

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

Διευθυντής: Επικ. Καθηγητής Ε.Π. Χίνης

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΑΣ  
ΜΕ ΤΟΝ ΚΩΔΙΚΑ XRSIM**

**SIMULATION OF INDUSTRIAL RADIOGRAPHY  
USING THE XRSIM CODE**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ  
ΘΕΟΔΩΡΟΠΟΥΛΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΥ - ΒΛΑΣΙΟΥ**

Σπουδαστή της Σχολής  
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επίβλεψη: Λέκτορας Ν.Π. Πετρόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2009

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	vii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	ix
ABSTRACT.....	xi
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή</b>	
1.1 Γενικά.....	1-1
1.2 Προσομοίωση βιομηχανικής ραδιογραφίας.....	1-2
1.3 Μαθήματα ραδιογραφίας με τη χρήση προσομοίωσης.....	1-3
1.4 Προσομοίωση δοκιμίων.....	1-3
1.5 Προσομοίωση τομογραφίας.....	1-4
1.6 Σύνοψη.....	1-4
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ο κώδικας XRSIM: Γενικές οδηγίες χρήσης</b>	
2.1 Εισαγωγή.....	2-1
2.2 Προσομοίωση ραδιογραφίας με τον κώδικα XRSIM.....	2-2
2.3 Βασικοί χειρισμοί παραγωγής εικόνας.....	2-3
2.3.1 Έναρξη XRSIM.....	2-3
2.3.2 Γραφικό περιβάλλον κώδικα.....	2-3
2.3.3 Επιλογή δοκιμίου.....	2-4
2.3.4 Καθορισμός θέσης δοκιμίου (Αξονική μετακίνηση).....	2-4
2.3.5 Αξονική περιστροφή δοκιμίου.....	2-5
2.3.6 Ακύρωση μετακινήσεων δοκιμίου.....	2-6
2.3.7 Επιλογή υλικού δοκιμίου.....	2-6
2.3.8 Διαφώτιστη απεικόνιση δοκιμίου.....	2-7
2.3.9 Εισαγωγή ελαττώματος στο δοκίμιο.....	2-7
2.3.10 Επιλογή υλικού ελαττώματος.....	2-8
2.3.11 Αλλαγή μεγέθους ελαττώματος.....	2-9
2.3.12 Αξονική περιστροφή ελαττώματος.....	2-10
2.3.13 Μετακίνηση ελαττώματος στο εσωτερικό του δοκιμίου.....	2-10
2.3.14 Ρύθμιση απόστασης φιλμ και εστιακού σημείου.....	2-11
2.3.15 Ρύθμιση μεγέθους και θέσης φιλμ.....	2-12
2.3.16 Παραγωγή διδιάστατου χάρτη πάχους.....	2-13

2.3.17 Αλλαγή / επιλογή τύπου φιλμ.....	2-14
2.3.18 Επιλογή μηχανής παραγωγής ακτίνων -x.....	2-14
2.3.19 Ρύθμιση χαρακτηριστικών μηχανής ακτίνων -x, έλεγχος της έκθεσης...	2-15
2.3.20 Παραγωγή εικονικής ραδιογραφίας.....	2-16
2.3.21 Πολλαπλές εικονικές ραδιογραφίες.....	2-17
2.3.22 Αξονική ανάλυση οπτικής πυκνότητας.....	2-17
2.4 Προηγμένες λειτουργίες του κώδικα XRSIM.....	2-18
2.4.1 Πολλά δοκίμια.....	2-18
2.4.2 Αλλαγή διαστάσεων δοκιμίου.....	2-19
2.4.3 Αποκοπή μέρους δοκιμίου.....	2-20
2.4.4 Τροποποίηση ανάλυσης εικόνας.....	2-20
2.5 Συμπεράσματα.....	2-21
Διαγράμματα του 2 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου.....	2-23
Πίνακες του 2 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου.....	2-68

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ο κώδικας XRSIM: Τυπικά μαθήματα προσομοίωσης

3.1 Γενικά.....	3-1
3.2 Βασικοί ορισμοί.....	3-2
3.2.1 Γενικά.....	3-2
3.2.2 Βασικές ιδιότητες του φιλμ.....	3-3
3.2.3 Οπτική πυκνότητα.....	3-4
3.2.4 Μέτρηση οπτικής πυκνότητας.....	3-5
3.2.5 Έκθεση.....	3-5
3.2.6 Νόμος του αντιστρόφου τετραγώνου.....	3-7
3.2.7 Εξασθένιση φωτονίων – Πάχος υποδιπλασιασμού.....	3-8
3.2.8 Διάγραμμα έκθεσης.....	3-9
3.2.9 Ταχύτητα του φιλμ.....	3-11
3.2.10 Χαρακτηριστική του φιλμ.....	3-11
3.2.11 Αντίθεση εικόνας.....	3-13
3.2.12 Υψηλή τάση.....	3-14
3.2.13 Ισοδύναμη έκθεση.....	3-14
3.2.14 Ελάττωμα.....	3-15
3.2.15 Εστιακό σημείο.....	3-15

3.2.16 Ευκρίνεια .....	3-16
3.2.17 Ραδιογραφική ευαισθησία.....	3-16
3.3 Μάθημα 1 <sup>ο</sup> : Εισαγωγή στην παραγωγή ραδιογραφικής εικόνας .....	3-17
3.4 Μάθημα 2 <sup>ο</sup> : Ιδιότητες του φιλμ .....	3-26
3.4.1 Εισαγωγή .....	3-26
3.4.2 Στόχος.....	3-26
3.4.3 Χρήση χαρακτηριστικής .....	3-26
3.4.4 Άσκηση προσομοίωσης .....	3-28
3.4.5 Εργαστηριακή άσκηση.....	3-29
3.5 Μάθημα 3 <sup>ο</sup> : Επιλογή υψηλής τάσης.....	3-31
3.5.1 Εισαγωγή .....	3-31
3.5.2 Στόχος.....	3-31
3.5.3 Μέθοδοι εκτίμησης υψηλής τάσης.....	3-31
3.5.4 Άσκηση προσομοίωσης .....	3-33
3.5.5 Εργαστηριακή άσκηση.....	3-33
3.6 Μάθημα 4 <sup>ο</sup> : Επιλογή έκθεσης.....	3-35
3.6.1 Εισαγωγή .....	3-35
3.6.2 Στόχος.....	3-35
3.6.3 Σύνδεση έκθεσης – οπτικής πυκνότητας .....	3-35
3.6.4 Άσκηση προσομοίωσης .....	3-36
3.6.5 Εργαστηριακή άσκηση.....	3-37
3.7 Μάθημα 5 <sup>ο</sup> : Κατασκευή διαγράμματος έκθεσης .....	3-38
3.7.1 Εισαγωγή .....	3-38
3.7.2 Στόχος.....	3-38
3.7.3 Άσκηση προσομοίωσης .....	3-38
3.7.4 Εργαστηριακή άσκηση.....	3-41
3.8 Μάθημα 6 <sup>ο</sup> : Ο ρόλος της απόστασης πηγής - φιλμ.....	3-42
3.8.1 Εισαγωγή .....	3-42
3.8.2 Στόχος.....	3-42
3.8.3 Άσκηση προσομοίωσης .....	3-42
3.8.4 Εργαστηριακή άσκηση.....	3-44
3.9 Μάθημα 7 <sup>ο</sup> : Ισοδύναμη έκθεση για διαφορετικά υλικά.....	3-45

3.9.1 Εισαγωγή .....	3-45
3.9.2 Στόχος.....	3-45
3.9.3 Εφαρμογές και ασκήσεις εξοικείωσης .....	3-45
3.9.4 Άσκηση προσομοίωσης .....	3-46
3.9.5 Εργαστηριακή άσκηση .....	3-47
3.10 Μάθημα 8 <sup>ο</sup> : Ραδιογραφική απεικόνιση ελαττώματος (A) .....	3-48
3.10.1 Εισαγωγή .....	3-48
3.10.2 Στόχος.....	3-48
3.10.3 Άσκηση προσομοίωσης .....	3-49
3.10.4 Εργαστηριακή άσκηση .....	3-49
3.11 Μάθημα 9 <sup>ο</sup> : Ραδιογραφική απεικόνιση ελαττώματος (B).....	3-50
3.11.1 Εισαγωγή .....	3-50
3.11.2 Στόχος.....	3-50
3.11.3 Άσκηση προσομοίωσης .....	3-50
3.11.4 Εργαστηριακή άσκηση .....	3-51
3.12 Μάθημα 10 <sup>ο</sup> : Οπτική ραδιογραφίας.....	3-52
3.12.1 Εισαγωγή .....	3-52
3.12.2 Στόχος.....	3-52
3.12.3 Υπολογισμοί γεωμετρικής ασάφειας (παρασκιάς).....	3-52
3.12.4 Υπολογισμοί γεωμετρικής μεγέθυνσης .....	3-53
3.12.5 Υπολογισμοί κάλυψης του φιλμ από τον κώνο ακτινοβολίας.....	3-53
3.12.6 Άσκηση προσομοίωσης .....	3-53
3.12.7 Εργαστηριακή άσκηση .....	3-54
3.13 Μάθημα 11 <sup>ο</sup> : Ταυτόχρονη έκθεση δύο φιλμ (double loading).....	3-56
3.13.1 Εισαγωγή .....	3-56
3.13.2 Στόχος.....	3-56
3.13.3 Άσκηση προσομοίωσης .....	3-56
3.13.4 Εργαστηριακή άσκηση .....	3-57
3.14 Μάθημα 12 <sup>ο</sup> : Χρήση δοκιμίων ποιότητας ραδιογραφικής εικόνας .....	3-58
3.14.1 Εισαγωγή .....	3-58
3.14.2 ΔΕΠ ελάσματα με οπές .....	3-58
3.14.3 ΔΕΠ σύρματα .....	3-59

3.14.4 Χρήση ΔΕΠ.....	3-60
3.14.5 Στόχος.....	3-61
3.14.6 Άσκηση προσομοίωσης .....	3-61
3.14.7 Εργαστηριακή άσκηση.....	3-62
3.15 Μάθημα 13 <sup>ο</sup> : Αναφορά ραδιογραφικού ελέγχου δοκιμίου.....	3-63
3.15.1 Εισαγωγή .....	3-63
3.15.2 Τυποποίηση ραδιογραφικής διαδικασίας.....	3-63
3.15.3 Στόχος.....	3-63
3.15.4 Εργαστηριακή άσκηση.....	3-63
3.16 Συμπεράσματα.....	3-65
<b>Διαγράμματα του 3<sup>ου</sup> Κεφαλαίου.....</b>	<b>3-66</b>
<b>Πίνακες του 3<sup>ου</sup> Κεφαλαίου.....</b>	<b>3-79</b>
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Κατασκευή δοκιμίων CAD για χρήση στον κώδικα XRSIM</b>	
4.1 Εισαγωγή .....	4-1
4.2 Κατασκευή στερεών CAD τύπου "ASCII stl" με χρήση απλών εντολών .....	4-2
4.2.1 Γενικά.....	4-2
4.2.2 Κατασκευή απλού στερεού.....	4-2
4.2.3 Επεξήγηση κώδικα .....	4-6
4.3 Κατασκευή στερεών CAD τύπου "ASCII stl" με χρήση προγραμμάτων .....	4-9
4.3.1 Γενικά.....	4-9
4.3.2 Προτεινόμενα ελεύθερα προγράμματα.....	4-9
4.3.3 Συμπληρωματικά εργαλεία για τα ελεύθερα προγράμματα.....	4-10
4.4 Παράδειγμα κατασκευής του δοκιμίου κλίμακος ως "ASCII stl" .....	4-12
4.5 Κατασκευή ελαττωμάτων για τον κώδικα XRSIM ως "ASCII stl" .....	4-14
4.6 Σχόλια και συμπεράσματα .....	4-15
<b>Διαγράμματα του 4<sup>ου</sup> Κεφαλαίου.....</b>	<b>4-17</b>
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Απλή διδιάστατη τομογραφία με χρήση του κώδικα XRSIM και άλλου λογισμικού</b>	
5.1 Εισαγωγή .....	5-1
5.2 Περιγραφή προβλήματος.....	5-1
5.3 Διδιάστατη τομογραφία.....	5-2

5.4 Λήψη ραδιογραφιών από πολλές γωνίες με τον κώδικα XRSIM.....	5-4
5.5 Back projection .....	5-6
5.5.1 Γενικά.....	5-6
5.5.2 Επέκταση ραδιογραφικών εικόνων.....	5-6
5.5.3 Ενίσχυση αντίθεσης .....	5-7
5.5.4 Περιστροφή .....	5-7
5.5.5 Προσαρμογή διαστάσεων.....	5-8
5.5.6 Υπέρθωση εικόνων.....	5-9
5.5.7 Ενίσχυση αντίθεσης τελικού αποτελέσματος .....	5-9
5.5.8 Επεξεργασία διαφορετικών τομών.....	5-9
5.6 Παρατηρήσεις – Back projection .....	5-9
5.7 Αυτοματοποιημένη 2Δ τομογραφία.....	5-10
5.7.1 Γενικά.....	5-10
5.7.2 Συνοπτική ανασκόπηση ελεύθερου λογισμικού .....	5-11
5.7.3 Διάγραμμα sinogram.....	5-12
5.7.4 Παραγωγή sinogram από γνωστή τομή με τη βοήθεια λογισμικού .....	5-13
5.7.5 Παραγωγή sinogram από άγνωστη τομή με τη βοήθεια ραδιογραφίας.....	5-14
5.7.6 Αναπαραγωγή τομής από sinogram .....	5-15
5.8 Παρατηρήσεις – Αυτοματοποιημένη 2Δ Τομογραφία.....	5-16
5.9 Συμπεράσματα.....	5-17
Διαγράμματα του 5 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου.....	5-19
ΕΠΙΛΟΓΟΣ .....	E-1
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	B-1

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η Βιομηχανική Ραδιογραφία είναι μία από τις σημαντικότερες εφαρμοζόμενες Μεθόδους Μη Καταστροφικού Ελέγχου. Μάλιστα, θεωρείται από πολλούς ως η πλέον ευέλικτη. Χρησιμοποιεί ακτίνες  $-x$  ή/και ακτίνες  $-γ$  υψηλής διαπεραστικής ικανότητας καθώς και άλλες μορφές ακτινοβολίας, οι οποίες ενώ δεν καταστρέφουν ή με άλλο τρόπο παραποιούν το ραδιογραφούμενο αντικείμενο, παρέχουν μία σχεδόν πλήρη εικόνα των συνθηκών που επικρατούν στο εσωτερικό του. Η εικόνα αυτή καταγράφεται μόνιμα συνήθως σε φιλμ (με τρόπο εντελώς ανάλογο όπως οι ιατρικές ακτινογραφίες) και περιέχει σημαντικές πληροφορίες με βάση τις οποίες ελέγχεται η κατασκευαστική πληρότητα του προϊόντος. Τα τελευταία 30 έτη (1975 –2005), τα στοιχεία από τέτοια φιλμ βιομηχανικής ραδιογραφίας, επέτρεψαν στην βιομηχανία να αυξήσει την αξιοπιστία των προϊόντων της, και παρείχαν τα μέσα για την πρόληψη μεγάλων ατυχημάτων και τη συνακόλουθη διάσωση ζώων, με κοινωνικό όφελος που καρπώνεται πλήρως ο τελικός χρήστης των ραδιογραφούμενων προϊόντων.

Η Βιομηχανική Ραδιογραφία είναι εξαιρετικά ευέλικτη μέθοδος. Τα ραδιογραφούμενα αντικείμενα / προϊόντα, έχουν μέγεθος που κυμαίνεται από ηλεκτρονικά ανταλλακτικά σχεδόν οσοδήποτε μικρά, έως και οσοδήποτε μεγάλα μηχανολογικά μέρη διαστημικών πυραύλων. Επιπλέον η σύνθεση των ραδιογραφούμενων αντικειμένων μπορεί να περιέχει σχεδόν οποιοδήποτε γνωστό κατασκευαστικό υλικό. Τέλος, ο τρόπος κατασκευής (χύτευση, συγκόλληση κλπ) των αντικειμένων αυτών, ελάχιστα επηρεάζει. Σημειώνεται ότι υπάρχει διαρκής έρευνα και ανάπτυξη στο πεδίο της Βιομηχανικής Ραδιογραφίας, από την οποία προκύπτουν συνεχώς νέες πηγές ακτινοβολίας και νέες τεχνικές παραγωγής της ραδιογραφικής εικόνας κατάλληλες προς χρήση.

Η σημασία της Βιομηχανικής Ραδιογραφίας οδηγεί στην ανάγκη για ύπαρξη ειδικά καταρτισμένου προσωπικού, ικανού να χειριστεί (α) την πραγματοποίηση της ραδιογραφίας υπό ασφαλείς συνθήκες ραδιοπροστασίας, (β) την λήψη της ραδιογραφικής εικόνας από δοκίμια με τους κανόνες της τέχνης και της επιστήμης και (γ) της ερμηνείας των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη ραδιογραφία. Με το βλέμμα στην ανάγκη αυτήν, το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και ο Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών αποφάσισαν τη δημιουργία ενός Εργαστηρίου Βιομηχανικής Ραδιογραφίας. Με τη λειτουργία του Εργαστηρίου αυτού στο ΕΜΠ θα επιδιωχθεί η εξοικείωση των μελλοντικών



Μηχανολόγων και άλλων Μηχανικών με το αντικείμενο της Βιομηχανικής Ραδιογραφίας στο προπτυχιακό αλλά και στο μεταπτυχιακό στάδιο. Για το σκοπό αυτό στις σχετικές εγκαταστάσεις Βιομηχανικής Ραδιογραφίας, οι οποίες αυτή τη στιγμή (2009) βρίσκονται στο στάδιο της διαμόρφωσης με τη βοήθεια ήδη αποκτηθέντος εξοπλισμού, θα ραδιογραφούνται δοκίμια χρησιμοποιώντας συσκευή παραγωγής ακτίνων  $\alpha$ . Δεδομένου ότι ο εξοπλισμός αυτός είναι απολύτως ενεργητικός και λειτουργεί μόνο με την παροχή της κατάλληλης ηλεκτρικής ισχύος αποφεύγονται ουσιαστικά προβλήματα ραδιοπροστασίας που θα υπήρχαν αν αντίθετα γινόταν χρήση ισχυρών ισοτοπικών πηγών φωτονίων, όπως π.χ. προβλήματα φύλαξης και ασφαλούς θωράκισης. Η καταγραφή της ραδιογραφικής εικόνας θα γίνεται σε συμβατικό φιλμ, του οποίου η εμφάνιση θα πραγματοποιείται σε αυτόματο εμφανιστήριο. Για τη λειτουργία του υπόψιν εξοπλισμού διατέθηκαν από τον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ συγκεκριμένοι χώροι που εξασφαλίζουν την ασφαλή για το προσωπικό και τους φοιτητές έκθεση των δοκιμίων και την εμφάνιση των φιλμ σε περιβαλλοντικές συνθήκες (φωτισμού, θερμοκρασίας κλπ.) που δεν αλλοιώνουν τη ραδιογραφική εικόνα. Το αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, η οποία ανατέθηκε στα πλαίσια του μαθήματος "Βιομηχανικές Εφαρμογές Πυρηνικής Τεχνολογίας" του 7<sup>ου</sup> χειμερινού εξαμήνου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών είναι γενικά η εξέταση της λειτουργίας και οι εφαρμογές που μπορεί να έχει το ειδικό λογισμικό προσομοίωσης βιομηχανικής ραδιογραφίας XRSIM ως μέρος της εκπαιδευτικής και της ερευνητικής διαδικασίας.

### **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Λέκτορα κ. Ν.Π. Πετρόπουλο για την συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της Διπλωματικής Εργασίας. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διευθυντή του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας Επίκουρο Καθηγητή κ. Ε.Π. Χίνη για τη διάθεση αναγκαίων πιστώσεων για μικρές δαπάνες προκειμένου για την ολοκλήρωση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

# ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΑΣ ΜΕ ΤΟΝ ΚΩΔΙΚΑ XRSIM

Διπλωματική Εργασία του Γ. Θεοδωρόπουλου

Οι κύριοι στόχοι της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας συνοψίζονται ως εξής:

(1) Να παρουσιασθεί και να εξετασθεί εκτενώς το ειδικό λογισμικό XRSIM, το οποίο προσομοιώνει τη διαδικασία της βιομηχανικής ραδιογραφίας. (2) Να εξετασθεί και να οργανωθεί ο τρόπος με τον οποίο το λογισμικό XRSIM μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην διδασκαλία των αρχών της βιομηχανικής ραδιογραφίας ταυτόχρονα με τη χρήση του πραγματικού εργαστηρίου παραγωγής ραδιογραφιών. (3) Να εξετασθεί το πιο κατάλληλο και κατά προτίμηση ελεύθερο λογισμικό για την κατασκευή και τροποποίηση δοκιμών σε μορφή αρχείων CAD, με σκοπό την εισαγωγή τους στον κώδικα XRSIM για την εικονική ραδιογράφιση συγκεκριμένων γεωμετριών. (4) Να παρουσιασθούν οι βασικές αρχές της τομογραφίας και να παραχθεί μία τομογραφία μιας τυπικής γεωμετρίας με τη βοήθεια του κώδικα XRSIM. Επισημαίνεται ότι η χρήση του XRSIM αντί πραγματοποίησης ραδιογραφίας στο Εργαστήριο ελαχιστοποιεί το κόστος της εκπαίδευσης κυρίως διότι δεν χρειάζεται χρηματοδότηση για φιλμ και αναλώσιμα και συντήρηση του εμφανιστηρίου. Επί πλέον η χρήση του κώδικα XRSIM εξοικονομεί πολύ χρόνο, αφού το βήμα της εμφάνισης του φιλμ έχει εξαλειφθεί. Έτσι εξάσκηση με τον κώδικα XRSIM με τη χρήση αντίστοιχων αποσπασμάτων θεωρίας βοηθούν στην κατανόηση του ρόλου των ρυθμίσεων της μηχανής παραγωγής ακτίνων  $x$ , όπως της υψηλής τάσης (kV), της έντασης (mA), του χρόνου έκθεσης (s), της επιλογής τύπου φιλμ, της απόστασης κοκ. Τα αρχεία CAD που μπορούν να εισαχθούν στο κώδικα με πληροφορίες για την γεωμετρία του δοκιμίου είναι τύπου "ASCII stl", μία από τις πρώτες προτυποποιήσεις για CAD πληροφορίες. Υπάρχουν πολλά ελεύθερα ή εμπορικά λογισμικά που μπορούν να δημιουργήσουν και να χειρισθούν αρχεία αυτού του τύπου. Συμπεραίνεται ότι το ελεύθερο "GoogleSketchUp" είναι το πιο χρήσιμο στην γρήγορη και εύκολη παραγωγή αρχείων CAD τύπου "ascii stl". Ο χρήστης εξοικειώνεται γρήγορα με το λογισμικό αυτό με αποτέλεσμα τη δυνατότητα παραγωγής πολλών αρχείων απλής ή πολύπλοκης γεωμετρίας. Όσον αφορά τις τομογραφικές μεθόδους, αυτές έχουν επικρατήσει στον μη καταστροφικό έλεγχο του εσωτερικού δοκιμίων τόσο στη

βιομηχανική όσο και στην ιατρική ραδιογραφία. Χρησιμοποιώντας τον κώδικα XRSIM και άλλο εξειδικευμένο λογισμικό γίνεται δυνατή η εξερεύνηση των μεθόδων τομογραφίας σε επίπεδο προσομοίωσης. Η προσομοίωση τομογραφίας βοηθάει (α) στην κατανόηση των μεθόδων "back projection" και την επιλογή της πιο αποτελεσματικής από αυτές και (β) στο να καταδείξει τι απαιτείται να προστεθεί, σε πρακτικό επίπεδο, στον ήδη διαθέσιμο εξοπλισμό του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ για την υλοποίηση πραγματικής τομογραφίας.

## **ABSTRACT**

### **SIMULATION OF INDUSTRIAL RADIOGRAPHY USING THE XRSIM CODE**

#### **Diploma Dissertation of G. Theodoropoulos**

The main objectives of this Diploma Dissertation may be summarized as it follows: (1) To extensively present and review the XRSIM special software, which simulates the typical processes of industrial radiography. (2) To use the XRSIM simulation software as a tool for teaching industrial radiography using the class in parallel to the actual radiography laboratory. (3) To review the most appropriate and preferably free available software to be used for the construction and modification of specimens in the form of CAD files, that could be introduced to XRSIM in order to serve for the simulation of the radiography of specific geometries. (4) To present the basic principles of tomography and to simulate a tomography of a typical cross-section using the help of XRSIM software. It is indicated that employing XRSIM, instead of actually performing radiographies, minimizes training costs mainly because there is no need to fund for film and film processor consumables and maintenance. Furthermore, simulations with XRSIM are extremely time saving since film development time is not necessary. Therefore, appropriate training simulation exercises accompanied by segments of basic radiography theory could assist towards the understanding of the role of the main radiographic procedures components on the virtual level, namely: the x-ray generator type, the selection of the suitable exposure (high voltage kV, mA, distance etc.) and the selection of the suitable film type. The CAD files that could be introduced to XRSIM with the geometry information of the specimen are following the "ASCII stl" format, originally introduced for stereolithography prototyping. Lots of free and commercial software is available for drawing in this format. It is concluded that the free "GoogleSketchUp" is readily provided for the easy and quick production of specimens in "ASCII stl". One can easily familiarize with this software, thus allowing for the production of numerous simple or complicated geometries of specimens. Regarding tomographic procedures, such methods have been well established for the non destructive inspection of specimen interior both in medical and industrial imaging. Tomography simulations from virtual specimens can be successfully investigated using XRSIM and other

specialized software. Such simulations could help (a) in terms of understanding which is the most appropriate variation of the back-projection tomographic methodology and (b) in showing what is further needed in the practical level, so that to proceed to actual tomographic imaging using the already available equipment in the Nuclear Engineering Laboratory of NTUA.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Γενικά

Οι στόχοι της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας μπορούν γενικά να συνοψισθούν ως εξής:

(1) Η παρουσίαση του ειδικού λογισμικού XRSIM που προσομοιώνει όλη τη διαδικασία βιομηχανικής ραδιογραφίας για εκπαιδευτικούς σκοπούς. Η χρήση του λογισμικού αυτού στη θέση της πραγματικής ραδιογραφίας έχει πλεονεκτήματα έναντι της πραγματικής εργαστηριακής εξάσκησης διότι απαλλάσσει από το κόστος του φιλμ, το κόστος της συντήρησης του εμφανιστηρίου καθώς και από το χρόνο που απαιτείται για τις εμφανίσεις.

(2) Η παρουσίαση μαθημάτων με χρήση του λογισμικού προσομοίωσης XRSIM (μαθήματα ραδιογραφίας). Τα μαθήματα αυτά, συνοδευόμενα από την αντίστοιχη θεωρία, αποτελούν μία εισαγωγή στις κυριότερες έννοιες που αφορούν τη ραδιογραφία και οδηγούν τον εκπαιδευόμενο στη σωστή κατανόησή τους. Τα μαθήματα αυτά επιπλέον εκμεταλλεύονται τις δυνατότητες του λογισμικού προσομοίωσης σε σχέση με την επιλογή της κατάλληλης μηχανής παραγωγής ακτίνων  $x$ , την επιλογή της κατάλληλης έκθεσης (υψηλή τάση kV, mA, απόσταση κλπ) και την επιλογή του κατάλληλου φιλμ σε εικονικό επίπεδο.

(3) Η παρουσίαση των πιο εύχρηστων λογισμικών με τα οποία μπορεί κανείς να κατασκευάσει και να τροποποιήσει τα δοκίμια σε μορφή αρχείων CAD, τα οποία είναι απαραίτητα για την προσομοίωση δοκιμίων που εισάγονται στο λογισμικό XRSIM.

(4) Η παρουσίαση των βασικών αρχών της τομογραφίας, δύο απλών μεθόδων πραγματοποίησης τομογραφίας και της αποτελεσματικότητάς τους κρίνοντας εκ του αποτελέσματος.

(5) Η διατύπωση συμπερασμάτων και η παρουσίαση προτάσεων σε σχέση με την αποδοτική χρήση της εγκατάστασης βιομηχανικής ραδιογραφίας που διαθέτει ο Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας.

## 1.2 Προσομοίωση βιομηχανικής ραδιογραφίας

Για την προσομοίωση της βιομηχανικής ραδιογραφίας, την παραγωγή δηλαδή ραδιογραφικής εικόνας με χρήση εικονικής μηχανής παραγωγής ακτίνων  $-x$ , εικονικών ρυθμίσεων, εικονικού δοκιμίου και εικονικού φιλμ, διατίθεται ο κώδικας προσομοίωσης XRSIM (από τα αρχικά των όρων X-RAY SIMULATOR). Πρόκειται για λογισμικό που λειτουργεί σε περιβάλλον Λειτουργικού Συστήματος MSWindows το οποίο με γραφικό τρόπο προσομοιώνει βιομηχανικούς ραδιογραφικούς ελέγχους χρησιμοποιώντας μοντέλα δοκιμίων σχεδιασμένα από κώδικες CAD για να παράγει ακριβείς προσομοιώσεις ραδιογραφιών τους με ακτίνες  $-x$ , για εκπαιδευτικούς σκοπούς. Το λογισμικό αυτό αγοράστηκε από τον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ, το 2008, με τη βοήθεια της τελικής επαναδιανομής των διαθέσιμων πιστώσεων ΕΤΠΑ<sup>1</sup> από το έργο ΥΠΕΠΘ<sup>2</sup> - Β' ΕΠΕΑΕΚ<sup>3</sup> / Γ' ΚΠΣ<sup>4</sup> με τίτλο "Αναμόρφωση Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ". Πρόκειται για λογισμικό που διατίθεται από τον οίκο NDE Technologies Inc, 1785 Sourwood Pl., Charlottesville, VA22911, U.S.A., <http://www.ndetechnologies.com/>, τηλέφωνο επικοινωνίας +14349730299, e-mail: [info@ndetechnologies.com](mailto:info@ndetechnologies.com). Ο Τομέας προμηθεύθηκε την έκδοση 8.22b με τρεις θέσεις εργασίας, για την οποία έκδοση τα δικαιώματα ανήκουν τόσο στον οίκο NDE Technologies Inc (από 1999 έως και 2008), όσο και στο ISURF (Iowa State University Research Foundation, από 1995 έως και 2008). Οι τρεις θέσεις εργασίας ταυτίζονται με κατάλληλα USB κλειδιά, χωρίς την ύπαρξη των οποίων ο κώδικας αν εγκατασταθεί σε Η/Υ τύπου PC συμβατό, δεν μπορεί να "τρέξει". Ο κώδικας επιτρέπει τον εικονικό έλεγχο διαφορετικών δοκιμίων από διαφορετικά υλικά, την ρύθμιση της θέσης και του προσανατολισμού του δοκιμίου -έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η κατάλληλη γεωμετρική του θέση σε σχέση με την πηγή της ακτινοβολίας, και τη ρύθμιση των βασικότερων παραμέτρων λειτουργίας μιας μηχανής ακτίνων  $-x$  έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή έκθεση ενός εικονικού φιλμ. Ο χρήστης του XRSIM, έχει στη διάθεσή του τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί στις προσομοιώσεις του μια σειρά διαφορετικούς τύπους μηχανών παραγωγής ακτίνων  $-x$  διαφόρων κατασκευαστών και μία σειρά από

---

<sup>1</sup> Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης

<sup>2</sup> Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων

<sup>3</sup> 2<sup>ο</sup> Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Εκπαίδευσης και Αρχικής Επαγγελματικής Κατάρτισης

<sup>4</sup> 3<sup>ο</sup> Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης

διαφορετικούς εικονικούς τύπους φιλμ, επίσης διαφόρων κατασκευαστών. Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της Διπλωματικής Εργασίας παρουσιάζονται οι βασικότερες οδηγίες για την παραγωγή προσομοιωμένης ραδιογραφικής εικόνας με τον κώδικα XRSIM.

### **1.3 Μαθήματα ραδιογραφίας με τη χρήση προσομοίωσης**

Μία από τις δυσκολίες που αντιμετωπίζει όποιος μαθαίνει τα βασικά της ραδιογραφίας είναι το σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα ανάμεσα στην έκθεση ενός φιλμ και τη στιγμή που θα έχει στα χέρια του τη ραδιογραφία, το εμφανισμένο δηλαδή φιλμ. Αποτέλεσμα είναι μια εκπαιδευτική άσκηση, που απαιτεί πολλές εκθέσεις έτσι ώστε να γίνει κατανοητή η επίδραση διάφορων παραμέτρων στην ποιότητα της ραδιογραφίας, να είναι πολύ χρονοβόρα. Ο κώδικας προσομοίωσης ραδιογραφίας XRSIM, επιτρέπει στον χρήστη/εκπαιδευόμενο να πειραματιστεί με τη γεωμετρία εξοπλισμού/δοκιμίου και τις διάφορες παραμέτρους της έκθεσης. Οι εικονικές ραδιογραφίες παράγονται από τον κώδικα προσομοίωσης μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα, παρέχοντας άμεση εποπτεία του αποτελέσματος που έχουν οι προσομοιούμενες παράμετροι στην ποιότητα της εικόνας. Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της Διπλωματικής Εργασίας παρουσιάζεται μία σειρά από δεκατρία (13) μαθήματα προσομοίωσης ραδιογραφίας κατάλληλα για εκπαίδευση. Η δομή των μαθημάτων, έχει γενικά ως εξής: Εισαγωγή, Στόχος, Ορισμοί, Ασκήσεις με τον κώδικα, Ασκήσεις στο Εργαστήριο. Πριν τα δεκατρία αυτά μαθήματα προηγείται μία πολύ βασική ενότητα με τους περισσότερους αναγκαίους ορισμούς.

### **1.4 Προσομοίωση δοκιμίων**

Είναι προφανές ότι για την προσομοίωση ραδιογραφίας απαιτείται να εισάγονται στον κώδικα XRSIM δοκίμια σε μορφή ηλεκτρονικών αρχείων CAD στερεών που προσομοιώνουν διάφορα πραγματικά δοκίμια. Τα αρχεία CAD που μπορεί να "διαβάσει" ο κώδικας μπορούν να ακολουθούν κυρίως την τυποποίηση ASCII stl. Έχει αποδειχθεί ότι η τυποποίηση ASCII stl είναι πολύ αποδοτική για τη δημιουργία τριδιάστατων δοκιμίων σε γραφικό περιβάλλον, για τις ανάγκες σε τριδιάστατα στερεά διαφόρων προγραμμάτων προσομοίωσης, όπως και στην περίπτωση του κώδικα XRSIM. Η τυποποίηση ASCII stl είναι από τις πλέον απλές διότι περιγράφει μόνο την γεωμετρία της εξωτερικής επιφάνειας των διαφόρων τριδιάστατων αντικειμένων. Όλες οι επιφάνειες στην τυποποίηση αυτή περιγράφονται και ουσιαστικά αποτελούνται από πολλές



μικρότερες τριγωνικού σχήματος επιφάνειες, για τον καθορισμό της θέσης των οποίων χρησιμοποιείται ένα τριδιάστατο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της Διπλωματικής Εργασίας εξετάζεται με σύντομο τρόπο η κατασκευή, ο χειρισμός και η τροποποίηση δοκιμίων αυτής της τυποποίησης με χρήση κατάλληλων λογισμικών, το πλέον πρόσφορο από τα οποία θεωρείται το GoogleSketchUp.

### **1.5 Προσομοίωση τομογραφίας**

Η τομογραφία είναι χρήσιμη για τον έλεγχο της εσωτερικής δομής της ύλης και ως εκ τούτου είναι απαραίτητη τόσο για τη διάγνωση πολλών ασθενειών στην ιατρική, αλλά και για τον έλεγχο δοκιμίων στη βιομηχανία. Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της Διπλωματικής Εργασίας περιγράφεται το πρόβλημα ελέγχου της εσωτερικής δομής μιας τομής από ένα δοκίμιο και ο τρόπος με τον οποίο το αντιμετωπίζει η μέθοδος της τομογραφίας με τη χρήση απλών παραδειγμάτων και εφαρμογών. Για την υλοποίηση αυτού του είδους της τομογραφίας απαιτούνται στην ουσία μία σειρά από τεχνικές ανάλυσης εικόνας, οι οποίες μπορούν να είναι σχετικά απλές έως εξαιρετικά πολύπλοκες και για τις οποίες απαιτείται σχετικά εξειδικευμένο λογισμικό. Ως πρώτη και απλούστερη από αυτές τις τεχνικές παρουσιάζεται και σχολιάζεται η λεγόμενη μέθοδος back projection. Σε πιο προχωρημένο επίπεδο παρουσιάζεται και σχολιάζεται στη συνέχεια ο τρόπος υλοποίησης της τομογραφίας με χρήση λογισμικού το οποίο διευκολύνει στην ευκολότερη εφαρμογή της μεθόδου back projection. Οι βάσεις του υπόψιν λογισμικού είναι δύο κύριοι μαθηματικοί μετασχηματισμοί: ο μετασχηματισμός Radon και ο μετασχηματισμός Fourier. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία και τα δύο αυτά μαθηματικά εργαλεία δεν αναλύονται σε βάθος αλλά αντιμετωπίζονται ως "μαύρα κουτιά". Κατ' αυτόν τον τρόπο τροφοδοτούνται με όσο το δυνατόν ορθότερα δεδομένα και ελέγχεται στην έξοδό τους η ποιότητα του τομογραφικού αποτελέσματος. Τέλος, διατυπώνονται συμπεράσματα σε σχέση με τις παρουσιαζόμενες μεθόδους.

### **1.6 Σύνοψη**

Στον επίλογο της Διπλωματικής Εργασίας, δίνονται τα κυριότερα σημεία των επιμέρους συμπερασμάτων, τα οποία μπορούν να αναφερθούν περιληπτικά ως εξής:

(α) Ο κώδικας XRSIM προσομοιώνει με επιτυχία σε γραφικό περιβάλλον βιομηχανικούς ραδιογραφικούς ελέγχους για να παράγει ραδιογραφίες με ακτίνες  $-x$ , για εκπαιδευτικούς σκοπούς.

(β) Οι εφαρμογές του κώδικα XRSIM υπό τύπον διακριτών "μαθημάτων", μπορεί να γίνονται με τρόπο ώστε ο χρήστης/εκπαιδευόμενος να εξοικειωθεί τόσο με τον ίδιο τον κώδικα, όσο και με την πραγματική ραδιογραφική διαδικασία που προσομοιώνεται.

(γ) Διαπιστώθηκε ότι, είναι δυνατόν με απλά και γενικά ελεύθερα διαθέσιμα εργαλεία λογισμικού να κατασκευάζονται γεωμετρικές αναπαραστάσεις δοκιμίων σε ηλεκτρονικά αρχεία CAD τύπου "ASCII stl" για χρήση με τον κώδικα XRSIM.

(δ) Όπως σχεδόν κάθε λογισμικό, έτσι και ο κώδικας XRSIM, παρουσιάζει προβλήματα μικρότερης ή μεγαλύτερης βαρύτητας τα οποία εμποδίζουν την ομαλή λειτουργία του. Τα προβλήματα αυτά διαπιστώθηκαν στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Περισσότερες λεπτομέρειες για τα προβλήματα αυτά παρουσιάζονται στον Επίλογο,

και τέλος

(ε) Με τη βοήθεια και του κώδικα XRSIM, επαληθεύθηκαν οι βασικότερες μέθοδοι τομογραφίας και έγινε μία πρώτη γνωριμία με τα αναμφισβήτητα πλεονεκτήματά της. Σε συνέχεια της επαλήθευσης αυτής διαπιστώθηκε και η βασικότερη έλλειψη της εγκατάστασης βιομηχανικής ραδιογραφίας σε ό,τι αφορά την παραγωγή τομογραφιών στην πράξη είναι η παραγωγή ψηφιοποιημένης ραδιογραφικής εικόνας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Ο ΚΩΔΙΚΑΣ XRSIM: ΓΕΝΙΚΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ

#### 2.1 Εισαγωγή

Ο κώδικας XRSIM (από τα αρχικά των όρων X-RAY SIMULATOR), σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε στο Κέντρο Μη Καταστρεπτικού Ελέγχου του Πολιτειακού Πανεπιστημίου της Iowa των Η.Π.Α (Iowa State University's Center for Nondestructive Evaluation). Ο κώδικας προσομοιώνει σε γραφικό περιβάλλον βιομηχανικούς ραδιογραφικούς ελέγχους χρησιμοποιώντας μοντέλα δοκιμών σχεδιασμένα από κώδικες CAD (Computer Aided Design) για να παράγει ακριβείς προσομοιώσεις ραδιογραφιών τους με ακτίνες -x, για εκπαιδευτικούς σκοπούς. Ο κώδικας επιτρέπει στο χειριστή/εκπαιδευόμενο τον έλεγχο διαφορετικών δοκιμών από διαφορετικά υλικά, την ρύθμιση της θέσης και του προσανατολισμού του δοκιμίου -έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η κατάλληλη γεωμετρική του θέση σε σχέση με την πηγή της ακτινοβολίας, και τη ρύθμιση των βασικότερων παραμέτρων λειτουργίας μιας μηχανής ακτίνων -x έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή έκθεση ενός εικονικού φιλμ. Ο χρήστης του XRSIM, έχει στη διάθεσή του τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί στις προσομοιώσεις του μια σειρά διαφορετικούς τύπους μηχανών παραγωγής ακτίνων -x διαφόρων κατασκευαστών και μία σειρά από διαφορετικούς εικονικούς τύπους φιλμ, επίσης διαφόρων κατασκευαστών

Όπως είναι γνωστό, η επιτυχημένη ραδιογραφία εξαρτάται από πολυάριθμες μεταβλητές που επηρεάζουν την έκβαση και την ποιότητα της εικόνας. Πολλές από αυτές τις μεταβλητές επιδρούν ουσιαστικά στην ποιότητα της εικόνας, ενώ άλλες λιγότερο. Χρησιμοποιώντας τον XRSIM αυτές οι μεταβλητές μπορούν να τροποποιηθούν σε επίπεδο προσομοίωσης και η τελική προσομοιωμένη εικόνα στο φιλμ να παρατηρηθεί έτσι ώστε να κατανοηθεί η επίδραση τους σε αυτήν. Με τον κώδικα XRSIM μπορούν:

- (α) να εξερευνηθούν από τον καθένα ένας μεγάλος αριθμός και ποικιλία προβλημάτων, και
- (β) να κατανοηθούν οι επιδράσεις των διαφόρων μεταβλητών μέσω διαδοχικών δοκιμών, χωρίς να σπαταλώνται υλικά και εργαστηριακές ανθρωποώρες.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δεν περιπλέκονται εξ αιτίας αστάθμητων παραγόντων, όπως π.χ.

- (i) ατέλειες που παρουσιάζονται στην επεξεργασία του πραγματικού φιλμ
- (ii) διαταραχές της προσοχής του εκπαιδευόμενου, από θέματα που δε συνδέονται με την κύρια εκπαίδευση.

Ο κώδικας XRSIM έχει σχεδιαστεί να τρέχει σε περιβάλλον MSWindows σε προσωπικό Η/Υ IBM ή σε αντίστοιχο συμβατό τεχνολογίας Pentium. Για τη χρήση του XRSIM ο εκπαιδευόμενος πρέπει να είναι γενικά εξοικειωμένος με το λειτουργικό σύστημα των Windows. Στη συνέχεια θα παρουσιασθούν οι βασικότερες οδηγίες για την παραγωγή προσομοιωμένης ραδιογραφικής εικόνας με τον κώδικα (βλ. και XRSIM, 1999a).

## **2.2 Προσομοίωση ραδιογραφίας με τον κώδικα XRSIM**

Τα βήματα που απαιτούνται για την παραγωγή μιας ραδιογραφίας με τον κώδικα XRSIM είναι βασικά τα ίδια με αυτά που απαιτούνται για την παραγωγή μιας πραγματικής ραδιογραφίας. Ένα παραπάνω βήμα που απαιτείται αφού το δοκίμιο έχει τοποθετηθεί όπως επιθυμεί ο χρήστης, είναι η κατασκευή ενός δισδιάστατου χάρτη του πάχους του δοκιμίου, το οποίο θα προσβάλλει κάθετα η πρωτεύουσα δέσμη ακτίνων  $-x$ . Ένα δεύτερο πιθανό παραπάνω βήμα που μπορεί να περιλαμβάνεται στη διαδικασία προετοιμασίας του XRSIM είναι η εισαγωγή ενός ελαττώματος στο δοκίμιο, κάτι που δεν είναι απαραίτητο. Τα βήματα που απαιτούνται για την παραγωγή μιας εικονικής ραδιογραφίας είναι:

1. "Τρέξτε" τον κώδικα XRSIM (π.χ. από τη διαθέσιμη "συντόμευση")
2. Επιλέξτε ένα δοκίμιο (αρχείο CAD) για ραδιογραφία
3. Τοποθετήστε το δοκίμιο κατάλληλα σε σχέση με το φιλμ και τη μηχανή ακτίνων  $-x$
4. Επιλέξτε το υλικό του δοκιμίου
5. Εισάγετε, αν είναι επιθυμητό, ένα ελάττωμα στο δοκίμιο
6. Αλλάξτε τη θέση και το μέγεθος του φιλμ για να απεικονίσετε το επιθυμητό μέρος του δοκιμίου

7. "Τρέξτε" την κατάλληλη λειτουργία (Run CAD hot button) για την παραγωγή δισδιάστατου χάρτη πάχους του δοκιμίου
8. Επιλέξτε τον επιθυμητό τύπο φιλμ
9. Επιλέξτε τη μηχανή ακτίνων -x που θα χρησιμοποιήσετε
10. Ρυθμίστε κατάλληλα την υψηλή τάση (kilovoltage), την ένταση (ampereage) και το χρόνο έκθεσης έτσι ώστε να έχετε την επιθυμητή οπτική πυκνότητα
11. "Τρέξτε" τον XRSIM (εκθέστε δηλαδή το εικονικό φιλμ) για να παράγετε την ραδιογραφία

Τα πιο πάνω βήματα, όπως θα περιγραφούν στη συνέχεια χωρίζονται σε δύο ενότητες. Η πρώτη καλύπτει τους βασικούς χειρισμούς που χρειάζονται για την παραγωγή εικόνας. Η δεύτερη καλύπτει μερικές από τις λιγότερο χρησιμοποιούμενες επιλογές του κώδικα.

*Συνιστάται να χρησιμοποιούνται οι οδηγίες αυτού του Κεφαλαίου ταυτόχρονα με την εφαρμογή του κώδικα. Με αυτόν τον τρόπο η κατανόηση των λειτουργιών του θα γίνει πολύ πιο γρήγορα διότι ο εκπαιδευόμενος θα έχει τη δυνατότητα να εξερευνά τις διάφορες εντολές ενώ διαβάζει τις οδηγίες.*

## **2.3 Βασικοί χειρισμοί παραγωγής εικόνας**

### **2.3.1 Έναρξη XRSIM**

1. Εντοπίστε το αρχείο XRSIM.exe στον υπολογιστή σας.
2. Κάνετε διπλό "κλικ" στο εικονίδιο του.

### **2.3.2 Γραφικό περιβάλλον κώδικα**

Όταν τρέξει ο κώδικας ο χρήστης θα δει την εικόνα του Διαγράμματος 2.1. Στην κορυφή του κυρίως παραθύρου υπάρχουν "μενού" πολλαπλών επιλογών και εικονικά πλήκτρα (buttons) συντομεύσεων, που λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο όπως σε κάθε περιβάλλον MS Windows. Τα πλήκτρα συντομεύσεων αντιστοιχούν στις πιο χρήσιμες εντολές των μενού. Ο έλεγχος και η τροποποίηση του δοκιμίου, του ελαττώματος, του ανιχνευτή (δηλ. του εικονικού φιλμ) και της μηχανής ακτίνων -x γίνεται από τέσσερα ξεχωριστά παράθυρα ελέγχου στο αριστερό μέρος του κυρίως παραθύρου. Το επιθυμητό κάθε φορά παράθυρο ελέγχου εμφανίζεται κάνοντας "κλικ" σε αντίστοιχη ετικέτα (tab).

### 2.3.3 Επιλογή δοκιμίου

Όταν τρέξει ο κώδικας το παράθυρο ελέγχου του δοκιμίου (sample) θα είναι επιλεγμένο και ενεργό. Η πρώτη κίνηση που πρέπει να γίνει είναι ο χρήστης να ανοίξει το παράθυρο αρχείων CAD (τύπου \*.stl, \*.unv, ή \*.xad) και να επιλέξει ένα από τα διαθέσιμα για ραδιογραφικό έλεγχο, ως εξής, σύμφωνα και με την εικόνα του Διαγράμματος 2.2:

1. Στην πάνω αριστερά γωνία της οθόνης επιλέξτε File και μετά Open (ή κάνετε "κλικ" στο αντίστοιχο πλήκτρο συντόμευσης)
2. Θα δείτε έναν αριθμό αρχείων δοκιμίων CAD τύπου \*.stl ή \*.unv ή \*.xad που μπορείτε να επιλέξετε. Για να ανοίξετε κάποιο κάνετε διπλό "κλικ" πάνω του ή επιλέξτε το αρχείο και κάνετε κλικ στην επιλογή Open, σύμφωνα και με την εικόνα του Διαγράμματος 2.3. Το επιλεγμένο δοκίμιο θα εμφανιστεί σε πράσινο χρώμα στο "παράθυρο τρισδιάστατης απεικόνισης" (3D sample image window), όπως διακρίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 2.4.

Όπως θα αναλυθεί στο επόμενο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, αρχεία δοκιμίων μπορούν να κατασκευασθούν με διάφορους τρόπους σε διάφορα βασικά σχήματα (π.χ. σφαίρες, ημισφαίρια, κύλινδροι, κώνοι, πυραμίδες και ορθογώνια παραλληλεπίπεδα) αλλά και σύμφωνα με κατασκευαστικά σχέδια με πολύπλοκες γεωμετρίες.

### 2.3.4 Καθορισμός θέσης δοκιμίου (Αξονική μετακίνηση)

Αφού ο χρήστης εισάγει το δοκίμιο στο "παράθυρο τριδιάστατης απεικόνισης" (3D sample image window, βλ. και Διάγραμμα 2.4) θα πρέπει να το τοποθετήσει και να το προσανατολίσει σωστά σε σχέση με τη μηχανή ακτίνων -x και το εικονικό φιλμ, όπως θα απαιτούνταν σε ένα πραγματικό Εργαστήριο Ραδιογραφίας. Για το σκοπό αυτό:

1. Χρησιμοποιήστε τα πλήκτρα επιλογής όψης στο άνω μέρος του παραθύρου τρισδιάστατης απεικόνισης (πλήκτρα χρώματος "φούξια", τα οποία διακρίνονται σε μεγέθυνση στην εικόνα του Διαγράμματος 2.5) για να παρατηρήσετε το δοκίμιο από διαφορετικές όψεις. Είναι δυνατόν, η παρατήρηση να γίνεται τριδιάστατα, ή ως "κάτοψη", ή "εμπρόσθια όψη", ή "πλάγια από αριστερά όψη", ή "πλάγια από δεξιά όψη", ή "οπίσθια όψη", ή "άνοψη"

2. Για την τοποθέτηση του δοκιμίου αλλά και για μια σειρά άλλους χειρισμούς επί αυτού διατίθεται σχετική ετικέτα (sample) στο "μενού ελέγχου" (set-up window). Το δοκίμιο μπορεί να μετακινηθεί κατά τους x, ψ και z άξονες με τρεις τρόπους. Ο πρώτος τρόπος σε όλες τις όψεις είναι κάνοντας "κλικ" πάνω του και μετακινώντας το ποντίκι (η γνωστή διαδικασία "click and drag"). Το δοκίμιο ανάλογα με τις δυνατότητες του χρησιμοποιούμενου υπολογιστή και την έκδοση του κώδικα XRSIM μπορεί να μην ακολουθήσει ακαριαία την κίνηση του ποντικιού, για αυτό σε τέτοιες περιπτώσεις συνιστάται να σταματάτε συχνά επιτρέποντάς του έτσι να ακολουθήσει. Σύμφωνα με αυτόν τον τρόπο μετακίνησης όταν βλέπετε

- την εμπρόσθια όψη, το δοκίμιο μετακινείται κατά x ή z,
- την οπίσθια όψη, ομοίως
- την πλάγια από αριστερά, το δοκίμιο μετακινείται κατά ψ ή z,
- την πλάγια από δεξιά, ομοίως
- την κάτωψη, το δοκίμιο μετακινείται κατά x ή ψ, και τέλος
- την άνοψη ομοίως.

Ο δεύτερος τρόπος μετακίνησης είναι με ρυθμίσεις στο του "μενού ελέγχου" στο "παράθυρο ελέγχου δοκιμίου" (sample set-up window) στην επιλογή "Smpl Translate" στο πλαίσιο "Sample Operation", με την πληκτρολόγηση τιμών σε εκατοστά του μέτρου στα τρία κατάλληλα διαθέσιμα πλαίσια, όπως φαίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 2.6. Η όποια μετακίνηση θα ισχύσει αφού πατήσετε enter. Τέλος, ο τρίτος τρόπος μετακίνησης είναι να χρησιμοποιήσετε τα πλήκτρα ολίσθησης ή τα βελάκια που διακρίνονται στο "παράθυρο ελέγχου δοκιμίου".

### **2.3.5 Αξονική περιστροφή δοκιμίου**

Ο προσανατολισμός του δοκιμίου μπορεί να τροποποιηθεί από το "παράθυρο ελέγχου δοκιμίου".

1. Στο "παράθυρο ελέγχου δοκιμίου", επιλέξτε "Smpl Rotate" στο πλαίσιο "Sample Operation".

2. Χρησιμοποιήστε τα πλήκτρα ολίσθησης ή συμπληρώστε τιμές σε μοίρες στα τρία κατάλληλα διαθέσιμα πλαίσια, όπως φαίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 2.7, για να περιστρέψετε το δοκίμιο αξονικά γύρω από τον άξονα x ή ψ ή z. Όταν παρατηρείτε το δοκίμιο από την εμπρόσθια όψη το πλήκτρο για τον άξονα x θα το περιστρέψει γύρω από έναν νοητό οριζόντιο άξονα παράλληλο με την οθόνη, το πλήκτρο για τον άξονα ψ θα το περιστρέψει γύρω από έναν νοητό οριζόντιο άξονα κάθετο στην οθόνη και το πλήκτρο για τον άξονα z θα το περιστρέψει γύρω από έναν κατακόρυφο άξονα παράλληλο προς την οθόνη.

### **2.3.6 Ακύρωση μετακινήσεων δοκιμίου**

Οποιαδήποτε μετακίνηση ή περιστροφή μπορεί εύκολα να ακυρωθεί επιλέγοντάς την (στο πλαίσιο αριστερά του πλήκτρου "Undo") και κάνοντας κλικ στο πλήκτρο αυτό. Για παράδειγμα στην εικόνα του Διαγράμματος 2.8, παρουσιάζεται μία ακύρωση περιστροφής.

### **2.3.7 Επιλογή υλικού δοκιμίου**

Δύο παράγοντες επηρεάζουν την αλληλεπίδραση του δοκιμίου με την δέσμη ακτίνων -x, το υλικό του δοκιμίου και η πυκνότητά του. Χονδρικά και απλοποιητικά για τις βασικές ανάγκες αυτού του κειμένου μπορεί κανείς να πει γνωρίζοντας γενικές αρχές αλληλεπιδράσεων ακτινοβολιών και ύλης ότι π.χ.

1. ο μόλυβδος μειώνει την ενέργεια ενός φωτονίου πολύ περισσότερο από το αλουμίνιο, κάτι που δείχνει την επίδραση του ατομικού αριθμού του υλικού.
2. ο συντελεστής εξασθένησης (attenuation coefficient) για μια συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων αυξάνεται ανάλογα με την πέμπτη δύναμη του ατομικού αριθμού (δηλ.  $\sim Z^5$ ).
3. για κάποια υλικά, έστω τα κεραμικά, η σύνθεση του κεραμικού υλικού δεν αλλάζει, αλλά η πυκνότητα μπορεί να αλλάξει ανάλογα με τον τρόπο παρασκευής και τον σκοπό της εφαρμογής. Ένα κεραμικό υλικό που δεν έχει περάσει θερμική επεξεργασία έχει συνήθως μόνο το 60% της πυκνότητας του ίδιου υλικού μετά την θέρμανση. Σε αυτήν την περίπτωση ο συντελεστής εξασθένησης αυξάνεται γραμμικά ως συνάρτηση της πυκνότητας του υλικού.

Για την επιλογή υλικού του δοκιμίου:



1. Στο "παράθυρο ελέγχου δοκιμίου" (sample set-up window) εντοπίστε το πλαίσιο με την ετικέτα "Material".
2. Επιλέξτε από τον διαθέσιμο κατάλογο το επιθυμητό υλικό για το δοκίμιο, κατά τον τρόπο που υποδεικνύεται στην εικόνα του Διαγράμματος 2.9. Στον κατάλογο αυτόν παρέχεται και η πυκνότητα του υλικού (σε  $\text{gcm}^{-3}$ ). Τα δυνατά υλικά του κώδικα XRSIM περιγράφονται στον Πίνακα 2.1. Τα γραμμοσκιασμένα υλικά του κώδικα είναι αυτά που διατίθενται για την έκδοση που αναλύεται εδώ.

### **2.3.8 Διαφώτιστη απεικόνιση δοκιμίου**

Το δοκίμιο συνήθως απεικονίζεται ως τριδιάστατο συμπαγές αντικείμενο. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις που η διαφώτιστη (translucent) απεικόνιση είναι χρήσιμη, για να φαίνεται η εσωτερική του δομή και τα τυχόν ελαττώματα που μπορεί να τοποθετήσει ο χρήστης, για σκοπούς προσομοίωσης. Χρησιμοποιώντας τη διαφώτιστη απεικόνιση το ελάττωμα γίνεται ορατό και έτσι μπορεί εύκολα να μετακινηθεί στην επιθυμητή θέση κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου. Μπορείτε να δείτε τη διαφώτιστη απεικόνιση του δοκιμίου επιλέγοντας "display" στο κάτω μέρος του "παραθύρου ελέγχου του δοκιμίου" και τοποθετώντας " $\surd$ " στη θέση "Translucent", με τον τρόπο που διακρίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 2.10.

### **2.3.9 Εισαγωγή ελαττώματος στο δοκίμιο**

Αν είναι επιθυμητό, μπορεί να εισαχθεί ένα ελάττωμα στο δοκίμιο. Το ελάττωμα (όπως και το δοκίμιο) είναι ένα μοντέλο σε αρχείο CAD. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να γίνεται τροποποίηση του σχήματος και των διαστάσεων του ελαττώματος από κώδικες σχεδιασμού αλλά και ως ένα βαθμό από τον ίδιο τον κώδικα XRSIM, όσο αφορά μόνο στις διαστάσεις. Η έκδοση του κώδικα που αναλύεται εδώ είναι εφοδιασμένη με ένα αρχείο ελαττώματος του βασικού σχήματος σφαίρα. Όπως θα αναλυθεί στο επόμενο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, αρχεία ελαττωμάτων (αλλά και αρχεία δοκιμίων, όπως ήδη σημειώθηκε) μπορούν να κατασκευασθούν με διάφορους τρόπους σε διάφορα βασικά σχήματα (π.χ. σφαίρες, ημισφαίρια, κύλινδροι, κώνοι, πυραμίδες και ορθογώνια παραλληλεπίπεδα) αλλά και σύμφωνα με κατασκευαστικά σχέδια με πολύπλοκες γεωμετρίες. Τα αρχεία ελαττωμάτων γενικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναπαράσταση κοινών ελαττωμάτων, όπως κενά, εγκάρσιες και διαμήκειες ρωγμές κλπ.

1. Κάνετε "κλικ" στην ετικέτα "Flaw" για να επιλέξετε από το "μενού" ελέγχου το "παράθυρο ελέγχου ελαττώματος" (flaw set-up window) –βλ. και την εικόνα του Διαγράμματος 2.11.
2. Επιλέξτε ένα ελάττωμα παρόμοια με τον τρόπο που επιλέξατε και το δοκίμιο, σύμφωνα και με την εικόνα του Διαγράμματος 2.12, δηλαδή:
  - Στην πάνω αριστερά γωνία της οθόνης επιλέξτε File και μετά Open (ή κάνετε "κλικ" στο αντίστοιχο πλήκτρο συντόμευσης)
  - Θα δείτε έναν αριθμό αρχείων ελαττωμάτων CAD τύπου \*.flw, που μπορείτε να επιλέξετε. Για να ανοίξετε κάποιο (εδώ μοναδική επιλογή είναι το sphere.flw) κάνετε διπλό "κλικ" πάνω του ή επιλέξτε το αρχείο και κάνετε κλικ στην επιλογή Open, σύμφωνα και με την εικόνα του Διαγράμματος 2.13. Το επιλεγμένο ελάττωμα θα εμφανιστεί σε φωτεινό (φωτεινότερο του δοκιμίου) πράσινο χρώμα στο "παράθυρο τρισδιάστατης απεικόνισης" (3D sample image window), όπως διακρίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 2.14.

Όπως θα αναλυθεί και στο επόμενο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, αρχεία ελαττωμάτων μπορούν να κατασκευασθούν με διάφορους τρόπους σε διάφορα βασικά σχήματα (π.χ. σφαίρες, ημισφαίρια, κύλινδροι, κώνοι, πυραμίδες και ορθογώνια παραλληλεπίπεδα) αλλά και σύμφωνα με κατασκευαστικά σχέδια με πολύπλοκες γεωμετρίες. Σημειώνεται ότι, όπως διερευνήθηκε στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, τα αρχεία CAD τύπου \*.flw, είναι στην ουσία μετονομασμένα αρχεία CAD τύπου \*.stl.

### **2.3.10 Επιλογή υλικού ελαττώματος**

Όπως ακριβώς και για το δοκίμιο, το ελάττωμα μπορεί να αποτελείται από ένα από τα διαθέσιμα υλικά (βλ. και Πίνακα 2.1). Το υλικό του ελαττώματος επιλέγεται από τα διαθέσιμα υλικά ώστε να προσομοιώνεται η επιθυμητή πυκνότητα του ελαττώματος με βάση την πυκνότητα των διαθέσιμων υλικών. Τα διαθέσιμα υλικά περιλαμβάνουν τον αέρα για αναπαράσταση ρωγμών και κενών στο δοκίμιο, και μια ποικιλία επιλογών με υψηλή και χαμηλή πυκνότητα που μπορούν να αναπαραστήσουν εγκλείσματα ξένων υλικών (inclusions) μέσα στο δοκίμιο. Για την επιλογή υλικού του ελαττώματος:

1. Στο "παράθυρο ελέγχου ελαττώματος" (flaw set-up window) εντοπίστε το πλαίσιο με την ετικέτα "Material".
2. Επιλέξτε από τον διαθέσιμο κατάλογο το επιθυμητό υλικό για το ελάττωμα, κατά τον τρόπο που υποδεικνύεται στην εικόνα του Διαγράμματος 2.15.

### **2.3.11 Αλλαγή μεγέθους ελαττώματος**

Αφού εισαχθεί το ελάττωμα στο παράθυρο τριδιάστατης απεικόνισης πρέπει –αν χρειάζεται- να καθορισθεί το μέγεθός του και να προσανατολισθεί και να τοποθετηθεί σωστά μέσα στο δοκίμιο. Συνήθως είναι ευκολότερο να καθορισθεί το μέγεθος του ελαττώματος πριν τον προσανατολισμό και την τοποθέτησή του μέσα στο δοκίμιο. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να αναπαρασταθεί ένα σχεδόν διδιάστατο ή και μονοδιάστατο ελάττωμα κάνοντας τις διαστάσεις ενός δεδομένου ελαττώματος (π.χ. μιας σφαίρας) πολύ μικρές. Για το σκοπό αυτό:

1. Χρησιμοποιήστε τα πλήκτρα επιλογής όψης στο άνω μέρος του παραθύρου τριδιάστατης απεικόνισης (πλήκτρα χρώματος "φούξια", τα οποία διακρίνονται σε μεγέθυνση στην εικόνα του Διαγράμματος 2.5) για να παρατηρήσετε το ελάττωμα από διαφορετικές όψεις, με τρόπο παρόμοιο όπως γίνεται η παρατήρηση του δοκιμίου.
2. Στο παράθυρο ελέγχου δοκιμίου, επιλέξτε "Flaw Scale" στο πλαίσιο "Flaw operation", με τον τρόπο που φαίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 2.16.
3. Το μέγεθος του ελαττώματος μπορεί να αλλάξει πληκτρολογώντας μία τιμή στο κατάλληλο διαθέσιμο πλαίσιο, όπως φαίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 2.17. Η όποια αλλαγή θα ισχύσει αφού πατήσετε enter. Η αλλαγή μεγέθους του ελαττώματος μπορεί να γίνει επίσης αν στο "παράθυρο ελέγχου δοκιμίου" χρησιμοποιηθούν κατάλληλα τα διαθέσιμα πλήκτρα ολίσθησης ή τα διαθέσιμα βελάκια. Πλήκτρα ολίσθησης και βελάκια παρέχονται για κάθε μία από τις τρεις μέγιστες διαστάσεις του ελαττώματος. Έτσι, για να μειωθεί το μέγεθος ενός ελαττώματος, για παράδειγμα μιας σφαίρας, χωρίς να αλλάξει το σχήμα του, θα πρέπει να μειωθούν οι τιμές των τριών αυτών διαστάσεων κατά το ίδιο ποσοστό. Στην εικόνα του Διαγράμματος 2.18 διακρίνεται το ελάττωμα που εισήχθη στο "παράθυρο τριδιάστατης απεικόνισης" (βλ. και Διάγραμμα 2.14), αφού έχει μειωθεί η κατά x διάστασή του.

### 2.3.12 Αξονική περιστροφή ελαττώματος

Ο προσανατολισμός του ελαττώματος γίνεται με παρόμοιο τρόπο όπως και του δοκιμίου. Ο προσανατολισμός αυτός μπορεί να τροποποιηθεί από το "παράθυρο ελέγχου ελαττώματος".

1. Στο "παράθυρο ελέγχου του ελαττώματος" επιλέξτε "Flaw Rotate" στο πλαίσιο "Flaw operation".
4. Χρησιμοποιήστε τα πλήκτρα ολίσθησης ή συμπληρώστε τιμές σε μοίρες στα τρία κατάλληλα διαθέσιμα πλαίσια, όπως φαίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 2.19, για να περιστρέψετε το ελάττωμα αξονικά γύρω από τον άξονα x ή ψ ή z. Όταν παρατηρείτε το ελάττωμα από την εμπρόσθια όψη το πλήκτρο για τον άξονα x θα το περιστρέψει γύρω από έναν νοητό οριζόντιο άξονα παράλληλο με την οθόνη, το πλήκτρο για τον άξονα ψ θα το περιστρέψει γύρω από έναν νοητό οριζόντιο άξονα κάθετο στην οθόνη και το πλήκτρο για τον άξονα z θα το περιστρέψει γύρω από έναν κατακόρυφο άξονα παράλληλο προς την οθόνη. Στην εικόνα του Διαγράμματος 2.20 διακρίνεται το ελάττωμα τροποποιημένης διάστασης που υπήρχε στο "παράθυρο τριδιάστατης απεικόνισης" (βλ. και Διάγραμμα 2.18), αφού έχει περιστραφεί κατά τι δεξιόστροφα γύρω από τον άξονα ψ.

### 2.3.13 Μετακίνηση ελαττώματος στο εσωτερικό του δοκιμίου

Αφού έχει καθορισθεί το μέγεθος και ο προσανατολισμός του ελαττώματος, μπορεί αυτό να τοποθετηθεί στο εσωτερικό του δοκιμίου. Φυσικά, σε μερικές περιπτώσεις ίσως χρειαστεί να αλλαχθεί η θέση και η γωνία του ελαττώματος πάνω από μία φορές για να επιτευχθεί η τοποθέτησή του στην επιθυμητή θέση μέσα στο δοκίμιο. Για την αναγκαία μετακίνηση:

1. Στο "παράθυρο ελέγχου του ελαττώματος" επιλέξτε "Flaw Translate" στο πλαίσιο "Flaw Operation".
2. Το ελάττωμα μπορεί να μετακινηθεί κατά τους x, ψ και z άξονες με τρεις τρόπους. Ο πρώτος τρόπος σε όλες τις όψεις είναι κάνοντας "κλικ" πάνω του και μετακινώντας το ποντίκι (η γνωστή διαδικασία "click and drag"). Το ελάττωμα ανάλογα με τις δυνατότητες του χρησιμοποιούμενου υπολογιστή και την έκδοση του κώδικα XRSIM μπορεί να μην ακολουθήσει ακαριαία την κίνηση του ποντικιού, για αυτό σε τέτοιες

περιπτώσεις συνιστάται να σταματάτε συχνά επιτρέποντάς του έτσι να ακολουθήσει. Σύμφωνα με αυτόν τον τρόπο μετακίνησης όταν βλέπετε

- την εμπρόσθια όψη, το ελάττωμα μετακινείται κατά x ή z,
  - την οπίσθια όψη, ομοίως
  - την πλάγια από αριστερά, το ελάττωμα μετακινείται κατά ψ ή z,
  - την πλάγια από δεξιά, ομοίως
  - την κάτοψη, το ελάττωμα μετακινείται κατά x ή ψ, και τέλος
  - την άνοψη ομοίως.
5. Ο δεύτερος τρόπος μετακίνησης είναι με ρυθμίσεις στο "μενού ελέγχου" στο "παράθυρο ελέγχου ελαττώματος" (flaw set-up window) στην επιλογή "Flaw Translate" στο πλαίσιο " Flaw Operation ", με την πληκτρολόγηση τιμών σε εκατοστά του μέτρου στα τρία κατάλληλα διαθέσιμα πλαίσια, όπως φαίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 2.21. Η όποια μετακίνηση θα ισχύσει αφού πατήσετε enter. Τέλος, ο τρίτος τρόπος μετακίνησης είναι να χρησιμοποιήσετε τα πλήκτρα ολίσθησης ή τα βελάκια που διακρίνονται στο "παράθυρο ελέγχου ελαττώματος". Στην εικόνα του Διαγράμματος 2.22 διακρίνεται το ελάττωμα τροποποιημένης διάστασης και κατάλληλου προσανατολισμού, που υπήρχε στο "παράθυρο τριδιάστατης απεικόνισης" (βλ. και Διάγραμμα 2.20), αφού έχει τοποθετηθεί στο εσωτερικό του δοκιμίου.

#### **2.3.14 Ρύθμιση απόστασης φιλμ και εστιακού σημείου**

Αφού το σύνολο δοκίμιο και ελάττωμα έχει διαμορφωθεί με τον επιθυμητό τρόπο, μπορεί να χρειάζεται να καθορισθεί η απόσταση μεταξύ του φιλμ και του εστιακού σημείου της μηχανής παραγωγής ακτίνων –x. Για το σκοπό αυτό:

1. Κάνετε "κλικ" στην ετικέτα "Detector" για να επιλέξετε από το "μενού" ελέγχου το "παράθυρο ελέγχου ανιχνευτή" (detector set-up window) –βλ. και την εικόνα του Διαγράμματος 2.23.

2. Στο πλαίσιο "Detector Type" επιλέξτε το είδος του ανιχνευτή, που για την εδώ εξεταζόμενη περίπτωση, μπορεί να είναι μόνο "film" και ακριβώς από κάτω, στο πλαίσιο "Detector List", τον τύπο του film.
3. Ρυθμίστε την απόσταση του φιλμ από το εστιακό σημείο της μηχανής παραγωγής ακτίνων  $-x$ , πληκτρολογώντας μία τιμή στο πλαίσιο "Detector distance" και πατήστε enter, με τον τρόπο που διακρίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 2.23. Η σχετική προεπιλεγμένη τιμή είναι 100 cm. Η εικόνα του Διαγράμματος 2.24 παρουσιάζει το set-up της διάταξης για απόσταση φιλμ – εστιακού σημείου 100 cm. Η εικόνα του Διαγράμματος 2.25 παρουσιάζει το set-up της διάταξης για απόσταση φιλμ – εστιακού σημείου 50 cm.

### 2.3.15 Ρύθμιση μεγέθους και θέσης φιλμ

Αφού το σύνολο δοκίμιο και ελάττωμα έχει διαμορφωθεί με τον επιθυμητό τρόπο, και έχει επιπλέον ρυθμισθεί η απόσταση φιλμ – εστιακού σημείου, μπορεί να χρειάζεται να μεταβληθεί η θέση ή το μέγεθος του φιλμ για να απεικονισθεί ραδιογραφικά η περιοχή που ενδιαφέρει. Για το σκοπό αυτό:

1. Επιλέξτε κάτοψη με το κατάλληλο πλήκτρο επιλογής όψης (βλ. και Διάγραμμα 2.5) ώστε να παρατηρείτε δοκίμιο, ελάττωμα και φιλμ "από πάνω (επίπεδο  $x$ - $\psi$ )". Σε αυτήν την περίπτωση στο "παράθυρο τριδιάστατης απεικόνισης" το φιλμ αποδίδεται με γαλάζιο χρώμα και η προβολή της δέσμης ακτίνων  $-x$  με ροζ χρώμα.
2. Η  $x$  ή  $\psi$  διάσταση του φιλμ μπορούν να αλλάξουν κάνοντας "κλικ" σε μία από τις γωνίες του και "τραβώντας" με το ποντίκι κατά  $x$  ή  $\psi$ , όπως φαίνεται και στις εικόνες των Διαγραμμάτων 2.26 και 2.27. Εναλλακτικά είναι δυνατόν να αλλάξετε την  $x$  ή την  $\psi$  διάσταση του φιλμ πληκτρολογώντας τιμές στα κατάλληλα πλαίσια με ετικέτες "MaxX", "MinX", "MaxY", "MinY" στο "παράθυρο ελέγχου ανιχνευτή", με τον τρόπο που διακρίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 2.28. Τα μεγέθη "MaxX", "MinX", "MaxY" και "MinY" ορίζονται σε σχέση με το σημείο (0,0) του επιπέδου στο οποίο τοποθετείται το φιλμ. Το σημείο αυτό είναι η προβολή του εστιακού σημείου της μηχανής παραγωγής ακτίνων  $-x$  στο επίπεδο του φιλμ.
3. Το φιλμ μπορεί να μετακινηθεί αξονικά κατά  $x$  ή  $\psi$  χωρίς να αλλάξει το μέγεθός του κάνοντας "κλικ" μακριά από τις γωνίες του και "τραβώντας" το με το ποντίκι στην επιθυμητή θέση.

4. Επιλέξτε εμπρόσθια όψη με το κατάλληλο πλήκτρο επιλογής όψης (βλ. και Διάγραμμα 2.5) ώστε να παρατηρείτε δοκίμιο, ελάττωμα και φιλμ "από μπροστά (επίπεδο  $x - z$ )". Σε αυτήν την περίπτωση στο "παράθυρο τριδιάστατης απεικόνισης" το φιλμ αποδίδεται με γαλάζια γραμμή. Προφανώς η γαλάζια γραμμή αναπαριστά το επίπεδο του φιλμ. Για μία ορθή προσομοίωση ραδιογραφίας –ακριβώς όπως και για μία ορθή πραγματική ραδιογραφία, το δοκίμιο πρέπει να βρίσκεται σε επαφή με (ή έστω ελάχιστα πιο πάνω από) το φιλμ. Επομένως αν χρειάζεται μετακινήστε το σύνολο δοκίμιο – ελάττωμα "τραβώντας" με το ποντίκι μέχρι αυτό να τοποθετηθεί ακριβώς πάνω στο ή ελάχιστα παραπάνω από το επίπεδο του φιλμ. Σημειώνεται και πάλι, ότι όταν μετακινείτε το δοκίμιο – ελάττωμα ή το φιλμ πρέπει να δίνετε χρόνο στον H/Y να ακολουθεί.
5. Επιστρέψτε στην άνοψη για να επιβεβαιώσετε ότι δεν έχετε μετακινήσει το δοκίμιο εκτός φιλμ.

### **2.3.16 Παραγωγή διδιάστατου χάρτη πάχους**

Αφού διαμορφωθεί η γεωμετρία και τα υλικά για το δοκίμιο, το ελάττωμα και το φιλμ χρειάζεται να παραχθεί ένας δισδιάστατος χάρτης πάχους (thickness map) του δοκιμίου - ελαττώματος. Αυτό το βήμα καθορίζει την ποσότητα του υλικού που οι ακτίνες -x πρέπει να διαπεράσουν, με βάση τη διαμόρφωση του δοκιμίου και του ελαττώματος. Ο διδιάστατος χάρτης πάχους υπολογίζεται με βάση το εμβαδόν του φιλμ, οπότε αυτό το βήμα πρέπει να πραγματοποιείται αφού έχουν καθορισθεί οι ιδιότητες, η θέση και οι διαστάσεις του δοκιμίου, του ελαττώματος και του φιλμ. Αν χρειασθεί να γίνουν αλλαγές στα προηγούμενα, ο χάρτης πάχους πρέπει να υπολογιστεί ξανά (σημειώνεται ότι δε χρειάζεται παραγωγή νέου διδιάστατου χάρτη πάχους αν αλλάξει το είδος του φιλμ). Για την παραγωγή διδιάστατου χάρτη πάχους:

1. Ξεκινήστε τη διαδικασία δημιουργίας του διδιάστατου χάρτη πάχους του τεμαχίου κάνοντας κλικ στο κουμπί συντόμευσης "Run CAD" ή επιλέγοντας "Cad" στο μενού "Run", με τον τρόπο που διακρίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 2.29.
2. Εμφανίζεται ένα αναδυόμενο παράθυρο ("pop-up"), στο οποίο είναι δυνατόν να επιλέξετε το όνομα του αρχείου στο οποίο θα σώσετε το διδιάστατο χάρτη. Αν δεν αλλάξετε το όνομα, το αρχείο θα αντικατασταθεί από τον επόμενο χάρτη την επόμενη φορά που θα κάνετε αυτή τη διαδικασία.

3. Πατώντας "OK" στο αναδυόμενο παράθυρο εμφανίζεται πάνω από "παράθυρο τριδιάστατης απεικόνισης" μια διδιάστατη εικόνα που παρουσιάζει με διαφορετικό χρώμα τα διάφορα πάχη υλικού που θα διαπεράσουν κάθετα οι ακτίνες  $-x$ , αν προσβάλλουν κάθετα το δοκίμιο από την επιφάνεια της κάτοψης. Ένας τέτοιος διδιάστατος χάρτης πάχους παρουσιάζεται στην εικόνα του Διαγράμματος 2.30.

### **2.3.17 Αλλαγή / επιλογή τύπου φιλμ**

*Τα βήματα που αφορούν στην αλλαγή / επιλογή τύπου φιλμ καθώς και αυτά που αφορούν πιο κάτω στην επιλογή και τη ρύθμιση της μηχανής παραγωγής ακτίνων  $-x$ , δεν επηρεάζουν τον διδιάστατο χάρτη πάχους του προηγούμενου βήματος.*

Στον κώδικα XRSIM έχουν μοντελοποιηθεί ένας αριθμός από διαφορετικά φιλμ, διαφόρων τύπων, διαφόρων κατασκευαστών. Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται τα βασικότερα και πλέον δημοφιλή φιλμ γνωστών κατασκευαστών που έχουν μοντελοποιηθεί. Για την επιλογή τύπου φιλμ:

1. Κάνετε "κλικ" στην ετικέτα "Detector" για να επιλέξετε από το "μενού" ελέγχου το "παράθυρο ελέγχου ανιχνευτή" (detector set-up window) –βλ. και την εικόνα του Διαγράμματος 2.23.
2. Στο πλαίσιο "Detector Type" επιλέξτε το είδος του ανιχνευτή, που για την εδώ εξεταζόμενη περίπτωση, μπορεί να είναι μόνο "film" και ακριβώς από κάτω, στο πλαίσιο "Detector List", τον τύπο του film.
3. Μπορείτε να αλλάξετε τον τύπο φιλμ κάνοντας "κλικ" πάνω στον τύπο φιλμ που είναι ήδη επιλεγμένος. Τότε θα ανοίξει ένα παράθυρο με τον διαθέσιμο κατάλογο από τύπους φιλμ. Επιλέξτε νέο τύπο φιλμ κάνοντας "κλικ" στον επιθυμητό τύπο και πατώντας "OK". Η διαδικασία αυτή φαίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 2.31.

### **2.3.18 Επιλογή μηχανής παραγωγής ακτίνων $-x$**

Στον κώδικα XRSIM έχουν μοντελοποιηθεί ένας αριθμός από διαφορετικές μηχανές παραγωγής ακτίνων  $-x$ , διαφόρων τύπων, διαφόρων κατασκευαστών. Στην έκδοση του κώδικα που εξετάζεται εδώ, ο αριθμός των τύπων είναι μάλλον περιορισμένος. Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται τα βασικότερα και πλέον δημοφιλή μοντέλα μηχανών γνωστών κατασκευαστών που έχουν μοντελοποιηθεί σε πληρέστερες εκδόσεις του κώδικα XRSIM. Για την επιλογή μηχανής παραγωγής ακτίνων  $-x$ :



1. Κάνετε "κλικ" στην ετικέτα "Generator" για να επιλέξετε από το "μενού" ελέγχου το "παράθυρο ελέγχου μηχανής" (generator set-up window) –βλ. και την εικόνα του Διαγράμματος 2.32.
2. Στο πλαίσιο "Generator Type" επιλέξτε το είδος της μηχανής. Θα διαπιστώσετε ότι η γωνία του κώνου της δέσμης των ακτίνων -x είναι γενικά διαφορετική από μηχανή σε μηχανή. Η γωνία του κώνου της δέσμης αναγράφεται στο "παράθυρο ελέγχου μηχανής" και απεικονίζεται στο "παράθυρο τρισδιάστατης απεικόνισης". Η σύγκριση της εικόνας του Διαγράμματος 2.32 με την εικόνα του Διαγράμματος 2.33 δείχνει διαφορετικούς κώνους δέσμης από διαφορετικές μηχανές.

### **2.3.19 Ρύθμιση χαρακτηριστικών μηχανής ακτίνων –x, έλεγχος της έκθεσης**

Όπως σε κάθε σύστημα παραγωγής ακτίνων -x, έτσι και στο εικονικό σύστημα που προσομοιώνεται στον κώδικα XRSIM υπάρχουν τρεις παράμετροι που πρέπει να καθορισθούν για να επιτευχθεί η επιθυμητή ραδιογραφική εικόνα. Αυτές είναι:

- (α) η τάση της μηχανής (kilovoltage), η οποία καθορίζει το φάσμα ενεργειών και την "δραστική" ενέργεια των εκπεμπόμενων φωτονίων,
- (β) η ένταση (milliamperage) του ρεύματος των ηλεκτρονίων που προσβάλλουν την άνοδο της μηχανής, η οποία καθορίζει την ποσότητα των φωτονίων που παράγονται σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, και τέλος
- (γ) ο χρόνος έκθεσης (exposure time), που καθορίζει το χρόνο που θα εκτεθεί το φιλμ στην ακτινοβολία.

Για τις ρυθμίσεις των παραμέτρων αυτών ρυθμίστε την τάση (kV), την ένταση (mA), και τον χρόνο έκθεσης (s) πληκτρολογώντας τιμές στα αντίστοιχα πλαίσια στο "παράθυρο ελέγχου μηχανής". Οι αλλαγές θα ισχύσουν αφού πατήσετε enter. Σχετικά δείτε και την εικόνα του Διαγράμματος 2.34.

Αφού καθορισθούν οι παράμετροι αυτές, είναι δυνατόν να γίνει ένας προκαταρκτικός έλεγχος στην οπτική πυκνότητα του φιλμ που θα προκύψει από την προσομοίωση για να ελεγχθεί αν η έκθεση (exposure) όπως έχει ρυθμισθεί πιο πάνω με βάση τις παραμέτρους (α), (β) και (γ) είναι κατ' αρχήν ορθή. Υπενθυμίζεται ότι το παραγόμενο φιλμ βιομηχανικής ραδιογραφίας πρέπει να έχει κατά μέσο όρο οπτική πυκνότητα περί το 2

(βλ. π.χ. και Quinn R.A., 1980). Η οπτική πυκνότητα μπορεί να ελεγχθεί στο κέντρο του ελαττώματος (αν υπάρχει) ή σε οποιοδήποτε σημείο του δισδιάστατου χάρτη πάχους. Για τον προκαταρκτικό έλεγχο της οπτικής πυκνότητας:

1. Επιλέξτε έναν από τους δύο διαθέσιμους τρόπους ελέγχου της έκθεσης στο κάτω μέρος του "παράθυρου ελέγχου μηχανής" στο πλαίσιο "Check exposure". Οι τρόποι είναι "OnFlawCenter" (δηλ. στο "κέντρο του ελαττώματος") ή "OnMouse" (δηλ. όπου γίνει "κλικ" με το ποντίκι στον διδιάστατο χάρτη πάχους).
2. Θα ανοίξει το "παράθυρο ελέγχου οπτικής πυκνότητας" που απεικονίζει τιμές οπτικής πυκνότητας. Η μεσαία γραμμή δίνει προκαταρκτικά αποτελέσματα οπτικής πυκνότητας για τις τιμές των παραμέτρων που έχετε επιλέξει για τη μηχανή παραγωγής ακτίνων  $-x$  στο σημείο "OnFlawCenter" ή στο σημείο "OnMouse", ανάλογα. Η πρώτη γραμμή περιγράφει πως θα ήταν οι οπτικές πυκνότητες αν είχατε το ένα τέταρτο της έκθεσης που έχετε. Η τρίτη γραμμή περιγράφει πως θα ήταν οι οπτικές πυκνότητες αν είχατε την τετραπλάσια έκθεση. Όταν επιλέξετε να γίνει έλεγχος της οπτικής πυκνότητας στο κέντρο του ελαττώματος ("OnFlawCenter"), στη δεύτερη στήλη υπάρχει η οπτική πυκνότητα στο κέντρο του ελαττώματος και στην τρίτη στήλη υπάρχει η οπτική πυκνότητα στην περιοχή δίπλα στο ελάττωμα. Όταν κάνετε την άλλη επιλογή ελέγχου (δηλ. την "OnMouse"), στο παράθυρο αυτό απεικονίζεται η οπτική πυκνότητα σε όποιο σημείο του δισδιάστατου χάρτη πάχους κάνετε "κλικ". Στην δεύτερη αυτή περίπτωση όλες οι στήλες παρουσιάζουν τις ίδιες τιμές.
3. Κλείστε το "παράθυρο ελέγχου οπτικής πυκνότητας" κάνοντας κλικ στο "OK".

### **2.3.20 Παραγωγή εικονικής ραδιογραφίας**

Μετά τη ρύθμιση της μηχανής παραγωγής ακτίνων  $-x$  και τον προκαταρκτικό έλεγχο της οπτικής πυκνότητας είναι δυνατόν να παραχθεί πλέον η εικονική ραδιογραφία. Αυτό γίνεται ως εξής:

1. Κάνοντας κλικ στο πλήκτρο συντόμευσης "Run XRS" ή επιλέγοντας "XRS" στο μενού "Run", εμφανίζεται το παράθυρο Save Density Image File, που προτρέπει για την αποθήκευση της εικονικής ραδιογραφίας που θα παραχθεί, όπως παρουσιάζεται

στην εικόνα του Διαγράμματος 2.35, με όνομα και τύπο (format) που μπορεί να επιλεγεί. Ο εξ'ορισμού (default) τύπος είναι \*.jpg.

2. Πατώντας "Save" τρέχει η προσομοίωση και παράγεται / αποθηκεύεται η εικονική ραδιογραφία, η οποία εμφανίζεται σε ξεχωριστό παράθυρο, το οποίο ονομάζεται Density Image.
3. Χρειάζεται προσοχή διότι αν την επόμενη φορά που "τρέξετε" προσομοίωση δεν αλλάξετε το όνομα του αρχείου της εικονικής ραδιογραφίας, η προηγούμενη εικονική ραδιογραφία θα χαθεί, διότι το προηγούμενο αρχείο θα αντικατασταθεί με το νεότερο με το ίδιο όνομα.

### **2.3.21 Πολλαπλές εικονικές ραδιογραφίες**

Είναι δυνατόν να υπάρχουν ανοιχτά πολλά παράθυρα Density Image File, δηλ. περισσότερες από μία ραδιογραφίες την ίδια στιγμή έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση ή άλλες εργασίες. Ο τρόπος που γίνεται αυτό έχει ως εξής (βλ. και εικόνα του Διαγράμματος 2.36):

1. Κάνετε "κλικ" στο πλήκτρο συντόμευσης "Open" ή επιλέξετε "Open" στο μενού "File" και θα εμφανιστεί το παράθυρο από όπου μπορούν να επιλεγούν αρχεία.
2. Στο πλαίσιο "Files of type" επιλέξετε "Density image-all format"
3. Επιλέξετε το επιθυμητό αρχείο και κάνετε "κλικ" στο "Open".
4. Επαναλάβετε τη διαδικασία για να ανοίξετε επιπλέον ραδιογραφίες.

### **2.3.22 Αξονική ανάλυση οπτικής πυκνότητας**

Μετά την προσομοίωση με τον κώδικα XRSIM η εικονική ραδιογραφία που προκύπτει (έστω ότι το επίπεδό της είναι το  $x - \psi$ ) είναι δυνατόν να αναλυθεί ως προς την οπτική της πυκνότητα κατά μήκος αξόνων παράλληλων με τον  $x=0$  ή αξόνων παράλληλων με τον  $\psi=0$ . Αυτό γίνεται παράγοντας ένα γράφημα με την οπτική πυκνότητα κατά μήκος οποιασδήποτε οριζόντιας (δηλ. παράλληλης με τον  $x$ ) ή κάθετης (δηλ. παράλληλης με τον  $\psi$ ) ευθείας που διασχίζει την ραδιογραφική εικόνα. Ο τρόπος αξονικής ανάλυσης οπτικής πυκνότητας έχει ως εξής (βλ. και την εικόνα του Διαγράμματος 2.37):

1. "Ανοίξτε" μία ή περισσότερες ραδιογραφικές εικόνες προς επεξεργασία
2. Από το μενού "Image" επιλέξετε "Analysis" και μετά "Slice". Έτσι θα εμφανιστεί το παράθυρο Slice.

3. Στο παράθυρο Slice κάνετε "κλικ" στο πλήκτρο "Horizontal", αν επιθυμείτε γράφημα της οπτικής πυκνότητας κατά μήκος ευθείας παράλληλης στον άξονα x, ή κάνετε "κλικ" στο πλήκτρο "Vertical", αν επιθυμείτε γράφημα της οπτικής πυκνότητας κατά μήκος ευθείας παράλληλης στον άξονα ψ.
4. Κάνετε "κλικ" στο σημείο της εικόνας (που εμφανίζεται σε παράθυρο Density Image) που θέλετε να γίνει η οριζόντια ή κάθετη ανάλυση οπτικής πυκνότητας. Θα χαραχθεί επί της εικόνας μία οριζόντια ή κατακόρυφη γραμμή, ανάλογα με την επιλογή σας στο προηγούμενο βήμα. Η οπτική πυκνότητα κατά μήκος αυτής της γραμμής θα εμφανιστεί σε γράφημα στο παράθυρο Slice. Ένα μικρό σημείο "x" στο γράφημα θα δείχνει πού κάνατε κλικ με το ποντίκι και επίσης θα αναφέρονται η οπτική πυκνότητα και οι συντεταγμένες του σημείου αυτού. Τέλος, αν θέλετε μπορείτε κρατώντας το "κλικ" πατημένο να εξερευνήσετε με το ποντίκι τη ραδιογραφική εικόνα και να παρατηρήσετε τις οπτικές πυκνότητες που απεικονίζονται σε κάθε θέση, για πλήθος παράλληλων κατά x ή κατά ψ ευθειών.
5. Κάνετε "κλικ" στο "Done" στο παράθυρο Slice για να τερματίσετε αυτού του είδους την ανάλυση.

## **2.4 Προηγμένες λειτουργίες του κώδικα XRSIM**

### **2.4.1 Πολλά δοκίμια**

Ο κώδικας XRSIM επιτρέπει την προσομοίωση ραδιογραφίας με πολλά δοκίμια (αρχεία CAD) ταυτόχρονα, έτσι ώστε να είναι δυνατή η μοντελοποίηση ελέγχων που εμπλέκουν πολλά αντικείμενα. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει π.χ. να τοποθετηθούν σε κατάλληλη θέση στο δοκίμιο που ραδιογραφείται εικονικά, δείκτες ποιότητας ραδιογραφικής εικόνας (image quality indicators), κατά DIN (Ευρωπαϊκοί και Διεθνείς κανονισμοί) ή κατά ASTM (κανονισμοί Η.Π.Α). Επίσης με αυτό το τεχνικό χαρακτηριστικό γίνεται δυνατή η προσομοίωση ραδιογραφικού ελέγχου συναρμολογημένων ή συγκεντρωμένων εξαρτημάτων. Η αξιοποίηση του χαρακτηριστικού αυτού γίνεται ως εξής (βλ. και τις εικόνες των Διαγραμμάτων 2.38 και 2.39).

1. Επιλέξτε ένα δοκίμιο από αρχείο CAD, όπως εξηγείται στην προηγούμενη ενότητα 2.3. Η διαδικασία επιλογής δοκιμίου επαναλαμβάνεται για κάθε νέο δοκίμιο που

επιθυμείτε να εισάγετε στον κώδικα. Τα εισαχθέντα θα φαίνονται στο "παράθυρο τρισδιάστατης απεικόνισης".

2. Τα ονόματα των δοκιμίων που έχουν επιλεγεί διακρίνονται στο πλαίσιο που υπάρχει στο κάτω μέρος του "παραθύρου ελέγχου δοκιμίου".
3. Το δοκίμιο που είναι επιλεγμένο (συνήθως "μπλε") σε αυτό το πλαίσιο είναι το ενεργό δοκίμιο (δηλαδή το δοκίμιο στο οποίο εφαρμόζονται οι αλλαγές που πραγματοποιούνται). Ο αριθμός του ενεργού δοκιμίου φαίνεται στο πλαίσιο με ετικέτα "Sample No" στην πάνω δεξιά γωνία του "παραθύρου ελέγχου δοκιμίου". Μπορείτε να αλλάξετε τη θέση, τον προσανατολισμό και το μέγεθος του δοκιμίου όπως αναλύεται στην ενότητα 2.3. Μπορείτε επίσης, φυσικά, να επιλέξετε το υλικό για όλα τα δοκίμια.

#### **2.4.2 Αλλαγή διαστάσεων δοκιμίου**

Τα αρχεία CAD των δοκιμίων μπορούν να τροποποιηθούν σε περιορισμένο βαθμό, μέσα από τον κώδικα XRSIM (εξάλλου ο κώδικας αυτός δεν μπορεί να είναι ταυτόχρονα και σχεδιαστικό λογισμικό), έτσι ώστε να είναι δυνατόν να γίνονται βασικές αλλαγές στις διαστάσεις τους και να μπορεί να παράγεται μία συλλογή από δοκίμια με βασικά σχήματα και διαφορετικούς όγκους που να μπορούν να τροποποιηθούν για χρήση σε μια μεγάλη ποικιλία περιπτώσεων ελέγχου. Για παράδειγμα, ένα βασικό σχήμα κυλινδρικού δοκιμίου ελέγχου ποιότητας ραδιογραφικής εικόνας, μπορεί να αλλάξει σε διαστάσεις και να αναπαριστά σχεδόν οποιοδήποτε κυλινδρικό τέτοιο δοκίμιο ελέγχου. Το ίδιο είναι δυνατόν να γίνει και με ένα δοκίμιο τύπου "κλίμακας" (step wedge) το οποίο μπορεί να τροποποιηθεί για να καλύπτει ένα μεγάλο φάσμα πάχους υλικών. Η διαδικασία αλλαγής μεγέθους έχει ως εξής (βλ. και τις εικόνες στα Διαγράμματα 2.40, 2.41 και 2.42)

1. Στο "παράθυρο ελέγχου δοκιμίου" στο πλαίσιο "Sample Operation" επιλέξτε "Smpl Scale".
2. Οι διαστάσεις του δοκιμίου μπορούν να αυξηθούν ή μειωθούν αναλογικά πληκτρολογώντας έναν πολλαπλασιαστή στο κατάλληλο πλαίσιο (οι αλλαγές ισχύουν αφού πατήσετε enter), ή χρησιμοποιώντας τα πλήκτρα ολίσθησης ή τα βελάκια για να αλλάξετε την τιμή του πολλαπλασιαστή. Πλαίσιο και πλήκτρα ολίσθησης παρέχονται για κάθε μία από τις τρεις διαστάσεις του δοκιμίου.

### 2.4.3 Αποκοπή μέρους δοκιμίου

Εκτός από την αλλαγή των διαστάσεών του, το δοκίμιο μπορεί να διαμορφωθεί και "αφαιρώντας" διάφορα μέρη του. Έτσι μη επιθυμητά ή άχρηστα μέρη του δοκιμίου μπορούν να "σβηστούν". Το ίδιο το αρχείο CAD του δοκιμίου δεν αλλάζει με αυτή τη διαδικασία. Η διαδικασία αποκοπής έχει ως εξής (βλ. και τις εικόνες στα Διαγράμματα 2.43, 2.44 και 2.45):

1. Στο "παράθυρο ελέγχου δοκιμίου" στο πλαίσιο "Sample Operation" επιλέξτε "Smpl Clip"
2. Μπορείτε να αφαιρέσετε ύλη από το δοκίμιο κατά τους άξονες x, ψ και z πληκτρολογώντας μία τιμή στο κατάλληλο πλαίσιο ή χρησιμοποιώντας τη μπάρα ή χρησιμοποιώντας τα πλήκτρα ολίσθησης ή τα βελάκια για να αλλάξετε την τιμή αυτή. Πλαίσιο και πλήκτρα ολίσθησης παρέχονται φυσικά για κάθε μία από τις τρεις διαστάσεις του δοκιμίου. Αν έχει γίνει "tick" στην επιλογή "X+", ή στην επιλογή "Y+" ή στην επιλογή "Z+" τότε από το δοκίμιο θα αφαιρεθεί όλη η ύλη που έχει x, ή ψ ή z μικρότερο από την τιμή που τοποθετήθηκε στο αντίστοιχο πλαίσιο. Προφανώς, αν δεν έχει γίνει "tick" στην επιλογή "X+", ή στην επιλογή "Y+" ή στην επιλογή "Z+" τότε από το δοκίμιο θα αφαιρεθεί όλη η ύλη που έχει x, ή ψ ή z μεγαλύτερο από την τιμή που τοποθετήθηκε στο αντίστοιχο πλαίσιο. Τα πλαίσια στα οποία συμπληρώνονται οι τιμές αυτές είναι προσυμπληρωμένα με τις ακραίες διαστάσεις του δοκιμίου κατά x ή ψ ή z.
3. Σημειώνεται ότι δεν είναι δυνατή νέα αποκοπή επί παλαιότερης. Πάντοτε αν συμπληρώνονται νέοι αριθμοί στα κατάλληλα κενά πλαίσια, οι αφαιρέσεις υλικού που γίνονται αφαιρούνται από τις αρχικές διαστάσεις του δοκιμίου.

### 2.4.4 Τροποποίηση ανάλυσης εικόνας

Ο κώδικας XRSIM δίνει επιπλέον την δυνατότητα να καθορίζεται η ανάλυση της λαμβανόμενης εικονικής ραδιογραφίας αλλάζοντας τον αριθμό των pixel που χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση. Εξ ορισμού (δηλ. με το που "τρέχει" ο κώδικας XRSIM) το πλάτος της εικόνας είναι 256 pixel και το ύψος έχει ανάλογο μέγεθος ώστε ο λόγος τους να είναι ίδιος με το λόγο πλάτους προς ύψους του χρησιμοποιούμενου φιλμ.

Με άλλα λόγια αν το φιλμ είναι τετράγωνο, το πλάτος της λαμβανόμενης ραδιογραφίας από την προσομοίωση θα είναι 256 pixel και το ύψος θα είναι επίσης 256 pixel. Αν το φιλμ έχει διπλάσιο πλάτος από ύψος, τότε η εικονική ραδιογραφία θα έχει πλάτος 256 pixel και ύψος 128 pixel. Αν κάποιος αλλάξει τη μία από τις δύο διαστάσεις της ραδιογραφίας τότε η άλλη θα αλλάξει αυτόματα για να ταιριάζει με το λόγο πλάτους/ύψους του φιλμ. Η τροποποίηση ανάλυσης εικόνας κάτω από τις παραπάνω προϋποθέσεις, μπορεί να γίνει ως εξής (βλ. και την εικόνα στο Διάγραμμα 2.46):

1. Στο "παράθυρο ελέγχου ανιχνευτή", εισάγετε τον επιθυμητό αριθμό pixel είτε στο πλαίσιο "Grid w" (πλάτος) είτε στο πλαίσιο "Grid h" (ύψος). Η αρχική τιμή του πλάτους είναι 256 pixel, οπότε αν επιθυμείτε μία εικόνα με διπλάσιο μέγεθος εισάγετε 512 pixel στο πλαίσιο "Grid w".
2. Τρέξτε το "run CAD" για την παραγωγή του δισδιάστατου χάρτη πάχους. Παρατηρήστε ότι ο χρόνος επεξεργασίας αυξάνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος της εικόνας.
3. Τρέξτε το "Run XRS" για την παραγωγή της εικόνας.

## **2.5 Συμπεράσματα**

Από την περιγραφή που προηγήθηκε, διαπιστώθηκε ότι ο κώδικας προσομοιώνει σε γραφικό περιβάλλον βιομηχανικούς ραδιογραφικούς ελέγχους χρησιμοποιώντας μοντέλα δοκιμών σχεδιασμένα από κώδικες CAD (Computer Aided Design) για να παράγει εικονικές ραδιογραφίες τους με ακτίνες -x, για εκπαιδευτικούς σκοπούς. Ο κώδικας επιτρέπει στο χειριστή/εκπαιδευόμενο την εύκολη εισαγωγή και τον έλεγχο διαφορετικών δοκιμών από διαφορετικά υλικά, την εύκολη ρύθμιση της θέσης και του προσανατολισμού του δοκιμίου και την εύκολη ρύθμιση των βασικότερων παραμέτρων λειτουργίας μιας μηχανής ακτίνων -x έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή έκθεση ενός εικονικού φιλμ. Ο χρήστης του XRSIM, έχει στη διάθεσή του τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί στις προσομοιώσεις του μια σειρά διαφορετικούς τύπους μηχανών παραγωγής ακτίνων -x διαφόρων κατασκευαστών και μία σειρά από διαφορετικούς εικονικούς τύπους φιλμ, επίσης διαφόρων κατασκευαστών

Το πλεονέκτημα της χρήσης του κώδικα XRSIM είναι ότι χωρίς πείραμα, μπορούν να ελεγχθούν πολλά σενάρια έκθεσης σε μικρό χρόνο, δεδομένου ότι η ρύθμιση της έκθεσης

και των λοιπών γεωμετρικών στοιχείων της ραδιογραφικής διαδικασίας μπορούν να ολοκληρωθούν γρήγορα και επιπλέον το βήμα της εμφάνισης του φιλμ δεν είναι απαραίτητο, διότι το φιλμ στην εφαρμογή αυτή είναι εικονικό. Τα ταχέα αποτελέσματα γίνονται έτσι πολύτιμα για εκπαίδευση και για εξάσκηση.

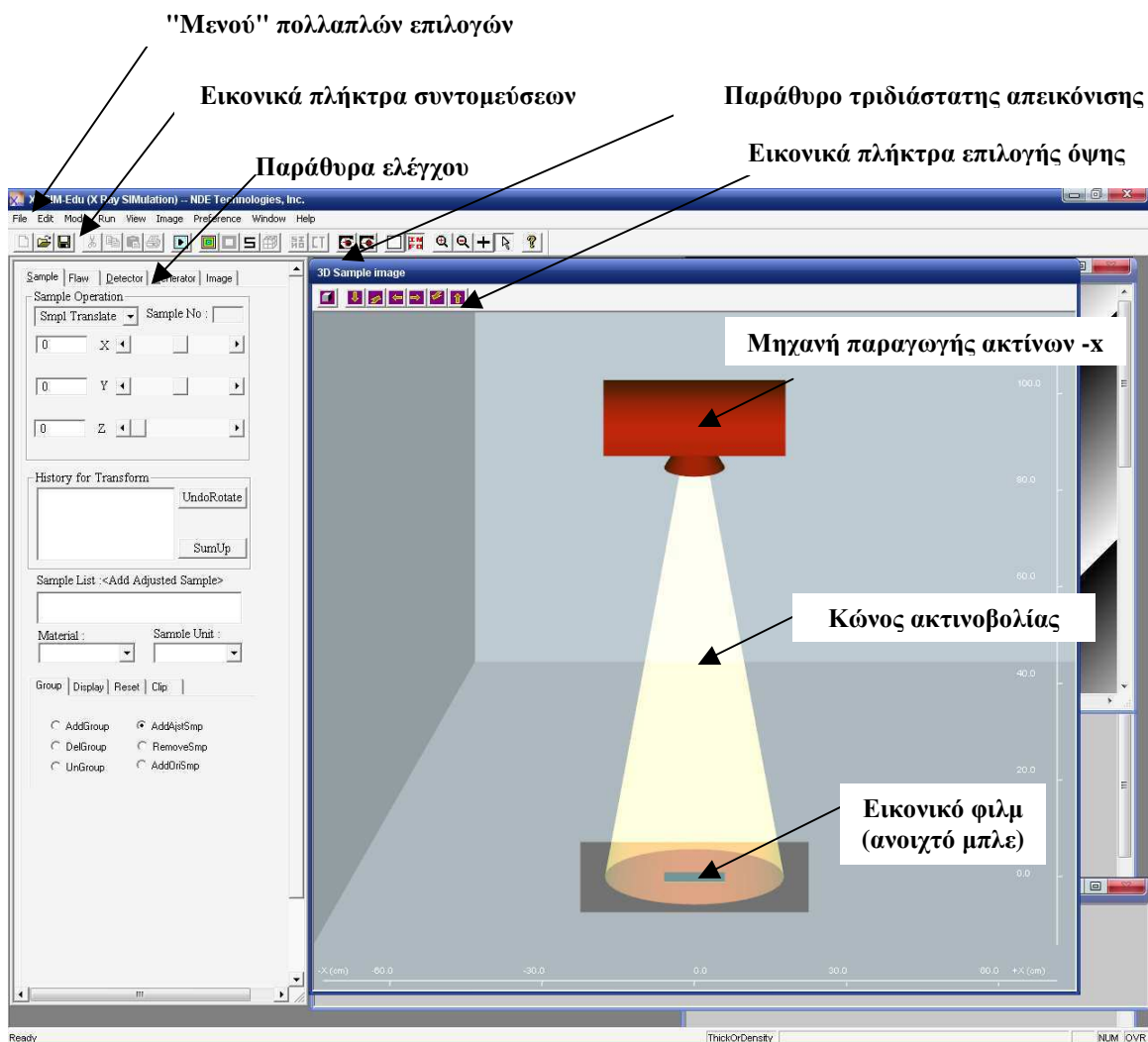
Φυσικά ο κώδικας XRSIM δεν απαιτεί πραγματικό δοκίμιο για έλεγχο. Έτσι, μπορούν να προσομοιωθούν ραδιογραφίες που θα ήταν αδύνατο ή πολύ ακριβό να πραγματοποιηθούν εκτός υπολογιστικού περιβάλλοντος. Ελαττώματα σε διάφορα σχήματα και μεγέθη μπορούν εύκολα να εισαχθούν στο δοκίμιο με εικονικό τρόπο, έτσι ώστε να παραχθεί μια σειρά σεναρίων για τον εντοπισμό τους. Τέλος, με τη χρήση του κώδικα XRSIM είναι δυνατόν οι εκπαιδευόμενοι να αναπτύξουν μια αποτελεσματική κατανόηση των επιστημονικών εννοιών που συνδέονται με τη ραδιογραφία.

Παρόλαυτά τα αποτελέσματα του κώδικα πρέπει να εφαρμόζονται με προσοχή στην πράξη, διότι η οπτική πυκνότητα (density) που παράγεται με την προσομοίωση στο εικονικό φιλμ μπορεί να μην είναι ακριβώς ίδια με την οπτική πυκνότητα που παράγεται στο Εργαστήριο με παρόμοιες ρυθμίσεις. Τυχόν διαφορές μπορεί να οφείλονται στις παραδοχές που έγιναν στον κώδικα για την μοντελοποίηση της εξασθένησης και γενικά της αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη. Η μοντελοποίηση αυτή είναι σχετικά απλή ώστε οι χρόνοι παραγωγής της προσομοίωσης να είναι σχετικά σύντομοι. Το βασικότερο πρόβλημα στις προσομοιώσεις με τον XRSIM είναι η αδυναμία εκτίμησης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας που φθάνει στο εικονικό φιλμ, ιδίως όταν τα δοκίμια είναι μεγάλου πάχους και περίπλοκης γεωμετρίας. Στις περιπτώσεις που η σκέδαση της ακτινοβολίας γίνεται κυρίως φαινόμενο, ένα μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας που θα φθάνει στο φιλμ θα είναι δευτερεύουσα ακτινοβολία και η οπτική πυκνότητα της προσομοίωσης στο εικονικό φιλμ του XRSIM δεν θα συμφωνεί γενικά με την πραγματική οπτική πυκνότητα που παράγεται στο Εργαστήριο.

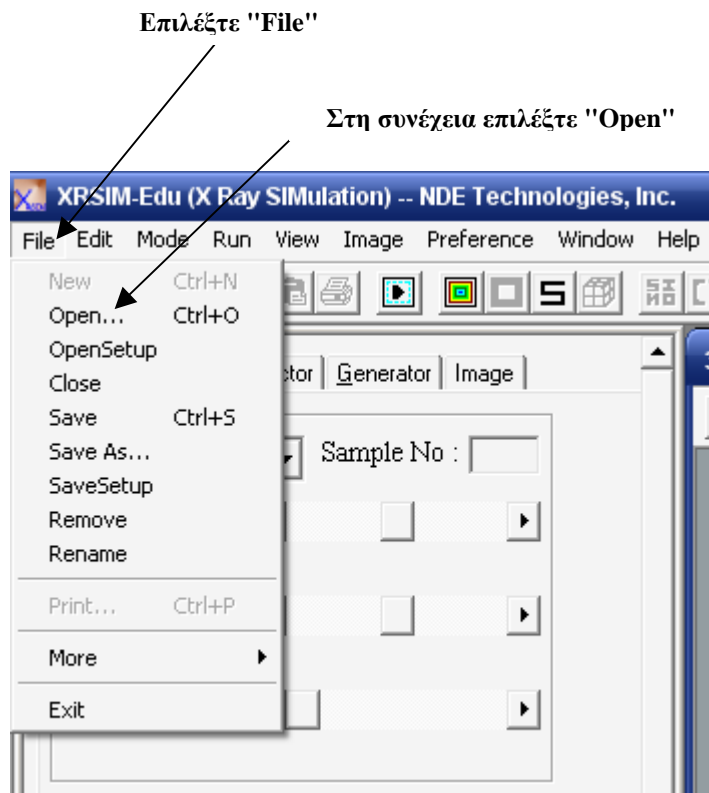
Στο επόμενο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, θα παρουσιασθούν εφαρμογές του κώδικα υπό τύπον "μαθημάτων", ώστε ο χρήστης/εκπαιδευόμενος να εξοικειωθεί τόσο με τον ίδιο τον κώδικα, όσο και με την πραγματική ραδιογραφική διαδικασία, που προσομοιώνεται.



## ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 2<sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

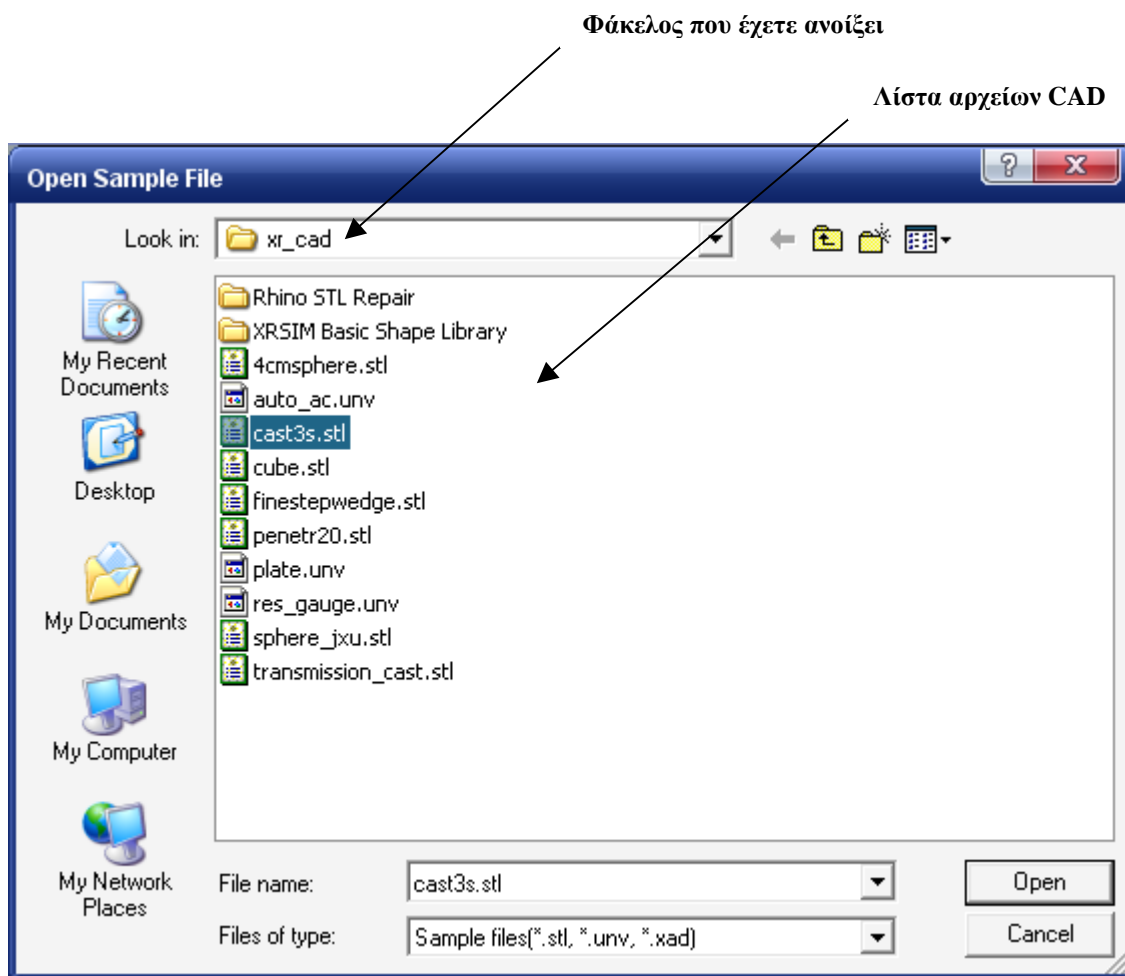


**Διάγραμμα 2.1**  
**Αρχική (πρώτη) εικόνα του κώδικα XRSIM**



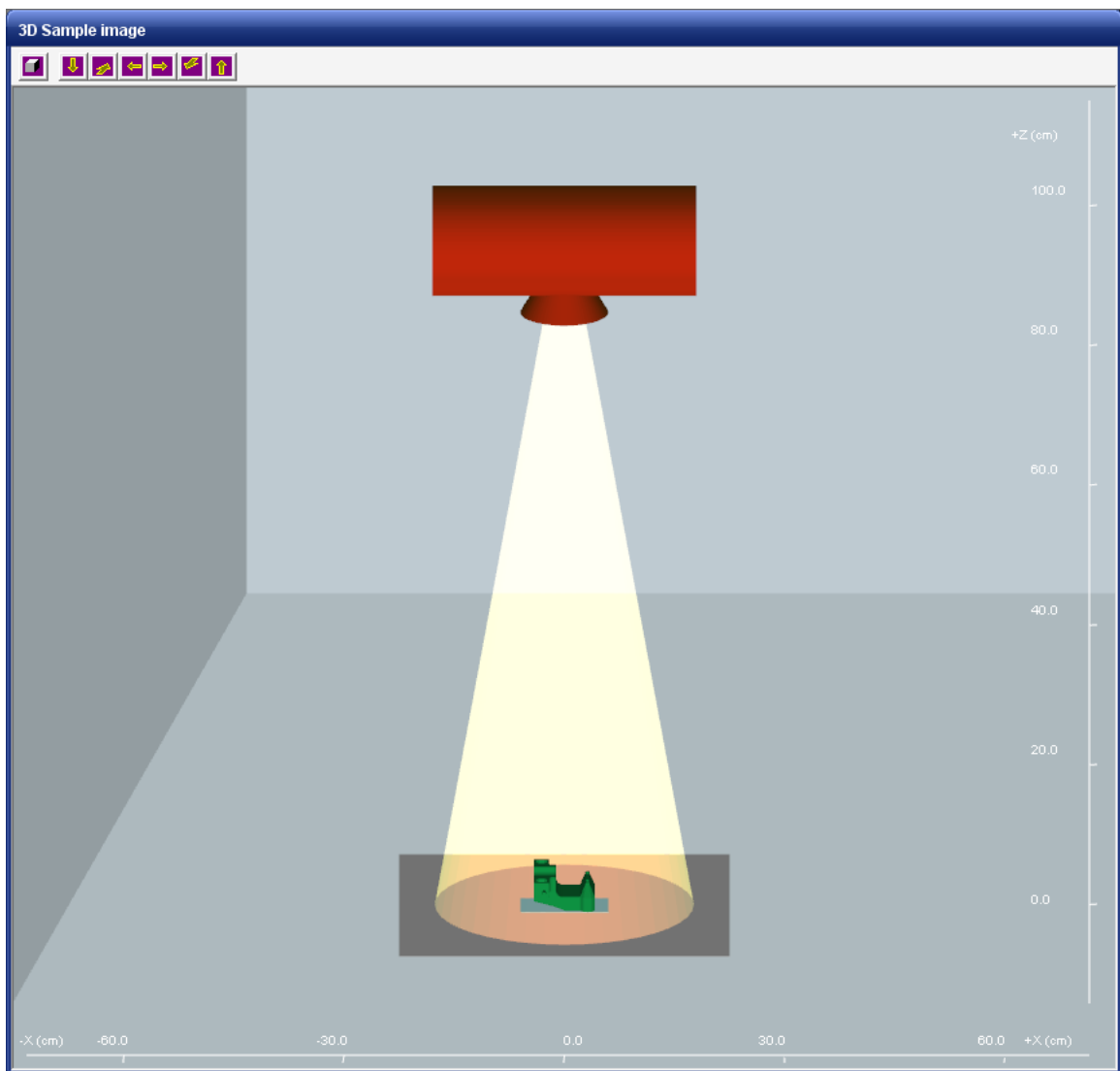
**Διάγραμμα 2.2**

**Επιλογή ενός από τα διαθέσιμα δοκίμια για ραδιογραφικό έλεγχο (1<sup>η</sup> εικόνα)**



**Διάγραμμα 2.3**

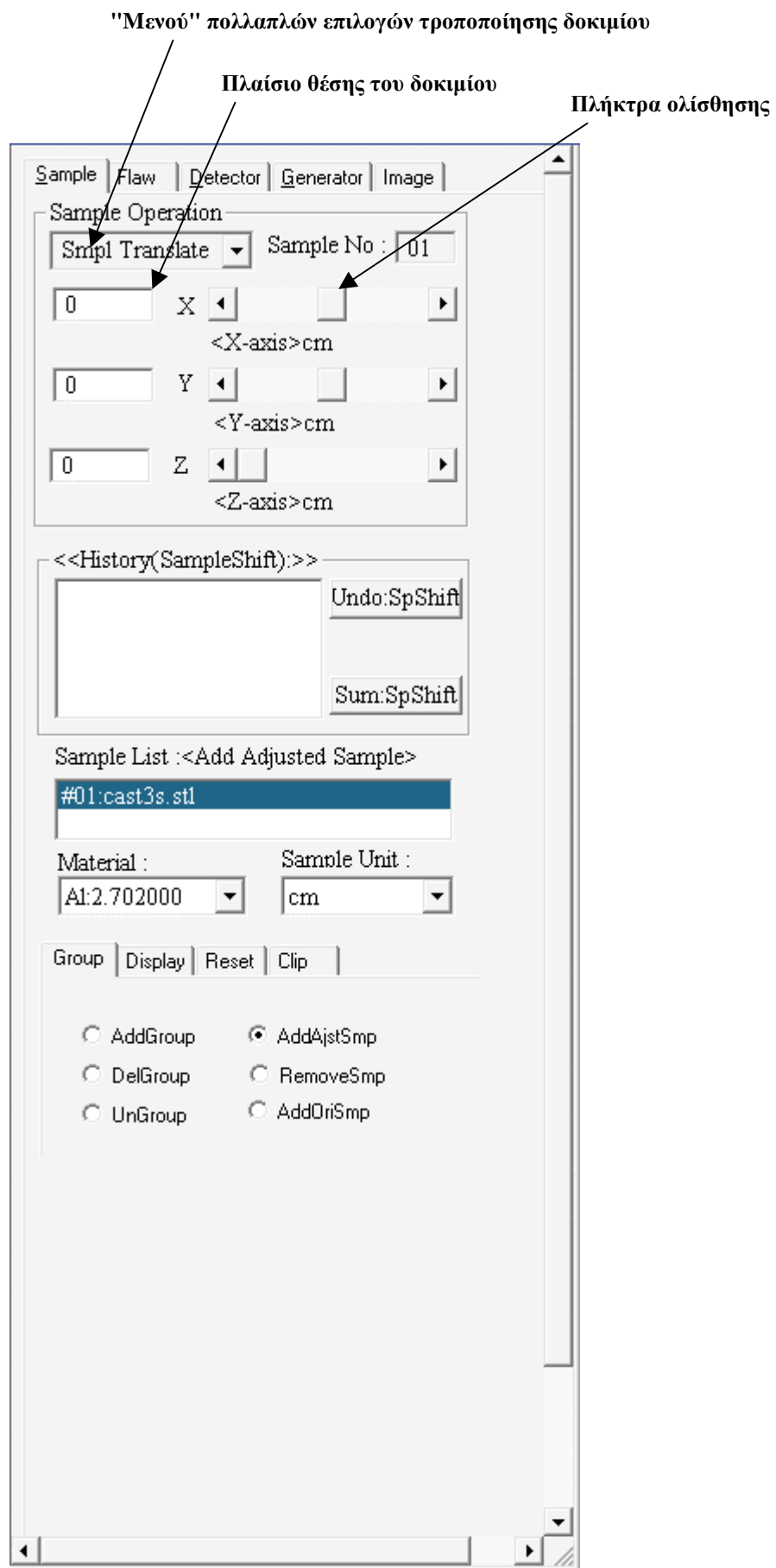
**Επιλογή ενός από τα διαθέσιμα δοκίμια για ραδιογραφικό έλεγχο (2<sup>η</sup> εικόνα)**



**Διάγραμμα 2.4**  
**Παράθυρο τριδιάστατης απεικόνισης (3D sample image window)**



Διάγραμμα 2.5  
Πλήκτρα επιλογής όψης

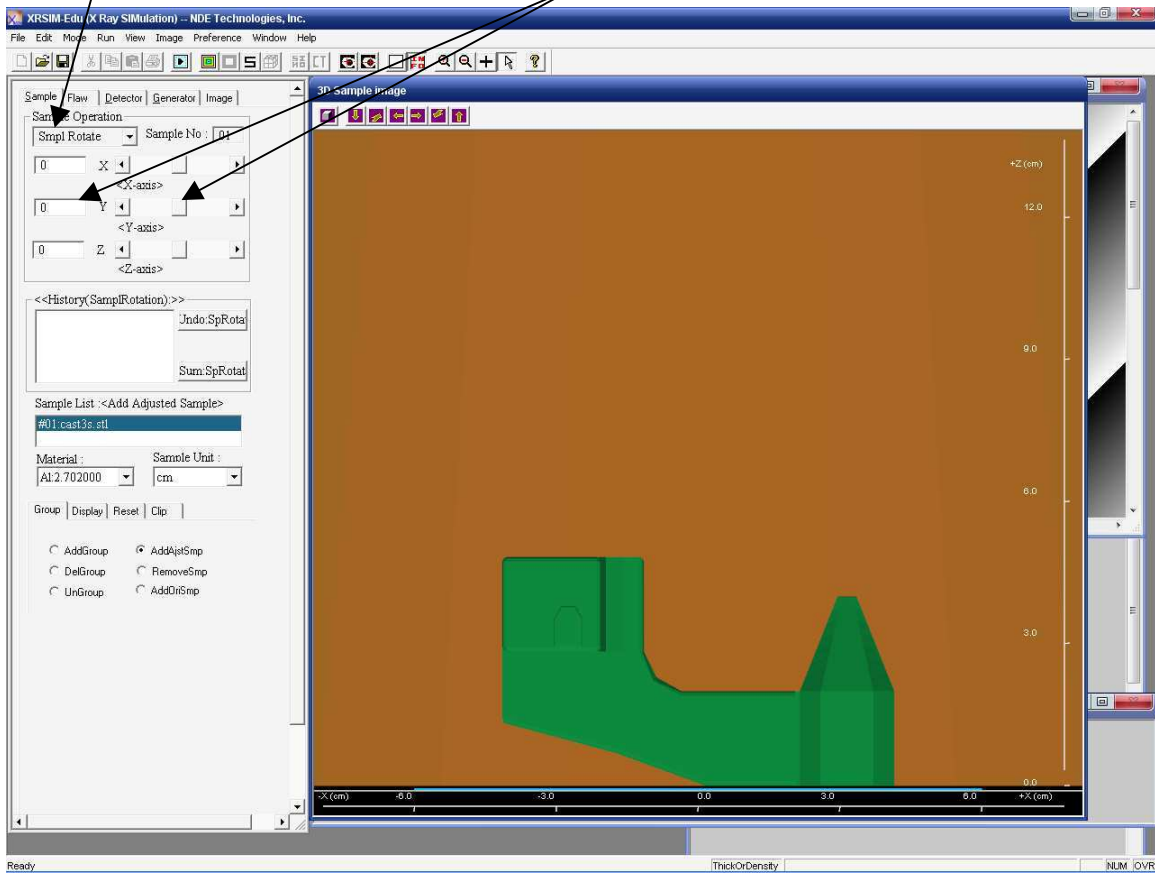


**Διάγραμμα 2.6**

**Παράθυρο ελέγχου δοκιμίου (sample set-up window), επιλογή "Smpl Translate", μετακίνηση δοκιμίου παράλληλα με τους άξονες x, y, z**

Επιλέξτε "Smpl Rotate"

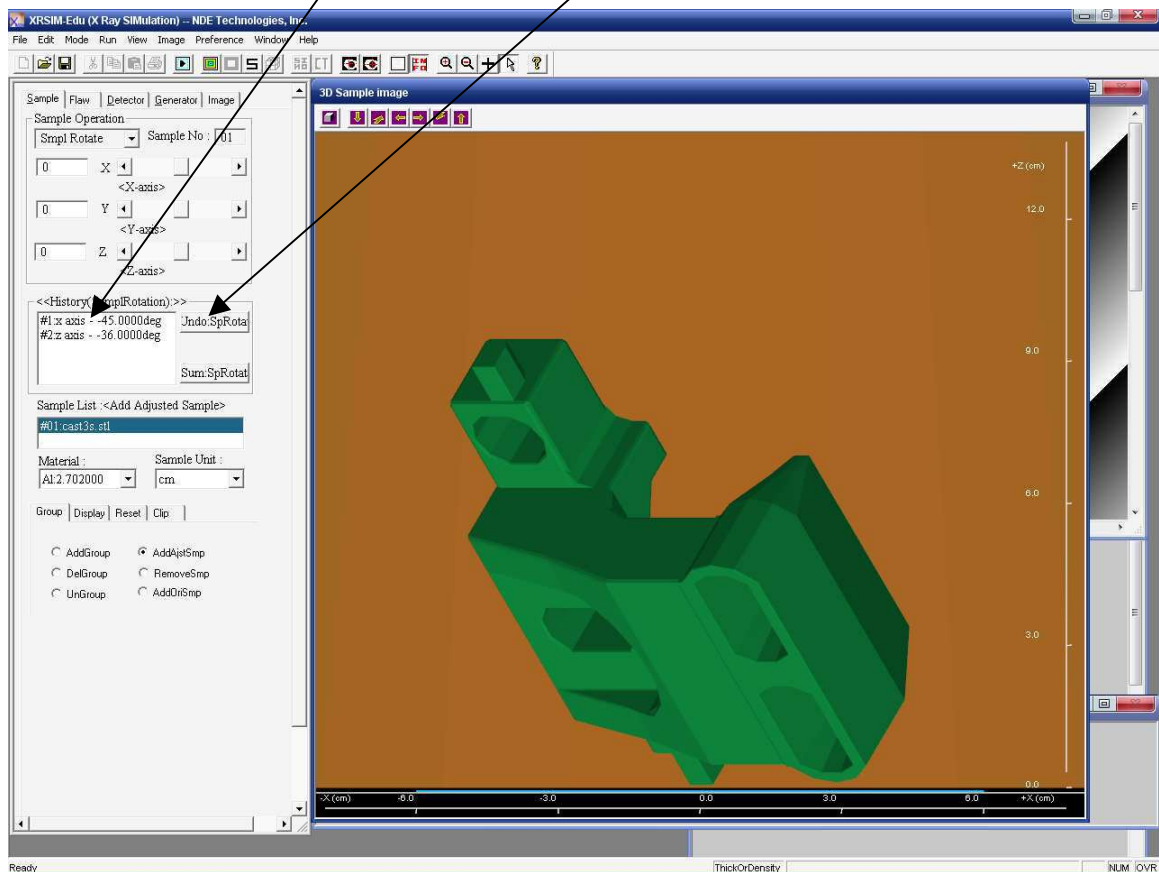
Περιστρέψτε το δοκίμιο χρησιμοποιώντας  
τα πλήκτρα ολίσθησης ή εισάγοντας μία  
τιμή (σε μοίρες)



Διάγραμμα 2.7

Παράθυρο ελέγχου δοκιμίου (sample set-up window), επιλογή "Smpl Rotate",  
περιστροφή δοκιμίου γύρω από τους άξονες x, ψ, z

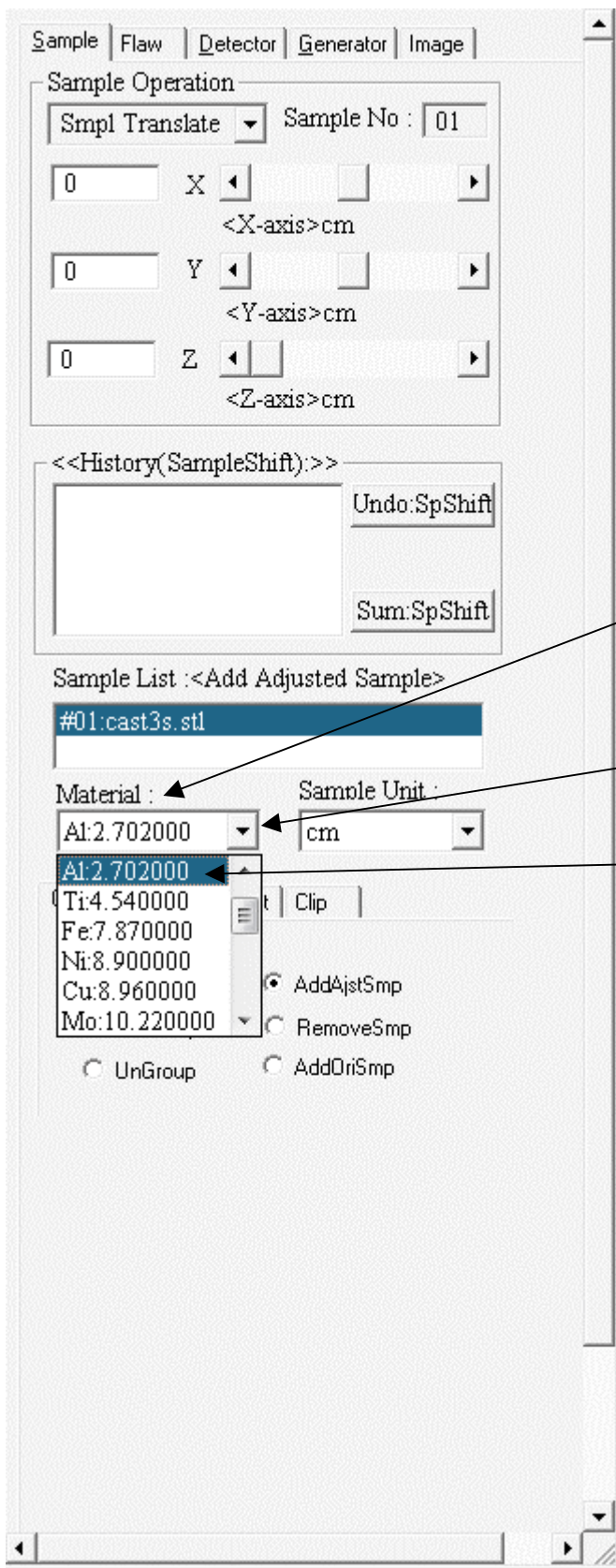
Οποιαδήποτε από τις περιστροφές που έχετε κάνει μπορεί να διορθωθεί, αλλά επιλέγοντάς την και κάνοντας κλικ στο πλήκτρο "Undo"



Διάγραμμα 2.8

Ακύρωση μετακίνησης ή περιστροφής δοκιμίου: στην εικόνα παρουσιάζεται μία ακύρωση περιστροφής



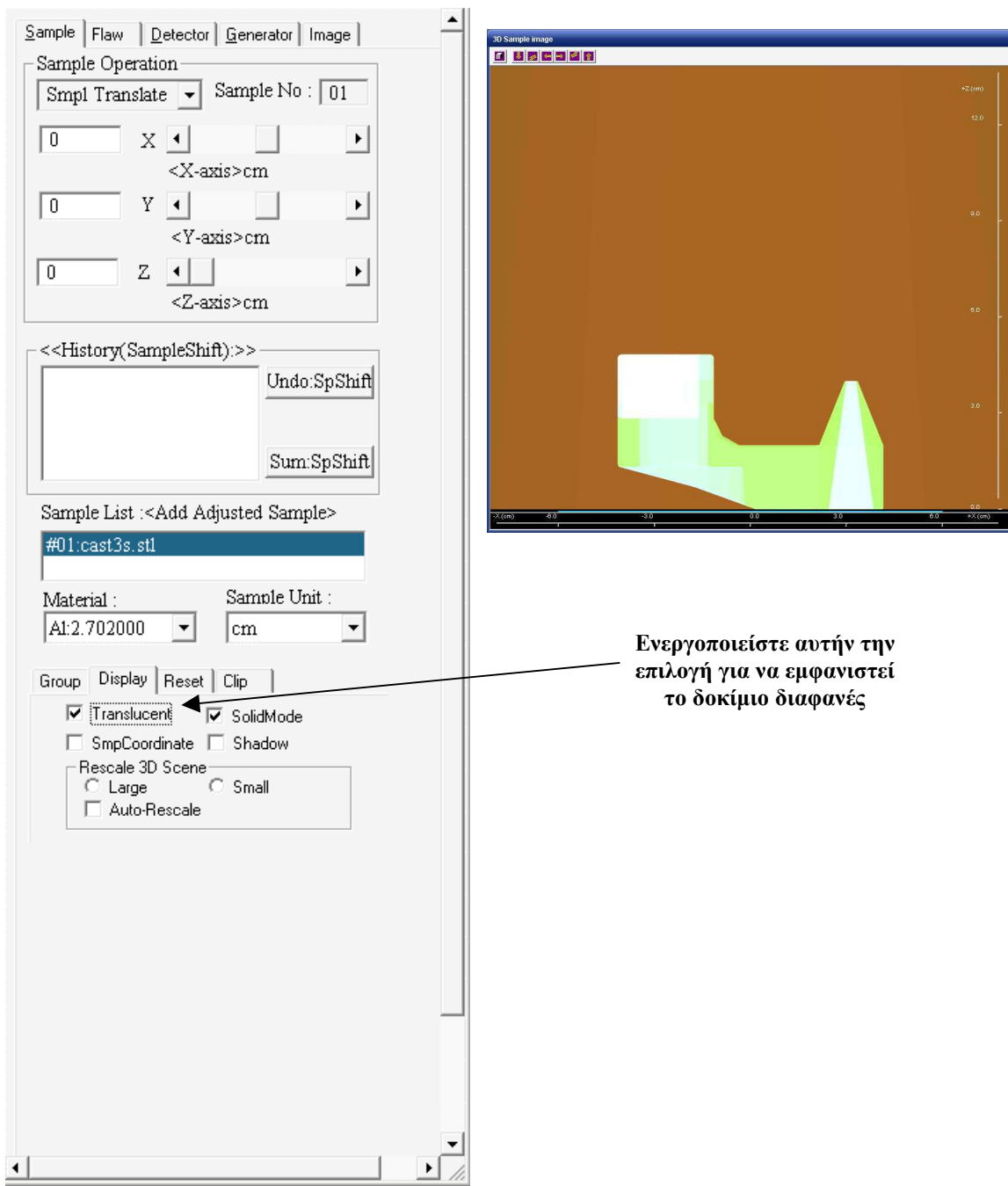


Επιλέξτε το επιθυμητό υλικό για το δοκίμιο από το παράθυρο με τίτλο "Material" στο "παράθυρο ελέγχου δοκιμίου"

Κάνετε "κλικ" στο βέλος για να εμφανιστεί η λίστα με τα διαθέσιμα υλικά

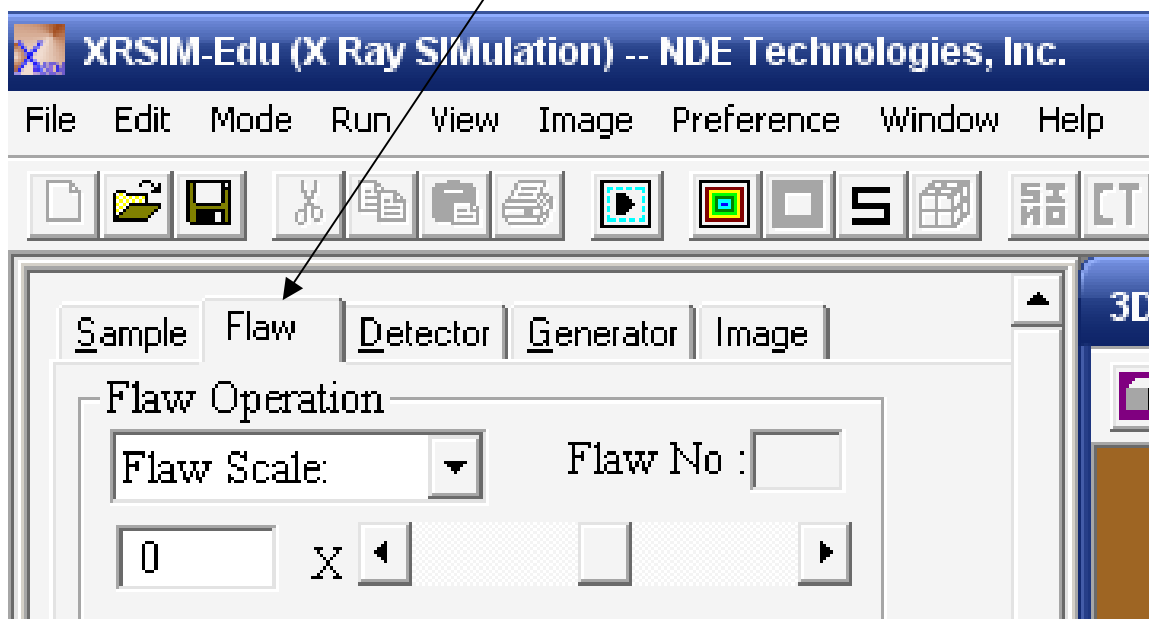
Κάνετε "κλικ" σε κάποιο υλικό για να το επιλέξετε

**Διάγραμμα 2.9**  
**Επιλογή υλικού δοκιμίου**



**Διάγραμμα 2.10**  
**Διαφώτιστη απεικόνιση του δοκιμίου**

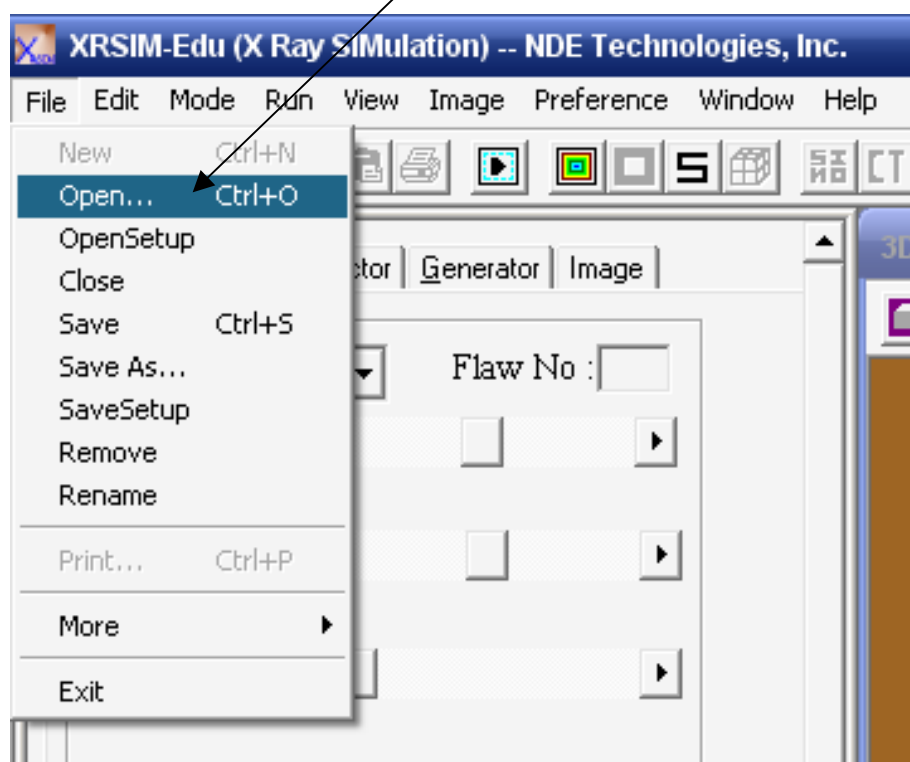
Επιλέξτε το "παράθυρο ελέγχου ελαττώματος"



Διάγραμμα 2.11

Παράθυρο ελέγχου ελαττώματος

Επιλέξτε "File" και στη συνέχεια "Open"

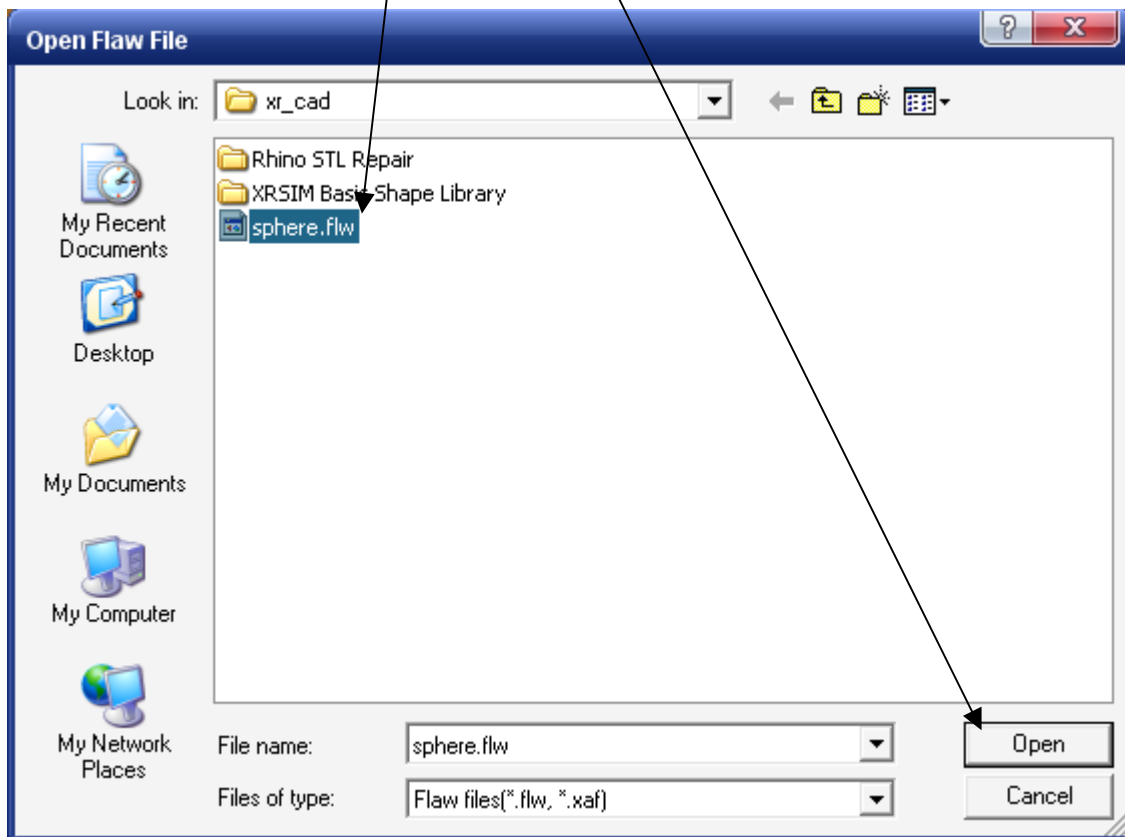


Διάγραμμα 2.12

Παράθυρο ελέγχου ελαττώματος

Επιλογή ενός από τα διαθέσιμα ελαττώματα για το δοκίμιο (1<sup>η</sup> εικόνα)

Κάνετε διπλό "κλικ" σε ένα αρχείο ελαττώματος ή επιλέξτε το και κάνετε "κλικ" στο "Open"



**Διάγραμμα 2.13**

**Επιλογή ενός από τα διαθέσιμα ελαττώματα για το δοκίμιο (2<sup>η</sup> εικόνα)**

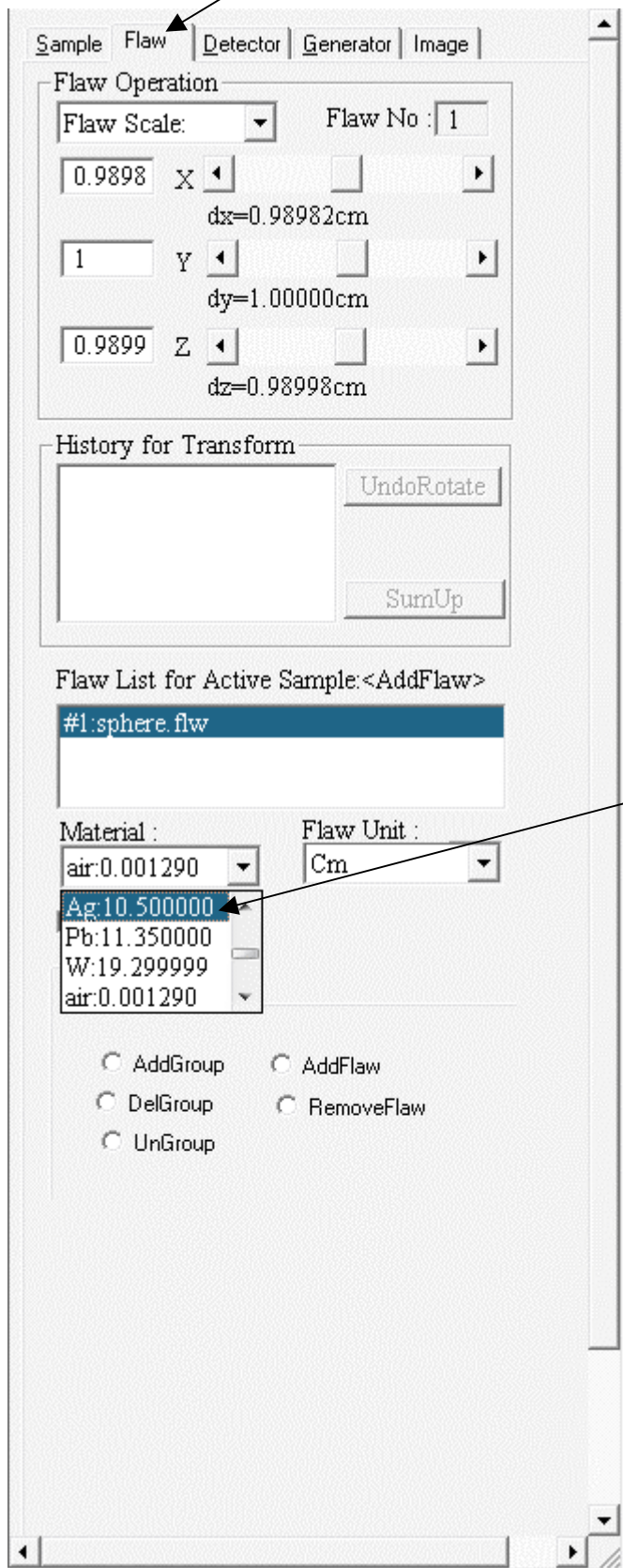
Το ελάττωμα θα εμφανιστεί στο "παράθυρο τριδιάστατης απεικόνισης". Η θέση του ελαττώματος σε σχέση με το περίγραμμα του δοκιμίου δίνεται στο πάνω αριστερό μέρος του παραθύρου



Διάγραμμα 2.14

Παράθυρο τριδιάστατης απεικόνισης: δοκίμιο και ελάττωμα

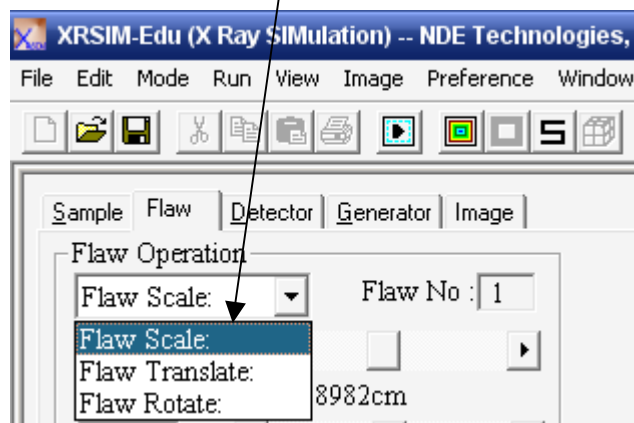
Σιγουρευτείτε ότι έχετε ενεργό το παράθυρο ελέγχου του δοκιμίου



Επιλέξτε το υλικό που επιθυμείτε για το ελάττωμα

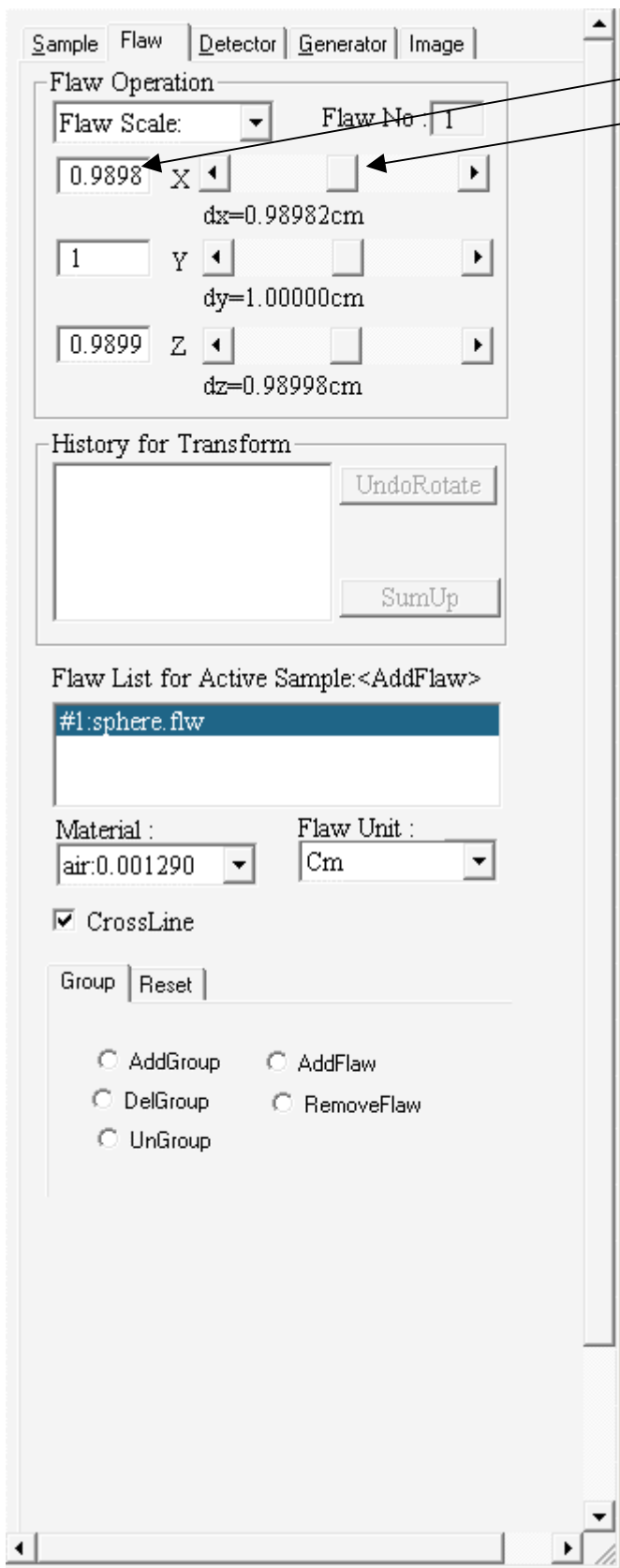
Διάγραμμα 2.15  
Επιλογή υλικού ελαττώματος

Στο παράθυρο ελέγχου του ελαττώματος, επιλέξτε "Flaw Scale" στο πλαίσιο "Flaw operation"



Διάγραμμα 2.16

Παράθυρο ελέγχου ελαττώματος, επιλογή "Flaw Scale" για αλλαγή μεγέθους του ελαττώματος

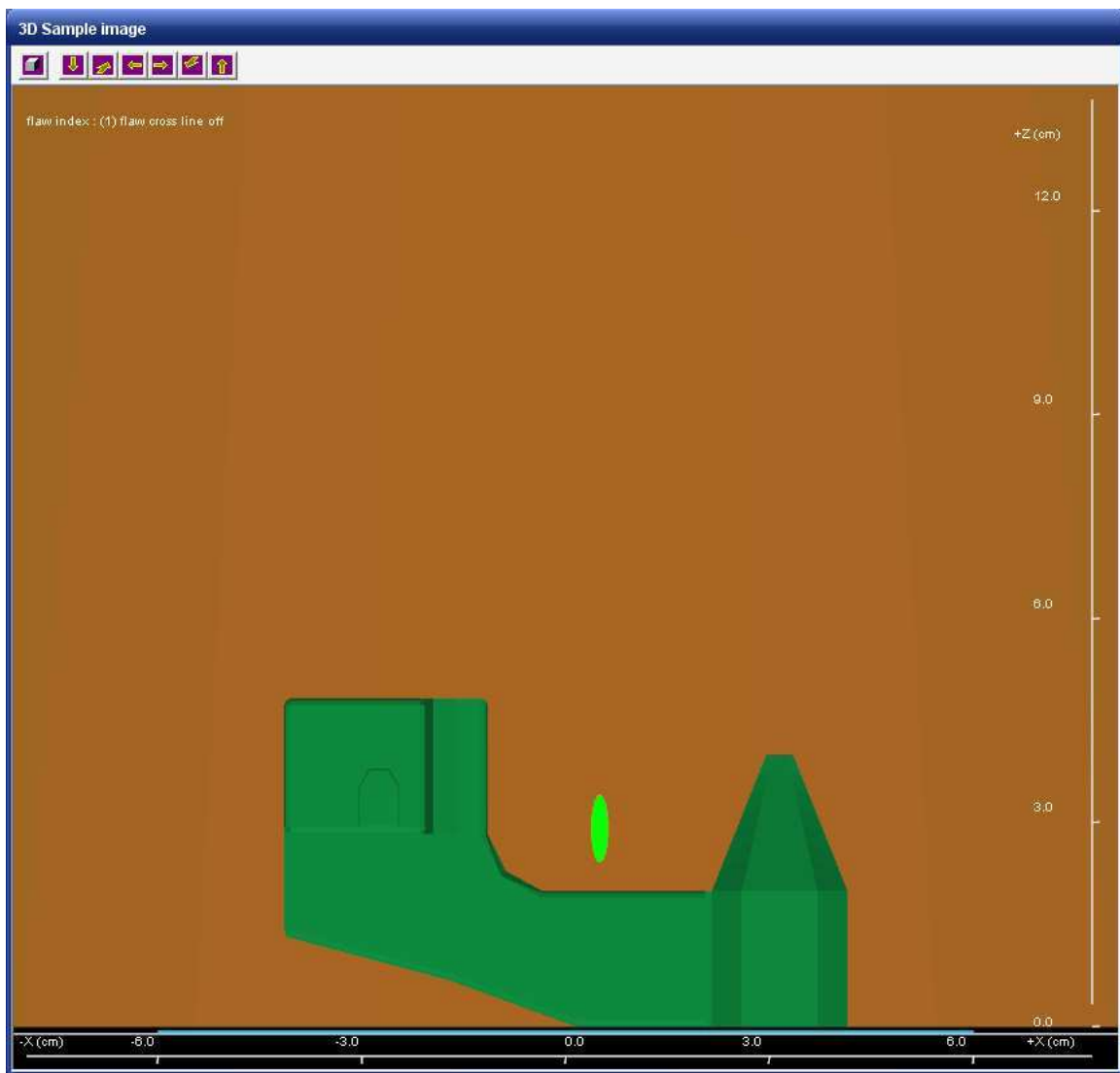


Εισάγετε μία τιμή στο πλαίσιο ή χρησιμοποιήστε τη μπάρα για να αλλάξετε το μέγεθος του ελαττώματος

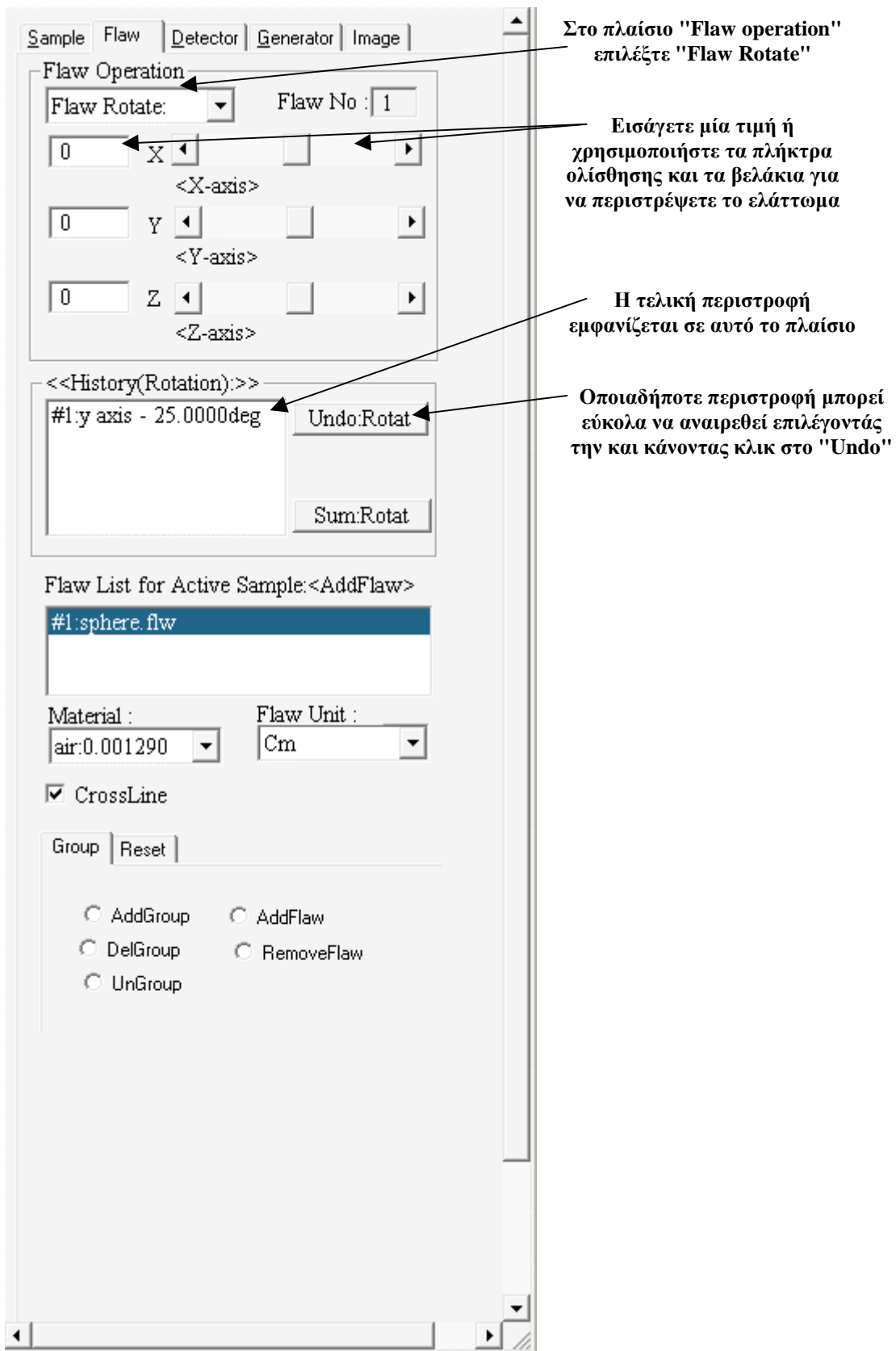
Μειώνοντας την τιμή της x διάστασης μόνο, θα αλλάξει η μορφή του ελαττώματος. Η αρχική μορφή του ελαττώματος και η παραμόρφωσή του λόγω της αλλαγής μόνο μίας από τις διαστάσεις του φαίνονται στις επόμενες δύο εικόνες

**Διάγραμμα 2.17**  
Αλλαγή μεγέθους του ελαττώματος

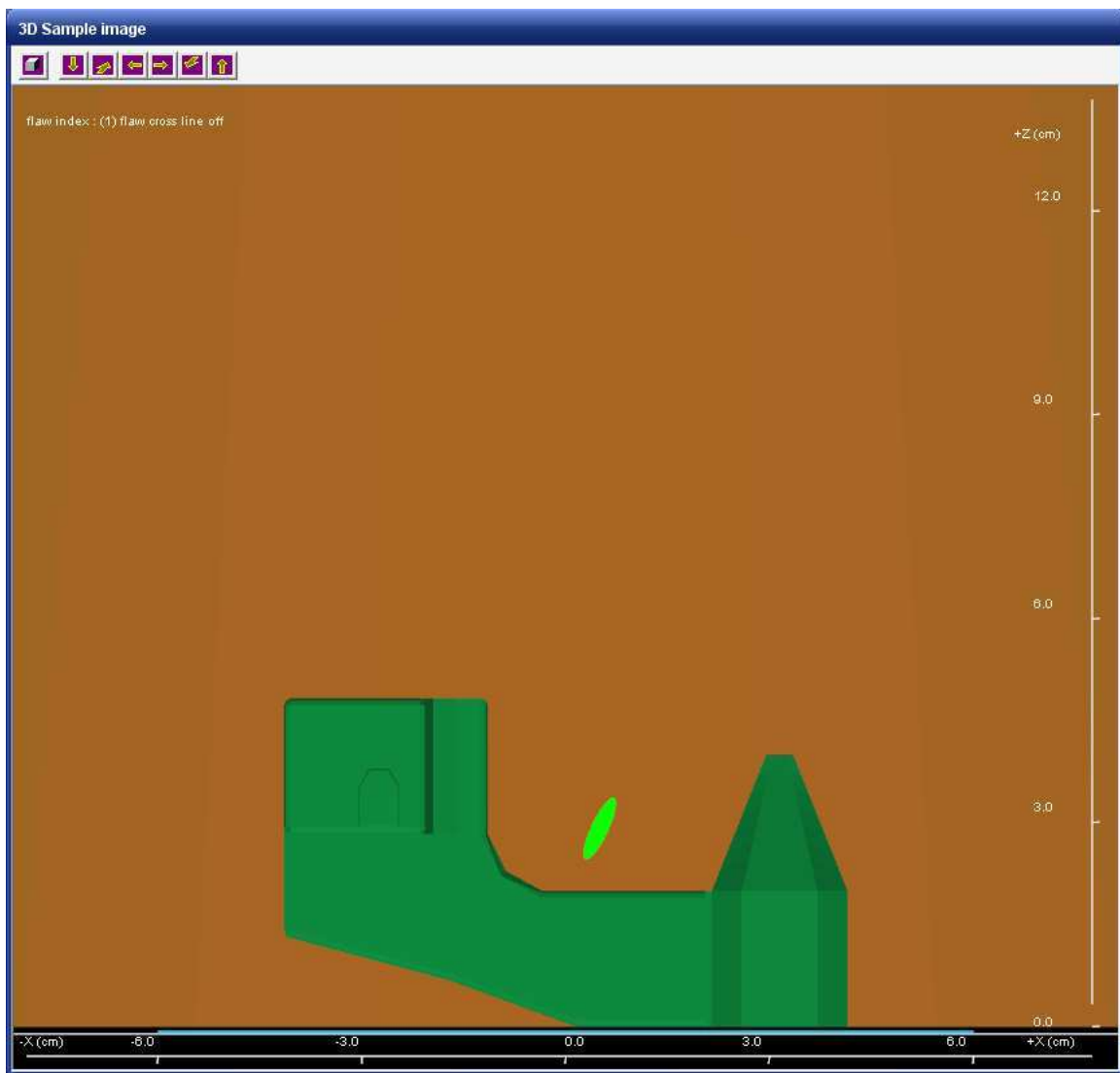




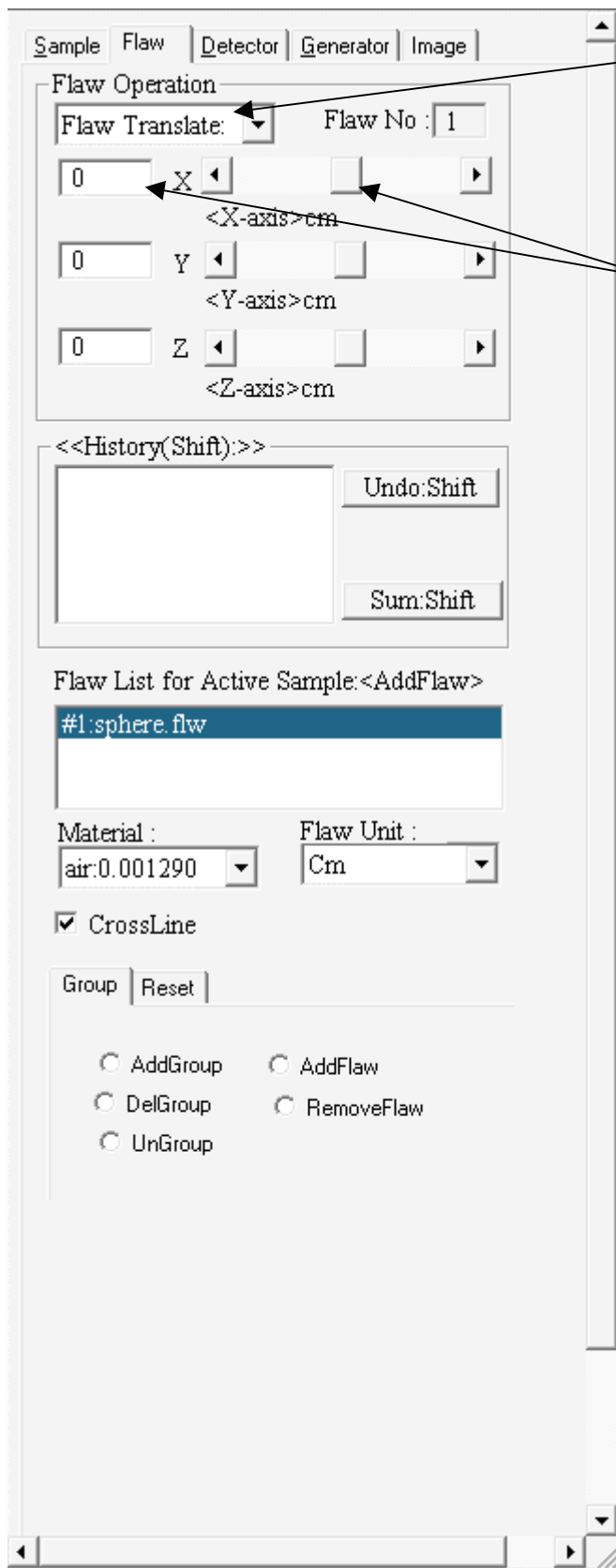
**Διάγραμμα 2.18**  
**Μορφή του ελαττώματος μετά την κατά άξονα x μείωση του μεγέθους του**



**Διάγραμμα 2.19**  
**Αξονική περιστροφή ελαττώματος κατά x, ψ ή z**



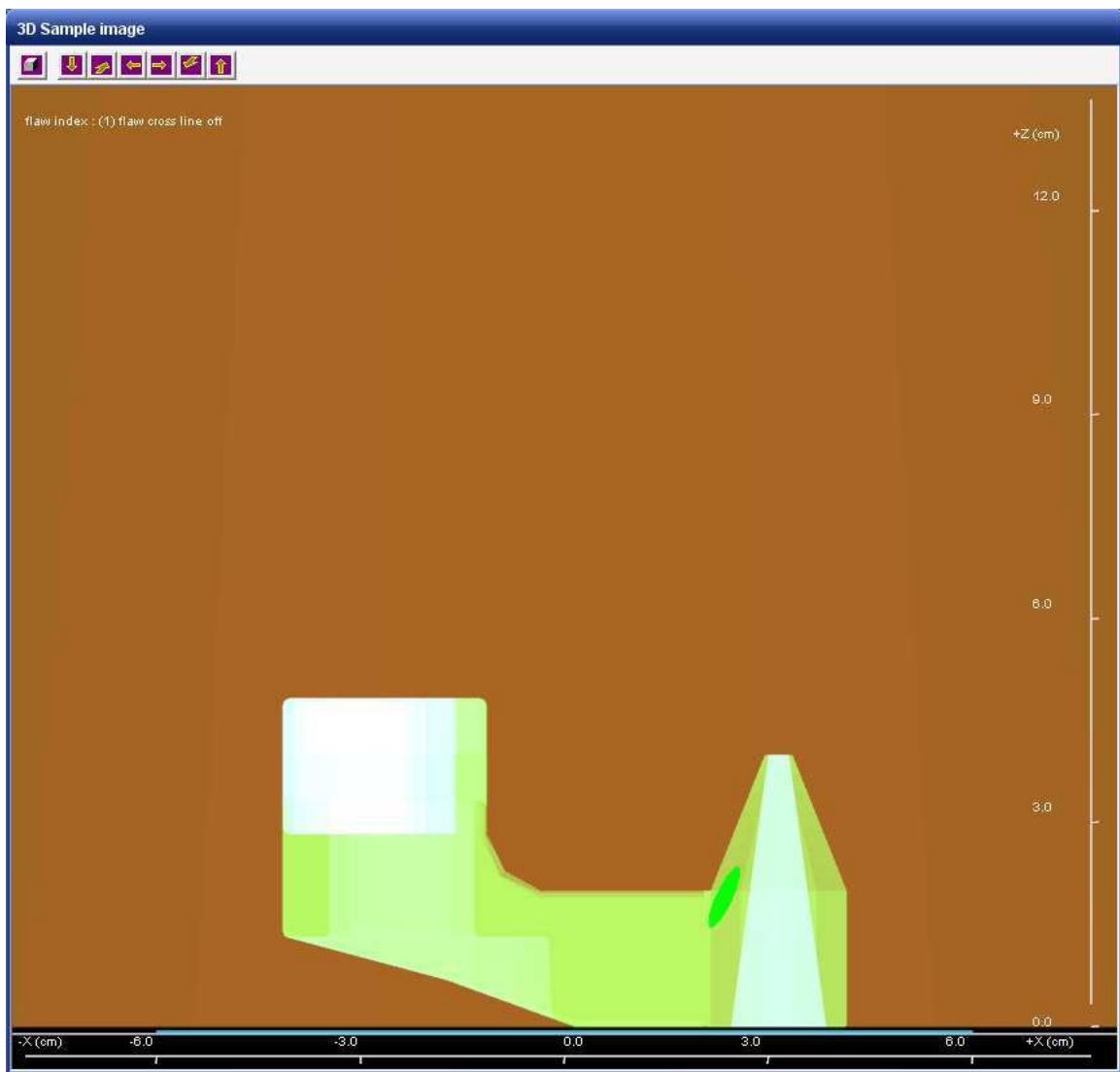
**Διάγραμμα 2.20**  
**Απεικόνιση του ελαττώματος μετά την περιστροφή του γύρω από τον άξονα  $\psi$**



Επιλέξτε "Flaw Translate" στο πλαίσιο "Flaw operation"

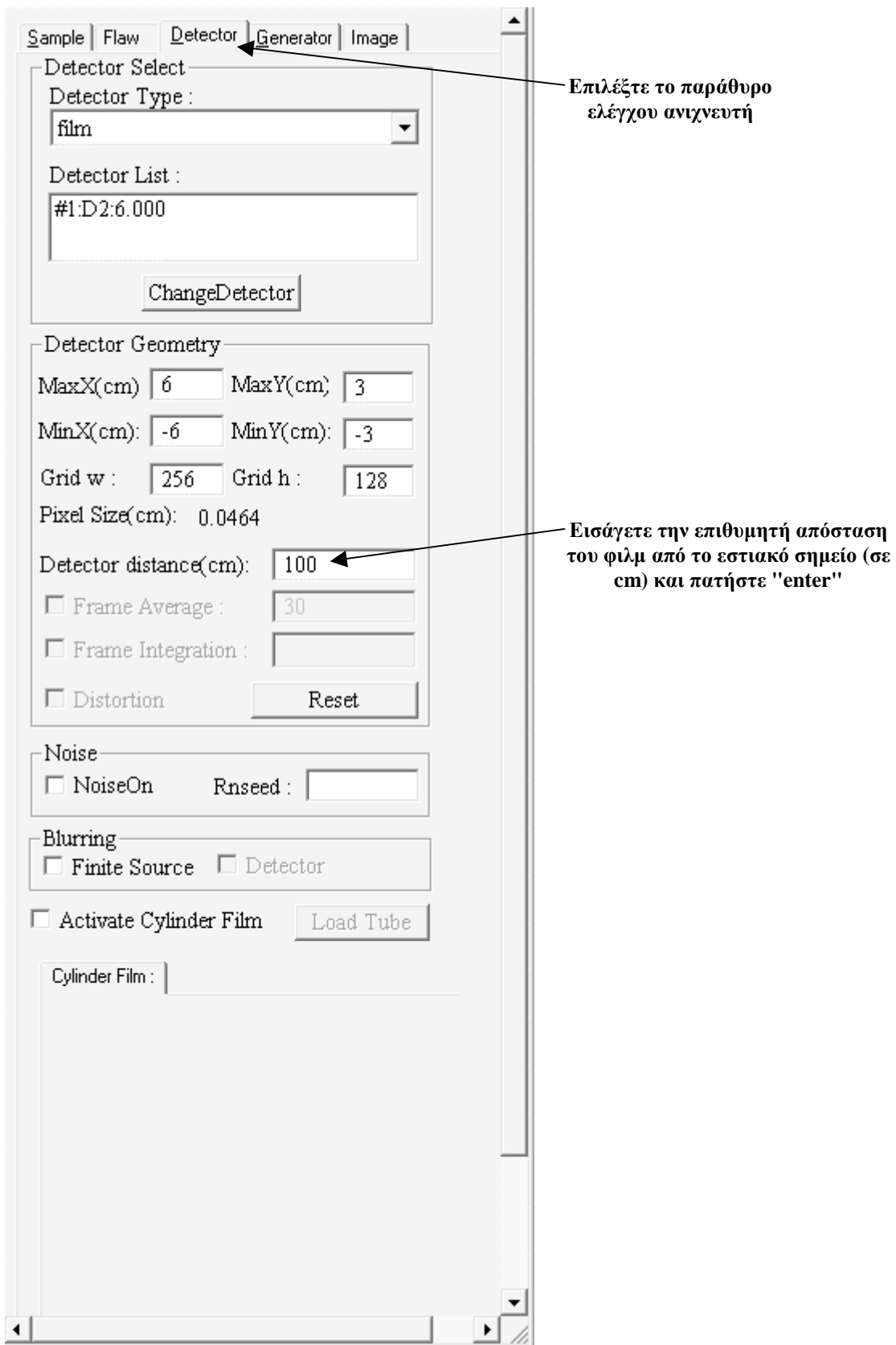
Πληκτρολογήστε μία τιμή στο πλαίσιο ή χρησιμοποιήστε τη μπάρα για να μετακινήσετε το ελάττωμα στην επιθυμητή θέση

**Διάγραμμα 2.21**  
**"Παράθυρο ελέγχου ελαττώματος" (flaw set-up window), επιλογή "Flaw Translate", μετακίνηση ελαττώματος παράλληλα με τους άξονες x, ψ, z**

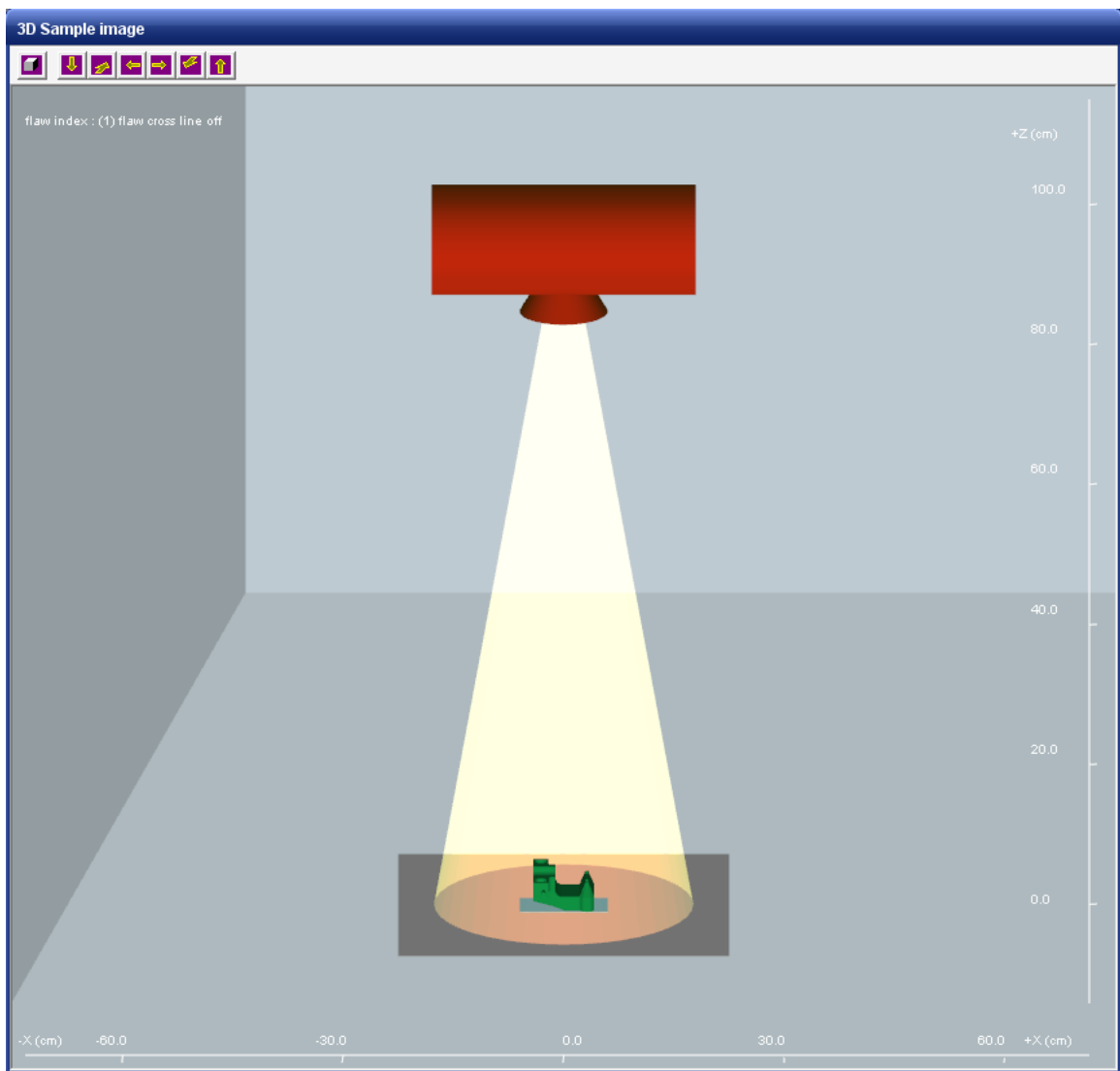


**Διάγραμμα 2.22**

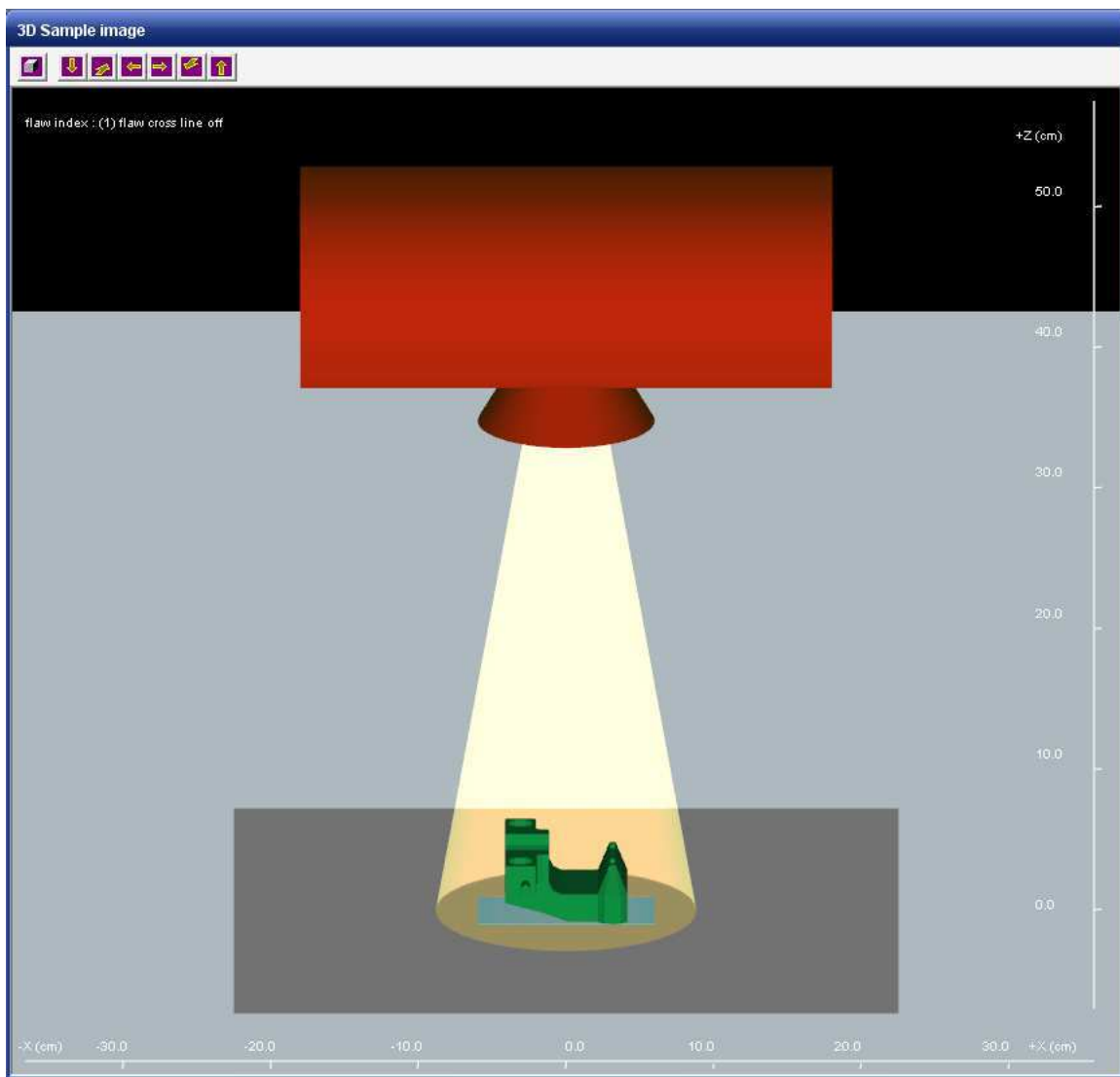
**Το ελάττωμα αφού έχει τοποθετηθεί μέσα στο δοκίμιο (Το δοκίμιο απεικονίζεται ημιδιαφανές έτσι ώστε να είναι ορατό το ελάττωμα)**



**Διάγραμμα 2.23**  
**"Παράθυρο ελέγχου ανιχνευτή", επιλογή της απόστασης του ανιχνευτή από το εστιακό σημείο**



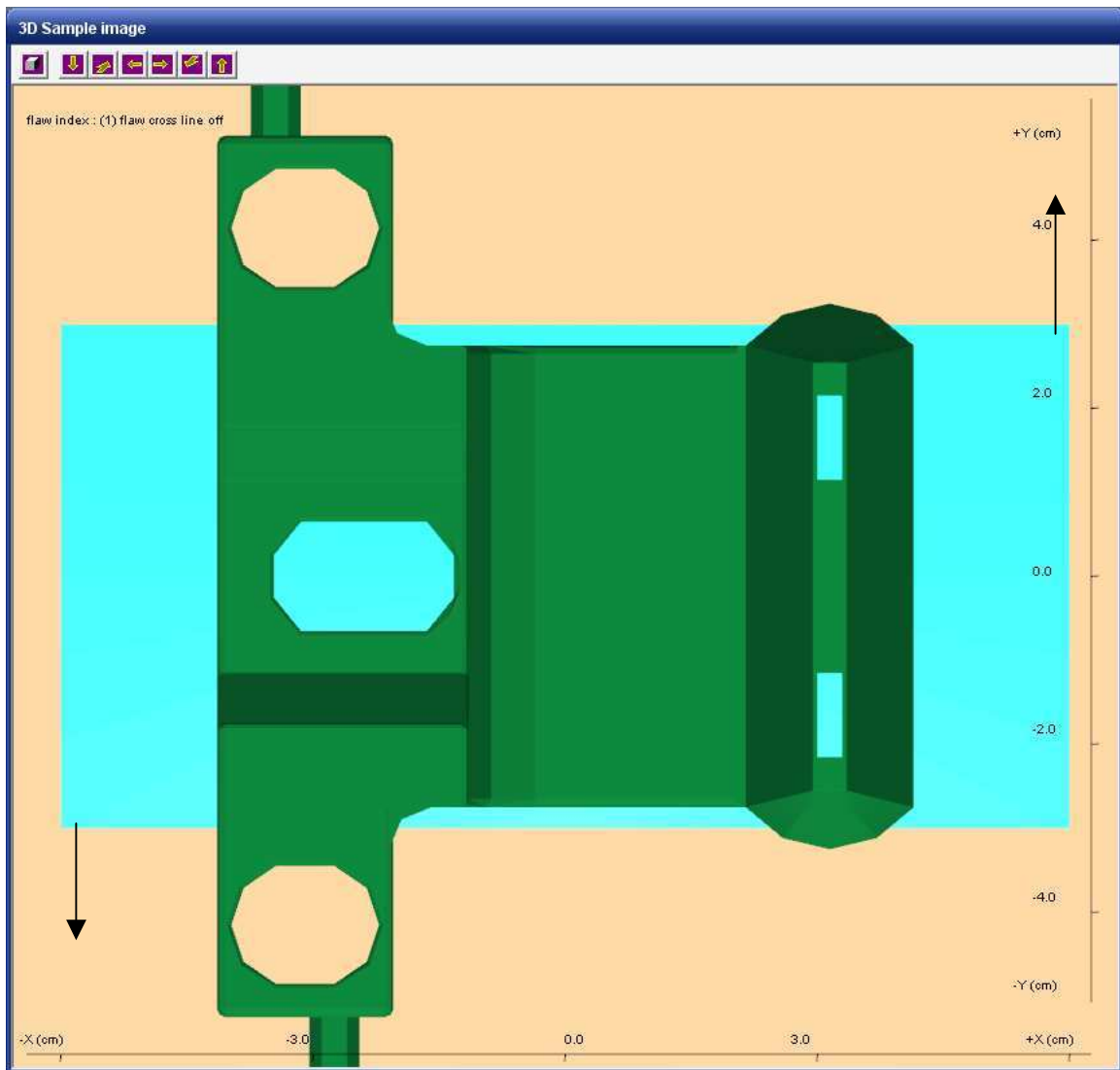
**Διάγραμμα 2.24**  
**Απόσταση ανιχνευτή – εστιακού σημείου 100cm**



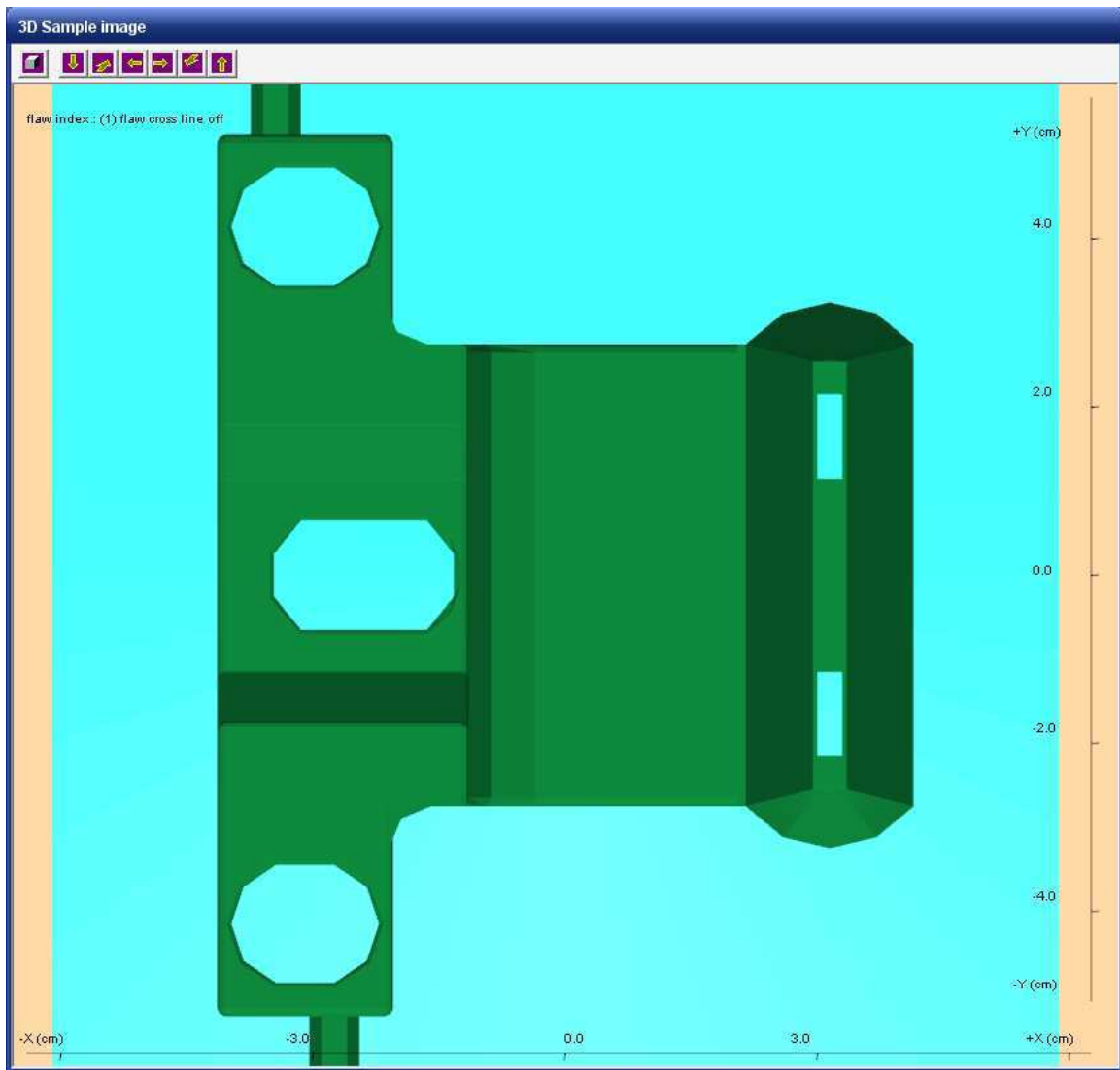
**Διάγραμμα 2.25**

**Απόσταση ανιχνευτή – εστιακού σημείου 50cm (παρατηρείται ότι η προβολή της ακτινοβολίας στο επίπεδο του ανιχνευτή είναι πολύ μικρότερη λόγω της μειωμένης απόστασης)**

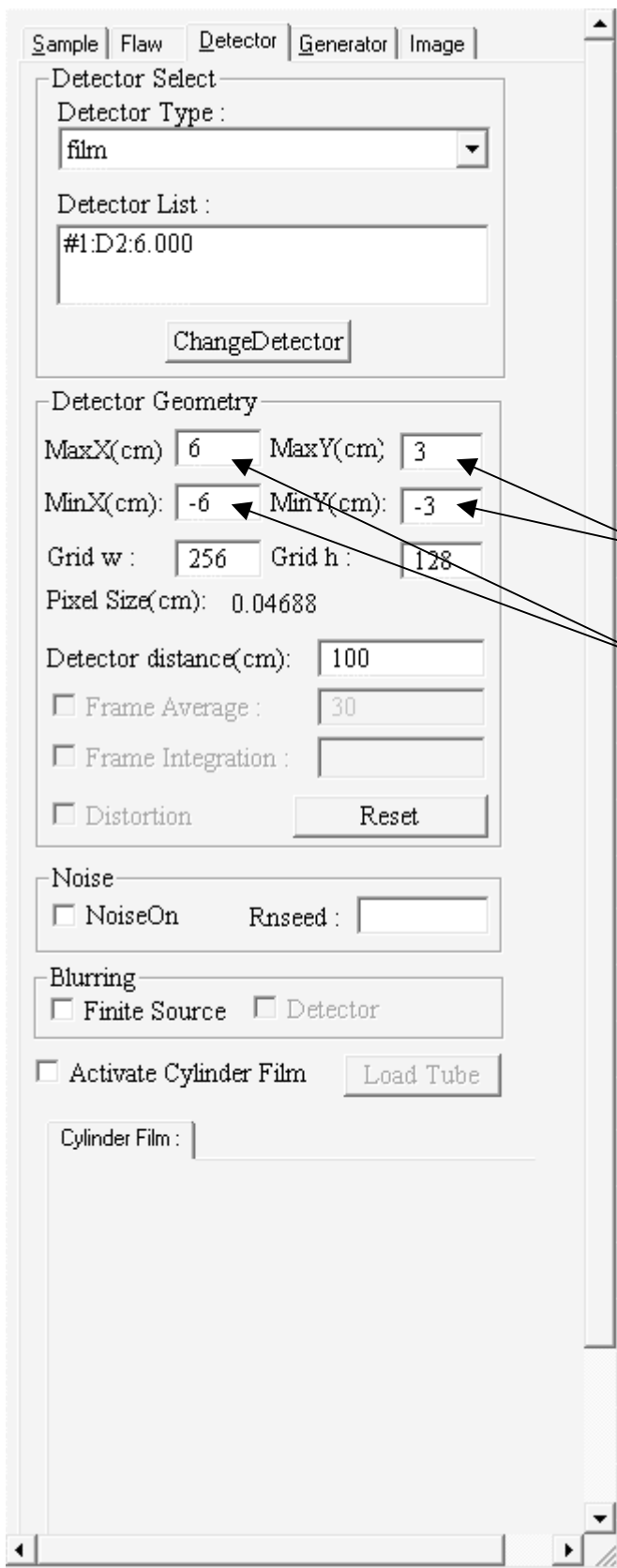




**Διάγραμμα 2.26**  
**Κάνοντας "κλικ" στις γωνίες του φιλμ και "τραβώντας" με τον τρόπο που δείχνουν τα βέλη της εικόνας θα αλλάξετε το μέγεθος του φιλμ, έτσι ώστε να καλύπτει ολόκληρο το δοκίμιο**



**Διάγραμμα 2.27**  
**Το φιλμ καλύπτει ολόκληρο το δοκίμιο**

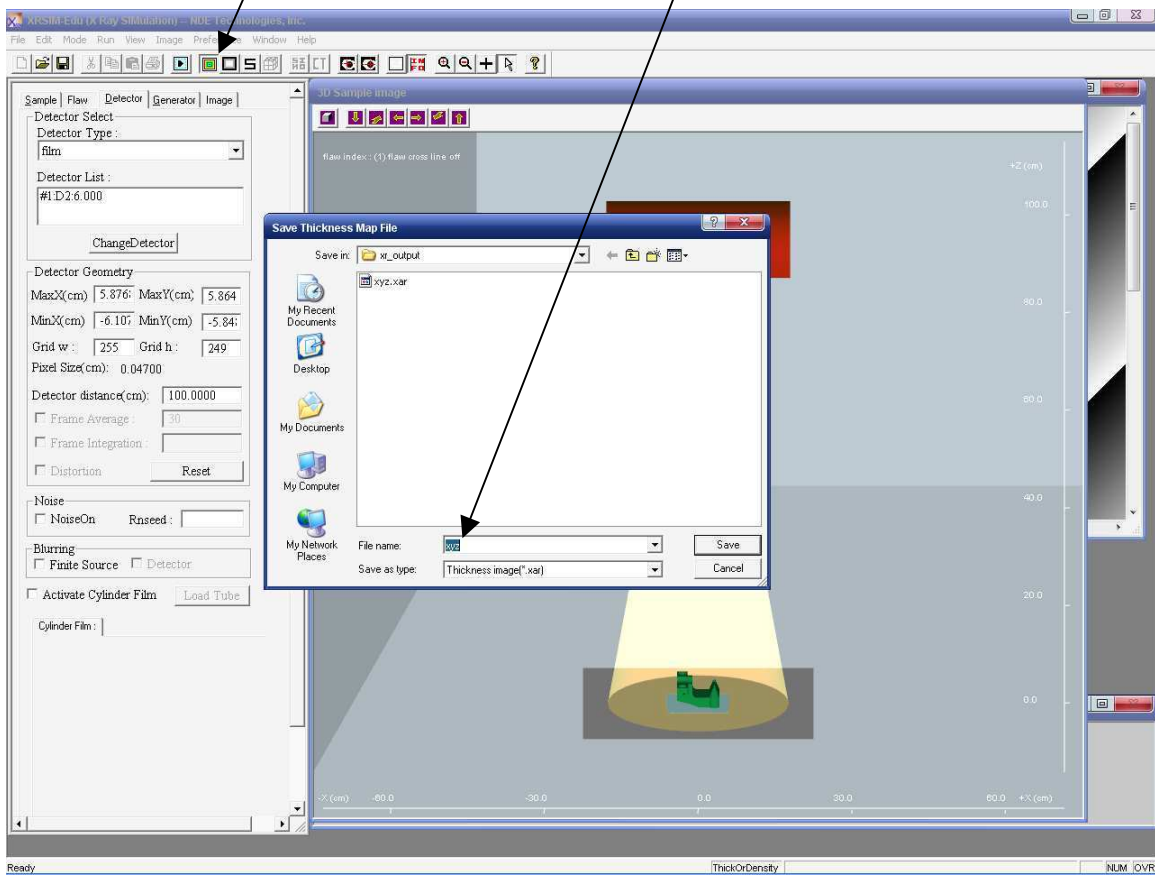


Το μέγεθος και η θέση του φιλμ μπορούν να αλλάξουν εισάγοντας τιμές. Οι τιμές αυτές είναι η απόσταση της άκρης του φιλμ από το κέντρο της προβολής της ακτινοβολίας -x.

**Διάγραμμα 2.28**  
 "Παράθυρο ελέγχου ανιχνευτή", αλλαγή μεγέθους του φιλμ χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα πλαίσια

**Κάνετε κλικ στο πλήκτρο "Run CAD"**

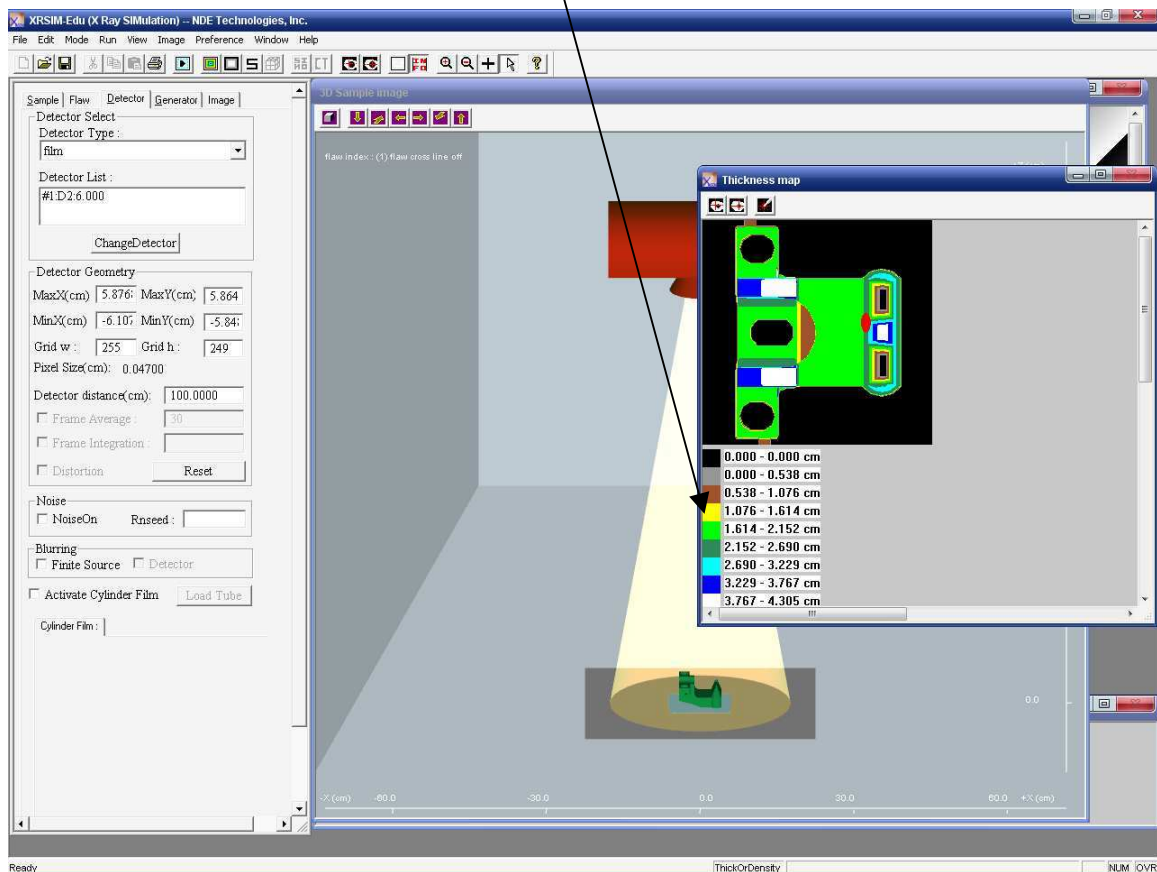
**Αν επιθυμείτε εισάγετε καινούργιο όνομα αρχείου και κάνετε κλικ στο "Save"**



**Διάγραμμα 2.29**

**Κάνοντας "κλικ" στο πλήκτρο συντόμευσης "Run CAD" εμφανίζεται ένα αναδυόμενο παράθυρο για την εισαγωγή του ονόματος του αρχείου που αποθηκεύεται ο διδιάστατος χάρτης πάχους**

Το πάχος του υλικού που η ακτίνα πρέπει να διαπεράσει απεικονίζεται συναρτήσει του χρώματος

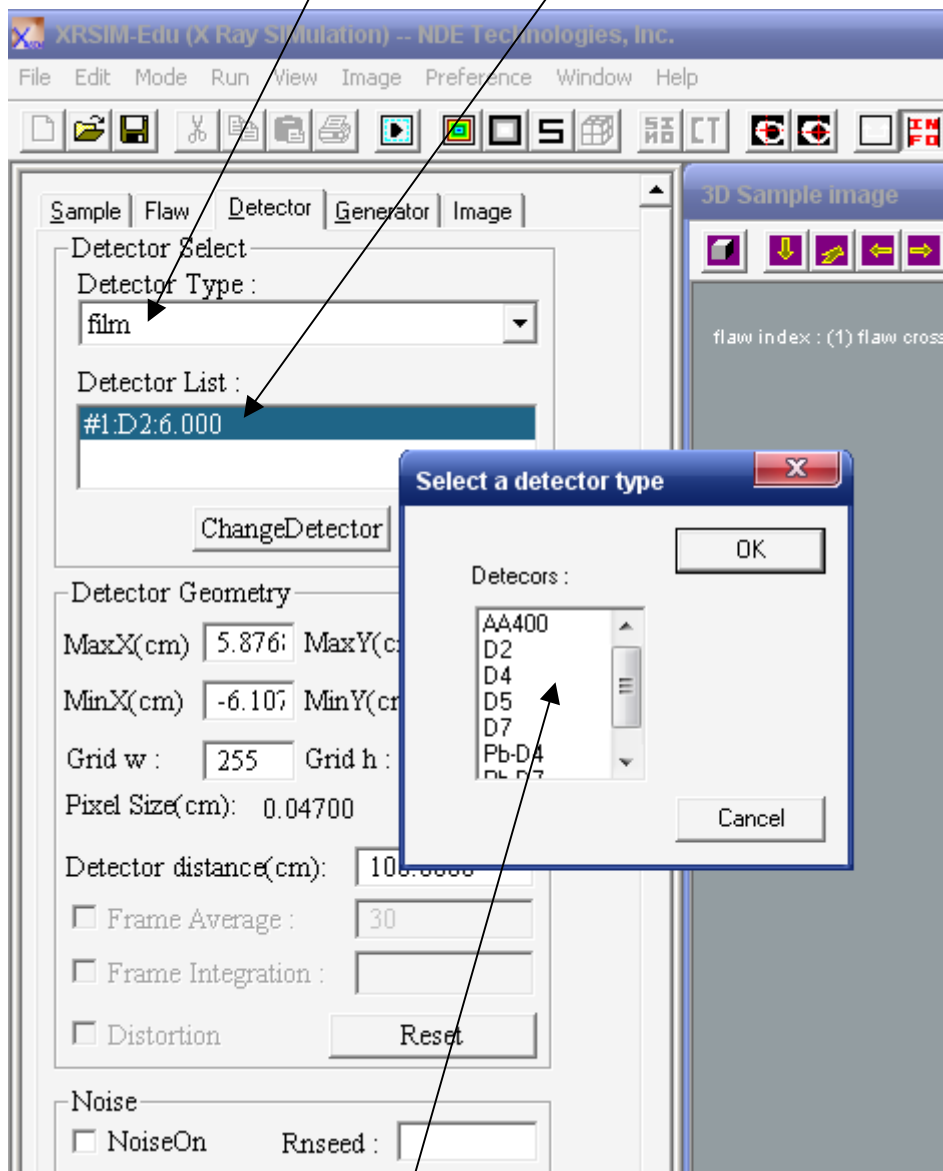


Διάγραμμα 2.30

Απεικόνιση με διαφορετικό χρώμα του πάχους του υλικού που θα διαπεράσει η κάθετη ακτινοβολία σε κάθε σημείο του δοκιμίου

Στο πλαίσιο με τίτλο "Detector Type" στο παράθυρο ελέγχου του ανιχνευτή πρέπει να υπάρχει η επιλογή "film"

Ένας συγκεκριμένος τύπος φιλμ θα υπάρχει σε αυτό το πλαίσιο. Για να αλλάξετε το φιλμ κάνετε κλικ εδώ και θα ανοίξει ένα παράθυρο με μια λίστα από φιλμ

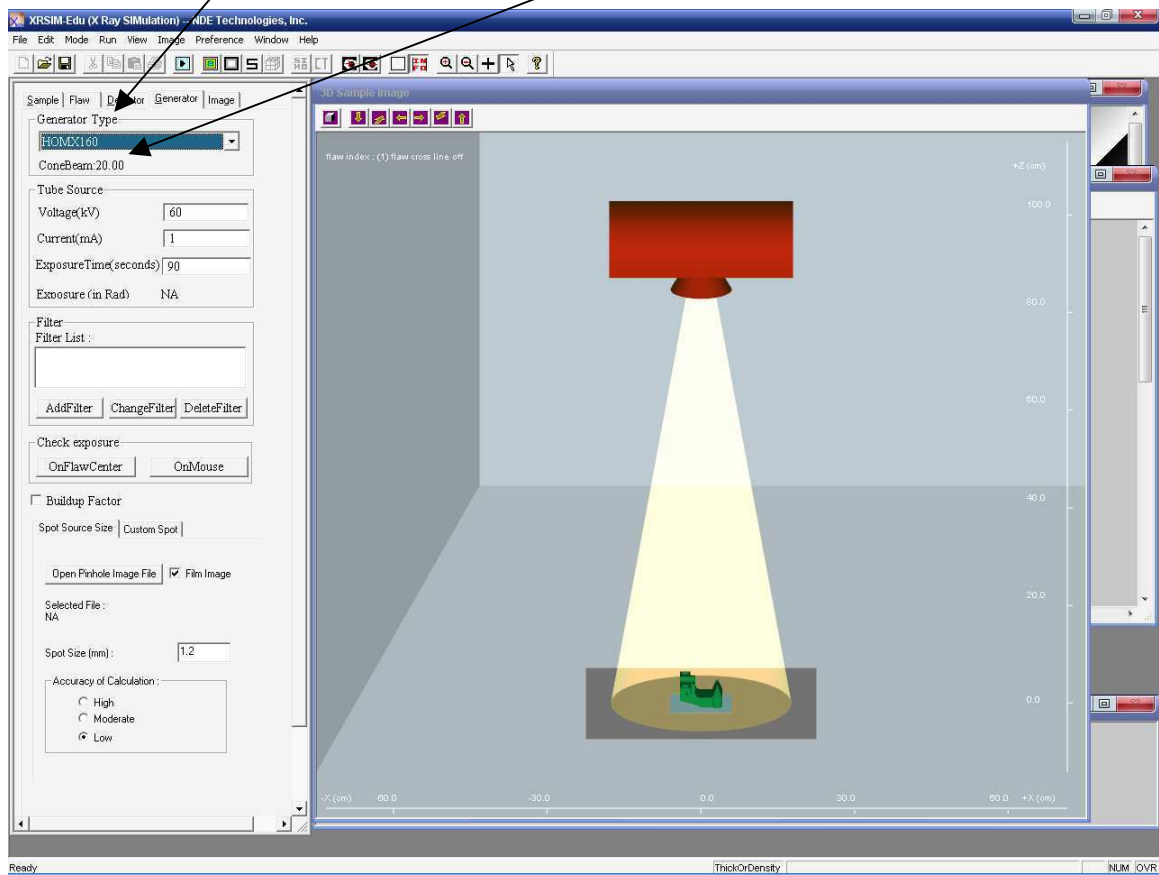


Επιλέξτε το νέο φιλμ και κάνετε κλικ στο "OK"

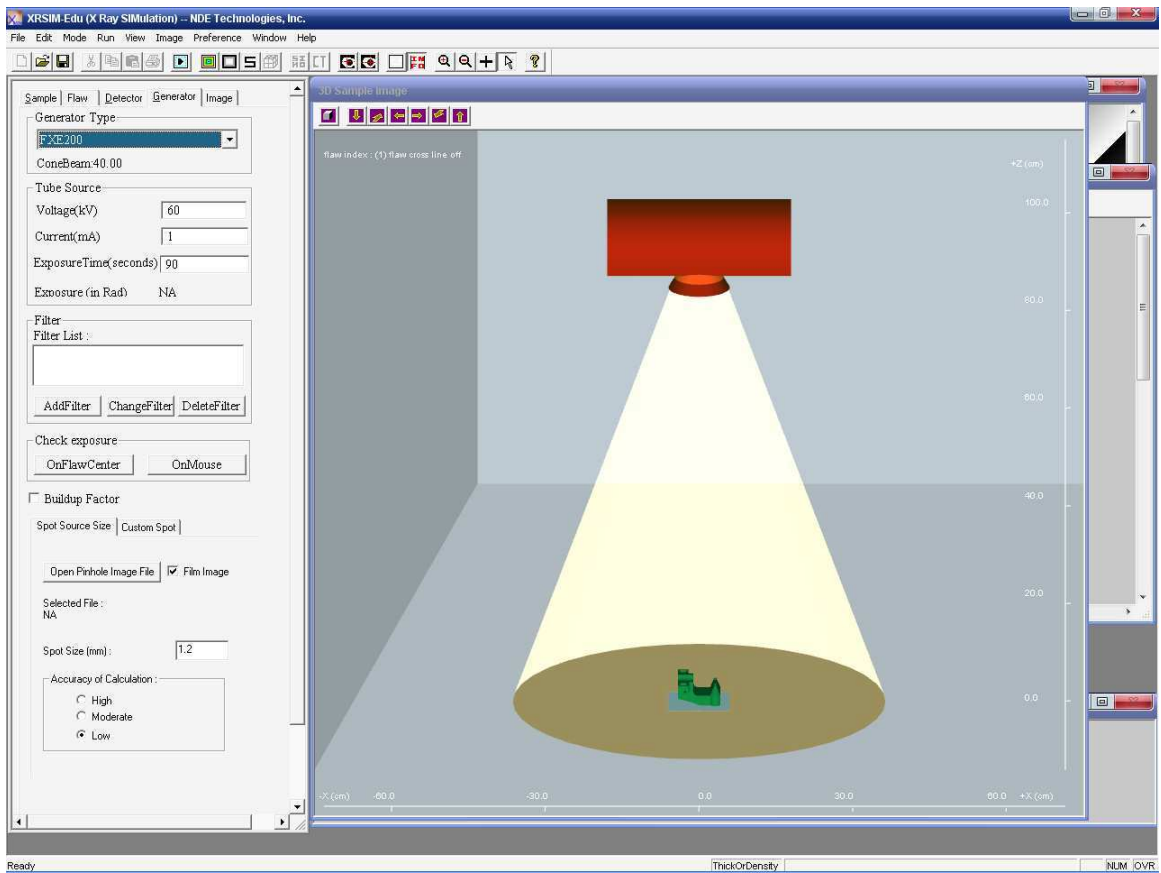
**Διάγραμμα 2.31**  
**"Παράθυρο ελέγχου ανιχνευτή", διαδικασία αλλαγής φιλμ**

Επιλέξτε την επιθυμητή  
μηχανή από τη λίστα που  
παρέχεται στο πλαίσιο με  
τίτλο "Generator Type"

Αναγράφεται η  
γωνία της δέσμης



**Διάγραμμα 2.32**  
"Παράθυρο ελέγχου μηχανής", επιλογή μηχανής παραγωγής ακτίνων –x

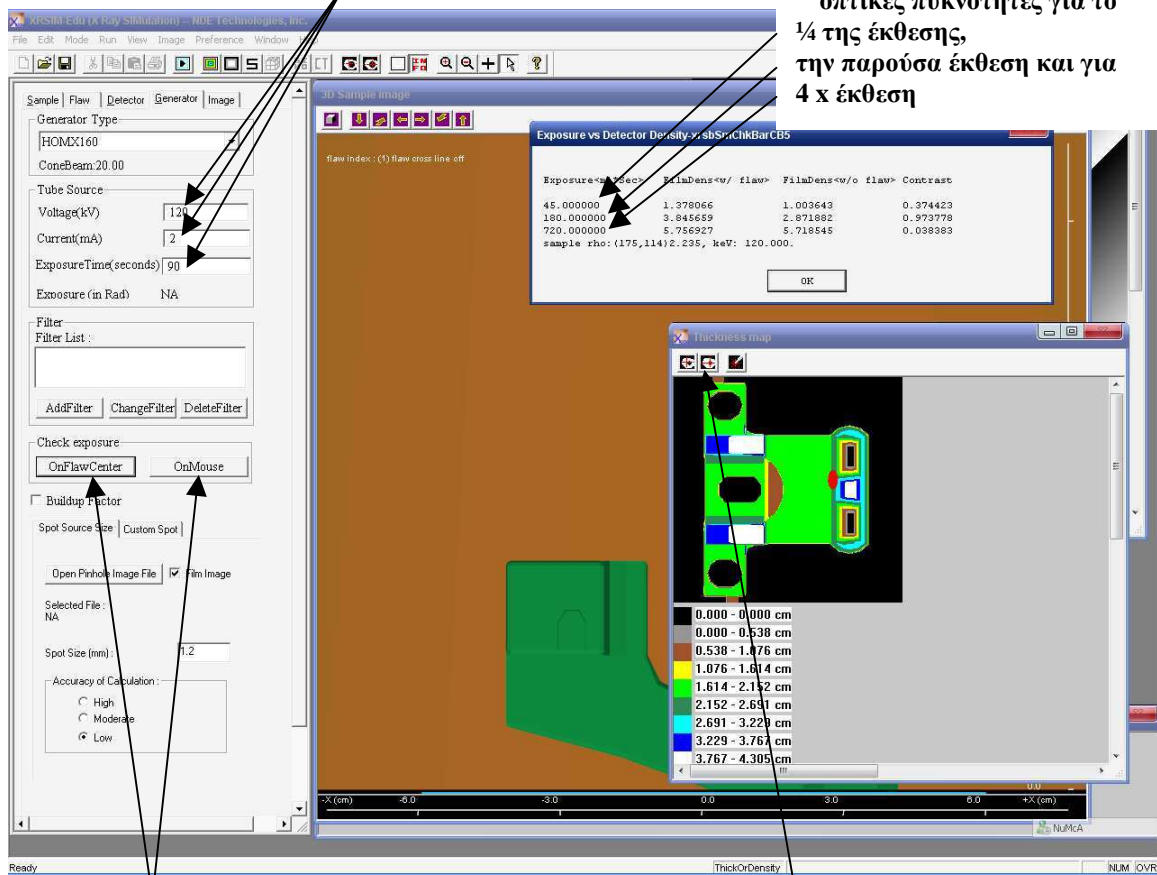


**Διάγραμμα 2.33**  
**Απεικόνιση του κώνου ακτινοβολίας μηχανής με διπλάσια γωνία (40 μοίρες) από την αρχική (HOMX160)**



Εισάγετε τιμές στα πλαίσια που ελέγχουν την τάση (kV), ένταση (mA) και το χρόνο έκθεσης (sec) για να καθορίσετε τα χαρακτηριστικά της μηχανής

Το παράθυρο ελέγχου της οπτικής πυκνότητας περιέχει οπτικές πυκνότητες για το ¼ της έκθεσης, την παρούσα έκθεση και για 4 x έκθεση

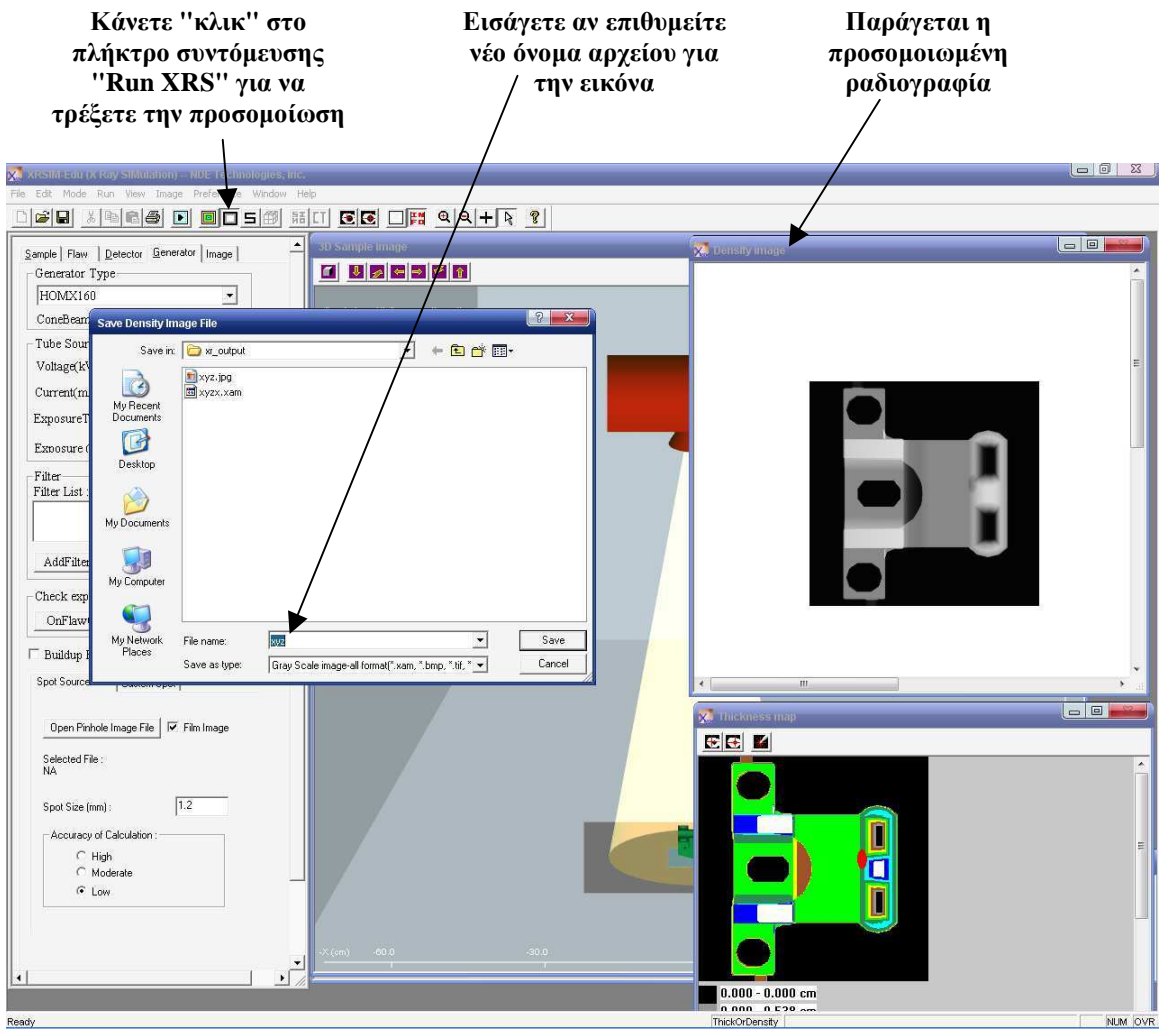


Επιλέξτε σε ποιο σημείο θέλετε να ελέγξετε την οπτική πυκνότητα

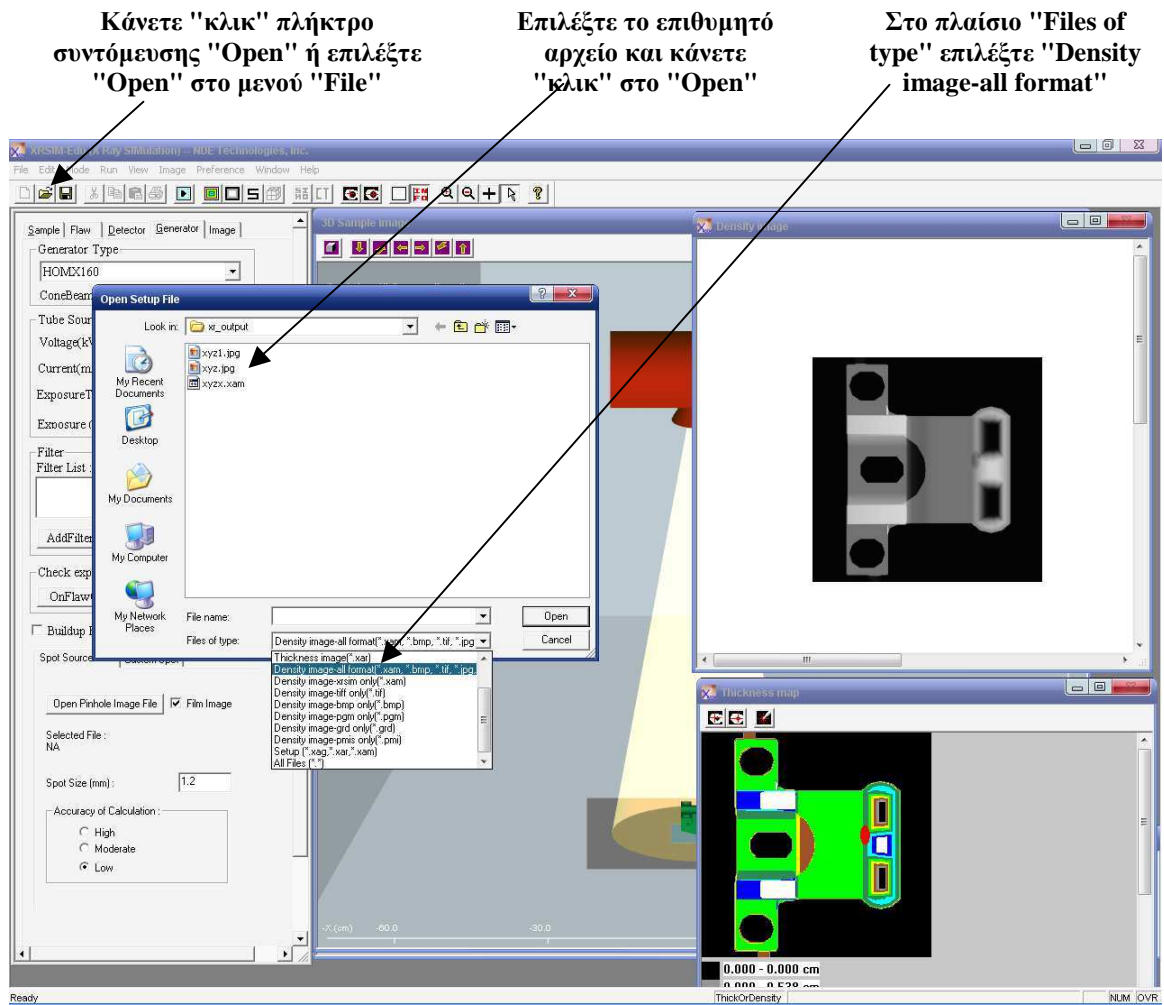
Το παράθυρο του διδιάστατου χάρτη πάχους παρέχει τρία πλήκτρα συντόμευσης για τον έλεγχο της οπτικής πυκνότητας

### Διάγραμμα 2.34

"Παράθυρο ελέγχου μηχανής", ρύθμιση των παραμέτρων της μηχανής παραγωγής ακτίνων -x και προκαταρκτικός έλεγχος της οπτικής πυκνότητας



**Διάγραμμα 2.35**  
**Παραγωγή εικονικής ραδιογραφίας**

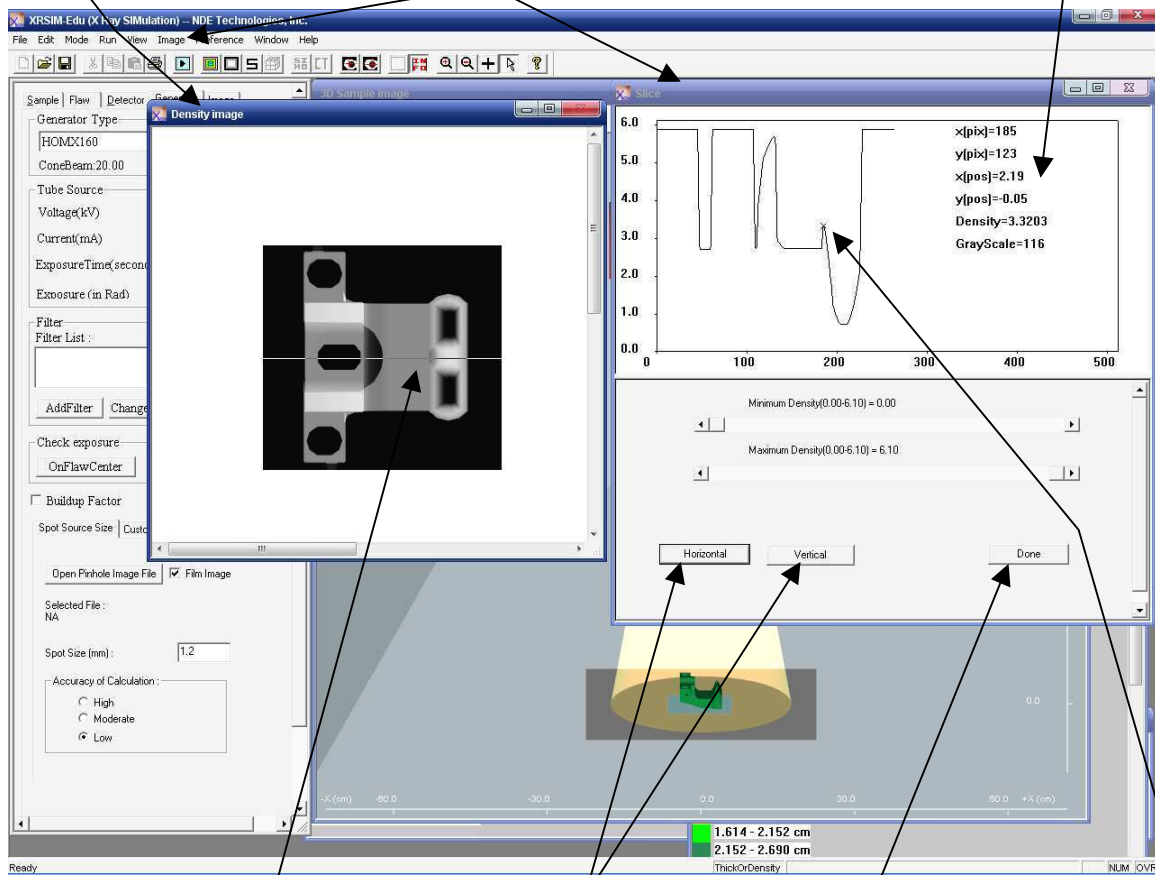


**Διάγραμμα 2.36**  
**"Ανοίγοντας" πολλαπλές ραδιογραφικές εικόνες**

Ανοίξτε μία ή περισσότερες ραδιογραφικές εικόνες και τοποθετήστε τες όπως επιθυμείτε στην οθόνη

Στο μενού "Image" επιλέξτε "Analysis" και μετά "Slice" για να ανοίξετε το παράθυρο τομής

Αναφέρονται η οπτική πυκνότητα και οι συντεταγμένες του σημείου που κάνατε κλικ στη ραδιογραφική εικόνα



Κάνετε αριστερό κλικ στο σημείο της εικόνας που θέλετε να γίνει η τομή και η ανάλυση. Η οπτική πυκνότητα κατά μήκος αυτής της γραμμής θα εμφανιστεί σε γράφημα στο παράθυρο τομής

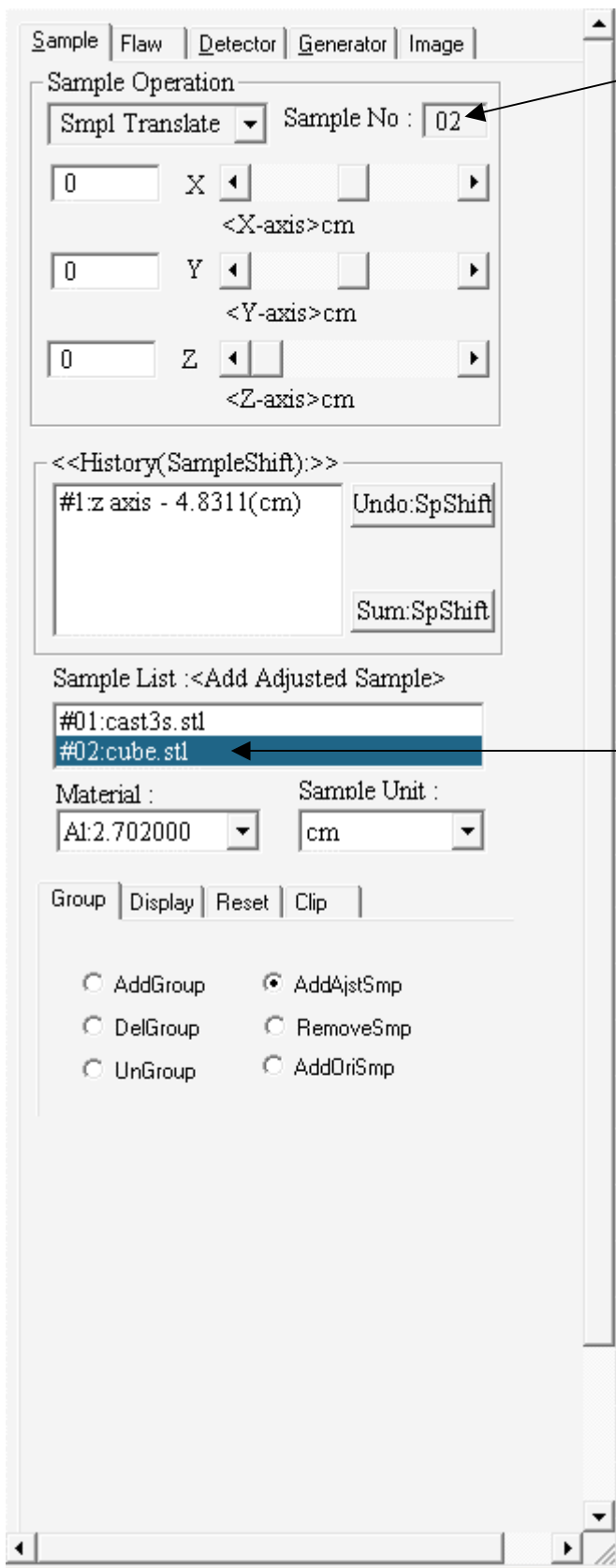
Κάνετε κλικ στο "Horizontal" ή στο "Vertical" για να διαλέξετε τη διεύθυνση της τομής

Κάνετε κλικ στο "Done" για να κλείσετε το παράθυρο

Ένα μικρό σημείο "x" στο γράφημα θα δείχνει πού κάνατε κλικ

### Διάγραμμα 2.37

Ανάλυση της οπτικής πυκνότητας κατά μήκος οριζόντιου ή κατακόρυφου άξονα με την επιλογή "Analysis" και "Slice" στο μενού "Image"

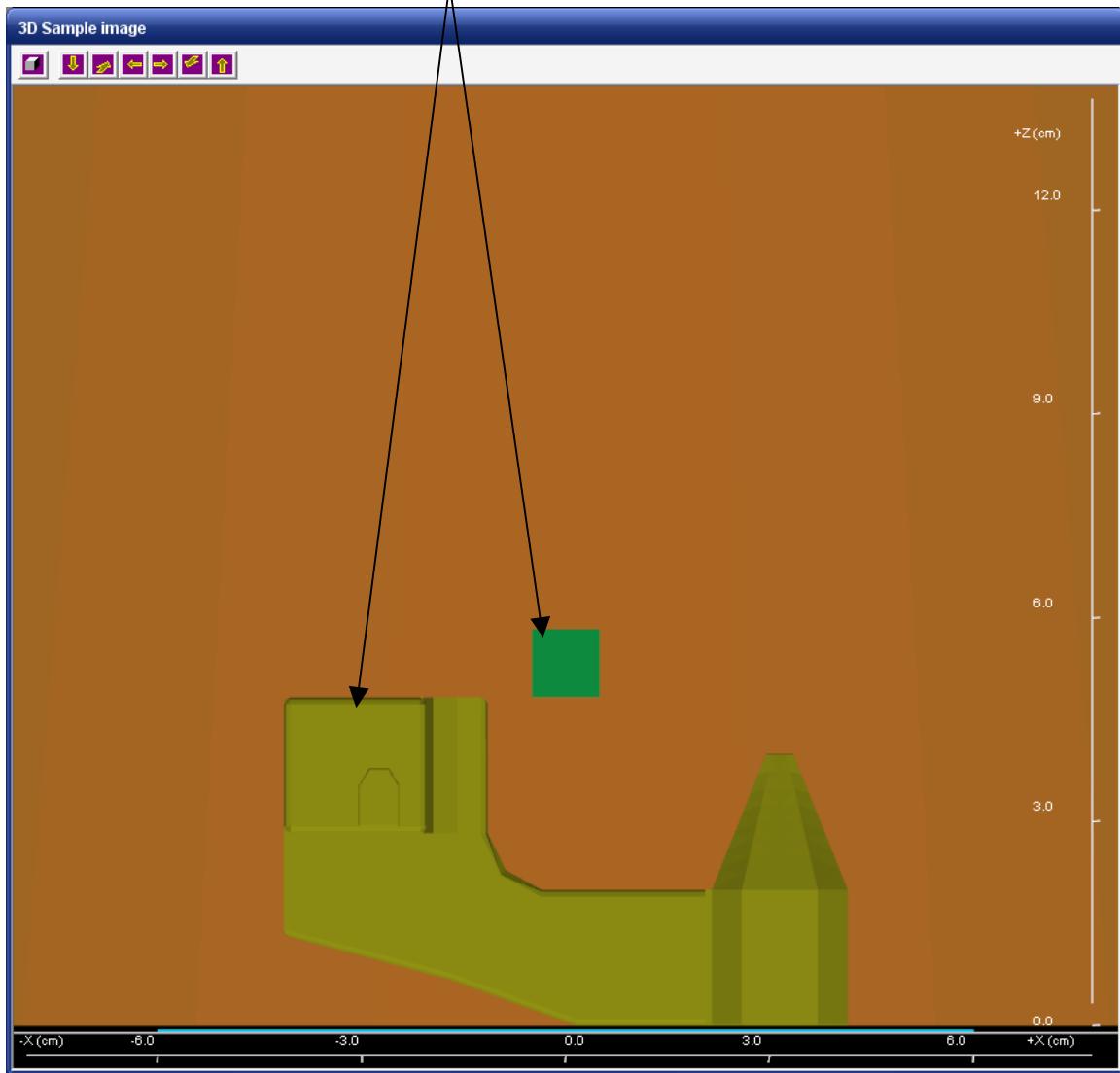


Ο αριθμός του ενεργού δοκιμίου φαίνεται εδώ

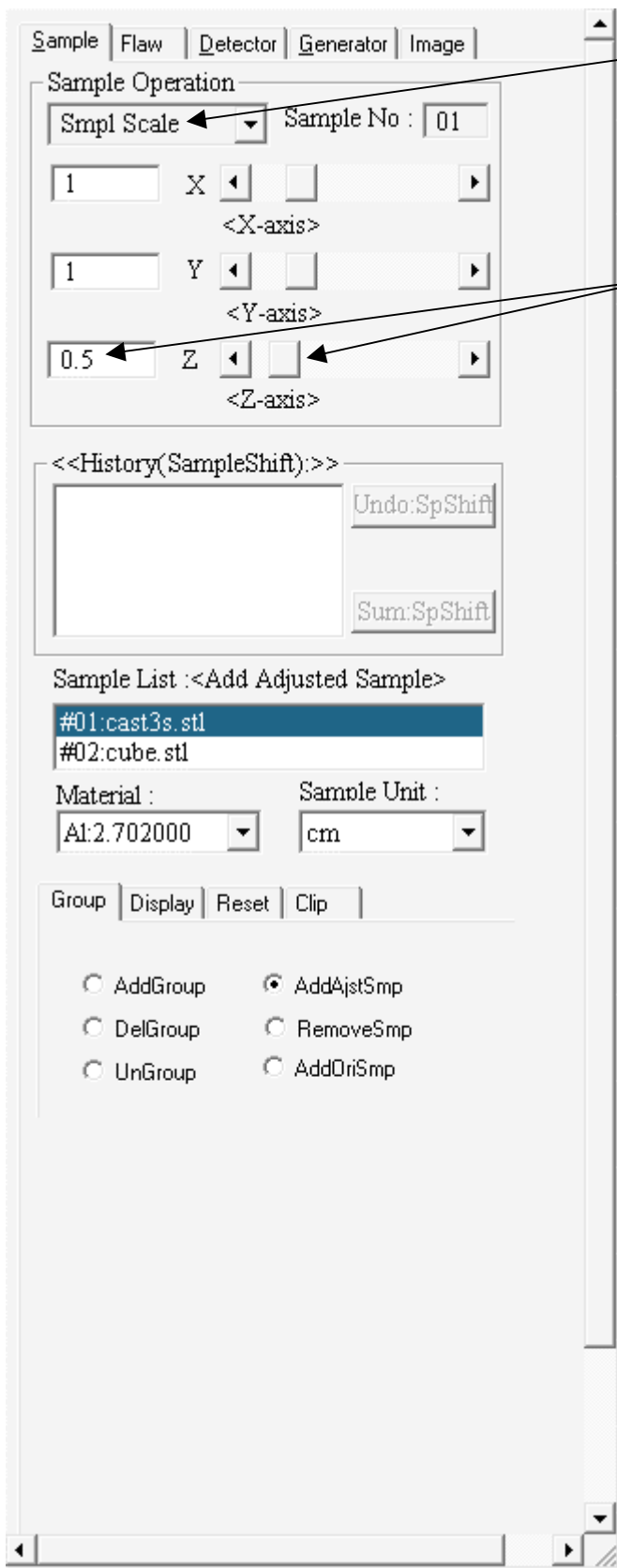
Η λίστα με τα δοκίμια που έχετε ανοίξει φαίνεται εδώ. Το επιλεγμένο όνομα αρχείου εδώ είναι και το ενεργό δοκίμιο

**Διάγραμμα 2.38**  
Χειρισμός πολλών δοκιμίων

Τα δοκίμια που έχετε  
ανοίξει φαίνονται στο  
παράθυρο τριδιάστατης  
απεικόνισης



**Διάγραμμα 2.39**  
"Παράθυρο τριδιάστατης απεικόνισης", όπου φαίνονται τα δοκίμια που έχετε  
"ανοίξει"



Επιλέξτε "Smpl Scale" στο πλαίσιο "Sample Operation"

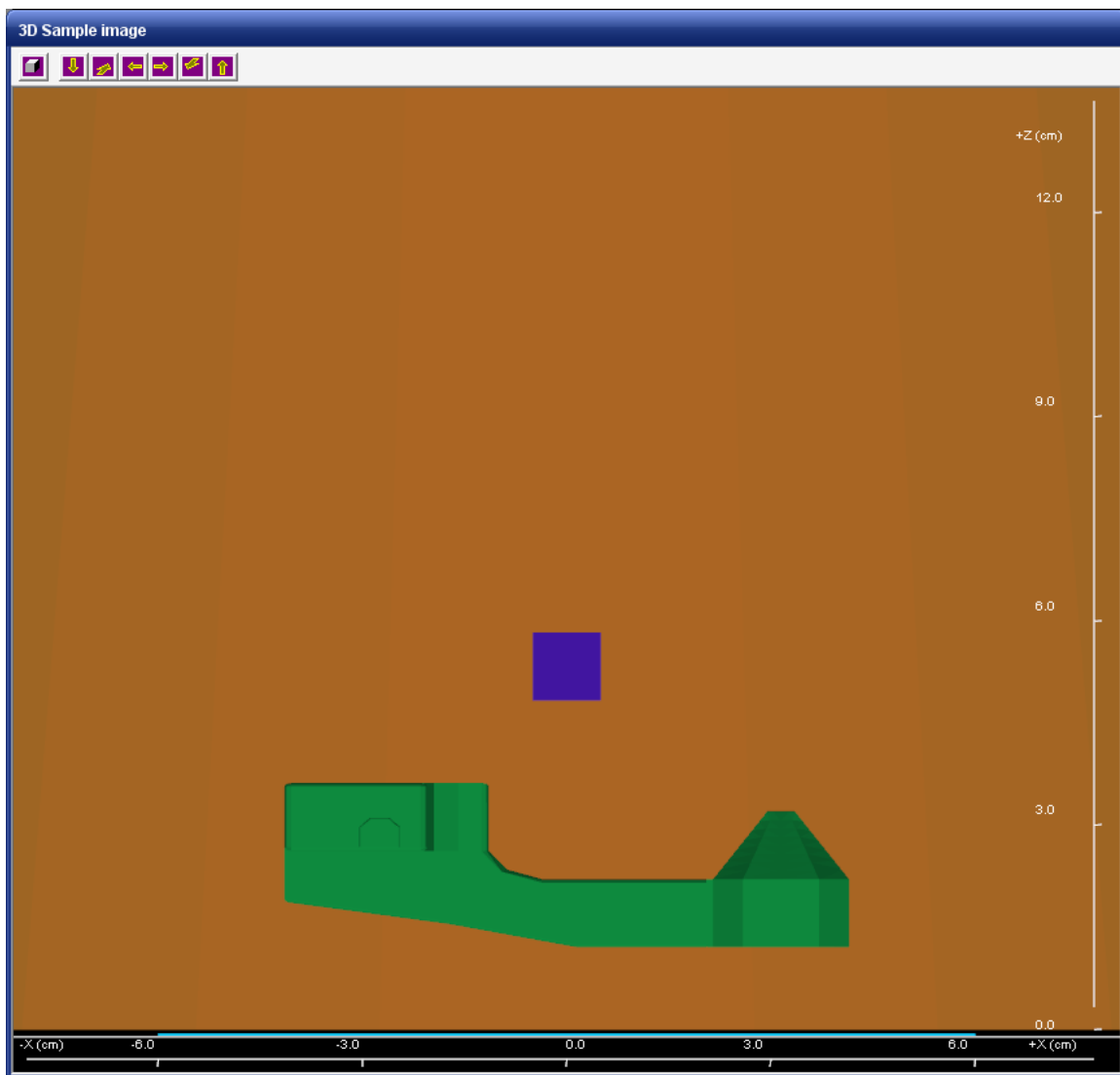
Πληκτρολογήστε μία τιμή ή χρησιμοποιήστε τα πλήκτρα ολίσθησης και τα βελάκια για να διαλέξετε παράγοντα μεταβολής του μεγέθους. Η διάσταση z έχει πολλαπλασιαστεί με 0.5 έτσι ώστε να έχουμε το αποτέλεσμα που φαίνεται στο Διάγραμμα 2.42

**Διάγραμμα 2.40**  
**"Παράθυρο ελέγχου δοκιμίου", επιλογή "Smpl Scale", αλλαγή μεγέθους του δοκιμίου**



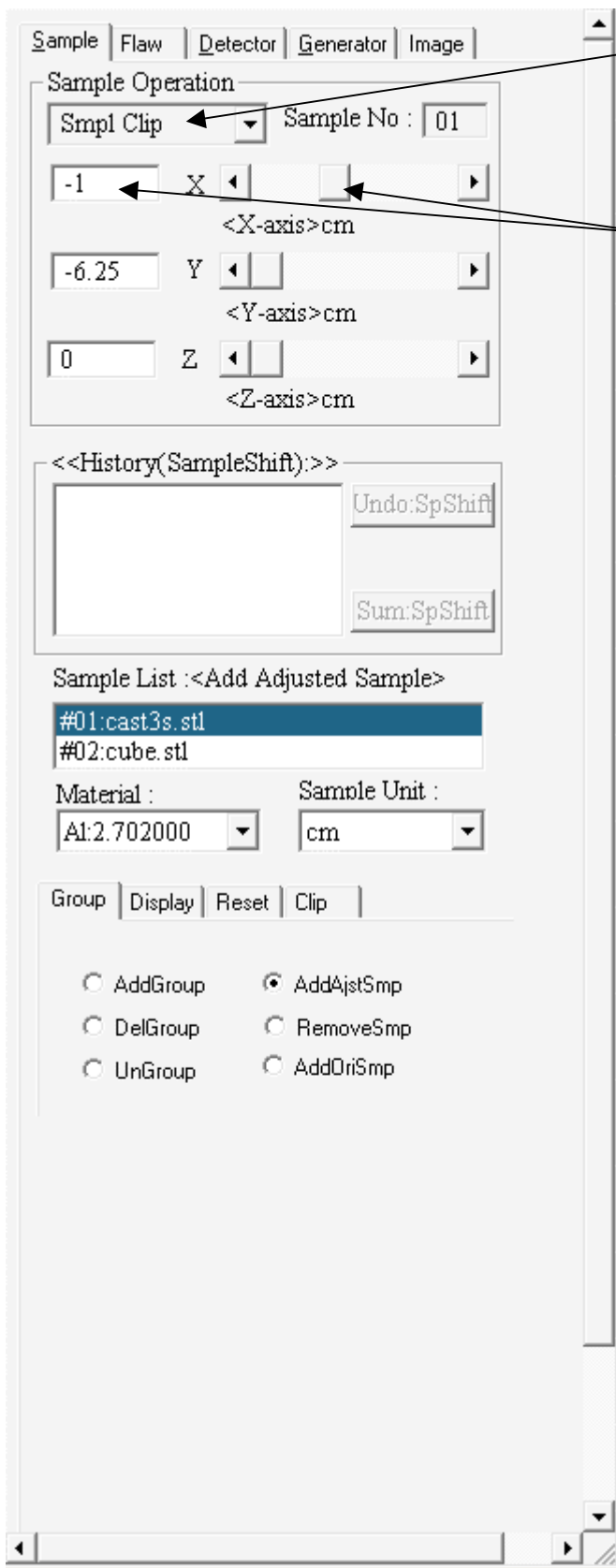
**Διάγραμμα 2.41**  
**Αρχική μορφή των δύο δοκιμίων που έχετε εισάγει**





Διάγραμμα 2.42

Μορφή του δοκιμίου "cast3s.stl", αφού πολλαπλασιάσετε την z διάστασή του με 0.5 όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 2.40



Επιλέξτε "Smpl Clip" στο πλαίσιο "Sample Operation"

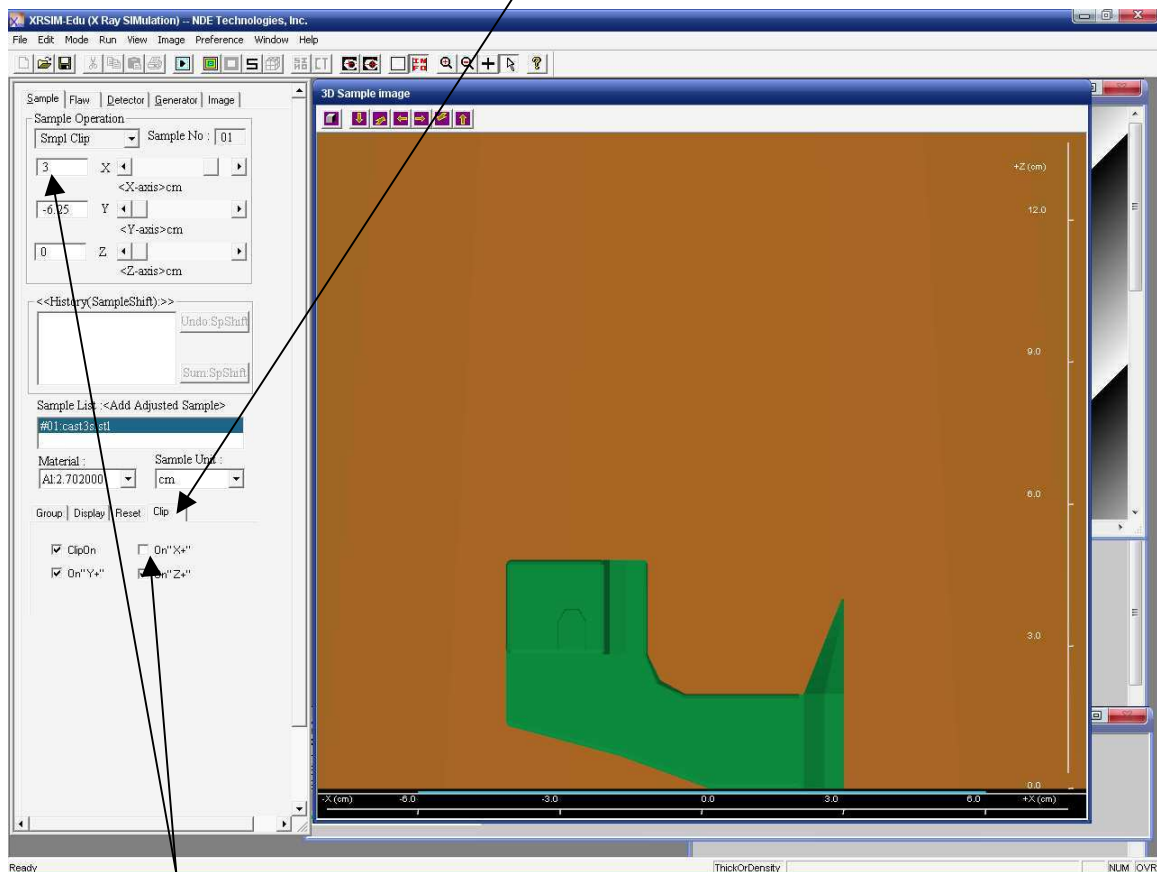
Εισάγετε μία τιμή ή χρησιμοποιήστε τα πλήκτρα ολίσθησης και τα βελάκια για να κόψετε το δοκίμιο σε μία θέση του αντίστοιχου άξονα

**Διάγραμμα 2.43**  
 "Παράθυρο ελέγχου δοκιμίου", επιλογή "Smpl Clip", αποκοπή ενός μέρους του δοκιμίου



**Διάγραμμα 2.44**  
**Αποτέλεσμα της αποκοπής του δοκιμίου "cast3s.stl" στο σημείο -1 του άξονα x**

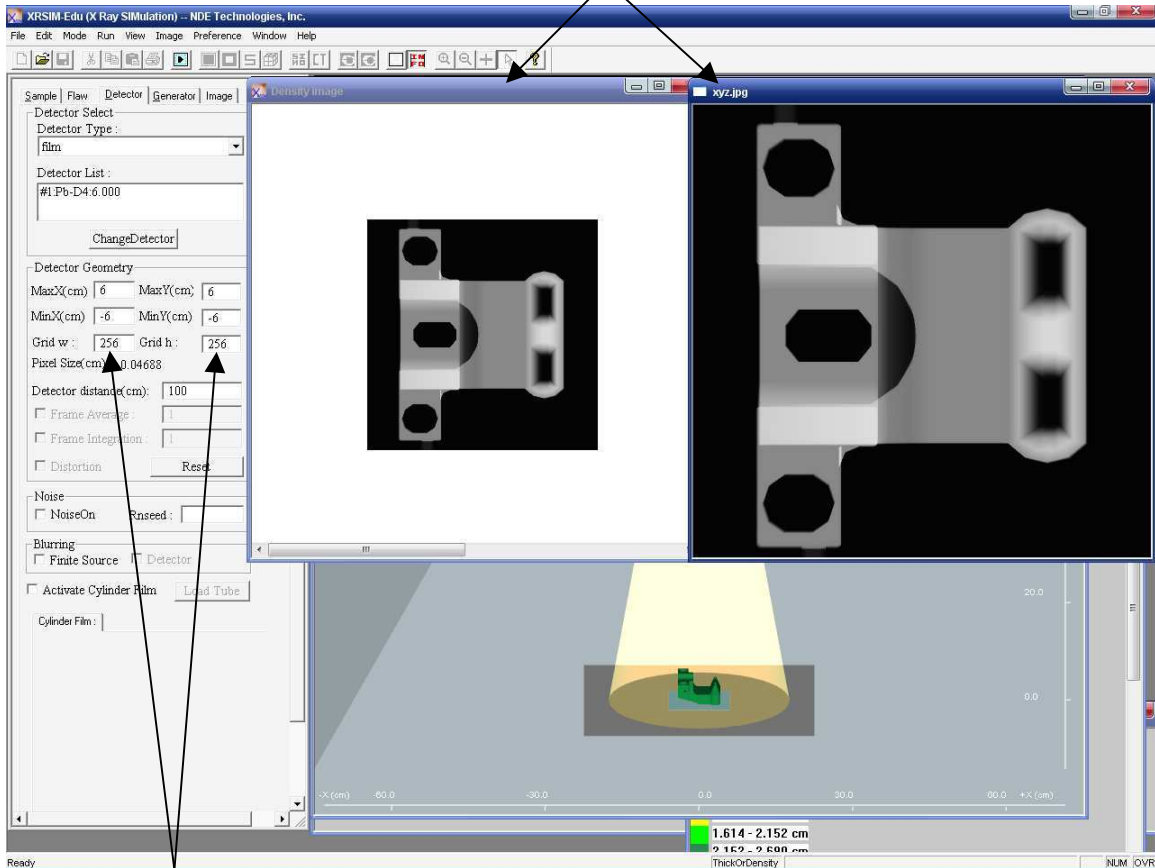
Επιλέξτε την ετικέτα  
"Clip" στο κάτω μέρος  
του "παραθύρου  
ελέγχου δοκιμίου"



Κάνετε "κλικ" στη θέση "On X+", έτσι ώστε να μην είναι επιλεγμένη. Αν πληκτρολογήσετε μία τιμή (π.χ.  $x = 3$ ), τότε θα αφαιρεθεί από το δοκίμιο όλη η ύλη που έχει  $x > 3$ .

**Διάγραμμα 2.45**  
Αποτέλεσμα της αποκοπής του δοκιμίου "cast3s.stl" στο σημείο 3 του άξονα x, αφαιρώντας όλη την ύλη που έχει  $x > 3$

**Η εικόνα στα αριστερά έχει διαστάσεις 256x256, ενώ εκείνη στα δεξιά 512x512.**



**Εισάγετε σε αυτά τα πλαίσια τον αριθμό των pixel που επιθυμείτε να έχει η παραγόμενη εικόνα. Προσέξτε ότι διατηρείται αυτόματα η αναλογία μήκους-πλάτους του φιλμ. Αν θέλετε να την αλλάξετε θα πρέπει να αλλάξετε το σχήμα του φιλμ**

**Διάγραμμα 2.46**  
**Αλλαγή των διαστάσεων της παραγόμενης εικόνας της εικονικής ραδιογραφίας**

## ΠΙΝΑΚΕΣ ΤΟΥ 2<sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

<u>XRSIM</u> <u>Identification</u>	<u>Density</u> <u>(grams/cm<sup>3</sup>)</u>	<u>Description</u>
Void	0.00129	Air filled void
Be	1.84800	Beryllium (pure)
Al	2.70200	Aluminum (pure)
Ti	4.54000	Titanium (pure)
Fe	7.87000	Iron (pure)
Ni	8.90000	Nickel (pure)
Cu	8.96000	Copper (pure)
Mo	10.22000	Molybdenum (pure)
Ag	10.5000	Silver (pure)
Pb	11.35000	Lead (pure)
W	19.29900	Tungsten (pure)
Air	0.00129	Air
Water	1.00000	Water (pure)
Quartz	2.64000	Quartz
Leather	1.64000	Leather
A2024	2.27000	Wrought Aluminum Alloy 2024 (Copper is the main alloying element)
A7075	2.81000	Wrought Aluminum Alloy 7075 (Zinc in the main alloying element)
A6061	2.70000	Wrought Aluminum Alloy 6061 (Magnesium and Silicon are the main alloying elements)
A356	2.29600	Cast Aluminum Alloy A356
Al2O3_b	2.60000	Aluminum Oxide (density 1)
Al2O3_c	2.00000	Aluminum Oxide (density 2)
Al2O3_d	1.60000	Aluminum Oxide (density 3)
Bone	1.65000	Human Bone (density 1)
Bone_a	1.45000	Human Bone (density 2)
Bone_b	1.25000	Human Bone (density 3)
Bone_c	1.15000	Human Bone (density 4)
SS304	7.56170	Stainless Steel Alloy 304
Sapphire	4.00000	Sapphire
MgZk60	1.83000	Forged Magnesium Alloy Zk60 (Zinc and Zirconium are the main alloying elements)
Mg_WE43	1.84000	Cast Magnesium Alloy WE43 (Yttrium is the main alloying element)
Custom	User Defined	Using this setting, a density can be enter by the user

### Πίνακας 2.1

#### Δυνατός κατάλογος υλικών του XRSIM

## General Film Characteristics

<u>Film</u>	<u>Producer</u>	<u>ASTM Class</u>	<u>Grain Size</u>	<u>Contrast</u>	<u>Speed</u>	<u>Common Applications</u>
IX50	Fuji	1	Extremely-Fine	High	Slow	welds, aircraft, graphite epoxy composites
IX80	Fuji	1	Extremely-Fine	High	Medium	aircraft, welds, castings, high energy
D2	Agfa	Special	Extremely Fine	High	Slow	castings, welds, electronics, composites, highest quality
D4	Agfa	1	Extra-Fine	High	Medium	aircraft, medium castings and welds
D5	Agfa	1	Fine	High	Fast	multiple film techniques, thick castings and welds
D7	Agfa	2	Fine	High	Fast	high density, neutron radiography, thick castings
AA400	Kodak	2	Fine	High	Fast	castings, welds, heavy construction
M	Kodak	1	Ultra-Fine	High	Slow	aircraft, welds, castings, high energy

### Πίνακας 2.2

#### Κατάλογος τυπικών φιλμ μοντελοποιημένων στον κώδικα XRSIM

## X-ray Generator Descriptions

<u>Generator Identification</u>	<u>Maximum kV</u>	<u>Maximum Power Output (Watt)</u>	<u>Max mA<sup>1</sup></u>	<u>Target Material and Angle</u>	<u>Spot Size (mm)</u>	<u>Window Material</u>	<u>Window Thickness (mm)</u>	<u>Cone Beam Angle</u>
HOMX160	160	275	5	W 20°	0.001 to 0.1	Al		20°
FXE200	200	300	1.5	W 21°	0.005 to 0.1	Be	0.5	40°
IRT320	320	3200	30	W 70°	3.0	Be	5.0	20°
HF160	160	2400	15	W 45°		Be		40

1 - The maximum mA values are limited by the maximum power (kV x mA) capability. As kV is increased, mA will decrease to stay within limits.

### Πίνακας 2.3

#### Κατάλογος τυπικών μηχανών παραγωγής ακτίνων -x μοντελοποιημένων στον κώδικα XRSIM

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Ο ΚΩΔΙΚΑΣ XRSIM: ΤΥΠΙΚΑ ΜΑΘΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

#### 3.1 Γενικά

Η επιτυχημένη ραδιογραφία εξαρτάται από πολλές παραμέτρους που επηρεάζουν την έκβαση και την ποιότητά της. Πολλές από αυτές τις παραμέτρους έχουν σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα, ενώ άλλες μικρότερη. Μία από τις δυσκολίες που αντιμετωπίζει όποιος μαθαίνει τα βασικά της ραδιογραφίας είναι το σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα ανάμεσα στην έκθεση και τη στιγμή που θα έχει στα χέρια του τη ραδιογραφία. Αποτέλεσμα είναι μια άσκηση, που απαιτεί πολλές εκθέσεις έτσι ώστε να γίνει κατανοητή η επίδραση διάφορων παραμέτρων στην ποιότητα της ραδιογραφίας, να είναι πολύ χρονοβόρα. Στα παρακάτω μαθήματα χρησιμοποιείται ο κώδικας προσομοίωσης ραδιογραφίας XRSIM, που επιτρέπει στον χρήστη/εκπαιδευόμενο να πειραματιστεί με τη γεωμετρία εξοπλισμού/δοκιμίου και τις διάφορες παραμέτρους της έκθεσης. Οι εικονικές ραδιογραφίες στον κώδικα προσομοίωσης παράγονται μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα, παρέχοντας άμεση εποπτεία του αποτελέσματος που έχουν οι προσομοιούμενες παράμετροι στην ποιότητα της εικόνας. Όπως έγινε ήδη κατανοητό από το 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο ο κώδικας XRSIM επιτρέπει να γίνονται κατά το δυνατόν ακριβείς εικονικές ραδιογραφίες χρησιμοποιώντας μοντέλα δοκιμίων σχεδιασμένα σε CAD. Στη συνέχεια θα παρουσιασθούν μία σειρά από δεκατρία (13) μαθήματα προσομοίωσης ραδιογραφίας κατάλληλα για εκπαίδευση. Τα κείμενα των περισσότερων από τα μαθήματα αυτά βασίζονται σε αντίστοιχα κείμενα στα αγγλικά (βλ. και XRSIM, 1999b), που παράχθηκαν από τους συγγραφείς του κώδικα XRSIM, με χρηματοδότηση από το National Science Foundation των ΗΠΑ (NSF-USA). Η δομή των μαθημάτων, πλην του πρώτου, έχει γενικά ως εξής: Εισαγωγή, Στόχος, Ορισμοί, Ασκήσεις με τον κώδικα, Ασκήσεις στο Εργαστήριο. Το πρώτο μάθημα είναι μία εφαρμογή που μπορεί να χρησιμεύσει ως γενική εισαγωγή στον κώδικα και τις λειτουργίες του και στη βιομηχανική ραδιογραφία γενικότερα. Πριν τα δεκατρία αυτά μαθήματα προηγείται μία πολύ βασική ενότητα με τους περισσότερους αναγκαίους ορισμούς. Επιπλέον στα μαθήματα τα τμήματα του κειμένου με έντονους (**bold**) και κεκλιμένους (*italic*) χαρακτήρες είναι αποσπάσματα από εγχειρίδια θεωρίας ραδιογραφικού ελέγχου. Σημειώνεται ότι για αυτά τα θεωρητικά τμήματα χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες



βιβλιογραφικές πηγές: (α) Rumyantsev (1967), (β) Quinn (1980), (γ) Bryant (1985), (δ) Halmshaw (1995) και (ε) Πετρόπουλος (2009).

## **3.2 Βασικοί ορισμοί**

### **3.2.1 Γενικά**

Ως ραδιογραφία με τη χρήση φιλμ ορίζεται η φωτογραφική αποτύπωση που παράγεται σε φωτογραφικό φιλμ από φωτόνια, δηλαδή ακτίνες  $-x$  ή ακτίνες  $-γ$ , που έχουν διαπεράσει ένα δοκίμιο. Το φωτογραφικό φιλμ είναι ένα λεπτό φύλλο από οργανικό υλικό πάνω στο οποίο συγκρατείται ένα λεπτό στρώμα από κατάλληλο στερεό διάλυμα φωτοευαίσθητου άλατος βρομιούχου αργύρου. Όταν το φιλμ εκτίθεται σε ακτίνες  $-x$  ή ακτίνες  $-γ$  ή και στο ορατό φως, στο φωτοευαίσθητο άλας πραγματοποιούνται αόρατες φωτοχημικές αλλαγές που ονομάζονται "λανθάνουσα εικόνα". Για να αποκαλυφθεί η λανθάνουσα εικόνα, το φιλμ μετά την έκθεση πρέπει να "εμφανισθεί". Για το σκοπό αυτό εμβαπτίζεται σε κατάλληλο χημικό υγρό, το οποίο αλληλεπιδρά χημικά με όσο από το φωτοευαίσθητο άλας έχει προσβληθεί από τις ακτίνες και εμφανίζει την εικόνα. Η χημική αυτή αλληλεπίδραση πρέπει να διαρκεί πολύ συγκεκριμένο χρόνο και γίνεται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία. Υπέρβαση του χρόνου και κακή τήρηση της θερμοκρασίας έχει ως συνέπεια την καταστροφή του φωτοευαίσθητου άλατος. Η εικόνα αποδίδεται σε αποχρώσεις του γκριζού και είναι μάλιστα τόσο πιο "μαύρη" όσες περισσότερες ακτίνες  $-x$  ή  $-γ$  έχουν αλληλεπιδράσει με το φιλμ. Μετά την εμφάνιση, το φιλμ "ξεπλένεται" σε επόμενο κατάλληλο χημικό υγρό, ώστε να σταματήσει η χημική διαδικασία της εμφάνισης. Στη συνέχεια το φιλμ εμβαπτίζεται σε σταθεροποιητικό υγρό, το οποίο σταθεροποιεί το φωτοευαίσθητο άλας που έχει εμφανισθεί και τέλος "ξεπλένεται" με νερό ή άλλο υγρό ώστε να απομακρυνθούν και όσα τμήματα του άλατος δεν έχουν σταθεροποιηθεί. Το φιλμ μετά και από αυτή τη διαδικασία γίνεται κατάλληλο για μελέτη, επεξεργασία και αρχειοθέτηση. Η διαδικασία εμφάνισης εκτεθέντος φιλμ μπορεί να γίνει είτε χειρωνακτικά είτε σε αυτόματες μονάδες επεξεργασίας. Σήμερα (2009) στις περισσότερες περιπτώσεις, η εμφάνιση του φιλμ γίνεται με αυτόματο τρόπο, με αποτέλεσμα οι χρόνοι επεξεργασίας του κατά τα διάφορα στάδια και η θερμοκρασία των χημικών διαλυμάτων που χρησιμοποιούνται να είναι σταθεροί και ως εκ τούτου να μην επηρεάζουν ως ανεξάρτητες μεταβλητές το αποτέλεσμα της βιομηχανικής ραδιογραφίας.

### 3.2.2 Βασικές ιδιότητες του φιλμ

Διατίθενται από περιορισμένο αριθμό κατασκευαστών διάφοροι ειδικοί τύποι φιλμ, κατάλληλοι για την βιομηχανική Ραδιογραφία. Ως υλικό δεν διαφέρουν σημαντικά από το ασπρόμαυρο φωτογραφικό φιλμ, οι διαστάσεις τους είναι όμως σαφώς μεγαλύτερες και σε μερικές περιπτώσεις φθάνουν να έχουν την επιφάνεια ιατρικής ακτινογραφίας. Τα φιλμ της βιομηχανικής ραδιογραφίας σε αντίθεση με τα φιλμ της αναλογικής φωτογραφίας, είναι συνήθως καλυμμένα με φωτοευαίσθητο άλας και από τις δύο πλευρές τους και ονομάζονται φιλμ "διπλής επικάλυψης" (double coated). Η ύπαρξη δύο επικαλύψεων βελτιώνει την απόδοση του φιλμ και μειώνει το χρόνο έκθεσης. Διατίθενται και φιλμ "μονής επικάλυψης" (single coated), τα οποία χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις.

Όταν μία δέσμη φωτονίων προσβάλλει την επιφάνεια ενός φιλμ, μόλις περί το 1% των φωτονίων που προσπίπτουν αλληλεπιδρούν, λόγω του μικρού πάχους του φιλμ και του μικρού συντελεστή εξασθένισης (υπενθυμίζεται ότι το φιλμ είναι κατασκευασμένο από υλικά με μικρό ατομικό αριθμό). Δεδομένου ότι ο σχηματισμός της ραδιογραφικής εικόνας εξαρτάται κυρίως από αυτό ακριβώς το ποσοστό των φωτονίων που αλληλεπιδρά με το φιλμ, γίνεται κατανοητό ότι το 99% της διαθέσιμης από τα προσπίπτοντα φωτόνια ενέργειας "πάει χαμένη" διότι δεν είναι φωτογραφικά παραγωγική. Προφανώς, οποιοδήποτε διαθέσιμο μέσο ή μέθοδος που θα μετέτρεπε σε φωτογραφικό αποτέλεσμα έστω και μέρος της ενέργειας που χάνεται, είναι πολύ επιθυμητά. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται οι λεγόμενες "ενισχυτικές οθόνες" (intensifying screens) με τη βοήθεια των οποίων το φωτογραφικό αποτέλεσμα από την απευθείας δράση των φωτονίων μπορεί να ενισχυθεί. Η λειτουργία των ενισχυτικών οθονών βασίζεται στο γεγονός ότι ένα μέρος από τα φωτόνια που προσβάλλουν ένα αντικείμενο μπορούν, να ελευθερώσουν ηλεκτρόνια. Αν μάλιστα το αντικείμενο αυτό είναι μεταλλικό και αρκετά λεπτό, τα ηλεκτρόνια αυτά είναι περισσότερα και έχουν την ενεργειακή δυνατότητα να διαφεύγουν από την ύλη του. Μία συνήθης μορφή ενισχυτικών οθονών είναι λεπτά φύλλα μολύβδου πάχους ~0.1 mm, που προσομοιάζουν σε εμφάνιση το αλουμινόχαρτο, τα οποία τοποθετούνται σε επαφή με το ραδιογραφικό φιλμ και στις δύο πλευρές του –εμπρός και πίσω. Ο μολύβδος προτιμάται ως υλικό για ενισχυτικές οθόνες διότι σε αυτόν το φαινόμενο παραγωγής ηλεκτρονίων από

προσπίπτοντα φωτόνια είναι πολύ εντονότερο από άλλα ελαφρύτερα μέταλλα. Έτσι, τα φωτόνια των ακτίνων  $-x$  και των ακτίνων  $-γ$  που φθάνουν στην περιοχή του φιλμ, αλληλεπιδρούν με το μόλυβδο και παράγουν ηλεκτρόνια, τα οποία με τη σειρά τους εκπεμπόμενα από το λεπτό φύλλο, αλληλεπιδρούν με το φιλμ ενισχύοντας το φωτογραφικό αποτέλεσμα. Οι οθόνες αυτές ονομάζονται "οθόνες μολύβδου" (lead screens). Έτσι, οι ενισχυτικές οθόνες μπορούν να βοηθήσουν σημαντικά στην αύξηση της απόδοσης ενός φιλμ. Δευτερευόντως, ένα φύλλο μολύβδου που βρίσκεται σε επαφή με ένα φιλμ απορροφά σημαντικό μέρος από τυχόν ακτινοβολία φωτονίων χαμηλότερης ενέργειας από αυτήν της δέσμης που εξέρχεται από το δοκίμιο. Η κύρια πηγή τέτοιων φωτονίων μειωμένης ενέργειας είναι τα φωτόνια από σκέδαση που παράγονται από την αλληλεπίδραση της δέσμης ακτίνων  $-x$  με ύλη εκτός του φιλμ και των ενισχυτικών οθονών, δηλ. στο ραδιογραφούμενο αντικείμενο ή σε γειτονικά τοιχώματα κλπ. Σημειώνεται ότι τα φύλλα μολύβδου λειτουργώντας με αυτόν τον τρόπο ενισχύουν το φωτογραφικό αποτέλεσμα που οφείλεται στην προσπίπτουσα δέσμη ακτίνων  $-x$ , περισσότερο από το φωτογραφικό αποτέλεσμα που οφείλεται σε φωτόνια από σκέδαση της δέσμης αυτής. Επομένως η επιλεκτική απορρόφηση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας και η επιλεκτική ενίσχυση του φωτογραφικού αποτελέσματος που παράγεται από την προσπίπτουσα δέσμη στην ουσία περιορίζει σημαντικά την καταγραφή των φωτονίων από σκέδαση στο φιλμ βοηθώντας στην καλή ακρίβεια της σχηματιζόμενης ραδιογραφικής εικόνας. Επισημαίνεται ότι η πράξη δείχνει ότι οι οθόνες μολύβδου, τοποθετημένες σε επαφή εμπρός και πίσω από το φιλμ, είναι η πλέον αποτελεσματική τεχνική για τη μείωση των συνεπειών σκέδασης, διότι είναι μέθοδος απλή, τυποποιημένη, οικονομική, και εφαρμόσιμη σχεδόν στο σύνολο των εφαρμογών βιομηχανικής ραδιογραφίας. Σήμερα (2009) σετ φιλμ και οθονών από λεπτά φύλλα μολύβδου δίνονται ως έτοιμο προϊόν συσκευασμένο εν κενώ σε φωτοστεγανό φάκελο κάτω από υπερκαθαρή ατμόσφαιρα.

### **3.2.3 Οπτική πυκνότητα**

Η "οπτική πυκνότητα" (optical density) είναι ένα αδιάστατο ποσοτικό μέτρο των φωτονίων που αλληλεπιδρούν με το φιλμ και κατά συνέπεια το αμαυρώνουν. Η οπτική πυκνότητα υπολογίζεται από την σχέση:

$$D = \log\left(\frac{I'}{I''}\right) \quad (3.1)$$

όπου

D είναι η οπτική πυκνότητα,

I' είναι τα φωτόνια που προσπίπτουν στο φιλμ, και

I'' είναι τα φωτόνια που διαπερνούν το φιλμ χωρίς να αλληλεπιδράσουν με αυτό.

Είναι φανερό ότι επειδή  $I' \gg I''$  μόλις πολύ λίγα I'-I'' φωτόνια αλληλεπιδρούν με το φιλμ και δημιουργούν την ραδιογραφική εικόνα.

### 3.2.4 Μέτρηση οπτικής πυκνότητας

Η οπτική πυκνότητα μπορεί να εκφράζεται ποσοτικά με σχετικό τρόπο ως η έκταση που καταλαμβάνουν τα μαύρα σημεία σε μία επιφάνεια φιλμ (δηλαδή η έκταση του φωτοευαίσθητου υλικού που έχει αντιδράσει με φωτόνια) προς την έκταση που καταλαμβάνουν τα λευκά σημεία στην ίδια επιφάνεια (δηλαδή η έκταση του φωτοευαίσθητου υλικού που δεν έχει αντιδράσει με φωτόνια). Η οπτική πυκνότητα μπορεί επίσης να εκφράζεται ως το ποσοστό του φωτός που μπορεί να διαπεράσει ένα "μαυρισμένο" φιλμ σε σχέση με το φως που θα το περνούσε αν το φιλμ δεν είχε "μαυρίσει". Με βάση αυτή την έκφραση η οπτική πυκνότητα μπορεί να μετράται με τη χρήση του μετρητή οπτικής πυκνότητας (densitometer), μια γραφική αναπαράσταση του οποίου διακρίνεται στο Διάγραμμα 3.1. Για τους σκοπούς της βιομηχανικής ραδιογραφίας, ένα τέτοιο όργανο δεν απαιτείται να έχει καλή ακρίβεια, είναι απαραίτητο όμως να έχει πολύ καλή επαναληψιμότητα.

### 3.2.5 Έκθεση

Από ποσοτική άποψη στη βιομηχανική ραδιογραφία, η απεικόνιση του ραδιογραφούμενου αντικειμένου στο ραδιογραφικό φιλμ, εξαρτάται από την ποσότητα της ακτινοβολίας που αντιδρά με το στρώμα του φωτοευαίσθητου υλικού, δηλαδή στην ουσία από την ποσότητα I'. Η ποσότητα της ακτινοβολίας αυτής εξαρτάται από μια σειρά από παράγοντες όπως την ποσότητα της συνολικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την πηγή (ακτίνες -x ή ακτίνες -γ), την ποσότητα της ακτινοβολίας που προσβάλλει το ραδιογραφούμενο αντικείμενο, το ποσοστό της ακτινοβολίας που διαπερνά το

αντικείμενο αυτό, τη δράση των λεγόμενων ενισχυτικών οθονών αν χρησιμοποιούνται κ.α.

Η συνολική ακτινοβολία (αριθμός φωτονίων) που εκπέμπεται από μία μηχανή παραγωγής ακτίνων -x εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος των ηλεκτρονίων (milliamperage), την υψηλή τάση (kilovoltage) και το χρόνο που λειτουργεί η λάμπα. Όταν όλες οι άλλες συνθήκες παραμένουν σταθερές, (δηλαδή στην ουσία η υψηλή τάση και η απόσταση του εστιακού σημείου από το φιλμ) τότε μία αλλαγή στο milliamperage προκαλεί ανάλογη αλλαγή στο ρυθμό δέσμης φωτονίων (π.χ. σε φωτόνια/sec) που προσβάλλουν το δοκίμιο. Να σημειωθεί ότι, με την οποιαδήποτε αλλαγή μόνο στο milliamperage η ενεργειακή σύνθεση του φάσματος φωτονίων δεν αλλάζει, δεν προστίθενται δηλαδή ή αφαιρούνται μήκη κύματος από το φάσμα, απλά μεταβάλλεται ο ρυθμός εκπομπής φωτονίων σε κάθε μήκος κύματος. Έτσι, δεν παρατηρείται ποιοτική αλλαγή στα εκπεμπόμενα φωτόνια, παρά μόνο ποσοτική και η διαπεραστική ικανότητα των εκπεμπόμενων φωτονίων δεν μεταβάλλεται. Όπως είναι αναμενόμενο η συνολική ακτινοβολία που εκπέμπεται από μία μηχανή παραγωγής ακτίνων -x σε συγκεκριμένες συνθήκες milliamperage και kilovoltage είναι ανάλογη με το χρόνο λειτουργίας. Καταλήγοντας, το συμπέρασμα είναι ότι:

Ο αριθμός φωτονίων πρωτεύουσας δέσμης από μία μηχανή παραγωγής ακτίνων -x, τα οποία προσβάλλουν την επιφάνεια ενός φιλμ, αν το kilovoltage παραμένει ίδιο, η απόσταση του φιλμ από το εστιακό σημείο της μηχανής είναι σταθερή και δεν μεσολαβεί τίποτα μεταξύ φιλμ και μηχανής παραγωγής ακτίνων -x είναι κατευθείαν ανάλογος με το γινόμενο του milliamperage και του χρόνου λειτουργίας. Το γινόμενο αυτό ονομάζεται "έκθεση" (exposure) και συμβολίζεται με E.

$$E = Mt \tag{3.2}$$

όπου

E είναι η έκθεση,

M το ρεύμα (mA), και

t ο χρόνος λειτουργίας (π.χ. σε min)

Προφανώς το milliamperage είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ένταση της ακτινοβολίας που παράγει η μηχανή ακτίνων -x.

Από τη σχέση (3.2) προκύπτει ότι η ποσότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας που προσβάλλει το φιλμ παραμένει σταθερή, αν ισοδύναμα η έκθεση (το γινόμενο) παραμένει σταθερό. Οι επί μέρους τιμές των συνιστωσών αυτού του γινομένου είναι υπό προϋποθέσεις αδιάφορες όσο δεν επηρεάζεται το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού. Η έκθεση σε φωτόνια από μηχανή παραγωγής ακτίνων  $-x$  υπολογίζεται σε μονάδες milliamperere-min (mA-min) ή milliamperere-second (mA-s), χωρίς να απαιτείται ο επιμέρους καθορισμός του ρεύματος στη μηχανή ή του χρόνου λειτουργίας. Δεδομένου ότι ο χρόνος έκθεσης συνδέεται άμεσα με την ποσότητα ρεύματος που χρησιμοποιείται (όσο περισσότερο ρεύμα χρησιμοποιούμε, δηλαδή όσο ψηλότερο milliamperage έχουμε, τόσο λιγότερο χρόνο έκθεσης χρειαζόμαστε), είναι πιο εύχρηστο και σωστό να λαμβάνεται υπ' όψιν μας το γινόμενό τους, παρά η κάθε συνιστώσα του ξεχωριστά.

### 3.2.6 Νόμος του αντιστρόφου τετραγώνου

Όταν το ρεύμα και η τάση σε μία μηχανή παραγωγής ακτίνων  $-x$  διατηρούνται σταθερά, τότε η ένταση της πρωτεύουσας δέσμης φωτονίων που φθάνει στο φιλμ [π.χ. σε φωτόνια/(sec cm<sup>2</sup>)] είναι αντιστρόφως ανάλογη με την απόσταση μεταξύ της μηχανής παραγωγής ακτίνων  $-x$  και του φιλμ. Το φαινόμενο εξηγείται από την οπτική και η εξήγηση ισχύει και για φωτόνια. Τα φωτόνια που εκπέμπονται σημειακά από το εστιακό σημείο και προς όλες τις κατευθύνσεις καλύπτουν όλο και μεγαλύτερη επιφάνεια όσο απομακρύνονται από την πηγή τους. Το σχήμα στο Διάγραμμα 3.1 βοηθάει για την κατανόηση του φαινομένου. Στο σχηματικά παρουσιαζόμενο παράδειγμα τα φωτόνια παράγονται στην άνοδο A μιας μηχανής παραγωγής ακτίνων  $-x$ , περνούν από το διάφραγμα B, και όταν προσβάλλουν το επίπεδο C<sub>1</sub> (σε απόσταση  $r_1 = AC_1 = 30$  cm), καλύπτουν με φωτόνια μία επιφάνεια 24 cm<sup>2</sup>. Όταν τα φωτόνια προσβάλλουν το επίπεδο C<sub>2</sub> (σε διπλάσια απόσταση  $r_2 = AC_2 = 60$  cm), καλύπτουν μία επιφάνεια 96 cm<sup>2</sup>, τέσσερις φορές μεγαλύτερη από την επιφάνεια στο επίπεδο C<sub>1</sub>. Συμπεραίνεται επομένως ότι η ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας στο επίπεδο C<sub>1</sub> είναι τέσσερις φορές περισσότερη από εκείνη στο επίπεδο C<sub>2</sub>. Έτσι, μία ένταση πρωτεύουσας δέσμης κατάλληλη για ραδιογραφία στο επίπεδο C<sub>1</sub>, πρέπει να πολλαπλασιασθεί 4 φορές για να αποδώσει το ίδιο ραδιογραφικό αποτέλεσμα στο επίπεδο C<sub>2</sub> που απέχει από την πηγή δύο φορές από ότι το επίπεδο C<sub>1</sub>. Στην πράξη αυτό γίνεται αυξάνοντας το χρόνο, ή αν διατίθενται μηχανή παραγωγής ακτίνων  $-x$ , αυξάνοντας εναλλακτικά το milliamperage. Το

φαινόμενο αυτό ονομάζεται "νόμος του αντιστρόφου τετραγώνου" (inverse square law) και μπορεί να εκφράζεται αλγεβρικά ως εξής:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (3.3)$$

όπου

$E_1$  και  $E_2$  είναι η έκθεση σε απόσταση  $r_1$  and  $r_2$  αντίστοιχα.

### 3.2.7 Εξασθένηση φωτονίων – Πάχος υποδιπλασιασμού

Όταν μεταξύ της πηγής και του φιλμ μεσολαβήσει το ραδιογραφούμενο αντικείμενο, τότε είναι προφανές ότι το μέγεθος "έκθεση" αλλοιώνεται, διότι από τα φωτόνια της πρωτεύουσας δέσμης που προσβάλλουν ένα αντικείμενο (βλ. και Διάγραμμα 3.2), κάποια το διαπερνούν χωρίς να παρεκκλίνουν και να χάνουν ενέργεια, και κάποια από αυτά αλληλεπιδρούν παράγοντας δευτερογενή φωτόνια τυχαίας κατεύθυνσης ή ακόμα και ηλεκτρόνια. Το φαινόμενο ονομάζεται εξασθένηση της πρωτεύουσας δέσμης. Το ποσοστό των φωτονίων της πρωτεύουσας δέσμης που διαπερνούν το αντικείμενο χωρίς να παρεκκλίνουν και να χάνουν ενέργεια είναι αυτό που τελικά προσβάλλει παραγωγικά το φιλμ και σχηματίζει την ραδιογραφική εικόνα του, είναι δηλαδή τα φωτόνια  $I'$  που προσπίπτουν στο φιλμ. Φυσικά από διατομή σε διατομή του ραδιογραφούμενου αντικειμένου το μέγεθος  $I'$  μπορεί να διαφέρει σημαντικά. Αυτές ακριβώς οι διαφορές που συνήθως οφείλονται σε διαφορές πυκνότητας ή πάχους που υπάρχουν στο ραδιογραφούμενο αντικείμενο, δίνουν διαφορετική πληροφορία στην ραδιογραφική εικόνα και χαρίζουν στην βιομηχανική ραδιογραφία την χρηστική της αξία.

Αν η βιομηχανική ραδιογραφία πραγματοποιούνταν με χρήση δέσμης μονοενεργειακών φωτονίων, και τα ραδιογραφούμενα αντικείμενα ήταν κατασκευασμένα από ένα και μόνο στοιχείο, τότε ο νόμος της εξασθένησης της δέσμης μονοενεργειακών φωτονίων σε ύλη πάχους  $d$ , θα ίσχυε χωρίς αποκλίσεις, ως εξής:

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad (3.4)$$

όπου

$I_0$  είναι η ένταση της δέσμης που προσβάλλει την ύλη στο πάχος "0" (η ένταση της πρωτεύουσας δέσμης που προσβάλλει το φιλμ, αν δεν υπήρχε δοκίμιο),

$I$  η ένταση της δέσμης που έχει διαπεράσει το πάχος " $d$ " χωρίς να αλληλεπιδράσει και

μ συντελεστής (συντελεστής εξασθένισης) που εξαρτάται κυρίως από την ενέργεια των φωτονίων, από την πυκνότητα της ύλης και από τον ατομικό αριθμό της. Επισημαίνεται ότι ο ατομικός αριθμός επηρεάζει το συντελεστή εξασθένισης περισσότερο από τους άλλους δυο παράγοντες μαζί.

Όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια των φωτονίων τόσο μικρότερο είναι το μέγεθος μ και τόσο μεγαλύτερος ο λόγος  $I/I_0$ . Επίσης όσο μεγαλύτερος είναι ο ατομικός αριθμός της ύλης τόσο μεγαλύτερος είναι και ο λόγος  $I/I_0$ . Το μέγεθος μ δίνεται από πίνακες και διαγράμματα για διαφορετικά υλικά και για διαφορετικές ενέργειες φωτονίων.

Με βάση την σχέση (3.4) ως "πάχος υποδιπλασιασμού" (στα αγγλικά Half- value Layer) ορίζεται το πάχος  $d = HVL$  για το οποίο ισχύει:

$$\frac{I_0}{2} = I_0 e^{-\mu(HVL)} \quad (3.5)$$

Επομένως "Half-Value Layer" είναι το πάχος ενός υλικού που θα μειώσει την ένταση μιας συγκεκριμένης ακτινοβολίας συγκεκριμένης μοναδικής ενέργειας φωτονίων κατά 50%. Η ενέργεια της ακτινοβολίας και το υλικό του δοκιμίου επηρεάζουν το πάχος αυτό.

Είναι προφανές ότι:

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (3.6)$$

### 3.2.8 Διάγραμμα έκθεσης

Στην ραδιογραφική πραγματικότητα τα φωτόνια της πρωτεύουσας δέσμης που φθάνουν στο φιλμ διανύοντας την απόσταση από το σημείο παραγωγής τους μέχρι την επιφάνειά του δεν είναι αυτά που υπολογίζονται από το μέγεθος έκθεσης. Οι λόγοι είναι πολλοί και προφανείς. Αναφέρονται οι πλέον σημαντικοί:

- (α) το ραδιογραφούμενο αντικείμενο έχει πάχος
- (β) παρατηρείται το φαινόμενο της σκέδασης, και
- (γ) χρησιμοποιούνται ενισχυτικές οθόνες

Ειδικά για το πάχος του ραδιογραφούμενου αντικειμένου, θα μπορούσε κανείς να ισχυρισθεί, ότι η έκθεση μειώνεται κατά τον νόμο της εξασθένισης [σχέση (3.4)], παρόλαυτά αυτός ο χονδρικός υπολογισμός δεν ισχύει διότι κατά κανόνα το ραδιογραφούμενο αντικείμενο δεν αποτελείται από ένα μόνο στοιχείο, δεν έχει ενιαίο πάχος και τα φωτόνια που προέρχονται από μία μηχανή παραγωγής ακτίνων  $-x$ , είναι



μιας μοναδικής ενέργειας. Είναι επίσης προφανές ότι ραδιογραφούμενα αντικείμενα παρόμοιας σύνθεσης που διαφέρουν κατά το πάχος και μόνο (π.χ. δύο πρίσματα από χάλυβα διαφορετικού πάχους) ή κατά την πυκνότητα και μόνο (π.χ. ατμός και νερό) θα εξασθενήσουν την ακτινοβολία με διαφορετικό τρόπο. Το παχύτερο ή το πυκνότερο θα απορροφήσουν περισσότερα φωτόνια από την πρωτεύουσα δέσμη. Με βάση τις πιο πάνω παρατηρήσεις γίνεται προφανές ότι το μέγεθος έκθεσης δεν είναι αντιπροσωπευτικό του αριθμού των φωτονίων που αλληλεπιδρούν και αμαυρώνουν τελικά το φιλμ. Στη θέση του μεγέθους έκθεσης θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί το μέγεθος οπτική πυκνότητα

Η γραφική αναπαράσταση της σύνδεσης της έκθεσης  $E$  με την οπτική πυκνότητα  $D$  ονομάζεται "διάγραμμα έκθεσης" (exposure diagram). Το διάγραμμα έκθεσης είναι ένα διάγραμμα που δείχνει την σχέση μεταξύ του πάχους του δοκιμίου, του kilovoltage και της έκθεσης για μία ζητούμενη οπτική πυκνότητα. Ένα διάγραμμα έκθεσης είναι γενικά μία επιφάνεια οπτικής πυκνότητας  $D$ , πάνω στην οποία έχουν χαραχθεί γραφικές παραστάσεις που επιτρέπουν τον υπολογισμό της έκθεσης  $E$  που απαιτείται ώστε να επιτυγχάνεται πάντα η ίδια οπτική πυκνότητα  $D$ , για οποιοδήποτε πάχος ραδιογραφούμενου αντικειμένου. Ένα διάγραμμα έκθεσης ισχύει πάντοτε, (i) για ένα τρόπο παραγωγής φωτονίων, (ii) για ένα και μόνο υλικό, (iii) για ένα και μόνο είδος φιλμ, (iv) για μία και μόνο κατάσταση ενισχυτικών οθονών (δηλ. "με οθόνες" ή "χωρίς οθόνες"), (v) για μία και μόνη οπτική πυκνότητα, και τέλος (vi) για μία και μόνη γεωμετρική μορφή ραδιογραφούμενου δοκιμίου, το ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, το οποίο επιπλέον προσβάλλεται κάθετα από τα φωτόνια της πρωτεύουσας δέσμης και ως εκ τούτου το προσβαλλόμενο πάχος είναι σταθερό. Ένα τυπικό διάγραμμα έκθεσης για ακτίνες  $-x$ , για δεδομένη απόσταση πηγής φωτονίων και φιλμ, διακρίνεται στο σχήμα του Διαγράμματος 3.3, όπου ο οριζόντιος άξονας είναι το πάχος χαλύβδινης πλάκας και ο κατακόρυφος άξονας η έκθεση  $E$  σε mA-min. Προφανώς, από αυτό το διάγραμμα έκθεσης προκύπτουν συνήθως πολλές λύσεις για διάφορα kilovoltage ρύθμισης της μηχανής ακτίνων  $-x$ , για να επιτευχθεί η επιθυμητή οπτική πυκνότητα. Επί πλέον, υπό προϋποθέσεις, μέσω ενός διαγράμματος έκθεσης και με χρήση και ορισμένων άλλων πληροφοριών μπορούν να γίνουν υπολογισμοί έκθεσης για συνθήκες και υλικά διαφορετικά από εκείνα για τα οποία χαράχθηκε το διάγραμμα έκθεσης. Στο σαφές απλούστερο διάγραμμα έκθεσης για ακτίνες  $-x$  που διακρίνεται στο σχήμα του

Διαγράμματος 3.4, ο κατακόρυφος άξονας είναι τα kV, ενώ η έκθεση σε mA-min παραμένει σταθερή. Ο λόγος ύπαρξης τέτοιων απλών διαγραμμάτων έκθεσης είναι ότι πολλές φορές σε ένα εργαστήριο βιομηχανικής ραδιογραφίας παρατηρείται σταθερότητα στα εφαρμοζόμενα mA-min.

### 3.2.9 Ταχύτητα του φιλμ

Οι κόκκοι του φιλμ (film grains) είναι τα υλικά που συλλαμβάνουν την εικόνα. Οι κόκκοι του φιλμ αποτελούνται από εξαιρετικά μικρούς κρυστάλλους βρομιούχου αργύρου. Υπάρχουν εκατομμύρια τέτοιοι κόκκοι σε κάθε τετραγωνικό εκατοστό φιλμ. Όσο πιο μεγάλο είναι το μέγεθος του κόκκου τόσο πιο "γρήγορο" θεωρείται το φιλμ, δηλαδή αμαυρώνεται με λιγότερη έκθεση από άλλο με μικρότερους κόκκους. Αυτό συμβαίνει διότι ένα φωτόνιο ακτίνας  $-x$  έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να αλληλεπιδράσει με μεγάλο κόκκο. Περισσότερα φωτόνια ακτίνων  $-x$  χρειάζονται για να αλληλεπιδράσουν με μικρότερους κόκκους. Η ταχύτητα του φιλμ επομένως εξαρτάται από το μέγεθος του κόκκου του φιλμ. Από την άλλη, τα φιλμ αργής ταχύτητας, με λεπτότερο κόκκο είναι μεγαλύτερης διακριτικής ικανότητας. Η βιομηχανία χρησιμοποιεί μία ποικιλία φιλμ με διαφορετικές ταχύτητες για την παραγωγή εικόνας, ανάλογα και με την ποιότητα που επιδιώκεται. Η ταχύτητα του φιλμ είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται ως μέτρο του σχετικού χρόνου έκθεσης που χρειάζονται τα διάφορα φιλμ. Όσο μεγαλύτερος είναι ο κόκκος τόσο μικρότερος χρόνος έκθεσης χρειάζεται για την παραγωγή μιας συγκεκριμένης οπτικής πυκνότητας.

### 3.2.10 Χαρακτηριστική του φιλμ

Η λογαριθμική χαρακτηριστική καμπύλη ενός φιλμ, ή όπως απλά λέγεται στην πράξη η "χαρακτηριστική του φιλμ" (characteristic curve) είναι καμπύλη, η οποία εκφράζει τη σχέση που υπάρχει μεταξύ της έκθεσης και της παραγόμενης οπτικής πυκνότητας. Η χαρακτηριστική του φιλμ ονομάζεται και "σενσιτομετρική καμπύλη" (sensitometric curve) ή ακόμη καμπύλη H-D, προς τιμήν των Hurter και Driffield, που τη χρησιμοποίησαν πρώτοι το 1890. Στο γράφημα του Διαγράμματος 3.5, διακρίνονται οι χαρακτηριστικές από τρία διαφορετικά φιλμ X, Y και Z, όταν αυτά εκτίθενται με ενισχυτικές οθόνες από φύλλα μολύβδου. Τέτοιες καμπύλες μπορούν να παράγονται με σειρά από κατάλληλα πειράματα έκθεσης. Ο οριζόντιος άξονας του γραφήματος είναι ο δεκαδικός λογάριθμος της σχετικής μεταβολής της έκθεσης από πείραμα σε πείραμα. Ο

κατακόρυφος άξονας του γραφήματος είναι η προκύπτουσα οπτική πυκνότητα στο φιλμ. Στα γραφήματα των χαρακτηριστικών των φιλμ προτιμάται να χρησιμοποιείται ως ανεξάρτητη μεταβλητή η σχετική μεταβολή της έκθεσης, προκειμένου να μην υπάρχει προβληματισμός σχετικά με το ποια είναι η αρχική έκθεση αναφοράς και σε ποιες πειραματικές συνθήκες δημιουργήθηκε. Επιπλέον η δεκαδική λογαρίθμιση της σχετικής μεταβολής της έκθεσης συγκεντρώνει επίσης πλεονεκτήματα διότι κυρίως μικραίνει την αντίστοιχη γραμμική κλίμακα. Στη βιομηχανική ραδιογραφία, έχει πολύ περισσότερη αξία η χρήση λόγου δύο διαφορετικών εκθέσεων από τις ίδιες τις τιμές των δύο διαφορετικών εκθέσεων. Δύο εκθέσεις που παρουσιάζουν τον ίδιο λόγο παριστάνονται στο διάγραμμα της χαρακτηριστικής του φιλμ από την ίδια απόσταση πάνω στον άξονα του δεκαδικού λογάριθμου της σχετικής μεταβολής της έκθεσης. Έστω, για παράδειγμα, σχετικές αυξήσεις έκθεσης 1, 5, 2, 10, 30 και 50 φορές. Οι αντίστοιχοι δεκαδικοί λογάριθμοι είναι 0.00, 0.70, 0.30, 1.00, 1.48 και 2.18. Παρατηρείται ότι η σχετική αύξηση  $1 \rightarrow 5$ , αναπαριστάται στο διάγραμμα της χαρακτηριστικής ενός φιλμ από το διάστημα δεκαδικών λογαρίθμων (0.00, 0.70), η σχετική αύξηση  $2 \rightarrow 10$ , αναπαριστάται στο διάγραμμα της χαρακτηριστικής ενός φιλμ από το διάστημα δεκαδικών λογαρίθμων (0.30, 1.00), και η σχετική αύξηση  $30 \rightarrow 50$ , αναπαριστάται στο διάγραμμα της χαρακτηριστικής ενός φιλμ από το διάστημα δεκαδικών λογαρίθμων (0.30, 1.00). Όλα τα διαστήματα των υπόψιν δεκαδικών λογαρίθμων έχουν το ίδιο μήκος (0.70). Διατυπώνονται οι εξής μάλλον εμπειρικοί κανόνες:

(α) Οι κλίσεις και το σχήμα των χαρακτηριστικών των φιλμ εξαρτώνται αρκετά από το χρόνο που διαρκεί η εμφάνιση. Επειδή όμως σήμερα (2009), τα φιλμ εμφανίζονται αυτόματα, ο χρόνος της εμφάνισης διατηρείται σχεδόν σταθερός (και κοντά στον μέγιστο) με αποτέλεσμα η ραδιογραφική εργασία με ένα τύπο φιλμ να γίνεται με συγκεκριμένη αμετάβλητη κλίση και σχήμα χαρακτηριστικής καμπύλης.

(β) Οι κλίσεις και το σχήμα των χαρακτηριστικών των φιλμ είναι γενικά ανεξάρτητες από την ενέργεια των φωτονίων της πρωτεύουσας δέσμης  
αλλά

(γ) Οι θέση της χαρακτηριστικής του φιλμ μετακινείται παράλληλα με τον άξονα του λογαρίθμου της σχετικής αύξησης της έκθεσης αν μεταβληθεί η ενέργεια των

φωτονίων της πρωτεύουσας δέσμης. Αυτό σημαίνει ότι αν αυξηθεί η ενέργεια αυτών των φωτονίων η καμπύλη θα μετακινηθεί αριστερά και αντίστροφα.

(δ) Για την ίδια ενέργεια φωτονίων φιλμ που παρουσιάζουν χαρακτηριστικές καμπύλες σε σχετικά αριστερότερη θέση από άλλα, είναι φιλμ "μεγαλύτερης ταχύτητας", δηλαδή αραιότερων και μεγαλύτερων κόκκων.

### 3.2.11 Αντίθεση εικόνας

Ως "αντίθεση" (contrast) ορίζεται η διαφορά οπτικής πυκνότητας ανάμεσα σε δύο περιοχές της ραδιογραφικής εικόνας που αντιστοιχούν σε γειτονικές τιμές πάχους του δοκιμίου. Η αντίθεση εξαρτάται από δύο παράγοντες: την "αντίθεση του δοκιμίου" (subject contrast) και την "αντίθεση του φιλμ" (film contrast).

Η αντίθεση του φιλμ υπολογίζεται από την κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης του. Εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του φιλμ, το είδος των ενισχυτικών οθονών που έχουν χρησιμοποιηθεί και τον τρόπο εμφάνισης. Ένα φιλμ έχει χαμηλή αντίθεση όταν για μεγάλες μεταβολές της έκθεσης, δεν μεταβάλλεται σημαντικά η παραγόμενη οπτική πυκνότητα (σχεδόν οριζόντια χαρακτηριστική). Ένα φιλμ έχει υψηλή αντίθεση όταν για μικρές μεταβολές της έκθεσης η οπτική πυκνότητα μεταβάλλεται πάρα πολύ (σχεδόν κατακόρυφη χαρακτηριστική). Τα συνήθως χρησιμοποιούμενα φιλμ έχουν περί την τιμή της οπτικής πυκνότητας "2" χαρακτηριστική με ικανοποιητική κλίση περί τις 70°. Αυτό επιτρέπει την σταδιακή –και όχι την απότομη– αμαύρωση του φιλμ με σχετικά μικρές μεταβολές της έκθεσης. Η περιοχή εκθέσεων της χαρακτηριστικής ενός φιλμ για την οποία η κλίση είναι ικανοποιητική ονομάζεται "ωφέλιμο εύρος έκθεσης" (στα αγγλικά exposure latitude).

Ως αντίθεση δοκιμίου ορίζεται ο λόγος των εντάσεων (φωτόνια/cm<sup>2</sup> s) των ακτίνων –x που έχουν περάσει μέσα από δύο διαφορετικά πάχη υλικού του δοκιμίου. Όταν εξετάζεται η αντίθεση του δοκιμίου πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν η ενέργεια της ακτινοβολίας, η σκέδαση και η ένταση της ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται. Ένα δοκίμιο έχει χαμηλή αντίθεση όταν για μεγάλες μεταβολές της έκθεσης, δεν μεταβάλλεται σημαντικά η παραγόμενη οπτική πυκνότητα για γειτονικές τιμές πάχους του δοκιμίου. Ένα δοκίμιο έχει υψηλή αντίθεση όταν για μικρές μεταβολές της έκθεσης η οπτική πυκνότητα μεταβάλλεται πάρα πολύ για γειτονικές τιμές πάχους του δοκιμίου.

Δοκίμια με υψηλή αντίθεση θα παρουσιάζουν καλή ραδιογραφική εικόνα μόνο περί το μέσο πάχος τους. Τα λεπτά άκρα θα παρουσιάζουν μεγάλη σχεδόν όμοια αμαύρωση, ενώ τα παχύτερα σχεδόν όμοια πολύ μικρή. Δοκίμια με χαμηλή αντίθεση θα παρουσιάζουν σχεδόν όμοια αμαύρωση, σε όλα σχεδόν τα πάχη τους. Δοκίμια με καλή αντίθεση είναι εκείνα που δεν παρουσιάζουν τα μειονεκτήματα της υψηλής ή της χαμηλής αντίθεσης.

### **3.2.12 Υψηλή τάση**

Ως υψηλή τάση (kilovoltage) ορίζεται η διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται μεταξύ ανόδου και καθόδου σε μια μηχανή παραγωγής ακτίνων  $-x$  (βλ. και το σχήμα του Διαγράμματος 3.6). Όσο ψηλότερη είναι αυτή η τάση, τόσο πιο μεγάλη είναι η ενέργεια των παραγόμενων φωτονίων και τόσο πιο μεγάλη είναι η διεισδυτικότητα της ακτινοβολίας. Η ενέργεια των φωτονίων ακτίνων  $-x$  που πρέπει να χρησιμοποιηθεί επηρεάζεται επίσης από το υλικό του δοκιμίου που ραδιογραφείται. Το kilovoltage πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά διότι: (α) Η σκέδαση αυξάνεται όσο αυξάνεται η ενέργεια (β) Η αντίθεση μειώνεται όσο αυξάνεται η ενέργεια. Αν χρησιμοποιηθεί υπερβολικά υψηλή τάση (οπότε αντίστοιχα υψηλή ενέργεια ακτινοβολίας) τότε η αντίθεση της εικόνας μειώνεται, διότι οι ακτίνες  $-x$  υψηλής ενέργειας θα διαπεράσουν όλες το δοκίμιο ανεξάρτητα από το πάχος του, και δεν θα μεταφερθεί έτσι πληροφορία στο φιλμ.

### **3.2.13 Ισοδύναμη έκθεση**

Τα διαγράμματα έκθεσης για φωτόνια που παράγονται από μηχανές παραγωγής ακτίνων  $-x$  κατασκευάζονται συνήθως για δύο υλικά αναφοράς:

(α) για το χάλυβα αν η μηχανή  $-x$  λειτουργεί με υψηλή τάση  $\geq 150$  kV, και

(β) για το αλουμίνιο αν η μηχανή  $-x$  λειτουργεί με υψηλή τάση  $\leq 100$  kV.

Παρόλαυτά, τα διάφορα υλικά που πρέπει να ραδιογραφηθούν δεν είναι μόνο χάλυβας ή μόνο αλουμίνιο. Μπορεί να είναι ξεκινώντας από τα ελαφρότερα π.χ. μαγνήσιο, κράματα αλουμινίου, τιτάνιο, ανοξείδωτος χάλυβας, χαλκός, ψευδάργυρος, ορείχαλκος, ζirkόνιο, μόλυβδος και ουράνιο, αν αναφερθούν τα σημαντικότερα. Στον Πίνακα 3.1 διακρίνονται οι προσεγγιστικοί συντελεστές διόρθωσης με τους οποίους πολλαπλασιάζεται το πάχος ενός υλικού για να μας δώσει το ισοδύναμο πάχος του υλικού αναφοράς που αντιστοιχεί σε αυτό. Οι συντελεστές αυτοί επιτρέπουν να συσχετίζονται διαφορετικά υλικά με υλικά

για τα οποία διατίθενται διαγράμματα έκθεσης και έτσι να γίνονται εκτιμήσεις για τις ρυθμίσεις που χρειάζεται η ραδιογραφία των διαφορετικών αυτών υλικών.

Αν ο Πίνακας 3.1 συγκριθεί με τον Πίνακα 3.2, στον οποίο παρουσιάζονται οι λόγοι των πυκνοτήτων των υλικών που αναφέρθηκαν προς τις πυκνότητες του χάλυβα και του αλουμινίου, παρατηρείται ότι οι παρουσιαζόμενοι συντελεστές, έχουν μακρινή μόνο (και όχι προφανή) σχέση με αυτούς τους λόγους. Μπορεί κανείς να πει ότι οι λόγοι πυκνοτήτων "πλησιάζουν" τις τιμές των συντελεστών διόρθωσης μόνο στην περίπτωση ακτίνων  $x$  παραγόμενων από υψηλές τάσεις κυρίως όταν τα εξεταζόμενα υλικά έχουν κοντινές πυκνότητες. Ένα διάγραμμα έκθεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς συντελεστές διόρθωσης αν υπάρχει βεβαιότητα ότι χρησιμοποιείται στις συνθήκες (i), (ii), (iii), (iv), (v), (vi) της παραγράφου 3.2.8, για τις οποίες υπολογίστηκε. Παρόλαυτά υπάρχουν τρόποι που επιτρέπουν να χρησιμοποιείται και για άλλες συνθήκες. Για το σκοπό αυτό μπορούν να υπολογίζονται διάφοροι συντελεστές διόρθωσης, λεπτομερέστερη αναφορά για τους οποίους θα γίνει στο πλαίσιο των μαθημάτων. Ειδικά αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ένα υπάρχον διάγραμμα έκθεσης για άλλο υλικό, πρέπει να χρησιμοποιούνται οι συντελεστές διόρθωσης του Πίνακα 3.1.

#### **3.2.14 Ελάττωμα**

Ως ελάττωμα σε δοκίμιο, μπορεί να ορίζεται κάθε τι το οποίο δεν προβλέπεται να υπάρχει σε αυτό σύμφωνα με το κατασκευαστικό του σχέδιο. Στη ραδιογραφία είναι δυνατόν –κάτω από προϋποθέσεις- να ανιχνεύονται, ελαττώματα που περιέχουν ύλη διαφορετική από το υλικό του υπόλοιπου δοκιμίου, ενώ αυτό δεν προβλέπεται ή ελαττώματα που εν περιέχουν ύλη ενώ θα έπρεπε, δηλαδή κενά ελαττώματα. Τα κενά ελαττώματα ονομάζονται "απώλειες υλικού". Ειδική περίπτωση απώλειας υλικού είναι η "ρωγμή". Τα περισσότερα εγχειρίδια ορίζουν ως ρωγμή το ελάττωμα που έχει μήκος τουλάχιστον τριπλάσιο από το πλάτος του. Για παράδειγμα ένα ελάττωμα με πλάτος 0.009 cm θα χρειαζόταν μήκος τουλάχιστον 0.027cm για να θεωρηθεί ρωγμή.

#### **3.2.15 Εστιακό σημείο**

Όπως διακρίνεται στο Διάγραμμα 3.7 η προσβαλλόμενη από τα ηλεκτρόνια "πραγματική επιφάνεια του εστιακού σημείου" ή "πραγματικό εστιακό σημείο" (actual focal spot), μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη. Παρόλαυτά αν το εστιακό σημείο προσβάλλεται από τα ηλεκτρόνια υπό όσο το δυνατόν μικρότερη γωνία, το μέγεθος της οποίας είναι συνήθως

περίπου  $20^\circ$ , τα παραγόμενα φωτόνια από το εστιακό σημείο εμφανίζονται ότι παράγονται από επιφάνεια σαφώς μικρότερη από την πραγματική επιφάνεια του εστιακού σημείου, η οποία ονομάζεται "δραστική επιφάνεια του εστιακού σημείου" ή "δραστικό εστιακό σημείο" (effective focal spot). Στη συνέχεια αυτού του κειμένου, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά, ως διαστάσεις εστιακού σημείου θα εννοούνται οι διαστάσεις που ορίζουν την δραστική του επιφάνεια. Η εξέταση της γεωμετρίας του Διαγράμματος 3.7 δείχνει ότι αν το πραγματικό εστιακό σημείο παρουσιάζει την επιφάνεια ορθογωνίου παραλληλογράμμου, το δραστικό εστιακό σημείο, ανάλογα με την γωνία προσβολής, μπορεί να παρουσιάζει επιφάνεια τετραγώνου. Το εστιακό σημείο επηρεάζει την ευκρίνεια της εικόνας, με τρόπο που θα αναλυθεί και στο  $10^\circ$  Μάθημα. Όσο μικρότερο είναι το εστιακό σημείο τόσο καλύτερα απεικονίζονται τα όρια του δοκιμίου στη ραδιογραφική εικόνα.

### **3.2.16 Ευκρίνεια**

Ως "ευκρίνεια" (definition) ορίζεται η ευκολία διάκρισης των ορίων του δοκιμίου στην ραδιογραφική εικόνα (είτε αυτά είναι τα εξωτερικά όρια του δοκιμίου είτε άλλα όρια στο εσωτερικό του). Η ευκρίνεια εξαρτάται από τον τύπο των ενισχυτικών οθονών και του φιλμ που έχουν χρησιμοποιηθεί, από την ενέργεια της ακτινοβολίας, τη γεωμετρία του ραδιογραφούμενου δοκιμίου και το εστιακό σημείο (spot size) της πηγής ακτίνων  $x$ . Το κύριο μέτρο της ευκρίνειας είναι η λεγόμενη "γεωμετρική ασάφεια" (geometric unsharpness), ή "παρασκιά" (penumbra) η οποία αναφέρεται στην κατάσταση όπου κάποια γραμμή της ραδιογραφικής εικόνας δεν είναι αρκετά ευκρινής ή είναι θολή. Επειδή αυτό το φαινόμενο επηρεάζει την ποιότητα της εικόνας είναι αναγκαίο να υπολογίζεται και αν είναι δυνατόν να περιορίζεται. Ο τρόπος υπολογισμού της γεωμετρικής ασάφειας ή παρασκιάς εξετάζεται στο  $10^\circ$  Μάθημα.

### **3.2.17 Ραδιογραφική ευαισθησία**

Ως "ραδιογραφική ευαισθησία" (radiographic sensitivity) ορίζεται η μικρότερη λεπτομέρεια που μπορεί να παρατηρηθεί σε μια ραδιογραφία. Με άλλα λόγια η ραδιογραφική ευαισθησία περιγράφει την ελάχιστη ποσότητα πληροφορίας που μπορεί να παρατηρηθεί σε μια ραδιογραφία. Οι παράγοντες που καθορίζουν το επίπεδο της ραδιογραφικής ευαισθησίας είναι δύο: η ευκρίνεια (definition) και η αντίθεση (contrast).

### 3.3 Μάθημα 1<sup>ο</sup>: Εισαγωγή στην παραγωγή ραδιογραφικής εικόνας

Το μάθημα αυτό είναι στην ουσία μία σύνοψη σχετικά με το πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο κώδικας XRSIM για να δημιουργηθεί μια εικονική ραδιογραφία, σύμφωνα και με τα όσα σημειώθηκαν στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Η σύνοψη αυτή είναι χρήσιμη στα βασικά της σημεία και για τη λήψη πραγματικών ραδιογραφιών. Για να παρακολουθήσει κάποιος το μάθημα αυτό, πρέπει να έχει μελετήσει το 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο και να μπορεί να "τρέξει" τον κώδικα XRSIM σε διαθέσιμο υπολογιστή. Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι όπου χρειάζονται να χρησιμοποιηθούν διαστάσεις στον κώδικα, αυτές είναι εξ'ορισμού σε εκατοστά του μέτρου. Οι μονάδες των διαστάσεων μπορούν φυσικά να αλλάξουν είτε σε άλλες του συστήματος SI, είτε σε αντίστοιχες του Αγγλοσαξονικού συστήματος.

1. Ξεκινήστε τον κώδικα π.χ. κάνοντας "κλικ" στο αντίστοιχο εικονίδιο στο μενού "έναρξη" ("start").
2. Αριστερά στην οθόνη θα δείτε το "μενού ελέγχου" που διαθέτει τέσσερις ετικέτες (δηλαδή τέσσερα "παράθυρα ελέγχου"), τις εξής: Δοκίμιο (Sample), Ελάττωμα (Flaw), Ανιχνευτής (Detector), Γεννήτρια (Generator). Δεξιά στην οθόνη θα δείτε μια συμβολική αναπαράσταση της μηχανής παραγωγής ακτίνων -x και του φιλμ, στο λεγόμενο "παράθυρο τριδιάστατης απεικόνισης".
3. Το "παράθυρο ελέγχου δοκιμίου" στο "μενού ελέγχου" θα είναι ενεργό. Στην πάνω αριστερή γωνία της οθόνης κάνοντας "κλικ" στο "File" και μετά στο "Open" εμφανίζεται παράθυρο επιλογής δοκιμίων. Από τα διαθέσιμα δοκίμια κάνοντας "κλικ" στο "stepwedge"<sup>1</sup> και μετά "κλικ" στο "Open", μπορείτε να εισάγετε το δοκίμιο "stepwedge" στο παράθυρο τριδιάστατης απεικόνισης. Το δοκίμιο θα εμφανιστεί κάτω από τη μηχανή ακτίνων -x.

*Σημειώνεται ότι το δοκίμιο stepwedge είναι γενικά ένα δοκίμιο κλίμακος με πολλά "σκαλοπάτια" (steps) διαφορετικού πάχους, έτσι ώστε όταν ραδιογραφείται να παράγονται στο ίδιο φιλμ μία μεγάλη ποικιλία οπτικών πυκνοτήτων. Αξιοποιείται για να αναλυθούν τα χαρακτηριστικά και η ταχύτητα του φιλμ, αλλά και η*

---

<sup>1</sup> Το δοκίμιο "stepwedge" δεν είναι διαθέσιμο στην έκδοση του κώδικα XRSIM που χρησιμοποιείται. Κατασκευάστηκε όμως στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας με τρόπο και απλά εργαλεία που θα περιγραφούν στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.



***ποιότητα και διεισδυτικότητα της ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται για να πραγματοποιηθούν ραδιογραφίες.***

Στην εδώ περίπτωση το δοκίμιο stepwedge έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά (βλ. και το προοπτικό σχέδιο του Διαγράμματος 3.8):

1. 5 "σκαλοπάτια"
  2. συνολικό μήκος 5cm
  3. μέγιστο ύψος 1.8cm
  4. το κάθε "σκαλοπάτι" είναι 0.3cm χαμηλότερο από το προηγούμενο
  5. ελάχιστο ύψος 0.6 cm, και τέλος, όπως παρατηρείται το δοκίμιο σε κάτοψη
  6. το κάθε "σκαλοπάτι" έχει διαστάσεις 1x1cm.
4. Αλλάξτε την όψη που βλέπετε το δοκίμιο επιλέγοντας την κάτοψη. Μελετήστε το εμβαδόν που καταλαμβάνει η προβολή του δοκιμίου στο επίπεδο του φιλμ. Αν το εμβαδόν αυτό δεν καλύπτεται από φιλμ θα πρέπει να επεκτείνετε την επιφάνεια του φιλμ έτσι ώστε το εμβαδόν αυτό να χωρέσει στο επίπεδο που βρίσκεται το φιλμ. Αν το εμβαδόν αυτό καλύπτεται από φιλμ είναι δυνατόν –χωρίς να είναι και απαραίτητο– να περιορίσετε την επιφάνεια του φιλμ έτσι ώστε η έκταση του διαθέσιμου φιλμ να είναι περίπου στις διαστάσεις του εμβადού της προβολής. Για να γίνουν αυτά σε μία από τις γωνίες του κάνετε "κλικ" με το αριστερό πλήκτρο του ποντικιού, κρατήστε το "πατημένο" και σύρετε με το ποντίκι το φιλμ μέχρι να υπερκαλύψει το εμβαδόν της προβολής.
5. Πιθανόν να διαπιστώσετε ότι το δοκίμιο, στην εδώ περίπτωση δηλαδή το δοκίμιο stepwedge, δεν είναι στην επιθυμητή θέση.

***Ως επιθυμητή θέση του δοκιμίου ορίζεται εκείνη κατά την οποία, η διατομή του δοκιμίου που είναι επιθυμητό να μελετηθεί***

***(α) είναι παράλληλη με το επίπεδο του φιλμ***

***(β) προσβάλλεται κατά το δυνατόν κάθετα από τις ακτίνες -x***

Για παράδειγμα, αν χρειάζεται να περιστρέψετε 90 μοίρες το δοκίμιο κατά τον άξονα z, για να το τοποθετήσετε σωστά σε σχέση με τη μηχανή παραγωγής ακτίνων –x και το φιλμ, ενεργείτε ως εξής: Στο "παράθυρο ελέγχου δοκιμίου" κάτω από την ετικέτα "Sample" θα δείτε το πλαίσιο "Sample Operation", στο οποίο θα επιλέξετε "Smpl

Rotate". Στο πλαίσιο που αφορά στον άξονα z πληκτρολογήστε -90 και πατήστε enter. Υπενθυμίζεται ότι όποτε αλλάζετε κάτι σε αυτά τα πλαίσια αλλαγής θέσης πρέπει να πατήσετε enter για να ισχύσει η αλλαγή. Στη συνέχεια επιλέξτε την εμπρόσθια όψη χρησιμοποιώντας τα πλήκτρα αλλαγής όψης στο "παράθυρο τριδιάστατης απεικόνισης". Παρατηρείστε, ότι αν υπάρχει απόσταση φιλμ και δοκιμίου χρειάζεται να μετακινήσετε το δοκίμιο προς τα κάτω για να αποκτήσει επαφή με το φιλμ. Για το σκοπό αυτό κάνετε "κλικ" και σύρετε το δοκίμιο προς τα κάτω με το ποντίκι. Ανάλογα με τις δυνατότητες του υπολογιστή σας το δοκίμιο πιθανόν να μην ακολουθήσει ακαριαία την κίνησή σας, δώστε του τότε τον απαραίτητο χρόνο. Σε κάποιους υπολογιστές το δοκίμιο θα συνεχίσει να κινείται αφού έχετε αφήσει το "κλικ". Με εξάσκηση θα συνηθίσετε την κίνησή του.

6. Πρέπει να επιλέξετε το υλικό από το οποίο θα είναι φτιαγμένο το δοκίμιο stepwedge. Στο κάτω μέρος του "παραθύρου ελέγχου δοκιμίου" θα δείτε το πλαίσιο "Material". Προτείνεται να επιλέξετε ως υλικό του δοκιμίου το τιτάνιο (Ti) και όχι το αλουμίνιο (Al), που είναι η προεπιλογή.
7. Αφού έχετε ρυθμίσει τη θέση, τον προσανατολισμό και το υλικό του δοκιμίου, είναι τώρα δυνατό να εισάγετε ένα ελάττωμα με διαστάσεις και υλικό της επιλογής σας. Για παράδειγμα μπορείτε να τοποθετήσετε ένα ελάττωμα στο πρώτο (μεγαλύτερο) "σκαλοπάτι" του stepwedge, που έχει πάχος 1.8 cm. Προτείνεται πρώτα να κάνετε το δοκίμιο διαφώτιστο έτσι ώστε να βλέπετε που θα τοποθετήσετε το ελάττωμα. Για το σκοπό αυτό επιλέξτε "display" στο κάτω μέρος του "παραθύρου ελέγχου δοκιμίου" και κάνετε "κλικ" στην επιλογή "Translucent". Παρατηρήστε ότι το δοκίμιο άλλαξε χρώμα (για να συμβολίζεται το διαφώτιστο). Για το ελάττωμα κάνετε "κλικ" στην ετικέτα "Flaw" στο "μενού ελέγχου" για να ανοίξει το "παράθυρο ελέγχου ελαττώματος" και μετά επιλέξτε "File" και "Open". Στο παράθυρο επιλογών αρχείων σφαλμάτων που εμφανίζεται επιλέξτε τη σφαίρα (sphere.flw) και μετά "Open". Μία σφαίρα θα εμφανιστεί τότε πάνω από το δοκίμιο stepwedge. Έστω ότι με το ελάττωμα θέλετε να αναπαραστήσετε μία απώλεια υλικού 10%. Το πρώτο "σκαλοπάτι" του stepwedge έχει πάχος 1.8 cm οπότε η σφαίρα - ελάττωμα θα πρέπει να έχει διάμετρο 0.18 cm. Για την προσαρμογή των διαστάσεων του σφαιρικού ελαττώματος στο επιθυμητό μέγεθος, στο πλαίσιο "Flaw Operation" επιλέξτε "Flaw

Scale". Στο πλαίσιο που αντιστοιχεί στον άξονα x εισάγετε 0.18 και πατήστε enter. Κάνετε το ίδιο για τους ψ και z άξονες. Θα παρατηρήσετε ότι το μέγεθος του ελαττώματος έχει μειωθεί σημαντικά. Κάνετε "κλικ" πάνω στο ελάττωμα και σύρετέ το μέχρι να το φέρετε στο κέντρο βάρους του πρώτου "σκαλοπατιού" του δοκιμίου stepwedge. Στο κάτω μέρος του "παραθύρου ελέγχου ελαττώματος" βρίσκεται το πλαίσιο "Material". Κάνετε "κλικ" για να εμφανιστούν τα υλικά από τα οποία μπορεί να αποτελείται το ελάττωμα. Επιλέξτε τον αέρα για να αναπαραστήσετε μία σφαιρική φυσαλίδα διαμέτρου 0.18 cm.

8. Σε αυτό το βήμα μπορείτε να επιλέξετε το φιλμ που θα εκθέσετε. Για το σκοπό αυτό στο "μενού ελέγχου" κάνετε "κλικ" στην ετικέτα "Detector" και θα εμφανιστεί το "παράθυρο ελέγχου ανιχνευτή". Στο πάνω μέρος του παραθύρου αυτού θα δείτε ότι είναι επιλεγμένο ένα φιλμ D2. Κάνετε "κλικ" πάνω στην επιλογή D2 και δεξιά στην οθόνη θα ανοίξει ένα παράθυρο με τον κατάλογο από τα διαθέσιμα φιλμ. Προτείνεται να επιλέξετε φιλμ D5 κάνοντας "κλικ" πάνω του. Πιο κάτω στο "παράθυρο ελέγχου ανιχνευτή" θα βρείτε το πλαίσιο "Detector distance(cm)" για τη ρύθμιση της απόστασης φιλμ – μηχανής παραγωγής ακτίνων -x. Η προεπιλογή είναι 100 cm.

***Η συνήθης απόσταση φιλμ – μηχανής παραγωγής ακτίνων -x, στη βιομηχανική ραδιογραφία κυμαίνεται μεταξύ 60 και 100 cm (συνήθως είναι 70 cm).***

9. Αλλάξτε την απόσταση φιλμ – μηχανής παραγωγής ακτίνων -x σε 70 cm, πληκτρολογώντας "70" στο πλαίσιο "Detector distance(cm)" και πατώντας enter. Φυσικά αν η απόσταση φιλμ – μηχανής παραγωγής ακτίνων -x γίνει πολύ μικρή (μετακινηθεί δηλαδή η μηχανή πολύ πιο κοντά στο δοκίμιο stepwedge) είναι προφανές ότι η δέσμη των ακτίνων -x που προσβάλλει το δοκίμιο θα έχει πολύ μικρότερη διατομή.
10. Κάνετε "κλικ" στο "μενού ελέγχου" στην ετικέτα "Generator" για να εμφανιστεί το "παράθυρο ελέγχου μηχανής". Κάνετε "κλικ" στο πλαίσιο "Generator Type" για να εμφανιστεί ο κατάλογος με τις διαθέσιμες μηχανές. Αφήστε την προεπιλεγμένη μηχανή HOMX160. Προχωρώντας προς τα κάτω στο παράθυρο θα δείτε ότι μπορείτε να ρυθμίσετε την τάση (kilovoltage), την ένταση (miliampere) και το χρόνο

έκθεσης (exposure time). Οι ρυθμίσεις είναι περιορισμένες όπως και σε μία πραγματική μηχανή.

***Η μέγιστη τάση μιας μηχανής παραγωγής ακτίνων -x περιορίζεται από τις δυνατότητές της. Η μέγιστη ένταση επίσης δεν μπορεί να είναι διαθέσιμη για όλες τις τάσεις.***

Ρύθμιση στα 1 ή 2 miliampere θα είναι συχνή στην προσομοίωση. Ο χρόνος έκθεσης μετράται σε δευτερόλεπτα. Κάνετε τις ακόλουθες ρυθμίσεις, στα κατάλληλα πλαίσια στο "παράθυρο ελέγχου μηχανής": 180 kV, 2 mA, 172 s, πατώντας enter μετά από κάθε αλλαγή.

11. Αφού έχουν επιλεγθεί τα χαρακτηριστικά του το δοκιμίου, του ελαττώματος, του φιλμ και της μηχανής παραγωγής ακτίνων -x, πρέπει να παραχθεί ένας διδιάστατος χάρτης πάχους του δοκιμίου. Αυτό γίνεται κάνοντας "κλικ" στο πλήκτρο συντόμευσης πάνω από την ετικέτα του ανιχνευτή και δεξιά του πλήκτρου συντόμευσης για την διαφώτιστη απεικόνιση του δοκιμίου. Όταν κάνετε αυτό το "κλικ" θα εμφανιστεί ένα παράθυρο, στο οποίο θα πρέπει να επιλέξετε το όνομα με το οποίο θα αποθηκευτεί το αρχείο διδιάστατου χάρτη πάχους δοκιμίου. Αφήστε το στην προεπιλογή xyz. Αφού πατήσετε "OK" θα εμφανιστεί ο διδιάστατος χάρτης πάχους. Ουσιαστικά είναι μία διδιάστατη εικόνα που παρουσιάζει με διαφορετικό χρώμα τα διάφορα πάχη υλικού που θα διαπεράσει η προσπίπτουσα πρωτεύουσα δέσμη ακτίνων -x. Παρατηρήστε ότι στον χάρτη αυτό το ελάττωμα που επιλέχθηκε φαίνεται σαν ένας κύκλος κόκκινου χρώματος.
12. Στο κάτω μέρος του "παραθύρου ελέγχου μηχανής" υπάρχει το πλαίσιο "Check exposure". Με αυτή τη λειτουργία ο εξομοιωτής XRSIM επιτρέπει να ελέγξετε προκαταρκτικά και προσεγγιστικά την οπτική πυκνότητα (density) της ραδιογραφικής εικόνας που θα παραχθεί, στο σημείο που επιθυμείτε, χωρίς να τρέξετε στην ουσία τον κώδικα. Μπορείτε να χρησιμοποιήσετε αυτό το χαρακτηριστικό κάνοντας "κλικ" στις διαθέσιμες επιλογές στο κάτω μέρος του παραθύρου ή μπορείτε να χρησιμοποιήσετε πλήκτρα συντόμευσης για τον προκαταρκτικό έλεγχο της οπτικής πυκνότητας που βρίσκονται στο άνω μέρος του παραθύρου που περιέχει το δισδιάστατο χάρτη πάχους. Όποιο από τα προηγούμενα

χρησιμοποιήσετε το αποτέλεσμα θα είναι να εμφανισθεί ένα παράθυρο με εκθέσεις και οπτικές πυκνότητες για το σημείο που επιλέξατε να γίνει ο έλεγχος. Σε αυτόν το παράθυρο η πρώτη στήλη απεικονίζει το γινόμενο χρόνου έκθεσης του φιλμ και έντασης, δηλαδή την έκθεση (exposure) σε mAs. Αν υποθεθεί ότι έχετε επιλέξει να ελέγξετε την οπτική πυκνότητα στο κέντρο του ελαττώματος (δηλ. "OnFlawCenter"), η δεύτερη στήλη περιέχει τις οπτικές πυκνότητες στο σημείο του ελέγχου και η τρίτη στήλη περιέχει τις υποθετικές οπτικές πυκνότητες στο ίδιο σημείο αν δεν υπήρχε ελάττωμα. Προφανώς αν δεν έχετε επιλέξει έλεγχο στη θέση του ελαττώματος (δηλ. έχετε επιλέξει έλεγχο "OnMouse"), οι δύο αυτές στήλες (δεύτερη και τρίτη) θα ταυτίζονται. Η τέταρτη και τελευταία στήλη απεικονίζει την αντίθεση μεταξύ των δύο προηγούμενων, αν υπάρχει. Επίσης στο παράθυρο υπάρχουν και τρεις γραμμές. Η μεσαία γραμμή περιέχει τις οπτικές πυκνότητες για την έκθεση (exposure) που έχετε κάνει τον έλεγχο. Η πρώτη γραμμή περιέχει τις αντίστοιχες πληροφορίες για το ¼ της έκθεσης που έχετε επιλέξει. Τέλος η τρίτη γραμμή περιέχει πληροφορίες για τετραπλάσια έκθεση από αυτήν που έχετε τώρα. Στην περίπτωση του παραδείγματος με δοκίμιο stepwedge και έκθεση με χαρακτηριστικά: 180 kV, 2 mA, 172 s, σε φιλμ D5, παρατηρείστε ότι ο προκαταρκτικός έλεγχος αποδίδει οπτική πυκνότητα περίπου "1" για το "σκαλοπάτι" του δοκιμίου που έχει το ελάττωμα. Δεδομένου ότι:

***Η οπτική πυκνότητα είναι ανάλογη της έκθεσης αρκεί η ένταση σε mA ή ο χρόνος σε s ή το γινόμενό τους σε mAs, να μην μεταβάλλονται πάνω από 4 φορές προς τα πάνω ή προς τα κάτω.***

ανεβάστε (δηλ. διπλασιάστε) π.χ. το χρόνο έκθεσης στα 344 δευτερόλεπτα και ελέγξετε προκαταρκτικά την οπτική πυκνότητα. Παρατηρήστε ότι το αποτέλεσμα είναι πολύ κοντά στο διπλάσιο δηλ. το "2". Για το ίδιο αποτέλεσμα μπορείτε να αυξήσετε τα mA, αν φυσικά το επιτρέπει ο τύπος της μηχανής ακτίνων -x που έχετε επιλέξει.

13. Για να παράγετε την προσομοίωση της ραδιογραφίας κάνετε "κλικ" στο πλήκτρο συντόμευσης "Run XRS" δίπλα στο πλήκτρο συντόμευσης που παράγει το διδιάστατο χάρτη πάχους. Στο παράθυρο που ανοίγει η προεπιλογή του ονόματος του αρχείου στο οποίο είναι δυνατόν να σωθεί η παραγόμενη εικόνα της ραδιογραφίας

είναι xyz. Για να μην αντικατασταθεί το αρχείο αυτό την επόμενη φορά που θα τρέξετε τον κώδικα πρέπει να αλλάξετε το όνομα. Για αυτό το παράδειγμα δώστε π.χ. νέο όνομα το xy1. Στη συνέχεια κάνετε κλικ στο "OK" για να γίνει η εξομοίωση. Όταν τελειώσει θα εμφανιστεί ένα παράθυρο με την προσομοίωση της ραδιογραφίας.

14. Μπορείτε να πάρετε μια εικόνα της οπτικής πυκνότητας κατά μήκος ενός οριζόντιου ή κατακόρυφου άξονα επί της ραδιογραφικής εικόνας. Ανοίξτε ένα αρχείο εικόνας ραδιογραφίας επιλέγοντας "File" και μετά "Open". Στο πλαίσιο "Files of type" επιλέξτε ως τύπο αρχείων "density image". Θα εμφανιστεί ένας κατάλογος αρχείων. Επιλέξτε το xy1 του παραδείγματος και ανοίξτε το. Στο άνω μέρος του κυρίως παραθύρου του κώδικα επιλέξτε το μενού "Image" μετά "Analyze" και "Slice". Θα εμφανιστεί το παράθυρο "Slice" Στο κάτω μέρος αυτού του παραθύρου υπάρχουν οι επιλογές "Horizontal", "Vertical" και "Done". Επιλέξτε "Horizontal" και κάνετε "κλικ" οπουδήποτε πάνω στη ραδιογραφία. Κρατώντας το "κλικ" πατημένο εξερευνήστε με το ποντίκι τη ραδιογραφία και παρατηρήστε τις οπτικές πυκνότητες που απεικονίζονται γραφικά σε κάθε θέση, κατά μήκος ενός οριζόντιου άξονα που περνάει από αυτή τη θέση. Παρατηρήστε επίσης ότι το παράθυρο "Slice" παρέχει τη θέση (απεικονίζεται ως ένα μικρό "x") που βρίσκεται ο δείκτης του ποντικιού, και αναφέρει τις συντεταγμένες της και την οπτική πυκνότητα στο σημείο εκείνο. Τοποθετήστε το δείκτη του ποντικιού πάνω στο ελάττωμα και παρατηρήστε την αύξηση στην οπτική πυκνότητα. Αλλάξτε τη ρύθμιση της διεύθυνσης του άξονα που αναλύεται η οπτική πυκνότητα σε "Vertical" και επαναλάβετε τα παραπάνω. Μπορείτε να κλείσετε το παράθυρο "Slice" κάνοντας κλικ στο "Done".

15. Για ανασκόπηση και σύνοψη του μαθήματος, να επιφέρετε αλλαγές στο ελάττωμα, στο δοκίμιο, στο φιλμ και σε διάφορες συναφείς ρυθμίσεις.

A. *Αλλαγές στο ελάττωμα:* Επιστρέψτε στο "παράθυρο ελέγχου ελαττώματος" και αλλάξτε το υλικό του ελαττώματος από αέρα (δηλ. στην ουσία ελάττωμα φυσαλίδα) σε μόλυβδο (Pb). Τρέξτε την προσομοίωση και στην προκύπτουσα εικόνα παρατηρήστε την αλλαγή στην οπτική πυκνότητα του ελαττώματος.

B. *Αλλαγές στο δοκίμιο:* Αφήστε ως υλικό του ελαττώματος το μόλυβδο. Στο "παράθυρο ελέγχου δοκιμίου" αλλάξτε το υλικό του δοκιμίου stepwedge από

τιτάνιο σε αλουμίνιο (Al) και τρέξτε την εξομοίωση. Παρατηρήστε την αλλαγή στην οπτική πυκνότητα της εικόνας, η εικόνα γίνεται "κατάμαυρη".

- C. *Αλλαγές στο φιλμ:* Για υλικό δοκιμίου Αλουμίνιο και φιλμ D2, πηγαίνετε στο "παράθυρο ελέγχου μηχανής" και εισάγετε τις ακόλουθες ρυθμίσεις πατώντας enter μετά από κάθε αλλαγή 100 kV, 2 mA, 40 sec. Ελέγξτε την οπτική πυκνότητα με την επιλογή "Check exposure" και θα παρατηρήσετε ότι έχει την τιμή περίπου  $D=0.5$  για το παχύτερο "σκαλοπάτι" του δοκιμίου stepwedge. Τρέξτε τον κώδικα για παραγωγή ραδιογραφίας. Στο άνω μέρος του κυρίως παραθύρου επιλέξτε το μενού "Image" μετά "Analyze" και "Slice". Επιλέξτε οριζόντια επιθεώρηση και εξερευνήστε τις διάφορες οπτικές πυκνότητες πάνω στη ραδιογραφία. Παρατηρήστε ότι οι οπτικές πυκνότητες των λεπτότερων "σκαλοπατιών" είναι φυσικά πολύ μεγαλύτερες από εκείνες των παχύτερων "σκαλοπατιών". Όταν τελειώσετε την επιθεώρηση κλείστε τα παράθυρα "Slice" και της ραδιογραφίας. Για να επιτύχετε ραδιογραφική εικόνα οπτικής πυκνότητας  $D=1$  στο παχύτερο "σκαλοπάτι" έχετε στην ουσία μία από δύο επιλογές:

(α) να ραδιογραφήσετε με ρυθμίσεις 100 kV, 2 mA, 100 sec ή

(β) να αλλάξετε είδος φιλμ, πηγαίνοντας σε ένα φιλμ δηλαδή διαφορετικής όπως λέμε ταχύτητας, που παράγει μεγαλύτερη οπτική πυκνότητα με την έκθεση στις ρυθμίσεις 100 kV, 2 mA, 40 sec.

Για το (β) πηγαίνετε στο "παράθυρο ελέγχου ανιχνευτή", κάνετε "κλικ" στο επιλεγμένο D2 φιλμ και στο παράθυρο που ανοίγει μπορείτε να δείτε τις υπόλοιπες διαθέσιμες επιλογές για φιλμ. Επιλέξτε το D4. Τρέξτε την προσομοίωση και παρατηρήστε την αλλαγή των οπτικών πυκνοτήτων στην προκύπτουσα εικόνα. Θα πρέπει το παχύτερο "σκαλοπάτι" του δοκιμίου stepwedge να έχει αποκτήσει οπτική πυκνότητα  $D=1$ .

- D. *Αλλαγή απόστασης φιλμ – εστιακού σημείου:* Επιστρέψτε στο φιλμ D2 και τις ρυθμίσεις 100 kV, 2 mA, 40 sec. Στο "παράθυρο ελέγχου ανιχνευτή" στο πλαίσιο "Detector distance" αλλάξτε την απόσταση σε 40 cm (από 70 cm). Πατήστε enter και τρέξτε την προσομοίωση. Απαιτείται να παράγετε νέο δισδιάστατο χάρτη

πάχους. Αφού το κάνετε στη συνέχεια τρέξτε τον κώδικα. Θα παρατηρήσετε σημαντική αύξηση της οπτικής πυκνότητας.



## 3.4 Μάθημα 2<sup>ο</sup>: Ιδιότητες του φιλμ

### 3.4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το μάθημα θα αξιολογηθεί η σχέση της ταχύτητας ενός φιλμ με την έκθεση. Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθεί η λεγόμενη χαρακτηριστική καμπύλη του φιλμ (sensitometric curve) και θα γίνουν υπολογισμοί χρησιμοποιώντας διαφορετικά φιλμ με διαφορετικές χαρακτηριστικές, έτσι ώστε να επιλέξετε το κατάλληλο φιλμ για δεδομένη έκθεση ή αντίστροφα. Δεν έχει πολύ σημασία ο κατασκευαστής του φιλμ, αφού όλα σχεδόν τα φιλμ βιομηχανικής ραδιογραφίας λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο. Καλό είναι να μελετήσετε εγχειρίδια από διάφορα φιλμ διαφορετικών κατασκευαστών πριν προχωρήσετε στο μάθημα.

### 3.4.2 Στόχος

Στόχοι του 2<sup>ου</sup> μαθήματος είναι:

- (α) η κατανόηση των ιδιοτήτων των φιλμ βιομηχανικής ραδιογραφίας
- (β) η ερμηνεία των χαρακτηριστικών καμπυλών για διάφορα φιλμ, και
- (γ) η κατανόηση του τρόπου αλλαγής τύπου φιλμ, χωρίς να μεταβάλλεται η οπτική πυκνότητα της ραδιογραφίας

### 3.4.3 Χρήση χαρακτηριστικής

Η χαρακτηριστική του φιλμ μπορεί να χρησιμοποιείται στη ραδιογραφία για τη λύση διαφόρων ποσοτικών προβλημάτων που προκύπτουν. Συνήθως χρησιμοποιούνται χαρακτηριστικές προετοιμασμένες από τον κατασκευαστή

#### *Εφαρμογή 1: Ίδιο φιλμ – αλλαγή οπτικής πυκνότητας*

Έστω ραδιογραφία που γίνεται με το φιλμ τύπου Z (βλ. και Διάγραμμα 3.5) με έκθεση 12 mAmip, επιτυγχάνοντας οπτική πυκνότητα 0.8. Να υπολογισθεί η έκθεση που απαιτείται ώστε η οπτική πυκνότητα να αυξηθεί σε 2.0. Είναι:

$$\text{για } D = 2.0, \log E_{2.0} = 1.62$$

$$\text{για } D = 0.8, \log E_{0.8} = 1.00$$

Επομένως:

$$\log E_{2.0} - \log E_{0.8} = 0.62$$

Και:

$$10^{0.62} = 4.2$$

Έτσι, αν η έκθεση των 12 mAmin πολλαπλασιασθεί με 4.2 τότε θα γίνει 50 mAmin. Για τη νέα αυτή έκθεση η παραγόμενη οπτική πυκνότητα θα είναι 2.0.

**Εφαρμογή 2: Ίδια οπτική πυκνότητα – αλλαγή φιλμ**

Έστω ραδιογραφία που γίνεται με το φιλμ τύπου Z (βλ. και Διάγραμμα 3.5) με έκθεση 50 mA-min, επιτυγχάνοντας οπτική πυκνότητα 2.0. Να υπολογισθεί η έκθεση που απαιτείται ώστε αντί για φιλμ τύπου Z να χρησιμοποιείται φιλμ τύπου X και να επιτυγχάνεται πάλι οπτική πυκνότητα 2.0. Είναι:

$$\text{για } D = 2.0 \text{ και φιλμ X, } \log E_X = 1.91$$

$$\text{για } D = 2.0 \text{ και φιλμ Z, } \log E_Z = 1.62$$

Επομένως:

$$\log E_X - \log E_Z = 0.29$$

Και:

$$10^{0.29} = 1.95$$

Έτσι, αν η έκθεση των 50 mA-min πολλαπλασιασθεί με 1.95 τότε θα γίνει 97.5 mA-min. Για τη νέα αυτή έκθεση και φιλμ τύπου X, η παραγόμενη οπτική πυκνότητα θα είναι 2.0.

**Εφαρμογή 3: Αλλαγή φιλμ – αλλαγή οπτικής πυκνότητας**

Έστω ραδιογραφία που γίνεται με το φιλμ τύπου X (βλ. και Διάγραμμα 3.5) με έκθεση 20 mA-min, επιτυγχάνοντας οπτική πυκνότητα 1.0. Να υπολογισθεί η έκθεση που απαιτείται ώστε αντί για φιλμ τύπου X να χρησιμοποιείται φιλμ τύπου Y και να επιτυγχάνεται οπτική πυκνότητα 2.5. Είναι:

$$\text{για } D = 1.0 \text{ και φιλμ X, } \log E_X \approx 1.58$$

$$\text{για } D = 2.5 \text{ και φιλμ Y, } \log E_Y \approx 2.62$$

Επομένως:

$$\log E_Y - \log E_X \approx 1.04$$

και:

$$10^{1.04} = 10.96$$

Έτσι, αν η έκθεση των 20 mAmin πολλαπλασιασθεί με 10.96 τότε θα γίνει 220 mAmin. Για τη νέα αυτή έκθεση και φιλμ τύπου Y, η παραγόμενη οπτική πυκνότητα θα είναι 2.5.

### 3.4.4 Άσκηση προσομοίωσης

Χρησιμοποιείτε τον κώδικα XRSIM για να κατανοήσετε την χρήση της χαρακτηριστικής των φιλμ πραγματοποιώντας την παρακάτω άσκηση.

1. Παρατηρήστε τις χαρακτηριστικές καμπύλες από φιλμ του Διαγράμματος 3.9.
2. Παρατηρήστε τον Πίνακα 3.3 στον οποίο παρουσιάζονται συντελεστές διόρθωσης έκθεσης ως προς φιλμ αναφοράς το D-7, προκειμένου να μπορούν να γίνονται ισοδύναμης οπτικής πυκνότητας ραδιογραφίες του ίδιου δοκιμίου με άλλα φιλμ.
3. Στον κώδικα XRSIM επιλέξτε το δοκίμιο `stepwedge.stl` (το οποίο αναφέρεται σε παράδειγμα χυτού δοκιμίου) και επιλέξτε αλουμίνιο για υλικό. Στο κάτω μέρος του "παραθύρου ελέγχου δοκιμίου" επιλέξτε την ετικέτα "Display" και κάνετε "κλικ" στο "Translucent" για να απεικονίζεται το δοκίμιο διαφώτιστο και να μπορείτε έτσι να παρατηρείτε τη θέση του ελαττώματος. Από το "πaráθυρο ελέγχου ελαττώματος" επιλέξτε, κατά τον γνωστό τρόπο, σφαίρα ως ελάττωμα με υλικό τον αέρα. Τοποθετήστε το ελάττωμα στο μέσο του ύψους του στο μεσαίο "σκαλοπάτι" του δοκιμίου, που από την κατασκευή του έχει ύψος 12 mm. Στο "πaráθυρο ελέγχου ανιχνευτή" επιλέξτε φιλμ D-7 και απόσταση 70 cm. Χρησιμοποιήστε μηχανή HOMX160 και με ρυθμίσεις, 100 kV, 1 mA και 60 sec θα πρέπει να πάρετε οπτική πυκνότητα περίπου 2.5 γύρω από το ελάττωμα. Χρησιμοποιήστε για την διαπίστωση αυτή την επιλογή "Slice" για να δείτε την οπτική πυκνότητα κατά μήκος κάποιου άξονα της εικόνας. Μην ξεχνάτε ότι για να δουλέψουν όλα αυτά, θα πρέπει να ελέγξετε / προσαρμόσετε, αν χρειάζεται, τις διαστάσεις του φιλμ στο δοκίμιο και τις διαστάσεις του ελαττώματος, ώστε αυτό να μην είναι πολύ μικρό ή πολύ μεγάλο σε σχέση με το δοκίμιο. Για παράδειγμα στην εδώ περίπτωση η σφαίρα ελάττωμα μπορεί να ρυθμισθεί με διάμετρο 3 mm.
4. Χρησιμοποιώντας τις χαρακτηριστικές καμπύλες για φιλμ του κατασκευαστή AGFA του Διαγράμματος 3.9 υπολογίστε, σύμφωνα με όσα σημειώθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, τι πρέπει να αλλάξετε για να αυξηθεί η οπτική πυκνότητα από το 2.5 στο 3.5. Παράγετε μια νέα ραδιογραφική εικόνα με τον κώδικα XRSIM για να επιβεβαιώσετε τον υπολογισμό σας. Συμφωνούν τα αποτελέσματα των υπολογισμών σας με εκείνα της προσομοίωσης<sup>2</sup>; Αν όχι γιατί;

5. Αλλάξτε το φιλμ σε D-5 και κάνετε τους κατάλληλους υπολογισμούς για να υπολογίσετε τις ρυθμίσεις που χρειάζονται για να έχουμε εικόνα με οπτική πυκνότητα 3.5 γύρω από το ελάττωμα. Παράγετε μια νέα ραδιογραφική εικόνα με τον κώδικα XRSIM για να επιβεβαιώσετε τον υπολογισμό σας. Συμφωνούν τα αποτελέσματα των υπολογισμών σας με εκείνα της προσομοίωσης<sup>2</sup>; Αν όχι γιατί;
6. Ο Πίνακας 3.3 δίνει μια προσεγγιστική εικόνα για τις σχέσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών καμπυλών των διαφόρων φιλμ ενός κατασκευαστή, σε συγκεκριμένα kV. Στην περίπτωση του Πίνακα 3.3 ως φιλμ αναφοράς έχει επιλεγεί το D-7. Για παράδειγμα αν έχετε εκθέσει ένα φιλμ D-7 σε 100 kV, για να πάρετε την ίδια οπτική πυκνότητα με ένα φιλμ D-5, θα πρέπει να το εκθέσετε περίπου 1.8 φορές περισσότερο. Παρατηρήστε ότι οι συντελεστές διόρθωσης αλλάζουν όταν αλλάζει η τάση. Ερμηνεύσατε γιατί συμβαίνει αυτό<sup>2</sup>.
7. Χρησιμοποιώντας και πάλι τις χαρακτηριστικές καμπύλες για AGFA φιλμ του Διαγράμματος 3.9, συγκρίνετε δύο φιλμ, τα D-4 και D-7. Αν έχετε οπτική πυκνότητα 2 όταν εκθέτετε φιλμ D-4 για 43 mA-sec στα 100 kV, ποια θα ήταν η σωστή έκθεση για την ίδια οπτική πυκνότητα με φιλμ D-7<sup>2</sup>; Συμφωνεί ο λόγος των εκθέσεων με τις πληροφορίες που σας δίνει ο Πίνακας 3.3<sup>2</sup>;

#### 3.4.5 Εργαστηριακή άσκηση

Αυτή η εργαστηριακή άσκηση<sup>3</sup> απαιτεί τη χρήση μηχανής παραγωγής ακτίνων -x. η μηχανή αυτή είναι τύπου ERESKO 42 MF3 της εταιρείας κατασκευής GE Inspection Technologies. Θα πρέπει να έχετε διδαχθεί πως να χειρίζεστε με ασφάλεια τον εξοπλισμό αυτό, ή να υπάρχει εξουσιοδοτημένος για αυτό επιβλέπων.

1. Παράγετε ραδιογραφία ενός χαλύβδινου δοκιμίου κλίμακος (stepwedge) πάχους π.χ. 2.5 έως 12.5 mm χρησιμοποιώντας τον εξοπλισμό του Εργαστηρίου σας. Ρυθμίστε τη μηχανή παραγωγής ακτίνων -x (kV, mA, χρόνο έκθεσης), για κάποιο από τα "σκαλοπάτια" του δοκιμίου, σύμφωνα με το διάγραμμα έκθεσης (π.χ. σαν αυτό του

---

<sup>2</sup> Οι ερωτήσεις των μαθημάτων μπορούν να απαντώνται σε χωριστά φύλλα, από τους εκπαιδευόμενους.

<sup>3</sup> Εργαστηριακές ασκήσεις ραδιογραφίας στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας θα είναι δυνατόν να γίνονται μετά το πέρας της εγκατάστασης και την αδειοδότηση του αντίστοιχου εξοπλισμού, στα πλαίσια του κατ' επιλογήν υποχρεωτικού μαθήματος του 7<sup>ου</sup> εξαμήνου "Βιομηχανικές Εφαρμογές Πυρηνικής Τεχνολογίας"

Διαγράμματος 3.3). Τοποθετήστε ένα γράμμα από μολύβι στην άκρη του "σκαλοπατιού" που σας ενδιαφέρει και πραγματοποιείτε την έκθεση. Προέβλεψε το διάγραμμα έκθεσης σωστά την οπτική πυκνότητα<sup>2</sup>;

2. Χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα διαγράμματα χαρακτηριστικών φιλμ υπολογίστε τον καινούργιο χρόνο έκθεσης που απαιτείται για να παραχθεί η ίδια οπτική πυκνότητα με διαφορετικό φιλμ.
3. Παράγετε μία δεύτερη ραδιογραφία με τον καινούργιο χρόνο έκθεσης και το καινούργιο φιλμ. Προβλέψατε σωστά (με μέγιστη απόκλιση 5%) την ίδια οπτική πυκνότητα<sup>2</sup>; Αν όχι, ποιοι είναι οι πιθανοί λόγοι για τη διαφορά αυτή<sup>2</sup>;

### **3.5 Μάθημα 3<sup>ο</sup>: Επιλογή υψηλής τάσης**

#### **3.5.1 Εισαγωγή**

Σε αυτό το μάθημα θα μελετηθεί η σχέση μεταξύ της υψηλής τάσης της μηχανής παραγωγής ακτίνων  $-x$  (δηλ. στην ουσία της μέγιστης ενέργειας των ακτίνων  $-x$ ) και της αντίθεσης της ραδιογραφικής εικόνας (contrast). Η υψηλή τάση αυτή είναι της τάξης των χιλιάδων βολτ (kV). Η τάση έχει επίπτωση στη ραδιογραφική εικόνα διότι η διεισδυτικότητα των ακτίνων  $-x$  εξαρτάται από την μέγιστη ενέργειά τους. Επομένως, το πρώτο πράγμα που πρέπει να γίνει πριν πραγματοποιηθεί μία ραδιογραφία είναι να καθορισθεί τι μέγιστης ενέργειας ακτινοβολία απαιτείται για να διαπεράσει το δοκίμιο σε έναν πρακτικό χρόνο έκθεσης. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για να υπολογισθεί η τάση που απαιτείται για τη ραδιογραφία δοκιμίου συγκεκριμένου πάχους και υλικού. Οι δύο μέθοδοι που θα παρουσιασθούν εδώ είναι οι Half-Value Layer Method (HVL) και Fixed Exposure Method.

#### **3.5.2 Στόχος**

Στόχοι του 3<sup>ου</sup> μαθήματος είναι:

- (α) να παρουσιασθούν διάφορες μέθοδοι εκτίμησης της υψηλής τάσης που απαιτείται για μια έκθεση, και
- (β) να εκτιμηθεί πώς η ενέργεια της ακτινοβολίας (kilovoltage) επηρεάζει την ποιότητα της εικόνας.

#### **3.5.3 Μέθοδοι εκτίμησης υψηλής τάσης**

Διακρίνονται δύο κύριες μέθοδοι για την κατ'αρχήν εκτίμηση της υψηλής τάσης που απαιτείται για μια έκθεση:

- (α) Η μέθοδος του πάχους υποδιπλασιασμού (στα αγγλικά Half-Value Layer Method), και
- (β) Η μέθοδος σταθερής έκθεσης (στα αγγλικά Fixed Exposure Method)

#### **Μέθοδος του πάχους υποδιπλασιασμού ή μέθοδος HVL**

Η μέθοδος HVL είναι η απλοποίηση ενός πολύπλοκου υπολογισμού και επεξεργάζεται μόνο λίγες από τις μεταβλητές που επηρεάζουν τη ραδιογραφία με ακτίνες  $-x$ . Στη μέθοδο αυτή υποτίθεται ότι η ακτινοβολία των ακτίνων  $-x$  είναι μονοενεργειακή και η

σκέδαση δε λαμβάνεται υπόψιν. Για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιούνται πίνακες όπως π.χ. ο Πίνακας 3.4 σε συνδυασμό με την σχέση (3.6), ως εξής:

Επιλέγεται η υψηλή τάση ώστε το πάχος του δοκιμίου που θα διαπεραστεί να αποτελεί ~5 πάχη υποδιπλασιασμού για τη συγκεκριμένη υψηλή τάση. Αν οι υπολογισμοί δεν μπορούν να γίνουν ακριβώς τα αποτελέσματα είναι επίσης ικανοποιητικά αν η απόκλιση από τον προηγούμενο κανόνα δεν είναι μεγαλύτερη των 2 παχών υποδιπλασιασμού, δηλαδή αν οι υπολογισμοί γίνουν για ~3 - 7 πάχη υποδιπλασιασμού. Στην κατώτερη τιμή των τριών παχών η ραδιογραφική εικόνα έχει χαμηλή αντίθεση και στην ανώτερη τιμή των εφτά ο χρόνος έκθεσης θα είναι υπερβολικός.

#### ***Εφαρμογή:***

Πρέπει να ελεγχθεί ένα ατσάλινο δοκίμιο πάχους 1.27cm. Επιλέξτε τάση που θα παράγει ραδιογραφία σε λογικό χρόνο έκθεσης. Από την εμπειρία τα 150kV θα έχουν αρκετή διεισδυτικότητα και θα παράγουν ραδιογραφία σε σχετικά σύντομο χρόνο. Από τον Πίνακα 3.4 βλέπετε ότι για τα 150kV ο συντελεστής εξασθένισης  $\mu$  είναι 1.54. Χρησιμοποιώντας τη σχέση (3.6) διαιρέστε το  $\ln 2=0,693$  με το 1.54 με αποτέλεσμα 0.45 cm. Οπότε 0.45cm θα είναι το πάχος υποδιπλασιασμού για τα 150 kV. Διαιρώντας τώρα τα 1.27cm του δοκιμίου με τα 0.45cm του πάχους υποδιπλασιασμού παίρνετε 2.8 και στρογγυλοποιώντας προς τα πάνω ~3 πάχη υποδιπλασιασμού. Αυτό είναι το χαμηλότερο όριο και θα έχει ως αποτέλεσμα σχεδόν ικανοποιητική ραδιογραφία με κάπως μειωμένη αντίθεση. Ο υπολογισμός επομένως πρέπει να επαναληφθεί για χαμηλότερη υψηλή τάση.

#### **Μέθοδος σταθερής έκθεσης ή μέθοδος FEM**

Στη μέθοδο FEM, η υψηλή τάση ρυθμίζεται έτσι ώστε να παράγεται σταθερή οπτική πυκνότητα σε ραδιογραφίες δοκιμίων με διαφορετικά πάχη, υλικά και ιδιότητες. Ο χρόνος έκθεσης, το milliamperage (ένταση της ακτινοβολίας) και η απόσταση του φιλμ από την πηγή διατηρούνται σταθερά. Αυτή η μέθοδος δε χρησιμοποιείται ευρέως όπως η μέθοδος HVL γιατί απαιτεί είτε σημαντική εμπειρία από το χειριστή είτε λεπτομερή διαγράμματα έκθεσης έτσι ώστε να παράγονται σωστές ραδιογραφίες. Χωρίς την απαιτούμενη εμπειρία ή τα διαγράμματα αυτή η μέθοδος χρειάζεται πολλές δοκιμές οπότε θα υπάρχουν και πολλές αποτυχίες.

### 3.5.4 Άσκηση προσομοίωσης

1. Χρησιμοποιώντας τον κώδικα XRSIM επιλέξτε το δοκίμιο κλίμακος stepwedge με υλικό τον χάλυβα (Fe). Στο κέντρο βάρους του παχύτερου "σκαλοπατιού" (πάχους 1.8 cm) τοποθετήστε ένα ελάττωμα σφαίρα με υλικό τον αέρα και διάμετρο 0.2 cm.
2. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο HVL υπολογίστε πόσα kV χρειάζονται για να έχουμε 5 πάχη υποδιπλασιασμού στο παχύτερο αυτό "σκαλοπάτι". Ρυθμίστε την μηχανή παραγωγής ακτίνων -x (δηλ. τα mA-min) ώστε να παράγετε μία εικόνα με οπτική πυκνότητα 2.5 για αυτό το βήμα χρησιμοποιώντας φιλμ Pb-D7. Σώστε την ραδιογραφική εικόνα για να την συγκρίνετε με τις επόμενες αργότερα.
3. Παράγετε δύο ακόμα ραδιογραφικές εικόνες χρησιμοποιώντας το ίδιο φιλμ Pb-D7 και διατηρώντας την οπτική πυκνότητα στο 2.5. Η πρώτη εικόνα θα προκύψει με την μισή υψηλή τάση της αρχικής και η δεύτερη με την τριπλάσια. Σε ποια από τις τρεις εικόνες φαίνεται πιο εύκολα το ελάττωμα<sup>2</sup>;
4. Χρησιμοποιώντας την επιλογή απεικόνισης της οπτικής πυκνότητας Image / Slice βρείτε την αντίθεση (δηλαδή το λόγο των οπτικών πυκνοτήτων) μεταξύ του ελαττώματος και του δοκιμίου. Ήταν η εικόνα με την μεγαλύτερη αντίθεση εκείνη που φαίνεται το ελάττωμα πιο εύκολα<sup>2</sup>;
5. Χρησιμοποιώντας την επιλογή απεικόνισης της οπτικής πυκνότητας Image / Slice σε, αναφέρετε σε ποια από τις τρεις ραδιογραφικές εικόνες απεικονίζονται τα περισσότερα σκαλοπάτια με οπτική πυκνότητα μεταξύ 1 και 4. Είναι αυτή η εικόνα εκείνη που φαίνεται καλύτερα το ελάττωμα<sup>2</sup>;
6. Επαναλάβετε τις προσομοιώσεις με άλλες επιλογές υλικού, φιλμ και ρυθμίσεων. Σχολιάστε τα συμπεράσματά σας σε κείμενο δύο περίπου παραγράφων<sup>2</sup>.

### 3.5.5 Εργαστηριακή άσκηση

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο HVL υπολογίστε και καταγράψτε την υψηλή τάση που αντιστοιχεί σε 3.5 και 7 πάχη υποδιπλασιασμού για ένα αλουμινένιο ή χαλύβδινο δοκίμιο κλίμακος σαν αυτό της προσομοίωσης ή άλλο που πιθανός διατίθεται στο Εργαστήριό σας. Χρησιμοποιώντας ένα διάγραμμα έκθεσης για τον εξοπλισμό μηχανής παραγωγής ακτίνων -x που διατίθεται ελέγξτε αν η υψηλή τάση που προσδιορίσατε με την μέθοδο



HVL είναι κατάλληλη ή έστω κατά προσέγγιση κατάλληλη για το δοκίμιό σας και τα υλικά σας. Γράψτε μία παράγραφο εξηγώντας την συσχέτιση που κατ'αρχήν διαπιστώσατε μεταξύ της υψηλής τάσης που υπολογίσατε με την μέθοδο HVL και εκείνης που προέκυψε από το διάγραμμα έκθεσης. Σημειώστε αναλυτικά πόσο καλή είναι ή δεν είναι η συσχέτιση αυτή.

## 3.6 Μάθημα 4<sup>ο</sup>: Επιλογή έκθεσης

### 3.6.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το μάθημα θα εξετασθεί η ορθότερη επιλογή έκθεσης.

### 3.6.2 Στόχος

Στόχοι του 4<sup>ου</sup> μαθήματος είναι:

- (α) να γίνει κατανοητή η επίδραση του milliamperage και του χρόνου έκθεσης στην οπτική πυκνότητα της ραδιογραφίας, και
- (β) ο πρακτικός υπολογισμός της αλλαγής στην οπτική πυκνότητα της ραδιογραφικής εικόνας όταν αλλάζουν το milliamperage ή ο χρόνος έκθεσης.

### 3.6.3 Σύνδεση έκθεσης – οπτικής πυκνότητας

Η έκθεση (δηλ. το γινόμενο milliamperage επί το χρόνο έκθεσης) είναι κατά προσέγγιση ανάλογη με την οπτική πυκνότητα, δηλ.

$$D = kE \quad (3.7)$$

ή ισοδύναμα

$$D = kMt \quad (3.8)$$

- Αν ο χρόνος έκθεσης  $t$  διατηρηθεί σταθερός και μεταβάλλεται μόνο το milliamperage  $M$ , τότε μία αρχική κατάσταση έκθεσης "1", μπορεί να συνδέεται με μία νέα κατάσταση έκθεσης "2", ως εξής:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{D_1}{D_2} \quad (3.9)$$

όπου

$M_1$ =Αρχικό milliamperage

$M_2$ =Νέο milliamperage

$D_1$ =Αρχική οπτική πυκνότητα

$D_2$ =Νέα οπτική πυκνότητα

- Αν το milliamperage  $M$  διατηρηθεί σταθερό και μεταβάλλεται μόνο ο χρόνος έκθεσης  $t$  τότε μία αρχική κατάσταση έκθεσης "1", μπορεί να συνδέεται με μία νέα κατάσταση έκθεσης "2", ως εξής:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{D_1}{D_2} \quad (3.10)$$

όπου

$t_1$ =Αρχικός χρόνος έκθεσης

$t_2$ =Νέος χρόνος έκθεσης

$D_1$ =Αρχική οπτική πυκνότητα

$D_2$ =Νέα οπτική πυκνότητα

- Αν, τέλος, μεταβάλλονται τόσο το milliamperage  $M$  όσο και ο χρόνος έκθεσης  $t$  τότε μία αρχική κατάσταση έκθεσης "1", μπορεί να συνδέεται με μία νέα κατάσταση έκθεσης "2", ως εξής:

$$\frac{M_1 t_1}{M_2 t_2} = \frac{D_1}{D_2} \quad (3.11)$$

όπου προφανώς

$M_1 t_1$ =Αρχική έκθεση

$M_2 t_2$ =Νέα έκθεση

$D_1$ =Αρχική οπτική πυκνότητα

$D_2$ =Νέα οπτική πυκνότητα

### 3.6.4 Άσκηση προσομοίωσης

1. Στον κώδικα XRSIM επιλέξτε το δοκίμιο κλίμακος stepwedge. Επιλέξτε ως υλικό το Τιτάνιο (Ti) και την απόσταση από την πηγή στα 70 cm. Χρησιμοποιήστε φιλμ D-5 και ρυθμίστε τη μηχανή παραγωγής ακτίνων -x στα 150kV, 1mA και χρόνο έκθεσης 845 sec. Ποια είναι η οπτική πυκνότητα στο παχύτερο "σκαλοπάτι" (πάχους 1.8 cm)<sup>2</sup>;
2. Διπλασιάστε το milliamperage από 1mA σε 2mA. Ποια είναι τώρα η οπτική πυκνότητα στο παχύτερο "σκαλοπάτι"<sup>2</sup>;
3. Μειώστε το milliamperage στο 1mA και διπλασιάστε το χρόνο έκθεσης στα 1690 sec. Ποια είναι τώρα η οπτική πυκνότητα στο παχύτερο "σκαλοπάτι"<sup>2</sup>;
4. Ισχύει ο γενικός κανόνας ότι αν ο χρόνος έκθεσης διπλασιασθεί, τότε διπλασιάζεται και η οπτική πυκνότητα<sup>2</sup>; Για την αναγκαία επαλήθευση χρησιμοποιήστε την επιλογή απεικόνισης της οπτικής πυκνότητας Image / Slice.
5. Ήταν η οπτική πυκνότητα η ίδια στα προηγούμενα βήματα (2) και (3)<sup>2</sup>; Τηρούνται οι σχέσεις (3.9) έως και (3.11)<sup>2</sup>;

6. Με τις ρυθμίσεις της μηχανής παραγωγής ακτίνων  $x$  στα 1mA και 845 sec, που παράγουν οπτική πυκνότητα γύρω στο 1.5, υπολογίστε την αλλαγή στο χρόνο έκθεσης έτσι ώστε η τελική εικόνα να έχει (α) Οπτική πυκνότητα  $\sim 2.5$ , και (β) Οπτική πυκνότητα  $\sim 1.0$
7. Συμπληρώστε σε μία παράγραφο τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα αυτού του μαθήματος<sup>2</sup>.

### 3.6.5 Εργαστηριακή άσκηση

1. Να παράγετε δύο ραδιογραφίες στο Εργαστήριο χρησιμοποιώντας ένα δοκίμιο κλίμακας από αλουμίνιο ή χάλυβα, ως εξής: Αρχικά χρησιμοποιήστε ένα διάγραμμα έκθεσης για να βρείτε τις απαραίτητες ρυθμίσεις για να επιτύχετε την οπτική πυκνότητα  $D$  του διαγράμματος για το μεσαίο "σκαλοπάτι" του δοκιμίου. Έπειτα χρησιμοποιήστε το διάγραμμα έκθεσης για να βρείτε τις απαραίτητες ρυθμίσεις για να επιτύχετε την οπτική πυκνότητα  $D$  του διαγράμματος σε ένα άλλο από το μεσαίο "σκαλοπάτι" του δοκιμίου.
2. Όταν τελειώσετε τους υπολογισμούς κάνετε τις ραδιογραφίες. Παρατηρήστε την οπτική πυκνότητα στο μεσαίο "σκαλοπάτι" και στο διαφορετικό από το μεσαίο σκαλοπάτι. Είναι σωστοί οι υπολογισμοί σας με το διάγραμμα έκθεσης<sup>2</sup>;
3. Επαναλάβετε τις ραδιογραφίες σας για επιθυμητή οπτική πυκνότητα  $2D$ . Προφανώς θα πρέπει να διπλασιάσετε την έκθεση με τρόπο που εσείς θα επιλέξετε. Προκύπτει το επιθυμητό ραδιογραφικό αποτέλεσμα<sup>2</sup>;

## **3.7 Μάθημα 5<sup>ο</sup>: Κατασκευή διαγράμματος έκθεσης**

### **3.7.1 Εισαγωγή**

Όταν αλλάζει το πάχος του δοκιμίου, πρέπει να προσαρμόζονται οι παράμετροι ρύθμισης της μηχανής παραγωγής ακτίνων  $-x$ , έτσι ώστε να επιτευχθεί αποδεκτή οπτική πυκνότητα. Τα διαγράμματα έκθεσης παρέχουν πληροφορίες για τη σωστή ρύθμιση του milliamperage και του χρόνου έκθεσης με σταθερό kilovoltage για διάφορα πάχη δοκιμίων. Τα διαγράμματα έκθεσης κατασκευάζονται κρατώντας σταθερούς τους εξής παράγοντες: kilovoltage, οπτική πυκνότητα, τύπο φιλμ, επεξεργασία του φιλμ, απόσταση του φιλμ από την πηγή και υλικό του δοκιμίου. Το πάχος του δοκιμίου είναι η ανεξάρτητη μεταβλητή του διαγράμματος, ενώ εξαρτημένη είναι η έκθεση σε mA-min ή mA-sec. Ένα διάγραμμα έκθεσης παρέχει επομένως ένα γρήγορο και αξιόπιστο τρόπο στην εύρεση της κατάλληλης τιμής της έκθεσης, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή οπτική πυκνότητα. Σε αυτό το μάθημα θα εξηγηθεί ο τρόπος κατασκευής ενός διαγράμματος έκθεσης.

### **3.7.2 Στόχος**

Στόχοι του 5<sup>ου</sup> μαθήματος είναι:

- (α) η κατασκευή ενός διαγράμματος έκθεσης
- (β) η χρήση ενός διαγράμματος έκθεσης ως οδηγό στην επιλογή σωστών ρυθμίσεων έκθεσης με συγκεκριμένο σύστημα παραγωγής ακτίνων  $-x$ , φιλμ και τρόπο επεξεργασίας του φιλμ, και
- (γ) η χρήση ενός διαγράμματος έκθεσης για άλλες οπτικές πυκνότητες, διαφορετικές από αυτή για την οποία το διάγραμμα αυτό κατασκευάστηκε.

### **3.7.3 Άσκηση προσομοίωσης**

1. Στον κώδικα XRSIM ρυθμίστε με την κατάλληλη μεγέθυνση το δοκίμιο stepwedge ώστε το μεσαίο "σκαλοπάτι" να γίνει πάχους 4 cm.
2. Τοποθετήστε ένα σφαιρικό ελάττωμα διαμέτρου 0,8cm στο κέντρο βάρους αυτού του "σκαλοπατιού".

3. Χρησιμοποιώντας τις γνώσεις σας από τα μαθήματα 2 και 3 εκτιμήστε το απαιτούμενο kilovoltage για "σκαλοπάτι" από αλουμίνιο. Επιλέξτε το κατάλληλο φιλμ<sup>4</sup>. Ορίσατε την απόσταση μηχανής παραγωγής ακτίνων -x και φιλμ στα 70 cm.
4. Ρυθμίστε τη μηχανή στα kV που εκτιμήσατε για το μεσαίο "σκαλοπάτι" και ρυθμίστε το milliamperage και το χρόνο έκθεσης έτσι ώστε να παράγετε οπτική πυκνότητα 2 (πάνω στο "σκαλοπάτι", όχι στο ελάττωμα).
5. Προσομοιώστε και παράγετε την ραδιογραφική εικόνα. Χρησιμοποιήστε την επιλογή Image/Slice και καταγράψτε τις οπτικές πυκνότητες για κάθε "σκαλοπάτι".
6. Υπολογίστε με επόμενες προσομοιώσεις το χρόνο έκθεσης και το milliamperage έτσι ώστε να έχετε οπτική πυκνότητα 2 σε κάθε "σκαλοπάτι"
7. Κατασκευάστε το διάγραμμα έκθεσης για αλουμίνιο σε ημιλογαριθμικό χαρτί. Ο λογαριθμικός άξονας θα είναι ο κατακόρυφος. Στον κατακόρυφο άξονα του διαγράμματος έκθεσης απεικονίζεται η έκθεση σε mA-min και στον οριζόντιο το πάχος του δοκιμίου. Σύμφωνα με το βήμα "6" πρέπει να έχετε συγκεντρώσει 5 ζεύγη έκθεσης-πάχους που όλα παράγουν οπτική πυκνότητα 2. Τοποθετήστε τα ζεύγη αυτά στο γράφημα. Θα πρέπει τα ζεύγη αυτά να προσεγγίζονται από ευθεία. Αυτή η ευθεία αναφέρεται προφανώς σε ένα συγκεκριμένο kilovoltage (εκείνο που εκτιμήσατε για το μεσαίο "σκαλοπάτι" του δοκιμίου stepwedge). Μπορείτε να δείτε πως είναι κατασκευασμένο ένα πραγματικό διάγραμμα έκθεσης συγκρίνοντας με εκείνο του Διαγράμματος 3.3.
8. Επιλέξτε δύο άλλα kilovoltage και δημιουργήστε μια καινούργια ευθεία στο διάγραμμα επαναλαμβάνοντας τις προηγούμενες προσομοιώσεις. Όταν τελειώσετε το διάγραμμα θα πρέπει να απεικονίζει τρεις ευθείες που αντιστοιχούν σε τρία διαφορετικά kilovoltage. Θυμηθείτε ότι σε ειδικό πλαίσιο στο διάγραμμα έκθεσης θα πρέπει να αναγράφονται όλες οι σταθερές, όπως τύπος μηχανής παραγωγής ακτίνων -x, υλικό δοκιμίου, τύπος φιλμ, οπτική πυκνότητα, απόσταση φιλμ από την πηγή -x.
9. Επαναλάβετε όλα τα παραπάνω και για δοκίμιο κλίμακος από χάλυβα με διαστάσεις της επιλογής σας παράγοντας έτσι ένα δεύτερο διάγραμμα έκθεσης. Τα ύψη των

---

<sup>4</sup> Το είδος και η ταχύτητα του φιλμ πρέπει να επιλέγονται σωστά έτσι ώστε οι χρόνοι έκθεσης να κρατούνται σε λογικά επίπεδα. Πυκνότερα υλικά όπως ο χάλυβας συνήθως απαιτούν πιο γρήγορα φιλμ (π.χ. Pb-D7) σε σχέση με λιγότερο πυκνά υλικά όπως το αλουμίνιο, που μπορούν να ραδιογραφούνται με αργά φιλμ (π.χ. D-4).

"σκαλοπατιών" του δοκιμίου από χάλυβα, πρέπει να είναι μικρότερα από αυτά των αντίστοιχων "σκαλοπατιών" του δοκιμίου από αλουμίνιο.

10. Όταν έχετε τελειώσει με τα διαγράμματα έκθεσης επιλέξτε κάποιο πάχος δοκιμίου από τον οριζόντιο άξονα του διαγράμματος έκθεσης. για κάθε kilovoltage και κάνετε τις ραδιογραφίες προσομοιώνοντας με τον κώδικα XRSIM, ρυθμίζοντας την έκθεση όπως συμβουλεύει το διάγραμμα έκθεσης που κατασκευάσατε. Θεωρητικά όλες οι οπτικές πυκνότητες θα πρέπει να είναι ίσες με 2, αλλά αναμένεται κάποια απόκλιση.

***Εφαρμογή 1: Ίδια οπτική πυκνότητα – αλλαγή φιλμ***

Αν είναι γνωστό ότι το Διάγραμμα έκθεσης 3.3 κατασκευάστηκε για φιλμ τύπου X και οπτική πυκνότητα 1.5, να υπολογισθούν οι διορθώσεις που πρέπει να γίνονται ώστε το διάγραμμα να εφαρμόζεται και για φιλμ τύπου Y. Χρησιμοποιώντας τις χαρακτηριστικές καμπύλες των φιλμ τύπου X και Y, όπως εμφανίζονται στο γράφημα του Διαγράμματος 3.5, μπορεί να βρεθεί ότι γενικά το φιλμ Y απαιτεί λογαριθμική σχετική αύξηση της έκθεσης κατά 0.60 σε σχέση με το φιλμ X για να παράγει οπτική πυκνότητα ίση με 1.5. Υψώνοντας το 10 στον εκθέτη 0.60 προσδιορίζεται ότι η απαιτούμενη έκθεση για φιλμ Y είναι η έκθεση που απαιτείται για φιλμ X πολλαπλασιασμένη επί τον παράγοντα 4.

***Εφαρμογή 2: Ίδιο φιλμ – αλλαγή οπτικής πυκνότητας***

Αν είναι γνωστό ότι το Διάγραμμα έκθεσης 3.3 κατασκευάστηκε για φιλμ τύπου X και οπτική πυκνότητα 1.5, να υπολογισθούν οι διορθώσεις που πρέπει να γίνονται ώστε το διάγραμμα να εφαρμόζεται και για άλλες οπτικές πυκνότητες. Χρησιμοποιώντας τη χαρακτηριστική καμπύλη του φιλμ τύπου X, όπως εμφανίζεται στο γράφημα του Διαγράμματος 3.5, μπορεί να βρεθούν οι αναγκαίοι συντελεστές διόρθωσης ως εξής:

- μείωση της οπτικής πυκνότητας από 1.5 σε 1.0: Απαιτείται λογαριθμική σχετική μείωση της έκθεσης από 1.79 σε 1.57. Η προκύπτουσα διαφορά είναι 0.22. Υψώνοντας το 10 στον εκθέτη 0.22 προσδιορίζεται ότι η απαιτούμενη έκθεση για οπτική πυκνότητα 1.0 είναι η έκθεση που απαιτείται για οπτική πυκνότητα 1.5 διαιρεμένη δια τον παράγοντα 1.66.
- αύξηση της οπτικής πυκνότητας από 1.5 σε 2.0: Απαιτείται λογαριθμική σχετική αύξηση της έκθεσης από 1.79 σε 1.92. Η προκύπτουσα διαφορά είναι 0.13. Υψώνοντας το 10 στον εκθέτη 0.13 προσδιορίζεται ότι η απαιτούμενη έκθεση για

οπτική πυκνότητα 2.0 είναι η έκθεση που απαιτείται για οπτική πυκνότητα 1.5 πολλαπλασιασμένη επί τον παράγοντα 1.35.

- αύξηση της οπτικής πυκνότητας από 1.5 σε 3.0: Απαιτείται λογαριθμική σχετική αύξηση της έκθεσης από 1.79 σε 2.10. Η προκύπτουσα διαφορά είναι 0.31. Υψώνοντας το 10 στον εκθέτη 0.31 προσδιορίζεται ότι η απαιτούμενη έκθεση για οπτική πυκνότητα 3.0 είναι η έκθεση που απαιτείται για οπτική πυκνότητα 1.5 πολλαπλασιασμένη επί τον παράγοντα 2.04.

#### **3.7.4 Εργαστηριακή άσκηση**

Παράγετε ένα διάγραμμα έκθεσης στο εργαστήριο για δοκίμιο stepwedge από αλουμίνιο και χάλυβα χρησιμοποιώντας τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω. Για να μετρήσετε την οπτική πυκνότητα του φιλμ χρησιμοποιήστε ένα μετρητή οπτικής πυκνότητας. Παράγετε ευθείες για τουλάχιστον τέσσερις διαφορετικές ρυθμίσεις του kilovoltage. Οι ευθείες θα πρέπει να έχουν μεταξύ τους διαφορά 10kV ή περισσότερο. Αναφέρετε οποιαδήποτε μεταβλητή στο ειδικό πλαίσιο στο κάτω μέρος του διαγράμματος. Όταν τελειώσετε ετοιμάστε μία σύντομη έκθεση με τα ακόλουθα:

- (α) περιγραφή του πειράματος κατασκευής ενός διαγράμματος έκθεσης,
- (β) τους υπολογισμούς που χρησιμοποιήσατε για να φτιάξετε τα διαγράμματα έκθεσης, και
- (γ) τα διαγράμματα έκθεσης για αλουμίνιο και χάλυβα.



### **3.8 Μάθημα 6<sup>ο</sup>: Ο ρόλος της απόστασης πηγής - φιλμ**

#### **3.8.1 Εισαγωγή**

Ως απόσταση πηγής - φιλμ (source to film distance ή SFD) ορίζεται η απόσταση της μηχανής παραγωγής ακτίνων -x από το φιλμ που θα εκτεθεί. Η απόσταση αυτή αλλάζει για διάφορους λόγους. Συχνά χρειάζεται επιτάχυνση της παραγωγής, έτσι η απόσταση μειώνεται, μειώνοντας παράλληλα και το χρόνο έκθεσης για μια συγκεκριμένη οπτική πυκνότητα. Ο νόμος του αντιστρόφου τετραγώνου ορίζει ότι η ένταση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται πανοραμικά από πηγή είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή. Έτσι μειώνοντας την απόσταση του φιλμ από την πηγή στο μισό της αρχικής, η ένταση της ακτινοβολίας τετραπλασιάζεται. Η έκθεση συνδέεται άμεσα με την ένταση της ακτινοβολίας. Έτσι μειώνοντας την απόσταση του φιλμ από την πηγή στο μισό, θα πρέπει να μειωθεί η έκθεση στο ένα τέταρτο, για να διατηρηθεί σταθερή η οπτική πυκνότητα του φιλμ. Συχνά δεν είναι πρακτικό να γίνονται οι ραδιογραφήσεις στην απόσταση που αναφέρεται στο διάγραμμα έκθεσης. Έτσι η μείωση της απόστασης του φιλμ από την πηγή είναι μερικές φορές αναγκαία όταν έχουμε δοκίμια πολύ μεγάλου πάχους. Σε αυτό το μάθημα θα χρησιμοποιηθεί ο νόμος του αντιστρόφου τετραγώνου για να υπολογιστεί η οπτική πυκνότητα όταν αλλάζει η απόσταση του φιλμ από την πηγή.

#### **3.8.2 Στόχος**

Στόχοι του 6<sup>ου</sup> μαθήματος είναι:

- (α) να γίνει κατανοητή η επίδραση της αλλαγής της απόστασης στην οπτική πυκνότητα, και
- (β) να υπολογισθούν οι ρυθμίσεις που πρέπει να γίνονται ώστε να διατηρηθεί σταθερή οπτική πυκνότητα όταν αλλάζει η απόσταση του φιλμ από την πηγή.

#### **3.8.3 Άσκηση προσομοίωσης**

Κάνετε τα παρακάτω για το μεσαίο "σκαλοπάτι" πάχους 4 cm του δοκιμίου stepwedge, όπως αυτό ρυθμίσθηκε στο 5<sup>ο</sup> Μάθημα, χρησιμοποιώντας τον κώδικα XRSIM.

1. Επιλέξτε για υλικό το αλουμίνιο
2. Επιλέξτε για φιλμ το D-4
3. Επιλέξτε το κατάλληλο kilovoltage για το πάχος του δοκιμίου στο υπόψιν "σκαλοπάτι" με βάση το διάγραμμα έκθεσης στο οποίο καταλήξατε στο 5<sup>ο</sup> Μάθημα.

4. Προσπαθήστε να επιτύχετε οπτική πυκνότητα 2 με απόσταση του φιλμ από την πηγή 70cm. Σώστε τη συγκεκριμένη ραδιογραφία ως xyz.jpg.
5. Αλλάξτε την απόσταση του φιλμ από την πηγή στα 35 cm. Παρατηρείστε στο "παράθυρο τριδιάστατης απεικόνισης" τη μεταβολή της προβολής του κώνου της ακτινοβολίας στο επίπεδο του φιλμ.
6. Υπολογίστε τον καινούργιο χρόνο έκθεσης έτσι ώστε η οπτική πυκνότητα να παραμείνει "2", χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (3.2) και (3.3).
7. Παράγετε μια νέα ραδιογραφική εικόνα χρησιμοποιώντας τις καινούργιες ρυθμίσεις. Ονομάστε την καινούργια εικόνα xy1.jpg. Ελέγξτε την οπτική πυκνότητα. Παρέμεινε "2";
8. Επαναλάβετε με τον ίδιο τρόπο για απόσταση 100 cm
9. Επαναλάβετε για υλικό χάλυβα, φιλμ Pb-D7 και αποστάσεις 70, 35 και 100 cm.

**Εφαρμογή: Αλλαγή απόστασης πηγής - φιλμ**

Αν είναι γνωστό ότι το Διάγραμμα έκθεσης 3.3 κατασκευάστηκε για απόσταση εστιακού σημείου – φιλμ ίση με 1 m, να υπολογισθούν οι διορθώσεις που πρέπει να γίνονται ώστε το Διάγραμμα να εφαρμόζεται και για αποστάσεις 0.75 m και 1.5 m.

- Εφαρμόζοντας τη σχέση (3.3) για  $r_1 = 1$  m και  $r_2 = 0.75$  m, διαπιστώνεται ότι η απαιτούμενη έκθεση  $M_2 \times t_2$  στην απόσταση  $r_2$  προκύπτει αν η έκθεση  $M_1 \times t_1$  πολλαπλασιασθεί επί τον συντελεστή

$$\frac{r_2^2}{r_1^2} = 0.56$$

- Εφαρμόζοντας τη σχέση (3.3) για  $r_1 = 1$  m και  $r_2 = 1.5$  m, διαπιστώνεται ότι η απαιτούμενη έκθεση  $M_2 \times t_2$  στην απόσταση  $r_2$  προκύπτει αν η έκθεση  $M_1 \times t_1$  πολλαπλασιασθεί επί τον συντελεστή

$$\frac{r_2^2}{r_1^2} = 2.25$$

Ο Πίνακας 3.5, συνοψίζει μία σειρά από τέτοιους συντελεστές για διάφορες αποστάσεις πηγής – φιλμ στην περιοχή από 50 έως 150 cm με βήμα 10 cm.

### **3.8.4 Εργαστηριακή άσκηση**

Παράγετε μία ραδιογραφία ενός δοκιμίου stepwedge χρησιμοποιώντας τη μηχανή ακτίνων  $x$  του Εργαστηρίου σας και ρυθμίσεις και φιλμ της επιλογής σας. Αλλάξτε την απόσταση του φιλμ από την πηγή και υπολογίστε την καινούργια έκθεση έτσι ώστε η οπτική πυκνότητα να παραμείνει σταθερή. Επαναλάβετε τη ραδιογραφία. Συγκρίνετε τις δύο ραδιογραφίες και γράψτε μία σύντομη έκθεση για την επίδραση της απόστασης του φιλμ από την πηγή στο ραδιογραφικό αποτέλεσμα.

## **3.9 Μάθημα 7<sup>ο</sup>: Ισοδύναμη έκθεση για διαφορετικά υλικά**

### **3.9.1 Εισαγωγή**

Οι ιδιότητες της ύλης που παίζουν τον μεγαλύτερο ρόλο στη ραδιογραφία είναι η πυκνότητα και ο ατομικός αριθμός. Όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα του υλικού τόσο δυσκολότερο είναι για την ακτινοβολία να το διαπεράσει. Αυτό διαπιστώθηκε θεωρητικά και πειραματικά από υπολογισμούς εξασθένισης ακτινοβολίας. Συνήθως οι υπολογισμοί αυτοί καλύπτουν υλικά αναφοράς που χρησιμοποιούνται συχνά, όπως π.χ. ο χάλυβας και το αλουμίνιο. Όταν χρειάζεται να ραδιογραφηθούν δοκίμια από διαφορετικά υλικά με διαφορετική πυκνότητα και διαφορετικό ατομικό αριθμό από τα υλικά αναφοράς, πρέπει να υπολογιστούν καινούργιοι χρόνοι έκθεσης. Αυτό το μάθημα θα εξηγήσει πως χρησιμοποιούνται συντελεστές διόρθωσης στη ραδιογραφία αγνώστων υλικών, όταν είναι γνωστές οι ρυθμίσεις που πρέπει να γίνουν για συγκεκριμένα γνωστά υλικά.

### **3.9.2 Στόχος**

Στόχοι του 7<sup>ου</sup> μαθήματος είναι:

- (α) να γίνει κατανοητή η επίδραση που έχουν οι ιδιότητες των υλικών στην οπτική πυκνότητα, και
- (β) να χρησιμοποιηθούν οι ρυθμίσεις ραδιογράφισης ενός γνωστού υλικού για να εκτιμηθούν οι ρυθμίσεις που χρειάζονται για τη ραδιογραφία ενός άγνωστου υλικού.

### **3.9.3 Εφαρμογές και ασκήσεις εξοικείωσης**

#### ***Εφαρμογή: ισοδύναμη έκθεση χαλκού - χάλυβα***

Σύμφωνα με τον Πίνακα 3.1 για να υπολογισθεί η έκθεση που απαιτείται για να ραδιογραφηθεί χαλκός πάχους 1.27 cm (0.5 inch) στα 220 kV, το πάχος αυτό πολλαπλασιάζεται με το συντελεστή 1.4 και υπολογίζεται ένα ισοδύναμο πάχος χάλυβα 1.78 cm (0.7 inch), για το οποίο εκτιμάται η αναγκαία έκθεση από το διάγραμμα έκθεσης (π.χ. το Διάγραμμα 3.3 ), η οποία είναι και η ζητούμενη.

#### ***Ασκήσεις εξοικείωσης:***

Χρησιμοποιήστε τους συντελεστές διόρθωσης του Πίνακα 3.1 για να απαντήσετε τις ακόλουθες ερωτήσεις.

1. Τι πάχος αλουμινίου είναι αντίστοιχο σε 2 inch των παρακάτω υλικών; (α) Μαγνήσιο, (β) Χάλυβας, (γ) Χαλκός, (δ) Ζιρκόνιο και (ε) Αλουμίνιο 2024

2. Αν 100 kV και 15 mA-min παράγουν την επιθυμητή οπτική πυκνότητα για 2 inch αλουμινίου, εκτιμήστε την έκθεση που χρειάζεται για να ραδιογραφήσετε 2 inch από τα παρακάτω υλικά (χρησιμοποιήστε το διάγραμμα έκθεσης που υπολογίσατε στο προηγούμενο 5<sup>ο</sup> μάθημα): (α) Μαγνήσιο και (β) Αλουμίνιο 2024
3. Αν 150 kV και 12 mA-min παράγουν την επιθυμητή οπτική πυκνότητα για 1 inch χάλυβα, βρείτε το πάχος των παρακάτω υλικών που θα μπορούσατε να ραδιογραφήσετε με τις ρυθμίσεις αυτές: (α) Μαγνήσιο, (β) Αλουμίνιο, (γ) Χαλκός και (δ) Ζιρκόνιο.
4. Αν 100 kV και 6 mA-min παράγουν την επιθυμητή οπτική πυκνότητα για 1 inch αλουμινίου, εκτιμήστε την έκθεση στην οποία θα ραδιογραφήσετε 1 inch από τα παρακάτω υλικά αν χρησιμοποιήσετε το διάγραμμα έκθεσης που υπολογίσατε στο προηγούμενο 5<sup>ο</sup> μάθημα: (α) Μαγνήσιο και (β) Αλουμίνιο 2024.
5. Εξηγήστε γιατί ο συντελεστής διόρθωσης μεταξύ χάλυβα και χαλκού είναι 1.6 για 150 kV, αλλά αλλάζει στο 1.4 για 400kV. Επίσης εξηγήστε γιατί στα 400 kV δεν υπάρχει συντελεστής διόρθωσης για ραδιογραφία αλουμινίου ή μαγνησίου.

### 3.9.4 Άσκηση προσομοίωσης

Κάνετε τα παρακάτω για το δοκίμιο stepwedge, όπως αυτό ρυθμίσθηκε στο 5<sup>ο</sup> Μάθημα, χρησιμοποιώντας τον κώδικα XRSIM.

1. Ρυθμίστε το υλικό του δοκιμίου σε αλουμίνιο 2024 (A2024). Ρυθμίστε την απόσταση από τη μηχανή παραγωγής ακτίνων -x στα 70 cm.
2. Χρησιμοποιώντας φιλμ D7 και με ρυθμίσεις 100 kV, 2 mA και 90 sec παράγετε ραδιογραφία με οπτική πυκνότητα 2 στο λεπτότερο "σκαλοπάτι" πάχους 2 cm.
3. Χρησιμοποιώντας τους συντελεστές διόρθωσης του Πίνακα 3.1 και το διάγραμμα έκθεσης που κατασκευάσατε στο 5<sup>ο</sup> Μάθημα προσπαθήστε να διατηρήσετε την οπτική πυκνότητα του λεπτότερου "σκαλοπατιού" σταθερή, αλλάζοντας υλικό. Το άλλο υλικό που θα πρέπει να χρησιμοποιήσετε είναι το καθαρό αλουμίνιο. Καταγράψτε τις μετρήσεις και τα αποτελέσματα των ραδιογραφιών σας<sup>2</sup>.

4. Ήταν η οπτική πυκνότητα του λεπτότερου "σκαλοπατιού" του δοκιμίου stepwedge 2 και με το νέο υλικό; Αν όχι, η μέγιστη απόκλιση ήταν μικρότερη από 10%<sup>2</sup>;

### **3.9.5 Εργαστηριακή άσκηση**

Παράγετε μία ραδιογραφία ενός δοκιμίου stepwedge από χάλυβα χρησιμοποιώντας τη μηχανή ακτίνων -x του Εργαστηρίου σας και ρυθμίσεις και φιλμ της επιλογής σας για το συνδυασμό των οποίων διατίθεται διάγραμμα έκθεσης. Χρησιμοποιείτε για τη ραδιογραφία 100 kV ή λιγότερα. Με τον ίδιο τρόπο παράγετε μία ραδιογραφία ενός δοκιμίου stepwedge από αλουμίνιο ίδιων γεωμετρικών χαρακτηριστικών χρησιμοποιώντας τη μηχανή ακτίνων -x στο ίδιο φιλμ με ρυθμίσεις έκθεσης που προκύπτουν από εφαρμογή των συντελεστών διόρθωσης του Πίνακα 3.1, επί του διαγράμματος έκθεσης για χάλυβα έτσι ώστε να διατηρήσετε παρόμοια οπτική πυκνότητα. Μετρήστε τις οπτικές πυκνότητες των ραδιογραφιών που προέκυψαν και συγκρίνετε με τους υπολογισμούς σας. Γράψτε μία σύντομη έκθεση περιγράφοντας τη διαδικασία των προηγούμενων βημάτων και τα συμπεράσματά σας<sup>2</sup>.

## **3.10 Μάθημα 8<sup>ο</sup>: Ραδιογραφική απεικόνιση ελαττώματος (Α)**

### **3.10.1 Εισαγωγή**

Γενικά αν ένα ελάττωμα είναι ύλη με πυκνότητα και ατομικό αριθμό παρόμοια με τις αντίστοιχες ιδιότητες του ραδιογραφούμενου δοκιμίου, τότε το ελάττωμα δύσκολα ξεχωρίζει σε μία ραδιογραφία. Για παράδειγμα μπορούν να αναλυθούν ως προς τη ραδιογραφική τους συμπεριφορά ελαττώματα σε δοκίμια από αλουμίνιο ή από χάλυβα, τα οποία είναι και τα συνηθέστερα.

Όταν π.χ. διαβρώνονται δοκίμια από αλουμίνιο, τα προϊόντα της διάβρωσης είναι οξειδία και διοξειδία του αλουμινίου. Όταν η διάβρωση αυτή δεν περιορίζεται χημικά (π.χ. με κατάλληλη προστασία), εξελίσσεται με αποτέλεσμα το διαβρωμένο δοκίμιο να αποκτά αρκετά διαφορετική πυκνότητα από το υπόλοιπο μη διαβρωμένο δοκίμιο. Αυτή η περίπτωση διάβρωσης μπορεί να ανιχνευθεί σε ραδιογραφική εικόνα. Όμως, αν τα προϊόντα της διάβρωσης είναι περιορισμένα, για παράδειγμα, επιφανειακά πάνω σε ένα φύλλο αλουμινίου, τότε η πυκνότητα των προϊόντων αυτών θα είναι παρόμοια με την πυκνότητα του υπόλοιπου δοκιμίου. Αυτή η περίπτωση διάβρωσης δεν μπορεί να ανιχνευθεί σε ραδιογραφική εικόνα.

Αντιθέτως σκωρίες ή εγκλείσματα βολφραμίου μέσα σε μια χαλύβδινη συγκόλληση είναι εύκολο να ανιχνευθούν ραδιογραφικά λόγω της σημαντικής διαφοράς πυκνότητας των ελαττωμάτων αυτών και του υλικού από χάλυβα γύρω τους (οι σκωρίες είναι πολύ χαμηλότερης πυκνότητας και καταγράφονται ως μαύρα μη συμμετρικά στίγματα, ενώ τα εγκλείσματα βολφραμίου είναι πολύ υψηλότερης πυκνότητας και καταγράφονται ως λευκά μη συμμετρικά στίγματα). Για τυπικά ελαττώματα σε συγκολλήσεις και χυτά αντικείμενα και την εμφάνισή τους πάνω στη ραδιογραφία δείτε και <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/TechCalibrations/RadiographInterp.htm>.

### **3.10.2 Στόχος**

Στόχοι του 8<sup>ου</sup> μαθήματος είναι:

(α) να γίνει κατανοητή η επίδραση του υλικού του ελαττώματος στην δυνατότητα ανίχνευσής του και

(β) να γίνει κατανοητό πως το μέγεθος και το σχήμα του ελαττώματος χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση του είδους του.

### **3.10.3 Άσκηση προσομοίωσης**

Σε αυτήν την άσκηση πρέπει να γίνουν προσομοιώσεις ραδιογραφίας με τον κώδικα XRSIM που να δείχνουν ότι η δυνατότητα ανίχνευσης του ελαττώματος εξαρτάται από το υλικό του. Εισάγετε το δοκίμιο κλίμακος stepwedge στον κώδικα. Επιλέξτε αλουμίνιο για υλικό και τοποθετήστε ένα σφαιρικό ελάττωμα διαμέτρου 0.3 cm στο κέντρο βάρους του παχύτερου "σκαλοπατιού" των 1.8 cm. Επιλέξτε ως υλικό του ελαττώματος τον αέρα. Χρησιμοποιήστε φιλμ D-5 και τάση 80 kV και απόσταση πηγής – φιλμ 70 cm. Επιλέξτε ένταση 3 mA και χρόνο έκθεσης 165 s έτσι ώστε να παραχθεί οπτική πυκνότητα γύρω στο 3 για το υπόψιν "σκαλοπάτι". Σώστε την ραδιογραφική εικόνα που προκύπτει και χρησιμοποιήστε τις ίδιες ρυθμίσεις έκθεσης και για τη συνέχεια. Κάνετε άλλες δύο προσομοιώσεις ραδιογραφίας χρησιμοποιώντας διαφορετικά υλικά για το ελάττωμα. Το ένα υλικό θα έχει παρόμοια πυκνότητα με το αλουμίνιο, και το άλλο θα έχει μεγαλύτερη. Σώστε τις ραδιογραφικές εικόνες που προκύπτουν. Όταν σώζετε τα αρχεία των ραδιογραφικών εικόνων θυμηθείτε να αλλάζετε κάθε φορά το όνομα του αρχείου προκειμένου αυτά να μην σώζονται "το ένα πάνω στο άλλο". Ήταν δυνατό να ανιχνεύσετε όλα τα ελαττώματα<sup>2</sup>; Εξηγήστε πως η πυκνότητα και το ατομικό βάρος της ύλης του ελαττώματος επηρεάζει τη δυνατότητα ανίχνευσής του σε μια ραδιογραφία<sup>2</sup>.

### **3.10.4 Εργαστηριακή άσκηση**

Ζητήστε από τον καθηγητή σας, ραδιογραφίες για να τις αξιολογήσετε. Ελέγξτε τις ραδιογραφίες και σημειώστε τυχόν ελαττώματα που εντοπίσατε. Γράψτε μία μικρή έκθεση με τα συμπεράσματά σας<sup>2</sup>.



## **3.11 Μάθημα 9<sup>ο</sup>: Ραδιογραφική απεικόνιση ελαττώματος (B)**

### **3.11.1 Εισαγωγή**

Γενικά αν ένα ελάττωμα δεν συνεπάγεται σημαντική απώλεια υλικού από το δοκίμιο, ή εισαγωγή αρκετού ξένου υλικού στο δοκίμιο η αλλαγή στην οπτική πυκνότητα στην περιοχή του ελαττώματος θα είναι πολύ μικρή. Πέραν αυτών ο προσανατολισμός του ελαττώματος πρέπει να είναι τέτοιος ώστε η ακτινοβολία να συναντήσει κατά τη διαδρομή της σημαντική διαφορά στην ποσότητα του υλικού που έχει να διαπεράσει (ή υλικό διαφορετικής πυκνότητας) έτσι ώστε το ελάττωμα να φανεί στη ραδιογραφία. Οι ρωγμές, για παράδειγμα, είναι πολύ δύσκολο να διακριθούν αν το κύριο επίπεδο κατά το οποίο αναπτύσσονται δεν είναι παράλληλο με τη δέσμη της ακτινοβολίας. Το μάθημα αυτό επικεντρώνεται στο πως ένα ελάττωμα και ειδικότερα ο προσανατολισμός του επηρεάζουν την ραδιογραφική του απεικόνιση.

### **3.11.2 Στόχος**

Στόχος του 9<sup>ου</sup> μαθήματος είναι:

να εξετασθεί η επίδραση του προσανατολισμού του ελαττώματος στην δυνατότητα ανίχνευσής του.

### **3.11.3 Άσκηση προσομοίωσης**

Κάνετε τα παρακάτω για το δοκίμιο stepwedge, όπως αυτό χρησιμοποιήθηκε στο 3<sup>ο</sup> ή το 4<sup>ο</sup> Μάθημα, χρησιμοποιώντας τον κώδικα XRSIM.

1. Κατασκευάστε ένα ελάττωμα σε σχήμα ρωγμής με μέγιστες διαστάσεις κατά x, y, z 0.75 x 0.05 x 0.35 cm. Το ελάττωμα θα πρέπει να είναι κενό (με υλικό τον αέρα). Το ελάττωμα αυτό μπορεί π.χ. να κατασκευασθεί επιμηκύνοντας ή επιβραχύνοντας ένα ελάττωμα "σφαίρα".
2. Εισάγετε το ελάττωμα αυτό στο κέντρο βάρους του παχύτερου "σκαλοπατιού" του δοκιμίου stepwedge (αυτού με ύψος 1.8 cm).
3. Επιλέξτε ως υλικό του δοκιμίου το αλουμίνιο. Χρησιμοποιήστε φιλμ D5, απόσταση πηγής – φιλμ 70 cm και ρυθμίσεις μηχανής παραγωγής ακτίνων -x 100 kV, 2 mA, 78 s. Οι ρυθμίσεις αυτές θα πρέπει να παράγουν εικόνα με οπτική πυκνότητα περίπου 2 για το παχύτερο "σκαλοπάτι" του δοκιμίου αυτού.
4. Παράγετε ραδιογραφία. "Σώστε" την προσομοιωμένη ραδιογραφική εικόνα.

5. Περιστρέψτε το ελάττωμα κατά τον άξονα x κατά 10 μοίρες. Παράγετε δεύτερη ραδιογραφία. "Σώστε" την προσομοιωμένη ραδιογραφική εικόνα με άλλο όνομα.
6. Περιστρέψτε το ελάττωμα άλλες 5 μοίρες κατά τον ίδιο άξονα, έτσι ώστε να απέχει από την αρχική του θέση 15 μοίρες συνολικά. Παράγετε τρίτη ραδιογραφία. "Σώστε" την προσομοιωμένη ραδιογραφική εικόνα με τρίτο όνομα.
7. Περιστρέψτε το ελάττωμα άλλες 75 μοίρες κατά τον ίδιο άξονα έτσι ώστε να απέχει από την αρχική του θέση 90 μοίρες. Παράγετε μία τέταρτη ραδιογραφία. "Σώστε" την προσομοιωμένη ραδιογραφική εικόνα με τέταρτο όνομα.
8. Συγκρίνετε τις τέσσερις εικόνες μεταξύ τους χρησιμοποιώντας την επιλογή Image/Slice. Ελέγξτε δηλαδή τις οπτικές πυκνότητες των ελαττωμάτων στις εικόνες. Εξηγήστε πώς επηρεάζεται η ικανότητα εντοπισμού του ελαττώματος από τη γωνία του σε σχέση με την κατεύθυνση της ακτινοβολίας<sup>2</sup>. Αν υπάρχουν διαφοροποιήσεις στην απεικόνιση του ελαττώματος στις τέσσερις εικόνες, εξηγήστε που οφείλονται<sup>2</sup>.

#### **3.11.4 Εργαστηριακή άσκηση**

Παράγετε ραδιογραφίες ενός προτύπου δοκιμίου με ρωγμές από αλουμίνιο ή χάλυβα χρησιμοποιώντας τη μηχανή ακτίνων -x του Εργαστηρίου σας. Στην αρχή ραδιογραφείτε το δοκίμιο, φροντίζοντας ώστε το κύριο επίπεδο της ρωγμής να είναι παράλληλο με τη δέσμη της ακτινοβολίας. Κατόπιν ραδιογραφείτε το δοκίμιο, φροντίζοντας ώστε το κύριο επίπεδο της ρωγμής να είναι κάθετο στη δέσμη της ακτινοβολίας και τέλος ραδιογραφείτε το δοκίμιο, φροντίζοντας ώστε το κύριο επίπεδο της ρωγμής να σχηματίζει γωνία 45° με τη δέσμη της ακτινοβολίας. Εξετάστε τις τρεις ραδιογραφίες. Ήταν οι ρωγμές ορατές και στις τρεις ραδιογραφίες; Αν δεν ήταν, εξηγήστε γιατί και γράψτε μία μικρή έκθεση με τα ευρήματά σας<sup>2</sup>.

## 3.12 Μάθημα 10<sup>ο</sup>: Οπτική ραδιογραφίας

### 3.12.1 Εισαγωγή

Λόγω του γεγονότος ότι από μία άποψη τα φωτόνια της ραδιογραφίας είναι "φως" υπάρχει επίδραση του μεγέθους του εστιακού σημείου, της απόστασης του φιλμ από την πηγή, του πάχους του δοκιμίου και της απόστασης του δοκιμίου από το φιλμ στην ευκρίνεια και στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ραδιογραφικής εικόνας. Αυτές οι παράμετροι θα πρέπει να βελτιστοποιηθούν έτσι ώστε να ελεγχθεί η μεγέθυνση της εικόνας και να περιοριστεί η ασάφεια των ορίων του δοκιμίου στην εικόνα. Η ασάφεια αυτή εμφανίζεται με τη μορφή παρασκιάς, δηλ. ασαφών περιοχών, γύρω από τα όρια του δοκιμίου. Δεν πρέπει ακόμα να παραγνωρίζεται από την οπτική της ραδιογραφίας η στερεά γωνία του κώνου ακτινοβολίας που παράγεται από τη μηχανή παραγωγής ακτίνων -x. Ο κώνος της ακτινοβολίας διαφέρει ανάμεσα στις διάφορες μηχανές παραγωγής ακτίνων -x και αν το φιλμ τοποθετηθεί πολύ κοντά στη μηχανή, ο κώνος αυτός μπορεί να μην καλύπτει ολόκληρο το δοκίμιο που θέλουμε να απεικονίσουμε.

### 3.12.2 Στόχος

Στόχοι του 10<sup>ου</sup> μαθήματος είναι:

- (α) να γίνει κατανοητό πως το μέγεθος του εστιακού σημείου, η απόσταση του φιλμ από την πηγή, το πάχος του δοκιμίου και η απόσταση του δοκιμίου από το φιλμ επηρεάζουν την ευκρίνεια και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ραδιογραφικής εικόνας,
- (β) να γίνει κατανοητό πως η απόσταση του φιλμ από την πηγή και η απόσταση του δοκιμίου από το φιλμ επηρεάζουν τη μεγέθυνση της εικόνας, και
- (γ) να γίνει κατανοητό ότι πρέπει να είναι γνωστή η γωνία του κώνου της ακτινοβολίας και να υπολογίζεται το μέγεθος της προβολής της ακτινοβολίας στο φιλμ.

### 3.12.3 Υπολογισμοί γεωμετρικής ασάφειας (παρασκιάς)

Όταν το δοκίμιο που ραδιογραφείται έχει τοποθετηθεί σε άμεση επαφή με το φιλμ, τότε, όπως προκύπτει από το Διάγραμμα 3.10, η γεωμετρική ασάφεια (παρασκιά, και στα λατινικά penumbra) μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$U_g = \frac{f * t}{d} \quad (3.12)$$

όπου:

f=Διάμετρος του εστιακού σημείου

t=Απόσταση από την επάνω πλευρά του δοκιμίου μέχρι το φιλμ

d=Απόσταση από την επάνω πλευρά του δοκιμίου μέχρι την πηγή

### 3.12.4 Υπολογισμοί γεωμετρικής μεγέθυνσης

Γεωμετρική μεγέθυνση είναι η αύξηση του μεγέθους της εικόνας του δοκιμίου (σε σχέση με το πραγματικό δοκίμιο) και οφείλεται στην τοποθέτηση του δοκιμίου σε απόσταση από το φιλμ. Η μεγέθυνση βοηθά τον ενδιαφερόμενο να δει κάποιο χαρακτηριστικό που αλλιώς θα ήταν πολύ μικρό για να το διακρίνει, αλλά

*η μεγέθυνση προκαλεί μείωση της ευκρίνειας της εικόνας,*

διότι μεγενθύνει τις γεωμετρικές ασάφειες.

Η γεωμετρική μεγέθυνση μπορεί να υπολογιστεί από τον ακόλουθη σχέση, με βάση την ομοιότητα των τριγώνων του Διαγράμματος 3.11:

$$M = \frac{a+b}{a} \quad (3.13)$$

όπου:

M=Μεγέθυνση

a=Απόσταση δοκιμίου-πηγής

b=Απόσταση δοκιμίου-φιλμ

### 3.12.5 Υπολογισμοί κάλυψης του φιλμ από τον κώνο ακτινοβολίας

Η γωνία του κώνου της ακτινοβολίας μιας μηχανής παραγωγής ακτίνων -x καθορίζει την απόσταση που πρέπει να έχει το δοκίμιο από την πηγή, έτσι ώστε η ακτινοβολία να καλύπτει ολόκληρο το δοκίμιο. Σύμφωνα με το Διάγραμμα 3.12 και χρησιμοποιώντας απλή γεωμετρία, η διάμετρος X της προβολής της ακτινοβολίας μπορεί να υπολογιστεί, ως:

$$X = 2b \text{ or } X = 2a(\tan\theta) \quad (3.14)$$

### 3.12.6 Άσκηση προσομοίωσης

Κάντε τα ακόλουθα στον κώδικα XRSIM:

1. Εισάγετε το δοκίμιο cast3s.stl. Στο "παράθυρο τριδιάστατης απεικόνισης" παρατηρήστε ότι ο κώνος ακτινοβολίας καλύπτει ολόκληρο το δοκίμιο. Αλλάξτε την απόσταση μηχανής παραγωγής ακτίνων -x και φιλμ από τα 100 cm, που είναι η εξ'ορισμού επιλογή, στα 30 cm. Παρατηρήστε ότι η μηχανή παραγωγής ακτίνων -x

είναι τώρα πολύ πιο κοντά στο φιλμ και στην κάτοψη ότι ο κώνος της ακτινοβολίας δεν καλύπτει ολόκληρο το δοκίμιο.

2. Αλλάξτε μηχανή παραγωγής ακτίνων -x από HOMX160 σε FXE200. Η νέα αυτή μηχανή έχει 40 μοίρες γωνία του κώνου ακτινοβολίας, σε αντίθεση με την προηγούμενη που είχε 20 μοίρες. Παρατηρήστε στην κάτοψη ότι με την νέα μηχανή σε απόσταση 30 cm από το φιλμ, καλύπτεται ολόκληρο το δοκίμιο.
3. Εισάγετε το δοκίμιο *stepwedge* στον κώδικα, με τον τρόπο που αυτό χρησιμοποιήθηκε στο 3<sup>ο</sup> ή το 4<sup>ο</sup> Μάθημα και με υλικό από αλουμίνιο. Εισάγετε επίσης ένα κενό σφαιρικό ελάττωμα διαμέτρου 0.5 cm στο παχύτερο "σκαλοπάτι" του δοκιμίου (ύψους 1.8 cm) και παράγετε μία ραδιογραφία με φιλμ D5 και ρυθμίσεις 80 kV, 3 mA, 103 s από απόσταση 70 cm. Με τη βοήθεια της επιλογής *Image/Slice* μετρήστε πόσα pixel διάμετρο έχει το ελάττωμα.
4. Τοποθετήστε το σύνολο δοκιμίου-ελαττώματος 10 cm πάνω από το φιλμ και επαναλάβετε τη ραδιογραφία. Με τη βοήθεια της επιλογής *Image/Slice* μετρήστε πόσα pixel διάμετρο έχει το ελάττωμα. Εξηγήστε τη διαφορά στο μέγεθος του ελαττώματος στις δύο ραδιογραφικές εικόνες<sup>2</sup>.

### 3.12.7 Εργαστηριακή άσκηση

Βρείτε τη γωνία του κώνου ακτινοβολίας της μηχανής παραγωγής ακτίνων -x του Εργαστηρίου σας από το εγχειρίδιο του κατασκευαστή. Χρησιμοποιώντας απόσταση φιλμ-πηγής 60 cm και φιλμ μεγέθους 10"x8" κάνετε τα ακόλουθα. Βρείτε την προβολή της ακτινοβολίας πάνω στο επίπεδο του φιλμ χρησιμοποιώντας ένα μοιρογνωμόνιο και μερικά λεπτά σκοινάκια. Καλύπτεται ολόκληρο το φιλμ; Αν η απόσταση φιλμ-πηγής μειωθεί στα 30 cm θα καλύπτεται ολόκληρο το φιλμ;

Βρείτε το μέγεθος του εστιακού σημείου της μηχανής του Εργαστηρίου σας από το εγχειρίδιο του κατασκευαστή. Βρείτε την ελάχιστη απόσταση πηγής-φιλμ έτσι ώστε να μπορείτε να ραδιογραφήσετε ένα δοκίμιο πάχους 1.25 cm με μέγιστη γεωμετρική ασάφεια 1 mm.

Χρησιμοποιώντας τρία δοκίμια με γνωστό ελάττωμα (π.χ. οπή διαμέτρου 3 mm), εκθέστε ένα φιλμ με το ένα δοκίμιο σε επαφή με το φιλμ, το δεύτερο σε απόσταση 7 cm από το φιλμ και το τρίτο σε απόσταση 23 cm από το φιλμ. Υπολογίστε τη μεγέθυνση που θα πρέπει να παρατηρηθεί σε κάθε μία από τις τρύπες και στη συνέχεια μετρήστε το μέγεθός

τους πάνω στη ραδιογραφία. Συγκρίνετε τη μεγέθυνση που υπολογίσατε με αυτήν που μετρήσατε. Υπολογίστε και αφαιρέστε από τις προηγούμενες μετρήσεις σας τυχόν παρασκιές. Συγκρίνατε τη μεγέθυνση που υπολογίσατε με τις νέες διορθωμένες μετρήσεις.

Γράψτε μια σύντομη έκθεση περιγράφοντας τα παραπάνω και τις παρατηρήσεις σας<sup>2</sup>.

### **3.13 Μάθημα 11<sup>ο</sup>: Ταυτόχρονη έκθεση δύο φιλμ (double loading)**

#### **3.13.1 Εισαγωγή**

Η ταυτόχρονη έκθεση δύο διαφορετικών φιλμ (διαφορετικής ταχύτητας), χρησιμοποιείται όταν χρειάζεται να απεικονισθούν τμήματα διαφορετικού πάχους από το ίδιο δοκίμιο, με σχεδόν ίδια οπτική πυκνότητα, χωρίς να μεταβληθούν οι ρυθμίσεις (kV, mA, χρόνος, απόσταση) της ραδιογραφικής διαδικασίας. Το σχετικά αργότερο φιλμ χρησιμοποιείται για την ραδιογραφική απεικόνιση του σχετικά λεπτότερου πάχους μέρους του δοκιμίου και το σχετικά ταχύτερο φιλμ χρησιμοποιείται για την ραδιογραφική απεικόνιση του σχετικά παχύτερου μέρους του δοκιμίου. Τα δύο (ή σε μερικές περιπτώσεις, τα περισσότερα από δύο) φιλμ πρέπει να τοποθετούνται "το ένα ακριβώς πίσω από το άλλο". Θεωρητικά, η απόδοση στο "πίσω" φιλμ, δεν πρέπει να επηρεάζεται σημαντικά, δεδομένου ότι τα φιλμ είναι γενικά κακοί ανιχνευτές φωτονίων, και ως εκ τούτου η πλειοψηφία των φωτονίων από εκείνα που προσβάλλουν το "πρώτο" φιλμ θα είναι επίσης διαθέσιμα για να αλληλεπιδράσουν με το δεύτερο.

#### **3.13.2 Στόχος**

Στόχοι του 11<sup>ου</sup> μαθήματος είναι:

- να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο είναι δυνατόν να λαμβάνονται ταυτόχρονα ραδιογραφικές εικόνες σχεδόν ίδιας οπτικής πυκνότητας από διαφορετικά πάχη του ίδιου δοκιμίου.

#### **3.13.3 Άσκηση προσομοίωσης**

Κάνετε τα παρακάτω για το δοκίμιο stepwedge, όπως αυτό χρησιμοποιήθηκε στο 3<sup>ο</sup> ή το 4<sup>ο</sup> Μάθημα, χρησιμοποιώντας τον κώδικα XRSIM:

1. Επιλέξτε ως υλικό του δοκιμίου το Αλουμίνιο.
2. Τοποθετήστε δύο σφαιρικά ελαττώματα στο δοκίμιο. Τα ελαττώματα να τοποθετηθούν περί το κέντρο βάρους του παχύτερου και του μεσαίου "σκαλοπατιού" του δοκιμίου αντίστοιχα. Το υλικό των ελαττωμάτων θα πρέπει να είναι ο αέρας και η διάμετρός τους ίση με 25% του πάχους του "σκαλοπατιού" που θα τοποθετηθούν. Υπενθυμίζεται ότι το πάχος του παχύτερου "σκαλοπατιού" είναι 1.8 cm και του μεσαίου 1.2 cm.
3. Για να προσομοιώσετε την τεχνική της διπλής έκθεσης, θα τρέξετε τον κώδικα δύο φορές, δεδομένου ότι αυτός δε μπορεί να παράγει δύο ραδιογραφικές εικόνες με μία

έκθεση. Η μία εικόνα θα δημιουργηθεί με αργότερο φιλμ (π.χ. D2 ) και η άλλη με ένα πιο γρήγορο φιλμ (π.χ. D4) για να απεικονίσει με την ίδια περίπου οπτική πυκνότητα το πιο παχύ μέρος. Προφανώς η μόνη διαφορά ανάμεσα στις δύο ραδιογραφίες θα είναι το φιλμ. Η επιθυμητή οπτική πυκνότητα στις περιοχές που ενδιαφέρουν πρέπει να είναι ανάμεσα σε "2" και "3".

4. Ρυθμίστε την τάση (kV), την ένταση (mA) και το χρόνο έκθεσης για απόσταση 70 cm έτσι ώστε να πετύχετε οπτική πυκνότητα περί το "2" στο μεσαίο "σκαλοπάτι", χρησιμοποιώντας το φιλμ D2. Προτείνονται οι ακόλουθες ρυθμίσεις για μηχανή παραγωγής ακτίνων -x την: 100 kV, 2 mA, 107 s.
5. Αλλάξτε το φιλμ σε D-4 για να απεικονίσετε το πιο παχύ "σκαλοπάτι". Μην αλλάξετε καμία άλλη ρύθμιση για την απεικόνιση αυτού του "σκαλοπατιού". Παρέμεινε ίδια η οπτική πυκνότητα;
6. Γράψτε μία σύντομη έκθεση περιγράφοντας την άσκηση προσομοίωσης και τα αποτελέσματά της<sup>2</sup>.

#### **3.13.4 Εργαστηριακή άσκηση**

Επαναλάβετε την άσκηση προσομοίωσης στο Εργαστήριο, χρησιμοποιώντας τον διαθέσιμο εξοπλισμό. Τα φιλμ στην εργαστηριακή άσκηση πρέπει να τοποθετηθούν "το ένα πίσω από το άλλο" και πρέπει να γίνει μόνο μία ταυτόχρονη έκθεση. Γράψτε μία σύντομη αναφορά περιγράφοντας την εργαστηριακή άσκηση και τα αποτελέσματά της<sup>2</sup>.



## **3.14 Μάθημα 12<sup>ο</sup>: Χρήση δοκιμίων ποιότητας ραδιογραφικής εικόνας**

### **3.14.1 Εισαγωγή**

Συνήθως σε κάθε ραδιογράφιση αντικειμένου, ραδιογραφείται και ένα τυποποιημένο δοκίμιο ελέγχου ποιότητας (ΔΕΠ) ραδιογραφικής εικόνας, με σκοπό να ελέγχεται ενδεικτικά η ραδιογραφική ευαισθησία της μεθόδου. Τα ΔΕΠ πρέπει να είναι από το ίδιο ή παρόμοιο υλικό με εκείνο του ραδιογραφούμενου αντικειμένου και έχουν απλή γεωμετρική μορφή συνήθως ελασμάτων με οπές ή συρμάτων. Το πάχος των ελασμάτων και η διάμετρος των οπών και των συρμάτων είναι ανάλογα με το πάχος του ραδιογραφούμενου δοκιμίου σύμφωνα με ορισμένους κανόνες τυποποίησης κατά EN ή ASTM. Η μικρότερη διάμετρος οπής ή η μικρότερη διάμετρος σύρματος που αποτυπώνεται στη ραδιογραφική εικόνα ορίζουν τη δυνατή ραδιογραφική ευαισθησία της ραδιογραφικής εικόνας. Έχουν επικρατήσει δύο διαφορετικά πρότυπα τυποποίησης των ΔΕΠ: Στη Βόρεια Αμερική τα δοκίμια αυτά είναι ελάσματα με οπές και αναφέρονται ως "penetrameters" ενώ στην Ευρώπη τα δοκίμια αυτά είναι σύρματα και αναφέρονται ως "Image Quality Indicators" (ή IQI). Η αποτύπωση της εικόνας ενός ΔΕΠ πάνω στο ραδιογραφικό αποτέλεσμα είναι απαραίτητη εκτίμηση για την ποιότητα του ραδιογραφικού ελέγχου. Η χρήση των ΔΕΠ επιβάλλεται από την προτυποποίηση και τον έλεγχο της ποιότητας της ραδιογραφικής μεθόδου κατά EN και ASTM (και ενδεχομένως ASME). Η χρήση των ΔΕΠ μπορεί να τροποποιηθεί επί το αυστηρότερο, μετά από συμφωνία μεταξύ ελεγκτή και ελεγχόμενου.

### **3.14.2 ΔΕΠ ελάσματα με οπές**

Τα συνήθη ΔΕΠ ελάσματα με οπές συνίστανται από ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο κομμάτι από μέταλλο, που περιέχει (συνήθως) τρεις οπές διαφορετικής διαμέτρου. Η διάμετρος των οπών αυτών σχετίζεται με το πάχος του ελάσματος του ΔΕΠ (βλ. π.χ. και τα σχέδια του Διαγράμματος 3.13 ). Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM (American Society for Testing and Materials) τα ΔΕΠ ελάσματα με οπές διαθέτουν τρεις οπές με διάμετρο T, 2T και 4T, όπου T είναι το πάχος του ελάσματος του ΔΕΠ στο σύστημα μονάδων Imperial (inches). Δεδομένου ότι υπάρχουν πρακτικές δυσκολίες για τη διάτρηση οπών πολύ μικρής διαμέτρου σε λεπτά ελάσματα, οι ελάχιστες διαμέτροι των τριών αυτών οπών είναι 0.010", 0.020" και 0.0040". Τα ΔΕΠ ελάσματα με οπές, μπορεί να γίνουν πολύ μεγάλου πάχους και επιφάνειας (εξαιτίας της οπής διαμέτρου 4T). Σε αυτήν την

περίπτωση τα ΔΕΠ ελάσματα με οπές υπάρχουν στη μορφή δίσκων πάχους 0.180", οι οποίοι τοποθετούνται ο ένας πάνω στον άλλο μέχρι τη συμπλήρωση του κατάλληλου πάχους T. Οι δίσκοι είναι έτσι κατασκευασμένοι ώστε η εξωτερική τους διάμετρος να είναι 4T και να περιέχουν δύο οπές διαμέτρου T και 2T (βλ. π.χ. το σχέδιο στο Διάγραμμα 3.13). Τα ΔΕΠ ελάσματα με οπές επιτρέπουν την ποσοτική εκτίμηση της επιτυγχανόμενης ραδιογραφικής ευαισθησίας. Για παράδειγμα, αν οι προδιαγραφές καλούν για ραδιογραφική ευαισθησία 2-2T, τότε αυτό σημαίνει ότι (α) κατά το πρώτο σύμβολο "2", το ΔΕΠ έλασμα με οπές πρέπει να έχει πάχος T ίσο με 2% του πάχους του ραδιογραφούμενου αντικειμένου, και (β) κατά το δεύτερο σύμβολο "2T", τουλάχιστον η οπή με διάμετρο 2T πρέπει να διακρίνεται στην προκύπτουσα ραδιογραφική εικόνα. Η ραδιογραφική ευαισθησία 2-2T είναι η πλέον συνηθισμένη στη ραδιογραφική πράξη. Παρόλαυτά για ραδιογραφούμενα αντικείμενα των οποίων η αντοχή και η ποιότητα είναι εξαιρετικά κρίσιμη, χρησιμοποιούνται κριτήρια ραδιογραφικής ευαισθησίας 1-2T ή ακόμα και 1-1T. Από την άλλη, για ραδιογραφούμενα αντικείμενα των οποίων η αντοχή και η ποιότητα είναι περισσότερο αδιάφορη από το συνηθισμένο, χρησιμοποιούνται χαλαρότερα κριτήρια ραδιογραφικής ευαισθησίας, όπως 2-4T ή ακόμα και 4-4T. Γενικότερα αν τα κριτήρια ραδιογραφικής ευαισθησίας με ΔΕΠ ελάσματα με οπές, περιγράφονται ως m-nT, όπου m, n ακέραιοι αριθμοί με τον τρόπο που χρησιμοποιήθηκαν προηγούμενα, τότε, όσο μικρότεροι είναι οι m,n, τόσο αυστηρότερο είναι το κριτήριο με το οποίο χαρακτηρίζεται η ραδιογραφική ευαισθησία της ραδιογραφικής εικόνας ως αποδεκτή. Παραπλήσια με το πρότυπο ASTM, σύμφωνα με το πρότυπο ASME (American Society of Mechanical Engineers), Κώδικας για Λέβητες και Δοχεία Πιέσεως (Boiler and Pressure Vessel Code), τα ΔΕΠ ελάσματα με οπές, μπορεί να έχουν πάχος T και να διαθέτουν τρεις οπές με διάμετρο 2T, 3T και 4T. Το ελάχιστο T σύμφωνα με την ASME είναι 0.17". Διατίθενται επιπλέον και άλλα ειδικότερα ΔΕΠ ελάσματα με οπές, στα οποία οι οπές δεν είναι κύκλοι αλλά παραλληλόγραμμα ανοίγματα (σχισμές) με κατάλληλο μικρό πλάτος.

### **3.14.3 ΔΕΠ σύρματα**

Τα ΔΕΠ σύρματα κατά EN, χρησιμοποιούνται ευρύτερα στην Ευρώπη και ακολουθούν παλαιότερα γερμανικά πρότυπα DIN (Deutsche Industrie Norm). Ένα ΔΕΠ σύρμα, όπως

αυτό που διακρίνεται στο Διάγραμμα 3.14, αποτελείται από επτά (7) σύρματα σε κατάλληλες διαμέτρους με φθίνουσα κατάταξη κατά διάμετρο. Τα σύρματα είναι σφραγισμένα σε έναν πλαστικό φάκελο, ο οποίος επίσης φέρει σφραγισμένα μεταλλικά γράμματα, που αντιστοιχούν στο υλικό και τις διαμέτρους των συρμάτων του ΔΕΠ, και τα οποία ραδιογραφούνται μαζί με το ελεγχόμενο αντικείμενο, δίνουν πληροφορία για το ΔΕΠ σύρμα που χρησιμοποιήθηκε. Το λεπτότερο σύρμα που αποτυπώνεται πάνω στη ραδιογραφική εικόνα δείχνει και την ραδιογραφική ευαισθησία που είναι δυνατόν να επιτευχθεί. Το σύστημα οργάνωσης και χρήσης αυτών των ΔΕΠ είναι πολύ απλό και έχει σύντομα ως εξής: (α) τα ΔΕΠ σύρματα διατίθενται μόνο για τρία κύρια υλικά, το χάλυβα, το αλουμίνιο και το χαλκό, και (β) για κάθε υλικό διατίθενται τρία ΔΕΠ σύρματα, κάθε ένα από τα οποία περιέχει όπως σημειώθηκε επτά (7) σύρματα σε κατάλληλες διαμέτρους με φθίνουσα κατάταξη κατά διάμετρο. Με αυτόν τον τρόπο, μόλις εννέα (9) ΔΕΠ σύρματα αρκούν για τον έλεγχο της ραδιογραφικής ευαισθησίας στη συντριπτική πλειοψηφία των ραδιογραφιών της πράξης.

#### **3.14.4 Χρήση ΔΕΠ**

Στις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις ραδιογράφισης τα ΔΕΠ πρέπει να τοποθετούνται πάνω στο ραδιογραφούμενο αντικείμενο στην πλευρά που αυτό "βλέπει" την πηγή των φωτονίων (source side). Αυτή θεωρείται και η αυστηρότερη θέση, διότι η πληροφορία που παράγεται από το ΔΕΠ είναι δυνατόν να χαθεί κατά την πορεία των φωτονίων που ακολουθεί στο ραδιογραφούμενο δοκίμιο, κυρίως εξαιτίας της σκέδασης. Πληροφορία επομένως που παράγεται από ένα ΔΕΠ σε αυτή τη γεωμετρική θέση και δεν χάνεται στη συνέχεια για διάφορους λόγους, με αποτέλεσμα να αποτυπώνεται πάνω στο φιλμ, θεωρείται πολύ αξιόπιστη. Άλλη δυνατή θέση τοποθέτησης του ΔΕΠ είναι κάτω από το ραδιογραφούμενο αντικείμενο στην πλευρά που αυτό "βλέπει" το φιλμ (film side). Αυτή η θέση, αν το χρησιμοποιούμενο ΔΕΠ είναι το ίδιο με εκείνο που χρησιμοποιήθηκε στη θέση source side, δεν θεωρείται αξιόπιστη, διότι η πληροφορία που παράγεται από το ΔΕΠ δεν υπόκειται στην επίδραση της σκέδασης, στην οποία επίδραση όμως υπόκεινται όλες οι άλλες πληροφορίες που παράγονται στο ραδιογραφούμενο δοκίμιο. Προκειμένου να μπορεί να ελέγχεται η ραδιογραφική ευαισθησία με τον ίδιο περίπου τρόπο, είτε το ΔΕΠ τοποθετείται στη θέση source side, είτε στη θέση film side, έχει αποφασισθεί ότι τα ΔΕΠ που χρησιμοποιούνται στη θέση

film side, πρέπει γενικά να είναι αυστηρότερα από εκείνα που χρησιμοποιούνται στη θέση source side. Αν υπάρχει αμφιβολία σχετικά με το που τοποθετήθηκε ένα ΔΕΠ (source side ή film side), αυτό είναι σχετικά εύκολο να διαπιστωθεί για ΔΕΠ σύρματα, διότι στην περίπτωση film side τοποθέτησης, θα διακρίνεται στη ραδιογραφία και η πλαστική θήκη του. Στην περίπτωση source side τοποθέτησης η πληροφορία της πλαστικής θήκης θα έχει χαθεί από τη ραδιογραφία λόγω σκέδασης.

### **3.14.5 Στόχος**

Στόχοι του 12<sup>ου</sup> μαθήματος είναι:

- να γίνει κατανοητός ο τρόπος χρήσης των ΔΕΠ.

### **3.14.6 Άσκηση προσομοίωσης**

Κάνετε τα παρακάτω για το δοκίμιο stepwedge, όπως αυτό χρησιμοποιήθηκε στο 3<sup>ο</sup> ή το 4<sup>ο</sup> Μάθημα, χρησιμοποιώντας τον κώδικα XRSIM:

1. Επιλέξτε ως υλικό του δοκιμίου το αλουμίνιο.
2. Εισάγετε στον κώδικα το δοκίμιο "penetr20.stl" και επιλέξτε ως υλικό του επίσης το αλουμίνιο.
3. Τοποθετήστε το ΔΕΠ πάνω (source side) από το λεπτότερο "σκαλοπάτι" του δοκιμίου "stepwedge" και παράγετε μία ραδιογραφία. Προτείνονται οι εξής ρυθμίσεις: 100 kV, 1 mA, 90 s, φιλμ D4, 70cm απόσταση δοκιμίου – πηγής, οι οποίες παράγουν οπτική πυκνότητα γύρω στο 3.2. Αποθηκεύστε την εικόνα της προσομοιωμένης ραδιογραφίας για σύγκριση. Σε αυτό το σημείο σημειώνεται ότι η αποθηκευμένη εικόνα της προσομοιωμένης ραδιογραφίας έχει χαμηλότερη ποιότητα από τη προσομοιωμένη ραδιογραφία όπως αυτή φαίνεται στο σχετικό "παράθυρο" όταν τρέχει ο κώδικας XRSIM, με αποτέλεσμα οι μικρές οπές του ΔΕΠ που διακρίνονται στην οθόνη να μην διακρίνονται πλέον όταν γίνεται αναπαραγωγή της αποθηκευμένης εικόνας. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος, ανάλογα με τη δυνατότητα του υπολογιστή που χρησιμοποιείτε, προτείνεται η μεγάλη αύξηση του μεγέθους της παραγόμενης εικόνας από το εξ'ορισμού μέγεθος των 256 x 128 pixel. Ένα πολύ καλό μέγεθος είναι το 2048x1024 pixel, πράγμα που επιτρέπει να διακρίνονται οι πολύ μικρές οπές του ΔΕΠ όταν γίνεται αναπαραγωγή της αποθηκευμένης εικόνας.

4. Τοποθετήστε το ΔΕΠ πάνω (source side) από το παχύτερο "σκαλοπάτι" του δοκιμίου "stepwedge" και παράγετε μία δεύτερη ραδιογραφία. Προτείνονται οι εξής ρυθμίσεις: 100 kV, 3.5 mA, 90 s, φιλμ D4, 70cm απόσταση δοκιμίου – πηγής, οι οποίες παράγουν οπτική πυκνότητα γύρω στο 3. Αποθηκεύστε την εικόνα της προσομοιωμένης ραδιογραφίας για σύγκριση.
5. Παράγετε δύο ακόμα ραδιογραφίες με όμοιες ρυθμίσεις με τις προηγούμενες, με μόνη διαφορά ότι το ΔΕΠ τώρα θα βρίσκεται στο κάτω μέρος (film side) των "σκαλοπατιών".
6. Σε ποιες ραδιογραφίες φαίνονται καθαρότερα οι οπές του ΔΕΠ. Σε αυτές που ραδιογραφείται το λεπτότερο ή το παχύτερο "σκαλοπάτι" του δοκιμίου<sup>2</sup>; Σε αυτές που το ΔΕΠ ραδιογραφείται στο πάνω μέρος του δοκιμίου ή στο κάτω<sup>2</sup>; Για την απάντησή σας σε αυτό το τελευταίο ερώτημα λάβετε υπόψιν ότι ο κώδικας XRSIM, στην έκδοση που χρησιμοποιείται, δεν περιλαμβάνει σκέδαση στους αλγόριθμους προσομοίωσης που χρησιμοποιεί

#### **3.14.7 Εργαστηριακή άσκηση**

Επαναλάβετε την άσκηση προσομοίωσης στο Εργαστήριο, χρησιμοποιώντας τον διαθέσιμο εξοπλισμό. Γράψτε μία σύντομη αναφορά περιγράφοντας την εργαστηριακή άσκηση και τα αποτελέσματά της<sup>2</sup>.

### **3.15 Μάθημα 13<sup>ο</sup>: Αναφορά ραδιογραφικού ελέγχου δοκιμίου**

#### **3.15.1 Εισαγωγή**

Αναπόσπαστο μέρος της ραδιογραφικής διαδικασίας είναι η ταυτόχρονη συμπλήρωση μίας αναφοράς (φόρμας) για την καταγραφή των ρυθμίσεων έκθεσης του δοκιμίου και των συμπερασμάτων από την έκθεση αυτή. Η αναφορά αυτή συνοδεύει το φιλμ και εκτός από τις τεχνικές πληροφορίες περιέχει και τα σχόλια του αξιολογητή<sup>5</sup> που εξέτασε το ραδιογραφικό αποτέλεσμα σε σχέση με τα ελαττώματα του δοκιμίου και πιθανές ατέλειες της ραδιογραφικής διαδικασίας. Οι πληροφορίες που οπωσδήποτε πρέπει να περιέχονται στην αναφορά αυτή αφορούν στον τύπο του φιλμ, τις ρυθμίσεις έκθεσης, την απόσταση φιλμ-πηγής, τον προσανατολισμό του δοκιμίου και τον απαιτούμενο αριθμό ραδιογραφιών για ένα συγκεκριμένο δοκίμιο.

#### **3.15.2 Τυποποίηση ραδιογραφικής διαδικασίας**

Οι ραδιογραφικές διαδικασίες συνήθως τυποποιούνται σε ένα Εργαστήριο, ώστε:

*Δοκίμια από το ίδιο υλικό, με το ίδιο πάχος, ραδιογραφούνται με την ίδια έκθεση στην ίδια τάση, από την ίδια απόσταση, ώστε να επιτυγχάνεται οπτική πυκνότητα στην περιοχή 2 έως 3. Ο χρόνος έκθεσης πρέπει να είναι ο ελάχιστος δυνατός.*

Εξαιρέσεις από τις τυποποιήσεις γίνονται συνήθως μόνο όταν χρειάζεται να ληφθούν ειδικές ραδιογραφικές εικόνες.

#### **3.15.3 Στόχος**

Στόχοι του 13<sup>ου</sup> μαθήματος είναι:

- να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο συμπληρώνεται μία αναφορά ραδιογραφικού ελέγχου δοκιμίου.

#### **3.15.4 Εργαστηριακή άσκηση**

Για μία ή περισσότερες από τις εργαστηριακές ασκήσεις ραδιογραφικής απεικόνισης των προηγούμενων μαθημάτων ή για μία άλλη νέα εργαστηριακή ραδιογραφική απεικόνιση, συμπληρώστε τη σχετική αναφορά, όπως αυτή παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.6. Πέρα

---

<sup>5</sup> Οι αξιολογητές είναι εκπαιδευμένοι και πιστοποιημένοι τεχνικοί για την αξιολόγηση συμπερασμάτων από τους πλέον τυποποιημένους μη καταστρεπτικούς ελέγχους υλικών, όπως π.χ. είναι η βιομηχανική ραδιογραφία και οι υπέρηχοι. Το επίπεδο πιστοποίησης των αξιολογητών μπορεί να είναι I ή II ή το μέγιστο III, ανάλογα με τις γνώσεις και την ικανότητα αξιολόγησης που οι αξιολογητές αυτοί διαθέτουν. Το επίπεδο αυτό πιστοποιείται μετά από σεμινάρια και αντίστοιχες εξετάσεις. Η πιστοποίηση διαρκεί περιορισμένο χρονικό διάστημα και μετά από αυτό πρέπει να ανανεώνεται μετά από νέες εξετάσεις.

από τα προφανή, προσοχή χρειάζεται κατά την επαγγελματική χρήση μιας τέτοιας αναφοράς στα εξής:

1. Στην ορθή συμπλήρωση της "Προδιαγραφής Ραδιογραφίας". Διατίθενται σαφείς οδηγίες κατά EN ή κατά ASTM, σύμφωνα με τις οποίες γίνονται οι ραδιογραφίες συγκολλήσεων, χυτών, ελαφρών μετάλλων κλπ.
2. Στο χαρακτηρισμό της ραδιογραφίας ως αποδεκτή ή απορριπτέα. Ο χαρακτηρισμός αυτός αποδίδεται, είτε επειδή τα ελαττώματα του δοκιμίου είναι πολλά σε σχέση με τις ελάχιστες απαιτήσεις της προδιαγραφής, είτε επειδή η ραδιογραφία έχει γίνει με κακή τεχνική με αποτέλεσμα να μην μπορεί να αξιολογηθεί το δοκίμιο. Για το χαρακτηρισμό της ραδιογραφίας βλ. και τα "κελιά" "Παρατηρήσεις Αξιολογητή Επιπέδου III" και "Τύπος IQI"
3. Στο τμήμα "Παρατηρήσεις Αξιολογητή Επιπέδου III". Εκεί ο αξιολογητής παρουσιάζει τα σχόλιά του που τον οδηγούν να αποδεχθεί ή να απορρίψει την ραδιογραφία. Συστήνει επίσης, τι μπορεί ή πρέπει να γίνει για τη ραδιογραφία (π.χ. επανάληψη) ή για το δοκίμιο (επισκευή, πλήρης απόρριψη, κατάταξη σε προϊόν β' διαλογής κλπ).

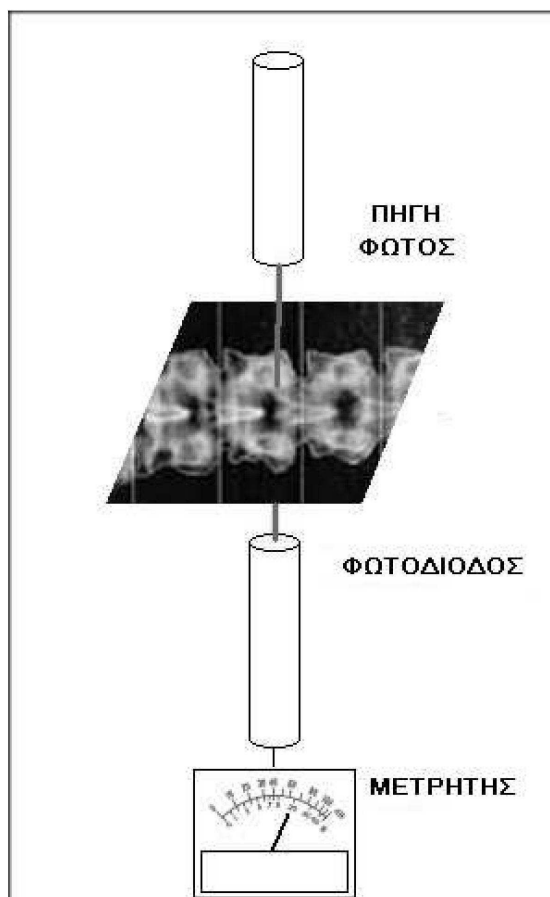
### 3.16 Συμπεράσματα

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, παρουσιάστηκαν εφαρμογές του κώδικα υπό τύπον "μαθημάτων", ώστε ο χρήστης/εκπαιδευόμενος να εξοικειωθεί τόσο με τον ίδιο τον κώδικα, όσο και με την πραγματική ραδιογραφική διαδικασία που προσομοιώνεται. Τα μαθήματα, που είναι στο σύνολό τους δεκατρία (13), εκτός από προσομοίωση με τον κώδικα πρέπει να συμπληρώνονται και από πραγματική εργαστηριακή εξάσκηση, έτσι ώστε να διαπιστώνονται τόσο τα πλεονεκτήματα, όσο και οι τυχόν αδυναμίες της προσομοίωσης. Όπως έχει γίνει ήδη σαφές στα μαθήματα οι εικονικές ραδιογραφίες στον κώδικα προσομοίωσης παράγονται μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα, παρέχοντας άμεση εποπτεία του αποτελέσματος που έχουν οι προσομοιούμενες παράμετροι στην ποιότητα της εικόνας. Τα κείμενα των περισσότερων από τα μαθήματα αυτά βασίζονται σε αντίστοιχα κείμενα στα αγγλικά (βλ. και XRSIM, 1999b) για δέκα σχετικά μαθήματα. Τα τρία επιπλέον μαθήματα συντάχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής εργασίας για να εξασφαλισθεί πληρότητα και σύμπλευση με την αντίστοιχη θεωρία ραδιογραφικού ελέγχου. Σημειώνεται ότι όπως διαπιστώθηκε, τα υπόψιν κείμενα στα αγγλικά (βλ. και XRSIM, 1999b), παρουσιάζουν ορισμένες αδυναμίες, κυρίως σε ότι αφορά τη σύνδεση της θεωρίας με την πράξη. Στην ελληνική απόδοση που έγινε, καταβλήθηκε προσπάθεια να καταπολεμηθούν κατά το δυνατόν οι αδυναμίες αυτές. Για το σκοπό αυτό πριν τα κείμενα για τα δεκατρία μαθήματα προηγήθηκε η ανάπτυξη μίας πολύ βασικής ενότητας με τους περισσότερους αναγκαίους ορισμούς.

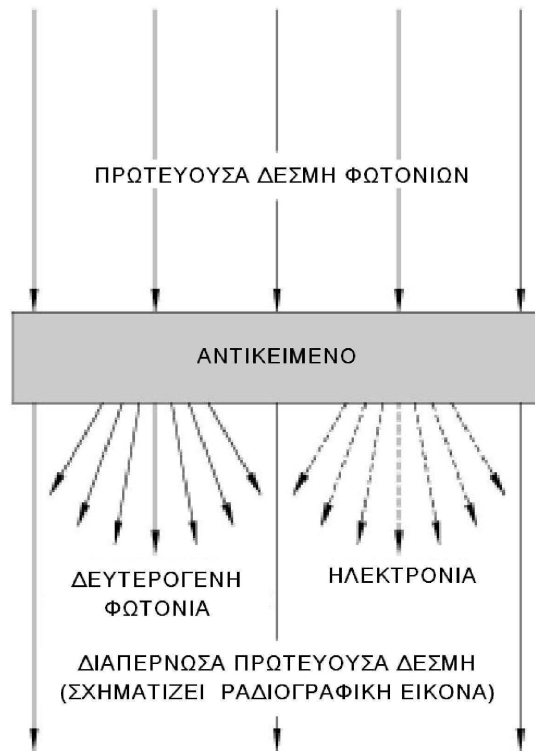
Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο θα παρουσιασθεί ο τρόπος με τον οποίο σχεδιάζονται και κατασκευάζονται τριδιάστατα δοκίμια σε ηλεκτρονική μορφή, στην τυποποίηση .stl, με το επιθυμητό σχήμα. Τα δοκίμια αυτά σε αυτήν την τυποποίηση είναι κατάλληλα για να εισάγονται στον κώδικα XRSIM και να ραδιογραφούνται εικονικά.



## ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 3<sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

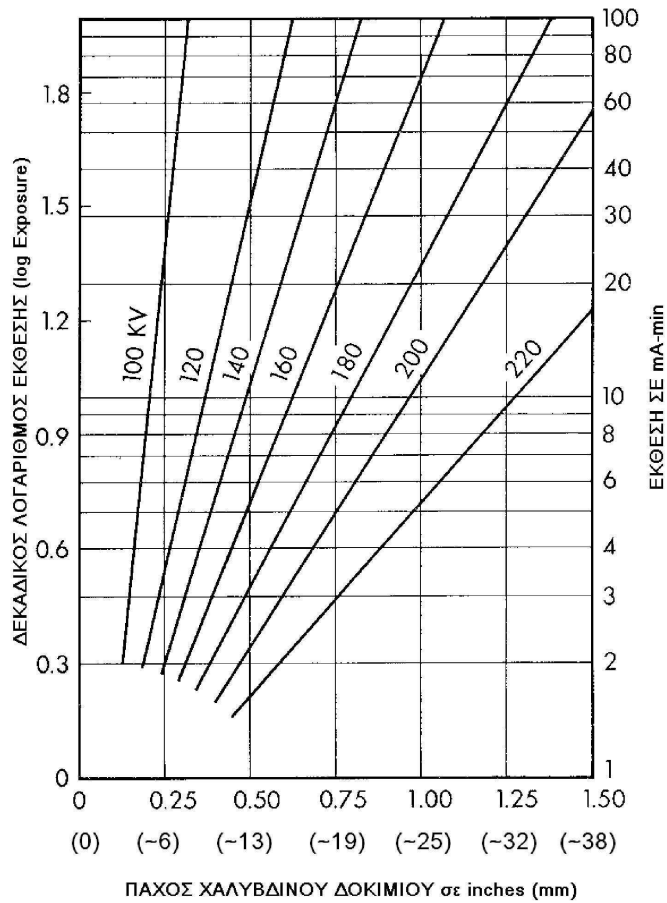


**Διάγραμμα 3.1**  
**Μετρητής οπτικής πυκνότητας**



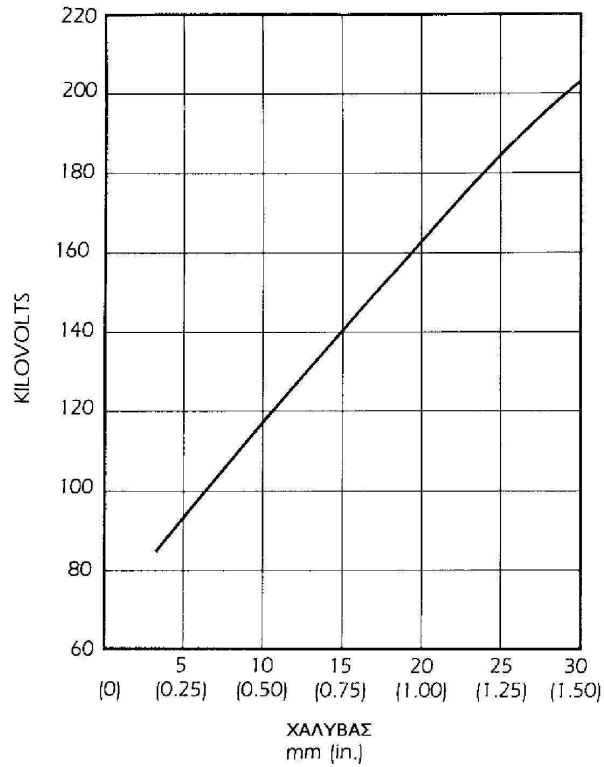
**Διάγραμμα 3.2**

**Σχηματικό διάγραμμα που αποδίδει τους τρόπους με τους οποίους τα φωτόνια διασχίζουν την ύλη: (α) χωρίς να αλληλεπιδράσουν (διαπερνάωσα πρωτεύουσα δέσμη), (β) με αλληλεπίδραση (παράγουν δευτερογενή φωτόνια τυχαίας κατεύθυνσης) και (γ) με αλληλεπίδραση (παράγουν ηλεκτρόνια)**  
**[βλ. και Quinn, 1980]**



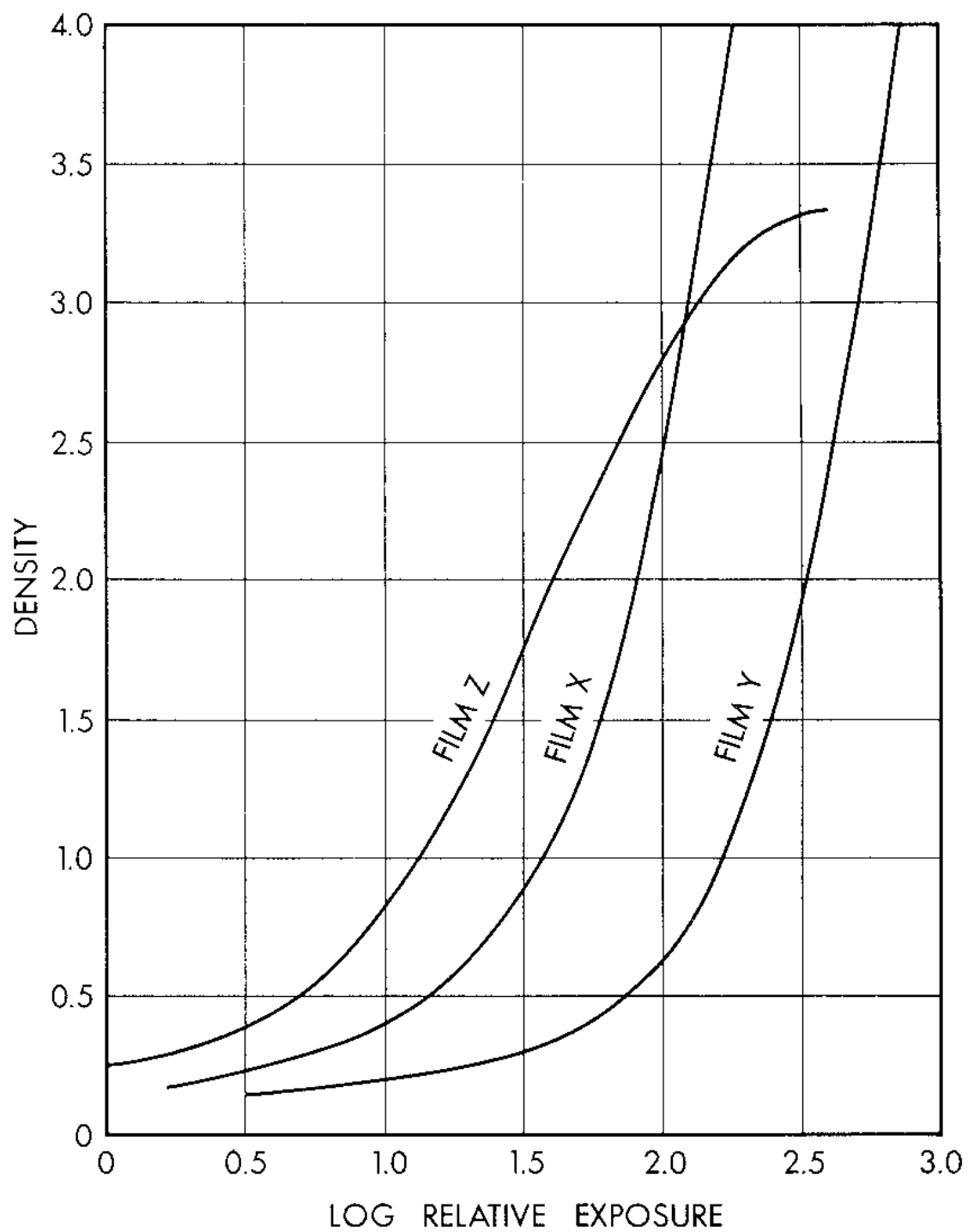
**Διάγραμμα 3.3**

**Τυπικό διάγραμμα έκθεσης για χάλυβα. Πηγή φωτονίων ακτίνων -x. Οπτική πυκνότητα 1.5, Απόσταση πηγής φωτονίων – φιλμ 40 inches (~ 1 m), Φιλμ συγκεκριμένου τύπου με ενισχυτικές οθόνες [βλ. και Quinn, 1980]**



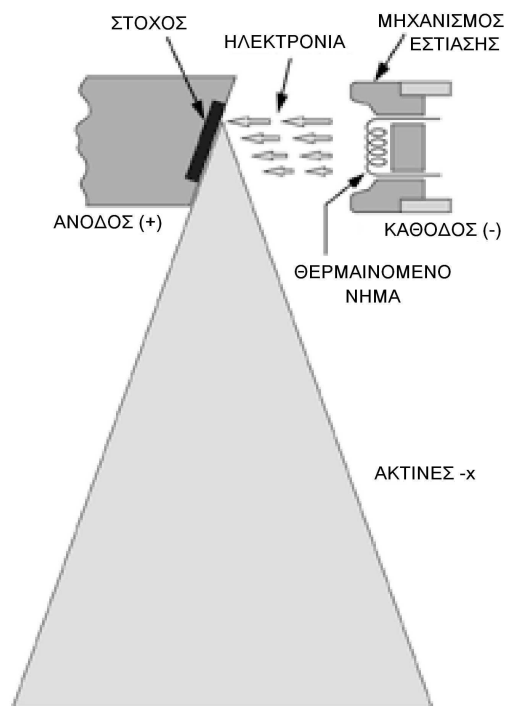
**Διάγραμμα 3.4**

**Τυπικό διάγραμμα έκθεσης για χάλυβα. Πηγή φωτονίων ακτίνων -x. Οπτική πυκνότητα 1.5, Απόσταση πηγής φωτονίων – φιλμ 40 inches (~ 1 m), Φιλμ συγκεκριμένου τύπου με ενισχυτικές οθόνες, Σταθερή έκθεση 50 mA-min [βλ. και Quinn, 1980]**



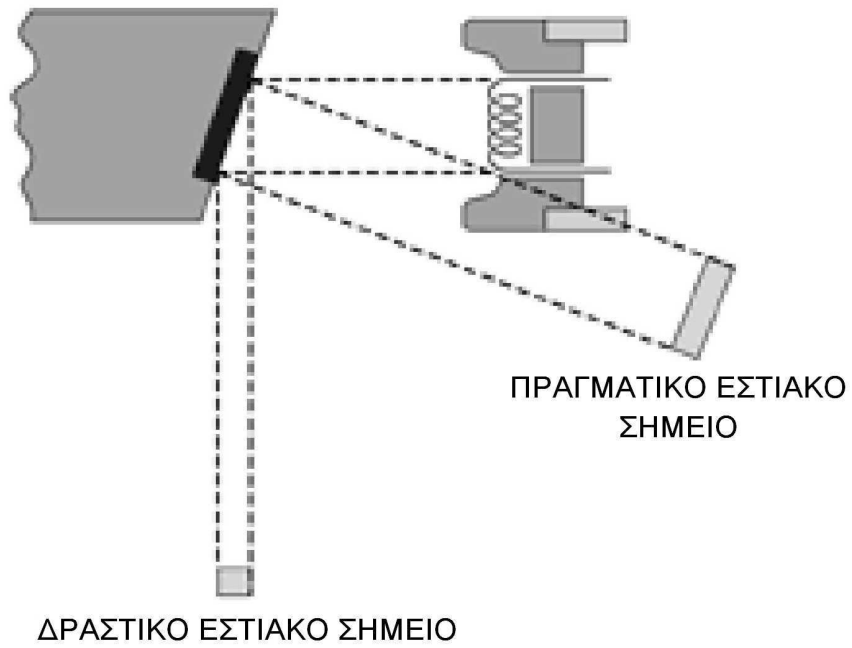
Διάγραμμα 3.5

Χαρακτηριστικές καμπύλες για διάφορα φιλμ X, Y και Z με ενισχυτικές οθόνες μολύβδου [βλ. και Quinn, 1980]



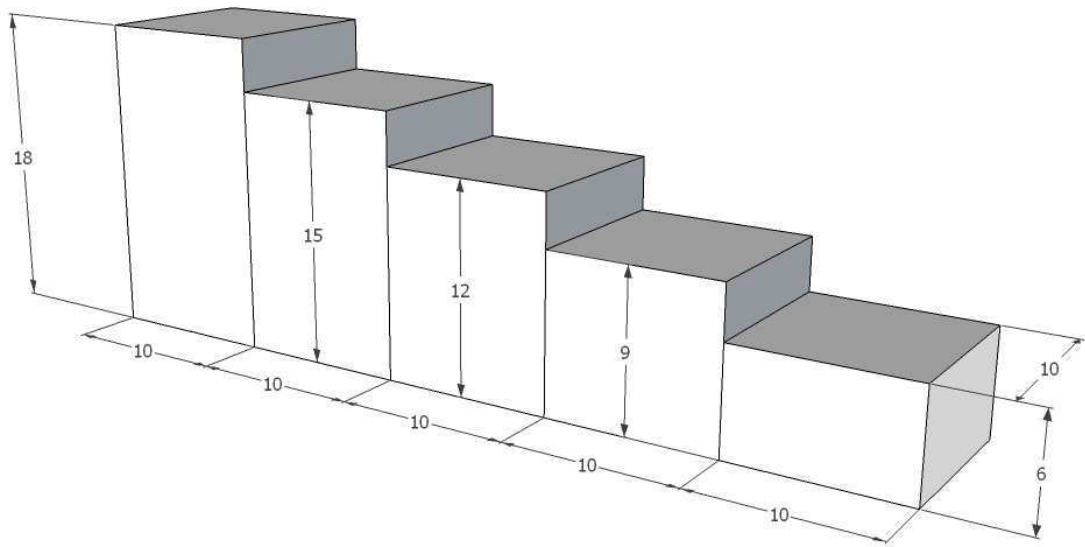
**Διάγραμμα 3.6**

**Σχηματικό διάγραμμα μηχανισμού παραγωγής ακτίνων -x**



**Διάγραμμα 3.7**

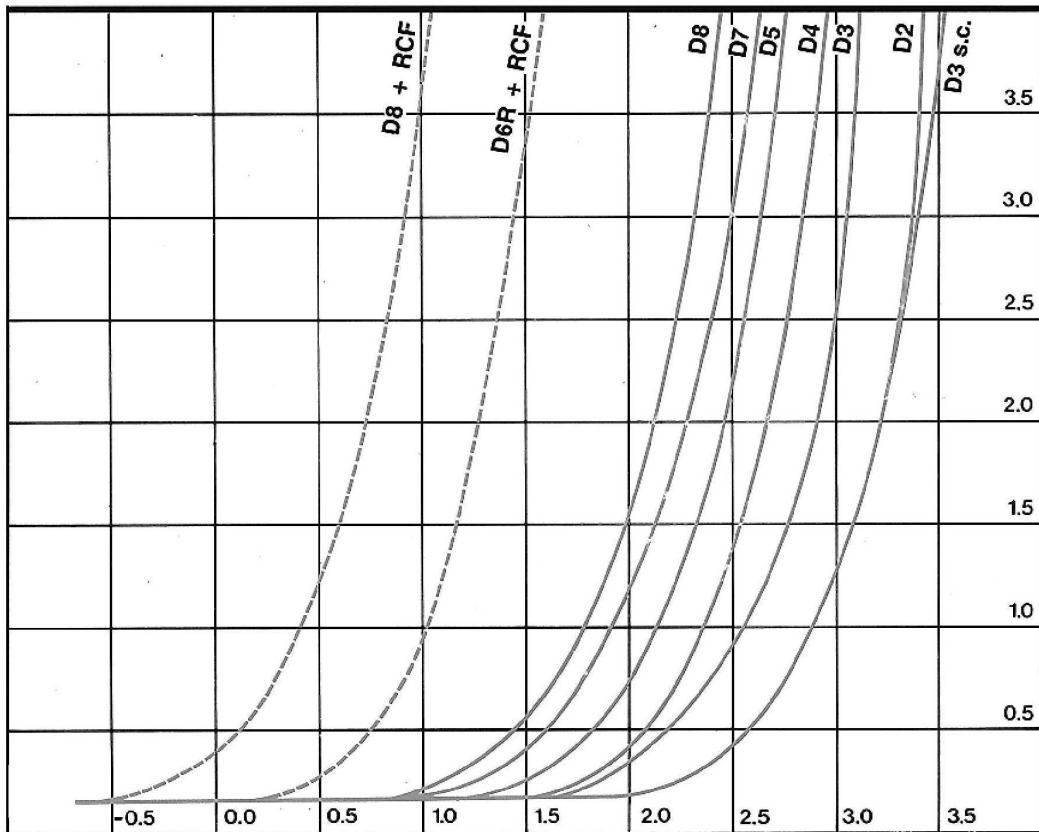
Σχέση μεταξύ της επιφάνειας του πραγματικού εστιακού σημείου (επιφάνεια του στόχου που προσβάλλεται από νετρόνια) και της επιφάνειας του δραστικού εστιακού σημείου, αν η άνοδος σχηματίζει γωνία  $20^\circ$  με την παράλληλη δέσμη των ηλεκτρονίων-βλημάτων



**Διάγραμμα 3.8**

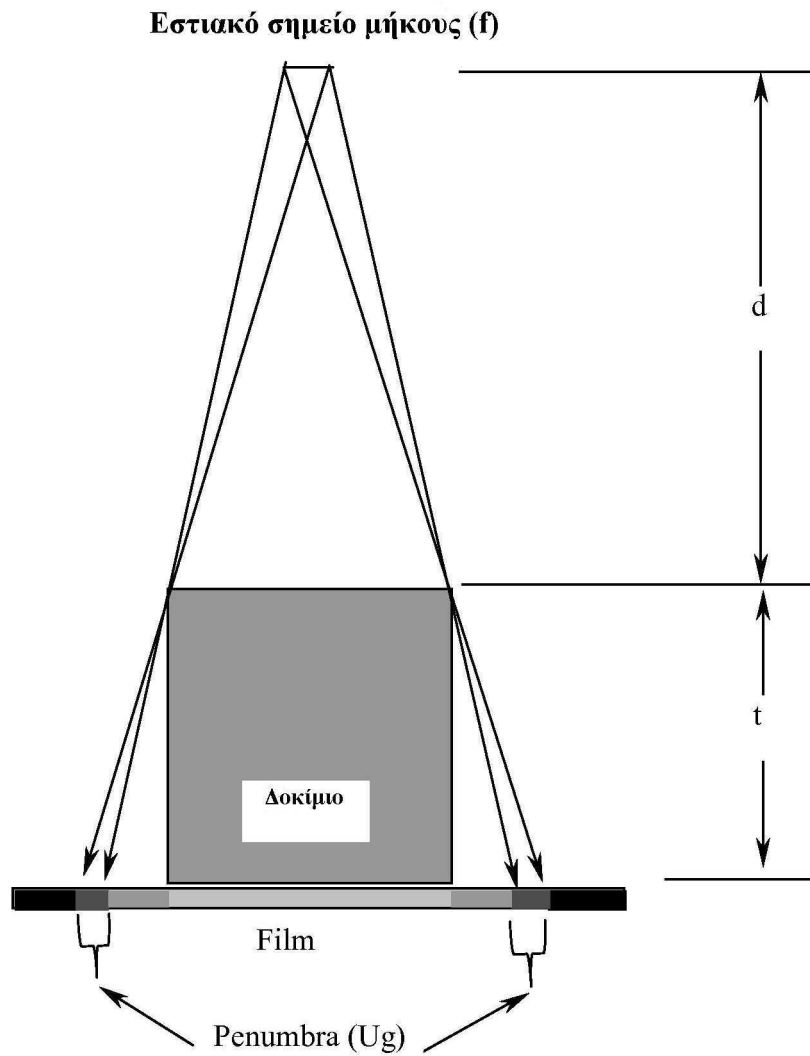
**Προοπτικό σχέδιο δοκιμίου κλίμακος "stepwedge" με πέντε σκαλοπάτια**





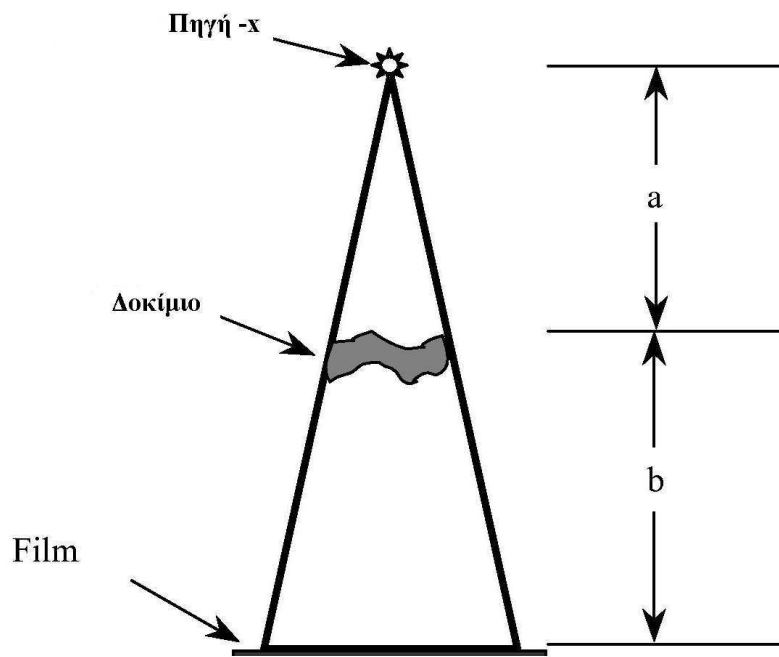
**Διάγραμμα 3.9**

**Χαρακτηριστικές καμπύλες (σенсиτομετρικές) για διάφορα φιλμ Agfa  
Structurix industrial [βλ. και XRSIM, 1999b]**



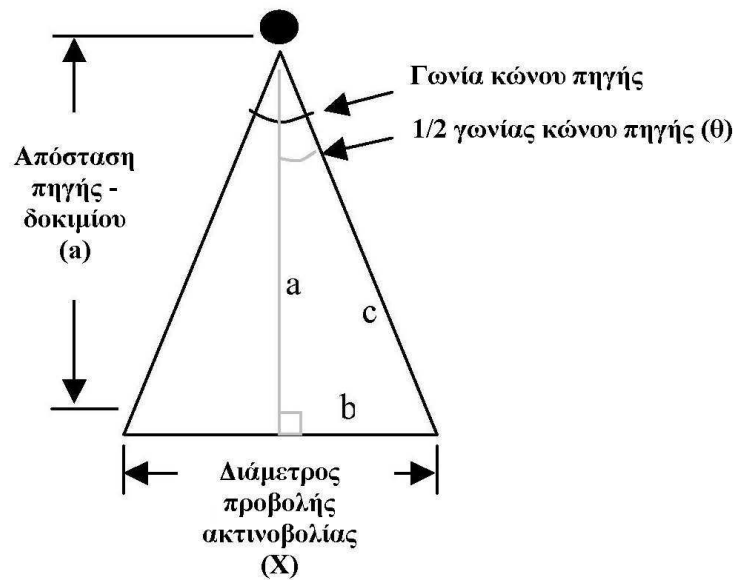
**Διάγραμμα 3.10**

**Γεωμετρική ασάφεια στη ραδιογραφία ( $U_g$ , παρασκία, και στα λατινικά penumbra)  
[βλ. και XRSIM, 1999b και σχέση (3.12)]**



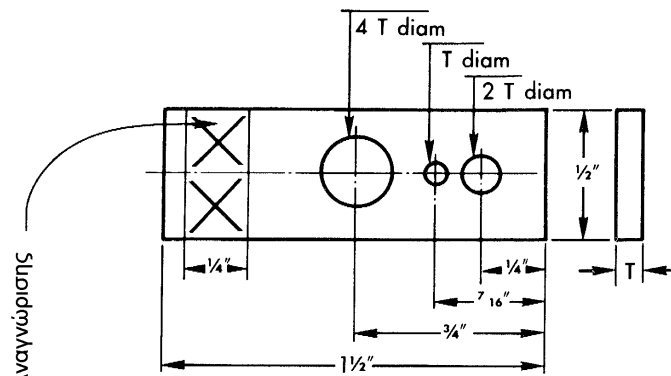
Διάγραμμα 3.11

Γεωμετρική μεγέθυνση στη ραδιογραφία [βλ. και XRSIM, 1999b και σχέση (3.13)]



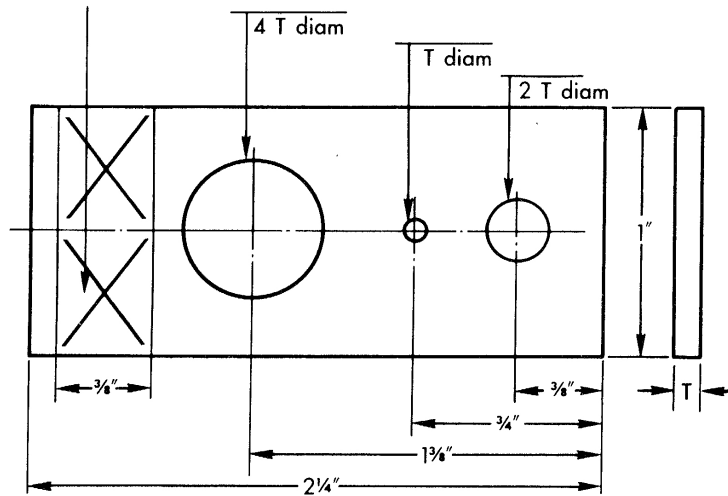
Διάγραμμα 3.12

Υπολογισμός της διαμέτρου X της προβολής της ακτινοβολίας από κώνο πηγής ακτίνων -x [βλ. και XRSIM, 1999b και σχέση (3.14)]

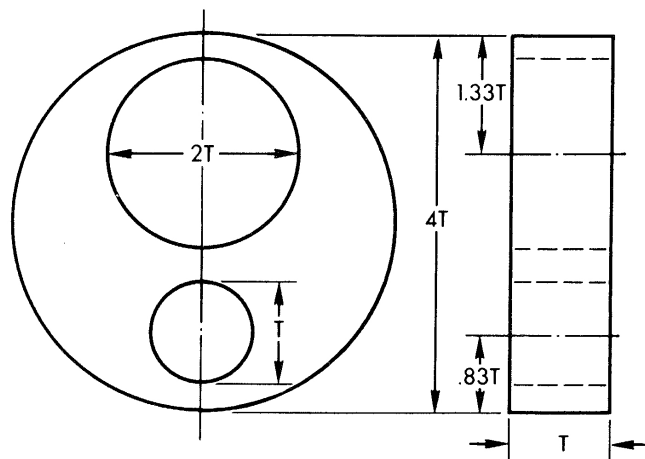


Αριθμοί Αναγνώρισης

ΔΕΠ έλασμα με οπές πάχους από 0.005" έως και 0.050"



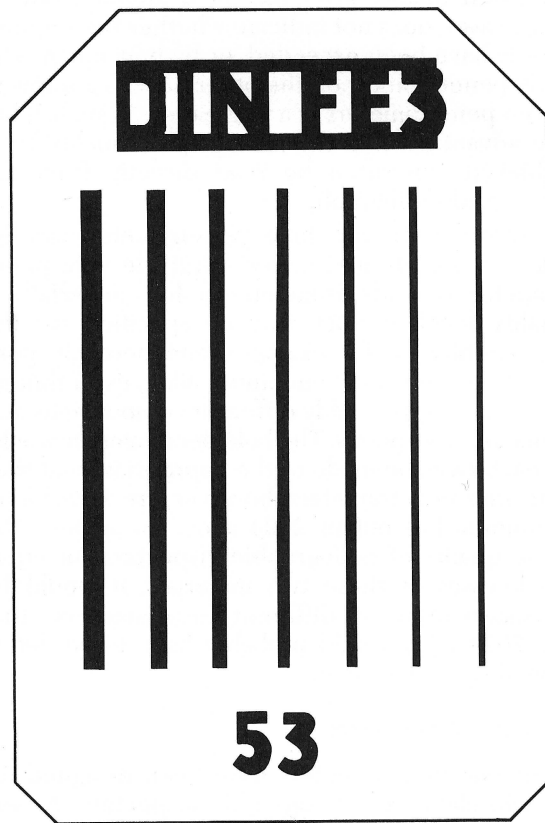
ΔΕΠ έλασμα με οπές πάχους από 0.060" έως και 0.160"  
Σύνθεση από ελάσματα πάχους 0.010"



ΔΕΠ έλασμα με οπές πάχους από 0.060" έως και 0.160"  
Σύνθεση από ελάσματα πάχους 0.010"

### Διάγραμμα 3.13

ΔΕΠ ελάσματα με οπές κατά ASTM [βλ. και Bryant, 1985]



Διάγραμμα 3.14

ΔΕΠ σύρματα κατά DIN ή EN [βλ. και Bryant, 1985]

### ΠΙΝΑΚΕΣ ΤΟΥ 3<sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Υλικό	50 kV	100 kV	150 kV	220 kV	400 kV	1000 kV	2000 kV	4 – 25 MeV
Μαγνήσιο	0.6	0.6	0.5	0.08				
Αλουμίνιο	1.0	1.0	0.12	0.18				
Κράμα 2024 (αλουμίνιο)	2.2	1.6	0.16	0.22				
Τιτάνιο			0.45	0.35				
Χάλυβας		12.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Κράμα 18-8 (χάλυβας)		12.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Χαλκός		18.0	1.6	1.4	1.4			1.3
Ψευδάργυρος			1.4	1.3	1.3			1.2
Ορείχαλκος*			1.4*	1.3*	1.3*	1.2*	1.2*	1.2*
Inconel		16.0	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
Ζιρκόνιο			2.3	2.0		1.0		
Μόλυβδος			14.0	12.0		5.0	2.5	3.0
Ουράνιο				25.0				3.4

Πίνακας 3.1

Προσεγγιστικοί συντελεστές ισοδύναμης έκθεσης για ακτίνες –x [βλ. και Quinn, 1980].

Το ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ είναι το μέταλλο αναφοράς για τα 50 και τα 100 kV. Ο ΧΑΛΥΒΑΣ είναι το μέταλλο αναφοράς για υψηλότερα kV.

Το πάχος κάθε άλλου μετάλλου πολλαπλασιάζεται με τον αντίστοιχο συντελεστή διόρθωσης, προκειμένου να υπολογισθεί το ισοδύναμο πάχος ενός από τα μέταλλα αναφοράς. Για την επιτυχή ραδιογραφία, η αναγκαία έκθεση υπολογίζεται για το ισοδύναμο πάχος του μετάλλου αναφοράς.

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ:** Για να ραδιογραφηθεί χαλκός πάχους 1.27 cm (0.5 inch) στα 220 kV, το πάχος αυτό πολλαπλασιάζεται με το συντελεστή 1.4 και υπολογίζεται ένα ισοδύναμο πάχος ατσαλιού 1.78 cm (0.7 inch).

(\*) Οι συντελεστές για ορείχαλκο είναι ενδεικτικοί, επειδή στο κράμα αυτό η περιεκτικότητα του κασσίτερου και του μολύβδου δεν είναι αυστηρά καθορισμένες.

Υλικό (g/cm <sup>3</sup> )	Μαγνήσιο (1.7)	Αλουμίνιο (2.7)	Τιτάνιο (4.5)	Χάλυβας (7.8)	Κράμα 18-8 (8.0)	Χαλκός (8.9)	Ψευδάργυρος (7.1)	Ορείχαλκος (8.6)	Ζιρκόνιο (6.5)	Μόλυβδος (11.3)	Ουράνιο (18.9)
Μαγνήσιο	1.00	1.60	2.65	4.68	4.70	5.23	4.18	5.06	3.82		
Αλουμίνιο	0.63	1.00	1.65	2.88	2.96	3.30	2.63	3.18			
Τιτάνιο	0.38	0.60	1.00	1.73	1.78	1.98	1.58	1.91			
Χάλυβας	0.22	0.35	0.58	1.00	1.02	1.14	0.91	1.10			
Κράμα 18-8 (χάλυβας)	0.21	0.34	0.56	0.97	1.00	1.11	0.89	1.07			
Χαλκός	0.19	0.30	0.50	0.88	0.90	1.00	0.80	0.97			
Ψευδάργυρος	0.23	0.38	0.63	1.10	1.13	1.25	1.00	1.21			
Ορείχαλκος	0.19	0.31	0.52	0.91	0.93	1.03	0.82	1.00			
Ζιρκόνιο			0.69	1.28	1.23	1.37	1.09	1.32	1.0		
Μόλυβδος	0.15	0.24	0.40	0.69	0.71	0.79	0.63	0.76		1.0	
Ουράνιο	0.09	0.14	0.23	0.41	0.42	0.47	0.37	0.45			1.0

Πίνακας 3.2

Λόγοι των πυκνοτήτων των υλικών του Πίνακα 3.1 προς τις πυκνότητες του χάλυβα και του αλουμινίου  
[βλ. και Πετρόπουλος, 2009]

<b>Υψηλή Τάση</b>	100 KV	200 KV
<b>Τύπος Film</b>		
<b>D-2</b>	10.6	8.7
<b>D-3</b>	4.1	4.2
<b>D-4</b>	3.1	2.6
<b>D-5</b>	1.8	1.6
<b>D-7</b>	1.0	1.0
<b>D-8</b>	0.7	0.7

**Πίνακας 3.3**

Συντελεστές διόρθωσης έκθεσης για φιλμ Agfa Structurix industrial, ως προς φιλμ αναφοράς το D-7, προκειμένου να μπορούν να γίνονται ισοδύναμης οπτικής πυκνότητας ραδιογραφίες του ίδιου δοκιμίου με άλλα φιλμ [βλ. και XRSIM, 1999b και Διάγραμμα 3.9]

<u>kV</u>	<u>Υλικό</u>	<u>μ</u>
50	Al	0.964
60	Al	0.729
80	Al	0.540
100	Al	0.456

---

50	St	15.2
60	St	9.52
80	St	4.71
100	St	2.93
150	St	1.54
200	St	1.15

**Πίνακας 3.4**

Γραμμικοί συντελεστές εξασθένησης ακτινοβολίας –x για Αλουμίνιο και Χάλυβα σε διάφορες υψηλές τάσεις (kV) [βλ. και XRSIM, 1999b]



<b>r</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>110</b>	<b>120</b>	<b>130</b>	<b>140</b>	<b>150</b>
<b>50</b>	<b>1.00</b>	<b>1.44</b>	<b>1.96</b>	<b>2.56</b>	<b>3.24</b>	<b>4.00</b>	<b>4.84</b>	<b>5.76</b>	<b>6.76</b>	<b>7.84</b>	<b>9.00</b>
<b>60</b>	<b>0.69</b>	<b>1.00</b>	<b>1.36</b>	<b>1.78</b>	<b>2.25</b>	<b>2.78</b>	<b>3.36</b>	<b>4.00</b>	<b>4.69</b>	<b>5.44</b>	<b>6.25</b>
<b>70</b>	<b>0.51</b>	<b>0.73</b>	<b>1.00</b>	<b>1.31</b>	<b>1.65</b>	<b>2.04</b>	<b>2.47</b>	<b>2.94</b>	<b>3.45</b>	<b>4.00</b>	<b>4.59</b>
<b>80</b>	<b>0.39</b>	<b>0.56</b>	<b>0.77</b>	<b>1.00</b>	<b>1.27</b>	<b>1.56</b>	<b>1.89</b>	<b>2.25</b>	<b>2.64</b>	<b>3.06</b>	<b>3.52</b>
<b>90</b>	<b>0.31</b>	<b>0.44</b>	<b>0.60</b>	<b>0.79</b>	<b>1.00</b>	<b>1.23</b>	<b>1.49</b>	<b>1.78</b>	<b>2.09</b>	<b>2.42</b>	<b>2.78</b>
<b>100</b>	<b>0.25</b>	<b>0.36</b>	<b>0.49</b>	<b>0.64</b>	<b>0.81</b>	<b>1.00</b>	<b>1.21</b>	<b>1.44</b>	<b>1.69</b>	<b>1.96</b>	<b>2.25</b>
<b>110</b>	<b>0.21</b>	<b>0.30</b>	<b>0.40</b>	<b>0.53</b>	<b>0.67</b>	<b>0.83</b>	<b>1.00</b>	<b>1.19</b>	<b>1.40</b>	<b>1.62</b>	<b>1.86</b>
<b>120</b>	<b>0.17</b>	<b>0.25</b>	<b>0.34</b>	<b>0.44</b>	<b>0.56</b>	<b>0.69</b>	<b>0.84</b>	<b>1.00</b>	<b>1.17</b>	<b>1.36</b>	<b>1.56</b>
<b>130</b>	<b>0.15</b>	<b>0.21</b>	<b>0.29</b>	<b>0.38</b>	<b>0.48</b>	<b>0.59</b>	<b>0.72</b>	<b>0.85</b>	<b>1.00</b>	<b>1.16</b>	<b>1.33</b>
<b>140</b>	<b>0.13</b>	<b>0.18</b>	<b>0.25</b>	<b>0.33</b>	<b>0.41</b>	<b>0.51</b>	<b>0.62</b>	<b>0.73</b>	<b>0.86</b>	<b>1.00</b>	<b>1.15</b>
<b>150</b>	<b>0.11</b>	<b>0.16</b>	<b>0.22</b>	<b>0.28</b>	<b>0.36</b>	<b>0.44</b>	<b>0.54</b>	<b>0.64</b>	<b>0.75</b>	<b>0.87</b>	<b>1.00</b>

**Πίνακας 3.5**

**Συντελεστές διόρθωσης έκθεσης για διάφορες αποστάσεις πηγής – φιλμ στην περιοχή απόστασης (r) από 50 έως 150 με βήμα 10 (οι μονάδες μήκους είναι αυθαίρετες, εδώ π.χ. μπορεί να είναι cm ή inches κλπ)**

Πελάτης			Ημερομηνία				Γεωμετρία δοκιμίου-πηγής	
Προδιαγραφή Ραδιογραφίας	Αποδεκτή/Απορριπτέα	1η όψη	2η όψη	3η όψη	4η όψη	1η όψη	2η όψη	
Όνομα δοκιμίου	Απόσταση πηγής-φιλμ							
Αριθμός δοκιμίου	Πηγή (ισότοπο)							
Υλικό	Ραδιενέργεια ισότοπου							
Πάχος δοκιμίου	Μηχανή παραγωγής -x							
Παρατηρήσεις Αξιολογητή Επιπέδου III	Υψηλή τάση (kV)							
	Ένταση (mA)							
	Χρόνος έκθεσης (s)					3η όψη	4η όψη	
	Τύπος IQI							
	Κατασκευαστής φιλμ							
	Είδος και μέγεθος φιλμ							
Επεξεργασία φιλμ: Αυτόματη Χειροκίνητη	Ενισχυτικές οθόνες							
Για χειροκίνητη επεξεργασία φιλμ: Χρόνος εμφάνισης   Θερμοκρασία	Οπτική πυκνότητα							

Ο Αξιολογητής Επιπέδου III:	Ημερομηνία:
Ο Ραδιογράφος:	Ημερομηνία:

**Πίνακας 3.6**  
**Τυπική αναφορά ραδιογραφικού ελέγχου [βλ. και XRSIM, 1999b]**

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ CAD ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΤΟΝ ΚΩΔΙΚΑ XRSIM**

#### **4.1 Εισαγωγή**

Όπως παρουσιάστηκε στα προηγούμενα Κεφάλαια, ο κώδικας XRSIM μπορεί να χρησιμοποιείται για την προσομοίωση βιομηχανικής ραδιογραφίας. Για το σκοπό αυτό απαιτείται να εισάγονται σε αυτόν δοκίμια σε μορφή ηλεκτρονικών αρχείων CAD (Computer-Aided Design) στερεών που προσομοιώνουν διάφορα πραγματικά δοκίμια. Τα αρχεία CAD που μπορεί να "διαβάσει" ο κώδικας μπορούν να ακολουθούν τρεις τυποποιήσεις CAD: την stl, την unv και την xad. Ο πιο διαδεδομένος και ο πιο εύκολος στη χρήση και τροποποίηση με διάφορα προγράμματα τύπος αρχείων από τους παραπάνω είναι ο τύπος που ακολουθεί την τυποποίηση stl. Η τυποποίηση αυτή δημιουργήθηκε για την εξυπηρέτηση κατασκευής τριδιάστατων πραγματικών δοκιμών, για λόγους παρατήρησης, έρευνας και βελτιστοποίησης στα πλαίσια μιας τεχνικής που ονομάζεται στερεολιθογραφία (στα αγγλικά stereolithography εξ' ού και η κατάληξη stl). Τα αντίστοιχα αρχεία CAD έχουν συνήθως την επέκταση \*.stl. Έχει αποδειχθεί ότι η τυποποίηση stl είναι πολύ αποδοτική για τη δημιουργία τριδιάστατων δοκιμών σε γραφικό περιβάλλον, για τις ανάγκες σε τριδιάστατα στερεά διαφόρων προγραμμάτων προσομοίωσης, όπως και στην περίπτωση του κώδικα XRSIM. Η τυποποίηση stl περιγράφει μόνο την γεωμετρία της εξωτερικής επιφάνειας των διαφόρων τριδιάστατων αντικειμένων και όχι το χρώμα, την υφή της και άλλα χαρακτηριστικά όπως κάνουν άλλες τυποποιήσεις CAD. Όλες οι επιφάνειες στην τυποποίηση αυτή περιγράφονται και ουσιαστικά αποτελούνται από πολλές μικρότερες τριγωνικού σχήματος επιφάνειες, για τον καθορισμό της θέσης των οποίων χρησιμοποιείται ένα τριδιάστατο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Γενικά υπάρχουν δύο τύποι αρχείων \*.stl, τα δυαδικά "binary stl" και τα "ASCII stl". Ο κώδικας XRSIM μπορεί να "διαβάσει" μόνο "ASCII stl", για το λόγο αυτό, στο Κεφάλαιο 4 θα εξετασθεί η κατασκευή, ο χειρισμός και η τροποποίηση μόνο του τύπου αυτού. Τα αρχεία δοκιμών CAD τύπου "ASCII stl" μπορούν να κατασκευασθούν τόσο με χρήση απλών εντολών όσο και με τη χρήση έτοιμων σχετικών προγραμμάτων σχεδίασης. Αρκετά στοιχεία σχετικά με την δομή των αρχείων CAD

τύπου "ASCII stl", μπορεί κάποιος να αντλήσει και από τις προσωπικές σελίδες του John Burkardt από το Πανεπιστήμιο της Florida των Η.Π.Α. (βλ. και την ιστοσελίδα <http://people.sc.fsu.edu/~burkardt/data/stla/stla.html>).

## **4.2 Κατασκευή στερεών CAD τύπου "ASCII stl" με χρήση απλών εντολών**

### **4.2.1 Γενικά**

Ένα τριδιάστατο στερεό σε αρχείο CAD τύπου "ASCII stl" είναι δυνατόν να κατασκευασθεί, χωρίς τη χρήση κάποιου προγράμματος σχεδίασης. Αυτό πραγματοποιείται γράφοντας τις απλές εντολές που περιγράφουν το στερεό σε ένα οποιοδήποτε είδος αρχείου κειμένου και στη συνέχεια αλλάζοντας την επέκταση του αρχείου σε "\*.stl". Εδώ υπενθυμίζεται ότι οι επιφάνειες των στερεών στα αρχεία \*.stl αποτελούνται πάντα από μικρότερες τριγωνικές επιφάνειες (οι οποίες περιγράφονται στο αρχείο εισάγοντας με συγκεκριμένο τρόπο τις συντεταγμένες των κορυφών τους). Για παράδειγμα ένα παραλληλόγραμμο αποτελείται από δύο τρίγωνα με κοινή πλευρά μία από τις διαγώνιους του και έτσι είναι αρκετά απλό να κατασκευασθεί ένας κύβος με μόνο δώδεκα τρίγωνα. Αντίθετα μία καμπύλη επιφάνεια πρέπει να αποτελείται από μεγάλο αριθμό τριγώνων έτσι ώστε να προσεγγίζεται η επιφάνεια που πρέπει να κατασκευασθεί. Στην περίπτωση μιας κλειστής σφαίρας, η επιφάνειά της μπορεί να προσεγγίζεται από εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες τρίγωνα. Όπως γίνεται κατανοητό από τα παραπάνω παραδείγματα, ο τρόπος που θα περιγραφεί σε αυτή την ενότητα χρησιμεύει στην κατασκευή απλών στερεών μόνο, με λίγα τρίγωνα και χωρίς καμπύλες.

### **4.2.2 Κατασκευή απλού στερεού**

Για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας κατασκευής αρχείων που περιγράφεται, δημιουργήθηκε ένα απλό στερεό, το οποίο εισάγεται στον κώδικα XRSIM χωρίς προβλήματα. Όπως φαίνεται και στην εικόνα του Διαγράμματος 4.1 το στερεό αυτό είναι σχήματος ισοσκελούς πυραμίδας με τετραγωνική βάση. Η τετραγωνική βάση έχει μήκος πλευράς "1" και το ύψος της πυραμίδας είναι "2". Οι μονάδες μήκους που χρησιμοποιούνται είναι σχετικές. Το αρχείο CAD τύπου "ASCII stl" που παράγεται θα αποκτήσει πραγματικές διαστάσεις ανάλογα με τις μονάδες μήκους που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα επεξεργασίας στο οποίο θα εισαχθεί. Αν π.χ. ο κώδικας XRSIM έχει

ρυθμισθεί για μονάδα μήκους το cm, η εν λόγω πυραμίδα θα παρουσιασθεί με τετραγωνική βάση με μήκος πλευράς 1 cm και ύψος πυραμίδας 2 cm. Ακολουθεί ο κώδικας που περιγράφει την πυραμίδα αυτή:

```

solid pyramid
  facet normal 0.000000e+000 0.000000e+000 -1.000000e+000
    outer loop
      vertex 0.000000e+000 1.000000e+000 0.000000e+000
      vertex 1.000000e+000 1.000000e+000 0.000000e+000
      vertex 1.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
    endloop
  endfacet
  facet normal 0.000000e+000 0.000000e+000 -1.000000e+000
    outer loop
      vertex 1.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
      vertex 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
      vertex 0.000000e+000 1.000000e+000 0.000000e+000
    endloop
  endfacet
  facet normal 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
    outer loop
      vertex 0.500000e+000 0.500000e+000 2.000000e+000
      vertex 1.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
      vertex 1.000000e+000 1.000000e+000 0.000000e+000
    endloop
  endfacet
  facet normal 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
    outer loop
      vertex 0.500000e+000 0.500000e+000 2.000000e+000
      vertex 0.000000e+000 1.000000e+000 0.000000e+000
      vertex 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
    endloop
  endfacet
  facet normal 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
    outer loop
      vertex 0.500000e+000 0.500000e+000 2.000000e+000
      vertex 1.000000e+000 1.000000e+000 0.000000e+000
      vertex 0.000000e+000 1.000000e+000 0.000000e+000
    endloop
  endfacet
  facet normal 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
    outer loop
      vertex 0.500000e+000 0.500000e+000 2.000000e+000
      vertex 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
      vertex 1.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
    endloop
  endfacet
endsolid

```

Αυτή είναι γενικότερα η δομή ενός αρχείου CAD τύπου "ASCII stl". Οι εντολές που εφαρμόζονται στον παραπάνω κώδικα είναι οι εξής:

(α) Η εντολή "solid" η οποία ακολουθείται από το όνομα του στερεού και με την οποία αρχίζει κάθε αρχείο. Το όνομα του στερεού είναι της επιλογής του προγραμματιστή. Αντίστοιχα για το τέλος του αρχείου χρησιμοποιείται η εντολή "endsolid", χωρίς όμως να ακολουθείται από τίποτα άλλο.

(β) Η εντολή "facet" με την οποία αρχίζει η περιγραφή ενός συγκεκριμένου τριγώνου και η εντολή "endfacet", με την οποία τελειώνει η περιγραφή ενός τριγώνου.

(γ) Η εντολή "normal", η οποία ακολουθεί στην ίδια γραμμή την εντολή "facet" στην αρχή κάθε τριγώνου και ακολουθείται από τις συντεταγμένες (x, ψ, z) του κάθετου μοναδιαίου διανύσματος (με φορά προς το εξωτερικό του στερεού) του συγκεκριμένου τριγώνου. Το διάνυσμα αυτό ξεκινά πάντοτε από το σημείο (0,0,0) και χρησιμοποιείται για να καθορίζει τη γωνία κλίσης του επιπέδου του τριγώνου.

(δ) Η εντολή "outer loop" με την οποία αρχίζει η περιγραφή των συντεταγμένων (x, ψ, z) των κορυφών κάθε τριγώνου και η εντολή "endloop" με την οποία τελειώνει η περιγραφή των συντεταγμένων.

(ε) Η εντολή "vertex" η οποία ακολουθείται από τις συντεταγμένες της μίας από τις τρεις κορυφές του τριγώνου που περιγράφεται. Το πρώτο νούμερο μετά την εντολή "vertex" είναι η συντεταγμένη του σημείου στον άξονα x, το δεύτερο στον άξονα y και το τρίτο στον άξονα z.

(στ) Γενικά οι συντεταγμένες του κάθετου μοναδιαίου διανύσματος που ακολουθούν την εντολή "facet" είναι χρονοβόρο να υπολογίζονται. Οι συντεταγμένες αυτές μπορούν να είναι μηδενικές, όταν τα τρίγωνα που χρησιμοποιούνται είναι καλώς ορισμένα (δηλ. δίνονται σωστά οι συντεταγμένες των κορυφών τους), όπως π.χ. στα τελευταία τέσσερα τρίγωνα του παραπάνω κώδικα.

Εκτός από τις βασικές εντολές είναι απαραίτητο να εφαρμόζονται και ορισμένοι κανόνες ως εξής:

1. Ο βασικότερος κανόνας, που πρέπει να εφαρμόζεται πάντα για να λειτουργήσει το αρχείο, είναι ότι η σειρά που πρέπει να τοποθετούνται τα τρίγωνα να είναι ωρολογιακή, όπως παρατηρείται η επιφάνεια του τριγώνου από το εσωτερικό του στερεού με κατεύθυνση προς το εξωτερικό. Δηλαδή, στην πρώτη από τις τρεις σειρές που θα χρησιμοποιηθούν για τις συντεταγμένες των τριών κορυφών αναγράφονται οι συντεταγμένες οποιασδήποτε κορυφής. Στην δεύτερη σειρά όμως, αναγράφονται οι συντεταγμένες της αμέσως επόμενης κορυφής ωρολογιακά "κοιτάζοντας" από το εσωτερικό της τριδιάστατης κατασκευής. Στην τρίτη σειρά, προφανώς, αναγράφονται οι συντεταγμένες της κορυφής που απομένει. Με αυτόν τον κανόνα, όταν εφαρμόζεται ορθά, επιτυγχάνεται να γίνεται προφανές στο πρόγραμμα CAD που διαβάζει το αρχείο, ποια πλευρά του τριγώνου είναι στο εσωτερικό του στερεού και ποια στο εξωτερικό και να μη χρειάζεται να υπολογισθεί και να αναγραφούν και οι συντεταγμένες για το κάθετο διάνυσμα της επιφάνειας. Επισημαίνεται ότι, στην αντίθετη περίπτωση που αναγράφονται οι συντεταγμένες του κάθετου μοναδιαίου διανύσματος, η ορθότητα του κώδικα δεν εξασφαλίζεται αν οι συντεταγμένες των κορυφών των τριγώνων έχουν εισαχθεί με τον λάθος τρόπο.
2. Δεν έχει σημασία με ποια σειρά θα αναγραφούν οι πλευρές και τα τρίγωνα του στερεού.
3. Το στερεό όπως σχεδιάζεται με τον τρόπο που περιγράφεται θα πρέπει να βρίσκεται εξ ολοκλήρου στο θετικό ημιχώρο που ορίζουν οι άξονες x, y, z. Το αν το στερεό θα τοποθετηθεί και σε αρνητικούς ημιχώρους εξαρτάται από τον τρόπο που θα το χειρισθεί το πρόγραμμα CAD στο οποίο θα εισαχθεί.
4. Στα αρχεία CAD τύπου "ASCII stl" οι άξονες x, y, z εννοούνται στη σχετική μεταξύ τους θέση στη μορφή που παρουσιάζεται στην εικόνα του Διαγράμματος 4.2.

#### **4.2.3 Επεξήγηση κώδικα**

Σε αυτήν την παράγραφο θα περιγραφεί αναλυτικά τι ακριβώς σημαίνει πρακτικά κάθε σειρά του απλού κώδικα κατασκευής της πυραμίδας που αναφέρθηκε παραπάνω. Για το σκοπό αυτό θα παρουσιασθεί πάλι ο εν λόγω κώδικας, μόνο που στο δεξί μέρος θα



υπάρχουν σχόλια για επεξήγηση. Οι όροι που χρησιμοποιούνται στην επεξήγηση παρουσιάζονται στην εικόνα του Διαγράμματος 4.2. Για οικονομία χώρου και ευκολία στην ανάγνωση έχει αποκοπεί η μεγάλη ακρίβεια στις συντεταγμένες που υπάρχει στον κώδικα όπως αυτός παρουσιάστηκε προηγουμένως.

```

solid pyramid
  facet normal 0 0 -1          Τρίγωνο 1 (βάση πυραμίδας)
    outer loop
      vertex 0 1 0            Κορυφή (0,1,0)
      vertex 1 1 0            Κορυφή (1,1,0)
      vertex 1 0 0            Κορυφή (1,0,0)
    endloop
  endfacet
  facet normal 0 0 -1          Τρίγωνο 2 (βάση πυραμίδας)
    outer loop
      vertex 1 0 0            Κορυφή (1,0,0)
      vertex 0 0 0            Κορυφή (0,0,0)
      vertex 0 1 0            Κορυφή (0,1,0)
    endloop
  endfacet
  facet normal 0 0 0           Τρίγωνο 3 (πλευρά πυραμίδας 1/4)
    outer loop
      vertex 0.5 0.5 2        Κορυφή (0.5,0.5,2)
      vertex 1 0 0            Κορυφή (1,0,0)
      vertex 1 1 0            Κορυφή (1,1,0)
    endloop
  endfacet
  facet normal 0 0 0           Τρίγωνο 4 (πλευρά πυραμίδας 2/4)
    outer loop
      vertex 0.5 0.5 2        Κορυφή (0.5,0.5,2)
      vertex 0 1 0            Κορυφή (0,1,0)
      vertex 0 0 0            Κορυφή (0,0,0)
    endloop
  endfacet
  facet normal 0 0 0           Τρίγωνο 5 (πλευρά πυραμίδας 3/4)
    outer loop
      vertex 0.5 0.5 2        Κορυφή (0.5,0.5,2)
      vertex 1 1 0            Κορυφή (1,1,0)
      vertex 0 1 0            Κορυφή (0,1,0)
    endloop
  endfacet
  facet normal 0 0 0           Τρίγωνο 6 (πλευρά πυραμίδας 4/4)
    outer loop
      vertex 0.5 0.5 2        Κορυφή (0.5,0.5,2)
      vertex 0 0 0            Κορυφή (0,0,0)
      vertex 1 0 0            Κορυφή (1,0,0)
    endloop
  endfacet
endsolid

```

Από την προηγούμενη επεξήγηση, γίνεται φανερό ότι ένα αρχείο CAD τύπου "ASCII stl", μπορεί να αναπαριστά ένα και μόνο τριδιάστατο κλειστό στερεό, το οποίο μπορεί καταχρηστικά να είναι και διδιάστατο, δεν είναι συμπιεσμένο, και δεν μεταφέρει πληροφορίες χρώματος. Γίνεται κατανοητό ότι ένα αρχείο CAD τύπου "ASCII stl", ενός πολύπλοκου στερεού μπορεί να έχει χιλιάδες εντολές, με αποτέλεσμα να καταλαμβάνει πολύ χώρο. Για αυτό το λόγο δίνεται η δυνατότητα και της τυποποίησης "binary stl". Επίσης σε ένα αρχείο CAD τύπου "stl", ενός πολύπλοκου στερεού, είναι δυνατόν να έχουν γίνει λάθη, δηλαδή στην ουσία παραλείψεις απαραίτητων τριγώνων εξωτερικής επιφάνειας, με αποτέλεσμα η αναπαράστασή του μέσα σε ένα σχεδιαστικό πρόγραμμα που δέχεται και αυτήν την τυποποίηση να παρουσιάζει "οπές". Μερικά από αυτά τα σχεδιαστικά προγράμματα διορθώνουν τις οπές αυτόματα ή πολύ εύκολα.

### **4.3 Κατασκευή στερεών CAD τύπου "ASCII stl" με χρήση προγραμμάτων**

#### **4.3.1 Γενικά**

Όπως φάνηκε στην προηγούμενη παράγραφο η κατασκευή αρχείων CAD τύπου "ASCII stl" γράφοντας κώδικα είναι πολύ χρονοβόρα και δύσκολη. Στην περίπτωση που ένα στερεό έχει πάνω από έξι πλευρές ή έχει καμπύλες επιφάνειες η κατασκευή του με αυτόν τον τρόπο "εντολή με εντολή" γίνεται ουσιαστικά αδύνατη (βλ. και σχετικά παραδείγματα αρχείων CAD τύπου "ASCII stl" στην ιστοσελίδα <http://people.sc.fsu.edu/~burkardt/data/stla/stla.html>). Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιασθεί ο τρόπος κατασκευής αρχείων CAD τύπου "ASCII stl" με διάφορα προγράμματα που είναι ελεύθερα διαθέσιμα ως "εκτελέσιμα" ή και ως "πηγαίος κώδικας" ανάλογα με το λειτουργικό σύστημα για το οποίο έχουν σχεδιασθεί.

#### **4.3.2 Προτεινόμενα ελεύθερα προγράμματα**

Σύμφωνα με τα όσα προτείνει ο Gray (2009), μερικά από τα ελεύθερα προγράμματα οι λειτουργίες, των οποίων μπορούν να χρησιμοποιούνται στην κατασκευή αρχείων CAD τύπου "ASCII stl" είναι τα εξής:

1. GoogleSketchUp (<http://sketchup.google.com/download/>) για περιβάλλον λειτουργικού συστήματος MS WXP. Την εποχή συγγραφής της παρούσας ΔΕ

(Αύγουστος, 2009), το εκτελέσιμο εγκατάστασης είχε το όνομα GoogleSketchUpWEN.exe. Σημειώνεται ότι αυτό το πρόγραμμα χρειάζεται τα plugins "su2stl.rbd" και "su2stl.rb" για να εισάγει και εξάγει "ASCII stl" αρχεία. Τα plugins βρίσκονται στη διεύθυνση <http://www.crai.archi.fr/rubylibrarydepot/ruby/>, και μετά το download πρέπει να τοποθετηθούν στο home directory του GoogleSketchUp (π.χ. το "C:\Program Files\Google\Google SketchUp 7\") μέσα στο φάκελο Plugins. Το GoogleSketchUp είναι πολύ χρήσιμο διότι μπορεί να "ανοίξει" αρχεία στερεών \*.dwg και \*.dxf που προέρχονται από κάποια έκδοση του "Autocad" και να τα μετατρέψει σε αρχεία "ASCII stl" χρησιμοποιώντας την επιλογή "Plugins>Export stl file". Επίσης αυτό το πρόγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την κατασκευή διαφόρων σχετικά απλών στερεών, χωρίς να χρειάζεται η εισαγωγή αρχείου από "Autocad".

2. Art of Illusion (<http://www.artofillusion.org/downloads>) για περιβάλλον λειτουργικού συστήματος MS WXP ή και LINUX. Αυτό είναι ένα άλλο πρόγραμμα κατασκευής σχετικά πολύπλοκων τριδιάστατων στερεών. Την εποχή συγγραφής της παρούσας ΔΕ (Αύγουστος, 2009), το εκτελέσιμο εγκατάστασης για περιβάλλον λειτουργικού συστήματος MS WXP είχε το όνομα ArtOfIllusion272-Windows.exe. Δεν είναι τόσο εύχρηστο όσο το GoogleSketchUp, αλλά αν κάποιος διαβάσει τα εγχειρίδια και τα παραδείγματα που προσφέρονται (βλ. και <http://www.artofillusion.org/documentation>) θα μπορέσει να το χρησιμοποιήσει.

#### **4.3.3 Συμπληρωματικά εργαλεία για τα ελεύθερα προγράμματα**

Σημειώνεται κατ' αρχήν ότι γενικά πολλά από τα σχεδιαστικά προγράμματα έχουν διαμορφωθεί χρησιμοποιώντας και εργαλεία σε γλώσσα Python, η οποία πρέπει να εγκατασταθεί προκειμένου για την ορθή λειτουργία τους. Η γλώσσα Python είναι διαθέσιμη ελεύθερα και σε ανοιχτό κώδικα τόσο για περιβάλλον λειτουργικού συστήματος MS WXP όσο και για περιβάλλον LINUX. Την εποχή συγγραφής της παρούσας ΔΕ (Αύγουστος, 2009), η τρέχουσα έκδοση της γλώσσας Python ήταν η 2.6. Επίσης, επειδή χρησιμοποιούνται και εργαλεία σε γλώσσα C++, όταν οι εγκαταστάσεις των προγραμμάτων γίνονται για περιβάλλον λειτουργικού συστήματος MS WXP, πρέπει να έχει εγκατασταθεί και το "Microsoft Visual C++ 2008 Redistributable Package".

Τέλος επειδή χρησιμοποιούνται και εργαλεία σε Java Virtual Machine (π.χ. από το Art of Illusion) είναι απαραίτητη και αυτή η εγκατάσταση. Η Java Virtual Machine είναι διαθέσιμη ελεύθερα τόσο για περιβάλλον λειτουργικού συστήματος MS WXP όσο και για περιβάλλον LINUX. Την εποχή συγγραφής της παρούσας ΔΕ (Αύγουστος, 2009), η τρέχουσα έκδοση της Java Virtual Machine ήταν η 6.14.

Όπως διαπιστώθηκε στην πορεία της Διπλωματικής Εργασίας, ένα μειονέκτημα του GoogleSketchUp σε σχέση με τον κώδικα XRSIM, είναι ότι τα αρχεία "ASCII stl" που δημιουργεί, όταν περιέχουν καμπύλες επιφάνειες, δεν μπορούν να "διαβαστούν" από τον κώδικα XRSIM. Αυτό το πρόβλημα λύνεται χρησιμοποιώντας το ελεύθερο πρόγραμμα MeshLab (<http://sourceforge.net/projects/meshlab/files/>) για περιβάλλον λειτουργικού συστήματος MS WXP ή και LINUX. Την εποχή συγγραφής της παρούσας ΔΕ (Αύγουστος, 2009), το εκτελέσιμο εγκατάστασης για MS WXP είχε το όνομα MeshLab\_v121.exe. Το MeshLab είναι ένα πρόγραμμα τροποποίησης και βελτίωσης διαφόρων αρχείων τριδιάστατων στερεών σε διάφορες τυποποιήσεις με πολλές δυνατότητες επεξεργασίας. Στην περίπτωση που εξετάζεται χρησιμοποιείται με δύο κυρίως τρόπους:

(α) Για βελτίωση των αρχείων που έχουν παραχθεί από το GoogleSketchUp. Αυτό επιτυγχάνεται απλά "ανοίγοντας" αυτά τα αρχεία στο MeshLab και στη συνέχεια, στο αναδυόμενο παράθυρο με τίτλο "Post-Open Processing", επιλέγοντας "OK" και έχοντας ενεργοποιήσει την επιλογή "Unify Duplicated Vertices". Αυτή η λειτουργία διορθώνει τα όποια σφάλματα είχε το αρχείο στο οποίο εφαρμόστηκε. Στη συνέχεια αφού ανοίξει κανονικά το αρχείο κάνοντας "File>Save as", στο αναδυόμενο παράθυρο στο πλαίσιο "Save as type" επιλέγοντας "stl file format" και στο επόμενο και τελευταίο αναδυόμενο παράθυρο θα απενεργοποιώντας την επιλογή "Binary encoding" είναι δυνατό να σωθεί το διορθωμένο / βελτιωμένο αρχείο ως "ASCII stl".

(β) Για μετατροπή αρχείων από "binary stl" σε "ASCII stl" και το αντίθετο.

Ένα πρόβλημα του προγράμματος Art of Illusion είναι ότι τα αρχεία που επεξεργάζεται δεν είναι της μορφής "stl". Συνήθως έχουν την επέκταση \*.obj (και κάποιες άλλες που δεν μας ενδιαφέρουν εδώ). Το πρόβλημα αυτό λύνεται με τη χρήση του προγράμματος MeshLab ή του επίσης ελεύθερου προγράμματος Blender (<http://www.blender.org/>

download/get-blender/). για περιβάλλον λειτουργικού συστήματος MS WXP ή και LINUX. Την εποχή συγγραφής της παρούσας ΔΕ (Αύγουστος, 2009), το εκτελέσιμο εγκατάστασης για MS WXP είχε το όνομα blender-2.49a-avifix-windows.exe. Το πρόγραμμα Blender, που απαιτεί και εργαλεία Python, είναι πολύ χρήσιμο γιατί μπορεί να χειρισθεί πολλά ήδη αρχείων και να τα μετατρέπει από το ένα είδος στο άλλο. Ανάμεσα στα άλλα χειρίζεται αρχεία \*.obj, \*.dxf και αρχεία "binary stl". Τα αρχεία "binary stl" μπορούν να μετατραπούν εύκολα σε "ASCII stl" χρησιμοποιώντας το MeshLab. Δυνατότητες μετατροπής μεταξύ διαφόρων τυποποιήσεων διαθέτει και το MeshLab.

#### **4.4 Παράδειγμα κατασκευής του δοκιμίου κλίμακας ως "ASCII stl"**

Στην παράγραφο αυτή θα αναλυθεί ένας τρόπος με τον οποίο μπορεί να κατασκευασθεί ένα δοκίμιο μορφής κλίμακας (ή όπως έχει ήδη αναφερθεί, μορφής *stepwedge*), σαν αυτό που χρησιμοποιήθηκε στα μαθήματα του 3<sup>ου</sup> Κεφαλαίου, με το πρόγραμμα GoogleSketchUp. Ο τρόπος αυτός δεν είναι ο μοναδικός, αλλά παρουσιάζεται ως αυτός που διευκόλυνε τον γράφοντα στην πρώτη του επαφή με αυτά τα εργαλεία. Αν χρειάζονται περισσότερες πληροφορίες μπορεί κανείς να τις βρει στο Chopra (2009). Αφού λοιπόν ανοίξει το πρόγραμμα πρέπει να γίνουν τα εξής:

1. Όταν "ανοίξει" το πρόγραμμα για πρώτη φορά, καλό είναι να επιλεγθεί το template "Engineering – Meters", το οποίο ταιριάζει περισσότερο στην λειτουργία που είναι επιθυμητή εδώ. Μετά την επιλογή αυτή το υπόψιν template γίνεται το "εξ'ορισμού" (default).
2. Στην επιλογή "View" επιλέξτε "Toolbars" και εκεί επιλέξτε "Large Tool Set". Έτσι θα εμφανιστεί μία πλήρης στήλη εργαλείων στο αριστερό μέρος του παραθύρου του προγράμματος. Επίσης επιλέξτε και το Toolbar "Measurements". Αυτό το Toolbar θα σας επιτρέψει να αποδώσετε στο εικονικό δοκίμιο ακριβείς διαστάσεις, που είναι – όπως διαπιστώθηκε- δύσκολο να αποδοθούν με τη χρήση του ποντικιού.
3. Στην επιλογή "Window/ Model Info/ Units" και στη θέση "Precision", μειώστε την απαιτούμενη ακρίβεια των μονάδων σε 0.00 m. Ο λόγος που πρέπει να γίνει αυτό είναι διότι μεγαλύτερη ακρίβεια δεν έχει νόημα στην εφαρμογή που εξετάζουμε, διότι οι μονάδες μήκους σε ένα αρχείο CAD τύπου "ASCII stl" είναι σχετικές. Εάν στο

GoogleSketchUp το μήκος είναι 1 (μέτρο) στον κώδικα XRSIM το 1 αυτό μπορεί να είναι 1 cm ή 1 mm κοκ.

4. Από την στήλη "Large Tool Set" επιλέξτε το εργαλείο τετραγωνικού σχήματος με τον τίτλο "Rectangle". Προφανώς αυτό το εργαλείο χρησιμοποιείται για την κατασκευή παραλληλογράμμων. Κατασκευάστε στο θετικό μέρος των αξόνων x, y, z (ο θετικός ημιάξονας είναι πάντα εκείνος με την συνεχόμενη γραμμή) ένα παραλληλόγραμμο κρατώντας πατημένο το αριστερό "κλικ".
5. Όταν θα αφήσετε το αριστερό "κλικ", το παράθυρο του Toolbar "Measurements" μετονομάζεται σε "Dimensions", στο οποίο μπορείτε να συμπληρώσετε το μήκος και το πλάτος του παραλληλόγραμμου. Εδώ συμπληρώστε "1.00m, 1.00m" και πατήστε ENTER.
6. Επιλέξτε από την στήλη εργαλείων στα αριστερά το εργαλείο με τίτλο "Dimension". Το εργαλείο αυτό γενικά χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση διαστάσεων στα σχέδια. Μπορείτε έτσι να τοποθετήσετε τις διαστάσεις που ρυθμίσατε στις δύο πλευρές του παραλληλογράμμου με τη χρήση του ποντικιού, όπως φαίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 4.3.
7. Επιλέξτε τώρα το εργαλείο με τίτλο "Scale" για να αλλάξετε, αν θέλετε, τις διαστάσεις του παραλληλογράμμου. Κάνετε "κλικ" στο εσωτερικό του παραλληλόγραμμου, δηλαδή επιλέξτε το. Το παράθυρο του Toolbar "Measurements" μετονομάζεται σε "Scale", στο οποίο μπορείτε να συμπληρώσετε έναν πολλαπλασιαστή που θα αλλάξει τη διάσταση που έχετε επιλέξει. (Σημειώνεται ότι μπορείτε να κάνετε "zoom in" και "zoom out" χρησιμοποιώντας τη ροδέλα του ποντικιού ή τα αντίστοιχα εργαλεία. Επίσης μπορείτε να μετακινηθείτε στο χώρο χρησιμοποιώντας το εργαλείο με τίτλο "Pan", με εικονίδιο σχήματος χεριού. Τέλος μπορείτε να αλλάξετε τη γωνία που παρατηρείτε το σχέδιο χρησιμοποιώντας το εργαλείο με τίτλο "Orbit".)
8. Επιλέξτε το εργαλείο με τίτλο "Push/ Pull" για να επεκτείνετε στην τρίτη διάσταση το διδιάστατο, μέχρι στιγμής, σχέδιό σας. Αφού επιλέξετε το εργαλείο, κάνετε αριστερό "κλικ" στο τετράγωνο και "τραβήξτε το" προς την τρίτη διάσταση, προς τα πάνω δηλαδή.

9. Όταν θα αφήσετε το αριστερό "κλικ", το παράθυρο του Toolbar "Measurements" μετονομάζεται σε "Distance", στο οποίο μπορείτε να συμπληρώσετε το ύψος του ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου που δημιουργήσατε. Εδώ συμπληρώστε "1.80m" και πατήστε ENTER.
10. Εισάγετε με τον τρόπο του "βήματος 6" διάσταση στο ύψος του παραλληλεπιπέδου, όπως φαίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 4.4.
11. Στη συνέχεια θα πρέπει να περιστρέψετε την γωνία από την οποία παρατηρείτε το παραλληλεπίπεδο έτσι ώστε να φαίνεται ολόκληρη η πλευρά που θα τοποθετήσετε τα υπόλοιπα "σκαλοπάτια" του stepwedge.
12. Τώρα χρησιμοποιείτε την επιλογή "Edit/ Select All" για να επιλέξετε ολόκληρο το παραλληλεπίπεδο. Κάνετε "copy" και "paste" τέσσερις φορές, τοποθετώντας μετά από κάθε "paste" το παραλληλεπίπεδο δίπλα στο προηγούμενο, έτσι ώστε στο τέλος αυτό που έχετε κατασκευάσει να μοιάζει με την εικόνα του Διαγράμματος 4.5.
13. Χρησιμοποιώντας το εργαλείο "Push/Pull" μειώστε το ύψος των παραλληλεπιπέδων έτσι ώστε τα σκαλοπάτια που έχουν πια δημιουργηθεί να έχουν διαφορά ύψους 0.3 m, αρχίζοντας από 1.8 m και τελειώνοντας σε 0.6 m. Δείτε και την τελικό αποτέλεσμα του Διαγράμματος 4.6.
14. Εξάγετε το στερεό με την επιλογή "Plugins>Export stl file" (με "Export Unit" σε "Meters") και στη συνέχεια "ανοίξτε" το με το πρόγραμμα MeshLab κάνοντας τη διαδικασία βελτίωσης που αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Αν τελικά εισάγετε το αποτέλεσμα στον κώδικα XRSIM έχοντας θέσει την επιλογή "Sample Unit" στο "παράθυρο ελέγχου δοκιμίου" σε cm, τότε αυτό θα εμφανιστεί σαν ένα δοκίμιο stepwedge με ύψος από 1.8 cm έως 0.6 cm.

#### **4.5 Κατασκευή ελαττωμάτων για τον κώδικα XRSIM ως "ASCII stl"**

Σε έναν κώδικα που προσομοιώνει βιομηχανική ραδιογραφία είναι πολύ σημαντικό να υπάρχουν τα κατάλληλα αρχεία CAD ελαττωμάτων για εκπαίδευση. Στον κώδικα XRSIM, όπως έχει αναφερθεί, τα αρχεία ελαττωμάτων έχουν επέκταση \*.flw. Η κατασκευή τους είναι πολύ απλή. Κατ'αρχήν κατασκευάζεται το στερεό, που θα αναπαραστήσει κάποιο ελάττωμα σε μορφή "ASCII stl" που μπορεί να διαβάσει ο κώδικας XRSIM, με κάποιον από τους προηγούμενους τρόπους. Στη συνέχεια πρέπει, με ένα απλό "rename", να αλλάξει η επέκταση του αρχείου από \*.stl σε \*.flw. Αυτή η



διαδικασία αρκεί για να δημιουργηθεί ένα λειτουργικό αρχείο CAD ελαττώματος για τον κώδικα XRSIM.

#### **4.6 Σχόλια και συμπεράσματα**

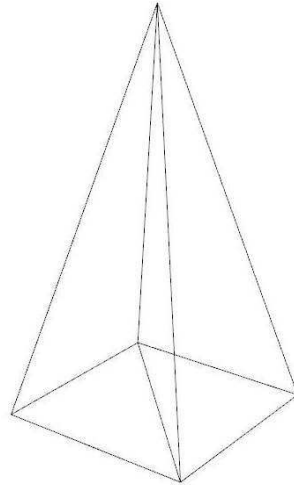
Όπως φάνηκε, είναι δυνατόν με τα παραπάνω απλά και γενικά ελεύθερα διαθέσιμα εργαλεία λογισμικού να κατασκευάζονται ηλεκτρονικά αρχεία CAD τύπου "ASCII stl". Τα αρχεία αυτά μπορούν να εισάγονται για την εξυπηρέτηση προσομοιώσεων στον κώδικα XRSIM, είτε ως δοκίμια, είτε ως ελαττώματα. Επισημαίνεται όμως ότι με τα εργαλεία αυτά υπάρχει μόνο περιορισμένος έλεγχος στο πλήθος των τριγώνων που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των επιφανειών των δοκιμίων ή των ελαττωμάτων. Αυτό είναι κάπως ενοχλητικό όταν τα δοκίμια ή τα ελαττώματα που ζητούνται να υλοποιηθούν έχουν καμπύλες επιφάνειες. Μικρές δυνατότητες παρέμβασης στην πυκνότητα του δικτύου των τριγώνων φαίνεται να υπάρχουν τόσο στο GoogleSketchUp, όσο και στο MeshLab και στο Blender. Πολλά εξαρτώνται από τη λεπτομέρεια (δηλ. το πλήθος των επιφανειών) με την οποία έχει κατασκευασθεί το αρχικό στερεό π.χ. από το GoogleSketchUp. Κατά τη διάρκεια της υλοποίησης ενός στερεού π.χ. στο GoogleSketchUp, είναι πιθανό, να μην έχει επιτευχθεί να "κλείσει" πλήρως η εξωτερική του επιφάνεια. Ως αποτέλεσμα, το παραγόμενο αρχείο τύπου "ASCII stl", θα έχει όπως λέγεται "τρύπες", με συνέπεια το αντίστοιχο δοκίμιο ή ελάττωμα να μην μπορεί να εισαχθεί στον κώδικα XRSIM, όπως είναι το ζητούμενο. Οι "τρύπες" μπορούν να διορθωθούν με σχετικές επεμβάσεις που μπορούν να γίνουν τόσο στο GoogleSketchUp, όσο και στο MeshLab και στο Blender, υπό κάποιες απλές προϋποθέσεις.

Σε πιο επαγγελματικό περιβάλλον προτείνεται η χρήση γνωστών και διαδεδομένων εμπορικών προγραμμάτων με τα οποία μπορεί κάποιος να κατασκευάσει αρχεία CAD τύπου "ASCII stl". Για παράδειγμα, μία μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιείται και στο ΕΜΠ, δεδομένου ότι διατίθεται από το Κέντρο Ηλεκτρονικών Υπολογιστών (ΚΗΥ) πλήθος αδειών Autocad / Inventor για τριδιάστατο σχεδιασμό, είναι: (α) η παραγωγή του σχήματος του ζητούμενου στερεού σε τυποποίηση dwg ή dxf (αυτός είναι ο εξ'ορισμού τύπος αρχείων του Autocad), (β) η εισαγωγή των αρχείων dwg ή dxf στο MeshLab και (γ) η μετατροπή των αρχείων στον τύπο "ASCII stl" από το MeshLab.

Τα κυριότερα εμπορικά προγράμματα με τα οποία είναι δυνατόν να δημιουργηθούν αρχεία "ASCII stl" είναι: (1) το ίδιο το Autocad με το απαραίτητο plugin, (2) το Solidworks, (3) το Rhino3D, (4) το GoogleSketchUp Pro και (5) το Solid Edge.

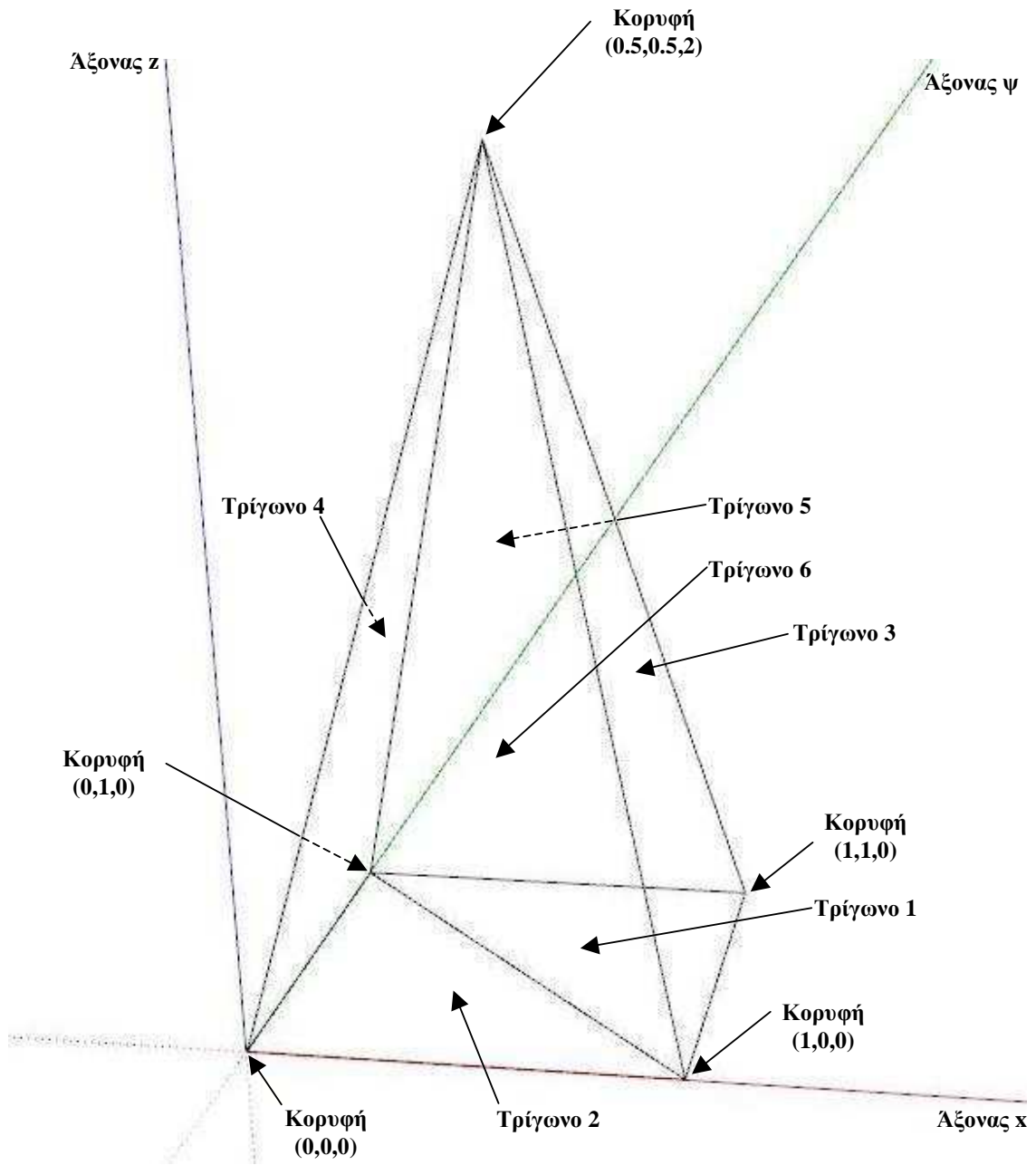
Στο επόμενο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί μία προσπάθεια αξιοποίησης των γνώσεων που αποτυπώθηκαν στα προηγούμενα προς την κατεύθυνση παραγωγής απλών διδιάστατων τομογραφικών απεικονίσεων με τη βοήθεια του κώδικα XRSIM και άλλων διαθέσιμων υπολογιστικών εργαλείων.

## ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



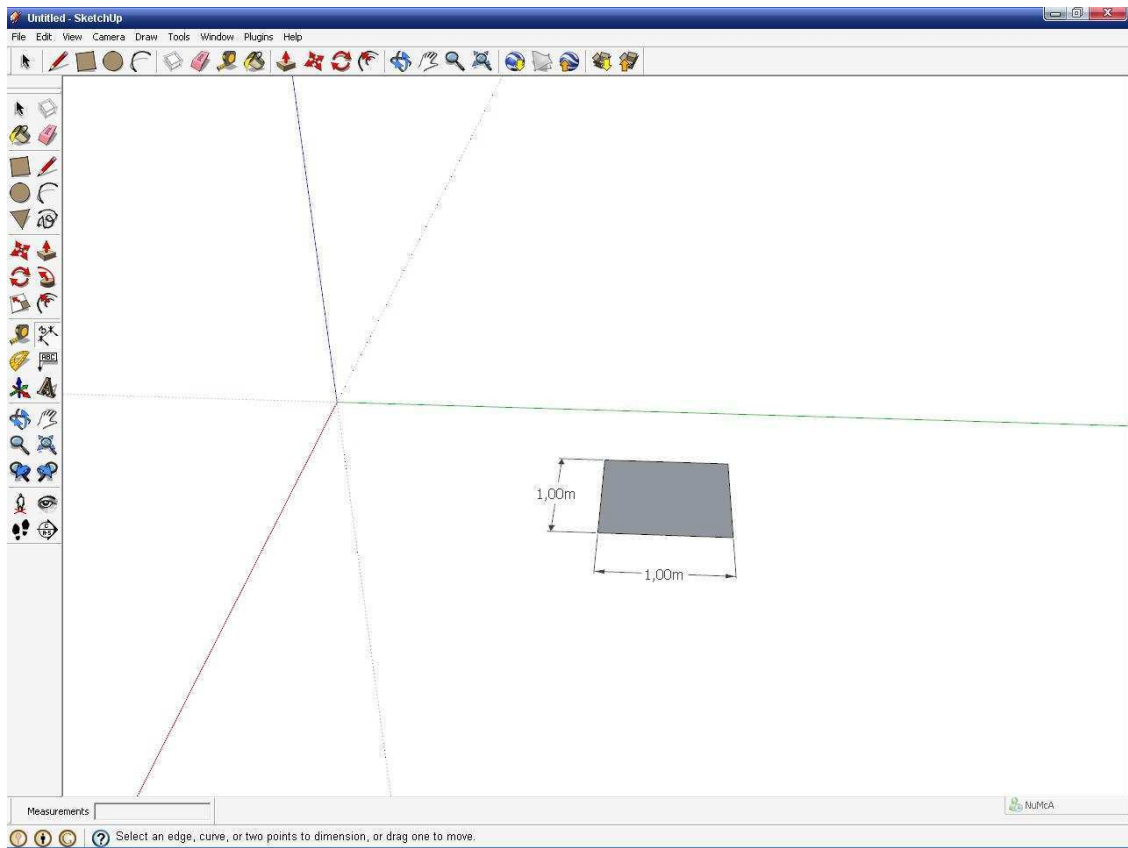
**Διάγραμμα 4.1**

**Ισοσκελής πυραμίδα με τετραγωνική βάση πλευράς "1" και ύψος "2" (για την επίδειξη κατασκευής αρχείου CAD τύπου "ASCII stl")**



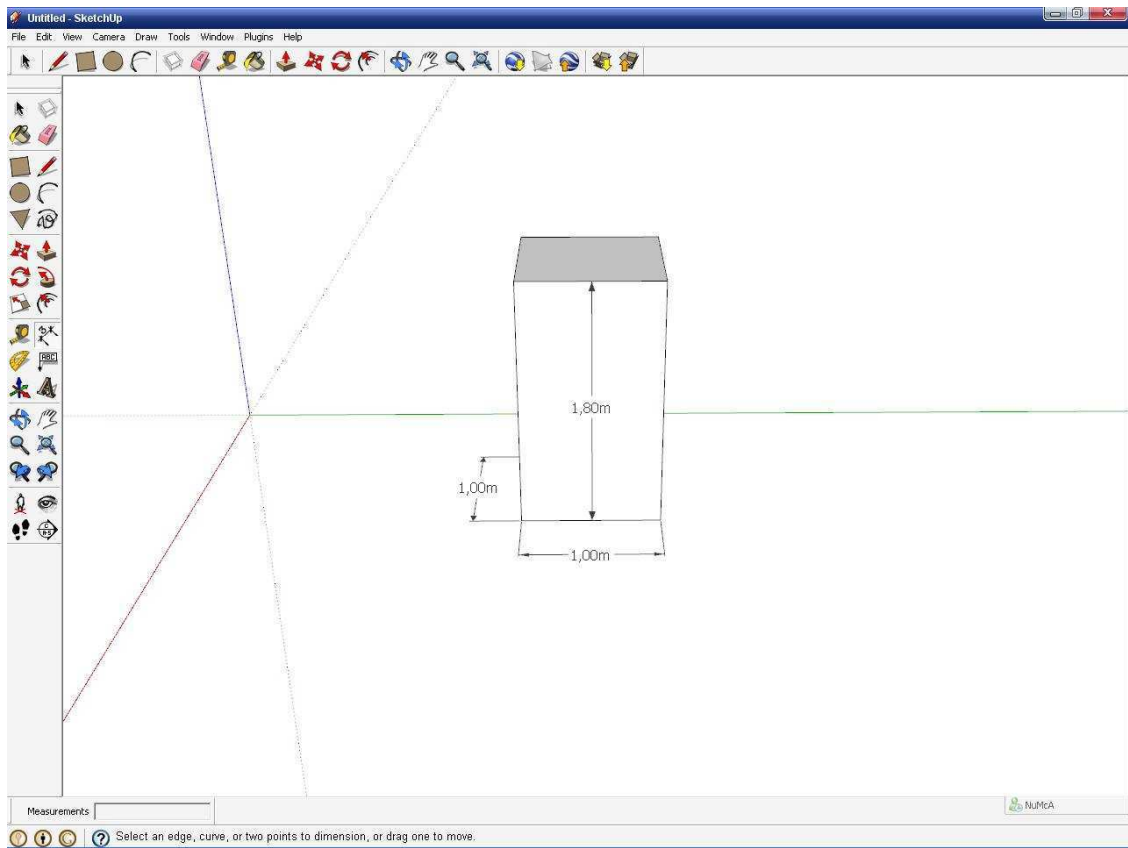
**Διάγραμμα 4.2**

**Σχήμα για την επεξήγηση του κώδικα αρχείου CAD τύπου "ASCII stl"  
(βλ. και § 4.2.3)**



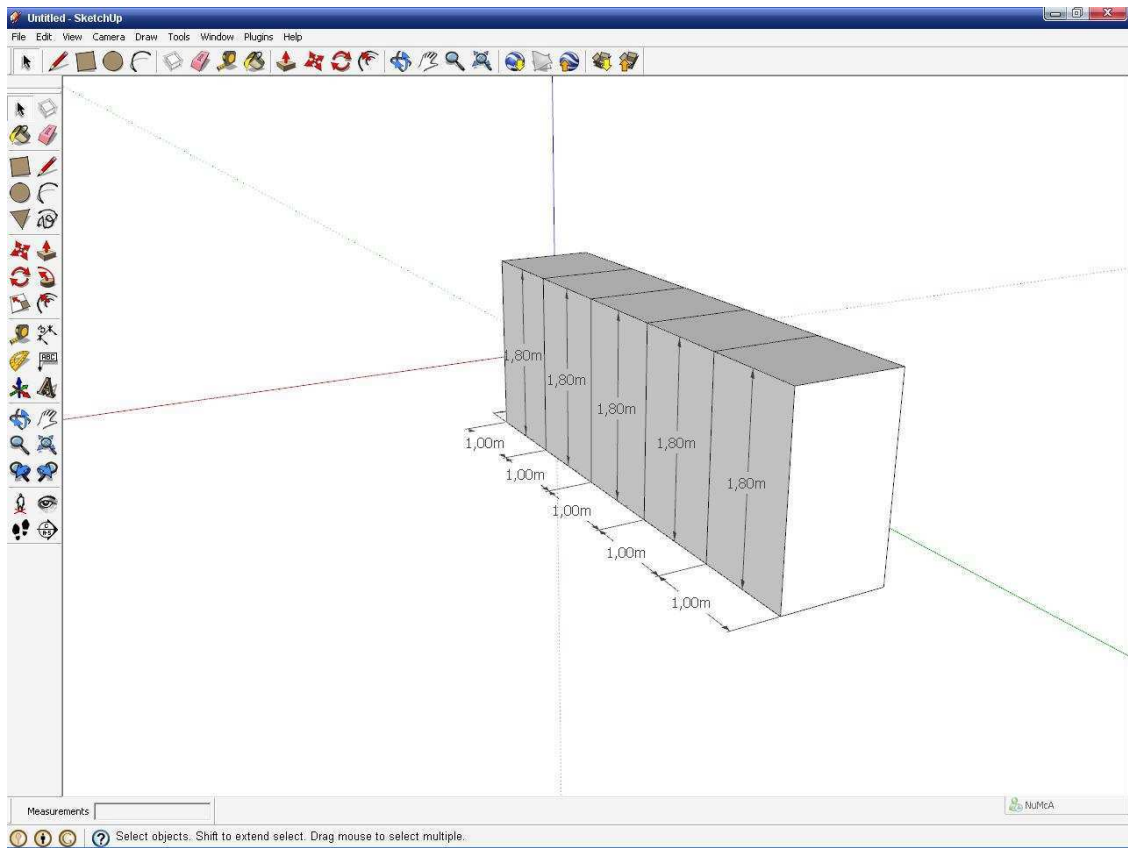
### Διάγραμμα 4.3

Τοποθέτηση διαστάσεων με το GoogleSketchUp (βήμα 6, §4.4)



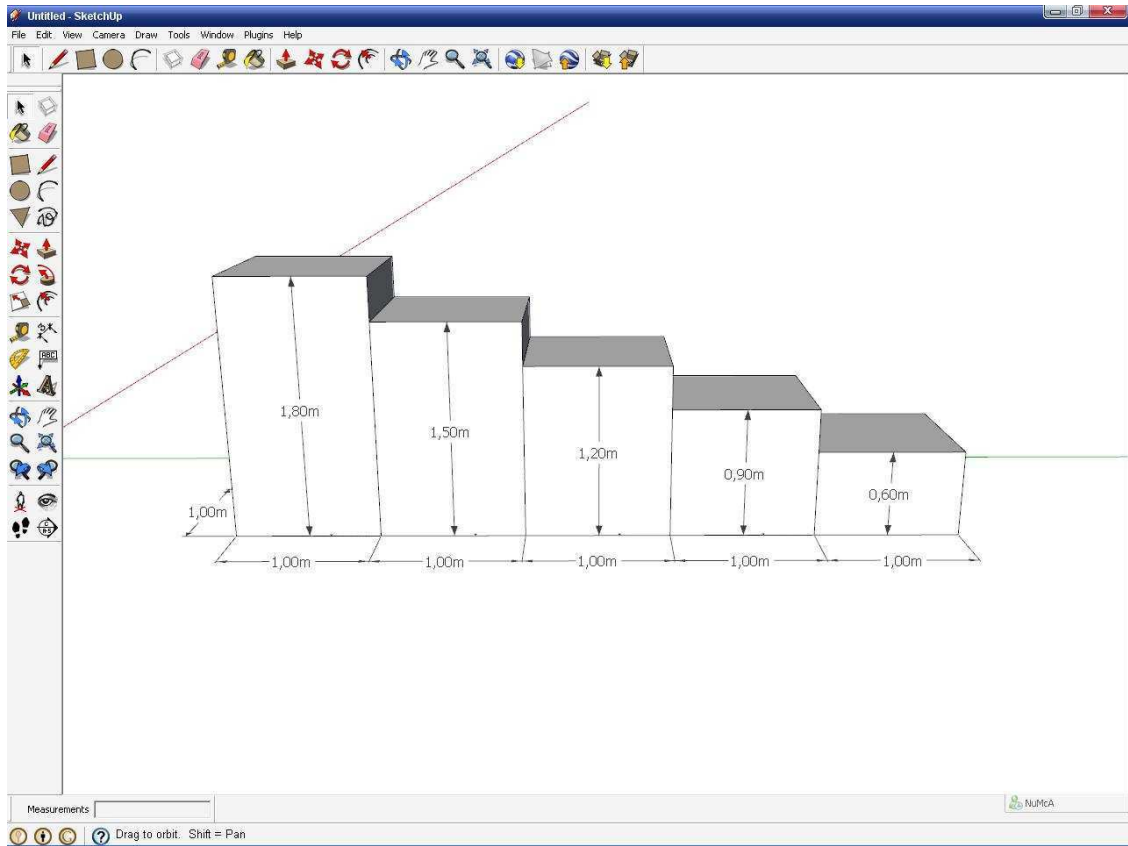
#### Διάγραμμα 4.4

Τοποθέτηση διαστάσεων με το GoogleSketchUp, μετά από τη διεργασία Push/ Pull (βήματα 8 - 10, §4.4)



#### Διάγραμμα 4.5

Αντιγραφή (copy) και διαδοχικές επικολλήσεις (paste) του πρωτότυπου παραλληλεπίπεδου (βήμα 12, §4.4)



#### Διάγραμμα 4.6

Τελικό δοκίμιο κλίμακας stepwedge όπως κατασκευάστηκε με το GoogleSketchUp



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΑΠΛΗ ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ XRSIM ΚΑΙ ΑΛΛΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

#### 5.1 Εισαγωγή

Η τομογραφία είναι χρήσιμη για τον έλεγχο της εσωτερικής δομής της ύλης και ως εκ τούτου είναι απαραίτητη τόσο για τη διάγνωση πολλών ασθενειών στην ιατρική, αλλά και για τον έλεγχο δοκιμίων στη βιομηχανία. Στο παρόν 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο θα περιγραφεί το πρόβλημα ελέγχου της εσωτερικής δομής της ύλης και ο τρόπος με τον οποίο το αντιμετωπίζει η μέθοδος της τομογραφίας με τη χρήση απλών παραδειγμάτων και εφαρμογών για διδιάστατη τομογραφία. Ως διδιάστατη (2Δ) τομογραφία φυσικά εννοείται η αναπαράσταση μίας τομής της ύλης κατά ένα συγκεκριμένο επίπεδο, με τη χρήση ραδιογραφιών από ισαπέχουσες γωνίες. Για την υλοποίηση της 2Δ τομογραφίας απαιτούνται στην ουσία μία σειρά από τεχνικές ανάλυσης εικόνας, οι οποίες μπορούν να είναι σχετικά απλές έως εξαιρετικά πολύπλοκες και για τις οποίες απαιτείται σχετικά εξειδικευμένο λογισμικό. Ως πρώτη και απλούστερη από αυτές τις τεχνικές παρουσιάζεται και σχολιάζεται η λεγόμενη μέθοδος back projection, η οποία απαιτεί πολλά αλλά μάλλον απλά βήματα επεξεργασίας. Σε πιο προχωρημένο επίπεδο παρουσιάζεται και σχολιάζεται στη συνέχεια ο τρόπος υλοποίησης της 2Δ τομογραφίας με χρήση κατάλληλου λογισμικού, το οποίο αναλαμβάνει την διεκπεραίωση της μεθόδου back projection με αυτόματο τρόπο, μέσω μετασχηματισμού Fourier. Μάλιστα, κατά την αυτοματοποιημένη διεκπεραίωση του back projection είναι δυνατόν να χρησιμοποιούνται κατάλληλα φίλτρα εικόνας ώστε το τελικό αποτέλεσμα της αναπαράστασης της τομής να είναι πολύ καθαρό και όσο το δυνατόν κοντύτερα στην πραγματικότητα. Τέλος, διατυπώνονται συμπεράσματα σε σχέση με τις παρουσιαζόμενες μεθόδους.

#### 5.2 Περιγραφή προβλήματος

Για τη κατανόηση του πρακτικού προβλήματος ανίχνευσης της μορφής και της θέσης ενός ελαττώματος μέσα σε ένα δοκίμιο γνωστής εξωτερικής γεωμετρίας, θα χρησιμοποιηθεί ένα απλό παράδειγμα: Έστω δοκίμιο-κύλινδρος απείρου μήκους. Ο κύλινδρος αυτός παρουσιάζει στο εσωτερικό του, ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο ελάττωμα με τετραγωνική διατομή επίσης απείρου μήκους. Ο άξονας συμμετρίας του

ελαττώματος δεν ταυτίζεται με τον άξονα του δοκιμίου. Στην εικόνα του Διαγράμματος 5.1 διακρίνεται μία υποθετική τομή του δοκιμίου αυτού όπως περιγράφηκε. Αν το δοκίμιο αυτό ραδιογραφηθεί από "πάνω" (γωνία  $0^\circ$  – θέση πηγής "Α") τότε η ραδιογραφική εικόνα θα έχει τη μορφή του Διαγράμματος 5.2. Αν το δοκίμιο ραδιογραφηθεί από "πλάγια" (γωνία  $90^\circ$  – θέση πηγής "Β"), τότε η ραδιογραφική εικόνα θα έχει τη μορφή του Διαγράμματος 5.3. Αν το δοκίμιο ραδιογραφηθεί "υπό γωνία" (γωνία  $45^\circ$  – θέση πηγής "C"), τότε η ραδιογραφική εικόνα θα έχει τη μορφή του Διαγράμματος 5.4. Γίνεται κατανοητό ότι παρόλο που λήφθηκαν με αυτόν τον τρόπο τρεις ραδιογραφίες του δοκιμίου, από το αποτέλεσμα τους δεν στάθηκε δυνατό να αποφασισθεί αν το ελάττωμα έχει τετραγωνική ή ελλειψοειδή διατομή. Οι τομογραφικές μέθοδοι μπορούν να βοηθήσουν στην λύση αυτού του πρακτικού προβλήματος της βιομηχανικής ραδιογραφίας. Σημειώνεται πάντως, ότι για ελαττώματα που παρουσιάζουν σχετικά μεγάλο όγκο (δηλ. δεν είναι ρωγμές) και εκφυλισμένη 3<sup>η</sup> διάσταση (άπειρη ή ελάχιστη) με δύο μόλις ραδιογραφίες με την πηγή στο ίδιο επίπεδο αλλά από διαφορετικές γωνίες μπορεί κατ' αρχήν να εντοπισθεί η θέση τους μέσα στο δοκίμιο.

### **5.3 Διδιάστατη τομογραφία**

Το κατ' αρχήν ζητούμενο σύμφωνα με τα όσα σημειώθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, είναι με απλές ραδιογραφικές μεθόδους να επιτευχθεί η αναπαράσταση της τομής (βλ. και εικόνα του Διαγράμματος 5.1) του δοκιμίου – κυλίνδρου. Το αποτέλεσμα μπορεί να ονομασθεί διδιάστατη τομογραφία (2Δ τομογραφία – στα αγγλικά tomography). Στη συνέχεια θα εξερευνηθεί πως μπορεί να υλοποιηθεί στην πράξη μια 2Δ τομογραφία.

Κατ' αρχήν, διαπιστώθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, ότι "φωτίζοντας" το αντικείμενο από διάφορες γωνίες είναι δυνατόν να ληφθούν πληροφορίες για το σχήμα και τις εξωτερικές διαστάσεις μιας τομής του από τη μελέτη της σκιάς που δημιουργείται. Για παράδειγμα, μπορεί κανείς να μελετήσει τη σκιά μιας τομής κυλίνδρου (βλ. και την εικόνα του Διαγράμματος 5.5) και μιας τομής ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου με τετραγωνική διατομή (βλ. και την εικόνα του Διαγράμματος 5.6) χρησιμοποιώντας φωτισμό από τρεις διαφορετικές γωνίες. Γίνεται προφανές ότι αν οι γωνίες με τις οποίες ραδιογραφείται μία τομή γίνουν πάρα πολλές, η πληροφορία για το

σχήμα και τις εξωτερικές διαστάσεις της υπό μελέτη τομής θα γίνουν πολύ ακριβείς. Επίσης, επειδή οι ραδιογραφίες θα απεικονίσουν και στοιχεία από το εσωτερικό της τομής (δηλ. ελαττώματα και άλλες εσωτερικές κοιλότητες) γίνεται επίσης προφανές ότι αν οι γωνίες με τις οποίες ραδιογραφείται μία τομή γίνουν πάρα πολλές, θα ληφθούν επαρκείς πληροφορίες και για το σχήμα και τις διαστάσεις αυτών των εσωτερικών ανωμαλιών. Δύο είναι οι βασικοί τρόποι λήψεως πολλών ραδιογραφιών μιας τομής από διάφορες γωνίες: (α) η περιστροφή κατά βήματα του συστήματος πηγή ακτίνων –x και φιλμ ή (β) η περιστροφή του δοκιμίου γύρω από έναν άξονα περιστροφής κάθετο στο επίπεδο της υπό μελέτη τομής. Αυτού του είδους οι ραδιογραφικές εικόνες καθότι πάρα πολλές δεν συμφέρει να λαμβάνονται σε φιλμ, αλλά συνήθως λαμβάνονται με ηλεκτρονικές μεθόδους και αποθηκεύονται σε υπολογιστές από όπου σε άλλη χρονική στιγμή ανακτώνται για επεξεργασία. Εξαιτίας της ανάγκης χρήσης υπολογιστών η τομογραφία ονομάζεται υπολογιστική τομογραφία (computed tomography ή CT). Για λεπτομερή κατανόηση της 2Δ τομογραφίας ως αποτέλεσμα συνδυασμού πολλών ραδιογραφιών από μία τομή, μπορεί κανείς να ανατρέξει και στο βασικό σύγγραμμα Herman (2009).

Μετά τη λήψη των ραδιογραφιών μιας τομής από πολλές συνήθως ισαπέχουσες γωνίες και την αποθήκευση των αντίστοιχων εικόνων σε κατάλληλο υπολογιστικό σύστημα, θα πρέπει να γίνει η κατάλληλη επεξεργασία τους ώστε από αυτές τις πολλές ραδιογραφίες να γίνει η ζητούμενη αναπαραγωγή της τομής. Για την περιγραφή του αλγορίθμου θα χρησιμοποιηθεί ένα απλό παράδειγμα:

Έστω τομή δοκιμίου από αλουμίνιο, η οποία περιέχει τετραγωνικό ελάττωμα από χάλυβα, όπως στην εικόνα του Διαγράμματος 5.7. Η τομή θεωρείται άγνωστη και ο σκοπός είναι η αναπαραγωγή της με ραδιογραφικές / τομογραφικές μεθόδους. Κατ' αρχήν η τομή ραδιογραφείται από "πάνω" (γωνία  $0^\circ$  – θέση πηγής "A"). Το ραδιογραφικό αποτέλεσμα διακρίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 5.8. Ενώ στην πραγματικότητα η εξεταζόμενη τομή δεν έχει πάχος η ραδιογραφική εικόνα αναπαριστάται καταχρηστικά με κάποιο πλάτος για λόγους κατανόησης. Έπειτα η τομή ραδιογραφείται από "πλάγια" (γωνία  $90^\circ$  – θέση πηγής "B"). Το ραδιογραφικό αποτέλεσμα διακρίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 5.9. Και εδώ στην πραγματικότητα η εξεταζόμενη τομή δεν έχει πάχος αλλά η ραδιογραφική εικόνα

αναπαριστάται καταχρηστικά με κάποιο πλάτος για λόγους κατανόησης. Αν τώρα, τοποθετηθούν οι δύο αυτές εικόνες όπως στο Διάγραμμα 5.10 (δηλαδή σε σχετική μεταξύ τους γωνία  $90^\circ$ , σύμφωνη με τη γωνία με την οποία λήφθηκαν οι αντίστοιχες ραδιογραφίες) και με κάποιο υπολογιστικό εργαλείο "επεκταθούν" όπως δείχνουν διαδοχικά τα Διαγράμματα 5.11α έως και 5.11δ, παρατηρείται ότι η υπέρθεση των επεκτάσεων αυτών δίνει μία χονδρική αναπαράσταση της ζητούμενης τομής. Η αναπαράσταση αυτή δεν είναι πολύ ακριβής διότι αποτυπώνονται σε αυτήν και κάποιες "σκιές" του ελαττώματος, οι οποίες δεν υπάρχουν στην πραγματικότητα.

Η μέθοδος τομογραφίας που περιγράφηκε πιο πάνω ονομάζεται στα αγγλικά "back projection" και μπορεί να γίνει τόσο ακριβέστερη, όσο περισσότερες γωνίες ραδιογράφισης χρησιμοποιηθούν. Για να είναι δυνατή η υλοποίηση μιας καλής τομογραφίας, όπου να φαίνονται καθαρά οι λεπτομέρειες του εσωτερικού του ραδιογραφούμενου αντικειμένου, χρειάζεται να πραγματοποιηθούν πολλές τέτοιες ραδιογραφίες. Στην πραγματικότητα μπορούν να λαμβάνονται από 300 έως και 3600 ραδιογραφίες της τομής που ενδιαφέρει.

Συνοψίζοντας, για ένα back projection απαιτούνται:

- (α) λήψη ραδιογραφιών μιας τομής από  $n$  ισαπέχουσες γωνίες (όπου  $n$  μεγάλος ακεραίος), πάντα γύρω από τον ίδιο άξονα περιστροφής.
- (β) επεξεργασία των ραδιογραφικών εικόνων της τομής ώστε να "επεκταθούν" σε 2 διαστάσεις, και τέλος
- (γ) υπέρθεση των επεξεργασμένων ραδιογραφικών εικόνων, ώστε να παραληφθεί η ζητούμενη συνισταμένη εικόνα αναπαράστασης της τομής. Κατά την υπέρθεση η επεξεργασμένη ραδιογραφική εικόνα  $i$  πρέπει να βρίσκεται τοποθετημένη σε σχετική γωνία  $360/n$  σε σχέση με την προηγούμενη της εικόνα  $i-1$ .

#### **5.4 Λήψη ραδιογραφιών από πολλές γωνίες με τον κώδικα XRSIM**

Ο κώδικας XRSIM μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προσομοιωτής ραδιογραφιών δοκιμών από πολλές γωνίες, διότι μπορεί με ευκολία να παρέχει και να φυλάσσει σε ηλεκτρονική μορφή ραδιογραφικές εικόνες. Ως εκ τούτου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την σχετικά εύκολη συλλογή μιας σειράς από τέτοιες εικονικές ραδιογραφίες. Μετά τη συλλογή

αυτών των ραδιογραφιών θα γίνει μια απόπειρα σύνθεσής τους κατά τον τρόπο που περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο ώστε να παραληφθεί –αν είναι δυνατόν- μία εικόνα τομής που ενδιαφέρει. Για την λήψη των εικονικών ραδιογραφιών θα χρησιμοποιηθεί ένα σφαιρικό δοκίμιο από αλουμίνιο το οποίο σε κάποιο σημείο παρουσιάζει ελάττωμα σφαιρικής φυσαλίδας αέρα. Είναι προφανές, ότι η τομή του δοκιμίου αυτού που περιέχει τη φυσαλίδα, χρειάζεται περισσότερες από δύο ραδιογραφίες για να αποδοθεί. Αν χρησιμοποιούνταν μόνο δύο ραδιογραφίες υπό γωνία  $90^\circ$  τότε το αποτέλεσμα με τη μέθοδο back projection θα ήταν παρόμοιο με αυτό του Διαγράμματος 5.11δ, πράγμα που απέχει πολύ από την πραγματικότητα. Με τον κώδικα XRSIM γίνονται τα εξής χονδρικά βήματα, για τις τεχνικές λεπτομέρειες των οποίων θα πρέπει κανείς να ανατρέξει στα προηγούμενα Κεφάλαια:

1. Έγινε η εισαγωγή στον κώδικα σφαιρικού δοκιμίου από αλουμίνιο διαμέτρου 5 cm από αρχείο CAD τύπου "ASCII stl".
2. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε στο δοκίμιο αυτό σφαιρικό ελάττωμα από αέρα διαμέτρου 1 cm από αρχείο CAD τύπου "ASCII stl" (με την επέκταση .flw, ώστε ο XRSIM να καταλάβει ότι πρόκειται περί ελαττώματος). Η σχετική θέση του δοκιμίου και του ελαττώματος φαίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 5.12. Η απόσταση εστιακού σημείου και φιλμ ορίσθηκε στα 100 cm.
3. Το φιλμ διαμορφώθηκε έτσι ώστε ως προς τον άξονα x του κώδικα XRSIM να έχει μήκος που να καλύπτει ακριβώς την προβολή ολόκληρου του δοκιμίου, δηλαδή 5 cm (έγινε ρύθμιση ώστε αυτά τα 5 cm να αντιστοιχούν σε 256 pixel μήκους ραδιογραφικής εικόνας). Το πλάτος του φιλμ ως προς τον άξονα ψ του κώδικα XRSIM ρυθμίσθηκε στην ελάχιστη τιμή του ενός pixel. Η θέση του φιλμ ρυθμίσθηκε έτσι ώστε το λεπτό αυτό φιλμ να μπορεί να ραδιογραφήσει το επίπεδο συμμετρίας του σφαιρικού ελαττώματος. Η τελική θέση του φιλμ στο επίπεδο xψ φαίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 5.13.
4. Πραγματοποιήθηκαν 36 ραδιογραφίες, μία κάθε 10 μοίρες. Η αλλαγή της γωνίας του δοκιμίου έγινε στρέφοντας το δοκίμιο δεξιόστροφα ως προς τον άξονα ψ, όπως φαίνεται και στην εικόνα του Διαγράμματος 5.14. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής ήταν 36 ραδιογραφίες μεγέθους 256 x 1 pixel, οι οποίες αποθηκεύθηκαν σε ηλεκτρονική μορφή σε τυποποίηση \*.jrg και στις οποίες αποδόθηκαν για

λειτουργικούς λόγους που θα κατανοηθούν στην συνέχεια τα διαδοχικά ονόματα αρχείων ggi.jpg (όπου  $i = 0,350$  με βήμα 10).

## 5.5 Back projection

### 5.5.1 Γενικά

Για το βήμα της επεξεργασίας των ραδιογραφικών εικόνων ggi.jpg, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα υπολογιστικά εργαλεία. Από τα ελεύθερα διαθέσιμα ξεχωρίζει για την πληρότητά του το παραθυρικό "Irfanview", για περιβάλλον λειτουργικού συστήματος MS WXP. Την εποχή συγγραφής της παρούσας ΔΕ (Αύγουστος, 2009), το εκτελέσιμο εγκατάστασης είχε το όνομα iview425\_setup.exe, και ήταν διαθέσιμο από το δικτυακό τόπο <http://www.irfanview.com>. Επίσης ξεχωρίζει το πακέτο ανοιχτού κώδικα "ImageMagick" για περιβάλλον λειτουργικού συστήματος MS WXP ή και LINUX. Την εποχή συγγραφής της παρούσας ΔΕ (Αύγουστος, 2009), το εκτελέσιμο εγκατάστασης για περιβάλλον λειτουργικού συστήματος MS WXP είχε το όνομα ImageMagick-6.5.4-6-Q16-windows-dll.exe. Το ImageMagick δεν είναι τόσο φιλικό στο χρήστη όσο το Irfanview διότι δεν είναι παραθυρικό, αλλά λογισμικό που χρησιμοποιεί εντολές (command line interface ή CLI). Παρόλαυτά, οι δυνατότητές του είναι πολύ περισσότερες από αυτές του Irfanview, διατίθεται και σε πηγαία μορφή και μπορεί να επεξεργαστεί αρχεία από εικόνες πολλών τύπων και μάλιστα κατά ομάδες. Η τελευταία δυνατότητα δεν είναι τόσο εύκολη με το Irfanview. Τόσο σε περιβάλλον MSWXP, όσο και σε περιβάλλον LINUX, οι εντολές του ImageMagick μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τμήματα προγραμμάτων. Φυσικά αυτή η δυνατότητα είναι πολύ πιο ανεπτυγμένη σε περιβάλλον LINUX, διότι οι δυνατότητες του Unix shell σε σχέση με αυτές του MS WXP command shell (απόγονος του DOS 6.22) είναι πολύ περισσότερες. Για τις ανάγκες της επεξεργασίας των ραδιογραφικών εικόνων ggi.jpg, αποφασίσθηκε στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ να χρησιμοποιηθεί το πακέτο ImageMagick για περιβάλλον λειτουργικού συστήματος MS WXP. Τα αναγκαία απλά προγράμματα γράφθηκαν στην μορφή \*.bat.

### 5.5.2 Επέκταση ραδιογραφικών εικόνων

Χρησιμοποιείται το ακόλουθο μικρό πρόγραμμα \*.bat με εντολές του πακέτου ImageMagick:

```
@echo off
```

```
for /L %%a in (0,10,350) do (  
convert gg%%a.jpg -geometry 256x256! hh%%a.jpg  
)
```

Με τον διακόπτη

```
-geometry 256x256!
```

επιτυγχάνεται η υποχρεωτική (τελεστής "!") αλλαγή του μήκους κάθε ραδιογραφικής εικόνας gg1.jpg από 1 σε 256 pixel. Στην εικόνα του Διαγράμματος 5.15, φαίνεται η ραδιογραφική εικόνα gg0.jpg πριν την "επέκταση". Στην εικόνα του Διαγράμματος 5.16 φαίνεται η ίδια ραδιογραφική εικόνα μετά την "επέκταση".

### 5.5.3 Ενίσχυση αντίθεσης

Επειδή το δοκίμιο που εξετάζεται είναι από ένα και μόνο υλικό (αλουμίνιο) και παρουσιάζει ένα και μόνο ελάττωμα από άλλο μοναδικό υλικό (αέρας) συμφέρει να τονισθεί κατά το δυνατόν η διαφορά αυτή με τεχνητή αύξηση της αντίθεσης. Χρησιμοποιείται το ακόλουθο μικρό πρόγραμμα \*.bat με εντολές του πακέτου ImageMagick:

```
@echo off  
for /L %%a in (0,10,350) do (  
convert hh%%a.jpg -contrast-stretch 0 eh%%a.jpg  
)
```

Με τον διακόπτη

```
-contrast-stretch 0
```

επιτυγχάνεται η επιθυμητή βελτίωση της αντίθεσης (βλ. π.χ. και Still, 2005). Στην εικόνα του Διαγράμματος 5.16, φαίνεται η ραδιογραφική εικόνα hh0.jpg πριν την αλλαγή της αντίθεσης. Στην εικόνα του Διαγράμματος 5.17 φαίνεται η ίδια ραδιογραφική εικόνα μετά την βελτίωση της αντίθεσης.

### 5.5.4 Περιστροφή

Για την απαραίτητη υπέρθεση των επεξεργασμένων ραδιογραφικών εικόνων, ώστε να παραληφθεί η ζητούμενη συνισταμένη εικόνα αναπαράστασης της τομής μία επεξεργασμένη ραδιογραφική εικόνα  $i$  πρέπει να βρίσκεται τοποθετημένη σε σχετική γωνία  $360/n$  σε σχέση με την προηγούμενή της εικόνα  $i-1$ . Χρησιμοποιείται το ακόλουθο μικρό πρόγραμμα \*.bat με εντολές του πακέτου ImageMagick, προκειμένου κάθε μία από τις ραδιογραφικές εικόνες eh1i.jpg που προέκυψαν από την επεξεργασία του

προηγούμενου βήματος, να περιστραφούν γύρω από το κέντρο βάρους τους αριστερόστροφα κατά τη γωνία με τιμή  $i$  που τους αντιστοιχεί:

```
@echo off
for /L %%a in (0,10,350) do (
convert ehh%%a.jpg -rotate -%%a ii%%a.jpg
)
```

Στην εικόνα του Διαγράμματος 5.18, φαίνεται η ραδιογραφική εικόνα ehh30.jpg πριν την περιστροφή της. Στην εικόνα του Διαγράμματος 5.19 φαίνεται η ίδια ραδιογραφική εικόνα μετά την αριστερόστροφη περιστροφή της κατά  $30^\circ$ .

### 5.5.5 Προσαρμογή διαστάσεων

Μετά την περιστροφή οι παραγόμενες εικόνες έχουν αποκτήσει διαστάσεις, λόγω της περιστροφής της διαγωνίου, γενικά μεγαλύτερες από 256x256 pixel, πράγμα που δεν αντιστοιχεί σε πραγματική πληροφορία, διότι οι πρωτότυπες ραδιογραφικές εικόνες έχουν μέγιστο μήκος 256 pixel. Θα πρέπει επομένως σε αυτό το σημείο να γίνει μία προσαρμογή των διαστάσεων των εικόνων ii\*.jpg στα 256x256 pixel. Αυτό επιτυγχάνεται με μία αποκοπή (crop) των διαστάσεων που "περισεύουν", με αρχή των συντεταγμένων το κέντρο βάρους των ραδιογραφικών εικόνων. Χρησιμοποιείται το ακόλουθο μικρό πρόγραμμα \*.bat με εντολές του πακέτου ImageMagick:

```
@echo off
for /L %%a in (0,10,350) do (
convert ii%%a.jpg -gravity Center -crop 256x256+0+0 jj%%a.jpg
)
```

Με τον διακόπτη

```
-gravity Center
```

πληροφορείται το ImageMagick, ότι η αρχή των συντεταγμένων είναι το κέντρο βάρους της εικόνας. Αυτός ο διακόπτης χρειάζεται να μπει διότι η αρχή των συντεταγμένων στο ImageMagick είναι η πάνω αριστερά γωνία της εικόνας (βλ. π.χ. και Still, 2005).

Με τον διακόπτη

```
-crop 256x256+0+0
```

πληροφορείται το ImageMagick, ότι η αποκοπή θα γίνει με σημείο αναφοράς την αρχή των συντεταγμένων, και ότι όση εικόνα είναι μεγαλύτερη από 256 pixel κατά το  $x$  ή τον  $y$  άξονα θα αποκοπεί. Στην εικόνα του Διαγράμματος 5.19, φαίνεται η ραδιογραφική εικόνα ii30.jpg πριν την προσαρμογή των διαστάσεών της. Στην εικόνα του



Διαγράμματος 5.20 φαίνεται η ίδια ραδιογραφική εικόνα μετά την προσαρμογή των διαστάσεών της.

### **5.5.6 Υπέρθωση εικόνων**

Για την υπέρθεση των εικόνων `jj*.jpg` πρέπει να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη εντολή του ImageMagick:

```
convert -average jj*.jpg theresult.jpg
```

Με τη χρήση της εντολής αυτής οι 36 διαθέσιμες εικόνες `jj*.jpg`, όπως προέκυψαν από την προηγούμενη επεξεργασία υπερτίθεται η μία πάνω στην άλλη, για να αποδώσουν την εικόνα της τομής που ενδιαφέρει. Η υπέρθεση μιας εικόνας γίνεται με βαρύτητα  $1/36$  ή ισοδύναμα περίπου 3%. Το αποτέλεσμα είναι η εικόνα του Διαγράμματος 5.21.

### **5.5.7 Ενίσχυση αντίθεσης τελικού αποτελέσματος**

Επειδή, όπως έχει ήδη αναφερθεί, το δοκίμιο που εξετάζεται είναι από ένα και μόνο υλικό (αλουμίνιο) και παρουσιάζει ένα και μόνο ελάττωμα από άλλο μοναδικό υλικό (αέρας) συμφέρει να τονισθεί κατά το δυνατόν η διαφορά αυτή με τεχνητή αύξηση της αντίθεσης και στο τελικό αποτέλεσμα. Χρησιμοποιείται η ακόλουθη εντολή του πακέτου ImageMagick:

```
convert theresult.jpg -contrast-stretch 0 theresult1.jpg
```

Στην εικόνα του Διαγράμματος 5.22 φαίνεται η τομή που ενδιαφέρει μετά την βελτίωση της αντίθεσης.

### **5.5.8 Επεξεργασία διαφορετικών τομών**

Στην περίπτωση που η προς αναπαράσταση τομή είναι διαφορετική π.χ. έχει ελάττωμα τετραγωνικής και όχι κυκλικής διατομής, η μέθοδος `back projection` όπως περιγράφηκε προηγούμενα δουλεύει ικανοποιητικά κατά τον ίδιο τρόπο, όπως διακρίνεται και στην εικόνα του Διαγράμματος 5.23

## **5.6 Παρατηρήσεις – Back projection**

Σύμφωνα με τα όσα παρουσιάστηκαν στην ενότητα 5.5, συμπεραίνονται τα ακόλουθα σχετικά με την μέθοδο 2Δ τομογραφίας `back projection`:

(α) Αναπαριστά με ικανοποιητική ακρίβεια τη ζητούμενη τομή. Τηρούνται οι εξωτερικές διαστάσεις της τομής καθώς και οι εξωτερικές διαστάσεις του ελαττώματος. Επιπλέον η θέση του ελαττώματος στην τομή αποδίδεται επίσης με ακρίβεια.

(β) Στην αναλυτική της μορφή η μέθοδος έχει πολλές επί μέρους συνιστώσες δηλαδή πολλά και μάλλον πολύπλοκα βήματα που πρέπει να πραγματοποιηθούν.

(γ) Η μέθοδος μπορεί να εφαρμόζεται και χωρίς ενισχύσεις αντίθεσης, μόνο που τότε το αποτέλεσμα θα είναι προφανώς φτωχότερο σε αντίθεση. Για παράδειγμα μπορεί κανείς να συγκρίνει τη ραδιογραφική εικόνα του Διαγράμματος 5.22 με εκείνες των Διαγραμμάτων 5.24, 5.25 και 5.26.

(δ) Το τελικό αποτέλεσμα ως εικόνα δεν είναι τέλειο, διότι, όπως παρατηρείται από τα Διαγράμματα 5.22 και 5.23, διαπιστώνεται θόρυβος με τη μορφή αστεριών, τα λεγόμενα ραδιογραφικά artifacts, τα οποία είναι στην ουσία τεχνικές παρενέργειες της υπέρθεσης.

## **5.7 Αυτοματοποιημένη 2Δ τομογραφία**

### **5.7.1 Γενικά**

Σύμφωνα και με τα συμπεράσματα της παραγράφου 5.6, δύο φαίνεται να είναι τα κύρια προβλήματα της μεθόδου back projection:

- (i) τα πολλά και πολύπλοκα βήματα επεξεργασίας εικόνας, και
- (ii) ο θόρυβος από τις τεχνικές παρενέργειες της υπέρθεσης.

Και τα δύο αυτά προβλήματα είναι γνωστά στον τομέα επεξεργασίας εικόνας και έχουν λυθεί αποτελεσματικά με μαθηματικό τρόπο εδώ και αρκετά χρόνια, κυρίως διότι υπήρξε ζήτηση από τον τομέα των ιατρικών εφαρμογών. Ο μαθηματικός τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίζεται η πολυπλοκότητα της επεξεργασίας εικόνας είναι η δημιουργία του ονομαζόμενου διαγράμματος sinogram, ενώ για την ανακατασκευή της ζητούμενης τομής από το sinogram με τη μέθοδο back projection χρησιμοποιείται ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier. Για να αποφευχθούν τα artifacts, ενσωματώνονται στον μετασχηματισμό Fourier, κατάλληλα μαθηματικά φίλτρα (βλ. και Baruchel, 2000, Κεφ. 4). Αν χρησιμοποιούνται μαθηματικά φίλτρα η μέθοδος back projection ονομάζεται filtered back projection. Είναι προφανές ότι αυτές οι μαθηματικές υπολογιστικές διαδικασίες, μπορούν να γίνονται αυτοματοποιημένα για τους σκοπούς της 2Δ τομογραφίας, με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού. Στο κείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας τόσο τα μαθηματικά που εμπλέκονται στον αντίστροφο

μετασχηματισμό Fourier, ή στα σχετικά μαθηματικά φίλτρα ή τέλος στο λογισμικό που τα υλοποιεί αντιμετωπίζονται ως "μαύρα κουτιά".

### **5.7.2 Συνοπτική ανασκόπηση ελεύθερου λογισμικού**

Οι κύριοι πάροχοι λογισμικού τομογραφικών απεικονίσεων είναι οι μεγάλες εταιρείες κατασκευής ιατρικών τομογραφικών μηχανημάτων, των γνωστών αξονικών τομογράφων. Οι κυριότερες αυτές εταιρείες είναι η Siemens και η Philips. Στο λογισμικό τους αυτό, οι κατασκευαστές αυτοί ενσωματώνουν όλες τις τελευταίες εξελίξεις στην σχετική με την τομογραφία επεξεργασία εικόνας. Το λογισμικό αυτό δεν είναι ελεύθερο και το κόστος του είναι εξαιρετικά μεγάλο, διότι, εκτός των άλλων έχει περάσει και από αυστηρό έλεγχο πιστοποίησης ποιότητας από διεθνείς οργανισμούς προκειμένου να εξασφαλίζεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του.

Από το ελεύθερα διαθέσιμο λογισμικό ανοιχτού κώδικα, μετά από λεπτομερή έρευνα είναι δυνατόν να απομονωθούν ανάμεσα σε άλλα, τα ακόλουθα τρία πακέτα:

(α) Το λογισμικό SNARK09 (<http://www.snark09.com>). Πρόκειται για την τελευταία έκδοση ενός κατ' ομολογία πολύ καλού λογισμικού για ιατρική τομογραφία και όχι μόνο, το οποίο όμως δεν είναι πιστοποιημένο. Το λογισμικό αυτό είναι γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού C++ και προορίζεται για περιβάλλον Λειτουργικού Συστήματος LINUX. Στην δημιουργία του λογισμικού αυτού είχε σημαντικό ρόλο ο Gabor Herman, ο οποίος είναι από τους πλέον αποδεκτούς επιστήμονες στην τομογραφία. Ο προγραμματισμός γίνεται τόσο σε επίπεδο γραμμών εντολών (command line interface ή CLI), όσο και με παραθυρικό τρόπο (graphical user interface ή GUI). Το λογισμικό SNARK09 είναι διαθέσιμο με πολύ μικρό κόστος στην τάξη των 50 ΕΥΡΩ.

(β) Το λογισμικό CTSIM (<http://www.ctsim.org>). Πρόκειται για λογισμικό επίδειξης των δυνατοτήτων και των βασικών τρόπων της ιατρικής τομογραφίας. Το λογισμικό αυτό δεν διαθέτει πιστοποίηση και είναι γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού C++. Προορίζεται τόσο για περιβάλλον Λειτουργικού Συστήματος LINUX, όσο και για περιβάλλον Λειτουργικού Συστήματος MS WXP. Ο προγραμματισμός γίνεται τόσο σε επίπεδο CLI, όσο και σε επίπεδο GUI. Παρόλαυτά, το λογισμικό αυτό παρουσιάζει το πολύ σημαντικό μειονέκτημα ότι τα ηλεκτρονικά αρχεία εικόνας που χρησιμοποιεί τόσο σε επίπεδο δεδομένων όσο και σε επίπεδο αποτελεσμάτων ακολουθούν στις

περισσότερες περιπτώσεις εσωτερικής μορφής τυποποίηση. Ως εκ τούτου το λογισμικό αυτό έχει περιορισμένη χρηστικότητα.

(γ) Το λογισμικό ImageJ. Πρόκειται για λογισμικό επίδειξης επεξεργασίας εικόνας για ιατρικές εφαρμογές, το οποίο προτείνεται από τον οργανισμό National Institutes of Health των ΗΠΑ (βλ. και <http://www.nhs.gov>), για βασική ιατρική εκπαίδευση στις ιατρικές ακτινογραφίες και τις ιατρικές τομογραφικές μεθόδους. Το λογισμικό αυτό δεν διαθέτει πιστοποίηση και είναι γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού Java. Προορίζεται τόσο για περιβάλλον Λειτουργικού Συστήματος LINUX, όσο και για περιβάλλον Λειτουργικού Συστήματος MS WXP. Ο προγραμματισμός γίνεται σε επίπεδο GUI. Το επίπεδο αυτό δεν είναι εξαιρετικά φιλικό, παρόλαυτά το λογισμικό έχει πολλές δυνατότητες, είναι πολύ γρήγορο και λόγω του ιατρικού κοινού στο οποίο απευθύνεται, είναι και πολύ δημοφιλές. Επίσης διαθέτει έναν πολύ μεγάλο αριθμό από "plugins". Το λογισμικό ImageJ μπορεί κανείς γενικά να βρει στο δικτυακό τόπο <http://rsbweb.nih.gov/ij/>. Το "download" για διάφορα λειτουργικά συστήματα μπορεί να γίνει από το δικτυακό τόπο <http://rsbweb.nih.gov/ij/download.html>, ενώ το "download" των "plugins" μπορεί να γίνει από τον δικτυακό τόπο <http://rsbweb.nih.gov/ij/plugins/index.html>.

Για την επίδειξη αυτοματοποιημένης 2Δ τομογραφίας στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το λογισμικό ImageJ. Πρέπει να σημειωθεί εδώ όμως ότι το λογισμικό ImageJ, θεωρεί ότι η δέσμη φωτονίων από την οποία παράγονται οι ραδιογραφίες που τελικά οδηγούν στην τομογραφία είναι παράλληλη. Αυτό, βέβαια στην πράξη δεν ισχύει πάντοτε.

### **5.7.3 Διάγραμμα sinogram**

Κατά τα όσα αναφέρονται στην παράγραφο 5.5, προκειμένου να εφαρμοσθεί η μέθοδος back projection, μία τομή, πρέπει να ραδιογραφηθεί από διάφορες γωνίες και τα αποτελέσματα σε μορφή "φετών" (slices), όπως στην εικόνα του Διαγράμματος 5.15 να συμμετέχουν στα επόμενα βήματα, όπως αυτά περιγράφονται στην παράγραφο 5.5. Αν η εικόνα της τομής είναι γνωστή τότε μπορεί σε αυτή να εφαρμοσθεί ο μετασχηματισμός Radon, ο οποίος είναι μία μαθηματική μέθοδος επεξεργασίας που συλλέγει αυτόματα τις ραδιογραφίες της τομής από διάφορες ισαπέχουσες γωνίες και τις τοποθετεί σειριακά την

μία κάτω από την άλλη, δημιουργώντας το επονομαζόμενο sinogram. Αν η εικόνα της τομής είναι άγνωστη, τότε ο μετασχηματισμός Radon δεν μπορεί να εφαρμοσθεί και το sinogram πρέπει να προκύψει από σύνθεση ραδιογραφικών εικόνων του τύπου του Διαγράμματος 5.15. Η κατασκευή του sinogram, με τον έναν ή τον άλλο τρόπο είναι απαραίτητη για την αυτόματη 2Δ τομογραφία, διότι αυτό είναι η είσοδος στην μέθοδο αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier με φίλτρα ή χωρίς, η οποία μέθοδος θα παράγει την ζητούμενη αναπαράσταση της τομής. Για μαθηματικούς λόγους που παρουσιάζονται από τον Baruchel (2000), σε περίπτωση παράλληλης δέσμης ακτίνων  $-x$ , οι ραδιογραφίες της τομής δεν χρειάζεται να καλύψουν συνολική γωνία γύρω από την τομή μεγαλύτερη από  $180^\circ$ .

#### **5.7.4 Παραγωγή sinogram από γνωστή τομή με τη βοήθεια λογισμικού**

Έστω ότι διατίθεται τομή της οποίας ζητείται η αναπαράσταση με 2Δ τομογραφία. Για λόγους επαλήθευσης του αποτελέσματος της τομογραφίας –όταν αυτή ολοκληρωθεί– η τομή θεωρείται δεδομένη και αναπαριστάται από την εικόνα του Διαγράμματος 5.27. Για την παραγωγή του διαγράμματος sinogram, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ImageJ από περιβάλλον Λειτουργικού Συστήματος MS WXP, με τα ακόλουθα τρία βήματα:

(α) ImageJ > File > Open > "ηλεκτρονικό αρχείο εικόνας Διαγράμματος 5.27",

(β) Plugins > Radon Transform, και

(γ) Calculate

Το Plugin "Radon Transform", δηλ. του μετασχηματισμού Radon, εγκαταστάθηκε στο ImageJ από τον δικτυακό τόπο των σχετικών Plugins, που έχει ήδη αναφερθεί. Πριν το βήμα "(γ) Calculate" ρυθμίσθηκαν τα εξής:

**Scans: 256,**

**Angular Increment: 1.0 (σε μοίρες), και**

**Output Depth: 8 (σε bit)**

Οι ρυθμίσεις αυτές διακρίνονται στην εικόνα του Διαγράμματος 5.28. Οι υπόλοιπες ρυθμίσεις που διακρίνονται σε αυτήν την εικόνα είναι αδιάφορες για την παραγωγή sinogram. Σύμφωνα με τις ρυθμίσεις αυτές το διάγραμμα sinogram θα έχει διαστάσεις

256x180 pixel, όπου  $180 = 180$  Views της μίας μοίρας και θα είναι ασπρόμαυρο τύπου grayscale (8 bit). Τονίζεται ότι ο μετασχηματισμός Radon, όπως εφαρμόζεται από το λογισμικό ImageJ, είναι για τους σκοπούς της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας "μαύρο κουτί". Το αποτέλεσμα του δημιουργούμενου sinogram φαίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 5.29.

### **5.7.5 Παραγωγή sinogram από άγνωστη τομή με τη βοήθεια ραδιογραφίας**

Έστω ότι διατίθεται άγνωστη τομή της οποίας ζητείται η αναπαράσταση με 2D τομογραφία. Για λόγους επαλήθευσης του αποτελέσματος της τομογραφίας –όταν αυτή ολοκληρωθεί- η τομή θεωρείται δεδομένη και αναπαριστάται από την εικόνα του Διαγράμματος 5.12. Για την παραγωγή του διαγράμματος sinogram, κατ' αρχήν γίνονται 180 εικονικές ραδιογραφίες ανά μία μοίρα, με τη βοήθεια του κώδικα XRSIM, σύμφωνα με τα όσα αναφέρονται στην παράγραφο 5.4. Στην συνέχεια ακολουθεί, σύνθεση των ραδιογραφιών αυτών σε μία εικόνα με τη βοήθεια είτε του πακέτου λογισμικού Irfanview, είτε του πακέτου λογισμικού ImageMagick.

Με το Irfanview η σύνθεση γίνεται ως εξής:

Irfanview > Image > Create Panorama Image > Add Images (όλα τα ggi.jpg) > Sort Images [αν χρειάζεται, με την επιλογή "by Name (ascending, XP Style)"] > Create Image

Με το ImageMagick η σύνθεση γίνεται ως εξής:

```
montage gg*.jpg -mode concatenate -tile 1x sinogram.jpg
```

Και στις δύο περιπτώσεις το αποτέλεσμα διακρίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 5.30.

Συγκρίνοντας τις εικόνες των Διαγραμμάτων 5.29 και 5.30, οι οποίες προέκυψαν για τομές παραπλήσιας γεωμετρίας γίνεται αντιληπτό ότι η παραγωγή sinogram από άγνωστη τομή με τη βοήθεια ραδιογραφίας είναι αποδεκτή μέθοδος παραγωγής sinogram. Οι μικρές ατέλειες που παρατηρούνται στο sinogram του Διαγράμματος 5.30, οφείλονται σε ατέλειες του κώδικα προσομοίωσης XRSIM.

### 5.7.6 Αναπαραγωγή τομής από sinogram

Για την αναπαραγωγή τομής από sinogram, αυτοματοποιημένα θα χρησιμοποιηθεί και πάλι το λογισμικό ImageJ. Σκοπός της χρησιμοποίησης του sinogram και της εφαρμογής του λογισμικού είναι να αποφευχθεί η κοπιαστική μέθοδος του back projection σε βήματα, όπως αυτά περιγράφηκαν στην παράγραφο 5.5, και επίσης η χρησιμοποίηση μαθηματικών φίλτρων για την απάλειψη των συνεπειών της υπέρθεσης.

#### (α) Ρυθμίσεις λογισμικού ImageJ

Συνεχίζοντας από το βήμα (γ) της παραγράφου 5.7.4, επιλέγονται τα εξής που αφορούν την αναπαραγωγή της τομής:

**Zoom: 1, και**

**Output Img Size: 512,**

Οι ρυθμίσεις αυτές διακρίνονται στην εικόνα του Διαγράμματος 5.28. Σύμφωνα με τις ρυθμίσεις αυτές το η αναπαραγωγή της τομής θα έχει διαστάσεις 512x512 pixel. Τονίζεται ότι ο μετασχηματισμός Fourier, όπως εφαρμόζεται από το λογισμικό ImageJ, για την αναπαραγωγή της τομής είναι για τους σκοπούς της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας "μαύρο κουτί".

#### (β) Σενάριο 1

Χρήση sinogram από μετασχηματισμό Radon, γνωστής τομής, λογισμικό ImageJ, χωρίς χρήση φίλτρων. Απενεργοποιείται η επιλογή **Use Filtering**. Η αναπαραγωγή γίνεται με την επιλογή Reconstruct. Το αποτέλεσμα της αναπαραγωγής της τομής φαίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 5.31.

#### (γ) Σενάριο 2

Χρήση sinogram από μετασχηματισμό Radon, γνωστής τομής, λογισμικό ImageJ, με χρήση φίλτρων. Ενεργοποιείται η επιλογή **Use Filtering**. Επιλέγεται το φίλτρο "**ramp**". Η αναπαραγωγή γίνεται με την επιλογή Reconstruct. Το αποτέλεσμα της αναπαραγωγής της τομής φαίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 5.32.

#### (δ) Σενάριο 3

Χρήση sinogram από ραδιογραφίες, άγνωστης τομής, λογισμικό ImageJ, χωρίς χρήση φίλτρων. Απενεργοποιείται η επιλογή *Use Filtering*. Χρησιμοποιείται η επιλογή **Zoom: 0.5**. Εφόσον το sinogram δεν κατασκευάστηκε από το ImageJ απαιτείται η εισαγωγή του sinogram στο Radon Transform Plugin με την επιλογή Import Data. Προσοχή χρειάζεται να επιλεγθεί η ορθή απάντηση στην αναδυόμενη ερώτηση "Import Options Data bins in cols or rows?" Η αναπαραγωγή γίνεται με την επιλογή Reconstruct. Το αποτέλεσμα της αναπαραγωγής της τομής φαίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 5.33.

#### (ε) Σενάριο 4

Χρήση sinogram από ραδιογραφίες, άγνωστης τομής, λογισμικό ImageJ, με χρήση φίλτρων. Ενεργοποιείται η επιλογή *Use Filtering*. Επιλέγεται το φίλτρο "*ramp*" και χρησιμοποιείται η επιλογή **Zoom: 0.5**. Εφόσον το sinogram δεν κατασκευάστηκε από το ImageJ απαιτείται η εισαγωγή του sinogram στο Radon Transform Plugin με την επιλογή Import Data. Προσοχή χρειάζεται να επιλεγθεί η ορθή απάντηση στην αναδυόμενη ερώτηση "Import Options Data bins in cols or rows?" Η αναπαραγωγή γίνεται με την επιλογή Reconstruct. Το αποτέλεσμα της αναπαραγωγής της τομής φαίνεται στην εικόνα του Διαγράμματος 5.34.

### **5.8 Παρατηρήσεις – Αυτοματοποιημένη 2Δ Τομογραφία**

Μετά από την μελέτη των σχετικών αποτελεσμάτων στις αντίστοιχες εικόνες των Διαγραμμάτων μπορούν να συγκεντρωθούν οι ακόλουθες κύριες παρατηρήσεις:

- (1) Η μέθοδος back projection και η μέθοδος αυτοματοποιημένης 2Δ τομογραφίας για την ίδια άγνωστη τομή, δίνουν πολύ κοντινά αποτελέσματα, αν δεν χρησιμοποιούνται φίλτρα ή ενίσχυση της αντίθεσης (σύγκρινε τις εικόνες των Διαγραμμάτων 5.24 και 5.33).
- (2) Η χρήση φίλτρων για την αυτοματοποιημένη τομογραφία δίνει πολύ ποιοτική αναπαράσταση μιας τομής (σύγκρινε π.χ. τις εικόνες των Διαγραμμάτων 5.27 και 5.32)
- (3) Η καλή ποιότητα της αναπαραγωγής μιας τομής εξαρτάται πολύ από την ποιότητα του sinogram: σύγκρινε και την αναπαραγωγή της εικόνας του Διαγράμματος 5.32 με εκείνη της εικόνας του Διαγράμματος 5.34. Τα αντίστοιχα διαγράμματα sinogram είναι



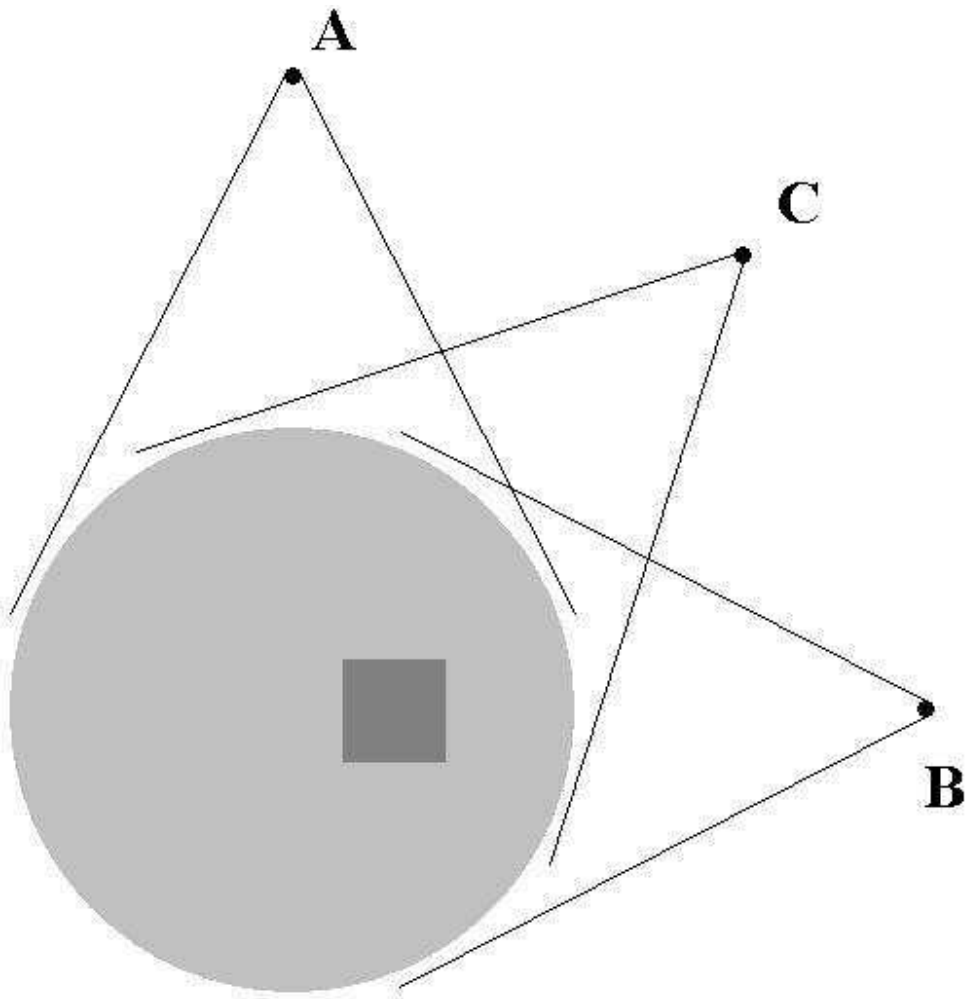
τα 5.29 και 5.30. Είναι φανερό ότι η κακή ποιότητα της αναπαραγωγής στο Διάγραμμα 5.34 οφείλεται κατ' αρχήν στην κακή ποιότητα του αντίστοιχου sinogram. Η κακή ποιότητα του υπόψιν sinogram δεν μπορεί να αποδοθεί μόνο στον κώδικα XRSIM αλλά και στην πραγματική φύση των αντίστοιχων ραδιογραφιών, όπως αυτές προσομοιώνονται με επιτυχία από τον XRSIM. Για να γίνει κατανοητό το σχόλιο παρατίθεται μεγέθυνση του υπόψιν sinogram στην εικόνα του Διαγράμματος 5.35, όπου διακρίνονται ασυνέχειες "σκαλοπάτια" μεταξύ διαδοχικών ραδιογραφιών. Στις ασυνέχειες αυτές οφείλονται οι δακτύλιοι που παρατηρούνται στην αναπαραγωγή της τομής στο Διάγραμμα 5.34. Οι διάφορες ευθείες γραμμές που επίσης παρατηρούνται στο Διάγραμμα 5.34, αντίθετα αποδίδονται στις άλλες ορατές ατέλειες του sinogram, οι οποίες οφείλονται στον κώδικα XRSIM (βλ. και την εικόνα του Διαγράμματος 5.30). Κατά δεύτερο λόγο η κακή ποιότητα της αναπαραγωγής στο Διάγραμμα 5.34 οφείλεται επίσης στο ότι η δέσμη των φωτονίων της ραδιογραφίας, όπως αυτή προσομοιώνεται από τον κώδικα XRSIM είναι κωνική, ενώ το λογισμικό ImageJ, όπως έχει σημειωθεί, χρησιμοποιεί αλγορίθμους για παράλληλη δέσμη. Η επίδραση αυτής της διαφοράς οπωσδήποτε υπάρχει, παρόλαυτά πρέπει να θεωρηθεί μικρή διότι η ραδιογραφούμενη τομή είναι μικρής διαμέτρου (5 cm), ενώ το εστιακό σημείο απέχει πολύ από το φιλμ (100 cm).

## **5.9 Συμπεράσματα**

Χρησιμοποιήθηκαν απλές γεωμετρικές τομών που γενικά θεωρήθηκαν άγνωστες και επιχειρήθηκε η αναπαραγωγή τους με 2Δ τομογραφικές μεθόδους. Οι αναγκαίες για τις τομογραφικές μεθόδους ραδιογραφίες λήφθηκαν με προσομοίωση μέσω του κώδικα XRSIM. Η επεξεργασία των ραδιογραφιών αυτών έγινε τόσο με την απλή μέθοδο back projection όσο και με τη χρήση λογισμικού που χρησιμοποιεί τον μετασχηματισμό Fourier με διάφορα φίλτρα εικόνας ή χωρίς. Γενικά, όπως αναμενόταν, οι τομές αναπαράχθηκαν με επιτυχία κυρίως ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους. Περιορισμένη ήταν η επιτυχία της μεθόδου back projection σε ότι αφορά την αναπαραγωγή της αντίθεσης της τομής. Αντίθετα πολύ επιτυχής ήταν και σε αυτό η μέθοδος της 2Δ αυτοματοποιημένης τομογραφίας με χρήση λογισμικού (δηλ. χρήση του μετασχηματισμού Fourier και φίλτρων εικόνας). Παρόλαυτά σε αυτήν την τελευταία μέθοδο, σημαντικό ρόλο για την καλή αναπαράσταση της αντίθεσης τομής παίζει, όπως

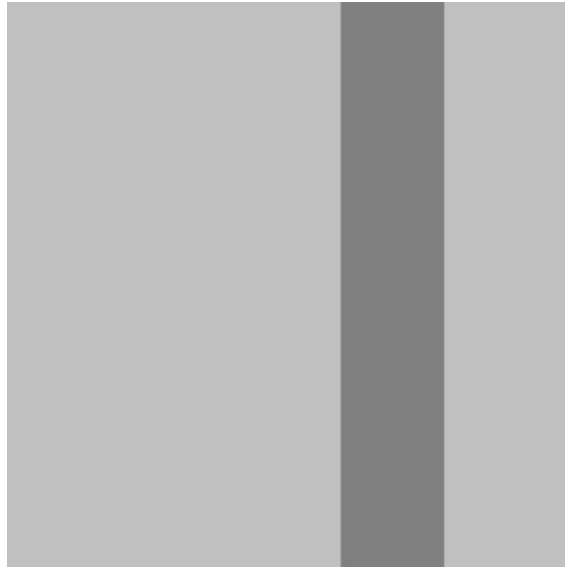
αποδείχθηκε, η ποιότητα του λεγόμενου διαγράμματος sinogram. Ο ρόλος του κώδικα XRSIM στη διερεύνηση των τομογραφικών μεθόδων αποδείχθηκε αποφασιστικός, διότι παρείχε άμεσα μεγάλους αριθμούς από προσομοιωμένες ραδιογραφικές εικόνες κατά παραγγελία, οι οποίες διαφορετικά θα έπρεπε να παραχθούν σε φιλμ, να εμφανισθούν και να ψηφιοποιηθούν προτού εισαχθούν ως δεδομένα στις μεθόδους αυτές. Με τη βοήθεια επομένως και του XRSIM, επαληθεύθηκαν οι βασικότερες μέθοδοι τομογραφίας και έγινε μία πρώτη γνωριμία με τα αναμφισβήτητα πλεονεκτήματά της αλλά και με κάποια από τα μειονεκτήματά της. Πρέπει να τονισθεί ιδιαίτερα ότι πολύ χρήσιμο λογισμικό επεξεργασίας εικόνων σε όλη αυτή την διαδικασία αποδείχθηκε το ImageMagick.

**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 5<sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ**



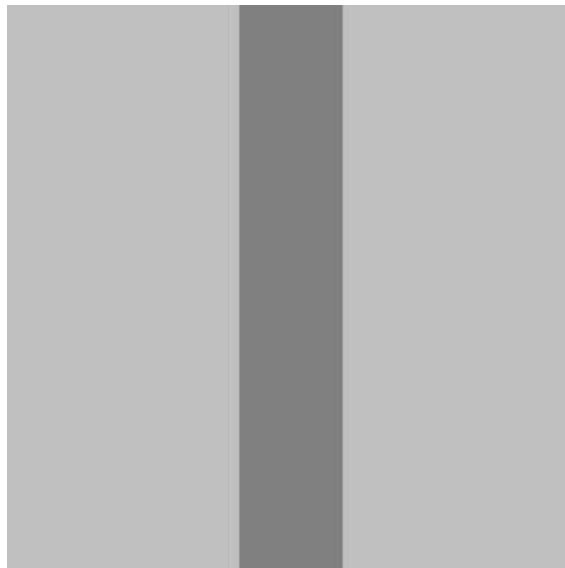
**Διάγραμμα 5.1**

**Τομή δοκμίου - κυλίνδρου απείρου μήκους με ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο ελάττωμα τετραγωνικής διατομής πλευράς  $d$ .**



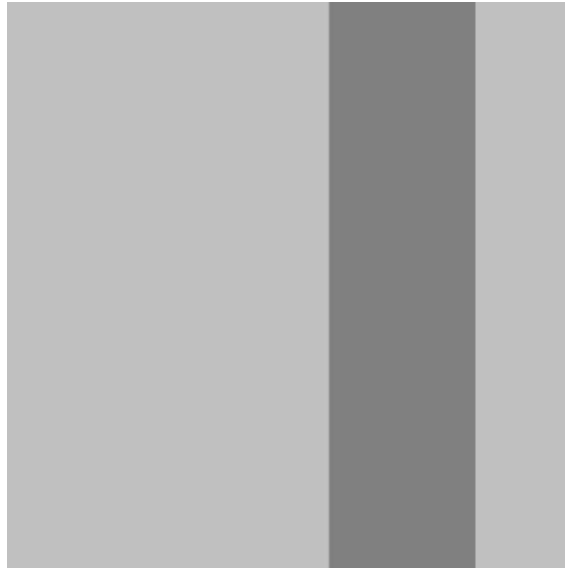
**Διάγραμμα 5.2**

**Αποτέλεσμα ραδιογράφησης δοκιμίου Διαγράμματος 5.1 από "πάνω" (γωνία  $0^{\circ}$  – θέση πηγής "Α"). Το "ελάττωμα" παρουσιάζει εύρος  $d$ .**



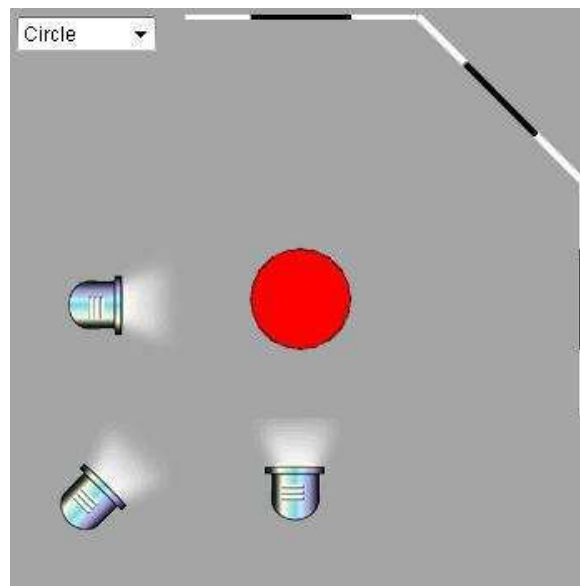
**Διάγραμμα 5.3**

**Αποτέλεσμα ραδιογράφησης δοκιμίου Διαγράμματος 5.1 από "πλάγια" (γωνία  $90^{\circ}$  – θέση πηγής "Β"). Το "ελάττωμα" παρουσιάζει εύρος  $d$ .**



**Διάγραμμα 5.4**

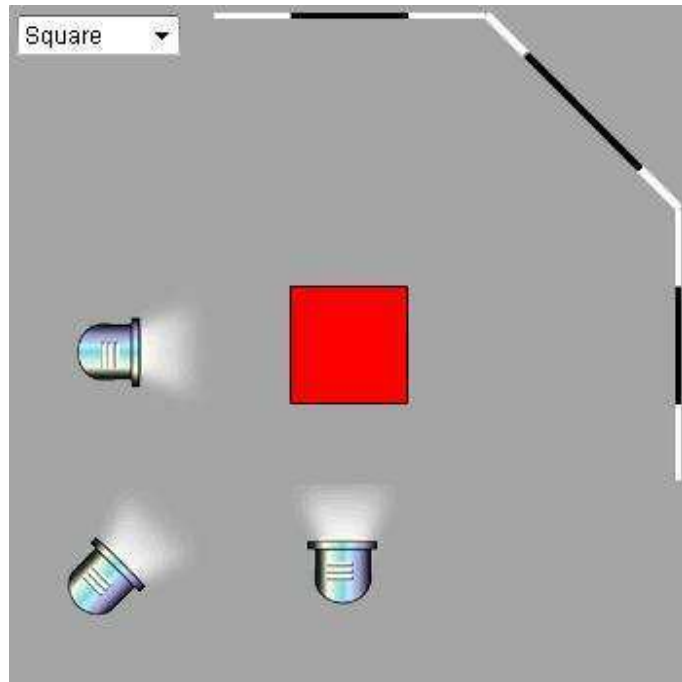
**Αποτέλεσμα ραδιογράφησης δοκιμίου Διαγράμματος 5.1 "υπό γωνία"  
(γωνία  $45^\circ$  – θέση πηγής "C"). Το "ελάττωμα" παρουσιάζει εύρος  $\sqrt{2} d$ .**



**Διάγραμμα 5.5**

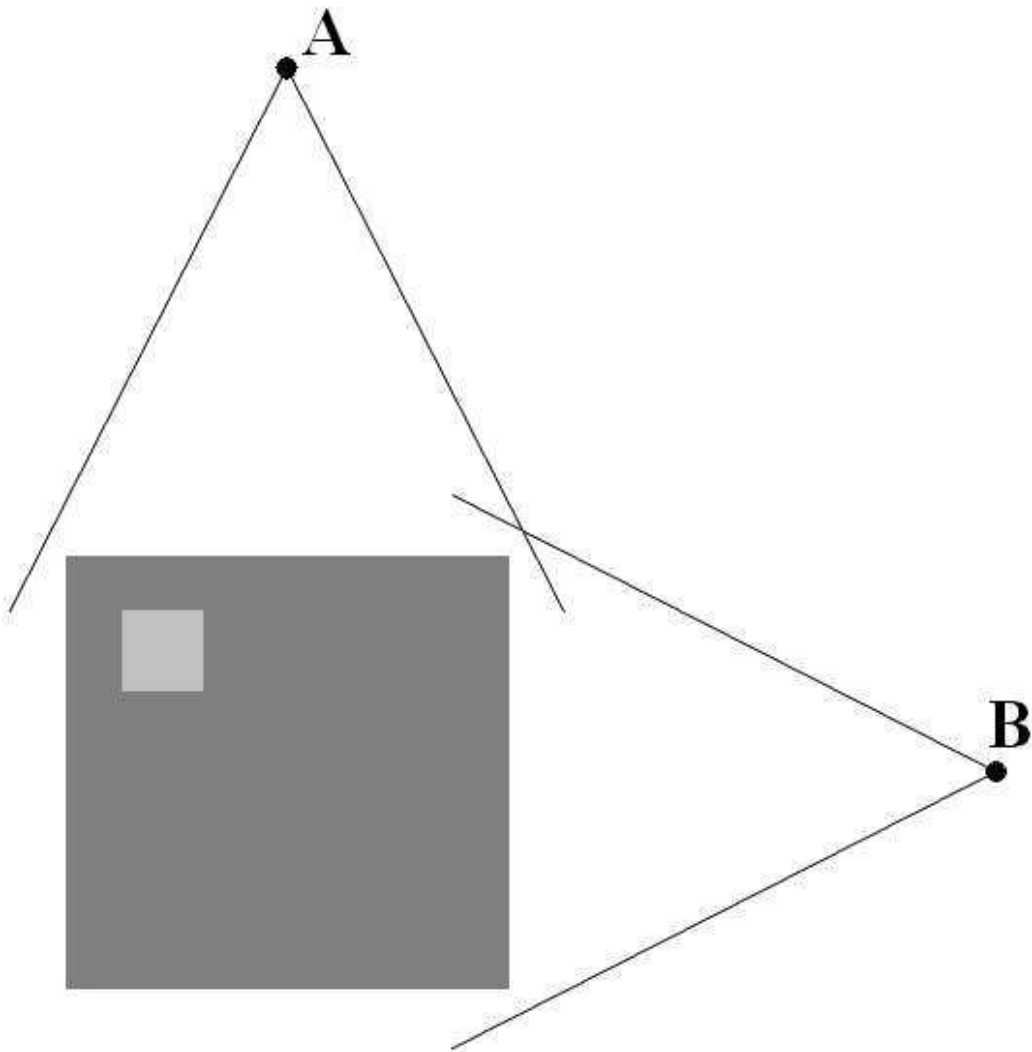
**Σκιές από τομή κυλινδρικού δοκιμίου, ως αποτέλεσμα φωτισμού από διάφορες γωνίες (βλ. και το δικτυακό τόπο του πανεπιστημίου του Colorado, Η.Π.Α.)<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup> <http://www.colorado.edu/physics/2000/tomography/>



**Διάγραμμα 5.6**

**Σκιές από τομή δοκιμίου τετραγωνικής διατομής, ως αποτέλεσμα φωτισμού από διάφορες γωνίες<sup>1</sup>.**



**Διάγραμμα 5.7**

**Τομή δοκιμίου τετραγωνικής διατομής με ελάττωμα επίσης τετραγωνικής διατομής πλευράς d.**



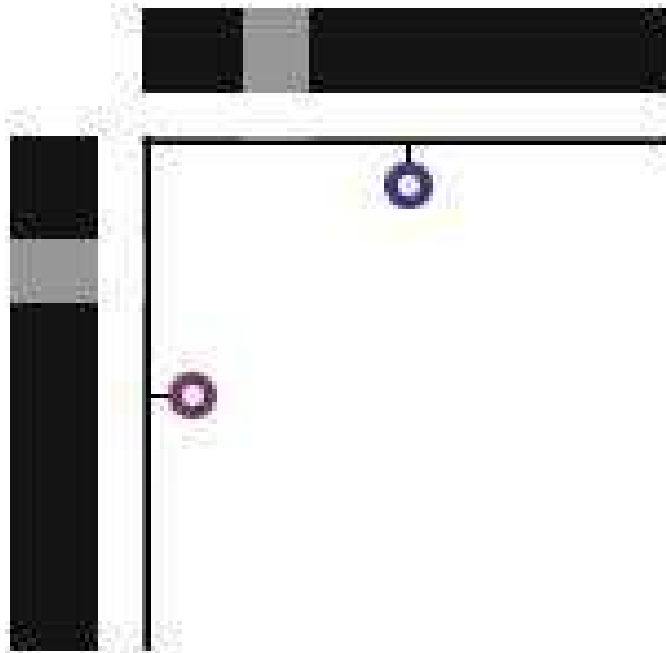
**Διάγραμμα 5.8**

**Αποτέλεσμα ραδιογράφησης δοκιμίου Διαγράμματος 5.7 από "πάνω" (γωνία  $0^\circ$  – θέση πηγής "A"). Το "ελάττωμα " παρουσιάζει εύρος d.**



**Διάγραμμα 5.9**

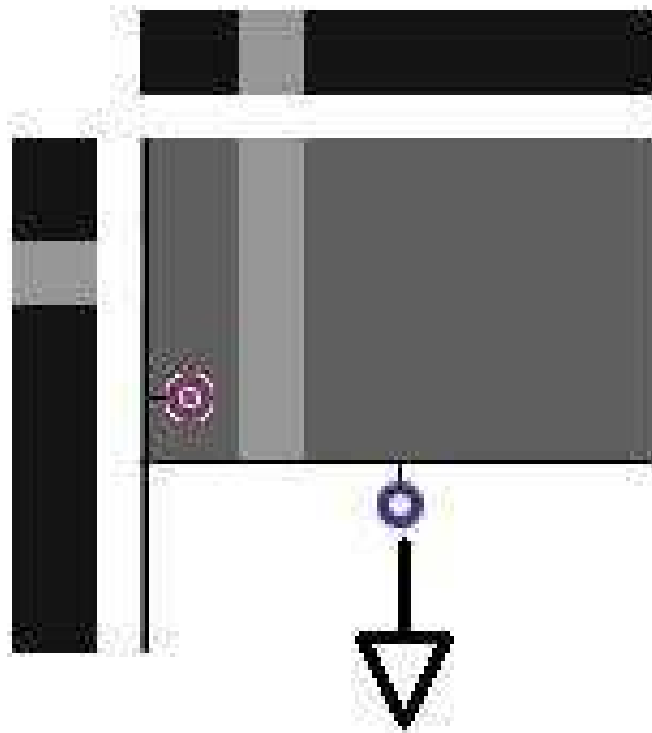
**Αποτέλεσμα ραδιογράφησης δοκιμίου Διαγράμματος 5.7 από "πλάγια" (γωνία  $90^\circ$  – θέση πηγής "B"). Το "ελάττωμα" παρουσιάζει εύρος d.**



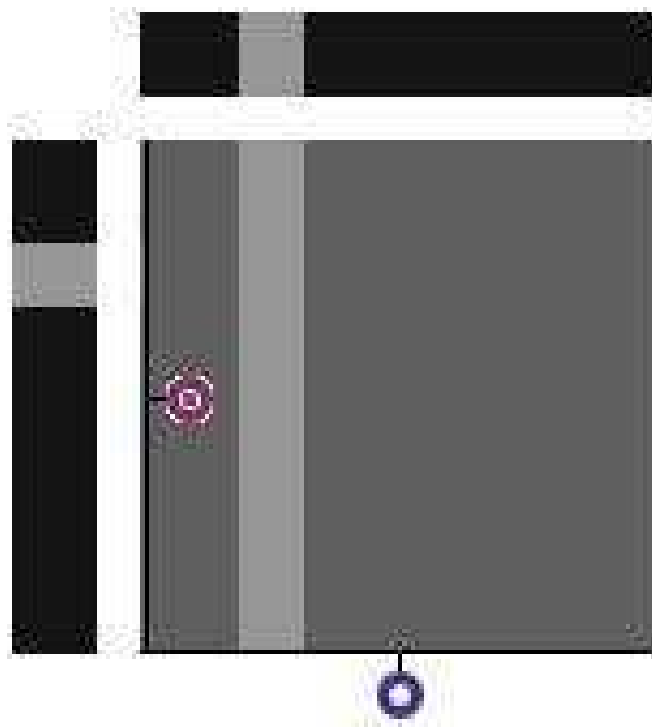
**Διάγραμμα 5.10**

**Ραδιογραφικές εικόνες από τα Διαγράμματα 5.8 και 5.9 τοποθετημένες σε γωνία  $90^\circ$  μεταξύ τους<sup>1</sup>.**

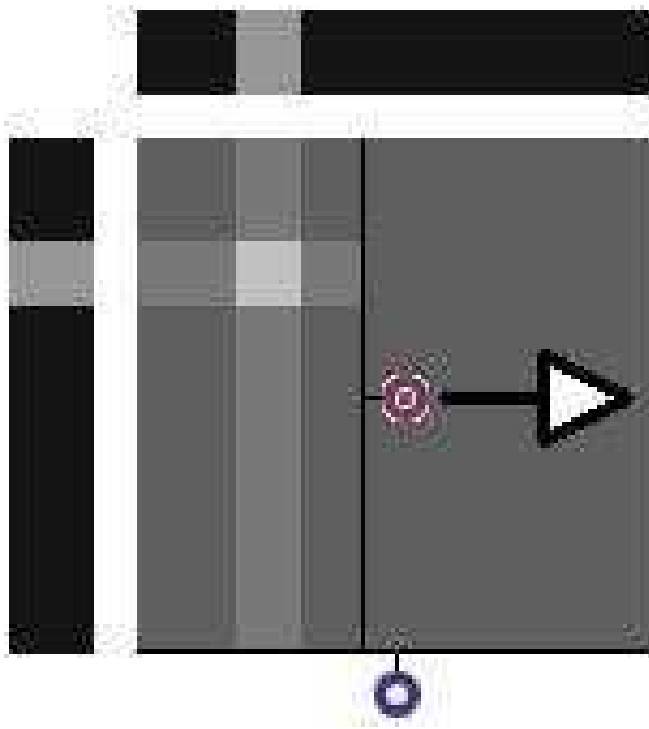




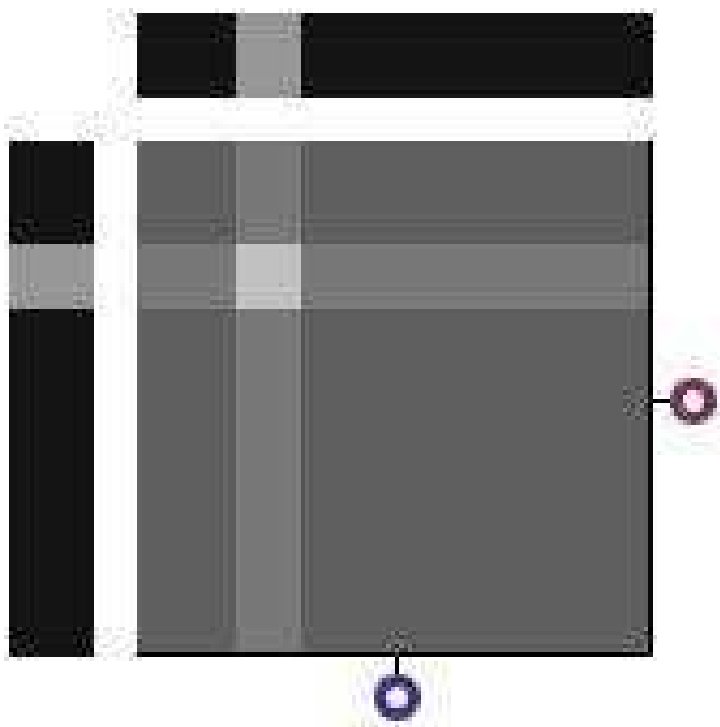
Διάγραμμα 5.11α<sup>1</sup>



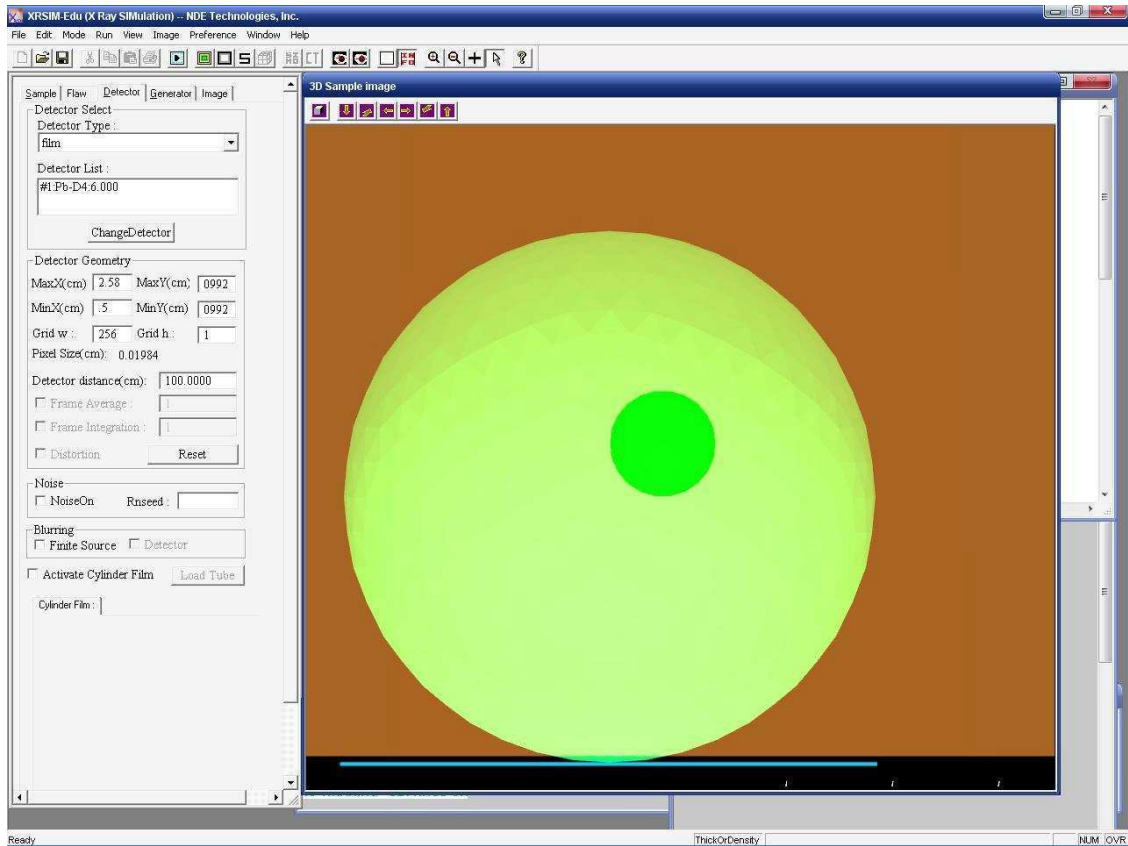
Διάγραμμα 5.11β<sup>1</sup>



Διάγραμμα 5.11γ<sup>1</sup>

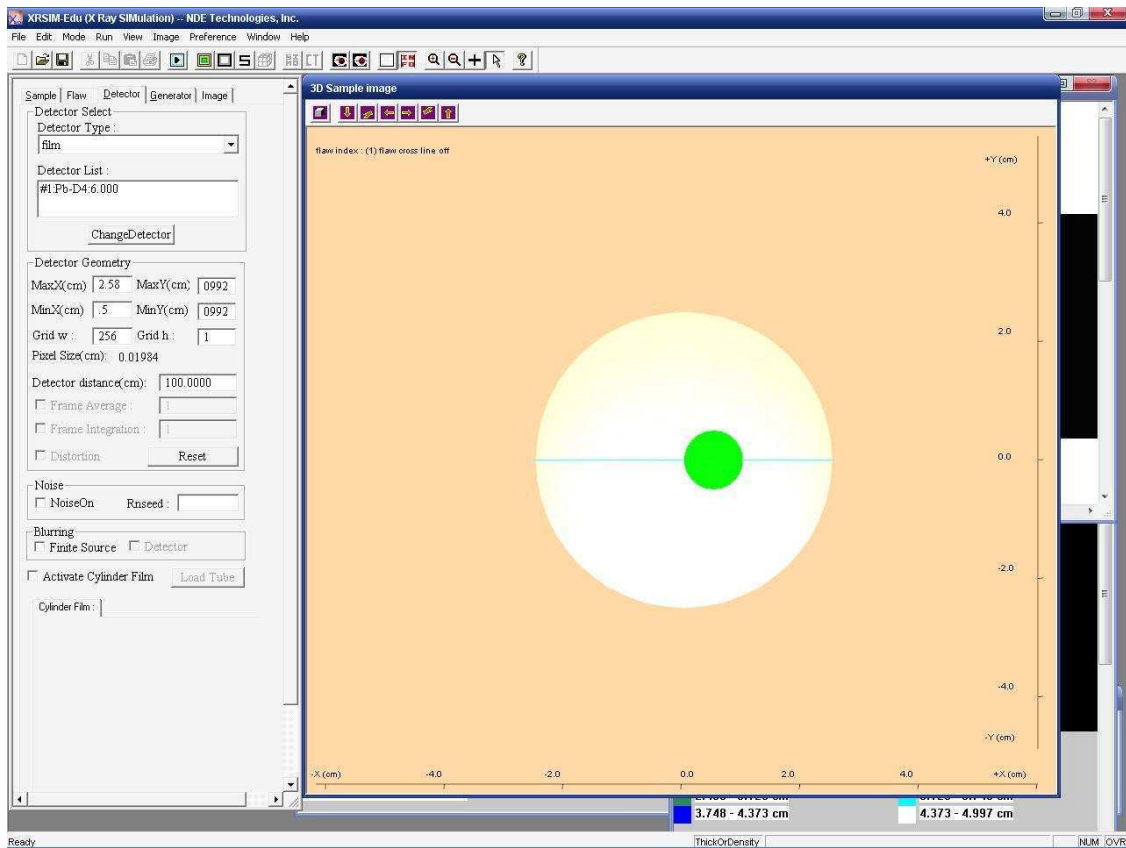


Διάγραμμα 5.11δ<sup>1</sup>



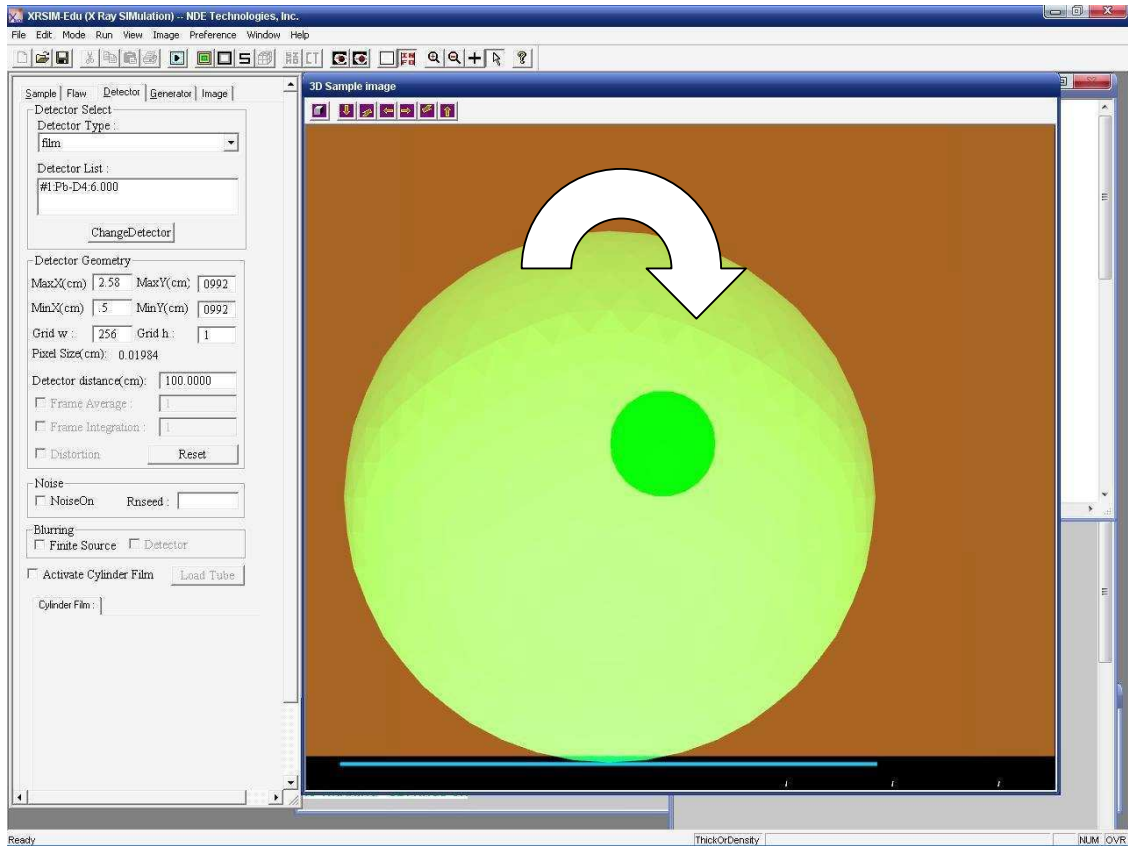
**Διάγραμμα 5.12**

**Σχετική θέση σφαιρικού δοκιμίου διαμέτρου 5 cm και σφαιρικού ελαττώματος διαμέτρου 1 cm, στον κώδικα XRSIM. Έχει ενεργοποιηθεί η διαφώτιστη απεικόνιση δοκιμίου για να είναι ορατό το ελάττωμα.**



**Διάγραμμα 5.13**

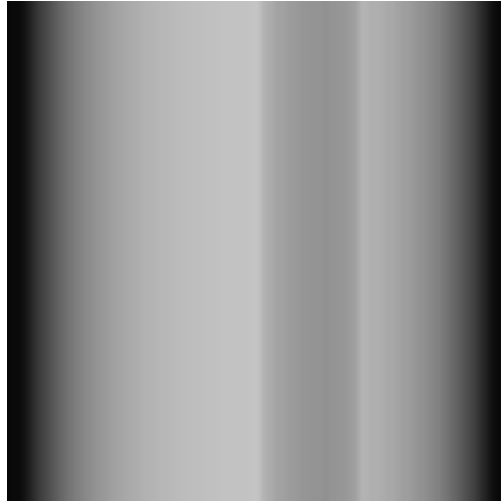
**Κάτοψη του επιπέδου xψ που αποδίδει την σχετική θέση φιλμ (γαλάζια "γραμμή"), σφαιρικού δοκιμίου και σφαιρικού ελαττώματος στον κώδικα XRSIM. Εχει ενεργοποιηθεί η διαφώτιστη απεικόνιση δοκιμίου για να είναι ορατό το φιλμ και το ελάττωμα.**



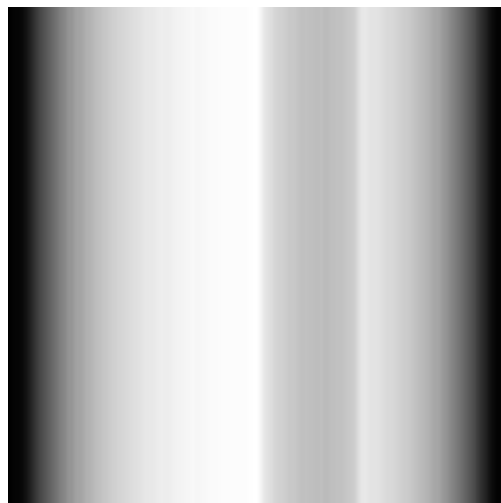
**Διάγραμμα 5.14**  
**Φορά περιστροφής δοκιμίου – ελαττώματος.**

---

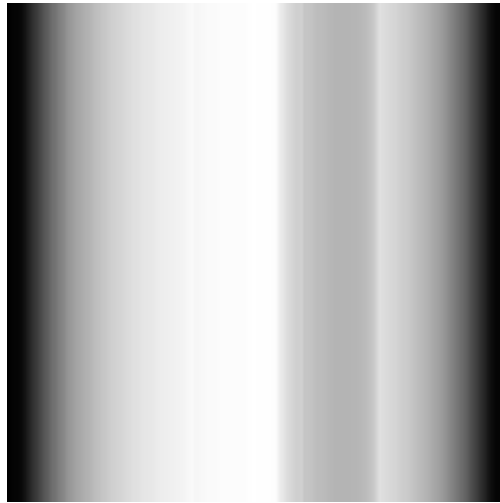
**Διάγραμμα 5.15**  
**Ραδιογραφική εικόνα gg0.jpg.**



**Διάγραμμα 5.16**  
**Ραδιογραφική εικόνα hh0.jpg, μετά την επεξεργασία της gg0.jpg.**

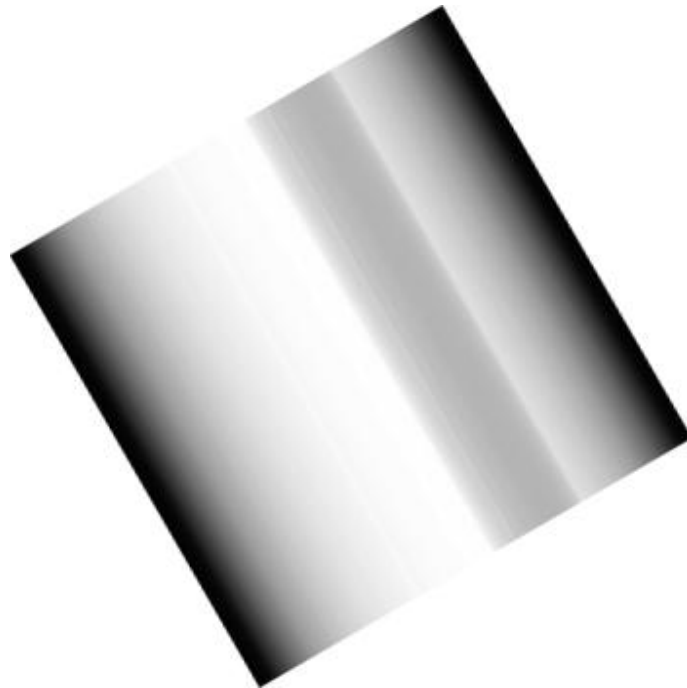


**Διάγραμμα 5.17**  
**Ραδιογραφική εικόνα ehh0.jpg, μετά τη βελτίωση της αντίθεσης της hh0.jpg.**



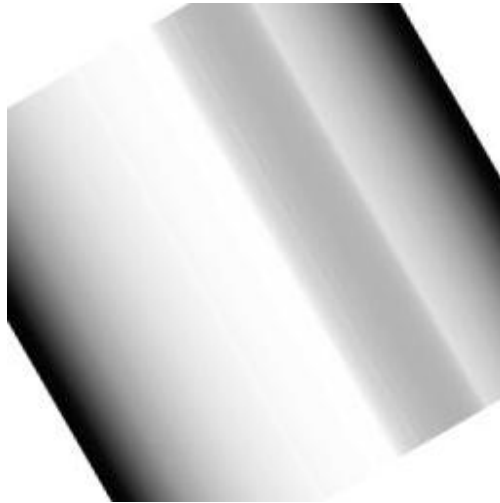
**Διάγραμμα 5.18**

**Ραδιογραφική εικόνα eh30.jpg πριν την περιστροφή κατά  $-30^\circ$ .**



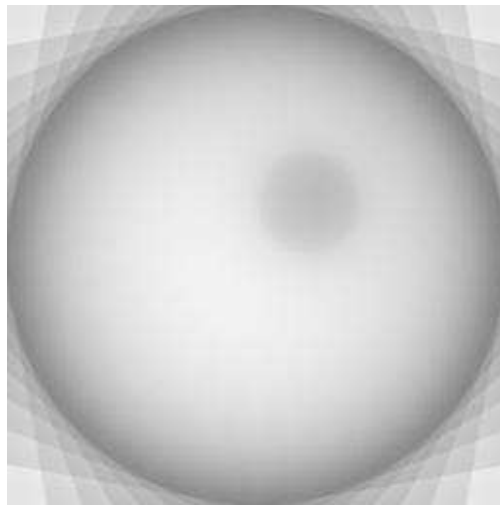
**Διάγραμμα 5.19**

**Ραδιογραφική εικόνα ii30.jpg, μετά την περιστροφή της eh30.jpg κατά  $-30^\circ$ .**



**Διάγραμμα 5.20**

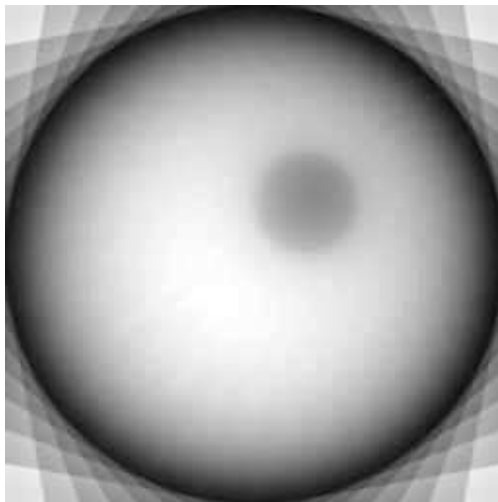
**Ραδιογραφική εικόνα jj30.jpg, μετά την προσαρμογή των διαστάσεων της ii30.jpg σε 256x256 pixel με αρχή των συντεταγμένων το κέντρο βάρους.**



**Διάγραμμα 5.21**

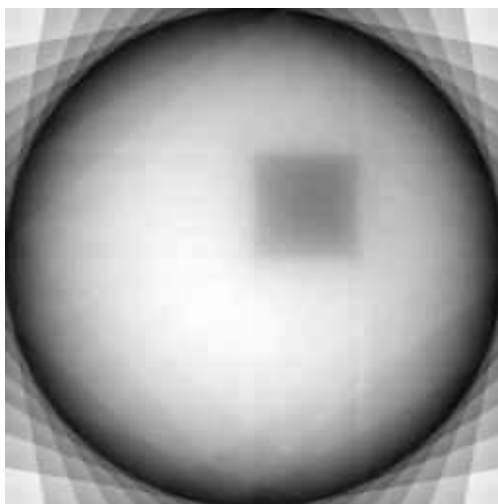
**Υπέρθωση 36 ραδιογραφικών εικόνων jj\*.jpg, με βαρύτητα κάθε μίας 3%.**





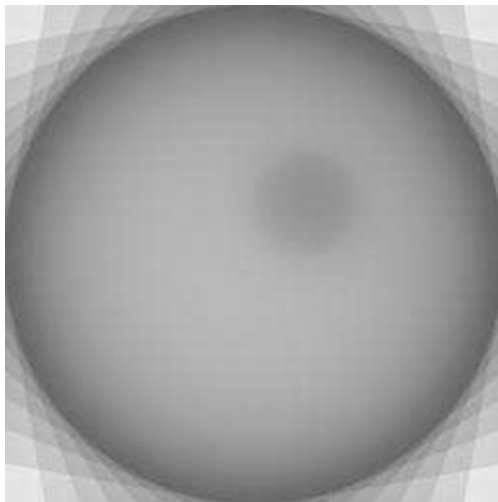
**Διάγραμμα 5.22**

**Βελτίωση της αντίθεσης τελικού αποτελέσματος της τομής που ενδιαφέρει.**



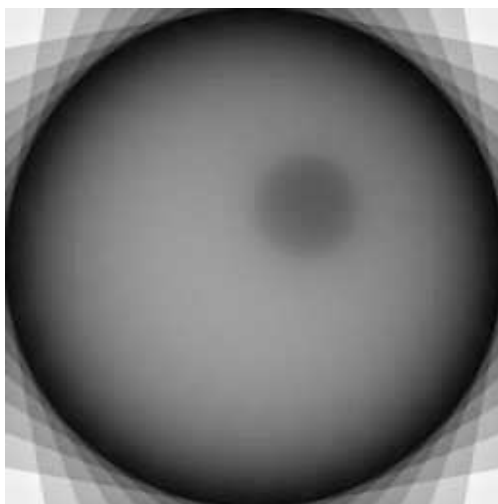
**Διάγραμμα 5.23**

**Αναπαράσταση τομής με ελάττωμα τετραγωνικής διατομής με τη μέθοδο back projection.**



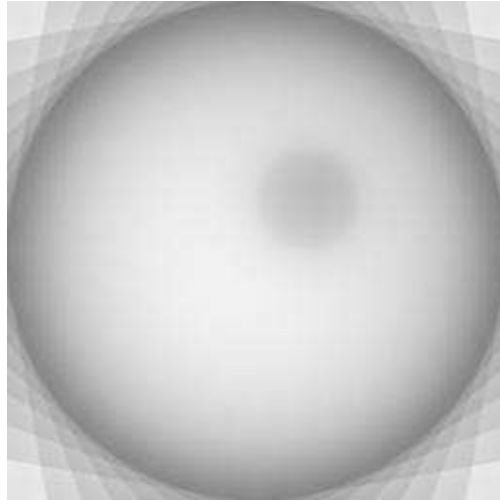
**Διάγραμμα 5.24**

**Τομογραφία με την μέθοδο back projection χωρίς ενίσχυση της αντίθεσης.**



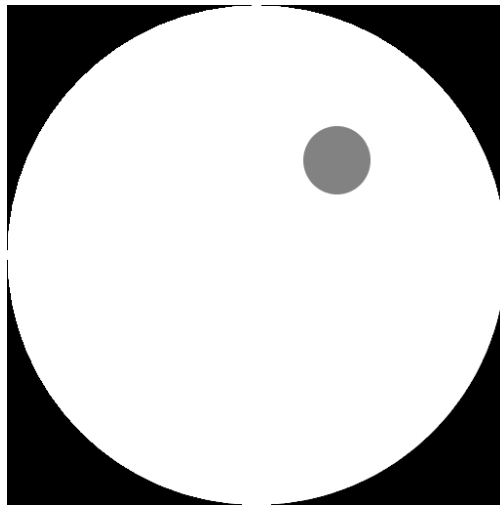
**Διάγραμμα 5.25**

**Τομογραφία με την μέθοδο back projection με ενίσχυση της αντίθεσης μόνο στο τελικό αποτέλεσμα.**



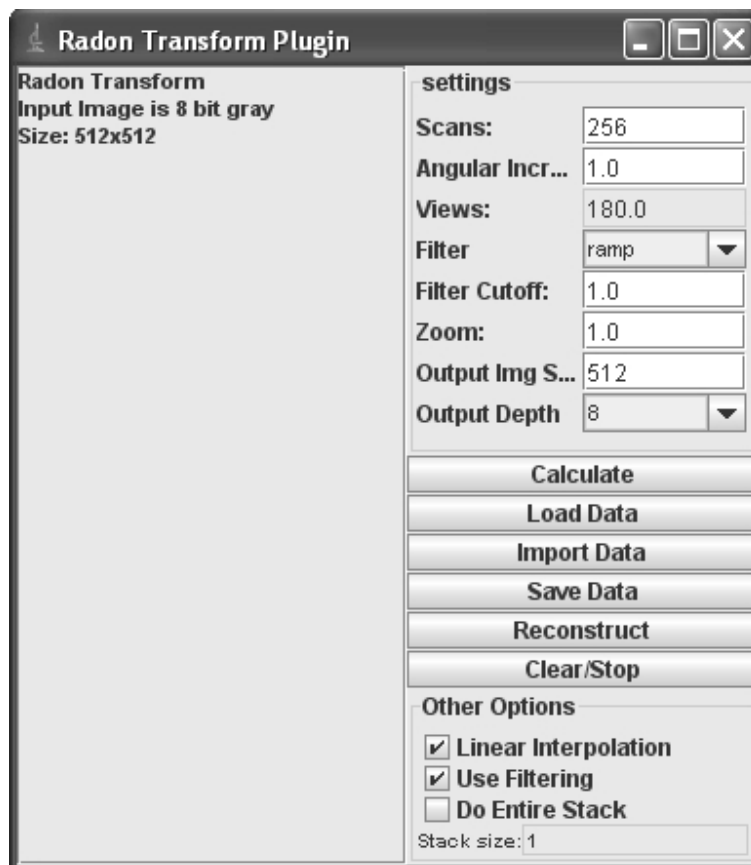
**Διάγραμμα 5.26**

**Τομογραφία με την μέθοδο back projection με ενίσχυση της αντίθεσης μόνο στις αρχικές ραδιογραφικές εικόνες.**



**Διάγραμμα 5.27**

**Δεδομένη τομή για παραγωγή sinogram (μέσω μετασχηματισμού Radon).**



**Διάγραμμα 5.28**

**Ρυθμίσεις λογισμικού ImageJ, menu "Radon Transform Plugin" για την παραγωγή του sinogram από την τομή του Διαγράμματος 5.27.**



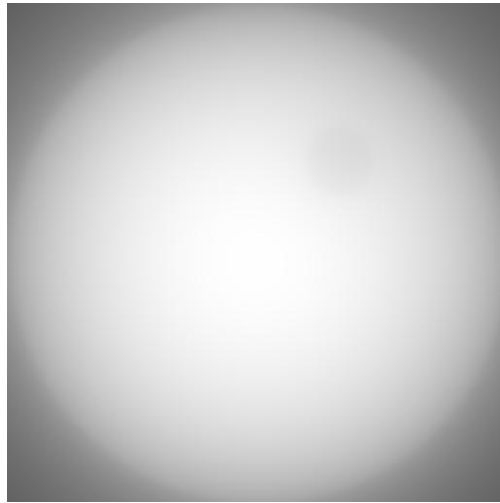
**Διάγραμμα 5.29**

**Παραγωγή του sinogram από την τομή του Διαγράμματος 5.27.**



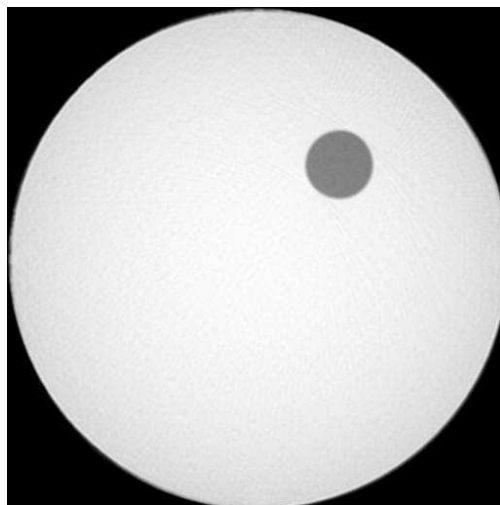
**Διάγραμμα 5.30**

**Παραγωγή του sinogram από την τομή του Διαγράμματος 5.12 με τη μέθοδο της ραδιογραφίας.**



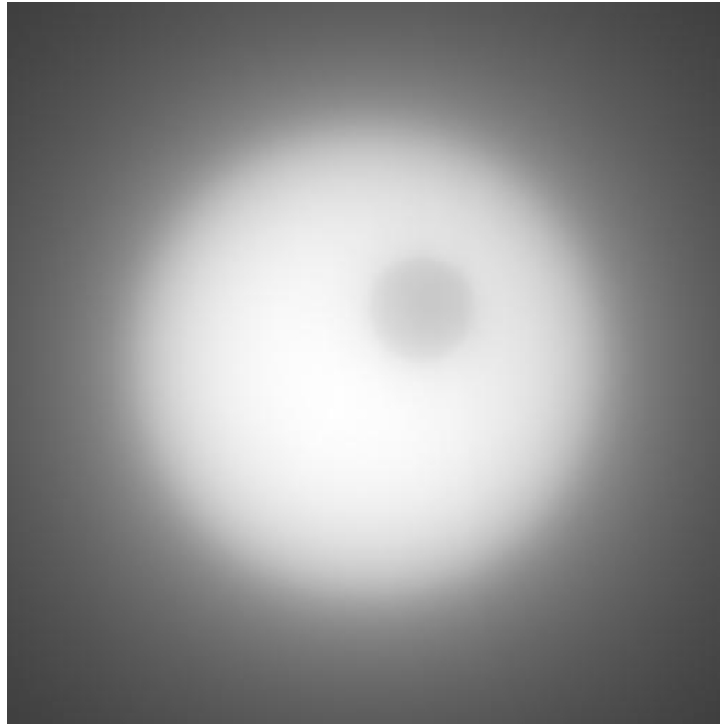
**Διάγραμμα 5.31**

**Αναπαραγωγή γνωστής τομής από το sinogram του Διαγράμματος 5.29 με τη χρήση του λογισμικού ImageJ, χωρίς φίλτρα.**



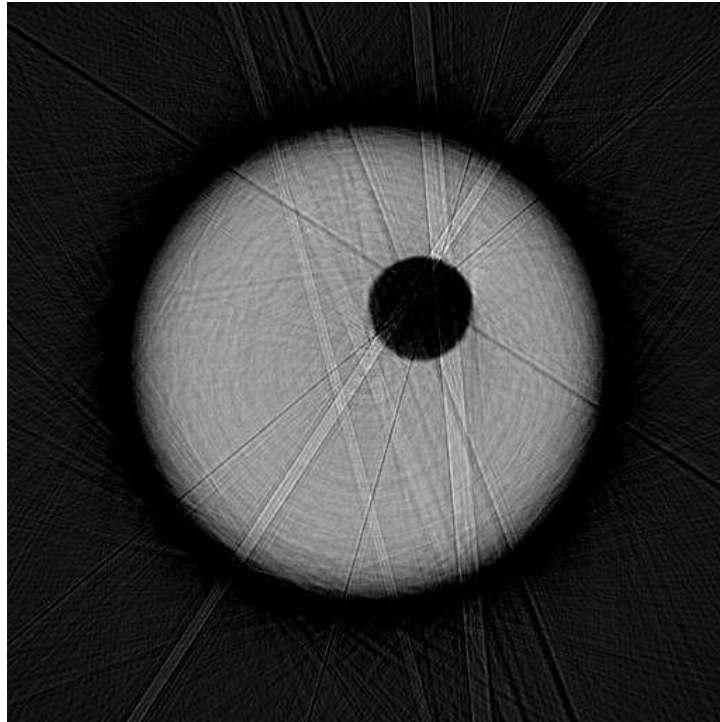
**Διάγραμμα 5.32**

**Αναπαραγωγή γνωστής τομής από το sinogram του Διαγράμματος 5.29 με τη χρήση του λογισμικού ImageJ, με φίλτρο ramp.**



**Διάγραμμα 5.33**

**Αναπαραγωγή άγνωστης τομής από το sinogram του Διαγράμματος 5.30 με τη χρήση του λογισμικού ImageJ, χωρίς φίλτρα.**



**Διάγραμμα 5.34**

**Αναπαραγωγή άγνωστης τομής από το sinogram του Διαγράμματος 5.30 με τη χρήση του λογισμικού ImageJ, με φίλτρο ramp.**



**Διάγραμμα 5.35**

**Μεγέθυνση sinogram άγνωστης τομής που έχει παραχθεί με προσομοίωση ραδιογραφίας με τον κώδικα XRSIM.**



## ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Σύμφωνα με τα όσα παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ προέκυψαν συμπεράσματα, τα κυριότερα σημεία των οποίων μπορούν να συνοψισθούν ως εξής:

(α) Σχετικά με τον κώδικα XRSIM, γενικά:

Ο κώδικας XRSIM προσομοιώνει με επιτυχία σε γραφικό περιβάλλον βιομηχανικούς ραδιογραφικούς ελέγχους χρησιμοποιώντας μοντέλα δοκιμίων σχεδιασμένα από κώδικες CAD (Computer Aided Design) για να παράγει ραδιογραφίες με ακτίνες -x, για εκπαιδευτικούς σκοπούς. Ο κώδικας επιτρέπει στο χειριστή/εκπαιδευόμενο την εύκολη εισαγωγή και τον έλεγχο διαφορετικών δοκιμίων από διαφορετικά υλικά, την εύκολη ρύθμιση της θέσης και του προσανατολισμού του δοκιμίου και την εύκολη ρύθμιση των βασικότερων παραμέτρων λειτουργίας μιας μηχανής ακτίνων -x έτσι ώστε να επιτευχθεί απεικόνιση με καλά ποιοτικά χαρακτηριστικά σε ένα εικονικό φιλμ. Ο χρήστης του XRSIM, έχει στη διάθεσή του τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί στις προσομοιώσεις του μια σειρά διαφορετικούς τύπους μηχανών παραγωγής ακτίνων -x διαφόρων κατασκευαστών και μία σειρά από διαφορετικούς εικονικούς τύπους φιλμ, επίσης διαφόρων κατασκευαστών. Το πλεονέκτημα της χρήσης του κώδικα XRSIM είναι ότι χωρίς πείραμα, μπορούν να ελεγχθούν πολλά σενάρια έκθεσης σε μικρό χρόνο, δεδομένου ότι η ρύθμιση της έκθεσης και των υπόλοιπων γεωμετρικών στοιχείων της ραδιογραφικής διαδικασίας μπορούν να ολοκληρωθούν γρήγορα και επιπλέον το βήμα της εμφάνισης του φιλμ δεν είναι απαραίτητο, διότι το φιλμ στην εφαρμογή αυτή είναι εικονικό. Τα ταχέα αποτελέσματα γίνονται έτσι πολύτιμα για εκπαίδευση και για εξάσκηση. Ο κώδικας XRSIM δεν απαιτεί πραγματικό δοκίμιο για έλεγχο. Έτσι, μπορούν να προσομοιωθούν ραδιογραφίες που θα ήταν αδύνατο ή πολύ ακριβό να πραγματοποιηθούν εκτός υπολογιστικού περιβάλλοντος. Ελαττώματα σε διάφορα σχήματα και μεγέθη μπορούν εύκολα να εισαχθούν στο δοκίμιο με εικονικό τρόπο, έτσι ώστε να παραχθεί μια σειρά σεναρίων για τον εντοπισμό τους. Τέλος, με τη χρήση του κώδικα XRSIM είναι δυνατόν οι εκπαιδευόμενοι να αναπτύξουν

μια αποτελεσματική κατανόηση των επιστημονικών εννοιών που συνδέονται με τη ραδιογραφία.

Τα αποτελέσματα του κώδικα XRSIM πρέπει να εφαρμόζονται με προσοχή στην πράξη και οπωσδήποτε δεν συνιστάται η χρήση του για αυστηρά επαγγελματικούς σκοπούς, παρά μόνο αν ζητείται μία πρώτη εκτίμηση ποιότητας ραδιογραφικού αποτελέσματος με βάση κάποιες ρυθμίσεις. Ο κυριότερος λόγος για τον οποίο πρέπει να αποφεύγεται η επαγγελματική χρήση του XRSIM είναι ότι η οπτική πυκνότητα (density) που παράγεται με την προσομοίωση στο εικονικό φιλμ μπορεί να μην είναι ακριβώς ίδια με την οπτική πυκνότητα που παράγεται στο Εργαστήριο με παρόμοιες ρυθμίσεις. Τυχόν διαφορές μπορεί να οφείλονται στις παραδοχές που έγιναν στον κώδικα για την μοντελοποίηση της εξασθένησης και γενικά της αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη. Η μοντελοποίηση αυτή είναι σχετικά απλή ώστε οι χρόνοι παραγωγής της προσομοίωσης να είναι σχετικά σύντομοι. Έτσι, το βασικότερο πρόβλημα στις προσομοιώσεις με τον XRSIM είναι η αδυναμία εκτίμησης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας που φθάνει στο εικονικό φιλμ, ιδίως όταν τα δοκίμια είναι μεγάλου πάχους και περίπλοκης γεωμετρίας. Στις περιπτώσεις που η σκέδαση της ακτινοβολίας γίνεται κυρίαρχο φαινόμενο, ένα μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας που θα φτάνει στο φιλμ θα είναι δευτερεύουσα ακτινοβολία και η οπτική πυκνότητα της προσομοίωσης στο εικονικό φιλμ του XRSIM δεν θα συμφωνεί γενικά με την πραγματική οπτική πυκνότητα που παράγεται στο Εργαστήριο.

(β) Για την εξάσκηση με τον κώδικα XRSIM:

Οι εφαρμογές του κώδικα XRSIM υπό τύπον διακριτών "μαθημάτων", μπορεί να γίνονται με τρόπο ώστε ο χρήστης/εκπαιδευόμενος να εξοικειωθεί τόσο με τον ίδιο τον κώδικα, όσο και με την πραγματική ραδιογραφική διαδικασία που προσομοιώνεται. Τα σχετικά μαθήματα, όπως παρουσιάστηκαν στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, εκτός από προσομοίωση με τον κώδικα πρέπει να συμπληρώνονται και από πραγματική εργαστηριακή εξάσκηση, έτσι ώστε να διαπιστώνονται τόσο τα πλεονεκτήματα, όσο και οι τυχόν αδυναμίες της προσομοίωσης. Οι εικονικές ραδιογραφίες στον κώδικα προσομοίωσης παράγονται μέσα σε λίγα

δευτερόλεπτα, παρέχοντας άμεση εποπτεία του αποτελέσματος που έχουν οι προσομοιούμενες παράμετροι στην ποιότητα της εικόνας. Φυσικά, όποια και όσα μαθήματα μπορούν να προσομοιωθούν από τον κώδικα XRSIM, από μόνα τους δεν μπορούν να συμβάλλουν παραγωγικά στην εκπαιδευτική διαδικασία αν δεν προηγηθεί ή δεν γίνεται παράλληλα τουλάχιστον συνοπτική αναφορά στην απλή θεωρία του ραδιογραφικού ελέγχου.

(γ) Για την κατασκευή δοκιμίων/ελαττωμάτων προς εισαγωγή στον κώδικα XRSIM:

Διαπιστώθηκε ότι, είναι δυνατόν με απλά και γενικά ελεύθερα διαθέσιμα εργαλεία λογισμικού να κατασκευάζονται ηλεκτρονικά αρχεία CAD τύπου "ASCII stl" για χρήση με τον κώδικα XRSIM. Για τους σκοπούς της παρούσης ΔΕ εξετάστηκε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια το ελεύθερο λογισμικό GoogleSketchUp. Τα αρχεία "ASCII stl" μπορούν να εισάγονται για την εξυπηρέτηση προσομοιώσεων στον κώδικα XRSIM, είτε ως δοκίμια, είτε ως ελαττώματα. Στα εργαλεία αυτά υπάρχει σχετικά περιορισμένος έλεγχος στο πλήθος των τριγώνων που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των επιφανειών των δοκιμίων ή των ελαττωμάτων. Αυτό είναι κάπως ενοχλητικό όταν τα δοκίμια ή τα ελαττώματα που ζητούνται να υλοποιηθούν έχουν εκτεταμένες καμπύλες επιφάνειες ή καμπύλες επιφάνειες με έντονες μεταβολές κλίσης. Κατά τη διάρκεια της υλοποίησης ενός στερεού με αυτά τα εργαλεία (και με το GoogleSketchUp), είναι επομένως πιθανό, να μην έχει επιτευχθεί να "κλείσει" πλήρως η εξωτερική του επιφάνεια. Ως αποτέλεσμα, το παραγόμενο αρχείο τύπου "ASCII stl", θα έχει όπως λέγεται "τρύπες", με συνέπεια το αντίστοιχο δοκίμιο ή ελάττωμα να μην μπορεί να εισαχθεί στον κώδικα XRSIM, όπως είναι το ζητούμενο. Οι "τρύπες" μπορούν να διορθωθούν με σχετικές επεμβάσεις που μπορούν να γίνουν τόσο στο GoogleSketchUp, όσο και στο MeshLab και στο Blender, υπό κάποιες απλές προϋποθέσεις. Σε επαγγελματικό επίπεδο παραγωγής δοκιμίων / ελαττωμάτων προτείνεται η χρήση γνωστών και διαδεδομένων εμπορικών προγραμμάτων με τα οποία μπορεί κάποιος να κατασκευάσει αρχεία CAD τύπου "ASCII stl", όπως το Autocad / Inventor για τριδιάστατο σχεδιασμό. Τα κυριότερα εμπορικά προγράμματα με τα οποία είναι δυνατόν να δημιουργηθούν αρχεία "ASCII stl" είναι: (1) το ίδιο το Autocad με το απαραίτητο

plugin, (2) το Solidworks, (3) το Rhino3D, (4) το GoogleSketchUp Pro και (5) το Solid Edge.

(δ) Για τα κυριότερα προβλήματα που παρουσιάζει ο κώδικας XRSIM:

Όπως σχεδόν κάθε λογισμικό, έτσι και ο κώδικας XRSIM, παρουσιάζει προβλήματα μικρότερης ή μεγαλύτερης βαρύτητας τα οποία εμποδίζουν την ομαλή λειτουργία του. Τα προβλήματα αυτά διαπιστώθηκαν στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ. Αναφορές σε αυτά τα προβλήματα δεν συμπεριλήφθηκαν κατά την παρουσίαση κυρίως των Κεφαλαίων 2 έως και 4, διότι θα αλλοίωναν το σκοπό για τον οποίο συντάχθηκαν τα Κεφάλαια αυτά. Σε αυτό το σημείο είναι δυνατόν να παρουσιασθούν τα κυριότερα από τα προβλήματα αυτά:

(i) δεν προσομοιώνεται από τον κώδικα η μηχανή παραγωγής ακτίνων  $-x$  που διαθέτει ο Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, δηλ. η ERESKO 42 MF3 του κατασκευαστή οίκου General Electric Inspection Technologies GmbH, Ομοσπονδιακής Γερμανίας.

(ii) ο κώδικας XRSIM δεν προσομοιώνει με επιτυχία τα φιλμ με ενισχυτικές οθόνες μολύβδου κυρίως για χαμηλές ενέργειες φωτονίων. Το πρόβλημα διαπιστώθηκε ότι παρουσιάζεται με τα φιλμ Agfa Structurix D7Pb και D4Pb. Συγκεκριμένα το φιλμ τύπου D4Pb, παρουσιάζεται πιο "γρήγορο" από το D7Pb, ενώ η πραγματική κατάσταση είναι αντίθετη (βλ. και GE, 2008). Ο λόγος για αυτή την κακή συμπεριφορά του κώδικα είναι ότι ο XRSIM, δεν προσομοιώνει σκεδάσεις φωτονίων, με αποτέλεσμα να μην προσομοιώνονται καθόλου οι σκεδάσεις των φωτονίων που γίνονται στις ενισχυτικές οθόνες μολύβδου των φιλμ αυτών.

(iii) δεν γίνεται επιτυχής ανάλυση οπτικής πυκνότητας με την επιλογή Image/Slice σε ήδη ληφθείσα εικονική ραδιογραφία, η οποία επανεισάγεται από ηλεκτρονικό αρχείο εικόνας. Συγκεκριμένα, η ανάλυση που γίνεται στην επανεισαγόμενη ραδιογραφία αποδίδει περίπου την οπτική πυκνότητα που θα είχε το αντίστοιχο αρνητικό της εικόνας αυτής.

και

(iv) υπάρχουν περιπτώσεις που ο κώδικας XRSIM "κολλάει", για λόγους που δεν μπορούν να προσδιορισθούν ακριβώς, δεδομένου μάλιστα, ότι δεν διατίθεται ο πηγαίος κώδικας του προγράμματος.

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών, ειδοποιήθηκε ήδη ο κατασκευαστής του κώδικα, ο οποίος, περί το χρόνο ολοκλήρωσης της παρούσας ΔΕ, παρείχε λύσεις κυρίως για τα (i) και (ii), οι οποίες δεν έχουν ακόμα δοκιμασθεί. Αναμένεται σύντομα, κατά τις διαβεβαιώσεις του κατασκευαστή, και η λύση στο πρόβλημα (iii).

(ε) Για την εισαγωγή στην αναπαράσταση τομών με χρήση ραδιογραφίας:

Πραγματοποιήθηκε μία προσπάθεια αξιοποίησης των γνώσεων που αποτυπώθηκαν στα προηγούμενα προς την κατεύθυνση παραγωγής απλών διδιάστατων τομογραφικών απεικονίσεων με τη βοήθεια του κώδικα XRSIM και άλλων διαθέσιμων υπολογιστικών εργαλείων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν απλές γεωμετρικές τομών που γενικά θεωρήθηκαν άγνωστες και επιχειρήθηκε η αναπαραγωγή τους με διδιάστατες τομογραφικές μεθόδους. Οι αναγκαίες για τις τομογραφικές μεθόδους ραδιογραφίες λήφθηκαν με ευκολία με προσομοίωση μέσω του κώδικα XRSIM. Η επεξεργασία των ραδιογραφιών αυτών έγινε τόσο με την απλή μέθοδο back projection όσο και με τη χρήση λογισμικού που χρησιμοποιεί τον μετασχηματισμό Fourier με διάφορα φίλτρα εικόνας ή χωρίς. Διαπιστώθηκε ότι, οι τομές αναπαράχθηκαν με επιτυχία κυρίως ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους. Περιορισμένη ήταν η επιτυχία της μεθόδου back projection σε ότι αφορά την αναπαραγωγή της αντίθεσης της τομής. Αντίθετα πολύ επιτυχής ήταν και σε αυτό η μέθοδος της αυτοματοποιημένης τομογραφίας με χρήση λογισμικού (δηλ. χρήση του μετασχηματισμού Fourier και φίλτρων εικόνας). Στη μέθοδο αυτή βέβαια, σημαντικό ρόλο για την καλή αναπαράσταση της αντίθεσης τομής παίζει, όπως αποδείχθηκε, η ποιότητα του λεγόμενου διαγράμματος sinogram. Ο ρόλος του κώδικα XRSIM στη διερεύνηση των τομογραφικών μεθόδων αποδείχθηκε αποφασιστικός, διότι παρείχε άμεσα μεγάλους αριθμούς από προσομοιωμένες ραδιογραφικές εικόνες κατά παραγγελία, οι οποίες διαφορετικά θα έπρεπε να

παραχθούν σε φιλμ, να εμφανισθούν και να ψηφιοποιηθούν προτού εισαχθούν ως δεδομένα στις μεθόδους αυτές. Με τη βοήθεια επομένως και του XRSIM, επαληθεύθηκαν οι βασικότερες μέθοδοι τομογραφίας και έγινε μία πρώτη γνωριμία με τα αναμφισβήτητα πλεονεκτήματά της αλλά και με κάποια από τα μειονεκτήματά της.

Τα συμπεράσματα που διατυπώθηκαν –και ιδιαίτερα εκείνα που αφορούν στις διδιάστατες τομογραφικές απεικονίσεις, οδηγούν σε μία σειρά από προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση και άλλων πρακτικών προβλημάτων πάνω στη βιομηχανική ραδιογραφία στα πλαίσια Διπλωματικών Εργασιών ή άλλης έρευνας. Οι προτάσεις αυτές έχουν συνοπτικά ως εξής:

(Α) να δοκιμασθούν και άλλα λογισμικά τομογραφικών απεικονίσεων με προτεραιότητα τη δοκιμή του λογισμικού SNARK09.

(Β) να πραγματοποιηθούν πραγματικά τομογραφικά πειράματα σε πρότυπα δοκίμια ελέγχου ποιότητας τομογραφικής απεικόνισης. Τα πειράματα αυτά πρέπει να έχουν χονδρικά τις εξής συνιστώσες:

(B1) Ραδιογράφιση προτύπου δοκιμίου από διάφορες γωνίες γύρω από συγκεκριμένο άξονα περιστροφής. Ο Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας έχει ήδη προμηθευτεί τον μηχανισμό ακριβούς περιστροφής του δοκιμίου (δηλ. τραπέζι ΧΨ και σχετικό διαιρέτη).

(B2) Ψηφιοποίηση των φιλμ του προηγούμενου βήματος.

(B3) Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας των ψηφιοποιημένων φιλμ

(B4) Παραγωγή sinogram μίας τομής του δοκιμίου

(B5) Ανασύνθεση της υπόψιν τομής του δοκιμίου μέσω λογισμικού μετασχηματισμού Fourier με χρήση φίλτρων

(B6) Επανάληψη των βημάτων (B4) και (B5) για άλλες τομές του ελεγχόμενου δοκιμίου.

και

(B7) Αν το πλήθος των τομών που αναπαριστώνται είναι ικανό, σύνθεση των τομών αυτών σε τριδιάστατη απεικόνιση του δοκιμίου με χρήση κατάλληλου λογισμικού, το οποίο πρέπει να προσδιορισθεί ή να αναπτυχθεί.

Το σημαντικότερο πρακτικό κενό που υπάρχει αυτή τη στιγμή (2009) για την υλοποίηση των προτάσεων αυτών είναι ότι λείπει από τον διατιθέμενο εξοπλισμό ο μηχανισμός με τον οποίο μπορεί να ψηφιοποιηθεί το ραδιογραφικό φιλμ. Προτείνονται για αυτό το σκοπό δύο λύσεις:

- η ψηφιοποίηση των ραδιογραφικών φιλμ μέσω scanner τύπου φωτογραφικών διαφανειών με κόστος που κυμαίνεται ανάλογα με τη συσκευή και τις δυνατότητές της από 150 έως και κατ'εκτίμηση 10000 EUR ή/και
- η απευθείας λήψη της ραδιογραφικής εικόνας σε ψηφιακή μορφή με κόστος που κυμαίνεται ανάλογα με την μέθοδο από 15000 ;έως και κατ' εκτίμηση 60000 EUR.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Baruchel J., Buffiere J.-Y., Maire E., Merle P., Peix G., "X-Ray Tomography in Material Science", Hermes Science Publications, Paris 2000.
2. Bryant L.E., van den Anandel J., McIntire P. Eds., Nondestructive Testing Handbook, second edition, Vol.3, "Radiography and Radiation Testing", American Society for Nondestructive Testing, 1985.
3. Burkardt J., Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, <http://people.sc.fsu.edu/~burkardt/data/stla/stla.html>, 2007
4. Chopra A., "Google SketchUp 7 for Dummies", Wiley, 2009
5. Gabor H., "Fundamentals of Computerized Tomography: Image Reconstruction from Projections (Advances in Pattern Recognition)", 2<sup>nd</sup> Edition, Springer 2009
6. GE Sensing and Inpection Technologies, "X-Ray Radiographic Film Systems", General Electric Company, 2008
7. Gray I., NDE Technologies, Προσωπική Επικοινωνία, 2009
8. Halmshaw R., "Industrial Radiology, Theory and Practice", 2<sup>nd</sup> Edition, Chapman and Hall, London, 1995
9. Πετρόπουλος Ν.Π., "Στοιχεία Βιομηχανικής Ραδιογραφίας" (Πανεπιστημιακές Σημειώσεις), Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, ΕΜΠ, Αθήνα 2009 (υπό έκδοση)
10. Quinn R.A., Sigl C.C., Callinan J.J. Jr., "Radiography in Modern Industry", 4<sup>th</sup> Edition, EASTMAN KODAK COMPANY, Rochester, New York 14650, 1980
11. Rummyantsev S., "Industrial Radiology", MIR Publishers, Moscow, 1967 (Translated from the Russian by S. Semyonov)
12. Still M., "The Definitive Guide to ImageMagick", Apress, 2005
13. XRSIM, "Users Manual", Center for Nondestructive Evaluation, Iowa State University, 1999a
14. XRSIM, "Lessons in Radiography, Using the X-Ray Simulation Program", Student Booklet, Center for Nondestructive Evaluation, Iowa State University, 1999b