

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

**ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΗΣΗ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ: ΑΡΧΕΣ - ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ - ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕ
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ**

**CERAMICS RADIOGRAPHY: PRINCIPLES - EXPOSURE
DIAGRAM CONSTRUCTION - INTERPRETATION WITH
EXAMPLES**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ
ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΥ του ΧΡΗΣΤΟΥ

Σπουδαστή του ΔΠΜΣ
Εφαρμοσμένη Μηχανική του ΕΜΠ

Επίβλεψη: Επίκουρος Καθηγητής Ν.Π. Πετρόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2020

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 του συγγραφέα ή του επιβλέποντός του με σχετικά εμπορικά ή οικονομικά συμφέροντα. Ούτε ο συγγραφέας, ούτε ο επιβλέπων του, ούτε το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο διατυπώνουν κάποια γραπτή εγγύηση, ρητή ή έμμεση, συμπεριλαμβανομένων των εγγυήσεων που αφορούν στην ασφάλεια και την προστασία ατόμων και υλικών και στην καταλληλότητα για χρήση των περιεχόμενων επιστημονικών πληροφοριών και αποτελεσμάτων για τους σκοπούς της βιομηχανικής ραδιογραφίας ή του μη καταστρεπτικού ελέγχου γενικότερα ή άλλου σχετικού ραδιολογικού επιστημονικού ή / και τεχνολογικού περιβάλλοντος. Ούτε ο συγγραφέας, ούτε ο επιβλέπων του 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 την 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. Ο συγγραφέας και ο επιβλέπων του είναι διαθέσιμοι για την παροχή συμβουλών σε ό,τι αφορά επιβεβαίωση των περιεχόμενων αποτελεσμάτων καθώς και για οδηγίες σχετικά με την ενδεδειγμένη χρήση τους

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 δικά 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 ο συγγραφέας, ούτε ο επιβλέπων του 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 αντιγράφουν, διανέμουν και να χρησιμοποιούν το περιεχόμενο τους (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:

Anagnostou, G.H., Ceramics radiography: Principles - Exposure Diagram Construction - Interpretation with Examples, MSc Thesis (in Greek), Nuclear Engineering Laboratory, National Technical University of Athens, Athens, 2019, 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.

Disclaimer

This document has been edited as a result of a MSc Thesis project accomplished by a 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 his supervisor are directly or indirectly connected to any relevant commercial or financial interests. Neither the author nor its 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 purposes 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 no 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 his supervisor are available for consultation regarding the verification and implementation of the presented data.

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 his 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:

Anagnostou, G.H., Ceramics radiography: Principles - Exposure Diagram Construction - Interpretation with Examples, MSc Thesis (in Greek), Nuclear Engineering Laboratory, National Technical University of Athens, Athens, 2019, 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.*

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	vii
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	viii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ix
EXTENDED ABSTRACT	xi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή	1-1
1.1 Στόχοι της εργασίας.....	1-1
1.2 Αρχές ραδιογραφίας.....	1-1
1.3 Αναγκαιότητα διαγράμματος έκθεσης.....	1-2
1.4 Διάγραμμα έκθεσης για κεραμικά	1-3
1.5 Γενικά για τη ραδιογραφία κεραμικής	1-3
1.6 Επίλογος και προτάσεις.....	1-4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Βασικές Αρχές Ραδιογραφίας	
2.1 Εισαγωγή	2-1
2.2 Παραγωγή ακτίνων - x	2-4
2.3 Εξασθένιση ακτίνων - x.....	2-8
2.4 Ο νόμος του αντιστρόφου τετραγώνου της απόστασης.....	2-10
2.5 Ο ρόλος της γεωμετρίας στη ραδιογραφία.....	2-11
2.6 Οπτική πυκνότητα	2-14
2.7 Διάγραμμα έκθεσης.....	2-16
2.8 Σχόλια και συμπεράσματα	2-17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Κατασκευή και χρήση διαγράμματος έκθεσης	
3.1 Εισαγωγή	3-1
3.2 Κατασκευή διαγράμματος έκθεσης.....	3-2
3.2.1 Δοκίμιο κλίμακας.....	3-2
3.2.2 Πρώτη μέθοδος κατασκευής διαγράμματος έκθεσης.....	3-3
3.2.3 Δεύτερη μέθοδος κατασκευής διαγράμματος έκθεσης.....	3-7
3.3 Χρήση του διαγράμματος έκθεσης.....	3-8
3.3.1 Για τις συνθήκες και προδιαγραφές του διαγράμματος.....	3-8
3.3.2 Για διαφορετικές αποστάσεις	3-9
3.3.3 Χαρακτηριστική καμπύλη φιλμ	3-9
3.3.4 Ίδιο φιλμ άλλη οπτική πυκνότητα	3-11

3.3.5 Ίδια οπτική πυκνότητα άλλο φιλμ – μέθοδος 1.....	3-13
3.3.6 Ίδια οπτική πυκνότητα άλλο φιλμ – μέθοδος 2.....	3-15
3.3.7 Άλλο υλικό	3-16
3.4 Σχόλια και συμπεράσματα	3-19

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Πειραματική κατασκευή διαγράμματος έκθεσης

4.1 Εισαγωγή	4-1
4.2 Δοκίμιο κλίμακας.....	4-1
4.3 Άλλος εξοπλισμός και ρυθμίσεις.....	4-2
4.4 Πείραμα και αποτελέσματα σύμφωνα με την πρώτη μέθοδο	4-4
4.4.1 Πειραματικές εκθέσεις	4-4
4.4.2 Προκαταρκτικά βοηθητικά διαγράμματα Οπτικής πυκνότητας - Πάχους..	4-6
4.4.3 Προκαταρκτικό βοηθητικό διάγραμμα kV - Πάχους.....	4-8
4.4.4 Παραγωγή διαγράμματος έκθεσης.....	4-9
4.5 Πείραμα και αποτελέσματα σύμφωνα με την δεύτερη μέθοδο.....	4-10
4.6 Νέα χαρακτηριστική καμπύλη για φιλμ D4	4-15
4.7 Συμπεράσματα	4-22

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ραδιογραφία κεραμικής

5.1 Εισαγωγή	5-1
5.2 Χαρακτηρισμό της σύστασης του πυλού	5-1
5.3 Πρωτεύουσες κατασκευαστικές τεχνικές κεραμικών	5-2
5.3.1 Coil building και Ring building.....	5-5
5.3.2 Slab-building	5-6
5.3.3 Moulding.....	5-7
5.3.4 Αγγειοπλαστικός τροχός.....	5-7
5.4 Συμπληρωματικές τεχνικές.....	5-8
5.4.1 Paddle & anvil.....	5-9
5.4.2 Scraping	5-10
5.4.3 Knife trimming.....	5-11
5.4.4 Turning	5-12
5.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχία της ραδιογραφίας	5-13
5.6 Παραδείγματα ραδιογραφιών θραυσμάτων αρχαίων αγγείων	5-14
5.7 Σχόλια και συμπεράσματα	5-17

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	B-1
--------------------	-----

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η Βιομηχανική Ραδιογραφία είναι μία από τις σημαντικότερες εφαρμοζόμενες Μεθόδους Μη Καταστροφικού Ελέγχου. Μάλιστα, θεωρείται από πολλούς ως η πλέον ευέλικτη. Χρησιμοποιεί 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 αρχαιολογική έρευνα για την κεραμική, η τεχνική της Βιομηχανικής Ραδιογραφίας αναδείχθηκε σχετικά πρόσφατα σε απαραίτητο εργαλείο καθώς μέσω αυτής οι ερευνητές είναι δυνατόν να προσδιορίσουν με ποιες τεχνικές κατασκευάστηκαν τα κεραμικά αντικείμενα, κάτι που δεν ήταν τόσο εύκολο να γίνει 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 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 για την κεραμική ύλη. Ο τελικός σκοπός της Μεταπτυχιακής Εργασίας είναι η παρουσίαση της σημασίας της Βιομηχανικής Ραδιογραφίας για την αρχαιολογική έρευνα της κεραμικής μέσω βιβλιογραφικών στοιχείων και παραδειγμάτων πραγματικών ραδιογραφιών αρχαίας κεραμικής που έγιναν στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Στο πλαίσιο αυτό κατασκευάζεται και παρουσιάζεται και ένα διάγραμμα έκθεσης για κεραμικά υλικά και ακτίνες $-x$ ώστε ο υπολογισμός της αναγκαίας έκθεσης να γίνεται με ορθότητα και

χωρίς πολλές δοκιμαστικές λήψεις εικόνας. Τέτοιο διάγραμμα έκθεσης παρουσιάζεται για πρώτη φορά.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΗΣΗ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ: ΑΡΧΕΣ - ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ - ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Μεταπτυχιακή Εργασία του Γ. Αναγνώστου

Ο κύριος σκοπός της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας είναι η παρουσίαση του ρόλου που μπορεί να παίξει καθώς και των δυνατοτήτων της Βιομηχανικής Ραδιογραφίας σε ό,τι αφορά την αρχαιολογική έρευνα για κεραμικά αντικείμενα. Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιήθηκαν και πειράματα για την κατασκευή ενός διαγράμματος έκθεσης για κεραμικά υλικά και ακτίνες -x. Επιπλέον μελετήθηκαν και θραύσματα αρχαίας κεραμικής. 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 παρουσιάζεται για πρώτη φορά. Επιπλέον το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας φαίνεται ότι θα συμβάλλει αποφασιστικά στον εμπλουτισμό των -προς το παρόν λίγων, ραδιογραφιών αρχαίας ελληνικής κεραμικής.

Στο κείμενο γίνεται πρώτα μια ιστορική - τεχνική 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 περιγράφονται δύο τρόποι 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 κατασκευές πολύ μεγάλης σημασίας.

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

εξοπλισμού που διατίθεται στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Πρώτα έγινε η κατασκευή του διαγράμματος με την πρώτη μέθοδο (τη λεγόμενη άμεση) και στη συνέχεια με την δεύτερη (τη λεγόμενη έμμεση). Τα δύο διαγράμματα δόθηκαν σε κοινό γράφημα ώστε να είναι ευκολότερη η σύγκρισή τους. Για τη χάραξη των διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκε λογισμικό MS Excel και Origin Pro 9. Μετά την εξαγωγή των διαγραμμάτων παρουσιάζονται σχόλια και συμπεράσματα από τη σύγκριση των δύο μεθόδων.

Τέλος, αναλύεται ο ρόλος της Βιομηχανικής Ραδιογραφίας στην αρχαιολογική έρευνα για τη κεραμική και ιδιαίτερα σε ό,τι αφορά θραύσματα από αρχαία αγγεία (τα ονομαζόμενα από τους αρχαιολόγους ως "όστρακα"). Με τη βοήθεια της μεθόδου είναι δυνατόν να δίνονται απαντήσεις σε σημαντικά ερωτήματα που δεν φαίνεται να απαντώνται εύκολα με άλλες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου. Για παράδειγμα, μπορούν να διαπιστωθούν τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά του πηλού ενός αγγείου, να προσδιορισθούν οι αγγειοπλαστικές κατασκευαστικές τεχνικές που εφαρμόστηκαν και να αναγνωρισθούν οι δευτερογενείς επεξεργασίες που έχουν πραγματοποιηθεί κυρίως για την τροποποίηση ιδιοτήτων όπως η εμφάνιση της επιφάνειας, το πάχος τοιχώματος, το πορώδες κ.ά. Σχετικώς, δίνονται παραδείγματα με βάση ραδιογραφικές εικόνες οστράκων από αρχαιολογικές ανασκαφές στην Ελλάδα. Οι εικόνες εξάχθηκαν στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ σε συνεργασία με τη Βρετανική Αρχαιολογική Σχολή των Αθηνών.

EXTENDED ABSTRACT
CERAMICS RADIOGRAPHY: PRINCIPLES - EXPOSURE
DIAGRAM CONSTRUCTION - INTERPRETATION WITH
EXAMPLES

MSc Thesis by G. Anagnostou

The main scope of this Thesis is to present the role and the capabilities of the Industrial Radiography method with regard to the archaeological research of ceramic objects (mainly pottery). Within this framework, experiments were performed suitable for the construction of an exposure diagram for ceramic matter and -x rays. Furthermore, there were produced radiographic images of some pottery fragments. All experimental work was carried out in the Industrial Radiography installation of the Nuclear Engineering Laboratory of the School of Mechanical Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA). To the best of known information, it is the first time that such an exposure diagram is presented. In addition, the Nuclear Engineering Laboratory seems capable to decisively contribute in increasing the, so far limited, numbers of ancient Greek pottery radiographs.

The study deals first with a short report on the history, the general principles and the techniques of Industrial Radiography (mainly that using -x rays). Generic information is provided for the discovery of the method, its application fields and their gradual expansion, the operation principle of an -x ray producing unit and the main phenomena appearing during the application of the method.

Next, two ways of experimentally deriving an exposure diagram (or chart) are described. Comments follow on all the factors on which the chart depends. An analysis is also given for the productive use of such a chart in cases, where there are changes in the exposure conditions. Furthermore, the importance of the exposure chart is adequately stressed, as proper exposure selection is a prerequisite for producing a quality image on the film. The interpretation of this image could lead to important decisions regarding constructions of great importance.

Based on the above theoretical considerations, experiments were conducted, which led to the construction of an exposure diagram for ceramic materials and -x rays. To this

end, the equipment available in NTUA's Nuclear Engineering Laboratory was employed and used. Two charts have been produced: one using the first construction method (the one called direct) and one using the other (the one called indirect). Both charts were presented on the same graph to accommodate easier comparison. The charts plotting was made possible using the MS Excel and Origin Pro 9 software. The production of these exposure diagrams led to comments and conclusions on the methods used.

Finally, an analysis is given on the importance of Industrial Radiography for the archaeological research on ancient pottery fragments. This method, if applied, could provide answers to important questions, which could not be given easily using other non-destructive methods. For example, the method could provide information for the macroscopic characteristics of the clay used, for the identification of the pottery techniques applied and for the identification of the secondary processing methods connected to the pottery properties modification like the appearance of the surface, the thickness of the pots, the porosity etc. Examples are provided, based on radiographic images of pot fragments recovered from archaeological excavations in Greece. All images have been derived in NTUA's Nuclear Engineering Laboratory in collaboration with the British School at Athens.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Στόχοι της Εργασίας

Στους κύριους στόχους της εργασίας περιλαμβάνονται τα εξής:

(1) Η κατασκευή ενός διαγράμματος έκθεσης για κεραμικά για την μηχανή παραγωγής ακτινών $-x$ της εγκατάστασης Βιομηχανικής Ραδιογραφίας του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Με το διάγραμμα αυτό θα διευκολυνθεί πολύ η χρήση του σχετικού εξοπλισμού και θα μπορούν να λαμβάνονται εύκολα και σύντομα ποιοτικές ραδιογραφικές εικόνες κεραμικών σε φιλμ με υψηλά ποιοτικά χαρακτηριστικά χωρίς να χρειάζονται δοκιμές. Ο στόχος αυτός καταλαμβάνει και τον μεγαλύτερο όγκο της εργασίας.

(2) Η παρουσίαση της ραδιογραφίας ως τη μη καταστροφική μέθοδο επιλογής για τον προσδιορισμό των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών αγγείων αρχαίας προέλευσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται βασικές βιβλιογραφικές αναφορές στα αγγλικά, το περιεχόμενο των οποίων αποδόθηκε μαζί με παραδειγματικές ραδιογραφικές εικόνες και σκαριφήματα, συνοπτικά αλλά παραστατικά, στα Ελληνικά.

και

(3) Η παρουσίαση μικρού αριθμού πειραματικών αποτελεσμάτων ραδιογραφίας προϊστορικών κεραμικών, που υλοποιήθηκαν με βάση το διάγραμμα έκθεσης που κατασκευάστηκε. Το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ διαθέτει πολύ περισσότερες ραδιογραφικές εικόνες από αυτές που δίνονται εδώ. Παρόλα αυτά η αναφορά σε αυτές και η ανάλυσή τους δεν είναι εύκολη διότι αποτελούν μέρος εξελισσόμενης αδημοσίευτης αρχαιολογικής έρευνας για την οποία θεμελιώνονται και πνευματικά δικαιώματα άλλων

1.2 Αρχές ραδιογραφίας

Στο Κεφάλαιο 2 της εργασίας γίνεται αναφορά στην ανακάλυψη της ραδιογραφίας, στις αρχές στις οποίες βασίζεται, 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. Από την σύντομη ανάλυση προκύπτει εύκολα ότι η Βιομηχανική Ραδιογραφία είναι μία κατ' αρχήν απλή και ευέλικτη μέθοδος Μη Καταστροφικού Ελέγχου, η οποία βασίζεται σε σαφείς αρχές με βάση την οπτική και τη 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. Τονίζεται ότι υπάρχει διαρκής έρευνα και ανάπτυξη στο πεδίο της Βιομηχανικής Ραδιογραφίας, από την οποία προκύπτουν συνεχώς νέοι τρόποι παραγωγής φωτονιακών ακτινοβολιών και νέες τεχνικές παραγωγής της ραδιογραφικής εικόνας κατάλληλες προς χρήση.

1.3 Αναγκαιότητα διαγράμματος έκθεσης

Τα διαγράμματα έκθεσης είναι απαραίτητα ώστε να καθορίζεται η κατάλληλη τιμή έκθεσης για τη ραδιογράφιση ενός αντικειμένου. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται, σε θεωρητικό επίπεδο, οι πειραματικές μέθοδοι με τις οποίες μπορεί να κατασκευασθεί ένα διάγραμμα έκθεσης, καθώς επίσης και πως αυτό 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. Για τα σχετικά πειράματα πρέπει να γίνονται σειρές ραδιογραφιών ενός δοκιμίου τύπου κλίμακας (δηλαδή με "σκαλοπάτια"), ή ισοδύναμα, μιας σειράς από πλάκες διαφορετικών παχών κατασκευασμένες από το ίδιο υλικό το οποίο ενδιαφέρει. Το κατάλληλο διάγραμμα έκθεσης εξασφαλίζει ότι η ραδιογραφική εικόνα θα είναι κατά το δυνατό υψηλής ποιότητας ώστε σε αυτήν 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. Τα συνήθως διαθέσιμα διαγράμματα έκθεσης είναι αυτά του αλουμινίου και του χάλυβα. Επομένως, δεν διατίθεται διάγραμμα έκθεσης για κεραμικά υλικά.. Ως αποτέλεσμα, δεν μπορεί να εκτιμηθεί ορθά η έκθεση για τέτοια υλικά, όπως τα αγγεία και τα θραύσματά τους, παρόλο που αυτό είναι πολλές φορές αναγκαίο να γίνεται στα πλαίσια ερευνών όπως η αρχαιολογική και άλλες. Αναδεικνύεται επομένως η αναγκαιότητα πειραματικής κατασκευής ενός τέτοιου διαγράμματος.

1.4 Διάγραμμα έκθεσης για κεραμικά

Όταν, αποκλειστικά λόγω της έλλειψης καταλλήλου διαγράμματος έκθεσης δεν μπορεί να εκτιμηθεί ορθά η απαιτούμενη έκθεση, τότε χρειάζεται να γίνονται αρκετές δοκιμαστικές ραδιογραφίες ώστε να βρεθεί η περιοχή ρυθμίσεων του εξοπλισμού, για την οποία η ραδιογραφική εικόνα θα έχει καλή ποιότητα. Μια χαρακτηριστική τέτοια περίπτωση είναι τα κεραμικά υλικά, για τα οποία πράγματι δεν διατίθεται διάγραμμα έκθεσης. Ως αποτέλεσμα, δεν μπορεί να εκτιμηθεί ορθά και γρήγορα η απαιτούμενη έκθεση για τέτοια υλικά, όπως τα αγγεία και τα θραύσματά τους. Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στην εγκατάσταση Βιομηχανικής Ραδιογραφίας του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ για την παραγωγή ενός διαγράμματος έκθεσης για κεραμικά χρησιμοποιώντας τις πειραματικές μεθόδους που αναλύθηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο 3. Σημειώνεται ότι τέτοιο διάγραμμα δεν υπάρχει στην βιβλιογραφία και από όσο είναι γνωστό είναι το πρώτο που κατασκευάζεται. Στην βιβλιογραφία, για κεραμικά, δίνονται μόνο ορισμένες τιμές από ενδεικτικές ρυθμίσεις έκθεσης. Επιπλέον τονίζεται ότι στο πλαίσιο των πειραμάτων για την διερεύνηση της έμμεσης μεθόδου χρειάστηκε να κατασκευασθεί νέα χαρακτηριστική καμπύλη για φιλμ Agfa D4, κατάλληλη για χαμηλότερα δυναμικά στην περιοχή 40 έως περίπου 80 kV. Τέτοια χαρακτηριστική καμπύλη δημοσιεύεται ομοίως για πρώτη φορά και συμπληρώνει την αντίστοιχη που δίνει ο κατασκευαστής των φιλμ για δυναμικά στην περιοχή από 100 έως 200 kV.

1.5 Γενικά για τη ραδιογραφία κεραμικής

Η ραδιογραφία στην αρχαιολογία και την αρχαιομετρία έχει καταστεί πλέον ανεκτίμητο εργαλείο τόσο για συντηρητές όσο και για ερευνητές και εφαρμόζεται συστηματικά σε μια μεγάλη ποικιλία ευρημάτων. Στη χώρα μας η χρήση της μεθόδου είναι ακόμα περιορισμένη αλλά κερδίζει αργά έδαφος. Στο Κεφάλαιο 5 εντοπίζεται το πώς η μέθοδος χρησιμοποιείται για την ανάλυση παλαιών κεραμικών. Με τη μέθοδο επιτυγχάνονται κυρίως: (1) ο μακροσκοπικός / ποιοτικός χαρακτηρισμός των υλικών από τα οποία κατασκευάστηκε ο πηλός και (2) ο προσδιορισμός των λεπτομερειών κατασκευής των κεραμικών προϊόντων. Παράλληλα γίνεται και μια ανάλυση των τεχνικών κατασκευής αγγείων ή άλλων πήλινων αντικειμένων. Τέλος παρατίθενται ραδιογραφικές εικόνες από θραύσματα πήλινων αγγείων των οποίων η λήψη έγινε στην

εγκατάσταση Βιομηχανικής Ραδιογραφίας του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των λήψεων αποφασίσθηκαν με τη βοήθεια του διαγράμματος έκθεσης που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο 4. Αυτές οι ραδιογραφικές εικόνες σχολιάζονται πολύ συνοπτικά σχετικά με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των αγγείων.

1.6 Επίλογος και προτάσεις

Με τη βοήθεια και της παρούσας εργασίας στηρίζεται η άποψη ότι η ραδιογραφία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ταυτοποίηση των πρωτευουσών τεχνικών κατασκευής αγγείων και άλλων κεραμικών αντικειμένων και σε συνδυασμό με την οπτική επιθεώρηση, δίνει τη δυνατότητα προαγωγής των γνώσεων σχετικά με τους τρόπους κατασκευής αρχαίων αγγείων και κεραμικών. Δεδομένης μάλιστα της ευκολίας και της ταχύτητας με την οποία μπορούν να ληφθούν μη καταστροφικά ραδιογραφικές εικόνες, η μέθοδος συγκεντρώνει πολλά πλεονεκτήματα. Στους στόχους του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας είναι να αναπτύξει περισσότερο τη μέθοδο ώστε να μπορεί να αναλύσει και άλλα υλικά που απασχολούν τους κλάδους της αρχαιολογίας και της αρχαιομετρίας, όπως για παράδειγμα το χαρτί ή τα υφάσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

2.1 Εισαγωγή

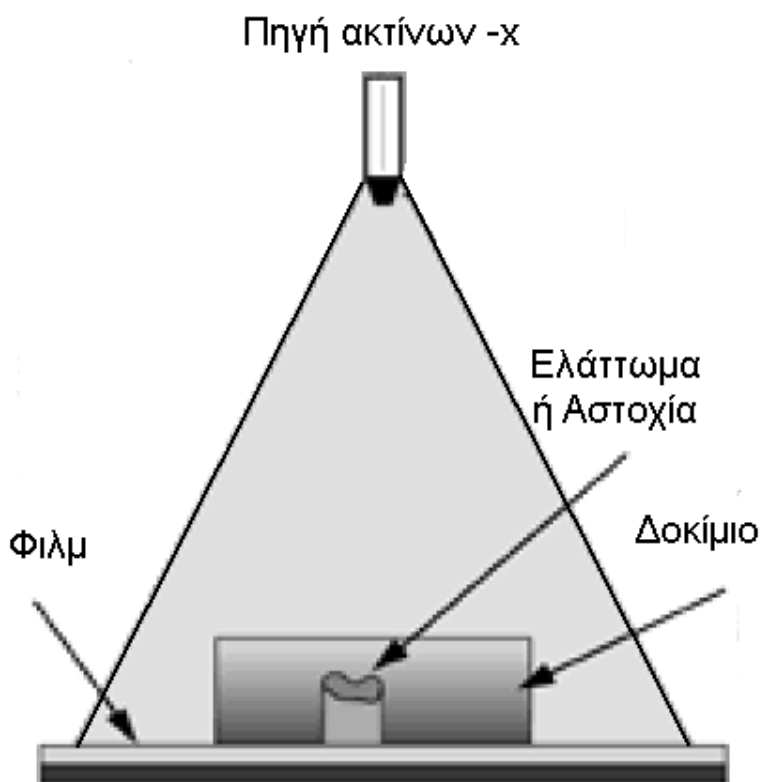
Σε αυτό το Κεφάλαιο γίνεται σύντομη αναφορά στην ανακάλυψη της ραδιογραφίας, τις φυσικές αρχές στις οποίες βασίζεται, στον εξοπλισμό που απαιτείται, στον τρόπο που εκτελείται, στους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη μορφή και την ποιότητα της ραδιογραφικής εικόνας και στον τρόπο που υπολογίζονται 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) και Lang (2005). Πιο αναλυτικά:

Όπως είναι γνωστό οι ακτίνες -x ανακαλύφθηκαν το Νοέμβριο του 1895 από τον Wilhelm Conrad Roentgen (1845-1923), ο οποίος ήταν καθηγητής στο Πανεπιστήμιο Wurzburg της Γερμανίας. Ο Roentgen, ενώ εργαζόταν σε ένα ημι-σκοτεινό εργαστήριο και πειραματιζόταν με ένα σωλήνα κενού (λυχνία Crooke), τον οποίο είχε καλύψει με μαύρο φωτογραφικό χαρτί, παρατήρησε φθορισμό σε παρακείμενο πίνακα με επίστρωση κρυστάλλων αλάτων βαρίου με κυανιούχο λευκόχρυσο (barium platino-cyanide). Επίσης παρατήρησε ότι όπως μετακινούσε τον πίνακα πλησιέστερα στον καθοδικό σωλήνα, ο φθορισμός είχε ακόμα μεγαλύτερη ένταση, πράγμα που απεδείκνυε ότι κάποια άγνωστη ακτινοβολία πήγαζε από το σωλήνα. Ως αποτέλεσμα αυτής της ανακάλυψης, ο Roentgen άρχισε να πειραματίζεται τοποθετώντας δοκίμια μεταξύ της λυχνίας και του πίνακα και έτσι πέτυχε να δημιουργήσει τις πρώτες εργαστηριακές ραδιογραφίες, συμπεριλαμβανομένης και της ακτινογραφίας της παλάμης της συζύγου του, στην οποία παρατηρήθηκε να εμφανίζεται στον πίνακα με την επίστρωση και για πρώτη φορά η δομή των οστών ανάμεσα στον ιστό. Κατά τις πρώτες ημέρες της ανακάλυψης, ο Roentgen αναφερόταν στην άγνωστη ακτινοβολία ως "φως -x" (δηλαδή φως αγνώστου αιτιολογίας), αλλά πολλοί από τους συναδέλφους του επιστήμονες αναφερόταν σε αυτή ως "ακτίνες-Roentgen", όρος που επικράτησε μέχρι τις αρχές του 20^{ου} αι.. Από το 1902 και μετά επικράτησε η ονομασία "ακτίνες -x", την οποία έδωσε ο ίδιος Roentgen.

Κατά την πρώτη εικοσαετία μετά την ανακάλυψή τους, οι ακτίνες -x χρησιμοποιήθηκαν στην ιατρική. Η γνωστή πλέον σήμερα λυχνία παραγωγής ακτίνων -x, η βασιζόμενη στην πέδηση ηλεκτρονίων, ανακαλύφθηκε από τον W.D. Coolidge της General Electric Co. Η ανακάλυψη αυτή έκανε δυνατή την παραγωγή ακτίνων -x με πολύ μεγαλύτερη ενέργεια και επέτρεψε τον έλεγχο της έντασης της παραγόμενης δέσμης. Στον τομέα του Μη Καταστροφικού Ελέγχου, τα πρώτα πειράματα ραδιογραφίας πραγματοποιήθηκαν από τον H.H. Lester στις αρχές της δεκαετίας του 1920 στο Watertown Arsenal στο Watertown της Μασαχουσέτης, Η.Π.Α. 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. Οι εξελίξεις λόγω του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου οδήγησαν σε σημαντικές καινοτομίες και εφευρέσεις στον ραδιογραφικό εξοπλισμό ώστε αυτός να παράγει περισσότερο έντονες δέσμες ακτίνων σε υψηλότερες ενέργειες. Διευκρινίστηκε επιπλέον με σαφήνεια η φύση των ακτίνων -x, ως αόρατα διαπεραστικά φωτόνια γενικά χαμηλότερων ενεργειών από αυτά που παράγονται από την αποδιέγερση πυρήνων.

Σήμερα, τόσο η κοινωνία, όσο και ο επιστημονικός και τεχνολογικός κόσμος είναι εξοικειωμένοι με τις ιατρικές χρήσεις των ακτίνων -x. Για παράδειγμα, είναι πλέον κοινός τόπος η ακτινογραφία του θώρακος ή η ακτινογραφία οδοντοστοιχιών, αλλά και πιο προχωρημένες εφαρμογές όπως η αξονική τομογραφία, οι αρχές της οποίας βασίζονται στη ραδιογραφία (βλ. και την Μεταπτυχιακή Εργασία Λεβέντης, 2016). 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 επικαλυμμένου 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. Βέβαια, λόγω της δισδιάστατης φύσης της αποτύπωσης, η ραδιογραφία δεν αποδίδει το βάθος, στο οποίο συναντάται το οστό ή ο ιστός. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα εσωτερικά χαρακτηριστικά του ασθενούς (ή οποιουδήποτε άλλου αντικειμένου) επικαλύπτονται το ένα πάνω στο άλλο στην εικόνα που λαμβάνεται ως τελικό αποτέλεσμα. Αυτό μπορεί μερικές φορές να οδηγήσει σε ραδιογραφικές εικόνες που είναι δύσκολο να ερμηνευτούν. Ωστόσο, αυτές οι δυσκολίες που προκύπτουν από την προβολή ενός τρισδιάστατου αντικειμένου σε μια δισδιάστατη εικόνα μπορούν σήμερα πλέον να ξεπεραστούν, όπως γίνεται για παράδειγμα στην αξονική τομογραφία, όπου λαμβάνονται ραδιογραφίες του ίδιου αντικειμένου από πολλές διαφορετικές γωνίες, οι οποίες, με κατάλληλους αλγορίθμους ανασυντίθεται σε εικόνα τριών διαστάσεων. Η γενική διάταξη της πηγής ακτίνων -x, του ραδιογραφούμενου αντικειμένου και του φιλμ διακρίνεται στην Εικόνα 2.1



ΕΙΚΟΝΑ 2.1: 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 τομής της βιομηχανίας, όπως οι πτητικές συσκευές, οι πυρηνικοί αντιδραστήρες, οι αγωγοί υγρών και αερίων. Τα τελευταία χρόνια η ραδιογραφία έχει βρει έδαφος εφαρμογής και στη μελέτη της εσωτερικής δομής αρχαιολογικών και πολιτιστικών αντικειμένων. 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 κ.ά.

Προς αποφυγή παρεξηγήσεων, η έκθεση των ζωντανών ιστών σε ακτίνες -x για ιατρικούς διαγνωστικούς σκοπούς πρέπει πάντοτε να ελέγχεται προσεκτικά, και να τηρείται στο ελάχιστο απαραίτητο κάτω όριο δόσης, διότι η δομή και η λειτουργία των κυττάρων είναι δυνατό να επηρεασθεί από την αποτιθέμενη σε αυτά ενέργεια φωτονίων.

2.2 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 ή από το μήκος κύματος τους λ . Αυτές οι ιδιότητες είναι αλληλένδετες. Συγκεκριμένα, η ενέργεια και το μήκος κύματος μπορούν να συσχετιστούν με την σχέση:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

όπου h είναι η σταθερά του Planck και c είναι η ταχύτητα του φωτός. Με αντικατάσταση των γνωστών τιμών για h και c , η σχέση γίνεται:

$$E[\text{keV}] = \frac{1.24}{\lambda[\text{mm}]} \quad (2.2)$$

Από αυτήν την εξίσωση γίνεται φανερό ότι οι ακτίνες -x υψηλότερων ενεργειών θα έχουν μικρότερα μήκη κύματος. Οι ακτίνες -x με το μικρότερο μήκος κύματος (λ_{\min}) ή με τη μεγαλύτερη ενέργεια (E_{\max}), παράγονται από τη μέγιστη τάση που εφαρμόζεται στη λυχνία ακτίνων -x (σε kV). Η τάση της λυχνίας πολλές φορές συμβολίζεται και με kVp (kilovoltage potential).

Επειδή η αλληλεπίδραση πέδησης είναι πολύ μικρό μέρος των άλλων αλληλεπιδράσεων που πραγματοποιούν τα ηλεκτρόνια με την άνοδο και επειδή οι άλλες αλληλεπιδράσεις μπορούν να χαρακτηρισθούν γενικά ως "τριβές" γίνεται κατανοητό ότι στην πράξη σχεδόν όλη η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων μετατρέπεται σε θερμότητα. Επομένως, και προκειμένου να μην καταστραφεί από υπερθέρμανση, η άνοδος πρέπει να έχει την ικανότητα να διαχέει τη θερμότητα. Για το σκοπό αυτό, η άνοδος είναι φτιαγμένη από υλικό που απάγει εύκολα τη θερμότητα, όπως π.χ. ο χαλκός. Παρόλα αυτά ο χαλκός δεν είναι υλικό με το οποίο πραγματοποιείται εύκολα η αλληλεπίδραση πέδησης. Προκειμένου να ξεπερασθεί αυτό, 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. Στην πραγματικότητα, ακόμη και στην περίπτωση του κατάλληλου στόχου, το 97-99% της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία απάγεται με τη βοήθεια της ανόδου από χαλκό και μόλις το 1-3% περίπου μετατρέπεται σε ακτίνες -x. Η ψύξη της ανόδου γίνεται με ρεύμα αέρα ή με κύκλωμα ψυκτικού νερού ή ψυκτικού ελαίου. Τα ηλεκτρόνια παράγονται στην κάθοδο της λυχνίας με τη βοήθεια ενός θερμαινόμενου μεταλλικού νήματος (το οποίο, χωρίς να είναι απαραίτητο, μπορεί και αυτό να είναι από βολφράμιο, ώστε να αντέχει). Όταν το νήμα θερμανθεί περιβάλλεται από ηλεκτρόνια. Προκειμένου τα ηλεκτρόνια να κινηθούν προς την άνοδο, το αναγκαίο ηλεκτρικό δυναμικό (τάση) επιβάλλεται με τη βοήθεια κατάλληλου τροφοδοτικού. Με τη βοήθεια του δυναμικού αυτού τα ηλεκτρόνια προσελκύονται έντονα προς τον στόχο της ανόδου. Η ροή των ηλεκτρονίων μεταξύ καθόδου και ανόδου είναι το ρεύμα ηλεκτρονίων. 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.

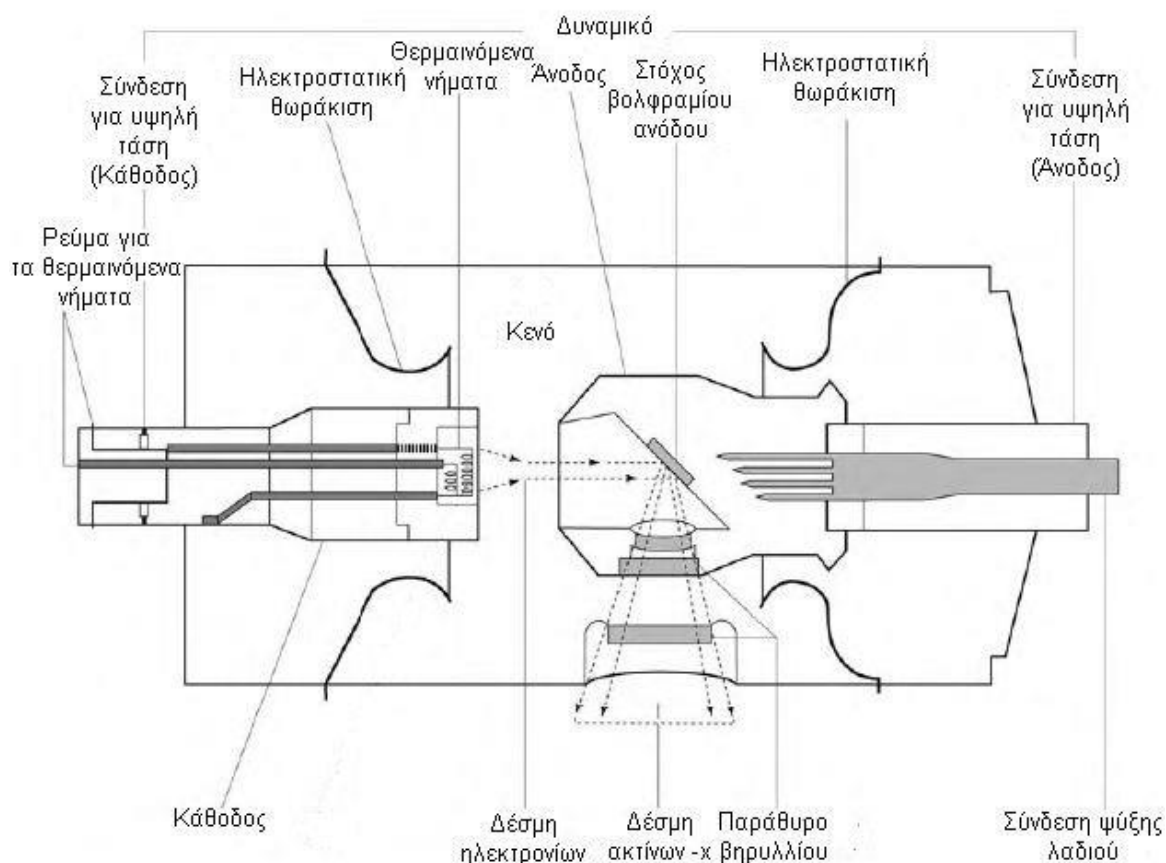
Η υψηλή τάση ανάμεσα στην κάθοδο και στην άνοδο, μπορεί να ρυθμίζεται επίσης. Το δυναμικό αυτό, επηρεάζει την κινητική ενέργεια με την οποία καταλήγουν τα ηλεκτρόνια πάνω στον στόχο. Όσο υψηλότερη η τάση (περισσότερα kV) τόσο μεγαλύτερη η ταχύτητα των ηλεκτρονίων, άρα και η ενέργεια που έχουν όταν προσπίπτουν 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 τόσο το πλήθος όσο και την ενέργεια των παραγόμενων ακτίνων -x με μη γραμμικό τρόπο.

Το μέγεθος του στόχου είναι σημαντική παράμετρος μιας λυχνίας ακτίνων -x, καθώς αποδεικνύεται ότι, σύμφωνα με απλές αρχές της οπτικής, επηρεάζει την ευκρίνεια της εικόνας του ραδιογραφούμενου αντικειμένου. Όσο μικρότερος είναι ο στόχος τόσο ευκρινέστερη προκύπτει η ραδιογραφία. Ακριβώς επειδή ο στόχος πρέπει να είναι μικρός, το "σημείο" από το οποίο παράγονται οι ακτίνες -x με πέδηση, ονομάζεται και "εστιακό σημείο".

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 του τροφοδοτικού υψηλής τάσης. Μια τυπική αναπαράσταση ενός συστήματος λυχνίας -x δίνεται στην Εικόνα 2.2.

Ασφαλώς και διατίθενται εξειδικευμένα συστήματα που αναπτύσσουν πολύ μεγαλύτερα δυναμικά, όπως είναι για παράδειγμα οι γραμμικοί επιταχυντές που βρίσκουν εφαρμογή σε πολλά βιομηχανικά πεδία όπου τα ραδιογραφούμενα αντικείμενα έχουν μεγάλο πάχος ή πολύ μεγάλη πυκνότητα ή και τα δύο και επομένως οι ακτίνες -x, προκειμένου να είναι πιο διαπεραστικές, χρειάζεται να έχουν πολλή περισσότερη ενέργεια.



ΕΙΚΟΝΑ 2.2: Αναπαράσταση μιας τυπικής λυχνίας παραγωγής ακτίνων -x

Βεβαίως, τα ιατρικά διαγνωστικά συστήματα ακτίνων -x είναι συνήθως σχεδιασμένα για να λειτουργούν με πολύ μικρό χρόνο έκθεσης, υψηλό ρεύμα 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.

2.3 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).

Η συνολική εξασθένιση μιας δέσμης φωτονίων που διαπερνά μία εξεταζόμενη ύλη είναι το άθροισμα τριών διαφορετικών τύπων αλληλεπιδράσεων: (α) Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (φωτόνιο χαμηλής ενέργειας < 500 kV, μεταφέρει όλη του την ενέργεια σε ένα ηλεκτρόνιο του ατόμου του υλικού), (β) σκεδάσεις διαφόρων τύπων και (γ) δίδυμη γέννηση (μετατροπή φωτονίου σε ηλεκτρόνιο + ποζιτρόνιο).

Η παρακάτω απλοποιημένη σχέση εκφράζει τον εκθετικό νόμο εξασθένησης μιας δέσμης μονοενεργειακών φωτονίων σε συνάρτηση με την απόσταση που διάνυσε στο υλικό:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.3)$$

όπου:

e : βάση των φυσικών λογαρίθμων (περίπου 2.7)

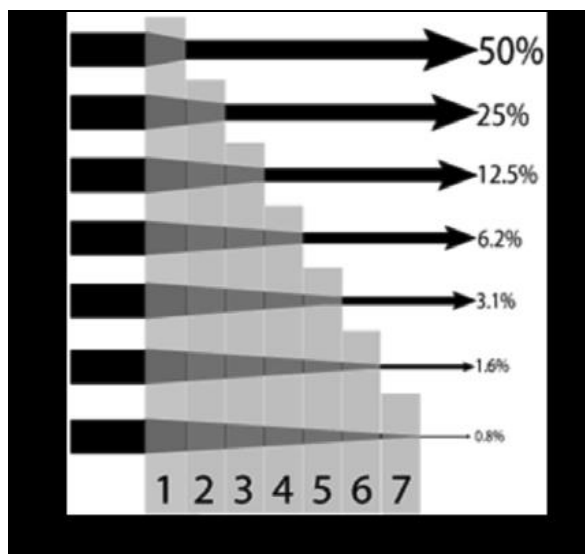
I_0 : αρχική (χωρίς εξασθένηση) ένταση της ακτινοβολίας

μ : γραμμικός συντελεστής εξασθένησης ανά μονάδα απόστασης

x : απόσταση που διάνυσε η ακτινοβολία στο υλικό

Η ικανότητα διείσδυσης μιας δέσμης φωτονίων μετράται με το πάχος υποδιπλασιασμού (Half-Value Layer – HVL), σε mm υλικού και παριστάνεται ποιοτικά για μονοενεργειακά φωτόνια στην Εικόνα 2.3. Ως πάχος υποδιπλασιασμού ορίζεται το πάχος ενός υλικού, το οποίο απαιτείται για να μειωθεί η ένταση της δέσμης φωτονίων κατά 50% σε σχέση με την ένταση της προσπίπτουσας δέσμης. Η τιμή του HVL εξαρτάται από την ενέργεια των φωτονίων (υψηλότερη ενέργεια, μεγαλύτερο πάχος υποδιπλασιασμού) και τον τύπο του υλικού (υψηλότερη η πυκνότητα του υλικού, μικρότερο πάχος υποδιπλασιασμού, υψηλότερος μαζικός αριθμός, μικρότερο πάχος υποδιπλασιασμού).

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".



ΕΙΚΟΝΑ 2.3: Το πάχος υποδιπλασιασμού χαρακτηρίζει τη διεισδυτικότητα δέσμης φωτονίων σε ένα υλικό

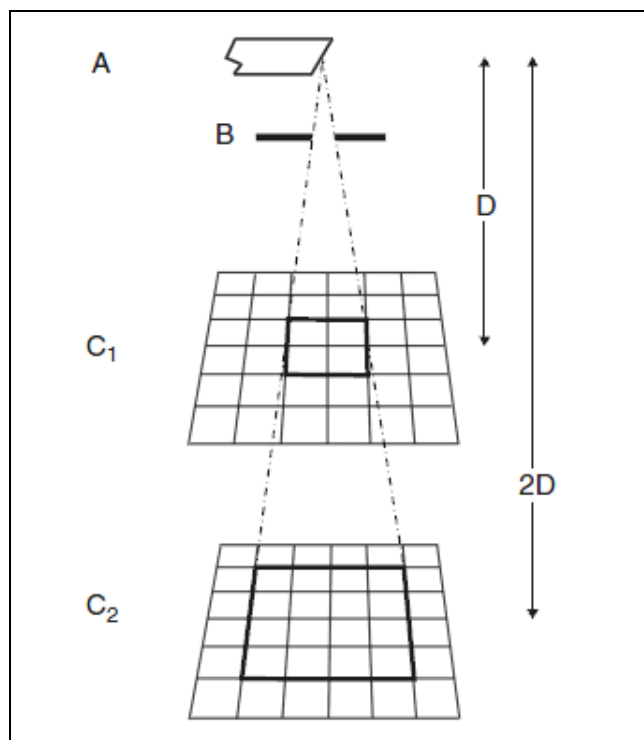
Όσο παχύτερο και πιο ακανόνιστο το σχήμα του εξεταζόμενου αντικειμένου, τόσο περισσότερες γίνονται οι σκεδάσεις των φωτονίων. Πρόσθετα σκεδαζόμενα φωτόνια μπορούν να δημιουργηθούν όταν οι ακτίνες -x της προσπίπτουσας στο αντικείμενο δέσμης αλληλεπιδράσουν με επιφάνειες ή οποιαδήποτε άλλα αντικείμενα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

2.4 Ο νόμος του αντίστροφου τετραγώνου της απόστασης

Όταν οι ακτίνες -x παράγονται από το εστιακό σημείο, "ταξιδεύουν" σε αποκλίνουσες ευθείες γραμμές έτσι ώστε να δημιουργείται μια δέσμη φωτονίων σε σχήμα κώνου που μοιάζει να παράγεται από μία σημειακή πηγή. Η ένταση της δέσμης (σε φωτόνια ανά μονάδα κάθετης επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου) μειώνεται καθώς αυτή απομακρύνεται από την πηγή, διότι, εξαιτίας της κωνικής μορφής της, εξαπλώνεται και αραιώνει για να προσβάλλει μια ολοένα και ευρύτερη επιφάνεια όπως διακρίνεται και στην Εικόνα 2.4. Η σχέση μεταξύ της έντασης της δέσμης και της απόστασης από την πηγή μπορεί να εκφραστεί από την εξίσωση:

$$I_2 = I_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \quad (2.4)$$

αν η ένταση σε απόσταση D_1 είναι I_1 και η ένταση στο D_2 είναι I_2 . Αυτή η σχέση είναι γνωστή ως ο "νόμος του αντίστροφου τετραγώνου", ο οποίος δηλώνει ότι, για παράδειγμα, αν η απόσταση του αντικειμένου από την πηγή ακτίνων -x διπλασιαστεί,



ΕΙΚΟΝΑ 2.4: Διάγραμμα που δείχνει την επίδραση του νόμου του αντίστροφου τετράγωνου

τότε η ένταση δέσμης που προσβάλλει το αντικείμενο θα μειωθεί στο ένα τέταρτο της αρχικής της τιμής. Ως συνέπεια, εάν το εξεταζόμενο αντικείμενο τοποθετηθεί πολύ μακριά από το εστιακό σημείο της λυχνίας ακτίνων -x, δεν θα υπάρχει επαρκής ένταση για να γίνει μια ραδιογραφία σε εύλογο χρόνο. Η απόσταση πηγής - φιλμ αν η πηγή φωτονίων είναι λυχνία ακτίνων -x είναι συνήθως μεταξύ 60 cm και 100 cm. Η χρήση μικρότερης απόστασης έχει το μειονέκτημα, όπως θα συζητηθεί στην επόμενη παράγραφο, ότι η ποιότητα της εικόνας επιδεινώνεται.

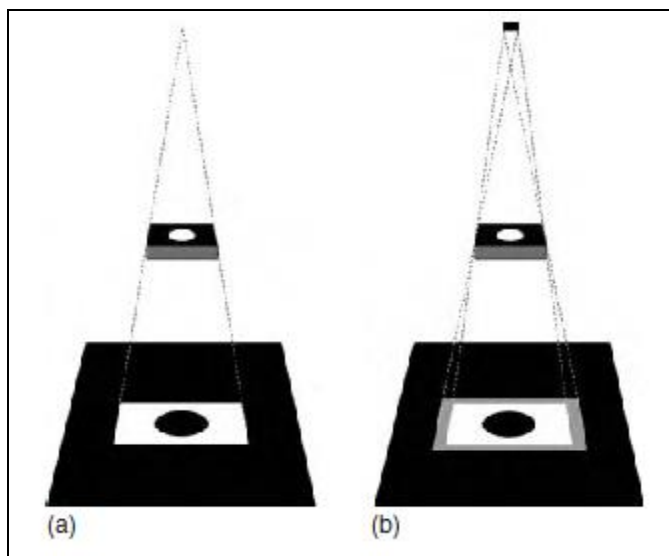
2.5 Ο ρόλος της γεωμετρίας στη ραδιογραφία

Οι γεωμετρικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της εικόνας στην ραδιογραφία, είναι οι διαστάσεις του εστιακού σημείου, η απόσταση μεταξύ φιλμ (ή της επιφάνειας σχηματισμού εικόνας) και εστιακού σημείου και η απόσταση μεταξύ ραδιογραφούμενου αντικειμένου και φιλμ. Η καλής ποιότητας εικόνα πρέπει να έχει ευκρίνεια ή αλλιώς οξύτητα. Η ευκρίνεια εξαρτάται πολύ από το αν το εστιακό σημείο ως πηγή φωτονίων (ή ευρύτερα φωτός) δημιουργεί παρασκιές στην επιφάνεια σχηματισμού εικόνας. Είναι γνωστό από την οπτική, ότι το μέγεθος της παρασκιάς U_g

(το πλάτος της γκρι λωρίδας στις Εικόνες 2.5 και 2.6) μπορεί να εκφραστεί από τον τύπο:

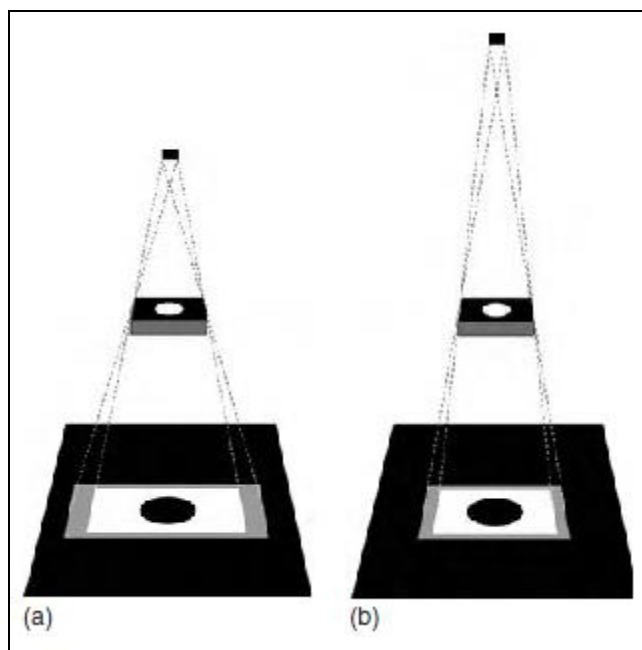
$$U_g = S \frac{b}{a} \quad (2.5)$$

όπου S είναι η μεγαλύτερη από τις διαστάσεις του εστιακού σημείου, a η απόσταση εξεταζόμενου αντικειμένου - πηγής και b η απόσταση αντικειμένου - επιφάνειας σχηματισμού εικόνας. Εάν το S είναι μεγάλο, ή η απόσταση μεταξύ αντικειμένου και επιφάνειας σχηματισμού εικόνας b είναι μεγάλη, η παρασκιά U_g αυξάνεται. Με άλλα λόγια, τότε, η ευκρίνεια και επομένως η ποιότητα της εικόνας επιδεινώνεται. Αυτές οι επιδράσεις συνοψίζονται στις Εικόνες 2.5 και 2.6. Με μεγάλες τιμές της παρασκιάς, η ανίχνευση των απότομων αλλά μικρών αλλαγών στο πάχος του εξεταζόμενου αντικειμένου γίνεται δύσκολη, διότι οι ακμές του, όπως αυτές αποτυπώνονται στο φιλμ καταλήγουν δυσδιάκριτες. Εάν λοιπόν μία αστοχία στο αντικείμενο είναι μικρή (για παράδειγμα, μια χαραγμένη γραμμή), η γραμμή ενδέχεται να μην γίνει ορατή λόγω του θορύβου που εισάγει η παρασκιά.



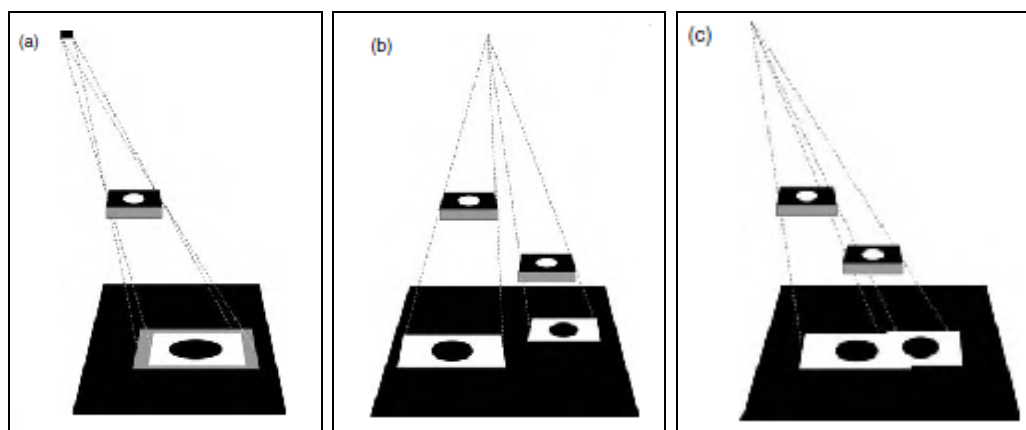
ΕΙΚΟΝΑ 2.5. Επίδραση της γεωμετρίας στην παρασκιά (α) Σημειακό εστιακό σημείο και μεγάλη απόσταση μεταξύ του σημείου και του αντικειμένου: δεν υπάρχει παρασκιά (β) Μεγαλύτερο εστιακό σημείο με ίδια απόσταση μεταξύ του σημείου και του αντικειμένου: υπάρχει παρασκιά (Quinn, 1980).

Από τις Εικόνες 2.5 και 2.6 γίνεται κατανοητό, ότι είναι δυνατή η μεγέθυνση της εικόνας αυξάνοντας την απόσταση του αντικειμένου από την επιφάνεια σχηματισμού της εικόνας. Είναι επίσης δυνατή η παραμόρφωση της εικόνας και άλλα παραπλανητικά



ΕΙΚΟΝΑ 2.6: Επίδραση της γεωμετρίας στην παρασκία. Καθώς η απόσταση μεταξύ του εστιακού σημείου και του αντικειμένου αυξάνεται, το μέγεθος της παρασκιάς μειώνεται (Quinn, 1980).

αποτελέσματα λόγω άλλων γεωμετρικών επιδράσεων, όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 2.7



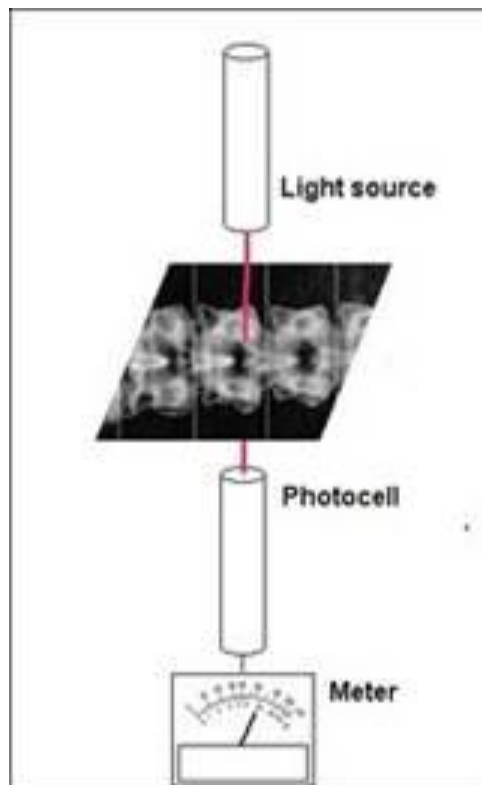
ΕΙΚΟΝΑ 2.7: Διαγράμματα που απεικονίζουν την παραμόρφωση που εμφανίζεται στη ραδιογραφική εικόνα εξαιτίας διαφόρων γεωμετρικών λόγων (Quinn, 1980). (α) Η εικόνα παραμορφώνεται αν η προς εξέταση επιφάνεια του αντικειμένου δεν είναι σε ορθή γωνία με τον άξονα της δέσμης ακτίνων -x. (β) Τα αντικείμενα με ίδιες διαστάσεις ραδιογραφούμενα σε διαφορετικές αποστάσεις εμφανίζονται με διαφορετικές διαστάσεις στην τελική εικόνα. (γ) Τα αντικείμενα με ίδιες διαστάσεις ραδιογραφούμενα σε διαφορετικές αποστάσεις και υπό γωνία με τη δέσμη μπορεί να φαίνεται ότι αποτελούν μέρος ενός μόνο αντικειμένου.

2.6 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:

$$D = \log \frac{I_0}{I_1} \quad (2.6)$$

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 2.8.



ΕΙΚΟΝΑ 2.8 Μετρητής οπτικής πυκνότητας: Light Source = Πηγή Φωτός, Photocell = Φωτοδίοδος, Meter = Μετρητής

Η σχέση (2.6) 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.

Εναλλακτικά, αντί για την οπτική πυκνότητα μπορούν να χρησιμοποιούνται και τα ακόλουθα μεγέθη:

$$\text{Διαφάνεια} = \frac{I_1}{I_0} \quad (2.7)$$

και

$$\text{Αδιαφάνεια} = \frac{I_0}{I_1} \quad (2.8)$$

Στον Πίνακα 2.1, αποτυπώνεται η σχέση μεταξύ των τριών αυτών μεγεθών με τη βοήθεια αριθμητικών παραδειγμάτων. Διακρίνεται ότι, η αύξηση της πυκνότητας κατά 0.3 μειώνει το φως που διαπερνά στο μισό του αρχικού.

Διαφάνεια $\frac{I_1}{I_0}$	Διαφάνεια (%)	Αδιαφάνεια $\frac{I_0}{I_1}$	Πυκνότητα $\log \frac{I_0}{I_1}$
1	100	1	0
0.5	50	2	0.3
0.25	25	4	0.6
0.1	10	10	1
0.01	1	100	2
0.001	0.1	1000	3
0.0001	0.01	10000	4

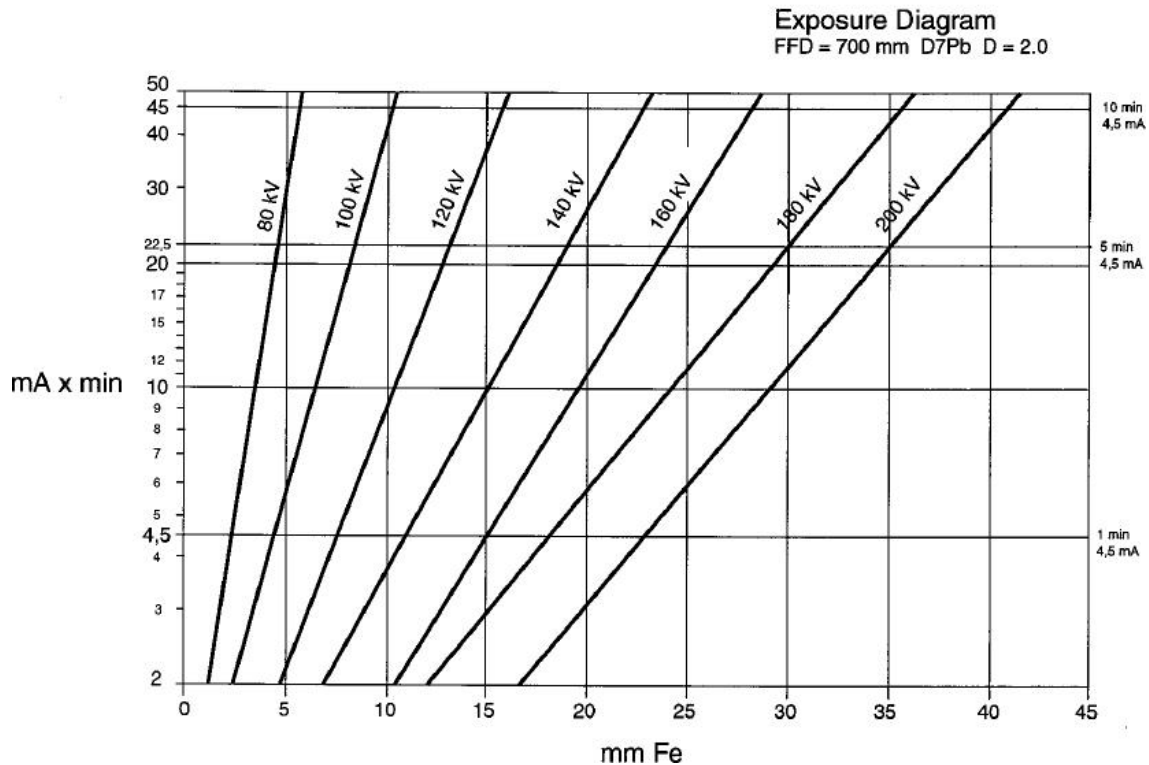
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: Αριθμητικά παραδείγματα, Διαφάνειας, Αδιαφάνειας και Οπτικής Πυκνότητας

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

2.7 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. Η έκθεση μετρείται ως γινόμενο του ρεύματος των ηλεκτρονίων (σε mA) επί το χρόνο εκπομπής της λυχνίας (για βιομηχανικές εφαρμογές συνήθως σε min) και 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 για τη λυχνία που διατίθεται στην εγκατάσταση Βιομηχανικής Ραδιογραφίας του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ δίνεται στην Εικόνα 2.9.

ERESCO 42 MF3



ΕΙΚΟΝΑ 2.9: Διάγραμμα έκθεσης για λυχνία ακτίνων -x, εταιρείας κατασκευής General Electric, τύπου ERESKO 42 MF3, μέγιστης τάσεως 200 kV. Υλικό: Χάλυβας, Οπτική Πυκνότητα: 2, Απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ: 700 mm, Φιλμ: Agfa D7Pb.

Ένα διάγραμμα έκθεσης είναι το κατάλληλο εργαλείο για τον προσδιορισμό εκθέσεων για ραδιογραφία ομοιόμορφων πλακών, αλλά χρησιμεύουν μόνο ως οδηγοί για αντικείμενα, όπως περίπλοκα χυτά, με μεγάλες διακυμάνσεις πάχους.

2.8 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 σε σαφείς αρχές με βάση την οπτική και τη 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. Τονίζεται ότι υπάρχει διαρκής έρευνα και ανάπτυξη στο πεδίο της Βιομηχανικής Ραδιογραφίας, από την οποία προκύπτουν συνεχώς νέοι τρόποι παραγωγής φωτονιακών ακτινοβολιών και νέες τεχνικές παραγωγής της ραδιογραφικής εικόνας κατάλληλες προς χρήση. Στο επόμενο Κεφάλαιο θα γίνει πιο λεπτομερής αναφορά στην χρησιμότητα του διαγράμματος έκθεσης, καθώς και στους τρόπους κατασκευής του, προκειμένου στη συνέχεια να παραχθεί πειραματικά διάγραμμα έκθεσης για κεραμικά υλικά ώστε να μπορεί να προσδιορίζεται η έκθεση για κεραμικά όστρακα αγγείων που προέκυψαν από την αρχαιολογική έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Αντικείμενο αυτού του Κεφαλαίου είναι κυρίως η παρουσίαση των πειραματικών μεθόδων με τις οποίες μπορεί να κατασκευασθεί ένα διάγραμμα έκθεσης, καθώς επίσης και πως αυτό 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. 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", κυρίως στις οδηγίες που βρίσκονται στο General Electric (2008). Επιπλέον χρησιμοποιείται υλικό και από το εγχειρίδιο Quinn (1980) και από τη Διπλωματική Εργασία Παπαδόπουλος (2014).

Όπως ήδη αναφέρθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, όπου δόθηκε και ο ορισμός του διαγράμματος έκθεσης, τα διαγράμματα έκθεσης είναι απαραίτητα ώστε να καθορίζεται η κατάλληλη τιμή έκθεσης για τη ραδιογράφιση ενός αντικειμένου.

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 - 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.

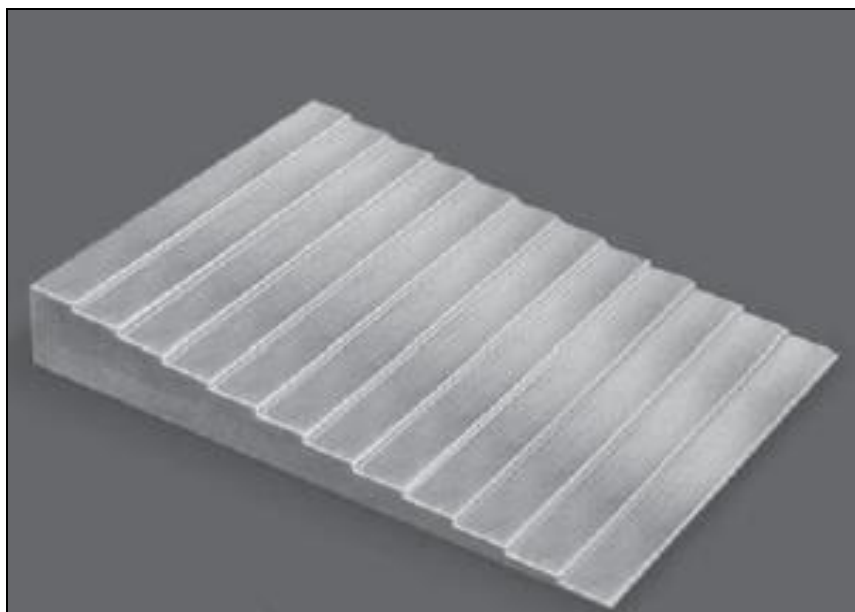
- (3) Είδος φιλμ: Το διάγραμμα έκθεσης παράγεται για ένα συγκεκριμένο τύπο φιλμ. Ο τύπος του φιλμ παίζει ρόλο διότι ίδια έκθεση σε διαφορετικό φιλμ παράγει διαφορετική οπτική πυκνότητα. Αν υπάρχει ανάγκη να χρησιμοποιηθεί άλλο φιλμ από αυτό για το οποίο χαράχθηκε το διάγραμμα διατίθενται τρόποι αναγωγής 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

3.2 Κατασκευή διαγράμματος έκθεσης

3.2.1 Δοκίμιο κλίμακας

Ένα δοκίμιο κλίμακας διακρίνεται στην Εικόνα 3.1. 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.



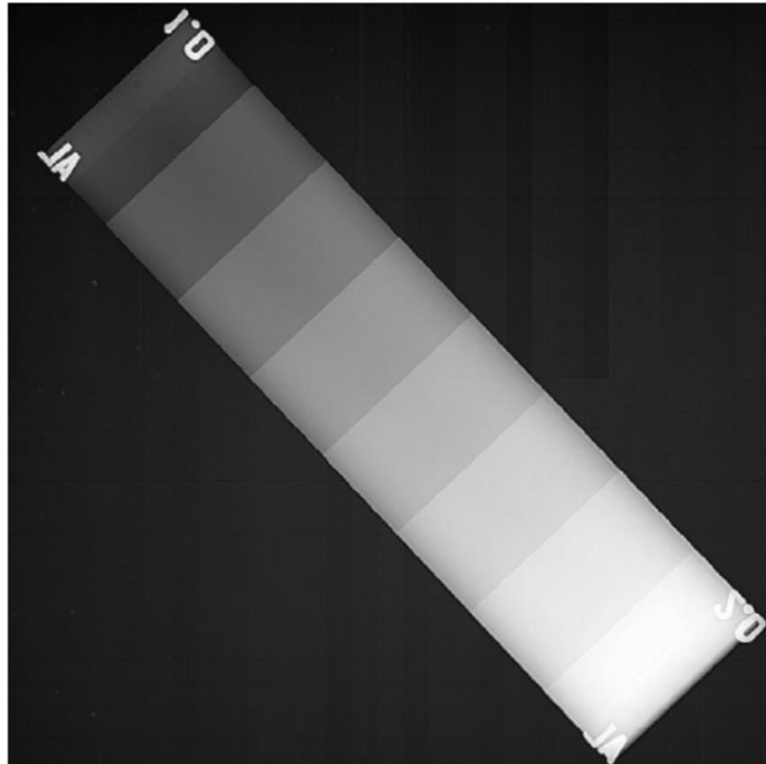
ΕΙΚΟΝΑ 3.1: Δοκίμιο κλίμακας

3.2.2 Πρώτη μέθοδος κατασκευής διαγράμματος έκθεσης

Για την πειραματική παραγωγή ενός διαγράμματος έκθεσης, σύμφωνα με την πρώτη ή αλλιώς άμεση μέθοδο, 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 3.2.

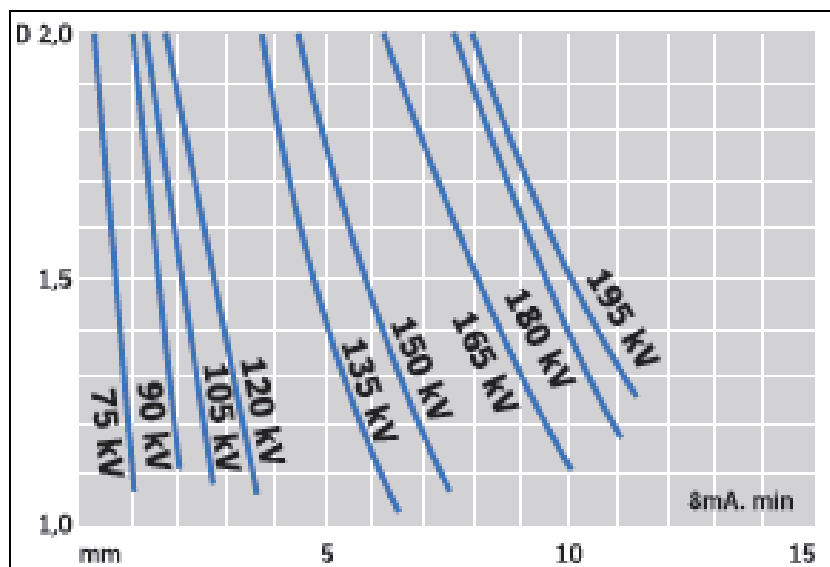


**ΕΙΚΟΝΑ 3.2: Τυχαία ραδιογραφία δοκιμίου κλίμακας
(από το διαδίκτυο)**

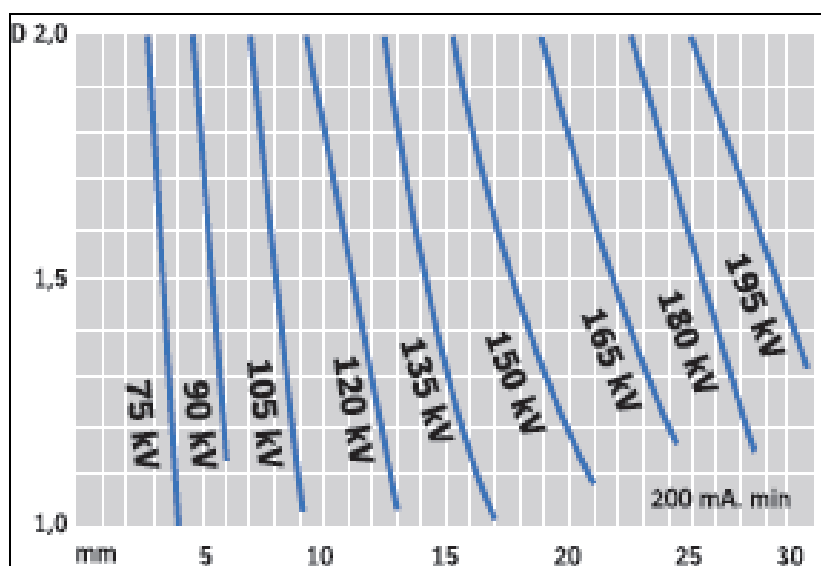
Γίνεται κατανοητό ότι τα λεπτότερα τμήματα του δοκιμίου κλίμακας αποτυπώνονται πιο μαύρα στη ραδιογραφική εικόνα, ενώ τα παχύτερα αποτυπώνονται πιο ανοιχτόχρωμα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για αυξημένο ρεύμα ηλεκτρονίων π.χ. 10 mA και μεγαλύτερο χρόνο έκθεσης π.χ. 20 min, ώστε η έκθεση να αυξηθεί στα 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 3.3 και στην Εικόνα 3.4.



ΕΙΚΟΝΑ 3.3: Προκαταρκτικό διάγραμμα Οπτικής πυκνότητας – Πάχους στα 8 mA·min (General Electric, 2008)

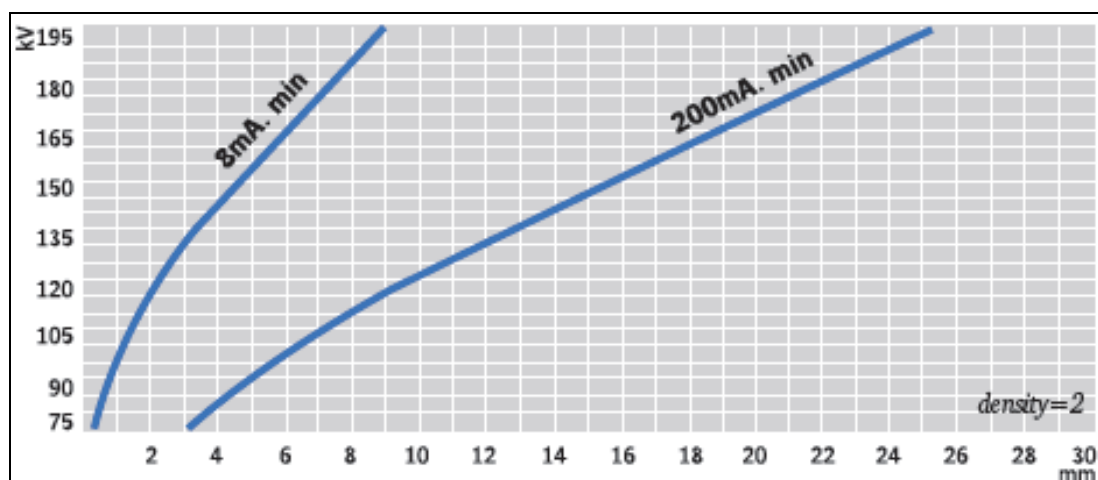


ΕΙΚΟΝΑ 3.4: Προκαταρκτικό διάγραμμα Οπτικής πυκνότητας – Πάχους στα 200 mA·min (General Electric, 2008)

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 3.3 φέρεται η ευθεία $D = 2$. Τα σημεία τομής της ευθείας αυτής με τις καμπύλες των τάσεων μεταφέρονται σε ένα

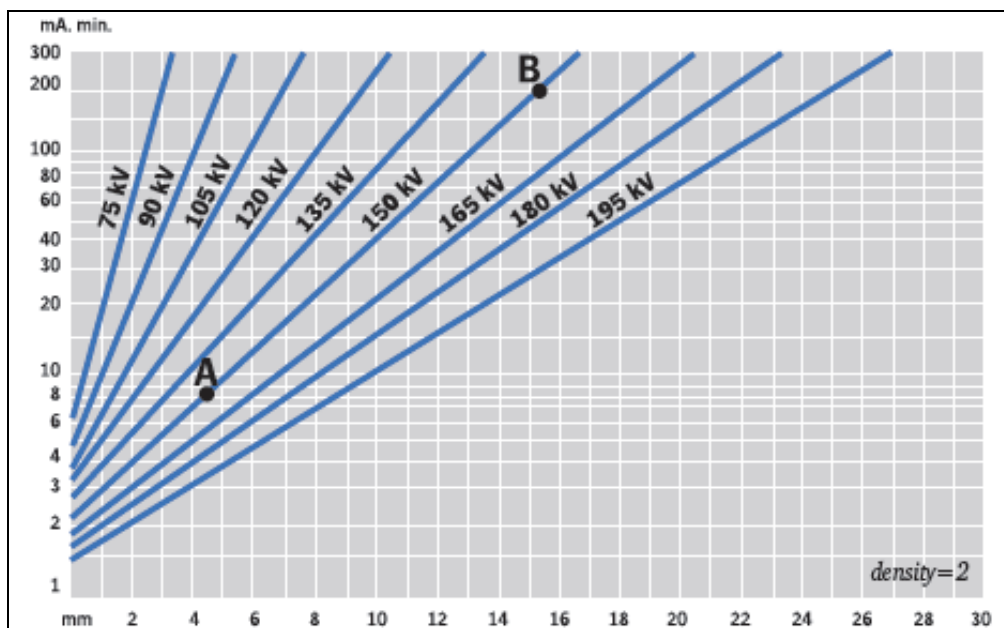
διάγραμμα, όπως αυτό της Εικόνας 3.5, το οποίο έχει οριζόντιο άξονα το πάχος σε mm και κατακόρυφο άξονα την τάση σε kV. Τα σημεία αυτά ενώνονται για να σχηματίσουν την καμπύλη 8 mA×min. Ομοίως στην Εικόνα 3.4 φέρεται και πάλι η ευθεία $D = 2$. Τα σημεία τομής της ευθείας αυτής με τις καμπύλες των τάσεων μεταφέρονται στο διάγραμμα της Εικόνας 3.5. Τα σημεία αυτά ενώνονται για να σχηματίσουν την καμπύλη 200 mA×min.



ΕΙΚΟΝΑ 3.5: 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 "Α" και σημείο "Β" και ενώνονται ώστε να προκύψει η ευθεία των 150 kV (βλ. και Εικόνα 3.6). Αποδεικνύεται πειραματικά ότι η υπόψη ευθεία αλλά και οι άλλες παρόμοιες της για άλλα kV είναι πράγματι ευθεία και όχι 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.



ΕΙΚΟΝΑ 3.6: Ζητούμενο διάγραμμα έκθεσης (General Electric, 2008)

3.2.3 Δεύτερη μέθοδος κατασκευής διαγράμματος έκθεσης

Για τη δεύτερη μέθοδο, ή αλλιώς την έμμεση μέθοδο, το δοκίμιο κλίμακας ραδιογραφείται σε πολλά από τα διαθέσιμα kV για δεδομένη τιμή της έκθεσης σε mA×min. Σημειώνονται η έκθεση σε mA×min και όλες οι πυκνότητες που λήφθηκαν για κάθε σκαλί σε κάθε ηλεκτρικό πεδίο που επιλέχθηκε. Δεδομένου ότι η χρήσιμη (η ορατή) αμαύρωση του φιλμ είναι στην περιοχή από οπτική πυκνότητα ~0.7 (μόλις ορατό γκρι) έως ~3.5 (μαύρο πρακτικά αδιαπέραστο από το φως), αν κάποιες από τις πυκνότητες που βρέθηκαν είναι μικρότερες από το 0.7, γίνονται, αν απαιτείται, και άλλες εκθέσεις για περισσότερα mA×min. Αν κάποιες από τις πυκνότητες που βρέθηκαν είναι > 3.5 - 4, γίνονται, αν απαιτείται, και άλλες εκθέσεις για λιγότερα mA×min. Όλα τα δεδομένα έκθεσης και πυκνότητας μετατρέπονται στην έκθεση που απαιτείται ώστε η οπτική πυκνότητα να έχει την επιθυμητή τιμή (όπως πιο πάνω, εδώ έχει επιλεγεί η τιμή 2). Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιούνται μια σειρά από τρόποι. Ο συντομότερος, αλλά όχι και τόσο ακριβής, είναι ο ακόλουθος:

Αν είναι EXP η έκθεση (mA×min) που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία και D η οπτική πυκνότητα που επιτεύχθηκε, τότε η απαραίτητη έκθεση EXP_{needed} με την οποία θα επιτευχθεί η επιθυμητή οπτική πυκνότητα D_{needed} θα δίνεται από τη σχέση.

$$\frac{EXP_{needed}}{EXP} = \frac{D_{needed}}{D} \quad (3.1)$$

Υπάρχουν και άλλοι λιγότερο προσεγγιστικοί τρόποι που θα παρουσιασθούν στη συνέχεια. Στη συνέχεια συλλέγονται όλα τα τελικά δεδομένα (πάχη, mA×min για την επιθυμητή οπτική πυκνότητα και kV) και τοποθετούνται ως σημεία στο διάγραμμα έκθεσης. Το διάγραμμα που προκύπτει είναι προσεγγιστικό στο βαθμό που η σχέση (3.1) είναι προσεγγιστική. Επίσης, και προφανώς, το διάγραμμα που προκύπτει δεν είναι τόσο ακριβές όσο αυτό που προκύπτει από την πρώτη μέθοδο.

3.3 Χρήση του διαγράμματος έκθεσης

3.3.1 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. Όπως ήδη αναφέρθηκε, 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.

3.3.2 Για διαφορετικές αποστάσεις

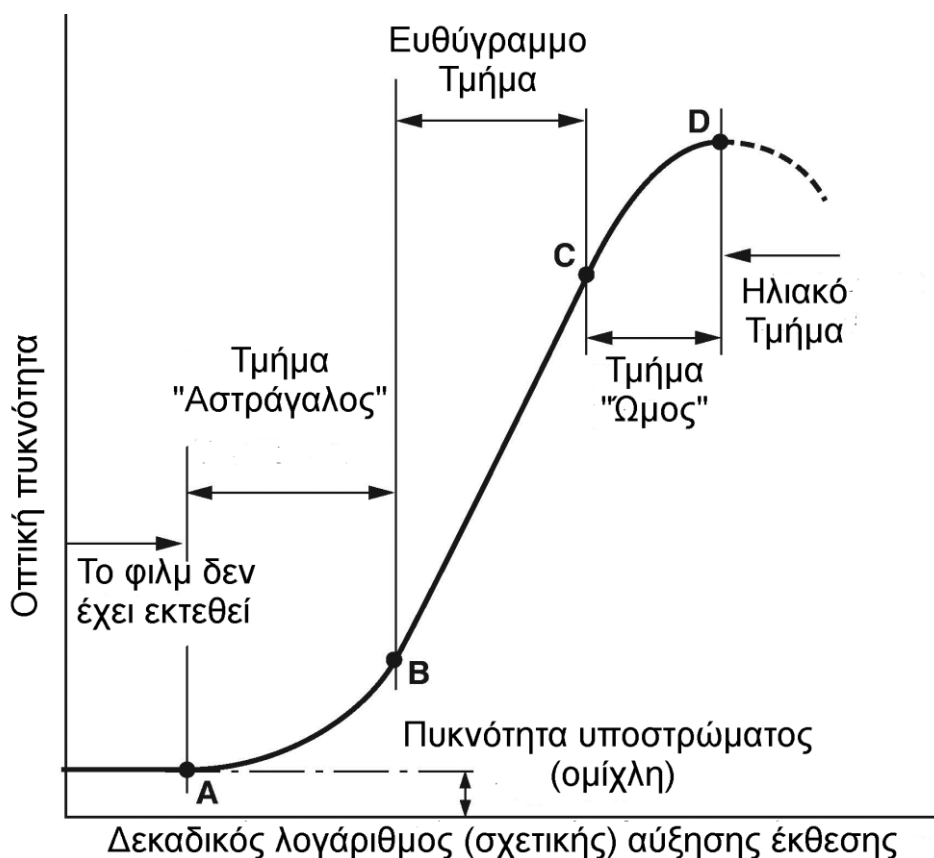
Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζονται κατ' αρχήν ακριβώς τα αναφερόμενα στην παράγραφο 3.3.1. Υπολογίζεται επομένως η έκθεση EXP_1 σε $\text{mA}\times\text{min}$ για την απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ για την οποία χαράχθηκε το διαθέσιμο διάγραμμα έκθεσης, δηλαδή έστω την SFD_1 σε mm ή cm. Αν η διαφορετική 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:

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

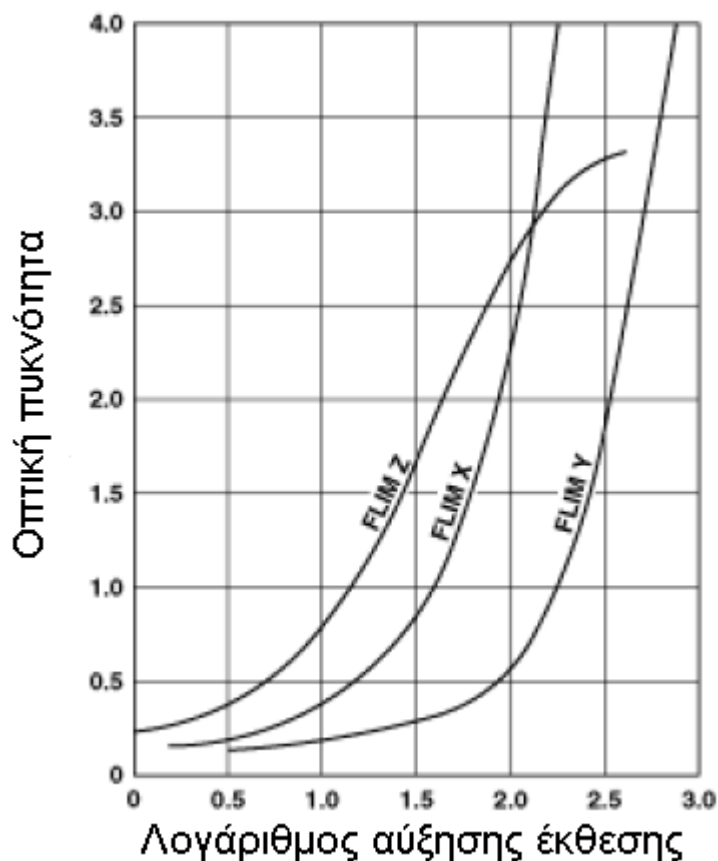
3.3.3 Χαρακτηριστική καμπύλη φιλμ

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 3.7. 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 στην λογάριθμο της απόλυτης αύξησης της έκθεσης αλλά στο 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 3.7. 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 3.8. 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.



ΕΙΚΟΝΑ 3.7: Τα πέντε χαρακτηριστικά τμήματα της χαρακτηριστικής καμπύλης του φιλμ (από το διαδίκτυο)



ΕΙΚΟΝΑ 3.8: Χαρακτηριστικές διαφορετικών τύπων φιλμ (Quinn, 1980)

3.3.4 Ίδιο φιλμ άλλη οπτική πυκνότητα

Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζονται κατ' αρχήν ακριβώς τα αναφερόμενα στην παράγραφο 3.3.1. Υπολογίζεται επομένως 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 3.9)
- 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 3.9)
- Στο διάγραμμα της χαρακτηριστικής καμπύλης του φιλμ Z, χαράσσεται η ευθεία $D_2 = 2$ (βλ. Εικόνα 3.9)

- 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 3.9)
- Υπολογίζεται η απόλυτη διαφορά των δύο λογαρίθμων $d = |LOG_1-LOG_2|$, είναι $d = 0.62$ (ευθύγραμμο τμήμα "3" στην Εικόνα 3.9)
- Υπολογίζεται η αναγκαία έκθεση EXP_2 ώστε να ληφθεί η επιθυμητή άλλη οπτική πυκνότητα $D_2 = 2$, ως

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

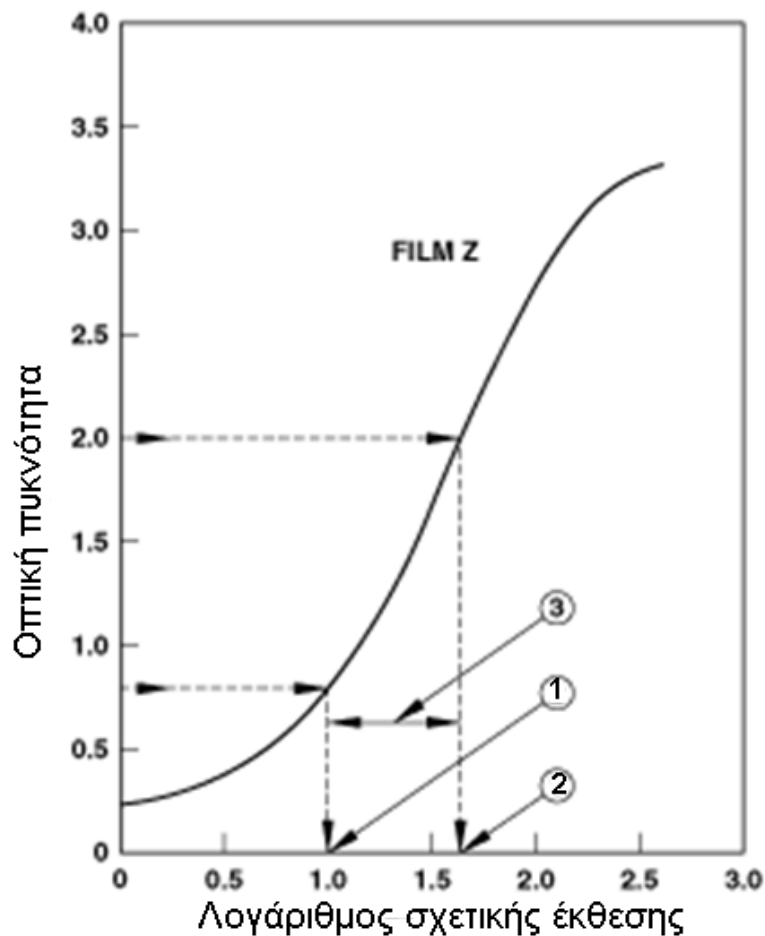
Με αντικατάσταση, για την αριθμητική εφαρμογή που εξετάζεται προκύπτει ότι

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

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. Επιπλέον, είναι επίσης φανερό πόσο προσεγγιστική είναι η σχέση (3.1), η οποία εφαρμόζομενη για $EXP = 12 \text{ mA} \times \text{min}$, $D = 0.8$, $D_{needed} = 2$ δίνει $EXP_{needed} = 30 \text{ mA} \times \text{min}$ αντί για $50 \text{ mA} \times \text{min}$ που είναι το ορθότερο.



ΕΙΚΟΝΑ 3.9: Υπολογισμός έκθεσης για άλλη οπτική πυκνότητα με τη βοήθεια της χαρακτηριστικής του φιλμ με βάση γνωστό διάγραμμα έκθεσης (Quinn, 1980)

3.3.5 Ίδια οπτική πυκνότητα άλλο φιλμ - μέθοδος 1

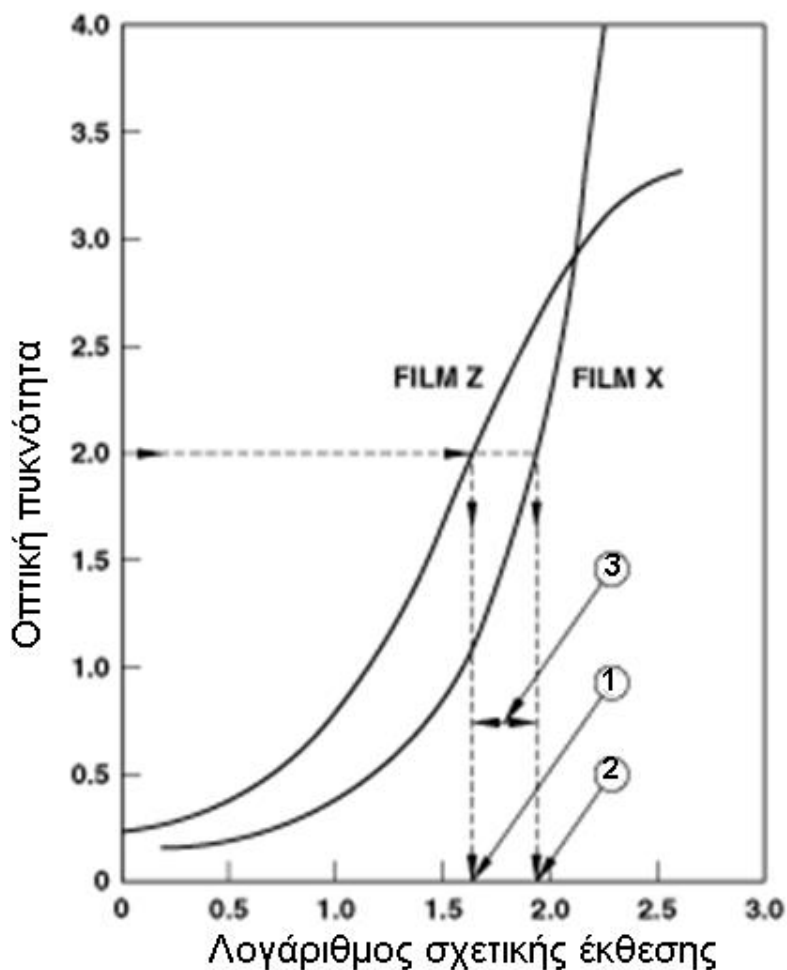
Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζονται κατ' αρχήν ακριβώς τα αναφερόμενα στην παράγραφο 3.3.1. Υπολογίζεται επομένως η έκθεση EXP_1 σε $mA \times min$, έστω $50 mA \times min$, για την οπτική πυκνότητα για την οποία χαράχθηκε το διαθέσιμο διάγραμμα έκθεσης, η οποία έστω ότι είναι $D = 2$ για φιλμ Z. Αν το 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 3.10)
- 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 3.10)

- Στο διάγραμμα της χαρακτηριστικής καμπύλης του φιλμ X, χαράσσεται η ευθεία $D = 2$ (βλ. Εικόνα 3.9)
- 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 3.10)
- Υπολογίζεται η απόλυτη διαφορά των δύο λογαρίθμων $d = |LOG_1 - LOG_2|$, είναι $d = 0.29$ (ευθύγραμμο τμήμα "3" στην Εικόνα 3.10)

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.



ΕΙΚΟΝΑ 3.10: Υπολογισμός έκθεσης για άλλο φιλμ με τη βοήθεια των χαρακτηριστικών των φιλμ με βάση γνωστό διάγραμμα έκθεσης (Quinn, 1980)

3.3.6 Ίδια οπτική πυκνότητα άλλο φιλμ - μέθοδος 2

Η μέθοδος που θα παρουσιασθεί στη συνέχεια βασίζεται σε πινακοποιημένα δεδομένα μετατροπής από φιλμ σε φιλμ που αφορούν μόνο στο ίδιο τυποποιημένο σύστημα φιλμ. Ως "σύστημα φιλμ" εννοούνται τα φιλμ του ίδιου κατασκευαστή που έχουν τα κατάλληλα και πιστοποιημένα χαρακτηριστικά με βάση τα οποία προέκυψαν τα πινακοποιημένα δεδομένα. Αν τα φιλμ που συζητούνται για το πρόβλημα "ίδια οπτική πυκνότητα - άλλο φιλμ" είναι διαφορετικού κατασκευαστή το πρόβλημα δεν θα αντιμετωπισθεί ορθά. Για φιλμ του κατασκευαστή Agfa, τα πινακοποιημένα δεδομένα μετατροπής από φιλμ σε φιλμ, δίνονται στον Πίνακα 3.1.

Τύπος φιλμ	Συντελεστές μετατροπής έκθεσης				
	100 kV	200 kV	300 kV	Ir-192	Co-60
D2	9.0	7.0		8.0	9.0
D3	4.1	4.3		5.0	5.0
D4	3.0	2.7		3.0	3.0
D5	1.7	1.5		1.5	1.5
D7	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
D8	0.6	0.6		0.6	0.6
RCF+F6 (5)	0.174		0.132	0.389	0.562
RCF+F8 (5)	0.03		0.022	0.035	0.040

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1: Πίνακας συντελεστών μετατροπής έκθεσης για φιλμ εταιρείας κατασκευής Agfa (δίνονται και συντελεστές μετατροπής για φωτόνια που προέρχονται από τη διάσπαση των πυρήνων Ir-192 και Co-60)

Ο τρόπος χρήσεως του Πίνακα 3.1, θα επιδειχθεί με τη βοήθεια παραδείγματος. Έστω λοιπόν το ίδιο και μόνο σύστημα φιλμ π.χ. Agfa: Αν για φιλμ τύπου "D5" και έκθεση EXP_1 50 mA.min στα 200 kV επιτυγχάνεται $D_1 = 2.0$. Για ποια έκθεση EXP_2 θα επιτυγχάνεται $D_2 = 2.0$ χρησιμοποιώντας ένα πιο αργό φιλμ όπως το "D4" στα 200 kV;

Για τη λύση εντοπίζεται ο συντελεστής διόρθωσης για φιλμ "D5" από τον Πίνακα 3.1. Προκύπτει ότι αυτός είναι 1.5. Εντοπίζεται ο συντελεστής διόρθωσης για φιλμ "D4" από τον ίδιο πίνακα. Προκύπτει ότι αυτός είναι 2.7. Υπολογίζεται ο 10^d ως $2.7/1.5$ (είναι τεχνικώς γνωστό ότι το φιλμ "D4" είναι πιο αργό από το "D5"). Εφαρμόζεται η σχέση (3.3) και προκύπτει

$$EXP_2 = 10^d EXP_1 = (2.7/1.5) \times 50 \text{ mA} \times \text{min} \Rightarrow EXP_2 = 90 \text{ mA} \times \text{min}$$

Φυσικά αν το φιλμ "D4" ήταν πιο γρήγορο από το "D5", θα έπρεπε να εφαρμοσθεί η σχέση (3.4).

3.3.7 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 3.2, έως και 3.4

	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

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2: Ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας υλικών (ισοδυναμία με αλουμίνιο, 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	-

ΠΙΝΑΚΑΣ 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

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4: Ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας υλικών (ισοδυναμία με χάλυβα, Quinn, 1980, Παπαδόπουλος, 2014)

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. Ο Πίνακας Η έκθεση που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μπορεί να υπολογισθεί με τη βοήθεια του Πίνακα 3.3. 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 στις παραγράφους 3.3.2, 3.3.4, 3.3.5, 3.3.6 και 3.3.7.

3.4 Σχόλια και συμπεράσματα

Όπως είναι γνωστό η ραδιογραφία είναι μια μέθοδος Μη Καταστροφικού Ελέγχου με την οποία μπορεί να διαπιστώνεται η εσωτερική ακεραιότητα προϊόντων και κατασκευών πολλές από τις οποίες συνδέονται άμεσα με την ανθρώπινη ζωή. Για την ορθή διεκπεραίωση του ελέγχου θα πρέπει στην εικόνα που θα παραχθεί μέσω της ραδιογραφίας 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 τα κεραμικά υλικά, για τα οποία δεν διατίθενται ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας. Ως αποτέλεσμα, δεν μπορεί να εκτιμηθεί ορθά η έκθεση για τέτοια υλικά, όπως τα αγγεία και τα θραύσματά τους, παρόλο που αυτό είναι πολλές φορές αναγκαίο να γίνεται στα πλαίσια ερευνών όπως η αρχαιολογική και άλλες. Στο επόμενο Κεφάλαιο θα γίνει η απόπειρα να συμπληρωθεί το σχετικό κενό, καθώς θα περιγραφεί το πείραμα που οδήγησε στην παραγωγή ενός διαγράμματος έκθεσης για κεραμικά υλικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Όπως ήδη αναφέρθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, υπάρχουν και οι περιπτώσεις για τις οποίες τα εργαλεία τα οποία βοηθούν στην εκτίμηση της ορθής έκθεσης με βάση ένα ήδη διαθέσιμο διάγραμμα έκθεσης δεν διευκολύνουν πολύ. Οι κυριότερες από αυτές είναι όσες αφορούν υλικά για τα οποία οι ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας με το χάλυβα ή το αλουμίνιο δεν είναι ακριβώς ή δεν είναι καθόλου γνωστοί. Τότε, δεν μπορεί να εκτιμηθεί ορθά η απαιτούμενη έκθεση και χρειάζεται να γίνονται αρκετές δοκιμαστικές ραδιογραφίες ώστε να βρεθεί η περιοχή ρυθμίσεων, για την οποία η ραδιογραφική εικόνα θα έχει καλή ποιότητα. Βεβαίως μία τέτοια διαδικασία δοκιμών και σφαλμάτων εκτός από χαμηλής ποιότητας είναι και οπωσδήποτε χρονοβόρα σε σχέση με το αν είναι διαθέσιμο ένα κατάλληλο διάγραμμα έκθεσης για τα εξεταζόμενα υλικά και δεν συμφέρει καθόλου ιδιαίτερα για συνθήκες που απαιτούν πολλούς ελέγχους σε πολλά πάχη. Μια χαρακτηριστική τέτοια περίπτωση είναι τα κεραμικά υλικά, για τα οποία πράγματι δεν διατίθενται ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας. Ως αποτέλεσμα, δεν μπορεί να εκτιμηθεί ορθά η απαιτούμενη έκθεση για τέτοια υλικά, όπως τα αγγεία και τα θραύσματά τους, παρόλο που αυτό είναι πολλές φορές αναγκαίο να γίνεται στα πλαίσια ερευνών όπως η αρχαιολογική και άλλες. Στο Κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στην εγκατάσταση Βιομηχανικής Ραδιογραφίας του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ για την παραγωγή ενός διαγράμματος έκθεσης για κεραμικά χρησιμοποιώντας τις πειραματικές μεθόδους που αναλύθηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο 3. Σημειώνεται ότι τέτοιο διάγραμμα δεν υπάρχει στην βιβλιογραφία και από όσο είναι γνωστό είναι το πρώτο που κατασκευάζεται. Στην βιβλιογραφία, για κεραμικά, δίνονται μόνο ορισμένες τιμές από ενδεικτικές ρυθμίσεις έκθεσης.

4.2 Δοκίμιο κλίμακας

Το πρώτο απαραίτητο στοιχείο προκειμένου να πραγματοποιηθούν τα σχετικά πειράματα κατασκευής διαγράμματος έκθεσης για κεραμικά, είναι να διατίθεται ένα δοκίμιο κλίμακας από κεραμική ύλη. Για το σκοπό αυτό χρειάστηκε να κατασκευασθεί

ένα τέτοιο δοκίμιο. Το δοκίμιο συγκροτήθηκε από απλά τετράγωνα πλακάκια λουτρού, ακμής 15 cm και πάχους 5.6 mm, τα οποία συγκολλήθηκαν μεταξύ τους με απλή κόλλα γενικής χρήσης ελαστομερικής πολυουρεθάνης (δηλαδή τύπου UHU), με τρόπο ώστε να σχηματισθεί μία κλίμακα από 10 σκαλοπάτια, σύμφωνα και με όσα φαίνονται στην Εικόνα 4.1



ΕΙΚΟΝΑ 4.1: Κεραμικό δοκίμιο κλίμακας

4.3 Άλλος εξοπλισμός και ρυθμίσεις

Για τις αναγκαίες εκθέσεις χρησιμοποιήθηκε λυχνία ακτίνων -x, εταιρείας κατασκευής General Electric, τύπου ERESO 42MF3.1, η οποία διατίθεται στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ (βλ. και Διπλωματικές Εργασίες Θεοδωρόπουλος 2009, Έξαρχος 2010, Παπαδόπουλος 2014, και τη Μεταπτυχιακή Εργασία Χρυσικόπουλος 2009). Η λυχνία αυτή είναι ισχύος 900 W, μέγιστου ηλεκτρικού δυναμικού 200 kV. Το διάγραμμα έκθεσης για το οποίο πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα θα ισχύει κατ' αρχήν, μόνο για την υπόψη λυχνία. Οι λοιπές ρυθμίσεις για τα πειράματα είχαν ως εξής:

- Απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ 70 cm
- Είδος φιλμ: Agfa D4
- Επιθυμητή οπτική πυκνότητα: $D = 2$

Δεδομένου ότι τα κεραμικά υλικά είναι μικρής γενικά πυκνότητας και χαμηλότερου μαζικού αριθμού από τα μέταλλα, αποφασίσθηκε, μετά από λίγες δοκιμές, ότι το διάγραμμα δεν μπορεί να κατασκευασθεί για ηλεκτρικά δυναμικά μεγαλύτερα από 90 kV. Αν το δυναμικό είναι μεγαλύτερο από τόσο, τα παραγόμενα φωτόνια είναι υψηλής ενέργειας και πολύ διαπεραστικά σε ό,τι αφορά ακόμα και το μέγιστο πάχος του δοκιμίου κλίμακας με αποτέλεσμα η ραδιογραφική εικόνα του δοκιμίου στο φιλμ να προκύπτει συνολικά μαύρη.

Δεδομένου από την άλλη ότι τα κεραμικά υλικά δεν είναι τόσο χαμηλής πυκνότητας όσο τα ελαφρά πλαστικά, αποφασίσθηκε, μετά από λίγες δοκιμές, ότι το διάγραμμα δεν μπορεί να κατασκευασθεί για ηλεκτρικά δυναμικά μικρότερα από 40 kV. Αν το δυναμικό είναι μικρότερο από τόσο, τα παραγόμενα φωτόνια είναι χαμηλής ενέργειας και όχι τόσο διαπεραστικά σε ό,τι αφορά πολλά από τα πάχη του δοκιμίου κλίμακας με αποτέλεσμα η ραδιογραφική εικόνα του δοκιμίου στο φιλμ να προκύπτει πολύ λευκή για τα πολλά από τα τμήματα της κλίμακας.

Επιπλέον μετά από μικρό αριθμό δοκιμών αποφασίσθηκε να χρησιμοποιηθούν οι εξής δύο εκθέσεις: 4 mA×min και 8 mA×min.

Η πειραματική διάταξη αποδίδεται φωτογραφικά στην Εικόνα 4.2. Το δοκίμιο έχει τοποθετηθεί πάνω από το έδαφος, σε ξύλινη επιφάνεια. Μεταξύ της ξύλινης επιφάνειας και του δοκιμίου έχει τοποθετηθεί το ραδιογραφικό φιλμ (δεν φαίνεται σε αυτήν τη φωτογραφική λήψη, βλ. το κόκκινο φύλλο στην Εικόνα 4.1). Κάτω από το φιλμ έχουν τοποθετηθεί δύο τρία λεπτά φύλλα μολύβδου (πάχους το κάθε ένα 0.1 - 0.2 mm, τα άσπρα φύλλα στην Εικόνα 4.2). Τα φύλλα αυτά χρησιμεύουν ώστε να προστατεύουν το φιλμ από τις ακτίνες -x που παράγονται από τη λυχνία, φθάνουν στο έδαφος και οπισθοσκεδάζονται προς τα πάνω, με αποτέλεσμα να μαυρίζουν το φιλμ χωρίς να αντιστοιχούν σε ακτίνες -x που διαπέρασαν το δοκίμιο και μεταφέρουν πληροφορίες από αυτό. Τέτοια οπισθοσκεδαζόμενα φωτόνια είναι δυνατόν να αλλοιώσουν σημαντικά την εικόνα του δοκιμίου. Πάνω από το δοκίμιο και με τρόπο ώστε το εστιακό να απέχει 70 cm από την επιφάνεια, τοποθετείται η λυχνία ακτίνων -x.



ΕΙΚΟΝΑ 4.2: Πειραματική διάταξη παραγωγής διαγράμματος έκθεσης

Η παραγόμενη δέσμη ακτίνων -x (βλ και την Εικόνα 2.1) στρέφεται έτσι ώστε ο άξονας της δέσμης των ακτίνων να είναι κάθετος στην επιφάνεια του φιλμ και να διέρχεται από το γεωμετρικό του κέντρο. Το τελευταίο εξασφαλίζεται με σκόπευτρα laser που διατίθενται πάνω στη λυχνία.

Τα πειράματα έκθεσης πραγματοποιήθηκαν σε ειδικό θωρακισμένο χώρο (βλ. Χρυσικόπουλος 2009), έξω από τον οποίο το προσωπικό και το κοινό είναι απολύτως προστατευμένο από την ακτινοβολία, η οποία εκπέμπεται, πράγμα που πιστοποιείται και ελέγχεται από την Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, που είναι η αρμόδια Ελληνική Αρχή για τέτοιες πιστοποιήσεις και ελέγχους.

4.4 Πείραμα και αποτελέσματα σύμφωνα με την πρώτη μέθοδο

4.4.1 Πειραματικές εκθέσεις

Χρησιμοποιώντας ένταση ρεύματος ηλεκτρονίων 4 mA και χρόνο έκθεσης 1 min (δηλαδή για έκθεση 4 mA×min) λήφθηκαν ραδιογραφίες του δοκιμίου κλίμακας για ηλεκτρικά πεδία 40 έως -90 kV, με βήμα 10 kV. Η διαδικασία επαναλήφθηκε για

ένταση 8 mA και χρόνο έκθεσης 1 min (δηλαδή για έκθεση 8 mA×min). Στη συνέχεια έγινε χειροκίνητη εμφάνιση των ραδιογραφιών (βλ. Έξαρχος 2010). Για την εξέταση της οπτικής πυκνότητας της ραδιογραφικής εικόνας που είχε αποτυπωθεί στα φιλμ χρησιμοποιήθηκε διαφανοσκόπιο (φωτιζόμενη οθόνη ικανής φωτεινής εντάσεως), εταιρείας κατασκευής KOWOLUX τύπου 4S που φαίνεται στην Εικόνα 4.3.



ΕΙΚΟΝΑ 4.3: Διαφανοσκόπιο KOWOLUX 4S

Η φωτιζόμενη οθόνη του διαφανοσκοπίου (λευκή επιφάνεια στην εικόνα) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή φωτός για τη διαπίστωση της οπτικής πυκνότητας στο φιλμ σύμφωνα με την αρχή που δίνεται στην Εικόνα 2.7. Ο μετρητής οπτικής πυκνότητας που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις ήταν εταιρείας κατασκευής Fidgeon Ltd τύπου Digit-X (βλ. Έξαρχος 2010 και Εικόνα 4.4).



ΕΙΚΟΝΑ 4.4: Μετρητής οπτικής πυκνότητας τύπου Digit-X της Fidgeon Ltd

Οι μετρήσεις της οπτικής πυκνότητας έγιναν για κάθε σκαλί του δοκιμίου κλίμακας και συνοψίζονται στους παρακάτω Πίνακα 4.1 και Πίνακα 4.2.

kV	Πάχος (mm)									
	5.6	11.2	16.8	22.4	28.0	33.6	39.2	44.8	50.4	56.0
40	0.95	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-
50	2.17	1.13	0.77	0.54	-	-	-	-	-	-
60	3.56	2.1	1.34	0.94	-	-	-	-	-	-
70	5.35	3.44	2.3	1.57	1.12	0.9	0.75	-	-	-
80	-	4.5	3.22	2.29	1.67	1.36	1.15	0.99	-	-
90	-	-	4.39	3.28	2.48	1.94	1.56	1.13	-	-

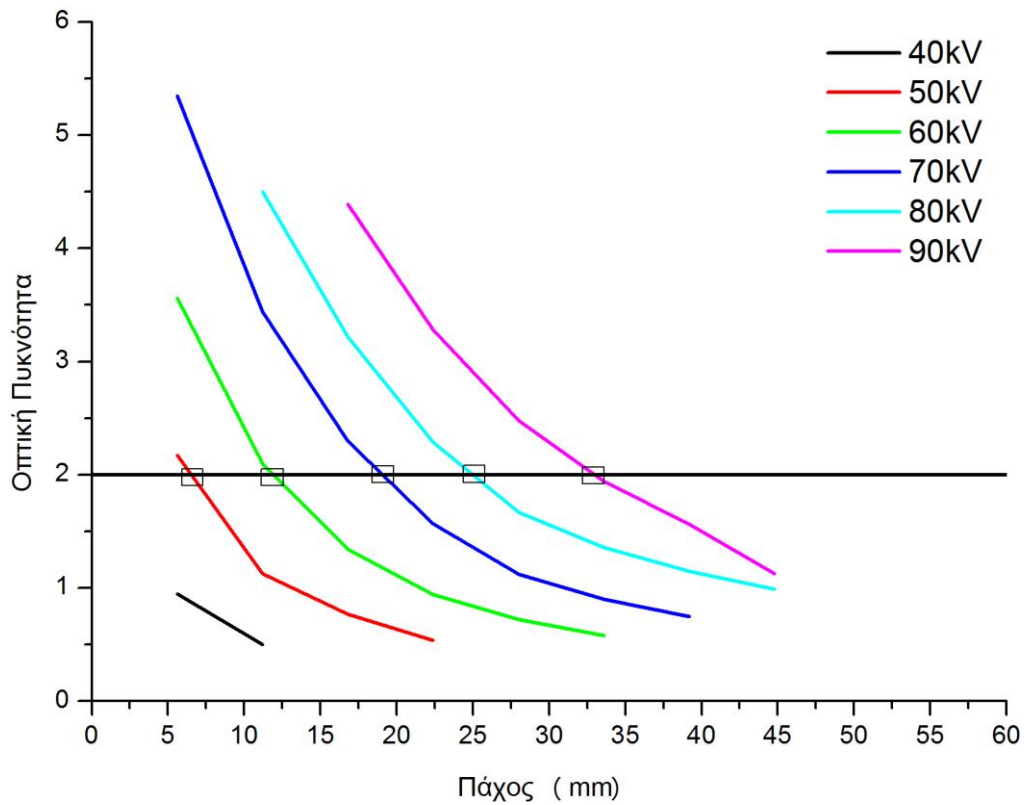
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: Πυκνότητες που μετρήθηκαν για κάθε πάχος του δοκιμίου κλίμακας σε κάθε ηλεκτρικό δυναμικό για έκθεση 4 mA×min

kV	Πάχος (mm)									
	5.6	11.2	16.8	22.4	28.0	33.6	39.2	44.8	50.4	56.0
40	1.6	0.77	0.5	-	-	-	-	-	-	-
50	3.7	1.92	1.13	0.74	0.58	-	-	-	-	-
60	6.25	3.71	2.32	1.5	1.07	0.79	0.66	0.61	-	-
70	-	5.55	3.81	2.61	1.92	1.5	1.15	0.95	0.81	0.73
80	-	-	5.5	3.99	2.99	2.3	1.8	1.46	1.25	1
90	-	-	-	5.6	4.35	3.41	2.78	2.28	1.96	1.7

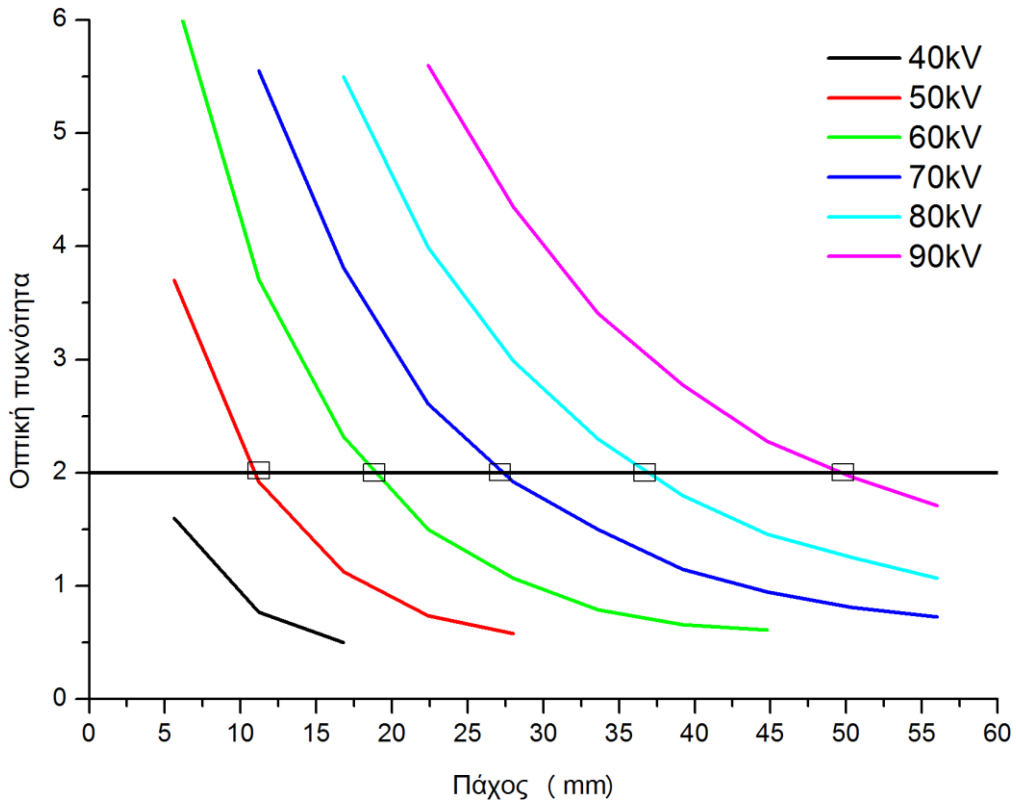
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2: Πυκνότητες που μετρήθηκαν για κάθε πάχος του δοκιμίου κλίμακας σε κάθε ηλεκτρικό δυναμικό για έκθεση 8 mA×min

4.4.2 Προκαταρκτικά βοηθητικά διαγράμματα Οπτικής πυκνότητας - Πάχους

Σύμφωνα με τις οδηγίες από το General Electric (2008), οι μετρηθείσες πυκνότητες σχεδιάστηκαν γραφικά σε σχέση με το πάχος του υλικού για το οποίο επιτεύχθηκαν. Τα αποτελέσματα δίνονται στην Εικόνα 4.5 και στην Εικόνα 4.6.



ΕΙΚΟΝΑ 4.5: Προκαταρκτικό Διάγραμμα Οπτικής Πυκνότητας – Πάχους για 4 mA*min



ΕΙΚΟΝΑ 4.6: Προκαταρκτικό Διάγραμμα Οπτικής Πυκνότητας – Πάχους για 8 mA*min

4.4.3 Προκαταρκτικό βοηθητικό διάγραμμα kV - Πάχους

Στη συνέχεια μεταφέρονται τα δεδομένα της οπτικής πυκνότητας με τιμή $D = 2$ που έχουν ήδη καταγραφεί στα προκαταρκτικά διαγράμματα Οπτικής Πυκνότητας - Πάχους, τα σημεία δηλαδή που παρουσιάζονται εγκλωβισμένα σε τετράγωνα στις Εικόνες 4.5 και 4.6, στο προκαταρκτικό διάγραμμα kV - Πάχους, σύμφωνα και με τις οδηγίες από το General Electric (2008). Το προκαταρκτικό διάγραμμα kV - Πάχους που προκύπτει φαίνεται στην Εικόνα 4.7. Τα σημεία που αντιστοιχούν στην έκθεση 4 mA×min μεταφέρθηκαν στο διάγραμμα ως κύκλοι, ενώ τα σημεία που αντιστοιχούν στην έκθεση 8 mA×min μεταφέρθηκαν στο διάγραμμα ως άστρα. Κατόπιν με τις ευκολίες που παρέχει το λογισμικό Origin Pro 9, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις γραφικές παραστάσεις, αναζητήθηκαν απλές καμπύλες προσαρμογής τόσο για τα σημεία που αφορούν σε έκθεση 4 mA×min όσο και για τα σημεία που αφορούν σε έκθεση 8 mA×min ώστε με την προεκβολή τους να προκύψουν περισσότερες πληροφορίες από το διάγραμμα. Προέκυψε ότι οι καμπύλες μπορούν να έχουν την απλή μορφή

$$y = a + bx + cx^2 \quad (4.1)$$

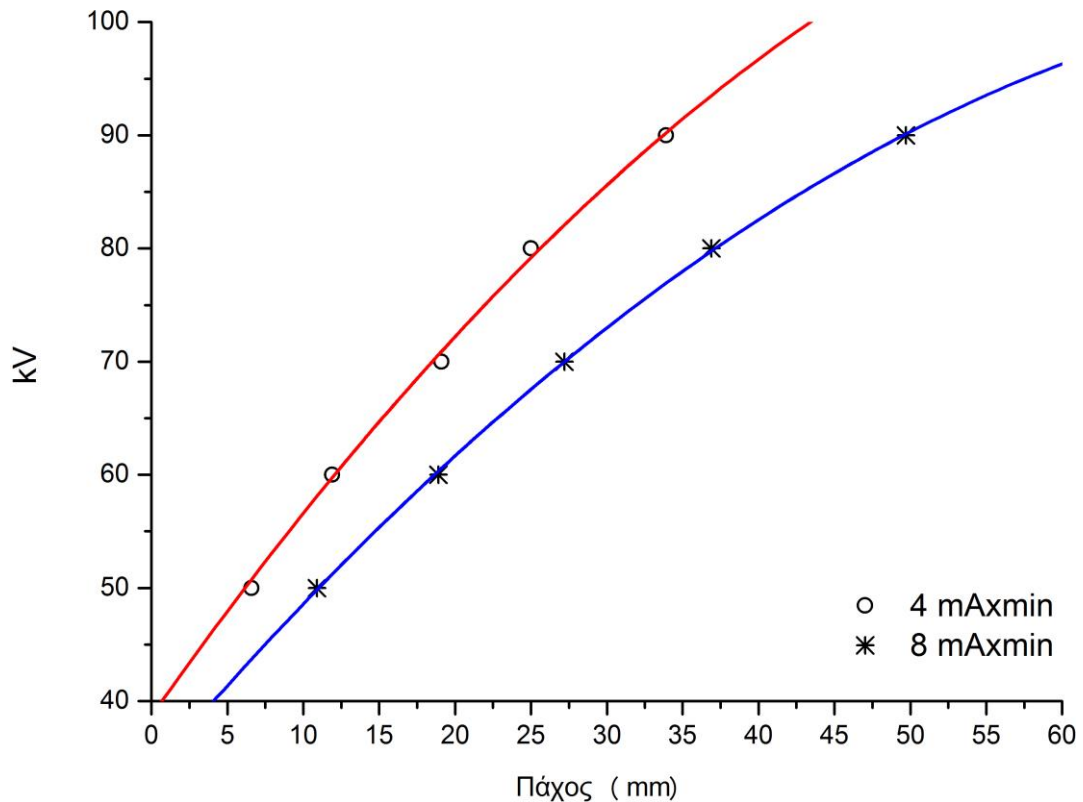
Τα αποτελέσματα της διαδικασίας προσαρμογής δίνονται στον Πίνακα 4.3.

	4 mA×min	8 mA×min
<i>a</i>	39 ± 5	33.7 ± 0.7
<i>b</i>	1.9 ± 0.5	1.58 ± 0.05
<i>c</i>	-0.01 ± 0.01	-0.0089 ± 0.0008
<i>R</i>	0.99	1

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3: Συντελεστές της εξίσωσης προσαρμογής (4.1)

Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 4.3, και για τις δύο προσαρμογές ο συντελεστής συσχέτισης R είναι πάρα πολύ υψηλός (κοντά στη μονάδα), οπότε γίνεται κατανοητό ότι οι προσαρμογές προέκυψαν πολύ ακριβείς. Επιπλέον τα σφάλματα των συντελεστών δείχνουν ότι η καμπύλη προσαρμογής που αφορά στην έκθεση 4 mA×min θα μπορούσε και να είναι ευθεία, δηλαδή να έχει τη μορφή

$$y = a + bx \quad (4.2)$$



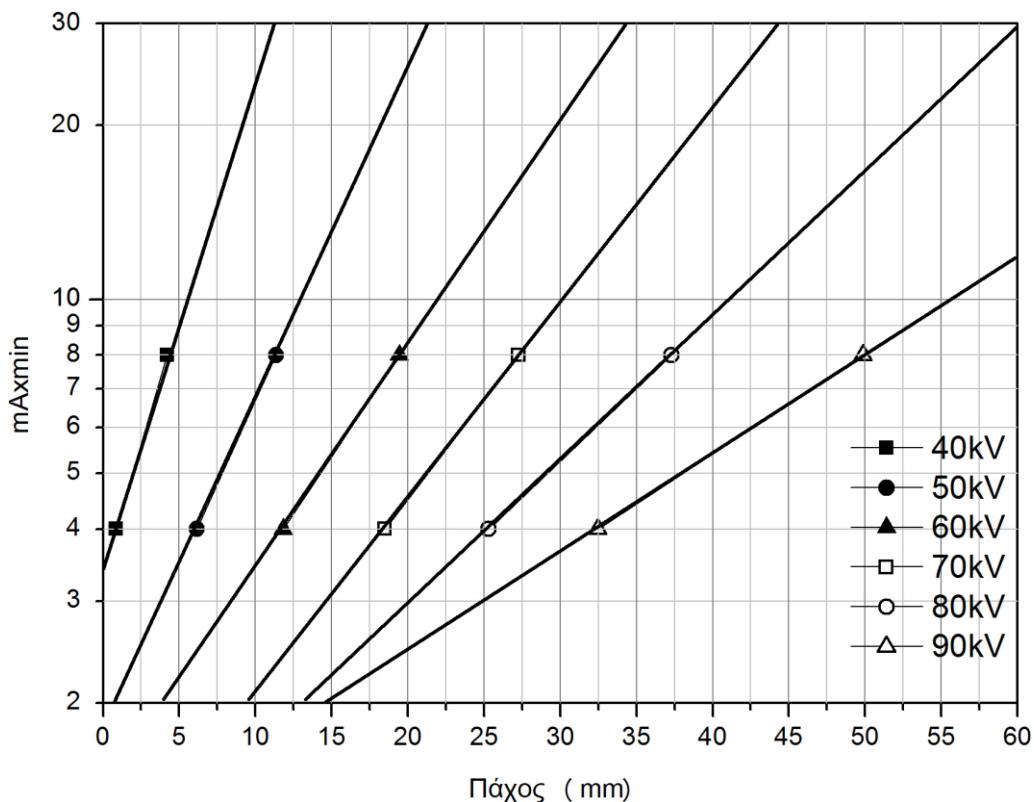
ΕΙΚΟΝΑ 4.7: Προκαταρκτικό διάγραμμα kV – Πάχους

4.4.4 Παραγωγή διαγράμματος έκθεσης

Με χάρακα ή με έναν ψηφιακό αναγνώστη συντεταγμένων από το διάγραμμα της Εικόνας 4.7 προκύπτει ο Πίνακας 4.4. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν τα ζεύγη των σημείων του Πίνακα 4.4 σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα. Ενώνοντας τα ζεύγη των σημείων που αντιστοιχούν στις δύο εκθέσεις για κάθε ηλεκτρικό δυναμικό παράγεται το ζητούμενο διάγραμμα έκθεσης, το οποίο διακρίνεται στην Εικόνα 4.8.

Έκθεση	Ηλεκτρικό δυναμικό (kV)					
	40	50	60	70	80	90
4 min×mA	0.86	6.16	11.82	18.5	25.31	32.46
8 min×mA	4.21	11.36	19.43	27.27	37.3	49.86
Είδος σημείου στην Εικόνα 4.8	■	●	▲	□	○	△

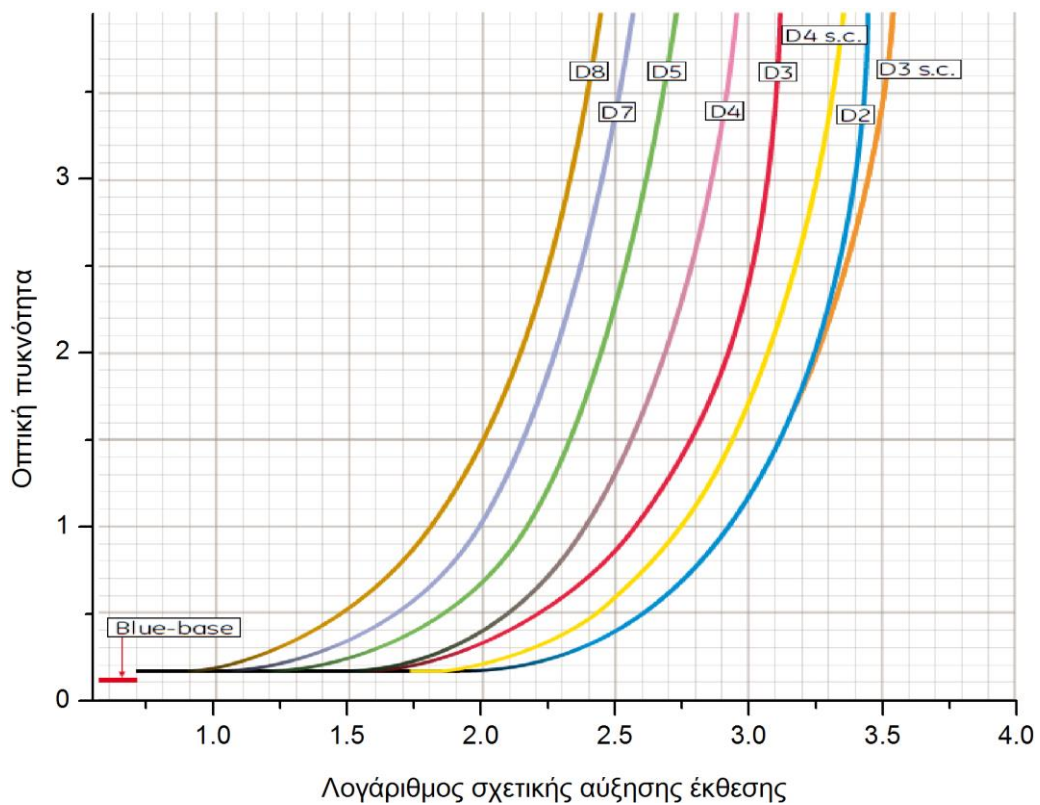
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4: Πάχη κεραμικής ύλης σε mm για τα οποία προκύπτει $D = 2$ για διάφορες εκθέσεις και διάφορα kV



ΕΙΚΟΝΑ 4.8: ΑΜΕΣΗ ΜΕΘΟΔΟΣ: Διάγραμμα έκθεσης κεραμικών για λυχνία ακτίνων -x τύπου ERESKO 42 MF3, εταιρείας κατασκευής General Electric, για απόσταση εστιακού σημείου - φιλμ 70 cm και φιλμ Agfa D4.

4.5 Πείραμα και αποτελέσματα σύμφωνα με τη δεύτερη μέθοδο

Τα δεδομένα οπτικής πυκνότητας είναι ίδια με αυτά της πρώτης μεθόδου καθώς το εύρος των ηλεκτρικών δυναμικών, το δοκίμιο κλίμακας και οι εκθέσεις προέρχονται από το ίδιο πείραμα. Οι οπτικές πυκνότητες D_1 που καταγράφηκαν για κάθε σκαλί του δοκιμίου, για έκθεση EXP_1 4 ή 8 mA x min σε κάθε ηλεκτρικό δυναμικό μετατρέπονται με τη βοήθεια της χαρακτηριστικής καμπύλης του φιλμ Agfa D4 στην επιθυμητή τιμή πυκνότητας $D_2 = 2$ με βάση τις σχέσεις (3.3) και (3.4) ανάλογα και με αυτά που σημειώθηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο. Από την εφαρμογή των σχέσεων προκύπτουν διορθωμένες εκθέσεις EXP_2 . Η χαρακτηριστική καμπύλη του φιλμ Agfa D4, δίνεται στην Εικόνα 4.9



ΕΙΚΟΝΑ 4.9: Χαρακτηριστικές καμπύλες για φιλμ του συστήματος Agfa (General Electric, 2008)

Από την επεξεργασία που έγινε προέκυψαν νέα αποτελέσματα σύμφωνα με τον Πίνακα 4.5 και τον Πίνακα 4.6.

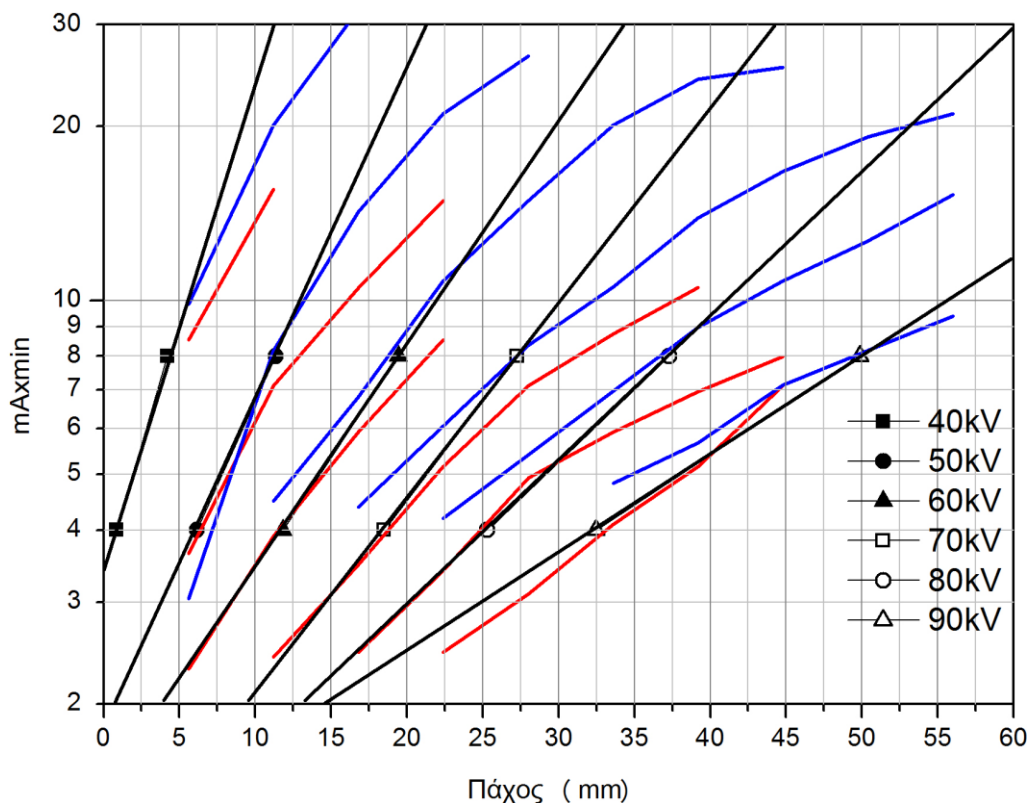
kV	mm	D_1 πειράματος	LOG_1 πειράματος	LOG_2 για $D_2=2$	Έκθετης d	Έκθεση EXP_2
40	5.6	0.95	2.36	2.69	0.33	8.55
	11.2	0.50	2.1		0.59	15.56
50	5.6	2.17	2.73	2.69	-0.04	3.64
	11.2	1.13	2.44		0.25	7.11
	16.8	0.77	2.27		0.42	10.5
	22.4	0.54	2.12		0.57	14.86
60	5.6	3.56	2.93	2.69	-0.24	2.3
	11.2	2.1	2.7		-0.01	3.9
	16.8	1.34	2.52		0.17	5.91
	22.4	0.94	2.36		0.33	8.55
70	5.6	5.35	-	2.69	-	-
	11.2	3.44	2.91		-0.22	2.41
	16.8	2.3	2.75		-0.06	3.48
	22.4	1.57	2.58		0.11	5.15
	28.0	1.12	2.44		0.25	7.11
	33.6	0.9	2.35		0.34	8.75
	39.2	0.75	2.27		0.42	10.52
80	11.2	4.5	-	2.69	-	-
	16.8	3.22	2.9		-0.21	2.46
	22.4	2.29	2.76		-0.07	3.4
	28.0	1.67	2.6		0.09	4.92
	33.6	1.36	2.52		0.17	5.91
	39.2	1.15	2.45		0.24	6.85
	44.8	0.99	2.39		0.3	7.98
90	16.8	4.39	-	2.69	-	-
	22.4	3.28	2.9		-0.21	2.46
	28.0	2.48	2.8		-0.11	3.1
	33.6	1.94	2.68		0.01	4.09
	39.2	1.56	2.58		0.11	5.15
	44.8	1.13	2.44		0.25	7.11

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5: Πίνακας μετατροπής των πειραματικών πυκνοτήτων στην επιθυμητή πυκνότητα και η αναγκαία έκθεση που απαιτείται (αρχική έκθεση 4 mA×min)

kV	mm	D_1 πειράματος	LOG_1 πειράματος	LOG_2 για $D_2=2$	Εκθέτης d	Έκθεση EXP_2
40	5.6	1.6	2.6	2.69	0.09	9.84
	11.2	0.77	2.29		0.4	20.09
	16.8	0.5	2.09		0.6	31.84
50	5.6	3.7	3.11	2.69	-0.42	3.04
	11.2	1.92	2.68		0.01	8.18
	16.8	1.13	2.44		0.25	14.22
	22.4	0.74	2.27		0.42	21.04
	28.0	0.58	2.17		0.52	26.49
60	5.6	6.25	-	2.69	-	-
	11.2	3.71	2.94		-0.25	4.49
	16.8	2.32	2.76		-0.07	6.8
	22.4	1.5	2.56		0.13	10.79
	28.0	1.07	2.42		0.27	14.89
	33.6	0.79	2.29		0.4	20.09
	39.2	0.66	2.21		0.48	24.15
	44.8	0.61	2.19		0.5	25.29
70	11.2	5.55	-	2.69	-	-
	16.8	3.81	2.95		-0.26	4.39
	22.4	2.61	2.81		-0.12	6.06
	28.0	1.92	2.67		0.02	8.37
	33.6	1.5	2.57		0.12	10.54
	39.2	1.15	2.45		0.24	13.90
	44.8	0.95	2.37		0.32	16.71
	50.4	0.81	2.31		0.38	19.19
	56.0	0.73	2.27		0.42	21.04
80	16.8	5.5	-	2.69	-	-
	22.4	3.99	2.97		-0.28	4.19
	28.0	2.99	2.86		-0.17	5.4
	33.6	2.3	2.75		-0.06	6.96
	39.2	1.8	2.64		0.05	8.97
	44.8	1.46	2.56		0.13	10.79
	50.4	1.25	2.49		0.2	12.67
	56.0	1	2.41		0.28	15.24
90	22.4	5.6	-	2.69	-	-
	28.0	4.35	-		-	-
	33.6	3.41	2.91		-0.22	4.82
	39.2	2.78	2.84		-0.15	5.66
	44.8	2.28	2.74		-0.05	7.13
	50.4	1.96	2.68		0.01	8.18
	56.0	1.7	2.62		0.07	9.39

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.6: Πίνακας μετατροπής των πειραματικών πυκνοτήτων στην επιθυμητή πυκνότητα και η αναγκαία έκθεση που απαιτείται (αρχική έκθεση 8 mA×min)

Στη συνέχεια όλα τα τελικά δεδομένα (πάχη, mA×min, kV) τοποθετήθηκαν ως σημεία στο διάγραμμα έκθεσης που προέκυψε από την άμεση μέθοδο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.10.



ΕΙΚΟΝΑ 4.10: ΕΜΜΕΣΗ ΜΕΘΟΔΟΣ: Κόκκινες γραμμές από το πείραμα έκθεσης στα 4 mA×min, Μπλε γραμμές από το πείραμα έκθεσης στα 8 mA×min, Μαύρες γραμμές από την ΑΜΕΣΗ ΜΕΘΟΔΟ

Είναι φανερό από την Εικόνα 4.10 ότι εφαρμόζοντας την έμμεση μέθοδο δεν επιτεύχθηκε να ληφθεί ένα καλό διάγραμμα έκθεσης (δηλαδή ένα διάγραμμα ίδιο ή πολύ κοντινό σε αυτό της άμεσης μεθόδου) διότι:

(α) Οι κόκκινες (έκθεση 4 mA×min) και οι μπλε γραμμές (έκθεση 8 mA×min) δεν ταυτίζονται μεταξύ τους, όπως θα έπρεπε.

(β) Αν η άμεση μέθοδος ήταν ισοδύναμη με την έμμεση, όπως θα έπρεπε, τότε όλες οι γραμμές του διαγράμματος θα έπρεπε να ταυτίζονται ή να είναι πολύ κοντά, πράγμα που δεν συμβαίνει.

και

(γ) Η συμφωνία μαύρων, κόκκινων και μπλε γραμμών είναι σχετικώς καλύτερη για χαμηλές εκθέσεις στην περιοχή 4 έως 10 mA×min.

Παρατηρείται επιπλέον ότι μόνο για το ηλεκτρικό δυναμικό των 90 kV υπάρχει καλύτερη ταύτιση. Η τελευταία αυτή παρατήρηση σε συνδυασμό με τα (α) και (β) οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι αποκλίσεις οφείλονται στην χαρακτηριστική του φιλμ που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς. Ο λόγος είναι ότι η χαρακτηριστική είναι κατασκευασμένη για ηλεκτρικά δυναμικά στην περιοχή από 100 kV έως 200 kV, για αυτό εξάλλου υπάρχει συμφωνία στο κοντινό δυναμικό των 90 kV.

Ειδικά πάντως μπορεί να ειπωθεί ότι η έμμεση μέθοδος δεν έχει αποτύχει εντελώς, διότι στις εκθέσεις μεταξύ 4 και 10 mA×min το αποτέλεσμα δεν διαφέρει από την Εικόνα 4.10. όλες οι παρατηρήσεις που γίνονται για την έμμεση μέθοδο βασίζονται στο ότι η πρώτη μέθοδος υποτίθεται ορθή.

4.6 Νέα χαρακτηριστική καμπύλη για φιλμ D4

Για την διόρθωση της έμμεσης μεθόδου ώστε να ισχύει και για τα δυναμικά 40/50/60/70 και 80 kV έγινε προσπάθεια χάραξης νέας χαρακτηριστικής καμπύλης για το φιλμ Agfa D4 που να ισχύει για ηλεκτρικά δυναμικά μικρότερα των 100 kV.

Αυτό επιτεύχθηκε με την αντιστροφή της έμμεσης μεθόδου. Για το σκοπό αυτό, τα βήματα περιγράφονται με τη βοήθεια της Εικόνας 4.11 ως εξής

(1) Έστω ότι μελετώνται τα λανθασμένα σημεία A (60 kV) και B (70 kV). Είναι φανερό από την Εικόνα 4.10 ότι δεν είναι όλα τα σημεία λανθασμένα.

(2) Χαράσσεται η κατακόρυφος που ενώνει τα σημεία αυτά με τον οριζόντιο άξονα του πάχους και τέμνει την μαύρη γραμμή που του αντιστοιχεί.

(3) Από το σημείο τομής χαράσσεται οριζόντια που τέμνει τον άξονα των εκθέσεων.

(4) Σημειώνεται η τιμή της έκθεσης EXP'_2

(5) Εφαρμόζονται οι σχέσεις (3.3) και (3.4) για τον υπολογισμό του νέου d' ως εξής

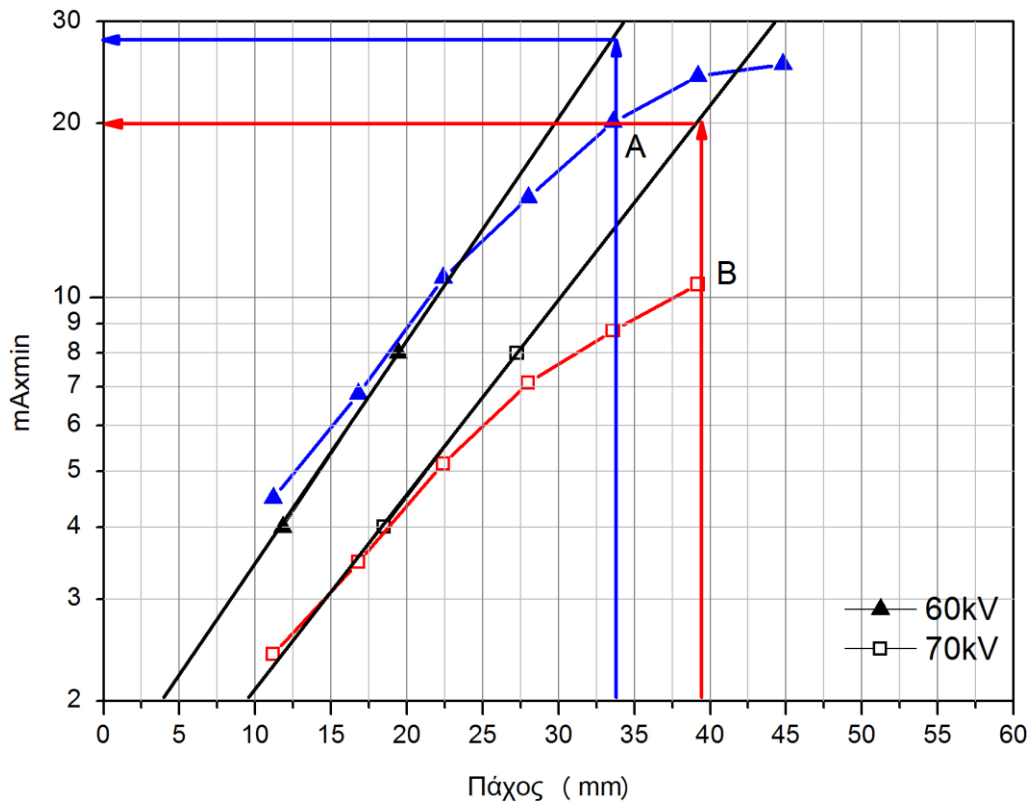
$$EXP'_2 = EXP_1 \times 10^{d'}$$

(6) Λύνεται η εξίσωση $|\text{LOG}'_1 - \text{LOG}'_2| = d'$, ως προς LOG'_1 , με $\text{LOG}'_2 = \log_{10}(EXP'_2)$

και

(7) Τα ζεύγη (D_1, LOG'_1) είναι τα σημεία του διαγράμματος της νέας χαρακτηριστικής καμπύλης του φιλμ D4

Εννοείται ότι η EXP_1 έχει μόνο τις τιμές 4 ή 8 mA×min. Οι τιμές του D_1 είναι αυτές που δίνονται στους Πίνακες 4.1, 4.2, 4.5 και 4.6.



ΕΙΚΟΝΑ 4.11: Χρήση των πειραματικών αποτελεσμάτων της Εικόνας 4.10 για τη διόρθωση της χαρακτηριστικής καμπύλης του φιλμ Agfa D4

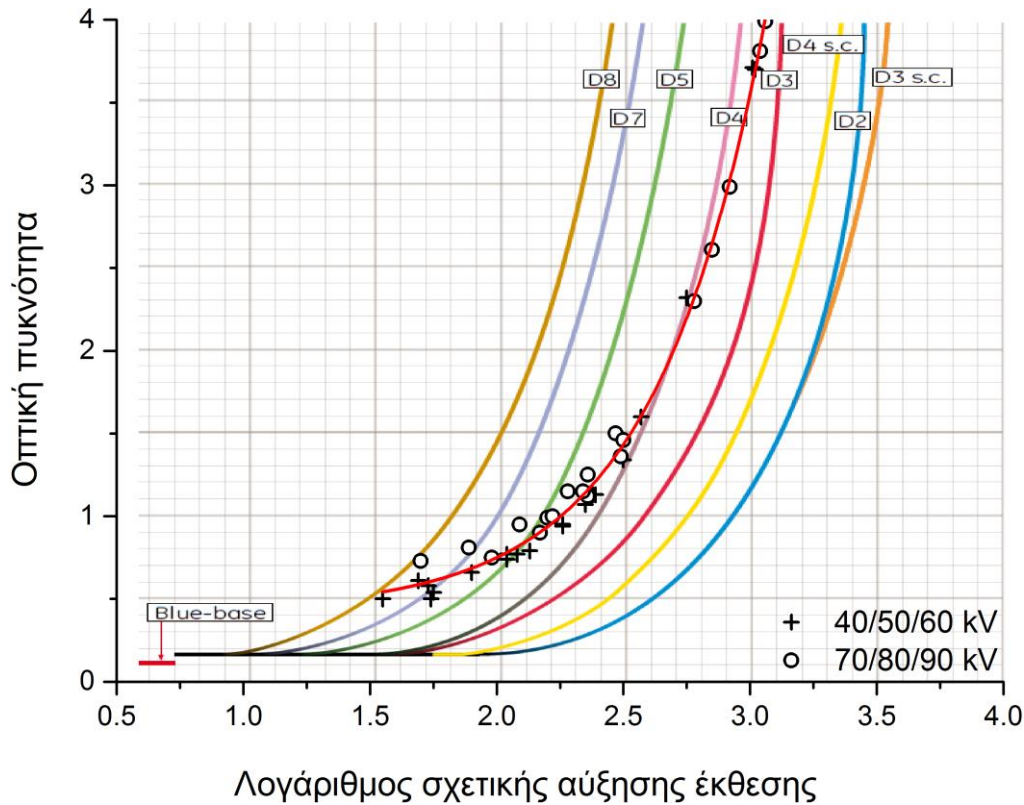
Τα αποτελέσματα των προηγούμενων βημάτων βρίσκονται συγκεντρωμένα στους Πίνακες 4.7 και 4.8. Τα ζεύγη (D_1, LOG'_1) δίνονται σε γκρι φόντο. Όταν τα ζεύγη (D_1, LOG'_1) τοποθετηθούν σε διάγραμμα προκύπτει αυτό που φαίνεται στην Εικόνα 4.12. Στην εικόνα αυτή τα ζεύγη χωρίστηκαν σε εκείνα που αντιστοιχούν στα 40/50/60 kV (σταυροί) και σε άλλα που αντιστοιχούν στα 70/80/90 kV (κύκλοι). Για διευκόλυνση των παρατηρήσεων τοποθετήθηκε πίσω από το διάγραμμα της Εικόνας 4.12 και αυτό της Εικόνας 4.9, στο οποίο δίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη του φιλμ D4 του συστήματος Agfa. Προκύπτει ότι η χαρακτηριστική καμπύλη για τα 40/50/60/70 kV (σταυροί) είναι σχεδόν ίδια με εκείνη για τα 70/80/90 kV (κύκλοι) για τιμές οπτικής πυκνότητας $D > 2$. Επιπλέον σε αυτή την περίπτωση η καμπύλη δεν φαίνεται να διαφέρει σημαντικά από τη χαρακτηριστική καμπύλη του κατασκευαστή.

kV	mm	D_1 πειράματος	LOG_1 πειράματος	LOG_2 για $D_2=2$	Εκθέτης d	Έκθεση EXP_2	Έκθεση EXP'_2	10^d πειράματος	d'	$ d - d' $	LOG'_1
40	5.6	0.95	2.36	2.69	0.33	8.55	10.96	2.74	0.43	0.1	2.26
	11.2	0.5	2.1	2.69	0.59	15.56	35.64	8.91	0.95	0.36	1.74
50	5.6	2.17	2.73	2.69	-0.04	3.64	-	-	-	-	-
	11.2	1.13	2.44	2.69	0.25	7.11	8	2	0.3	0.05	2.39
	16.8	0.77	2.27	2.69	0.42	10.5	16.6	4.15	0.61	0.19	2.08
	22.4	0.54	2.12	2.69	0.57	14.86	35.5	8.87	0.94	0.37	1.75
60	5.6	3.56	2.93	2.69	-0.24	2.3	-	-	-	-	-
	11.2	2.1	2.7	2.69	-0.01	3.9	-	-	-	-	-
	16.8	1.34	2.52	2.69	0.17	5.91	6.32	1.58	0.19	0.02	2.5
	22.4	0.94	2.36	2.69	0.33	8.55	10.54	2.63	0.41	0.08	2.26
70	11.2	3.44	2.91	2.69	-0.22	2.41	-	-	-	-	-
	16.8	2.3	2.75	2.69	-0.06	3.48	-	-	-	-	-
	22.4	1.57	2.58	2.69	0.11	5.15	-	-	-	-	-
	28	1.12	2.44	2.69	0.25	7.11	8.6	2.15	0.33	0.08	2.36
	33.6	0.9	2.35	2.69	0.34	8.75	13.39	3.34	0.52	0.18	2.17
	39.2	0.75	2.27	2.69	0.42	10.52	20.73	5.18	0.71	0.29	1.98
80	16.8	3.22	2.9	2.69	-0.21	2.46	-	-	-	-	-
	22.4	2.29	2.76	2.69	-0.07	3.4	-	-	-	-	-
	28	1.67	2.6	2.69	0.09	.92	-	-	-	-	-
	33.6	1.36	2.52	2.69	0.17	5.91	6.46	1.61	0.2	0.03	2.49
	39.2	1.15	2.45	2.69	0.24	6.95	9	2.25	0.35	0.11	2.34
	44.8	0.99	2.39	2.69	0.3	7.98	12.37	3.1	0.49	0.19	2.2

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.7: Πίνακας διόρθωσης του LOG_1 σε LOG'_1 σύμφωνα με τις αποκλίσεις που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της άμεσης από την έμμεση μέθοδο για έκθεση 4 mA×min

kV	mm	D_1 πειράματος	LOG_1 πειράματος	LOG_2 για $D_2=2$	Εκθέτης d	Έκθεση EXP_2	Έκθεση EXP'_2	10^d πειράματος	d'	$ d - d' $	LOG'_1
40	5.6	1.6	2.6	2.69	0.09	9.84	10.6	1.32	0.12	0.03	2.57
	11.2	0.77	2.29	2.69	0.4	20.09	35.83	4.47	0.65	0.25	2.04
	16.8	0.5	2.09	2.69	0.6	31.84	110.55	13.81	1.14	0.54	1.55
50	5.6	3.7	3.11	2.69	-0.42	3.04	3.75	0.46	-0.33	0.09	3.02
	11.2	1.92	2.68	2.69	0.01	8.18	-	-	-	-	-
	16.8	1.13	2.44	2.69	0.25	14.22	16.6	2.07	0.31	0.06	2.38
	22.4	0.74	2.27	2.69	0.42	21.04	35.64	4.45	0.65	0.23	2.04
	28	0.58	2.17	2.69	0.52	26.49	74.25	9.28	0.96	0.44	1.73
60	11.2	3.71	2.94	2.69	-0.25	4.49	3.81	0.47	-0.32	0.07	3.01
	16.8	2.32	2.76	2.69	-0.07	6.8	6.91	0.86	-0.06	0.01	2.75
	22.4	1.5	2.56	2.69	0.13	10.79	-	-	-	-	-
	28	1.07	2.42	2.69	0.27	14.89	17.66	2.2	0.34	0.07	2.35
	33.6	0.79	2.29	2.69	0.4	20.09	29.24	3.65	0.56	0.16	2.13
	39.2	0.66	2.21	2.69	0.48	24.15	49.21	6.15	0.79	0.31	1.9
	44.8	0.61	2.19	2.69	0.5	25.29	81.47	10.18	1	0.5	1.69
70	16.8	3.81	2.95	2.69	-0.26	4.39	3.53	0.44	-0.35	0.09	3.04
	22.4	2.61	2.81	2.69	-0.12	6.06	5.44	0.68	-0.16	0.04	2.85
	28	1.92	2.67	2.69	0.02	8.37	-	-	-	-	-
	33.6	1.5	2.57	2.69	0.12	10.54	13.37	1.67	0.22	0.1	2.47
	39.2	1.15	2.45	2.69	0.24	13.9	20.56	2.57	0.41	0.17	2.28
	44.8	0.95	2.37	2.69	0.32	16.71	32.13	4.01	0.6	0.28	2.09
	50.4	0.81	2.31	2.69	0.38	19.19	50.62	6.33	0.8	0.42	1.89
	56	0.73	2.27	2.69	0.42	21.04	78.35	9.79	0.99	0.57	1.7
80	22.4	3.99	2.97	2.69	-0.28	4.19	3.38	0.42	-0.67	0.09	3.06
	28	2.99	2.86	2.69	-0.17	5.4	4.67	0.58	-0.23	0.06	2.92
	33.6	2.3	2.75	2.69	-0.06	6.96	6.41	0.8	-0.09	0.03	2.78
	39.2	1.8	2.64	2.69	0.05	8.97	-	-	-	-	-
	44.8	1.46	2.56	2.69	0.13	10.79	12.47	1.55	0.19	0.06	2.5
	50.4	1.25	2.49	2.69	0.2	12.67	17.08	2.13	0.33	0.13	2.36
	56	1	2.41	2.69	0.28	15.24	23.8	2.97	0.47	0.19	2.22

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.8: Πίνακας διόρθωσης του LOG_1 σε LOG'_1 σύμφωνα με τις αποκλίσεις που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της άμεσης από την έμμεση μέθοδο για έκθεση 8 mA·min



ΕΙΚΟΝΑ 4.12: Νέα χαρακτηριστική καμπύλη για το φιλμ Agfa D4

Παρατηρείται όμως ότι, όταν $D < 2$ η καμπύλη εμφανίζει αποκλίσεις από αυτήν του κατασκευαστή, οι οποίες μπορούν να αποδοθούν στο γεγονός ότι τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε πολύ χαμηλά ηλεκτρικά δυναμικά, δεδομένου του μικρού μαζικού αριθμού των κεραμικών. Μάλιστα όσο μικρότερη γίνεται η πυκνότητα τόσο μεγαλύτερη γίνεται και η απόκλιση. Επιπλέον η απόκλιση δηλώνει ότι σε χαμηλά δυναμικά και χαμηλές οπτικές πυκνότητες το φιλμ γίνεται γρηγορότερο και παρουσιάζει μεγαλύτερο και διαφορετικό "αστράγαλο" (βλ. Κεφάλαιο 3, Εικόνα 3.7) Με βάση τα αριθμητικά δεδομένα (σταυροί και κύκλοι, βλ. Εικόνα 4.12), τα οποία χρησίμευσαν για τη χάραξη του διαγράμματος αυτού, μπορεί τώρα να χαραχθεί με προσαρμογή νέα χαρακτηριστική καμπύλη για το φιλμ Agfa D4 κατάλληλη για τα χαμηλά ηλεκτρικά δυναμικά που απαιτούνται για την περίπτωση που εξετάζεται. Είναι φανερό ότι μία τέτοια καμπύλη μπορεί να έχει την εκθετική μορφή

$$D_1 = a \times \exp(b \text{LOG}'_1) + c \quad (4.2)$$

Με τη βοήθεια του λογισμικού Origin Pro 9 προέκυψε ότι:

$$a = 0.0035 \pm 0.0009, b = 2.27 \pm 0.08 \text{ και } c = 0.42 \pm 0.04$$

με συντελεστή συσχέτισης $R = 0.997$

Η νέα χαρακτηριστική καμπύλη διακρίνεται με παχιά κόκκινη γραμμή στο διάγραμμα της Εικόνας 4.12. Η τιμή της $c = 0.42$ δηλώνει και τον μεγαλύτερο "αστράγαλο". Διαθέτοντας πλέον τη νέα και καταλληλότερη χαρακτηριστική καμπύλη για το φιλμ D4 επαναλήφθηκε η διεργασία της παραγράφου 4.3 και δημιουργήθηκαν οι Πίνακες 4.9 και 4.10, οι οποίοι στην πραγματικότητα είναι διορθωμένοι Πίνακες 4.5 και 4.6 αντίστοιχα. Η διεργασία δεν πραγματοποιήθηκε για τα 90 kV διότι το διάγραμμα έκθεσης που προέκυψε με την έμμεση μέθοδο, συμφωνεί σε αυτό το δυναμικό, με εκείνο που προέκυψε από την άμεση μέθοδο.

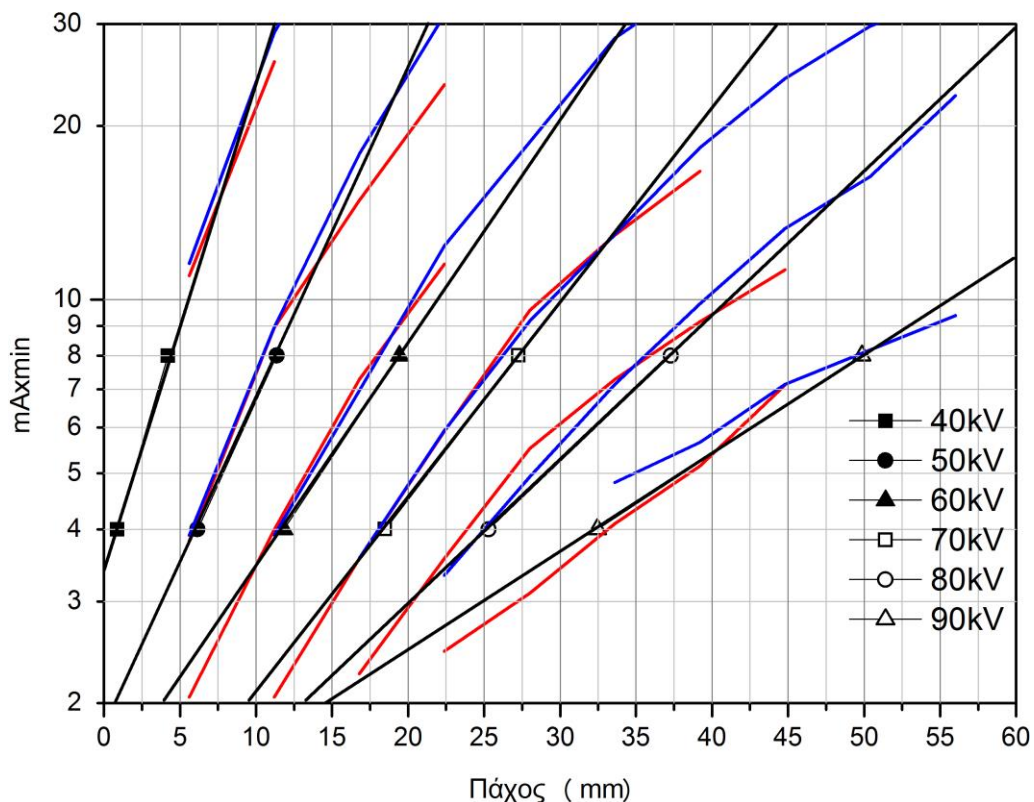
kV	mm	D_1 πειράματος	LOG_1 πειράματος	LOG_2 για $D_2=2$	Έκθετης d	Έκθεση EXP_2
40	5.6	0.95	2.25	2.69	0.44	11.01
	11.2	0.5	1.88	2.69	0.81	25.82
50	5.6	2.17	2.71	2.69	-0.02	3.82
	11.2	1.13	2.34	2.69	0.35	8.95
	16.8	0.77	2.12	2.69	0.57	14.86
	22.4	0.54	1.92	2.69	0.77	23.55
60	5.6	3.56	2.98	2.69	-0.29	2.05
	11.2	2.1	2.69	2.69	0	4
	16.8	1.34	2.43	2.69	0.26	7.28
	22.4	0.94	2.23	2.69	0.46	11.53
70	11.2	3.44	2.98	2.69	-0.29	2.05
	16.8	2.3	2.74	2.69	-0.05	3.56
	22.4	1.57	2.52	2.69	0.17	5.91
	28	1.12	2.31	2.69	0.38	9.59
	33.6	0.9	2.18	2.69	0.51	12.94
	39.2	0.75	2.07	2.69	0.62	16.67
80	16.8	3.22	2.94	2.69	-0.25	2.25
	22.4	2.29	2.74	2.69	-0.05	3.56
	28	1.67	2.55	2.69	0.14	5.52
	33.6	1.36	2.43	2.69	0.26	7.28
	39.2	1.15	2.33	2.69	0.36	9.16
	44.8	0.99	2.24	2.69	0.45	11.27

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.9: Πίνακας μετατροπής των πειραματικών πυκνοτήτων στην επιθυμητή πυκνότητα και η αναγκαία έκθεση που απαιτείται, με χρήση της χαρακτηριστικής καμπύλης της Εικόνας 4.12 (αρχική έκθεση 4 mA×min)

kV	mm	D_1 πειράματος	LOG_1 πειράματος	LOG_2 για $D_2=2$	Έκθετης d	Έκθεση EXP_2
40	5.6	1.6	2.53	2.69	0.16	11.56
	11.2	0.77	2.13	2.69	0.56	29.04
	16.8	0.5	1.88	2.69	0.81	51.65
50	5.6	3.7	3	2.69	-0.31	3.91
	11.2	1.92	2.64	2.69	0.05	8.97
	16.8	1.13	2.34	2.69	0.35	17.9
	22.4	0.74	2.1	2.69	0.59	31.12
	28	0.58	1.97	2.69	0.72	41.98
60	11.2	3.71	3	2.69	-0.31	3.91
	16.8	2.32	2.75	2.69	-0.06	6.96
	22.4	1.5	2.5	2.69	0.19	12.39
	28	1.07	2.32	2.69	0.37	18.75
	33.6	0.79	2.14	2.69	0.55	28.38
	39.2	0.66	2.04	2.69	0.65	35.73
	44.8	0.61	1.99	2.69	0.7	40.09
70	16.8	3.81	3.04	2.69	-0.35	3.57
	22.4	2.61	2.82	2.69	-0.13	5.93
	28	1.92	2.63	2.69	0.06	9.18
	33.6	1.5	2.48	2.69	0.21	12.97
	39.2	1.15	2.33	2.69	0.36	18.32
	44.8	0.95	2.21	2.69	0.48	24.15
	50.4	0.81	2.12	2.69	0.57	29.72
	56	0.73	2.06	2.69	0.63	34.12
80	22.4	3.99	3.07	2.69	-0.38	3.33
	28	2.99	2.9	2.69	-0.21	4.93
	33.6	2.3	2.74	2.69	-0.05	7.13
	39.2	1.8	2.6	2.69	0.09	9.84
	44.8	1.46	2.47	2.69	0.22	13.27
	50.4	1.25	2.38	2.69	0.31	16.33
	56	1	2.24	2.69	0.45	22.54

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.10: Πίνακας μετατροπής των πειραματικών πυκνοτήτων στην επιθυμητή πυκνότητα και η αναγκαία έκθεση που απαιτείται, με χρήση της χαρακτηριστικής καμπύλης της Εικόνας 4.12 (αρχική έκθεση 8 mA×min)

Στη συνέχεια όλα τα τελικά δεδομένα (πάχη, mA×min, kV) τοποθετήθηκαν εκ νέου ως σημεία στο διάγραμμα έκθεσης που προέκυψε από την άμεση μέθοδο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.13.



ΕΙΚΟΝΑ 4.13: ΕΜΜΕΣΗ ΜΕΘΟΔΟΣ: Κόκκινες γραμμές από το πείραμα έκθεσης στα 4 mA x min, Μπλε γραμμές από το πείραμα έκθεσης στα 8 mA x min, Μαύρες γραμμές από την ΑΜΕΣΗ ΜΕΘΟΔΟ. Τα αποτελέσματα βασίζονται σε νέα χαρακτηριστική καμπύλη για το φιλμ D4.

Είναι φανερό ότι το νέο διάγραμμα έκθεσης της έμμεσης μεθόδου, το οποίο προέκυψε με τη βοήθεια καταλληλότερης χαρακτηριστικής καμπύλης για το φιλμ D4 ταυτίζεται σχεδόν με εκείνο που κατασκευάστηκε με την άμεση μέθοδο.

4.7 Συμπεράσματα

Αποδείχθηκε πιο πάνω ότι είναι δυνατό με τη βοήθεια μιας σχετικά εύκολης πειραματικής διαδικασίας να παραχθεί διάγραμμα έκθεσης για κεραμικά. Για το σκοπό αυτό δοκιμάστηκαν δύο μέθοδοι, η ονομαζόμενη άμεση και η ονομαζόμενη έμμεση, με τα ίδια κατά προσέγγιση αποτελέσματα. Επισημαίνεται ότι, από όσα είναι γνωστά, διάγραμμα έκθεσης για κεραμικά και φιλμ κατασκευάζεται και δημοσιεύεται για πρώτη φορά. Επιπλέον τονίζεται ότι για την διερεύνηση της έμμεσης μεθόδου χρειάστηκε να κατασκευασθεί νέα χαρακτηριστική καμπύλη για φιλμ Agfa D4, κατάλληλη για χαμηλότερα δυναμικά στην περιοχή 40 έως περίπου 80 kV. Τέτοια χαρακτηριστική καμπύλη δημοσιεύεται ομοίως για πρώτη φορά.

Στο επόμενο και τελευταίο Κεφάλαιο 5 αναλύεται ο ρόλος που μπορεί να παίξει η ραδιογραφία στην ανάλυση αρχαίων κεραμικών και δίνονται παραδείγματα σχετικών ραδιογραφιών θραυσμάτων αγγείων, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν αξιοποιώντας το διάγραμμα έκθεσης που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΡΑΜΙΚΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Στο σημείο αυτό μπορεί να ειπωθεί χωρίς αμφιβολία ότι η ραδιογραφία στην αρχαιολογία και την αρχαιομετρία έχει καταστεί πλέον ανεκτίμητο εργαλείο τόσο για συντηρητές όσο και για ερευνητές και εφαρμόζεται συστηματικά σε μια μεγάλη ποικιλία υλικών, όπως τα οστά των ανθρώπων και των ζώων, τα μέταλλα, τα κεραμικά, το χαρτί, τα έργα ζωγραφικής ακόμα και το έδαφος. Στη χώρα μας η χρήση της μεθόδου είναι ακόμα περιορισμένη αλλά κερδίζει συνεχώς τη θετική γνώμη των επιστημόνων. Από την πρώτη εφαρμογή της ραδιογραφίας στην κεραμική, η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε κυρίως για δύο σκοπούς: (1) να χαρακτηρίσει μακροσκοπικά / ποιοτικά τα υλικά από τα οποία κατασκευάστηκε ο πηλός μέσω του χαρακτηρισμού των εγκλεισμάτων ή των πρόσθετων ξένων υλικών και (2) να προσδιορίσει τις λεπτομέρειες κατασκευής των κεραμικών προϊόντων. Στο Κεφάλαιο 5 επομένως χρειάζεται να παρουσιασθούν οι τρόποι με τους οποίους ταυτοποιούνται δια της ραδιογραφίας τα ζητήματα (1) και (2). Για τη σχετική βιβλιογραφία ο αναγνώστης μπορεί να μελετήσει τους Lang (2005), την Berg (2008) και την Berg (2009) σε ό,τι αφορά στη ραδιογραφία των κεραμικών. Παράλληλα γίνεται και μια αναγκαία ανάλυση των τεχνικών κατασκευής αγγείων ή άλλων πήλινων αντικειμένων. Στη συνέχεια παρατίθενται ραδιογραφικές εικόνες από θραύσματα πήλινων αγγείων των οποίων η λήψη έγινε στην εγκατάσταση Βιομηχανικής Ραδιογραφίας του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των λήψεων αποφασίσθηκαν με τη βοήθεια του διαγράμματος έκθεσης που παρουσιάσθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο 4. Αυτές οι ραδιογραφικές εικόνες σχολιάζονται πολύ συνοπτικά σχετικά με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των αγγείων δεδομένου ότι και η εμπειρία που υπάρχει στο Εργαστήριο για τη σχετική ανάλυση τέτοιων δεδομένων είναι περιορισμένη και δεν συγκρίνεται με την εμπειρία συντηρητών μουσείων ή άλλων επαγγελματιών της αρχαιολογίας.

5.2 Χαρακτηρισμός της σύστασης του πηλού

Κάτω από κατάλληλες συνθήκες, η ραδιογραφία μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αρκετή επιτυχία για το μακροσκοπικό ποιοτικό χαρακτηρισμό των συστατικών του πηλού καθορίζοντας το μέγεθος, την αναλογία, τον τύπο και τη γενική ορυκτολογία των εγκλεισμάτων και / ή των πρόσθετων ξένων υλικών, χωρίς βέβαια να φθάνει την ακρίβεια και τη λεπτομέρεια μιας πετρογραφικής ανάλυσης. Εκπαιδευμένοι και έμπειροι μελετητές

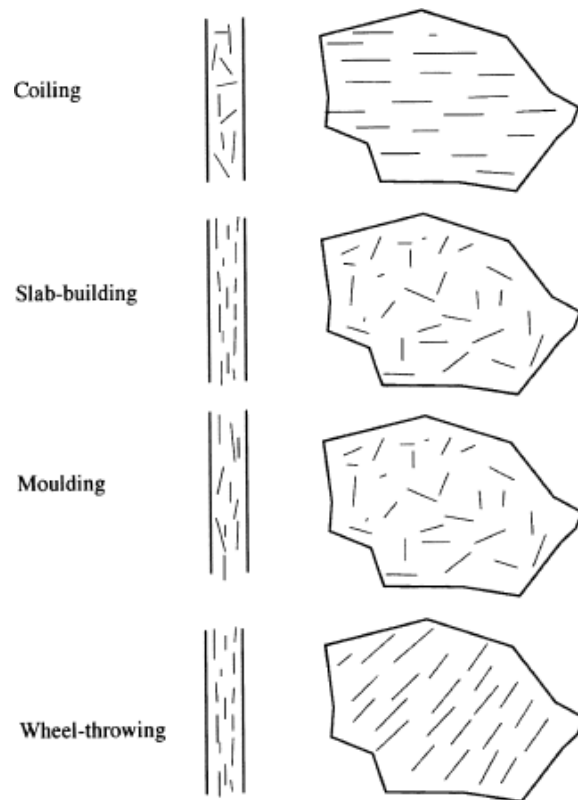
μπορούν να διακρίνουν μεταξύ κατηγοριών ορυκτών, όπως ηφαιστειακή (felsic) πέτρα, πυριγενή (mafic) πέτρα και τους αδιαπέρατους λίθους (πιθανότατα μέταλλα), λαμβάνοντας υπόψη την οπτική πυκνότητα και τη μορφολογία των σωματιδίων στον πηλό και την παρουσία, τον αριθμό και τις γωνίες των περιεχομένων κρυστάλλων. Η πιο λεπτομερής μελέτη των ανόργανων ορυκτών είναι συχνά προβληματική, ειδικά όταν τα συστατικά έχουν παρόμοια χημική σύνθεση και παρουσιάζουν παρόμοια μορφολογία στις ραδιογραφικές εικόνες (π.χ. λεπτόκοκκη ιζηματογενής πέτρα, χαλαζίας, καθαρός ψαμμίτης). Αντίθετα, τα οργανικά και κάποια ανόργανα εγκλείσματα (όπως το άχυρο, το ξύλο, το σφουγγάρι, τα έντομα, οι σπόροι, τα κοχύλια) και τα κενά που αφήνονται από τα περισσότερα από αυτά μετά την αποδόμησή τους είναι εύκολα αναγνωρίσιμα, ενώ θραύσματα από παλαιά κεραμική ή από απόβλητα κεραμικής ή από πυρίμαχα τοιχώματα, τα οποία είναι αλεσμένα και προστίθενται στον πηλό για να βοηθήσουν στη μείωση της πλαστικότητας του (grog) είναι καλύτερα ορατά όταν προέρχονται από διαφορετικούς πηλούς. Όταν χαρακτηρισθούν τα σωματίδια, η ογκομετρική τους αναλογία και το μέγεθος τους τότε συνήθως μετρώνται και οι μετρικές χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν τον πηλό και να βοηθήσουν στην ταυτοποίηση των πηλών παρόμοιας σύστασης. Ωστόσο, η επιτυχία αναλύσεων τέτοιου βάθους δεν είναι πάντοτε σίγουρη καθώς μελέτες έχουν δείξει ότι πάρα πολλά εξαρτώνται από το υπό εξέταση κεραμικό. Κάτω από αυτή την οπτική είναι συνεπώς πολύ πιο συνετό να θεωρηθεί η ραδιογραφία ως κατάλληλο συμπληρωματικό εργαλείο και όχι ως αντικατάσταση της πετρογραφίας και των χημικών αναλύσεων.

5.3 Πρωτεύουσες κατασκευαστικές τεχνικές κεραμικών

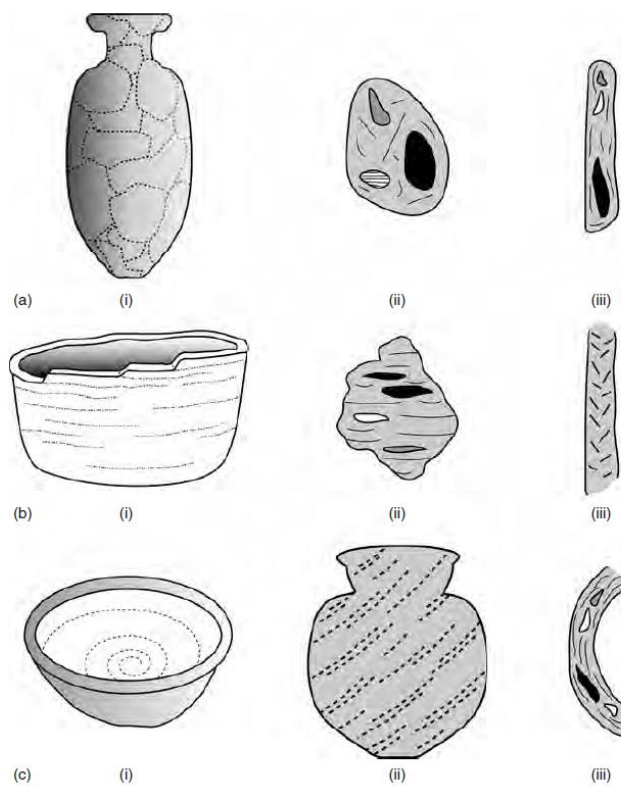
Ο υγρός πηλός είναι μια εύπλαστη πρώτη ύλη και η δημιουργία ενός κεραμικού αντικειμένου από αυτήν μπορεί να επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα το κεραμικό μπορεί να κατασκευάζεται κυρίως από (1) τη συνένωση επιμηκών κυλίνδρων ή δακτυλίων από πηλό για την κατασκευή κυλινδρικών τοιχωμάτων (το ονομαζόμενο Coil - building ή Ring - building) ή (2) με τη συνένωση πλακών πηλού, δηλ. διακριτών ορθογώνιων παραλληλεπίπεδων τμημάτων πηλού (το ονομαζόμενο Slab - building) ή (3) με χρήση μητρών (καλουπιών) με τη βοήθεια των οποίων ο πηλός παίρνει προκαθορισμένα σχήματα (στα αγγλικά Moulding) ή, τέλος, (4) με τη βοήθεια του αγγειοπλαστικού τροχού (στα αγγλικά Wheel throwing). Στην Εικόνα 5.1 δίνονται παραστάσεις από ατέλειες σε κεραμικά (εγκλείσματα ή κενά διαφόρων τύπων) η θέση και η φορά των οποίων συνδέονται με τον τρόπο κατασκευής τους. Δεξιά δίνονται οι εξωτερικές επιφάνειες των κεραμικών (εννοούμενες κατακόρυφες) και αριστερά οι τομές τους (εννοούμενες ομοίως κατακόρυφες).

Η διαπίστωση των κατασκευαστικών τεχνικών παρέχει μια ένδειξη της οργάνωσης των αγγειοπλαστών και του βαθμού της εφαρμοζόμενης πολυπλοκότητας στην υπόψη τέχνη. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει συμβολή στη γενικότερη μελέτη της κάθε τεχνικής, καθώς και μια ευρύτερη κατανόηση της ιστορίας και της ανάπτυξης της κεραμικής τεχνολογίας. Από περίπου το 1970 και μετά, αυτού του είδους η έρευνα συστηματοποιήθηκε και χρησιμοποιήθηκαν συλλογές αγγειοπλαστικής προκειμένου να διατυπωθούν οι τρόποι από τους οποίους μπορούν να προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με τις κατασκευαστικές τεχνικές. Είναι φανερό, ότι το είδος και η ποιότητα των τεχνικών συνδέονται και με ανθρωπολογικές και άλλες αρχαιολογικές παρατηρήσεις. Ένας από τους κυριότερους τρόπους για τέτοιες διαπιστώσεις είναι και η ραδιογραφία, διότι είναι πάρα πολύ ικανή μέθοδος για την αναγνώριση χαρακτηριστικών όπως ο προσανατολισμός και ο τρόπος παράταξης των κενών, των εγκλεισμάτων και των επιμηκών σωματιδίων στα διάφορα μίγματα πηλών. Η ραδιογραφία των κεραμικών, χρησιμοποιεί τις ηθελημένες ή αθέλητες ατέλειες στον πηλό για να διαγνώσει με μη καταστροφικό τρόπο τις κατασκευαστικές τεχνικές. Φυσικά αν η διάγνωση αφορά σε εξωτερικές επιφάνειες, αυτό μπορεί να γίνει και οπτικά. Αν όμως η διάγνωση πρέπει να προχωρήσει και στο εσωτερικό του εξεταζόμενου υλικού, τότε η ραδιογραφία είναι η πλέον κατάλληλη και μη καταστροφική μέθοδος.

Οι κατασκευαστικές τεχνικές κεραμικών διαχωρίζονται συνήθως σε πρωτεύουσες και συμπληρωματικές. Ως πρωτεύουσες χαρακτηρίζονται εκείνες που χρησιμοποιούνται για να μετασχηματίζουν τον άμορφο πηλό στο βασικό ζητούμενο σχήμα και ως συμπληρωματικές χαρακτηρίζονται αυτές που χρησιμοποιούνται για την τροποποίηση του βασικού σχήματος (π.χ. για τη λέπτυνση των τοιχωμάτων ή την εξομάλυνση των επιφανειών). Πρωτεύουσες είναι οι τεχνικές (1) έως (4) που ήδη αναφέρθηκαν. Οι συμπληρωματικές τεχνικές μπορούν και αυτές να μελετηθούν ραδιογραφικά με παρόμοιους τρόπους όπως και οι πρωτεύουσες. Υπάρχει βεβαίως και μία τρίτη ομάδα τεχνικών: είναι εκείνες που χρησιμοποιούνται για να ολοκληρωθεί και να διακοσμηθεί το κεραμικό. Αυτές οι τελευταίες τεχνικές δεν είναι γενικά επιδεκτικές ραδιογραφικής μελέτης. Στην Εικόνα 5.2 δίνεται μία συνοπτική παρουσίαση μερικών πρωτευουσών τεχνικών με τη βοήθεια σκαριφημάτων αγγείων. Στην πρώτη σειρά δίνεται η τεχνική Slab - building, στο μέσον άτακτες ατέλειες στην πρόσθια όψη, δεξιά ατέλειες προσανατολισμένες κατά το ύψος. Στη δεύτερη σειρά δίνεται η τεχνική Coil / Ring -



ΕΙΚΟΝΑ 5.1: Χαρακτηριστικά των πρωτεύουσών κατασκευαστικών τεχνικών που μπορούν σχετικά εύκολα να διαπιστωθούν με ραδιογραφία (βλ. Berg, 2008; 2009)

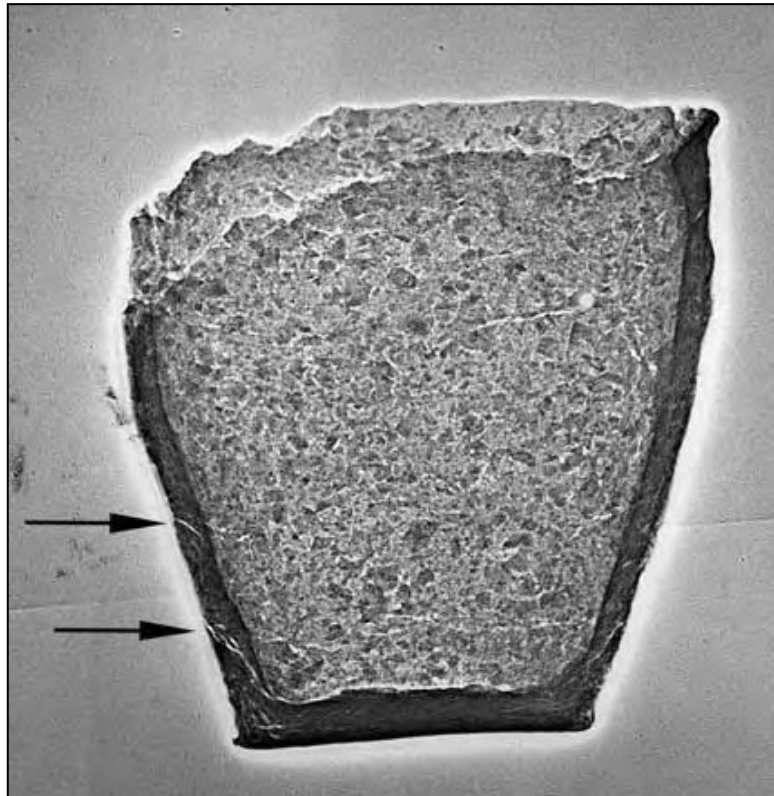


ΕΙΚΟΝΑ 5.2: Σκαριφήματα που απεικονίζουν χαρακτηριστικά γνωρίσματα ορισμένων κατασκευαστικών τεχνικών κεραμικής (βλ. Lang, 2005)

building, στο μέσον προσανατολισμένες ατέλειες παράλληλες με τη βάση του αγγείου, δεξιά ατέλειες κατά το ύψος οι οποίες παρουσιάζουν δύο κύριες κλίσεις, η μία αντιστοιχεί στο ένα μισό περιφέρειας και η άλλη στο άλλο. Στην τρίτη σειρά δίνεται η τεχνική Wheel - throwing, στο μέσον, οι ατέλειες έχουν προσανατολισθεί υπό γωνία σε σχέση με τον άξονα του αγγείου, δεξιά οι ατέλειες φαίνονται παράλληλες προς τη βάση του αγγείου.

5.3.1 Coil - building και Ring - building

Η τεχνική της κατασκευής ενός αγγείου από μια σειρά επιμηκών κυλίνδρων πηλού έχει εφαρμοστεί ευρέως από τους προϊστορικούς χρόνους. Ο όρος Coil - building ή coiling (δηλ. περιέλιξη) χρησιμοποιείται ειδικά όταν το μήκος του πήλινου κυλίνδρου είναι μεγαλύτερο από την περιφέρεια του αγγείου, έτσι ώστε η σπείρα να περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του αγγείου. Ο όρος Ring - building χρησιμοποιείται ειδικά όταν τα κυλινδρικά τμήματα είναι βραχύτερα και με μήκος περίπου ίσο με μία περιφέρεια του αγγείου. Στην πράξη, ωστόσο, είναι συχνά αδύνατο να γίνει διάκριση της μιας τεχνικής από την άλλη και πολλές φορές θεωρούνται ως μία. Συνήθως αυτό που μπορεί να παρατηρηθεί είναι τα σημεία σύνδεσης μεταξύ διαδοχικών σπειρών ή διαδοχικών περιφερειών (δηλ. δακτυλίων). Πολλές φορές οι συνδέσεις αυτές είναι ορατές μακροσκοπικά ιδιαίτερα αν πρόκειται για θραύσματα κεραμικής. Ωστόσο, κατά κανόνα, τέτοιες συνδέσεις δεν μπορούν εύκολα να παρατηρηθούν, ακόμη και σε κεραμικά μικρού πάχους. Υπό αυτές τις συνθήκες, η μη καταστρεπτική ραδιογραφική εξέταση μπορεί να παρέχει τα μέσα με τα οποία μπορούν να διαγνωσθούν τέτοιες λεπτομέρειες. Για παράδειγμα, η ραδιογραφική εξέταση ενός ταφικού αγγείου της Ύστερης Εποχής του Χαλκού που βρέθηκε στο Yorkshire του Ηνωμένου Βασιλείου, αποκάλυψε ότι αυτό ήταν κατασκευασμένο με την τεχνική Coil / Ring-building (βλ. και την Εικόνα 5.3). Κάποιες συνδέσεις μεταξύ των σπειρών είναι ελάχιστα ορατές (βλ. τοξάκια) ως οριζόντιες ατέλειες και αντιστοιχούν σε τμήματα της ραδιογραφικής εικόνας όπου το τοίχωμα του αγγείου ήταν περίπου παράλληλο προς το φιλμ. Η τεχνική διαγνώσθηκε καθόσον η περιέλιξη (Coiling) οδηγεί σε έναν οριζόντιο προσανατολισμό των ατελειών, δηλ. των εγκλεισμάτων και επιμηκών οριζόντιων κενών.



ΕΙΚΟΝΑ 5.3: Ραδιογραφία ενός ταφικού αγγείου της Ύστερης Εποχής του Χαλκού από το Yorkshire. Διακρίνονται κάποιες συνδέσεις μεταξύ διαδοχικών σπειρών πηλού (βλ. Lang, 2005).

5.3.2 Slab-building

Η ραδιογραφία είναι χρήσιμη ομοίως όταν πρόκειται για την αναγνώριση της τεχνικής κατασκευής ενός κεραμικού με συνένωση πλακών από πηλό (Slab-building). Με την τεχνική αυτή το κεραμικό συναρμολογείται από μια ακολουθία επίπεδων τμημάτων πηλού, τα οποία ενώνονται μεταξύ τους στις ακμές (βλ. και Εικόνα 5.2α). Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την κατασκευή σχετικά μεγάλων αγγείων και οι μεμονωμένες πλάκες μπορεί να ποικίλουν σε μήκος ή πλάτος από λίγα cm έως περισσότερα από 10 cm. Όπως και με το Coil / Ring building, η αναγνώριση της τεχνικής αυτής εξαρτάται κυρίως από την ικανότητα της ραδιογραφίας να διαπιστωθούν οι ενώσεις γειτονικών πλακών, επιτρέποντας έτσι στον παρατηρητή να "αποδομήσει" το εξεταζόμενο κεραμικό στις συνιστώσες του. Πέρα από αυτό στη ραδιογραφική εικόνα του Slab - building, οι ατέλειες στον πηλό βρίσκονται σε επίπεδα παράλληλα με την επιφάνειά του αλλά δεν φαίνονται να έχουν συγκεκριμένο προσανατολισμό.

5.3.3 Moulding

Τα ανοικτά κεραμικά αγγεία, όπως τα δοχεία μορφής "μπολ", μπορούν να σχηματιστούν και να διαμορφωθούν με την πίεση του πηλού μέσα σε ή πάνω σε μία μήτρα (ή καλούπι, στα αγγλικά mould). Το καλούπι μπορεί να είναι κοίλο, με τον πηλό να πιέζεται στο εσωτερικό ή κυρτό, οπότε το αγγείο σχηματίζεται στο εξωτερικό του καλουπιού. Τα καλούπια κατασκευάζονται συχνά από κεραμικό υλικό που έχει ψηθεί, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και υλικά όπως γύψος, υφαντά καλάθια και ακόμη και τμήματα σπασμένων πήλινων δοχείων. Και πάλι το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των κεραμικών που έχουν κατασκευασθεί με την βοήθεια καλουπιού είναι οι συνδέσεις μεταξύ των διαφόρων τμημάτων. Ωστόσο, από τις ραδιογραφικές εικόνες δεν είναι πάντα εύκολο να προκύπτουν συμπεράσματα. Μια απλή οπτική αξιολόγηση μπορεί να είναι πιο κατάλληλη. Πέρα από αυτό στη ραδιογραφική εικόνα του Moulding, οι ατέλειες στον πηλό βρίσκονται και πάλι σε επίπεδα παράλληλα με την επιφάνειά του αλλά δεν φαίνονται να έχουν συγκεκριμένο προσανατολισμό. Επομένως, το Moulding μπορεί πολύ εύκολα να παρεξηγηθεί ως Slab - building και το αντίστροφο.

5.3.4 Αγγειοπλαστικός τροχός

Η χρήση του αγγειοπλαστικού τροχού επιτρέπει να κατασκευάζονται πήλινα αγγεία πολύ γρήγορα και αποτελεσματικά. Για την επιτυχή κατασκευή, ο τροχός πρέπει να περιστρέφεται συνεχώς σε σχετικά υψηλή ταχύτητα στην περιοχή των 50 έως 150 rpm. Η ανύψωση των τοιχωμάτων των αγγείων κατά τη διάρκεια της διαδικασίας προσδίδει ένα χαρακτηριστικό λοξό προσανατολισμό σε ατέλειες του πηλού, όπως π.χ. τα επιμήκη εγκλείσματα και τα επιμήκη κενά (βλ και την Εικόνα 5.2c). Οι ατέλειες στο τέλος συμμετέχουν σε ένα σπειροειδή σχηματισμό, ο οποίος ανυψώνεται γύρω από τον άξονα του αγγείου. Η κλίση των σπειρών είναι τόσο εντονότερη σε σχέση με το επίπεδο του τροχού, όσο ταχύτερα αυτός περιστρέφεται (ισοδύναμα, μεγάλη ταχύτητα ανύψωσης). Ο λοξός προσανατολισμός των επιμηκών ατελειών μπορεί να φανεί πολύ καθαρά με ραδιογραφία, π.χ. όπως στην ραδιογραφία ενός βάζου Bellarmine του 17ου αιώνα στην Εικόνα 5.4.



ΕΙΚΟΝΑ 5.4: Ραδιογραφία ενός βάζου Bellarmine του 17ου αιώνα. Ο λοξός προσανατολισμός των ατελειών είναι χαρακτηριστικό της χρήσης αγγειοπλαστικού τροχού (βλ. Lang, 2005).

5.4 Συμπληρωματικές τεχνικές

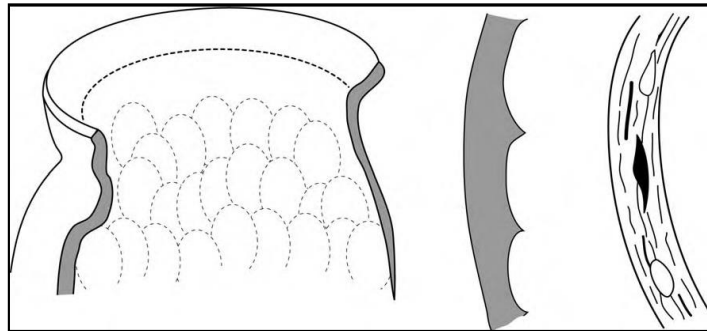
Το αγγείο που δεν έχει εκτεθεί ακόμα στη φωτιά συχνά υποβάλλεται σε επιπλέον συμπληρωματική επεξεργασία, προκειμένου να τροποποιηθούν ορισμένες ιδιότητές του, όπως, π.χ., η εμφάνιση της επιφάνειας, το πάχος των τοιχωμάτων και το πορώδες. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ορισμένες συμπληρωματικές τεχνικές όπως η σφυρηλάτηση με κόντρες (paddle & anvil, βλ και Εικόνα 5.5), η απλή σφυρηλάτηση (beating), η απόξεση (scraping), η αποκοπή (trimming) και το τρνίρισμα (turning). Σε πολλές περιπτώσεις αυτές οι τεχνικές αποκρύπτουν ή τροποποιούν τόσο τα οπτικά όσο και τα ραδιογραφικά χαρακτηριστικά της πρωτεύουσας τεχνικής και μπορούν επίσης να δημιουργήσουν ένα νέο σύνολο χαρακτηριστικών γνωρισμάτων. Πολλές από τις επιδράσεις των συμπληρωματικών τεχνικών εντοπίζονται καλύτερα με οπτική παρατήρηση, αλλά η συμπληρωματική τεχνική που μπορεί να αναγνωρισθεί εύκολα ραδιογραφικά είναι η τεχνική paddle & anvil.



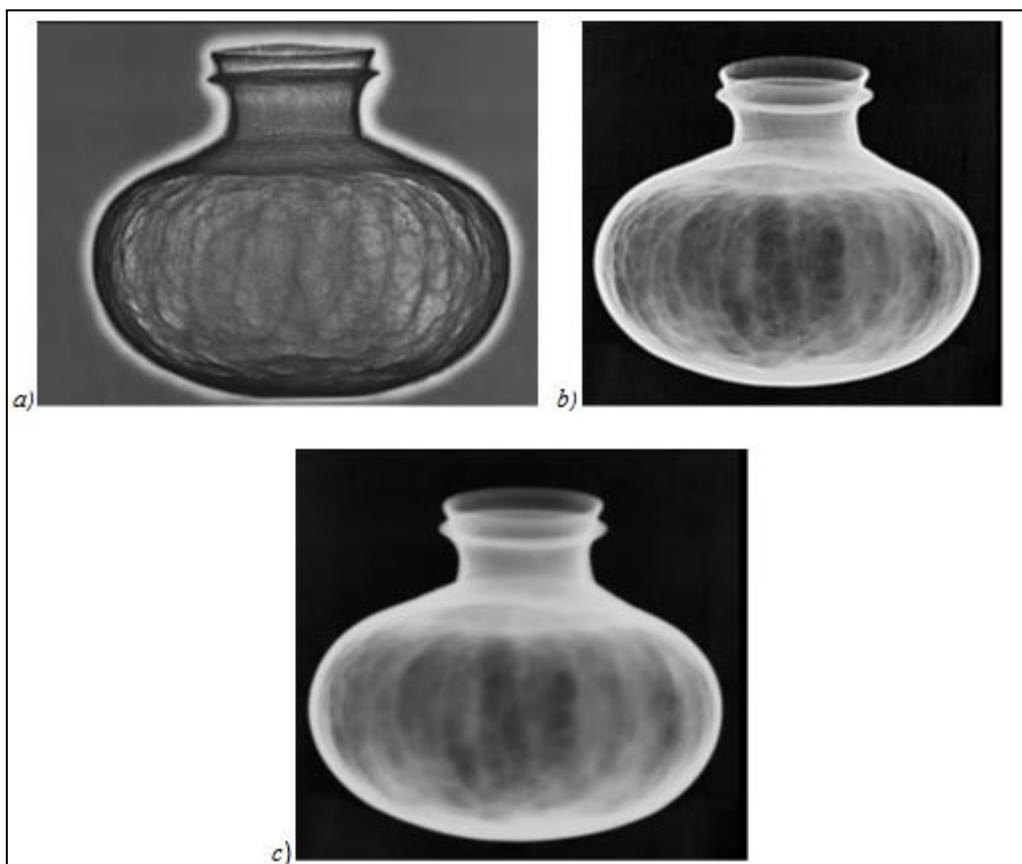
ΕΙΚΟΝΑ 5.5: Συμπληρωματική τεχνική paddle & anvil (εικόνα από το διαδίκτυο).

5.4.1 Paddle & anvil

Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται για τη λείανση και τη βελτίωση των τοιχωμάτων των αγγείων. Πραγματοποιείται με σφυρηλάτηση του τοιχώματος (συνήθως από το εξωτερικό του δοχείου) με ένα (συνήθως) ξύλινο αντικείμενο που έχει το σχήμα μικρού κουπιού (paddle). Το τοίχωμα του δοχείου υποστηρίζεται από το εσωτερικό χρησιμοποιώντας ένα λείο όγκο από πέτρα ή από κεραμικό, την λεγόμενη κόντρα (anvil). Αυτό, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.6, προκαλεί τοπική παραμόρφωση του πήλινου τοιχώματος. Η τεχνική paddle & anvil χρησιμοποιείται συνήθως σε αγγεία που κατασκευάζονται με Coil / Ring - building, ως μέσο λείανσης της επιφάνειας και ενίσχυσης των δεσμών μεταξύ γειτονικών σπειρών ή δακτυλίων από πηλό. Εντούτοις, η τεχνική αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε αγγείο, ακόμη και εκείνα που κατασκευάζονται στον αγγειοπλαστικό τροχό. Ως εκ τούτου κρίνεται σημαντικό να μπορεί να προσδιορίζεται, εκτός από την συμπληρωματική ΚΑΙ η πρωτεύουσα τεχνική. Ένα πήλινο δοχείο μεταφοράς νερού από το Βιετνάμ, που φαίνεται στην Εικόνα 5.7, θεωρείται ότι έχει σχηματιστεί από πηλό σε σχήμα κυλίνδρου που κατασκευάζεται με τη συνένωση των ακμών μίας ορθογώνιας πλάκας από πηλό. Διακρίνεται ότι το τελικό σχήμα του δοχείου επιτεύχθηκε με τη χρήση της τεχνικής paddle & anvil.



ΕΙΚΟΝΑ 5.6: Τοπικές παραμορφώσεις πήλινου τοιχώματος λόγω της τεχνικής paddle & anvil (βλ. Lang, 2005)

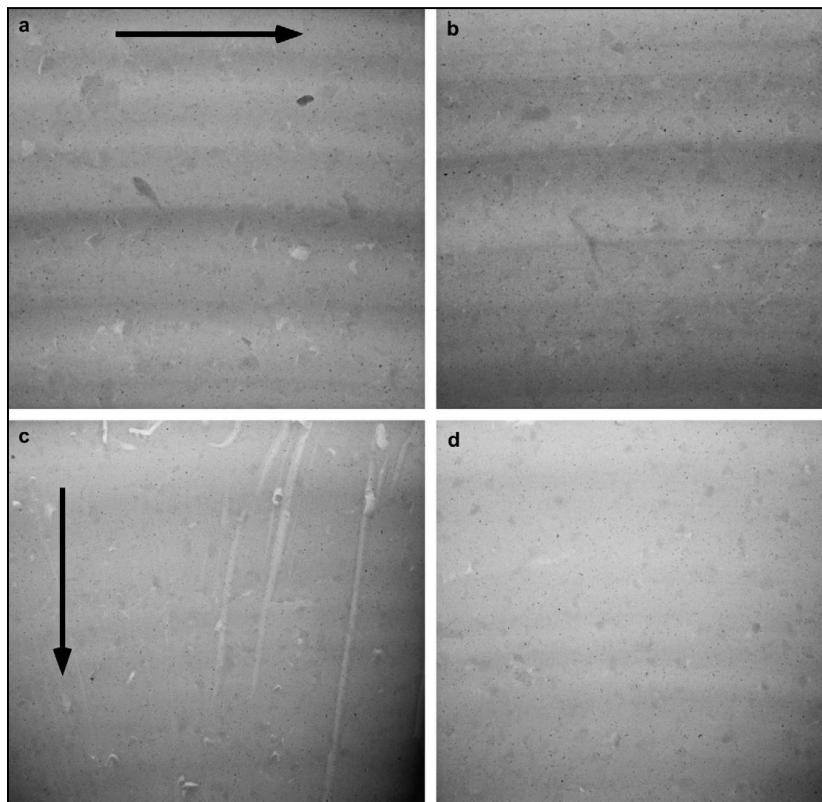


ΕΙΚΟΝΑ 5.7: Ραδιογραφίες δοχείου μεταφοράς νερού του 19ου αιώνα από το Mekong Delta, Vietnam, διαμορφωμένου χρησιμοποιώντας την τεχνική paddle & anvil. (a) και (b) πρωτογενείς ραδιογραφικές εικόνες και (c) ψηφιακά επεξεργασμένη ραδιογραφική εικόνα (βλ. Lang, 2005)

5.4.2 Scraping

Στην τεχνική αυτή, ο πηλός που περισσεύει αφαιρείται με ένα ξύλινο εργαλείο ακριβώς πριν από το στάδιο του ψησίματος. Αυτή η διαδικασία εξομαλύνει τα τοιχώματα τόσο με την απομάκρυνση του πλεονάζοντος πηλού όσο και με τη συμπλήρωση πηλού σε σημεία που υπάρχουν βαθουλώματα ή ελλείψεις. Ανάλογα με το μέγεθος και την ποσότητα των

εγκλεισμάτων, υπάρχουν ρηγά ή βαθιά σημάδια. Το εργαλείο απόξεσης πιθανόν να αφήσει αβαθείς εσοχές, οι οποίες μπορεί να εξαλειφθούν με επακόλουθη επιφανειακή επεξεργασία. Με τη ραδιογραφία η απόξεση είναι δυνατόν να αναγνωρίζεται έμμεσα από τη συσσώρευση ατελειών (κυρίως μεγάλων εγκλεισμάτων) σε μικρές εκτάσεις και τη δημιουργία θυλάκων αέρα σε αντίθετη κατεύθυνση από τον προσανατολισμό των αποξέσεων. Η σύγκριση ραδιογραφιών πριν και μετά από μη έντονη απόξεση, δείχνει ότι αυτή η συμπληρωματική τεχνική, δεν έχει καμία επίδραση που να οδηγεί σε παραμόρφωση της πρωτεύουσας τεχνικής. Ισοδύναμα, ο προσανατολισμός, η θέση, η εμφάνιση και το μέγεθος των ατελειών του πηλού δεν αλλοιώνονται με την ελαφρά απόξεση, βλ. και Εικόνα 5.8 a, b.



ΕΙΚΟΝΑ 5.8:

- a) Η οριζόντια απόξεση με ξύλινο εργαλείο μπορεί να δημιουργήσει θύλακες αέρα**
 - b) Δεν υπάρχουν θύλακες αέρα στο δοχείο που δεν έχει υποστεί απόξεση**
 - (c) Η κατακόρυφη κοπή μπορεί να δημιουργήσει εσοχές και θύλακες αέρα**
 - d) Δεν υπάρχουν εσοχές και θύλακες αέρα στο δοχείο που δεν έχει υποστεί αποκοπές**
- Τα βέλη υποδεικνύουν την κατεύθυνση της κίνησης απόξεσης / κοπής (βλ. Berg, 2008).**

5.4.3 Knife trimming

Ο πηλός κόβεται με λεπίδα κατά τη διάρκεια του σταδίου ξήρανσης όταν πλέον ο πηλός έχει δημιουργήσει ένα ξηρό επιφανειακό στρώμα και τυχόν επεμβάσεις με εργαλεία δεν θα οδηγήσουν στην καταστροφή του κεραμικού (ο πηλός είναι όπως λέγεται στα αγγλικά leather

hard). Η διαδικασία της κοπής αφήνει σημάδια με αιχμηρά άκρα, εκτός και αν αυτά εξαλείφονται στη συνέχεια από άλλη συμπληρωματική επιφανειακή επεξεργασία. Ανάλογα με το μέγεθος και την ποσότητα των εγκλεισμάτων, ενδέχεται τα σημάδια αυτά να είναι πολλά και έντονα. Λόγω της εφαρμοζόμενης πίεσης από τη λεπίδα, ο πηλός στις περιοχές κοπής μπορεί να εμφανίζεται συμπιεσμένος με ελαφριά λάμψη. Η τυχόν επακόλουθη συμπληρωματική επιφανειακή επεξεργασία σπάνια εξαλείφει εντελώς αυτά τα ίχνη. Το trimming μπορεί να αναγνωριστεί ραδιογραφικά όταν τα σημάδια κοπής έχουν έστω και μικρό πάχος ή έμμεσα όταν η κοπή παρασύρει πίσω της εγκλείσματα και θύλακες αέρα σε αντίθετη κατεύθυνση με την κίνηση της κοπής. Η σύγκριση ραδιογραφιών πριν και μετά από μη έντονες κοπές, δείχνει ότι αυτή η συμπληρωματική τεχνική, δεν έχει καμία επίδραση που να οδηγεί σε παραμόρφωση της πρωτεύουσας τεχνικής. Ισοδύναμα, ο προσανατολισμός, η θέση, η εμφάνιση και το μέγεθος των ατελειών του πηλού δεν αλλοιώνονται με την ελαφρά κοπή, βλ. και Εικόνα 5.8 c, d. Βεβαίως η υπερβολική κοπή, παρόμοια με την έντονη απόξεση, θα μπορούσε να οδηγήσει στην εξάλειψη των χαρακτηριστικών της πρωτεύουσας τεχνικής.

5.4.4 Turning

Σύμφωνα με την τεχνική του τορνιρίσματος, σημαντικές ποσότητες πηλού αποξέονται με μεταλλικό εργαλείο ακίνητο υπό γωνία έναντι της επιφάνειας του δοχείου, ενώ το δοχείο περιστρέφεται γρήγορα, πάνω στον αγγειοπλαστικό τροχό. Ο αποξεστήρας μπορεί να αφήσει σημαντικές εσοχές. Ανάλογα με το μέγεθος και την ποσότητα των εγκλεισμάτων, παρατηρούνται ρηχά ή βαθιά σημάδια, τα ρηχά δεν αλλοιώνουν γενικά μια προηγουμένως λεία επιφάνεια, ενώ τα βαθιά μπορούν να συμβάλλουν στο σχηματισμό επιφανειών τραχιάς υφής. Αυτά τα τραχιά χαρακτηριστικά μπορεί να είναι εμφανή στη ραδιογραφία ακόμα και μετά την πρόσθετη επιφανειακή επεξεργασία. Το τορνίρισμα μπορεί να αναγνωριστεί εύκολα ραδιογραφικά εφόσον τα σημάδια αφήνουν προφανείς διαδρομές πίσω ή μεγάλες μεταλλικές εγκλείσεις και δημιουργούν θύλακες αέρα στα κατάντη της κατεύθυνσης της περιστροφής. Η σύγκριση ραδιογραφιών πριν και μετά από ελαφρά τορνιρίσματα, δείχνει ότι αυτή η συμπληρωματική τεχνική, δεν έχει καμία επίδραση που να οδηγεί σε παραμόρφωση της πρωτεύουσας τεχνικής. Ισοδύναμα, ο προσανατολισμός, η θέση, η εμφάνιση και το μέγεθος των ατελειών του πηλού δεν αλλοιώνονται με το ελαφρό τορνίρισμα. Βεβαίως το υπερβολικό τορνίρισμα, παρόμοια με την έντονη απόξεση, θα μπορούσε να οδηγήσει στην εξάλειψη των χαρακτηριστικών της πρωτεύουσας τεχνικής, όπως π.χ. στην περίπτωση αγγείων της Κυπριακής Εποχής του Χαλκού, όπου το έντονο τορνίρισμα μπορεί να οδηγήσει σε τόσο λεπτά τοιχώματα στα οποία δεν διασώζονται ίχνη της πρωτεύουσας τεχνικής.

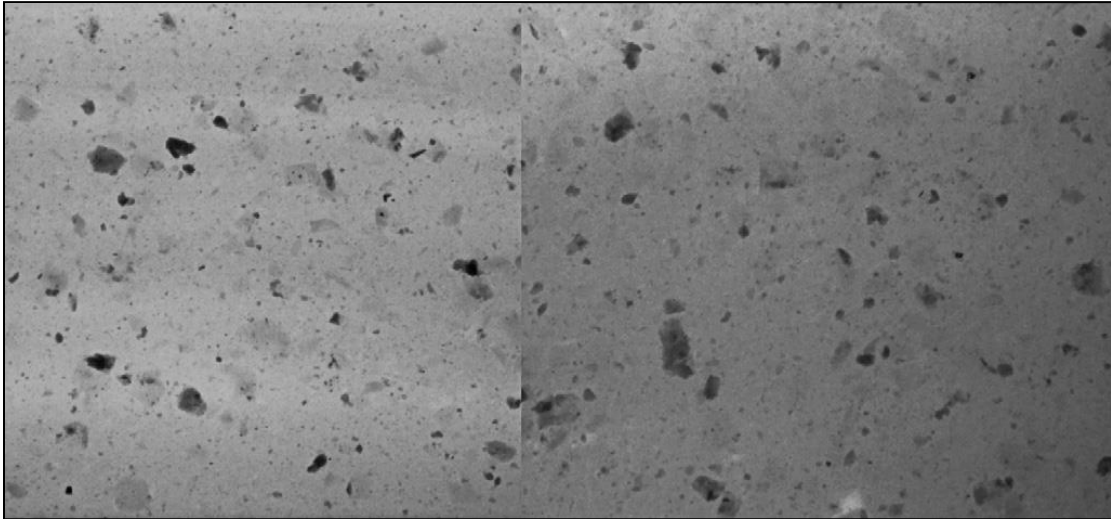
5.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχία της ραδιογραφίας.

Η ικανότητά αναγνώρισης των τεχνικών επεξεργασίας του πηλού μέσω της ραδιογραφίας εξαρτάται από την αντίθεση της εικόνας μεταξύ του πηλού και των ξένων προς αυτόν σωματιδίων που υπάρχουν μέσα σε αυτόν. Επειδή οι δύο κύριες εφαρμογές της ραδιογραφίας κεραμικής (δηλαδή ο χαρακτηρισμός του πηλού και η ταυτοποίηση των τεχνικών κατασκευής) βασίζονται αμφότερες στην απεικόνιση εγκλεισμάτων, είναι σημαντικό να επισημανθούν οι παράγοντες που εμπλέκονται στην επίτευξη μεγαλύτερης ευκρίνειας στη ραδιογραφική εικόνα.. Το θέμα έχει αναλυθεί πολλαπλώς στις βιομηχανικές εφαρμογές της ραδιογραφίας και δευτερευόντως στις αρχαιομετρικές. Γενικά μπορεί να ειπωθεί ότι οι ατέλειες του πηλού διαχωρίζονται σε κατηγορίες μεγέθους που κυμαίνονται σε ατέλειες μεγέθους λιγότερο από 0.01 mm και σε ατέλειες μεγέθους έως περισσότερο από 2.0 mm.

Η ορατότητα των ατελειών καθορίζεται από τέσσερις κύριους παράγοντες.

1. Τη διαφορετική εξασθένιση ακτινοβολίας μεταξύ του πηλού και των ατελειών. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά, τόσο πιο ορατές είναι οι ατέλειες.
2. Το πάχος του κεραμικού. Μεγάλα πάχη αποκρύπτουν τις χρήσιμες για την αναγνώριση ατέλειες τόσο λόγω εξασθένισης όσο και λόγω σκέδασης της ακτινοβολίας. Από την άλλη μικρά πάχη προσφέρουν καλύτερη ορατότητα ατελειών, αλλά δεν παρέχουν επαρκείς πληροφορίες για τον πηλό.
3. Το μέγεθος των ατελειών. Ατέλειες με ελάχιστη διάσταση τουλάχιστον 0.5 mm διακρίνονται πολύ περισσότερο από άλλες μικρότερες, οι οποίες δεν μπορούν να ξεχωρίσουν από τον πηλό.
4. Η πυκνότητα των ατελειών. Λιγότερες ατέλειες διευκολύνουν την οπτική αντίθεση μεταξύ τους και βοηθούν στον ασφαλέστερο χαρακτηρισμό του κεραμικού.

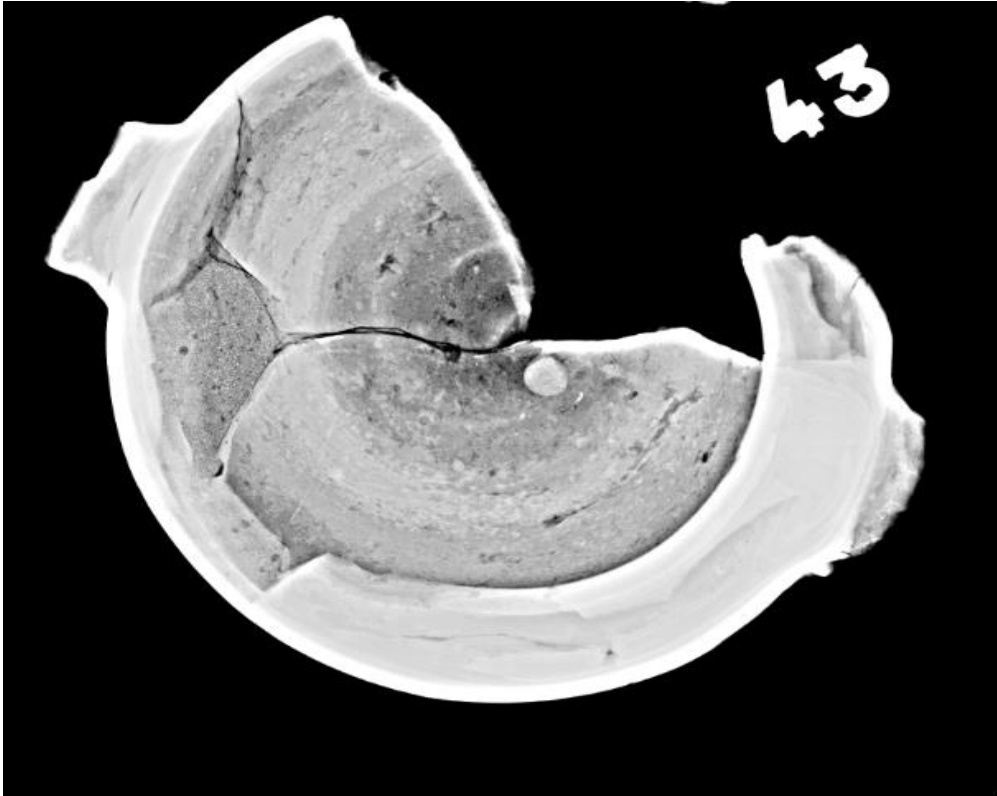
Η Εικόνα 5.9 δείχνει ενδεικτικά μια από άλλες δυσκολίες που μπορούν να προκύψουν στην λήψη ευκρινών ραδιογραφικών εικόνων, την επισφάλτωση και τις συνέπειες της.



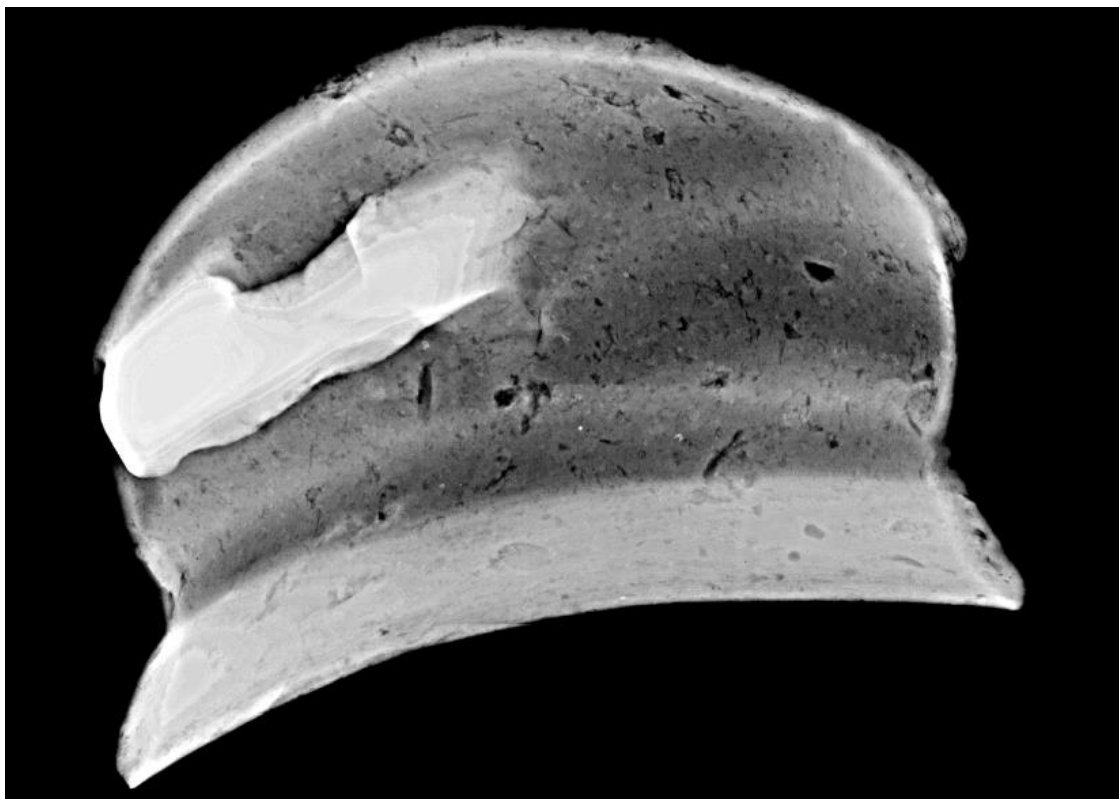
ΕΙΚΟΝΑ 5.9: Η επίδραση του πάχους του σμάλτου στην ορατότητα των ατελειών (αριστερά με σμάλτο, δεξιά χωρίς, βλ. Berg, 2008).

5.6 Παραδείγματα ραδιογραφιών θραυσμάτων αρχαίων αγγείων

Στην εγκατάσταση Βιομηχανικής Ραδιογραφίας του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ, ραδιογραφήθηκαν θραύσματα αρχαίων αγγείων με χρήση του διαγράμματος έκθεσης που κατασκευάστηκε και παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4. Τα θραύσματα βρέθηκαν στο Εργαστήριο, στο πλαίσιο συνεργασίας του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας με τη Βρετανική Αρχαιολογική Σχολή των Αθηνών και τη σύμφωνη γνώμη της επιβλέπουσας εφορίας. Από τις ραδιογραφήσεις που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζεται ένας πολύ περιορισμένος αριθμός όπως στις παρακάτω εικόνες. Ο τόπος στον οποίο ανασκάφηκαν τα θραύσματα δεν αποκαλύπτεται διότι η πληροφορία αυτή αποτελεί μέρος αδημοσίευτης αρχαιολογικής έρευνας και υπάρχουν θέματα προστασίας πνευματικών δικαιωμάτων. Παρόλα αυτά τα παρουσιαζόμενα παραδείγματα είναι χρήσιμα για μία πρόιμη τριβή με την ερμηνεία των σχετικών ραδιογραφικών εικόνων σε ό,τι αφορά τις πρωτεύουσες τεχνικές κατασκευής. Η γνώμη του γράφοντος σχετικά δίνεται στις λεζάντες των εικόνων. Για τη συνεργασία με τη Βρετανική Αρχαιολογική Σχολή των Αθηνών, οφείλονται πολλές ευχαριστίες στη Δρ. Μαρία Χολέβα, υπότροφο της Σχολής.



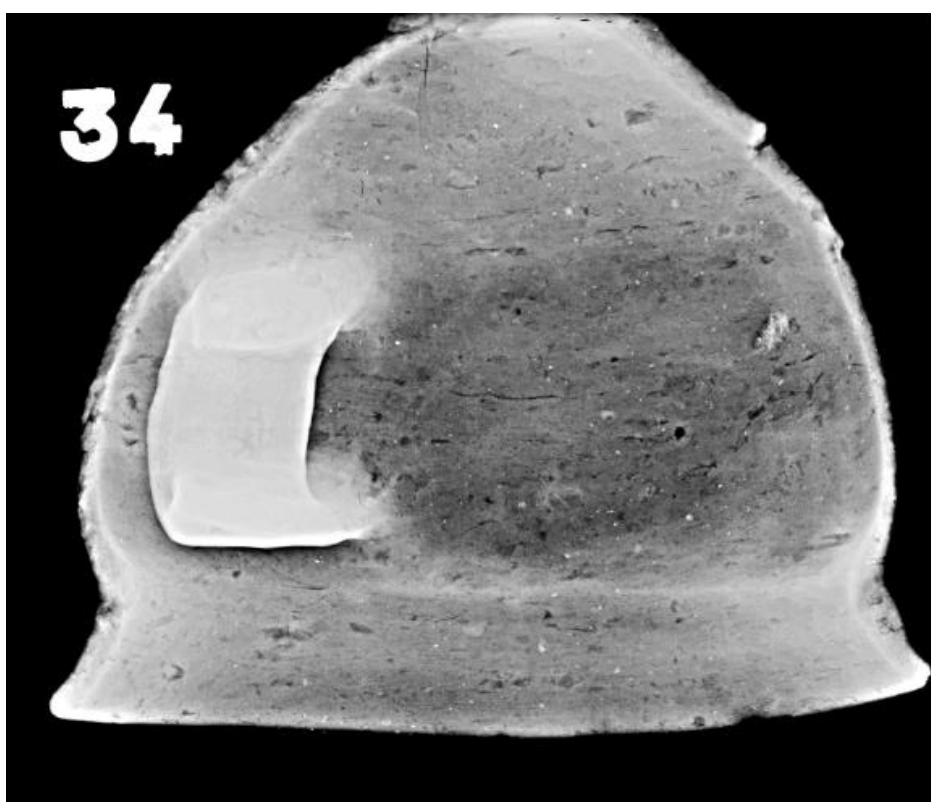
ΕΙΚΟΝΑ 5.10: Ραδιογραφία θραύσματος αγγείου. Πιθανόν Coiling.



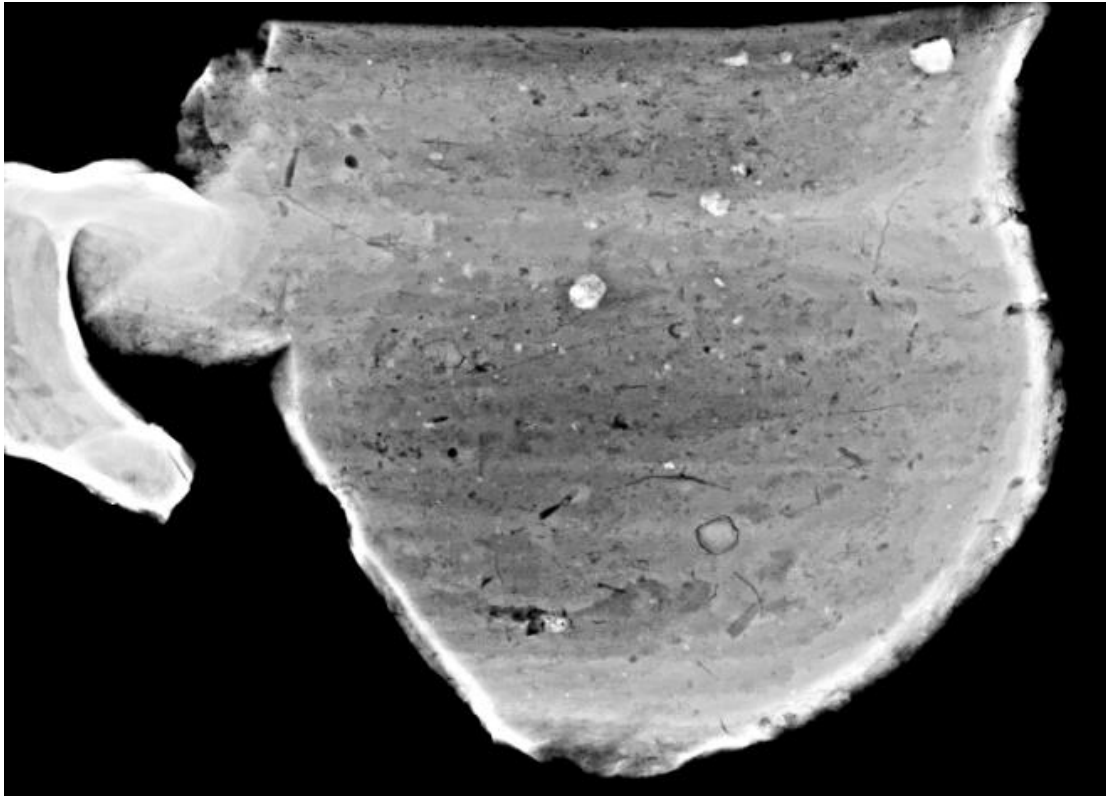
**ΕΙΚΟΝΑ 5.11: Ραδιογραφία θραύσματος αγγείου.
Πιθανόν Moulding ή κατασκευή "στο χέρι"**



**ΕΙΚΟΝΑ 5.12: Ραδιογραφία θραύσματος αγγείου.
Πιθανόν Wheel throwing και συμπληρωματικές αποξέσεις.**



**ΕΙΚΟΝΑ 5.14: Ραδιογραφία θραύσματος αγγείου.
Πιθανόν Coiling.**



**ΕΙΚΟΝΑ 5.14: Ραδιογραφία θραύσματος αγγείου.
Πιθανόν Slab - building.**

5.7 Σχόλια και συμπεράσματα

Τόσο σύμφωνα με τα αναφερόμενα στη Βιβλιογραφία, όσο και σύμφωνα με αυτά που διαπιστώνονται στην εδώ Μεταπτυχιακή Εργασία, είναι σαφές ότι η ραδιογραφία έχει διαδραματίσει και μπορεί να συνεχίσει να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ταυτοποίηση των πρωτεύουσών τεχνικών κατασκευής αγγείων και άλλων κεραμικών αντικειμένων. Επιπλέον, επειδή οι περισσότερες συμπληρωματικές τεχνικές κατασκευής και οι άλλες τεχνικές τελικής διαμόρφωσης των κεραμικών εφαρμόζονται κατά τη διάρκεια του σταδίου ξήρανσης leather hard, δεν προκαλούν γενικά αλλαγές στην εσωτερική δομή του πηλού, όπως αυτή καθορίζεται από την πρωτεύουσα τεχνική. Έτσι, η ραδιογραφία, σε συνδυασμό με την οπτική επιθεώρηση, δίνει τη δυνατότητα προαγωγής των γνώσεων σχετικά με τους τρόπους κατασκευής αρχαίων αγγείων και κεραμικών. Δεδομένης μάλιστα της ευκολίας και της ταχύτητας με την οποία μπορούν να ληφθούν ραδιογραφικές εικόνες, καθώς επίσης και του γεγονότος ότι η ραδιογραφία είναι κατ' εξοχήν μη καταστρεπτική μέθοδος αντιμετώπισιμου κόστους, κατατάσσει τη μέθοδο στις ιδανικές για την εκτίμηση της εσωτερικής δομής των κεραμικών αλλά και άλλων υλικών που απασχολούν τους κλάδους της αρχαιολογίας και της αρχαιομετρίας.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Για την επιτυχημένη ραδιογράφιση οποιασδήποτε ύλης σε φιλμ (ή ακόμα και σε άλλες επιφάνειες σχηματισμού ραδιογραφικής εικόνας) είναι απαραίτητο να διατίθεται κατάλληλο διάγραμμα έκθεσης στη βάση του οποίου επιλέγονται ο χρόνος έκθεσης, τα κατάλληλα kV, τα κατάλληλα mA ανάλογα και με το πάχος του ραδιογραφούμενου δοκιμίου. Από όσα είναι γνωστά σήμερα, δεν φαίνεται να υπάρχουν κατάλληλα διαγράμματα έκθεσης για κεραμικά.

Για να καλυφθεί το κενό αυτό, παράχθηκε στα πλαίσια αυτής της Μεταπτυχιακής Εργασίας ένα τέτοιο διάγραμμα έκθεσης, κατάλληλο για κεραμικά και για τον εξοπλισμό και τα φιλμ που διατίθεται για ραδιογραφικούς σκοπούς στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ.

Με την ευκαιρία, δοκιμάστηκαν δύο μέθοδοι για την παραγωγή του διαγράμματος, αυτή που ονομάστηκε ΑΜΕΣΗ και αναφέρεται ρητά στη βιβλιογραφία και εκείνη που ονομάστηκε ΕΜΜΕΣΗ και υπονοείται στη βιβλιογραφία. Τα δύο διαγράμματα έκθεσης πρέπει να ταυτίζονται.

Διαπιστώθηκε ότι από την έμμεση μέθοδο προκύπτει διάγραμμα το οποίο είναι πολύ πιο προσεγγιστικό από το διάγραμμα που προκύπτει από την άμεση μέθοδο. Η κυριότερη αιτία των διαφορών εντοπίζεται στο ότι η χαρακτηριστική καμπύλη ενός τυπικού φιλμ ισχύει για ηλεκτρικά δυναμικά στην περιοχή των 100 – 200 kV και όχι για μικρότερα, όπως είναι αυτά που χρησιμοποιούνται στη ραδιογραφία της κεραμικής.

Παρόλα αυτά αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε μέθοδος για τη διόρθωση του διαγράμματος έκθεσης που προέκυψε από την έμμεση μέθοδο, ώστε τελικά το αποτέλεσμα να είναι παρόμοιο με αυτό της άμεσης μεθόδου. Για το σκοπό αυτό χρειάστηκε να βρεθεί νέα χαρακτηριστική καμπύλη για το εξεταζόμενο φιλμ, η οποία να ισχύει για ηλεκτρικά δυναμικά στην περιοχή από 40 έως 80 kV.

Το διάγραμμα έκθεσης που κατασκευάστηκε (μέθοδος αδιάφορη) αποδείχθηκε κατάλληλο για την καθαρή ραδιογράφιση ορισμένων θραυσμάτων αγγείων αρχαίας προέλευσης, για τη ραδιογράφιση των οποίων ενδιαφέρθηκε η Βρετανική Αρχαιολογική Σχολή της Αθήνας με τη σύμφωνη γνώμη της αντίστοιχης εφορίας της Αρχαιολογικής Υπηρεσίας.

Οι ραδιογραφικές εικόνες που προέκυψαν σε φιλμ είναι πολύ ικανοποιητικές και οδηγούν τους πιθανόν πιο έμπειρους από εμάς, αναλυτές σε συμπεράσματα για τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των θραυσμάτων.

Βεβαίως οι ραδιογραφήσεις αγγείων για αρχαιομετρικούς σκοπούς παρουσιάζουν εξαιρετικό επιστημονικό και ερευνητικό ενδιαφέρον. Παρόλα αυτά δεν είναι ασφαλώς οι μοναδικές που μπορούν να γίνουν σε αντικείμενα πολιτιστικού ενδιαφέροντος. Από τα πλέον σημαντικά τέτοια αντικείμενα είναι τα βιβλία, η ραδιογράφιση των οποίων μπορεί να αποκαλύψει κρυμμένες εικόνες, διάφορα στρώματα διαδοχικών εγγραφών και άλλα πολλά.

Προτείνεται ότι, με την εμπειρία που αποκτήθηκε σε αυτήν την Μεταπτυχιακή, να παραχθεί και διάγραμμα έκθεσης χαρτιού με το οποίο να διευκολυνθούν και τέτοιες ραδιογραφικές αναλύσεις.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Berg I., "Looking through pots: Recent advances in ceramics X-Radiography, Journal of Archaeological Science, 35:1177-1188, 2008
2. Berg I., "X-radiography of Knossian Bronze Age vessels: Assessing our knowledge of primary forming techniques", The Annual of the British School at Athens, 104: 137 - 173, 2009
3. GE Inspection Technologies, General Electric Company, "Industrial Radiography; Image forming techniques" GE imaging at work, GEIT-30158(01/07), 2008
4. Lang J. and Middleton A. (Eds.), "Radiography of Culture Material", Elsevier, Second Edition 2005
5. Quinn R.A., Sigl C.C., Callinan J.J., "Radiography in Modern Industry", Eastman Kodak Company, 1980
6. Έξαρχος Γ., "Εμφάνιση και ψηφιοποίηση φιλμ στην εγκατάσταση Βιομηχανικής Ραδιογραφίας του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας με πρακτικές εφαρμογές", Διπλωματική Εργασία, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ, Αθήνα, 2010
7. Θεοδωρόπουλος, Γ.-Β., "Προσομοίωση βιομηχανικής ραδιογραφίας με τον κώδικα XRSIM", Διπλωματική Εργασία, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ, Αθήνα, 2009
8. Λεβέντης Σ., "Ο κώδικας υπολογιστικής τομογραφίας SNARK09: Εγκατάσταση σε Λειτουργικό Σύστημα LINUX, Συνοπτική παρουσίαση και αρχική αξιολόγηση για μη καταστρεπτικό έλεγχο υλικών", Μεταπτυχιακή Εργασία, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ, ΔΠΜΣ Εφαρμοσμένη Μηχανική ΕΜΠ, Αθήνα, 2016
9. Παπαδόπουλος Δ., "Προσεγγιστικοί ραδιογραφικοί συντελεστές ισοδυναμίας πάχους για διάφορα στοιχεία και τα μίγματά τους", Διπλωματική Εργασία, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ, Αθήνα, 2014
10. 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