



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας

**ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ
ΕΚΘΕΣΗΣ ΓΙΑ ΧΑΡΤΙ**

**CONSTRUCTION OF RADIOGRAPHY EXPOSURE
DIAGRAM FOR PAPER**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ
ΚΕΜΜΟΥ ΣΤΥΛΙΑΝΗΣ του ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ
(Α.Μ.: 09520008)

Σπουδάστριας του ΔΠΜΣ
Εφαρμοσμένη Μηχανική
του ΕΜΠ

Επίβλεψη: Επίκ. Καθηγητής Ν.Π. Πετρόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2024

Αποποίηση τυχόν ευθυνών

Αυτό το κείμενο συντάχθηκε ως προϊόν φοιτητικής Μεταπτυχιακής Εργασίας και δεν είναι το αποτέλεσμα επαγγελματικής μελέτης διπλωματούχου μηχανικού. Στο κείμενο αυτό περιέχονται επιστημονικές πληροφορίες και αποτελέσματα σε σχέση με το αντικείμενο που περιγράφεται στον τίτλο. Για το περιεχόμενο αυτό έχει δοθεί κατά το δυνατό η αναγκαία προσοχή ώστε να διασφαλισθεί η ποιότητά του κατά τη στιγμή της δημοσίευσης. Διευκρινίζεται ότι η δημοσίευση του κειμένου αυτού γίνεται χωρίς να υπάρχει άμεση ή έμμεση σύνδεση της συγγραφέως ή του επιβλέποντός της με σχετικά εμπορικά ή οικονομικά συμφέροντα. Ούτε η συγγραφέας, ούτε ο επιβλέπων της, ούτε το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο διατυπώνουν κάποια γραπτή εγγύηση, ρητή ή έμμεση, συμπεριλαμβανομένων των εγγυήσεων που αφορούν στην ασφάλεια και την προστασία ατόμων και εξοπλισμού και στην καταλληλότητα για χρήση των περιεχόμενων επιστημονικών πληροφοριών και αποτελεσμάτων για τους σκοπούς της βιομηχανικής ραδιογραφία ή του μη καταστρεπτικού ελέγχου γενικότερα ή άλλου σχετικού ραδιολογικού επιστημονικού ή / και τεχνολογικού περιβάλλοντος. Ούτε η συγγραφέας, ούτε ο επιβλέπων της, ούτε το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο αποδέχονται κάποια νομική ή άλλη ευθύνη για την ποιότητα, την ακρίβεια, την πληρότητα, τη χρησιμότητα, τυχόν λάθη, τυχόν παραλείψεις στο περιεχόμενο του κειμένου ή για τις συνέπειες οποιασδήποτε απόφασης που θα ληφθεί με βάση το περιεχόμενο αυτό. Επίσης δεν αποδέχονται ειδικότερα και νομική ευθύνη για την απώλεια προσδοκώμενων κερδών ή για τη δημιουργία συνακόλουθων ζημιών από τη χρήση του περιεχόμενου αυτού. Παρόλα αυτά, καταβλήθηκε σημαντική προσπάθεια ώστε η παραγωγή των περιεχόμενων αποτελεσμάτων να προκύψει ως αποτέλεσμα καλών πρακτικών επιστημονικής ανάλυσης. Η συγγραφέας και ο επιβλέπων της είναι διαθέσιμοι για την παροχή συμβουλών σε ό,τι αφορά επιβεβαίωση των περιεχόμενων αποτελεσμάτων καθώς και για οδηγίες σχετικά με την ενδεδειγμένη χρήση τους. Η αποδοχή αυτής της Μεταπτυχιακής Εργασίας από το Εθνικού Μετσόβιο Πολυτεχνείο δεν υποδηλώνει και την αποδοχή των γνώμων της συγγραφέως (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Πνευματικά δικαιώματα και σχετικές ευθύνες

Οι αναγνώστες μπορούν να χρησιμοποιούν το μέρος του περιεχομένου που τους ενδιαφέρει για δική τους προσωπική και αποκλειστική χρήση αλλά όχι για δημοσίευση ή παρουσίασή τους ως δικό τους ή χωρίς κατάλληλη αναφορά στην πηγή. Τυχόν παράλειψη της αναφοράς στην πηγή συνιστά το αδίκημα της λογοκλοπής. Οι αναγνώστες έχουν τη ρητή υποχρέωση να μην παραβιάζουν ή να μην ενθαρρύνουν / επιτρέπουν την παραβίαση των νομίμων πνευματικών δικαιωμάτων των σχετικών με το κείμενο αυτό χρησιμοποιώντας τα περιεχόμενα αποτελέσματα με ανάρμοστο τρόπο. Ούτε η συγγραφέας, ούτε ο επιβλέπων της θα αποδεχθούν ποτέ όποια ευθύνη τυχόν προκύψει ως συνέπεια παραβιάσεων πνευματικών δικαιωμάτων. Τα φυσικά ή τα νομικά πρόσωπα, τα υπεύθυνα για τις παραβιάσεις αυτές θα είναι, ως εκ τούτου, τα μόνα υπόλογα για τυχόν ζημιές ή άλλες συνέπειες. Το κείμενο αυτό προστατεύεται σε ό,τι αφορά τα πνευματικά δικαιώματα από άδεια [Creative Commons License](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/) by Attribution / No Derivatives, βάσει της οποίας οι χρήστες επιτρέπεται κυρίως να αντιγράψουν, διανέμουν και να χρησιμοποιούν το περιεχόμενο του (αλλά να μην δημιουργούν παράγωγα από αυτό), υπό την προϋπόθεση ότι κάνουν την πρέπουσα αναφορά στην πηγή. Όσοι από εσάς γνωρίζετε την συμβολική γλώσσα της αντίστοιχης άδειας Creative Commons, η σχετική εικόνα σήμανσης έχει ως εξής:



Η συνιστώμενη αναφορά στην πηγή είναι:

Kemmu, S.D., Construction of Radiographic Exposure Diagram for Paper, MSc Thesis (in Greek), Nuclear Engineering Laboratory, National Technical University of Athens, Athens, 2023, available on-line (αναφέρατε διαδικτυακό σύνδεσμο και ημερομηνία ανάγνωσης). Σε περίπτωση που εντοπίσατε αυτό το κείμενο μέσω άλλης δημοσίευσης των συγγραφέων, παρακαλείσθε να αναφέρετε ως πηγή και αυτή τη δημοσίευση.

Υπεύθυνη δήλωση σχετικά με τη λογοκλοπή

Τόσο η συγγραφέας όσο και ο επιβλέπων της έχουν λάβει υπόψη τους το κανονιστικό και ηθικό πλαίσιο που ισχύει διεθνώς σχετικά με τη λογοκλοπή και δηλώνουν ότι, με βάση τα όσα γνωρίζουν, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν αυτόνομης εργασίας της συγγραφέως και ότι για τυχόν κείμενα άλλων αυτούσια ή σε παράφραση ή άλλες εξωτερικές πληροφορίες και δεδομένα που χρησιμοποιούνται υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποιήθηκαν.

Disclaimer

This document has been prepared as a result of an MSc Thesis project accomplished by a graduate student and it is not the result of a professional study by a certified engineer. This document is designed to provide scientific information and results with regard to the matter covered by its title; all reasonable care has been taken to ensure quality of the results at the time of publication. This document is published on the understanding that neither the author nor her supervisor are directly or indirectly connected to any relevant commercial or financial interests. Neither the author nor her supervisor or the National Technical University of Athens (NTUA) make any warranty, expressed or implied, including the warranties of personnel and installations safety and security and fitness for use of the herein included data for the purpose of industrial radiography or non-destructive testing in general or other radiology related scientific and / or technological environment, or accept any legal liability or responsibility for the quality, accuracy, completeness, usefulness, any errors, any omissions within the content of this document, or for the consequences of any decisions taken on the basis of the information provided. This includes, but is not limited to, loss of anticipatory profits or consequential damages from the use of this information. Nonetheless, considerable effort has been put so that best scientific analysis practices were followed during the production of the presented results. The author and her supervisor are available for consultation regarding the verification and implementation of the presented data. Acceptance of this MSc Thesis by the National Technical University of Athens, does not imply the adoption of the opinions of the author (Law 5343/1932, Article 202).

Copyright note and relevant liabilities

Readers may copy the part of the content, in which they are interested, for their own use and not for publication, display and/or plagiarism. Readers are expressly required not to infringe or authorize any infringement of any legal rights related to these data by inappropriately using the information provided. Neither the author nor her supervisor will accept any liability in respect of such infringement, and the individuals or entities responsible will be personally liable for any damages or other liability arising. This document is protected by the [Creative Commons License](#) by Attribution / No Derivatives, which primarily means that licensees may copy, distribute, display and repeat the work (**but not make derivatives based on it**) only if they give the author the credits. For those of you familiar with the Creative Commons Symbolic Signs, then the respective marking is as it follows:



Recommended citation is as it follows:

Kemmou, S.D., Construction of Radiographic Exposure Diagram for Paper, MSc Thesis (in Greek), Nuclear Engineering Laboratory, National Technical University of Athens, Athens, 2023, available on-line (please mention URL and access date).
In case that you have reached this document through another publication of the authors, please, cite this publication as well.

Plagiarism statement

Both the author and her supervisor are aware of the legal and ethics framework internationally applicable regarding plagiarism. Therefore, they both declare that the content of the present Diploma Dissertation is a product of the author's autonomous work. References to sources are duly and appropriately provided for texts of others either quoted directly or paraphrased as well as for external information and data employed.

ΜΕΛΗ ΤΡΙΜΕΛΟΥΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

Επιβλέπων

Ν.Π. ΠΕΤΡΟΠΟΥΛΟΣ Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Μέλη

Ευστάθιος ΘΕΟΤΟΚΟΓΛΟΥ Ομ. Καθηγητής ΕΜΠ

Ευαγγελία ΚΟΝΤΟΥ Ομ. Καθηγήτρια ΕΜΠ

Οκτώβριος 2024

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	ix
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	xi
ABSTRACT	xiii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή	
1.1 Στόχοι της Εργασίας	1-1
1.2 Ραδιογραφία και χαρτί.....	1-2
1.3 Αρχές Ραδιογραφίας.....	1-2
1.4 Διαγράμματα έκθεσης για χαρτί.....	1-3
1.5 Επίλογος	1-4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ραδιογραφία Χαρτιού	
2.1 Εισαγωγή.....	2-1
2.2 Σύσταση χαρτιού	2-1
2.3 Δομή χαρτιού	2-3
2.4 Κατασκευαστική ιστορία χαρτιού	2-4
2.5 Ραδιογραφία χαρτιού	2-6
2.6 Χρήση πηγής ακτίνων-x	2-7
2.6.1 Γενικά	2-7
2.6.2 Χρήση ακτίνων -x χαμηλής ενέργειας	2-7
2.6.3 Χρήση ακτίνων -x υψηλότερης ενέργειας	2-8
2.7 Χρήση πηγής-β σωματιδίων.....	2-9
2.8 Επιλογή φιλμ.....	2-10
2.9 Το πρόβλημα της οπισθοσκέδασης	2-10
2.10 Παραδείγματα εφαρμογής ραδιογραφίας χαρτιού	2-11
2.11 Σχόλια και συμπεράσματα	2-15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Στοιχεία βιομηχανικής ραδιογραφίας	
3.1 Εισαγωγή.....	3-1
3.2 Παραγωγή ακτίνων -x.....	3-3
3.3 Εξασθένιση ακτίνων -x	3-5

3.4	Οπτική πυκνότητα.....	3-6
3.5	Διάγραμμα έκθεσης.....	3-7
3.6	Κατασκευή διαγράμματος έκθεσης	3-9
3.6.1	Γενικά.....	3-9
3.6.2	Δοκίμιο κλίμακας	3-10
3.6.3	Πείραμα κατασκευής διαγράμματος έκθεσης.....	3-11
3.7	Χρήση του διαγράμματος έκθεσης	3-15
3.7.1	Για τις συνθήκες και τις προδιαγραφές του διαγράμματος.....	3-15
3.7.2	Για διαφορετικές αποστάσεις.....	3-16
3.7.3	Χαρακτηριστική καμπύλη φιλμ.....	3-16
3.7.4	Ίδιο φιλμ άλλη οπτική πυκνότητα.....	3-18
3.7.5	Ίδια οπτική πυκνότητα άλλο φιλμ.....	3-20
3.7.6	Άλλο υλικό	3-21
3.8	Σχόλια και συμπεράσματα.....	3-24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Προσδιορισμός έκθεσης για χαρτί με τη βοήθεια διαγράμματος έκθεσης		
4.1	Εισαγωγή.....	4-1
4.2	Ραδιογραφικός συντελεστής ισοδυναμίας.....	4-1
4.3	Δοκίμιο κλίμακας	4-6
4.4	Εξοπλισμός, ρυθμίσεις και προκαταρκτικές σκέψεις	4-8
4.5	Πειράματα και αποτελέσματα	4-14
4.5.1	Πειραματικές εκθέσεις για φιλμ FUJI IX100PB.....	4-14
4.5.2	Πειραματικές εκθέσεις για φιλμ FUJI IX50PB.....	4-15
4.5.3	Βοηθητικά διαγράμματα Οπτικής πυκνότητας - Πάχους.....	4-16
4.5.4	Βοηθητικά διαγράμματα kV - Πάχους.....	4-19
4.5.5	Εξαγωγή διαγράμματος έκθεσης	4-20
4.6	Σχέση διαγραμμάτων έκθεσης	4-22
4.7	Σχόλια και συμπεράσματα.....	4-24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Επίλογος		
E.1	Εισαγωγή.....	E-1
E.2	Ραδιογραφία για την αξιολόγηση κατάστασης βιβλίων.....	E-1
E.3	Ερευνητική ραδιογραφία βιβλίων.....	E-2

E.4 Ραδιογραφική έρευνα μικροδομής	E-3
E.5 Συνέργειες με άλλες μεθόδους	E-4
E.6 Νετρονογραφία χαρτιού	E-6
E.7 Κατακλείδα	E-6
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	B-1

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Όπως έχει αναφερθεί και σε παρόμοιες Διπλωματικές και Μεταπτυχιακές Εργασίες που έχουν εκπονηθεί στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ, η Βιομηχανική Ραδιογραφία είναι μία από τις σημαντικότερες εφαρμοζόμενες Μεθόδους Μη Καταστροφικού Ελέγχου. Μάλιστα, θεωρείται από πολλούς ως η πλέον ευέλικτη. Χρησιμοποιεί φωτόνια δηλαδή ακτίνες $-x$ ή/και ακτίνες $-γ$ υψηλής διαπεραστικής ικανότητας καθώς και άλλες μορφές ακτινοβολίας (π.χ. νετρόνια), 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) ή και πιο πρόσφατα με ψηφιακούς τρόπους και περιέχει σημαντικές πληροφορίες με βάση τις οποίες ελέγχεται η κατασκευαστική πληρότητα του προϊόντος. Τα τελευταία 50 έτη, τα στοιχεία από εικόνες 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 ζωών, με κοινωνικό όφελος που καρπώνεται πλήρως ο τελικός χρήστης των ραδιογραφούμενων προϊόντων.

Στην επιστημονική έρευνα για τον πολιτισμό που αφορά στη μελέτη αντικειμένων από χαρτί, όπως τα διάφορα έντυπα, τα βιβλία, οι χάρτες, τα χαρακτικά, οι υδατογραφίες κλπ, η τεχνική της Βιομηχανικής Ραδιογραφίας αναδείχθηκε σχετικά πρόσφατα σε απαραίτητο εργαλείο καθώς μέσω αυτής οι ερευνητές είναι δυνατόν να προσδιορίσουν χωρίς να αγγίξουν ή να ξεδιπλώσουν ευαίσθητες επιφάνειες, αν υπάρχουν φθορές, προηγούμενες γραφές που έχουν αποξεσθεί, παλαιότερες εικόνες που έχουν επιχρωματισθεί κ.ά., κάτι που δεν είναι τόσο εύκολο να γίνει μη καταστροφικά με άλλες μεθόδους. Για να επιτευχθεί όμως αυτό πρέπει η ερμηνεία της ραδιογραφίας να γίνει σωστά. Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας είναι η καλή ποιότητα εικόνας στο φιλμ για το δοκίμιο χαρτιού που εξετάζεται. Μεγάλη επίδραση στην ποιότητα της εικόνας έχει η σωστή επιλογή της έκθεσης. Όπως είναι γνωστό, τα διαγράμματα έκθεσης είναι αυτά, με τη βοήθεια των οποίων, καθορίζεται η έκθεση ανάλογα με το ραδιογραφούμενο υλικό και το πάχος του. Συνήθως τα διαγράμματα έκθεσης διατίθενται για δύο υλικά, τον χάλυβα και το αλουμίνιο και δεν υπάρχουν τέτοια για το χαρτί. Σκοπός της Μεταπτυχιακής Εργασίας είναι (α) η παρουσίαση της σημασίας της

Βιομηχανικής Ραδιογραφίας στην μη καταστρεπτική αξιολόγηση αντικειμένων από χαρτί με τη βοήθεια βιβλιογραφικών στοιχείων και (β) κυρίως, η κατασκευή και η παρουσίαση διαγραμμάτων έκθεσης για χαρτί και ακτίνες -x ώστε ο υπολογισμός της αναγκαίας έκθεσης να γίνεται με ορθότητα και χωρίς πολλές δοκιμαστικές λήψεις εικόνας. Τέτοια διαγράμματα έκθεσης παρουσιάζονται, όσο μας είναι γνωστό, για πρώτη φορά.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΓΙΑ ΧΑΡΤΙ

Μεταπτυχιακή Εργασία της Σ. Κέμμου

Ο κύριος σκοπός της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας είναι η παρουσίαση των δυνατοτήτων της Βιομηχανικής Ραδιογραφίας σε ό,τι αφορά την έρευνα για την εσωτερική δομή αντικειμένων από χαρτί με τη βοήθεια της βιομηχανικής ραδιογραφίας. Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιήθηκαν πειράματα για την κατασκευή ενός διαγράμματος έκθεσης για χαρτί και ακτίνες -x. Όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στην εργαστηριακή εγκατάσταση Βιομηχανικής Ραδιογραφίας του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Από όσα είναι γνωστά τέτοιο διάγραμμα έκθεσης δεν έχει ξαναπαρουσιασθεί. Επιπλέον το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας έχοντας αυτές τις τεχνικές πληροφορίες φαίνεται ότι θα μπορεί να συμβάλλει σε ανάγκες μη καταστρεπτικού ελέγχου βιβλίων από την πολιτιστική κληρονομιά της χώρας.

Στο κείμενο γίνεται πρώτα μια πολύ χονδρική γνωριμία με τα είδη του χαρτιού με βάση κυρίως εγκυκλοπαιδικές πληροφορίες. Στη συνέχεια ακολουθεί μια ανάλυση για τους τρόπους ραδιογράφησης χαρτιού. Απαιτούνται φυσικά πρότερες αρχών ραδιογραφίας, οι οποίες υπάρχουν στη βιβλιογραφία και σε προηγούμενες Διπλωματικές και Μεταπτυχιακές Εργασίες που εκπονήθηκαν στο Εργαστήριο.

Ακολουθεί μια αναφορά στις γενικές αρχές της Βιομηχανικής Ραδιογραφίας (κυρίως με ακτίνες -x). Δίνονται γενικές πληροφορίες για την αρχική ανακάλυψη της μεθόδου, τους τομείς εφαρμογής όπως αυτοί αναπτύχθηκαν σταδιακά, το πώς ακριβώς λειτουργεί μία μηχανή που παράγει ακτίνες -x καθώς και στα κυριότερα φαινόμενα που παρουσιάζονται κατά την εφαρμογή της μεθόδου. Στη συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος πειραματικής κατασκευής ενός διαγράμματος έκθεσης, εξηγούνται αναλυτικά όλοι οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται το διάγραμμα και αναλύονται οι δυνατότητες χρήσης του σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν αλλαγές σε κάποιες από τις συνθήκες έκθεσης. Τονίζεται επιπλέον η μεγάλη σημασία που έχει το διάγραμμα έκθεσης καθώς η ορθή επιλογή έκθεσης είναι απαραίτητη προϋπόθεση για να παραχθεί μία καλή εικόνα στο φιλμ. Με βάση την ερμηνεία της εικόνας αυτής μπορεί να ληφθούν αποφάσεις που πολλές φορές αφορούν σε σημαντικές κατασκευές.

Με βάση τα πιο πάνω θεωρητικά στοιχεία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα για την κατασκευή ενός διαγράμματος έκθεσης για χαρτί διαφόρων παχών και ακτίνες -x, με χρήση

εξοπλισμού που διατίθεται στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Για τη χάραξη του διαγράμματος χρησιμοποιήθηκε λογισμικό MS Excel και Origin Pro 9.

Τέλος, αναλύεται ο ρόλος που μπορεί να παίξει η βιομηχανική ραδιογραφία στην πολιτιστική έρευνα του παλαιού χαρτιού ιδιαίτερα εκείνου από φύλλα μεγάλου πάχους ή βιβλία που δεν μπορούν να ανοίξουν για συντήρηση χωρίς γνώση για φθορές από έντομα, τρωκτικά ή χωρίς γνώση για τη θέση χρυσοτυπειών ή άλλων τεχνικών γραφής ή κατασκευής.

ABSTRACT
CONSTRUCTION OF RADIOGRAPHIC EXPOSURE DIAGRAM FOR
PAPER

MSc Thesis of S. Kemmou

The main purpose of this Master's Thesis is to present the capabilities of Industrial Radiography concerning the research on the internal structure of thick paper objects using industrial radiography techniques. In this context, experiments were conducted to create an exposure diagram for paper and -x rays. All experiments were conducted at the Industrial Radiography Installation facility of the Nuclear Engineering Laboratory at the School of Mechanical Engineering of NTUA. As far as it is known, such an exposure diagram has not been presented elsewhere. Furthermore, the Nuclear Engineering Laboratory, using this technical information, seems now to be able to contribute to the non-destructive investigations of books of the country's cultural heritage.

The text begins with a broad overview of the types of paper, primarily based on encyclopedic information. This is followed by an analysis of the methods for radiographing paper. Prior knowledge of radiographic principles is required. This could be found in the literature and in previous theses and Master's projects conducted at the Laboratory.

The next section presents an exploration of the general principles of Industrial Radiography (mainly using -x rays). The general information provided is basically about the initial discovery of the method, the gradual development of the relevant fields of application, how an -x ray machine operates, as well as the main phenomena which occur during the application of the method. In succession, the method of the experimental construction of an exposure diagram is described. Details are given for all the factors on which the diagram depends and for the analysis of its use in cases where there are changes in some of the exposure conditions. The great importance of the exposure diagram for the correct selection of exposure is further emphasized as the necessary condition for producing a good image on the film. Sound decisions could be reached based on the interpretation of such images regarding often significant constructions.

Using the above-mentioned theoretical elements, experiments were conducted for the construction of an exposure diagram for paper of various thicknesses and -x ray exposures, utilizing the equipment available at the Nuclear Engineering Laboratory of NTUA. For the plotting of the diagram, MS Excel and Origin Pro 9 software were used.

Finally, it is also portrayed in this thesis the significance of industrial radiography in the cultural research of old paper, more specifically for thick sheets or books that cannot be opened for conservation without knowledge of probable damage from insects, rodents, or without understanding the placement of gilding or other writing and construction techniques.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Στόχοι της Εργασίας

Όπως και για τη ραδιογράφιση οποιουδήποτε άλλου υλικού, έτσι και για τη ραδιογράφιση χαρτιού με ακτίνες -x, το πλέον απαραίτητο εργαλείο, κυρίως όταν η ραδιογράφιση γίνεται αναλογικά (δηλαδή με φιλμ) και όχι ψηφιακά, είναι το διάγραμμα έκθεσης. Με τη βοήθεια του διαγράμματος αυτού προσδιορίζεται η αναγκαία έκθεση σε ακτίνες -x προκειμένου να ληφθεί καλή ραδιογραφική εικόνα, σε συνάρτηση με το πάχος. Διάγραμμα έκθεσης για ραδιογράφιση χαρτιού δεν υπάρχει στην βιβλιογραφία. Δεδομένου ότι η Ελλάδα είναι χώρα, στην οποία υπάρχει σημαντική πολιτιστική κληρονομιά που βασίζεται στο παλιό χαρτί, κυρίως θρησκευτικά βιβλία και χειρόγραφα, εκτυπωμένα, ζωγραφισμένα ή επιζωγραφισμένα ή παλίμψηστα, με ποικίλες βιβλιοδεσίες βυζαντινής ή δυτικότροπης τεχνικής, αποφασίσθηκε στο πλαίσιο αυτής της Μεταπτυχιακής Εργασίας να κατασκευασθούν τέτοια διαγράμματα έκθεσης για διάφορα βιομηχανικά ραδιογραφικά φιλμ. Με αυτόν τον τρόπο το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ, αν ποτέ προκύψει θα μπορεί να προσφέρει ευκολότερα υπηρεσίες ραδιογράφισης χαρτιού, βιβλίων και άλλων τέτοιων παρόμοιων συνθέσεων.

Επομένως στους κύριους στόχους της Εργασίας περιλαμβάνονται τα εξής:

(1) Η κατασκευή διαγραμμάτων έκθεσης για χαρτί για τη μηχανή παραγωγής ακτινών -x της εγκατάστασης Βιομηχανικής Ραδιογραφίας του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Με τα διαγράμματα αυτά θα διευκολυνθεί πολύ η χρήση του σχετικού εξοπλισμού και θα μπορούν να λαμβάνονται εύκολα και σύντομα ποιοτικές ραδιογραφικές εικόνες βιβλίων σε φιλμ με υψηλά ποιοτικά χαρακτηριστικά χωρίς να χρειάζονται δοκιμές. Ο στόχος αυτός καταλαμβάνει και τον μεγαλύτερο όγκο της εργασίας.

και

(2) Η παρουσίαση της ραδιογραφίας ως μία δυναμική μη καταστροφική μέθοδο για τον προσδιορισμό των ζημιών σε χάρτινα αντικείμενα πολιτιστικού ενδιαφέροντος. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται βιβλιογραφικές αναφορές αλλά και εγκυκλοπαιδικές γνώσεις. Η σχετική έρευνα δεν είναι ικανοποιητικά ανεπτυγμένη στην Ελλάδα, ούτε στο

εξωτερικό κυρίως επειδή δεν έχει αναδειχθεί η σχετική ανάγκη με την εξαίρεση έργων ζωγραφικής.

1.2 Ραδιογραφία και χαρτί

Στο Κεφάλαιο 2 της Εργασίας γίνεται μια γνωριμία με τα είδη του χαρτιού, τον τρόπο κατασκευής του και τη σύστασή του ανά εποχές. Στη συνέχεια ακολουθεί μια ανάλυση για τους τρόπους ραδιογράφισης του χαρτιού σύμφωνα με εγκυκλοπαιδικές και βιβλιογραφικές πηγές. Προκύπτει ότι για τη ραδιογράφιση του χαρτιού μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες ιοντίζουσες ακτινοβολίες μεταξύ των οποίων βρίσκονται και οι ακτίνες -x χαμηλών ενεργειών οι οποίες και ενδιαφέρουν στην παρούσα Εργασία και μπορούν να δημιουργήσουν εικόνας σε κατάλληλο φιλμ. Για τον τρόπο αυτό απαιτείται να υπάρχουν κατάλληλα διαγράμματα έκθεσης για τον υπολογισμό της ποσότητας ακτίνων -x που απαιτούνται συναρτήσει του πάχους του ραδιογραφούμενου χαρτιού. Δίνονται παραδείγματα, στα οποία χρησιμεύει η ραδιογράφιση του χαρτιού σύμφωνα με τη βιβλιογραφία.

Ως συμπέρασμα, στη ραδιογραφία του χαρτιού και των βιβλίων η βιομηχανική ραδιογραφία μπορεί να είναι καλό εργαλείο μη καταστρεπτικού ελέγχου όπως εξάλλου είναι γενικότερα για την σύγχρονη παραγωγή και έλεγχο αντικειμένων, αλλά και για την ανάλυση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς όπως τα μεταλλικά καλλιτεχνικά έργα παντός είδους, κεραμικά, έργα ζωγραφικής και παλαιά χαρτιά τυπωμένα ή ζωγραφισμένα. Εκτιμάται ότι το ενδιαφέρον για ραδιογράφιση χαρτιού παλαιότερου του 20^{ου} αιώνα είναι έντονο. Με τη ραδιογράφιση τέτοιου χαρτιού μπορεί να επιτυγχάνεται χρονολόγηση, ταύτιση του τόπου παραγωγής και να αποσπώνται άλλες πολύτιμες πληροφορίες. Επιπλέον, η έκθεση του παλαιού χαρτιού σε ακτίνες -x έχει δοκιμαστεί ως μέθοδος αποστείρωσης αντί της ανοξίας.

1.3 Αρχές ραδιογραφίας

Στο επόμενο Κεφάλαιο 3, και προτού πραγματοποιηθούν τα πειράματα για τα διαγράμματα έκθεσης του χαρτιού, δίνονται τα αναγκαία στοιχεία από τη θεωρία της ραδιογραφίας. Πιο συγκεκριμένα γίνεται σύντομη αναφορά στην ανακάλυψη της ραδιογραφίας, τις φυσικές αρχές της, στον εξοπλισμό που απαιτείται, στον τρόπο που εκτελείται, στους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη μορφή και την ποιότητα της ραδιογραφικής εικόνας και στον τρόπο που υπολογίζονται οι αναγκαίες ρυθμίσεις του εξοπλισμού, ανάλογα με το τι και πώς πρέπει να ραδιογραφηθεί. Από τη σύντομη

αυτή ανάλυση προκύπτει εύκολα ότι η Βιομηχανική Ραδιογραφία είναι μία κατ' αρχήν απλή και ευέλικτη μέθοδος Μη Καταστροφικού Ελέγχου, η οποία βασίζεται κυρίως στη διαπερατότητα φωτονιακών ακτινοβολιών κατάλληλης ενέργειας στην ύλη. Επισημαίνεται ότι για την ορθή διεκπεραίωση ενός ραδιογραφικού ελέγχου θα πρέπει στην εικόνα που θα παραχθεί να είναι ορατά όσο το δυνατόν περισσότερα από τα εσωτερικά σφάλματα που μπορεί να υπάρχουν στο προϊόν ή την κατασκευή κάτι το οποίο εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την σωστή επιλογή τιμής της έκθεσης για το αντίστοιχο υλικό. Επομένως η σημασία των διαγραμμάτων έκθεσης είναι ιδιαίτερα σημαντική αφού είναι αυτά που βοηθούν στην κατά το δυνατό ορθή εκτίμηση της απαραίτητης έκθεσης ενός υλικού και κατά συνέπεια τον σωστό έλεγχο του. Τα συνήθως διαθέσιμα διαγράμματα είναι αυτά του αλουμινίου και του χάλυβα. Υπάρχουν περιπτώσεις, για τις οποίες διατίθενται εργαλεία που βοηθούν στην εκτίμηση της ορθής έκθεσης με βάση ένα ήδη διαθέσιμο διάγραμμα έκθεσης, όπως αυτό για χάλυβα και αλουμίνιο. Τα εργαλεία αυτά περιγράφονται περιληπτικά. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις που αυτό δεν μπορεί να γίνει. Μια τέτοια περίπτωση είναι και το χαρτί, για το οποίο δεν αποδίδουν καλά τα υπόψη εργαλεία. Ως αποτέλεσμα, χωρίς αντίστοιχα διαγράμματα έκθεσης δεν μπορεί να εκτιμηθεί ορθά η έκθεση για υλικά όπως τα βιβλία ή άλλα χάρτινα αντικείμενα.

1.4 Διαγράμματα έκθεσης για χαρτί

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η αναγκαία πειραματική εργασία παραγωγής διαγραμμάτων έκθεσης για χαρτί. Ειδικά για το χαρτί δεν είναι ακριβείς ή γνωστοί οι ονομαζόμενοι ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας με τον χάλυβα ή το αλουμίνιο. Αν υπήρχαν τέτοιοι συντελεστές τότε τα διαγράμματα έκθεσης για χαρτί θα προκύπταν αυτόματα με τρόπο που περιγράφεται επαρκώς στο Κεφάλαιο 3. Χωρίς καλούς συντελεστές ισοδυναμίας και χωρίς διαγράμματα έκθεσης, απαιτούνται αρκετές και χρονοβόρες δοκιμαστικές ραδιογραφίες ώστε να βρεθεί η περιοχή ρυθμίσεων που θα δώσει μια καλής ποιότητας ραδιογραφική εικόνα. Η πειραματική διαδικασία παραγωγής διαγραμμάτων έκθεσης για χαρτί είναι σχετικά εύκολη, έχει επαναληφθεί και στο παρελθόν για διάγραμμα έκθεσης κεραμικών υλικών και προέκυψε το ίδιο αποδοτική και για το χαρτί και μάλιστα εφαρμόστηκε για δύο διαφορετικά φιλμ. Κατ' αυτή την έννοια υπάρχει πλέον διαθέσιμη στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ η τεχνογνωσία για τη ραδιογραφία χαρτιού κυρίως σε πάχη, όπως βιβλία ή χάρτινες

κατασκευές ή κολλάζ. Σύμφωνα με τα όσα είναι γνωστά αυτή η τεχνολογία δεν υπάρχει αλλού σε Ελληνικό Εργαστήριο.

1.5 Επίλογος

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία καλύφθηκε θεωρητικά το πως δημιουργείται ένα διάγραμμα έκθεσης για άγνωστο υλικό, πέρα δηλαδή από αυτά που συνήθως συνοδεύουν πηγές φωτονίων ή μηχανές παραγωγής ακτίνων -x, όπως αυτά για χάλυβα και για αλουμίνιο. Το θεωρητικό αυτό μέρος έχει καλυφθεί σε μικρότερη ή μεγαλύτερη έκταση και σε παλαιότερες αντίστοιχες Εργασίες. Στο πειραματικό μέρος της Εργασίας κατασκευάστηκαν διαγράμματα έκθεσης για χαρτί για δύο διαφορετικά φιλμ από αυτά που υπάρχουν στην Ελληνική αγορά. Φυσικά τα διαγράμματα αυτά αφορούν μόνο στον εξοπλισμό και τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ και δεν μπορούν να εφαρμόζονται για άλλες συνθήκες. Τα διαγράμματα μπορούν να αποδειχθούν πολύ χρήσιμα για την αξιολόγηση της κατάστασης παλαιών βιβλίων. Τα βιβλία αυτά μπορεί να προέρχονται από συλλογές ιδιωτικές ή δημόσιες, από βιβλιοθήκες ή μουσεία ή άλλους οργανισμούς π.χ. αρχαιικούς. Το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ προσδοκά να βρεθεί στην ευχάριστη θέση να βοηθήσει σε τέτοιες αξιολογήσεις παλαιών βιβλίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΑ ΧΑΡΤΙΟΥ

2.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται μια πρώτη πολύ χονδρική γνωριμία με τα είδη του χαρτιού, τον τρόπο κατασκευής του και τη σύστασή του ανά εποχές. Ως κύριες πηγές για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το διαδίκτυο, εγκυκλοπαιδικές πληροφορίες αλλά και η μικρή ανάλυση του Ζερβού (2015). Στη συνέχεια ακολουθεί μια ανάλυση για τους τρόπους ραδιογράφισης του χαρτιού. Κύρια πηγή για την ανάλυση αυτή είναι το σύγγραμμα Lang (2005). Φυσικά για την ανάγνωση αυτού του τμήματος του κειμένου απαιτούνται και πρότερες γνώσεις αρχών ραδιογραφίας, τις οποίες ο αναγνώστης μπορεί να βρει στον Quinn (1980), στον Moore (2002), στον Lang (2005), στο Fujifilm (2009) αλλά και στην πρόσφατη Μεταπτυχιακή Εργασία του Αναγνώστου (2020) ή σε κάποιο μικρότερο βαθμό στο επόμενο 3^ο Κεφάλαιο. Προκύπτει από την ανάλυση αυτή ότι για τη ραδιογράφιση του χαρτιού χρειάζονται ακτίνες -x χαμηλών ενεργειών, ή πεδία ηλεκτρονίων παραγόμενα με κατάλληλο τρόπο από ακτίνες -x υψηλών ενεργειών ή πεδία -β σωματιδίων. Επισημαίνεται ότι στη Μεταπτυχιακή αυτή Εργασία ενδιαφέρει μόνο ο τρόπος ραδιογράφισης χαρτιού με ακτίνες -x χαμηλών ενεργειών και σχηματισμό της εικόνας σε κατάλληλο φιλμ. Για τον τρόπο αυτό απαιτείται να υπάρχουν κατάλληλα διαγράμματα έκθεσης για τον υπολογισμό της ποσότητας ακτίνων -x που απαιτούνται συναρτήσει του πάχους του ραδιογραφούμενου χαρτιού. Η κατασκευή τέτοιων διαγραμμάτων είναι, όπως αναφέρθηκε, ο κύριος στόχος της Εργασίας. Τέλος, δίνονται παραδείγματα, στα οποία χρησιμεύει η ραδιογράφιση του χαρτιού. Η πηγή αυτών των παραδειγμάτων είναι κυρίως ο Lang (2005). Το Κεφάλαιο κλείνει με σχόλια και συμπεράσματα.

2.2 Σύσταση χαρτιού

Σύμφωνα με τον Ζερβό (2015) αλλά και άλλες εγκυκλοπαιδικές και διαδικτυακές πληροφορίες, το χαρτί, μπορεί να περιέχει διαφορετικά συστατικά, ανάλογα με την πρώτη ύλη και την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του, την εποχή παραγωγής του, καθώς και τη χρήση, για την οποία προορίζεται. "Ιστορικό" ονομάζεται το χαρτί, το οποίο έχει παραχθεί πριν το 1850, και υπάρχει πιθανότητα να έχει κατασκευαστεί από κατάλληλα ράκη (υφασμάτινα ή άλλα "κουρέλια"). Τα ράκη αυτά πρέπει να έχουν περιέχουν κυτταρίνη, δηλ. είναι κατά βάση από λινό, κάνναβη ή βαμβάκι. Το ιστορικό χαρτί έχει συνήθως υποστεί υδροφοβία (κολλάρισμα) με ζωική κόλλα (ζελατίνη), μπορεί να περιέχει στύψη σε μικρές

ποσότητες και μπορεί να περιέχει ποσότητα αλάτων μαγνησίου και ασβεστίου, πράγμα που το καθιστά αλκαλικό, ουδέτερο ή ελαφρά όξινο. Τα παραπάνω τρία υλικά περιέχουν επιπλέον μικρότερες ποσότητες ημικυτταρίνης και λιγνίνης. Το χαρτί αυτής της περιόδου, λόγω των πρώτων υλών του, ονομάζεται και "χαρτί από κουρέλια" (rag paper). Το χαρτί από κουρέλια, έχει υψηλή περιεκτικότητα σε κυτταρίνη καλής ποιότητας και σε συνδυασμό με το pH του και την ύπαρξη ζελατίνης, έχει συνήθως καλή αντοχή στη γήρανση.

Το χαρτί που έχει παραχθεί μετά το 1850 και μέχρι περίπου το 1980, πιθανότατα προέρχεται από ξυλοπολτό και μπορεί σε αντιδιαστολή με το "ιστορικό" χαρτί να ονομάζεται "ενδιάμεσο". Η ειδοποιός διαφορά είναι πως το ξύλο, εκτός από κυτταρίνη και ημικυτταρίνη περιέχει μεγάλες ποσότητες λιγνίνης. Η ποσότητα λιγνίνης εξαρτάται, κάθε φορά, από τη μέθοδο πολτοποίησης που χρησιμοποιείται. Επιπλέον, το χαρτί αυτό περιέχει συνήθως κολοφώνιο και θειικό αργίλιο, έναν συνδυασμό χημικών ουσιών που χρησιμοποιούνταν για να γίνει το χαρτί όσο το δυνατόν πιο υδρόφοβο. Η διαδικασία προστασίας από την υγρασία μετατρέπει το χαρτί σε όξινο. Λόγω της υποβαθμισμένης ποσότητας κυτταρίνης και του χαμηλού του pH, το συγκεκριμένο χαρτί θεωρείται χημικά ασταθές και με χαμηλή αντοχή στην γήρανση.

Από το 1980 και έπειτα, η βιομηχανία χαρτιού έχει αλλάξει τη μέθοδο παραγωγής και έχει στραφεί στην παραγωγή αλκαλικού χαρτιού, το οποίο ονομάζεται "σύγχρονο" χαρτί. Αυτό το είδος χαρτιού παράγεται επίσης από ξυλοπολτό με τη διαφορά ότι πλέον, χρησιμοποιείται μια άλλη διαδικασία προστασίας από την υγρασία που δεν οδηγεί σε όξινο προϊόν. Στα σύγχρονα αλκαλικά χαρτιά, γίνεται προσθήκη σημαντικής ποσότητας ανθρακικού ασβεστίου, η οποία καθιστά το χαρτί αλκαλικό και του προσδίδει αυξημένη αντοχή στην γήρανση, σύμφωνα με πρότυπα ISO.

Εκτός από τα τρία βασικά συστατικά του σύγχρονου χαρτιού (δηλ. κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και λιγνίνη), στο χαρτί μπορεί να περιέχονται και διάφορα πρόσθετα όπως:

(α) Υλικά προστασίας από την υγρασία (sizing agents), όπως φυσικές ή συνθετικές ρητίνες, άμυλο, και ζελατίνη. Τα συγκεκριμένα υλικά αδιαβροχοποιούν μερικώς το χαρτί και ελαττώνουν την απορρόφηση του μελανιού.

(β) Υλικά επικάλυψης (fillers-coatings) όπως καολίνης, ανθρακικό ασβέστιο και οξείδιο του τιτανίου. Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται στην παραγωγή χαρτιού για να αυξήσουν το βάρος και να μειώσουν το πορώδες του, βελτιώνοντας έτσι την απόθεση των μελανιών εκτύπωσης και γραφής. Τα τελευταία 25 χρόνια, με την σταδιακή στροφή προς την παραγωγή

αλκαλικού χαρτιού, η χρήση ανθρακικού ασβεστίου έχει καθιερωθεί για το σκοπό αυτό και προσφέρει εξαιρετικά αποτελέσματα τόσο στην απόδοση όσο και στην αντοχή στον χρόνο.

(γ) Στυπτηρία (αλλιώς στύψη) που είναι το διπλό θειικό άλας του καλίου-αργιλίου $KAl(SO_4)_2$ ή θειικό αργίλιο, το οποίο χρησιμοποιείται για την καθίζηση των ρητινών.

(δ) Ενισχυτικά λαμπρότητας (φθορίζουσες ουσίες ή μπλε χρωστικές). Τα συγκεκριμένα υλικά, χρησιμοποιούνται για να βελτιώνουν την λαμπρότητα του σύγχρονου χαρτιού, που υπό άλλες συνθήκες θα εμφανίζονταν υποκίτρινο.

(ε) Χρωστικές ουσίες.

(στ) Τέλος, ως προσμίξεις μπορεί να περιέχονται ιόντα βαρέων μετάλλων (Fe, Cu), ανθρακικό ασβέστιο και ανθρακικό μαγνήσιο. Στην παρουσία των δύο τελευταίων, αποδίδεται η εξαιρετική αντοχή στον χρόνο και πολλών ιστορικών χαρτιών.

2.3 Δομή χαρτιού

Στο χαρτί, η μικρότερη μορφολογική μονάδα θεωρείται πως είναι η μικρο-ίνα (Microfibril) της κυτταρίνης, η οποία συνδυάζεται με άλλες μικρο-ίνες ώστε να δημιουργηθούν μακρο-ίνες. Αυτές θεωρούνται ως η δομική μονάδα της κυτταρίνης. Η κυτταρίνη χαρακτηρίζεται από στρώματα ινών, τα οποία μπορεί να διαφέρουν σε υφή και δομή. Το χαρτί επομένως αποτελείται από ίνες κυτταρίνης που συνδέονται μεταξύ τους με δεσμούς υδρογόνου. Το τελικό σχήμα και οι διαστάσεις των ινών στο χαρτί εξαρτώνται από τον τρόπο επεξεργασίας. Για παράδειγμα, η διαδικασία του χτυπήματος (beating) οδηγεί στον διαχωρισμό των ινών της κυτταρίνης και στην ελάττωση του μήκους τους. Παράλληλα, με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η επιφάνεια επαφής μεταξύ των ινών. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό στην μικρο-δομή της κυτταρίνης είναι το σύστημα των πόρων, διακένων και ρωγμών που υπάρχουν σε αυτή. Ο συνολικός όγκος και η κατανομή των πόρων, εξαρτώνται σημαντικά από τη διάγνωση και την ξήρανση της κυτταρίνης. Λόγω του συστήματος πόρων, η συνολική επιφάνεια της κυτταρίνης υπερβαίνει κατά πολύ την γεωμετρική εξωτερική της επιφάνεια. Η ειδική επιφάνεια της κυτταρίνης μπορεί να κυμαίνεται από 1 έως 1000 m^2/g .

Το επιμέρους συμπέρασμα για την ύλη (σύσταση και δομή) του ιστορικού, του ενδιάμεσου και του σύγχρονου χαρτιού είναι ότι πρόκειται για προϊόν μικρής πυκνότητας από οργανική ύλη, το οποίο έχει έντονο πορώδες μικρών διαστάσεων. Επομένως για τη ραδιογράφησή του σε μικρά πάχη δεν πρέπει κατ' αρχάς να απαιτούνται υψηλές ενέργειες φωτονίων.

2.4 Κατασκευαστική ιστορία χαρτιού

Ως χαρτί, θεωρείται το υλικό που προέρχεται από ίνες κυτταρίνης, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους σχηματίζοντας ένα φύλλο, καθώς αποτίθενται από υδατικό αιώρημα σε κατάλληλα κόσκινα. Η πρώτη παραγωγή χαρτιού εντοπίζεται στην Κίνα πριν από περίπου 2000 έτη. Ως πρώτες ύλες χρησιμοποιούνταν άχρηστα υφάσματα, παλαιά δίχτυα, ίνες μπαμπού και φλοιός μουριάς. Η διαδικασία είχε ως εξής: πολτοποίηση των πρώτων υλών, έπειτα αραίωση του πολτού με νερό μέσα σε κάδους, και τέλος σχηματισμός του χαρτιού με απόθεση του πολτού σε κόσκινα, κατασκευασμένα από μπαμπού και μεταξωτά νήματα. Μετά τον 4^ο αιώνα μ.Χ., το χαρτί κατασκευάζεται από τα ίδια υλικά, αλλά προστίθεται η χρήση φυτικής κόλλας ή αμύλου για τη συγκόλληση των ινών. Τον 8^ο αιώνα μ.Χ., στην Αίγυπτο, κατασκευάζεται χαρτί από βαμβάκι ή λινό, κολλαρισμένο με αμυλόκολλα. Στη συνέχεια η τέχνη της χαρτοποιίας διαδίδεται από τη Βόρεια Αφρική στην Ισπανία. Ο πρώτος ευρωπαϊκός μύλος για χαρτί που αναφέρεται στην ιστορία είναι στην Χαντίνα της Βαλένθια, το 1151. Το 1228 παράγονται τα πρώτα γερμανικά χειρόγραφα σε χαρτί. Στο Fabriano της Ιταλίας, λειτούργησε ο πρώτος ιταλικός χαρτόμυλος το 1276, ενώ η λειτουργία του πρώτου χαρτόμυλου στην Γερμανία εντοπίζεται γύρω στο 1390.

Κατά την κατασκευή χαρτιού στην Ευρώπη το 12^ο αιώνα, χρησιμοποιούνταν μεταλλικά κόσκινα ένθετου τύπου (laid mould), τα οποία αποτελούνταν από πυκνά τοποθετημένα και παράλληλα μεταξύ τους, λεπτά νήματα, τα οποία υποστηρίζονταν από ένα αραιότερο πλέγμα παχύτερων νημάτων που ήταν τοποθετημένα κάθετα στα πρώτα. Αυτό το πλέγμα αφήνει στο χαρτί ένα χαρακτηριστικό αποτύπωμα, το οποίο αποτελείται από πυκνές παράλληλες γραμμές (ένθετες γραμμές, laid lines) και αραιότερες γραμμές, κάθετες στις πρώτες (γραμμές αλυσίδας, chain lines). Το αποτύπωμα αυτό είναι δυνατόν να γίνει ορατό με ραδιογράφιση με φωτόνια χαμηλών ενεργειών και να ταυτοποιήσει με αυτόν τον τρόπο την προέλευση και τη χρονολόγηση του χαρτιού. Βεβαίως αργότερα, γύρω στο 1750 ο John Baskerville δημιούργησε ένα μεταγενέστερο είδος κόσκινου που ονομάζεται πλεκτό, το οποίο δεν αποτυπώνει στο χαρτί τις χαρακτηριστικές γραμμές των ένθετων κόσκινων.

Στην συνέχεια, η εισαγωγή των μεταλλικών νημάτων, στο τέλος του 13^{ου} αιώνα οδήγησε στην παραγωγή χαρτιού με υδατογραφίες, οι οποίες σχεδιάζονταν με σύρμα. Στην περιοχή του σύρματος της υδατογραφίας, αποτίθεται λιγότερος χαρτοπολτός και το χαρτί γίνεται λεπτότερο στο σημείο αυτό, δημιουργώντας έτσι ένα αδρό αποτύπωμα του σχήματος του σύρματος που γίνεται ορατό στο φως λόγω του μικρότερου πάχους του χαρτιού, στην περιοχή αυτή. Οι υδατογραφίες, χρησιμοποιούνταν ως εμπορικά σήματα του χαρτόμυλου παραγωγής

και σήμερα χρησιμοποιούνται για την πιστοποίηση της αυθεντικότητας, τη χρονολόγηση και τον χαρακτηρισμό ενός εγγράφου.

Μέχρι τον 19^ο αιώνα, η διαδικασία παραγωγής χαρτιού χειροκίνητη ή μηχανική είχε ως εξής:

- συλλογή άχρηστων υφασμάτων και παρόμοιων πρώτων υλών
- κοπή πρώτης ύλης σε μικρά κομμάτια
- πολτοποίηση σε νερό (5 έως 30 ημέρες για χειροκίνητη πολτοποίηση)
- προσθήκη ασβεστίου και χωρισμός πολτού σε ίνες
- χτύπημα
- παραγωγή φύλλων χαρτιού
- ξήρανση στον ήλιο
- επανάληψη κύκλου μέχρι ικανοποιητικής λεύκανσης τελικού προϊόντος
- προστασία από την υγρασία με ζωική κόλλα και στυπτηρία (στύψη)
- λείανση φύλλων χαρτιού με μηχανικά σφυριά ή με λείες πέτρες

Η εφεύρεση της τυπογραφίας, περί το 1450, αύξησε τη ζήτηση για χαρτί. Από το 1680 και έπειτα, αρχίζουν να χρησιμοποιούνται μηχανές, για να καλύψουν τις ανάγκες που είχαν δημιουργηθεί για μαζική παραγωγή χαρτιού. Για παράδειγμα, η μηχανή Hollander, που εμφανίστηκε στην Ολλανδία, αντικατέστησε σταδιακά τη χειροκίνητη διαδικασία πολτοποίησης, με το να αλέθει μηχανικά την πρώτη ύλη και ταυτόχρονα να χτυπάει τον χαρτοπολτό. Στην συνέχεια το 1798, παρουσιάζεται μια μηχανή που παράγει ρολά χαρτιού και το μέχρι τότε κολλάρισμα με ζωική κόλλα, αντικαθίσταται με κολλάρισμα από ρητίνη κωνοφόρων (κολοφώνιο) και στύψη. Το 1820 στις μηχανές παραγωγής χαρτιού προστίθενται θερμαινόμενοι κύλινδροι, ώστε να επιτυγχάνεται το στέγνωμα των ρολών. Φυσικά στη συνέχεια προστέθηκαν και οι αναγκαίοι αυτοματισμοί.

Επιπλέον από το μέσο του 18^{ου} αιώνα ξεκίνησε αναζήτηση για πιο οικονομικές πρώτες ύλες. Από εκεί προέκυψε η καταλληλότητα του ξυλοπολτού και ανακαλύφθηκε η δυνατότητα ανακύκλωσης παλαιού χαρτιού. Στο μέσο του 19^{ου} αιώνα καθιερώνεται ο ξυλοπολτός ως πρώτη ύλη και ακολουθείται όξινη μέθοδος προστασίας από την υγρασία, με την οποία όμως το παραγόμενο χαρτί δεν είχε καλή διάρκεια ζωής. Η μέθοδος αυτή τελικά αντικαταστάθηκε με άλλη αλκαλική. Το σύνολο του χαρτιού που παράγεται και χρησιμοποιείται σήμερα, για γραφή και εκτυπώσεις, να είναι αλκαλικό.

Η αρχική ιδέα για την παραγωγή χαρτιού, έχει μείνει αναλλοίωτη με το πέρασμα των χρόνων. Στόχος είναι η συνεχώς αυξανόμενη παραγωγή χαρτιού με ελαχιστοποίηση του κόστους και

παράλληλα η εύρεση φθηνών και εύχρηστων πρώτων υλών. Φυσικά το τελευταίο δεν επιφέρει πάντα θετικά αποτελέσματα στην τελική ποιότητα του χαρτιού. Οι μηχανές που λειτουργούν σήμερα, χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη το ξύλο, το οποίο πολτοποιείται με διάφορες μεθόδους. Ανάλογα την μέθοδο πολτοποίησης καθορίζονται και οι ιδιότητες του χαρτιού που παράγεται. Τα κυριότερα είδη πολτών είναι τα εξής:

- *Μηχανικός Πολτός (Mechanical Pulp)*: Πολτός που παρασκευάζεται από τη μηχανική επεξεργασία ξύλου διαφόρων ειδών. Οι μηχανικοί πολτοί περιέχουν συνήθως περισσότερη λιγνίνη σε σύγκριση με τους χημικούς πολτούς, πράγμα που τους καθιστά αποδοτικότερους σε τελικό προϊόν από τους δεύτερους. Για τον ίδιο λόγο όμως, παράγουν χαρτί χαμηλότερης ποιότητας, το οποίο κιτρινίζει πιο γρήγορα μετά την έκθεση του στο φως.
- *Χημικός Πολτός (Chemical Pulp)*: Πολτός που παρασκευάζεται από τη χημική επεξεργασία του ξύλου διαφόρων ειδών. Λόγω της χημικής επεξεργασίας αφαιρούνται μεγάλα ποσοστά λιγνίνης με αποτέλεσμα μείωση της απόδοσης. Το χαρτί που παράγεται σε αυτή την περίπτωση έχει καλύτερες μηχανικές αντοχές και οπτικές ιδιότητες σε σύγκριση με το αντίστοιχο που έχει παραχθεί από μηχανικό πολτό.
- *Ημιχημικός Πολτός*: Πρόκειται για χημικό πολτό, μέρος του οποίου έχει κατεργασθεί και μηχανικά ώστε η περιεχόμενη λιγνίνη να είναι περισσότερη και η απόδοση μεγαλύτερη.

2.5 Ραδιογραφία χαρτιού

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι για να εξετασθεί το χαρτί χωρίς να καταστραφεί. Ένα τρόπος είναι να χρησιμοποιηθεί υπέρυθρο, υπεριώδες ή ορατό φως ώστε να παρατηρηθεί η επιφάνεια του χαρτιού. Οι παρατηρήσεις αυτές μπορούν να γίνονται με γυμνό μάτι ή / και μπορούν να αποτυπωθούν σε φωτογραφίες, ψηφιακές ή αναλογικές ή σε φωτογραφικό φιλμ. Όταν η επιφάνεια του χαρτιού είναι καλυμμένη με μελάνι, μπορεί να παρεμποδίζεται η διάβαση του φωτός και έτσι η παραπάνω διαδικασία παρατηρήσεων να μην είναι επαρκής. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ραδιογραφία με φωτόνια χαμηλής ενέργειας, σχεδόν αποκλειστικά από κατάλληλες μηχανές ακτίνων -x, ώστε να παρατηρείται η εσωτερική δομή του χαρτιού χωρίς να καταστρέφεται. Για την πλήρη εξέταση ενός χαρτιού που περιλαμβάνει μελάνι και χρώματα, μπορεί να γίνει συνδυασμός μεθόδων και να χρησιμοποιηθεί και (καταστρεπτική ασφαλώς) χημική ανάλυση εκτός από τις οπτικές παρατηρήσεις και τη ραδιογραφία.

Η διαφορετική εξασθένιση των ακτίνων -x από διαφορετικά υλικά ή από υπάρχουσες ατέλειες στα υλικά, είναι ουσιώδης και για τη ραδιογραφία χαρτιού. Τα στοιχεία από τα

οποία αποτελείται το χαρτί, όπως εξάλλου έχει ήδη αναφερθεί, είναι κυρίως ο άνθρακας, το υδρογόνο και το οξυγόνο. Τα στοιχεία αυτά είναι ελαφρά, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι μόνο ακτίνες -x χαμηλής ενέργειας μπορούν να εξασθενήσουν στο χαρτί. Συνεπώς, λόγω της φύσης αλλά και της σύνθεσης του χαρτιού υπάρχουν περιορισμοί στο τι μπορεί να επιτευχθεί με την ραδιογραφία.

2.6 Χρήση πηγής ακτίνων -x

2.6.1 Γενικά

Υπάρχουν δυο βασικές μέθοδοι για τη χρήση ακτίνων -x στη ραδιογραφία του χαρτιού. Η πρώτη είναι, η χρήση ακτίνων -x χαμηλής ενέργειας (συμβατική ραδιογραφία), η οποία χρησιμοποιεί τάση πηγής το πολύ μεταξύ 5-30 kV. Η δεύτερη είναι με ακτίνες -x υψηλότερης ενέργειας. Σε αυτήν την περίπτωση, η πηγή χρησιμοποιείται για την δευτερογενή παραγωγή ηλεκτρονίων και η ραδιογραφία γίνεται είτε με αυτοραδιογραφία ηλεκτρονίων είτε με ραδιογραφία εξασθένισης ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια αυτοραδιογραφίας παράγονται από την αλληλεπίδραση των ακτίνων -x υψηλότερης ενέργειας: (α) ή με φύλλα μολύβδου στην επιφάνεια του χαρτιού, (β) ή με υλικά με μέγεθος νανοσωματιδίων που ήδη υπάρχουν μέσα στο χαρτί. Υπενθυμίζεται ότι πολλά από τα παλαιότερα χρώματα στο χαρτί είναι μολυβδούχα, πράγμα που προάγει την παραγωγή ηλεκτρονίων αυτού του είδους, καθώς επίσης και τα σημερινά χρώματα εκτυπωτικής τεχνολογίας laser είναι σιδηρούχα που δυνατόν να παράγουν και αυτά ηλεκτρόνια σε μικρότερο βαθμό. Τα ηλεκτρόνια για ραδιογραφία εξασθένισης ηλεκτρονίων παράγονται συνήθως με τη μέθοδο (α), δηλαδή από την αλληλεπίδραση των ακτίνων -x υψηλότερης ενέργειας με ένα λεπτό φύλλο μολύβδου που τοποθετείται πάνω στο χαρτί (βλ. λεπτομέρειες και στην παράγραφο 2.6.3).

2.6.2 Χρήση ακτίνων -x χαμηλής ενέργειας

Ο παράγοντας που καθορίζει αν οι ακτίνες -x μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη ραδιογραφία του χαρτιού είναι η κατάλληλη χαμηλή ενέργεια των φωτονίων τους καθώς η παραγωγή μιας καλής ραδιογραφικής εικόνας εξαρτάται άμεσα από την ικανότητα απορρόφησης φωτονίων. Φωτόνια ακατάλληλης χαμηλής ενέργειας απορροφούνται όλα ενώ φωτόνια ακατάλληλα υψηλότερης ενέργειας διαπερνούν όλα. Λόγω της φύσης του χαρτιού, το οποίο αποτελείται κατά βάση από κυτταρίνη, μόνο οι ακτίνες -x κατάλληλης χαμηλής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποδοτικά.

Παράλληλα είναι σημαντικό να τονιστεί πως το παράθυρο της μηχανής παραγωγής ακτίνων -x, σε αυτή την περίπτωση, θα πρέπει να είναι κατασκευασμένο κατά προτίμηση από υλικό

χαμηλού ατομικού αριθμού Z , όπως είναι το βηρύλλιο ($Z = 4$) αντί π.χ. του αλουμινίου με $Z = 13$. Ένα άλλο πρόβλημα που υπάρχει με τις ακτίνες $-x$ χαμηλών ενεργειών είναι ότι εξασθενούν ακόμα και στον αέρα κατά την διάρκεια της διαδρομής τους για τη ραδιογράφιση. Το γεγονός αυτό, θέτει περιορισμούς τόσο στην χαμηλότερη τάση (kV) όσο και στην μέγιστη απόσταση μεταξύ πηγής-φιλμ, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

2.6.3 Χρήση ακτίνων $-x$ υψηλότερης ενέργειας

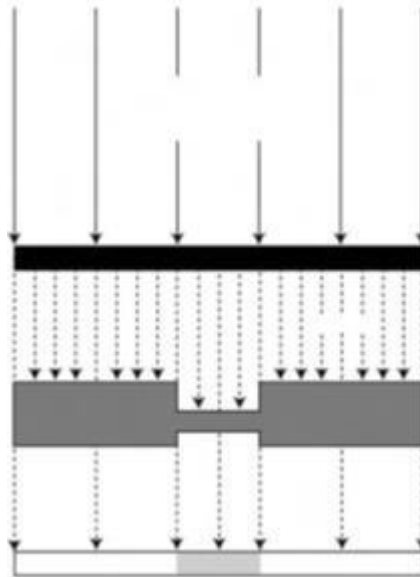
Αυτοραδιογραφία με χρήση ηλεκτρονίων

Η μέθοδος αυτή στα αγγλικά ονομάζεται electron emission autoradiography. Βαριά μεταλλικά στοιχεία όπως αυτά που μπορούν να υπάρχουν στο μελάνι, στα χρώματα ζωγραφικής και στις χρωστικές ουσίες που δίνουν χρώμα στο χαρτί καθώς και κάποια μεταλλικά νανοσωματίδια στο εσωτερικό του χαρτιού, μπορούν να αλληλεπιδρούν με ακτίνες $-x$ υψηλότερης ενέργειας. Από τις αλληλεπιδράσεις παράγονται και ηλεκτρόνια είτε λόγω σκεδάσεων είτε λόγω φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Τα ηλεκτρόνια αυτά προσβάλλουν το φιλμ και επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ραδιογραφικής εικόνας. Για την τεχνική αυτή απαιτούνται κατάλληλο φιλμ και ακτίνες $-x$ υψηλότερης ενέργειας που παράγονται με τάση περί τα 200 - 300 kV. Επειδή σε αυτή την περίπτωση οι ακτίνες $-x$ χαμηλής ενέργειας που παράγονται ταυτόχρονα είναι άχρηστες, χρησιμοποιείται ειδικό φίλτρο χαλκού με πάχος 5 - 10 mm και φίλτρο αλουμινίου με πάχος ~ 2 mm για την απορρόφησή τους και την κατάλληλη ενεργειακή "σκλήρυνση" του φάσματος των παραγόμενων φωτονίων. Μέσω αυτής της μεθόδου μπορεί να γίνει αναγνώριση των βαρέων προσμίξεων και των βαρέων μεταλλικών χρωστικών του χαρτιού. Η τεχνική αυτή δεν θα απασχολήσει σε αυτή τη Μεταπτυχιακή Εργασία.

Ραδιογραφία εξασθένησης με χρήση ηλεκτρονίων

Είναι γνωστό ότι λόγω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου φωτόνια κατάλληλης υψηλής ενέργειας μπορούν να αλληλεπιδράσουν με μόλυβδο και να παράγουν ηλεκτρόνια. Το φαινόμενο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη ραδιογράφιση χαρτιού μικρού ή πολύ μικρού πάχους για τη μελέτη της μικροσκοπικής δομής του. Για το σκοπό μπροστά από το χαρτί τοποθετείται ένα φύλλο μολύβδου μικρού πάχους (< 0.5 mm). Οι ακτίνες $-x$, πρώτα διέρχονται από το φύλλο μολύβδου, στη συνέχεια από το χαρτί έπειτα προσβάλλουν το φιλμ. Εννοείται ότι το φύλλο μολύβδου, το χαρτί και το φιλμ θα πρέπει να βρίσκονται σε πολύ καλή επαφή μεταξύ τους. Οι ακτίνες $-x$ που προσβάλλουν αυτό το σύστημα, λόγω της υψηλής ενέργειάς τους δεν δημιουργούν εικόνα στο φιλμ, δηλ. απλώς διαπερνούν το φιλμ

χωρίς να αλληλεπιδράσουν. Από την άλλη αυτές οι ακτίνες -x όταν προσπίπτουν στο φύλλο μολύβδου παράγουν ηλεκτρόνια. Ένα μικρό αλλά σημαντικό ποσοστό αυτών των ηλεκτρονίων περνά (εξασθενεί) μέσα από το χαρτί και δημιουργεί μια εικόνα στο φιλμ. Τα ηλεκτρόνια δηλαδή λόγω της σωματιδιακής τους φύσης δεν μπορούν να διαπεράσουν το φιλμ και αλληλεπιδρούν με αυτό. Η τεχνική απεικονίζεται στην Εικόνα 2.1. Η τεχνική αυτή δεν θα απασχολήσει σε αυτή τη Μεταπτυχιακή Εργασία.



Εικ. 2.1 Ακτίνες -x κατάλληλα υψηλής ενέργειας (τόξα) προσβάλλουν φύλλο από μολύβδο (μαύρη λωρίδα). Από την αλληλεπίδραση παράγονται ηλεκτρόνια (διακεκομμένα τόξα), τα οποία προσβάλλουν το χαρτί (γκρι λωρίδα) και εξασθενούν μέσα από αυτό. Τα ηλεκτρόνια που διαπερνούν το χαρτί προσβάλλουν το φιλμ (λευκή λωρίδα) και ανάλογα με το πλήθος τους αλληλεπιδρούν με αυτό δημιουργώντας ραδιογραφική εικόνα (γκρι τμήμα στο φιλμ). Η εικόνα αποδίδει το τμήμα του χαρτιού που έχει μικρότερο πάχος (από το διαδίκτυο).

2.7 Χρήση πηγής -β σωματιδίων

Εναλλακτικά με τα παραπάνω υπάρχει και η μέθοδος ραδιογράφησης χαρτιού μικρού πάχους με τη βοήθεια πηγής -β σωματιδίων, συνήθως C-14, τα οποία δρουν στο φιλμ όπως τα ηλεκτρόνια. Το φιλμ που χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση μπορεί να είναι οποιαδήποτε φιλμ βιομηχανικής ραδιογραφίας. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει μειονεκτήματα ως εξής:

(α) Οι πηγές -β σωματιδίων είναι συνήθως σημειακές, οπότε η επιφάνεια του χαρτιού που μπορεί να ραδιογραφηθεί είναι περιορισμένη. Αντίθετα, με τις μεθόδους των ηλεκτρονίων η

επιφάνεια χαρτιού που μπορεί να ραδιογραφηθεί δεν περιορίζεται από το μέγεθος της πηγής, με αποτέλεσμα να μπορούν να εξετάζονται μεγάλες επιφάνειες.

(β) Ο αναγκαίος χρόνος έκθεσης είναι αρκετές ώρες. Αντίθετα, για τις μεθόδους των ηλεκτρονίων αρκούν μερικά λεπτά έκθεσης κάτι το οποίο επιτρέπει να γίνονται πολλές διαδοχικές εκθέσεις σε μικρό χρόνο. Έτσι, μπορούν σύντομα να ραδιογραφηθούν αρκετές σελίδες ενός βιβλίου, χρησιμοποιώντας διαφορετικό φιλμ για κάθε μια σελίδα.

2.8 Επιλογή φιλμ

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να χρησιμοποιείται το κατάλληλο φιλμ για τη ραδιογραφία του χαρτιού. Τα φιλμ βιομηχανικής ραδιογραφίας, χωρίς να αποκλείονται, δεν είναι και τα απολύτως κατάλληλα για ραδιογραφίες χαρτιού με ακτίνες -x χαμηλών ενεργειών. Σε αυτή την περίπτωση συνιστώνται τα φιλμ που χρησιμοποιούνται για τις μαστογραφίες. Παρόλα αυτά, τα φιλμ αυτά είναι δύσκολο να βρεθούν πλέον ως εμπορικά διαθέσιμα διότι η μαστογραφία σε φιλμ έχει σχεδόν πλήρως αντικατασταθεί από τη ψηφιακή μαστογραφία. Τα φιλμ μαστογραφίας έχουν το πλεονέκτημα ότι έχουν σχεδιαστεί για να παράγουν υψηλό βαθμό αντίθεσης προκειμένου να απεικονίζουν μικροσκοπικές περιοχές ασβεστοποίησης σε μαλακούς ιστούς. Τα φιλμ μαστογραφίας είναι καλυμμένα με ραδιογραφικό υλικό αλληλεπίδρασης με φωτόνια (emulsion), μόνο από την εμπρός όψη (αυτή που βλέπει στο χαρτί) και όχι και από τις δύο όψεις της βάσης τους. Έχει διαπιστωθεί ότι η εικόνα που αποδίδουν για χαρτί τα φιλμ μαστογραφίας είναι πολύ καλή, παρόλο που το emulsion υπάρχει μόνο στην εμπρός όψη. Στη Μεταπτυχιακή Εργασία χρησιμοποιούνται μόνο βιομηχανικά φιλμ ραδιογραφίας διπλής όψεως σειράς IX, εταιρείας κατασκευής FUJI. Τα φιλμ αυτά είναι ισοδύναμα με τα βιομηχανικά φιλμ σειράς D της εταιρείας κατασκευής AGFA. Σημειώνεται ότι τα φιλμ μαστογραφίας μονής όψεως συστήνονται ως πολύ καλή επιλογή και για ραδιογραφία με χρήση ηλεκτρονίων. Παρόλα αυτά, στην περίπτωση αυτή παρόμοια αποτελέσματα εικόνας μπορεί επίσης να δώσουν και τα βιομηχανικά φιλμ διπλής όψεως.

2.9 Το πρόβλημα της οπισθοσκέδασης

Ένας από τους εχθρούς της ραδιογραφικής εικόνας είναι η οπισθοσκέδαση φωτονίων στις επιφάνειες που βρίσκονται πίσω από το φιλμ κατά τη διάρκεια της έκθεσης. Τα φωτόνια αυτά αλληλεπιδρούν με το φιλμ αλλοιώνοντας τη ραδιογραφική εικόνα. Το φαινόμενο είναι πολύ ενοχλητικό για τη ραδιογραφία χαρτιού. Η τυποποιημένη μέθοδος αντιμετώπισης του φαινομένου, είναι να τοποθετείται μεταξύ του φιλμ και των επιφανειών που βρίσκονται πίσω από αυτό, φύλλο ή φύλλα μολύβδου, τα οποία εμποδίζουν τα φωτόνια από οπισθοσκέδαση να

φθάσουν στο φιλμ. Ειδικά αν το φιλμ είναι μαστογραφίας μονής όψεως τότε αυτά τα φύλλα μολύβδου δεν είναι απαραίτητα, διότι η καταγραφή φωτονίων από οπισθοσκέδαση δεν είναι έντονη στην εμπρός όψη γιατί τα φωτόνια αυτά είναι μικρής ενέργειας και δύσκολα διαπερνούν τη βάση του φιλμ για να αλληλεπιδράσουν. Σε περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται βιομηχανικά φιλμ ραδιογραφίας διπλής όψης και δεν μπορούν να χρησιμοποιούνται τέτοια φύλλα μολύβδου, θα γίνει καταγραφή φωτονίων από οπισθοσκέδαση στην πίσω όψη. Το πρόβλημα τότε αντιμετωπίζεται ως εξής:

Για χειροκίνητη εμφάνιση

(α) Εμφανίζεται μόνο η όψη του φιλμ που είναι σε επαφή με το χαρτί. Η εμφάνιση της πίσω όψης μπορεί να αποτραπεί, αν πριν από την επεξεργασία καλυφθεί, η συγκεκριμένη πλευρά, με μια αδιαφανή πλαστική σελίδα η οποία έχει κολληθεί με αδιάβροχη ταινία.

(β) Η σελίδα αυτή, αφαιρείται πριν τη στερέωση και η τελική εικόνα που προκύπτει μετά τη στερέωση απεικονίζει μόνο την εμπρός όψη του φιλμ. Η πίσω όψη, αφού δεν έχει εμφανισθεί απομακρύνεται από το φιλμ με τη βοήθεια της χημικής δράσης του στερεωτή.

Για αυτόματη εμφάνιση

(α) Εμφανίζονται και οι δύο όψεις του φιλμ κατά τα γνωστά.

(β) Καλύπτεται η εμπρός εμφανισμένη πλέον εμπρός όψη με μια πλαστική σελίδα, η οποία έχει κολληθεί με αδιάβροχη ταινία.

(γ) Βυθίζεται το φιλμ σε διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου. Το υδροξείδιο μαλακώνει την πίσω όψη αφήνοντας ακέραιη την εμπρός που είναι προστατευμένη.

(δ) η μαλακιά πίσω όψη μπορεί πλέον να αφαιρεθεί με απόξεση.

Η παραπάνω διαδικασία προτείνεται μόνο ως έσχατη λύση, καθώς είναι μια ανεπιθύμητη και "βρώμικη" μέθοδος και φυσικά, με αυτό τον τρόπο μπορεί να προκληθεί ζημία στην εμπρός όψη του φιλμ. Επίσης, το υδροξείδιο του νατρίου είναι διαβρωτικό και θα πρέπει να λαμβάνονται ειδικά μέτρα προστασίας κατά την χρήση του.

2.10 Παραδείγματα εφαρμογής ραδιογραφίας χαρτιού

Η ραδιογραφία του χαρτιού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορες μελέτες. Ενδεικτικά αναφέρονται κάποιες όπως παρακάτω.

(α) Φυσικές ιδιότητες χαρτιού

Τόσο η ραδιογραφία με ακτίνες -x όσο και με ηλεκτρόνια αλλά και με -β σωματίδια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της πυκνότητας του χαρτιού και τον τρόπο κατανομής των ινών μέσα σε αυτό. Αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο όποτε υπάρχει ανάγκη για σύγκριση διαφορετικών χαρτιών ή σε μελέτες αυθεντικότητας. Για παράδειγμα, για τους σκοπούς αυτούς ακριβώς, η Σουηδική βιομηχανία χαρτοπολτού και χαρτιού, έχει αναπτύξει προγράμματα λογισμικού, τα οποία αναλύουν τις ψηφιοποιημένες εικόνες από ραδιογράφιση με -β σωματίδια.

(β) Υδατογραφίες ή υδατόσημα

Τα υδατόσημα σε χαρτιά, εκτός αν έχουν τυπωθεί επίτηδες με χρώμα είναι συνήθως αόρατα ή δυσδιάκριτα. Παρόλα αυτά μπορούν να αποκαλυφθούν με ραδιογραφικές τεχνικές. Η μελέτη των υδατοσήμων και ιδιαίτερα σημαντικό μέρος της μελέτης των εκτυπώσεων και των σχεδίων. Πολλά χαρτιά διαφόρων καλλιτεχνών, φέρουν ειδικά υδατόσημα. Η σύγκριση των υδατοσήμων, μπορεί να βοηθήσει στο να ταυτισθεί μία εκτύπωση ή ένα καλλιτεχνικό έργο σε χαρτί με μια συγκεκριμένη περίοδο ή τοποθεσία. Στο παρελθόν τα υδατόσημα καταγράφονταν με ιχνογραφία σε διαφανές ριζόχαρτο πάνω από το χαρτί, το οποίο είχε τοποθετηθεί σε φωτισμένη επιφάνεια (backlight). Αυτή θεωρείται κάπως υποκειμενική μέθοδος καταγραφής και δεν είναι κατάλληλη σε όλες τις περιπτώσεις, καθώς τα υδατόσημα δεν είναι πάντα ορατά στο φως. Επίσης, κάποιες φορές τα υδατόσημα, μπορεί να καλύπτονται από κάποιο κείμενο ή ζωγραφική. Για οποιοδήποτε από τους παραπάνω λόγους, όταν τα υδατόσημα είναι δύσκολο να παρατηρηθούν με γυμνό μάτι, η καταλληλότερη μέθοδος είναι η ραδιογραφία. Η ραδιογραφία, παρέχει μια μόνιμη και ακριβή καταγραφή των υδατοσήμων σε φιλμ. Το θέμα των υδατοσήμων σε χαρτί και χαρτονομίσματα είναι από τα κυρίαρχα στη ραδιογραφία χαρτιού. Αρκετά περισσότερα μπορεί να δει για παράδειγμα ο αναγνώστης στον van Aken (2003) και στον Zhang (2019).

(γ) Χρώματα και μελάνια

Υπάρχουν πολλές ομοιότητες ανάμεσα στην ραδιογραφία ενός έργου ζωγραφικής πάνω σε χαρτί και ενός έργου πάνω σε καμβά ή πάνελ, κυρίως γιατί χρησιμοποιούνται πολλά ίδια χρώματα. Ωστόσο, υπάρχουν κάποιες σημαντικές διαφορές. Τα χρώματα ακουαρέλας συνήθως εφαρμόζονται σε πολύ λεπτά στρώματα πάνω στο χαρτί ως έχει. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, να μην μπορεί το χρώμα αυτού του είδους να διακριθεί εύκολα με ραδιογραφικές τεχνικές, χωρίς αυτό να αποκλείεται. Άλλες τεχνικές ζωγραφικής, όπως

κάποιες ελαιογραφίες, χρησιμοποιούν πολύ πιο παχιά στρώματα χρώματος και έτσι τα χρώματα αυτά είναι πιο εύκολο να αποτυπωθούν ραδιογραφικά.

Η ραδιογραφία με ακτίνες -x χαμηλών ενεργειών και η ραδιογραφία με ηλεκτρόνια είναι συνήθως συμπληρωματικές σε πολλές περιπτώσεις. Η πρώτη μπορεί να μας δείξει ξεκάθαρα το χρώμα αλλά όχι τα υδατόσημα, ενώ η δεύτερη μπορεί να αποκαλύψει τα υδατόσημα αλλά όχι το χρώμα. Οι ραδιογραφίες μπορούν επίσης να αποκαλύψουν πληροφορίες που είναι κρυμμένες (π.χ. τη βάση μιας ζωγραφικής) αλλά το επίπεδο επιτυχίας ποικίλλει. Η ραδιογραφία μπορεί επίσης να δώσει στοιχεία ώστε να ταυτοποιηθούν οι χρωστικές που χρησιμοποιούνται στα μελάνια. Για παράδειγμα, στα έργα τέχνης πριν από το 1870, η ποικιλία των χρωστικών που ήταν διαθέσιμες, ήταν αρκετά περιορισμένη και έτσι η ταυτότητα του χρώματος μπορούσε να προσδιοριστεί μόνο με βάση την απόχρωση. Η πιθανότητα σωστού προσδιορισμού ήταν αρκετά μεγάλη. Όμως η χρήση της ραδιογραφίας παρέχει επιπρόσθετες πληροφορίες ελαττώνοντας τον αριθμό των πιθανών χρωστικών. Στις γκραβούρες, που είναι εκτυπώσεις με πολύ μελάνι ή χρώμα, τα κόκκινα και ροζ χρώματα είναι αραιότερα λόγω οργανικής προέλευσης και μπορεί να είναι διαφανή στις ραδιογραφίες. Αντίθετα οι πορτοκαλί περιοχές είναι χρώματα πυκνότερα με βάση από πιθανώς βαριά ανόργανα υλικά και εμφανίζονται να εξασθενούν τις ακτίνες -x.

Φυσικά κατά την διενέργεια μη καταστροφικής ανάλυσης χρωστικών σε χαρτί, η ραδιογραφία αποτελεί μόνο μέρος των δεδομένων που χρησιμοποιούνται, για τον καθορισμό της πιθανής σύστασής τους. Για να ολοκληρωθεί η διερεύνηση θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν και άλλες τεχνικές όπως για παράδειγμα η φασματοσκοπία XRF. Ειδικά για τις περιοχές χαρτιού με πορτοκαλί χρώμα η τεχνική αυτή μπορεί να αποκαλύψει και να διαχωρίσει κάδμιο, μόλυβδο, βάριο χρώμιο και ίχνη σιδήρου. Έτσι μπορεί κάποιος να καταλήξει ότι το πορτοκαλί χρώμα οφείλεται π.χ. σε οξειδίο του μολύβδου

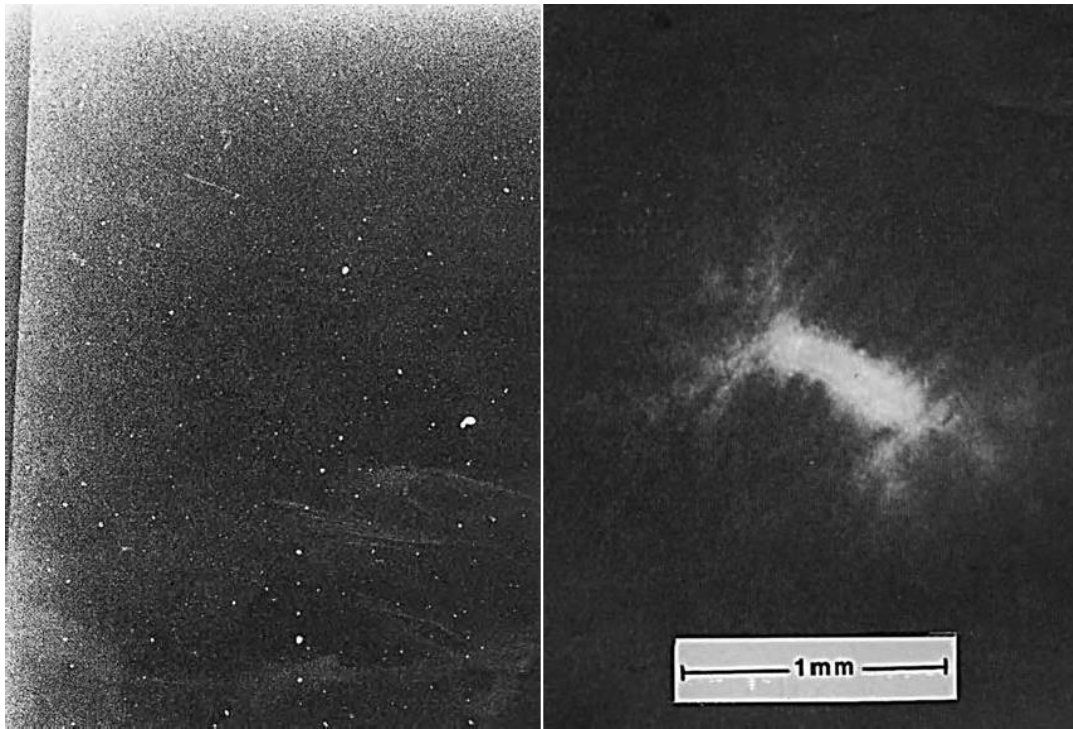
(δ) Μεταλλικά σωματίδια στο χαρτί

Υπάρχουν περιπτώσεις που χαρτιά εμφανίζουν διάφορες καφέ κηλίδες. Το φαινόμενο είναι γνωστό με το όνομα foxing (από το καφέ χρώμα της αλεπούς). Το φαινόμενο αυτό προκαλείται από δυο βασικούς μηχανισμούς:

- (1) είτε από οξείδωση μεταλλικών σωματιδίων στο χαρτί,
- (2) είτε από μύκητες

Η ραδιογραφία, σε τέτοιες περιπτώσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διάκριση μεταξύ διαφόρων αιτιών του foxing, καθώς τα μεταλλικά σωματίδια αποτυπώνονται στην

ραδιογραφία, ενώ οι μύκητες όχι. Στην Εικόνα 2.2 φαίνεται η ραδιογραφική απεικόνιση από ένα ζωγραφικό έργο σε χαρτί του J.M.W Turner (1775 - 1851), το οποίο παρουσίαζε foxing. Η ραδιογράφιση του έργου αποκάλυψε πως το χαρτί ήταν γεμάτο με μικρά κομμάτια από ακτινογραφικά πυκνό υλικό που διακρίνεται ως λευκά ρινίσματα, πιθανότατα επομένως ρινίσματα σιδήρου. Στην συνέχεια, με περαιτέρω ανάλυση βρέθηκε πως πράγματι τα σωματίδια αυτά ήταν πλούσια σε σίδηρο.

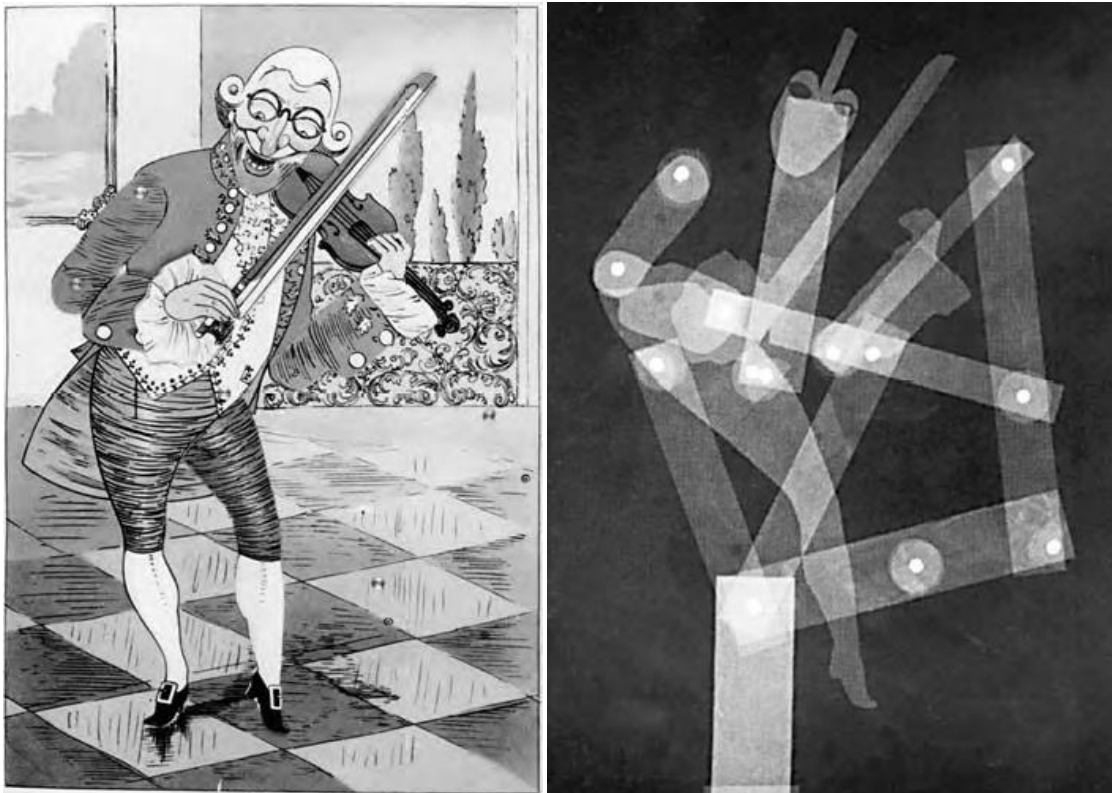


Εικ. 2.2 Ραδιογραφική απεικόνιση από ένα ζωγραφικό έργο σε χαρτί του J.M.W. Turner (1775 - 1851), διακρίνονται ως λευκά σημάδια ρινίσματα σιδήρου (Lang, 2005)
ε) Μελέτες κολλάζ

Ένα "κολλάζ" φτιάχνεται από υλικά, τα οποία πολλές φορές είναι εντελώς διαφορετικά μεταξύ τους. Η ραδιογραφία είναι μια εξαιρετική μέθοδος για την μελέτη τέτοιων κατασκευών καθώς μπορεί να μας δώσει πληροφορίες σχετικά με όλα τα υλικά που μπορεί να έχουν χρησιμοποιηθεί σε κάποιο κολλάζ. Με τη βοήθεια της ραδιογραφίας τα κατώτερα στρώματα των υλικών μπορούν να διακριθούν εξίσου καλά με τα ανώτερα. Μερικές φορές, μπορεί να είναι ορατές ακόμα και οι κόλλες που χρησιμοποιούνται για την ένωση των υλικών. Αν το κολλάζ είναι από χαρτί και επειδή, συνήθως σε τέτοιες περιπτώσεις το χαρτί που χρησιμοποιείται είναι αρκετού πάχους, η ραδιογράφησή του είναι αποκαλυπτική για τη σύνθεση και την κατασκευή του.

(στ) Κατασκευές από χαρτί

Το χαρτί χρησιμοποιείται εκτός από κολλάζ και σε διάφορες κατασκευές, μια από αυτές είναι και το λεγόμενο κινούμενο βιβλίο (moving book), το οποίο ήταν ιδιαίτερα δημοφιλές στην βικτωριανή εποχή. Στις συγκεκριμένες βικτωριανές κατασκευές, ο αναγνώστης μπορούσε να μετακινήσει κατάλληλα ένα μέρος της χάρτινης κατασκευής. Ως αποτέλεσμα ταυτόχρονα κινούνταν άλλα χάρτινα μέρη δίνοντας κάποιο παραστατικό διδακτικό ή καλλιτεχνικό αποτέλεσμα. Το χαρτί και σε αυτές τις κατασκευές είναι αρκετά παχύ ώστε να μην διαπερνάται από το φως. Μέσω της ραδιογραφίας, αποκαλύπτεται ο μηχανισμός των κατασκευών αυτού του είδους. Ένα παράδειγμα τέτοιας κατασκευής διακρίνεται αριστερά στην Εικόνα 2.3. Δεξιά στην ίδια Εικόνα φαίνεται η ραδιογραφία της κατασκευής. Είναι φανερό ότι όταν κινηθεί η κατασκευή ο εικονιζόμενος βιολιστής "παίζει" το όργανο και "χορεύει". Τα διάφορα λευκά τμήματα που απεικονίζονται στην ραδιογραφία είναι κυρίως μεταλλικά καρφιά σύνδεσης και στήριξης και παχύτερα χάρτινα σημεία με κόλλα.



Εικ. 2.3 Βικτωριανή χάρτινη κατασκευή από moving book (αριστερά) και η ραδιογραφία της (δεξιά). Από τον Lang (2005)

2.11 Σχόλια και συμπεράσματα

Έχει αποδειχθεί ότι η βιομηχανική ραδιογραφία είναι αποφασιστικό εργαλείο μη καταστρεπτικού ελέγχου για τη σύγχρονη παραγωγή και έλεγχο αντικειμένων, των οποίων ο

ρόλος είναι αποφασιστικός για τη σύνθεση ασφαλών συστημάτων όπως π.χ. αυτά των πτήσεων των πυρηνικών αντιδραστήρων κ.ά. Όμως από τη στιγμή που αναδείχθηκαν τα πλεονεκτήματα της βιομηχανικής ραδιογραφίας για την παραγωγή, ταυτόχρονα εφαρμόστηκε και για την ανάλυση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς. αντικειμένων. Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται μεταλλικά αντικείμενα και καλλιτεχνικά έργα παντός είδους, κεραμικά, έργα ζωγραφικής και παλαιά χαρτιά τυπωμένα ή ζωγραφισμένα. Μπορεί κανείς να πει σήμερα, με δεδομένο ότι το βιομηχανικό χαρτί παντός είδους και οι εκτυπώσεις σε αυτό έχουν πλέον τυποποιηθεί ότι το ενδιαφέρον για ραδιογράφιση σύγχρονου χαρτιού είναι μάλλον περιορισμένο. Από την άλλη, το ενδιαφέρον για ραδιογράφιση χαρτιού παλαιότερου του 20^{ου} αιώνα παραμένει έντονο. Με τη ραδιογράφιση τέτοιου χαρτιού επιτυγχάνεται χρονολόγηση, ταύτιση του τόπου παραγωγής, αποκάλυψη της εσωτερικής του δομής και εκτίμηση της παραμένουσας μηχανικής του αντοχής, αποτύπωση υδατοσήμεων, σύνδεση των υδατοσήμεων με χρηματοδότες, καλλιτέχνες ή ιδιοκτήτες του εξεταζόμενου χαρτιού, αποκάλυψη χρωματικών στρωμάτων εικόνων, αποκάλυψη επιζωγραφισμένων εικόνων, διαπίστωση ασθενειών, όπως foxing λόγω μυκήτων και άλλα μερικά από τα οποία παρουσιάστηκαν προηγούμενα. Επιπλέον, η έκθεση του παλαιού χαρτιού σε ακτίνες -x έχει δοκιμαστεί ως μέθοδος αποστείρωσης αντί της ανοξίας. Όπως και για τη ραδιογράφιση οποιουδήποτε άλλου υλικού, έτσι και για τη ραδιογράφιση χαρτιού με ακτίνες -x, το πλέον απαραίτητο εργαλείο, κυρίως όταν η ραδιογράφιση γίνεται με φιλμ, είναι το διάγραμμα έκθεσης. Με τη βοήθεια του διαγράμματος αυτού προσδιορίζεται η αναγκαία έκθεση σε ακτίνες -x προκειμένου να ληφθεί καλή ραδιογραφική εικόνα, σε συνάρτηση με το πάχος. Διάγραμμα έκθεσης για ραδιογράφιση χαρτιού δεν υπάρχει στην βιβλιογραφία. Δεδομένου ότι η Ελλάδα είναι χώρα, στην οποία υπάρχει σημαντική πολιτιστική κληρονομιά που βασίζεται στο παλαιό χαρτί, κυρίως θρησκευτικά βιβλία και αναγνώσματα μεγάλης αξίας, χειρόγραφα, εκτυπωμένα, ζωγραφισμένα ή επιζωγραφισμένα ή παλίμψηστα, με ποικίλες βιβλιοδεσίες βυζαντινής ή δυτικότροπης τεχνικής, αποφασίσθηκε στο πλαίσιο αυτής της Μεταπτυχιακής Εργασίας να κατασκευασθούν τέτοια διαγράμματα έκθεσης για διάφορα βιομηχανικά ραδιογραφικά φιλμ. Με αυτόν τον τρόπο το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ, αν ποτέ προκύψει θα μπορεί να προσφέρει ευκολότερα υπηρεσίες ραδιογράφισης χαρτιού, βιβλίων και άλλων τέτοιων παρόμοιων συνθέσεων. Στο επόμενο Κεφάλαιο 3, και προτού πραγματοποιηθούν τα σχετικά πειράματα για τα διαγράμματα έκθεσης δίνονται τα αναγκαία στοιχεία από τη θεωρία της ραδιογραφίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

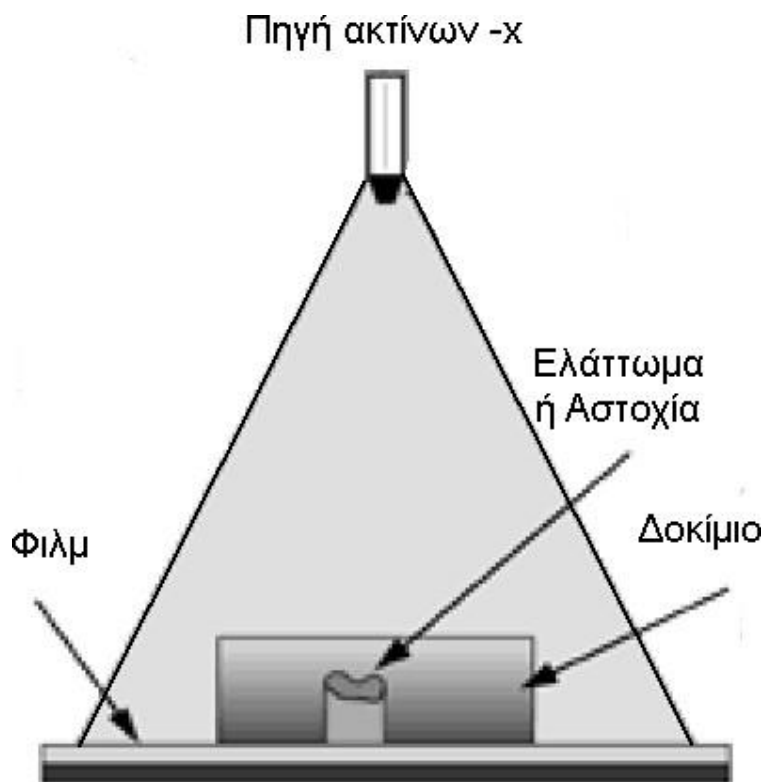
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το Κεφάλαιο γίνεται σύντομη αναφορά στην ανακάλυψη της ραδιογραφίας, τις φυσικές αρχές της, στον εξοπλισμό που απαιτείται, στον τρόπο που εκτελείται, στους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη μορφή και την ποιότητα της ραδιογραφικής εικόνας και στον τρόπο που υπολογίζονται οι αναγκαίες ρυθμίσεις του εξοπλισμού, ανάλογα με το τι και πως πρέπει να ραδιογραφηθεί. Το κείμενο που ακολουθεί βασίζεται πέρα από το διδακτικό υλικό του μαθήματος "Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι Υλικών με Μεθόδους Πυρηνικής Τεχνολογίας" στο πλαίσιο του ΔΠΜΣ του ΕΜΠ "Εφαρμοσμένη Μηχανική", εν μέρει και στις ακόλουθες βιβλιογραφικές αναφορές: Quin (1980), CGSB (1981), Moore (2002), Lang (2005), Fujifilm (2009), Παπαδόπουλος (2014) και Αναγνώστου (2020). Αυτούσια τμήματα από την πιο πάνω βιβλιογραφία συμπεριλαμβάνονται αναπόφευκτα ως συνδετικός κρίκος μεταξύ του 2^{ου} και του επόμενου 4^{ου} Κεφαλαίου στο οποίο δίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα. Πιο αναλυτικά:

Οι ακτίνες -x ανακαλύφθηκαν το 1895 από τον Roentgen (1845-1923). Ως αποτέλεσμα αυτής της ανακάλυψης, ο Roentgen άρχισε να πειραματίζεται τοποθετώντας δοκίμια μεταξύ της λυχνίας παραγωγής ακτίνων -x και ενός πίνακα επικαλυμμένου με φωτοευαίσθητο υλικό και έτσι πέτυχε να δημιουργήσει τις πρώτες εργαστηριακές ραδιογραφίες, συμπεριλαμβανομένης και της ακτινογραφίας της παλάμης της συζύγου του. Στην αρχή οι ακτίνες -x χρησιμοποιήθηκαν κυρίως στην ιατρική. Στον τομέα του Μη Καταστροφικού Ελέγχου, τα πρώτα πειράματα ραδιογραφίας μετάλλων πραγματοποιήθηκαν από τον H.H. Lester στις αρχές της δεκαετίας του 1920. Η σημασία των ακτίνων -x και της ραδιογραφίας για τον Μη Καταστροφικό Έλεγχο των υλικών δεν έγινε πλήρως γνωστή, ούτε η διαθέσιμη τεχνολογία χρησιμοποιήθηκε ευρέως, μέχρι τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο και έως και σήμερα, τόσο η κοινωνία, όσο και ο επιστημονικός και τεχνολογικός κόσμος είναι εξοικειωμένοι με τις ιατρικές και τις βιομηχανικές χρήσεις των ακτίνων -x. Από τις ιατρικές χρήσεις, υπάρχει πλέον σχεδόν σε όλους η ίδια αντίληψη ότι η ραδιογραφία μπορεί να δώσει δισδιάστατες εικόνες του εσωτερικού της ύλης, που σε

άλλη περίπτωση θα ήταν αόρατο, σε πραγματικές διαστάσεις. Στις εικόνες αυτές, όπως μπορούν να αποτυπωθούν σε ένα απλό μαυρόασπρο φωτογραφικό φιλμ, το οποίο παίζει το ρόλο του πίνακα του Roentgen, οι πυκνότερες περιοχές, όπως τα οστά, ξεχωρίζουν από τους μαλακούς ιστούς ως πιο φωτεινές αποτυπώσεις, δηλαδή ως επιφάνειες που δέχθηκαν λιγότερα φωτόνια, λόγω της υψηλότερης πυκνότητας των οστών, η οποία εμπόδισε αρκετά από τα φωτόνια των ακτίνων -x να τα διασχίσουν. Αντίθετα, οι μαλακότερες περιοχές, όπως οι μύες ή τα όργανα, ξεχωρίζουν από τα οστά, ως σκοτεινότερες αποτυπώσεις, λόγω της χαμηλότερης πυκνότητας των ιστών, η οποία επέτρεψε σε πολλά από τα φωτόνια των ακτίνων -x να τους διασχίσουν και να προσβάλλουν το φιλμ μαυρίζοντάς το. Η γενική διάταξη της πηγής ακτίνων -x, του ραδιογραφούμενου αντικειμένου και του φιλμ διακρίνεται στην Εικόνα 3.1



Εικ. 3.1: Γενική διάταξη της πηγής ακτίνων -x, ραδιογραφούμενου αντικειμένου και φιλμ (Quinn, 1980)

Συμπερασματικά, η ραδιογραφία προσφέρει τη δυνατότητα απόκτησης μιας καλής γνώσης της εσωτερικής δομής αντικειμένων με μη καταστρεπτικό τρόπο. Τα αντικείμενα αυτά μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικής φύσης, όπως π.χ. το ίδιο το ανθρώπινο σώμα και οι ολοκληρωμένες συνθέσεις μηχανολογικών εξαρτημάτων. Δεδομένου ότι η λήψη της εικόνας ή των εικόνων της εσωτερικής δομής γίνεται χωρίς

να προκληθεί βλάβη στο αντικείμενο είναι εύκολο να κατανοηθεί γιατί η ραδιογραφία χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σε κρίσιμους τομείς της βιομηχανίας, όπως οι πτητικές συσκευές, οι πυρηνικοί αντιδραστήρες, οι αγωγοί υγρών και αερίων κλπ. Τα τελευταία χρόνια η ραδιογραφία έχει βρει έδαφος εφαρμογής και στη μελέτη της εσωτερικής δομής αντικειμένων πολιτιστικού ενδιαφέροντος. Στο πλαίσιο αυτό φαίνεται ότι η ραδιογραφία είναι σε θέση να απαντήσει σε πολλές ερωτήσεις σχετικά με την κατασκευή, τη χρήση και την κατάσταση συντήρησης πολλών αντικειμένων τέτοιου ενδιαφέροντος. Για παράδειγμα μπορεί να διαπιστώσει επιζωγραφήσεις σε πίνακες, κρυμμένα αντικείμενα σε φαινομενικά αδιατάρακτες κατασκευές από ξύλο κ.ά. Σε αρκετές περιπτώσεις ενδιαφέρει η ραδιογράφιση αντικειμένων από χαρτί, για να διαπιστωθεί π.χ. πως είναι δεμένο ένα βιβλίο χωρίς αυτό να ανοίξει, ή άλλες τέτοιες λεπτομέρειες που παρουσιάστηκαν ως παραδείγματα στο Κεφάλαιο 2.

3.2 Παραγωγή ακτίνων -x

Σύμφωνα με την πλέον διαδεδομένη τεχνική, οι ακτίνες -x παράγονται στη μεταλλική άνοδο μιας ειδικής λυχνίας κενού, η οποία ονομάζεται και λυχνία Coolidge, προς τιμήν του εφευρέτη της. Η παραγωγή των ακτίνων συμβαίνει όταν στην άνοδο προσπίπτουν ηλεκτρόνια υψηλής ταχύτητας, τα οποία εκπέμπονται από κατάλληλη κάθοδο και επιταχύνονται προς αυτή με την επιβολή υψηλής τάσης. Η σχετική αλληλεπίδραση ονομάζεται πέδηση ακτινοβολίας (Bremsstrahlung), οι λεπτομέρειες της οποίας δεν θα παρουσιασθούν. Οι ακτίνες -x, ως φωτόνια, χαρακτηρίζονται από την ενέργεια τους E , η οποία συνήθως δίνεται σε keV.

Στο προσβαλλόμενο από τα ηλεκτρόνια γεωμετρικό κέντρο της ανόδου, τοποθετείται μικρός στόχος από υλικό υψηλού σημείου τήξης και μεγάλου μαζικού αριθμού που είναι καταλληλότερο για αλληλεπίδραση πέδησης, συνήθως βολφράμιο (σημείο τήξης 3249° C, μαζικός αριθμός 184). Η δέσμη των ηλεκτρονίων εστιάζεται με κατάλληλους μηχανισμούς προς το μικρό αυτό στόχο, ώστε οι παραγόμενες ακτίνες -x να προκύπτουν όσο το δυνατό σαν από σημειακή πηγή. Τα ηλεκτρόνια παράγονται στην κάθοδο της λυχνίας με τη βοήθεια ενός θερμαινόμενου μεταλλικού νήματος. Όταν το νήμα θερμανθεί περιβάλλεται από τέτοια ηλεκτρόνια. Προκειμένου τα ηλεκτρόνια να κινηθούν προς την άνοδο, το αναγκαίο ηλεκτρικό δυναμικό (τάση) επιβάλλεται με τη βοήθεια κατάλληλου τροφοδοτικού. Αν το ρεύμα των ηλεκτρονίων (μετρούμενο σε

mA) αυξηθεί, τότε το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή περισσότερων ακτίνων -x ανά μονάδα χρόνου και αντίστροφα. Η αύξηση ή η μείωση του ρεύματος των ηλεκτρονίων είναι ένας από τους τρόπους για τον έλεγχο της έντασης της παραγόμενης δέσμης ακτινοβολίας. Το ρεύμα ηλεκτρονίων ελέγχεται ρυθμίζοντας το ρεύμα θέρμανσης χαμηλής τάσης που εφαρμόζεται στο θερμαινόμενο νήμα. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία του νήματος, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που αποσπώνται από την κάθοδο και αντίστροφα.

Η υψηλή τάση ανάμεσα στην κάθοδο και στην άνοδο, μπορεί να ρυθμίζεται επίσης. Το δυναμικό αυτό, επηρεάζει την κινητική ενέργεια με την οποία καταλήγουν τα ηλεκτρόνια πάνω στον στόχο. Όσο υψηλότερη η τάση (περισσότερα kV) τόσο μεγαλύτερη η ταχύτητα των ηλεκτρονίων, άρα και η κινητική ενέργεια που έχουν όταν προσπίπτουν στο στόχο. Ηλεκτρόνια που προσπίπτουν με περισσότερη ενέργεια παράγουν ακτίνες -x με μεγαλύτερη ενέργεια και αντίστροφα. Επιπλέον, πέρα από την αύξηση της ενέργειας, η αύξηση των kV προκαλεί ταυτόχρονη αύξηση της έντασης των παραγόμενων ακτίνων -x (αριθμό φωτονίων ανά μονάδα χρόνου), διότι κατευθύνει εστιάζοντας περισσότερα ηλεκτρόνια προς το στόχο και αντίστροφα. Επομένως, η ρύθμιση της θερμοκρασίας του νήματος της λυχνίας ρυθμίζει γραμμικά την παραγόμενη ένταση των ακτίνων -x, χωρίς να επηρεάζει την ενέργειά τους. Αντίθετα η ρύθμιση του δυναμικού επηρεάζει μη γραμμικά τόσο το πλήθος όσο και την ενέργεια των παραγόμενων ακτίνων -x με μη γραμμικό τρόπο.

Ένα σύστημα παραγωγής ακτίνων -x, όπως αυτό τύπου λυχνίας που περιγράφηκε πιο πάνω είναι σχεδιασμένο για να λειτουργεί εντός καθορισμένων ορίων δυναμικού (kV) και ρεύματος ηλεκτρονίων (mA). Υπάρχουν ανώτερα όρια τα οποία δεν μπορούν να ξεπεραστούν στην τεχνολογία των λυχνιών. Οπότε, πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την επιλογή μιας λυχνίας παραγωγής ακτίνων -x με τεχνικά χαρακτηριστικά κατάλληλα για τις αναγκαίες εφαρμογές. Χονδρικά μπορεί να σημειωθεί ότι διατίθενται λυχνίες με εύρος δυναμικού (α) ~10-150 kV, (β) ~50-200 kV, (γ) ~50-250 kV, (δ) ~50-300 kV, (ε) ~50-350 kV και παρόμοιες. Ένα τεχνικό άνω όριο τάσης αυτής της τεχνολογίας είναι περίπου τα 400 kV. Ένας απλός κανόνας σχετικά με την τιμή των αναπτυσσόμενων mA σε ένα τέτοιο σύστημα είναι ότι το γινόμενο kV×mA δεν μπορεί να ξεπερνάει την ισχύ σε W του τροφοδοτικού υψηλής τάσης.

Βεβαίως, τα ιατρικά διαγνωστικά συστήματα ακτίνων -x είναι συνήθως σχεδιασμένα για να λειτουργούν με πολύ μικρό χρόνο έκθεσης, υψηλό ρεύμα ηλεκτρονίων και χαμηλή τάση. Για παράδειγμα, μία τυπική ακτινογραφία θώρακος γίνεται συνήθως στα 70 kV, μερικές εκατοντάδες mA και χρόνο έκθεσης που διαρκεί λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο. Οι ρυθμίσεις αυτές είναι απαραίτητες ώστε να επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση της δόσης στον ασθενή. Οι πολύ σύντομοι χρόνοι έκθεσης χρησιμεύουν επιπλέον ώστε να μην προλαβαίνει ο ασθενής να κινηθεί κατά την διαδικασία. Στα βιομηχανικά συστήματα δεν υπάρχουν τέτοιοι περιορισμοί διότι το αντικείμενο είναι ακίνητο και η έκθεσή του σε φωτόνια δεν συνεπάγεται βιολογικές επιπτώσεις.

3.3 Εξασθένιση ακτίνων -x

Ως φωτόνια, οι ακτίνες -x μπορεί να διαδίδονται μέσα στην ύλη χωρίς να υφίστανται απώλειες ενέργειας ή αλλαγή κατεύθυνσης. Ωστόσο, εάν όλες οι ακτίνες -x διαπερνούσαν την ύλη χωρίς μεταβολές, φυσικά δεν θα υπήρχε χρήσιμη ραδιογραφική απεικόνιση, αλλά απλώς ένα ομοιόμορφα μαυρισμένο φιλμ. Σε μια τέτοια περίπτωση όλα τα φωτόνια τα παραγόμενα από μια λυχνία ακτίνων -x θα διαπερνούσαν πλήρως την εξεταζόμενη ύλη. Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας της ραδιογραφίας, η επιτυχία της μεθόδου βασίζεται στο ότι η δέσμη των διαπερνώντων φωτονίων εξασθενεί σε διαφορετικό βαθμό ανάλογα με τις ιδιότητες της εσωτερικής δομής της προσβαλλόμενης ύλης. Ο βαθμός εξασθένισης εξαρτάται από τη σύνθεση (δηλ. το μαζικό αριθμό των συστατικών), την πυκνότητα και το πάχος του εξεταζόμενου αντικειμένου και επίσης από την ενέργεια των ακτίνων -x. Ο όρος εξασθένιση αντιπροσωπεύει τις απώλειες φωτονίων από την προσπίπτουσα δέσμη, οι οποίες προκύπτουν στην ύλη του εξεταζόμενου αντικειμένου από έναν αριθμό διαδικασιών που περιλαμβάνουν: την απορρόφηση (δηλαδή τη μερική ή ολική απώλεια ενέργειας των φωτονίων) και τη σκέδαση (δηλαδή την αλλαγή κατεύθυνσης των φωτονίων με ταυτόχρονη μείωση ή όχι της ενέργειας τους).

Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι αν φωτόνια που έχουν προκύψει από σκέδαση φθάσουν στο φιλμ ή στην οποιαδήποτε άλλη επιφάνεια σχηματισμού εικόνας, δεν συμβάλλουν στη δημιουργία χρήσιμης πληροφορίας διότι δεν συνδέονται με την

εσωτερική δομή της εξεταζόμενης ύλης και θολώνουν την ευκρίνεια του αποτελέσματος, δημιουργώντας εικόνες με "θόρυβο".

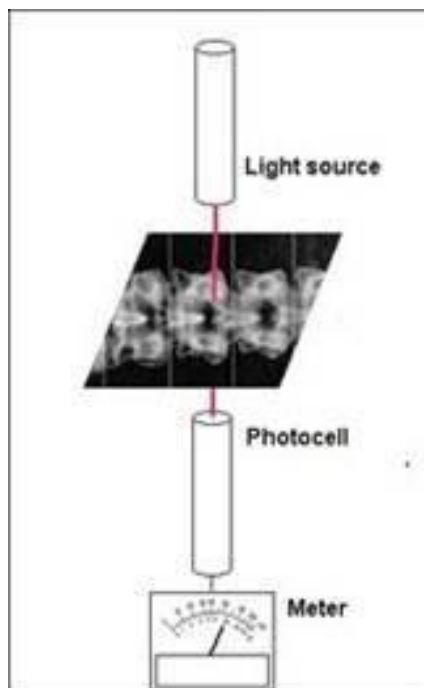
Όσο παχύτερο και πιο ακανόνιστο το σχήμα του ραδιογραφικά εξεταζόμενου αντικειμένου, τόσο περισσότερες γίνονται οι σκεδάσεις των φωτονίων. Πρόσθετα σκεδαζόμενα φωτόνια μπορούν να δημιουργηθούν όταν οι ακτίνες -x της προσπίπτουσας στο αντικείμενο δέσμης αλληλεπιδράσουν με επιφάνειες ή οποιαδήποτε άλλα αντικείμενα βρίσκονται σε άμεση γειτνίαση. Για να βελτιωθεί η ευκρίνεια της εικόνας, είναι σημαντικό να ελεγχθεί η σκέδαση των φωτονίων.

3.4 Οπτική πυκνότητα

Η οπτική πυκνότητα μιας ραδιογραφίας είναι το ποσοτικό μέτρο της αμαύρωσης της ραδιογραφικής εικόνας. Αν η ραδιογραφική εικόνα έχει ληφθεί σε φωτογραφικό φιλμ, τότε η μέτρηση της οπτικής πυκνότητας είναι εύκολη και γίνεται με βάση τον τύπο:

$$D = \log \frac{I_0}{I_1} \quad (3.1)$$

όπου \log ο δεκαδικός λογάριθμος, D είναι οπτική πυκνότητα, I_0 είναι η ένταση ορατού φωτός που παραγόμενη από κατάλληλη πηγή προσπίπτει κάθετα στην μία επιφάνεια του φιλμ και I_1 είναι η ένταση του διαπερνώντος ορατού φωτός που μετράται κάθετα στην άλλη επιφάνεια του φιλμ με κατάλληλη συσκευή. Η συσκευή αυτή ονομάζεται μετρητής οπτικής πυκνότητας και λειτουργεί σύμφωνα με την αρχή που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2.



Εικ. 3.2 Μετρητής οπτικής πυκνότητας: *Light Source* = Πηγή Φωτός, *Photocell* = Φωτοδίοδος, *Meter* = Μετρητής

Η σχέση (3.1) διατυπώνει ποσοτικά το γεγονός ότι αν η εικόνα στο φιλμ είναι πολύ μαύρη, το φως δεν μπορεί να περάσει.

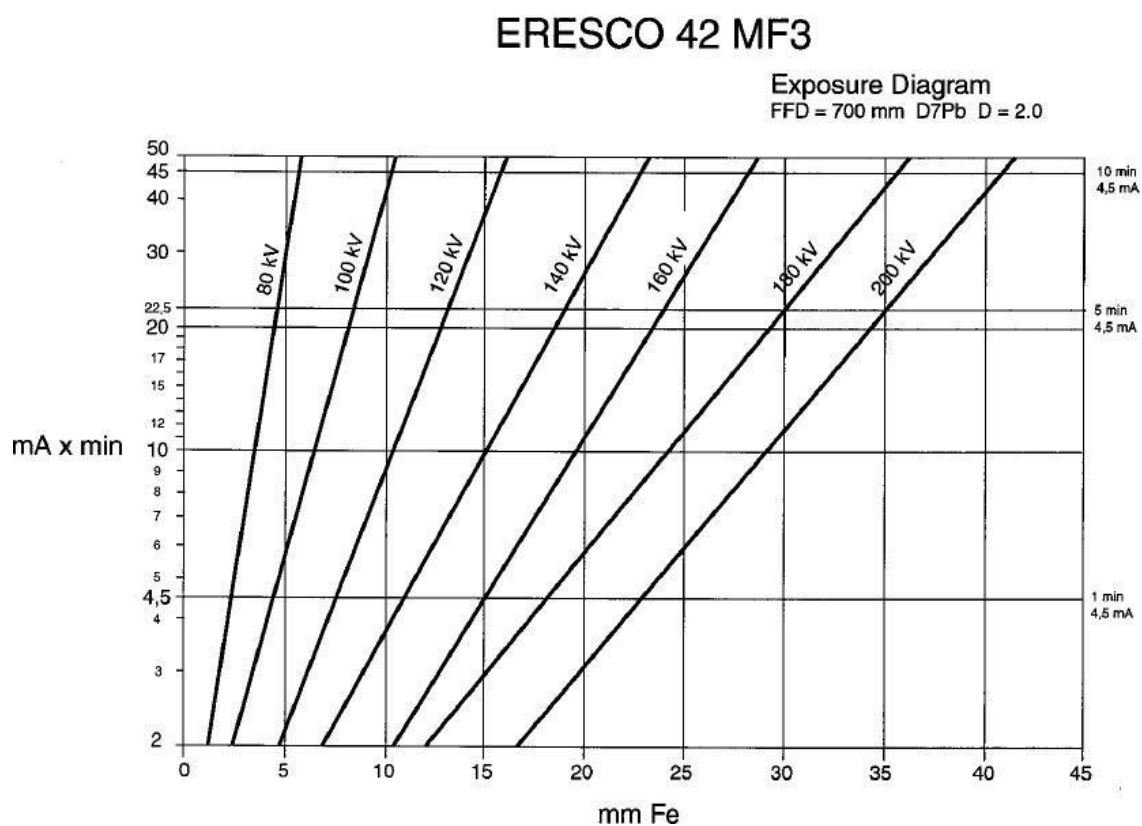
Όταν δεν υπάρχει κίνδυνος σύγχυσης, η οπτική πυκνότητα μιας ραδιογραφίας σε φιλμ, συνήθως αναφέρεται μόνο ως πυκνότητα ή ως αμαύρωση.

Γενικά, δεδομένου ότι η πυκνότητα είναι ένας δεκαδικός λογάριθμος, μια ορισμένη αύξηση της πυκνότητας πάντα αντιστοιχεί στην ίδια ποσοστιαία μείωση της διαπερατότητας φωτός.

3.5 Διάγραμμα έκθεσης

Ως διάγραμμα έκθεσης ορίζεται ένα γράφημα που εκτιμά την έκθεση που απαιτείται ώστε από τη ραδιογράφιση ενός ορισμένου πάχους γνωστού υλικού με δεδομένη λυχνία παραγωγής ακτίνων -x, για ορισμένη απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ και με χρήση δεδομένου φιλμ, να προκύπτει ραδιογραφική εικόνα ορισμένης οπτικής πυκνότητας. Τα διαγράμματα έκθεσης για λυχνίες ακτίνων -x έχουν στον οριζόντιο γραμμικό άξονά τους το πάχος του υλικού (συνήθως σε mm) και στον κατακόρυφο λογαριθμικό άξονά τους την απαιτούμενη έκθεση (συνήθως σε mA×min). Η έκθεση μετρείται ως γινόμενο του ρεύματος των ηλεκτρονίων (σε mA) επί το χρόνο εκπομπής

της λυχνίας (για βιομηχανικές εφαρμογές συνήθως σε min) για αυτό αναφέρεται με τη μονάδα mA×min. Το διάγραμμα έκθεσης για λυχνία ακτίνων -x περιλαμβάνει καμπύλες για την επιλογή των καταλληλότερων kV της λυχνίας. Κάθε λυχνία συνοδεύεται από τα δικά της διαγράμματα έκθεσης, τα οποία συνήθως δίνονται για δύο μόνο υλικά, το χάλυβα και το αλουμίνιο. Επειδή σε γενικές γραμμές, διαγράμματα για μία λυχνία δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άλλη ή για άλλα υλικά, υπάρχουν πειραματικές μέθοδοι παραγωγής διαγραμμάτων. Ένα ενδεικτικό διάγραμμα έκθεσης χάλυβα για τη λυχνία που διατίθεται στην εγκατάσταση Βιομηχανικής Ραδιογραφίας του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ δίνεται στην Εικόνα 3.3.



Εικ. 3.3: Διάγραμμα έκθεσης για λυχνία ακτίνων -x, εταιρείας κατασκευής General Electric, τύπου ERESKO 42 MF3, μέγιστης τάσεως 200 kV.

Υλικό: Χάλυβας, Οπτική Πυκνότητα: 2,

Απόσταση ανόδου (εστιακού σημείου) - φιλμ: 700 mm, Φιλμ: Agfa D7Pb.

Τα διαγράμματα έκθεσης είναι τα κατάλληλα εργαλεία για τον προσδιορισμό εκθέσεων για ραδιογραφία ομοιόμορφων πλακών, αλλά χρησιμεύουν μόνο ως οδηγό για αντικείμενα, όπως περίπλοκα χυτά, με μεγάλες διακυμάνσεις πάχους. Φυσικά διαγράμματα έκθεσης μπορούν να κατασκευασθούν για διαφορετικά μέταλλα (π.χ.

αλουμίνιο) ή για διαφορετικά υλικά π.χ. κεραμικά (Αναγνώστου, 2020) ή χαρτί όπως στην παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία. Το διάγραμμα έκθεσης μπορεί να χρησιμοποιείται για την εύρεση της έκθεσης σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν αλλαγές σε κάποιες από τις συνθήκες, για τις οποίες το υπόψη διάγραμμα κατασκευάστηκε.

3.6 Κατασκευή διαγράμματος έκθεσης

3.6.1 Γενικά

Υπάρχει τουλάχιστον μία πειραματική μέθοδος για την κατασκευή ενός διαγράμματος έκθεσης. Η μέθοδος βρίσκεται κυρίως στις οδηγίες που βρίσκονται στο General Electric (2008). Όπως είναι γνωστό

Το διάγραμμα έκθεσης απαντά στην ερώτηση:

"Ποια είναι η έκθεση που απαιτείται για να επιτευχθεί ορισμένη τιμή οπτικής πυκνότητας σε φιλμ ορισμένου τύπου, όταν κάποιος ραδιογραφεί ένα αντικείμενο δεδομένου υλικού και πάχους με ορισμένο τύπο πηγής και ορισμένη απόσταση πηγής-φιλμ;"

Επομένως, το διάγραμμα έκθεσης για λυχνία ακτίνων -x εξαρτάται από:

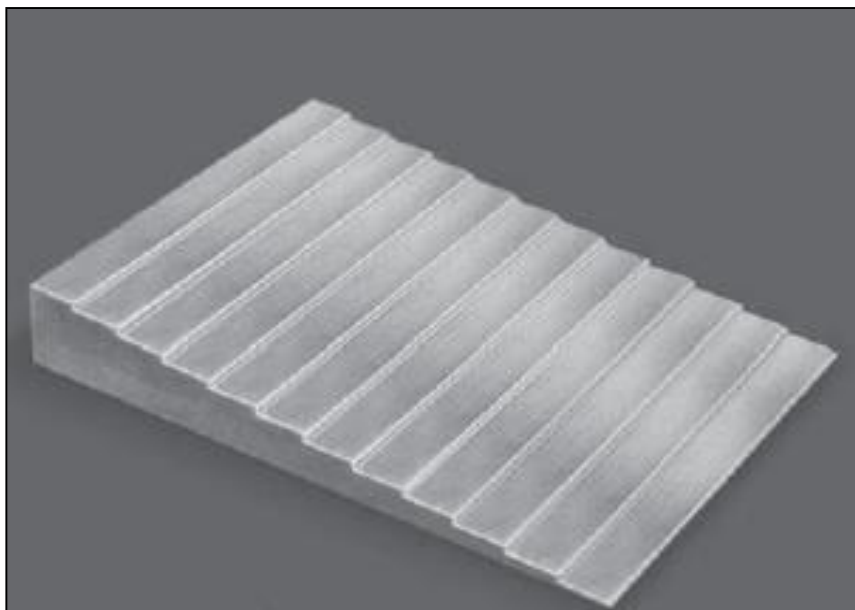
- (1) Τύπος λυχνίας: Μεταξύ των παραγόντων που παίζουν ρόλο σε ένα διάγραμμα έκθεσης είναι η τάση της λυχνίας (σε kV), τα όρια ρύθμισης αυτής της τάσης, η ένταση του ρεύματος ηλεκτρονίων (mA) και τα όρια ρύθμισής του. Επομένως, το διάγραμμα έκθεσης είναι συνήθως μοναδικό και αποτελεί την ταυτότητα του συγκεκριμένου τύπου λυχνίας για την οποία χαράχθηκε.
- (2) Απόσταση εστιακού σημείου (ανόδου) - φιλμ: Το διάγραμμα έκθεσης για ένα συγκεκριμένο τύπο λυχνίας ακτίνων -x παράγεται μόνο για μια καθορισμένη απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ. Αν υπάρχει ανάγκη να χρησιμοποιηθεί άλλη απόσταση, θα χρειαστούν διορθώσεις χρησιμοποιώντας το νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου.
- (3) Είδος φιλμ: Το διάγραμμα έκθεσης παράγεται για ένα συγκεκριμένο τύπο φιλμ. Ο τύπος του φιλμ παίζει ρόλο διότι ίδια έκθεση σε διαφορετικό φιλμ παράγει διαφορετική οπτική πυκνότητα. Αν υπάρχει ανάγκη να χρησιμοποιηθεί άλλο φιλμ από αυτό, για το οποίο χαράχθηκε το διάγραμμα διατίθενται τρόποι αναγωγής στο άλλο φιλμ.

- (4) Επιθυμητή οπτική πυκνότητα: Το διάγραμμα έκθεσης παράγεται για υπολογισμούς έκθεσης που καταλήγουν στην ίδια οπτική πυκνότητα. Αν υπάρχει ανάγκη να χρησιμοποιηθεί άλλη οπτική πυκνότητα από αυτή για την οποία χαράχθηκε το διάγραμμα διατίθενται τρόποι αναγωγής στη ζητούμενη πυκνότητα.
- (5) Είδος υλικού: Τα διαγράμματα έκθεσης προετοιμάζονται συνήθως μόνο για δύο υλικά: τον χάλυβα και το αλουμίνιο. Αν χρειασθεί να γίνουν υπολογισμοί για άλλο υλικό υπάρχουν τρόποι χρήσης του διαγράμματος και για άλλα είδη υλικών.

Ένα διάγραμμα έκθεσης παράγεται με πειραματικό τρόπο κάνοντας μια σειρά ραδιογραφιών ενός δοκιμίου τύπου κλίμακας (δηλαδή με "σκαλοπάτια"), ή ισοδύναμα, μιας σειράς από πλάκες διαφορετικών παχών κατασκευασμένες από το ίδιο υλικό.

3.6.2 Δοκίμιο κλίμακας

Ένα δοκίμιο κλίμακας διακρίνεται στην Εικόνα 3.4. Η αύξηση του πάχους ανά διαδοχικό "σκαλί" του δοκιμίου κλίμακας πρέπει να είναι σταθερή αλλά μπορεί να είναι διαφορετική για διαφορετικά υλικά από 0.5 mm για ελαφρά υλικά μικρής πυκνότητας έως αρκετά χιλιοστά για υλικά μεγαλύτερου μαζικού αριθμού και μεγαλύτερης πυκνότητας. Αν τα χρησιμοποιούμενα kV είναι λιγότερα από 175, η αύξηση ανά σκαλί μπορεί να είναι μεταξύ 0.5 έως 1.0 mm. Αν τα kV είναι περισσότερα η αύξηση μπορεί να είναι μεταξύ 2 και 3 mm. Επιπλέον του δοκιμίου κλίμακας και για την περαιτέρω αύξηση του πάχους δοκιμών πρέπει να διατίθενται και επίπεδες πλάκες από το ίδιο υλικό και με κατάλληλο πάχος (π.χ. 10 mm). Αν π.χ. το εύρος παχών που καλύπτει ένα δοκίμιο κλίμακας είναι από 0.5 έως 10 mm, το δοκίμιο κλίμακας συν μία τέτοια πλάκα πάχους 10 mm αποδίδει ένα εύρος παχών από 10.5 έως 20 mm.



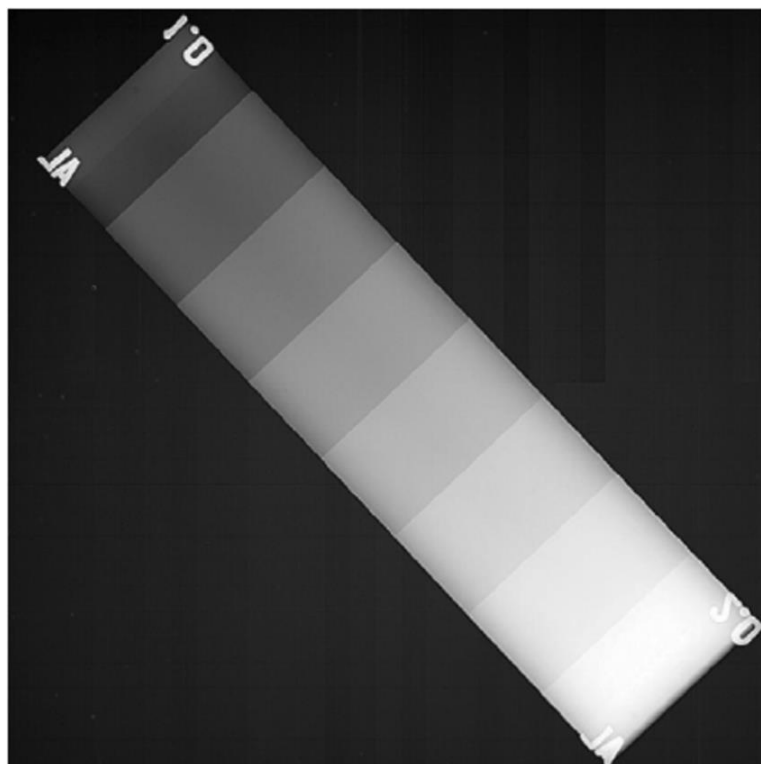
Εικ. 3.4: Δοκίμιο κλίμακας (από το διαδίκτυο)

3.6.3 Πείραμα κατασκευής διαγράμματος έκθεσης

Για την πειραματική παραγωγή ενός διαγράμματος έκθεσης απαιτείται η χάραξη δύο ειδών προκαταρκτικών βοηθητικών διαγραμμάτων, το πρώτο ονομάζεται "Διάγραμμα Οπτικής πυκνότητας - Πάχους" και χαράσσεται για τις διάφορες δυνατές τάσεις (kV) στο ηλεκτρικό πεδίο μιας λυχνίας ακτίνων -x και το άλλο ονομάζεται "Διάγραμμα kV - Πάχους". Έστω ότι για την πειραματική παραγωγή του διαγράμματος οι πειραματικές δυνατότητες είναι οι παρακάτω:

- Ηλεκτρικό πεδίο 60 - 200 kV
- Ένταση ρεύματος 5 - 10 mA,
- Απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ: 80 cm
- Υλικό: χάλυβας (υλικό του δοκιμίου κλίμακας)
- Τύπος φιλμ: Agfa D7
- Επιθυμητή πυκνότητα: $D=2.0$

Πειραματικές Εκθέσεις: Χρησιμοποιώντας χαμηλή ένταση ρεύματος ηλεκτρονίων π.χ. 8 mA και χρόνο έκθεσης 1 min (δηλαδή έκθεση 8 mA×min) λαμβάνονται ραδιογραφίες του δοκιμίου κλίμακας σε φιλμ για διάφορα ηλεκτρικά πεδία π.χ. στα 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165, 180 και 195 kV. Μια τέτοια ραδιογραφία μοιάζει με αυτή της Εικόνας 3.5.

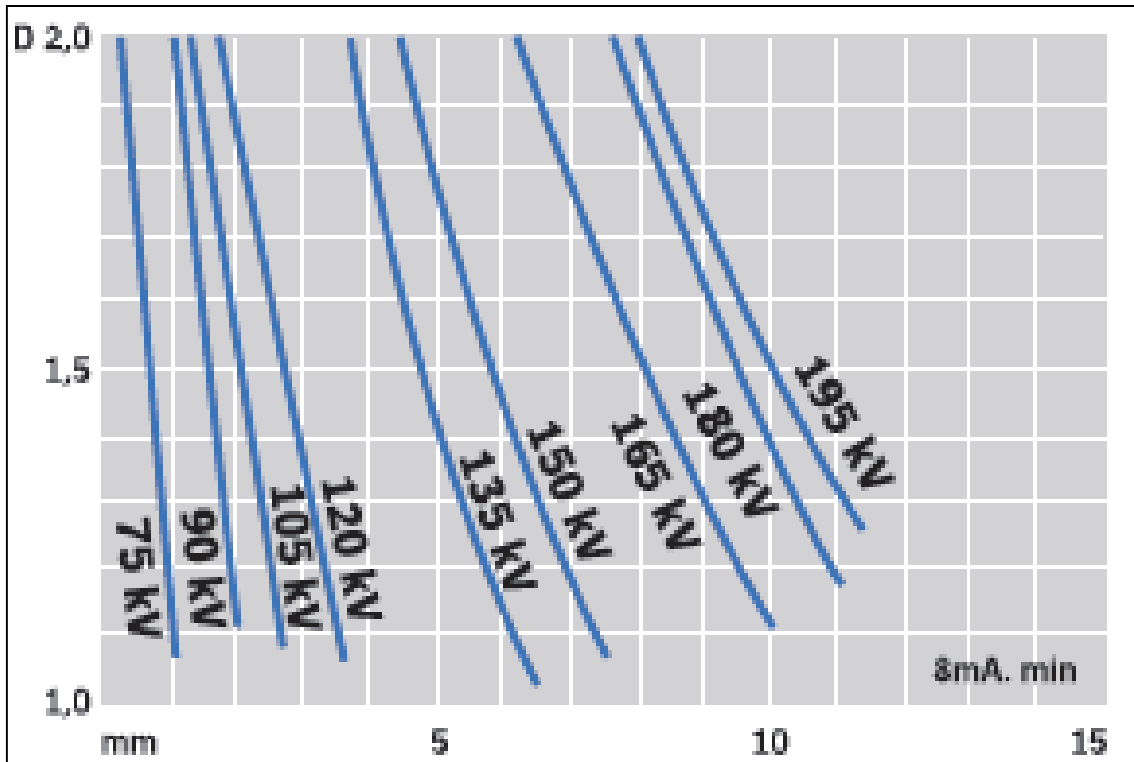


*Εικ. 3.5: Τυχαία ραδιογραφία δοκιμίου κλίμακας
(από το διαδίκτυο)*

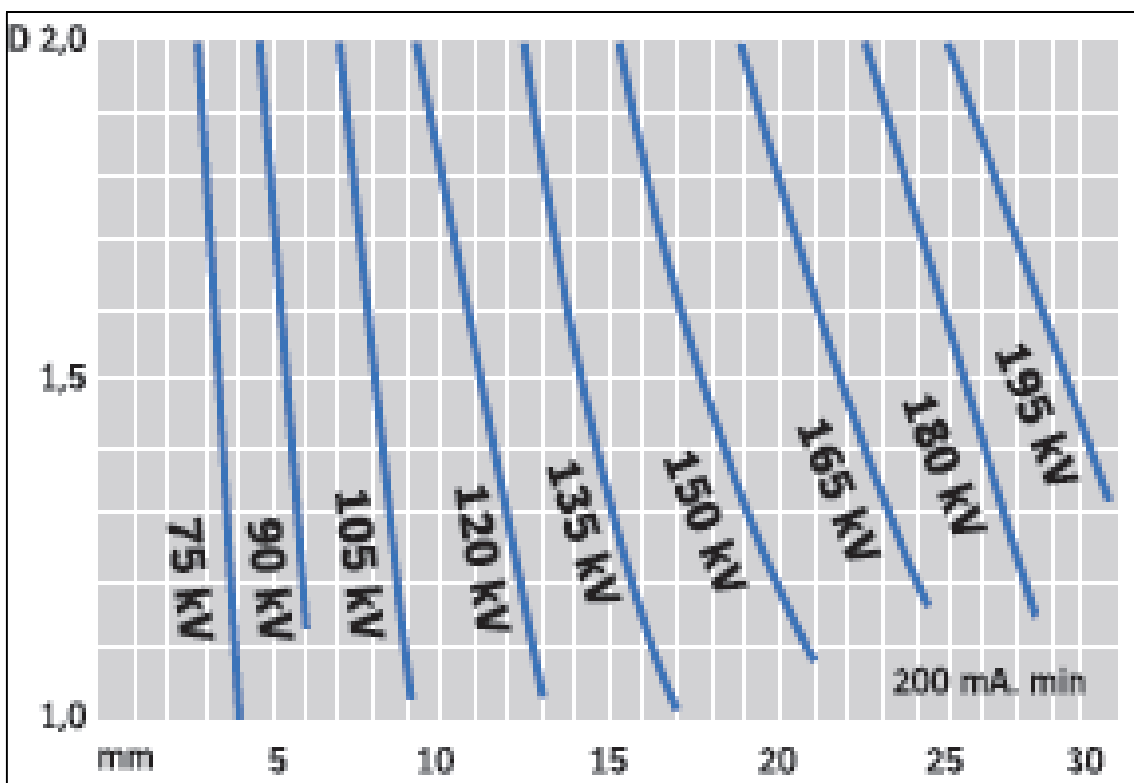
Γίνεται κατανοητό ότι τα λεπτότερα τμήματα του δοκιμίου κλίμακας αποτυπώνονται πιο μαύρα στη ραδιογραφική εικόνα, ενώ τα παχύτερα αποτυπώνονται πιο ανοιχτόχρωμα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για αυξημένο ρεύμα ηλεκτρονίων π.χ. 10 mA και μεγαλύτερο χρόνο έκθεσης π.χ. 20 min, ώστε η έκθεση να αυξηθεί στα 200 mA×min). Μετά την εμφάνιση των ραδιογραφιών μετρώνται οι πυκνότητες που αντιστοιχούν σε κάθε σκαλί με την βοήθεια συσκευής μέτρησης οπτικής πυκνότητας. Από τις μετρήσεις αυτές προκύπτουν τα προκαταρκτικά βοηθητικά διαγράμματα.

Προκαταρκτικά διαγράμματα Οπτικής πυκνότητας - Πάχους

Οι μετρηθείσες πυκνότητες χαράσσονται σε γράφημα ως συνάρτηση του πάχους του υλικού και της τάσης της λυχνίας, για τις οποίες επιτεύχθηκαν. Προκύπτει ότι μια ευθεία ή μία καμπύλη γραμμή μικρής καμπυλότητας συνδέει τα πειραματικά σημεία που αναφέρονται στο ίδιο ηλεκτρικό δυναμικό. Για το πείραμα που περιγράφηκε προκύπτουν δύο προκαταρκτικά διαγράμματα Οπτικής πυκνότητας - Πάχους, ένα για έκθεση 8 mA×min και ένα για έκθεση 200 mA×min, τα οποία διακρίνονται στην Εικόνα 3.6 και στην Εικόνα 3.7.



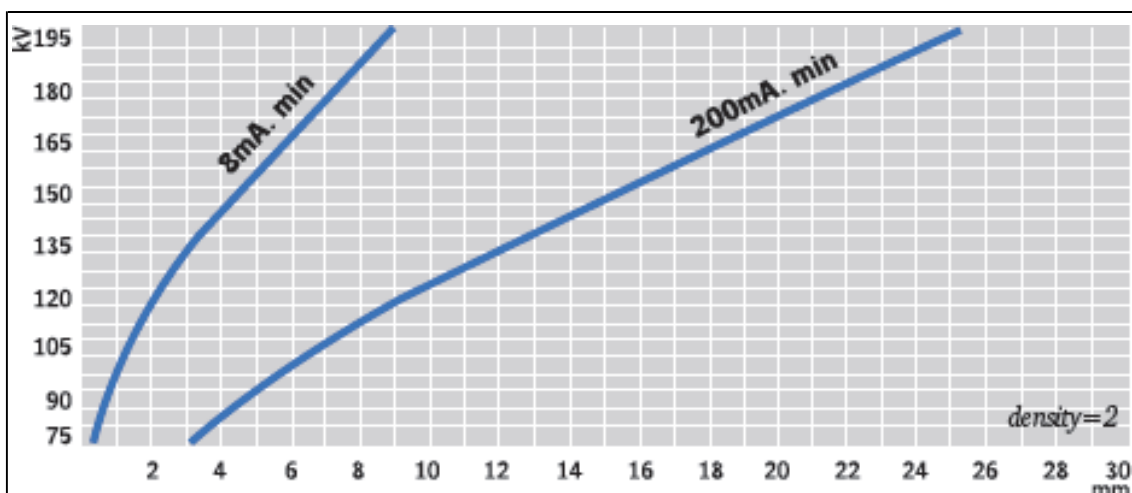
Εικ. 3.6: Προκαταρκτικό διάγραμμα Οπτικής πυκνότητας – Πάχους στα 8 mA·min (General Electric, 2008)



Εικ. 3.7: Προκαταρκτικό διάγραμμα Οπτικής πυκνότητας – Πάχους στα 200 mA·min (General Electric, 2008)

Προκαταρκτικό διάγραμμα kV - Πάχους

Τα προκαταρκτικά διαγράμματα Οπτικής πυκνότητας - Πάχους, όπως δόθηκαν πιο πάνω χρησιμεύουν για την κατασκευή του προκαταρκτικού διαγράμματος kV – Πάχους, με βάση το οποίο παράγεται και το ζητούμενο διάγραμμα έκθεσης. Το προκαταρκτικό διάγραμμα kV - Πάχους, χαράσσεται ως εξής: Στην Εικόνα 3.6 φέρεται η ευθεία $D = 2$. Τα σημεία τομής της ευθείας αυτής με τις καμπύλες των τάσεων μεταφέρονται σε ένα διάγραμμα, όπως αυτό της Εικόνας 3.8, το οποίο έχει οριζόντιο άξονα το πάχος σε mm και κατακόρυφο άξονα την τάση σε kV. Τα σημεία αυτά ενώνονται για να σχηματίσουν την καμπύλη 8 mA×min. Ομοίως στην Εικόνα 3.7 φέρεται και πάλι η ευθεία $D = 2$. Τα σημεία τομής της ευθείας αυτής με τις καμπύλες των τάσεων μεταφέρονται στο διάγραμμα της Εικόνας 3.8. Τα σημεία αυτά ενώνονται για να σχηματίσουν την καμπύλη 200 mA×min.

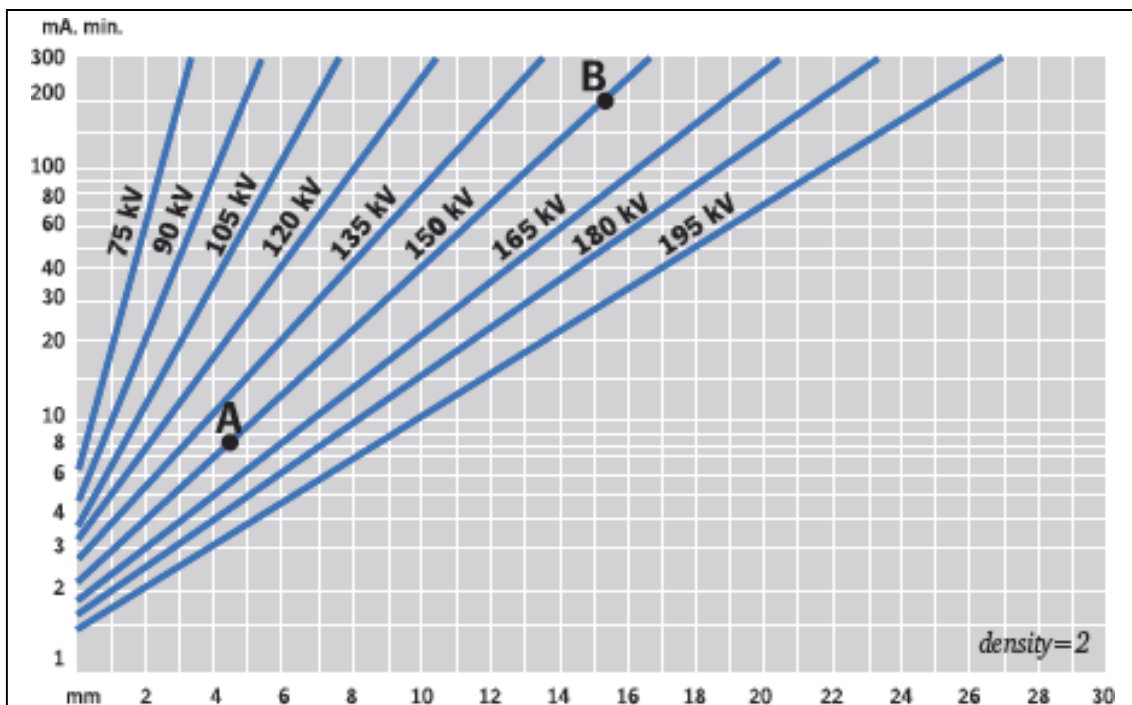


Εικ. 3.8: Προκαταρκτικό διάγραμμα kV – Πάχους (General Electric, 2008)

Παραγωγή διαγράμματος έκθεσης

Το τελικό διάγραμμα έκθεσης χαράσσεται σε ημιλογαριθμικό χαρτί. Ο οριζόντιος γραμμικός άξονας είναι αυτός του πάχους (σε mm). Ο κάθετος λογαριθμικός άξονας είναι αυτός της έκθεσης (σε mA×min). Χρησιμοποιώντας το προκαταρκτικό διάγραμμα kV - Πάχους φέρεται η ευθεία (π.χ.) 150 kV. Τα σημεία τομής της ευθείας αυτής με τις καμπύλες 8 και 200 mA×min μεταφέρονται στην επιφάνεια του διαγράμματος έκθεσης ως σημείο "A" και σημείο "B" και ενώνονται ώστε να προκύψει η ευθεία των 150 kV (βλ. και Εικόνα 3.9). Αποδεικνύεται πειραματικά ότι η υπόψη ευθεία αλλά και οι άλλες παρόμοιες της για άλλα kV είναι πράγματι (κοντά σε) ευθεία και όχι (κοντά σε) άλλη

καμπύλη γραμμή. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για άλλα kV με τον ίδιο τρόπο μέχρι το διάγραμμα να πληρωθεί από χρήσιμες ευθείες ηλεκτρικού δυναμικού και έτσι προκύπτει το ζητούμενο διάγραμμα έκθεσης.



Εικ. 3.9: Ζητούμενο διάγραμμα έκθεσης (General Electric, 2008)

3.7 Χρήση του διαγράμματος έκθεσης

3.7.1 Για τις συνθήκες και τις προδιαγραφές του διαγράμματος

Έστω ότι κάποιος επιθυμεί να προσδιορίσει την αναγκαία έκθεση (σε mA×min) με τη βοήθεια ενός διαγράμματος έκθεσης για τις συνθήκες και τις προδιαγραφές για τις οποίες χαράχθηκε το διάγραμμα έκθεσης (υλικό, απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ, είδος φιλμ, τιμή οπτικής πυκνότητας). Υπενθυμίζεται ότι ένα διάγραμμα έκθεσης για μία λυχνία ακτίνων -x ισχύει μόνο για την υπόψη λυχνία. Για το σκοπό αυτό πρέπει να χαραχθεί η κατακόρυφη του πάχους του υλικού, να επιλεγεί η καμπύλη των kV και στη συνέχεια να χαραχθεί η αντίστοιχη οριζόντια. Το σημείο που η οριζόντια τέμνει τον κατακόρυφο άξονα του διαγράμματος είναι η ζητούμενη έκθεση. Αν το προς ραδιογράφιση αντικείμενο έχει κύμανση πάχους, η έκθεση μπορεί να προσδιορίζεται για το μέσο πάχος. Διατομές του αντικειμένου με πάχος μεγαλύτερο από το μέσο, θα φαίνονται στο φιλμ με λευκότερη απόχρωση γκρι και διατομές του αντικειμένου με πάχος μικρότερο από το μέσο, θα φαίνονται στο φιλμ με σκουρότερη απόχρωση γκρι.

Είναι προφανές ότι, για το συγκεκριμένο πάχος που επιλέχθηκε είναι δυνατόν να εξυπηρετούν περισσότερες από μία τιμές για εκθέσεις, όπως προκύπτουν από περισσότερα του ενός ηλεκτρικά δυναμικά (kV). Στην περίπτωση αυτή, ο κανόνας είναι ότι επιλέγεται ένα από τα χαμηλότερα δυνατά δυναμικά. Οι λόγοι, είναι πολλοί για να εξηγηθούν στο πλαίσιο του παρόντος κειμένου. Αν η κύμανση πάχους του αντικειμένου έχει αρκετό εύρος, μπορεί να προκύψει ότι τα μικρά πάχη αποτυπώνονται στην ραδιογραφική εικόνα με οπτική πυκνότητα μεγαλύτερη του 3.5 ή / και ότι τα μεγάλα πάχη αποτυπώνονται με οπτική πυκνότητα μικρότερη του 0.7. Τέτοια μεγέθη πυκνότητας δεν είναι ορατά στην πράξη. Το πρώτο είναι πολύ μαύρο, και το δεύτερο πολύ λευκό. Για να λυθεί το θέμα, η ραδιογραφία του εξεταζόμενου αντικειμένου πρέπει να επαναληφθεί και να γίνει κατά δύο ή περισσότερα τμήματα για το μέσο πάχος του καθενός από τα τμήματα. Το μεν παχύτερο τμήμα πρέπει να ραδιογραφηθεί σε υψηλότερο δυναμικό από ότι επιλέχθηκε για το σύνολο του αντικειμένου, το δε λεπτότερο, πρέπει να ραδιογραφηθεί σε χαμηλότερο δυναμικό.

3.7.2 Για διαφορετικές αποστάσεις

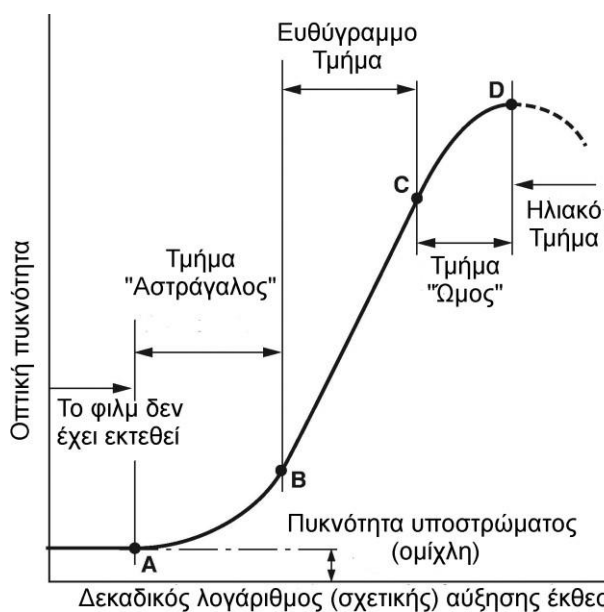
Υπολογίζεται η έκθεση EXP_1 σε $\text{mA} \times \text{min}$ για την απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ για την οποία χαράχθηκε το διαθέσιμο διάγραμμα έκθεσης, δηλαδή έστω την SFD_1 σε mm ή cm. Αν η διαφορετική απόσταση εστιακού σημείου – φιλμ είναι η SFD_2 σε mm ή cm, τότε σύμφωνα με το νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου, η αναγκαία έκθεση EXP_2 στην SFD_2 θα είναι:

$$EXP_2 = \frac{EXP_1}{SFD_1^2} SFD_2^2 \quad (3.2)$$

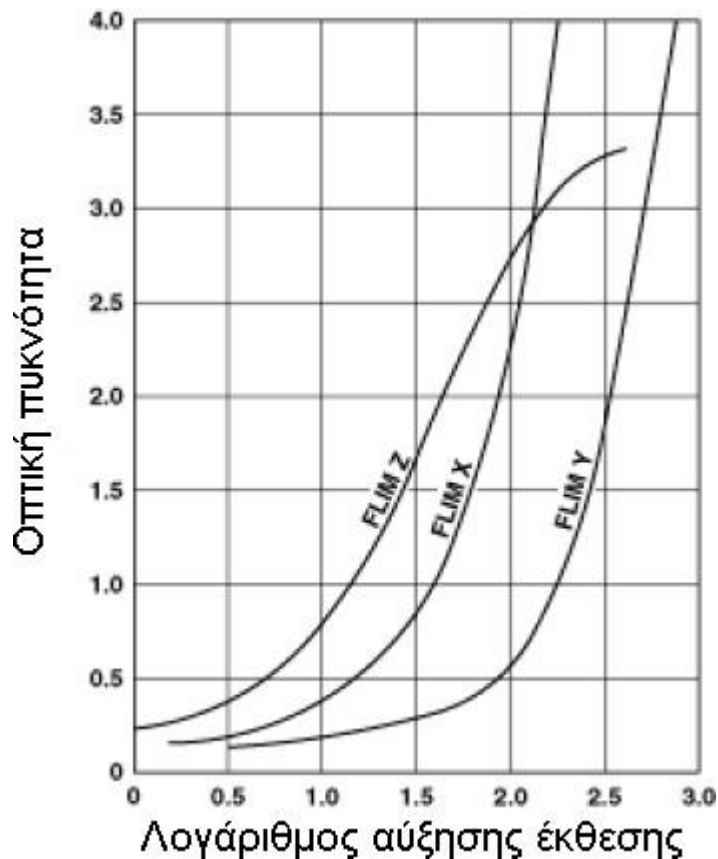
3.7.3 Χαρακτηριστική καμπύλη φιλμ

Η ονομαζόμενη χαρακτηριστική καμπύλη φιλμ είναι ένα χρήσιμο εργαλείο που μεταξύ άλλων διευκολύνει τη χρήση του διαγράμματος έκθεσης. Η χαρακτηριστική καμπύλη (characteristic ή sensitometric curve) είναι ο πλέον αποδεκτός τρόπος για την περιγραφή των ιδιοτήτων του φιλμ, καθόσον συσχετίζει την οπτική πυκνότητα που αποτυπώνεται στο φιλμ με την αύξηση της έκθεσης. Η γενική μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης είναι αυτή που διακρίνεται στην Εικόνα 3.9. Ο κατακόρυφος άξονας είναι γραμμικός και αφορά στην οπτική πυκνότητα. Ο οριζόντιος άξονας είναι λογαριθμικός (με βάση 10) και αφορά στην αύξηση της έκθεσης. Προσοχή

χρειάζεται διότι ο οριζόντιος άξονας δεν αφορά στον λογάριθμο της απόλυτης αύξησης της έκθεσης αλλά στον λογάριθμο της σχετικής αύξησης της έκθεσης. Αυτό έχει επιλεγεί επίτηδες ώστε η χαρακτηριστική να καλύπτει πολλά εύρη διαφορετικών εκθέσεων. Έχει αποδειχθεί ότι και με αυτήν την τεχνική, η συμπεριφορά του φιλμ αποδίδεται ορθά. Συνήθως τα πειράματα που διεξάγονται για την παραγωγή της χαρακτηριστικής καμπύλης ενός φιλμ, γίνονται για ακτίνες -x δυναμικού στην περιοχή μεταξύ 100 και 200 kV. Όπως γίνεται εμμέσως φανερό, το χρήσιμο τμήμα, αντίστοιχα οι χρήσιμες οπτικές πυκνότητες, στην χαρακτηριστική καμπύλη είναι αυτές μεταξύ των σημείων B και C στην Εικόνα 3.9. Το σημείο B αντιστοιχεί σε οπτική πυκνότητα ~ 0.7 , η οποία έχει ήδη αναφερθεί ως το κάτω όριο της χρήσιμης οπτικής πυκνότητας, ενώ το σημείο C αντιστοιχεί σε οπτική πυκνότητα περίπου 3.5 με 4, η οποία έχει ήδη αναφερθεί ως το άνω όριο της χρήσιμης οπτικής πυκνότητας. Εννοείται ότι διαφορετικά φιλμ παρουσιάζουν διαφορετικές χαρακτηριστικές όπως π.χ. οι τυχαίες χαρακτηριστικές για τα φιλμ X, Y και Z της Εικόνας 3.10. Δεδομένου ότι το φιλμ X χρειάζεται λιγότερη έκθεση για να αποδώσει την ίδια οπτική πυκνότητα με το φιλμ Y, και το φιλμ Y χρειάζεται λιγότερη έκθεση για να αποδώσει την ίδια οπτική πυκνότητα με το φιλμ Z, το φιλμ X χαρακτηρίζεται ως πιο "γρήγορο" από το φιλμ Y, και το φιλμ Y χαρακτηρίζεται ως πιο "γρήγορο" από το φιλμ Z. Αντίστροφα, το φιλμ Z χαρακτηρίζεται ως πιο "αργό" από το φιλμ Y και το φιλμ Y πιο "αργό" από το φιλμ X.



Εικ. 3.9: Τα πέντε χαρακτηριστικά τμήματα της χαρακτηριστικής καμπύλης του φιλμ (από το διαδίκτυο)



Εικ. 3.10: Χαρακτηριστικές διαφορετικών τύπων φιλμ (Quinn, 1980)

3.7.4 Ίδιο φιλμ άλλη οπτική πυκνότητα

Υπολογίζεται η έκθεση EXP_1 σε $mA \times min$, έστω $12 mA \times min$, για την οπτική πυκνότητα για την οποία χαράχθηκε το διαθέσιμο διάγραμμα έκθεσης, η οποία έστω ότι είναι $D_1 = 0.8$ για φιλμ Z. Αν η οπτική πυκνότητα, στην οποία χρειάζεται να γίνει η ραδιογραφία είναι $D_2 = 2$ τότε στη συνέχεια:

- Στο διάγραμμα της χαρακτηριστικής καμπύλης του φιλμ Z, χαράσσεται η ευθεία $D_1 = 0.8$ (βλ. Εικόνα 3.11)
- Υπολογίζεται ο δεκαδικός λογάριθμος LOG_1 της λογαριθμικής αύξησης της έκθεσης για αυτήν την οπτική πυκνότητα (είναι 1.00 δηλαδή το σημείο "1" στην Εικόνα 3.11)
- Στο διάγραμμα της χαρακτηριστικής καμπύλης του φιλμ Z, χαράσσεται η ευθεία $D_2 = 2$ (βλ. Εικόνα 3.11)

- Υπολογίζεται ο δεκαδικός λογάριθμος LOG_2 της λογαριθμικής αύξησης της έκθεσης για αυτήν την οπτική πυκνότητα (είναι 1.62 δηλαδή το σημείο "2" στην Εικόνα 3.11)
- Υπολογίζεται η απόλυτη διαφορά των δύο λογαρίθμων $d = |LOG_1 - LOG_2|$, είναι $d = 0.62$ (ευθύγραμμο τμήμα "3" στην Εικόνα 3.11)
- Υπολογίζεται η αναγκαία έκθεση EXP_2 ώστε να ληφθεί η επιθυμητή άλλη οπτική πυκνότητα $D_2 = 2$, ως

$$EXP_2 = EXP_1 \times 10^d \quad (3.3)$$

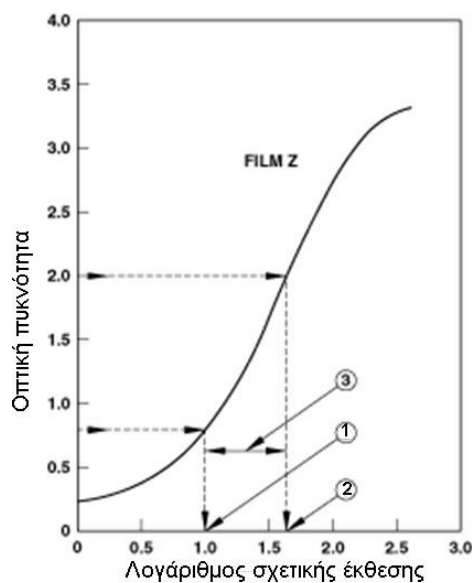
Με αντικατάσταση, για την αριθμητική εφαρμογή που εξετάζεται προκύπτει ότι

$$EXP_2 = 12 \times 10^{0.62} = 50 \text{ mA} \times \text{min}$$

Είναι φανερό ότι τα παραπάνω εφαρμόζονται αν $D_2 > D_1$. Στην περίπτωση που $D_2 < D_1$, εφαρμόζεται η

$$EXP_2 = EXP_1 \times 10^{-d} \quad (3.4)$$

Οι υπολογισμοί έχουν ακρίβεια μόνο αν η χαρακτηριστική καμπύλη είναι χαραγμένη για τα kV (ή έστω κοντά σε αυτά) που θα χρησιμοποιηθούν στην έκθεση. Αν όχι, τα αποτελέσματα των υπολογισμών θα πρέπει να διορθωθούν χρησιμοποιώντας κατάλληλους συντελεστές διόρθωσης σχετικής έκθεσης από αντίστοιχους πίνακες.



Εικ. 3.11: Υπολογισμός έκθεσης για άλλη οπτική πυκνότητα με τη βοήθεια της χαρακτηριστικής του φιλμ με βάση γνωστό διάγραμμα έκθεσης (Quinn, 1980)

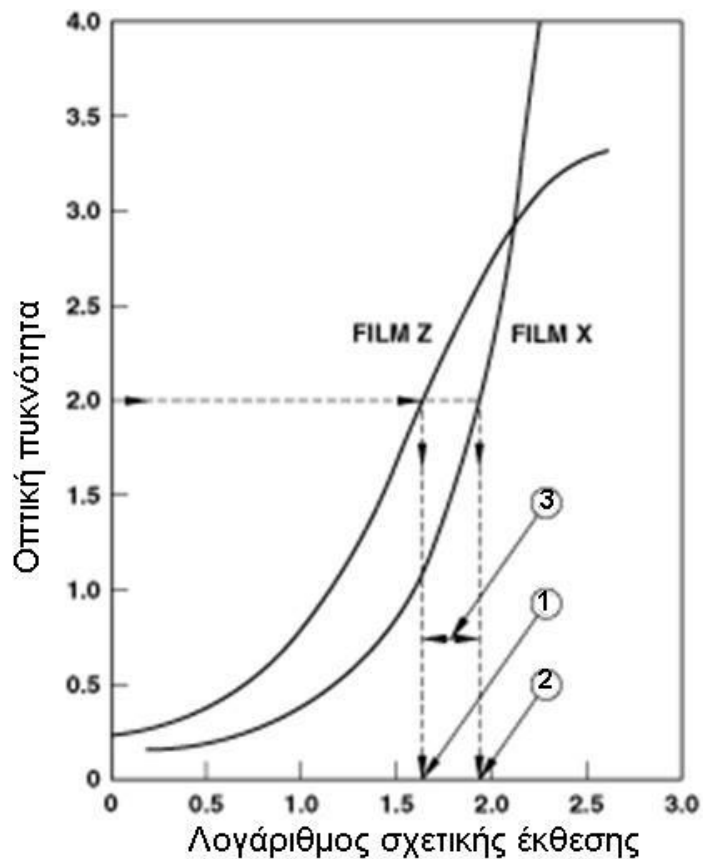
3.7.5 Ίδια οπτική πυκνότητα άλλο φιλμ

Υπολογίζεται η έκθεση EXP_1 σε $mA \times min$, έστω $50 mA \times min$, για την οπτική πυκνότητα για την οποία χαράχθηκε το διαθέσιμο διάγραμμα έκθεσης, η οποία έστω ότι είναι $D = 2$ για φιλμ Z . Αν το φιλμ στο οποίο χρειάζεται να γίνει η ραδιογραφία είναι X , τοποθετούνται (για ευκολία, μπορεί να γίνει και χωριστά) οι χαρακτηριστικές καμπύλες των φιλμ Z και X στο ίδιο διάγραμμα. Στη συνέχεια:

- Στο διάγραμμα της χαρακτηριστικής καμπύλης του φιλμ Z , χαράσσεται η ευθεία $D_1 = 2$ (βλ. Εικόνα 3.12)
- Υπολογίζεται ο δεκαδικός λογάριθμος LOG_1 της λογαριθμικής αύξησης της έκθεσης για αυτήν την οπτική πυκνότητα (είναι 1.62 δηλαδή το σημείο "1" στην Εικόνα 3.12)
- Στο διάγραμμα της χαρακτηριστικής καμπύλης του φιλμ X , χαράσσεται η ευθεία $D = 2$ (βλ. Εικόνα 3.12)
- Υπολογίζεται ο δεκαδικός λογάριθμος LOG_2 της λογαριθμικής αύξησης της έκθεσης για αυτήν την οπτική πυκνότητα (είναι 1.91 δηλαδή το σημείο "2" στην Εικόνα 3.12)
- Υπολογίζεται η απόλυτη διαφορά των δύο λογαρίθμων $d = |LOG_1 - LOG_2|$, είναι $d = 0.29$ (ευθύγραμμο τμήμα "3" στην Εικόνα 3.12)

Έπειτα, εφαρμόζεται η σχέση (3.3) αν το φιλμ X είναι πιο αργό από το φιλμ Z (η χαρακτηριστική του δηλαδή είναι δεξιότερα) και η σχέση (3.4) αν το φιλμ X είναι πιο γρήγορο από το φιλμ Z , η χαρακτηριστική του δηλαδή είναι αριστερότερα.

Και πάλι, οι υπολογισμοί έχουν ακρίβεια μόνο αν οι χαρακτηριστικές καμπύλες είναι χαραγμένες για τα kV (ή έστω κοντά σε αυτά) που θα χρησιμοποιηθούν στην έκθεση. Αν όχι, τα αποτελέσματα των υπολογισμών θα πρέπει να διορθωθούν χρησιμοποιώντας κατάλληλους συντελεστές διόρθωσης σχετικής έκθεσης από αντίστοιχους πίνακες που δεν δίνονται εδώ.



Εικ. 3.11: Υπολογισμός έκθεσης για άλλο φιλμ με τη βοήθεια των χαρακτηριστικών των φιλμ με βάση γνωστό διάγραμμα έκθεσης (Quinn, 1980)

3.7.6 Άλλο υλικό

Στην περίπτωση αυτή ο τρόπος εργασίας είναι διαφορετικός διότι, για όσα υλικά είναι διαθέσιμοι, χρησιμοποιούνται διορθωτικοί συντελεστές. Οι συντελεστές δίνονται σε πίνακες ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας με το αλουμίνιο ή το χάλυβα, δεδομένου ότι συνήθως τα διαγράμματα έκθεσης είναι για αλουμίνιο ή χάλυβα. Οι υπόψη πίνακες δίνονται στη συνέχεια και είναι οι 3.1, έως και 3.3.

Πίνακας 3.1: Ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας υλικών (ισοδυναμία με αλουμίνιο, Quinn, 1980, Παπαδόπουλος, 2014)

	50 kV	100 kV
Mn	0.6	0.6
Al	1.0	1.0
Al (2024)	2.2	1.6
Fe	-	12
Inox 18-8	-	12
Cu	-	18
Inconel	-	16

Πίνακας 3.2: Ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας υλικών (ισοδυναμία με χάλυβα, Quinn, 1980, Παπαδόπουλος, 2014)

	50 kV	100 kV	150 kV	200 kV	220 kV	250 kV	300 kV
Mn	0.034	0.05	0.05	0.07	0.08	-	-
Al	0.057	0.08	0.12	0.16	0.18	0.18	0.19
Al (2024)	-	-	0.16	-	0.22	-	i-
Duralumin(4%Cu)	0.077	0.09 - 0.1	0.13 - 0.14	0.18	0.18	0.18 - 0.21	0.19 - 0.21
Ti	-	-	0.45 - 0.54	1.0	0.35-0.54	-	-
Fe	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Inox 18-8	-	-	1.0	1.40	1.0	1.0	1.0
Cu	1.33	1.47 - 1.5	1.43 - 1.6	-	1.40	1.40-1.47	1.54
Zn	-	-	1.4	1.25	1.3	-	-
Brass	-	-	1.25 - 1.4	-	1.3	1.25	1.25
Inconel	-	-	1.4	-	1.3	-	-
Monel	-	1.7	-	-	1.2	-	-
Zr	-	2.4	2.3	-	2.0	1.7	-
Pb	-	14	11 - 14	13.3	12	1.4	16.7
U	-	-	-	-	20	16 - 25	-

Πίνακας 3.3: Ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας υλικών (ισοδυναμία με χάλυβα, Quinn, 1980, Παπαδόπουλος, 2014)

	400 kV	1 MV	2 MV	4 - 25 MV
Mn	-	-	-	-
Al	0.22	-	-	-
Al (2024)	-	-	-	-
Duralumin(4%Cu)	0.22	-	-	0.3
Ti	0.71	0.9	0.9	0.9
Fe	1.0	1.0	1.0	1.0
Inox 18-8	1.0	1.0	1.0	1.0
Cu	1.4 - 1.7	1.1	1.1	1.2 - 1.3
Zn	1.3	-	-	1.2
Brass	1.3	1.2	1.1-1.2	1.0
Inconel	1.3	1.3	1.3	1.3
Monel	-	-	-	-
Zr	1.5	1	1	1
Pb	-	5	2.5	2.7-3.0
U	12	4	-	3.9

Ο τρόπος χρήσεως των Πινάκων 3.2 έως 3.4, θα επιδειχθεί με τη βοήθεια παραδείγματος. Έστω λοιπόν ότι υπάρχει διαθέσιμο ένα διάγραμμα έκθεσης για χάλυβα. Στην περίπτωση αυτή η εργασία θα πρέπει να γίνει με έναν από τους πίνακες ο οποίος αναφέρεται σε ισοδυναμία με χάλυβα. Οι πίνακες ισοδυναμίας με χάλυβα ξεχωρίζουν από αυτούς της ισοδυναμίας με αλουμίνιο, διότι στη θέση των ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας για Fe έχουν παντού τιμή "1". (Προφανώς οι πίνακες ισοδυναμίας με αλουμίνιο ξεχωρίζουν από αυτούς της ισοδυναμίας με χάλυβα, διότι στη θέση των ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας για Al έχουν παντού τιμή "1"). Έστω επιπλέον ότι είναι επιθυμητό να ραδιογραφηθούν 12 mm χαλκού (Cu) στα 220 kV. Η έκθεση που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μπορεί να υπολογισθεί με τη βοήθεια του Πίνακα 3.2. Από τον πίνακα αυτό λαμβάνεται ότι ο συντελεστής ραδιογραφικής ισοδυναμίας του Cu με τον χάλυβα είναι 1.4. Υπολογίζεται το ισοδύναμο πάχος χάλυβα ως 12×1.4 mm. Για το πάχος αυτό λαμβάνεται για 220 kV, η κατάλληλη έκθεση από το διαθέσιμο διάγραμμα έκθεσης για χάλυβα.

Επισημαίνονται τα εξής: (α) Όλοι οι πίνακες είναι προσεγγιστικοί. (β) Δεν αποκλείεται ο χάλυβας να είναι μέταλλο αναφοράς και για 50 ή 100 kV, για τα οποία δόθηκε μόνο μέταλλο αναφοράς το ΑΙ. (γ) Τα κράματα ορείχαλκου δεν έχουν δεδομένη σύνθεση και οι συντελεστές κυμαίνονται διότι εξαρτώνται πολύ από τον περιεχόμενο μόλυβδο ή λευκοσίδηρο. (δ) Οι πίνακες δεν συμπεριλαμβάνουν την επίδραση των σκεδαζόμενων φωτονίων. (ε) Οι πίνακες προέκυψαν από πειράματα ερευνητών υπό διαφορετικές αλλά άγνωστες συνθήκες και αυτό είναι μια άλλη αιτία που για ορισμένα υλικά, κυρίως μεγάλου μαζικού αριθμού, οι συντελεστές παρουσιάζουν κύμανση.

Τέλος, είναι φανερό ότι, με βάση ένα γνωστό διάγραμμα έκθεσης είναι δυνατόν να υπολογισθεί η ορθή έκθεση, όταν υπάρχουν συνδυασμοί από μεταβολές στις συνθήκες για τις οποίες αυτό ισχύει και μάλιστα ακόμα και αν συνδυάζονται όλες οι αλλαγές που περιγράφονται στην παράγραφο 3.7.

3.8 Σχόλια και συμπεράσματα

Από την παραπάνω, πολύ σύντομη ανάλυση προκύπτει εύκολα ότι η Βιομηχανική Ραδιογραφία είναι μία κατ' αρχήν απλή και ευέλικτη μέθοδος Μη Καταστροφικού Ελέγχου, η οποία βασίζεται στη διαπερατότητα φωτονιακών ακτινοβολιών κατάλληλης ενέργειας στην ύλη. Σημειώνεται συμπληρωματικά ότι τα ραδιογραφούμενα αντικείμενα / προϊόντα, μπορεί να έχουν μέγεθος που κυμαίνεται από ηλεκτρονικά ανταλλακτικά σχεδόν οσοδήποτε μικρά, έως και οσοδήποτε μεγάλα μηχανολογικά μέρη διαστημικών πυραύλων. Επιπλέον η σύνθεση των ελεγχόμενων αντικειμένων μπορεί να περιέχει σχεδόν οποιοδήποτε γνωστό κατασκευαστικό υλικό. Τέλος, ο τρόπος κατασκευής (χύτευση, συγκόλληση κλπ) των αντικειμένων αυτών, ελάχιστα επηρεάζει.

Για την ορθή διεκπεραίωση ενός ραδιογραφικού ελέγχου θα πρέπει στην εικόνα που θα παραχθεί να είναι ορατά όσο το δυνατόν περισσότερα από τα εσωτερικά σφάλματα που μπορεί να υπάρχουν στο προϊόν ή την κατασκευή κάτι το οποίο εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την σωστή επιλογή τιμής της έκθεσης για το αντίστοιχο υλικό. Η μη διαπίστωση ενός σφάλματος ή μίας αστοχίας λόγω μη καθαρής εικόνας που έχει προκληθεί από την μη σωστή επιλογή της τιμής έκθεσης, μπορεί να έχει μεγάλες οικονομικές συνέπειες ή να συμβάλλει σε απώλειες ανθρώπινων ζωών. Επομένως η σημασία των διαγραμμάτων έκθεσης είναι ιδιαίτερα σημαντική αφού είναι αυτά που

βοηθούν στην κατά το δυνατό ορθή εκτίμηση της απαραίτητης έκθεσης ενός υλικού και κατά συνέπεια τον σωστό έλεγχο του.

Τα συνήθως διαθέσιμα διαγράμματα είναι αυτά του αλουμινίου και του χάλυβα. Παρόλα αυτά με χρήση κατάλληλων ραδιογραφικών συντελεστών ισοδυναμίας από υπάρχοντες πίνακες μπορεί να βρεθεί η κατάλληλη έκθεση και για τα άλλα υλικά. Επιπλέον ακόμη και αν οι συνθήκες ραδιογραφικού ελέγχου είναι διαφορετικές από αυτές για τις οποίες είναι διατυπωμένο ένα διάγραμμα έκθεσης, αυτό δεν αποκλείει την αποδοτική χρήση του, σύμφωνα με τρόπους που περιγράφηκαν με λεπτομέρεια πιο πάνω.

Βεβαίως, υπάρχουν και οι περιπτώσεις για τις οποίες τα εργαλεία, τα οποία βοηθούν στην εκτίμηση της ορθής έκθεσης με βάση ένα ήδη διαθέσιμο διάγραμμα έκθεσης είναι άχρηστα. Μια χαρακτηριστική τέτοια περίπτωση είναι το χαρτί, για το οποίο δεν διατίθενται ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας. Ως αποτέλεσμα, δεν μπορεί να εκτιμηθεί ορθά η έκθεση για τέτοιο υλικό, όπως τα βιβλία ή άλλα χάρτινα αντικείμενα παρόλο που αυτό είναι πολλές φορές αναγκαίο να γίνεται στα πλαίσια ερευνών πολιτιστικού ενδιαφέροντος, όπως η αρχαιολογική και άλλες. Στο επόμενο Κεφάλαιο γίνεται η αναγκαία πειραματική εργασία για να συμπληρωθεί το σχετικό κενό και να παραχθούν διαγράμματα έκθεσης για χαρτί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΓΙΑ ΧΑΡΤΙ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο Κεφάλαιο 3, υπάρχουν περιπτώσεις, που τα ήδη υπάρχοντα διαγράμματα έκθεσης, δεν διευκολύνουν την εκτίμηση της σωστής έκθεσης για κάποια υλικά. Αυτό συμβαίνει, όταν για τα εν λόγω υλικά, δεν είναι ακριβείς ή καθόλου γνωστοί οι ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας με τον χάλυβα ή το αλουμίνιο. Σε αυτές τις περιπτώσεις, που είναι δύσκολο να εκτιμηθεί σωστά η ορθή έκθεση, απαιτούνται αρκετές δοκιμαστικές ραδιογραφίες ώστε να βρεθεί η περιοχή ρυθμίσεων που θα δώσει μια καλής ποιότητας ραδιογραφική εικόνα. Μια τέτοια διαδικασία είναι αρκετά χρονοβόρα, ειδικά όταν απαιτούνται πολλοί έλεγχοι στα διάφορα πάχη του εκάστοτε υλικού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου υλικού είναι το χαρτί, για το οποίο δεν διατίθενται ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας. Στο Κεφάλαιο αυτό, περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ, προκειμένου να παραχθούν δύο διαγράμματα έκθεσης για χαρτί για δύο διαφορετικά φιλμ.

4.2 Ραδιογραφικός συντελεστής ισοδυναμίας

Ως χαρτί για αυτήν τη Μεταπτυχιακή Εργασία, εννοείται το σύγχρονο βιομηχανικό χαρτί όπως παράγεται σήμερα και ειδικότερα το λευκό φύλλο χαρτί βάρους 80 g ανά m², το οποίο χρησιμοποιείται για συνήθεις εκτυπώσεις σε εκτυπωτές γραφείου. Το χαρτί αυτό μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει τον χημικό τύπο της κυτταρίνης (cellulose) (C₆H₁₀O₅)_n, η οποία είναι το κυριότερο συστατικό του χαρτιού (> 90%). Αυτό σημαίνει ότι το χαρτί έχει τυπική μοριακή μάζα (MM)

$$MM_{\text{χαρτί}} = 6 \times AM_C + 10 \times AM_H + 5 \times AM_O \quad (4.1)$$

όπου:

AM_i, η κατά προσέγγιση ατομική μάζα του άνθρακα (i = C), του υδρογόνου (i=H) και του οξυγόνου (i=O).

Προκύπτει ότι $MM_{\text{χαρτί}} = 174$ αν είναι κατά μάζα 6% H, 48.0% C και 46.0% O. Αγνοούνται σε αυτόν τον μοριακό τύπο ανόργανα και πιθανόν μεταλλικά πρόσθετα που σίγουρα υπάρχουν στο χαρτί. Το χαρτί εκτυπώσεων θεωρείται με σχετικά μέτριο υψηλό βαθμό διασύνδεσης ινών. Πράγματι η φαινόμενη πυκνότητα του υπολογίζεται μεγαλύτερη από 0.75 gcm^{-3} που είναι ένα σύνηθες κάτω όριο για το πυκνό χαρτί. Πιο συγκεκριμένα, έστω δέσμη χαρτιού διαστάσεων A4 500 φύλλων, η οποία ζυγίστηκε και βρέθηκε με μάζα 2546 g. Ο όγκος της δέσμης αυτής βρέθηκε 3024 cm^3 . Επομένως η φαινόμενη πυκνότητα του χαρτιού αυτής της ποιότητας είναι 0.83 gcm^{-3} . Προκειμένου να εκτιμηθεί ο ραδιογραφικός συντελεστής ισοδυναμίας αυτού του είδους χαρτιού, εξετάστηκε αν μπορεί να εφαρμοστεί η σχέση υπολογισμού που προτείνει ο Παπαδόπουλος (2014), η οποία φαίνεται να εκτιμά ορθά στην περίπτωση μιγμάτων από πυρήνες που ανήκουν σε στερεά.

$$\rho_{\text{μίσματος}}^{\text{PΣI}} = \rho_{\text{μίσματος}} \sum_{i=1}^n w_i \frac{\rho_{\text{PΣI}_i}}{\rho_i} \quad (4.2)$$

όπου:

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

n το πλήθος των συστατικών του μίγματος

$\rho_{\text{PΣI}_i}$ ο ραδιογραφικός συντελεστής ισοδυναμίας κάθε συστατικού,

w_i η κατά μάζα περιεκτικότητα κάθε συστατικού, και

ρ_i η πυκνότητα κάθε συστατικού του μίγματος

Εφαρμόζοντας την σχέση αυτή μόνο για C, αγνοώντας δηλαδή τους ελαφρείς αέριους πυρήνες του H και του O και δεχόμενοι, αν αγνοηθούν οι πυκνότητες του H και του O, ότι η πυκνότητα του άνθρακα στην κυτταρίνη είναι 1.73 gcm^{-3} ($=0.83/0.48$) εκτιμάται ότι ο ραδιογραφικός συντελεστής ισοδυναμίας του χαρτιού είναι

$$\rho_{\text{χαρτί}}^{\text{PΣI}} = \rho_{\text{χαρτί}} \sum_{i=1}^1 0.48 \frac{\rho_{\text{PΣI}_C}}{1.73} \quad (4.3)$$

ή ισοδύναμα

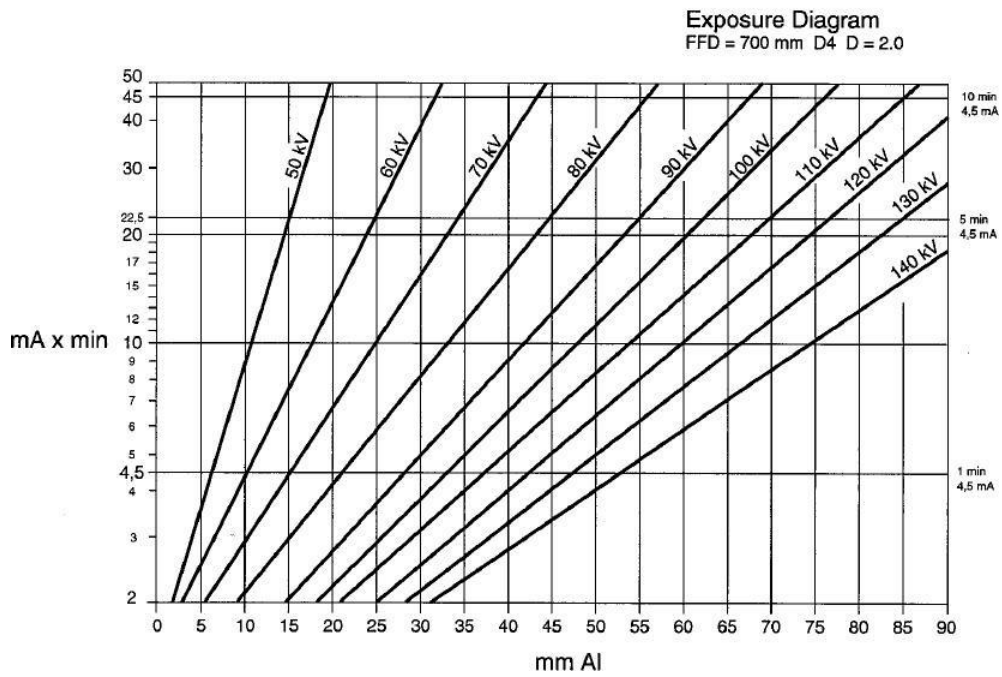
$$\rho_{\text{χαρτί}}^{\text{PΣI}} = 0.83 \times 0.48 \frac{\rho_{\text{PΣI}_C}}{1.73} \quad (4.4)$$

Ως P_{SI_C} λαμβάνεται από τον Πίνακα 5.14 της Διπλωματικής Εργασίας Παπαδόπουλος (2014) προσεγγιστικά η τιμή 0.02 για ακτίνες -x 50 kV και ισοδύναμο υλικό αναφοράς το Αλουμίνιο. Μετά από αντικατάσταση προκύπτει ότι $P_{SI_{\text{χαρτί}}} \approx 0.005$.

Εφαρμόζοντας αυτόν τον ραδιογραφικό συντελεστή ισοδυναμίας για μια δέσμη χαρτιού A4 (500 φύλλα) προκύπτει ότι για πάχος δέσμης ίσο με 48.5mm για ακτίνες -x των 50 kV, η αναγκαία έκθεση πρέπει να είναι 1.3 mA min. Το αποτέλεσμα αυτό προκύπτει από το διάγραμμα έκθεσης A1 (Εικόνα 4.1), για φιλμ AGFA D4, απόσταση εστιακού σημείου-φιλμ ίση με 70 cm και μηχανή παραγωγής ακτίνων -x General Electric ERESO 42 MF3, την οποία διαθέτει το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ (όπως στην Εικόνα 4.2).

Για την επαλήθευση του συντελεστή που βρέθηκε πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σύμφωνα με τον Πίνακα 4.1. Οι δοκιμές έγιναν με πάχος χαρτιού ίσο με 48.5 mm, δηλ. πάχος 500 φύλλων A4. Επειδή στο Εργαστήριο δεν υπήρχε διαθέσιμο φιλμ D4 οι δοκιμές έγιναν με φιλμ D7. Για να μετατραπεί μια έκθεση από φιλμ D4 σε φιλμ D7, χρειάζεται, σύμφωνα με όσα αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3, η έκθεση για το φιλμ D4 να πολλαπλασιαστεί με $10^{-0.4}$. Για τον υπολογισμό του εκθέτη χρησιμοποιήθηκαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες της Εικόνας 4.3. Προκύπτει από το διάγραμμα έκθεσης της Εικόνας 4.1, όπως μεγεθύνθηκε στην Εικόνα 4.4, ότι οι δοκιμές μπορούν να ξεκινήσουν για φιλμ D7 και έκθεση 1 mAmin. Διαπιστώθηκε από τις δοκιμές ότι η έκθεση των 1 mAmin στα 50 kV δεν ήταν αρκετή. Πρώτη καθαρή εικόνα καλής οπτικής πυκνότητας (στην περιοχή $1 < D < 2$), λήφθηκε για έκθεση 2 mA min. Αυτό σημαίνει ότι ο ραδιογραφικός συντελεστής ισοδυναμίας που εκτιμήθηκε είναι λανθασμένος και πιθανότατα αυτό οφείλεται σε λάθος εκτίμηση της περιεκτικότητας του C ή της πυκνότητας του O στο μίγμα του χαρτιού. Μπορεί να υποθεθεί εύλογα ότι σίγουρα υπάρχουν και άλλα στερεά στοιχεία στο χαρτί, τα οποία ασφαλώς δεν λήφθηκαν υπόψη, αλλά είναι απαραίτητα για την εξασφάλιση της αντοχής του και των υπολοίπων ιδιοτήτων του σε μια αλκαλική σύνθεση. Επιπλέον λόγω της λογαριθμικής μορφής του διαγράμματος έκθεσης του Αλουμινίου όπως χρησιμοποιήθηκε σε μεγέθυνση σύμφωνα με την Εικόνα 4.3, δεν αποκλείονται μεγάλα λάθη που πηγάζουν και από αυτήν την αυθαιρεσία. Το πραγματικό συμπέρασμα που προκύπτει από αυτήν τη διαπραγμάτευση είναι η επαλήθευση ότι οι ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας για χαρτί είναι πράγματι άγνωστοι.

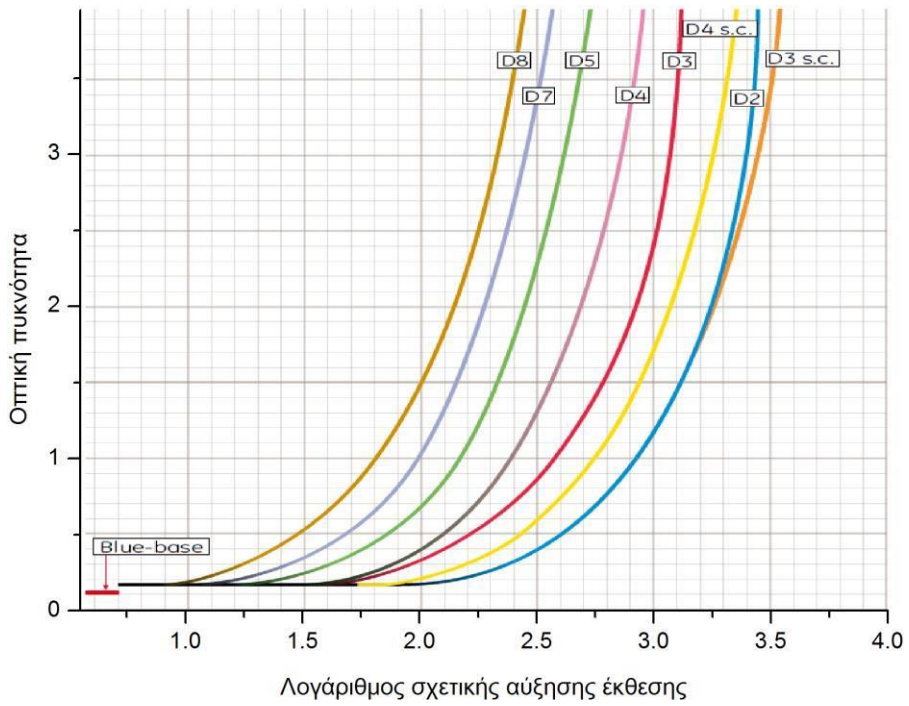
ERESCO 42 MF3



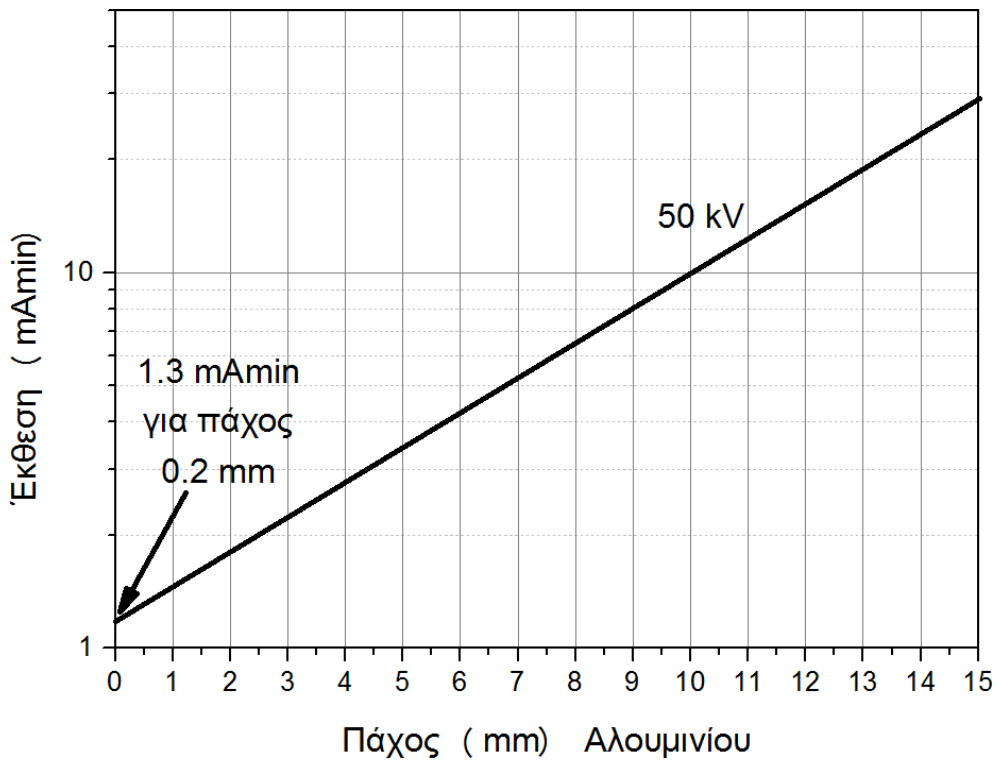
Εικ. 4.1 Διάγραμμα έκθεσης Αλουμινίου για τη μηχανή παραγωγής ακτίνων -x του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας



Εικ. 4.2 Μηχανή παραγωγής ακτίνων -x General Electric ERESKO 42 MF3, όπως αυτή που διαθέτει το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ



Εικ 4.3: Χαρακτηριστικές καμπύλες για φιλμ του συστήματος AGFA
(General Electric, 2008)



Εικ. 4.4: Μεγέθυνση της κάτω αριστερά περιοχής της Εικόνας 4.1 προκειμένου το διάγραμμα να εφαρμοστεί για χαρτί μέσω ραδιογραφικού συντελεστή ισοδυναμίας

Πίνακας 4.1 Δοκιμές έκθεσης χαρτιού πάχους 48.5 mm για λήψη εικόνας επιθυμητής οπτική πυκνότητας

kV πηγής	mA min	Οπτική Πυκνότητα D
30	1	< 0.5 (περίπου λευκό)
50	1	< 0.5 (περίπου λευκό)
50	2	1.1
50	4	2.0
80	5	> 4 (εντελώς μαύρο)

Εφαρμόζοντας αντίστροφα τα αποτελέσματα της προτελευταίας γραμμής του Πίνακα 4.1, μπορεί κανείς να πάει προς τα πίσω σε φιλμ AGFA D4 πολλαπλασιάζοντας τα 4 mA min με $10^{0.4}$. Προκύπτει νέα έκθεση 10 mAmin. Αν τοποθετηθεί η τιμή αυτή στο διάγραμμα έκθεσης της Εικόνας 4.1, για τάση πηγής 50 kV, προκύπτει ότι το πάχος Αλουμινίου είναι 11 mm. Δεδομένου ότι το πάχος του χαρτιού που δοκιμάστηκε είναι 48.5 mm, ο ραδιογραφικός συντελεστής ισοδυναμίας χαρτιού αλουμινίου είναι $11/48.5=0.23$. Η τιμή αυτή είναι πολύ υψηλή σε σχέση με την αρχική εκτίμηση του 0.003. Αυτό επιβεβαιώνει ότι το χαρτί που δοκιμάστηκε δεν έχει μόνο C ως στερεό.

4.3 Δοκίμιο κλίμακας

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων κατασκευής διαγράμματος έκθεσης για χαρτί, ήταν αναγκαίο να κατασκευαστεί ένα δοκίμιο κλίμακας από αυτό το υλικό. Το δοκίμιο συγκροτήθηκε από δέκα δεσμίδες των 100 φύλλων χαρτιού A4, πάχους 10 mm, μήκους 210 mm (= το πλάτος του χαρτιού A4) και μεταβλητού πλάτους, οι οποίες συγκολλήθηκαν μεταξύ τους με τρόπο τέτοιο ώστε να σχηματιστεί μια κλίμακα από 10 σκαλοπάτια. Το ελάχιστο πάχος του δοκιμίου είναι 1 cm. Το μέγιστο πάχος του δοκιμίου είναι 10 cm. Η αύξηση πάχους ανά σκαλοπάτι είναι 1 cm. Επειδή η μεταφορά του δοκιμίου, για τις ανάγκες διεξαγωγής του πειράματος, δεν ήταν εύκολη, η όλη παραπάνω κατασκευή τοποθετήθηκε σε κατάλληλα διαμορφωμένο κουτί από φύλλα Plexiglas. Τα φύλλα Plexiglas είναι πάχους 8 mm και οι εξωτερικές διαστάσεις του κουτιού προέκυψαν ως ~πλάτος: 22.5 × μήκος: 21.6 × ύψος: 13 cm, ενώ οι εσωτερικές προέκυψαν ως ~ πλάτος: 21 × μήκος: 20 × ύψος: 12.2 cm. Στην κατασκευή υπάρχουν

και λωρίδες plexiglass, οι οποίες εμποδίζουν τη διάλυση του δοκιμίου κλίμακας. Η κατασκευή ως δοκίμιο κλίμακας, παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.5.



Εικ. 4.5: Δοκίμιο κλίμακας χαρτιού, τοποθετημένο μέσα σε κουτί από Plexiglas. Η οριζόντια διάσταση είναι το μήκος και η κάθετη το πλάτος στην κάτω Εικόνα. Στην άνω Εικόνα διακρίνεται το ύψος.

4.4 Εξοπλισμός, ρυθμίσεις και προκαταρκτικές σκέψεις

Για τις πειραματικές εκθέσεις, χρησιμοποιήθηκε μηχανή παραγωγής ακτίνων -x της εταιρείας κατασκευής General Electric, τύπου ERESO 42 MF3.1. Η συγκεκριμένη μηχανή είναι διαθέσιμη στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ (βλ. π.χ. Μεταπτυχιακή Εργασία Αναγνώστου, 2020 , Μεταπτυχιακή Εργασία Χρυσικόπουλος, 2019 κ.ά.). Η μηχανή έχει ισχύ 900 W και αναπτύσσει μέγιστη τάση έως 200 kV.

Άλλες σχετικές ρυθμίσεις που έγιναν για τις ανάγκες του πειράματος είναι οι παρακάτω

1. Απόσταση εστιακού σημείου-φίλμ 70 cm
2. Είδη φίλμ για τα οποία υπολογίσθηκαν διαγράμματα έκθεσης: FUJI IX100PB και FUJI IX50PB
3. Επιθυμητή οπτική πυκνότητα: $D = 2$

Με δεδομένο ότι, το χαρτί, όπως αναφέρθηκε, αποτελείται βασικά από ελαφρούς πυρήνες και έχει χαμηλή Μοριακή Μάζα και πυκνότητα και σε συνδυασμό με τις πρώτες δοκιμές του Πίνακα 4.1 εκτιμήθηκε ότι δεν μπορεί να κατασκευαστεί διάγραμμα έκθεσης για τάσεις μηχανής μεγαλύτερες από 60 kV. Για τάσεις μεγαλύτερες από 60 kV, τα παραγόμενα φωτόνια είναι υψηλής δραστηρικής ενέργειας για χαρτί (περίπου 30 keV) άρα πολύ διαπεραστικά για χαρτί. Για τέτοια φωτόνια, η ραδιογραφική εικόνα χαρτιού εμφανίζεται μαύρη για το σύνολο του δοκιμίου κλίμακας. Παράλληλα, το διάγραμμα δεν μπορεί να κατασκευαστεί για τάσεις μηχανής χαμηλότερες από 20 kV, καθώς τότε τα παραγόμενα φωτόνια δεν είναι τόσο διαπεραστικά λόγω της χαμηλής τους δραστηρικής ενέργειας (περίπου 10 keV). Σε αυτές τις ενέργειες, η ραδιογραφική εικόνα χαρτιού στο φίλμ, προκύπτει υπόλευκη για τα περισσότερα τμήματα του δοκιμίου κλίμακας.

Για τα φίλμ που χρησιμοποιήθηκαν σημειώνονται τα παρακάτω:

- Τα φίλμ είναι εταιρείας κατασκευής FUJI
- τύπος IX100PB είναι αντίστοιχος / ισοδύναμος με τον τύπο D7PB της εταιρείας κατασκευής AGFA. Και οι δύο τύποι είναι σύμφωνοι με την προδιαγραφή C5 κατά ISO 11699-1. Το διακριτικό PB σημαίνει ότι το φίλμ έχει ενισχυτικές οθόνες από

φύλλα μολύβδου. Το φιλμ IX100PB προστατεύεται σε φωτοστεγανό φάκελο συσκευασίας σε κενό.

- τύπος IX50PB είναι αντίστοιχος / ισοδύναμος με τον τύπο D4PB της εταιρείας κατασκευής AGFA. Και οι δύο τύποι είναι σύμφωνοι με την προδιαγραφή C3 κατά ISO 11699-1. Το διακριτικό PB σημαίνει ότι το φιλμ έχει ενισχυτικές οθόνες από φύλλα μολύβδου. Το φιλμ IX50PB προστατεύεται σε φωτοστεγανό φάκελο συσκευασίας σε κενό.

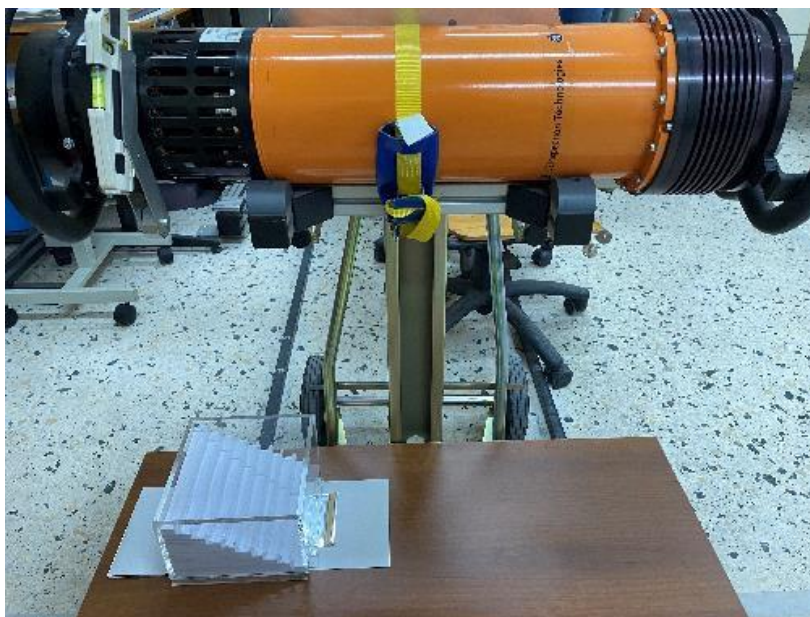
Εκτιμήθηκε με βάση προηγούμενη εμπειρία πως πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι εξής εκθέσεις

1. $3\text{ mA} \times \text{min}$ και $8\text{ mA} \times \text{min}$ για φιλμ FUJI IX100PB
2. $9\text{ mA} \times \text{min}$ και $20\text{ mA} \times \text{min}$ για φιλμ FUJI IX50PB

Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.6. Το δοκίμιο κλίμακας είναι τοποθετημένο πάνω από το έδαφος σε μια ξύλινη επιφάνεια, Μεταξύ του δοκιμίου και της ξύλινης επιφάνειας έχει τοποθετηθεί το ραδιογραφικό φιλμ (ασημί φωτοστεγανός φάκελος). Μεταξύ του φιλμ και της ξύλινης επιφάνειας έχουν τοποθετηθεί φύλλα μολύβδου για τον περιορισμό της οπισθοσκέδασης φωτονίων (λευκά φύλλα). Μέσα στο φιλμ, υπάρχουν, όπως αναφέρθηκε ήδη λεπτά φύλλα μολύβδου. Τα φύλλα αυτά στις ενέργειες ακτίνων -x που πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα, χρησιμεύουν μόνο για την προστασία του φιλμ από τα σκεδαζόμενα φωτόνια και δεν έχουν πρακτικά καμία ενισχυτική δράση. Τα σκεδαζόμενα φωτόνια μαυρίζουν το φιλμ, χωρίς να μεταφέρουν πληροφορίες από το δοκίμιο. Τέλος, πάνω από το δοκίμιο και σε απόσταση του εστιακού σημείου 70 cm, τοποθετείται η λυχνία ακτίνων -x. Η παραγόμενη δέσμη ακτίνων-x μπορεί να στρέφεται ώστε ο άξονας της δέσμης των ακτίνων να είναι κάθετος στην επιφάνεια του φιλμ και να διέρχεται από το γεωμετρικό του κέντρο, κάτι το οποίο επιτυγχάνεται με σκόπευτρο Laser που είναι ενσωματωμένο πάνω στην λυχνία.

Τα πειράματα έκθεσης, έλαβαν μέρος σε ένα ειδικά εξοπλισμένο και θωρακισμένο χώρο. Το προσωπικό και το κοινό που βρίσκεται εκτός αυτού του χώρου, αλλά ακόμα και σε κοντινή απόσταση, είναι απολύτως προστατευμένο από την εκπεμπόμενη ακτινοβολία, που παράγεται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, κάτι το οποίο

πιστοποιείται από την αρμόδια Ελληνική Αρχή, την Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας.

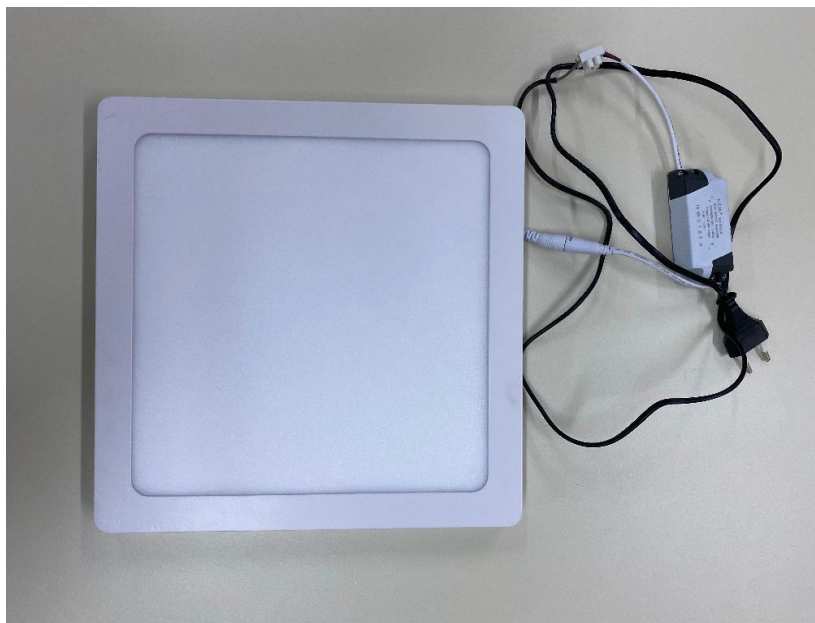


Εικ. 4.6: Πειραματική διάταξη

Η εμφάνιση, η στερέωση και η πλύση των φιλμ των πειραμάτων έγινε χειροκίνητα σε κατάλληλα για το σκοπό αυτό δοχεία εμφάνισης, στερέωσης και πλύσης. Για την εμφάνιση των φιλμ χρησιμοποιήθηκε διάλυμα εμφάνισης με βάση τον εμπορικά διαθέσιμο συμπυκνωμένο εμφανιστή XR D-6 NDT της γερμανικής εταιρείας κατασκευής DÜRR NDT, η προμήθεια του οποίου πραγματοποιήθηκε από τον τοπικό αντιπρόσωπο την εταιρεία QCONTROL. Η διάλυση του συμπυκνωμένου εμφανιστή έγινε με νερό κατά τις οδηγίες του κατασκευαστή. Για τη στερέωση των φιλμ χρησιμοποιήθηκε διάλυμα στερέωσης με βάση τον εμπορικά διαθέσιμο συμπυκνωμένο στερεωτή XR F-6 NDT της ίδιας γερμανικής εταιρείας. Η διάλυση του συμπυκνωμένου στερεωτή έγινε με νερό κατά τις οδηγίες του κατασκευαστή. Σημειώνεται ότι ο εμφανιστής και ο στερεωτής της υπόψη εταιρείας είναι κατάλληλος και για αυτόματη εμφάνιση και στερέωση με την ίδια συνταγή αραιώσης με νερό. Η πλύση των φιλμ έγινε με νερό βρύσης.

Για την εξέταση της οπτικής πυκνότητας της ραδιογραφικής εικόνας που αποτυπώθηκε στο φιλμ, χρησιμοποιήθηκε ειδικά φωτιζόμενη οθόνη υψηλής και ομοιόμορφης διάχυσης φωτός ή αλλιώς διαφανοσκόπιο. Η οθόνη αυτή είναι τύπου LED και υπάρχει σήμερα εμπορικά διαθέσιμη με μικρό κόστος (15 έως 20 ΕΥΡΩ, βλ. Εικόνα 4.7).

Παλαιότερες οθόνες τέτοιου είδους ήταν τεχνολογίας πυρακτώσεως με κατάλληλο διαχύτη φωτός. Το κόστος τέτοιων παλαιότερων διαφανοσκοπίων, όπως αυτό της εταιρίας κατασκευής KOWOLUX, στην Εικόνα 4.8, ήταν στην περιοχή των 2,000 ΕΥΡΩ. Τέτοιο διαφανοσκόπιο παλαιότερου τύπου διατίθεται και στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας.



Εικ. 4.7 Οικονομικό διαφανοσκόπιο LED



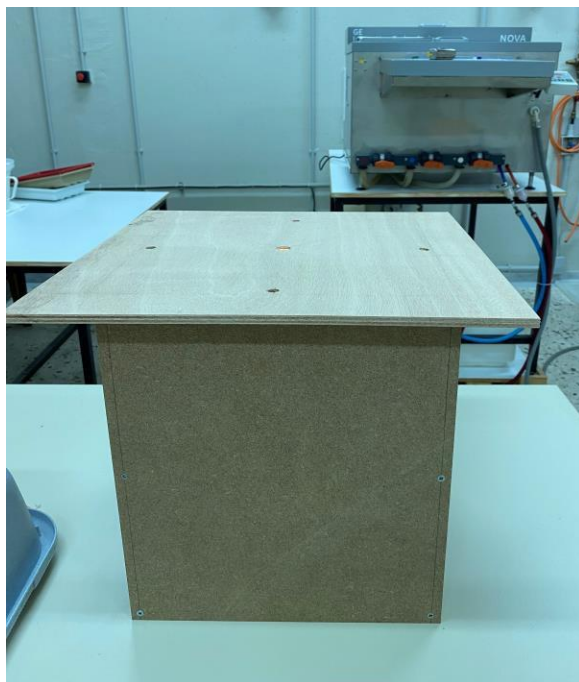
Εικ. 4.8: Διαφανοσκόπιο KOWOLUX 4S

Ο μετρητής οπτικής πυκνότητας, που χρησιμοποιήθηκε, φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 4.9 και είναι εταιρείας κατασκευής Fidgeon Ltd τύπου Digit-X.



Εικ. 4.9: Μετρητής οπτικής πυκνότητας

Τέλος, για τις ανάγκες της φωτογράφισης των φιλμ, κατασκευάστηκε θάλαμος παρατήρησης του διαφανοσκοπίου, ο οποίος φαίνεται στην Εικόνα 4.10. Η κατασκευή του θαλάμου είναι από ξύλο MDF πάχους 18 mm και έχει εσωτερικές διαστάσεις $Υ=39 \times Μ=30 \times Π=30$ cm.



Εικ. 4.10 Θάλαμος παρατήρησης διαφανοσκοπίου

Ο θάλαμος τοποθετείται περιφερειακά του διαφανοσκοπίου σε επαφή με τη φωτιζόμενη οθόνη LED, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.11



Εικ. 4.11: Θάλαμος παρατήρησης και οθόνη φωτός LED

Πάνω από τον θάλαμο τοποθετείται μια τετράγωνη επιφάνεια παρατήρησης με τρόπο ώστε ο άξονας της οπής διαμέτρου περίπου 10 - 15 mm που υπάρχει στο κέντρο της επιφάνειας να είναι και ο άξονας που διέρχεται από το κέντρο της φωτιζόμενης οθόνης. Στην οπή αυτή τοποθετείται η κάμερα μιας φωτογραφικής μηχανής ή βολικότερα ενός

κινητού τηλεφώνου, ώστε να μπορεί να λαμβάνεται φωτογραφία του φωτιζόμενου φιλμ για τυχόν ανάγκες ψηφιοποίησης (βλ. Εικόνα 4.11). Στην Εικόνα 4.12, φαίνεται η οθόνη παρατήρησης τοποθετημένη πάνω στο θάλαμο παρατήρησης μαζί με ένα κινητό τηλέφωνο. Κοντά στις ακμές της επιφάνειας παρατήρησης υπάρχουν οπές που επιτρέπουν, με τη βοήθεια κατάλληλων σημαδιών πάνω στο θάλαμο παρατήρησης, την τοποθέτηση της επιφάνειας παρατήρησης πάντοτε στην ίδια θέση.



Εικ. 4.12: Λεπτομέρειες επιφάνειας παρατήρησης με κινητό τηλέφωνο για φωτογράφιση.

4.5 Πειράματα και αποτελέσματα

4.5.1 Πειραματικές εκθέσεις για φιλμ FUJI IX100PB

Το πρώτο σετ εκθέσεων, έγινε χρησιμοποιώντας ένταση ρεύματος ηλεκτρονίων 3 mA και χρόνο έκθεσης 1 min. Το ηλεκτρικό πεδίο που χρησιμοποιήθηκε για τις ραδιογραφίες του δοκιμίου κλίμακας ήταν από 20 kV έως 60 kV, με βήμα 10 kV. Η ίδια διαδικασία έγινε για ένταση ρεύματος 2 mA και χρόνο έκθεσης 4 min. Για το πρώτο σετ εκθέσεων χρησιμοποιήθηκε φιλμ FUJI IX100PB. Έπειτα, έγινε χειροκίνητη εμφάνιση των ραδιογραφικών εικόνων, ενώ για την μέτρηση της οπτικής πυκνότητας των φιλμ χρησιμοποιήθηκε το διαφανοσκόπιο με φωτιζόμενη οθόνη LED, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.7.

Οι παρακάτω Πίνακες 4.2 και 4.3 συνοψίζουν τις τιμές οπτικής πυκνότητας που βρέθηκαν για κάθε ένα σκαλί της κλίμακας.

Πίνακας 4.2: Οπτική πυκνότητα για κάθε πάχος του δοκιμίου κλίμακας και για κάθε ηλεκτρικό δυναμικό για έκθεση στα 3 mA×1 min σε φιλμ FUJI IX100PB

kV	Πάχος (mm)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	0.61	0.45	0.38	-	-	-	-	-	-	-
40	2.28	1.53	1.06	0.79	0.63	0.54	0.49	-	-	-
50	4.05	3.36	2.56	1.95	1.50	1.18	0.96	0.77	0.63	0.52
60	-	5.15	4.35	3.52	2.9	2.32	1.94	1.56	1.24	1.01

Πίνακας 4.3: Οπτική πυκνότητα για κάθε πάχος του δοκιμίου κλίμακας και για κάθε ηλεκτρικό δυναμικό για έκθεση στα 2 mA×4 min σε φιλμ FUJI IX100PB

kV	Πάχος (mm)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
20	0.25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	1.19	0.68	0.45	0.32	0.26	0.23	-	-	-	-
40	4.23	3.02	2.12	1.50	1.08	0.72	0.60	0.47	0.36	0.29
50	-	5.26	4.58	3.66	2.93	2.32	1.84	1.43	1.11	0.85
60	-	-	-	5.12	4.69	4.06	3.43	2.88	2.33	1.88

4.5.2 Πειραματικές εκθέσεις για φιλμ FUJI IX50PB

Στην συνέχεια επαναλήφθηκε η παραπάνω διαδικασία για φιλμ FUJI IX50PB. Σε αυτή την περίπτωση, το πρώτο σετ εκθέσεων, έγινε χρησιμοποιώντας ένταση ρεύματος ηλεκτρονίων 4.5 mA και χρόνο έκθεσης 2 min. Η ίδια διαδικασία έγινε για ένταση ρεύματος 4 mA και χρόνο έκθεσης 5 min. Και στις δυο περιπτώσεις, το ηλεκτρικό πεδίο που χρησιμοποιήθηκε για τις ραδιογραφίες του δοκιμίου ήταν από 20 kV έως 60 kV, με βήμα 10 kV.

Οι παρακάτω Πίνακες 4.4 και 4.5 συνοψίζουν τις τιμές οπτικής πυκνότητας που βρέθηκαν για κάθε ένα σκαλί της κλίμακας.

Πίνακας 4.4: Οπτική πυκνότητα για κάθε πάχος του δοκιμίου κλίμακας και για κάθε ηλεκτρικό δυναμικό για έκθεση στα 4.5 mA×2 min σε φιλμ FUJI IX50PB

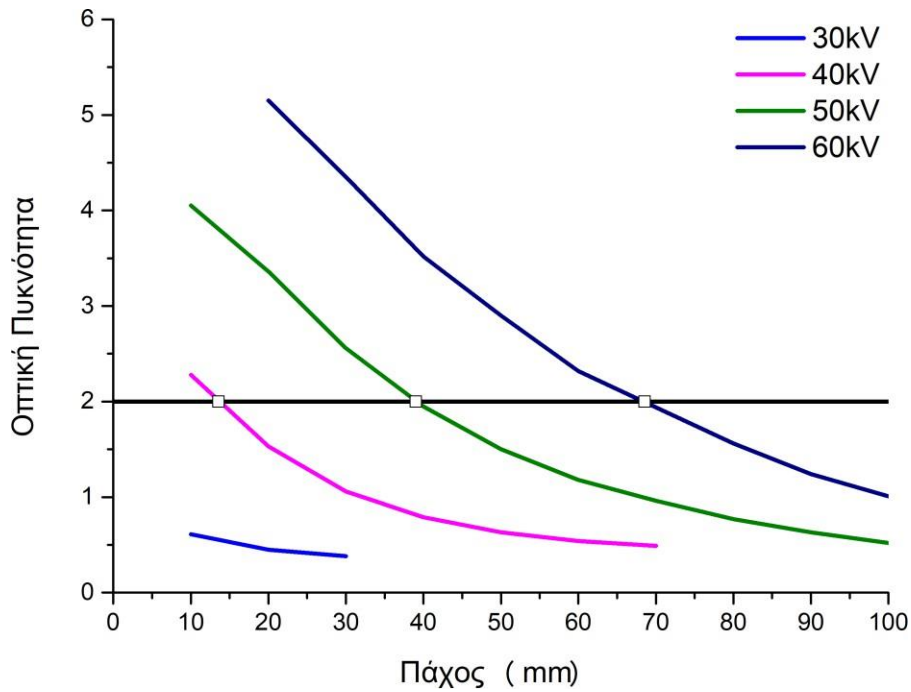
kV	Πάχος (mm)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
20	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	0.98	0.53	0.35	0.23	0.17	-	-	-	-	-
40	3.37	2.2	1.45	0.99	0.71	0.51	0.39	0.3	0.23	0.19
50	-	4.85	3.61	2.68	1.99	1.52	1.16	0.91	0.69	0.52
60	-	-	-	5.1	4.16	3.42	2.75	2.2	1.73	1.28

Πίνακας 4.5: Οπτική πυκνότητα για κάθε πάχος του δοκιμίου κλίμακας και για κάθε ηλεκτρικό δυναμικό για έκθεση στα 4 mA×5 min σε φιλμ FUJI IX50PB

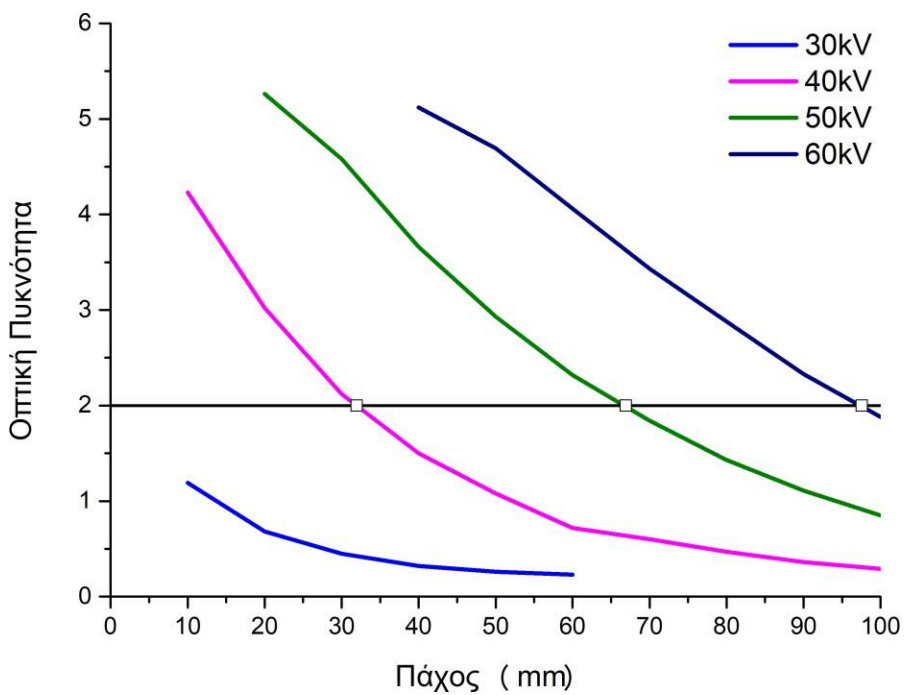
kV	Πάχος (mm)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
20	0.24	0.17	-	-	-	-	-	-	-	-
30	1.84	0.99	0.59	0.38	0.28	0.22	0.19	-	-	-
40	5.63	4.62	2.9	1.97	1.32	0.92	0.67	0.49	0.37	0.29
50	-	-	-	5.22	4.00	3.11	2.41	1.84	1.37	0.98
60	-	-	-	-	-	-	-	4.17	3.34	2.45

4.5.3 Βοηθητικά διαγράμματα Οπτικής πυκνότητας - Πάχους

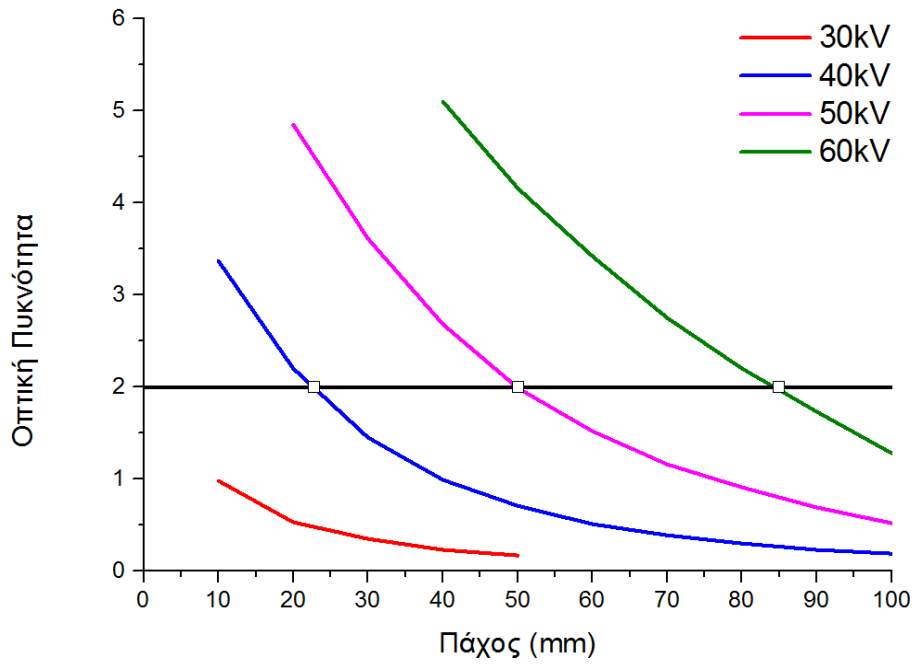
Στις παρακάτω Εικόνες 4.13 έως και 4.16 παρουσιάζονται τα βοηθητικά διαγράμματα οπτικής πυκνότητας σε σχέση με το πάχος του υλικού στα διάφορα σημεία του δοκιμίου.



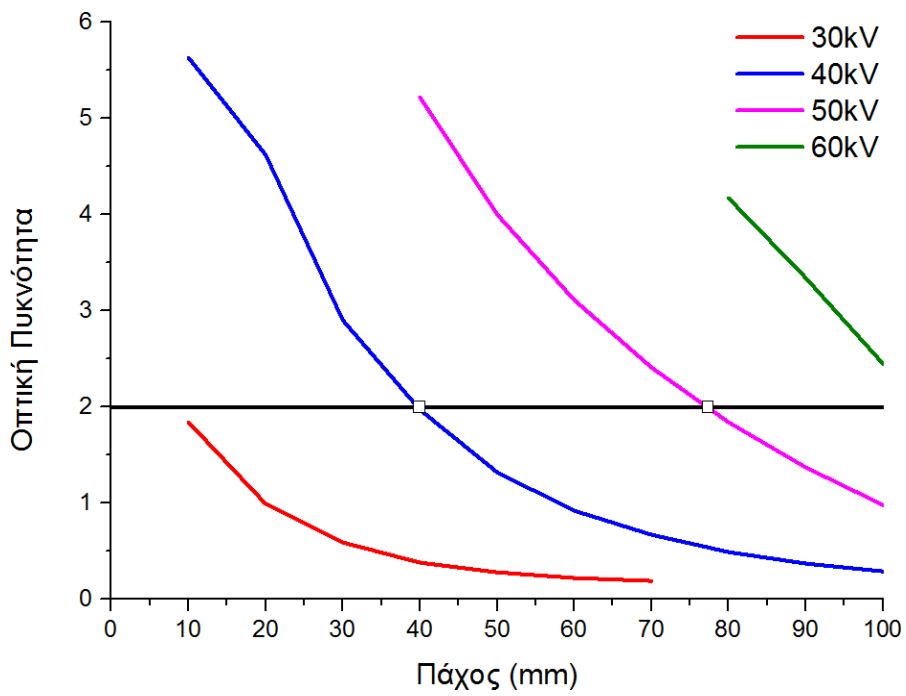
Εικ. 4.13: Διάγραμμα Οπτικής πυκνότητας - Πάχους για 3 mA×1 min για φιλμ FUJI IX100PB



Εικ. 4.14: Διάγραμμα Οπτικής πυκνότητας - Πάχους για 2 mA×4 min για φιλμ FUJI IX100PB



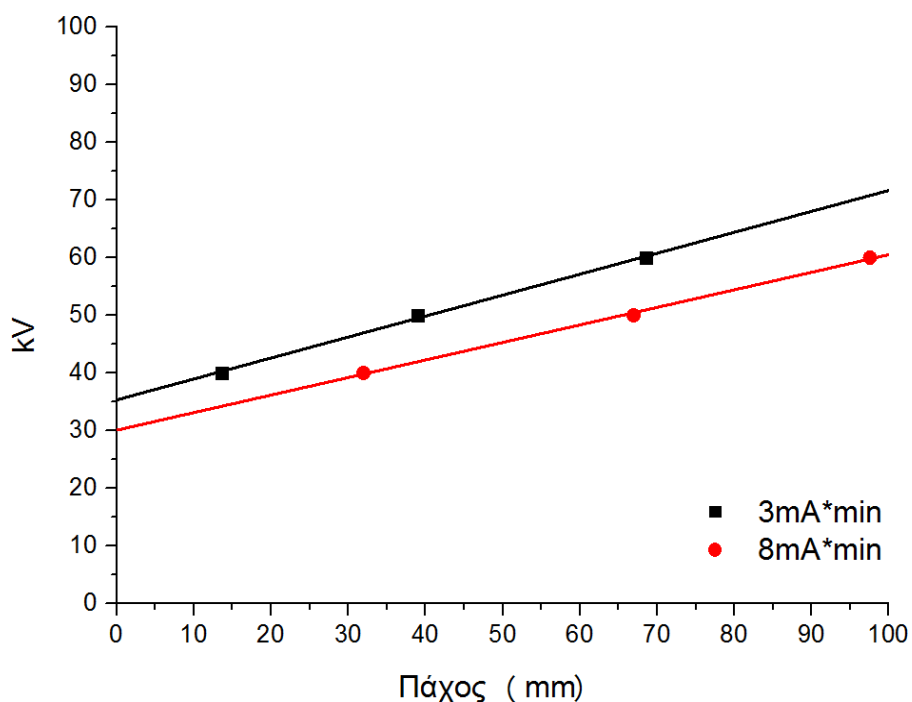
Εικ. 4.15: Διάγραμμα Οπτικής πυκνότητας - Πάχους για 4.5 mA×2 min για φιλμ FUJI IX50PB



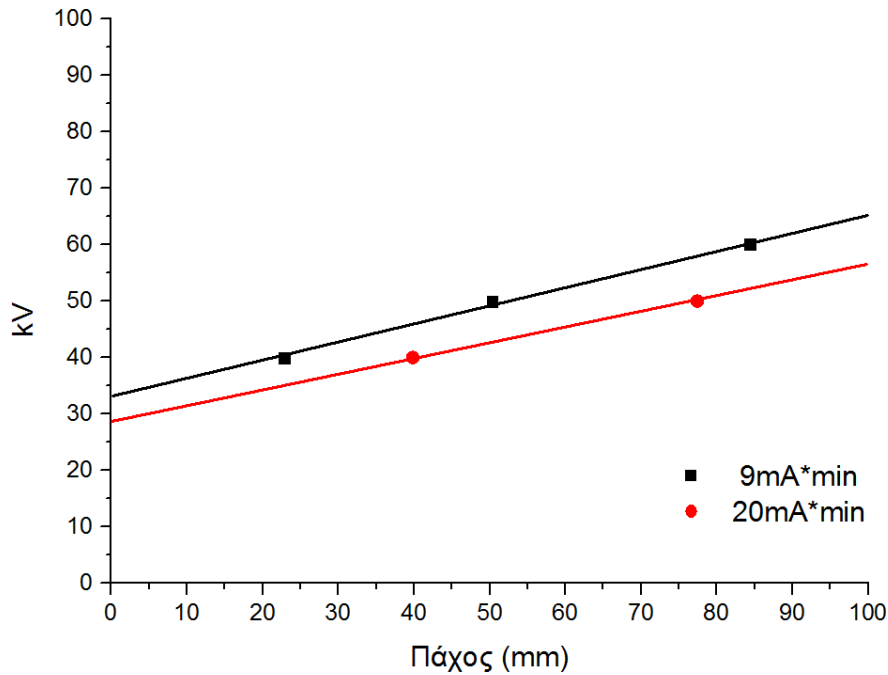
Εικ. 4.16: Διάγραμμα Οπτικής πυκνότητας - Πάχους για 4 mA×5 min για φιλμ FUJI IX50PB

4.5.4 Βοηθητικά διαγράμματα kV - Πάχους

Σε συνέχεια των προηγούμενων, τα σημεία με οπτική πυκνότητα $D = 2$ που παρουσιάζονται στα παραπάνω διαγράμματα Οπτικής πυκνότητας - Πάχους, με άσπρα τετράγωνα, μεταφέρονται σε δύο διαγράμματα kV - Πάχους. Στο πρώτο διάγραμμα στην Εικόνα 4.17 εμφανίζονται οι εκθέσεις στα 3 mAmin με σύμβολα "τετράγωνα" και 8 mAmin με σύμβολα "κύκλους" φιλμ FUJI IX100PB, ενώ στο δεύτερο στην Εικόνα 4.18 αποτυπώνονται οι εκθέσεις στα 9 mAmin (τετράγωνα) και 20 mAmin (κύκλους).



Εικ. 4.17: Διάγραμμα kV - Πάχους για φιλμ FUJI IX100PB



Εικ. 4.18: Διάγραμμα kV-Πάχους για φιλμ FUJI IX50PB

4.5.5 Εξαγωγή διαγράμματος έκθεσης

Με βάση τα διαγράμματα kV-Πάχους, προκύπτουν οι παρακάτω Πίνακες 4.6 και 4.7. Τα δεδομένα των Πινάκων αυτών προκύπτουν από τις τομές ευθειών kV με τις ευθείες mAmin.

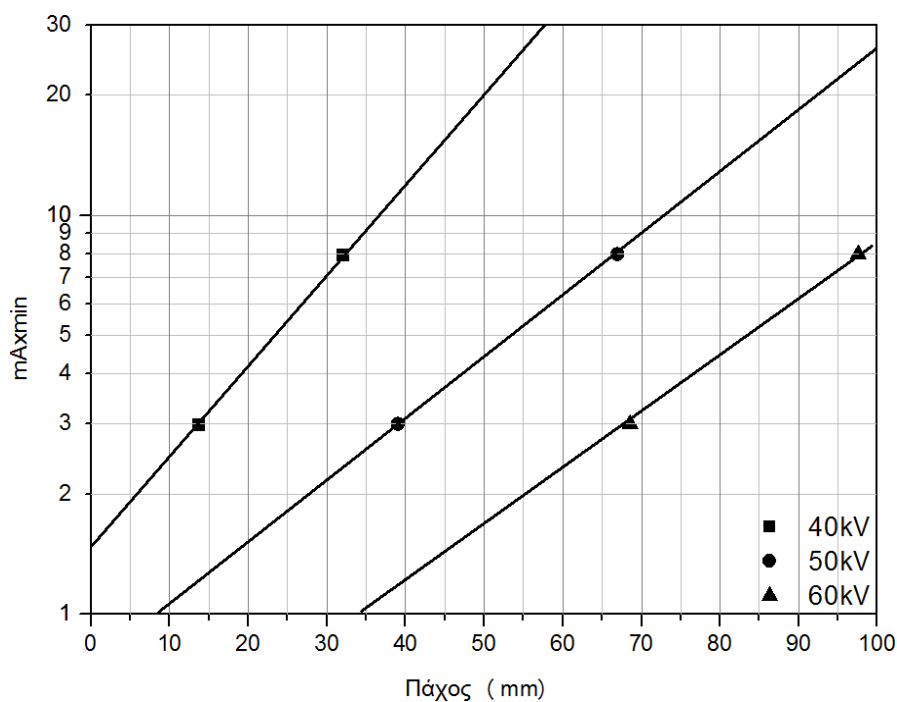
Πίνακας 4.6: Πάχη χαρτιού και αντίστοιχα kV που χρειάζεται να εκτεθούν στα 3 και τα 8 mAmin προκειμένου να επιτευχθεί οπτική πυκνότητα $D = 2$ για φιλμ FUJI IX100PB

Πάχος (mm)	40 kV	50 kV	60 kV
13.6	3		
31.9	8		
39.0		3	
66.9		8	
68.5			3
97.6			8

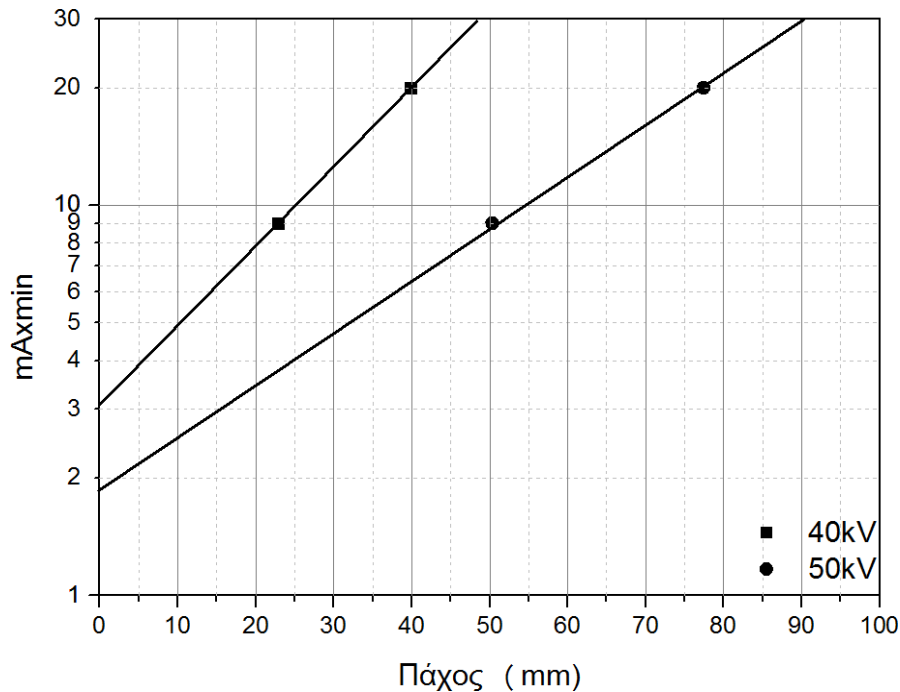
Πίνακας 4.7: Πάχη χαρτιού και αντίστοιχα kV που χρειάζεται να εκτεθούν στα 9 και τα 20 mAxmin προκειμένου να επιτευχθεί οπτική πυκνότητα $D = 2$ για φιλμ FUJI IX50PB

Πάχος (mm)	40 kV	50 kV
22.87	9	
39.84	20	
50.32		9
77.4		20

Στις Εικόνες 4.19 και 4.20, παρουσιάζονται τα τελικά διάγραμμα έκθεσης του χαρτιού για τα δυο διαφορετικά φιλμ που χρησιμοποιήθηκαν. Τα διαγράμματα προκύπτουν από την τοποθέτηση των ζευγών των Πινάκων 4.6 και 4.7 σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα.



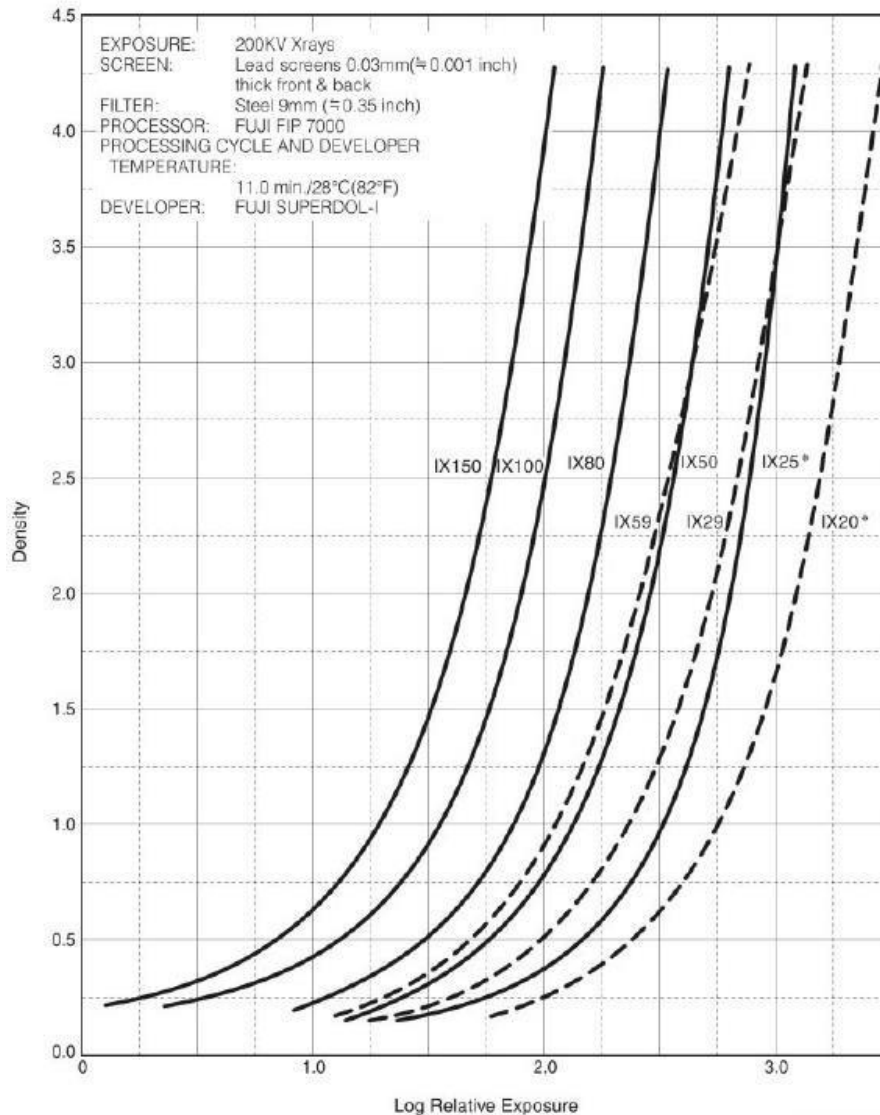
Εικ. 4.19: Διάγραμμα έκθεσης χαρτιού για φιλμ FUJI IX100PB, λυχνία ακτίνων-x τύπου ERESKO 42 MF3, General Electric, για απόσταση εστιακού σημείου-φιλμ 70cm και οπτική πυκνότητα $D = 2$



Εικ. 4.20: Διάγραμμα έκθεσης χαρτιού για φιλμ FUJI IX50PB, λυχνία ακτίνων-x τύπου ERESKO 42 MF3, General Electric, για απόσταση εστιακού σημείου-φιλμ 70cm και οπτική πυκνότητα $D = 2$

4.6 Σχέση διαγραμμάτων έκθεσης

Στην Εικόνα 4.21 δίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες για φιλμ βιομηχανικής ραδιογραφίας του συστήματος της εταιρείας κατασκευής FUJI. Αυτές οι χαρακτηριστικές καμπύλες είναι παρόμοιες με τις καμπύλες της Εικόνας 4.3 για το σύστημα AGFA, διότι και τα δύο συστήματα είναι συγκρίσιμα κατά ISO. Προκύπτει και από αυτές της χαρακτηριστικές καμπύλες ότι ο λόγος της έκθεσης για το φιλμ IX50PB προς εκείνη της έκθεσης για το φιλμ IX100PB πρέπει να είναι περίπου $10^{0.55} \approx 3.5$ για τα ίδια kV προκειμένου να δημιουργείται η ίδια αμαύρωση $D = 2$ για το ίδιο πάχος χαρτιού. Αυτή η παρατήρηση μπορεί να επιτρέψει την επαλήθευση των δύο διαγραμμάτων έκθεσης που δίνονται στις Εικόνες 4.19 και 4.20. Από την Εικόνα 4.19 προκύπτει ότι για 50 kV και πάχος χαρτιού 50 mm, η αναγκαία έκθεση E_{100} για φιλμ IX100PB είναι περίπου 4.5 mAmin. Ομοίως από την Εικόνα 4.20 προκύπτει ότι για 50 kV και πάχος χαρτιού 50 mm, η αναγκαία έκθεση E_{50} για φιλμ IX50PB είναι περίπου 9 mAmin. Ο λόγος E_{100}/E_{50} προκύπτει επομένως περίπου 2 και όχι περίπου 3.5 όπως θα έπρεπε. Η διαφορά δεν θεωρείται πολύ μεγάλη διότι:



Εικ. 4.21: Χαρακτηριστικές καμπύλες για φιλμ του συστήματος FUJI
 (από τον δικτυακό τόπο της Fujifilm)

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες της Εικόνας 4.21 είναι κατασκευασμένες για 200 kV και για αυτόματη εμφάνιση σε υγρά διαλύματα εμφάνισης και στερέωσης του συστήματος FUJI. Όπως έχει σημειωθεί δεν χρησιμοποιήθηκε αυτόματη εμφάνιση, ούτε 200 kV, ούτε τα διαλύματα ήταν του συστήματος FUJI. Επίσης, η εύρεση της ορθής έκθεσης μέσω διαγραμμάτων έκθεσης και χαρακτηριστικών καμπυλών δεν μπορεί να θεωρηθεί "ακριβής επιστήμη". Για παράδειγμα, αν θεωρηθεί ότι, επειδή ακολουθούν το ίδιο ISO, τα φιλμ AGFA D7PB και AGFA D4PB είναι αντίστοιχα με τα φιλμ IX100PB και IX50PB, τότε, σύμφωνα με τις χαρακτηριστικές καμπύλες της Εικόνας 4.3, για 200 kV, ο λόγος $E_{100}/E_{50} = 10^{0.45} \approx 2.8$ είναι πολύ κοντύτερα στον πειραματικό λόγο με τιμή 2.

Ο λόγος με τιμή 2.8 επιβεβαιώνεται και από τον Πίνακα I-8 (σελ. 69) και τον Πίνακα 1-9 (σελ. 80) της βιβλιογραφικής αναφοράς GE Inspection Technologies (2008) όπου δίνεται η τιμή 2.7. Μία άλλη αιτία για την γενικότερη, αλλά όχι ενοχλητική ασυμφωνία είναι ότι από τους υπολογισμούς για τα διαγράμματα έκθεσης δεν αφαιρέθηκε η οπτική πυκνότητα βάσης (δηλ. υποβάθρου) καθώς και η οπτική πυκνότητα ομίχλης, δηλαδή συνολικά η οπτική πυκνότητα που μετρείται στα φιλμ χωρίς αυτά να έχουν εκτεθεί σε ακτίνες -x.

4.7 Σχόλια και συμπεράσματα

Με μια σχετικά εύκολη πειραματική διαδικασία, η οποία εξάλλου είχε δοκιμασθεί ότι αποδίδει για κεραμικά όπως στον Αναγνώστου (2020), επιτεύχθηκε η παραγωγή διαγραμμάτων έκθεσης για το χαρτί και μάλιστα για δύο από τα συνήθη εμπορικά διαθέσιμα φιλμ βιομηχανικής ραδιογραφίας. Κατ' αυτή την έννοια υπάρχει πλέον διαθέσιμη στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ η τεχνογνωσία για τη ραδιογραφία χαρτιού κυρίως σε πάχη, όπως βιβλία ή χάρτινες κατασκευές ή κολλάζ. Σύμφωνα με τα όσα είναι γνωστά αυτή η τεχνογνωσία δεν υπάρχει αλλού σε Ελληνικό Εργαστήριο. Στον Επίλογο που ακολουθεί δίνονται επιπλέον στοιχεία όπως προκύπτουν από αυτή τη Διπλωματική Εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

E.1 Εισαγωγή

Στο πλαίσιο της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας έγινε μια ανασκόπηση των ιδιοτήτων του χαρτιού, μια σύντομη θεώρηση των δυνατοτήτων της βιομηχανικής ραδιογραφίας και τέλος, στο προηγούμενο Κεφάλαιο 4, στο πειραματικό μέρος της Μεταπτυχιακής Εργασίας, κατασκευάστηκαν διαγράμματα έκθεσης για χαρτί για δύο από τα συνήθως χρησιμοποιούμενα φιλμ σε συνδυασμό με την υπάρχουσα μηχανή παραγωγής ακτίνων -x του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Η Μεταπτυχιακή Εργασία αυτή είναι μέρος της προσπάθειας που καταβάλλεται στο Εργαστήριο για τον επιτυχημένο μη καταστρεπτικό έλεγχο αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς. Υπενθυμίζεται ότι στην προηγούμενη σχετική Μεταπτυχιακή Εργασία κατασκευάστηκε διάγραμμα έκθεσης για κεραμικά, το οποίο ήδη έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε έρευνα οστράκων κεραμικής της προϊστορικής, της προκλασικής και της κλασικής περιόδου, από ανασκαφές κυρίως της Βρετανικής Αρχαιολογικής Σχολής. Με βάση τα διαγράμματα έκθεσης για χαρτί, το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας αναμένει ότι θα συνεργαστεί με την Εθνική Βιβλιοθήκη της Ελλάδος σε θέματα συντήρησης βιβλίων. Το ίδιο αναμένεται να συμβεί και με άλλες μεγάλες βιβλιοθήκες της χώρας.

E.2 Ραδιογραφία για την αξιολόγηση κατάστασης βιβλίων

Όταν ενδιαφέρει η συντήρηση ενός βιβλίου και προτού ακόμα επέμβει ο συντηρητής, το πρώτο βήμα είναι η απαλλαγή του βιβλίου από τυχόν μικροοργανισμούς, π.χ. έντομα ή άλλα παράσιτα, τα οποία μπορεί να τρέφονται από την οργανική ύλη του χαρτιού. Η καταπολέμηση αυτών των εντόμων και παρασίτων γίνεται συνήθως σε ανοξικό θάλαμο, θάλαμο δηλαδή χωρίς οξυγόνο, στον οποίο το βιβλίο παραμένει ικανό χρόνο ώστε τα παράσιτα να νεκρωθούν λόγω ασφυξίας. Εναλλακτικά το ίδιο μπορεί να γίνει αν το βιβλίο προσβληθεί από κατάλληλο ρεύμα φωτονίων για κατάλληλο χρόνο, όπως π.χ. από ρεύμα φωτονίων, το οποίο μπορεί να παράγει η μηχανή ακτίνων -x του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας. Το πλεονέκτημα της δεύτερης μεθόδου είναι ότι μαζί με τα παράσιτα καταστρέφονται και τυχόν αυγά τους. Το μειονέκτημα όμως είναι ότι πιθανόν τα φωτόνια να έχουν κάποια αρνητική επίδραση στις ιδιότητες του χαρτιού ή στις ιδιότητες των μελανιών και των χρωμάτων του βιβλίου. Φυσικά η απεντόμωση και η αποπαρασίτωση μπορεί να γίνει και με χημικές μεθόδους, δηλαδή με εντομοκτόνα. Μετά από αυτή την απαραίτητη

διαδικασία ακολουθεί η αξιολόγηση της γενικότερης κατάστασης του βιβλίου από τον συντηρητή. Υπάρχουν περιπτώσεις που η κατάσταση του βιβλίου απαγορεύει το άνοιγμα του πριν εκτιμηθούν οι εσωτερικές ζημιές. Για τις εκτιμήσεις αυτές χρειάζονται εκτός από τον λεπτομερή οπτικό έλεγχο και μη καταστρεπτικές μέθοδοι όπως η βιομηχανική ραδιογραφία. Ερευνώντας ένα βιβλίο με βιομηχανική ραδιογραφία μπορεί κάποιος να διαπιστώσει τις ζημιές που έχουν προκαλέσει τα έντομα και τα παράσιτα, τυχόν ζημιές που έχουν προκαλέσει τρωκτικά, τυχόν θέσεις συγκέντρωσης νεκρής ύλης από έντομα και παράσιτα και τυχόν θέσεις συγκέντρωσης αποβλήτων τρωκτικών. Επιπλέον με την ραδιογραφία μπορεί να διαπιστωθούν παλαιότερες συντηρήσεις, στο εσωτερικό ή στη ράχη του βιβλίου, κυρίως αποτυχημένες, από τις οποίες τα υλικά συντήρησης, π.χ. κόλλες, έχουν διαχυθεί στο εσωτερικό του βιβλίου ή συντηρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί με λανθασμένες τεχνικές. Φυσικά μια πλήρης τρισδιάστατη εικόνα του εσωτερικού ενός βιβλίου μπορεί να προκύπτει μόνο με αξονική τομογραφία. Το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας δεν διαθέτει ακόμα αξονικό τομογράφο. Μια προσέγγιση τρισδιάστατης απεικόνισης μπορεί όμως να γίνεται ραδιογραφώντας το ίδιο βιβλίο από διαφορετικές γωνίες.

E.3 Ερευνητική ραδιογραφία βιβλίων

Δεν πρέπει κανείς να ξεχνάει ότι τα βιβλία δεν είναι πάντοτε στην μορφή που τα έχουμε συνηθίσει σήμερα, δηλαδή με χαρτί μικρού πάχους εκτυπωμένο είτε λινοτυπικά, είτε λιθογραφικά, είτε με τεχνολογία laser. Τα παλαιότερα βιβλία, πριν την εφεύρεση της τυπογραφίας ήταν, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, σε χαρτί μεγαλύτερου πάχους και βεβαίως χειρόγραφα. Προτού ακόμα ένα τέτοιο παλαιότερο βιβλίο συντηρηθεί, αλλά και κατά την διάρκεια της συντήρησης διαπιστώνεται συχνά ότι παλαιότερες εγγραφές έχουν αποξεστεί για να δημιουργηθεί χώρος για νέες. Επειδή υπάρχει πάντοτε η προσδοκία ότι οι παλαιότερες χαμένες εγγραφές αφορούν σε πολύτιμα κείμενα της αρχαιότητας, αξίζει η έρευνα αυτών των φύλλων με ραδιογράφιση, στην οποία είναι πιθανόν (αλλά όχι σίγουρο) να φανούν, αν υπάρχουν, σκιές από τις προηγούμενες εγγραφές. Με βάση τέτοιες ραδιογραφικές εικόνες σκιών εγγραφών έχει επιτευχθεί στο παρελθόν να ανακτηθούν πολύτιμες πληροφορίες. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται και σε χαρτιά που αφορούν ζωγραφικούς πίνακες, οι οποίοι έχουν κατασκευαστεί με ελαιογραφία ή ακόμα, πολύ δυσκολότερο) και με νωπογραφία (νερομπογιά, ακουαρέλες), αρκεί το χρώμα να έχει εφαρμοσθεί σε στρώματα ικανού πάχους. Η εικόνα που επιτυγχάνεται δίνει πληροφορίες τόσο για τα προσχέδια του ζωγράφου με το ίδιο θέμα πάνω στο χαρτί, όσο και για προηγούμενα θέματα που αναπτύχθηκαν στο ίδιο χαρτί αλλά καλύφθηκαν με τα χρώματα του

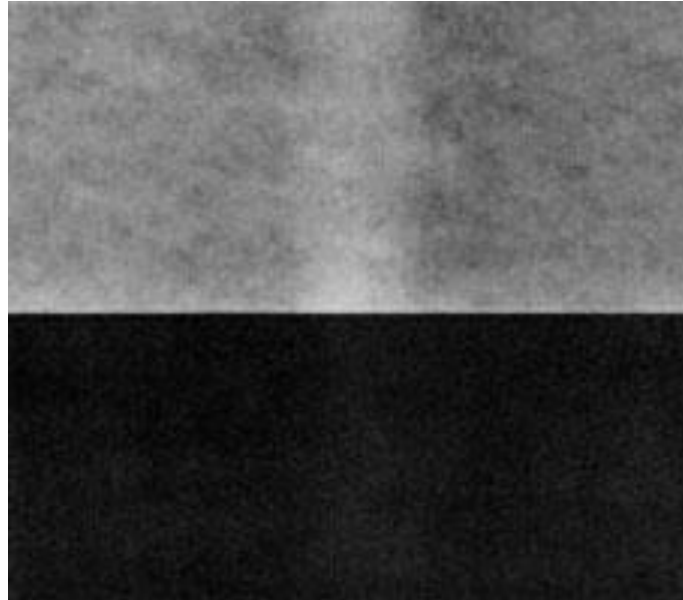
υπάρχοντος θέματος. Φυσικά, ιδιαίτερα στα παλαιά χειρόγραφα βιβλία, των οποίων οι εγγραφές έγιναν σε εργαστήρια μικροκαλλιγραφίας μοναστηριών κατά τον μεσαίωνα, παρατηρείται ομοίως και έντονη διακοσμητική ή επεξηγηματική εικονογράφηση. Η ραδιογράφιση των σελίδων με εικόνες μπορεί επίσης να αποκαλύψει προηγούμενες εικόνες ή / και διαφορετικά αρχικά χρώματα. Επίσης, τυχόν χρυσός από χρυσοτυπίες που δεν διακρίνονται είναι πιθανόν να αποκαλυφθεί λόγω του μεγάλου μαζικού αριθμού του χρυσού.

Γίνεται κατανοητό ότι παρόμοιες τεχνικές βιομηχανικής ραδιογράφισης μπορούν να χρησιμοποιούνται και σε "χαρτιά" από πάπυρο ή περγαμινή, καθώς και σε ζωγραφικά έργα πάνω σε καμβά ή ξύλο. Βέβαια, για αυτές τις ραδιογραφήσεις χρειάζονται διαφορετικές εκθέσεις από αυτές που προβλέπουν τα διαγράμματα έκθεσης αυτής της Μεταπτυχιακής Εργασίας. Δεν αναμένεται όμως οι απαιτούμενες εκθέσεις θα είναι σημαντικά διαφορετικές.

E.4 Ραδιογραφική έρευνα μικροδομής

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου τόσο σε παλαιότερα βιβλία ή ζωγραφικά έργα όσο και σε νεότερα ενδιαφέρει η διαπίστωση της μικροδομής του χαρτιού, δηλαδή ενδιαφέρει πως είναι κατανοητές και περιπλεγμένες οι ίνες του χαρτιού, αν υπάρχουν διαφορετικές μεταξύ τους ίνες και αν υπάρχουν στο σώμα του χαρτιού μικροϋλικά που δεν συνδέονται άμεσα με αυτό αλλά είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας παραγωγής του. Η διαπίστωση της μικροδομής μπορεί να βοηθήσει στην καλύτερη χρονολόγηση του χαρτιού καθώς και στην διαπίστωση του τρόπου παραγωγής, ο οποίος πολλές φορές συνδέεται με συγκεκριμένους τόπους παραγωγής. Η μικροδομή μπορεί να διερευνηθεί κυρίως με οπτικό μικροσκόπιο, και άλλες οπτικές μεθόδους αλλά είναι δυνατόν να διερευνηθεί και με ραδιογραφία. Τα διαγράμματα έκθεσης δεν μπορούν να δώσουν πληροφορίες για την αναγκαία έκθεση τόσο λεπτών φύλλων για τη διαπίστωση της μικροδομής, διότι τα πάχη μικρών φύλλων γενικά διαπερνώνται από τα φωτόνια και η εικόνα που αποτυπώνεται στο φιλμ προκύπτει ομοιογενής υψηλής αμαύρωσης (μαύρη). Η λύση σε αυτό το ραδιογραφικό πρόβλημα είναι γνωστή, πρόκειται για τη ραδιογραφία ηλεκτρονίων και αναφέρεται σε ικανοποιητική έκταση στο Κεφάλαιο 3 αλλά θα αποτελέσει αντικείμενο πειραματικής μελέτης επόμενης Εργασίας. Υπενθυμίζεται ότι για αυτή την μέθοδο, το προς διερεύνηση χαρτί τοποθετείται πάνω σε ένα φιλμ κατά τα συνήθη. Πάνω από το χαρτί τοποθετείται ένα φύλλο μολύβδου πάχους μικρότερο από 0.5 mm. Μεταξύ της κάτω επιφάνειας του χαρτιού και του φιλμ μπορεί να τοποθετηθεί επίσης ένα ίδιο φύλλο μολύβδου χωρίς αυτό να είναι απαραίτητο. Για την ραδιογράφιση ακτίνες -x κατάλληλης ενέργειας, η τιμή της οποίας πρέπει να διερευνηθεί, προσβάλλουν το χαρτί και το φιλμ κάθετα για πολύ μικρό χρόνο, η τιμή του οποίου πρέπει επίσης να διερευνηθεί και με

κατάλληλα λίγα mA. Το αποτέλεσμα αυτής της έκθεσης είναι ότι τα φύλλα μολύβδου παράγουν β σωματίδια (ηλεκτρόνια), τα οποία σχηματίζουν την εικόνα στο φιλμ. Επειδή τα β σωματίδια εξασθενούν σημαντικά στην μικροδομή του φιλμ αυτή η μικροδομή μπορεί να αποτυπωθεί στην εικόνα. Στην Εικόνα E.1 δίνεται το αποτέλεσμα μιας τέτοιας ραδιογραφίας προκειμένου ο αναγνώστης να κρίνει το αποτέλεσμα.



Εικ. E.1: Άνω: Η μικροδομή φύλλου χαρτιού με τη βοήθεια φύλλων μολύβδου και της παραγόμενης β ακτινοβολίας. Κάτω: Η μικροδομή φύλλου χαρτιού δεν διακρίνεται αν χρησιμοποιηθούν μόνο ακτίνες x .

E.5 Συνέργειες με άλλες μεθόδους

Οποσδήποτε για την διαπίστωση της κατάστασης ενός βιβλίου ή οποιουδήποτε χαρτιού, το πρώτο και κυριότερο εργαλείο είναι ο οπτικός έλεγχος. Η μέθοδος της βιομηχανικής ραδιογραφίας δεν είναι στην πρώτη γραμμή των μεθόδων που χρησιμοποιούνται, κυρίως διότι υπάρχει κόστος για την προμήθεια του σχετικού εξοπλισμού και απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό. Ο κίνδυνος από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες της βιομηχανικής ραδιογραφίας είναι μεν υπαρκτός αλλά γενικά θεωρείται αμελητέος διότι οι ενέργειες των ακτίνων x που χρησιμοποιούνται είναι πολύ μικρές και επομένως αβλαβείς. Επιπλέον τα σχετικά μηχανήματα ραδιογράφησης βιβλίων είναι γενικά μικρές καμπίνες, στις οποίες τοποθετείται το βιβλίο ή το χαρτί για να ραδιογραφηθούν. Το πλεονέκτημα των καμπίνων είναι ότι η εκπομπή ακτίνων x γίνεται μόνο όταν η καμπίνα είναι κλειστή με αποτέλεσμα να υπάρχει θωράκιση μεταξύ του χειριστή και της ιοντίζουσας ακτινοβολίας. Το μειονέκτημα των καμπίνων είναι ότι σε αυτές δεν μπορούν να διερευνηθούν ογκώδη βιβλία ή μεγάλες

χάρτινες επιφάνειες όπως ζωγραφικοί πίνακες ή χάρτες. Υπενθυμίζεται ότι το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας δεν διαθέτει καμπίνα και άρα μπορεί, με κατάλληλα μέτρα ακτινοπροστασίας, να εξυπηρετήσει από μικρά έως ογκώδη βιβλία και από φύλλα χαρτιού έως μεγάλες χάρτινες επιφάνειες.

Πέρα από τα αποτελέσματα που μπορεί να πάρει κάποιος με την βοήθεια της ραδιογραφίας, μια πολύ συνηθισμένη μέθοδος μη καταστρεπτικού ελέγχου για βιβλία και χαρτιά είναι η μέθοδος XRF (X Ray fluorescence). Κατά την μέθοδο αυτή το χαρτί προσβάλλεται με ακτίνες -x ορισμένων ενεργειών και τα άτομα του διεγείρονται. Η αποδιέγερση των ατόμων αυτών γίνεται με εκπομπή άλλων διαφορετικών ακτίνων -x. Αυτές οι εκπεμπόμενες ακτίνες -x έχουν διάφορες ενέργειες. Οι διαφορετικές ενέργειες συνδέονται με διαφορετικά στοιχεία που υπάρχουν στο χαρτί. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να διαπιστωθεί, μέρος της στοιχειακής σύνθεσης του χαρτιού, μέρος της στοιχειακής σύνθεσης του μελανιού και βεβαίως μέρος της στοιχειακής σύνθεσης των χρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τις εικόνες. Πιθανόν μάλιστα να βρεθεί ότι το μελάνι ή τα χρώματα έχουν ουσίες που σήμερα θεωρούνται δηλητήρια. Οι συσκευές XRF είναι σήμερα, μικρές, φορητές ή μεταφερόμενες, ικανοποιητικά οικονομικές και δεν χρειάζονται ιδιαίτερες γνώσεις. Στις συσκευές αυτές βρίσκονται ενσωματωμένα, η πηγή ακτίνων -x που προσβάλλει το χαρτί και ο ανιχνευτής των ακτίνων -x που εκπέμπονται από το χαρτί. Με βάση το πλήθος των ακτίνων -x που συλλέγονται στον ανιχνευτή γίνεται και χονδρική ποσοτική εκτίμηση των στοιχείων που ανιχνεύονται. Το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας διαθέτει εργαστηριακό εξοπλισμό XRF αλλά αυτός δεν είναι φορητός ή μεταφερόμενος. Το προς έρευνα αντικείμενο πρέπει να έρθει στο Εργαστήριο.

Μια άλλη, πιο εργαστηριακή, μέθοδος είναι η προσβολή του χαρτιού με νετρόνια κατάλληλης ενέργειας για κατάλληλο χρόνο. Η μέθοδος ονομάζεται νετρονική ενεργοποίηση. Τα νετρόνια αυτά ενσωματώνονται στους πυρήνες του χαρτιού, του μελανιού και των χρωμάτων και τους διεγείρουν (τους ενεργοποιούν). Οι πυρήνες αυτοί αποδιεγειρόμενοι εκπέμπουν φωτόνια διαφόρων ενεργειών. Το πλήθος και οι ενέργειες των φωτονίων αυτών μπορούν να διερευνηθούν σε κατάλληλες ανιχνευτικές διατάξεις. Διαφορετικές ενέργειες φωτονίων αντιστοιχούν σε διαφορετικά στοιχεία στο χαρτί. Το μετρούμενο πλήθος φωτονίων στη μονάδα του χρόνου δίνει πληροφορίες σχετικά με την ποσότητα των στοιχείων. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμόζεται μόνο σε εργαστηριακό χώρο που διαθέτει κατάλληλη πηγή νετρονίων και κατάλληλα μέτρα ακτινοπροστασίας έναντι νετρονίων. Στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας διατίθεται πλήρης εξοπλισμός νετρονικής ενεργοποίησης.

E.6 Νετρονογραφία χαρτιού

Ξεχωριστά θα αναφερθεί και μία εναλλακτική μέθοδος βιομηχανικής ραδιογραφίας πολύ κατάλληλη για οργανικά υλικά (όπως π.χ. τα πλαστικά) και φυσικά και για το χαρτί που είναι επίσης οργανικό υλικό. Η μέθοδος δεν χρησιμοποιεί ως διαπεραστική ακτινοβολία τις ακτίνες -x αλλά μία δέσμη ταχέων νετρονίων, με κινητική ενέργεια $\gg 1$ eV. Το χαρτί τοποθετείται κάθετα στη δέσμη νετρονίων, της οποίας η ένταση πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 10^5 ταχεία νετρόνια $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. Γενικά η δέσμη νετρονίων διαπερνά το χαρτί χωρίς καμία εξασθένηση. Αν όμως το χαρτί έχει ικανό πάχος τότε τα νετρόνια θερμοποιούνται γίνονται δηλαδή πολύ μικρής κινητικής ενέργειας $\ll 1$ eV. Αν πίσω από το χαρτί τοποθετηθεί σε επαφή μια επιφάνεια μικρού πάχους με Βόριο-10, τα θερμοποιημένα ή αλλιώς θερμικά νετρόνια αλληλεπιδρούν με αυτό και παράγουν -α σωματίδια και φωτόνια. Αν πίσω από την επιφάνεια με το Βόριο-10 τοποθετηθεί σε επαφή ένα ραδιογραφικό φιλμ τότε τα παραγόμενα -α σωματίδια και φωτόνια θα αλληλεπιδράσουν με το φιλμ και θα σχηματίσουν ραδιογραφική εικόνα. Οι περιοχές της εικόνας με τη μεγαλύτερη αμαύρωση δηλώνουν περισσότερα φωτόνια, δηλαδή περισσότερα θερμικά νετρόνια και άρα παχύτερο χαρτί. Η μέθοδος όπως περιγράφηκε ονομάζεται άμεση νετρονογραφία. Υπάρχει και η έμμεση νετρονογραφία. Σε αυτήν πίσω από το χαρτί τοποθετείται σε επαφή ένα μεταλλικό φύλλο μικρού πάχους από π.χ. Ίνδιο-155. Τα θερμικά νετρόνια αλληλεπιδρούν με αυτό κατά την πυρηνική αντίδραση $\text{In-155} (n,n') \text{In-155m}$. Το παραγόμενο μετασταθές In-155m έχει χρόνο ημιζωής 54 min και παράγει φωτόνια. Αφού ολοκληρωθεί η ακτινοβόληση του χαρτιού και του Ινδίου, το φύλλο Ινδίου τοποθετείται σε δεύτερο χρόνο πάνω σε ραδιογραφικό φιλμ ώστε τα φωτόνά του να δημιουργήσουν εικόνα. Οι περιοχές της εικόνας με τη μεγαλύτερη αμαύρωση δηλώνουν περισσότερα φωτόνια, δηλαδή περισσότερα θερμικά νετρόνια και άρα παχύτερο χαρτί. Το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας διαθέτει εξοπλισμό πηγών νετρονίων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για νετρονογραφίες, αλλά η μέθοδος δεν έχει δοκιμασθεί.

E.7 Κατακλείδα

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία καλύφθηκε θεωρητικά το πως δημιουργείται ένα διάγραμμα έκθεσης για άγνωστο υλικό, πέρα δηλαδή από αυτά που συνήθως συνοδεύουν πηγές φωτονίων ή μηχανές παραγωγής ακτίνων -x, όπως αυτά για χάλυβα και για αλουμίνιο. Το θεωρητικό αυτό μέρος έχει καλυφθεί σε μικρότερη ή μεγαλύτερη έκταση και σε παλαιότερες αντίστοιχες Εργασίες. Στο πειραματικό μέρος της Εργασίας κατασκευάστηκαν διαγράμματα έκθεσης για χαρτί για δύο διαφορετικά φιλμ από αυτά που υπάρχουν στην

Ελληνική αγορά. Φυσικά τα διαγράμματα αυτά αφορούν μόνο στον εξοπλισμό και τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ και δεν μπορούν να εφαρμόζονται για άλλες συνθήκες. Όπως συνοψίστηκε πιο πάνω αυτά τα διαγράμματα μπορούν να αποδειχθούν πολύ χρήσιμα για την αξιολόγηση της κατάστασης παλαιών βιβλίων πριν τη συντήρησή τους. Τα βιβλία αυτά μπορεί να προέρχονται από συλλογές ιδιωτικές ή δημόσιες, από βιβλιοθήκες ή μουσεία ή άλλους οργανισμούς π.χ. αρχειακούς. Το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ προσδοκά να βρεθεί στην ευχάριστη θέση να βοηθήσει σε τέτοιες αξιολογήσεις παλαιών βιβλίων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. CGSB (Canadian General Standards Board), "Manual on Industrial Radiography", 48GP-5M, Ottawa, 1981.
2. GE Inspection Technologies, General Electric Company, "Industrial Radiography; Image forming techniques" GE imaging at work, GEIT-30158(01/07), 2008
3. Fujifilm, "The Fundamentals of Industrial Radiography", Fujifilm Technical Handbook, Ref. No. IX-22-2009.02F1079, 2009
4. Lang J. and Middleton A. (Eds.), "Radiography of Cultural Material", Elsevier, Second Edition, 2005
5. Moore P.O. (Ed.) "Nondestructive Testing Handbook, third edition: Volume 4, Radiographic Testing", American Society for Nondestructive Testing, 2002
6. Quinn R.A., Sigl C.C., Callinan J.J., "Radiography in Modern Industry", Eastman Kodak Company, 1980
7. van Aken J., "An Improvement in Grenz Radiography of Paper to Record Watermarks, Chain and Laid Lines", Studies in Conservation, 48:2, pp. 103-110, 2003, DOI: 10.1179/sic.2003.48.2.103
8. Zhang Z., Ewert U., Barrett T.D., J. Bond L.J., "Paper watermark imaging using electron and low energy x-ray radiography", AIP Conference Proceedings 2102, 030004, Published Online: 08 May 2019, DOI: 10.1063/1.5099750
9. Αναγνώστου Γ., "Ραδιογράφιση Κεραμικών: Αρχές - Κατασκευή Διαγράμματος Έκθεσης - Ερμηνεία με Παραδείγματα", Μεταπτυχιακή Εργασία, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ, ΔΠΜΣ Εφαρμοσμένη Μηχανική ΕΜΠ , Αθήνα 2019
10. Ζερβός Σ., "Συντήρηση και Διατήρηση Χαρτιού, βιβλίων και Αρχαιακού Υλικού", ΤΕΙ Αθήνας, ΣΕΑΒ, www.kallipos.gr, ISBN: 978-618-82124-0-4, 2015

11. Παπαδόπουλος Δ., "Προσεγγιστικοί ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας πάχους για διάφορα στοιχεία και τα μίγματά τους", Διπλωματική Εργασία, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ, Αθήνα, 2014
12. Χρυσικόπουλος Σ., "Μελέτη και τεκμηρίωση εγκαταστάσεως Βιομηχανικής Ραδιογραφίας του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ", Μεταπτυχιακή Εργασία, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ, ΔΠΜΣ Εφαρμοσμένη Μηχανική ΕΜΠ, Αθήνα, 2009