συνέχεια αποθηκεύονται σε αρχείο σε ένα από τα συνήθη format. Στην εδώ περίπτωση προτιμήθηκε το format JPG, ως το πλέον συνηθισμένο. Παραδείγματα από τέτοιες γραφικές παραστάσεις όπως παραλήφθηκαν ως εικόνες δίνονται στα Διαγράμματα 3.10 και 3.11 για αέρα και νερό αντίστοιχα. Από τους μαζικούς συντελεστές υπολογίζονται οι ζητούμενοι γραμμικοί συντελεστές εξασθένησης από τη σχέση:

$$[\text{γραμμικός συντελεστής}] = [\text{μαζικός συντελεστής}] \times [\text{πυκνότητα}]$$

όπου φυσικά η πυκνότητα είναι σε gcm^{-3}

Είναι προφανές ότι το NIST δίνει τους μαζικούς και όχι τους γραμμικούς συντελεστές εξασθένησης διότι οι πρώτοι είναι ανεξάρτητοι από την κατάσταση του στοιχείου, δηλαδή από το αν είναι σε στερεή, υγρή ή αέρια φάση.

3.6.2 Εξαγωγή δεδομένων μέσω ψηφιοποίησης

Η πληροφορία για τους μαζικούς συντελεστές εξασθένησης μπορεί να παραλαμβάνεται από τις αποθηκευμένες εικόνες των γραφικών παραστάσεων του NIST με κατάλληλη ψηφιοποίησή τους. Προκειμένου να επιτευχθεί η εξαγωγή από την ψηφιοποίηση όσο το δυνατόν περισσότερων δεδομένων από τις εικόνες αυτές, κρίθηκε απαραίτητη η μετατροπή τους σε υψηλή ανάλυση (2560x1600 ή στην περιοχή των ~330kB). Αυτό επιτεύχθηκε με τη βοήθεια του ελεύθερου λογισμικού επεξεργασίας εικόνας *Irfanview v4.33* (βλ. και *Irfanview2014*), ανοίγοντας το προς επεξεργασία αρχείο εικόνας και χρησιμοποιώντας τη διαδικασία:

Image > Resize/Resample > New Size (pull down menu) > 2560x1600 > OK

Η ψηφιοποίηση των εικόνων υψηλής ανάλυσης των γραφικών παραστάσεων πραγματοποιήθηκε με χρήση του ελεύθερου λογισμικού ψηφιοποίησης ανοιχτού κώδικα *Engauge v4.1* (βλ. και *Engauge 2014*). Σημειώνεται ότι επειδή η ανάπτυξη και η υποστήριξη του λογισμικού αυτού φαίνεται ότι σήμερα (2014) έχει σταματήσει,

εκδόσεις νεότερες από την 4.1 είναι ασταθείς και παρουσιάζουν μεγάλα προβλήματα. Το λογισμικό *Engauge v4.1* αποτελείται στην ουσία από ένα εκτελέσιμο που δεν χρειάζεται εγκατάσταση, μία βιβλιοθήκη ".dll", ένα φάκελο με εγχειρίδιο χρήσης υπερ-κείμενο (html) και ένα φάκελο με παραδείγματα. Η έκδοση v4.1 που χρησιμοποιείται στην παρούσα Διπλωματική βρίσκεται στο ηλεκτρονικό αρχείο της Διπλωματικής Εργασίας.

Το *Engauge v4.1* μεταξύ άλλων δυνατοτήτων, μπορεί να μετατρέψει μία γραφική παράσταση σε κανονικούς άξονες η οποία περιέχεται σε αρχείο εικόνας, σε πίνακα αριθμητικών δεδομένων (x,y), στην ουσία δηλαδή συντεταγμένων. Το αρχείο εικόνας μπορεί να προέρχεται από σάρωση κάποιου εγγράφου, από ψηφιακή φωτογραφική μηχανή ή, όπως στην περίπτωση που εξετάζεται εδώ, από screenshot εικόνας σε Η/Υ. Βασικό χαρακτηριστικό του *Engauge v4.1* είναι ότι σε αντίθεση με άλλα ελεύθερα ή εμπορικά λογισμικά ψηφιοποίησης μπορεί να ανιχνεύσει αυτόματα την καμπύλη ενός διαγράμματος και να εξάγει από αυτήν σημεία με δυνατότητα ρύθμισης της πυκνότητάς τους. Στα περισσότερα από τα άλλα λογισμικά η διαδικασία ψηφιοποίησης γίνεται σημείο προς σημείο με το χέρι.

Το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού διακρίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 3.12. Το αρχείο εικόνας εισάγεται στο γραφικό περιβάλλον σε αποδεκτά format εικόνας, που είναι τα BMP, GIF, JPG, PNG και XPM, ακολουθώντας τη διαδρομή *File > Import*. Στη συνέχεια ελέγχεται από τον χρήστη αν οι άξονες συντεταγμένων της γραφικής παράστασης είναι καρτεσιανοί, ή πολικοί και αν η κλίμακά τους είναι γραμμική η λογαριθμική. Το *Engauge v4.1* λαμβάνει αυτή την πληροφορία μέσω της διαδρομής *Settings > Coordinates*, με την οποία ανοίγεται παράθυρο διαλόγου που επιτρέπει αυτές τις ρυθμίσεις. Είναι προφανές ότι οι γραφικές παραστάσεις για τους μαζικούς συντελεστές εξασθένησης φωτονίων σε συνάρτηση με την ενέργεια έχουν καρτεσιανούς άξονες "x" και "y" σε λογαριθμικές κλίμακες. Έπειτα ορίζεται η πυκνότητα των σημείων ψηφιοποίησης με χρήση της διαδρομής *Settings > Segments*, με την οποία ανοίγεται παράθυρο διαλόγου που επιτρέπει αυτές τις ρυθμίσεις. Εκεί ορίζεται το ελάχιστο μήκος (*minimum length*) που θα αντιλαμβάνεται το πρόγραμμα ως τμήμα της γραφικής παράστασης και το πλήθος των σημείων (*point separation*), τα οποία θα περιλαμβάνει το τμήμα αυτό. Για τις ψηφιοποιήσεις των διαγραμμάτων της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας ορίστηκε μετά από δοκιμές ότι *minimum length = 2* και *point separation = 4*, διότι αποδείχθηκε ότι με αυτές τις ρυθμίσεις

επιτυγχανόταν η λεπτομερέστερη δυνατή ψηφιοποίηση για τις εικόνες υψηλής ανάλυσης που δέχθηκε ως είσοδο το λογισμικό. Στο επόμενο βήμα γίνεται ο ορισμός των αξόνων της γραφικής παράστασης με χρήση 3 σημείων, ενός στην αρχή των αξόνων, ενός που ανήκει στον άξονα x και ενός που ανήκει στον άξονα y χρησιμοποιώντας την διαδρομή *Digitize > Axis Point*. Με την *Axis Point* ο δρομέας (τοξάκι) αντικαθίστανται με ένα σταυρόνημα. Το σταυρόνημα κινείται από τον χρήστη πάνω στην εικόνα. Όταν το σταυρόνημα τοποθετηθεί ακριβώς στην αρχή των αξόνων ο χρήστης με αριστερό πλήκτρο στο ποντίκι, ανοίγει παράθυρο διαλόγου στο οποίο μπορεί να συμπληρώσει τις συντεταγμένες της αρχής. Για παράδειγμα η αρχή των αξόνων της γραφικής παράστασης του Διαγράμματος 3.11 είναι η $x = 0.001$ και $y = 0.01$. Όταν το σταυρόνημα τοποθετηθεί ακριβώς στο μέγιστο του άξονα x , πάλι ο χρήστης με αριστερό πλήκτρο στο ποντίκι, ανοίγει παράθυρο διαλόγου στο οποίο μπορεί να συμπληρώσει τις συντεταγμένες του. Για παράδειγμα οι συντεταγμένες του μεγίστου του άξονα x της γραφικής παράστασης του Διαγράμματος 3.11 είναι $x = 100$ και $y = 0.01$. Όταν το σταυρόνημα τοποθετηθεί ακριβώς στο μέγιστο του άξονα y , πάλι ο χρήστης με αριστερό πλήκτρο στο ποντίκι, ανοίγει παράθυρο διαλόγου στο οποίο μπορεί να συμπληρώσει τις συντεταγμένες του. Για παράδειγμα οι συντεταγμένες του μεγίστου του άξονα y της γραφικής παράστασης του Διαγράμματος 3.11 είναι $x = 0.001$ και $y = 10000$. Τέλος, η αυτόματη αναγνώριση και ψηφιοποίηση της καμπύλης μιας γραφικής παράστασης γίνεται σε τρία σημαντικά βήματα:

(α) Ο χρήστης μεγεθύνει την εικόνα σε μεγάλη κλίμακα ανάλογη με την διατιθέμενη ανάλυση της εικόνας και του μεγέθους της οθόνης του Η/Υ που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα στους ΗΥ που έγιναν οι επεξεργασίες της Διπλωματικής Εργασίας μια μεγέθυνση 200% κρίθηκε υπεραρκετή.

(β) Ενεργοποιείται η διαδρομή *Digitize > Segment Fill*. Με την *Segment Fill* όταν ο δρομέας (τοξάκι) κινείται από τον πλησίον της γραφικής παράστασης ανοίγει παράθυρο που εγκλωβίζει το τμήμα της καμπύλης που μπορεί να ψηφιοποιηθεί αυτόματα. Ο χρήστης με αριστερό πλήκτρο στο ποντίκι, αποδέχεται την αυτόματη ψηφιοποίηση. Το ψηφιοποιημένο μέρος της παράστασης αλλάζει χρώμα. Αν το παράθυρο αυτόματης ψηφιοποίησης είναι μικρό και δεν κάλυψε όλη την καμπύλη, ο χρήστης μετακινεί το δρομέα σε γειτονικό μη ψηφιοποιημένο κομμάτι της

παράστασης και επαναλαμβάνει την διαδικασία μέχρι όλη η παράσταση να ψηφιοποιηθεί.

Και

(γ) Επειδή από αυτήν την ημιαυτόματη διαδικασία, όσο λεπτομερώς και αν γίνει, προκύπτουν συνήθως και σημεία ή τμήματα της παράστασης που δεν έχουν αλλάξει χρώμα (δηλαδή δεν έχουν ψηφιοποιηθεί) μπορεί να χρησιμοποιείται συμπληρωματικά και μια χειροκίνητη διαδικασία ψηφιοποίησης σημείο προς σημείο μέσω της διαδρομής *Digitize > Curve Point*. Με την *Curve Point* ο δρομέας (τοξάκι) αντικαθίστανται με ένα σταυρόνημα. Το σταυρόνημα κινείται από τον χρήστη πάνω στην εικόνα. Όταν το σταυρόνημα τοποθετηθεί ακριβώς σε ένα μη ψηφιοποιημένο σημείο της παράστασης ο χρήστης με αριστερό πλήκτρο στο ποντίκι, το επιλέγει και αυτό ψηφιοποιείται. Η χειροκίνητη διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι όλη η παράσταση να ψηφιοποιηθεί πλήρως.

Σε κάθε σημείο της γραφικής παράστασης που έχει ψηφιοποιηθεί με αυτές τις διαδικασίες, το λογισμικό τοποθετεί έναν μπλε ευμεγέθη σταυρό, πράγμα που επιτρέπει στο χρήστη να απομονώσει και να ψηφιοποιήσει εκείνα τα σημεία της παράστασης που δεν έχουν ακόμα ψηφιοποιηθεί. Μία πλήρως ψηφιοποιημένη γραφική παράσταση από εικόνα εισόδου παρόμοια με εκείνες των Διαγραμμάτων 3.8 και 3.11 διακρίνεται στο Διάγραμμα 3.13, όπου τα ψηφιοποιημένα σημεία είναι εντονότερα από άλλα λόγω των μπλε σταυρών. Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων της ψηφιοποίησης γίνεται ακολουθώντας τη διαδρομή *File > Export*. Το εξαγόμενο αρχείο κειμένου ακολουθεί την τυποποίηση "comma separated values"(.csv) και περιλαμβάνει δύο στήλες, μια για τις ενέργειες φωτονίων σε MeV και μία για τους μαζικούς συντελεστές εξασθένησης $\mu(E)/\rho$ σε cm^2g^{-1} . Παράδειγμα με απόσπασμα τέτοιου αρχείου κειμένου δίνεται στον Πίνακα 3.5 για υλικό αλουμίνιο.

Εννοείται ότι με πολλαπλασιασμό των μαζικών συντελεστών εξασθένησης των αρχείων αυτών για όλα τα 58 στοιχεία, τον αέρα και το νερό, όπως αναφέρθηκαν, με την πυκνότητα του κάθε ενός από αυτά τα υλικά, προκύπτουν οι αντίστοιχοι γραμμικοί συντελεστές εξασθένησης $\mu(E)$. Με την παραπάνω μέθοδο συγκεντρώθηκαν σε αρχεία κειμένου (.csv) οι γραμμικοί συντελεστές εξασθένησης όλων των υλικών που ενδιαφέρουν. Τα αρχεία αυτά περιλαμβάνουν φυσικά πάλι δύο στήλες, μια για τις ενέργειες φωτονίων σε keV και μία για τους γραμμικούς

συντελεστές εξασθένησης $\mu(E)$ σε cm^{-1} . Δεδομένου ότι τα περισσότερα από τα υλικά που ενδιαφέρουν είναι στερεά υπό κανονικές συνθήκες, οι πυκνότητες που χρησιμοποιήθηκαν για τους πολλαπλασιασμούς, είναι οι πυκνότητες τους στις κανονικές συνθήκες (Κ.Σ.) και λήφθηκαν από πηγές του διαδικτύου όπως η WIKIPEDIA. Εξαιρούνται φυσικά τα μονοατομικά αέρια, καθώς και το μίγμα αέρας που είναι επίσης αέριο για τον οποίο η πυκνότητά του σε κανονικές συνθήκες είναι $\sim 1.22 \text{ kgm}^{-3}$ και η χημική ένωση του νερού, το οποίο μπορεί να παρουσιάζει διάφορες φάσεις με διαφορετικές πυκνότητες σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.

3.6.3 Εξαγωγή δεδομένων μέσω άλλων πηγών

Διατίθενται οι ακόλουθες εναλλακτικές επιλογές για την λήψη των απαραίτητων για αυτή τη Διπλωματική Εργασία συντελεστών εξασθένησης για τα υλικά που αναφέρθηκαν ως εξής:

(α) η σχετική βάση δεδομένων της ιστοσελίδας του Ινστιτούτου Ατομικής Ενέργειας της Νότιας Κορέας (KAERI 2014). Η ιστοσελίδα αυτή είναι παρόμοια με την ιστοσελίδα του NIST (2014a), αλλά δεν παρέχει γραφικές παραστάσεις μαζικών συντελεστών. Παρέχει μόνο λίστες τιμών των μαζικών συντελεστών εξασθένησης για λίγες αντιπροσωπευτικές ενέργειες φωτονίων για κάθε στοιχείο του περιοδικού πίνακα. Οι λίστες αυτές είναι όμοιες με εκείνες που παρέχει το NIST (2014a), διότι όπως αναφέρεται παράγονται με μία άλλη παλαιότερη έκδοση του ίδιου λογισμικού *XCOM (v1.3/1991 off-line)* του NIST. Είναι φανερό ότι αυτή η πηγή δεδομένων, δεν εξυπηρετεί την Διπλωματική Εργασία, διότι οι ενέργειες φωτονίων και οι αντίστοιχοι μαζικοί συντελεστές εξασθένησης είναι λίγοι σε πλήθος. Παρόλα αυτά η ιστοσελίδα αυτή είναι παρομοίως χρήσιμη με αυτήν του NIST (2014a) διότι παρέχει επίσης έτοιμες τιμές μαζικών συντελεστών εξασθένησης για ένα πλήθος χημικών ενώσεων και μιγμάτων για τις ίδιες πάντως λίγες ενέργειες φωτονίων. Μάλιστα το πλήθος αυτό είναι πολύ σημαντικότερο από το πλήθος ενώσεων και μιγμάτων για το οποίο δίνονται πληροφορίες από το NIST (2014a) δηλ. ~ 200 ενώσεις και μίγματα, έναντι ~ 50 ενώσεις και μίγματα. Οι υπολογισμοί και για αυτήν την περίπτωση έχουν γίνει πάλι με το λογισμικό *XCOM . (v1.3/1991 off-line)*

(β) η on-line έκδοση του λογισμικού *XCOM (v1.5/2010 on-line)* (NIST, 2014b) το οποίο λειτουργεί μέσω περιηγητή και αξιοποιεί τη βάση δεδομένων του NIST. Μέσω της βάσης δεδομένων αυτού του λογισμικού *XCOM* παρέχεται η δυνατότητα

υπολογισμού του μαζικού συντελεστή εξασθένησης για στοιχεία, χημικές ενώσεις και μίγματα ενώ δίνεται και η δυνατότητα υπολογισμού και όλων των επιμέρους συνιστωσών του που οφείλονται για παράδειγμα στα διάφορα φαινόμενα σκέδασης, απορρόφησης, φωτοηλεκτρικού φαινομένου, δίδυμης γένεσης κλπ. Τα αποτελέσματα παρέχονται για κάθε στοιχείο με ατομικό αριθμό μικρότερο του 100 και για ακτινοβολία ενέργειας στην περιοχή από 1keV έως 100GeV τόσο με γραφική παράσταση όσο και σε μορφή αριθμητικών αποτελεσμάτων που μπορούν να καταφορτωθούν. Το κάτω και το άνω όριο της περιοχής αυτής ρυθμίζονται από τον χρήστη, ενώ αν χρησιμοποιείται όλη η περιοχή τότε οι ενέργειες υπολογισμών είναι σε 110 προκαθορισμένες τιμές των οποίων η απόσταση αυξάνει εκθετικά αυξανόμενη της ενέργειας στην ελεγχόμενη περιοχή. Όπως φαίνεται, για μικρότερες περιοχές ενεργειών πάλι οι ενέργειες υπολογισμών είναι προκαθορισμένες και προφανώς λιγότερες σε πλήθος. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα σε κάθε τρέξιμο του *XCOM*, να προσθέσει μέχρι και 100 ενέργειες της επιλογής του είτε χειροκίνητα σε ειδικό παράθυρο είτε μεταφορτώνοντας αρχείο που τις περιέχει. Είναι φανερό ότι αυτή η πηγή δεδομένων, δεν εξυπηρετεί την Διπλωματική Εργασία, διότι οι ενέργειες φωτονίων και οι αντίστοιχοι μαζικοί συντελεστές εξασθένησης που παρέχει προς καταφόρτωση είναι λίγοι σε πλήθος. Μπορούν φυσικά να γίνουν ικανοποιητικά περισσότεροι με διαδοχικά τρεξίματα του on-line λογισμικού με μεταφορτώσεις διαφορετικών αρχείων ενεργειών, αλλά ο απαιτούμενος χρόνος επεξεργασίας σε σύγκριση με την ψηφιοποίηση έτοιμων γραφικών παραστάσεων φαίνεται να είναι σημαντικά περισσότερος.

(γ) η τρέχουσα off-line εκδοχή του λογισμικού *XCOM* (v3.1/1999 *off-line*) (NIST 2014b) το οποίο μπορεί να λειτουργεί στον τοπικό υπολογιστή. Το λογισμικό αυτό μαζί με τις βιβλιοθήκες του είναι καταφορτώσιμο από το δικτυακό τόπο του NIST σε φάκελο σε συμπιεσμένη μορφή. Ο φάκελος περιέχει 109 αρχεία, μεταξύ των οποίων βρίσκεται το εκτελέσιμο *XCOM.exe*, καθώς και ο πηγαίος κώδικας της εφαρμογής γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN. Σημειώνεται ότι το εκτελέσιμο *XCOM.exe*, όπως περιέχεται στον φάκελο είναι κατάλληλο να τρέχει μόνο σε προσωπικούς υπολογιστές με Λειτουργικό σύστημα DOS, Windows 9x, Windows XP 32bit και Windows 7 με XP Mode Virtual Machine, η οποία είναι εξ' ορισμού 32 bit. Τα υπόλοιπα αρχεία που περιέχονται στον φάκελο περιλαμβάνουν τμήματα της βάσης δεδομένων του NIST, απαραίτητα για την εκτέλεση του προγράμματος. Τα

αρχεία MDAT3.xxx (όπου xxx αριθμοί από το 001 έως το 100 που συμβολίζουν τον ατομικό αριθμό κάθε στοιχείου) αποτελούν τα δεδομένα εισαγωγής καθενός από τα 100 στοιχεία που υποστηρίζονται. Κάθε αρχείο περιέχει τα αριθμητικά δεδομένα που συναντώνται και στο διαδικτυακό πρόγραμμα που περιγράφηκε παραπάνω, δηλαδή τις ενεργές διατομές και τους μαζικούς συντελεστές εξασθένησης για κάθε είδους αλληλεπίδραση (σκέδαση, φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, δίδυμη γένεση) για 80 διαφορετικές ενέργειες πηγής που καλύπτουν φάσμα από 1keV έως 100GeV. Το αρχείο ATWTS.dat περιέχει τα ατομικά βάρη των προαναφερθέντων στοιχείων και τα ENB.dat, HASH1.dat, HASH2.dat, INDEX.dat χρησιμοποιούνται για τις υπολογιστικές ανάγκες του κώδικα.

Οι δυνατότητες του λογισμικού αυτού είναι εντελώς ανάλογες με τις δυνατότητες της on-line εκδοχής με τη διαφορά ότι δεν παρέχονται γραφικές παραστάσεις. Είναι φανερό ότι αυτή η πηγή δεδομένων, δεν εξυπηρετεί την Διπλωματική Εργασία, διότι οι ενέργειες φωτονίων και οι αντίστοιχοι μαζικοί συντελεστές εξασθένησης που παρέχει προς καταφόρτωση είναι όπως και στην on-line εκδοχή λίγοι σε πλήθος. Μπορούν φυσικά να γίνουν ικανοποιητικά περισσότεροι με διαδοχικά τρεξίματα του off-line λογισμικού με διαφορετικά αρχεία ενεργειών, αλλά ο απαιτούμενος χρόνος επεξεργασίας σε σύγκριση με την ψηφιοποίηση έτοιμων γραφικών παραστάσεων (που δεν παρέχονται σε αυτήν την περίπτωση) φαίνεται να είναι σημαντικά περισσότερος. Παρόλα αυτά η off-line εκδοχή του λογισμικού *XCOM (v3.1/1999 off-line)* μπορεί να είναι πάρα πολύ χρήσιμη διότι το NIST εκτός από το σχετικό εκτελέσιμο XCOM.exe και τις κατάλληλες βιβλιοθήκες δεδομένων παρέχει, όπως αναφέρθηκε, στον συμπιεσμένο φάκελο και τον πηγαίο κώδικα σε FORTRAN, ο οποίος μπορεί να μεταφρασθεί και να τρέξει τόσο σε περιβάλλον MS[®] Windows, όσο και σε περιβάλλον LINUX, τόσο αυτόνομα όσο και ως μέρος άλλου μεγαλύτερου προγράμματος. Μάλιστα, αυτή η δυνατότητα αποδείχθηκε ήδη χρήσιμη διότι το εκτελέσιμο XCOM.exe, δεν μπορεί να λειτουργήσει Windows Vista ή 7 ή 8.x. Για να τρέξει, η λύση ήταν απλή: Ο πηγαίος κώδικας μεταφράστηκε σε εκτελέσιμο με τη βοήθεια του απλού μεταφραστή g-FORTRAN για Windows Vista και Windows 7, του *FORCE v2.09p*. Το εκτελέσιμο που προέκυψε τρέχει κανονικά αν του παρέχονται οι ίδιες βιβλιοθήκες δεδομένων.

3.7 Σύνοψη χαρακτηριστικών του λογισμικού *XCOM*

Προκύπτει από τα όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, ότι πρακτικά όλοι οι διαθέσιμοι σήμερα υπολογισμοί για τους μαζικούς συντελεστές εξασθένισης φωτονίων για στοιχεία, μίγματα ή χημικές ενώσεις πραγματοποιούνται μέσω κάποιας έκδοσης του λογισμικού *XCOM* (βλ. και Berger, 1987 και Berger, 1990). Αξίζει επομένως να γίνει εδώ και μία σύντομη αναφορά στα κυριότερα χαρακτηριστικά του λογισμικού αυτού, ως εξής:

(1) Οι μαζικοί συντελεστές εξασθένισης που υπολογίζει το λογισμικό *XCOM* αφορούν μεμονωμένα ουδέτερα άτομα και δε λαμβάνουν υπόψη μοριακές αλληλεπιδράσεις που μεταβάλλουν τις ιδιότητες των στοιχείων.

(2) Το λογισμικό *XCOM* δεν υπολογίζει τις αλληλεπιδράσεις ηλεκτρονίων που παράγονται λόγω φωτοηλεκτρικού φαινομένου και δίδυμης γένεσης και σκεδαζόμενων φωτονίων λόγω σκέδασης Compton.

(3) Ο υπολογισμός των μαζικών συντελεστών εξασθένισης των χημικών ενώσεων και των μιγμάτων πραγματοποιείται με καλή ακρίβεια, θεωρώντας το σταθμισμένο άθροισμα των συντελεστών εξασθένισης των συνιστωσών κάθε ένωσης. Οι συντελεστές στάθμισης υπολογίζονται αυτόματα από το λογισμικό *XCOM* βάσει του χημικού τύπου της ένωσης που δίνεται από τον χρήστη. Στην περίπτωση των μιγμάτων, ωστόσο, ο χρήστης πρέπει να παράσχει τις κατά βάρος αναλογίες των επιμέρους συστατικών.

(4) Οι συντελεστές εξασθένισης παρουσιάζουν ασυνέχειες στις αιχμές απορρόφησης. Για να αποφευχθούν οι ασυνέχειες αυτές, θα πρέπει πρώτα το λογισμικό να τις εντοπίζει επιλέγοντας με δοκιμές ενέργειες αμέσως πριν και αμέσως μετά από τις ενέργειες εμφάνισης των αιχμών για κάθε συνιστώσα μιας χημικής ένωσης ή ενός μίγματος, οδηγώντας σε χρονοβόρες διαδικασίες. Μια βολική εναλλακτική προσέγγιση που χρησιμοποιείται στο λογισμικό *XCOM* είναι η προσομοίωση των συντελεστών εξασθένισης με τη χρήση κώδικα στον οποίο έχουν δοθεί εκ των προτέρων μόνο οι ενέργειες για τις οποίες δεν εμφανίζονται αιχμές και για τις οποίες πρέπει να γίνονται υπολογισμοί.

3.8 Χρήση του λογισμικού *XCOM* (v1.5/2010 on-line)

Δίνεται στη συνέχεια μία πολύ απλή περιγραφή της χρήσης on-line έκδοσης του λογισμικού *XCOM* (v1.5/2010 on-line). Η χρήση της off-line έκδοσης *XCOM* (v3.1/1999 off-line) είναι εντελώς ανάλογη.

(1) Ο χρήστης χρησιμοποιεί τον σύνδεσμο NIST (2014b) για να βρεθεί στην ιστοσελίδα του λογισμικού. Ο διάλογος με το λογισμικό ανοίγει πατώντας το υπερ-κείμενο "Database Search Form".

(2) Στη συνέχεια παρουσιάζεται η απλή φόρμα που διακρίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 3.14, στην οποία, ο χρήστης καλείται να επιλέξει εάν ενδιαφέρεται για στοιχείο, χημική ένωση ή μίγμα και αν προτίθεται να προσθέσει δικές του ενέργειες για υπολογισμούς συντελεστών εξασθένισης.

(3) Ο χρήστης έπειτα μεταφέρεται στην πιο αναλυτική φόρμα που διακρίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 3.15. Με βάση αυτά που έχουν ορισθεί στο βήμα (2) στην περίπτωση του στοιχείου, η επιλογή του γίνεται είτε εισάγοντας τον ατομικό του αριθμό, είτε την χημική του ονομασία στο κατάλληλο κελί. Για χημικές ενώσεις απαιτείται η αναγραφή του χημικού τύπου της ένωσης χωρίς κενά και παρενθέσεις, ενώ για τη μελέτη μιγμάτων είναι επιπλέον απαραίτητη η συμπλήρωση της κατά βάρους αναλογίας των επιμέρους στοιχείων που τα συνιστούν. Τα αποτελέσματα που ζητούνται καθορίζονται επίσης στην ίδια φόρμα για εύρος ενεργειών οριζόμενο από τον χρήστη, για συγκεκριμένες ενέργειες που ο χρήστης μπορεί να ορίσει πληκτρολογώντας τις τιμές τους στα κατάλληλα κελιά ή μεταφορτώνοντας αρχείο με τιμές ενεργειών, αλλά και για συνδυασμό των παραπάνω μεθόδων. Σημειώνεται ότι η φόρμα αυτή δεν επιτρέπει εισαγωγή παραπάνω από 100 ενεργειών για κάθε στοιχείο, ένωση ή μίγμα.

(4) Με το υπερ-κείμενο "Submit Information" ο χρήστης παίρνει αποτελέσματα σε μορφή γραφικής παράστασης και on-line πίνακα. Μετά από αυτά δίνεται στον χρήστη η δυνατότητα να καταφορτώσει τον πίνακα σε αρχείο κειμένου.

Μια απεικόνιση του τρόπου που γίνεται η χρήση της off-line έκδοσης *XCOM* (v3.1/1999 off-line) διακρίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 3.15.

3.9 Σχόλια και συμπεράσματα

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν μέθοδοι για τον προσεγγιστικό υπολογισμό ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας μεταξύ διαφόρων υλικών με βάση κριτήρια για τη σύγκλιση των μεθόδων, δεδομένα ενεργειών φωτονίων παραγόμενα είτε από ισότοπα είτε από μηχανές παραγωγής ακτίνων -x, καθώς και με βάση γραμμικούς συντελεστές εξασθένισης φωτονίων για στοιχεία (και μίγματα και ενώσεις) που ενδιαφέρουν. Δημιουργήθηκε κατάλογος από στοιχεία, για τα οποία κρίνεται ότι πρέπει να υπολογισθούν ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας με βάση διάφορα πλαίσια χρήσης και χρησιμότητας. Στα ίδια πλαίσια εμπίπτει και το μίγμα του αέρα καθώς και η ένωση του νερού. Στο επόμενο 4^ο Κεφάλαιο θα παρουσιασθεί το λογισμικό που αναπτύχθηκε στην παρούσα Διπλωματική Εργασία ώστε κατ' αρχήν να επαληθευθούν οι πίνακες ΡΣΙ που παρουσιάστηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο με υλικά αναφοράς χάλυβα και αλουμίνιο και σε επόμενο βήμα να εμπλουτισθεί το σετ των ισοδύναμων υλικών που μπορούν να μετατρέπονται στα υλικά αναφοράς χάλυβα και αλουμίνιο και να αυξηθεί το πλήθος των υλικών αναφοράς. Στα πλαίσια του 4^{ου} Κεφαλαίου θα δικαιολογηθούν καλύτερα και τα χρησιμοποιούμενα κριτήρια σύγκλισης των μεθόδων.

ΠΙΝΑΚΕΣ 3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Co-60		Cs-137		Ir-192		Ra-226 & Pb-214 & Bi-214		Se-75	
keV	(%)	keV	(%)	keV	(%)	keV	(%)	keV	(%)
1332.5	99.98	661.7	85.1	316.5	83.0	186.2 ^a	3.6	264.7	59.0
1173.2	99.85	32.2	3.7	468.1	47.8	351.9 ^b	36.0	136.0	58.5
				205.8	4.0	295.2 ^b	18.0		
				484.6	3.9	609.3 ^c	45.0		
						1764.5 ^c	15.0		

^a φωτόνια του Ra-226, ^b φωτόνια του Pb-214, ^c φωτόνια του Bi-214

Πίνακας 3.1

**Ενέργειες φωτονίων και ποσοστά εκπομπής για ισοτοπικές πηγές που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανική ραδιογραφία
(το ισότοπο Ra-226, θεωρείται σε ισορροπία με τα θυγατρικά του που εκπέμπουν φωτόνια Pb-214 και Bi-214)**

Co-60		Cs-137 ^a		Ir-192 ^b		Ra-226 ^b & Pb-214 ^b & Bi-214 ^b		Se-75	
keV	π_i (%)	keV	π_i (%)	keV	π_i (%)	keV	π_i (%)	keV	π_i (%)
1332.5	46.82	661.7	99.59	300	51.99	300	3.5	121.1	5.17
1173.2	53.18			500	31.54	400	8.67	136.0	20.52
				600	13.28	600	16.39	264.7	40.33
						800	4.28	279.5	17.98
						1000	17.74	400.6	11.66
						1500	16.18		
						2000	30.32		

^a σε ισορροπία με το Ba-137m, ^b σε σταθμισμένες ενεργειακές ομάδες

Πίνακας 3.2

Ενέργειες φωτονίων και ποσοστά φωτονίων για ισοτοπικές πηγές που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανική ραδιογραφία,
όπως υπολογίζονται με το λογισμικό *Microshield v7.02*

(το ισότοπο Ra-226, θεωρείται σε ισορροπία με τα θυγατρικά του που εκπέμπουν φωτόνια Pb-214 και Bi-214)

Αγγλική ονομασία	Ελληνική ονομασία	Επιτρεπόμενες τιμές (δυνατότητα ρύθμισης από τον χρήστη)
Peak energy ($T0$)	Μέγιστη ενέργεια φωτονίων δέσμης ακτίνων -x σε keV	Εύρος τιμών: $40 < T0 < 300$ keV Επιλέχθηκαν 50, 100, 150, 200, 250, 300 keV
Minimum energy ($h\nu Min$)	Ελάχιστη ενέργεια φωτονίων που συνεισφέρει στον υπολογισμό του ενεργειακού φάσματος	Ελάχιστη επιτρεπόμενη ρύθμιση $h\nu Min = 0.1 \cdot T0$ keV (επιλέχθηκε)
Energy Bin ($Dh\nu$)	Βήμα υπολογισμού ενεργειακού φάσματος δέσμης	Ελάχιστη επιτρεπόμενη ρύθμιση $Dh\nu = 0.05$ keV (επιλέχθηκε)
Theta (th)	Γωνία φυγής δέσμης από την άνοδο	Εύρος τιμών: $6 - 30^\circ$ Εξ' ορισμού τιμή $th = 30^\circ$ (επιλέχθηκε)
Air Thickness (t_{Air})	Αέρας μεταξύ εστιακού σημείου και φιλμ σε mm	Εύρος τιμών απεριόριστο Εξ' ορισμού τιμή $t_{Air} = 1000$ mm (επιλέχθηκε)
Beryllium Thickness (t_{Be})	Πάχος φίλτρου βηρυλλίου σε mm	Εύρος τιμών απεριόριστο Εξ' ορισμού τιμή $t_{Be} = 0.8$ mm (επιλέχθηκε)
Aluminum Thickness (t_{Al})	Πάχος φίλτρου αλουμινίου σε mm	Εύρος τιμών απεριόριστο Εξ' ορισμού τιμή $t_{Al} = 1$ mm (επιλέχθηκε)

Πίνακας 3.3α

Κατάλογος ρυθμίσεων και τιμές που χρησιμοποιούνται στο γραφικό περιβάλλον του λογισμικού *SpekCalc v1.0*

Αγγλική ονομασία	Ελληνική ονομασία	Επιτρεπόμενες τιμές (δυνατότητα ρύθμισης από τον χρήστη)
Copper Thickness (t_{Cu})	Πάχος φίλτρου χαλκού σε mm	Εύρος τιμών απεριόριστο Εξ' ορισμού τιμή $t_{Cu} = 0.11$ mm (επιλέχθηκε)
Tin Thickness (t_{Sn})	Πάχος φίλτρου κασσίτερου σε mm	Εύρος τιμών απεριόριστο Εξ' ορισμού τιμή $t_{Sn} = 0$ mm (επιλέχθηκε)
Tungsten Thickness (t_W)	Πάχος φίλτρου βολφραμίου σε mm	Εύρος τιμών απεριόριστο Εξ' ορισμού τιμή $t_W = 0$ mm (επιλέχθηκε)
Water Thickness (t_{Wa})	Πάχος φίλτρου νερού σε mm	Εύρος τιμών απεριόριστο Εξ' ορισμού τιμή $t_{Wa} = 0$ mm (επιλέχθηκε)
Nf	Συντελεστής προσαρμογής εξαγόμενου αποτελέσματος σε πραγματικές δέσμες	Εξ' ορισμού τιμή $Nf = 0.68$ (δεν συνιστάται αλλαγή)
P	Συντελεστής προσαρμογής χαρακτηριστικής ακτινοβολίας XRF σε πραγματικά δεδομένα	Εξ' ορισμού τιμή $P = 0.33$ (δεν συνιστάται αλλαγή)

Πίνακας 3.3β

Κατάλογος ρυθμίσεων και τιμές που χρησιμοποιούνται στο γραφικό περιβάλλον του λογισμικού *SpekCalc v1.0*

**** COMMENT ****

**** INPUTS ****

kVp [kV] hvMIN [keV] Dhv [keV]

200 20 0.05

Angle [deg.]

30

t_AIR t_BE t_AL t_CU t_SN t_W t_Wa [mm]

1000 0.8 1 0.11 0 0 0

Nf P

0.68 0.33

****CALCULATED OUTPUTS ****

Brem[uGy/mAs@1m] Char[uGy/mAs@1m]

232.0506 33.98528

HVL1[cm AL] HVL2[cm AL] HVL1[cmCu] HVL2[cmCu] MeanE[keV]

EffEAL[keV] EffECu[keV]

0.8164105 1.125932 0.0496487 0.117469 73.35802 55.06861

60.45497

**** CALCULATED SPECTRUM ****

Energy[keV] N[keV cm² mAs]⁻¹ @ 1 meter

20 231750.9

20.05 238619.9

20.1 245469.8

20.15 252522.1

20.2 259783

20.25 267258.8

20.3 274956.1

20.35 282881.6

20.4 291042.3

20.45 299445.4

20.5 308098.2

20.55 317008.4

20.6 326184

20.65 335632.9

20.7 345363.7

20.75 355384.9

20.8 365705.4

20.85 376334.6

20.9 387281.8

20.95 398556.9

21 410170

21.05 420090.4

21.1 430259

21.15 440682.1

21.2 451366.4

21.25 462318.6

21.3 473545.6

21.35 485054.6

21.4 496852.9

Πίνακας 3.4

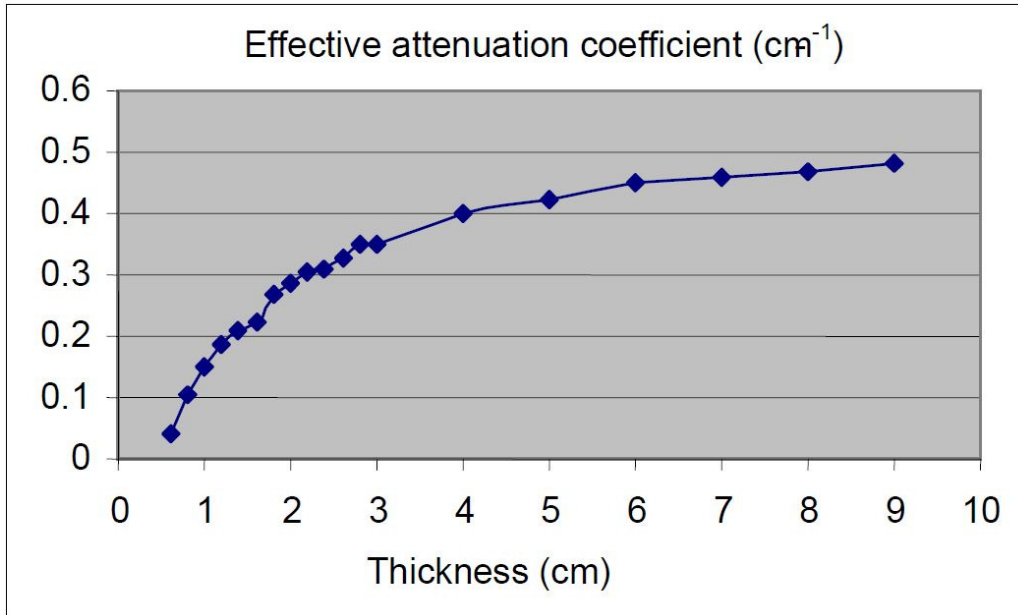
**Απόσπασμα αρχείου κειμένου από τον υπολογισμό φάσματος ακτίνων -x 200 kV
από το λογισμικό *SpekCalc v1.0***

x	Curve1
0.00101748	1001.46
0.00103527	1019.02
0.00105337	1010.22
0.00107178	984.258
0.00109052	958.961
0.00110319	942.458
0.00110958	910.289
0.00112898	894.628
0.00113552	864.091
0.00114209	841.875
0.00116879	785.391
0.00118237	765.201
0.00118922	739.082
0.00120304	726.364
0.00121702	701.573
0.00123116	683.539
0.00124547	665.968
0.00125994	648.849
0.00127458	626.704
0.0012894	615.919
0.00129687	594.896
0.00131194	584.658
0.00131954	564.702
0.00132718	545.427
0.00135038	536.043
0.00135821	517.746
0.00137399	508.836
0.00138195	491.468
0.00139801	478.834
0.00141425	466.525
0.00143069	450.603
0.00146413	446.715
0.00157831	3782.45
0.00160591	3717.38
0.00161521	3621.81
0.00164344	3528.72
0.00166254	3408.29
0.00168186	3320.67
0.00171126	3235.33
0.00172118	3152.15
0.00175126	3044.58
0.00178188	2966.33
0.0017922	2915.27
0.00180258	2815.76
0.00184472	2672.86
0.00187697	2626.88
0.00190978	2559.36
0.00193197	2493.57

Πίνακας 3.5

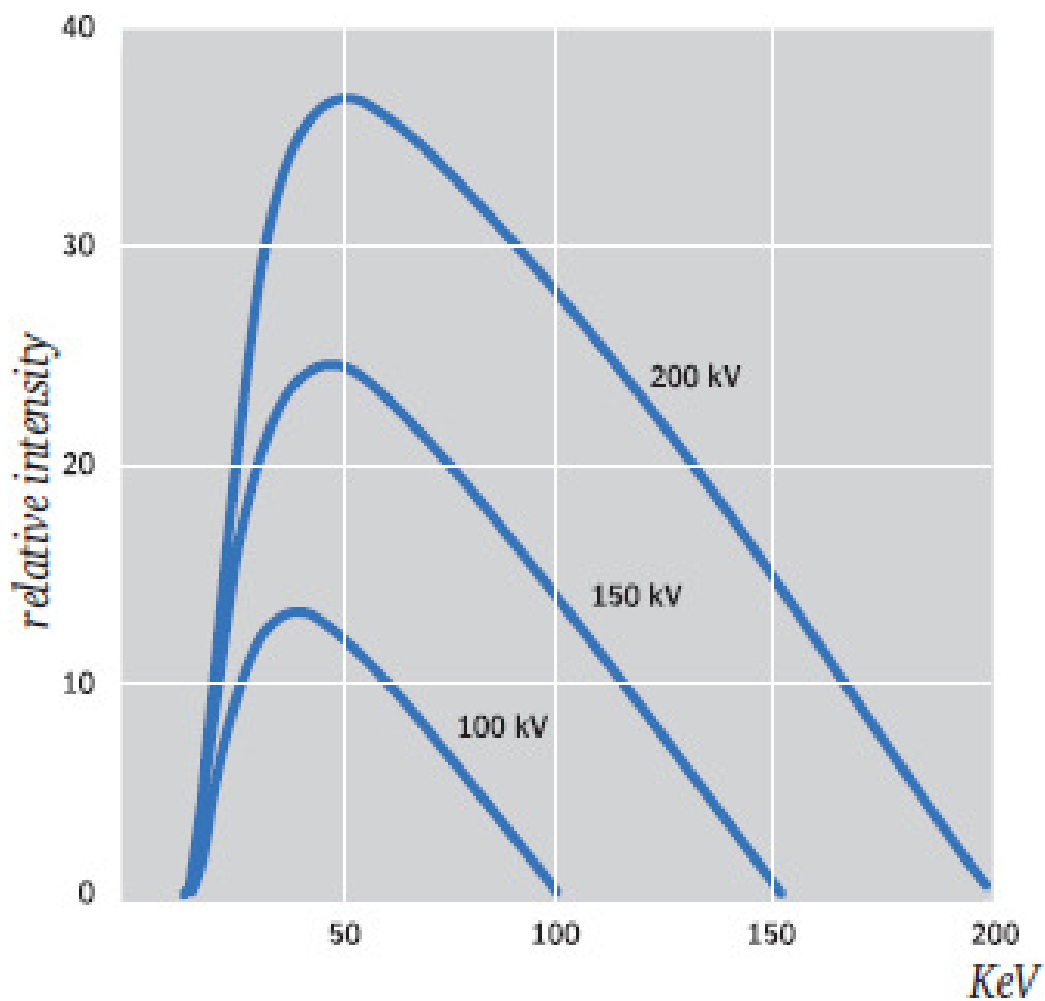
Απόσπασμα αρχείου κειμένου από την ψηφιοποίηση της γραφικής παράστασης του μαζικού συντελεστή εξασθένισης του αλουμινίου συναρτήσει της ενέργειας φωτονίων με τη βοήθεια του λογισμικού *Engauge v4.1*

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ 3^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



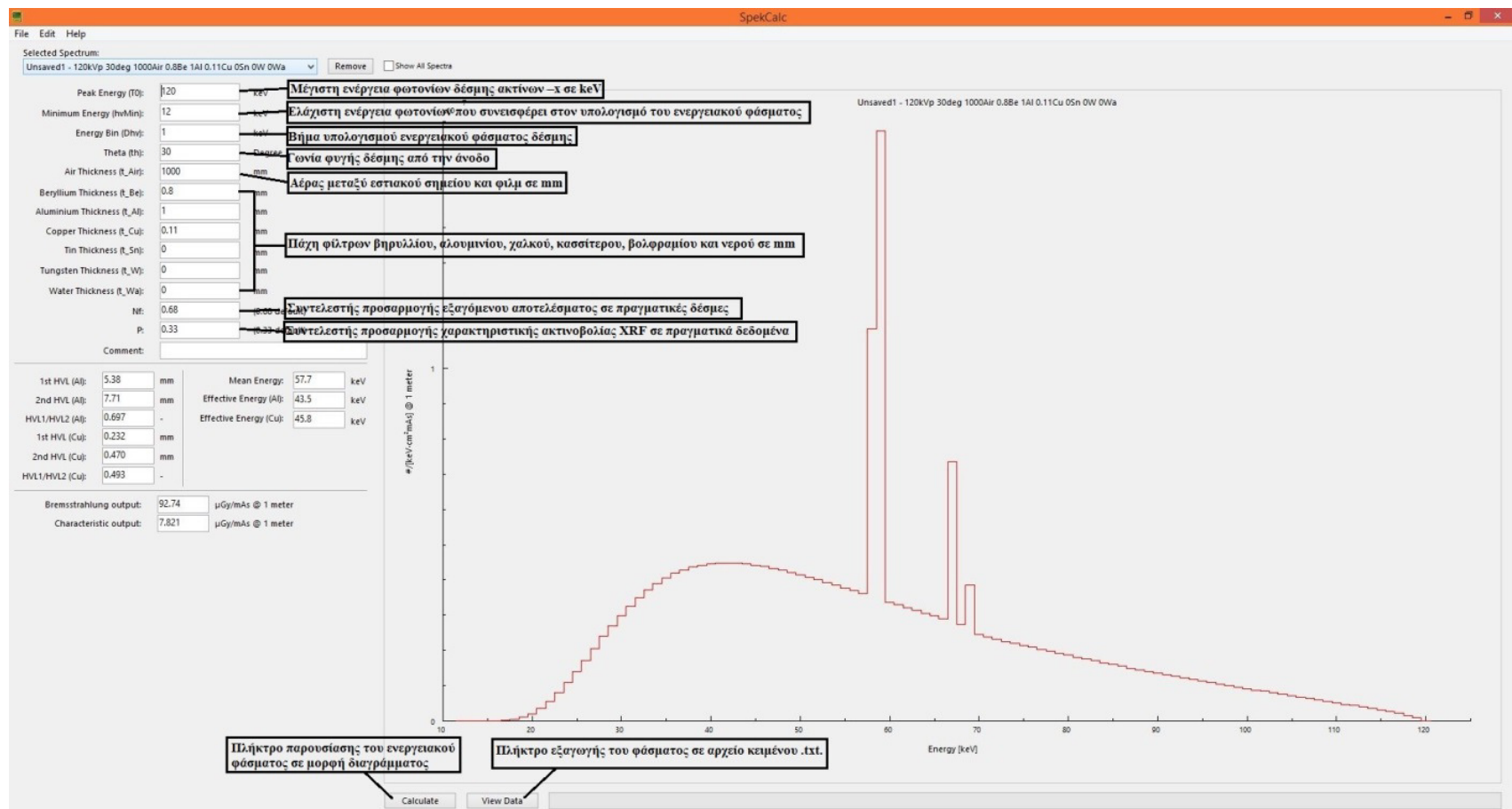
Διάγραμμα 3.1

Προσομοίωση Monte - Carlo
για τον ισοδύναμο γραμμικό συντελεστή εξασθένισης φωτονίων μ_{eff}
πηγής Ir-192 σε συνάρτηση με το πάχος πλάκας χάλυβα επιφάνειας 10 x 10cm.
Απόσταση πηγής - φιλμ 100cm (βλ. και Rokrok, 2006)



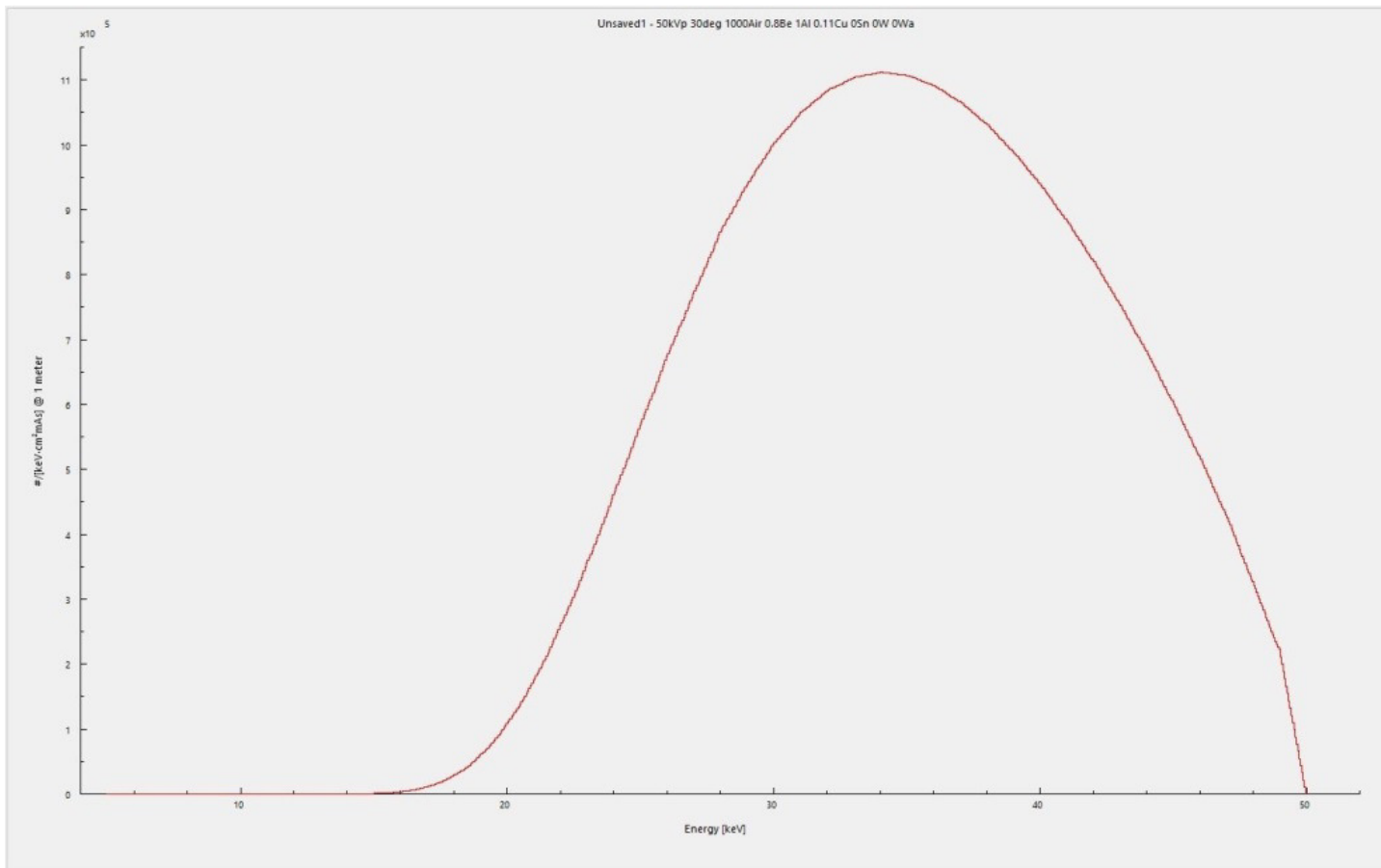
Διάγραμμα 3.2

**Φάσμα φωτονίων για μηχανές παραγωγής ακτίνων -x
της εταιρείας κατασκευής General Electric Sensing and Inspection Technologies
για διάφορες υψηλές τάσεις στα 10mA (βλ. και General Electric, 2007)**



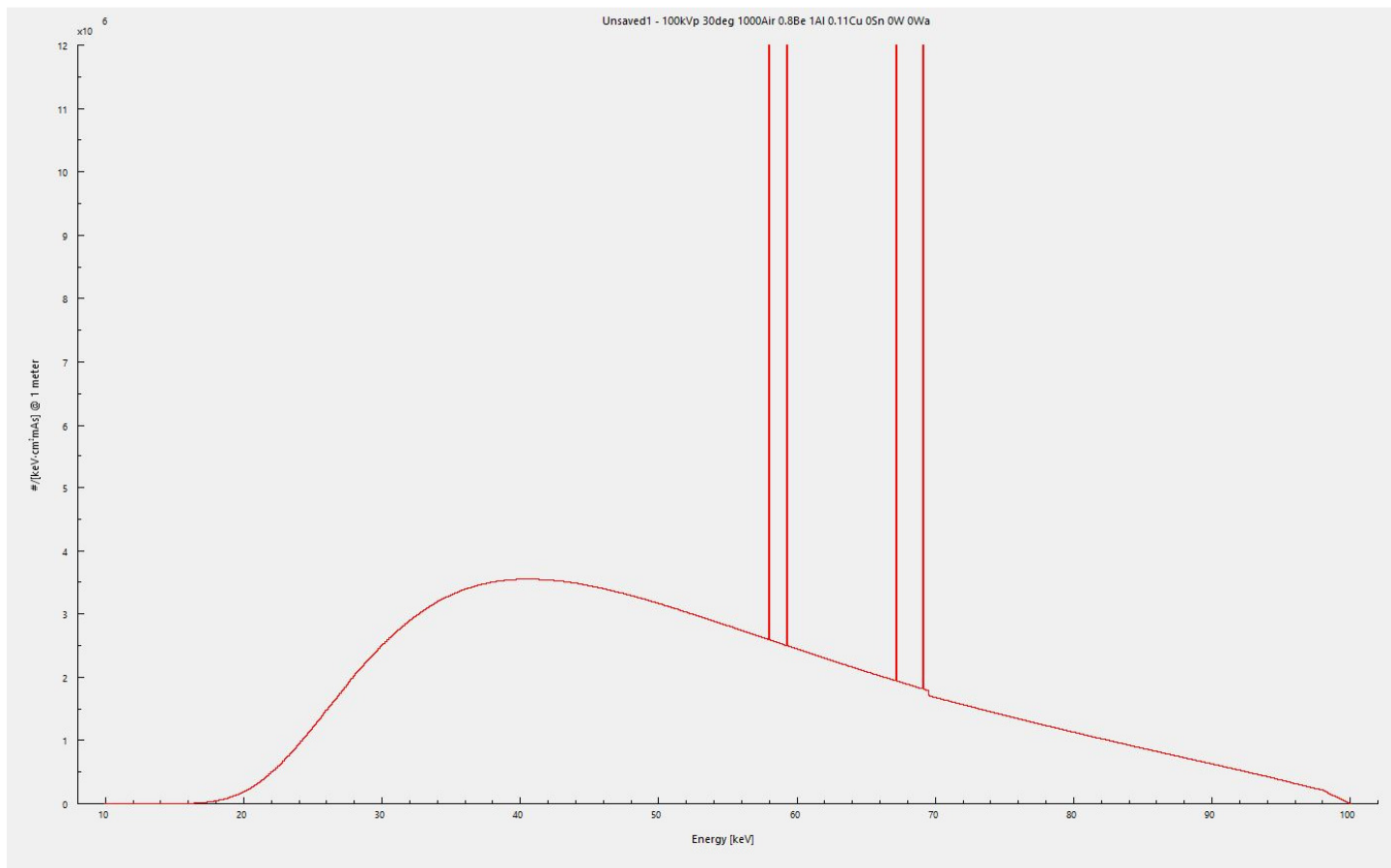
Διάγραμμα 3.3

Γραφικό περιβάλλον (GUI) λογισμικού *SpekCalc v1.0*



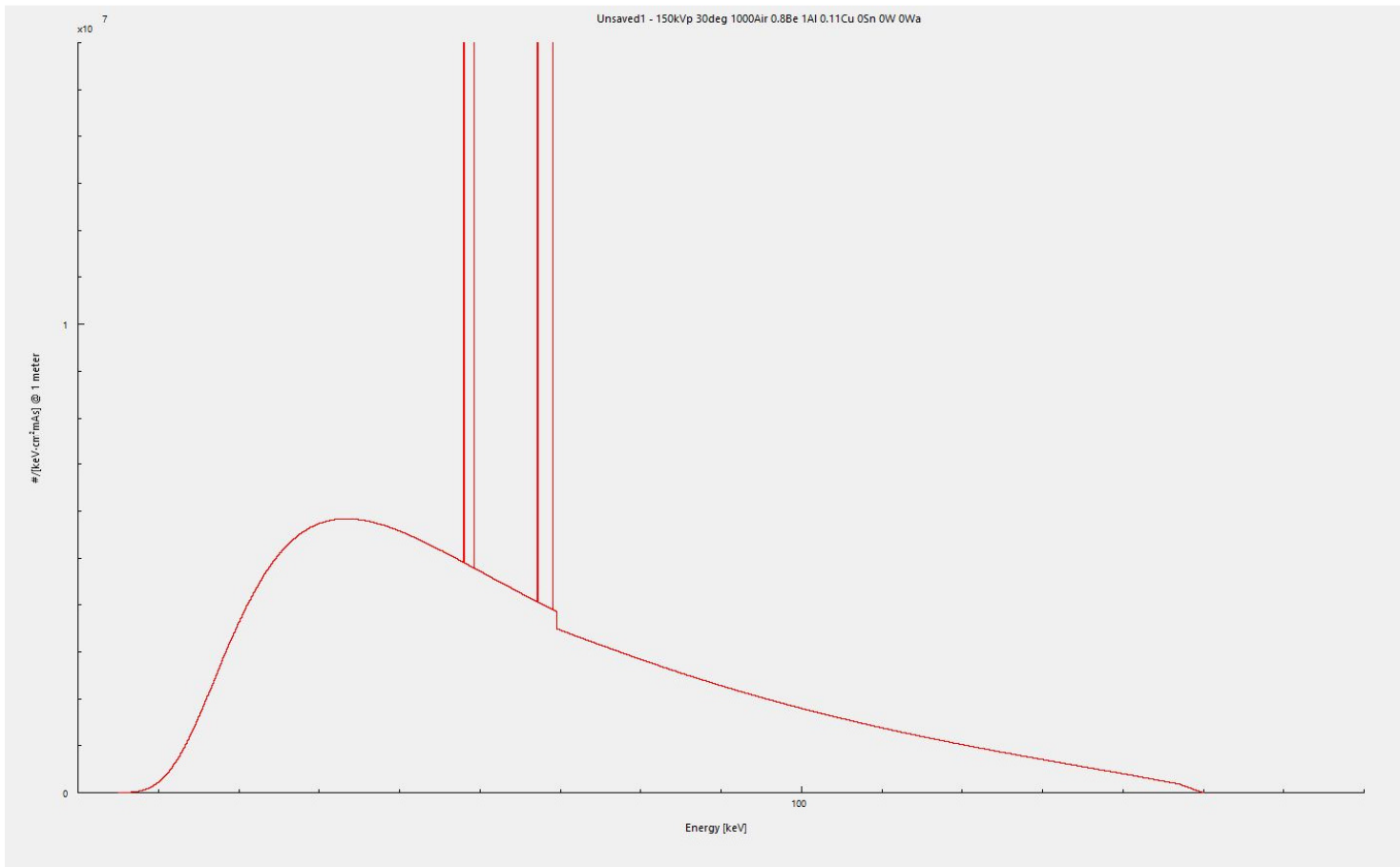
Διάγραμμα 3.4

Ενεργειακό φάσμα μηχανής παραγωγής ακτίνων –x τάσης 50kV από το λογισμικό *SpekCalc v1.0*



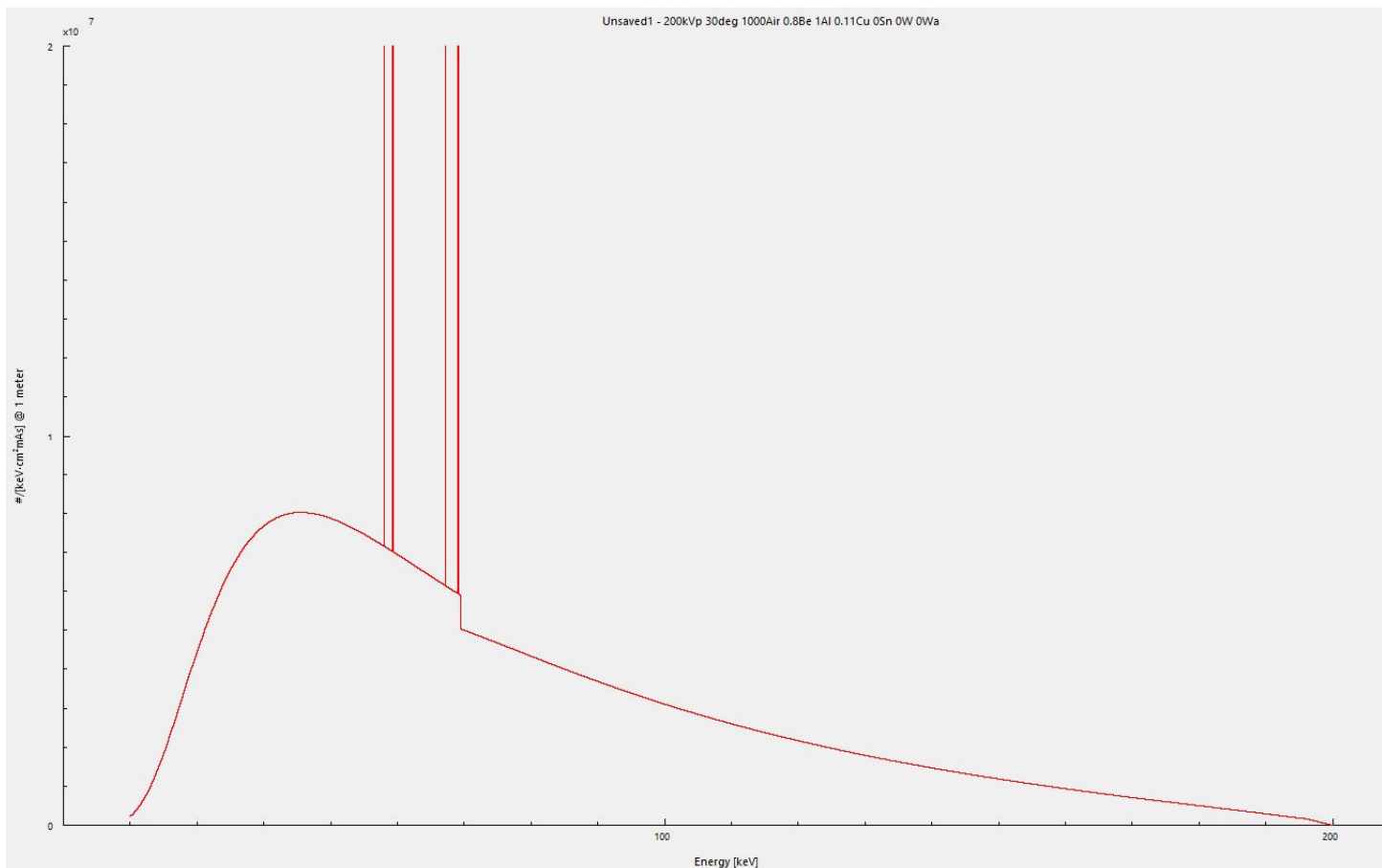
Διάγραμμα 3.5

Ενεργειακό φάσμα μηχανής παραγωγής ακτίνων –x τάσης 100kV από το λογισμικό *SpekCalc v1.0* σε μεγέθυνση



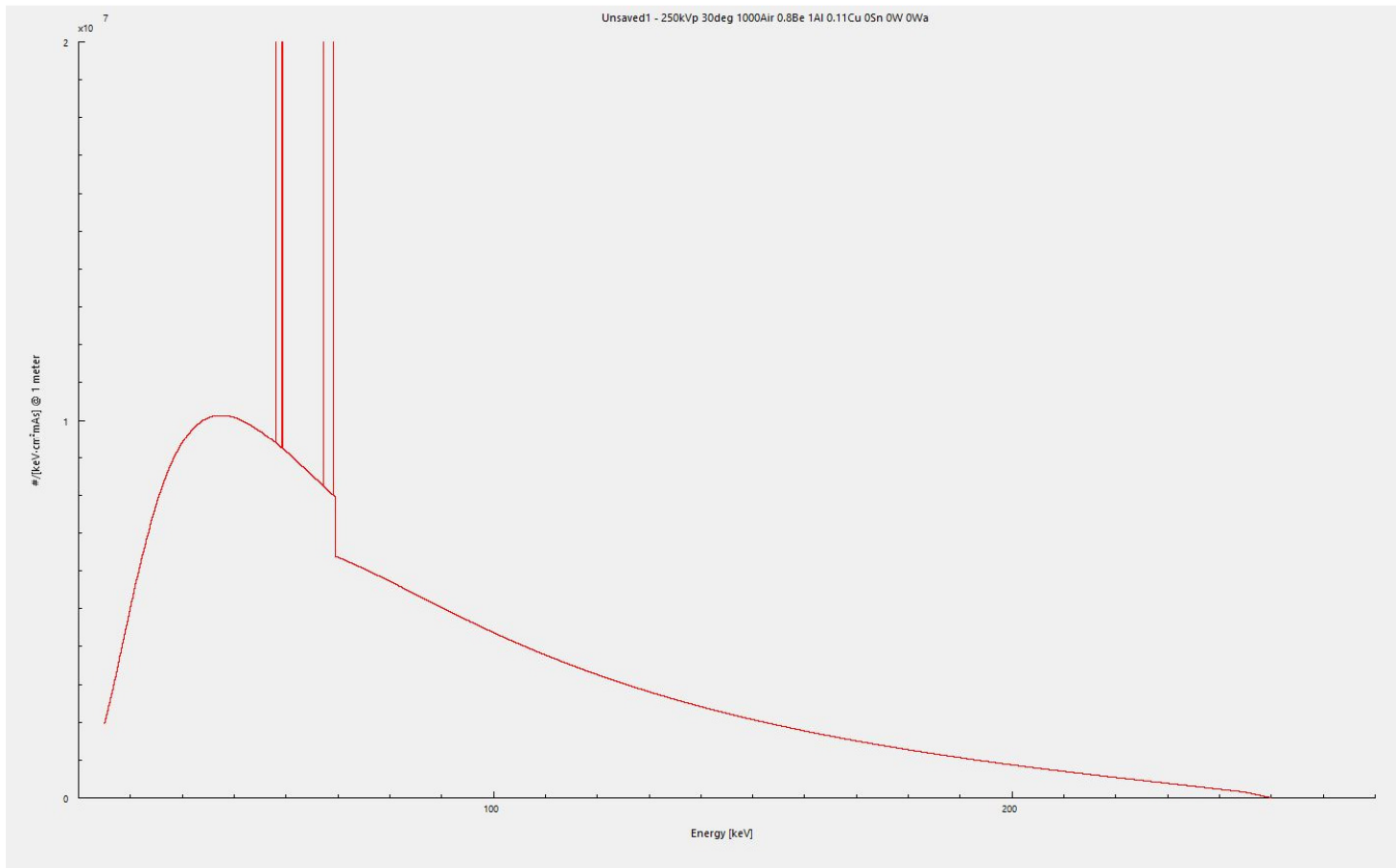
Διάγραμμα 3.6

Ενεργειακό φάσμα μηχανής παραγωγής ακτίνων –x τάσης 150kV από το λογισμικό *SpekCalc v1.0* σε μεγέθυνση



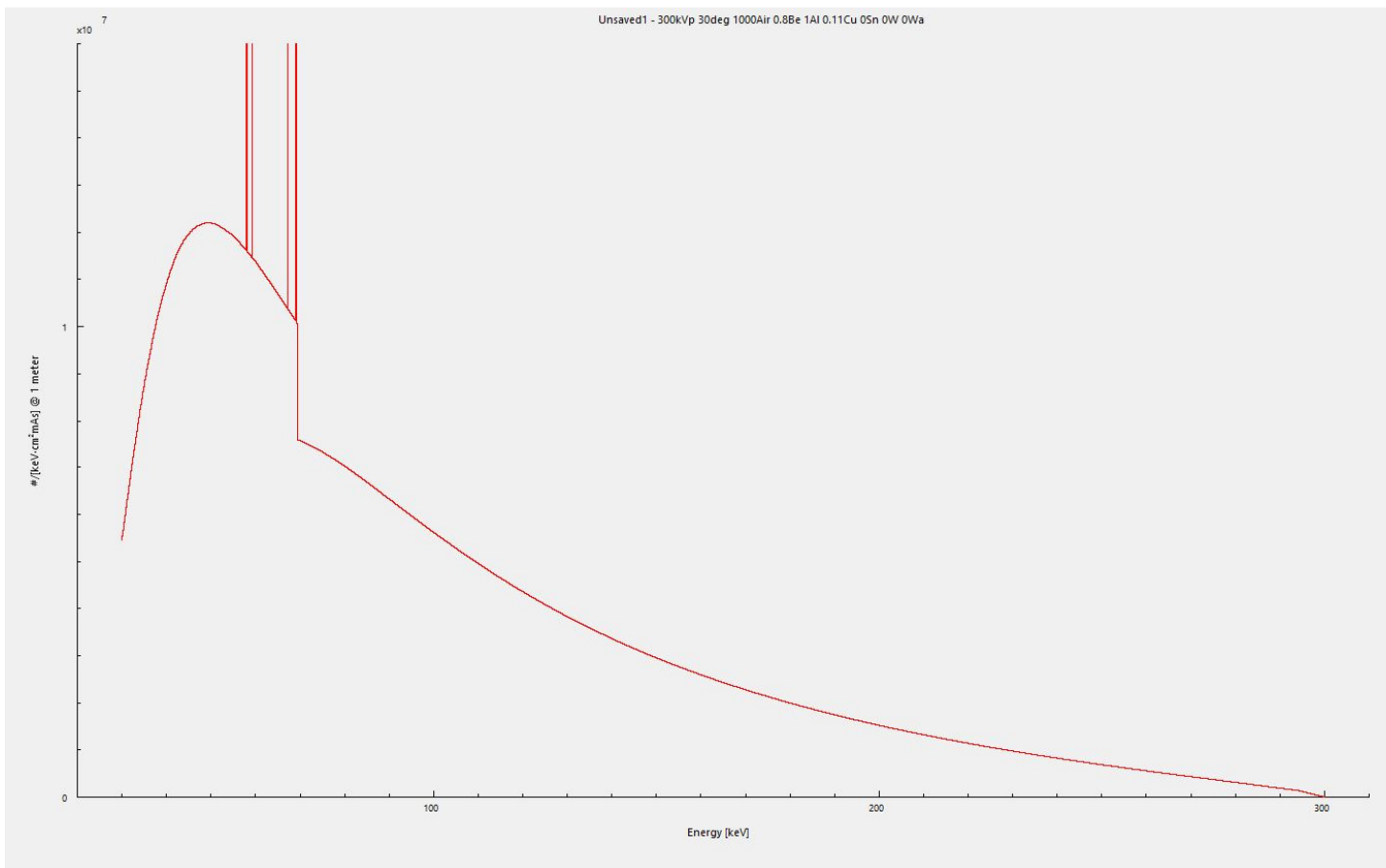
Διάγραμμα 3.7

Ενεργειακό φάσμα μηχανής παραγωγής ακτίνων -x τάσης 200kV από το λογισμικό *SpekCalc v1.0* σε μεγέθυνση



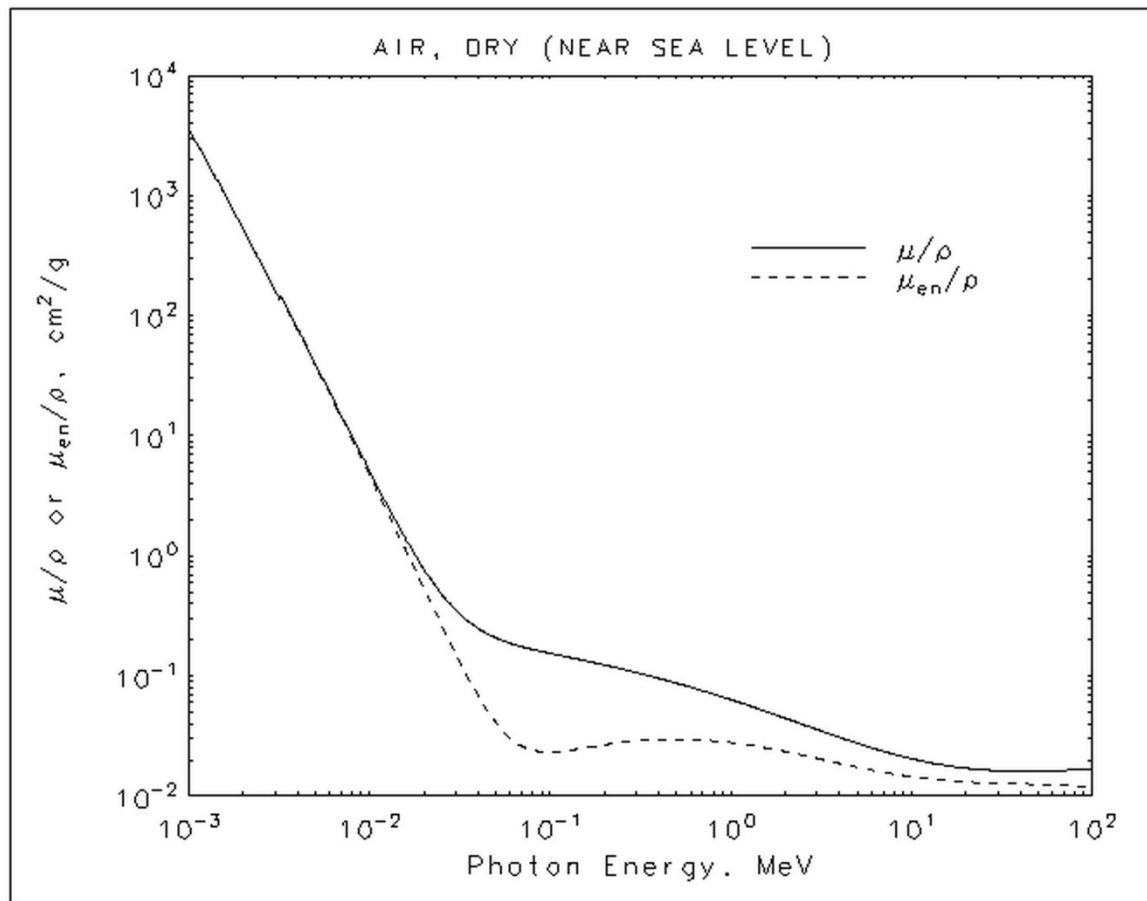
Διάγραμμα 3.8

Ενεργειακό φάσμα μηχανής παραγωγής ακτίνων –x τάσης 250kV από το λογισμικό *SpekCalc v1.0* σε μεγέθυνση



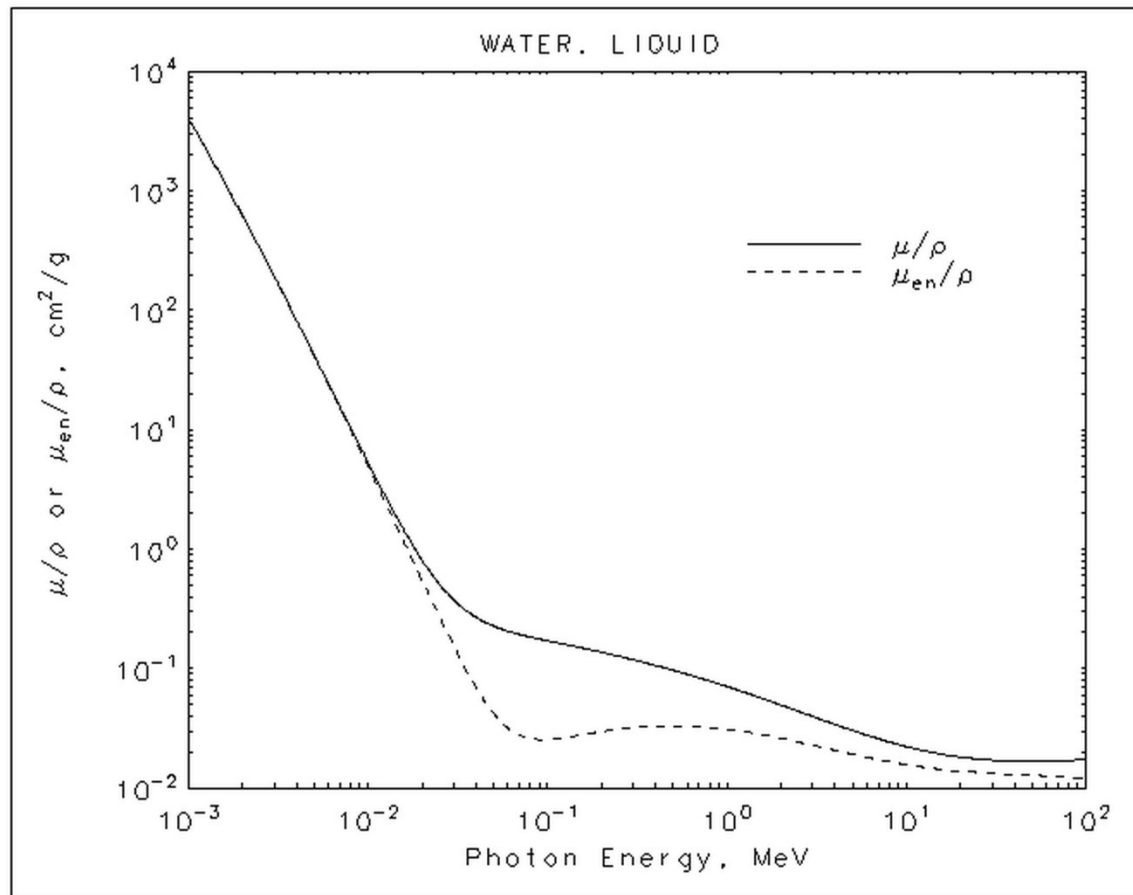
Διάγραμμα 3.9

Ενεργειακό φάσμα μηχανής παραγωγής ακτίνων -x τάσης 300kV από το λογισμικό *SpekCalc v1.0* σε μεγέθυνση



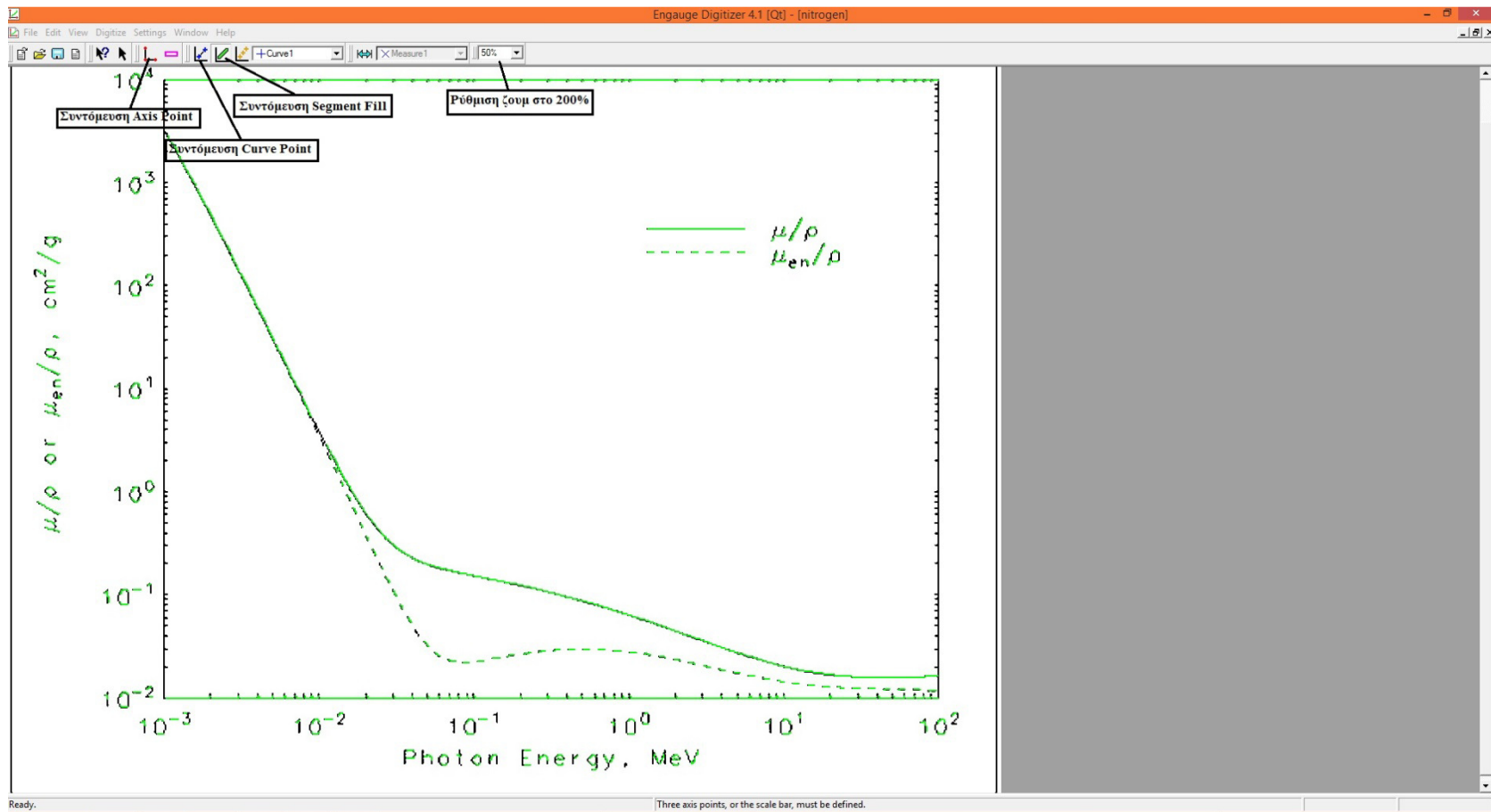
Διάγραμμα 3.10

Διάγραμμα μαζικού συντελεστή εξασθένησης αέρα $\mu(E)/\rho$



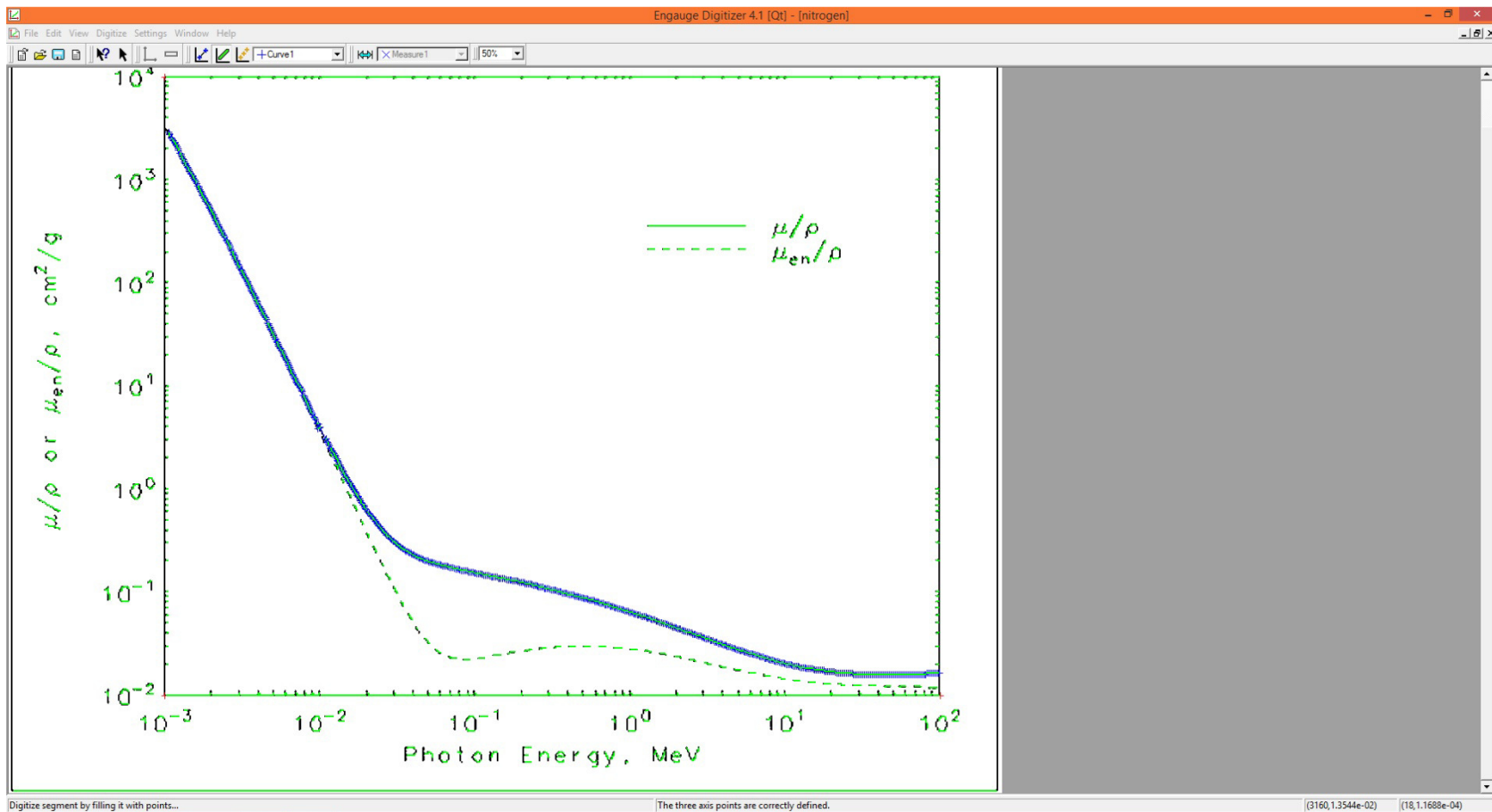
Διάγραμμα 3.11

Διάγραμμα μαζικού συντελεστή εξασθένησης νερού $\mu(E)/\rho$



Διάγραμμα 3.12

Γραφικό περιβάλλον λογισμικού Engauge v4.1



Διάγραμμα 3.13

Επισήμανση (μπλε σταυροί) σημείων γραφικής παράστασης που έχουν ψηφιοποιηθεί από το λογισμικό *Engauge v4.1*



Element/Compound/Mixture Selection

In this database, it is possible to obtain photon cross section data for a single element, compound, or mixture (a combination of elements and compounds). Please fill out the following information:

[Help](#)

Identify material by: <input checked="" type="radio"/> Element <input type="radio"/> Compound <input type="radio"/> Mixture
Method of entering additional energies: (optional) <input checked="" type="radio"/> Enter additional energies by hand <input type="radio"/> Additional energies from file (<i>Note: Your browser must be file-upload compatible</i>)



Διάγραμμα 3.14

1^η φόρμα συμπλήρωσης δεδομένων εισόδου για το λογισμικό *XCOM (v1.5/2010 on-line)*

Fill out the form to select the data to be displayed:

[Help](#)

Select by: (only elements 1 - 100) Atomic Number: <input type="text"/> or Symbol: <input type="text"/>	Options for output units: <input checked="" type="radio"/> All quantities in cm^2/g <input type="radio"/> All quantities in $barns/atom$ <input type="radio"/> Partial interaction coefficients in $barns/atom$ and total attenuation coefficients in cm^2/g
Graph options: <input checked="" type="checkbox"/> Total Attenuation with Coherent Scattering <input type="checkbox"/> Total Attenuation without Coherent Scattering <input type="checkbox"/> Coherent Scattering <input type="checkbox"/> Incoherent Scattering <input type="checkbox"/> Photoelectric Absorption <input type="checkbox"/> Pair Production in Nuclear Field <input type="checkbox"/> Pair Production in Electron Field <input type="checkbox"/> None	Additional energies in MeV: (optional) (up to 100 allowed) Note: Energies must be between 0.001 - 100000 MeV (1 keV - 100 GeV) (only 4 significant figures will be used). One energy per line. Blank lines will be ignored. <div style="border: 1px solid black; height: 30px; width: 100%;"></div> <input checked="" type="checkbox"/> Include the standard grid Energy Range: Minimum: <input type="text" value="0.001"/> MeV Maximum: <input type="text" value="100000"/> MeV

Return to [previous](#) document.

Διάγραμμα 3.15

2^η φόρμα συμπλήρωσης δεδομένων εισόδου για το λογισμικό *XCOM (v1.5/2010 on-line)*

```
C:\ XCOM\XCOM.EXE
Program XCOM, Version 3.1
M.J.Berger and J.H.Hubbell, 23 June 1999

Enter name of substance: H

Options for characterization of substance:
  1. Elemental substance, specified by atomic number
  2. Elemental substance, specified by chemical symbol
  3. Compound, specified by chemical formula
  4. Mixture of elements and/or compounds
Enter choice: 1

Enter atomic number of element: 1

Options for output quantities:
  1. Cross sections in barns/atom
  2. Cross sections in barns/atom, and
    attenuation coefficients in cm2/g
  3. Partial interaction coefficients and
    attenuation coefficients in cm2/g
Enter choice: 3

Options for energy list for output data:
  1. Standard energy grid only
  2. Standard grid plus additional energies
  3. Additional energies only
Enter choice: 1

Specify file on which output (cross section table)
is to be stored. (Specification can include drive
and path): c:\arxeio.txt
```

Διάγραμμα 3.16

Διάλογος εισόδου για το λογισμικό XCOM (v3.1/1999 off-line)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑΣ

4.1 Εισαγωγή

Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι απαραίτητοι ορισμοί που βασίζονται στους νόμους εξασθένησης ακτινοβολίας μονοενεργειακών φωτονίων και αναφέρθηκαν οι κυριότερες βιβλιογραφικές παραπομπές που αφορούν σε τιμές ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας μεταξύ κάποιων λίγων βασικών υλικών. Από την βιβλιογραφική έρευνα που πραγματοποιήθηκε έγιναν φανερά τα εξής:

(α) οι ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας, όπως υπάρχουν διαθέσιμοι σήμερα (2014, βλ. π.χ. και Πίνακες 2.1, 2.2α, 2.2β και 2.3) δεν καλύπτουν βασικά υλικά που ήδη συναντώνται σε πολλές βιομηχανικές ή άλλες εφαρμογές κυρίως λόγω της ανάπτυξης των συνθετικών, των οργανικών και των σύνθετων υλικών.

και

(β) οι ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας, όπως υπάρχουν διαθέσιμοι σήμερα (2014), έχουν κυρίως προκύψει πειραματικά και δεν έχει δημοσιοποιηθεί κάποια ολοκληρωμένη διαδικασία με απλή θεωρητική βάση που να οδηγεί στον υπολογισμό ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας μεταξύ δύο υλικών με αλγοριθμικό τρόπο, ανεξάρτητα από πείραμα.

Στο 3^ο Κεφάλαιο αναλύθηκε με λεπτομέρεια η σειρά των σχέσεων που μπορούν να χρησιμοποιούνται για τον προσεγγιστικό υπολογισμό ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας με θεωρητικό τρόπο για πολυενεργειακά φωτόνια τόσο στην περίπτωση φωτονίων που εκπέμπονται από συνήθεις ισοτοπικές πηγές όσο και από μηχανές παραγωγής ακτίνων -x. Επιπλέον στο 3^ο Κεφάλαιο αναπτύχθηκε ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να συγκεντρωθούν πληροφορίες σχετικά με τις ενεργειακές κατανομές των φωτονίων από ισοτοπικές πηγές και από μηχανές παραγωγής ακτίνων -x με βάση διαθέσιμες βιβλιογραφικές πηγές και το διαδίκτυο. Με την εφαρμογή του τρόπου αυτού προέκυψαν αρχεία κειμένου με σχετικά δεδομένα. Τέλος, στο 3^ο Κεφάλαιο, αναπτύχθηκε ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να συγκεντρωθούν πληροφορίες σχετικά με τους μαζικούς συντελεστές εξασθένησης διαφόρων στοιχείων, ενώσεων και μιγμάτων που ενδιαφέρουν σε συνάρτηση με την ενέργεια

των φωτονίων. Με την εφαρμογή του τρόπου αυτού προέκυψαν αρχεία κειμένου με σχετικά δεδομένα.

Στο παρόν 4^ο Κεφάλαιο, παρουσιάζεται ως συνέχεια του 3^{ου} Κεφαλαίου, η αλγοριθμική διαδικασία που μπορεί να οδηγήσει στον προσεγγιστικό θεωρητικό υπολογισμό ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας, με βάση τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν και τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν. Δεδομένου ότι η αλγοριθμική διαδικασία πρέπει να επεξεργάζεται σημαντικό όγκο δεδομένων και εμπεριέχει μεγάλο πλήθος επαναλήψεων η υλοποίησή της είναι δυνατή μόνο σε κώδικες Η/Υ. Σε επόμενο βήμα περιγράφονται οι κώδικες που βασίζονται στον αλγόριθμο αυτό και αναπτύχθηκαν σε περιβάλλον MATLAB, στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Οι κώδικες παρουσιάζονται τόσο σε επίπεδο διαγράμματος ροής, όσο και ως κείμενο εντολών, μαζί με απλά παραδείγματα.

Τέλος, για την διακρίβωση της καλής λειτουργίας και του αλγορίθμου και των κωδίκων, και στην ουσία δηλαδή του προσεγγιστικού θεωρητικού υπολογισμού ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας, πραγματοποιήθηκε στο 4^ο Κεφάλαιο, αναπαραγωγή σημαντικού μέρους των Πινάκων 2.1, 2.2α και 2.3 που παρουσιάστηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο. Η αναπαραγωγή αυτή πραγματοποιήθηκε με κατάλληλη εφαρμογή των κριτηρίων σύγκλισης των αλγορίθμων. Η σύγκριση αυτή υπήρξε επιτυχής.

4.2 Αλγοριθμική διαδικασία

Οι σχέσεις που αναλύθηκαν στο 2^ο και 3^ο Κεφάλαιο βασίζονται στην ουσία στην μελέτη της εξασθένησης μιας πρωτεύουσας δέσμης φωτονίων εντάσεως I_0 καθώς αυτή περνά διαμέσου ενός υλικού πάχους x . Ο προτεινόμενος αλγόριθμος επομένως πρέπει να ξεκινήσει με την απόδοση μιας οποιασδήποτε ακεραίας τιμής στην ένταση I_0 . Ως "υλικό" για τον αλγόριθμο εννοείται κατ' αρχήν μοναδικό στοιχείο. Ο υπολογισμός των ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας για μίγματα ή ενώσεις θεωρείται ειδική περίπτωση και θα εξετασθεί λεπτομερώς σε άλλο σημείο στο 5^ο Κεφάλαιο.

Στη συνέχεια ο αλγόριθμος πρέπει να πληροφορηθεί:

(α) ποιες είναι οι τιμές του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης του στοιχείου αναφοράς με το τυπικό όνομα "A" που έχει ήδη χρησιμοποιηθεί, για διάφορες

ενέργειες. Οι τιμές αυτές δίνονται από κατάλληλο αρχείο το οποίο προετοιμάστηκε από ψηφιοποίηση γραφήματος όπως εξηγήθηκε στο 3^ο Κεφάλαιο.

(β) ποιες είναι οι τιμές του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης του ισοδύναμου στοιχείου με το τυπικό όνομα "B" που έχει ήδη χρησιμοποιηθεί, για διάφορες ενέργειες. Ομοίως οι τιμές αυτές δίνονται από κατάλληλο αρχείο το οποίο προετοιμάστηκε από ψηφιοποίηση γραφήματος όπως εξηγήθηκε στο 3^ο Κεφάλαιο.

και

(γ) σε ποιες ενέργειες φωτονίων κατανέμεται η ένταση I_0 ,

Για το (γ) διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

- η πηγή φωτονίων είναι ισοτοπική. Στην περίπτωση αυτή ο αλγόριθμος πληροφορείται ζεύγη $[E_i, \pi_i]$ από κατάλληλο αρχείο το οποίο έχει προετοιμαστεί με τρόπο που περιγράφηκε στο 3^ο Κεφάλαιο.
- η πηγή φωτονίων είναι μηχανή παραγωγής ακτίνων -x. Στην περίπτωση αυτή ο αλγόριθμος πληροφορείται ζεύγη $[E, \text{πλήθος φωτονίων}]$ από κατάλληλο αρχείο το οποίο έχει προετοιμαστεί με τρόπο που περιγράφηκε στο 3^ο Κεφάλαιο (δηλ. από αρχείο δεδομένων φωτονίων προσομοιωμένης μηχανής παραγωγής ακτίνων -x από το λογισμικό *SpekCalc v1.0*) και τα οποία πρέπει να μετατρέψει σε ζεύγη $[E, \pi(E)]$. Επειδή είναι σχεδόν αδύνατο τα αρχεία δεδομένων φωτονίων για τις μηχανές παραγωγής ακτίνων -x να έχουν τιμές ενεργειών ίσες με εκείνες των αρχείων για τους γραμμικούς συντελεστές εξασθένησης γίνεται δεκτό ότι ένας γραμμικός συντελεστής εξασθένησης από τα δεδομένα (α) και (β) αναφέρεται σε μία ενέργεια πηγής, αρκεί αυτή η ενέργεια να εγκλωβίζεται μεταξύ δύο διαδοχικών ενεργειών του αρχείου δεδομένων ενεργειών και αντίστοιχων γραμμικών συντελεστών εξασθένησης. Γίνεται δεκτό ότι η διαφορά των δύο αυτών διαδοχικών ενεργειών είναι η ποσότητα ΔE της σχέσης (3.41). Αυτή η παραδοχή είναι δυνατή διότι κάθε αρχείο δεδομένων ενεργειών και αντίστοιχων γραμμικών συντελεστών εξασθένησης δίνεται σε πολύ μικρά ενεργειακά βήματα, όπως εκτενώς αναλύθηκε στο 3^ο Κεφάλαιο. Επομένως με τη χρήση της (3.41) ο υπολογισμός ζευγών $[E, \pi(E)]$ είναι εφικτός για μια ονομαστική ενέργεια E που βρίσκεται στο διάστημα από

$$E \text{ έως } E + \Delta E.$$

Έπειτα ο αλγόριθμος ελέγχει για ποιο πάχος x_A ικανοποιείται είτε το κριτήριο (3.14), αν πρόκειται για ισοτοπική πηγή φωτονίων, είτε το κριτήριο (3.24) αν πρόκειται για μηχανή παραγωγής ακτίνων -x. Αυτό γίνεται με σταδιακή αύξηση του πάχους του στοιχείου "A" σε μικρά βήματα (π.χ. $\Delta x = 0.01$ cm αν πρόκειται για στερεό).

Όταν επιτευχθεί σύγκλιση ο αλγόριθμος υπολογίζει το μ_{effA} από τη σχέση (3.10) ή την σχέση (3.20), ανάλογα αν πρόκειται για ισοτοπική πηγή φωτονίων, ή αν πρόκειται για μηχανή παραγωγής ακτίνων -x, αντίστοιχα.

Στη συνέχεια ο αλγόριθμος υπολογίζει την ένταση I_A από τη σχέση (3.7) ή (3.17), ανάλογα αν πρόκειται για ισοτοπική πηγή φωτονίων, ή αν πρόκειται για μηχανή παραγωγής ακτίνων -x, αντίστοιχα.

Τέλος ο αλγόριθμος επιλύει με δοκιμές ως προς x_B την σχέση (3.16) ή (3.26), ανάλογα αν πρόκειται για ισοτοπική πηγή φωτονίων, ή αν πρόκειται για μηχανή παραγωγής ακτίνων -x, αντίστοιχα, και υπολογίζει τον ζητούμενο ραδιογραφικό συντελεστή ισοδυναμίας μεταξύ του στοιχείου αναφοράς "A" και του ισοδυνάμου στοιχείου "B" εφαρμόζοντας τις σχέσεις (3.15) ή (3.25) κατά περίπτωση.

4.3 Συνοπτική περιγραφή του περιβάλλοντος MATLAB

Το MATLAB θεωρείται ένα περιβάλλον προγραμματισμού υψηλού επιπέδου (4^{ης} γενιάς) κατάλληλο για τεχνικούς υπολογισμούς. Το περιβάλλον αυτό διατίθεται εμπορικά από την Mathworks και ενσωματώνει μια γλώσσα προγραμματισμού σε μία φιλική προς το χρήστη διεπαφή για την ανάπτυξη κώδικα και διαθέτει ένα πολύ ισχυρό σύστημα γραφικής απεικόνισης των αποτελεσμάτων. Βασικό στοιχείο μεταβλητής είναι ο πίνακας, για τον οποίο δεν απαιτεί εκ των προτέρων δήλωση της διάστασής του. Αυτό επιτρέπει την ευκολότερη διατύπωση κώδικα για την επίλυση μεγάλου αριθμού προβλημάτων, ιδιαίτερα αυτών που η διατύπωσή τους γίνεται σε μητρική μορφή. Το όνομα MATLAB προέρχεται από τα τμήματα των λέξεων MATrix LABoratory, αφού το περιβάλλον αυτό αναπτύχθηκε αρχικά για να προσφέρει μία ευκολότερη διεπαφή με τα λογισμικά γραμμικής άλγεβρας LINPACK και EISPACK. Σήμερα (2014), το MATLAB παρέχει ενσωματωμένες τις αντίστοιχες νεώτερες βιβλιοθήκες LAPACK και BLAS, οι οποίες θεωρούνται ό,τι καλύτερο στο χώρο των μητρικών υπολογισμών.

Τα κύρια περιεχόμενα του περιβάλλοντος προγραμματισμού MATLAB παρουσιάζονται συνοπτικά στη συνέχεια:

- Γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου που περιλαμβάνει τόσο τα κλασσικά χαρακτηριστικά μιας γλώσσας προγραμματισμού, όπως έλεγχο ροής, επαναλήψεις, συναρτήσεις, δομές δεδομένων κλπ αλλά και χαρακτηριστικά αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού.
- Γραφικό περιβάλλον ανάπτυξης κώδικα (graphical user interface ή GUI) για την εισαγωγή εντολών, τη διαχείριση μεταβλητών και την ανάγνωση αρχείων
- Γραφικό περιβάλλον για την παραλαβή αποτελεσμάτων με γραφικές απεικονίσεις, video, σε δύο και τρεις διαστάσεις, με δυνατότητες επεξεργασίας εικόνας και ήχου (αν χρειάζεται).
- Άλλες πιο εξειδικευμένες πρόσθετες εργαλειοθήκες (toolboxes) και μεγάλος αριθμός πρόσθετων μαθηματικών βιβλιοθηκών. Οι δυνατότητες αυτές βέβαια έχουν δικό τους κόστος.
- Δυνατότητα συνεργασίας με το λογισμικό SIMULINK, ένα ειδικό λογισμικό από την ίδια εταιρία, κατάλληλο για τη μοντελοποίηση, ανάλυση και προσομοίωση δυναμικών συστημάτων, όπως ηλεκτρικά κυκλώματα, συστήματα πέδησης και πλήθος ηλεκτρολογικών, μηχανολογικών και θερμοδυναμικών συστημάτων.

Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι το περιβάλλον προγραμματισμού MATLAB, δεν παράγει εκτελέσιμο από μεταγλώττιση και σύνδεση (compilation and linking) αλλά εκτελεί τις εντολές με την διαδικασία διερμηνείας, είναι δηλαδή όπως λέγεται, ένας μεταφραστής (interpreter). Η λειτουργία του μεταφραστή παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Το κυριότερο πλεονέκτημα είναι ότι κάθε μεμονωμένη εντολή ή μία περιορισμένη ομάδα εντολών στο περιβάλλον MATLAB μπορεί να εκτελεστεί στο κατάλληλο παράθυρο εντολών, χωρίς να είναι απαραίτητο να φτιαχτεί πρώτα ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα, με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά ο χρόνος ανάπτυξης και αποσφαλμάτωσης (debugging) ενός κώδικα. Από τη άλλη πλευρά, επειδή ο μεταφραστής εκτελεί μεμονωμένα κάθε εντολή, η εκτέλεση του προγράμματος μπορεί να είναι αρκετά πιο αργή απ' ό τι αν είχε χρησιμοποιηθεί μεταγλωττιστής. Η διαφορά στην ταχύτητα μπορεί να είναι από πολύ μικρή έως πολύ σημαντική, μπορεί δηλαδή να χρειαστεί έως και δύο φορές

περισσότερος χρόνος για την εκτέλεση ενός προγράμματος μέσω μεταφραστή σε σχέση με την εκτέλεση ενός ίδιου προγράμματος μέσω μεταγλωττιστή.

Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας χρησιμοποιήθηκε περιβάλλον προγραμματισμού MATLAB R2014a με αριθμό αδείας 538981 του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ.

4.4 Κώδικες υπολογισμών

Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου δίνεται στο πολυσέλιδο Διάγραμμα 4.1. Με βάση το διάγραμμα ροής μπορεί να γίνει αναλυτική επεξήγηση των υπολογιστικών βημάτων των κωδίκων. Σημειώνεται ότι το διάγραμμα ροής είναι κατασκευασμένο για φωτόνια από μηχανή παραγωγής ακτίνων -x. Παρόλα αυτά η εξήγηση των κωδίκων δίνεται με τον ίδιο τρόπο και για φωτόνια από ισότοπα. Είναι προφανές ότι διατίθενται εκδοχές των κωδίκων για ισοτοπικές πηγές φωτονίων και εκδοχές για μηχανές παραγωγής ακτίνων -x, όπως θα αναφερθεί με πιο λεπτομέρεια τόσο στο παρόν όσο και στο 5^ο Κεφάλαιο, όπου θα εξετασθούν οι δυνατότητες διαφόρων εκδόσεων. Τα κείμενα των κυριότερων διαφόρων εκδόχων βρίσκονται συγκεντρωμένα στο Παράρτημα της Διπλωματικής Εργασίας. Σημειώνεται ότι μεταβλητές των κωδίκων με το επίθεμα "re" ή "ref" (από την αγγλική λέξη reference), δηλώνουν ιδιότητες του στοιχείου αναφοράς, ενώ μεταβλητές των κωδίκων με το επίθεμα "eq" (από την αγγλική λέξη equivalent), δηλώνουν ιδιότητες του ισοδύναμου στοιχείου.

– Αρχεία δεδομένων εισόδου

Τα απαραίτητα αρχεία δεδομένων εισόδου για την εκτέλεση των κωδίκων τοποθετούνται κατά προτίμηση στον υποφάκελο στον οποίο βρίσκεται και ο πηγαίος κώδικας του περιβάλλοντος MATLAB (τα γνωστά ".m" αρχεία)¹. Η προετοιμασία τους έχει ήδη γίνει όπως περιγράφηκε στο 3^ο Κεφάλαιο. Για ένα τρέξιμο χρειάζονται τρία αρχεία δεδομένων

(α) το αρχείο δεδομένων με τιμές του γραμμικού συντελεστή εξασθένισης του στοιχείου αναφοράς με το τυπικό όνομα "A" που έχει ήδη χρησιμοποιηθεί, για διάφορες ενέργειες. Για τους κώδικες το στοιχείο αναφοράς έχει στις διάφορες

¹ Αν ο υποφάκελος που περιέχει τα αρχεία δεδομένων εισόδου είναι διαφορετικός από τον υποφάκελο που περιέχει τα αρχεία ".m", με χρήση της εντολής *addpath*, μπορεί να γνωστοποιηθεί στον κώδικα η θέση τους, προκειμένου αυτός να τα χρησιμοποιήσει.

ιδιότητες του το συνθετικό RE από το reference. Αν το στοιχείο αναφοράς έχει ατομικό αριθμό mm τότε το αρχείο κειμένου που περιέχει τα σχετικά δεδομένα ονομάζεται $mm.csv$.

(β) το αρχείο δεδομένων με τιμές του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης του ισοδύναμου στοιχείου με το τυπικό όνομα "B" που έχει ήδη χρησιμοποιηθεί, για διάφορες ενέργειες. Για τους κώδικες το ισοδύναμο στοιχείο έχει στις διάφορες ιδιότητες του το συνθετικό EQ από το equivalent. Αν το στοιχείο αναφοράς έχει ατομικό αριθμό nn τότε το αρχείο κειμένου που περιέχει τα σχετικά δεδομένα ονομάζεται $nn.csv$.

και

(γ) το αρχείο δεδομένων που πληροφορεί σε ποιες ενέργειες φωτονίων κατανέμεται η ένταση I_0 της πρωτεύουσας δέσμης, με ζεύγη $[E_i, \pi_i]$ και $[E, \pi(E)]$, ανάλογα αν πρόκειται για ισοτοπική πηγή φωτονίων, ή αν πρόκειται για μηχανή παραγωγής ακτίνων -x, αντίστοιχα. Για μεν τις ισοτοπικές πηγές το αρχείο δεδομένων υπάρχει έτοιμο και έχει το όνομα $RR.csv$ (όπου RR είναι ίσο με "Co", "Cs", "Ir", "Ra" ή "Se" ανάλογα με την ισοτοπική πηγή στην οποία αναφέρεται), για δε τις μηχανές παραγωγής ακτίνων -x τα δεδομένα αυτά δημιουργούνται από άλλο κατάλληλο αρχείο δεδομένων φωτονίων προσομοιωμένης μηχανής παραγωγής ακτίνων -x με τη βοήθεια της σχέσης (3.41), όπως έχει ήδη εξηγηθεί. Η σχέση (3.41) εφαρμόζεται και για το στοιχείο αναφοράς και για το ισοδύναμο στοιχείο. Τα αρχεία δεδομένων φωτονίων των προσομοιωμένων μηχανών παραγωγής ακτίνων -x βρίσκονται σε μορφή κειμένου και έχουν το όνομα $xxx.txt$, όπου xxx είναι η μέγιστη ονομαστική τάση της προσομοιωμένης μηχανής, δηλ. 50, 100, 150, 200, 250 και 300 kV.

– Εισαγωγή δεδομένων από το χρήστη

Η εισαγωγή δεδομένων από το χρήστη γίνεται τόσο από το εσωτερικό των κωδίκων για μεταβλητές που δεν χρειάζεται να αλλάζουν, όπως η ενδεικτική τιμή έντασης φωτονίων πρωτεύουσας δέσμης I_0 (μεταβλητή shower), όσο και με την εμφάνιση κατάλληλων μηνυμάτων διαλόγου από τους κώδικες. Για να παρατηρείται καλύτερα η έντονη εξασθένηση της πρωτεύουσας δέσμης από στοιχεία μεγάλου ατομικού αριθμού τίθεται $shower = 10^9$, αριθμός που είναι

ικανοποιητικά μεγάλος για την καλή λειτουργία των κωδίκων στις περισσότερες περιπτώσεις εξασθένησης². Με τους διαλόγους ζητείται από τον χρήστη:

Επιλογή πηγής φωτονίων

Στην περίπτωση ισοτοπικής πηγής φωτονίων, την ισοτοπική πηγή φωτονίων που θα χρησιμοποιήσει δίνοντας δύο γράμματα ως εξής "Co" για Co-60, "Cs" για Cs-137, "Ir" για Ir-192, "Ra" για Ra-226 ή "Se" για Se-75. Ο σχετικός κώδικας έχει τη δυνατότητα ελέγχου των εισαχθέντων στο διάλογο και ειδοποιεί με κατάλληλο μήνυμα, εάν η επιλογή του χρήστη δεν είναι έγκυρη. Οι χαρακτήρες που δόθηκαν, ενώνονται με τους χαρακτήρες ".csv", ώστε το πρόγραμμα να μπορεί να αναζητήσει το αντίστοιχο αρχείο. Η μέγιστη ονομαστική ενέργεια φωτονίων της ισοτοπικής πηγής αποθηκεύεται στην μεταβλητή maxxray.

Στην περίπτωση μηχανής παραγωγής ακτίνων -x, την μέγιστη τάση της πηγής ακτίνων -x που επιθυμεί, πληκτρολογώντας τον αντίστοιχο αριθμό σε kV, δηλ. 50, 100, 150, 200, 250 ή 300 kV. Ο σχετικός κώδικας έχει τη δυνατότητα ελέγχου των εισαχθέντων στο διάλογο και ειδοποιεί με κατάλληλο μήνυμα, εάν η επιλογή του χρήστη δεν είναι έγκυρη. Ο αριθμός που δόθηκε, μετατρέπεται σε ακολουθία χαρακτήρων η οποία ενώνεται με τους χαρακτήρες ".txt", ώστε το πρόγραμμα να μπορεί να αναζητήσει το αντίστοιχο αρχείο. Η μέγιστη ονομαστική ενέργεια φωτονίων της προσομοιωμένης μηχανής αποθηκεύεται στην μεταβλητή maxxray.

Αφού το αρχείο με τις πληροφορίες πηγής φωτονίων ανοιχτεί, προστίθεται στο περιβάλλον εργασίας του MATLAB ως δισδιάστατος πίνακας με την ονομασία SOURCE.

Επιλογή στοιχείου αναφοράς

Αρχικά και πριν από οποιοδήποτε διάλογο για τα στοιχεία αναφοράς ή τα ισοδύναμα στοιχεία, ορίζεται ένα ευρετήριο INDEX των επιλεγμένων στοιχείων (αναφοράς ή ισοδύναμων) για τα οποία είναι επιθυμητό να γίνουν υπολογισμοί και τα οποία έχουν ορισθεί στο 3^ο Κεφάλαιο. Το ευρετήριο βασίζεται στον κατάλογο των ατομικών αριθμών των επιλεγμένων στοιχείων.

² Ο μέγιστος θετικό αριθμός που δέχεται το MATLAB είναι ο 1.7977×10^{308} .

Ο χρήστης καλείται να επιλέξει τον ατομικό αριθμό του στοιχείου αναφοράς που επιθυμεί, και στη συνέχεια γίνεται έλεγχος εάν η επιλογή του είναι έγκυρη, εμφανίζοντας σχετικό μήνυμα σε περίπτωση λανθασμένης. Ο αριθμός που δόθηκε μετατρέπεται σε ακολουθία χαρακτήρων, η οποία ενώνεται με τους χαρακτήρες ".csv", ώστε το πρόγραμμα να μπορεί να αναζητήσει το αντίστοιχο αρχείο ενεργειών φωτονίων - γραμμικών συντελεστών εξασθένησης. Αφού το αρχείο με τις πληροφορίες αυτές ανοιχτεί, προστίθεται στο περιβάλλον εργασίας του MATLAB ως δισδιάστατος πίνακας με την ονομασία RE.

Επιλογή ισοδύναμου στοιχείου

Με την ίδια διαδικασία επιλέγεται και το ισοδύναμο στοιχείο και αποθηκεύεται στον δισδιάστατο πίνακα EQ.

Επιλογή βήματος πάχους (μεταβλητή step)

Ακολουθεί η επιλογή του βήματος πάχους Δx σε εκατοστά (cm) με το οποίο, σε μία επαναληπτική διαδικασία αυξάνεται το πάχος x_A ώστε στην κατάλληλη μεγάλη τιμή του να ικανοποιηθεί η (3.14) ή η (3.24), ανάλογα αν πρόκειται για ισοτοπική πηγή φωτονίων, ή αν πρόκειται για μηχανή παραγωγής ακτίνων -x, αντίστοιχα. Για στερεό στοιχείο αναφοράς και στερεό ισοδύναμο στοιχείο, δοκιμές έδειξαν ότι η καταλληλότερη τιμή του Δx είναι 0.01cm, η οποία έχει οριστεί ως η εξ' ορισμού τιμή της μεταβλητής step. Δεν αποκλείεται φυσικά ο χρήστης να ορίσει άλλη μικρότερη τιμή, αν πρόκειται για στερεά στοιχεία. Αν η τιμή βέβαια είναι πολύ μικρότερη οι κώδικες θα γίνουν πολύ αργοί. Αν η τιμή είναι μεγαλύτερη από 1cm οι κώδικες δεν θα το δεχθούν. Αν η τιμή είναι μεταξύ 0.01 και 1cm, υπάρχει πιθανότητα οι υπολογισμοί να αποτύχουν. Για τα αέρια το βήμα πάχους μπορεί να είναι μεγαλύτερο από 1cm, αλλά με τρόπο που θα αναφερθεί σε άλλο σημείο.

Επιλογή κριτηρίου σύγκλισης (μεταβλητή conν)

Τέλος, γίνεται η επιλογή της τιμής του ϵ (μεταβλητή conν) για την οποία το αριστερό μέλος της (3.14γ) ή της (3.24γ) μπορεί να θεωρείται ικανοποιητικά μεγάλο αλλά όχι πολύ μεγάλο. Έγιναν δοκιμές με τιμές 3, 4 και 5, και διαπιστώθηκε ότι η τιμή "4" είναι αυτή που κατ' αρχήν επιτρέπει στους κώδικες να προσεγγίσουν καλύτερα τους ραδιογραφικούς συντελεστές

ισοδυναμίας της βιβλιογραφίας, όπως αυτοί παρουσιάσθηκαν στους πίνακες του 2^{ου} Κεφαλαίου. Η τιμή "4" έχει ορισθεί ως η εξ' ορισμού τιμή της μεταβλητής conν. Επιτρέπεται στον χρήστη να επιλέξει άλλες τιμές για τη μεταβλητή αυτή αλλά η εμπειρία με τον αλγόριθμο δείχνει ότι αυτό πρέπει να αποφεύγεται. Σε επόμενη παράγραφο του Κεφαλαίου αναλύεται περισσότερο η κατάλληλη τιμή για την μεταβλητή conν. Επίσης στο 5^ο Κεφάλαιο, αναλύονται και περιπτώσεις όπου η τιμή της παραμέτρου ϵ πρέπει να είναι "1".

– Προετοιμασία αλγορίθμου

Ο σχετικός κώδικας αφού λάβει τα απαραίτητα δεδομένα από το χρήστη ή από αρχεία δεδομένων με τις οδηγίες του χρήστη, δημιουργεί τις απαραίτητες μεταβλητές για την εκκίνηση των υπολογισμών. Συγκεκριμένα, δημιουργεί μονοδιάστατους πίνακες (arrays) ως εξής:

Πίνακας ενεργειών φωτονίων του στοιχείου αναφοράς (energyref)

Το πρώτο στοιχείο του πίνακα είναι η πρώτη ενέργεια από το πρώτο record του αρχείου mm.csv. Το τελευταίο στοιχείο του πίνακα είναι η τελευταία ενέργεια του αρχείου mm.csv, η οποία είναι μικρότερη ή ίση με την maxxray. Η διάσταση του πίνακα προκύπτει εμμέσως και φυλάσσεται στην μεταβλητή counter1.

Πίνακας συντελεστών εξασθένησης του στοιχείου αναφοράς (mref)

Το πρώτο στοιχείο του πίνακα είναι ο πρώτος συντελεστής από το πρώτο record του αρχείου mm.csv. Το τελευταίο στοιχείο του πίνακα είναι ο συντελεστής που αντιστοιχεί στην τελευταία ενέργεια του πίνακα energyref. Οι διαστάσεις των πινάκων energyref και mref είναι όμοιες.

Πίνακας ενεργειών φωτονίων του ισοδύναμου στοιχείου (energyeq)

Το πρώτο στοιχείο του πίνακα είναι η πρώτη ενέργεια από το πρώτο record του αρχείου nn.csv. Το τελευταίο στοιχείο του πίνακα είναι η τελευταία ενέργεια του αρχείου nn.csv, η οποία είναι μικρότερη ή ίση με την maxxray. Η διάσταση του πίνακα προκύπτει εμμέσως και φυλάσσεται στην μεταβλητή counter2.

Πίνακας συντελεστών εξασθένησης του ισοδύναμου στοιχείου (meq)

Το πρώτο στοιχείο του πίνακα είναι ο πρώτος συντελεστής από το πρώτο record του αρχείου *nn.csv*. Το τελευταίο στοιχείο του πίνακα είναι η ο συντελεστής που αντιστοιχεί στην τελευταία ενέργεια του πίνακα *energyeq*. Οι διαστάσεις των πινάκων *energyeq* και *meq* είναι όμοιες.

Πίνακας ενεργειών φωτονίων πηγής (*energyxray*)

Το πρώτο στοιχείο του πίνακα είναι η πρώτη ενέργεια από το πρώτο record του αρχείου *RR.csv* ή του αρχείου *xxx.txt* (ισοδύναμα του πίνακα SOURCE). Το τελευταίο στοιχείο του πίνακα είναι η τελευταία ενέργεια από το τελευταίο record του αρχείου *RR.csv* ή του αρχείου *xxx.txt*, η οποία είναι ίση με την *maxxray*. Η διάσταση του πίνακα προκύπτει εμμέσως και φυλάσσεται στο περιβάλλον MATLAB.

Πίνακας ποσοστών φωτονίων πηγής (*pxray*)

Το πρώτο στοιχείο του πίνακα είναι το ποσοστό ή ο αριθμός φωτονίων από το πρώτο record του αρχείου *RR.csv* ή του αρχείου *xxx.txt* (ισοδύναμα του πίνακα SOURCE). Το τελευταίο στοιχείο του πίνακα είναι το τελευταίο ποσοστό ή ο αριθμός φωτονίων από το τελευταίο record του αρχείου *RR.csv* ή του αρχείου *xxx.txt*. Κατά τη διάρκεια δημιουργίας του πίνακα *pxray* υπολογίζεται και το άθροισμα αυτών των ποσοστών ή αριθμών φωτονίων και φυλάσσεται στην μεταβλητή *totalpxray*.

Κοινός τύπος ενεργειών φωτονίων *energyref* και *energyxray*

Στη συνέχεια, είναι απαραίτητη η αντιστοίχιση των ποσοστών εμφάνισης κάθε ενέργειας φωτονίων πηγής (πίνακας *energyxray*) με τις ενέργειες που περιλαμβάνονται στον πίνακα *energyref* του στοιχείου αναφοράς. Για το σκοπό αυτό γίνεται ο ακόλουθος έλεγχος: Ελέγχεται ποιες και πόσες ενέργειες φωτονίων του πίνακα *energyxray* βρίσκονται μεταξύ διαδοχικών ενεργειών i και $i + 1$ του πίνακα *energyref*. Επειδή ο πίνακας *energyxray* είναι πολύ πυκνότερος από τον πίνακα *energyref*, υπάρχουν πάντοτε τέτοιες ενέργειες του πίνακα *energyxray*. Ο αριθμός των φωτονίων που αντιστοιχούν στις ενέργειες αυτές αθροίζονται (αθροιστής *sub1*) και δίνουν τον αριθμητή της (3.41) στην ενέργεια E' [δηλαδή κατά σύμβαση στην ενέργεια *energyref*(i)]. Ο παρονομαστής της (3.41) είναι φυσικά η μεταβλητή *totalpxray*. Διαιρώντας αριθμητή και παρονομαστή λαμβάνεται το ποσοστό των φωτονίων ενέργειας

energyref(i) από τη συνολική ένταση δέσμης shower, που προσβάλλει το στοιχείο αναφοράς. Τα ποσοστά αυτά φυλάσσονται στον πίνακα percentage1 με διάσταση counter1.

Κοινός τόπος ενεργειών φωτονίων energyeq και energyxray

Είναι επίσης απαραίτητη η αντιστοίχιση των ποσοστών εμφάνισης κάθε ενέργειας φωτονίων πηγής (πίνακας energyxray) με τις ενέργειες που περιλαμβάνονται στον πίνακα energyeq του ισοδύναμου στοιχείου. Για το σκοπό αυτό γίνεται ένας αντίστοιχος με προηγούμενα έλεγχος: Ελέγχεται ποιες και πόσες ενέργειες φωτονίων του πίνακα energyxray βρίσκονται μεταξύ διαδοχικών ενεργειών i και $i + 1$ του πίνακα energyeq. Επειδή ο πίνακας energyxray είναι πολύ πυκνότερος από τον πίνακα energyeq, υπάρχουν πάντοτε τέτοιες ενέργειες του πίνακα energyxray. Ο αριθμός των φωτονίων που αντιστοιχούν στις ενέργειες αυτές αθροίζονται (αθροιστής sub2) και δίνουν τον αριθμητή της (3.41) στην ενέργεια E' [δηλαδή κατά σύμβαση στην ενέργεια energyeq(i)]. Ο παρονομαστής της (3.41) είναι φυσικά η μεταβλητή totalxray. Διαιρώντας αριθμητή και παρονομαστή λαμβάνεται το ποσοστό των φωτονίων ενέργειας energyeq(i) από τη συνολική ένταση δέσμης shower, που προσβάλλει το ισοδύναμο στοιχείο. Τα ποσοστά αυτά φυλάσσονται στον πίνακα percentage2 με διάσταση counter2.

– Υπολογισμοί και αποτελέσματα

Μετά την προετοιμασία του αλγορίθμου ακολουθεί ο υπολογισμός της πρωτεύουσας δέσμης που διαπερνά το στοιχείο αναφοράς με ένταση I_A (μεταβλητή remainderre). Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με τα ακόλουθα βήματα:

Υπολογισμός του πάχους x_{Amax} του στοιχείου αναφοράς

Το πάχος x_{Amax} ικανοποιεί το 3^ο κριτήριο (3.14γ) ή την (3.24γ) ομοίως είτε πρόκειται για ισοτοπική πηγή φωτονίων, είτε πρόκειται για μηχανή παραγωγής ακτίνων -x. Ο έλεγχος για το αν αυτό το κριτήριο ικανοποιείται γίνεται εμμέσως ως εξής:

- i) έστω κατάλληλη αρχική τιμή του πάχους x_A (μεταβλητή thickness), κατά προτίμηση 0cm.

- ii) έστω κατάλληλη αρχική τιμή του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ_{effA} , (μεταβλητή meffre), κατά προτίμηση 1cm^{-1} ώστε στην αρχή να μην ικανοποιείται το κριτήριο (3.14γ) - (3.24γ)
- iii) υπολογίζεται για $\text{thickness} = \text{thickness} + \text{step}$ (υπενθυμίζεται ότι $\text{step} = \Delta x$) η απομένουσα πρωτεύουσα δέσμη φωτονίων έντασης I_A (μεταβλητή totalatten) που διασχίζει το στοιχείο αναφοράς, από τη σχέση (3.7) ή τη σχέση (3.17) ανάλογα αν πρόκειται για ισοτοπική πηγή φωτονίων, ή αν πρόκειται για μηχανή παραγωγής ακτίνων -x. Προσοχή χρειάζεται διότι τόσο η (3.7) όσο και η (3.17) χρησιμοποιούνται με τις ισοδύναμες μορφές τους, δηλ την:

$$I_A = \sum_{i=1}^n \pi_i I_0 \cdot e^{-\mu_{Ai} \cdot x_A} \quad (4.1)$$

και την

$$I_A = \sum_E \pi(E) I_0 e^{-\mu_A(E) x_A} \quad (4.2)$$

αντίστοιχα.

Κάθε γινόμενο $\pi_i I_0$ ή $\pi(E) I_0$ φυλάσσεται στον πίνακα atten1 με διάσταση counter1.

- iv) υπολογίζεται νέα τιμή του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ_{effA} , (μεταβλητή meffre), από την σχέση

$$\text{meffre} = (-1./\text{thickness}) * \ln (\text{totalatten}/\text{shower})$$

- v) γίνεται έλεγχος που ισοδυναμεί με τον έλεγχο της ικανοποίησης του κριτηρίου (3.14γ) - (3.24γ). Ο έλεγχος διαπιστώνει την αλήθεια της ανισότητας:

$$\text{thickness} < (\text{conv} * 0.693/\text{meffre})$$

- vi) αν η ανισότητα είναι αληθής, το x_{Amax} έχει προσδιοριστεί και φυλάσσεται στην μεταβλητή thickre και συνακόλουθα έχει προκύψει η απομένουσα πρωτεύουσα δέσμη I_A η οποία φυλάσσεται στην μεταβλητή remainderre

αν η ανισότητα δεν είναι αληθής τότε ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα (iii) Η διαδικασία (iii) έως (vi) επαναλαμβάνεται μέχρι ικανοποίησης της ανισότητας.

Υπολογισμός του πάχους x_B του ισοδύναμου στοιχείου

Ο ζητούμενος υπολογισμός γίνεται με τα ακόλουθα βήματα:

- i) έστω κατάλληλη αρχική τιμή του πάχους x_B (μεταβλητή thickness), κατά προτίμηση 0cm.
- ii) υπολογίζεται η απομένουσα πρωτεύουσα δέσμη φωτονίων έντασης I_B (μεταβλητή remaindereq) που διασχίζει το ισοδύναμο στοιχείο, από σχέσεις ανάλογες με τις (4.1) και (4.2) ανάλογα αν πρόκειται για ισοτοπική πηγή φωτονίων, ή αν πρόκειται για μηχανή παραγωγής ακτίνων -x, δηλαδή τις:

$$I_B = \sum_{i=1}^n \pi_i I_0 \cdot e^{-\mu_{Bi} \cdot x_B} \quad (4.3)$$

και την

$$I_B = \sum_E \pi(E) I_0 e^{-\mu_B(E) x_B} \quad (4.4)$$

αντίστοιχα.

Κάθε γινόμενο $\pi_i I_0$ ή $\pi(E) I_0$ φυλάσσεται στον πίνακα atten2 με διάσταση counter2.

- iii) γίνεται έλεγχος που διαπιστώνει την αλήθεια της ανισότητας:

$$\text{remainderre} - \text{remaindereq} < 0$$

- iv) αν η ανισότητα είναι ψευδής λαμβάνεται επόμενη τιμή του πάχους thickness από την αντικατάσταση

$$\text{thickness} = \text{thickness} + \text{step} \text{ (υπενθυμίζεται ότι } \text{step} = \Delta x \text{).}$$

- v) υπολογίζεται πάλι η απομένουσα πρωτεύουσα δέσμη φωτονίων έντασης I_B (μεταβλητή remaindereq) που διασχίζει το ισοδύναμο στοιχείο, από τη σχέση (4.3) ή τη σχέση (4.4). Η διαδικασία (iii) έως (v) επαναλαμβάνεται μέχρι ικανοποίησης της ανισότητας.

vi) αν η ανισότητα είναι αληθής, το thickness είναι έστω και λίγο μεγαλύτερο από το ζητούμενο x_B . Για να αποφευχθούν μεγάλες προς τα πάνω αποκλίσεις λαμβάνεται επόμενη τιμή του πάχους thickness από την αντικατάσταση

$$\text{thickness} = \text{thickness} - \text{step}$$

vii) ορίζεται λεπτότερο βήμα Δx με την μεταβλητή finestep = step / aaaa, όπου aaaa συνήθως 1000

viii) επαναλαμβάνονται τα βήματα (ii) έως (v) με τη διαφορά ότι στη θέση της μεταβλητής step χρησιμοποιείται η finestep. Όταν ικανοποιηθεί η ανισότητα η μεταβλητή thickness φυλάσσεται στην thickeq.

Υπολογισμός του ραδιογραφικού συντελεστή ισοδυναμίας

Εφαρμόζεται η σχέση (3.32) ή η ισοδυναμική της (3.44) και υπολογίζεται ο ζητούμενος ραδιογραφικός συντελεστής ισοδυναμίας μεταξύ του στοιχείου αναφοράς και του ισοδύναμου στοιχείου ως πηλίκο thickre / thickeq και φυλάσσεται στην μεταβλητή eqfactor.

Άλλοι υπολογισμοί

Στην περίπτωση ισοτοπικής πηγής φωτονίων εφαρμόζεται η σχέση (3.34) για το στοιχείο αναφοράς και η σχέση (3.36) για το ισοδύναμο στοιχείο. Με τις σχέσεις αυτές υπολογίζονται οι ισοδύναμοι συντελεστές εξασθένισης του στοιχείου αναφοράς και του ισοδύναμου στοιχείου και αποθηκεύονται στις μεταβλητές meffre και meffeq αντίστοιχα.

Στην περίπτωση μηχανής παραγωγής ακτίνων -x εφαρμόζεται η σχέση (3.46) για το στοιχείο αναφοράς και η σχέση (3.48) για το ισοδύναμο στοιχείο. Με τις σχέσεις αυτές υπολογίζονται οι ισοδύναμοι συντελεστές εξασθένισης του στοιχείου αναφοράς και του ισοδύναμου στοιχείου και αποθηκεύονται ομοίως στις μεταβλητές meffre και meffeq αντίστοιχα.

4.5 Παραδείγματα εφαρμογής

Στο Διάγραμμα 4.2 φαίνονται οι διάλογοι από ένα παράδειγμα εισαγωγής δεδομένων στον αντίστοιχο κώδικα από τον χρήστη, στην περίπτωση χρήσης ισοτοπικής πηγής φωτονίων. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4.2 έχει επιλεγεί ισότοπο Co-60, στοιχείο

αναφοράς ο χάλυβας ($Z = 26$) και ισοδύναμο στοιχείο ο μόλυβδος ($Z = 82$). Το βήμα του πάχους και το κριτήριο σύγκλισης ορίσθηκαν 0.01cm και 4 αντίστοιχα. Η εκτέλεση του σχετικού κώδικα έγινε άμεσα και ο συντελεστής ισοδυναμίας των δύο στοιχείων προέκυψε ίσος με 1.6 τιμή που συμφωνεί με την αντίστοιχη αναφερόμενη στην βιβλιογραφία (βλ. και στους πίνακες του 2^{ου} Κεφαλαίου). Ο κώδικας που επιτρέπει τέτοιους υπολογισμούς για ισοτοπικές πηγές δίνεται ως κείμενο αρχείου ".m", στο Παράρτημα της Διπλωματικής Εργασίας με τίτλο:

rsi_basic_isotope_v1_0.m

Περιέχει επεξηγηματικά σχόλια στα Αγγλικά.

Στο Διάγραμμα 4.3 φαίνονται οι διάλογοι από ένα παράδειγμα εισαγωγής δεδομένων στον αντίστοιχο κώδικα από τον χρήστη, στην περίπτωση χρήσης μηχανής παραγωγής ακτίνων -x. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4.3, έχει επιλεγεί τάση μηχανής παραγωγής ακτίνων -x 200kV, στοιχείο αναφοράς ο χάλυβας ($Z = 26$) και ισοδύναμο στοιχείο το αλουμίνιο ($Z = 13$). Το βήμα του πάχους και το κριτήριο σύγκλισης ορίσθηκαν 0.01cm και 4 αντίστοιχα.. Η εκτέλεση του κώδικα έγινε άμεσα και ο συντελεστής ισοδυναμίας των δύο στοιχείων προέκυψε ίσος με 0.16 τιμή που συμφωνεί με την αντίστοιχη αναφερόμενη στην βιβλιογραφία (βλ. και στους πίνακες του 2^{ου} Κεφαλαίου). Ο κώδικας που επιτρέπει τέτοιους υπολογισμούς για μηχανές παραγωγής ακτίνων -x δίνεται ως κείμενο αρχείου ".m", στο Παράρτημα της Διπλωματικής Εργασίας με τίτλο:

rsi_basic_xray_v1_0.m

Περιέχει επεξηγηματικά σχόλια στα Αγγλικά.

4.6 Διερεύνηση της τιμής του ϵ για τα κριτήρια σύγκλισης

Στην γραφική παράσταση του Διαγράμματος 4.4, δίνονται με γραφήματα θεωρητικά αποτελέσματα από ραδιογράφιση με Co-60 (για παράδειγμα):

(α) η εξέλιξη της μείωσης της πρωτεύουσας δέσμης φωτονίων που διαπερνά υλικό αναφοράς χάλυβα συναρτήσει του πάχους (σύμβολο "σταυρός"),

και

(β) η εξέλιξη της μείωσης της πρωτεύουσας δέσμης φωτονίων που διαπερνά ισοδύναμο υλικό μόλυβδο συναρτήσει του πάχους (σύμβολο "κύκλος"),

Η γραφική παράσταση του Διαγράμματος 4.4, μπορεί να παράγεται από τον κώδικα **rsi_basic_isotope_v1_0.m**, με λογισμικό γραφικών απεικονίσεων, π.χ. MS Excel ή Origin, αν ενεργοποιηθεί μια ειδική σειρά εντολών, οι οποίες βρίσκονται τώρα υπό μορφή σχολίων (comments), και εξάγουν από τον κώδικα αυτόν, σε αρχείο κειμένου, τα απαραίτητα δεδομένα.

Είναι φανερό από το Διάγραμμα 4.4 ότι υπάρχουν πάρα πολλοί συνδυασμοί παχών του υλικού αναφοράς και παχών του ισοδύναμου υλικού για τους οποίους η τιμή της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης είναι ίδια, με φυσική συνέπεια να υπάρχουν πάρα πολλές αντίστοιχες τιμές ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας, από τους οποίους θα πρέπει κάποιος να επιλέξει μία γενικά αντιπροσωπευτική τιμή.

Για την καλύτερη μελέτη του Διαγράμματος 4.4, το διάγραμμα αυτό μπορεί να μετασχηματισθεί σε άλλη πιθανώς πιο εξυπηρετική μορφή όπως στην παράσταση του Διαγράμματος 4.5, αν ο άξονας των τετημένων γίνει λογαριθμικός (γίνει δηλ. η γραφική παράσταση ημι-λογαριθμική). Το Διάγραμμα 4.5 επίσης επαληθεύει με πιο παραστατικό τρόπο ότι υπάρχουν πάρα πολλοί συνδυασμοί παχών του υλικού αναφοράς και παχών του ισοδύναμου υλικού για τους οποίους η τιμή της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης είναι ίδια, με φυσική συνέπεια να υπάρχουν πάρα πολλές αντίστοιχες τιμές ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας, από τους οποίους θα πρέπει κάποιος να επιλέξει μία γενικά αντιπροσωπευτική τιμή. Παρόλα αυτά, το Διάγραμμα 4.5, διακρίνεται σε τρεις διαφορετικές μεταξύ τους περιοχές:

(i) Την περιοχή μικρών παχών όπου τα γραφήματα παρουσιάζουν μικρή αλλά διαφορετική κλίση ως προς την οριζόντια (η περιοχή αυτή δεν διακρίνεται στο Διάγραμμα 4.4)

(ii) Την περιοχή μεγαλύτερων παχών όπου τα γραφήματα παρουσιάζουν μεγάλη αλλά περίπου την ίδια κλίση ως προς την οριζόντια (η αντίστοιχη περιοχή παχών είναι μάλλον ασαφής στο Διάγραμμα 4.4 και δεν μπορεί να προσδιορίζεται), και τέλος

(iii) Την περιοχή μεγάλων παχών όπου τα γραφήματα παρουσιάζουν μικρή αλλά διαφορετική κλίση ως προς την οριζόντια (η περιοχή αυτή δεν διακρίνεται στο Διάγραμμα 4.4).

Προκύπτει ότι:

- Αν ο υπολογισμός ενός ραδιογραφικού συντελεστή ισοδυναμίας γίνεται στην περιοχή "μικρών παχών" (δηλαδή από 0 έως 0.5 πάχος υποδιπλασιασμού του υλικού αναφοράς), μικρές μεταβολές στην τιμή της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης συνεπάγονται μεγάλες μεταβολές στο πάχος του υλικού αναφοράς και στο αντίστοιχο πάχος του ισοδύναμου υλικού, σε διαφορετικά ποσοστά το καθένα. Ως αποτέλεσμα, για περίπου την ίδια τιμή της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης μπορούν να εκτιμώνται πολύ διαφορετικές τιμές ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας.
- Αν ο υπολογισμός ενός ραδιογραφικού συντελεστή ισοδυναμίας γίνεται στην περιοχή "μεγάλων παχών" (>5 πάχη υποδιπλασιασμού του υλικού αναφοράς), μικρές μεταβολές στην τιμή της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης συνεπάγονται και πάλι μεγάλες μεταβολές στο πάχος του υλικού αναφοράς και στο αντίστοιχο πάχος του ισοδύναμου υλικού, σε διαφορετικά ποσοστά το καθένα. Ως αποτέλεσμα, για περίπου την ίδια τιμή της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης μπορούν να εκτιμώνται πολύ διαφορετικές τιμές ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας.
- Αν ο υπολογισμός ενός ραδιογραφικού συντελεστή ισοδυναμίας γίνεται στην περιοχή "μεγαλύτερων παχών" (από 1 έως 4 πάχη υποδιπλασιασμού), μεταβολές στην τιμή της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης συνεπάγονται αντίστοιχες μεταβολές στο πάχος του υλικού αναφοράς και στο αντίστοιχο πάχος του ισοδύναμου υλικού, με τα ίδια περίπου ποσοστά το καθένα. Ως αποτέλεσμα, για πολύ διαφορετικές τιμές της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης μπορούν να εκτιμώνται πολύ κοντινές τιμές ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας. Με μαθηματικό τρόπο το φαινόμενο αποδίδεται ως εξής (βλ. και στα Διαγράμματα 4.4 και 4.5):

Αν η τιμή της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης είναι I' τότε θα ισχύει για το υλικό αναφοράς "A":

$$I' = I_0 \cdot e^{-\mu'_{effA} \cdot x'_A} \quad (4.5)$$

Για το ισοδύναμο υλικό "B" ισχύει ομοίως:

$$I' = I_0 \cdot e^{-\mu'_{effB} \cdot x'_B} \quad (4.6)$$

Από την εξίσωση των (4.5) και (4.6) θα είναι:

$$\mu'_{effA} \cdot x'_A = \mu'_{effB} \cdot x'_B \quad (4.7)$$

ή ισοδύναμα:

$$\ln \left(\frac{\mu'_{effA}}{\mu'_{effB}} \right) = \ln \left(\frac{x'_B}{x'_A} \right) \quad (4.8)$$

ή ισοδύναμα:

$$\ln \left(\frac{\mu'_{effA}}{\mu'_{effB}} \right) = \ln x'_B - \ln x'_A \quad (4.9)$$

Αν η τιμή της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης είναι I'' τότε θα ισχύει ανάλογα ότι:

$$\ln \left(\frac{\mu''_{effA}}{\mu''_{effB}} \right) = \ln x''_B - \ln x''_A \quad (4.10)$$

Ακόμα και για σημαντικές μεταβολές της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης σε αυτή την περιοχή παχών των υλικών, ισχύει γενικά ότι:

$$\ln \left(\frac{\mu'_{effA}}{\mu'_{effB}} \right) \approx \ln \left(\frac{\mu''_{effA}}{\mu''_{effB}} \right) \quad (4.11)$$

πράγμα που τελικά σημαίνει, συνδυάζοντας και τις σχέσεις (4.8), (4.9) και (4.10) ότι πάντα, σε αυτήν την περιοχή παχών θα είναι:

$$P\Sigma I' = \frac{x'_A}{x'_B} \approx P\Sigma I'' = \frac{x''_A}{x''_B} \quad (4.12)$$

ακόμα και αν το x'_A και το x'_B διαφέρουν σημαντικά από τα x''_A και x''_B αντίστοιχα στην περιοχή από 1 έως 4 πάχη υποδιπλασιασμού.

Αυτό εξάλλου είναι εμμέσως προφανές από τις σχεδόν ίσες κλίσεις των γραφικών παραστάσεων στα Διαγράμματα 4.4 και 4.5 για αυτή την περιοχή παχών.

Από τη διαπραγμάτευση αυτή συμπεραίνεται ότι μία κατάλληλη τιμή για την παράμετρο ε του κριτηρίου σύγκλισης (3.14γ) σε ό,τι αφορά υλικά τα οποία ραδιογραφούνται με ισοτοπικές πηγές φωτονίων μπορεί να είναι κάποια οποιαδήποτε στην περιοχή από 1 έως 4 (1 έως 4 πάχη υποδιπλασιασμού).

Μάλιστα, αυτό στην πράξη σημαίνει ότι ο ζητούμενος ραδιογραφικός συντελεστής ισοδυναμίας για υλικά που ραδιογραφούνται με αυτόν τον τρόπο μπορεί πάντοτε να υπολογίζεται από τον λόγον των παχών υποδιπλασιασμού τους. Δηλαδή:

$$P\Sigma I = \frac{HVL_A}{HVL_B} \quad (4.13)$$

Η περίπτωση ραδιογράφισης με φωτόνια ακτίνων -x είναι λίγο διαφορετική. Στην γραφική παράσταση του Διαγράμματος 4.6, δίνονται με γραφήματα (για παράδειγμα):

(α) η εξέλιξη της μείωσης της πρωτεύουσας δέσμης φωτονίων που διαπερνά χάλυβα συναρτήσει του πάχους (σύμβολο "σταυρός")

και

(β) η εξέλιξη της μείωσης της πρωτεύουσας δέσμης φωτονίων που διαπερνά αλουμίνιο συναρτήσει του πάχους (σύμβολο "κύκλος")

Η γραφική παράσταση του Διαγράμματος 4.6 μπορεί να παράγεται από τον κώδικα **rsi_basic_xray_v1_0.m**, αν ενεργοποιηθεί μια ειδική σειρά εντολών, οι οποίες βρίσκονται τώρα υπό μορφή σχολίων (comments). Επίσης τα δεδομένα της γραφικής παράστασης μπορούν εύκολα να εξάγονται από τον ίδιο κώδικα υπό μορφή πίνακα ή αρχείου κειμένου, με μικρές μετατροπές κατ' αναλογία με τον τρόπο που αυτό γίνεται στον κώδικα **rsi_basic_isotope_v1_0.m**.

Η γραφική παράσταση του Διαγράμματος 4.6 μπορεί να μετασχηματισθεί σε άλλη πιθανώς πιο εξυπηρετική μορφή όπως στην παράσταση του Διαγράμματος 4.7, αν ο άξονας των τετμημένων γίνει λογαριθμικός (γίνει δηλ. η γραφική παράσταση ημι-λογαριθμική). Το Διάγραμμα 4.7 σε αναλογία με το Διάγραμμα 4.5 επαληθεύει με πιο παραστατικό τρόπο ότι υπάρχουν πάρα πολλοί συνδυασμοί παχών του υλικού αναφοράς και παχών του ισοδύναμου υλικού για τους οποίους η τιμή της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης είναι ίδια, με φυσική συνέπεια να υπάρχουν πάρα πολλές αντίστοιχες τιμές ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας, από τους οποίους θα πρέπει κάποιος να επιλέξει μία γενικά αντιπροσωπευτική τιμή. Παρόλα αυτά, το Διάγραμμα 4.7 (όπως περίπου και το Διάγραμμα 4.5) διακρίνεται σε τρεις διαφορετικές μεταξύ τους περιοχές:

(I) Την περιοχή μικρών παχών όπου τα γραφήματα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση τιμών ΡΣΙ καθώς δεν είναι δυνατόν να υπολογίζονται δεδομένα εξασθένησης για τον χάλυβα.

(II) Την περιοχή μεγαλύτερων παχών όπου τα γραφήματα παρουσιάζουν μεγάλη και διαφορετική κλίση ως προς την οριζόντια (η αντίστοιχη περιοχή παχών είναι μάλλον ασαφής στο Διάγραμμα 4.6 και δεν μπορεί να προσδιορίζεται), και τέλος

(III) Την περιοχή μεγάλων παχών όπου τα γραφήματα παρουσιάζουν μικρή αλλά διαφορετική κλίση ως προς την οριζόντια (η περιοχή αυτή δεν διακρίνεται στο Διάγραμμα 4.6).

Προκύπτει ότι:

- Ο υπολογισμός ενός ραδιογραφικού συντελεστή ισοδυναμίας δεν είναι δυνατόν να γίνεται στην περιοχή "μικρών παχών" (δηλαδή από 0 έως 0.5 πάχος υποδιπλασιασμού του υλικού αναφοράς).
- Αν ο υπολογισμός ενός ραδιογραφικού συντελεστή ισοδυναμίας γίνεται στην περιοχή "μεγάλων παχών" (>5 πάχη υποδιπλασιασμού του υλικού αναφοράς), μικρές μεταβολές στην τιμή της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης συνεπάγονται και πάλι μεγάλες μεταβολές στο πάχος του υλικού αναφοράς και στο αντίστοιχο πάχος του ισοδύναμου υλικού, σε διαφορετικά ποσοστά το καθένα. Ως αποτέλεσμα, για περίπου την ίδια τιμή της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης μπορούν να εκτιμώνται πολύ διαφορετικές τιμές ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας.
- Αν ο υπολογισμός ενός ραδιογραφικού συντελεστή ισοδυναμίας γίνεται στην περιοχή "μεγαλύτερων παχών" (από 1 έως 4 πάχη υποδιπλασιασμού), επίσης μικρές μεταβολές στην τιμή της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης συνεπάγονται μεταβολές στο πάχος του υλικού αναφοράς και στο αντίστοιχο πάχος του ισοδύναμου υλικού, σε διαφορετικά ποσοστά το καθένα. Ως αποτέλεσμα, για περίπου την ίδια τιμή της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης μπορούν να εκτιμώνται και πάλι πολύ διαφορετικές τιμές ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας.

Από τη διαπραγμάτευση αυτή συμπεραίνεται ότι μία κατάλληλη τιμή για την παράμετρο ϵ του κριτηρίου σύγκλισης (3.24γ) σε ό,τι αφορά υλικά τα οποία ραδιογραφούνται με φωτόνια ακτίνων -x, δεν μπορεί να είναι οποιαδήποτε στην

περιοχή από 1 έως 4, όπως διαπιστώθηκε για την περίπτωση ραδιογράφησης με φωτόνια από ισοτοπικές πηγές, αλλά πρέπει να επιλεγθεί.

Μία κατάλληλη τιμή για την παράμετρο ϵ του κριτηρίου σύγκλισης (3.24γ) μπορεί να είναι κάποια στην περιοχή από 3 έως 4, και μετά από δοκιμές επιλέχθηκε όπως ήδη αναφέρθηκε και πιο πάνω αλλά και στο 3^ο Κεφάλαιο η τιμή "4". Η τιμή αυτή μπορεί φυσικά να χρησιμοποιείται ακριβώς ίδια και για την παράμετρο ϵ του κριτηρίου (3.14γ) και είναι αυτή με την οποία -σε ό,τι αφορά ραδιογράφηση με ακτίνες -x, επιτυγχάνεται και η καλύτερη συμφωνία των ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας που δίνονται στην βιβλιογραφία με αυτούς που υπολογίζονται στην παρούσα Διπλωματική Εργασία.

4.7 Σύντομη σύγκριση βιβλιογραφίας και αποτελεσμάτων κωδίκων

Μετά την ανάλυση τυπικών παραδειγμάτων που πραγματοποιήθηκε στην παράγραφο 4.4, αλλά και την ποιοτική εξήγηση για την καταλληλότερη τιμή της παραμέτρου ϵ των κριτηρίων σύγκλισης, οι πιο πάνω βασικοί κώδικες χρησιμοποιήθηκαν για υπολογισμούς αντίστοιχους με αυτούς των Πινάκων 2.1, 2.2α και 2.3 του 2^{ου} Κεφαλαίου, με σκοπό να διαπιστωθεί αν οι κώδικες υπολογίζουν τιμές ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας κοντά σε αυτές που αναφέρονται στην βιβλιογραφία. Φυσικά οι υπολογισμοί έγιναν μόνο για στοιχεία και όχι για οποιαδήποτε μίγματα (ή ενώσεις ή κράματα) αναφέρονται στους Πίνακες αυτούς. Όπως έχει ήδη σημειωθεί οι υπολογισμοί ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας για μίγματα πρέπει να γίνονται με ειδικό τρόπο ο οποίος θα αναλυθεί στο επόμενο 5^ο Κεφάλαιο.

Από τους υπολογισμούς προέκυψαν οι Πίνακες 4.1 έως και 4.3. Παρατηρείται ότι οι Πίνακες αυτοί παρουσιάζουν πολύ καλή σύμπτωση τιμών με τους αντίστοιχους τους 2.1, 2.2α και 2.3 του 2^{ου} Κεφαλαίου. Εξαιρείται η περίπτωση του μολύβδου σε ό,τι αφορά ακτίνες -x μέχρι 300kV για στοιχείο αναφοράς τον χάλυβα (σύγκρινε τους Πίνακες 2.2α και 4.2 γραμμή με γραμμοσκίαση), όπου παρατηρούνται γενικά χαμηλότερες τιμές από την βιβλιογραφία, και η περίπτωση του μολύβδου και του ουρανίου σε ό,τι αφορά ισοτοπικές πηγές φωτονίων της χαμηλότερης ενέργειας φωτονίων (Ir-192) για στοιχείο αναφοράς τον χάλυβα (σύγκρινε τους Πίνακες 2.3 και 4.3 γραμμή με γραμμοσκίαση), όπου και πάλι παρατηρείται χαμηλότερη τιμή.

Οι διαφορές σε ό,τι αφορά τα φωτόνια των ακτίνων -x ερμηνεύονται αρκετά εύκολα αν ληφθούν υπόψη τα ακόλουθα:

(α) Για τον μόλυβδο:

- είναι δύσκολο να υπάρξει μόλυβδος καθαρός από προσμίξεις και επίπεδος σε λεπτό πάχος για την πραγματοποίηση πειραμάτων ακριβείας για υπολογισμούς ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας σε χαμηλές ενέργειες φωτονίων
- μια ισοδύναμη ραδιογράφιση με μόλυβδο και μέταλλο αναφοράς χάλυβα απαιτεί χάλυβα πολλαπλάσιου πάχους
- είναι δύσκολο να γίνουν πειράματα ακριβείας για υπολογισμό ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας χάλυβα και μολύβδου, τα οποία λόγω πολύ υψηλής εξασθένησης στον μόλυβδο, να μην βρίσκονται στην περιοχή "μικρών παχών" των Διαγραμμάτων 4.4 - 4.5, και 4.6 - 4.7. Σε αυτήν την περιοχή "μικρών παχών" είναι φανερό ότι οι ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας που προκύπτουν είναι πολύ μεγαλύτεροι από εκείνους που προκύπτουν στην περιοχή "μεγαλύτερων παχών".
- ειδικά για την περίπτωση του φάσματος ακτίνων -x των 100kV, αυτό δεν περιέχει από κατασκευής του (βλ. και στο 3^ο Κεφάλαιο, §3.5.2) τα φωτόνια χαμηλών ενεργειών έως και 10 keV. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη οι σημαντικές αιχμές απορρόφησης του μολύβδου για τα φωτόνια που είναι μικρότερα των 10keV, βλ. και το σχετικό Διάγραμμα 4.8). Παρόλα αυτά δεν φαίνεται ότι η τιμή που παρέχεται στον Πίνακα 4.2 για τον υπόψη ραδιογραφικό συντελεστή ισοδυναμίας να είναι λάθος, διότι σαφώς επαληθεύεται αν για τα 100kV εφαρμοσθούν οι σχέσεις που δίνουν ο Simpkin (1983, 1995) και ο Archer (1994) και συνοψίζονται στον Shultis (2000). Αυτές είναι:

$$\begin{aligned} & \{ \text{ποσοστό εξασθένησης πρωτεύουσας δέσμης για χάλυβα (\%)} \} = \\ & = \left[\left(1 + \frac{2.42}{0.3415} \right) e^{0.3415 \cdot 0.7645 \cdot x} - \frac{2.42}{0.3415} \right]^{-1/0.7645} \end{aligned} \quad (4.14)$$

και

$$\begin{aligned} & \{ \text{ποσοστό εξασθένησης πρωτεύουσας δέσμης για μόλυβδο (\%)} \} = \\ & = \left[\left(1 + \frac{15.28}{2.5} \right) e^{2.5 \cdot 0.7557 \cdot x} - \frac{15.28}{2.5} \right]^{-1/0.7557} \end{aligned} \quad (4.15)$$

- για τις άλλες περιπτώσεις φασμάτων -x υψηλότερων ενεργειών μπορεί να θεωρείται ότι ο Πίνακας 4.2 είναι επίσης ορθότερος έναντι της βιβλιογραφίας, αν ληφθεί υπόψη ότι (i) οι υπολογιζόμενες τιμές είναι αρκετά κοντύτερα στις βιβλιογραφικές, (ii) τα φωτόνια χαμηλών ενεργειών σε αυτές τις περιπτώσεις δεν μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο διότι έτσι και αλλιώς είναι μικρό ποσοστό του συνολικού φάσματος και (iii) οι βιβλιογραφικές τιμές παρουσιάζουν μεγάλη κύμανση έτσι και αλλιώς, διότι προφανώς έχουν προκύψει από πειράματα στην περιοχή "μικρών παχών".

(β) Για το ουράνιο (παρομοίως):

- είναι δύσκολο να υπάρξει ουράνιο καθαρό και σε λεπτό πάχος για την πραγματοποίηση πειραμάτων ακριβείας για υπολογισμούς ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας σε οποιεσδήποτε ενέργειες φωτονίων
- μια ισοδύναμη ραδιογράφιση με ουράνιο και μέταλλο αναφοράς χάλυβα απαιτεί χάλυβα πολλαπλάσιου πάχους
- είναι δύσκολο να γίνουν πειράματα ακριβείας για υπολογισμό ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας χάλυβα και ουρανίου, τα οποία λόγω πολύ υψηλής εξασθένισης στο ουράνιο, να μην βρίσκονται στην περιοχή "μικρών παχών" των Διαγραμμάτων 4.4 - 4.5, και 4.6 - 4.7. Σε αυτήν την περιοχή "μικρών παχών" είναι φανερό ότι οι ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας που προκύπτουν είναι πολύ μεγαλύτεροι από εκείνους που προκύπτουν στην περιοχή "μεγαλύτερων παχών".

Οι διαφορές σε ό,τι αφορά τα φωτόνια από Ir-192 χρειάζονται μεγαλύτερη διερεύνηση η οποία γίνεται στο 5^ο Κεφάλαιο.

Πάντως, αν σε όλες τις περιπτώσεις θεωρητικών υπολογισμών είναι $\varepsilon = 4$ οι τυχόν διαφορές ερμηνεύονται αρκετά εύκολα αν ληφθούν υπόψη τα ακόλουθα:

Είναι αναμενόμενο ότι με την αύξηση της ενέργειας των φωτονίων ενός φάσματος ακτίνων -x οι ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας του ουρανίου να μειώνονται. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία (βλ. και Quinn, 1980) μία ισοτοπική πηγή φωτονίων Ir-192 εκπέμπει φωτόνια ισοδύναμης ενέργειας ~400 - 450 keV (βλ. και Πίνακα 3.2 και General Electric, 2007), τα οποία προσομοιώνονται από μία μηχανή παραγωγής ακτίνων -x των 600kV, αν ληφθεί ως δεδομένο ότι η ισοδύναμη ενέργεια φωτονίων

μίας μηχανής παραγωγής ακτίνων -x υπολογίζεται στο 60-70% της μέγιστης³. Επίσης αν γίνει δεκτό ότι η τιμή του ραδιογραφικού συντελεστή ισοδυναμίας του ουρανίου με τον χάλυβα για μηχανή παραγωγής ακτίνων -x των 1MV είναι 4 (βλ. και Πίνακα 2.2β), αυτό σημαίνει ότι η τιμή "4" αναφέρεται σε ισοδύναμη ενέργεια φωτονίων 600 έως 700 keV. Συνάγεται από αυτά ότι η αντίστοιχη τιμή "6.3" του Πίνακα 4.3 για ισοτοπική πηγή φωτονίων Ir-192 (φωτόνια ισοδύναμης ενέργειας ~400keV) είναι πολύ λογικότερη από αυτήν που αναφέρεται στην βιβλιογραφία (βλ. και στον Πίνακα 2.3) διότι προφανώς η τελευταία έχει προκύψει από πειράματα στην περιοχή "μικρών παχών" ή σε περιοχή παχών μικρότερου ε.

4.8 Σχόλια και συμπεράσματα

Στο παρόν 4^ο Κεφάλαιο, παρουσιάστηκε, η αλγοριθμική διαδικασία και οι αντίστοιχοι κώδικες H/Y σε περιβάλλον MATLAB, που μπορούν να οδηγήσουν στον προσεγγιστικό θεωρητικό υπολογισμό ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας, ανάλογα αν πρόκειται για ισοτοπική πηγή φωτονίων, ή αν πρόκειται για μηχανή παραγωγής ακτίνων -x. Για την διακρίβωση της καλής λειτουργίας και του αλγορίθμου και των κωδίκων, πραγματοποιήθηκε επιπλέον, αναπαραγωγή σημαντικού μέρους των Πινάκων 2.1, 2.2α και 2.3 που παρουσιάστηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο. Η σύγκριση αυτή υπήρξε γενικά επιτυχής.

Σημειώνεται, ότι στο πλαίσιο της διαπραγμάτευσης και των δοκιμών καλής λειτουργίας του αλγορίθμου και των αντιστοιχών κωδίκων, δοκιμάστηκαν εκτός από τα κριτήρια (3.14γ) - (3.24γ) που προτιμήθηκαν και τα κριτήρια (3.14α) - (3.24α) και (3.14β) - (3.24β). Διαπιστώθηκε ότι τα κριτήρια (3.14α) - (3.24α), γενικά δεν λειτουργούν, προφανώς για τους λόγους που εξηγήθηκαν ήδη στο 3^ο Κεφάλαιο. Τα κριτήρια (3.14β) - (3.24β) λειτουργούν ικανοποιητικά αν $\delta = 0.002$ και ο ατομικός αριθμός του στοιχείου αναφοράς είναι "αρκετά κοντά" σε αυτόν του ισοδύναμου στοιχείου.

Οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν με την εφαρμογή των κριτηρίων (3.14γ) - (3.24γ) και με τιμή της παραμέτρου ε ίση με "4", κυρίως για χαμηλές ενέργειες φωτονίων και ισοδύναμα στοιχεία μεγάλου ατομικού αριθμού, μεταξύ των Πινάκων 2.1, 2.2α και 2.3 της βιβλιογραφίας και των Πινάκων 4.1, 4.2 και 4.3 των εδώ υπολογισμών εξηγήθηκαν με ικανοποιητική επάρκεια. Μάλιστα, φαίνεται ότι οι Πίνακες 4.1, 4.2

³ Πρόκειται για γενικευμένο κανόνα "τριών δακτύλων".

και 4.3 είναι με βάση αυτές τις εξηγήσεις ορθότεροι. Ειδικά για την περίπτωση των ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας μεταξύ χάλυβα και μολύβδου όπως εξετάζονται εδώ, για ακτίνες -x από μηχανή των 100kV με στόχο βολφραμίου, ούτε εκπέμπονται χαρακτηριστικά φωτόνια από το στόχο ενέργειας μικρότερης από 10keV (είναι αδυναμία της προσομοίωσης του φάσματος, βλ. και στο 3^ο Κεφάλαιο, §3.5.2), ούτε προφανώς απορροφώνται από τον χάλυβα ή τον μολύβδο με αποτέλεσμα αυτά τα χαμηλής ενέργειας φωτόνια να μην συμμετέχουν καθόλου στους υπολογισμούς και ως εκ τούτου να μην συνυπολογίζονται. Δεδομένου ότι γενικά για την περίπτωση στόχου βολφραμίου σε μηχανή παραγωγής ακτίνων -x των 100kV είναι βιβλιογραφικά δεκτό ότι τα χαρακτηριστικά φωτόνια του βολφραμίου είναι το 20% του συνόλου των φωτονίων που αποδίδει (τα υπόλοιπα 80% είναι φωτόνια από πέδηση, βλ. π.χ. και Podgorsak, 2005) προφανώς είναι ως ποσοστό ελάχιστα τα χαρακτηριστικά φωτόνια που έχουν ενέργεια κάτω από 10keV και ο μη συνυπολογισμός τους δεν δημιουργεί πρόβλημα. Για αυτό το λόγο εξάλλου συμφωνούν και τα αποτελέσματα από τις εξισώσεις (4.14) και (4.15) με τους υπολογισμούς του σχετικού κώδικα της Διπλωματικής Εργασίας.

Όμως, το πλέον σημαντικό συμπέρασμα στα πλαίσια του 4^{ου} Κεφαλαίου είναι ότι όταν γίνεται είτε πειραματικός, είτε θεωρητικός προσδιορισμός ενός ραδιογραφικού συντελεστή ισοδυναμίας, πρέπει το αποτέλεσμα να συνοδεύεται με αναφορά στο πάχος τουλάχιστον ενός από τα ισοδύναμα υλικά ως ποσοστό του αντίστοιχου πάχους υποδιπλασιασμού. Δυστυχώς τέτοιες αναφορές λείπουν από την βιβλιογραφία, με αποτέλεσμα πολλοί από τους ραδιογραφικούς συντελεστές ισοδυναμίας που δίνονται εκεί να μην ερμηνεύονται εύκολα.

Στο επόμενο 5^ο Κεφάλαιο, επαληθεύεται με επιπλέον ποσοτικούς τρόπους η καλή λειτουργία των κωδίκων, αναπτύσσονται οι μέθοδοι εξαγωγής των ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας για αέρια και για μίγματα ή κράματα ή ενώσεις, και τέλος εξετάζονται πλήρως οι δυνατότητες των κωδίκων και δίνονται τα αποτελέσματά του για όλες τις δυνατές περιπτώσεις συνδυασμών στοιχείων αναφοράς και ισοδύναμων στοιχείων που ενδιαφέρουν, όπως αυτά αναφέρθηκαν στο 3^ο Κεφάλαιο. Φυσικά εννοείται ότι τη θέση των στοιχείων αναφοράς ή των ισοδύναμων στοιχείων μπορεί να έχουν και αέρια και μίγματα ή ενώσεις ή κράματα.

ΠΙΝΑΚΕΣ 4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

	50kV	100kV
Μαγνήσιο	0.55	0.60
Αλουμίνιο	1.0	1.0
Αλουμίνιο τύπου 2024		
Χάλυβας	-	11
Ανοξείδωτος Χάλυβας 18-8		
Χαλκός	-	16
Inconel		

Πίνακας 4.1

ΡΣΙ για ακτίνες -x χαμηλών ενεργειών με μέταλλο αναφοράς το αλουμίνιο, όπως υπολογίζονται από τον κώδικα στη θέση των αντίστοιχων τιμών που αναφέρονται στην βιβλιογραφία (βλ. και στο 2^ο Κεφάλαιο).

Με γκρι μίγματα για τα οποία δεν έγιναν υπολογισμοί.

(όλοι οι υπολογισμοί για $\epsilon = 4$)

	50kV	100kV	150kV	200kV	250kV	300kV
Μαγνήσιο	0.029	0.06	0.08	0.10	-	-
Αλουμίνιο	0.053	0.09	0.13	0.16	0.18	0.20
Αλουμίνιο τύπου 2024						
Ντουραλουμίνιο (4% Cu)						
Τιτάνιο	-	-	0.41	-	-	-
Χάλυβας	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Ανοξειδωτος χάλυβας 18-8						
Χαλκός	1.49	1.47	1.42	1.36	1.32	1.29
Ψευδάργυρος	-	-	1.23	-	-	-
Ορείχαλκος						
Inconel						
Monel						
Ζιρκόνιο	-	2.4	2.2	-	1.7	-
Μόλυβδος	-	6.6	9.8	11.5	11.9	11.5
Άφνιο	-	-	-	-	-	-
Ουράνιο	-	-	-	-	20.4	-

Πίνακας 4.2

ΡΣΙ με μέταλλο αναφοράς τον χάλυβα για πηγές ακτίνων -x διαφόρων ενεργειών μέχρι 300kV, όπως υπολογίζονται από τον κώδικα στη θέση των αντίστοιχων τιμών που αναφέρονται στην βιβλιογραφία (βλ. και στο 2^ο Κεφάλαιο).

Με γκρι μίγματα για τα οποία δεν έγιναν υπολογισμοί.

(όλοι οι υπολογισμοί για $\epsilon = 4$)

	Ir-192	Co-60	Cs-137	Ra-226
Μαγνήσιο	-	-	-	-
Αλουμίνιο	0.34	0.35	0.35	0.35
Αλουμίνιο τύπου 2024				
Ντουραλουμίνιο (4% Cu)				
Τιτάνιο	0.55	0.56	0.57	
Χάλυβας	1.0	1.0	1.0	1.0
Ανοξειδωτος χάλυβας 18-8				
Χαλκός				
Ψευδάργυρος	0.9	0.9	0.8	0.9
Ορείχαλκος				
Inconel				
Monel				
Ζιρκόνιο	0.9	0.8	-	-
Μόλυβδος	3.1	1.6	2.2	-
Άφνιο				
Ουράνιο	6.3	2.8	4.2	-

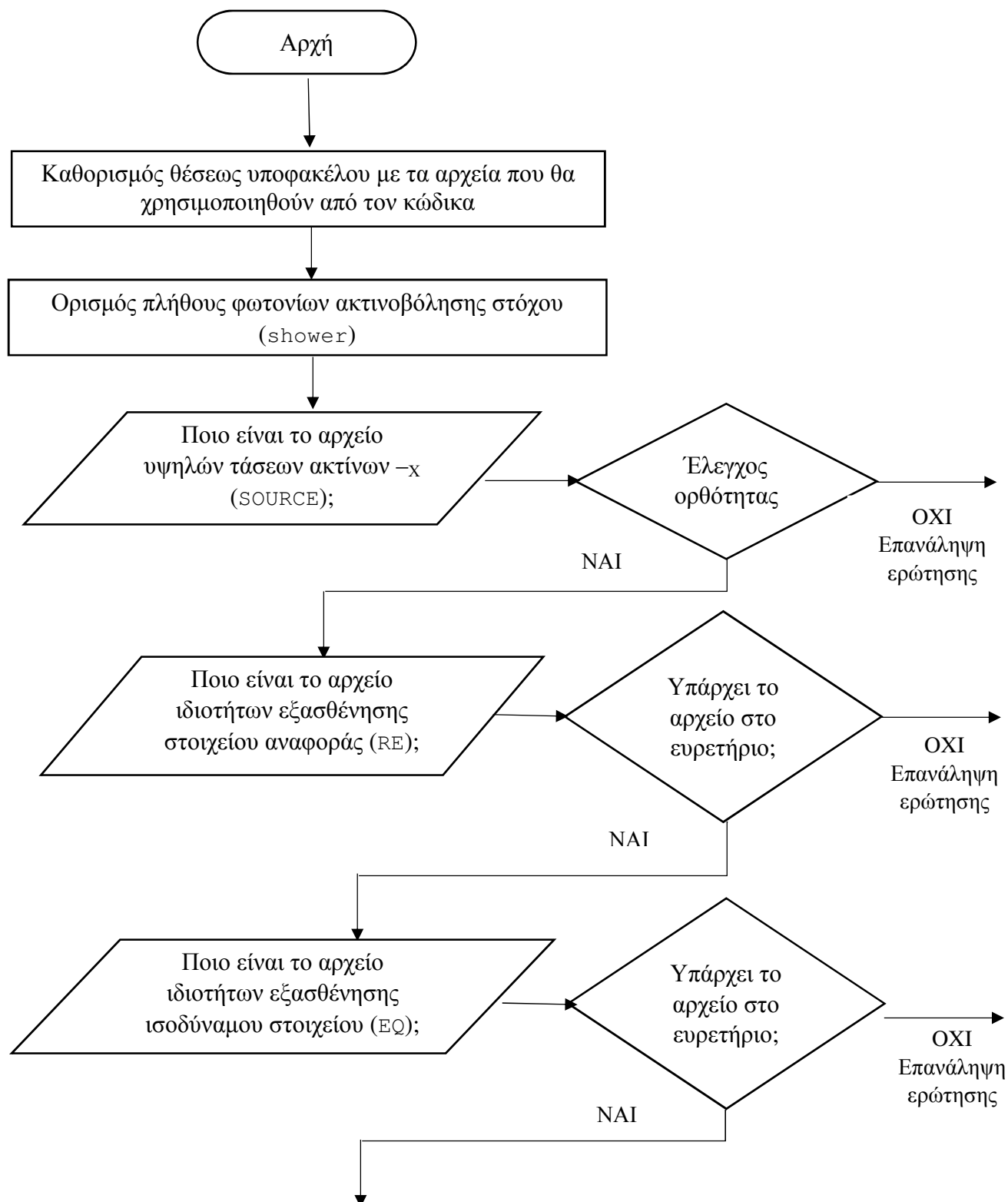
Πίνακας 4.3

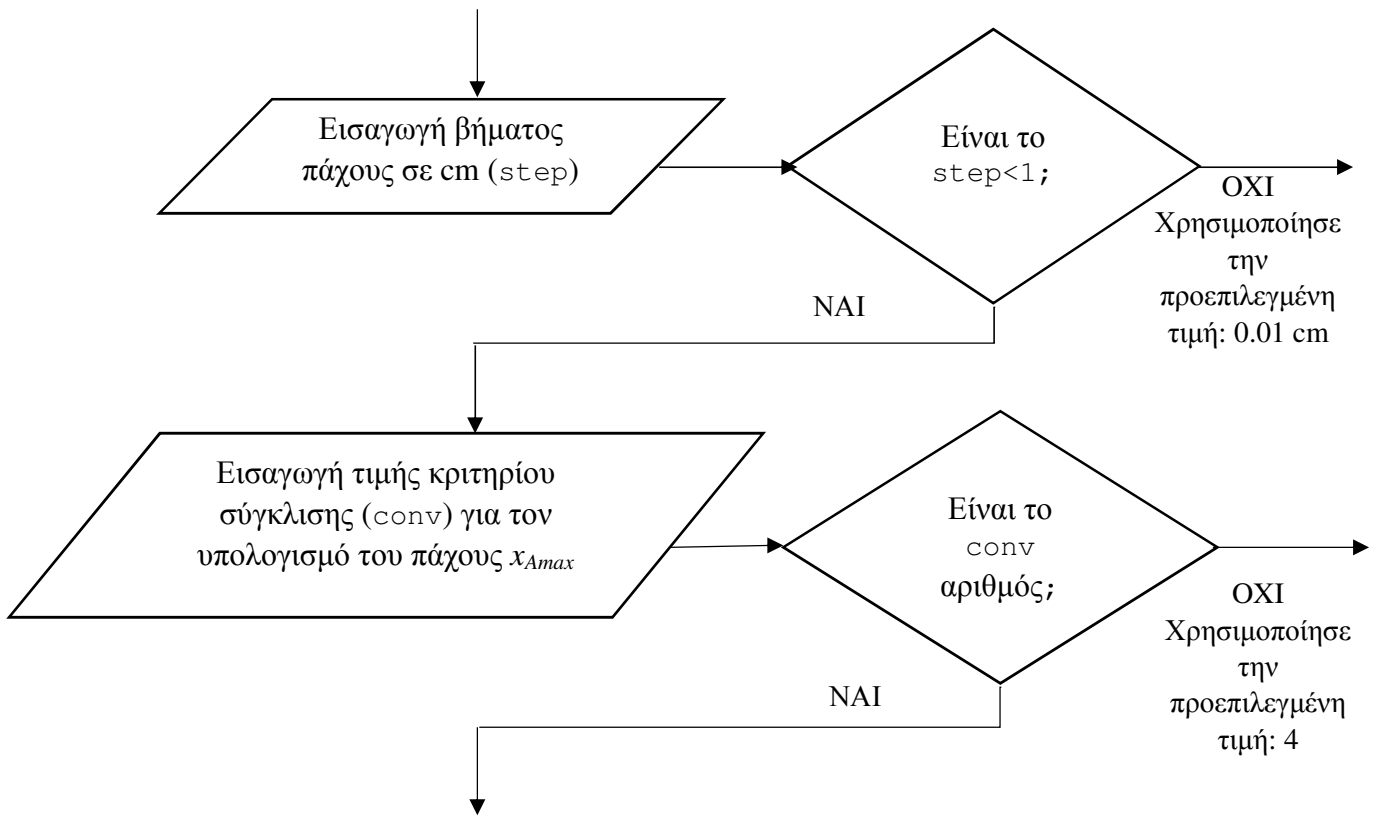
ΡΣΙ με μέταλλο αναφοράς τον χάλυβα για ισοτοπικές πηγές, όπως υπολογίζονται από τον κώδικα στη θέση των αντίστοιχων τιμών που αναφέρονται στην βιβλιογραφία (βλ. και στο 2^ο Κεφάλαιο).

**Με γκρι μίγματα για τα οποία δεν έγιναν υπολογισμοί.
(όλοι οι υπολογισμοί για $\epsilon = 4$)**

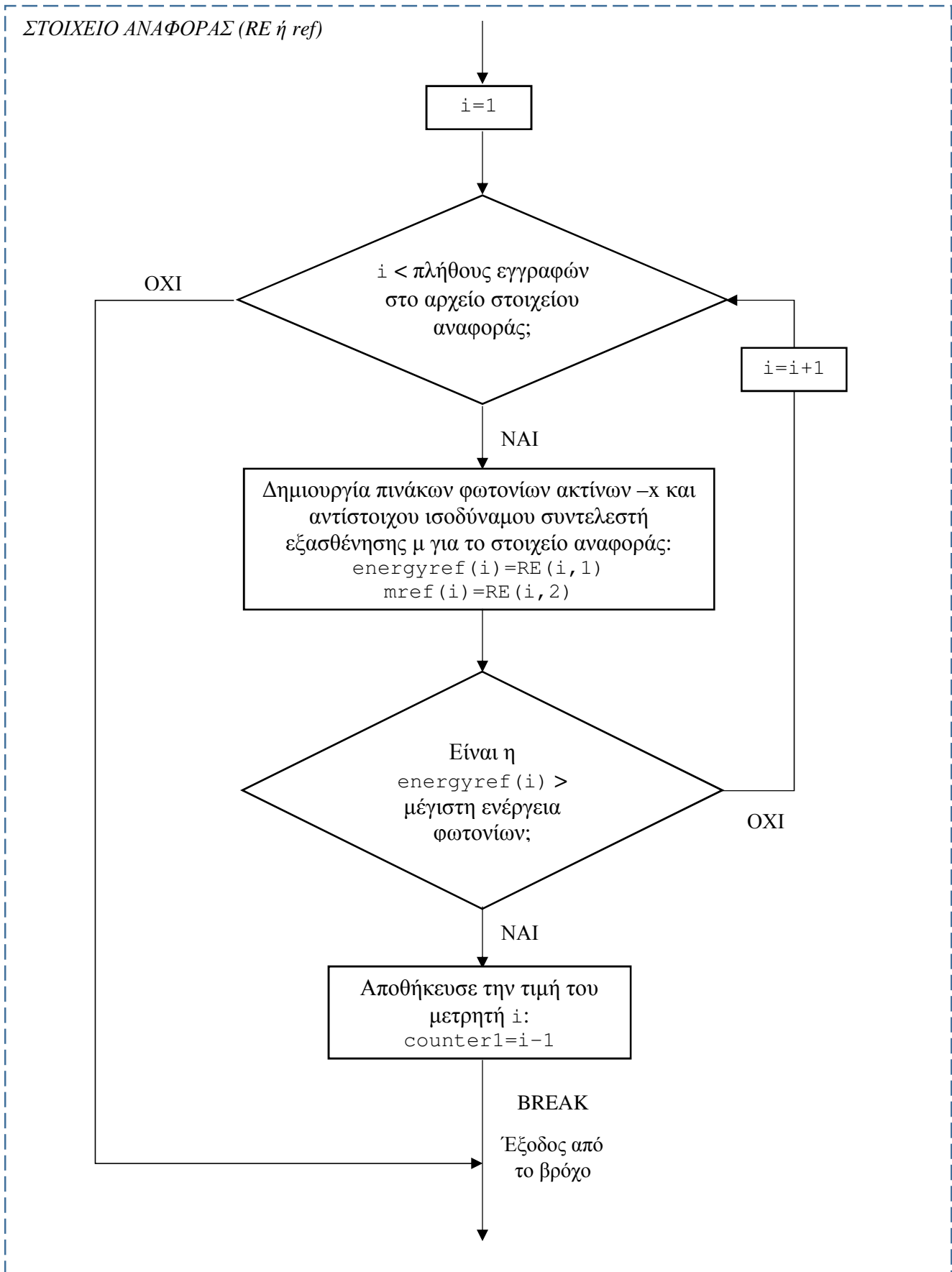
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ 4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Διάγραμμα 4.1 (Διάγραμμα Ροής) - 1. Εισαγωγή δεδομένων

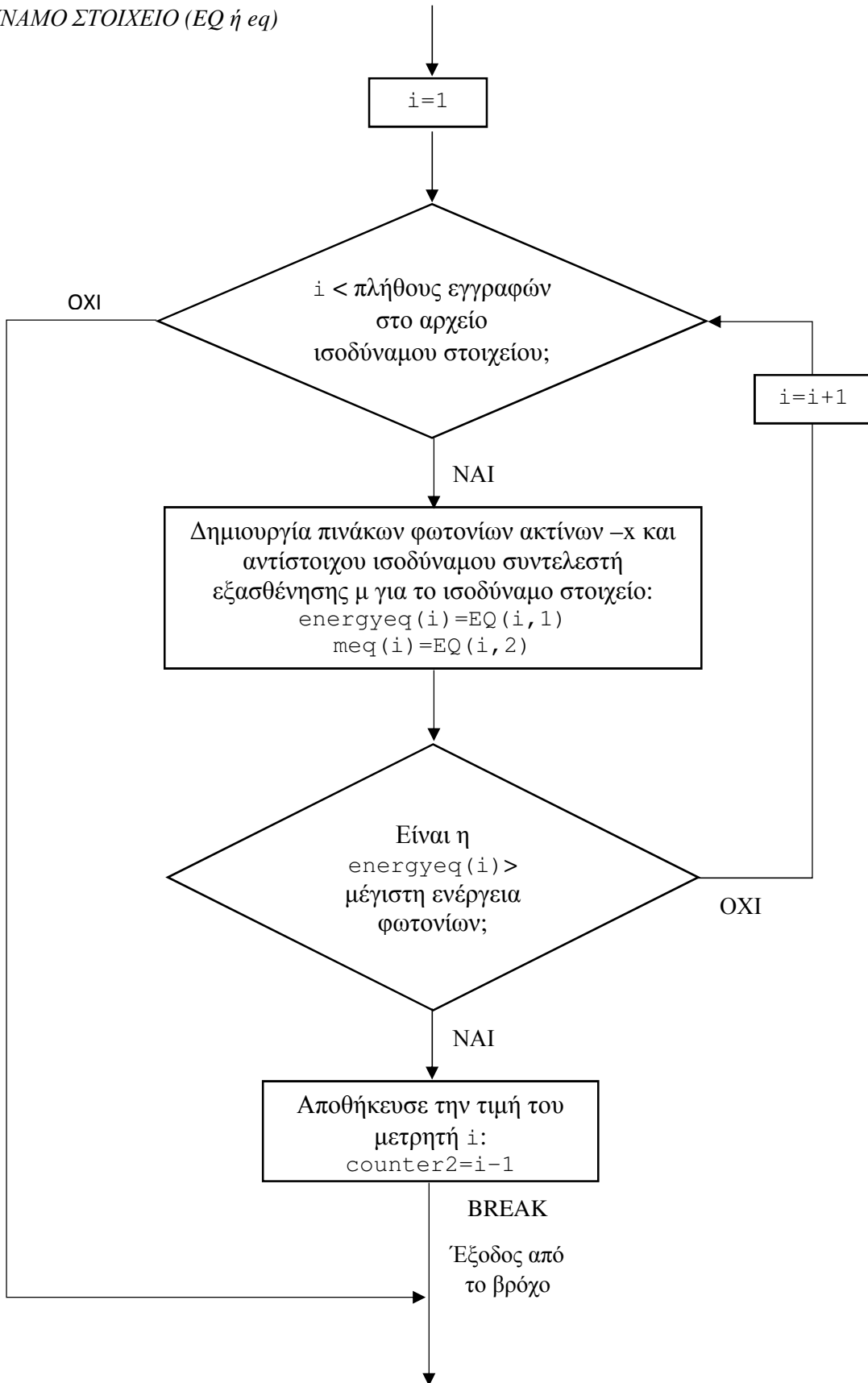




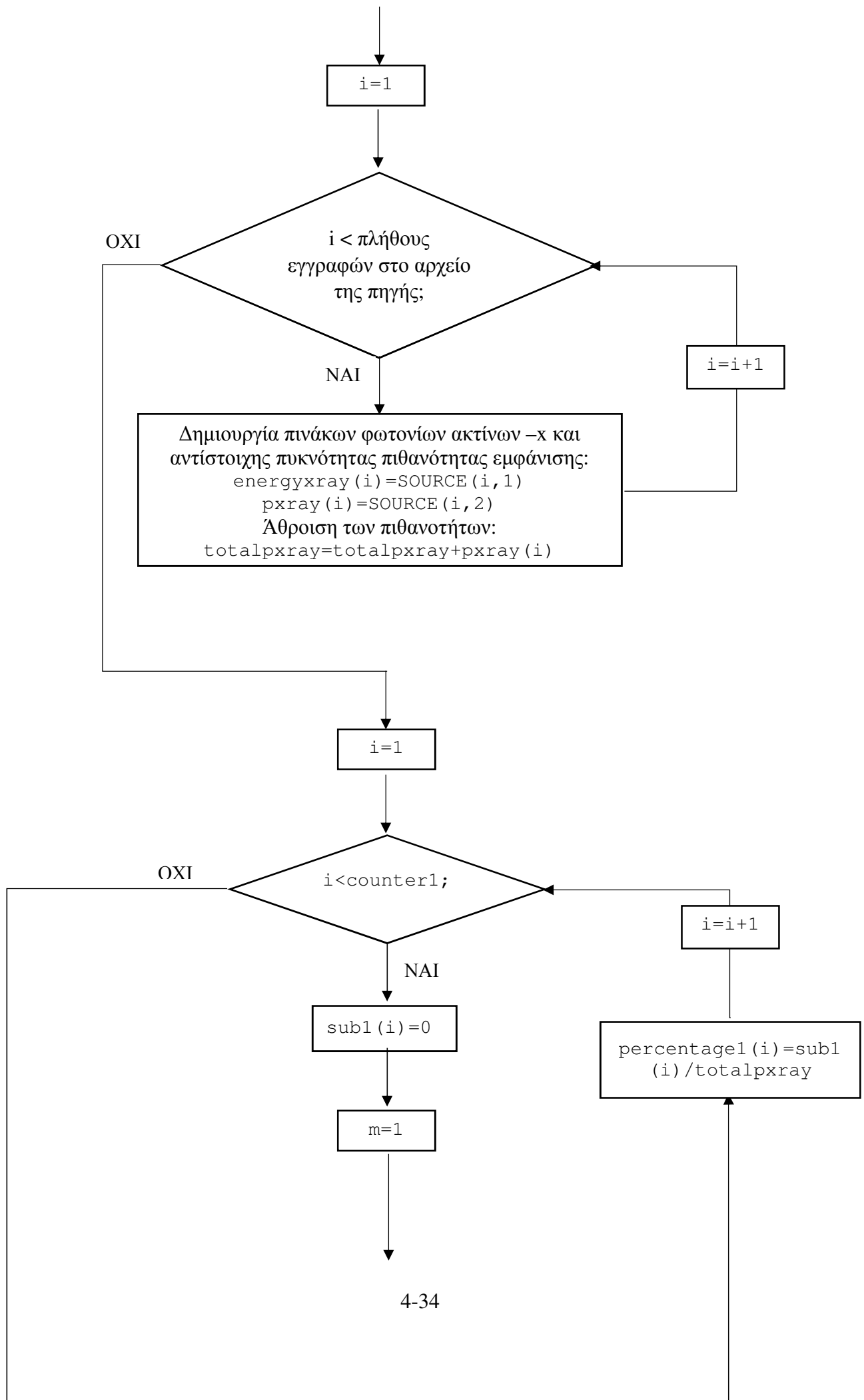
Διάγραμμα 4.1 (Διάγραμμα Ροής) - 2. Ανάγνωση και αρχική επεξεργασία των δεδομένων

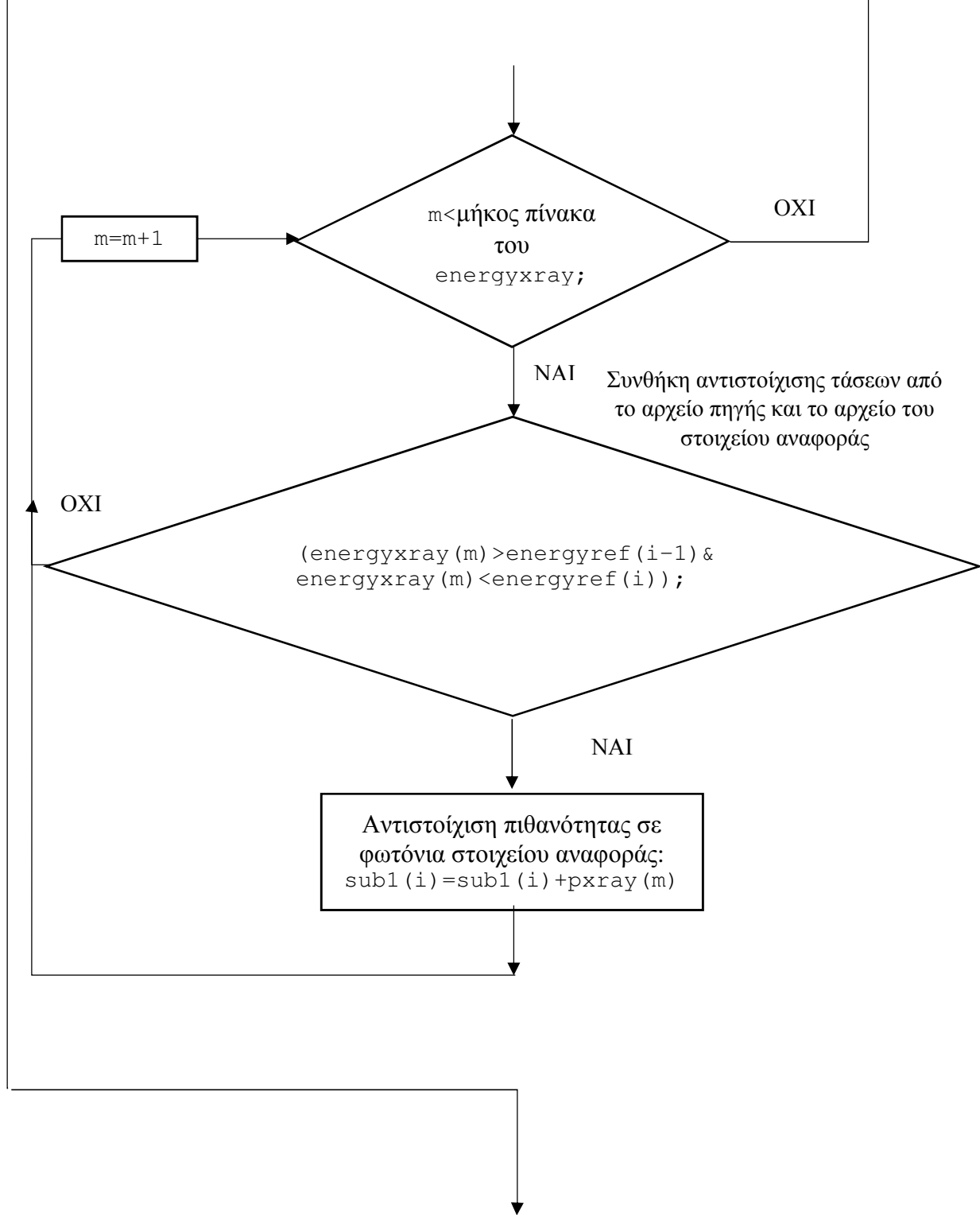


ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ (EQ ή eq)

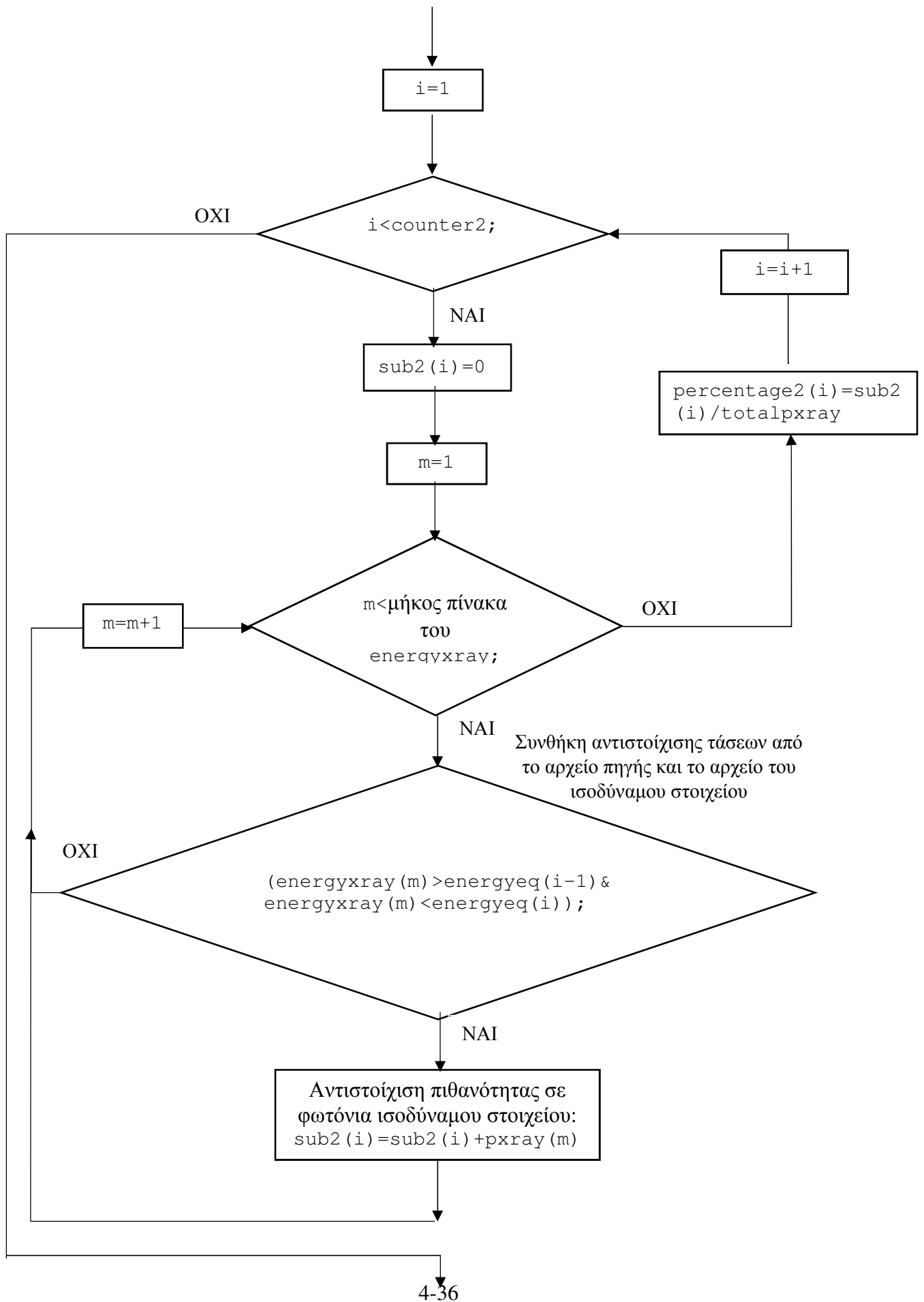


Διάγραμμα 4.1 (Διάγραμμα Ροής) - 3. Ιδιότητες στοιχείου αναφοράς

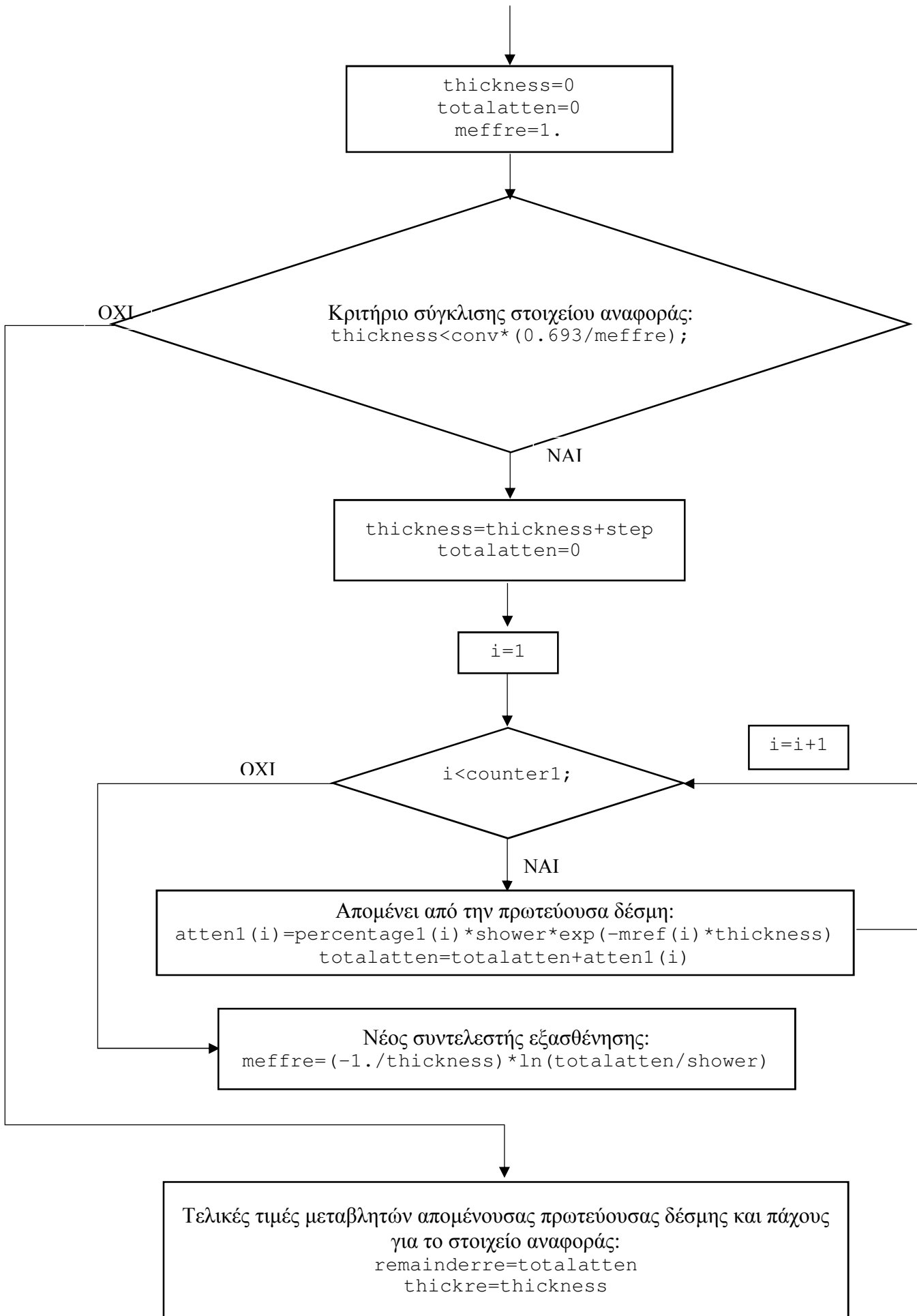




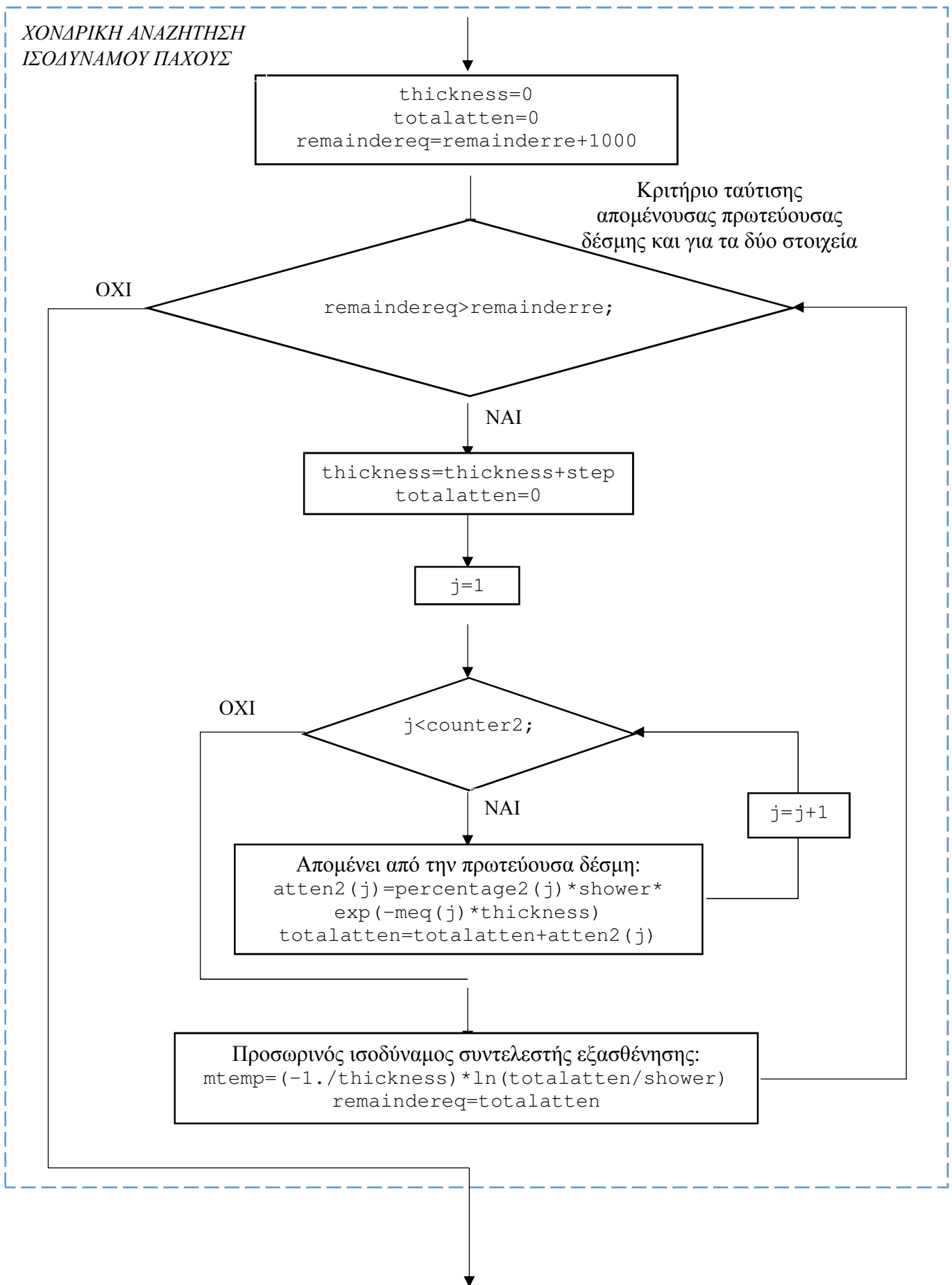
Διάγραμμα 4.1 (Διάγραμμα Ροής) - 4. Ιδιότητες ισοδύναμου στοιχείου

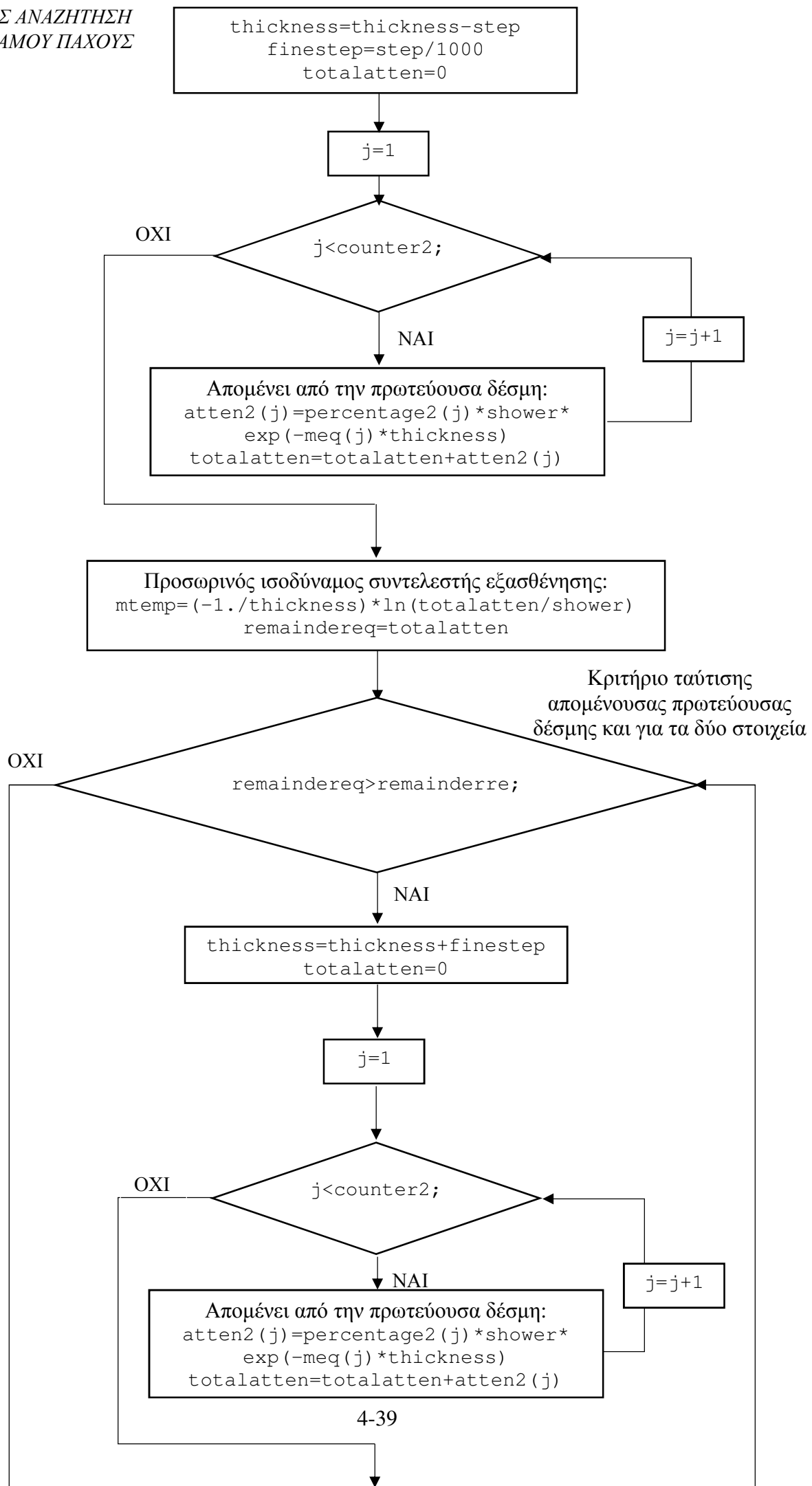


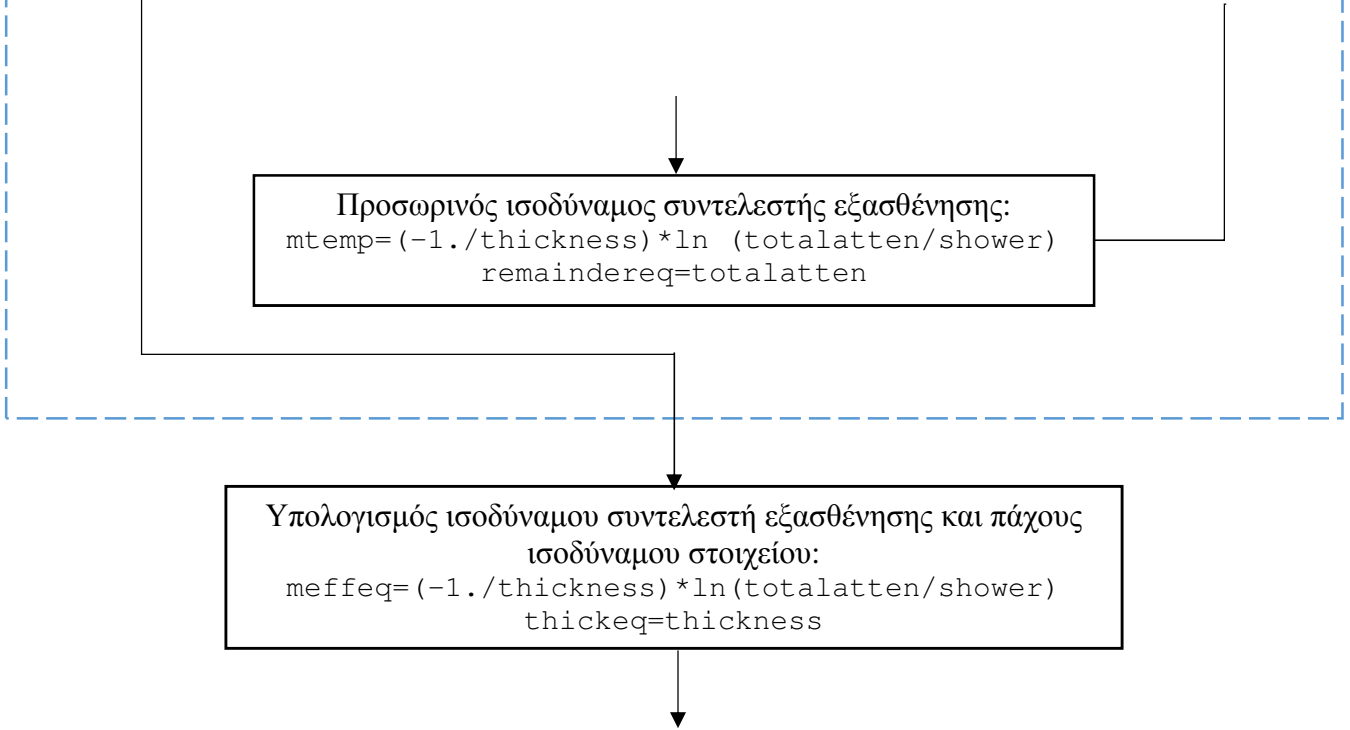
Διάγραμμα 4.1 (Διάγραμμα Ροής) - 5. Υπολογισμοί ισοδυναμίας στοιχείου αναφοράς



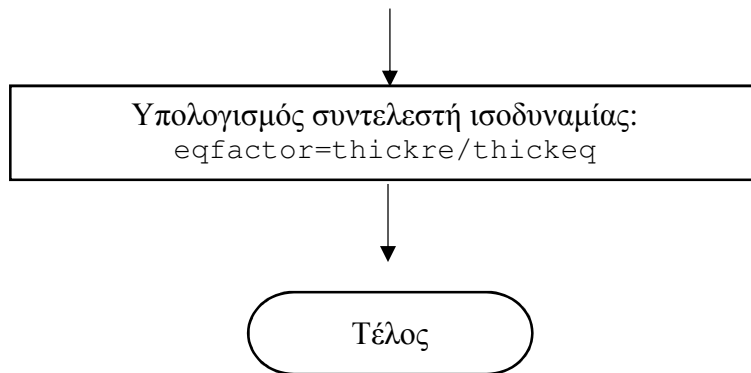
Διάγραμμα 4.1 (Διάγραμμα Ροής) - 6. Υπολογισμοί ισοδυναμίας ισοδύναμου στοιχείου







Διάγραμμα 4.1 (Διάγραμμα Ροής) - 7.Τελικός υπολογισμός συντελεστή ισοδυναμίας



```

Select radioisotopic source( Ir, Co ,Cs, Ra, Se ): Co
Select reference element by typing its atomic number Z (range 1-92): 26
Select equivalent element by typing its atomic number Z (range 1-92): 82
Select thickness step in cm (default value: 0.01cm): 0.01
Select convergence criterion for the max xA (default value: 4):4
*****
The equivalence factor is:
    1.5823
*****

```

Διάγραμμα 4.2

Απόσπασμα διαλόγων εισαγωγής δεδομένων από το χρήστη στον κώδικα υπολογισμού των ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας, για την περίπτωση ισοτοπικής πηγής φωτονίων

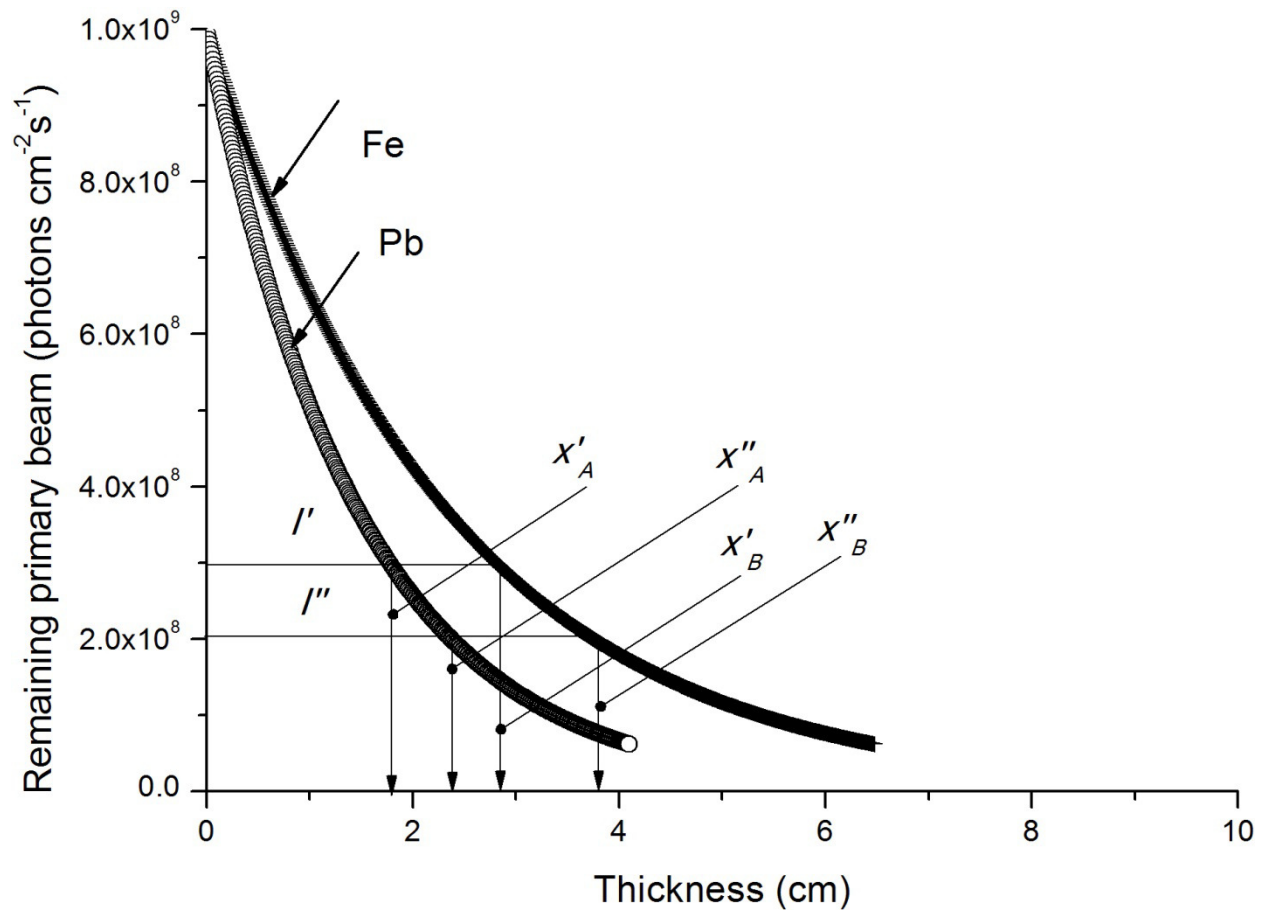
```

Select nominal -x ray source voltage in kV (50, 100, 150, 200, 250, 300 kV): 200
Select reference element by typing its atomic number Z (range 1-92): 26
Select equivalent element by typing its atomic number Z (range 1-92): 13
Select thickness step in cm (default value: 0.01cm): 0.01
Select convergence criterion for the max xA (default value: 4):4
*****
The equivalence factor is:
    0.1562
*****

```

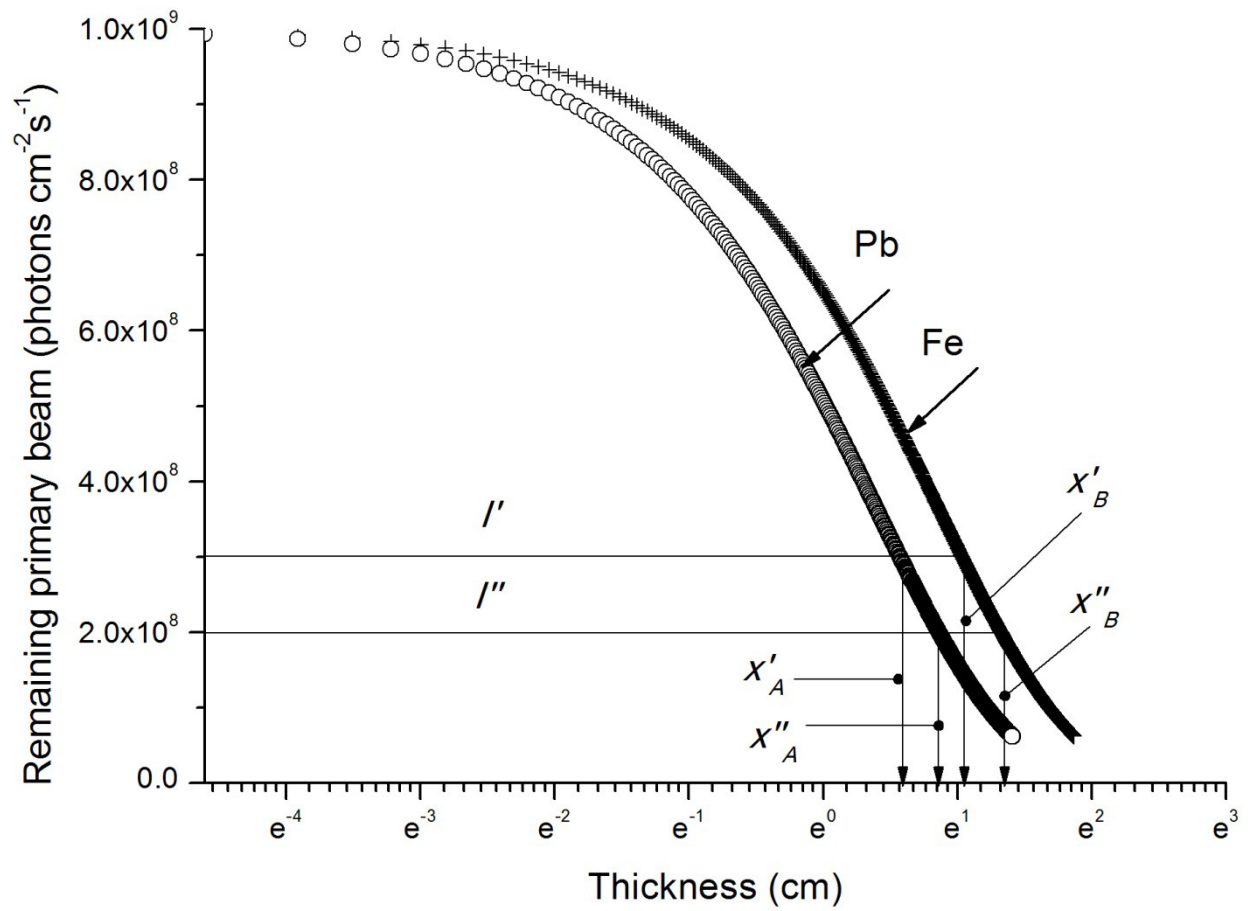
Διάγραμμα 4.3

Απόσπασμα διαλόγων εισαγωγής δεδομένων από το χρήστη στον κώδικα υπολογισμού των ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας, για την περίπτωση μηχανής παραγωγής ακτίνων -x



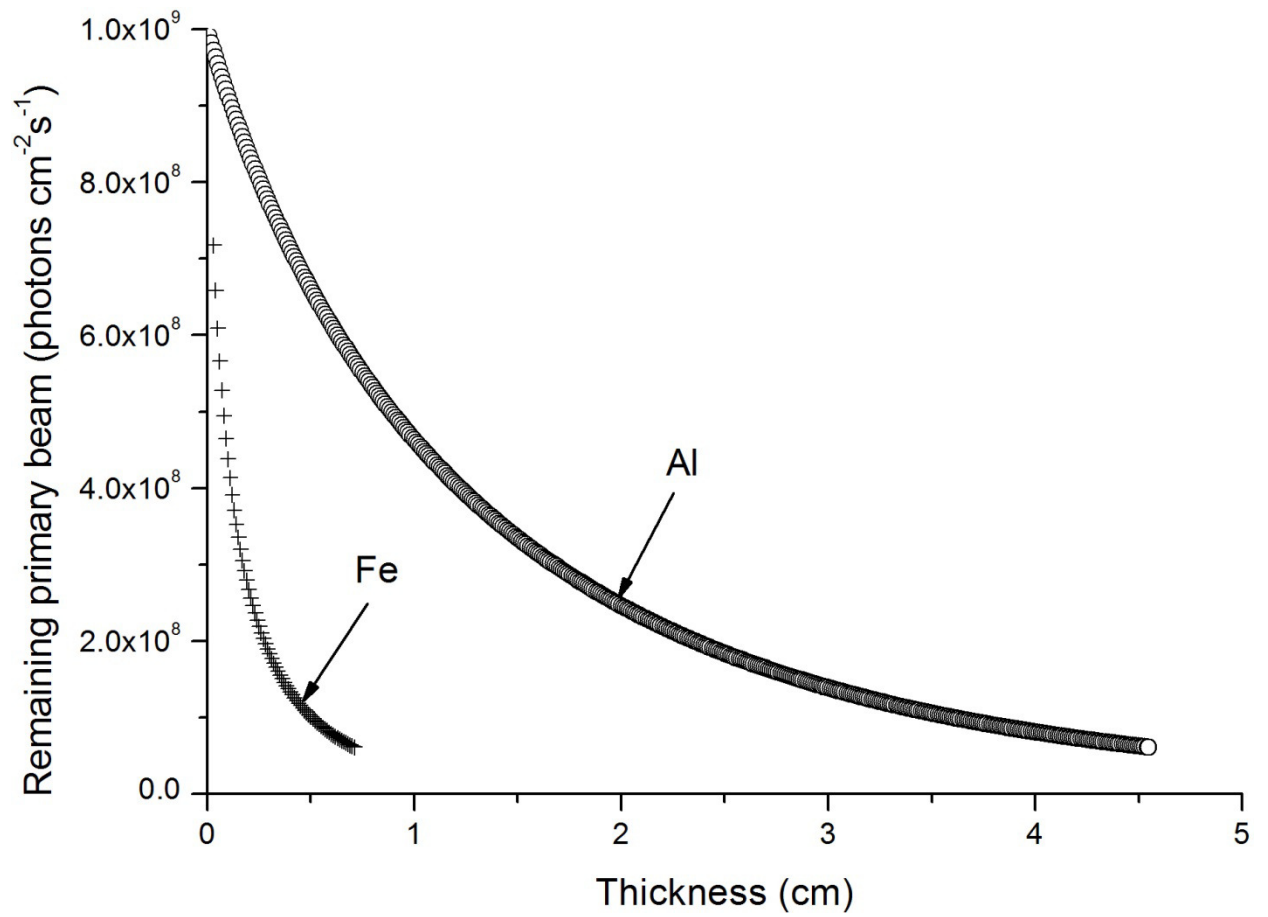
Διάγραμμα 4.4

**Γραφική αναπαράσταση της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης
(για εκτέλεση του αλγορίθμου όπως στο Διάγραμμα 4.2)**



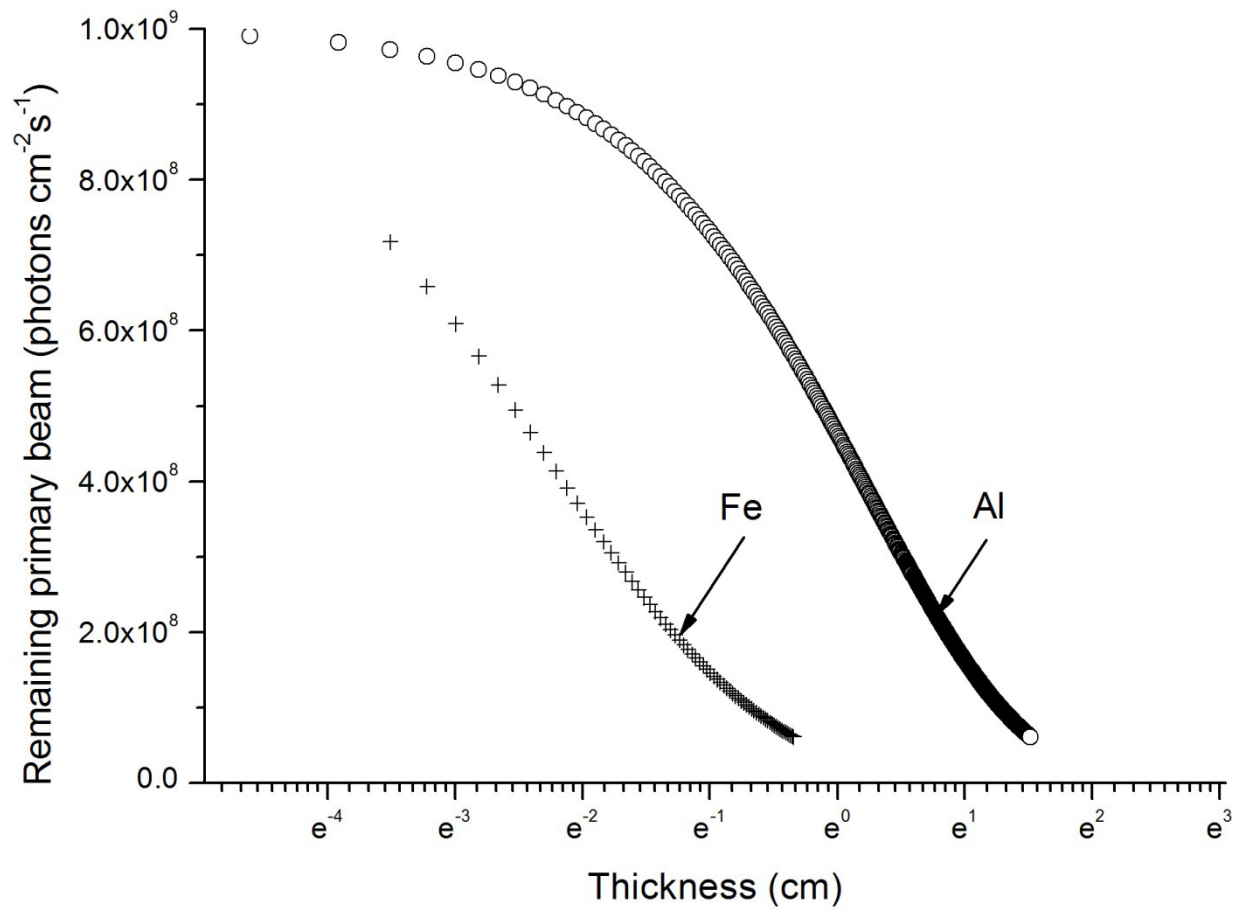
Διάγραμμα 4.5

**Γραφική αναπαράσταση της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης.
 Ο άξονας πάχους είναι λογαριθμικός.
 (για εκτέλεση του αλγορίθμου όπως στο Διάγραμμα 4.2)**



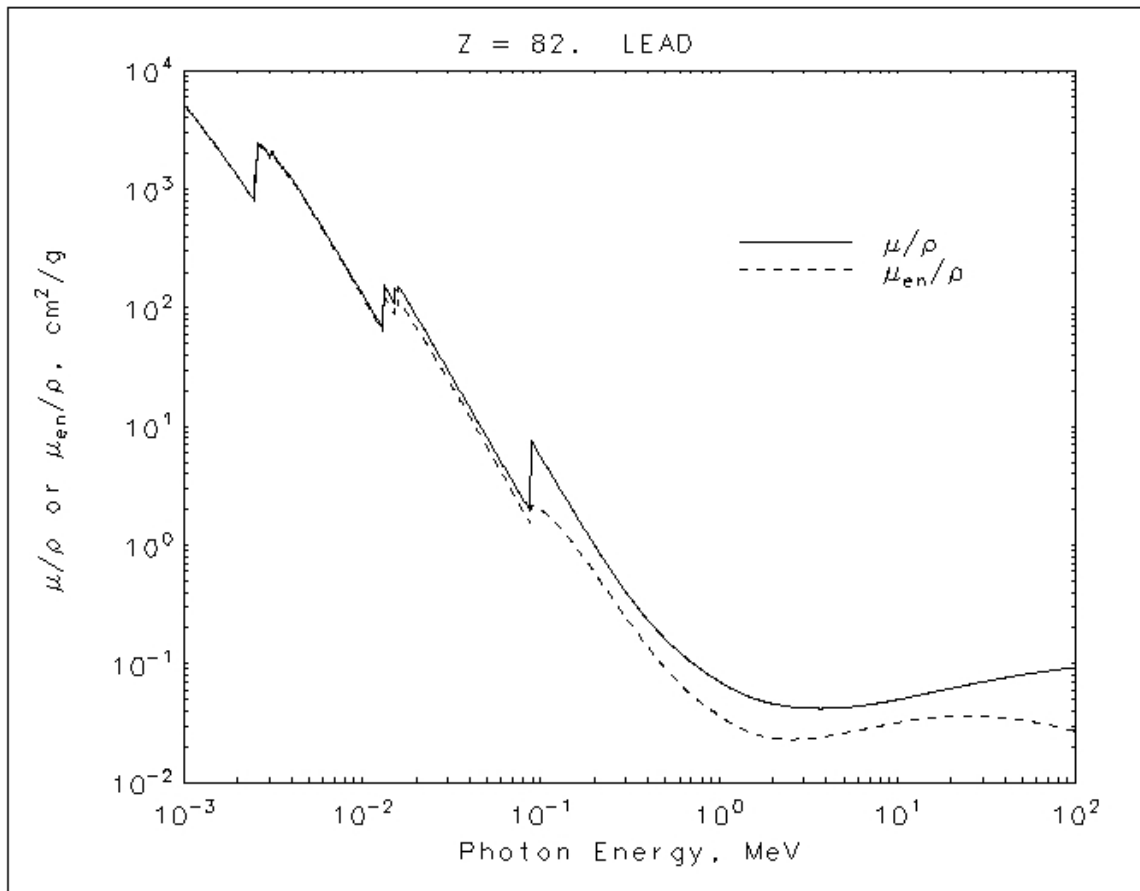
Διάγραμμα 4.6

Γραφική αναπαράσταση της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης
(για εκτέλεση του αλγορίθμου όπως στο Διάγραμμα 4.3)



Διάγραμμα 4.7

**Γραφική αναπαράσταση της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης.
 Ο άξονας πάχους είναι λογαριθμικός.
 (για εκτέλεση του αλγορίθμου όπως στο Διάγραμμα 4.3)**



Διάγραμμα 4.8

Διάγραμμα μαζικού συντελεστή εξασθένησης μολύβδου $\mu(E)/\rho$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Εισαγωγή

Στο 5^ο Κεφάλαιο, επαληθεύεται με επιπλέον ποσοτικούς τρόπους η καλή λειτουργία των κωδίκων της Διπλωματικής Εργασίας, αναπτύσσονται οι μέθοδοι εξαγωγής των ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας για αέρια και για μίγματα ή κράματα ή ενώσεις, και τέλος εξετάζονται πλήρως οι δυνατότητες των κωδίκων και δίνονται τα αποτελέσματά τους για όλες τις δυνατές περιπτώσεις συνδυασμών στοιχείων αναφοράς και ισοδύναμων στοιχείων που ενδιαφέρουν, όπως αυτά αναφέρθηκαν στο 3^ο Κεφάλαιο τόσο σε λεπτομερή όσο και σε συνοπτική μορφή καθώς και ποιοτικές γραφικές αναπαραστάσεις τους. Φυσικά εννοείται ότι τη θέση των υλικών αναφοράς ή των ισοδύναμων υλικών μπορεί να έχουν και αέρια και μίγματα ή ενώσεις ή κράματα.

5.2 Επαλήθευση καλής λειτουργίας των κωδίκων

5.2.1 Φωτόνια ακτίνων -x

Στο προηγούμενο 4^ο Κεφάλαιο, στην § 4.6 πραγματοποιήθηκε σύντομη σύγκριση βιβλιογραφίας και αποτελεσμάτων κώδικα για φωτόνια σε ό,τι αφορά ακτίνες -x (Πίνακες 4.1 και 4.2) με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τυχόν αποκλίσεις εξηγήθηκαν με αποτελεσματικό και εύλογο τρόπο. Σε αυτό το σημείο θα χρησιμοποιηθούν και ποσοτικά παραδείγματα που θα επαληθεύσουν την καλή λειτουργία του κώδικα με πρακτικό τρόπο λύνοντας δύο προβλήματα ραδιογραφικής ανάλυσης με χρήση ακτίνων -x.

Πρόβλημα 1

Έστω ότι χρειάζεται με την ίδια έκθεση, φιλμ τύπου D4, από την ίδια απόσταση και ακτίνες -x των 100kV να ραδιογραφηθεί με την ίδια οπτική πυκνότητα αλουμίνιο πάχους 65mm και χάλυβας ισοδύναμου πάχους. Να επαληθευθεί ότι αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί.

Λύση

Το Διάγραμμα 5.1 παρουσιάζει το διάγραμμα έκθεσης για αλουμίνιο για μηχανή παραγωγής ακτίνων -x τύπου ERESKO 42 MF3 της εταιρείας κατασκευής General

Electric Sensing and Inspection Technologies. Με το διάγραμμα αυτό υπολογίζεται γραφικά ότι τα 65mm αλουμινίου στα 100kV χρειάζονται έκθεση 25.5 mAmin ώστε με φιλμ D4 (χωρίς οθόνες μολύβδου), απόσταση πηγής - φιλμ 70cm, να επιτευχθεί οπτική πυκνότητα $D = 2$.

Το ισοδύναμο πάχος χάλυβα με αυτό του αλουμινίου είναι ίσο με:

$$\text{PΣI}(100\text{kV}) \times 65\text{mm}$$

Η τιμή του PΣI(100kV) λαμβάνεται από τον Πίνακα 4.2 ως 0.09. Επομένως το ισοδύναμο πάχος χάλυβα υπολογίζεται σε $0.09 \times 65 = 5.85\text{mm}$.

Το Διάγραμμα 5.2 παρουσιάζει το διάγραμμα έκθεσης για χάλυβα για την ίδια μηχανή παραγωγής ακτίνων -x. Με το διάγραμμα αυτό υπολογίζεται γραφικά ότι τα 5.85mm χάλυβα στα 100kV χρειάζονται έκθεση 8.6 mAmin ώστε με φιλμ D7Pb (με οθόνες μολύβδου), απόσταση πηγής - φιλμ 70cm, να επιτευχθεί οπτική πυκνότητα $D = 2$.

Το πρόβλημα της επαλήθευσης ανάγεται επομένως σε πρόβλημα "αλλαγής φιλμ (από D7Pb σε D4), χωρίς αλλαγή οπτικής πυκνότητας". Για να λυθεί πρέπει να διατίθενται οι χαρακτηριστικές των φιλμ D7Pb και D4.

Στο General Electric 2007 και στο General Electric 2008, δίνονται χαρακτηριστικές για φιλμ D7Pb και D4Pb, για ακτίνες -x των 200kV, οι οποίες διακρίνονται στο Διάγραμμα 5.3. Μπορεί να θεωρηθεί με ασφάλεια ότι η χαρακτηριστική του φιλμ D4Pb, ταυτίζεται με την άγνωστη χαρακτηριστική του φιλμ D4, δεδομένου ότι στις χαμηλές ενέργειες ακτίνων -x των 100kV, τα φωτόνια που χάνονται λόγω απορρόφησης στις οθόνες μολύβδου αναπαράγονται ως ηλεκτρόνια ισοδύναμης αποτελεσματικότητας αμαύρωσης λόγω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

Με αυτά υπόψη υπολογίζονται από το Διάγραμμα 5.3 οι δεκαδικοί λογάριθμοι της σχετικής αύξησης της έκθεσης μεταξύ φιλμ D7Pb και φιλμ D4 για οπτική πυκνότητα $D = 2$. Για φιλμ D7Pb είναι 2.25. Για φιλμ D4 είναι 2.7. Η διαφορά των δύο τιμών είναι 0.45. Επομένως αν είναι να ραδιογραφηθεί αυτός ο χάλυβας πάχους 5.85mm στις πιο πάνω συνθήκες με φιλμ D4 αντί D7Pb απαιτείται πολλαπλασιασμός της έκθεσης των 8.6 mAmin με $10^{0.45}$ και με έναν συντελεστή διόρθωσης $3.0/2.7 = 1.1$, ώστε να διορθωθούν οι χαρακτηριστικές των φιλμ που χρησιμοποιούνται από τα 200 στα 100kV, όπως προκύπτει από τον Πίνακα 5.1 (General Electric 2007, 2008). Το αποτέλεσμα του γινομένου που περιγράφηκε είναι:

$$8.6 \times 10^{0.45} \times 1.1 \approx 26.5 \text{ mAmin}$$

τιμή που είναι στην πράξη ίση με την προς επαλήθευση των 25.5 mAmin.

Πρόβλημα 2

Έστω ότι χρειάζεται με την ίδια έκθεση, φιλμ τύπου D4, από την ίδια απόσταση και ακτίνες -x των 140kV να ραδιογραφηθεί με την ίδια οπτική πυκνότητα αλουμίνιο πάχους 75mm και χάλυβας ισοδύναμου πάχους. Να επαληθευθεί ότι αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί.

Λύση

Το Διάγραμμα 5.1 παρουσιάζει το διάγραμμα έκθεσης για αλουμίνιο για μηχανή παραγωγής ακτίνων -x τύπου ERESKO 42 MF3 της εταιρείας κατασκευής General Electric Sensing and Inspection Technologies. Με το διάγραμμα αυτό υπολογίζεται γραφικά ότι τα 75mm αλουμινίου στα 140kV χρειάζονται έκθεση 10 mAmin ώστε με φιλμ D4 (χωρίς οθόνες μολύβδου), απόσταση πηγής - φιλμ 70cm, να επιτευχθεί οπτική πυκνότητα $D = 2$.

Το ισοδύναμο πάχος χάλυβα με αυτό του αλουμινίου είναι ίσο με:

$$\text{PΣI}(150\text{kV}) \times 75\text{mm}$$

Η τιμή του PΣI(150kV) λαμβάνεται από τον Πίνακα 4.2 ως 0.13. Επομένως το ισοδύναμο πάχος χάλυβα υπολογίζεται σε $0.13 \times 75 = 9.75\text{mm}$. Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται προσεγγιστικά για τη λύση του προβλήματος επειδή ο Πίνακας 4.2 δίνει μεταξύ άλλων PΣI αλουμινίου - χάλυβα για ακτίνες -x των 150kV που είναι η κοντινότερες στις ακτίνες -x των 140kV.

Το Διάγραμμα 5.2 παρουσιάζει το διάγραμμα έκθεσης για χάλυβα για την ίδια μηχανή παραγωγής ακτίνων -x. Με το διάγραμμα αυτό υπολογίζεται γραφικά ότι τα 9.75mm χάλυβα στα 140kV χρειάζονται έκθεση 3.6 mAmin ώστε με φιλμ D7Pb (με οθόνες μολύβδου), απόσταση πηγής - φιλμ 70cm, να επιτευχθεί οπτική πυκνότητα $D = 2$.

Το πρόβλημα της επαλήθευσης ανάγεται επομένως πάλι σε πρόβλημα "αλλαγής φιλμ (από D7Pb σε D4), χωρίς αλλαγή οπτικής πυκνότητας". Μπορεί να θεωρηθεί με ασφάλεια ότι η χαρακτηριστική του φιλμ D4Pb, όπως διακρίνεται στο Διάγραμμα 5.3 ταυτίζεται με την άγνωστη χαρακτηριστική του φιλμ D4, δεδομένου ότι στις χαμηλές ενέργειες ακτίνων -x των 140kV, τα φωτόνια που χάνονται λόγω απορρόφησης στις

οθόνες μολύβδου αναπαράγονται ως ηλεκτρόνια ισοδύναμης αποτελεσματικότητας αμαύρωσης λόγω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

Με αυτά υπόψη υπολογίζονται από το Διάγραμμα 5.3 οι δεκαδικοί λογάριθμοι της σχετικής αύξησης της έκθεσης μεταξύ φιλμ D7Pb και φιλμ D4 για οπτική πυκνότητα $D = 2$. Ομοίως όπως πριν για φιλμ D7Pb είναι 2.25 και για φιλμ D4 είναι 2.7. Η διαφορά των δύο τιμών είναι 0.45. Επομένως αν είναι να ραδιογραφηθεί αυτός ο χάλυβας πάχους 9.75 mm στις πιο πάνω συνθήκες με φιλμ D4 αντί D7Pb απαιτείται πολλαπλασιασμός της έκθεσης των 3.6 mAmin με $10^{0.45}$ και με έναν συντελεστή διόρθωσης $2.85/2.7 = 1.06$, ώστε να διορθωθούν οι χαρακτηριστικές των φιλμ που χρησιμοποιούνται από τα 200 στα 150kV, όπως προκύπτει με γραμμική παρεμβολή από τον Πίνακα 5.1 (General Electric 2007, 2008). Το αποτέλεσμα του γινομένου που περιγράφηκε είναι:

$$3.6 \times 10^{0.45} \times 1.06 \approx 10.7 \text{ mAmin}$$

τιμή που είναι στην πράξη ίση με την προς επαλήθευση των 10 mAmin, παρόλο που το πρόβλημα επιλύθηκε με ορισμένα δεδομένα για 140kV και με ορισμένα άλλα για 150kV

5.2.2 Φωτόνια από ισοτοπικές πηγές - Α

Στο προηγούμενο 4^ο Κεφάλαιο, στην § 4.6 πραγματοποιήθηκε σύντομη σύγκριση βιβλιογραφίας και αποτελεσμάτων του αντίστοιχου κώδικα, σε ό,τι αφορά και φωτόνια από ισοτοπικές πηγές (βλ. και Πίνακα 4.3) με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα και για την τιμή της παραμέτρου ϵ ίση με "4". Τυχόν αποκλίσεις αποδόθηκαν εύλογα στο ότι για τα πολύ πυκνά/βαριά ισοδύναμα υλικά όπως ο μόλυβδος και το ουράνιο, οι ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας της βιβλιογραφίας υπολογίστηκαν στην περιοχή "μικρών παχών" που εξηγήθηκε με βάση το Διάγραμμα 4.5 στο 4^ο Κεφάλαιο. Δυστυχώς για την περίπτωση των φωτονίων από ισοτοπικές πηγές δεν υπάρχει τόσο εκτεταμένη βιβλιογραφία σχετικά με τους ραδιογραφικούς συντελεστές ισοδυναμίας, όσο για τα φωτόνια ακτίνων -x, με βάση την οποία να μπορεί να γίνει καλύτερη επαλήθευση του σχετικού κώδικα.

Παρόλα αυτά, οι αποκλίσεις που παρατηρούνται για τους ραδιογραφικούς συντελεστές ισοδυναμίας για υλικό αναφοράς χάλυβα και πολύ πυκνά/βαριά ισοδύναμα υλικά όπως ο μόλυβδος και το ουράνιο για ραδιογράφιση με φωτόνια από Ir-192 είναι αρκετά μεγάλες και ίσως η αιτιολόγηση με την περιοχή "μικρών παχών"

δεν είναι επαρκής. Στα Διαγράμματα 5.4 και 5.5 αποτυπώνεται ποιοτικά με βάση τα αποτελέσματα από τον σχετικό κώδικα της Διπλωματικής Εργασίας η εξασθένηση μιας πρωτεύουσας δέσμης φωτονίων από ισοτοπικές πηγές για υλικό αναφοράς χάλυβα και ισοδύναμο υλικό μόλυβδο. Οι καμπύλες που παρουσιάζονται στα διαγράμματα αυτά δίνονται σε ζεύγη που ξεχωρίζουν μεταξύ τους από τον διαφορετικό τρόπο χάραξης. Σε κάθε ζεύγος, η "δεξιά" καμπύλη αφορά στο υλικό αναφοράς χάλυβας και η "αριστερή" καμπύλη αφορά στο ισοδύναμο υλικό μόλυβδος.

Διαπιστώνεται από τα διαγράμματα και ειδικά από το Διάγραμμα 5.5 ότι για πηγές φωτονίων Cs-137, Co-60 και Ra-226, και για την περιοχή παχών από 1 έως 4 πάχη υποδιπλασιασμού οι κλίσεις των καμπυλών για κάθε ζεύγος είναι πρακτικά ίσες, με αποτέλεσμα οποιαδήποτε τιμή της παραμέτρου ϵ στην περιοχή από 1 έως 4, να μην έχει καμία επίδραση στους υπολογιζόμενους ΡΣΙ, όπως εξάλλου έχει ήδη παρατηρηθεί στο 4^ο Κεφάλαιο με το παράδειγμα πηγής φωτονίων Co-60.

Από τα ίδια διαγράμματα και ειδικά από το Διάγραμμα 5.5 διαπιστώνεται ότι για πηγές φωτονίων Se-75 και δευτερευόντως για Ir-192, και για την περιοχή παχών από 1 έως 4 πάχη υποδιπλασιασμού οι κλίσεις των καμπυλών για κάθε ζεύγος είναι διαφορετικές, με αποτέλεσμα μεταβολές της παραμέτρου ϵ στην περιοχή από 1 έως 4, να επιδρούν σημαντικά στους υπολογιζόμενους ΡΣΙ, όπως εξάλλου έχει ήδη παρατηρηθεί στο 4^ο Κεφάλαιο με το παράδειγμα φωτονίων από ακτίνες -x. Η διαπίστωση της εξάρτησης αυτής γίνεται φανερή και με τον Πίνακα 5.2 που συνοψίζει σχετικά αποτελέσματα υπολογισμών για Se-75, Ir-192 και για Ra-226. Φυσικά φαίνεται και στην πράξη ότι για Ra-226 η εξάρτηση αυτή είναι όπως ήδη παρατηρήθηκε αμελητέα.

Μία σύγκριση των Πινάκων 2.3 (βιβλιογραφία), 4.3 (αποτελέσματα κώδικα για $\epsilon = 4$) και 5.2 (αποτελέσματα κώδικα για διάφορα ϵ) δείχνει ότι για τα φωτόνια του Ir-192 οι ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας του χάλυβα με τον μόλυβδο, έχουν εκτιμηθεί πειραματικά και αναφέρονται στην βιβλιογραφία στην περιοχή ενός πάχους υποδιπλασιασμού δηλ. για $\epsilon = 1$.

Για επαλήθευση των παραπάνω εντοπίστηκε η παλαιότερη πειραματική εργασία του Mintern (1959), η οποία μάλιστα εστιάζει στην ραδιογραφική ισοδυναμία χάλυβα και μολύβδου που εξετάζεται ως παράδειγμα και εδώ. Με βάση αυτή την εργασία αναπτύχθηκαν τα ακόλουθα ποσοτικά παραδείγματα:

Στο Διάγραμμα 5.6 διακρίνονται γραφικές παραστάσεις που συγκροτούν ραδιογραφικό διάγραμμα έκθεσης για χάλυβα και μόλυβδο με πηγή φωτονίων Ir-192, σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα του Mintern (1959) για απόσταση πηγής φιλμ 18" και $D = 1.75$. Το πείραμα οργανώθηκε έτσι ώστε για διάφορες εκθέσεις σε φωτόνια από Ir-192 (σε Curie-hours), να προσδιορίζεται το πάχος του χάλυβα και του μολύβδου για τα οποία προκύπτει ποσοτικά η ίδια απομένουσα πρωτεύουσα δέσμη, της οποίας η τιμή μεταφράζεται σε σταθερή τιμή της οπτικής πυκνότητας ($D = 1.75$) για το φιλμ που χρησιμοποιήθηκε.

Στο Διάγραμμα 5.6 διακρίνονται δύο αριθμητικές εφαρμογές:

(α) Για έκθεση 3 Curie-hours, υπολογίζεται ότι το ισοδύναμο πάχος του χάλυβα είναι περίπου 1.38" δηλαδή ~3.5cm. Στην ίδια έκθεση το ισοδύναμο πάχος μολύβδου είναι περίπου 0.25" δηλαδή ~0.64cm. Αυτό σημαίνει ότι ο ραδιογραφικός συντελεστής ισοδυναμίας για τα πάχη αυτά υπολογίζεται σε $3.5/0.64 \approx 4.7$

(β) Για έκθεση 5 Curie-hours, υπολογίζεται ότι το ισοδύναμο πάχος του χάλυβα είναι περίπου 1.79" δηλαδή ~4.55cm. Στην ίδια έκθεση το ισοδύναμο πάχος μολύβδου είναι περίπου 0.38" δηλαδή ~0.97cm. Αυτό σημαίνει ότι ο ραδιογραφικός συντελεστής ισοδυναμίας για τα πάχη αυτά υπολογίζεται σε $4.55/0.97 \approx 4.7$.

Επίσης, είναι φανερό ότι υπολογισμοί τύπου (α) και (β) δεν μπορεί να γίνουν για εκθέσεις μικρότερες των 2 Curie-hours, όπου οι γραφικές παραστάσεις του Διαγράμματος 5.6 δίνονται σε διακεκομμένες (δηλ. υποθετικές) καμπύλες.

Τα αποτελέσματα (α) και (β) δεν συμφωνούν ούτε με τον Πίνακα 2.3 (βιβλιογραφικά δεδομένα), ούτε με τον Πίνακα 4.3 (υπολογισμοί από τον σχετικό κώδικα της Διπλωματικής Εργασίας με τιμή του ϵ ίση με "4"). Είναι χαρακτηριστικά αυξημένα και πλησιάζουν αρκετά αυτά του Πίνακα 5.2 (τιμή του ϵ ίση με "1"). Παρόλα αυτά δεν φαίνεται τα αποτελέσματα αυτά να είναι αξιόπιστα διότι για τα πάχη που ραδιογραφήθηκαν για την κατασκευή του Διαγράμματος 5.5, οι ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας για τα πάχη του Διαγράμματος 5.6 θα έπρεπε σύμφωνα με τους θεωρητικούς υπολογισμούς να έχουν τιμή περίπου 3. Εκτιμάται ότι, για το πείραμα του Mintern (1959), η αλληλεπίδραση των φωτονίων της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης που προέκυψε από εξασθένηση στον μόλυβδο με το χρησιμοποιούμενο φιλμ, ήταν πολύ διαφορετική από την αλληλεπίδραση των φωτονίων της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης που προέκυψε από εξασθένηση

στον χάλυβα, με αποτέλεσμα λανθασμένα συμπεράσματα που οφείλονται μάλλον στην φασματική απόκριση φιλμ. Τέτοιες διαφορετικές φασματικές αποκρίσεις ήταν συνήθεις στην πρώιμη βιομηχανική ραδιογραφία, όπου χρησιμοποιούνταν μονοχρωματικού ή ορθοχρωματικού τύπου φιλμ και όχι παγχρωματικού τύπου.

Πάντως επαληθεύεται ποιοτικά ότι για χαμηλότερες εκθέσεις από τις (α) και (β) αυτό που ήδη έχει διαπιστωθεί για Ir-192 και υλικό αναφοράς χάλυβα, και ισοδύναμο υλικό μόλυβδο (με τη βοήθεια των Διαγραμμάτων 5.4 και 5.5), ότι δηλαδή, οι ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας εξαρτώνται -αν πρόκειται για την περιοχή "μικρών παχών", από τα πάχη στα οποία ελέγχεται η ισοδυναμία, και είναι αυξημένοι σε σχέση με την τιμή ~4.7.

Στο Διάγραμμα 5.7 διακρίνονται γραφικές παραστάσεις που συγκροτούν ραδιογραφικό διάγραμμα έκθεσης για χάλυβα και μόλυβδο με πηγή φωτονίων Ir-192, το οποίο υπολογίστηκε θεωρητικά από τον σχετικό κώδικα της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αντίστοιχα με τις γραφικές παραστάσεις των πειραματικών αποτελεσμάτων του Mintern (1959). Υποτίθεται απόσταση πηγής φιλμ 18" και $D = 1.75$. Ο κώδικας ρυθμίστηκε έτσι ώστε έτσι ώστε για διάφορες εκθέσεις σε φωτόνια από Ir-192 (σε Curie-hours), να προσδιορίζεται το πάχος του χάλυβα και του μολύβδου για τα οποία προκύπτει ποσοτικά η ίδια απομένουσα πρωτεύουσα δέσμη με τιμή 0.18 Curie-hours. Το Διάγραμμα 5.7 προέκυψε από τροποποίηση του σχετικού κώδικα της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Το λογικό διάγραμμα της τροποποίησης διακρίνεται στο Διάγραμμα 5.8.

Στο Διάγραμμα 5.7 εξετάζονται οι ίδιες αριθμητικές εφαρμογές που διερευνήθηκαν και για το Διάγραμμα 5.6. Είναι:

(α') Για έκθεση 3 Curie-hours, υπολογίζεται ότι το ισοδύναμο πάχος του χάλυβα είναι περίπου 3.75cm. Στην ίδια έκθεση το ισοδύναμο πάχος μολύβδου είναι περίπου 1.23cm. Αυτό σημαίνει ότι ο ραδιογραφικός συντελεστής ισοδυναμίας για τα πάχη αυτά υπολογίζεται σε $3.75/1.23 \approx 3$.

(β') Για έκθεση 5 Curie-hours, υπολογίζεται ότι το ισοδύναμο πάχος του χάλυβα είναι περίπου 4.43cm. Στην ίδια έκθεση το ισοδύναμο πάχος μολύβδου είναι περίπου 1.51cm. Αυτό σημαίνει ότι ο ραδιογραφικός συντελεστής ισοδυναμίας για τα πάχη αυτά υπολογίζεται σε $4.43/1.51 \approx 3$.

Τα αποτελέσματα (α') και (β') συμφωνούν με τον Πίνακα 4.3 αλλά, όπως αναμενόταν είναι μειωμένα σε σχέση με τον Πίνακα 2.3 και πολύ μειωμένα σε σχέση με τα αποτελέσματα (α') και (β').

Παρατηρούνται και τα εξής:

- Το Διάγραμμα 5.6 συμφωνεί ποιοτικά με το Διάγραμμα 5.7.
- Η γραφική παράσταση εξασθένησης που αφορά στον χάλυβα είναι ποιοτικά και ποσοτικά παρόμοια και στα δύο Διαγράμματα 5.6 και 5.7.
- Η γραφική παράσταση εξασθένησης που αφορά στον χάλυβα είναι ποιοτικά και ποσοτικά παρόμοια με αυτήν του Διαγράμματος 5.9 που δίνεται στον Quinn (1980) για ραδιογραφία με Ir-192.
- Η γραφική παράσταση εξασθένησης που αφορά στον χάλυβα είναι ποιοτικά και ποσοτικά παρόμοια με αυτές των Διαγραμμάτων 2.4 και 2.9 που δίνονται στον Semyonov (1967) για ραδιογραφία με Ir-192.
- Η γραφική παράσταση εξασθένησης που αφορά στον χάλυβα είναι ποιοτικά και ποσοτικά παρόμοια με αυτήν του Διαγράμματος 2.10 που δίνεται στον Semyonov (1967) για ραδιογραφία με Ir-192. Προσοχή χρειάζεται διότι, στο Διάγραμμα 2.10 ο κατακόρυφος άξονας φαίνεται ότι έχει μονάδες Curie - hours, ενώ οι ορθές μονάδες πρέπει να είναι Curie x hours x m².
- Διακρίνεται τόσο στους υπολογισμούς (α) - (β) όσο και στους υπολογισμούς (α') - (β'), η αναμενόμενη σταθερότητα στους ραδιογραφικούς συντελεστές ισοδυναμίας για μικρότερη και μεγαλύτερη έκθεση, παρόλο που υπάρχει απόσταση στις τιμές τους μεταξύ του πειράματος του Mintern (1959) και των υπολογισμών από τον εδώ σχετικό κώδικα.

Συμπερασματικά, οι αποκλίσεις που παρατηρούνται οφείλονται σε διαφορετική συμπεριφορά του μολύβδου μεταξύ πειράματος και θεωρίας με πιθανότερη αιτία το είδος του φιλμ που χρησιμοποιείται για την αποτύπωση της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης. Δεδομένου ότι η συμπεριφορά του χάλυβα τόσο στο πείραμα και τη θεωρία ταυτίζεται, γεννώνται και ερωτηματικά σχετικά με την ομοιογένεια, την καθαρότητα και το ακριβές πάχος του μολύβδου που γενικά χρησιμοποιείται σε τέτοια πειράματα. Υπενθυμίζεται ότι παρόμοια σχόλια έγιναν και στο 4^ο Κεφάλαιο.

5.2.3 Φωτόνια από ισοτοπικές πηγές - Β

Οι παρατηρήσεις που έγιναν σχετικά με την ραδιογραφική ισοδυναμία χάλυβα και μολύβδου για φωτόνια από ισοτοπικές πηγές ισχύουν κατ' αναλογία και για τη ραδιογραφική ισοδυναμία χάλυβα και ουρανίου, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.3, που συνοψίζει σχετικά αποτελέσματα υπολογισμών για Se-75, Ir-192 και για Ra-226. Φυσικά φαίνεται και στην πράξη ότι για Ra-226 η εξάρτηση και αυτών των ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας από το πάχος είναι όπως αναμένεται αμελητέα.

Επιπλέον, το Διάγραμμα 5.10 παρουσιάζει ποιοτικά με βάση τα αποτελέσματα από τον σχετικό κώδικα της Διπλωματικής Εργασίας την εξασθένηση μιας πρωτεύουσας δέσμης φωτονίων από Ir-192 για υλικό αναφοράς χάλυβα και ισοδύναμο υλικό ουράνιο. Διαπιστώνεται και από το διάγραμμα αυτό ότι για την περιοχή παχών από 1 έως 4 πάχη υποδιπλασιασμού οι κλίσεις των καμπυλών εξασθένησης είναι διαφορετικές, με αποτέλεσμα μεταβολές της παραμέτρου ϵ στην περιοχή από 1 έως 4, να επιδρούν σημαντικά στους υπολογιζόμενους ΡΣΙ, όπως εξάλλου έχει ήδη παρατηρηθεί στο 4^ο Κεφάλαιο με το παράδειγμα φωτονίων από ακτίνες -x.

Μία σύγκριση των Πινάκων 2.3 (βιβλιογραφία), 4.3 (αποτελέσματα σχετικού κώδικα για $\epsilon = 4$) και 5.3 (αποτελέσματα σχετικού κώδικα για διάφορα ϵ) δείχνει ότι για τα φωτόνια του Ir-192 οι ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας του χάλυβα με το ουράνιο, έχουν εκτιμηθεί πειραματικά και αναφέρονται στην βιβλιογραφία στην περιοχή ενός πάχους υποδιπλασιασμού δηλ. για $\epsilon = 1$.

5.2.4 Φωτόνια από ισοτοπικές πηγές - Γ

Σύμφωνα με τα όσα έχουν αναφερθεί τόσο στο 4^ο Κεφάλαιο, όσο και στις προηγούμενες παραγράφους, σε ό,τι γενικά αφορά τα φωτόνια από ισοτοπικές πηγές, οι ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας μπορούν να υπολογίζονται και ως λόγοι:

[πάχος υποδιπλασιασμού ισοδύναμου υλικού]

προς

[πάχος υποδιπλασιασμού υλικού αναφοράς]

Αυτό είναι δυνατόν, κυρίως για ισοτοπικές πηγές Cs-137, Co-60 και Ra-226, δεδομένου ότι όπως προκύπτει από το Διάγραμμα 5.5, οι γραφικές παραστάσεις εξασθένησης για το υλικό αναφοράς και το ισοδύναμο υλικό έχουν την ίδια κλίση

στην περιοχή από 1 έως 4 πάχη υποδιπλασιασμού. Επίσης αυτό είναι δυνατόν και για ισοτοπική πηγή Ir-192, αν ο υπολογισμός των ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας γίνεται στο 1 πάχος υποδιπλασιασμού. Ο Πίνακας 5.4 επαληθεύει τα παραπάνω αν συγκριθεί με τους Πίνακες 2.3, 4.3, 5.2 και 5.3. Τα πάχη υποδιπλασιασμού για τους υπολογισμούς του Πίνακα 5.4 λήφθηκαν από την διαδικτυακή πηγή NDT (2014). Τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.4 δείχνουν ότι γενικά οι θεωρητικές προσεγγίσεις που έγιναν για τους υπολογισμούς αυτής της Διπλωματικής Εργασίας φαίνονται ορθές και σε ό,τι αφορά τις ισοτοπικές πηγές φωτονίων. Παρατηρείται σημαντική απόκλιση των υπολογισμών με βάση τα πάχη υποδιπλασιασμού από τους θεωρητικούς υπολογισμούς μόνο για την περίπτωση υλικού αναφοράς χάλυβα και ισοδύναμου υλικού ουρανίου.

5.3 Επικαιροποιημένα και συμπληρωματικά αποτελέσματα

Μετά την ανάλυση τυπικών παραδειγμάτων που πραγματοποιήθηκε στην παράγραφο 4.4, αλλά και την ποιοτική εξήγηση για την καταλληλότερη τιμή της παραμέτρου ϵ των κριτηρίων σύγκλισης, η οποία έγινε τόσο στο 4^ο Κεφάλαιο, όσο και στις προηγούμενες παραγράφους, οι κώδικες της Διπλωματικής Εργασίας χρησιμοποιήθηκαν για υπολογισμούς αντίστοιχους με αυτούς των Πινάκων 2.1, 2.2α και 2.3 του 2^{ου} Κεφαλαίου, και με αυτούς των Πινάκων 4.1 έως και 4.3 του 4^{ου} Κεφαλαίου με σκοπό την επικαιροποίησή τους και την συμπλήρωσή τους σε κενά σημεία, χωρίς να γίνουν υπολογισμοί για μίγματα (ενώσεις και κράματα). Όπως έχει ήδη σημειωθεί οι υπολογισμοί ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας για μίγματα πρέπει να γίνονται με ειδικό τρόπο ο οποίος θα αναλυθεί στη συνέχεια του 5^{ου} Κεφαλαίου.

Από τους υπολογισμούς προέκυψαν οι Πίνακες 5.5 έως και 5.7. Παρατηρείται ότι οι Πίνακες αυτοί παρουσιάζουν πολύ καλή σύμπτωση τιμών με τους αντίστοιχους τους 2.1, 2.2α και 2.3 του 2^{ου} Κεφαλαίου. Τυχόν αποκλίσεις έχουν γενικά εξηγηθεί με ικανοποιητικό τρόπο.

5.4 Ραδιογραφική ισοδυναμία μιγμάτων

Στα πλαίσια υπολογισμών των ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας μεταξύ διαφόρων στοιχείων, επιχειρήθηκαν και υπολογισμοί αντίστοιχων συντελεστών με υλικά αναφοράς το αλουμίνιο και τον χάλυβα, ακολουθώντας την λογική των τιμών για μίγματα που δίνονται στην βιβλιογραφία στους Πίνακες από 2.1 έως και 2.3.

Κάτω από τον όρο "μίγματα" εννοούνται εδώ τόσο κράματα όσο και χημικές ενώσεις.

Μελετήθηκαν τα ακόλουθα μίγματα:

- Αλουμίνιο 2024
- Ανοξειδωτος χάλυβας 18-8
- Inconel (τύπου 625)
- Ντουραλουμίνιο (4% Cu)
- Ορείχαλκος
- Μολυβδούχος ορείχαλκος, και
- Monel (τύπου 400)

Η σύνθεση των μιγμάτων λήφθηκε % κατά βάρος από την WIKIPEDIA, με κυριότερο κριτήριο την συνηθέστερη συναντώμενη αναλογία συστατικών των εξεταζόμενων μιγμάτων. Ομοίως, όπως και στο 3^ο Κεφάλαιο, από την WIKIPEDIA λήφθηκαν και τα δεδομένα για τις πυκνότητες των εξεταζόμενων μιγμάτων σε κανονικές συνθήκες (Κ.Σ.). Τα παραπάνω αναφερόμενα δεδομένα συνοψίζονται ως εξής:

Αλουμίνιο 2024

(4.5% Cu, 0.5% Mn, 1.5% Mg, 93.5% Al)

πυκνότητα 2.78gcm^{-3}

Ανοξειδωτος χάλυβας 18-8

(74% Fe, 8% Ni, 18% Cr)

πυκνότητα 7.9gcm^{-3}

Inconel (τύπου 625)

(58% Ni, 21% Cr, 5% Fe, 10% Mb, 4% Nb, 0.1% C, 0.5% Mn, 0.5% Si, 0.4% Al,

0.4% Ti κ.ά.)

πυκνότητα 8.44gcm^{-3}

Ντουραλουμίνιο (4% Cu)

(95% Al, 4% Cu, 1% Mg)

πυκνότητα 2.8gcm^{-3}

Ορείχαλκος

(60% Cu, 40% Zn)

πυκνότητα 8.52gcm^{-3}

Μολυβδούχος ορείχαλκος
(60% Cu, 38% Zn, 2% Pb)
πυκνότητα 8.73gcm^{-3}

Monel (τύπου 400)
(67% Ni, 2% Mn, 29% Cu, 2% Fe)
πυκνότητα 8.8gcm^{-3}

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη προσεγγιστική σχέση:

$$P\Sigma I_{\text{μίγματος}} = \rho_{\text{μίγματος}} \sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{P\Sigma I_i}{\rho_i} \quad (5.1)$$

όπου:

i το i συστατικό του μίγματος λογιζόμενο ΠΑΝΤΑ ως ισοδύναμο υλικό,

n το πλήθος των συστατικών του μίγματος

$P\Sigma I_i$ ο ραδιογραφικός συντελεστής ισοδυναμίας κάθε συστατικού,

w_i η κατά μάζα περιεκτικότητα κάθε συστατικού, και

ρ_i η πυκνότητα κάθε συστατικού του μίγματος

Είναι προφανές ότι η σχέση (5.1) προέκυψε λογικά από τον ορισμό του ραδιογραφικού συντελεστή ισοδυναμίας και συνδέει τον ανηγμένο ως προς την πυκνότητά του συντελεστή ισοδυναμίας του μίγματος με τους συντελεστές ισοδυναμίας των επιμέρους συστατικών ενός μίγματος ανηγμένων ομοίως προς την πυκνότητα κάθε συστατικού. Ο κάθε επιμέρους ανηγμένος συντελεστής ισοδυναμίας συνοδεύεται από έναν συντελεστή βαρύτητας, ο οποίος ορίστηκε ως η κατά μάζα περιεκτικότητα κάθε συστατικού στο μίγμα.

Επισημαίνεται ότι στην (5.1) οι πυκνότητες ρ_i , νοούνται ως οι πυκνότητες των συστατικών σε Κ.Σ., με βάση τις οποίες υπολογίσθηκαν οι ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας τους.

Είναι επίσης προφανές ότι για τον υπολογισμό των ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας των πιο πάνω μιγμάτων, χρειάστηκε να υπολογισθούν από τους κώδικες της Διπλωματικής Εργασίας και νέοι ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας (π.χ. για Cr κλπ), οι οποίοι δεν υπάρχουν στην βιβλιογραφία.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών συνοψίζονται στους Πίνακες 5.8, 5.9 και 5.10. Διαπιστώνεται ότι οι πίνακες αυτοί συμφωνούν ικανοποιητικά με τα σχετικά δεδομένα από την βιβλιογραφία όπως αποτυπώνονται στους Πίνακες 2.1 έως και 2.3. Με βάση την διαπίστωση αυτή φαίνεται ότι η σχέση (5.1) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευρύτερα για τον υπολογισμό ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας μιγμάτων τυχαίας σύνθεσης, ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες ραδιογραφικού ελέγχου πρωτοποριακών μιγμάτων σύνθετων υλικών που δοκιμάζονται σήμερα (2014).

5.5 Ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας αερίων

5.5.1 Γενικά

Ο υπολογισμός ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας αερίων σε σχέση με υλικά αναφοράς άλλα στερεά, δεν φαίνεται να είναι απαραίτητος δεδομένου ότι για τις ενέργειες και τις ποσότητες φωτονίων της βιομηχανικής ραδιογραφίας σχεδόν όλα τα αέρια μπορούν να θεωρούνται ισοδύναμα με την κενή ύλη. Παρόλα αυτά, σήμερα τα αέρια στοιχεία είναι αναπόσπαστο μέρος συνθέτων υλικών, μιγμάτων, κραμάτων και ενώσεων τα οποία χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στην τεχνολογική πράξη. Επομένως, φαίνεται πλέον ότι ο υπολογισμός ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας αερίων σε σχέση με υλικά αναφοράς άλλα στερεά, είναι πολύ σημαντικός αν πρόκειται να εφαρμόζεται η σχέση (5.1) για τον υπολογισμό ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας μιγμάτων κάθε τύπου. Τα κυριότερα αέρια στοιχεία που χρησιμοποιούνται στα σημερινά (2014) τεχνολογικά υλικά είναι το υδρογόνο, το άζωτο και το οξυγόνο. Τα αέρια αυτά έχουν ενταχθεί στα στοιχεία που ενδιαφέρουν τους σκοπούς αυτής της Διπλωματικής Εργασίας ήδη από το 3^ο Κεφάλαιο (§ 3.6).

5.5.2 Προγραμματιστική υλοποίηση για αέρια

Το προγραμματιστικό πρόβλημα στους υπολογισμούς ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας μεταξύ αερίων και μεταξύ αερίων και στερεών πηγάζει από τη φυσική πραγματικότητα, ότι δηλαδή τα αέρια δεν εξασθενούν στην πράξη μια δέσμη φωτονίων, παρά μόνο αν μεσολαβούν πολύ μεγάλα πάχη από αυτά. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε ως εξής (αφού έγιναν οι κατάλληλες δοκιμές):

(α) Εντάχθηκε στους κώδικες μια διαδικασία ελέγχου που διαπιστώνει αν το υλικό αναφοράς ή το ισοδύναμο υλικό είναι ένα από τα τρία αέρια που ενδιαφέρουν, και αν ναι

(β) Αν το υλικό αναφοράς είναι αέριο και το ισοδύναμο υλικό είναι στερεό, τότε το βήμα πάχους (η μεταβλητή "step") για το αέριο ορίζεται στην τιμή 10cm, ενώ το βήμα πάχους για το στερεό διατηρείται στην τιμή της εισόδου, ή στην εξ' ορισμού τιμή 0.01cm

και

(γ) Αν το υλικό αναφοράς είναι στερεό και το ισοδύναμο υλικό είναι αέριο, τότε το βήμα πάχους (η μεταβλητή "step") για το αέριο ορίζεται στην τιμή 100cm, ενώ το βήμα πάχους για το στερεό διατηρείται στην τιμή της εισόδου, ή στην εξ' ορισμού τιμή 0.01cm

Οι υπολογισμοί ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας για αέρια ή με αέρια γίνονται με βάση τα σημεία (α), (β) και (γ) αν ενεργοποιηθεί μια ειδική σειρά εντολών, οι οποίες βρίσκονται τώρα υπό μορφή σχολίων (comments, βλ. σχετικά και τους κώδικες στο Παράρτημα).

5.5.3 Παραδείγματα συντελεστών ισοδυναμίας

Για την επαλήθευση των πιο πάνω συλλογισμών και της καλής λειτουργίας της προγραμματιστικής υλοποίησης για μίγματα που περιέχουν αέρια στη σύνθεσή τους, επιλέχθηκαν τα εξής μίγματα.

(α) Νερό (H₂O) αποτελούμενο κ.β. από 89% O και 11% H, πίεσεως 1 bar, θερμοκρασίας 20° C, πυκνότητας ~1gcm⁻³

(β) Αέρας αποτελούμενος κ.β. από 75% Άζωτο και 25% Οξυγόνο, πίεσεως 1 atm, θερμοκρασίας 15° C, πυκνότητας 0.00123 gcm⁻³, και

(γ) Poly(methyl methacrylate) ή εμπορικά γνωστό ως "Perspex" ή εμπορικά γνωστό στην Ελλάδα ως "Plexiglass" με χημικό τύπο (C₅O₂H₈)_n, αποτελούμενο κ.β. από 60% C, 32% O και 8% H, πυκνότητας 1.18gcm⁻³

(Το μίγμα (γ) παρότι στερεό διαπραγματεύεται στην ενότητα αυτή, δεδομένου ότι περιέχει στη σύνθεσή του δύο αέρια: το υδρογόνο και το οξυγόνο).

Η επιλογή αυτών των μιγμάτων έγινε διότι διατίθενται για αυτά υπολογισμένοι μαζικοί συντελεστές εξασθένησης (βλ. και NIST, 2014a), με αποτέλεσμα οι υπολογισμοί για τους ραδιογραφικούς συντελεστές ισοδυναμίας να μπορούν να γίνονται τόσο με την υπόθεση ότι τα μίγματα αυτά είναι αυτόνομα υλικά, όσο και με τη χρήση της σχέσης (5.1), για να υπάρχει επαλήθευση των μεθόδων.

Τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται στον Πίνακα 5.11 για υλικό αναφοράς αλουμίνιο και στον Πίνακα 5.12 για υλικό αναφοράς χάλυβα. Είναι φανερό από τα αποτελέσματα ότι οι δύο μέθοδοι υπολογισμών καταλήγουν πρακτικά στους ίδιους συντελεστές, πράγμα που επαληθεύει, όπως αναμενόταν και από τα αποτελέσματα της παραγράφου 5.4 την καλή απόδοση της σχέσης (5.1).

5.6 Πίνακες αποτελεσμάτων ΡΣΙ μεταξύ στοιχείων

5.6.1 Γενικά

Στο Παράρτημα της Διπλωματικής Εργασίας δίνονται σε πίνακες Π_{i,j} τα αποτελέσματα για τους ραδιογραφικούς συντελεστές ισοδυναμίας για όλες τις δυνατές περιπτώσεις συνδυασμών στοιχείων αναφοράς και ισοδύναμων στοιχείων που ενδιαφέρουν, όπως αυτά αναφέρθηκαν στο 3^ο Κεφάλαιο. Οι Πίνακες αυτοί καλύπτουν τις εξής περιπτώσεις φωτονίων:

(α) από μηχανές παραγωγής ακτίνων -x: 50, 100, 150, 200, 250, 300 kV, και

(β) από ραδιοϊσότοπα: Ir-192, Co-60, Cs-137, Ra-226, Se-75

Τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν από λογιστικά φύλλα, τα οποία παράχθηκαν με αυτόματα από τους κώδικες MATLAB, που ήδη περιγράφηκαν στο προηγούμενο 4^ο Κεφάλαιο. Φυσικά για να πραγματοποιηθεί με τους κώδικες αυτή η παραγωγή αποτελεσμάτων χρειάστηκε να τροποποιηθούν ώστε για κάθε στοιχείο αναφοράς από τα επιλεγμένα, να υπολογίζονται όλοι οι ΡΣΙ με όλα τα υπόλοιπα επιλεγμένα ισοδύναμα στοιχεία. Οι σχετικές εντολές επανάληψης θεωρούνται αυτονόητες και δεν περιγράφονται περισσότερο.

Κάθε πίνακας κάθε περίπτωσης καταλαμβάνει έκταση 15 σελίδων από αντίστοιχους 15 υποπίνακες. Στον Πίνακα 5.13, δίνονται πινακοποιημένα τα περιεχόμενα του Παραρτήματος σχετικά με τα αποτελέσματα ΡΣΙ, ώστε να γίνεται πιο εύκολα η αναζήτηση, από τους χρήστες οι οποίοι επιθυμούν να αξιοποιήσουν τις τιμές αυτές.

Επισημαίνεται ότι τα αποτελέσματα των πινάκων σε όλες τις περιπτώσεις υπολογίστηκαν για $\varepsilon = 4$, εκτός από τις περιπτώσεις του Ir-192 και του Se-75, στις οποίες λήφθηκε $\varepsilon = 1$.

5.6.2 Στοιχεία από τη χρήση των πινάκων

- Επειδή είναι γνωστό ότι στην πράξη της βιομηχανικής ραδιογραφίας διατίθενται δύο μόνο διαγράμματα έκθεσης, ένα για χάλυβα και ένα για αλουμίνιο με βάση τα οποία υπολογίζονται εκθέσεις για αυτά τα δύο υλικά, οι πίνακες που συγκεντρώθηκαν στο Παράρτημα, μπορούν κατ' αρχήν να χρησιμοποιούνται για κάθε στοιχείο (οριζόντια πάνω γραμμή) και με στοιχείο αναφοράς τον χάλυβα ή στοιχείο αναφοράς το αλουμίνιο (από την κατακόρυφη αριστερά στήλη). Βέβαια οι πίνακες όπως δίνονται καλύπτουν και περιπτώσεις για τις οποίες δεν υπάρχουν σήμερα (2014) διαγράμματα έκθεσης και επομένως αντίστοιχα στοιχεία αναφοράς (ή υπάρχουν, αλλά δεν είναι ελεύθερα διαθέσιμα).
- Στην περίπτωση που το υλικό αναφοράς είναι π.χ. το αλουμίνιο, και το ισοδύναμο υλικό είναι π.χ. ο χάλυβας, τότε υπάρχουν δύο δρόμοι για τον υπολογισμό του αντίστοιχου ΡΣΙ: (α) ο προφανής ευθύς που δίνει αποτελέσματα που έχουν ήδη πινακοποιηθεί, δηλαδή π.χ. στην περίπτωση των ακτίνων -x των 100 kV είναι ΡΣΙ = 10.9 και (β) ο έμμεσος με τη χρήση ενδιάμεσου ισοδύναμου υλικού. Αν στην περίπτωση αυτή το ενδιάμεσο υλικό είναι π.χ. ο χαλκός, τότε ο ΡΣΙ μεταξύ υλικού αναφοράς αλουμίνιο και ισοδύναμου υλικού χαλκός, έχει την τιμή στην ίδια περίπτωση των ακτίνων -x των 100 kV "16.1". Σε συνέχεια ο ΡΣΙ μεταξύ υλικού αναφοράς χαλκού και ισοδύναμου υλικού χάλυβα, έχει την τιμή στην ίδια περίπτωση των ακτίνων -x των 100 kV "0.68". Το γινόμενο 16.1 x 0.68 είναι ίσο με 10.9, ακριβώς το ίδιο που υπολογίστηκε με τον άμεσο τρόπο. Είναι προφανές και επαληθεύεται εύκολα ότι τα ενδιάμεσα υλικά μπορούν να είναι όσο πολλά κάποιος επιθυμεί.
- Στην περίπτωση που το στοιχείο αναφοράς είναι "Α" και το ισοδύναμο στοιχείο είναι "Β", έστω ότι ο υπολογιζόμενος ΡΣΙ είναι ο ΡΣΙ_{AB}. Στην περίπτωση που το στοιχείο αναφοράς είναι "Β" και το ισοδύναμο στοιχείο είναι "Α", έστω ότι ο υπολογιζόμενος ΡΣΙ είναι ο ΡΣΙ_{BA}. Είναι φανερό και επαληθεύεται από τους πίνακες ότι πάντα:

$$\text{ΡΣΙ}_{AB} \times \text{ΡΣΙ}_{BA} = I \quad (5.2)$$

- Στην περίπτωση που απαιτείται ο υπολογισμός μιγμάτων, όπως ήδη αναλύθηκε, πρέπει αντί των ΡΣΙ να χρησιμοποιείται η ποσότητα ΡΣΙ/ρ, σύμφωνα και με την σχέση (5.1). Είναι δυνατόν να παραχθούν πίνακες όπως

αυτοί του Παραρτήματος, με ποσότητες ΡΣΙ/ρ για κάθε στοιχείο ως συστατικό ενός μίγματος προκειμένου να χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές της σχέσης (5.1). Οι εφαρμογές που ήδη έγιναν με τη χρήση της σχέσης (5.1) για μίγματα για τα οποία υπήρχαν ΡΣΙ από πειράματα έδειξαν ότι η (5.1) αποδίδει αναμενόμενες τιμές. Φυσικά αν πρόκειται για τον υπολογισμό ΡΣΙ ενός τεχνολογικού κράματος σημαντικής σπουδαιότητας, θα πρέπει να γίνεται η επαλήθευση των υπολογισμών και με πείραμα.

5.7 Συνοπτικοί πίνακες αποτελεσμάτων ΡΣΙ μεταξύ στοιχείων

Είναι φανερό ότι οι πίνακες του Παραρτήματος είναι μεγάλοι και πολλοί για εύκολη και γρήγορη χρήση. Κρίθηκε επομένως αναγκαίο να κατασκευασθούν ορισμένοι μικρότεροι, λιγότεροι και συνοπτικότεροι, οι οποίοι να δίνουν ποσοτική και ποιοτική εικόνα για τους συντελεστές ΡΣΙ και από τους οποίους χονδρικά να μπορούν να εκτιμώνται με παρεμβολή τιμές των ΡΣΙ αν χρειάζεται. Για το σκοπό επιλέχθηκε μία σειρά από στοιχεία με χαρακτηριστικούς ατομικούς αριθμούς Z πολύ κοντά στα στοιχεία και τα μίγματα για τα οποία δίνονται τιμές ΡΣΙ στην βιβλιογραφία. Για αυτά τα στοιχεία αυτών των Z δίνονται οι συνοπτικοί πίνακες 5.14 έως και 5.24 στο τέλος του παρόντος Κεφαλαίου για ακτίνες $-x$ των 50, 100, 150, 200, 250 και 300 kV και για φωτόνια από ισότοπα Ir-192, Co-60, Cs-137, Ra-226 και Se-75 αντίστοιχα. Παρόλο που οι πίνακες αυτοί είναι σαφώς συντομότεροι και ευκολότεροι στη χρήση από εκείνους του Παραρτήματος, εξακολουθούν να μην είναι τόσο εύχρηστοι σε ό,τι αφορά τις ποιοτικές αναπαραστάσεις της συμπεριφοράς των ΡΣΙ. Έτσι συμπληρωματικά δημιουργήθηκαν γραφικές αναπαραστάσεις των πινάκων σε τρεις διαστάσεις με τη μορφή υψομετρικών χαρτών (στα αγγλικά contour maps), από τις οποίες ένας χρήστης του υλικού μπορεί να συμπεράνει ποιοτικά τιμές των ΡΣΙ σχετικά ευκολότερα. Αυτές οι αναπαραστάσεις κατασκευάστηκαν με πολυωνυμική παρεμβολή 3^{ης} τάξης για διάφορα φωτόνια ως εξής: ακτίνων $-x$ 50 και 200 kV και ραδιοϊσοτόπων Ir-192, Co-60 και Ra-226. Τα αντίστοιχα γραφήματα δίνονται στα Διαγράμματα 5.11 έως και 5.15.

Δεδομένου ότι οι συνδυασμοί λογισμικών με τα οποία μπορούν να προκύψουν τα γραφήματα αυτά βρέθηκαν σήμερα (2014) και ενδεχομένως δεν θα υπάρχουν με την ίδια λογική σε επόμενη χρονική στιγμή, κρίθηκε σκόπιμο σε αυτό το σημείο, να γίνει μία σύντομη περίληψη σχετικά με το πώς έγινε αυτή η κατασκευή γραφημάτων. Η όλη διαδικασία χωρίζεται σε δύο βήματα: (α) Δημιουργία συντεταγμένων

χαρτογράφησης από τους συνοπτικούς Πίνακες 5.14 έως και 5.24 και (β) Χαρτογράφηση συντεταγμένων τύπου contour map με κατάλληλο αλγόριθμο.

Πιο αναλυτικά:

Δημιουργία συντεταγμένων χαρτογράφησης:

(α1) Με MS EXCEL 2010

Πρόκειται για διαδικασία "un-pivot" πίνακα, η οποία όπως φαίνεται εκτελείται μόνο από τις Professional εκδόσεις του EXCEL και όχι από άλλες, ως εξής:

Εισάγεται σε ένα λογιστικό φύλλο ένας από τους Πίνακες 5.14 έως 5.24. Δεν είναι απαραίτητο αλλά βοηθάει, το άνω αριστερά κελί του πίνακα να ταυτίζεται με το κελί A1 του φύλλου. Στη συνέχεια η διαδρομή ενεργειών είναι:

Data > PivotTable > PivotTable and PivotChart Wizard >

"Check" Multiple Consolidation Ranges & PivotTable > Next >

"Check" I will create the page fields > Next >

Range (Select all table data from sheet) > Add > Next >

New Worksheet > Finish

Στο τέλος της διαδρομής το ζητούμενο δημιουργείται σε ξεχωριστό λογιστικό φύλλο, αν ο χρήστης κάνει "double click" στο κάτω δεξί κελί του "New Worksheet" όπου συναντώνται τα Grand Totals της διαδικασίας "un-pivot". Η πρώτη στήλη είναι η τετμημένη "X" (ο ατομικός αριθμός του υλικού αναφοράς), η δεύτερη στήλη είναι η τεταγμένη "Y" (ο ατομικός αριθμός του ισοδύναμου υλικού) και η τρίτη στήλη είναι η κατηγμένη "Z" (οι τιμές των ΡΣΙ).

(α2) Με Origin 8

Πρόκειται για διαδικασία "Convert Matrix to Worksheet" και ο τρόπος που εκτελείται δεν διερευνήθηκε με επιτυχία. Η διαδρομή ενεργειών φαίνεται να είναι:

File > New > Matrix > OK

Εισάγεται στο λογιστικό φύλλο του Matrix ένας από τους Πίνακες 5.14 έως 5.24. Στη συνέχεια εκτελείται η διαδικασία:

Matrix > Convert to Worksheet

Contour map χαρτογράφηση συντεταγμένων:

(β1) Με Surfer 7

Δοκιμές χαρτογραφήσεων με τη διαδικασία που θα περιγραφεί έδειξαν ότι οι χαρτογραφήσεις γίνονται πολύ παραστατικότερα αν οι κατηγορίες "Z" στο λογιστικό φύλλο που λήφθηκε ως αποτέλεσμα της (α1), μετατραπούν σε δεκαδικούς λογαρίθμους των τιμών ΡΣΙ.

Η διαδικασία με δεδομένα αυτά του λογιστικού φύλλου με συντεταγμένες ($X, Y, \log_{10}P\Sigma I$) έχει ως εξής:

Grid > Data > Open (επιλογή του λογιστικού φύλλου με τις συντεταγμένες) >

Scattered Data Interpolation > General (tab) > Gridding Method >

Polynomial Regression > Options > Cubic surface > OK > OK

Η διαδικασία αυτή δημιουργεί ένα αρχείο πλέγματος με την επέκταση ".grd" στη θέση που υπάρχει το λογιστικό φύλλο με τις συντεταγμένες. Στη συνέχεια πρέπει να ακολουθηθεί επόμενη διαδικασία:

Map > Contour Map > New Contour Map >

Open (επιλογή του αρχείου πλέγματος που ενδιαφέρει) >

Contour Map Properties > "Check" Fill Contours >

"Check" Color Scale > "Check" Smooth Contours > OK

File > New > Matrix > OK

Μετά από αυτή τη διαδικασία λαμβάνεται γράφημα σαν αυτά των Διαγραμμάτων 5.11 έως και 5.15, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να εξάγεται ως αρχείο εικόνας ".jpg".

(β2) Με το ελεύθερο λογισμικό Saga

Το λογισμικό αυτό λειτουργεί παρόμοια όπως το λογισμικό Surfer και είναι ικανό να αποδώσει παρόμοια γραφήματα. Έγιναν σχετικές δοκιμές με

αποτελέσματα παρόμοια με του Surfer, αλλά είναι άσκοπο να παρουσιασθούν εδώ και αυτές οι προσπάθειες.

5.8 Σχόλια και συμπεράσματα

Το παρόν Κεφάλαιο κλείνει την Διπλωματική Εργασία έχοντας μάλλον εξαντλητικά υλοποιήσει τα αναφερόμενα στην εισαγωγή του. Επιμέρους σχόλια σχετικά, γίνονται στις διάφορες παραγράφους που προηγήθηκαν. Συνολικά φαίνεται ότι οι ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας που υπολογίσθηκαν με βάση θεωρητικές αναλύσεις και αποτυπώθηκαν σε πίνακες είναι ορθοί αρκεί να λαμβάνεται με προσοχή υπόψη το πάχος στο οποίο υπολογίζονται και το μέγεθός του σε σχέση με το πάχος υποδιπλασιασμού.

Γενικά για το σύνολο της Διπλωματικής Εργασίας μπορούν να επισημανθούν τα εξής:

A. Σχετικά με τα αποτελέσματα:

- Για τους υπολογισμούς, οι δέσμες φωτονίων θεωρούνται στενές, ομογενείς και παράλληλες.
- Τα φαινόμενα σκεδάσεων φωτονίων και άλλων δευτερογενών αλληλεπιδράσεων της πρωτεύουσας δέσμης που συμβάλλουν στο "build-up" δεν λαμβάνονται υπόψη, κυρίως διότι πολύ λίγο συμβάλλουν στην παραγωγή οπτικής πυκνότητας επί του φιλμ. Παρόλα αυτά τα φαινόμενα "build-up" δεν βοηθούν στην καλή ποιότητα των ραδιογραφικών απεικονίσεων.
- Τα φιλμ θεωρούνται παγχρωματικά και σταθερής φασματικής απόκρισης για κάθε ενέργεια φωτονίων που τα προσβάλλει στην περιοχή ενεργειών φωτονίων της βιομηχανικής ραδιογραφίας. Αυτή η υπόθεση είναι προσεγγιστική και όχι εντελώς αληθινή.
- Οι αιχμές απορρόφησης φωτονίων των διαφόρων ατόμων δεν λαμβάνονται ισχυρά υπόψη. Αυτό οφείλεται κυρίως στον τρόπο που παράγονται τα δεδομένα για τους μαζικούς συντελεστές εξασθένησης από τα λογισμικά του NIST.
- Η πειραματική επαλήθευση ΡΣΙ μεταξύ αερίων και στερεών είναι πρακτικά αδύνατη, διότι ούτε άπειρος χώρος διατίθεται για την μέτρηση εξασθένησης φωτονίων σε αέρια, ούτε δοκίμια στερεών που να διαφέρουν μεταξύ τους απειροστά πάχη, ώστε οι υπολογισμοί ισοδυναμίας να είναι ακριβείς. Από αυτήν

την άποψη αυτή η Διπλωματική Εργασία εισάγει νέα δεδομένα που δεν υπάρχουν αλλού.

- Το μεγαλύτερο πλήθος τιμών ΡΣΙ που παρουσιάζονται, είναι επίσης νέα δεδομένα, τα οποία είναι πολύ χρήσιμα, διότι τα αντίστοιχα πειράματα έχουν πολύ μεγάλο κόστος και πρακτικές δυσκολίες.
- Κρίνεται ότι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται μπορούν άμεσα να ενσωματωθούν σε κώδικες προσομοίωσης ραδιογραφίας, είτε επαγγελματικούς είτε εκπαιδευτικούς, ώστε να μπορούν να υπολογίζονται οι εξασθενήσεις φωτονίων για πάρα πολλά υλικά και μίγματα με διαφορετικές πυκνότητες. Ένας τέτοιος κώδικας είναι π.χ. ο κώδικας XRSIM (βλ. και Θεοδωρόπουλος, 2009) τον οποίον το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας διαθέτει στην εκπαιδευτική του έκδοση. Ο XRSIM διατίθεται και σε επαγγελματική έκδοση.

B. Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

- Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, οι υπολογισμοί των γραμμικών συντελεστών εξασθένησης φωτονίων πραγματοποιήθηκαν με ολοκλήρωση ή άθροιση (ανάλογα τη χρήση) από γραφήματα. Οι υπολογισμοί αυτοί θα μπορούσαν ομοίως ή και καλύτερα να γίνουν με τον κώδικα XCOM, όπως αυτός παρέχεται από το NIST (βλ. και 3^ο Κεφάλαιο). Προτείνεται η χρήση του κώδικα για το σκοπό αυτό. Ο κώδικας είναι γραμμένος σε γλώσσα FORTRAN, αλλά δεδομένου ότι παρέχεται και ο πηγαίος κώδικας θα μπορούσε να μετεγγραφεί και σε MATLAB. Δεν προβλέπονται δυσκολίες σε τέτοια μετεγγραφή δεδομένου ότι όλα τα αρχεία δεδομένων του κώδικα είναι ASCII.
- Πολύ εύκολα θα μπορούσε να διερευνηθεί τόσο θεωρητικά όσο και υπολογιστικά η ενεργειακή κατανομή της απομένουσας πρωτεύουσας δέσμης και όχι μόνο το πλήθος των φωτονίων της. Σε αυτήν την απομένουσα πρωτεύουσα δέσμη θα μπορούσε να προστεθεί και η συμβολή φωτονίων από build-up, αρκεί αυτά να έχουν σημαντική ενέργεια ώστε να αλληλεπιδρούν με το φιλμ. Για τον υπολογισμό της ενέργειας φωτονίων από build up μπορούν να χρησιμοποιούνται και (πολύπλοκες) θεωρητικές σχέσεις αλλά και υπολογιστικές προσομοιώσεις.
- Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η ραδιογραφία γίνεται με τη χρήση δύο ή περισσότερων πηγών. Για το σκοπό αυτό προτείνεται ότι θα είναι χρήσιμοι υπολογισμοί ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας που να καλύπτουν και αυτές τις περιπτώσεις.
- Δεδομένου ότι όπως αναλύθηκε, οι τιμές ΡΣΙ μεταξύ υλικού αναφοράς και ισοδύναμου υλικού, εξαρτώνται στις περισσότερες περιπτώσεις πολύ από το πάχος του υλικού αναφοράς για το οποίο υπολογίζεται η ισοδυναμία, είναι δυνατόν για ορισμένα από τα ραδιογραφικά ισοδύναμα υλικά με μεγαλύτερο τεχνολογικό ενδιαφέρον να παραχθούν συσχετίσεις για τους ΡΣΙ σε συνάρτηση με το πάχος του υλικού αναφοράς. Εννοούνται φυσικά πάντοτε πάχη μεγαλύτερα από ένα τουλάχιστον πάχος υποδιπλασιασμού του υλικού αναφοράς.
- Οι ποιοτικές γραφικές αναπαραστάσεις των ΡΣΙ, όπως παρουσιάστηκαν σε Διαγράμματα στο τέλος του 5^{ου} Κεφαλαίου δείχνουν ότι μάλλον είναι δυνατόν να κατασκευασθούν συσχετίσεις της μορφής:

$$P\Sigma = P\Sigma(Z_{re}, Z_{eq})$$

ή αν θεωρείται ένα σταθερό υλικό αναφοράς

$$P\Sigma I = P\Sigma I(Z_{eq})$$

και σε αυτήν την περίπτωση σε πιο πολύπλοκη μορφή:

$$P\Sigma I = P\Sigma I(Z_{eq}, A_{eq}, \rho_{eq})$$

ΠΙΝΑΚΕΣ 5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Relative Exposure Factors

Type	100kV	200kV	Se75	Ir192	Co 60	Linac/8MeV	Contrast
STX D2	9.0	7.0	6.4	8.0	9.0	9.0	6.0
STX D3sc	9.5	8.0					5.3
STX D3	4.1	4,3	3.6	5.0	5.0	5.1	5.5
STX D4sc	5.4	4.8					4.6
STX D4	3.0	2.7	2.4	3.0	3.0	3.1	5.4
STX D5	1.7	1.5	1.4	1.5	1.5	1.5	5.4
STX D7	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	5.4
STX D8	0.6	0.65	0.6	0.6	0.6	0.6	4.3

Πίνακας 5.1

Διορθωτικοί συντελεστές έκθεσης χαρακτηριστικών καμπύλων για διάφορα φιλμ βιομηχανικής ραδιογραφίας AGFA, ώστε να μπορούν να εφαρμόζονται και για φωτόνια διαφορετικά από τις ακτίνες -x των 200kV (βλ. και το Διάγραμμα 5.3)

ϵ	Se-75	Ir-192	Ra-226
1	7.8	3.9	1.9
2	6.3	3.6	1.8
3	5.7	3.2	1.7
4	5.4	3	1.6

Πίνακας 5.2

ΡΣΙ για φωτόνια ισοτοπικών πηγών με υλικό αναφοράς τον χάλυβα και ισοδύναμο υλικό τον μόλυβδο, όπως υπολογίζονται από τον κώδικα για διάφορες τιμές της παραμέτρου ϵ

ϵ	Se-75	Ir-192	Ra-226
1	16.6	8.3	3.6
2	13.4	7.6	3.2
3	12.2	6.9	3.0
4	11.5	6.3	2.9

Πίνακας 5.3

ΡΣΙ για φωτόνια ισοτοπικών πηγών με υλικό αναφοράς τον χάλυβα και ισοδύναμο υλικό το ουράνιο, όπως υπολογίζονται από τον κώδικα για διάφορες τιμές της παραμέτρου ϵ

ε	HVL Χάλυβα (mm)	HVL Μολύβδου (mm)	ΡΣΙ
Ir-192	12.7	4.8	2.6
Co-60	21.6	12.5	1.7

Πίνακας 5.4α

ΡΣΙ για φωτόνια ισοτοπικών πηγών με υλικό αναφοράς τον χάλυβα και ισοδύναμο υλικό τον μόλυβδο, όπως υπολογίζονται από τον λόγο των παχών υποδιπλασιασμού. Οι τιμές HVL λήφθηκαν από το NDT (2014).

ε	HVL Χάλυβα (mm)	HVL Ουρανίου (mm)	ΡΣΙ
Ir-192	12.7	2.8	4.5
Co-60	21.6	6.9	3.1

Πίνακας 5.4β

ΡΣΙ για φωτόνια ισοτοπικών πηγών με υλικό αναφοράς τον χάλυβα και ισοδύναμο υλικό το ουράνιο, όπως υπολογίζονται από τον λόγο των παχών υποδιπλασιασμού. Οι τιμές HVL λήφθηκαν από το NDT (2014).

	50kV	100kV
Μαγνήσιο	0.55	0.60
Αλουμίνιο	1.0	1.0
Χάλυβας	19	11
Χαλκός	28	16

Πίνακας 5.5

ΡΣΙ για ακτίνες -x χαμηλών ενεργειών με μέταλλο αναφοράς το αλουμίνιο, όπως υπολογίζονται από τον κώδικα στη θέση των αντίστοιχων τιμών που αναφέρονται στην βιβλιογραφία (βλ. και στο 2^ο Κεφάλαιο). (συμπληρώθηκαν και κενά σημεία, όλοι οι υπολογισμοί για $\varepsilon = 4$)

	50kV	100kV	150kV	200kV	250kV	300kV
Μαγνήσιο	0.029	0.06	0.08	0.10	0.11	0.13
Αλουμίνιο	0.053	0.09	0.13	0.16	0.18	0.20
Τιτάνιο	0.34	0.38	0.41	0.44	0.46	0.48
Χάλυβας	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Χαλκός	1.49	1.47	1.42	1.36	1.32	1.29
Ψευδάργυρος	1.32	1.29	1.23	1.16	1.12	1.08
Ζιρκόνιο	2.5	2.4	2.2	1.9	1.7	1.54
Μόλυβδος	5.6	6.6	9.8	11.5	11.9	11.5
Ουράνιο	12.7	13.7	15.9	19.1	20.4	20.4

Πίνακας 5.6

**ΡΣΙ με μέταλλο αναφοράς τον χάλυβα για πηγές ακτίνων -x διαφόρων ενεργειών μέχρι 300kV, όπως υπολογίζονται από τον κώδικα στη θέση των αντίστοιχων τιμών που αναφέρονται στην βιβλιογραφία (βλ. και στο 2^ο Κεφάλαιο).
(συμπληρώθηκαν και κενά σημεία, όλοι οι υπολογισμοί για $\epsilon = 4$)**

	Ir-192	Co-60	Cs-137	Ra-226
Μαγνήσιο	0.22	0.23	0.23	0.23
Αλουμίνιο	0.34	0.35	0.35	0.35
Τιτάνιο	0.55	0.56	0.57	0.57
Χάλυβας	1.0	1.0	1.0	1.0
Χαλκός	1.1	1.1	1.1	1.1
Ψευδάργυρος	0.9	0.9	0.8	0.9
Ζιρκόνιο	0.9	0.8	0.8	0.8
Μόλυβδος	3.9*	1.6	2.2	1.6
Ουράνιο	8.3*	2.8	4.2	2.9

Πίνακας 5.7

**ΡΣΙ με μέταλλο αναφοράς τον χάλυβα για ισοτοπικές πηγές, όπως υπολογίζονται από τον κώδικα στη θέση των αντίστοιχων τιμών που αναφέρονται στην βιβλιογραφία (βλ. και στο 2^ο Κεφάλαιο).
(συμπληρώθηκαν και κενά σημεία, όλοι οι υπολογισμοί για $\epsilon = 4$, εκτός αυτών με αστερίσκο όπου $\epsilon = 1$)**

	50kV	100kV
Αλουμίνιο τύπου 2024	1.4	1.2
Ανοξειδωτος Χάλυβας 18-8	18	11
Inconel	29	17

Πίνακας 5.8

ΡΣΙ για ακτίνες -x χαμηλών ενεργειών με μέταλλο αναφοράς το αλουμίνιο, όπως υπολογίζονται από τον κώδικα στη θέση των αντίστοιχων τιμών που αναφέρονται στην βιβλιογραφία για μίγματα (βλ. και στο 2^ο Κεφάλαιο, συμπληρώθηκαν και κενά σημεία, όλοι οι υπολογισμοί για $\epsilon = 4$)

	50kV	100kV	150kV	200kV	250kV	300kV
Αλουμίνιο τύπου 2024	0.07	0.11	0.14	0.17	0.20	0.21
Ντουραλουμίνιο (4% Cu)	0.07	0.11	0.14	0.17	0.20	0.21
Ανοξειδωτος χάλυβας 18-8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Ορείχαλκος	1.48	1.46	1.40	1.34	1.29	1.26
Μολυβδούχος Ορείχαλκος	1.57	1.56	1.55	1.52	1.48	1.44
Inconel 625	1.52	1.51	1.45	1.38	1.32	1.28
Monel 400	1.39	1.38	1.35	1.31	1.28	1.26

Πίνακας 5.9

ΡΣΙ με μέταλλο αναφοράς τον χάλυβα για πηγές ακτίνων -x διαφόρων ενεργειών μέχρι 300kV, όπως υπολογίζονται από τον κώδικα στη θέση των αντίστοιχων τιμών που αναφέρονται στην βιβλιογραφία για μίγματα (βλ. και στο 2^ο Κεφάλαιο, συμπληρώθηκαν και κενά σημεία, όλοι οι υπολογισμοί για $\epsilon = 4$)

	Ir-192*	Co-60	Cs-137	Ra-226
Αλουμίνιο τύπου 2024	0.35	0.36	0.36	0.36
Ντουραλουμίνιο (4% Cu)	0.35	0.36	0.37	0.36
Ανοξειδωτός χάλυβας 18-8	1.0	1.0	1.0	1.0
Ορείχαλκος	1.1	1.1	1.1	1.1
Μολυβδούχος ορείχαλκος	1.2	1.1	1.1	1.1
Inconel 625	1.1	1.1	1.1	1.1
Monel 400	1.2	1.1	1.1	1.1

Πίνακας 5.10

ΡΣΙ με μέταλλο αναφοράς τον χάλυβα για ισοτοπικές πηγές, όπως υπολογίζονται από τον κώδικα στη θέση των αντίστοιχων τιμών που αναφέρονται στην βιβλιογραφία για μίγματα (βλ. και στο 2^ο Κεφάλαιο, συμπληρώθηκαν και κενά σημεία, όλοι οι υπολογισμοί για $\epsilon = 4$, εκτός αυτών με αστερίσκο όπου $\epsilon = 1$)

	50kV (σχέση 5.1)	100kV (σχέση 5.1)	50kV (NIST)	100kV (NIST)
H ₂ O	0.16	0.26	0.17	0.27
Αέρας	1.9×10^{-4}	3.1×10^{-4}	1.9×10^{-4}	3.0×10^{-4}
Plexiglass	0.18	0.31	0.17	0.30

Πίνακας 5.11

ΡΣΙ για ακτίνες -x χαμηλών ενεργειών με μέταλλο αναφοράς το αλουμίνιο, και ισοδύναμο υλικό ελαφρά μίγματα, όπως υπολογίζονται από τον κώδικα (όλοι οι υπολογισμοί για $\epsilon = 4$)

	50kV (σχέση 5.1)	100kV (σχέση 5.1)	50kV (NIST)	100kV (NIST)
H ₂ O	87x10 ⁻⁴	240x10 ⁻⁴	89x10 ⁻⁴	250x10 ⁻⁴
Αέρας	0.1x10 ⁻⁴	0.28x10 ⁻⁴	0.1x10 ⁻⁴	0.27x10 ⁻⁴
Plexiglass	95x10 ⁻⁴	290x10 ⁻⁴	93x10 ⁻⁴	270x10 ⁻⁴

Πίνακας 5.12

ΡΣΙ για ακτίνες -x χαμηλών ενεργειών με μέταλλο αναφοράς τον χάλυβα, και ισοδύναμο υλικό ελαφρά μίγματα, όπως υπολογίζονται από τον κώδικα (όλοι οι υπολογισμοί για $\epsilon = 4$)

	φωτόνια	Πίνακες ΡΣΙ	σελίδες Παραρτήματος
1	50 kV	Π1.1-Π1.15	Π19-Π33
2	100 kV	Π2.1-Π2.15	Π34-Π48
3	150 kV	Π3.1-Π3.15	Π49-Π63
4	200 kV	Π4.1-Π4.15	Π64-Π78
5	250 kV	Π5.1-Π5.15	Π79-Π93
6	300 kV	Π6.1-Π6.15	Π94-Π108
7	Ir-192	Π7.1-Π7.15	Π109-Π123
8	Co-60	Π8.1-Π8.15	Π124-Π138
9	Cs-137	Π9.1-Π9.15	Π139-Π153
10	Ra-226	Π10.1-Π10.15	Π154-Π168
11	Se-75	Π11.1-Π11.15	Π169-Π183

Πίνακας 5.13

Πίνακας περιεχομένων παραρτήματος της Διπλωματικής Εργασίας για τη διευκόλυνση της αναζήτησης τιμών για ραδιογραφικούς συντελεστές ισοδυναμίας

Z	12	13	14	15	22	26	28	29	30	40	47	50	74	79	82	92
12	1.00E+0	1.81E+0	1.93E+0	2.10E+0	1.15E+1	3.40E+1	4.74E+1	5.04E+1	4.49E+1	8.57E+1	1.92E+2	1.16E+2	2.40E+2	2.92E+2	1.89E+2	4.34E+2
13	5.53E-1	1.00E+0	1.07E+0	1.16E+0	6.37E+0	1.88E+1	2.62E+1	2.79E+1	2.49E+1	4.74E+1	1.06E+2	6.44E+1	1.33E+2	1.61E+2	1.05E+2	2.40E+2
14	5.19E-1	9.38E-1	1.00E+0	1.09E+0	5.98E+0	1.77E+1	2.46E+1	2.62E+1	2.33E+1	4.45E+1	9.96E+1	6.04E+1	1.25E+2	1.51E+2	9.82E+1	2.25E+2
15	4.76E-1	8.60E-1	9.17E-1	1.00E+0	5.48E+0	1.62E+1	2.25E+1	2.40E+1	2.14E+1	4.08E+1	9.14E+1	5.54E+1	1.14E+2	1.39E+2	9.01E+1	2.07E+2
22	8.69E-2	1.57E-1	1.67E-1	1.82E-1	1.00E+0	2.95E+0	4.11E+0	4.37E+0	3.90E+0	7.44E+0	1.67E+1	1.01E+1	2.09E+1	2.53E+1	1.64E+1	3.77E+1
26	2.94E-2	5.31E-2	5.66E-2	6.18E-2	3.39E-1	1.00E+0	1.39E+0	1.48E+0	1.32E+0	2.52E+0	5.65E+0	3.42E+0	7.07E+0	8.57E+0	5.56E+0	1.28E+1
28	2.12E-2	3.83E-2	4.08E-2	4.44E-2	2.44E-1	7.18E-1	1.00E+0	1.06E+0	9.48E-1	1.81E+0	4.06E+0	2.46E+0	5.08E+0	6.16E+0	4.00E+0	9.17E+0
29	2.00E-2	3.61E-2	3.85E-2	4.19E-2	2.30E-1	6.75E-1	9.41E-1	1.00E+0	8.92E-1	1.70E+0	3.83E+0	2.31E+0	4.78E+0	5.80E+0	3.76E+0	8.65E+0
30	2.23E-2	4.02E-2	4.29E-2	4.68E-2	2.56E-1	7.57E-1	1.05E+0	1.12E+0	1.00E+0	1.91E+0	4.27E+0	2.59E+0	5.35E+0	6.49E+0	4.21E+0	9.66E+0
40	1.19E-2	2.14E-2	2.27E-2	2.47E-2	1.35E-1	3.96E-1	5.52E-1	5.86E-1	5.23E-1	1.00E+0	2.25E+0	1.35E+0	2.81E+0	3.42E+0	2.21E+0	5.09E+0
47	5.29E-3	9.51E-3	1.01E-2	1.10E-2	5.99E-2	1.75E-1	2.44E-1	2.59E-1	2.31E-1	4.42E-1	1.00E+0	5.95E-1	1.25E+0	1.51E+0	9.79E-1	2.25E+0
50	8.79E-3	1.58E-2	1.68E-2	1.83E-2	1.00E-1	2.93E-1	4.09E-1	4.34E-1	3.87E-1	7.40E-1	1.67E+0	1.00E+0	2.08E+0	2.53E+0	1.64E+0	3.77E+0
74	4.30E-3	7.71E-3	8.15E-3	8.84E-3	4.82E-2	1.39E-1	1.95E-1	2.07E-1	1.84E-1	3.53E-1	8.05E-1	4.73E-1	1.00E+0	1.21E+0	7.85E-1	1.81E+0
79	3.58E-3	6.40E-3	6.74E-3	7.31E-3	3.96E-2	1.14E-1	1.60E-1	1.69E-1	1.51E-1	2.90E-1	6.64E-1	3.86E-1	8.22E-1	1.00E+0	6.46E-1	1.49E+0
82	5.39E-3	9.70E-3	1.03E-2	1.12E-2	6.12E-2	1.78E-1	2.49E-1	2.64E-1	2.36E-1	4.51E-1	1.02E+0	6.08E-1	1.27E+0	1.54E+0	1.00E+0	2.30E+0
92	2.45E-3	4.36E-3	4.56E-3	4.93E-3	2.64E-2	7.59E-2	1.07E-1	1.12E-1	1.01E-1	1.92E-1	4.46E-1	2.56E-1	5.48E-1	6.67E-1	4.32E-1	1.00E+0

Πίνακας 5.14

ΡΣΙ για πηγές ακτίνων -x 50 kV

(τα υλικά αναφοράς δίνονται στην πρώτη στήλη και τα ισοδύναμα υλικά δίνονται στην πρώτη γραμμή)

Z	12	13	14	15	22	26	28	29	30	40	47	50	74	79	82	92
12	1.00E+0	1.66E+0	1.64E+0	1.67E+0	6.92E+0	1.82E+1	2.53E+1	2.67E+1	2.35E+1	4.43E+1	1.11E+2	8.67E+1	2.22E+2	2.11E+2	1.20E+2	2.50E+2
13	6.01E-1	1.00E+0	9.86E-1	1.01E+0	4.16E+0	1.09E+1	1.52E+1	1.61E+1	1.41E+1	2.66E+1	6.66E+1	5.21E+1	1.33E+2	1.27E+2	7.23E+1	1.50E+2
14	6.09E-1	1.01E+0	1.00E+0	1.02E+0	4.22E+0	1.11E+1	1.54E+1	1.63E+1	1.43E+1	2.70E+1	6.75E+1	5.29E+1	1.35E+2	1.29E+2	7.33E+1	1.52E+2
15	5.98E-1	9.95E-1	9.81E-1	1.00E+0	4.14E+0	1.09E+1	1.51E+1	1.60E+1	1.40E+1	2.65E+1	6.62E+1	5.19E+1	1.33E+2	1.26E+2	7.20E+1	1.49E+2
22	1.45E-1	2.40E-1	2.37E-1	2.42E-1	1.00E+0	2.63E+0	3.66E+0	3.86E+0	3.39E+0	6.40E+0	1.60E+1	1.25E+1	3.20E+1	3.06E+1	1.74E+1	3.61E+1
26	5.51E-2	9.16E-2	9.04E-2	9.21E-2	3.81E-1	1.00E+0	1.39E+0	1.47E+0	1.29E+0	2.43E+0	6.09E+0	4.77E+0	1.22E+1	1.16E+1	6.62E+0	1.37E+1
28	3.98E-2	6.62E-2	6.52E-2	6.64E-2	2.74E-1	7.19E-1	1.00E+0	1.06E+0	9.27E-1	1.75E+0	4.37E+0	3.43E+0	8.81E+0	8.38E+0	4.76E+0	9.87E+0
29	3.77E-2	6.27E-2	6.18E-2	6.29E-2	2.59E-1	6.80E-1	9.46E-1	1.00E+0	8.77E-1	1.65E+0	4.14E+0	3.24E+0	8.35E+0	7.94E+0	4.51E+0	9.34E+0
30	4.26E-2	7.09E-2	7.00E-2	7.13E-2	2.95E-1	7.76E-1	1.08E+0	1.14E+0	1.00E+0	1.89E+0	4.72E+0	3.70E+0	9.46E+0	9.02E+0	5.13E+0	1.06E+1
40	2.29E-2	3.81E-2	3.75E-2	3.82E-2	1.57E-1	4.11E-1	5.72E-1	6.05E-1	5.30E-1	1.00E+0	2.50E+0	1.96E+0	5.06E+0	4.81E+0	2.73E+0	5.65E+0
47	9.08E-3	1.51E-2	1.49E-2	1.52E-2	6.26E-2	1.64E-1	2.29E-1	2.42E-1	2.12E-1	4.00E-1	1.00E+0	7.83E-1	2.01E+0	1.91E+0	1.09E+0	2.26E+0
50	1.18E-2	1.96E-2	1.93E-2	1.96E-2	8.03E-2	2.10E-1	2.92E-1	3.08E-1	2.70E-1	5.09E-1	1.27E+0	1.00E+0	2.61E+0	2.47E+0	1.40E+0	2.88E+0
74	4.57E-3	7.57E-3	7.43E-3	7.54E-3	3.03E-2	7.89E-2	1.10E-1	1.16E-1	1.01E-1	1.91E-1	4.77E-1	3.75E-1	1.00E+0	9.37E-1	5.29E-1	1.08E+0
79	4.83E-3	8.01E-3	7.88E-3	8.00E-3	3.25E-2	8.47E-2	1.18E-1	1.24E-1	1.09E-1	2.05E-1	5.13E-1	4.03E-1	1.06E+0	1.00E+0	5.66E-1	1.16E+0
82	8.46E-3	1.40E-2	1.38E-2	1.41E-2	5.74E-2	1.50E-1	2.09E-1	2.21E-1	1.93E-1	3.64E-1	9.11E-1	7.15E-1	1.86E+0	1.76E+0	1.00E+0	2.06E+0
92	4.30E-3	7.10E-3	6.96E-3	7.05E-3	2.81E-2	7.28E-2	1.01E-1	1.07E-1	9.36E-2	1.76E-1	4.39E-1	3.46E-1	9.35E-1	8.72E-1	4.91E-1	1.00E+0

Πίνακας 5.15

ΡΣΙ για πηγές ακτίνων -x 100 kV

(τα υλικά αναφοράς δίνονται στην πρώτη στήλη και τα ισοδύναμα υλικά δίνονται στην πρώτη γραμμή)

Z	12	13	14	15	22	26	28	29	30	40	47	50	74	79	82	92
12	1.00E+0	1.62E+0	1.56E+0	1.54E+0	5.32E+0	1.29E+1	1.75E+1	1.83E+1	1.58E+1	2.79E+1	6.86E+1	5.42E+1	2.21E+2	2.20E+2	1.27E+2	2.05E+2
13	6.18E-1	1.00E+0	9.62E-1	9.52E-1	3.28E+0	7.96E+0	1.08E+1	1.13E+1	9.77E+0	1.73E+1	4.24E+1	3.35E+1	1.36E+2	1.36E+2	7.82E+1	1.27E+2
14	6.42E-1	1.04E+0	1.00E+0	9.90E-1	3.41E+0	8.27E+0	1.12E+1	1.17E+1	1.02E+1	1.79E+1	4.41E+1	3.48E+1	1.42E+2	1.41E+2	8.13E+1	1.32E+2
15	6.49E-1	1.05E+0	1.01E+0	1.00E+0	3.45E+0	8.35E+0	1.13E+1	1.18E+1	1.02E+1	1.81E+1	4.45E+1	3.52E+1	1.43E+2	1.43E+2	8.21E+1	1.33E+2
22	1.88E-1	3.04E-1	2.93E-1	2.90E-1	1.00E+0	2.42E+0	3.29E+0	3.43E+0	2.97E+0	5.25E+0	1.29E+1	1.02E+1	4.15E+1	4.14E+1	2.38E+1	3.86E+1
26	7.77E-2	1.26E-1	1.21E-1	1.20E-1	4.13E-1	1.00E+0	1.36E+0	1.42E+0	1.23E+0	2.17E+0	5.32E+0	4.21E+0	1.72E+1	1.71E+1	9.83E+0	1.59E+1
28	5.74E-2	9.30E-2	8.94E-2	8.85E-2	3.04E-1	7.36E-1	1.00E+0	1.04E+0	9.03E-1	1.59E+0	3.91E+0	3.09E+0	1.27E+1	1.26E+1	7.26E+0	1.18E+1
29	5.48E-2	8.88E-2	8.54E-2	8.45E-2	2.91E-1	7.06E-1	9.58E-1	1.00E+0	8.66E-1	1.53E+0	3.76E+0	2.97E+0	1.21E+1	1.21E+1	6.94E+0	1.12E+1
30	6.36E-2	1.03E-1	9.89E-2	9.79E-2	3.37E-1	8.15E-1	1.11E+0	1.16E+0	1.00E+0	1.77E+0	4.34E+0	3.43E+0	1.40E+1	1.40E+1	8.03E+0	1.30E+1
40	3.61E-2	5.85E-2	5.62E-2	5.56E-2	1.91E-1	4.62E-1	6.28E-1	6.55E-1	5.67E-1	1.00E+0	2.46E+0	1.94E+0	7.97E+0	7.95E+0	4.56E+0	7.38E+0
47	1.48E-2	2.40E-2	2.31E-2	2.28E-2	7.82E-2	1.89E-1	2.56E-1	2.67E-1	2.31E-1	4.07E-1	1.00E+0	7.90E-1	3.27E+0	3.26E+0	1.87E+0	3.02E+0
50	1.90E-2	3.07E-2	2.95E-2	2.91E-2	9.94E-2	2.40E-1	3.25E-1	3.39E-1	2.93E-1	5.16E-1	1.26E+0	1.00E+0	4.17E+0	4.16E+0	2.39E+0	3.84E+0
74	4.53E-3	7.34E-3	7.05E-3	6.98E-3	2.40E-2	5.81E-2	7.89E-2	8.23E-2	7.12E-2	1.26E-1	3.09E-1	2.44E-1	1.00E+0	9.97E-1	5.73E-1	9.27E-1
79	4.54E-3	7.35E-3	7.07E-3	7.00E-3	2.41E-2	5.83E-2	7.92E-2	8.26E-2	7.15E-2	1.26E-1	3.10E-1	2.45E-1	1.00E+0	1.00E+0	5.74E-1	9.30E-1
82	8.03E-3	1.29E-2	1.24E-2	1.22E-2	4.09E-2	9.76E-2	1.32E-1	1.37E-1	1.19E-1	2.07E-1	5.07E-1	4.01E-1	1.75E+0	1.75E+0	1.00E+0	1.58E+0
92	5.14E-3	8.29E-3	7.93E-3	7.81E-3	2.59E-2	6.15E-2	8.31E-2	8.64E-2	7.46E-2	1.30E-1	3.17E-1	2.50E-1	1.12E+0	1.11E+0	6.38E-1	1.00E+0

Πίνακας 5.16

ΡΣΙ για πηγές ακτίνων -x 150 kV

(τα υλικά αναφοράς δίνονται στην πρώτη στήλη και τα ισοδύναμα υλικά δίνονται στην πρώτη γραμμή)

Z	12	13	14	15	22	26	28	29	30	40	47	50	74	79	82	92
12	1.00E+0	1.60E+0	1.52E+0	1.48E+0	4.54E+0	1.03E+1	1.36E+1	1.40E+1	1.20E+1	1.95E+1	4.67E+1	3.67E+1	1.92E+2	2.01E+2	1.18E+2	1.96E+2
13	6.26E-1	1.00E+0	9.49E-1	9.26E-1	2.84E+0	6.43E+0	8.52E+0	8.77E+0	7.50E+0	1.22E+1	2.92E+1	2.30E+1	1.20E+2	1.25E+2	7.38E+1	1.22E+2
14	6.60E-1	1.05E+0	1.00E+0	9.76E-1	2.99E+0	6.77E+0	8.98E+0	9.24E+0	7.90E+0	1.29E+1	3.08E+1	2.42E+1	1.27E+2	1.32E+2	7.79E+1	1.29E+2
15	6.76E-1	1.08E+0	1.02E+0	1.00E+0	3.06E+0	6.94E+0	9.20E+0	9.47E+0	8.09E+0	1.32E+1	3.15E+1	2.48E+1	1.30E+2	1.35E+2	7.98E+1	1.32E+2
22	2.20E-1	3.52E-1	3.34E-1	3.26E-1	1.00E+0	2.26E+0	3.00E+0	3.09E+0	2.64E+0	4.30E+0	1.03E+1	8.09E+0	4.24E+1	4.42E+1	2.60E+1	4.31E+1
26	9.77E-2	1.56E-1	1.48E-1	1.45E-1	4.42E-1	1.00E+0	1.33E+0	1.36E+0	1.17E+0	1.89E+0	4.53E+0	3.56E+0	1.88E+1	1.96E+1	1.15E+1	1.91E+1
28	7.34E-2	1.17E-1	1.11E-1	1.09E-1	3.33E-1	7.54E-1	1.00E+0	1.03E+0	8.80E-1	1.43E+0	3.42E+0	2.69E+0	1.41E+1	1.47E+1	8.67E+0	1.44E+1
29	7.16E-2	1.14E-1	1.09E-1	1.06E-1	3.24E-1	7.33E-1	9.72E-1	1.00E+0	8.55E-1	1.39E+0	3.32E+0	2.61E+0	1.37E+1	1.43E+1	8.44E+0	1.40E+1
30	8.39E-2	1.34E-1	1.27E-1	1.24E-1	3.79E-1	8.58E-1	1.14E+0	1.17E+0	1.00E+0	1.62E+0	3.89E+0	3.05E+0	1.61E+1	1.68E+1	9.88E+0	1.64E+1
40	5.13E-2	8.20E-2	7.78E-2	7.59E-2	2.33E-1	5.27E-1	6.99E-1	7.19E-1	6.15E-1	1.00E+0	2.39E+0	1.88E+0	9.86E+0	1.03E+1	6.05E+0	1.00E+1
47	2.18E-2	3.48E-2	3.30E-2	3.22E-2	9.81E-2	2.21E-1	2.93E-1	3.02E-1	2.58E-1	4.18E-1	1.00E+0	7.86E-1	4.17E+0	4.35E+0	2.56E+0	4.24E+0
50	2.75E-2	4.39E-2	4.16E-2	4.06E-2	1.24E-1	2.81E-1	3.72E-1	3.83E-1	3.27E-1	5.32E-1	1.27E+0	1.00E+0	5.27E+0	5.50E+0	3.24E+0	5.36E+0
74	5.26E-3	8.40E-3	7.95E-3	7.75E-3	2.34E-2	5.27E-2	6.97E-2	7.16E-2	6.11E-2	9.87E-2	2.35E-1	1.85E-1	1.00E+0	1.05E+0	6.16E-1	1.01E+0
79	5.07E-3	8.08E-3	7.64E-3	7.44E-3	2.23E-2	4.98E-2	6.58E-2	6.76E-2	5.76E-2	9.24E-2	2.20E-1	1.73E-1	9.54E-1	1.00E+0	5.89E-1	9.67E-1
82	8.65E-3	1.38E-2	1.30E-2	1.27E-2	3.76E-2	8.39E-2	1.11E-1	1.14E-1	9.69E-2	1.55E-1	3.68E-1	2.89E-1	1.62E+0	1.70E+0	1.00E+0	1.64E+0
92	5.21E-3	8.30E-3	7.86E-3	7.66E-3	2.31E-2	5.18E-2	6.85E-2	7.04E-2	6.01E-2	9.67E-2	2.31E-1	1.81E-1	9.86E-1	1.03E+0	6.08E-1	1.00E+0

Πίνακας 5.17

ΡΣΙ για πηγές ακτίνων -x 200 kV

(τα υλικά αναφοράς δίνονται στην πρώτη στήλη και τα ισοδύναμα υλικά δίνονται στην πρώτη γραμμή)

Z	12	13	14	15	22	26	28	29	30	40	47	50	74	79	82	92
12	1.00E+0	1.59E+0	1.49E+0	1.44E+0	4.07E+0	8.82E+0	1.15E+1	1.17E+1	9.88E+0	1.50E+1	3.45E+1	2.70E+1	1.61E+2	1.74E+2	1.05E+2	1.79E+2
13	6.31E-1	1.00E+0	9.40E-1	9.09E-1	2.57E+0	5.56E+0	7.24E+0	7.37E+0	6.23E+0	9.44E+0	2.18E+1	1.70E+1	1.02E+2	1.10E+2	6.61E+1	1.13E+2
14	6.71E-1	1.06E+0	1.00E+0	9.67E-1	2.73E+0	5.92E+0	7.69E+0	7.83E+0	6.62E+0	1.00E+1	2.32E+1	1.81E+1	1.08E+2	1.17E+2	7.03E+1	1.20E+2
15	6.94E-1	1.10E+0	1.03E+0	1.00E+0	2.82E+0	6.12E+0	7.95E+0	8.10E+0	6.85E+0	1.04E+1	2.40E+1	1.87E+1	1.12E+2	1.21E+2	7.26E+1	1.24E+2
22	2.46E-1	3.90E-1	3.66E-1	3.54E-1	1.00E+0	2.16E+0	2.81E+0	2.87E+0	2.42E+0	3.67E+0	8.47E+0	6.61E+0	3.96E+1	4.28E+1	2.57E+1	4.41E+1
26	1.14E-1	1.80E-1	1.69E-1	1.64E-1	4.62E-1	1.00E+0	1.30E+0	1.32E+0	1.12E+0	1.69E+0	3.91E+0	3.05E+0	1.83E+1	1.98E+1	1.19E+1	2.04E+1
28	8.75E-2	1.39E-1	1.30E-1	1.26E-1	3.56E-1	7.69E-1	1.00E+0	1.02E+0	8.61E-1	1.30E+0	3.00E+0	2.35E+0	1.41E+1	1.52E+1	9.15E+0	1.57E+1
29	8.56E-2	1.36E-1	1.28E-1	1.23E-1	3.49E-1	7.55E-1	9.82E-1	1.00E+0	8.46E-1	1.28E+0	2.96E+0	2.31E+0	1.38E+1	1.49E+1	8.97E+0	1.54E+1
30	1.01E-1	1.60E-1	1.51E-1	1.46E-1	4.12E-1	8.93E-1	1.16E+0	1.18E+0	1.00E+0	1.51E+0	3.50E+0	2.73E+0	1.63E+1	1.77E+1	1.06E+1	1.82E+1
40	6.71E-2	1.06E-1	1.00E-1	9.67E-2	2.73E-1	5.91E-1	7.68E-1	7.82E-1	6.61E-1	1.00E+0	2.31E+0	1.80E+0	1.08E+1	1.17E+1	7.02E+0	1.20E+1
47	2.94E-2	4.65E-2	4.37E-2	4.23E-2	1.19E-1	2.57E-1	3.34E-1	3.40E-1	2.87E-1	4.34E-1	1.00E+0	7.81E-1	4.70E+0	5.09E+0	3.06E+0	5.24E+0
50	3.73E-2	5.92E-2	5.56E-2	5.38E-2	1.52E-1	3.28E-1	4.26E-1	4.34E-1	3.67E-1	5.55E-1	1.28E+0	1.00E+0	5.99E+0	6.49E+0	3.90E+0	6.68E+0
74	6.29E-3	9.97E-3	9.36E-3	9.04E-3	2.53E-2	5.47E-2	7.10E-2	7.22E-2	6.10E-2	9.19E-2	2.12E-1	1.65E-1	1.00E+0	1.09E+0	6.52E-1	1.12E+0
79	5.93E-3	9.37E-3	8.79E-3	8.47E-3	2.34E-2	5.00E-2	6.47E-2	6.58E-2	5.55E-2	8.26E-2	1.89E-1	1.48E-1	9.15E-1	1.00E+0	6.02E-1	1.03E+0
82	9.75E-3	1.54E-2	1.45E-2	1.40E-2	3.88E-2	8.33E-2	1.08E-1	1.10E-1	9.27E-2	1.39E-1	3.19E-1	2.49E-1	1.52E+0	1.66E+0	1.00E+0	1.71E+0
92	5.79E-3	9.15E-3	8.57E-3	8.25E-3	2.26E-2	4.83E-2	6.24E-2	6.34E-2	5.34E-2	7.93E-2	1.81E-1	1.41E-1	8.82E-1	9.67E-1	5.83E-1	1.00E+0

Πίνακας 5.18

ΡΣΙ για πηγές ακτίνων -x 250 kV

(τα υλικά αναφοράς δίνονται στην πρώτη στήλη και τα ισοδύναμα υλικά δίνονται στην πρώτη γραμμή)

Z	12	13	14	15	22	26	28	29	30	40	47	50	74	79	82	92
12	1.00E+0	1.58E+0	1.47E+0	1.42E+0	3.78E+0	7.92E+0	1.01E+1	1.02E+1	8.58E+0	1.22E+1	2.74E+1	2.12E+1	1.33E+2	1.49E+2	9.07E+1	1.61E+2
13	6.34E-1	1.00E+0	9.34E-1	8.98E-1	2.39E+0	5.02E+0	6.43E+0	6.49E+0	5.44E+0	7.72E+0	1.74E+1	1.34E+1	8.43E+1	9.42E+1	5.75E+1	1.02E+2
14	6.79E-1	1.07E+0	1.00E+0	9.61E-1	2.56E+0	5.38E+0	6.88E+0	6.94E+0	5.82E+0	8.27E+0	1.86E+1	1.44E+1	9.02E+1	1.01E+2	6.16E+1	1.10E+2
15	7.06E-1	1.11E+0	1.04E+0	1.00E+0	2.67E+0	5.59E+0	7.15E+0	7.22E+0	6.06E+0	8.60E+0	1.93E+1	1.49E+1	9.38E+1	1.05E+2	6.40E+1	1.14E+2
22	2.65E-1	4.18E-1	3.90E-1	3.75E-1	1.00E+0	2.10E+0	2.68E+0	2.71E+0	2.27E+0	3.22E+0	7.25E+0	5.60E+0	3.52E+1	3.93E+1	2.40E+1	4.27E+1
26	1.26E-1	1.99E-1	1.86E-1	1.79E-1	4.77E-1	1.00E+0	1.28E+0	1.29E+0	1.08E+0	1.54E+0	3.46E+0	2.67E+0	1.68E+1	1.88E+1	1.15E+1	2.04E+1
28	9.90E-2	1.56E-1	1.46E-1	1.40E-1	3.73E-1	7.82E-1	1.00E+0	1.01E+0	8.47E-1	1.20E+0	2.70E+0	2.09E+0	1.31E+1	1.47E+1	8.95E+0	1.59E+1
29	9.80E-2	1.54E-1	1.44E-1	1.39E-1	3.69E-1	7.74E-1	9.91E-1	1.00E+0	8.39E-1	1.19E+0	2.67E+0	2.07E+0	1.30E+1	1.45E+1	8.87E+0	1.58E+1
30	1.17E-1	1.84E-1	1.72E-1	1.65E-1	4.40E-1	9.23E-1	1.18E+0	1.19E+0	1.00E+0	1.42E+0	3.19E+0	2.47E+0	1.55E+1	1.73E+1	1.06E+1	1.88E+1
40	8.22E-2	1.30E-1	1.21E-1	1.16E-1	3.10E-1	6.51E-1	8.32E-1	8.40E-1	7.05E-1	1.00E+0	2.25E+0	1.74E+0	1.09E+1	1.22E+1	7.45E+0	1.33E+1
47	3.67E-2	5.78E-2	5.40E-2	5.19E-2	1.38E-1	2.90E-1	3.71E-1	3.74E-1	3.14E-1	4.45E-1	1.00E+0	7.73E-1	4.86E+0	5.43E+0	3.32E+0	5.90E+0
50	4.76E-2	7.50E-2	7.00E-2	6.73E-2	1.79E-1	3.75E-1	4.80E-1	4.84E-1	4.06E-1	5.76E-1	1.29E+0	1.00E+0	6.28E+0	7.04E+0	4.30E+0	7.65E+0
74	7.97E-3	1.25E-2	1.17E-2	1.12E-2	2.93E-2	6.09E-2	7.76E-2	7.82E-2	6.54E-2	9.15E-2	2.04E-1	1.57E-1	1.00E+0	1.13E+0	6.93E-1	1.24E+0
79	6.97E-3	1.10E-2	1.02E-2	9.80E-3	2.58E-2	5.37E-2	6.85E-2	6.90E-2	5.78E-2	8.11E-2	1.81E-1	1.40E-1	8.87E-1	1.00E+0	6.12E-1	1.10E+0
82	1.10E-2	1.74E-2	1.63E-2	1.56E-2	4.16E-2	8.73E-2	1.12E-1	1.13E-1	9.46E-2	1.34E-1	3.02E-1	2.33E-1	1.46E+0	1.64E+0	1.00E+0	1.78E+0
92	6.53E-3	1.03E-2	9.55E-3	9.14E-3	2.36E-2	4.89E-2	6.22E-2	6.26E-2	5.23E-2	7.25E-2	1.61E-1	1.24E-1	7.91E-1	9.00E-1	5.54E-1	1.00E+0

Πίνακας 5.19

ΡΣΙ για πηγές ακτίνων -x 300 kV

(τα υλικά αναφοράς δίνονται στην πρώτη στήλη και τα ισοδύναμα υλικά δίνονται στην πρώτη γραμμή)

Z	12	13	14	15	22	26	28	29	30	40	47	50	74	79	82	92
12	1.00E+0	1.54E+0	1.38E+0	1.27E+0	2.53E+0	4.60E+0	5.45E+0	5.21E+0	4.26E+0	4.25E+0	7.65E+0	5.53E+0	2.53E+1	2.88E+1	1.80E+1	3.81E+1
13	6.50E-1	1.00E+0	8.94E-1	8.23E-1	1.65E+0	2.99E+0	3.54E+0	3.39E+0	2.77E+0	2.77E+0	4.97E+0	3.60E+0	1.64E+1	1.87E+1	1.17E+1	2.48E+1
14	7.27E-1	1.12E+0	1.00E+0	9.20E-1	1.84E+0	3.34E+0	3.96E+0	3.79E+0	3.10E+0	3.09E+0	5.56E+0	4.02E+0	1.84E+1	2.10E+1	1.31E+1	2.77E+1
15	7.90E-1	1.22E+0	1.09E+0	1.00E+0	2.00E+0	3.63E+0	4.31E+0	4.12E+0	3.36E+0	3.36E+0	6.05E+0	4.37E+0	2.00E+1	2.28E+1	1.42E+1	3.01E+1
22	3.95E-1	6.07E-1	5.43E-1	4.99E-1	1.00E+0	1.81E+0	2.15E+0	2.06E+0	1.68E+0	1.68E+0	3.02E+0	2.18E+0	9.96E+0	1.14E+1	7.10E+0	1.50E+1
26	2.18E-1	3.35E-1	2.99E-1	2.75E-1	5.51E-1	1.00E+0	1.19E+0	1.13E+0	9.26E-1	9.26E-1	1.66E+0	1.20E+0	5.49E+0	6.27E+0	3.91E+0	8.28E+0
28	1.83E-1	2.82E-1	2.52E-1	2.32E-1	4.65E-1	8.43E-1	1.00E+0	9.56E-1	7.81E-1	7.80E-1	1.40E+0	1.01E+0	4.63E+0	5.29E+0	3.30E+0	6.98E+0
29	1.92E-1	2.95E-1	2.64E-1	2.43E-1	4.86E-1	8.82E-1	1.05E+0	1.00E+0	8.17E-1	8.16E-1	1.47E+0	1.06E+0	4.84E+0	5.53E+0	3.45E+0	7.31E+0
30	2.35E-1	3.61E-1	3.23E-1	2.97E-1	5.95E-1	1.08E+0	1.28E+0	1.22E+0	1.00E+0	9.99E-1	1.80E+0	1.30E+0	5.93E+0	6.77E+0	4.22E+0	8.94E+0
40	2.35E-1	3.62E-1	3.23E-1	2.97E-1	5.96E-1	1.08E+0	1.28E+0	1.22E+0	1.00E+0	1.00E+0	1.80E+0	1.30E+0	5.93E+0	6.78E+0	4.23E+0	8.95E+0
47	1.31E-1	2.01E-1	1.80E-1	1.65E-1	3.31E-1	6.01E-1	7.13E-1	6.81E-1	5.57E-1	5.56E-1	1.00E+0	7.23E-1	3.30E+0	3.77E+0	2.35E+0	4.97E+0
50	1.81E-1	2.78E-1	2.49E-1	2.29E-1	4.58E-1	8.31E-1	9.86E-1	9.43E-1	7.70E-1	7.69E-1	1.38E+0	1.00E+0	4.56E+0	5.21E+0	3.25E+0	6.88E+0
74	3.97E-2	6.10E-2	5.46E-2	5.02E-2	1.01E-1	1.82E-1	2.16E-1	2.07E-1	1.69E-1	1.69E-1	3.03E-1	2.19E-1	1.00E+0	1.14E+0	7.12E-1	1.51E+0
79	3.48E-2	5.35E-2	4.78E-2	4.40E-2	8.81E-2	1.60E-1	1.90E-1	1.81E-1	1.48E-1	1.48E-1	2.66E-1	1.92E-1	8.76E-1	1.00E+0	6.24E-1	1.32E+0
82	5.57E-2	8.57E-2	7.67E-2	7.05E-2	1.41E-1	2.56E-1	3.04E-1	2.90E-1	2.37E-1	2.37E-1	4.26E-1	3.08E-1	1.40E+0	1.60E+0	1.00E+0	2.12E+0
92	2.63E-2	4.04E-2	3.61E-2	3.32E-2	6.66E-2	1.21E-1	1.43E-1	1.37E-1	1.12E-1	1.12E-1	2.01E-1	1.45E-1	6.63E-1	7.57E-1	4.72E-1	1.00E+0

Πίνακας 5.20

ΡΣΙ για ισοτοπικές πηγές Ir-192

(τα υλικά αναφοράς δίνονται στην πρώτη στήλη και τα ισοδύναμα υλικά δίνονται στην πρώτη γραμμή)

Z	12	13	14	15	22	26	28	29	30	40	47	50	74	79	82	92
12	1.00E+0	1.53E+0	1.36E+0	1.27E+0	2.45E+0	4.37E+0	5.00E+0	4.84E+0	3.86E+0	3.46E+0	5.66E+0	3.82E+0	1.11E+1	1.15E+1	6.91E+0	1.24E+1
13	6.52E-1	1.00E+0	8.88E-1	8.27E-1	1.60E+0	2.85E+0	3.26E+0	3.16E+0	2.52E+0	2.26E+0	3.69E+0	2.49E+0	7.23E+0	7.53E+0	4.51E+0	8.12E+0
14	7.35E-1	1.13E+0	1.00E+0	9.32E-1	1.80E+0	3.21E+0	3.68E+0	3.55E+0	2.84E+0	2.54E+0	4.16E+0	2.80E+0	8.15E+0	8.48E+0	5.08E+0	9.14E+0
15	7.88E-1	1.21E+0	1.07E+0	1.00E+0	1.93E+0	3.44E+0	3.94E+0	3.81E+0	3.04E+0	2.73E+0	4.46E+0	3.01E+0	8.74E+0	9.10E+0	5.45E+0	9.81E+0
22	4.08E-1	6.25E-1	5.55E-1	5.17E-1	1.00E+0	1.78E+0	2.04E+0	1.97E+0	1.57E+0	1.41E+0	2.31E+0	1.56E+0	4.52E+0	4.71E+0	2.82E+0	5.08E+0
26	2.29E-1	3.51E-1	3.12E-1	2.91E-1	5.62E-1	1.00E+0	1.15E+0	1.11E+0	8.84E-1	7.92E-1	1.30E+0	8.74E-1	2.54E+0	2.64E+0	1.58E+0	2.85E+0
28	2.00E-1	3.06E-1	2.72E-1	2.54E-1	4.90E-1	8.73E-1	1.00E+0	9.67E-1	7.72E-1	6.91E-1	1.13E+0	7.63E-1	2.22E+0	2.31E+0	1.38E+0	2.49E+0
29	2.07E-1	3.17E-1	2.81E-1	2.62E-1	5.07E-1	9.02E-1	1.03E+0	1.00E+0	7.98E-1	7.15E-1	1.17E+0	7.89E-1	2.29E+0	2.39E+0	1.43E+0	2.57E+0
30	2.59E-1	3.97E-1	3.53E-1	3.29E-1	6.35E-1	1.13E+0	1.30E+0	1.25E+0	1.00E+0	8.95E-1	1.47E+0	9.89E-1	2.87E+0	2.99E+0	1.79E+0	3.22E+0
40	2.89E-1	4.43E-1	3.94E-1	3.67E-1	7.09E-1	1.26E+0	1.45E+0	1.40E+0	1.12E+0	1.00E+0	1.64E+0	1.10E+0	3.21E+0	3.34E+0	2.00E+0	3.60E+0
47	1.77E-1	2.71E-1	2.40E-1	2.24E-1	4.33E-1	7.71E-1	8.84E-1	8.55E-1	6.82E-1	6.11E-1	1.00E+0	6.74E-1	1.96E+0	2.04E+0	1.22E+0	2.20E+0
50	2.62E-1	4.02E-1	3.57E-1	3.32E-1	6.42E-1	1.14E+0	1.31E+0	1.27E+0	1.01E+0	9.06E-1	1.48E+0	1.00E+0	2.91E+0	3.02E+0	1.81E+0	3.26E+0
74	9.02E-2	1.38E-1	1.23E-1	1.14E-1	2.21E-1	3.94E-1	4.51E-1	4.36E-1	3.48E-1	3.12E-1	5.10E-1	3.44E-1	1.00E+0	1.04E+0	6.23E-1	1.12E+0
79	8.66E-2	1.33E-1	1.18E-1	1.10E-1	2.12E-1	3.78E-1	4.33E-1	4.19E-1	3.34E-1	2.99E-1	4.90E-1	3.31E-1	9.61E-1	1.00E+0	5.98E-1	1.08E+0
82	1.45E-1	2.22E-1	1.97E-1	1.84E-1	3.55E-1	6.32E-1	7.24E-1	7.00E-1	5.59E-1	5.00E-1	8.19E-1	5.53E-1	1.61E+0	1.67E+0	1.00E+0	1.80E+0
92	8.04E-2	1.23E-1	1.09E-1	1.02E-1	1.97E-1	3.51E-1	4.02E-1	3.89E-1	3.10E-1	2.78E-1	4.55E-1	3.07E-1	8.91E-1	9.28E-1	5.55E-1	1.00E+0

Πίνακας 5.21

ΡΣΙ για ισοτοπικές πηγές Co-60

(τα υλικά αναφοράς δίνονται στην πρώτη στήλη και τα ισοδύναμα υλικά δίνονται στην πρώτη γραμμή)

Z	12	13	14	15	22	26	28	29	30	40	47	50	74	79	82	92
12	1.00E+0	1.53E+0	1.37E+0	1.25E+0	2.48E+0	4.33E+0	5.07E+0	4.91E+0	3.94E+0	3.57E+0	6.10E+0	4.14E+0	1.42E+1	1.53E+1	9.50E+0	1.83E+1
13	6.52E-1	1.00E+0	8.89E-1	8.14E-1	1.62E+0	2.82E+0	3.31E+0	3.20E+0	2.57E+0	2.33E+0	3.98E+0	2.70E+0	9.28E+0	9.96E+0	6.19E+0	1.19E+1
14	7.32E-1	1.12E+0	1.00E+0	9.15E-1	1.82E+0	3.17E+0	3.72E+0	3.59E+0	2.89E+0	2.62E+0	4.47E+0	3.03E+0	1.04E+1	1.12E+1	6.96E+0	1.34E+1
15	8.00E-1	1.23E+0	1.09E+0	1.00E+0	1.99E+0	3.47E+0	4.06E+0	3.93E+0	3.16E+0	2.86E+0	4.89E+0	3.31E+0	1.14E+1	1.22E+1	7.61E+0	1.47E+1
22	4.03E-1	6.19E-1	5.50E-1	5.04E-1	1.00E+0	1.75E+0	2.05E+0	1.98E+0	1.59E+0	1.44E+0	2.46E+0	1.67E+0	5.74E+0	6.16E+0	3.83E+0	7.39E+0
26	2.31E-1	3.54E-1	3.15E-1	2.88E-1	5.72E-1	1.00E+0	1.17E+0	1.13E+0	9.09E-1	8.24E-1	1.41E+0	9.55E-1	3.29E+0	3.53E+0	2.19E+0	4.23E+0
28	1.97E-1	3.03E-1	2.69E-1	2.46E-1	4.89E-1	8.54E-1	1.00E+0	9.67E-1	7.77E-1	7.04E-1	1.20E+0	8.16E-1	2.81E+0	3.01E+0	1.87E+0	3.61E+0
29	2.04E-1	3.13E-1	2.78E-1	2.55E-1	5.06E-1	8.83E-1	1.03E+0	1.00E+0	8.03E-1	7.28E-1	1.24E+0	8.44E-1	2.90E+0	3.12E+0	1.94E+0	3.74E+0
30	2.54E-1	3.89E-1	3.46E-1	3.17E-1	6.29E-1	1.10E+0	1.29E+0	1.24E+0	1.00E+0	9.06E-1	1.55E+0	1.05E+0	3.61E+0	3.88E+0	2.41E+0	4.65E+0
40	2.80E-1	4.30E-1	3.82E-1	3.50E-1	6.94E-1	1.21E+0	1.42E+0	1.37E+0	1.10E+0	1.00E+0	1.71E+0	1.16E+0	3.99E+0	4.28E+0	2.66E+0	5.13E+0
47	1.64E-1	2.51E-1	2.24E-1	2.05E-1	4.06E-1	7.10E-1	8.31E-1	8.04E-1	6.46E-1	5.85E-1	1.00E+0	6.78E-1	2.33E+0	2.51E+0	1.56E+0	3.00E+0
50	2.41E-1	3.71E-1	3.30E-1	3.02E-1	5.99E-1	1.05E+0	1.23E+0	1.18E+0	9.52E-1	8.63E-1	1.47E+0	1.00E+0	3.44E+0	3.69E+0	2.30E+0	4.43E+0
74	7.02E-2	1.08E-1	9.58E-2	8.77E-2	1.74E-1	3.04E-1	3.56E-1	3.44E-1	2.77E-1	2.51E-1	4.28E-1	2.91E-1	1.00E+0	1.07E+0	6.67E-1	1.29E+0
79	6.54E-2	1.00E-1	8.93E-2	8.17E-2	1.62E-1	2.83E-1	3.32E-1	3.21E-1	2.58E-1	2.34E-1	3.99E-1	2.71E-1	9.32E-1	1.00E+0	6.22E-1	1.20E+0
82	1.05E-1	1.61E-1	1.44E-1	1.31E-1	2.61E-1	4.56E-1	5.34E-1	5.16E-1	4.15E-1	3.76E-1	6.42E-1	4.36E-1	1.50E+0	1.61E+0	1.00E+0	1.93E+0
92	5.45E-2	8.37E-2	7.45E-2	6.81E-2	1.35E-1	2.36E-1	2.77E-1	2.68E-1	2.15E-1	1.95E-1	3.33E-1	2.26E-1	7.77E-1	8.34E-1	5.18E-1	1.00E+0

Πίνακας 5.22

ΡΣΙ για ισοτοπικές πηγές Cs-137

(τα υλικά αναφοράς δίνονται στην πρώτη στήλη και τα ισοδύναμα υλικά δίνονται στην πρώτη γραμμή)

Z	12	13	14	15	22	26	28	29	30	40	47	50	74	79	82	92
12	1.00E+0	1.51E+0	1.35E+0	1.25E+0	2.46E+0	4.35E+0	5.04E+0	4.85E+0	3.92E+0	3.50E+0	5.80E+0	3.93E+0	1.14E+1	1.20E+1	7.08E+0	1.27E+1
13	6.61E-1	1.00E+0	8.90E-1	8.29E-1	1.63E+0	2.87E+0	3.33E+0	3.20E+0	2.59E+0	2.31E+0	3.84E+0	2.60E+0	7.55E+0	7.90E+0	4.68E+0	8.39E+0
14	7.42E-1	1.12E+0	1.00E+0	9.32E-1	1.83E+0	3.23E+0	3.74E+0	3.60E+0	2.91E+0	2.60E+0	4.31E+0	2.92E+0	8.48E+0	8.88E+0	5.25E+0	9.42E+0
15	7.97E-1	1.21E+0	1.07E+0	1.00E+0	1.96E+0	3.47E+0	4.02E+0	3.86E+0	3.12E+0	2.79E+0	4.63E+0	3.13E+0	9.11E+0	9.53E+0	5.64E+0	1.01E+1
22	4.06E-1	6.15E-1	5.47E-1	5.10E-1	1.00E+0	1.77E+0	2.05E+0	1.97E+0	1.59E+0	1.42E+0	2.36E+0	1.60E+0	4.64E+0	4.86E+0	2.87E+0	5.16E+0
26	2.30E-1	3.48E-1	3.10E-1	2.89E-1	5.66E-1	1.00E+0	1.16E+0	1.12E+0	9.01E-1	8.05E-1	1.33E+0	9.04E-1	2.63E+0	2.75E+0	1.63E+0	2.92E+0
28	1.98E-1	3.00E-1	2.67E-1	2.49E-1	4.88E-1	8.63E-1	1.00E+0	9.62E-1	7.78E-1	6.94E-1	1.15E+0	7.80E-1	2.27E+0	2.37E+0	1.40E+0	2.52E+0
29	2.06E-1	3.12E-1	2.78E-1	2.59E-1	5.08E-1	8.97E-1	1.04E+0	1.00E+0	8.08E-1	7.22E-1	1.20E+0	8.11E-1	2.36E+0	2.47E+0	1.46E+0	2.62E+0
30	2.55E-1	3.86E-1	3.44E-1	3.20E-1	6.28E-1	1.11E+0	1.29E+0	1.24E+0	1.00E+0	8.93E-1	1.48E+0	1.00E+0	2.92E+0	3.05E+0	1.81E+0	3.24E+0
40	2.86E-1	4.32E-1	3.85E-1	3.58E-1	7.03E-1	1.24E+0	1.44E+0	1.39E+0	1.12E+0	1.00E+0	1.66E+0	1.12E+0	3.26E+0	3.42E+0	2.02E+0	3.63E+0
47	1.72E-1	2.61E-1	2.32E-1	2.16E-1	4.24E-1	7.49E-1	8.68E-1	8.36E-1	6.75E-1	6.03E-1	1.00E+0	6.77E-1	1.97E+0	2.06E+0	1.22E+0	2.19E+0
50	2.54E-1	3.85E-1	3.43E-1	3.19E-1	6.26E-1	1.11E+0	1.28E+0	1.23E+0	9.97E-1	8.90E-1	1.48E+0	1.00E+0	2.91E+0	3.04E+0	1.80E+0	3.23E+0
74	8.75E-2	1.32E-1	1.18E-1	1.10E-1	2.15E-1	3.81E-1	4.41E-1	4.24E-1	3.43E-1	3.06E-1	5.08E-1	3.44E-1	1.00E+0	1.05E+0	6.19E-1	1.11E+0
79	8.36E-2	1.27E-1	1.13E-1	1.05E-1	2.06E-1	3.64E-1	4.21E-1	4.05E-1	3.28E-1	2.93E-1	4.85E-1	3.29E-1	9.55E-1	1.00E+0	5.91E-1	1.06E+0
82	1.41E-1	2.14E-1	1.90E-1	1.77E-1	3.48E-1	6.15E-1	7.13E-1	6.86E-1	5.54E-1	4.95E-1	8.21E-1	5.56E-1	1.62E+0	1.69E+0	1.00E+0	1.79E+0
92	7.88E-2	1.19E-1	1.06E-1	9.89E-2	1.94E-1	3.43E-1	3.97E-1	3.82E-1	3.09E-1	2.76E-1	4.57E-1	3.10E-1	9.00E-1	9.42E-1	5.57E-1	1.00E+0

Πίνακας 5.23

ΡΣΙ για ισοτοπικές πηγές Ra-226

(τα υλικά αναφοράς δίνονται στην πρώτη στήλη και τα ισοδύναμα υλικά δίνονται στην πρώτη γραμμή)

Z	12	13	14	15	22	26	28	29	30	40	47	50	74	79	82	92
12	1.00E+0	1.52E+0	1.37E+0	1.28E+0	2.79E+0	5.31E+0	6.54E+0	6.48E+0	5.32E+0	6.38E+0	1.31E+1	9.73E+0	5.66E+1	6.55E+1	4.16E+1	8.87E+1
13	6.59E-1	1.00E+0	9.03E-1	8.43E-1	1.84E+0	3.50E+0	4.31E+0	4.27E+0	3.51E+0	4.20E+0	8.63E+0	6.41E+0	3.73E+1	4.32E+1	2.74E+1	5.84E+1
14	7.29E-1	1.11E+0	1.00E+0	9.34E-1	2.03E+0	3.88E+0	4.77E+0	4.73E+0	3.88E+0	4.65E+0	9.56E+0	7.10E+0	4.13E+1	4.78E+1	3.03E+1	6.47E+1
15	7.81E-1	1.19E+0	1.07E+0	1.00E+0	2.18E+0	4.15E+0	5.11E+0	5.07E+0	4.16E+0	4.98E+0	1.02E+1	7.60E+0	4.43E+1	5.12E+1	3.25E+1	6.93E+1
22	3.59E-1	5.45E-1	4.92E-1	4.59E-1	1.00E+0	1.91E+0	2.34E+0	2.33E+0	1.91E+0	2.29E+0	4.70E+0	3.49E+0	2.03E+1	2.35E+1	1.49E+1	3.18E+1
26	1.88E-1	2.86E-1	2.58E-1	2.41E-1	5.25E-1	1.00E+0	1.23E+0	1.22E+0	1.00E+0	1.20E+0	2.46E+0	1.83E+0	1.06E+1	1.23E+1	7.79E+0	1.66E+1
28	1.53E-1	2.32E-1	2.10E-1	1.96E-1	4.27E-1	8.13E-1	1.00E+0	9.92E-1	8.14E-1	9.74E-1	2.00E+0	1.48E+0	8.63E+0	9.98E+0	6.34E+0	1.35E+1
29	1.54E-1	2.34E-1	2.11E-1	1.97E-1	4.30E-1	8.20E-1	1.01E+0	1.00E+0	8.21E-1	9.83E-1	2.02E+0	1.50E+0	8.72E+0	1.01E+1	6.40E+0	1.37E+1
30	1.88E-1	2.85E-1	2.57E-1	2.40E-1	5.24E-1	9.98E-1	1.23E+0	1.22E+0	1.00E+0	1.20E+0	2.46E+0	1.83E+0	1.06E+1	1.23E+1	7.81E+0	1.67E+1
40	1.57E-1	2.38E-1	2.15E-1	2.01E-1	4.38E-1	8.34E-1	1.03E+0	1.02E+0	8.36E-1	1.00E+0	2.06E+0	1.53E+0	8.87E+0	1.03E+1	6.51E+0	1.39E+1
47	7.65E-2	1.16E-1	1.05E-1	9.79E-2	2.13E-1	4.06E-1	5.00E-1	4.96E-1	4.07E-1	4.87E-1	1.00E+0	7.42E-1	4.31E+0	4.99E+0	3.17E+0	6.76E+0
50	1.03E-1	1.56E-1	1.41E-1	1.32E-1	2.87E-1	5.48E-1	6.73E-1	6.68E-1	5.48E-1	6.56E-1	1.35E+0	1.00E+0	5.81E+0	6.73E+0	4.27E+0	9.11E+0
74	1.77E-2	2.69E-2	2.43E-2	2.27E-2	4.94E-2	9.41E-2	1.16E-1	1.15E-1	9.43E-2	1.13E-1	2.32E-1	1.72E-1	1.00E+0	1.16E+0	7.34E-1	1.57E+0
79	1.59E-2	2.42E-2	2.18E-2	2.04E-2	4.43E-2	8.43E-2	1.03E-1	1.03E-1	8.42E-2	9.97E-2	2.03E-1	1.50E-1	8.65E-1	1.00E+0	6.35E-1	1.35E+0
82	2.48E-2	3.76E-2	3.39E-2	3.17E-2	6.89E-2	1.31E-1	1.61E-1	1.60E-1	1.31E-1	1.56E-1	3.19E-1	2.36E-1	1.36E+0	1.58E+0	1.00E+0	2.13E+0
92	1.14E-2	1.74E-2	1.57E-2	1.46E-2	3.19E-2	6.07E-2	7.46E-2	7.40E-2	6.08E-2	7.25E-2	1.49E-1	1.10E-1	6.38E-1	7.39E-1	4.69E-1	1.00E+0

Πίνακας 5.24

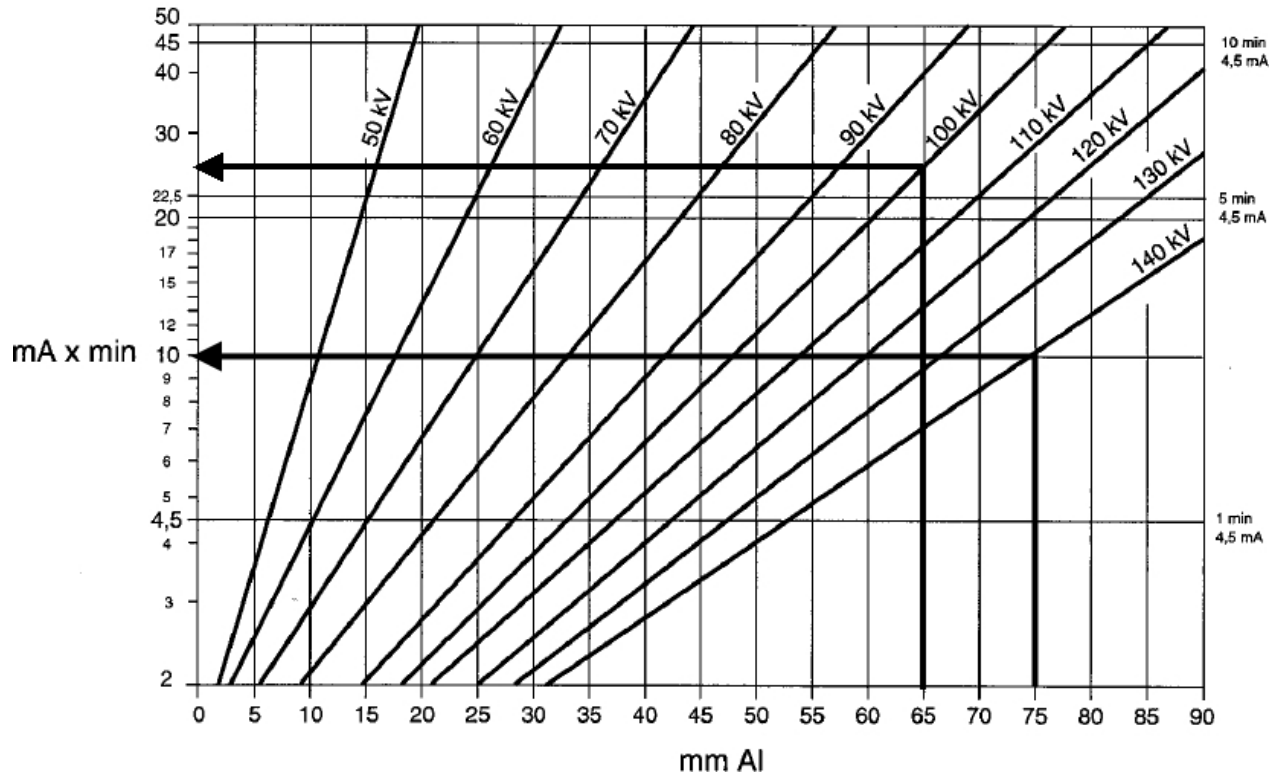
ΡΣΙ για ισοτοπικές πηγές Se-75

(τα υλικά αναφοράς δίνονται στην πρώτη στήλη και τα ισοδύναμα υλικά δίνονται στην πρώτη γραμμή)

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ 5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

ERESCO 42 MF3

Exposure Diagram
FFD = 700 mm D4 D = 2.0

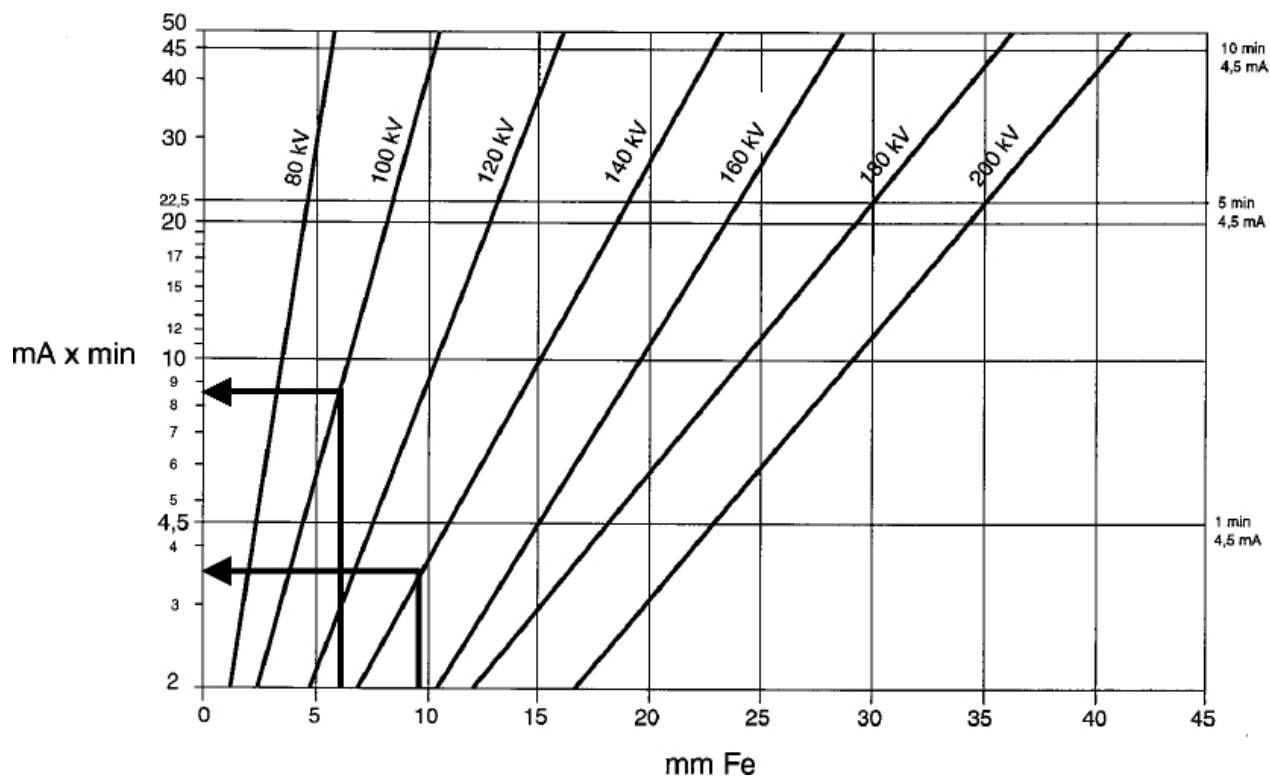


Διάγραμμα 5.1

Τυπικό διάγραμμα έκθεσης αλουμινίου από ακτίνες -x για διάφορες υψηλές τάσεις για την μηχανή παραγωγής ακτίνων -x τύπου ERESKO 42 MF3 της εταιρείας κατασκευής General Electric Sensing and Inspection Technologies

ERESCO 42 MF3

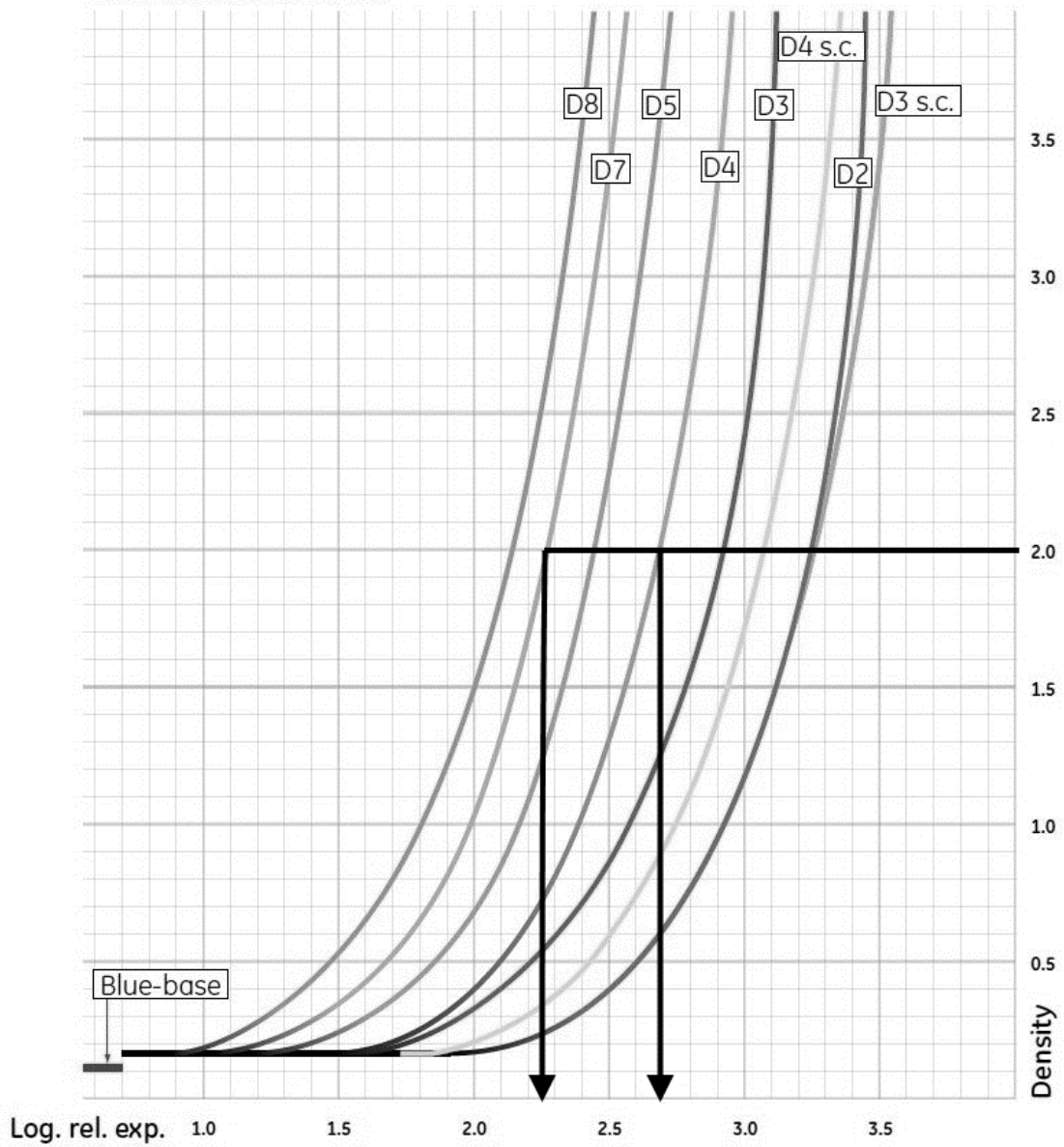
Exposure Diagram
FFD = 700 mm D7Pb D = 2.0



Διάγραμμα 5.2

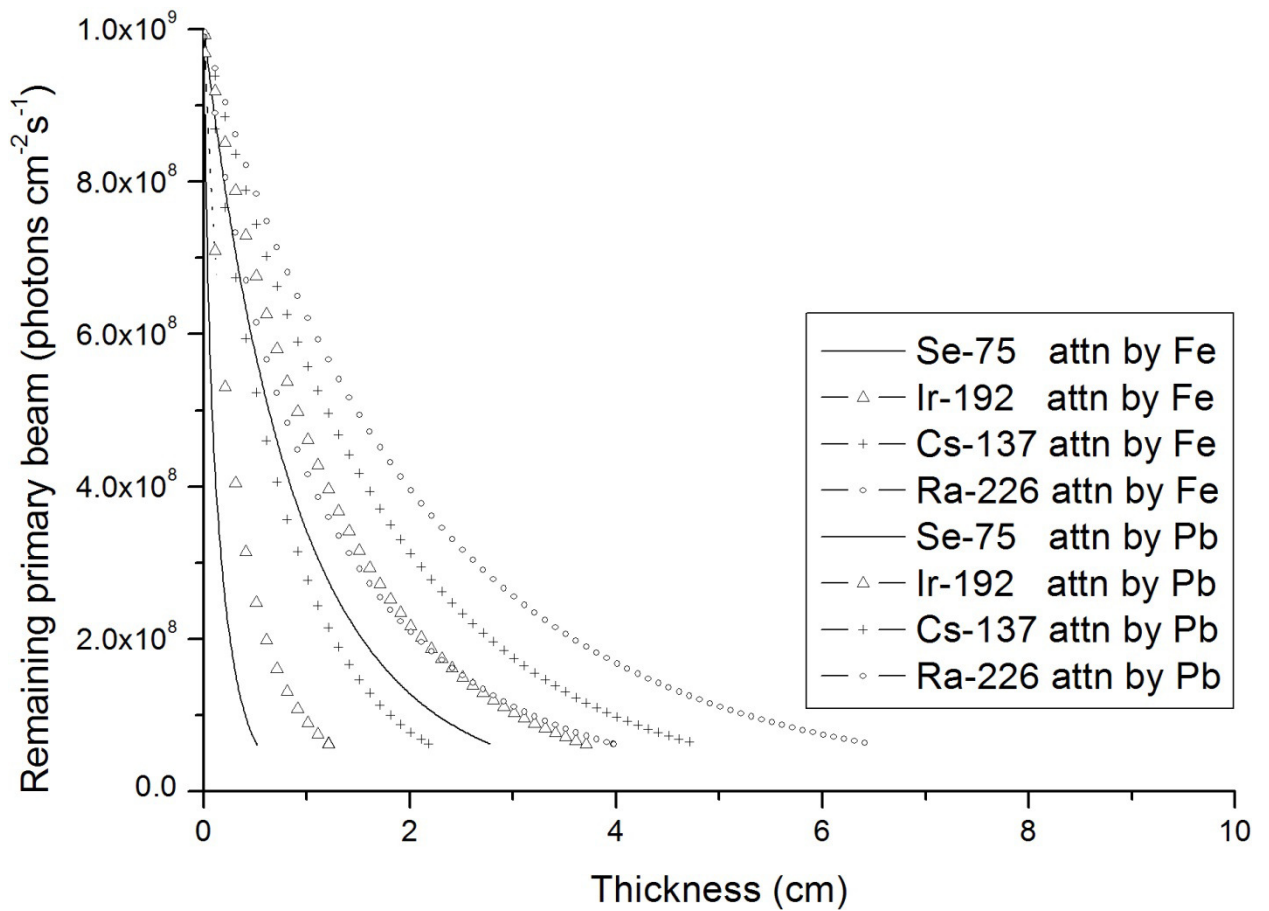
Τοπικό διάγραμμα έκθεσης χάλυβα από ακτίνες -x για διάφορες υψηλές τάσεις για την μηχανή παραγωγής ακτίνων -x τύπου ERESKO 42 MF3 της εταιρείας κατασκευής General Electric Sensing and Inspection Technologies

Sensitometric Curves



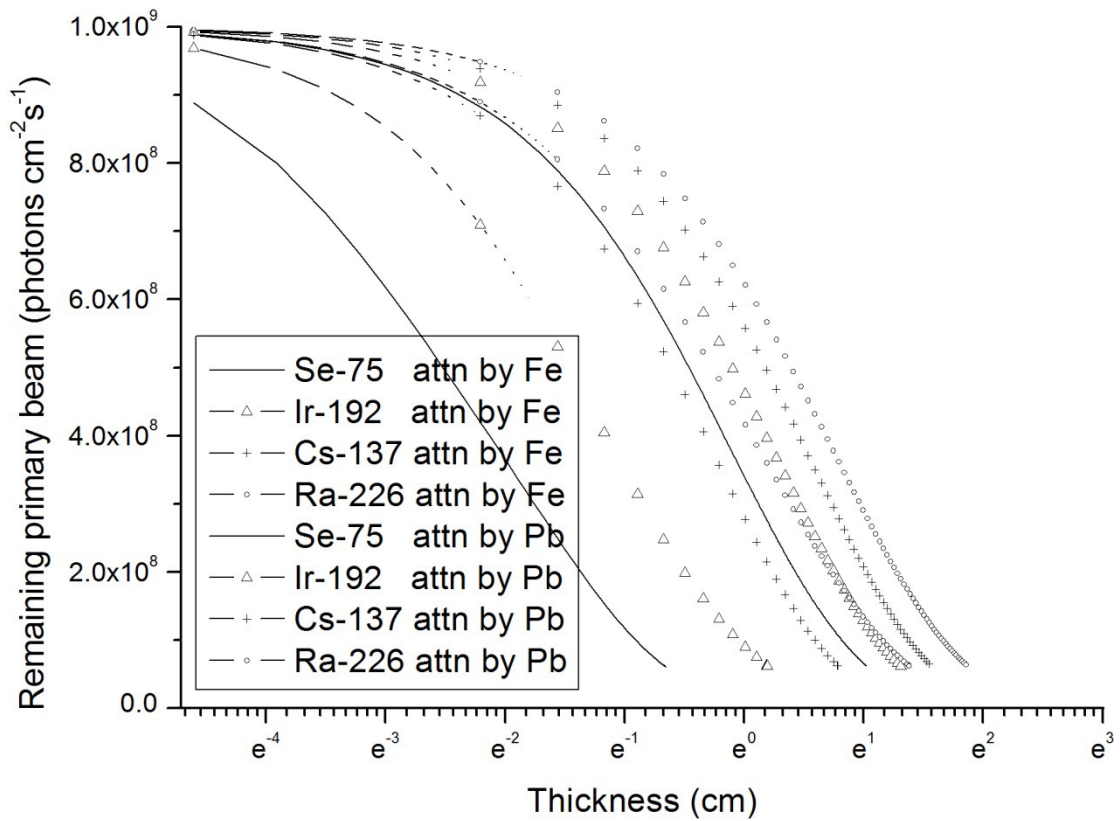
Διάγραμμα 5.3

Χαρακτηριστικές καμπύλες για διάφορους τύπους φιλμ της εταιρείας κατασκευής AGFA, όπως δίνονται για ακτίνες -x των 200 kV από την General Electric (2007, 2008)



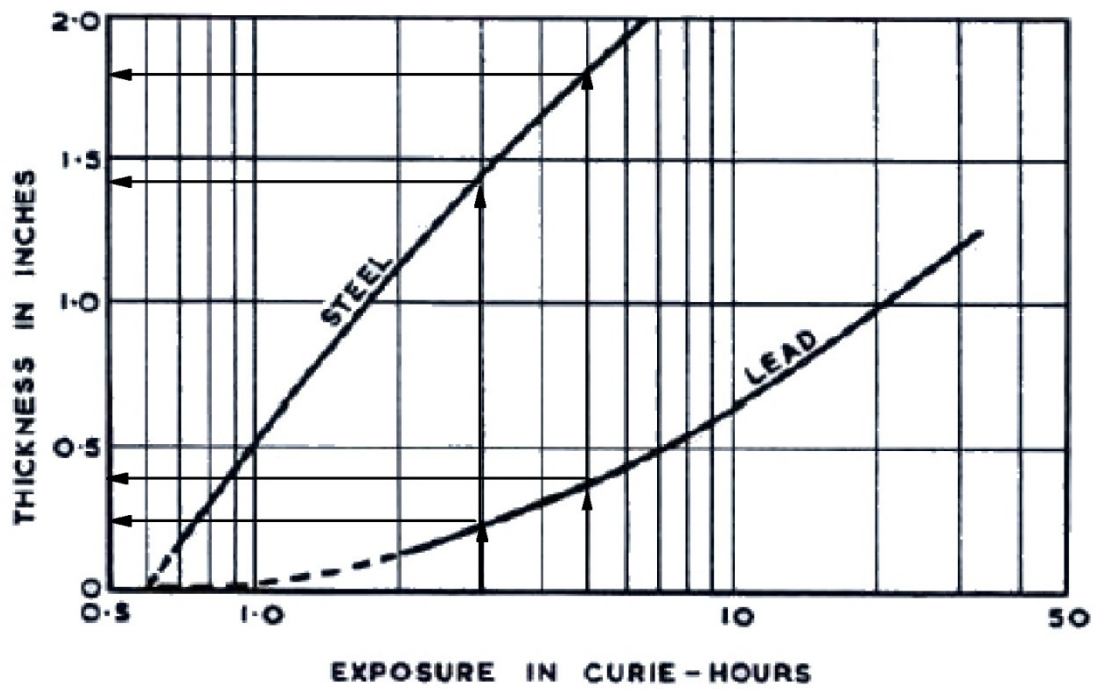
Διάγραμμα 5.4

Εξασθένηση μιας πρωτεύουσας δέσμης φωτονίων από ισοτοπικές πηγές για υλικό αναφοράς χάλυβα και ισοδύναμο υλικό μόλυβδο.
Οι καμπύλες που παρουσιάζονται στα διαγράμματα αυτά δίνονται σε ζεύγη που ξεχωρίζουν μεταξύ τους από τον διαφορετικό τρόπο χάραξης.
Σε κάθε ζεύγος, η "δεξιά" καμπύλη αφορά στο υλικό αναφοράς χάλυβας και η "αριστερή" καμπύλη αφορά στο ισοδύναμο υλικό μόλυβδος.



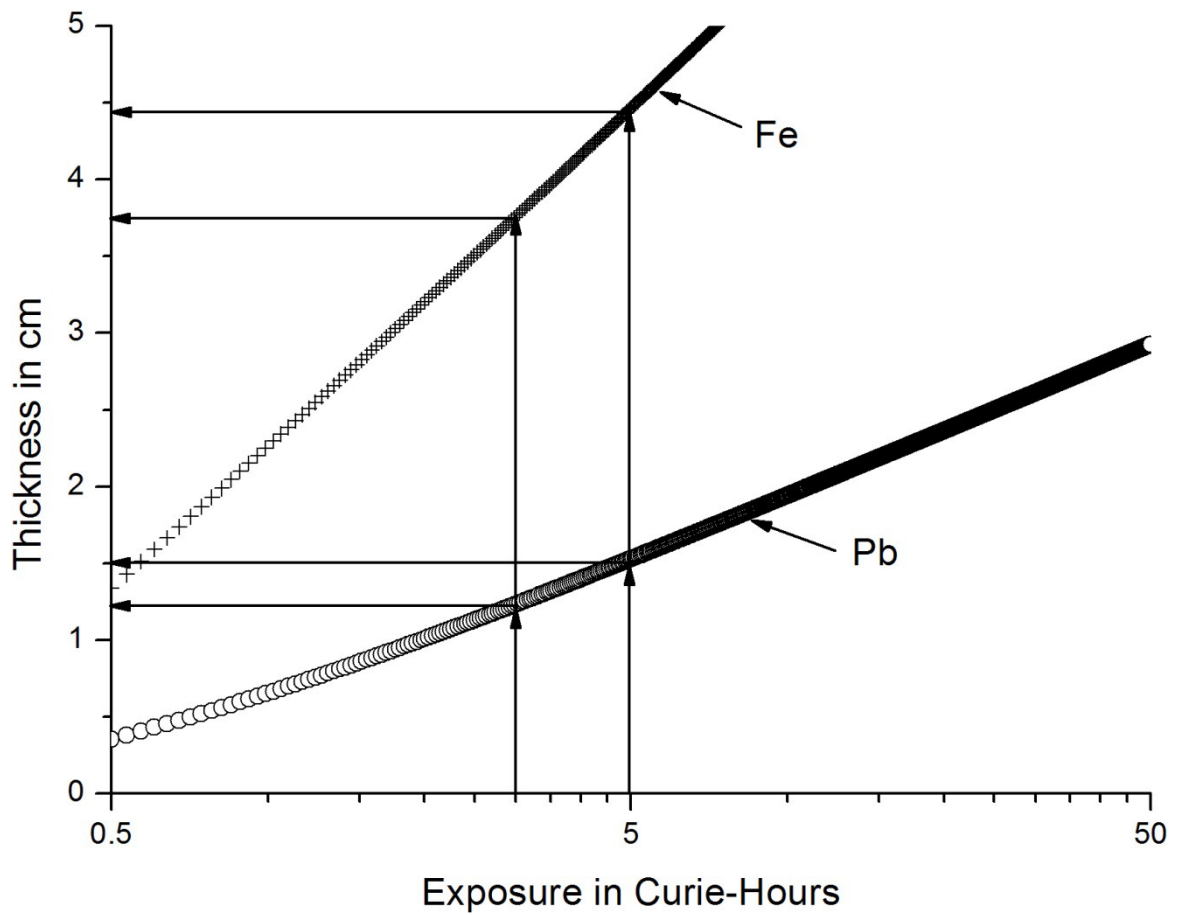
Διάγραμμα 5.5

Εξασθένηση μιας πρωτεύουσας δέσμης φωτονίων από ισοτοπικές πηγές για υλικό αναφοράς χάλυβα και ισοδύναμο υλικό μόλυβδο.
Οι καμπύλες που παρουσιάζονται στα διαγράμματα αυτά δίνονται σε ζεύγη που ξεχωρίζουν μεταξύ τους από τον διαφορετικό τρόπο χάραξης.
Σε κάθε ζεύγος, η "δεξιά" καμπύλη αφορά στο υλικό αναφοράς χάλυβας και η "αριστερή" καμπύλη αφορά στο ισοδύναμο υλικό μόλυβδος.



Διάγραμμα 5.6

Διαγράμματα έκθεσης για χάλυβα και μόλυβδο προς χρήση για βιομηχανική ραδιογραφία με Ir-192 σύμφωνα με τον Mintern (1959).
 Ισχύει για απόσταση πηγής - φιλμ 18" και για $D = 1.75$



Διάγραμμα 5.7

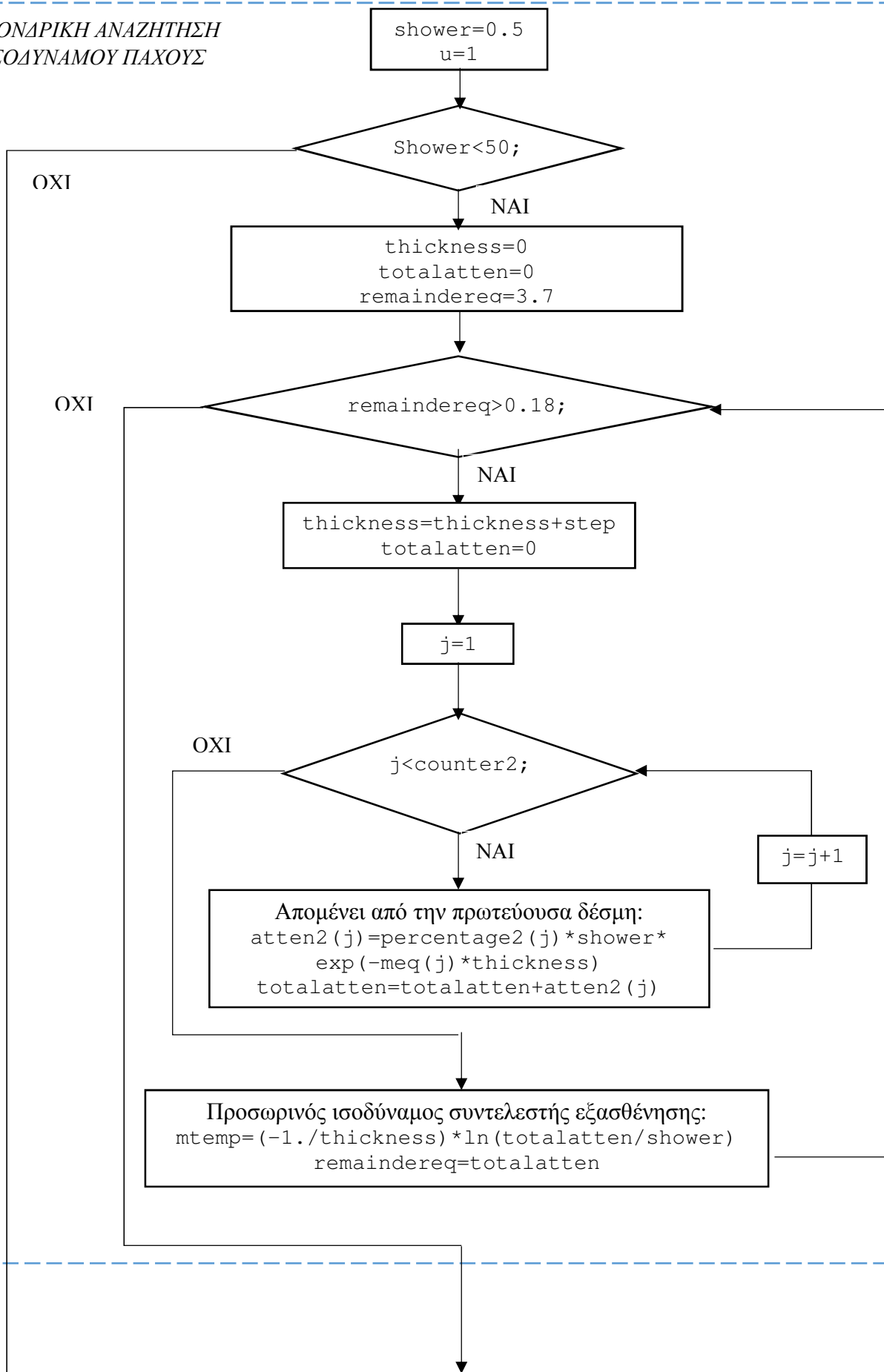
Διαγράμματα έκθεσης για χάλυβα και μόλυβδο για βιομηχανική ραδιογραφία με Ir-192 σύμφωνα με θεωρητικούς υπολογισμούς από τον κώδικα της Διπλωματικής Εργασίας. Υποτίθεται απόσταση πηγής - φιλμ 18" και $D = 1.75$

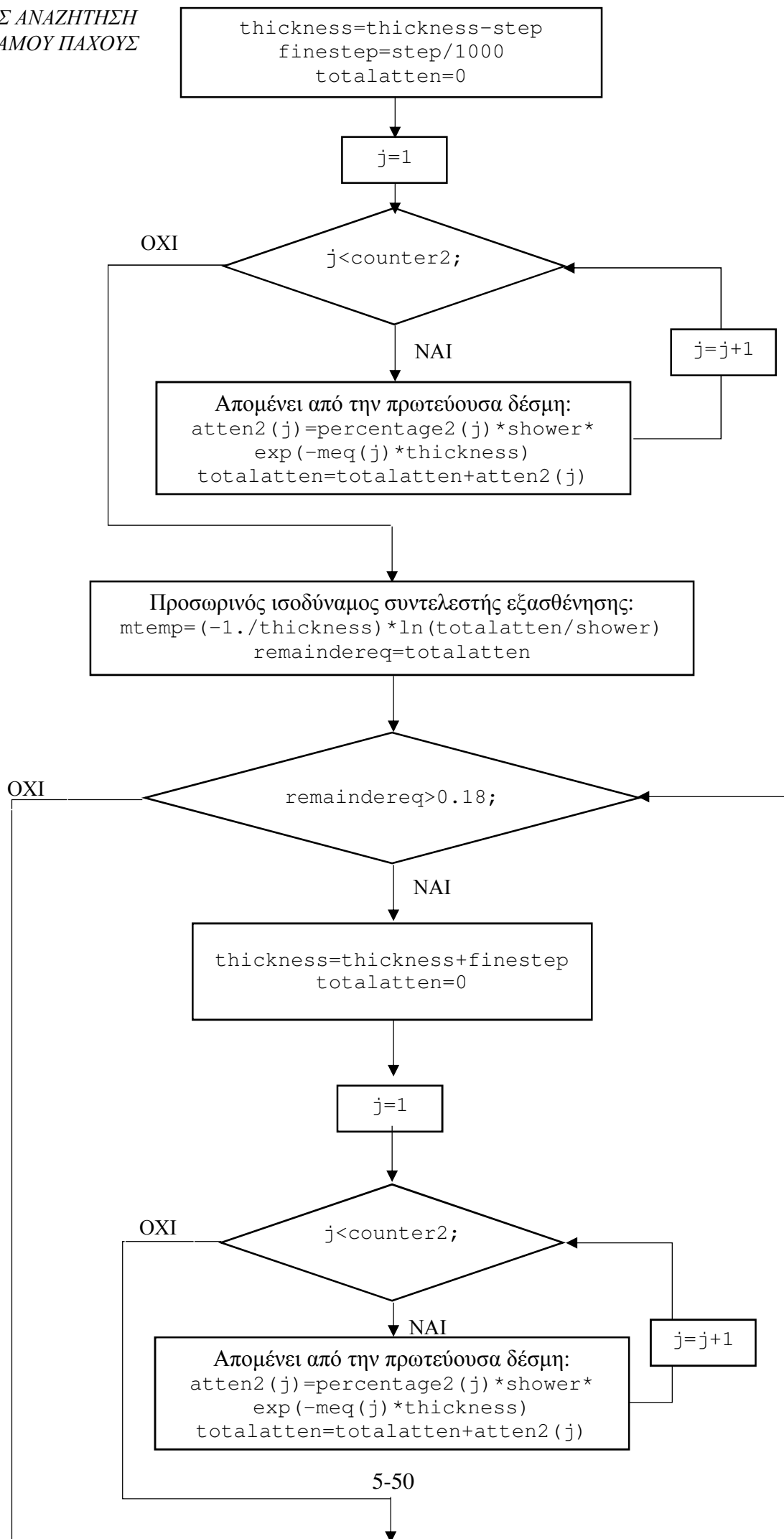
Διάγραμμα 5.8 (Διάγραμμα Ροής)

Υπολογισμοί για την παραγωγή του Διαγράμματος 5.7

(ΑΚΟΛΟΥΘΕΙ)

ΧΟΝΔΡΙΚΗ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ
ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΠΑΧΟΥΣ

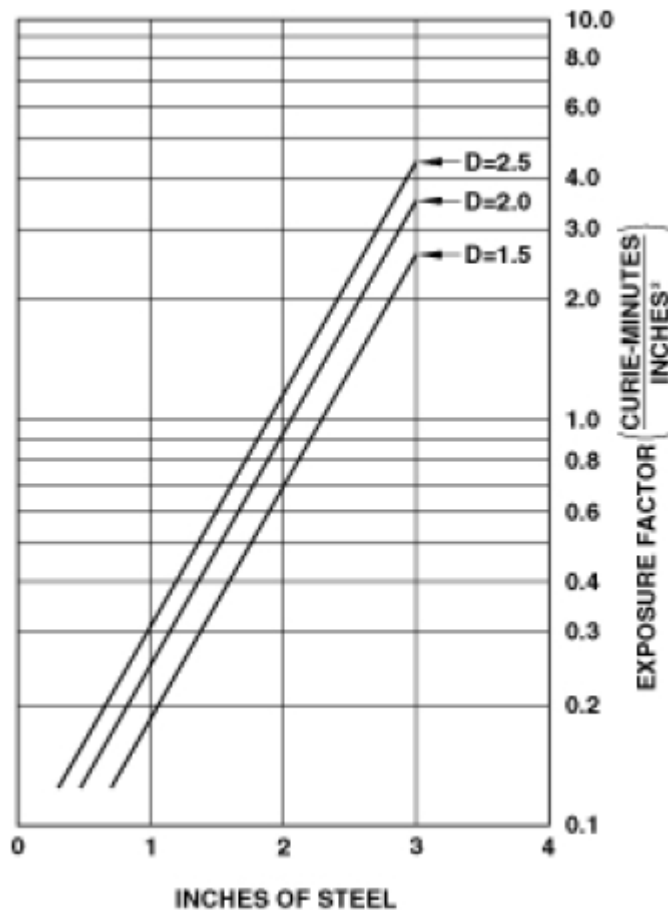




Προσωρινός ισοδύναμος συντελεστής εξασθένησης:
 $mtemp = (-1./thickness) * \ln (totalatten/shower)$
 $remaindreq = totalatten$

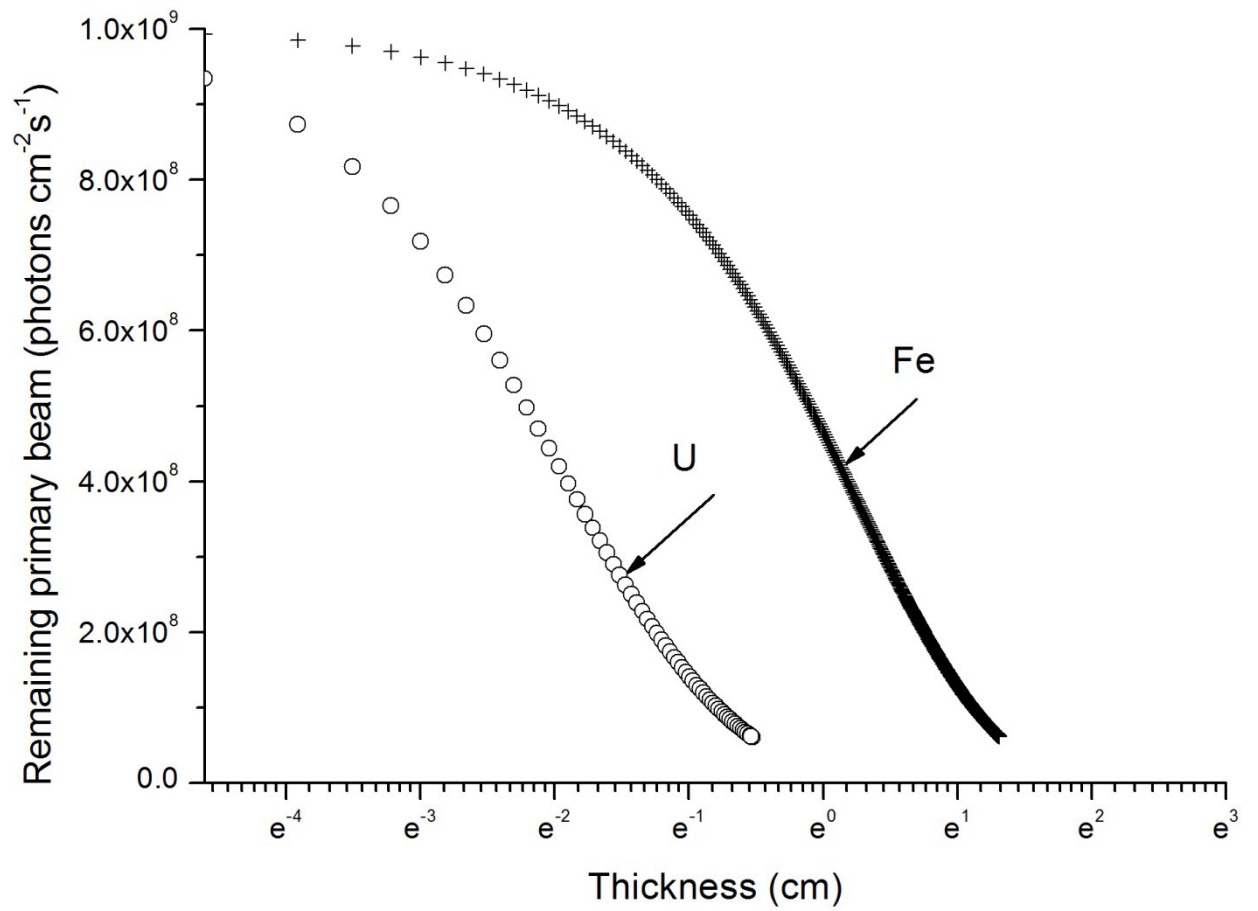
Υπολογισμός ισοδύναμου συντελεστή εξασθένησης και πάχους
ισοδύναμου στοιχείου:
 $meffeq = (-1./thickness) * \ln (totalatten/shower)$
 $thickeq = thickness$

Δημιουργία πίνακα δεδομένων δέσμης φωτονίων-πάχους υλικού
 $diagram(u, 1) = shower$
 $diagram(u, 2) = thickness$
 $shower = shower + 0.035$
 $u = u + 1$



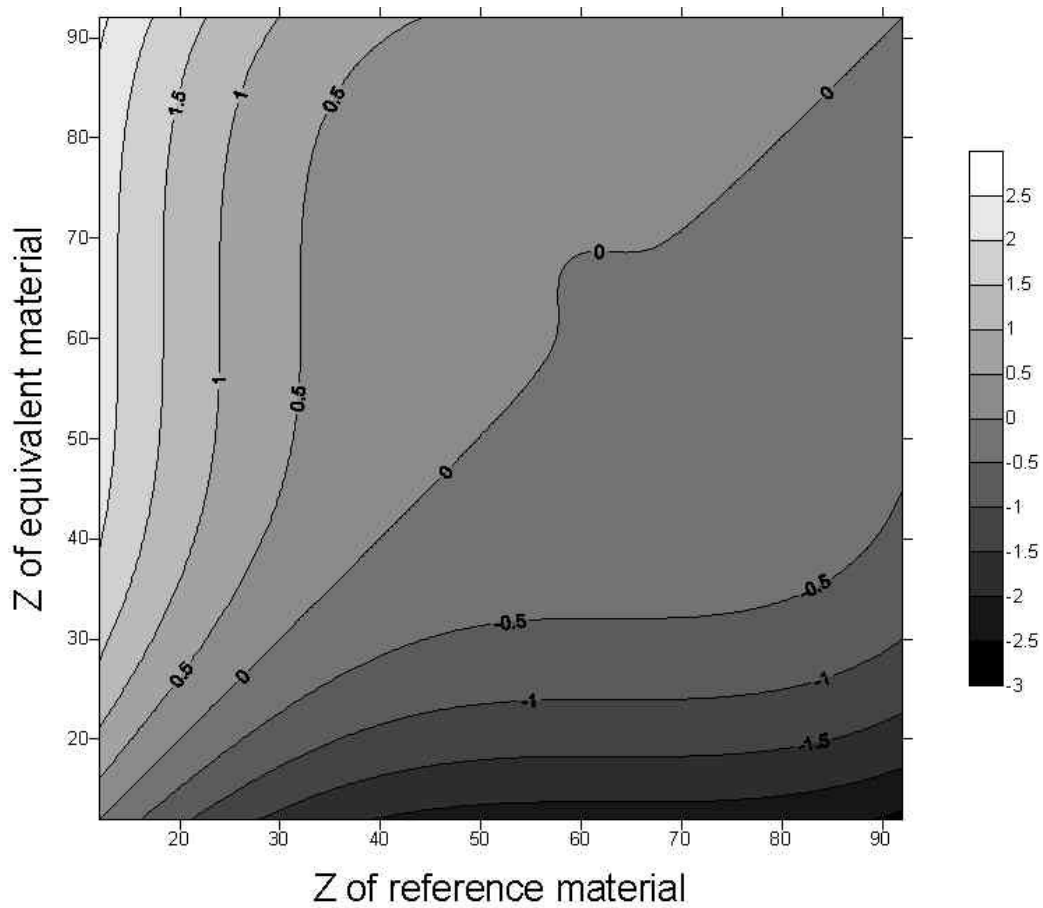
Διάγραμμα 5.9

Διαγράμματα έκθεσης για χάλυβα για βιομηχανική ραδιογραφία με Ir-192 σύμφωνα με τον Quinn (1980).



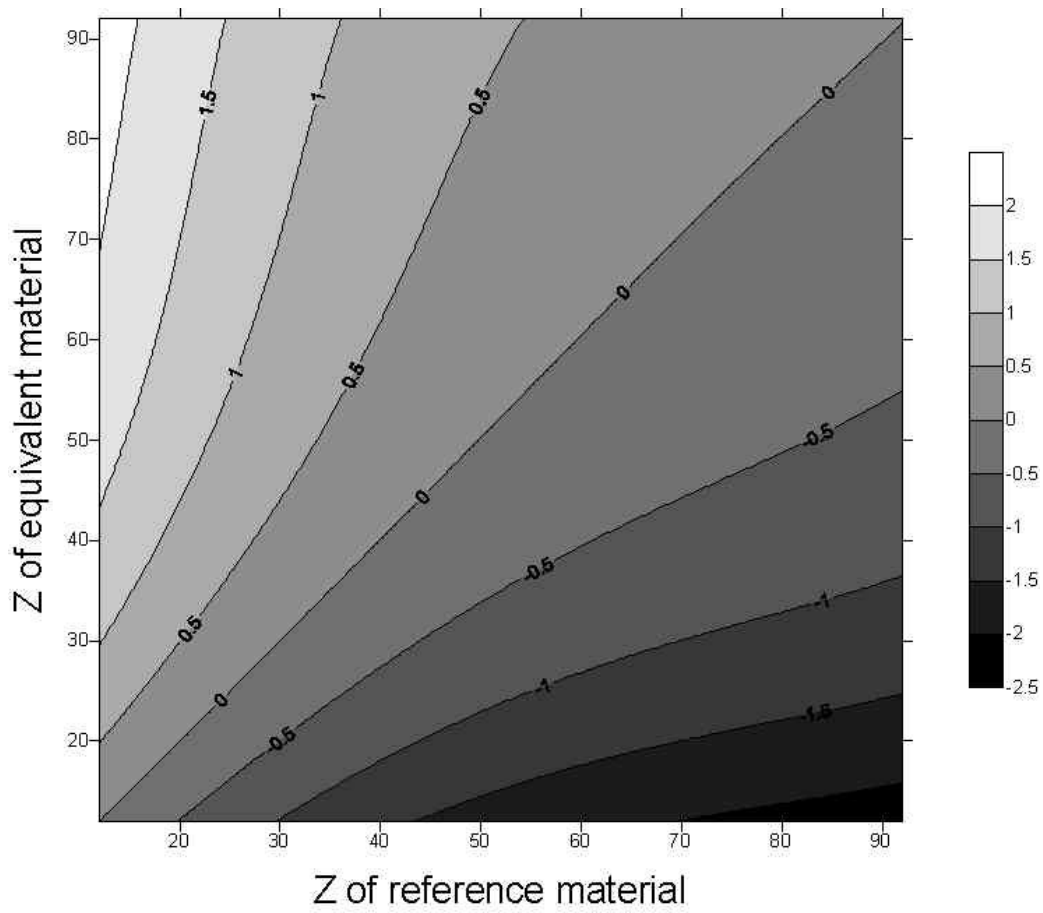
Διάγραμμα 5.10

Τυπική (θεωρητική) εξασθένηση μιας πρωτεύουσας δέσμης φωτονίων από Ir-192 για υλικό αναφοράς χάλυβα και ισοδύναμο υλικό ουράνιο.



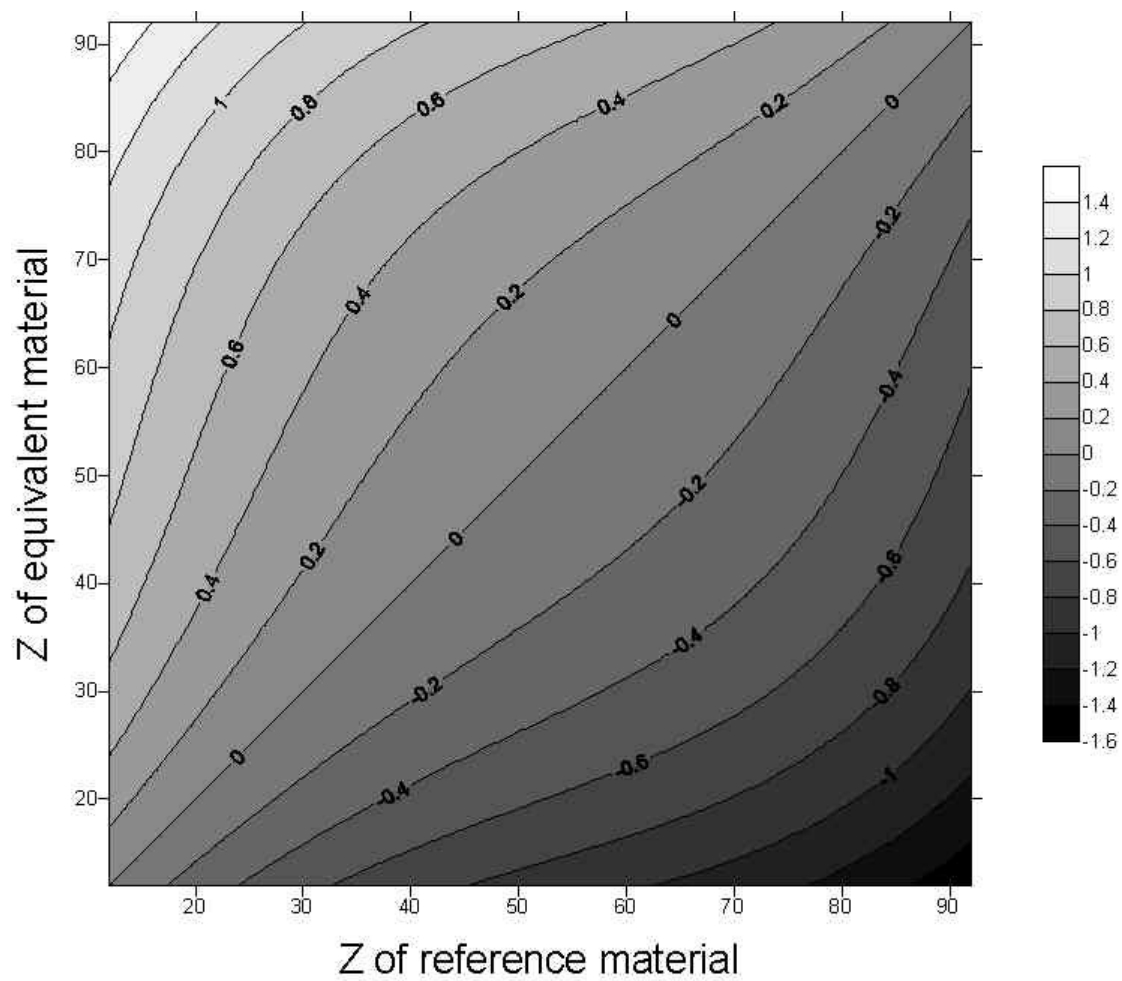
Διάγραμμα 5.11

Χαρτογράφηση του δεκαδικού λογάριθμου ΡΣΙ μεταξύ στοιχείων για ακτίνες -x των 50 kV - η καμπύλη τιμής "0" παρουσιάζει τοπική "κοιλιάδα" λόγω έλλειψης δεδομένων στην περιοχή Z από 60 έως 80 (θα έπρεπε να είναι ευθεία).



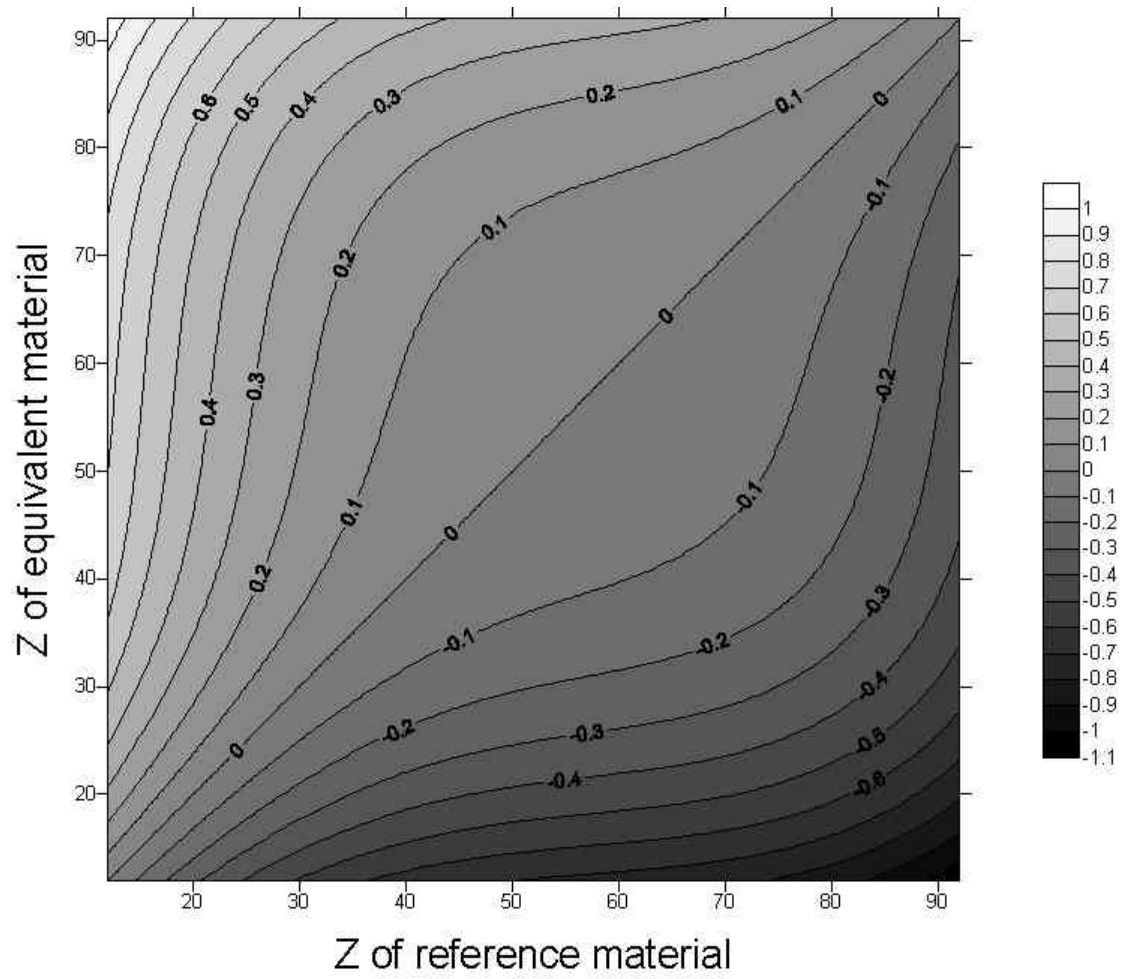
Διάγραμμα 5.12

Χαρτογράφηση του δεκαδικού λογάριθμου ΡΣΙ μεταξύ στοιχείων για ακτίνες -x των 200 kV.



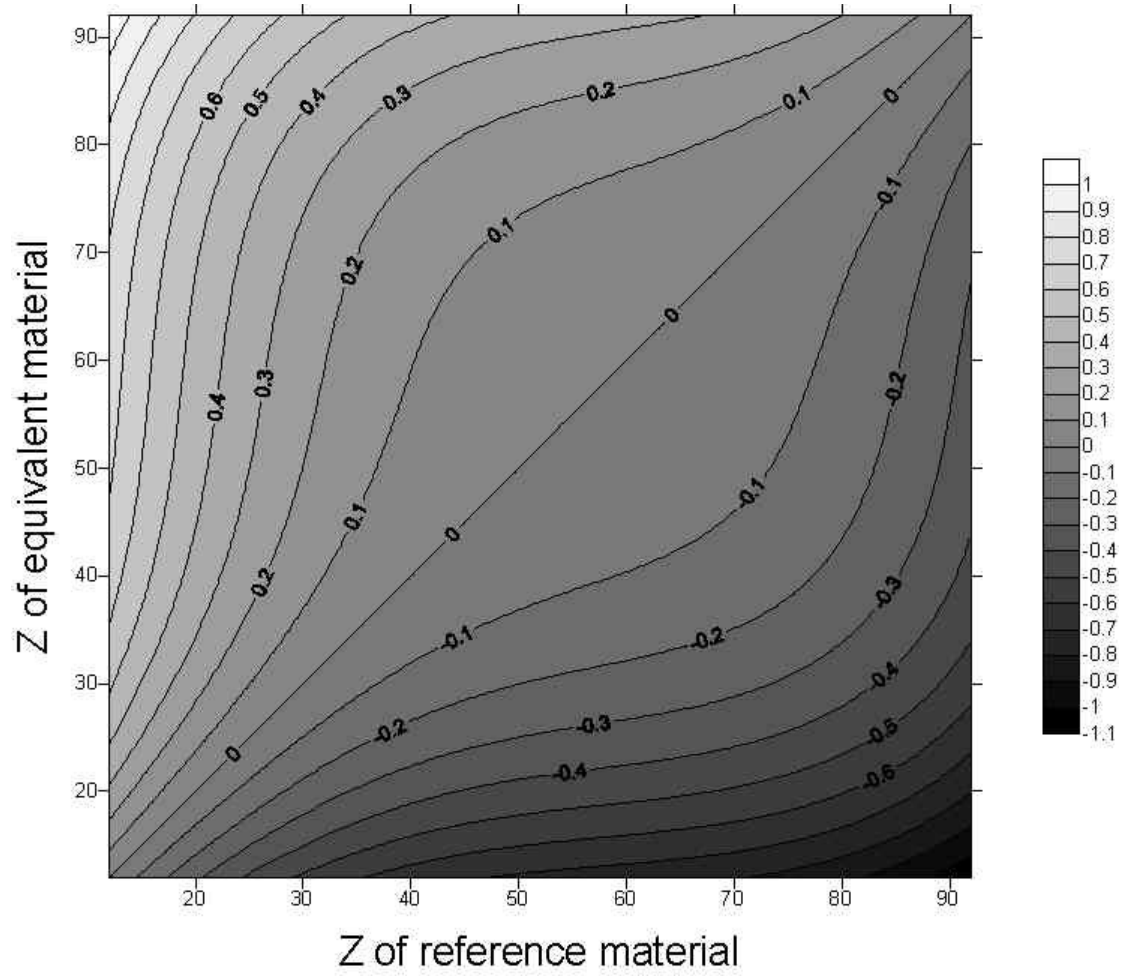
Διάγραμμα 5.13

Χαρτογράφηση του δεκαδικού λογάριθμου ΡΣΙ μεταξύ στοιχείων για φωτόνια από Ir-192.



Διάγραμμα 5.14

Χαρτογράφηση του δεκαδικού λογάριθμου ΡΣΙ μεταξύ στοιχείων για φωτόνια από Co-60.



Διάγραμμα 5.15

Χαρτογράφηση του δεκαδικού λογάριθμου ΡΣΙ μεταξύ στοιχείων για φωτόνια από Ra-226.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

I. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

1. Archer B.R., Fewell T.R., Conway B.J., Quinn P.W, Attenuation properties of diagnostic x-ray shielding materials, *Medical Physics*, 21:1499-1507, 1994
2. Bossi R.H., Iddings F.A., Wheeler G.C., Moore P.O., "Nondestructive Testing Handbook, Volume 4, Radiographic Testing", American Society for Nondestructive Testing, Third Edition, 2002
3. Berger M.J., Hubbell J.H., "XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer," NBSIR 87-3597, National Bureau of Standards (former name of NIST), Gaithersburg, MD, 1987
4. Berger M.J., Hubbell J.H., "NIST X-ray and Gamma-ray Attenuation Coefficients and Cross Sections Database," NIST Standard Reference Database 8, Version 2.0, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1990
5. Bryant L.E., McIntire P., "Nondestructive Testing Handbook, Volume 3, Radiography & Radiation Testing", American Society for Nondestructive Testing, Second Edition, 1985
6. General Electric Company, "Industrial Radiography; Image forming techniques" GE imaging at work, GEIT-30158(01/07)
7. General Electric Company, " X-Ray Radiographic Film Systems", GEIT-40007EN (10/08)
8. Halmshaw R., "Industrial Radiology, Theory and Practice", Chapman & Hall, Second Edition, 1995
9. Lang J., Middleton A., "Radiography of Cultural Material", Elsevier Butterworth-Heinemann, Second Edition, 2005
10. Mintern R.A., Chaston J.C., Gamma Radiography with Iridium-192, *Platinum Metals Review*, 3(1):12-16, 1959
11. Poludniowski G.G., Evans P. M., "Calculation of x-ray spectra emerging from an x-ray tube. Part I. Electron penetration characteristics in x-ray targets", *Medical Physics*, 34: 2164, 2007

12. Poludniowski G.G., "Calculation of x-ray spectra emerging from an x-ray tube. Part II. X-ray production and filtration in x-ray targets", *Medical Physics*, 34: 2175, 2007
13. Podgorsak E.B., *Radiation oncology physics: A handbook for teachers and students*, IAEA, Vienna, 2005
14. Poludniowski G., Landry G., DeBlois F., Evans P. M., Verhaegen F., "SpekCalc: a program to calculate photon spectra from tungsten anode x-ray tubes", *Physics in Medicine and Biology* 54: N433-N438, 2009
15. Prasad J., Nair, C., "Non-Destructive Test and Evaluation of Materials", Tata McGraw-Hill Education, 2008
16. Quinn R.A., Sigl C.C., Callinan J.J., "Radiography in Modern Industry", Eastman Kodak Company, 1980
17. Rokrok B., Movafegi A., Edalati K., Kermani A., Seiedi M., Rastkhah N., "Monte Carlo simulation of scattering phenomenon effects on industrial radiography", Department of NDT and Inspection, Radiation Protection Technological Center, INRA, Tehran, Iran, European Conference on NDT, 2006
18. Semyonov S., "Industrial Radiology", μετάφραση στα Αγγλικά από Rumyantsev S.B., MIR Publishers, 1967
19. Shultis J.K., Faw R.E, *Radiation Shielding*, American Nuclear Society, Illinois, 2000
20. Simpkin D.J., Shielding requirements for constant potential diagnostic x-ray beams determined by Monte Carlo calculation, *Health Physics*, 56:151-154, 1989
21. Simpkin D.J., Transmission data for shielding diagnostic x-ray facilities, *Health Physics*, 68:704-709, 1995
22. Wallingford R.M., Gray J.N., "Use of an x-ray process model to determine crack detectability in a multi-layer geometry, in "Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Volume 12A"", Eds. Thompson D., Chimenti D., Plenum Press, 1993

23. XRSIM, "Lessons in Radiography, Using the X-Ray Simulation Program", Student Booklet, Center for Nondestructive Evaluation, Iowa State University, 1999
24. Θεοδωρόπουλος, Γ.-Β., "Προσομοίωση βιομηχανικής ραδιογραφίας με τον κώδικα XRSIM", Διπλωματική Εργασία, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ, Αθήνα, 2009

II. ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

1. Engauge2014
<http://digitizer.sourceforge.net/>
2. Irfanview2014
<http://www.irfanview.com/>
3. KAERI 2014
<http://atom.kaeri.re.kr/cgi-bin/w3xcom>
4. IAEA2014
<https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>
5. NDT 2014
<http://www.ndt-ed.org/>
6. NIST 2014a
<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html>
7. NIST 2014b
<http://www.nist.gov/pml/data/xcom/>
8. Specialmetals2014
<http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20625.pdf>
9. SpekCalc2014
<http://spekcalc.weebly.com/>
10. Wikipedia2014
<http://en.wikipedia.org/>