



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ**  
**ΣΧΟΛΗ ΑΝΘΡΩΠΙΣΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΑΣ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΡΧΑΙΟΜΕΤΡΙΑΣ**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

της Ασημίνας Βαφειάδου

*«Χρονολόγηση με φωταύγεια αιγυπτιακών και ελληνικών μνημείων»*

Επόπτης:  
Ι. Λυριτζής, Καθ. ΤΜΣ, Παν/μίου Αιγαίου

Συμβουλευτική επιτροπή:  
Α. Σάμψων, Καθ. ΤΜΣ, Παν/μίου Αιγαίου  
Γ. Κίτης, Αν. Καθ. Τμήματος Φυσικής, ΑΠΘ

Ρόδος, 2006

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κατάλογος εικόνων .....	I
Κατάλογος πινάκων .....	IX
Κατάλογος σχημάτων .....	XV
Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> : Μέθοδοι χρονολόγησης με φωταύγεια	
1. Εισαγωγή .....	1
2. Θερμοφωταύγεια .....	1
2.1. Αρχές μεθόδου .....	1
2.2. Τεχνικές χρονολόγησης με θερμοφωταύγεια .....	10
2.2.1. Δειγματοληψία .....	10
2.2.2. Τεχνικές χρονολόγησης .....	11
2.3. Παράγοντες που επηρεάζουν την ηλικία .....	13
2.4. Όργανο μέτρησης θερμοφωταύγειας .....	15
2.5. Πρωτόκολλα προσδιορισμού ισοδύναμης δόσης .....	17
2.5.1. Πρωτόκολλο Προσθετικών Δόσεων Πολλαπλών Δισκίων.....	17
2.5.2. Πρωτόκολλο Ανασύστασης Πολλαπλών Δισκίων .....	18
2.6. Σφάλματα .....	18
3. Οπτική θερμοφωταύγεια .....	19
3.1. Αρχές μεθόδου .....	19
3.1.1. Δειγματοληψία.....	20
3.1.2. Καταλληλότητα δειγμάτων για χρονολόγηση .....	21
3.2. Όργανο μετρήσεων .....	22
3.3. Πρωτόκολλα προσδιορισμού Ισοδύναμης Δόσης .....	23
3.4. Σφάλματα .....	24
4. Οπτικά Προτρεπόμενη Φωταύγεια .....	25
4.1. Αρχές μεθόδου .....	25
4.2. Όργανο μετρήσεων .....	27
4.3. Τεχνικές και πρωτόκολλα μετρήσεων .....	29
4.3.1. Πρωτόκολλα Πολλαπλών Δισκίων .....	29
4.3.2. Πρωτόκολλα Μοναδικού Δισκίου .....	30
4.3.2.1. Πρωτόκολλο Προσθετικών Δόσεων Μοναδικού Δισκίου .....	30
4.3.2.2. Πρωτόκολλο Ανασύστασης Δόσεων Μοναδικού Δισκίου .....	33
4.4. Χρονολογήσεις με μετρήσεις Δειγμάτων Μοναδικού Κόκκου .....	37
4.5. Πρόταση για νέα μέθοδο χρονολόγησης ασβεστολιθικών πετρωμάτων .....	39
5. Προσδιορισμός ισοδύναμης δόσης .....	46
5.1. Οπτική Θερμοφωταύγεια .....	46
5.1.1. Τεχνική προσθετικών δόσεων πολλαπλών δισκίων .....	46
5.1.2. Τεχνική ανασύστασης δόσεων πολλαπλών δισκίων .....	50
5.2. Οπτική φωταύγεια .....	50
5.2.1. Τεχνική προσθετικών δόσεων μοναδικού δισκίου .....	50
5.2.2. Τεχνική ανασύστασης δόσεων μοναδικού δισκίου .....	52
Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> : Προσδιορισμός ετήσιων δόσεων	
1. Εισαγωγή .....	53
2. Μέθοδοι χημικής ανάλυσης .....	60
2.1. Φασματοσκοπία Ακτίνων-Χ Φθορισμού .....	61
2.1.1. Γεωμετρία.....	72
2.1.2. Πάχος δείγματος .....	75
2.1.3. Πείραμα κρίσιμου βάθους ανίχνευσης ιχνοστοιχείων .....	77
2.1.4. Χρόνος καταμέτρησης .....	80
2.1.5. Διάμετρος κόκκων του δείγματος .....	81
2.2. Νετρονική Ενεργοποίηση.....	84
2.3. Μετρητής άλφα σωματιδίων .....	86

2.3.1. Παράγοντες κανονικοποίησης .....	92
2.3.2. Εξισώσεις E. Rhodes .....	95
3. Συστήματα μετρήσεων ετήσιων δόσεων .....	100
3.1. Φορητός μετρητής γάμα ακτινοβολίας.....	100
3.2. Απαριθμητής Γερμανίου .....	100
3.3. Μετρητής γάμα ακτινοβολίας Risø.....	101
3.4. Πλαστικός σπινθηριστής βήτα σωματιδίων.....	104
3.5. Πολυμετρητής Χαμηλής Έντασης Βήτα Σωματιδίων (Risø) .....	106
Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> : Χρονολόγηση δειγμάτων	
1. Χρονολόγηση δειγμάτων από Αίγυπτο	
1.1 Περιοχή Ναός της Κοιλιάδας (Valley Temple), Μυκερίνου και Χεφρίνου .....	110
1.1 (1) RHO-98 (υλικό: γρανίτης, προέλευση: γρανιτένιο τυφλό δωμάτιο, κωδικός VT1).....	110
1.1 (2) RHO-99 (υλικό: ασβεστόλιθος, προέλευση: επάνω τυφλό δωμάτιο, κωδικός VT3).....	115
1.1 (3) RHO-103 (υλικό: αλάβαστρο, προέλευση: αλαβάστρινο δωμάτιο, κωδικός VT6).....	117
1.1 (4) RHO-104 (υλικό: αλάβαστρο, προέλευση: τοίχος αλαβάστρινου δωματίου, κωδικός VT7).....	141
1.1 (5) RHO-105 (υλικό: ασβεστόλιθος, προέλευση: οροφή ναού, κωδικός VT8)..	143
1.1 (6) RHO-106 (υλικό: ασβεστόλιθος, προέλευση: εσωτερικός τοίχος οροφής ναού, κωδικός: VT9a).....	147
1.1 (7) RHO-107 (υλικό: ασβεστόλιθος, προέλευση: εσωτερικός τοίχος οροφής ναού, κωδικός: VT9b).....	153
1.2 Περιοχή Ναός της Σφίγγας (Sphinx Temple), Γκίζα.....	155
1.2 (8) RHO-56 (υλικό: ασβεστόλιθος, προέλευση: εξωτερικός τοίχος, κωδικός: ST2).....	155
1.2 (9) RHO-57 (υλικό: γρανίτης, κωδικός: ST3).....	164
1.2 (10) RHO-58 (υλικό: γρανίτης, προέλευση: εξωτερικός τοίχος, επαφή με βραχώδες υπόστρωμα, κωδικός: ST4).....	171
1.2 (11) RHO-59 (υλικό: γρανίτης, προέλευση: τάφος-αυλάκι, κωδικός: ST5)....	180
1.3 Περιοχή Ναός του Σέθου 1 <sup>ου</sup> , Άβυδος.....	187
1.3 (12) RHO-109 (υλικό: ασβεστόλιθος, κωδικός: SETI I).....	187
1.3 (13) RHO-110 (υλικό: ψαμμίτης, προέλευση: τυφλό δωμάτιο 1 <sup>ου</sup> ορόφου, κωδικός: SETI II).....	202
1.3 (14) RHO-111 (υλικό: ψαμμίτης, προέλευση: ταβάνι του ναού στον επάνω διάδρομο, κωδικός: SETI IV).....	209
1.4 Περιοχή Οσίριον, Άβυδος.....	215
1.4 (15) RHO-136 (υλικό: ασβεστόλιθος, προέλευση: τυφλό δωμάτιο πρώτου ορόφου, κωδικός: OS3).....	215
1.4 (16) RHO-137 (υλικό: ψαμμίτης, κωδικός: OS5).....	219
1.4 (17) RHO-138 (υλικό: ψαμμίτης, προέλευση: εξωτερικός τοίχος του συμπλέγματος, κωδικός: OS6).....	233
1.4 (18) RHO-139 (υλικό: γρανίτης, προέλευση: τμήμα από τις κολώνες του ναού, κωδικός: OS7).....	244
1.5 Περιοχή Qasr el-Sagha, Φαγιούμ.....	277
1.5 (19) RHO-129 (υλικό: ασβεστόλιθος, προέλευση: ο δεύτερος από αριστερά από τους επτά κίονες, κωδικός: QAS1).....	277
1.5 (20) RHO-130 (υλικό: ασβεστόλιθος, προέλευση: σκοτεινός διάδρομος, κωδικός: QAS2).....	281
1.5 (21) RHO-131 (υλικό: ψαμμίτης, προέλευση: εσωτερικό δωμάτιο μνημείου, κωδικός: QAS3).....	288
1.6 Πυραμίδα του Μυκερίνου, Γκίζα.....	311
1.6 (22) RHO-119 (υλικό: γρανίτης, προέλευση: βάση της πυραμίδας, κωδικός: MYK).....	311

1.7 Osirion Shaft, Γκίζα.....	323
1.7 (23) RHO-53 (υλικό: δακίτης, προέλευση: 2 <sup>η</sup> σαρκοφάγος 2 <sup>ου</sup> επιπέδου, κωδικός: OT-1).....	323
1.7 (24) RHO-54 (υλικό: γρανίτης, προέλευση: 3 <sup>η</sup> σαρκοφάγος 2 <sup>ου</sup> επιπέδου, κωδικός: OT-2).....	331
1.8 Τάφος Κασεκεμούι, Άβυδος.....	338
1.8 (25) RHO-134 (υλικό: ασβεστόλιθος, κωδικός: KH1).....	338
1.8 (26) RHO-135 (υλικό: ασβεστόλιθος, κωδικός: KH2).....	346
1.8 (27) RHO-132 (υλικό: κεραμικό, κωδικός: KH1c).....	350
1.8 (28) RHO-133 (υλικό: κεραμικό, κωδικός: KH2c).....	353
2. Χρονολόγηση δειγμάτων από τον ελλαδικό χώρο.....	356
2.1 Περιοχή Στρόφιλας, Άνδρος.....	356
2.1 (29) STR1 (υλικό: ασβεστόλιθος, προέλευση: εξωτερικό τοίχος οικισμού).....	356
2.1 (30) STR2 (υλικό: ασβεστόλιθος, προέλευση: εξωτερικό τοίχος οικισμού).....	363
<b>2.2</b>	<b>Περιοχή</b>
<b>Δελφών.....</b>	<b>3</b>
<b>67</b>	
2.2 (31) <i>Κουμουλα</i> (υλικό: ασβεστόλιθος, προέλευση: περιοχή <i>Κουμούλα Δελφών</i> ).....	367
2.2 (32) <i>Elafokastro</i> (υλικό: ασβεστόλιθος, προέλευση: <i>Κασταλία πηγή, Παρνασσός, Δελφοί</i> ).....	376
<b>2.3</b>	<b>Σπήλαιο</b>
<b>Βοιωτία.....</b>	<b>381</b>
2.3 (33) SARKN (υλικό: καμένο χώμα, προέλευση: σπήλαιο Σαρακηνού, τομή B7, T3).....	381
<b>2.4</b>	<b>Περιοχή</b>
<b>Ιθάκη.....</b>	<b>38</b>
<b>4</b>	
2.4 (34) ΙΤΗ1 (υλικό: ασβεστόλιθος, προέλευση: Κρήνη Οδυσσέα).....	384
2.4 (35) Krousta (υλικό: ασβεστόλιθος, προέλευση: Κρήνη Οδυσσέα).....	386
2.4 (36) ΙΤΗ3 (υλικό: ασβεστόλιθος, προέλευση: σχολή του Ομήρου, εξωτερικός τοίχος).....	390
2.4 (37) ΙΤΗ4 (υλικό: ασβεστόλιθος, προέλευση: σχολή του Ομήρου, οφιοειδής τοίχος).....	410
2.5 Περιοχή Φτελιά,	
Μύκονος.....	420
2.5 (38) 1B/B4 (υλικό: γρανίτης).....	420
2.5 (39) 1A/B4 (υλικό: χώμα).....	430
2.5 (40) 2/A5 (υλικό: διορίτης).....	432
Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup> : Σχόλια – Συμπεράσματα.....	434
1. Πρόταση νέας μεθόδου χρονολόγησης ασβεστολιθικών πετρωμάτων.....	434
2. Οι ηλικίες των χρονολογημένων δειγμάτων με μεθόδους φωταύγειας.....	435
3. Μέθοδοι ανάλυσης.....	437
Παράρτημα.....	439
1. Αίγυπτος.....	439

1.1 Περιοχή Γκίζα.....	439
1.1.1. Ναός της Σφίγγας.....	439
1.1.2. Ο Ναός της Κοιλιάδας στο Σύμπλεγμα της Πυραμίδας του Χεφρίνου.....	441
1.1.3. Η Πυραμίδα του Μυκερίνου.....	444
1.1.4. Ο Ναός της Κοιλιάδας στο σύμπλεγμα της Πυραμίδας του Μυκερίνου.....	448
1.2 Περιοχή Άβυδος.....	451
1.2.1 Ταφικό σύμπλεγμα Khasekhemwy.....	452
1.2.2 Ναός Σέθου του 1 <sup>ου</sup> .....	454
1.2.3 Οσίριον.....	456
1.3 Περιοχή Φαγιούμ.....	457
1.3.1 Ναός Qasr el-Sagha.....	457
2. Ελλαδικός χώρος.....	458
2.1 Στρόφιλας, Άνδρος.....	458
2.2 Δελφοί.....	460
2.2.1 Ελαφόκαστρο.....	460
2.2.2 Κουμούλα.....	461
2.3 Σπήλαιο Σαρακηνό, Βοιωτία.....	461
2.4 Ιθάκη.....	462
2.5 Φτελιά, Μύκονος.....	464
Βιβλιογραφία.....	465

## Πρόλογος

Τα μεγαλιθικά κτίσματα είναι ένα σημαντικό κομμάτι της ιστορίας μιας περιοχής. Τα υλικά κατασκευής, το αρχιτεκτονικό σχέδιο, δίνουν πολλές πληροφορίες για το λαό, την κοινωνική διάρθρωση και τη θρησκεία του. Οι Πυραμίδες στην Αίγυπτο δεν ήταν απλοί βασιλικοί τάφοι. Οι Φαραώ Βασιλείς θεωρούνταν μετενσάρκωση του θεού Ώρου, θεού του Ήλιου. Ως ταφικά συμπλέγματα συγκέντρωναν γύρω τους πλήθος κόσμου, οι οποίοι πρόσφεραν τις υπηρεσίες τους στη συντήρηση και στην επιβίωση του συμπλέγματος.

Το να κρατάς ένα μικρό κομμάτι της ιστορίας ενός λαού στα χέρια σου είναι από μόνο του ενδιαφέρον. Το να κρατάς στα χέρια σου ένα κομμάτι γης του ομηρικού Οδυσσέα και να προσπαθείς να φωτίσεις ένα μέρος της ιστορίας ενός τόσο σημαντικού μνημείου της παγκόσμιας αρχαιολογίας, είναι συναρπαστικό.

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Αρχαιομετρίας του Πανεπιστημίου Αιγαίου στη Ρόδο και έχει θέμα *«Χρονολόγηση με φωταύγεια αιγυπτιακών και ελληνικών μνημείων»*, υπό την εποπτεία του Καθ. Ι. Λυριτζή, τον οποίο και ευχαριστώ θερμά για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο αξιόλογο θέμα και για τις πολύτιμες συμβουλές, την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια των ερευνών και το πλούσιο φωτογραφικό υλικό που μου προσέφερε. Ευχαριστώ επίσης τους καθηγητές μου, κ. Γ. Κίτη για τις βάσεις στα πρώτα μου βήματα στην έρευνα και στο φαινόμενο της φωταύγειας, κ. Α. Σάμπων για τα δείγματα που μας παραχώρησε για χρονολόγηση, και κ. Π. Κουσούλη για την πολύτιμη βοήθειά του σε θέματα αιγυπτιολογίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Ίδρυμα Ελένη Νάκου για τη χρηματοδότηση της τετράμηνης παραμονής μου στη Δανία, στο Διεθνές Εργαστήριο Risø, τον Επ. Καθ. Α. Murray για τις κατευθύνσεις του και το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ) για την οικονομική βοήθεια καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στο Ινστιτούτο Πολιτιστικής και Εκπαιδευτικής Τεχνολογίας (ΙΠΕΤ) και τον Δρ. Νέστορα Τσιρλιγκάνη για τη φιλοξενία στο Εργαστήριο Αρχαιομετρίας και τον Δρ. Γιώργο Πολυμέρη για τις μετρήσεις ισοδύναμης δόσης σε δείγματα και τις μετρήσεις οπτικής φωταύγειας στα ασβεστολιθικά δείγματα.

Καθοριστικής σημασίας για την αποπεράτωση της παρούσας διατριβής ήταν η βοήθεια δυο στενών μου συνεργατών στο Εργαστήριο Αρχαιομετρίας: της Δρ. Νίκης Δριβαλιάρη, η οποία συνέβαλε στο πείραμα εξαγωγής κόκκων χαλαζία από ασβεστόλιθο, και της υποψήφιας διδάκτορος Ιωάννας Αρφαρά, η οποία αφιέρωσε πολύτιμο χρόνο στην κονιορτοποίηση των δειγμάτων με εξοπλισμό του Εργαστηρίου Ορυκτολογίας του Πανεπιστημίου Αθηνών και του Χημείου του Κράτους στη Ρόδο.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την κατανόηση και την αμέριστη συμπαράστασή της.

## Κεφάλαιο 1ο

### Μέθοδοι χρονολόγησης με φωταύγεια

#### 1. Εισαγωγή

**Μ**έχρι πρόσφατα ο καθορισμός της ηλικίας μεγαλιθικών δομών και τέχνεργων με φυσικές μεθόδους ήταν δύσκολος. Η χρονολόγηση βασιζόταν σε ευρήματα από τις αρχαιολογικές ανασκαφές που σχετίζονταν με την περίοδο κατασκευής και όχι από υλικά.

Με τον όρο φωταύγεια θεωρούμε το φυσικό φαινόμενο πλήρωσης και απελευθέρωσης ηλεκτρονίων από ηλεκτρονικές παγίδες, ατέλειες, των κρυστάλλων των ορυκτών. Η πλήρωση των παγίδων προκαλείται από την περιβαλλοντική ιοντική ακτινοβολία και η απελευθέρωση από τη θέρμανση ή από οπτική/υπέρυθρη ακτινοβολία (με τη χρήση laser). Για να μπορέσει να εφαρμοστεί η μέθοδος τα υλικά θα πρέπει να έχουν κάποιο από τα παρακάτω ορυκτό: χαλαζία, άστριο, ζirkόνιο και/ή ασβεστίτη.

Υπάρχουν δύο μέθοδοι χρονολόγησης που βασίζονται στο φαινόμενο αυτό. Πρόκειται για τη Θερμοφωταύγεια (ΘΦ), που είναι η θερμική απόσπαση των ηλεκτρονίων από τις παγίδες με θέρμανση μέχρι και τους 500°C, και για την Οπτικά Προτρεπόμενη Φωταύγεια (ΟΠΦ) κατά την οποία η απελευθέρωση των ηλεκτρονίων γίνεται με ακτινοβολία διαφόρων μηκών κύματος του οπτικού φάσματος (χρησιμοποιείται κυρίως το υπέρυθρο και το μπλε).

Τα υλικά τα οποία χρονολογούνται με τις μεθόδους αυτές είναι κεραμικά, καμένο χώμα ή πέτρες, κονιάματα, λεπτόκοκκα ιζήματα που έχουν αποθεθεί σε ήρεμες συνθήκες, παλαιοεδάφη, μεγαλιθικά μνημεία, αγάλματα. Θα πρέπει να πούμε ότι οι μέθοδοι χρονολογούν το τελευταίο γεγονός που προκάλεσε απελευθέρωση ηλεκτρονίων από τις παγίδες των ορυκτών στα υλικά, είτε αυτό ήταν θέρμανση είτε έκθεση στο ηλιακό φως (Λυριτζής, 1994, 2005).

#### 2. Θερμοφωταύγεια

##### 2.1 Αρχές μεθόδου

Με τον όρο θερμοφωταύγεια εννοούμε το φαινόμενο της εκπομπής φωτός μετά από θερμική διέγερση. Δεν πρέπει να συγχέεται με το φως που εκπέμπεται αυθόρμητα από μια

ουσία η οποία θερμαίνεται για να πυρακτωθεί. Είναι η θερμικά προτρεπόμενη εκπομπή φωτός που ακολουθεί προηγούμενη απορρόφηση ενέργειας από ακτινοβολία (McKeever, 1985). Είναι μια περίπτωση φωσφορισμού<sup>8</sup> που παρατηρείται κάτω από συνθήκες σταθερά αυξανόμενης θερμοκρασίας. Χαρακτηριστικό της θερμοφωταύγειας είναι ότι μετά την πρώτη θέρμανση του υλικού και την εκπομπή φωτός, το υλικό δεν μπορεί να εκπέμψει ξανά θερμοφωταύγεια απλά ψύχοντας και θερμαίνοντάς το ξανά. Για να επάγουμε εκ νέου ΘΦ θα πρέπει να εκτεθεί το υλικό σε ακτινοβολία και στη συνέχεια να θερμανθεί ξανά.

Το φαινόμενο παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1663 σε άρθρο της Royal Society του Λονδίνου από τον Robert Boyle, στο οποίο περιέγραψε το αποτέλεσμα εκπομπής φωτός από ένα διαμάντι όταν αυτό θερμαίνεται στη θερμοκρασία του ανθρώπινου σώματος.

Η χρήση της αποθηκευμένης ΘΦ ενός ορυκτού κάποιου υλικού για τον προσδιορισμό της ηλικίας του προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Daniels. Οι πρώτες εφαρμογές έγιναν το 1960 από τους Kennedy και Knorff οι οποίοι έκαναν πειράματα σε ελληνικά αγγεία. Στη συνέχεια έγινε χρήση της ιδέας της πλήρωσης των παγίδων στους κρυστάλλους επιτρέπει χρονολόγηση υλικών με ακρίβεια  $\pm 20\%$  (Tite and Waine, 1962). Κατόπιν έγιναν παρατηρήσεις πάνω στην ανομοιογένεια διαφόρων υλικών (Fremlin and Srirath, 1964) και αυτές πάνω σε μετρήσεις κρυστάλλων χαλαζία (Ichikawa, 1965; Fleming, 1966) συνέβαλαν στη διόρθωση των απόλυτων ηλικιών. Από το σημείο αυτό και μετά οι μελέτες εξελίχθηκαν με ταχεία πρόοδο και σε άλλα υλικά εκτός από τα κεραμικά.

Έτσι η μέθοδος εφαρμόστηκε σε υλικά όπως καμένα ιζήματα, κεραμικά, καμένες πέτρες, κεραμικούς και μεταλλευτικούς κλιβάνους, υλικά δηλαδή που έχουν θερμανθεί τυχαία ή εσκεμμένα σε θερμοκρασίες πάνω από τους  $500^{\circ}\text{C}$  για την έναρξη του «χρόνου μηδέν».

Μπορούμε να διακρίνουμε επιπλέον δύο κατηγορίες υλικών στα οποία εφαρμόζεται η μέθοδος αυτή, αυτά που είναι βιολογικής και αυτά που είναι γεωλογικής προέλευσης. Στα βιολογικής προέλευσης υλικά περιλαμβάνονται απολιθωμένοι οδόντες και οστά, τα οποία συλλέχθηκαν σε περιοχή της Ουγγαρίας, άλλοτε κατοικία του Homo Sapiens, με αποτέλεσμα 50.000 χρόνια. Επίσης έχει δειχθεί ότι σε σμάλτο οδόντων ή υλικό ίδιας φύσης η ΘΦ δίνει ηλικίες μέχρι 2-3 εκατομμύρια χρόνια.

<sup>8</sup> Η εκπομπή φωτός συμβαίνει σε χαρακτηριστικό χρόνο  $\tau_c$  μετά την απορρόφηση της ακτινοβολίας. Η παράμετρος αυτή μας επιτρέπει να κατηγοριοποιήσουμε τη διαδικασία της φωταύγειας. Έτσι μπορεί να γίνει διαχωρισμός ανάμεσα στο φθορισμό, με  $\tau_c < 10^{-8}\text{s}$ , και στο φωσφορισμό, με  $\tau_c > 10^{-8}\text{s}$ . Η εκπομπή φθορισμού συμβαίνει ταυτόχρονα με την απορρόφηση ακτινοβολίας και σταματάει με την παύση της ακτινοβολίας, ενώ ο φωσφορισμός χαρακτηρίζεται από μια καθυστέρηση ανάμεσα στην έναρξη της ακτινοβολίας και ένα μέγιστο χρόνο στον οποίο φτάνει την μέγιστη έντασή του. Επιπλέον, ο φωσφορισμός μπορεί να χωριστεί σε δύο τύπους, στη βραχείας περιόδου με  $\tau_c < 10^{-4}\text{s}$  και στη μακράς περιόδου  $\tau_c > 10^{-4}\text{s}$  (McKeever, 1985). Συνεχής εκπομπή φωτός (φωσφορισμός) μπορεί να παρατηρηθεί ακόμα και μετά την απομάκρυνση της πηγής ακτινοβολίας. Η εκπομπή θα συνεχίσει με φθίνουσα ένταση μέχρι να αδειάσουν οι μετασταθείς καταστάσεις από φορτία. Ο φωσφορισμός στην περίπτωση αυτή θα είναι πιο λαμπρός και ο χρόνος εξασθένισης θα είναι πιο σύντομος λόγω της ταχύτερης μείωσης της μετασταθούς κατάστασης. Στην περίπτωση αυτή ο φωσφορισμός καλείται θερμοφωταύγεια (Furetta et al., 1998).



Στα υλικά γεωλογικής προέλευσης περιλαμβάνεται ένας μεγάλος αριθμός ορυκτών. Τα ορυκτά αυτά που βρίσκονται σε φυσική κατάσταση αποθηκεύουν θερμοφωταύγεια από τη στιγμή του σχηματισμού τους. Το γεγονός όμως αυτό δεν μπορεί να δείξει την πραγματική τους ηλικία, γιατί μια ορισμένη δόση ακτινοβολίας οδηγεί στο φαινόμενο του κορεσμού και στην ανικανότητα αποθήκευσης περισσότερης ΘΦ. Αν όμως ένα τέτοιο ορυκτό κάποια στιγμή θερμάνθηκε τυχαία, από ηφαιστειο για παράδειγμα, ή από ανθρώπινη ενέργεια, (εστίες φωτιάς ή κλίβανοι) σε τέτοια θερμοκρασία ικανή να καταστρέψει όλη τη γεωλογική ΘΦ (αυτή που αποθήκευσε το ορυκτό από τη στιγμή του σχηματισμού του μέχρι εκείνη τη στιγμή) τότε αρχίζει νέα καταγραφή απορροφούμενης δόσης, δηλαδή επαναλειτουργεί το ΘΦ ρολόι, χρόνος μηδέν (υπολογισμός της ηλικίας σε μια τέτοια περίπτωση θα μας δώσει την τελευταία θέρμανση του υλικού). Τέτοια υλικά είναι ο πυριτόλιθος, ο οψιδιανός, καμένες πέτρες, καμένο χώμα, γρανίτες, ηφαιστειογενή πετρώματα, μετεωρίτες.

Πρέπει να σημειώσουμε στο σημείο αυτό ότι σε κάποια υλικά δεν είναι απαραίτητη η θέρμανση για το μηδενισμό του ΘΦ ρολογιού. Το ρόλο της θέρμανσης παίζουν στην περίπτωση αυτή οι ηλιακές ακτίνες. Τα υλικά αυτά είναι τα ιζήματα σπηλιών, λιμνών, ωκεανών, και τα ιζήματα loess (άμμος προερχόμενος από αιολική ενέργεια).

Ο μηχανισμός του φαινομένου της ΘΦ των κρυσταλλικών υλικών βασίζεται στα ίχνη ποσοτήτων (ppm) Ουρανίου-238, Θορίου-232 και Καλίου-40, τα οποία εκπέμπουν ακτινοβολίες τύπου α, β και γ. οι ραδιενεργές αυτές ακτινοβολίες όταν διέρχονται από τους κρυσταλλικούς κόκκους του υλικού δημιουργούν φαινόμενα ιονισμού και μετατόπισης. Το αποτέλεσμα αυτών των φαινομένων είναι η δημιουργία οπών (ιονισμός – απόσπαση ηλεκτρονίων) και πλεγματικών ατελειών.

Ο μηχανισμός της θερμοφωταύγειας βασίζεται στην αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων και των οπών με τα δύο είδη πλεγματικών ατελειών που πρέπει να υπάρχουν για να έχουμε ΘΦ. Τα δύο αυτά είδη είναι:

α) οι παγίδες ηλεκτρονίων, δηλαδή παγίδευση ηλεκτρονίων και αποδέσμευσή τους αφού διεγερθούν, όπως οι ατέλειες Schottky (παγίδες-κενά που δημιουργούνται όταν ένα άτομο αποσπάται από τη θέση του και δεν επιστρέφει), και

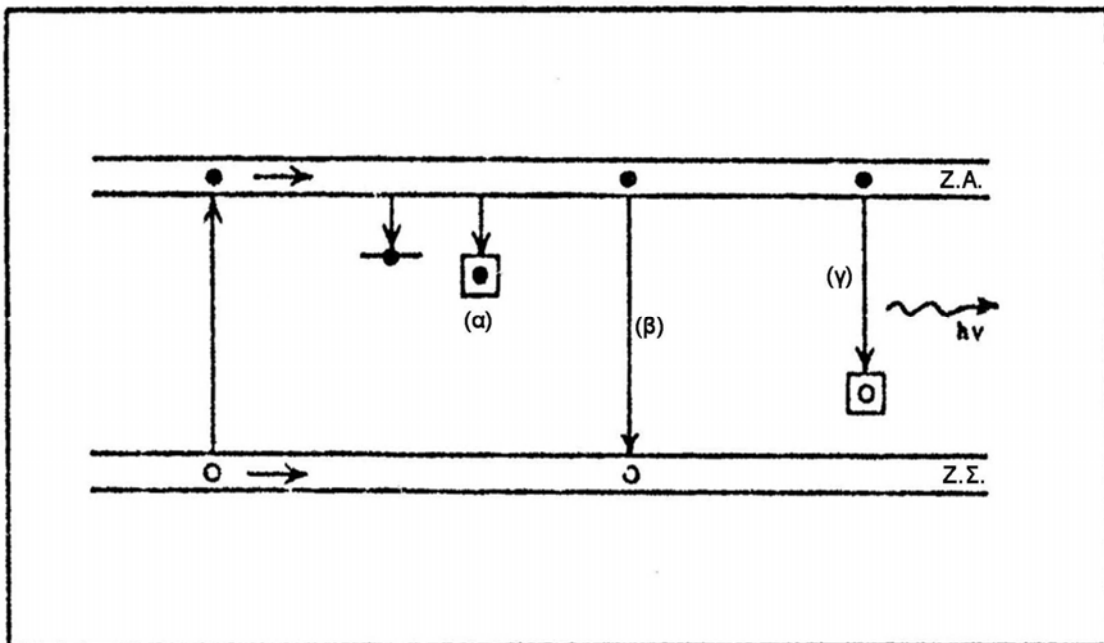
β) τα φωταυγή ή χρωματικά κέντρα, δηλαδή επανασύνδεση οπών και ηλεκτρονίων με δημιουργία φωτός, φωταύγειας. Για παράδειγμα, αρνητικά κενά είναι περιοχές όπου συσσωρεύεται θετικό φορτίο, γιατί το αρνητικό ιόν το οποίο θα βρισκόταν στη θέση αυτή λείπει και ο κρύσταλλος δε θα έμενε θετικά φορτισμένος. Σαν αποτέλεσμα της ιονιστικής ακτινοβολίας, ένα ηλεκτρόνιο είναι ελεύθερο να περιπλανηθεί μέσα στον κρύσταλλο και μπορεί να παγιδευτεί στο κενό. Το κενό αυτό ονομάζεται F-κέντρο. Το κατιονικά κενά αναπαριστούν τις οπές και τα κέντρα αυτά λέγονται V-κέντρα (Furetta et al., 1998).

Το φαινόμενο περιλαμβάνει δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο το υλικό εκτίθεται σε ακτινοβολία, σωματιδιακής ή ηλεκτρομαγνητικής φύσεως, σε συγκεκριμένη θερμοκρασία. Κατά

το δεύτερο στάδιο η διέγερση διακόπτεται και το δείγμα θερμαίνεται. Παρατηρήθηκε ότι καθώς η θερμοκρασία ανεβαίνει το δείγμα εκπέμπει φως. στα συνήθη πειράματα θερμοφωταύγειας, το σύστημα ακτινοβολείται σε θερμοκρασία στην οποία η ένταση του φωσφορισμού είναι χαμηλή. Μετά θερμαίνεται σε μια θερμοκρασιακή περιοχή όπου ο φωσφορισμός είναι έντονος, μέχρι τη θερμοκρασία στην οποία όλα τα φορτία να έχουν θερμικά διεγερθεί έξω από τις μετασταθείς τους καταστάσεις και το φως να χαθεί τελείως (Furetta et al., 1998).

- Πρώτο στάδιο: ακτινοβόληση

Η ακτινοβόληση παράγει ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές. Τα ηλεκτρόνια τότε είναι ελεύθερα να κινηθούν μέσα στο στερεό στη ζώνη αγωγιμότητας για μικρό χρονικό διάστημα και μπορεί, είτε να παγιδευτούν σε ατέλειες, Σχ. 1.1α, είτε να πέσουν πίσω στη ζώνη σθένους και να επανασυνδεθούν με τις οπές με εκπομπή ακτινοβολίας (φθορισμός) ή χωρίς, Σχ. 1.1β, είτε να συνδεθούν με κέντρα φωταύγειας, πιθανώς πολύ βαθιές παγίδες, τα οποία έχουν ήδη ενεργοποιηθεί από οπές σαν αποτέλεσμα της ακτινοβόλησης. Η απενεργοποίηση των κέντρων με την εκπομπή φωτός, Σχ. 1.1γ, καλείται ραδιοφωταύγεια. Η ίδια διαδικασία μπορεί να εξηγηθεί και για τις οπές.



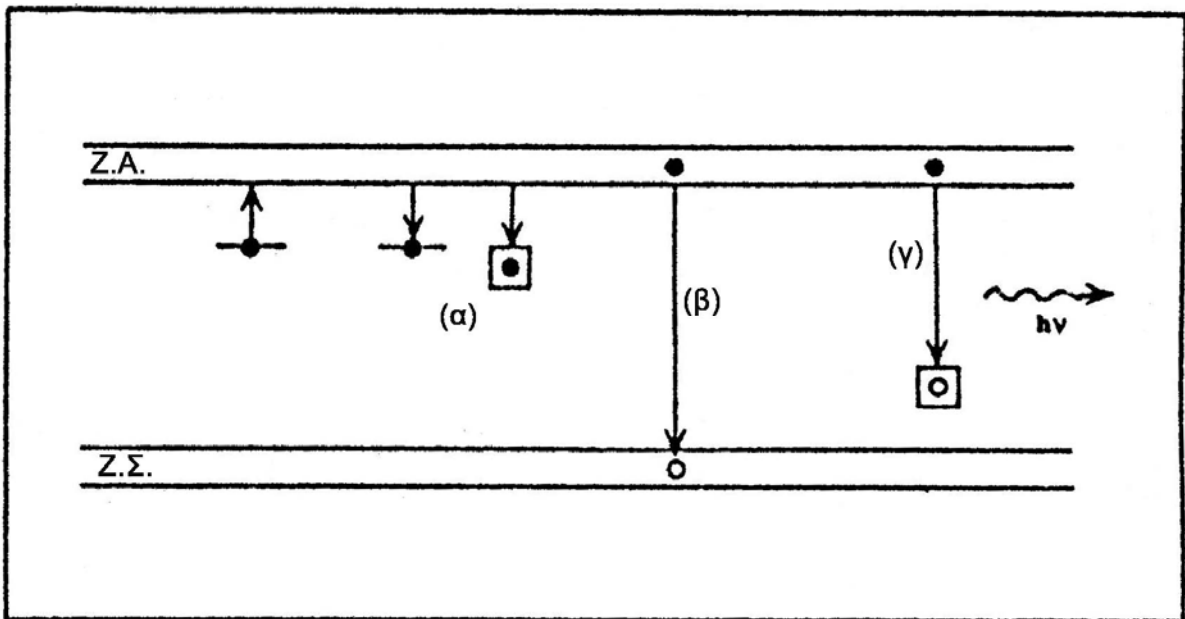
Σχ. 1.1: Διεργασίες που δημιουργούνται από την ακτινοβόληση στην κρυσταλλική δομή του υλικού. Τα ηλεκτρόνια από τη ζώνη αγωγιμότητας μπορούν είτε να παγιδευτούν σε ατέλειες (α), είτε να πέσουν πάλι στη ζώνη σθένους και επανασυνδεόμενα με οπές με ταυτόχρονη εκπομπή

ακτινοβολίας (φθορισμός) ή χωρίς ( $\beta$ ), είτε να συνδεθούν με κέντρα φωταύγειας ( $\gamma$ ) (Furetta et al., 1998).

- Δεύτερο στάδιο: θέρμανση

Όπως φαίνεται στο Σχ. 1.2, τα παγιδευμένα ηλεκτρόνια στις μετασταθείς καταστάσεις παίρνουν αρκετή ενέργεια για να διαφύγουν από τις παγίδες προς τη ζώνη αγωγιμότητας. Τώρα, μπορεί να παγιδευτούν ξανά είτε σε ατέλειες (Σχ. 1.2α), είτε να πέσουν πάλι πίσω στη ζώνη σθένους και να επανασυνδεθούν με τις οπές εκπέμποντας ή όχι ακτινοβολία (Σχ. 1.2β), είτε να επανασυνδεθούν ακτινοβολώντας σε μια ενεργοποιημένη οπή κέντρου φωταύγειας (Σχ. 1.2γ).

Μια απ' ευθείας ακτινοβολούσα μεταπήδηση των ηλεκτρονίων από τη ζώνη αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους δημιουργεί ακτινοβολία που έχει κβάντο ενέργειας μεγαλύτερο ή ίσο με το ενεργειακό χάσμα και συνεπώς η αυτόματη απορρόφηση συμβαίνει με μεγάλη πιθανότητα.

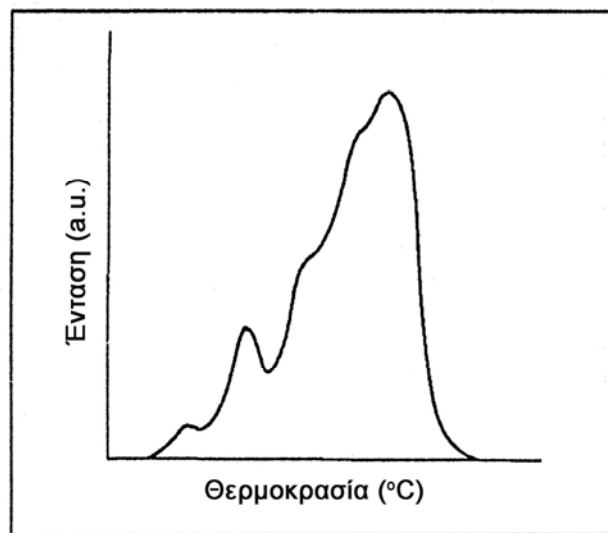


Σχ. 1.2: Διεργασίες που δημιουργούνται κατά τη θέρμανση ενός ακτινοβολημένου κρυστάλλου. Τα παγιδευμένα ηλεκτρόνια στις μετασταθείς καταστάσεις παίρνουν ενέργεια για να διαφύγουν προς τη ζώνη αγωγιμότητας. Από εκεί μπορούν είτε να παγιδευτούν ξανά στις ατέλειες (α), είτε να πέσουν πάλι στη ζώνη σθένους (β) (Furetta et al., 1998). είτε να επανασυνδεθούν ακτινοβολώντας σε μια ενεργοποιημένη οπή κέντρου φωταύγειας (Σχ. 1.2γ).

Όσο θερμαίνεται ο κρύσταλλος απελευθερώνονται ηλεκτρόνια από παγίδες κατάλληλου βάθους. Επίσης με την αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη θέρμανση του υλικού αδειάζουν όλο

και πιο βαθιές παγίδες. Ο ρυθμός με τον οποίο απελευθερώνονται τα ηλεκτρόνια από τις παγίδες μπορεί να επιταχυνθεί αν η θερμοκρασία του κρυστάλλου αυξηθεί. Στην πράξη η θερμοκρασία του κρυστάλλου αυξάνει γραμμικά με το χρόνο από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, 20°C, μέχρι μια μέγιστη θερμοκρασία, περίπου 500°C με σταθερό ρυθμό θέρμανσης, 1 – 10°C/s.

Η θερμοφωταύγεια μετριέται με έναν φωτοπολλαπλασιαστή ευαίσθητο στο ορατό φως που θα δώσει ηλεκτρικό ρεύμα ανάλογο με την ένταση του φωτός στο οποίο εκτίθεται. Το ρεύμα αυτό καταγράφεται σε υπολογιστή σε συνάρτηση της θερμοκρασίας. Η γραφική παράσταση που προκύπτει ονομάζεται φωτοκαμπύλη (Σχ. 1.3) (Furetta et al., 1998).



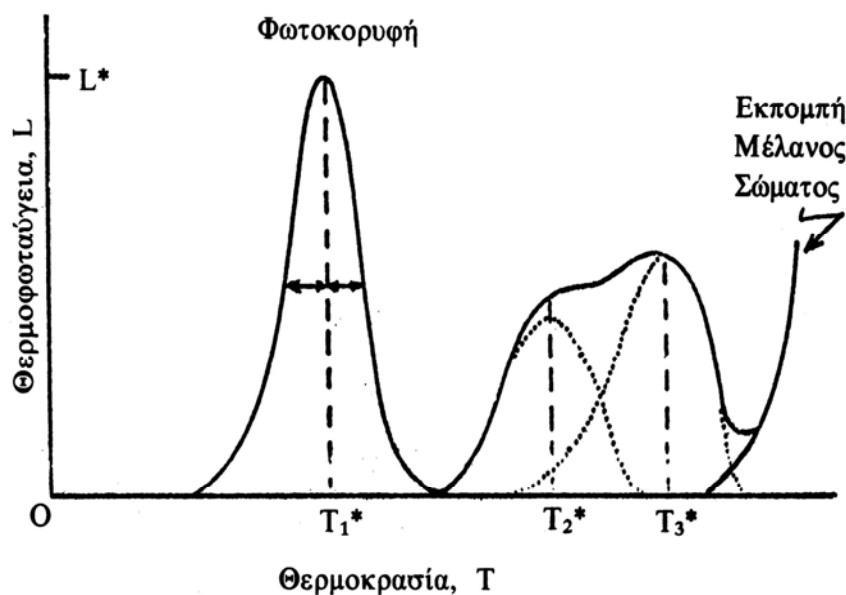
Σχ. 1.3: Παράδειγμα φωτοκαμπύλης (Furetta et al., 1998).

Εξετάζοντας στη συνέχεια τι συμβαίνει κατά τη θέρμανση ενός κρυστάλλου που έχει εκτεθεί σε ακτινοβολία, θεωρούμε αρχικά ηλεκτρόνια παγιδευμένα σε ένα είδος παγίδων, δηλαδή συγκεκριμένου βάθους και ενέργειας. Σε χαμηλές θερμοκρασίες η πιθανότητα να διαφύγουν ηλεκτρόνια είναι μικρή, άρα και η ένταση της θερμοφωταύγειας θα είναι χαμηλή. Αυξάνοντας τη θερμοκρασία, αυξάνεται και ο ρυθμός διαφυγής των ηλεκτρονίων καθώς και η ένταση της θερμοφωταύγειας, με ταυτόχρονη μείωση του αριθμού των ηλεκτρονίων που παραμένουν παγιδευμένα. Έτσι η ένταση της θερμοφωταύγειας θα φτάσει ένα μέγιστο και στη συνέχεια θα πέσει στο μηδέν όταν όλες οι παγίδες αδειάσουν (Παπαστεφάνου, 1999).

Για παγίδες ενός είδους στη φωτοκαμπύλη καταγράφεται μια κορυφή, η φωτοκορυφή. Η θερμοκρασία στην οποία παρουσιάζεται το μέγιστο της φωτοκορυφής εξαρτάται από το βάθος των παγίδων και το ρυθμό θέρμανσης. Η διάρκεια του αδειάσματος είναι της τάξης των μερικών δευτερολέπτων κι έτσι η φωτοκορυφή έχει πλάτος μερικές δεκάδες βαθμούς Κελσίου.

Περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας θα οδηγήσει στο άδειασμα παγίδων μεγαλύτερου βάθους κι έτσι θα παρατηρηθούν κι άλλες φωτοκορυφές. Οι διάφορες φωτοκορυφές είναι χαρακτηριστικές του κρυστάλλου και των προσμίξεων του και μπορεί να μη διαχωριστούν πλήρως, δίνοντας έτσι ένα πολύπλοκο σχήμα (Σχ. 1.4).

Στις υψηλές θερμοκρασίες, πολλές φορές, παγίδες διαφορετικού βάθους μπορεί να παίρνουν την ενέργεια που χρειάζονται για να αρχίσουν να αδειάζουν ταυτόχρονα. Μέχρι να αδειάσει η μια παγίδα, και καθώς αυξάνει η θερμοκρασία, ταυτόχρονα και η ενέργεια που δίνεται στον κρύσταλλο γίνεται αρκετή ώστε να αρχίσει να αδειάζει η αμέσως επόμενη σε βάθος παγίδα. Το αποτέλεσμα είναι οι δυο φωτοκορυφές να μην διαχωρίζονται στη φωτοκαμπύλη και να δίνουν ένα πολύπλοκο σχήμα.



Σχ. 1.4: Η θερμοφωταύγεια σε συνάρτηση της θερμοκρασίας κατά τη θέρμανση του κρυστάλλου. Φαίνονται οι φωτοκορυφές που προκύπτουν με την αύξηση της θερμοκρασίας. Στο διάγραμμα διακρίνονται τρεις κορυφές, εκ των οποίων η μια είναι καθαρή (θερμοκρασία  $T_1$ ). Οι άλλες δύο είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα μη διαχωρισμένων φωτοκαμπύλων (Παπαστεφάνου, 1999).

Στη θερμοκρασία των 350 – 400°C η εκπομπή φωτός μέλανος σώματος από τον κρύσταλλο γίνεται έντονη, ώστε η ένταση του φωτός να αυξάνει απότομα καθώς αυξάνει κι άλλο η θερμοκρασία. Αρχίζει δηλαδή ο κρύσταλλος να ερυθροπυρώνεται. Πέρα από αυτή τη θερμοκρασία είναι αδύνατη η παρατήρηση της θερμοφωταύγειας. Για το λόγο αυτό, μετά την πρώτη θέρμανση γίνεται και δεύτερη για να μετρηθεί το φως που οφείλεται στην εκπομπή μέλανος σώματος (μέτρηση υποστρώματος). Η διαφορά των δύο μετρήσεων δίνει το καθαρό σήμα θερμοφωταύγειας (Παπαστεφάνου, 1999).

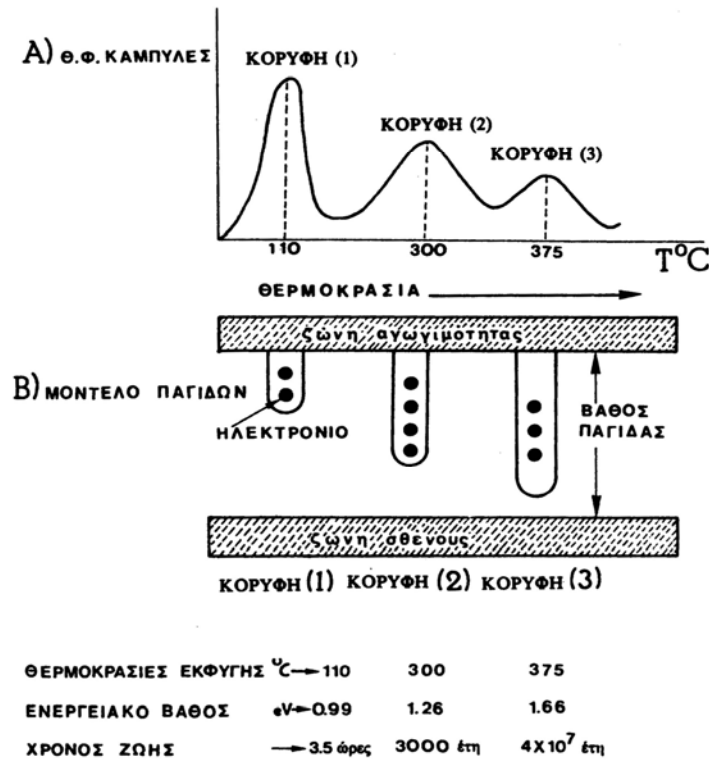
Το μέλαν σώμα είναι ένας ιδανικός ακτινοβολητής ο οποίος απορροφά όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω του. Έτσι δεν υπάρχει καθόλου ανάκλαση και το σώμα

φαίνεται μαύρο. Επειδή τα σώματα στην κατάσταση ισορροπίας εκπέμπουν και απορροφούν ίσα ποσά ενέργειας, έπεται ότι το μέλαν σώμα, καθώς είναι ο άριστος απορροφητής, είναι και ο άριστος εκπομπός ενέργειας. Το μέλαν σώμα είναι ένα θεωρητικό ιδεώδες, που στην πράξη προσεγγίζεται από μια κοιλότητα με τοιχώματα με ομοιόμορφη θερμοκρασία, η οποία έχει ένα μικρό άνοιγμα. Η ακτινοβολία που εισέρχεται από το άνοιγμα, ύστερα από διαδοχικές ανακλάσεις στα τοιχώματα, πρακτικά απορροφάται πλήρως, ανεξάρτητα από τη φύση των τοιχωμάτων. Με θερμοδυναμικές μεθόδους μπορεί ναδειχτεί ότι η φασματική κατανομή της κοιλότητας είναι ίδια με αυτή της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μέλαν σώμα.

Η χρησιμότητα του μέλανος σώματος προκύπτει από το γεγονός ότι σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας (όταν σε ένα σύστημα σωμάτων η θερμοκρασία και η πίεση είναι παντού η ίδια τότε έχουμε θερμοδυναμική ισορροπία) σε συγκεκριμένη θερμοκρασία η ροή ενέργειας του πεδίου ακτινοβολίας είναι ταυτόσημη με τη θερμική ακτινοβολία του μέλανος σώματος. Για το λόγο αυτό η ροή ενέργειας λέγεται συχνά ακτινοβολία μέλανος σώματος (Μπλέρης, 1992).

Το σώμα που δεν απορροφά την προσπίπτουσα σε αυτό ακτινοβολία λέγεται λευκό. Στην πραγματικότητα τα σώματα δεν συμπεριφέρονται ούτε σαν μέλανα ούτε σαν λευκά, αλλά σαν φαιά.

Θα πρέπει όμως να πούμε ότι το άδειασμα των παγίδων μπορεί να επηρεαστεί και από άλλους παράγοντες εκτός από τη σχέση της θερμοκρασίας και του βάθους των παγίδων. Έτσι μπορούμε να έχουμε ένα μη θερμικό άδειασμα, το οποίο συμβαίνει σε παγίδες μικρού ενεργειακού βάθους στις οποίες τα ηλεκτρόνια μπορούν με την πρόσληψη μικρού ποσού ενέργειας να φύγουν από αυτές, και τη σχέση του βάθους των παγίδων με το χρόνο παραμονής των ηλεκτρονίων σε αυτές. Όταν αυξάνει το βάθος της παγίδας αυξάνει και ο χρόνος παραμονής των ηλεκτρονίων σε αυτή. Στην περίπτωση του χαλαζία παγίδες κανονικά άδειες στους 110°C κρατούν ηλεκτρόνια για 3,5 ώρες σε θερμοκρασία 20°C και παγίδες άδειες κανονικά στους 325°C κρατούν ηλεκτρόνια για 3000 χρόνια πάλι σε θερμοκρασία 20°C. Κάτω από τις ίδιες συνθήκες παγίδες κανονικά άδειες στους 375°C κρατούν ηλεκτρόνια για 40 εκατομμύρια χρόνια (Λυριτζής, 1994).



Σχ. 1.5: Σχεδιάγραμμα του φυσικού μηχανισμού και του τρόπου λήψης της έντασης της θερμοφωταύγειας. Στο α) φαίνονται οι φωτοκορυφές και στο β) το βάθος των παγίδων από τις οποίες αυτές προέκυψαν (Λυριτζής, 1982).

Η χρονολόγηση με τη μέθοδο αυτή συνίσταται α) στην εύρεση του ετήσιου ρυθμού απόκτησης της ενέργειας με ακτινοβολία από το υλικό, β) στη μέτρηση της ποσότητας της αποθηκευμένης ενέργειας με τη μορφή εκπεμπόμενου φωτός κατά τη θέρμανση του υλικού και γ) στη μέτρηση του ποσού ακτινοβολίας που απαιτείται για εκπομπή φωτός στο εργαστήριο, όμοιο με το φυσικό φως. Με τα δεδομένα αυτά μπορεί να προσδιοριστεί η ηλικία του υλικού από τη στιγμή που θερμάνθηκε για τελευταία φορά.

Ο ετήσιος ρυθμός απόκτησης ενέργειας ή η ετήσια δόση (ΕΔ) συνίσταται από τρεις παραμέτρους. Την εσωτερική δόση, δηλαδή τη δόση ακτινοβολίας που λαμβάνει το υλικό, π.χ. κόκκοι χαλαζία, μέσα από το ίδιο το υλικό. Αποτελείται από τις άλφα και βήτα ακτινοβολίες που παράγονται από τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα, κυρίως ουρανίου 238, θορίου 232 και καλίου 40 που υπάρχουν σε μικρές ποσότητες στο υλικό, και ένα μέρος της γάμα ακτινοβολίας από το ίδιο το υλικό, η οποία εξαρτάται από το μέγεθός του. Η εξωτερική γάμα δόση, δηλαδή η δόση ακτινοβολίας που λαμβάνει το υλικό από το περιβάλλον χώμα και παράγεται από τα ίδια ραδιενεργά ισότοπα που υπάρχουν στο χώμα. Τέλος, την κοσμική ακτινοβολία, δηλαδή ακτινοβολία που προέρχεται από το διάστημα, υψηλής ενέργειας και διαπεραστικής ικανότητας.

Ο ετήσιος ρυθμός δόσης θεωρείται σταθερός. Είναι σταθερός όταν υπάρχει ραδιενεργός ισορροπία στη ραδιενεργό σειρά του ουρανίου 238, όταν δεν υπάρχει διαφυγή ραδονίου 224,

ούτε έκλυση ή εμπλουτισμός φυσικών ραδιοϊσοτόπων στο δείγμα από τρεχούμενα νερά και χημικές αντιδράσεις με το σε επαφή ίζημα (Λυριτζής, 2005).

Λεπτομέρειες για τη μέτρηση και τον υπολογισμό της ετήσιας δόσης στο δεύτερο κεφάλαιο.

Η μέτρηση της αποθηκευμένης ενέργειας στο υλικό γίνεται στο εργαστήριο με θέρμανση των κρυστάλλων κατά την οποία απελευθερώνεται το παγιδευμένο φως, το ποσό του οποίου είναι μέτρο της ηλικίας του υλικού από την τελευταία θέρμανσή του. Αυτή είναι η ισοδύναμη ολική δόση (ΙΟΔ) με μονάδες Γκρέι (Gy).

Η ισοδύναμη δόση αυξάνει με το χρόνο σε αναλογία προς τον αριθμό των παγιδευμένων ηλεκτρονίων. Στο εργαστήριο τα παγιδευμένα ηλεκτρόνια απελευθερώνονται με θέρμανση. Το ηλεκτρικό φορτίο επανασυνδέεται με τα φωταυγή κέντρα και εκπέμπεται φως στην ορατή περιοχή χαρακτηριστικού μήκους κύματος του οποίου μετριέται η ένταση (Liritzis, 2000). Η ισοδύναμη δόση είναι η ακτινοβολούμενη δόση που επάγεται στο δείγμα από πηγή βήτα ή γάμα ή ακτινοβολίας γνωστής ισχύος, σε ένα δεδομένο χρόνο στο εργαστήριο και αποτελεί φως ΘΦ ισοδύναμο με εκείνο που εκπέμπεται σαν αποτέλεσμα συσσωρευμένης φυσικής ΘΦ (ΦΘΦ) από το ίδιο δείγμα κατά τη διάρκεια του αρχαιολογικού χρόνου.

Τελικά η εξίσωση ηλικίας είναι:

$$ΗΛΙΚΙΑ = \frac{ΙΟΔ}{ΕΔ} \quad (1.1)$$

## 2.2 Τεχνικές χρονολόγησης με θερμοφωταύγεια

Το φως της θερμοφωταύγειας εκπέμπεται από ένα διακεκριμένο αριθμό περιοχών που αναγνωρίζεται σαν διαφανείς κρύσταλλοι χαλαζία ( $SiO_2$ ) και άστριου (πυριτικού αργιλίου  $x[AlSi_3O_8]$ , όπου  $x=K, Na, Ca$ ). Αυτή η παρατήρηση έγινε από λεπτές τομές αγγείων οι οποίες αφού ακτινοβολήθηκαν, φωτογραφήθηκαν ταυτόχρονα με τη μέτρησή τους. Οι κρύσταλλοι αυτοί λαμβάνονται από το δείγμα με τη σύνθλιψη του οστράκου και με την επίδραση οξέων.

### 2.2.1 Δειγματοληψία

Θέλει προσοχή τόσο πως θα πάρουμε το δείγμα από τον αρχαιολογικό χώρο όσο και τη σκόνη από το κομμάτι για γίνουν οι μετρήσεις. Το ιδανικό θα ήταν η δειγματοληψία να γίνεται όταν πέσει ο ήλιος για να μην επηρεαστεί την αποθηκευμένη φωταύγεια των δειγμάτων. Αμέσως μετά τη συλλογή του δείγματος αυτό τοποθετείται σε μαύρη σακούλα και κλείνεται καλά. Η όλη επεξεργασία για την απόληψη της σκόνης για χρονολόγηση και η χρήση χημικών αντιδραστηρίων για τον καθαρισμό της σκόνης, που θα ακολουθήσει στο εργαστήριο θα πρέπει



να γίνει κάτω από κόκκινο φωτισμό, σε συνθήκες δηλαδή φωτογραφικού θαλάμου, καθώς και η τοποθέτηση της σκόνης σε κατάλληλα δισκία, ανάλογα με τη μέθοδο και την τεχνική χρονολόγησης που επιλέγουμε, για τη διαδικασία των μετρήσεων. Η χημική επεξεργασία των δειγμάτων ανά περίπτωση θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο τρίτο κεφάλαιο, όπως επίσης και το μέγεθος της σκόνης που χρησιμοποιήθηκε. Συνήθως χρησιμοποιείται αραιό υδροχλωρικό (HCl) οξύ, 45% υδροφθορικό (HF) οξύ και 10% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> με τη σειρά που αναφέρονται.

Στην περίπτωση των κεραμικών οστράκων διαλέγουμε κομμάτια χωρίς αρχαιολογική αξία, χωρίς παραστάσεις ή χρώματα που θα μπορούσαν να δώσουν πληροφορίες στους αρχαιολόγους, γιατί θα θρυμματιστούν. Κατόπιν, αφού μεταφερθεί στο εργαστήριο, γίνεται καθαρισμός του όστρακου με ελαφρύ τρίψιμο με τροχό ή βουρτσάκι από ακαθαρσίες, σκόνη και χώμα. Το όστρακο θρυμματίζεται με τη βοήθεια γουδιού ή τροχού, γίνεται διαχωρισμός της σκόνης ανάλογα με το μέγεθός της (διάμετρος κόκκων) με κόσκινα. Το υλικό με το ζητούμενο μέγεθος (αυτό καθορίζεται από την τεχνική που θα ακολουθήσουμε – παράγραφος 2.2.2) καθαρίζεται με χημικά αντιδραστήρια και χωρίζεται σε δισκία για να μετρηθεί.

Στην περίπτωση κατά την οποία το δείγμα είναι χώμα, αφού καλύψουμε το σημείο που από όπου θέλουμε να πάρουμε το δείγμα με ένα σκούρο πανί, στην περίπτωση που το φως είναι αρκετό, καθαρίζουμε το σημείο από φύλλα που τυχόν υπάρχουν στο χώρο και σε ένα σακουλάκι συλλέγουμε το χώμα μέχρι και σε βάθος 5cm (σε βαθύτερα στρώματα δεν έχουν φτάσει οι ακτίνες του ήλιου ή φωτιά για να «μηδενίσουν το ρολόι» του). Το δείγμα κλείνεται σε μαύρη σακούλα, μεταφέρεται στο εργαστήριο και γίνεται η επεξεργασία του ανάλογα με τη μέθοδο και την τεχνική που θα ακολουθήσουμε για τη χρονολόγησή του.

Στην περίπτωση των πετρωμάτων, από τους δύο ογκόλιθους το κομμάτι προς δειγματοληψία είναι το κάτω. Το μέρος του ογκόλιθου που παίρνουμε είναι συνήθως η έξω δεξιά γωνία του, η οποία βρίσκεται στην άκρη του οικοδομήματος. Η αποκοπή του κομματιού γίνεται με καλέμι και σφυρί. Το μέγεθος που κόβεται δεν είναι πάνω από 3cm. Θα πρέπει να φροντίσουμε την ώρα που κόβουμε το λίθο να έχουμε σκεπαστεί με ένα σκούρο ύφασμα για να μην αλλοιώσει το φυσικό φως τη φωταύγεια του πετρώματος. Μετά την αποκοπή θα πρέπει να τυλιχτεί αμέσως σε μαύρη σακούλα.

## 2.2.2 Τεχνικές χρονολόγησης

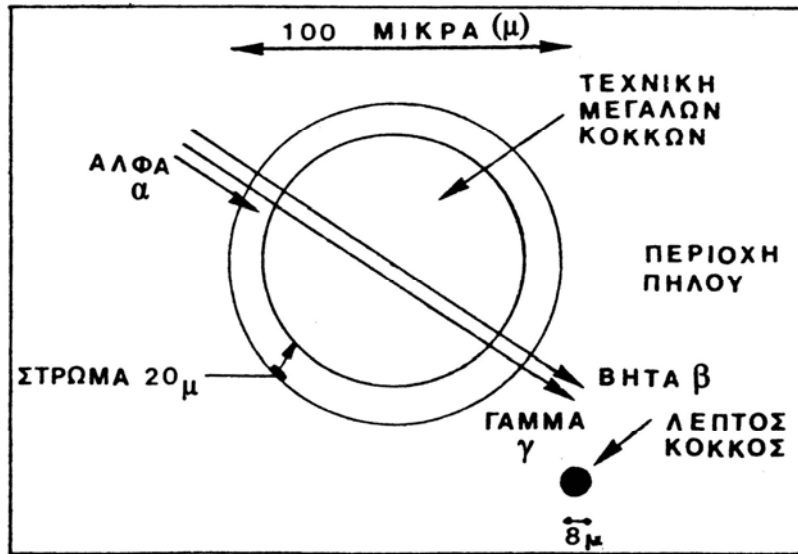
Δύο είναι οι κύριες τεχνικές χρονολόγησης που συνήθως χρησιμοποιούνται:

### α) Τεχνική Λεπτών Κόκκων Χαλαζία (ΛΚ)

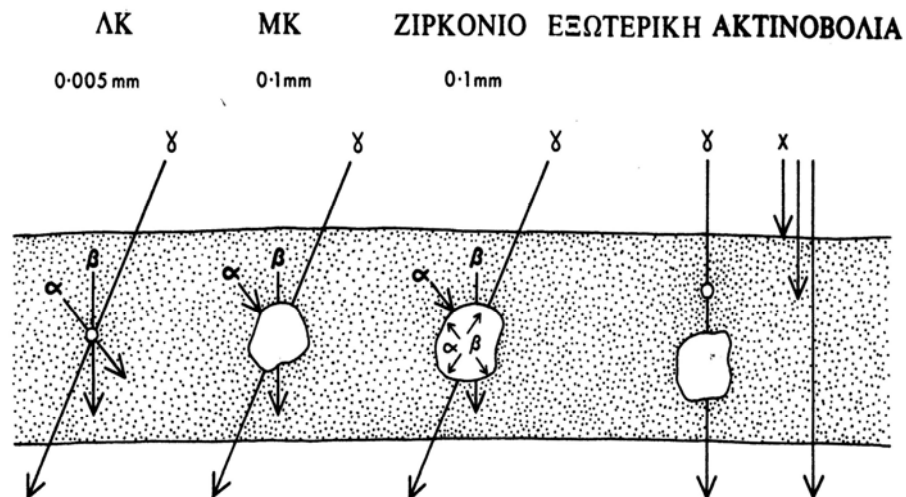
Το μέγεθος των κρυσταλλικών κόκκων στην τεχνική αυτή κυμαίνεται από 1 μέχρι 8μm και λαμβάνεται σε ακετόνη μετά από αιώρημα. Στην περίπτωση αυτή η εξασθένιση της άλφα ακτινοβολίας θεωρείται αμελητέα και η εξίσωση της ηλικίας λαμβάνεται ως έχει. Το σφάλμα της τεχνικής είναι ±5–7% ή ±100 – 140 χρόνια για υλικό 2000 χρόνων.

β) Τεχνική Μεγάλων Κόκκων Χαλαζία (ΜΚ)

Το μέγεθος των κρυσταλλικών κόκκων στην περίπτωση αυτή είναι 90 $\mu\text{m}$  – 1mm. Οι κόκκοι αυτοί λαμβάνονται αφού προηγουμένως γίνει κατεργασία του υλικού με υδροφθορικό (HF) οξύ. Το οξύ διαλύει το εξωτερικό περίβλημα (φλοιό) των κόκκων που έχουν επηρεαστεί από την άλφα ακτινοβολία, γεγονός που μας κάνει να θεωρήσουμε αμελητέα την άλφα και να θεωρήσουμε στους υπολογισμούς μας μόνο τη βήτα και τη γάμα ακτινοβολία. Το σφάλμα της μεθόδου είναι γύρω στο  $\pm 3\text{--}5\%$ .



Σχ. 1.6: Γεωμετρία ακτινοβολιών για μεγάλους κόκκους χαλαζία (Λυριτζής, 1994).



Σχ. 1.7: Γεωμετρία ακτινοβολιών για τις τεχνικές των λεπτών και των μεγάλων κόκκων χαλαζία, την τεχνική ζιρκονίου και την εξωτερική ακτινοβολία (Λυριτζής, 1994).

Άλλες τεχνικές χρονολόγησης περιλαμβάνουν:

γ) τεχνική μεγάλων ραδιενεργών κόκκων ζιρκονίου (Zimmerman, 1978)

Σ' αυτή την τεχνική παραβλέπονται οι συνθήκες ταφής του αγγείου και δε λαμβάνονται υπ' όψιν οι ακτινοβολίες περιβάλλοντος. Η ΘΦ προέρχεται κυρίως από την άλφα ακτινοβολία μέσα από το ζirkόνιο. Το σφάλμα δεν είναι μικρότερο από  $\pm 15-20\%$ .

δ) μέθοδος αφαίρεσης

Στη μέθοδο αυτή γίνεται αφαίρεση των εξισώσεων ηλικιών για λεπτούς και μεγάλους κόκκους χαλαζία, οπότε παίρνουμε την ηλικία χωρίς να απαιτείται γνώση του περιβάλλοντος χώρου του δείγματος. Η μέθοδος είναι ιδανική για δείγματα αγνώστου προελεύσεως, από μουσεεία ή συλλογές. Η εξίσωση της ηλικίας είναι:

$$\text{Ηλικία (χρόνια)} = \frac{IA_{\lambda K} - IA_{MK}}{\kappa \cdot E\Delta_{\alpha} + E\Delta_{\beta} \cdot (1 - \alpha)} \quad (1.2)$$

όπου  $\alpha$  είναι ο παράγοντας εξασθένησης των  $\beta$  σωματιδίων. Το σφάλμα στην τεχνική αυτή είναι περίπου  $\pm 13\%$ .

ε) Μέθοδος της προ – δόσης

Η μέθοδος αυτή παρουσιάστηκε από τον Fleming το 1973 (Fleming, 1973). Δεν χρησιμοποιήθηκε η αποθηκευμένη θερμοφωταύγεια, αλλά η μεταβολή της ευαισθησίας<sup>9</sup> μιας ασταθούς φωτοκορυφής στη θερμοκρασία των  $110^{\circ}\text{C}$ . Η μεταβολή αυτή κάνει γνωστό τον τρόπο της λαμβανόμενης δόσης στη διάρκεια του αρχαιολογικού χρόνου που πέρασε.

Αναλυτικά η διαδικασία μέτρησης της ολικής δόσης είναι η εξής:

- 1) Μέτρηση της ευαισθησίας  $E_0$ , με την ακτινοβολήση του χαλαζία με μικρή δοκιμαστική βήτα δόση ( $1 - 5$  rads) πριν από κάθε θέρμανση. Αυτή είναι η ευαισθησία του χαλαζία αμέσως μετά την αφαίρεση του κεραμικού από τον κλίβανο όσον αφορά τη φωτοκορυφή του στους  $110^{\circ}\text{C}$ .
- 2) Θέρμανση τους  $500^{\circ}\text{C}$  και μέτρηση της ευαισθησίας,  $E_N$ .
- 3) Ακτινοβολήση με βήτα δόση, θέρμανση στους  $500^{\circ}\text{C}$  και μέτρηση με δοκιμαστική δόση της ευαισθησίας  $E_{N+\beta}$ . Η αρχαιολογική ή ισοδύναμη βήτα δόση δίνεται από το λόγο:

$$IO\Delta = \frac{E_N - E_0}{E_{N+\beta} \cdot E_N} \cdot \beta \text{ (rad)} \quad (1.3)$$

<sup>9</sup> Κάθε φορά που μιλάμε για την ευαισθησία της φωτοκορυφής των  $110^{\circ}\text{C}$  εννοούμε το εμβαδόν της καμπύλης αυτής.

Ο υπολογισμός της ετήσιας δόσης, για τον υπολογισμό, στη συνέχεια, της ηλικίας, δε διαφέρει από την περίπτωση της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί για τους δικούς μας υπολογισμούς (βλέπε κεφάλαιο 2ο).

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ευρέως για τα προβλήματα αυθεντικότητας, αφού προηγουμένως ελεγχθεί η γραμμική ή μη εξάρτησή της στην αύξηση της ευαισθησίας με τη δόση. Περιορίζεται όμως στα τελευταία 1500 περίπου χρόνια αν και έχουν γίνει προσπάθειες να διευρυνθεί η περίοδος αυτή. Το σφάλμα της είναι  $\pm 7\%$ .

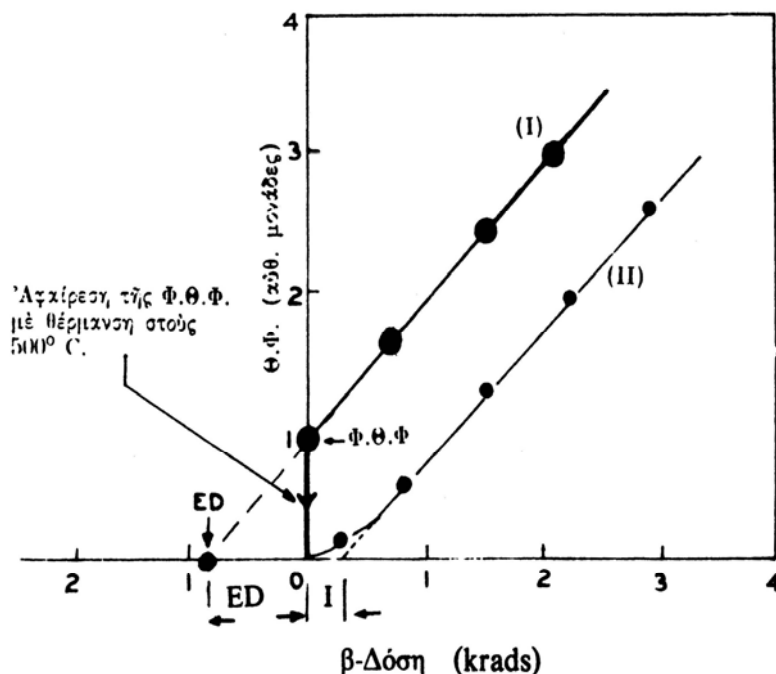
### 2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ηλικία

α) Παροδικό Άδειασμα Παγίδων (fading) και Ανώμαλο Παροδικό Άδειασμα Παγίδων (anomalous fading)

Είναι το άδειασμα των παγίδων από ηλεκτρόνια χωρίς την επίδραση της θερμοκρασίας και εξαρτάται από το βάθος, το είδος, τον τρόπο δημιουργίας της παγίδας, κ.λ.π.. Έχουμε δηλαδή διαρροή μέρους ή όλης της αποθηκευμένης θερμοφωταύγειας. Παρατηρείται σε ρηχές κυρίως παγίδες.

β) Μη γραμμικότητα και μεταβολή της ευαισθησίας

Στην περίπτωση που η φωταύγεια δεν αναπτύσσεται γραμμικά γίνεται η εξής διόρθωση:



Σχ. 1.8: Ανάπτυξη θερμοφωταύγειας σε συνάρτηση της βήτα δόσης. Η ισοδύναμη δόση είναι το άθροισμα (ED+I). Οι ευθείες (I) και (II) είναι οι γραμμές της (φυσικής+εργαστηριακής βήτα δόσης) βάση του πρωτοκόλλου προσθετικών δόσεων (Λυριτζής, 1977).

Από την προέκταση της 2<sup>ης</sup> καμπύλης και τον τομή της με τον άξονα των δόσεων, η δόση που προκύπτει προστίθεται στην ισοδύναμη δόση της 1<sup>ης</sup> καμπύλης και έτσι υπολογίζεται η ολική ισοδύναμη δόση.

γ) Φως που επάγει θερμοφωταύγεια

Έκθεση του δείγματος σε πηγή φωτός μπορεί να επάγει θερμοφωταύγεια και εισάγει έτσι σφάλματα στην ηλικία του.

δ) Μη ραδιενεργός επαγωγή θερμοφωταύγειας

Πρόκειται για την περίπτωση της ψευδο-φωταύγειας. Οφείλεται σε φαινόμενα τριβοφωταύγειας, πιεζο-φωταύγειας, χημικο-φωταύγειας, φωταύγειας δηλαδή που προκλήθηκε από τριβή, πίεση ή με χημικές μεθόδους κατά την προετοιμασία της σκόνης για χρονολόγηση, κατά τη δειγματοληψία του υλικού ή και σε μερικές περιπτώσεις κατά τη δημιουργία του.

ε) Υδατικό περιεχόμενο στο αγγείο και το περιβάλλον του

Η μέτρηση του φαινομένου του κορεσμού του υδατικού περιεχομένου βοηθάει στην ακριβέστερη γνώση της ακτινοβολίας του περιβάλλοντος, του ποσού δηλαδή του ύδατος που απορροφάται από το υλικό κατά τη διάρκεια των αρχαιολογικών χρόνων. Εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής που βρέθηκε το υλικό και τη σκληρότητά του.

ζ) Μεταβολές στο λόγο Ουράνιο προς Θόριο (U/Th)

Στη μέθοδο της άλφα καταμέτρησης (δεύτερο κεφάλαιο, δεύτερη παράγραφος) για τον προσδιορισμό της ετήσιας δόσης ακτινοβολίας που έχει προσλάβει το υλικό, υποθέτουμε ότι ο λόγος Ουράνιο προς Θόριο (U/Th) είναι ίσος με 3,4 όπως συμβαίνει συνήθως στη φύση. Διαφορετικός λόγος θα εισάγει σφάλμα στις μετρήσεις (Λυριτζής, 1994).

Όλες οι πιο πάνω περιπλοκές θα πρέπει να εντοπίζονται και να εξαλείφονται. Τα στοιχεία αυτά της διόρθωσης θα πρέπει να αναφέρονται στο τελικό αποτέλεσμα της ηλικίας έτσι ώστε να εκτιμηθούν ανάλογα από τον αρχαιολόγο για την αξιοπιστία της τελικής ηλικίας και του σφάλματός της (Aitken, 1976).

#### 2.4 Οργανο μέτρησης θερμοφωταύγειας

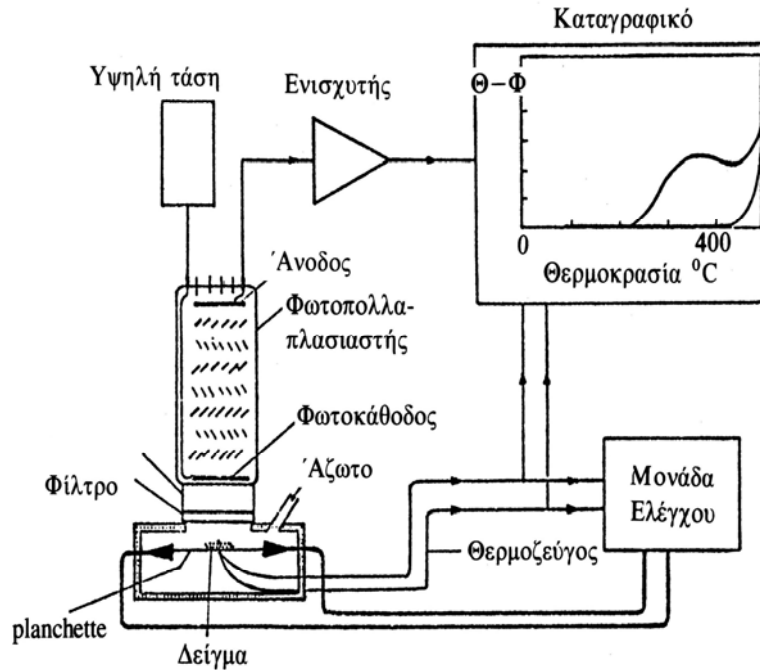
Οι μετρήσεις μας για τον προσδιορισμό των ηλικιών των δειγμάτων μας με τη μέθοδο της θερμοφωταύγειας έγιναν στο Τμήμα Φυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, στο εργαστήριο Ατομικής και Πυρηνικής Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων.

Το σύστημα μέτρησης θερμοφωταύγειας είναι της εταιρίας Littlemore Co με μετρητή (reader) τύπου 711, με glow-oven με δυνατότητα κενού μέχρι και 0,1 Torr και δυνατότητα ροής

καθαρού αζώτου  $N_2$  καθ' όλη τη διάρκεια της μέτρησης. Η εκπομπή φωτός ανιχνεύεται από φωτοπολλαπλασιαστή τύπου EMI QA. Οι φωτοκαμπύλες αποθηκεύονται σε υπολογιστή μέσω μιας 1024-channel κάρτας ADC η οποία λειτουργεί σε MCA mode. Το θερμαινόμενο πλακίδιο είναι από nicochrom με πάχος 0,8 mm και θερμοζεύγος από Cr-Al συνδεδεμένο με αυτό. Η πηγή που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα είναι  $^{90}Sr$ - $^{90}Yt$  βήτα ακτινοβολίας η οποία δίνει 0,6 Gy/min.



Εικ. 1.1: Συσκευή θερμοφωταύγειας του Εργαστηρίου Ατομικής και Πυρηνικής Φυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.



Σχ. 1.9: Διάγραμμα ροής της συσκευής θερμοφωταύγειας του Εργαστηρίου Ατομικής και Πυρηνικής Φυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (Παπαστεφάνου, 1999; Aitken, 1985).

Ο κρύσταλλος – δείγμα τοποθετείται πάνω στο μεταλλικό πλακίδιο το οποίο θερμαίνεται από το ηλεκτρικό ρεύμα από το οποίο διαρρέεται. Η θερμοκρασία του πλακιδίου μετρείται με το θερμοζεύγος. Το ρεύμα θέρμανσης δίνεται από τροφοδοτικό και η μέτρηση της θερμοκρασίας γίνεται μέσω του σήματος του θερμοζεύγους. Η ένταση του ρεύματος ρυθμίζεται έτσι ώστε η αύξηση της θερμοκρασίας να είναι γραμμική. Η θέρμανση γίνεται σε ατμόσφαιρα καθαρού αζώτου και κενού για να αποφευχθεί οξείδωση της επιφάνειας του κρυστάλλου, η οποία συνοδεύεται από εκπομπή φωτός. Η ένταση της θερμοφωταύγειας μετρείται από το φωτοπολλαπλασιαστή και οι φωτοκαμπύλες καταγράφονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

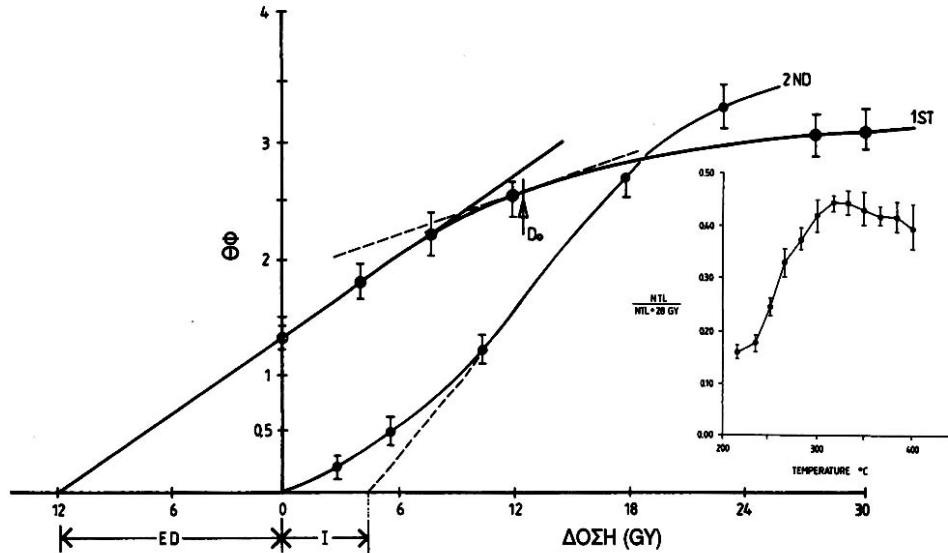
## 2.5 Πρωτόκολλα προσδιορισμού Ισοδύναμης δόσης

### 2.5.1 Πρωτόκολλο Προσθετικών Δόσεων Πολλαπλών Δισκίων

Στην τεχνική αυτή γίνονται αρχικά τρεις μετρήσεις, το λιγότερο, φυσική θερμοφωταύγειας. Αυτό εξαρτάται από τον επαναληψιμότητα που θα δούμε στο σήμα, αν σε κάποια μέτρηση κάτι δεν πάει καλά, όπως δεν είχε ρυθμιστεί σωστά το όργανο, δεν είχε ανοιχτεί το άζωτο, το δισκίο εκτέθηκε σε φως, παίρνουμε κι άλλες επαναληπτικές μετρήσεις φυσικής θερμοφωταύγειας.

Στη συνέχεια ακτινοβολούμε τα υπόλοιπα δισκία με αυξανόμενες βήτα ή άλφα δόσεις. Και τις δύο περιπτώσεις (φυσική θερμοφωταύγειας και φυσικής θερμοφωταύγειας+εργαστηριακή δόση) μετά από κάθε μέτρηση παίρνουμε μια επιπλέον μέτρηση υποστρώματος.

Στην περίπτωση των κεραμικών, λόγω της φύσης του υλικού και της επεξεργασίας της σκόνης του οστράκου, η φωτοκορυφή του χαλαζία είναι καθαρή και χρησιμοποιούμε σε κάθε μέτρηση το εμβαδόν της για την κατασκευή διαγράμματος δόσης με ένταση φωτοκορυφής.



Σχ. 1.10: Διαδικασία προσδιορισμού ισοδύναμης δόσης με το πρωτόκολλο Προσθετικών Δόσεων Πολλαπλών Δισκίων (αριστερά) και τεστ οροπεδίου (δεξιά) σε ηφαιστειακό πέτρωμα από το Γυαλί Νισύρου (Liritzis, et al., 1996b).

Η ισοδύναμη ολική δόση υπολογίζεται από την τομή την καμπύλης με τον άξονα των δόσεων.

Επειδή κατά την προετοιμασία των δισκίων δεν είναι εύκολο να έχουμε σταθερή μάζα καλό θα ήταν να παίρναμε και μια διορθωτική μέτρηση, μέτρηση κανονικοποίησης, ακτινοβολώντας κάθε δισκίο μετά τη μέτρηση του υποστρώματος με σταθερή βήτα δόση.

### 2.5.2 Πρωτόκολλο Ανασύστασης Δόσεων Πολλαπλών Δισκίων

Στην τεχνική αυτή αφού μετρήσουμε τη φυσική θερμοφωταύγεια των δισκίων, στα άδεια πλέον από θερμοφωταύγεια δισκάκια δίνουμε αυξανόμενες βήτα δόσεις. Πάντα μετά από κάθε μέτρηση παίρνουμε μια επιπλέον μέτρηση υποστρώματος και μια μέτρηση κανονικοποίησης, όπως και στο πρωτόκολλο Προσθετικών Δόσεων Πολλαπλών Δισκίων. Κατασκευάζουμε διάγραμμα δόσεων με ένταση θερμοφωταύγειας και η ισοδύναμη ολική δόση υπολογίζεται από την καμπύλη που προκύπτει από το πείραμα και γνωρίζοντας την ένταση της φυσικής θερμοφωταύγειας από τις αρχικές μετρήσεις.

### 2.6 Σφάλματα



Τα σφάλματα που υπεισέρχονται στη μέθοδο χρονολόγησης με θερμοφωταύγεια ποικίλουν και εξαρτώνται από τα προς χρονολόγηση υλικά, τις συνθήκες ταφής τους και τις τεχνικές χρονολόγησης που χρησιμοποίησε ο ερευνητής.

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, η τεχνική μεγάλων κόκκων δίνει σφάλμα  $\pm 3-5\%$  και η τεχνική λεπτών κόκκων  $\pm 5-7\%$ . Αυτές είναι και οι δύο τεχνικές που χρησιμοποιούνται περισσότερο σήμερα. Σε γενικές γραμμές και κατανέμοντας τα σφάλματα βάση των υλικών που χρονολογούμε έχουμε ότι σε καμένα υλικά, κεραμικά, καμένα ιζήματα ή πέτρες, κλιβάνους, το σφάλμα στην ηλικία κυμαίνεται από  $\pm 3-7\%$ , ενώ σε άκαυτα υλικά, ιζήματα, μεγάλιθοι, αγάλματα, έχουμε το σφάλμα στους ασβεστίτες είναι  $\pm 7-25\%$ , ενώ στα υλικά με χαλαζία και άστριο  $\pm 5-7\%$  (Λυριτζής, 2005).

Η δυσκολία στον προσδιορισμό των σφαλμάτων έγκειται στην αβεβαιότητα των συστηματικών σφαλμάτων, όπως είναι ο προσδιορισμός του υδατικού περιεχομένου σε ένα αγγείο, τα υπόγεια ύδατα που αλλοιώνουν τις ραδιενεργούς σειρές του Ουρανίου και του Θορίου προκαλώντας εισροή ή διαρροή ιόντων, μεταβάλλοντας το ραδιενεργό περιεχόμενο του προς χρονολόγηση κεραμικού (Murray, 1982) ή η βαθμονόμηση ραδιενεργών πηγών κ.α.. Ο προσδιορισμός των παραγόντων αυτών περιορίζουν το σφάλμα στο  $\pm 5\%$ , αριθμός που θεωρείται το ελάχιστο σφάλμα στη θερμοφωταύγεια. Κάτω από ορισμένες συνθήκες ταφής, τα συστηματικά αυτά σφάλματα μπορούν να ελαχιστοποιηθούν και να ληφθεί ο μέσος όρος δειγμάτων που να ανήκουν στο ίδιο γεωλογικό στρώμα, διαδικασία που μπορεί να μειώσει το σφάλμα στο  $\pm 3\%$  (Liritzis, 1985; Λυριτζής, 1994).

### **3. Οπτική Θερμοφωταύγεια**

#### **3.1 Αρχές μεθόδου**

Οι αρχές που διέπουν τη μέθοδο αυτή είναι οι ίδιες με αυτές της μεθόδου της θερμοφωταύγειας. Ουσιαστικά πρόκειται για μια εξελιγμένη μορφή της μεθόδου η οποία βρίσκει εφαρμογή σε μεγαλιθικά μνημεία και πετρώματα.

Στην περίπτωση αυτή, αντί να μηδενίζει το "ΘΦ ρολόι" η θέρμανση του υλικού σε κάποια εστία φωτιάς, το μηδενίζει το ηλιακό φως. Ο μηχανισμός έχει ως εξής:

Μετά τη λάξευση του ογκόλιθου αυτός αφήνεται στον ήλιο μέχρι να τοποθετηθεί στην κατάλληλη θέση στον τοίχο ή στο οίκημα και μέχρι να καλυφθεί από άλλον. Σε όλο αυτό το διάστημα το ηλιακό φως προκαλεί αποδέσμευση ηλεκτρονίων από τις παγίδες τους. Το

φαινόμενο αυτό λέγεται οπτική άντληση ή λεύκανση (bleaching). Όσο περισσότερο μείνει στον ήλιο ο ογκόλιθος, τόσο καλύτερα θα αδειάσουν οι παγίδες. Το βάθος στο οποίο διεισδύουν οι ακτίνες του ήλιου εξαρτάται από το υλικό του ογκόλιθου και τη διαφάνειά του. Για τον ασβεστόλιθο το βάθος είναι 0,5 – 1mm, για τους γρανίτες τα 10mm και για ορισμένα μάρμαρα φτάνουν τα 20 – 30mm (Liritzis and Galloway, 1999; Liritzis et al., 1997b; Vafiadou et al., 2005).

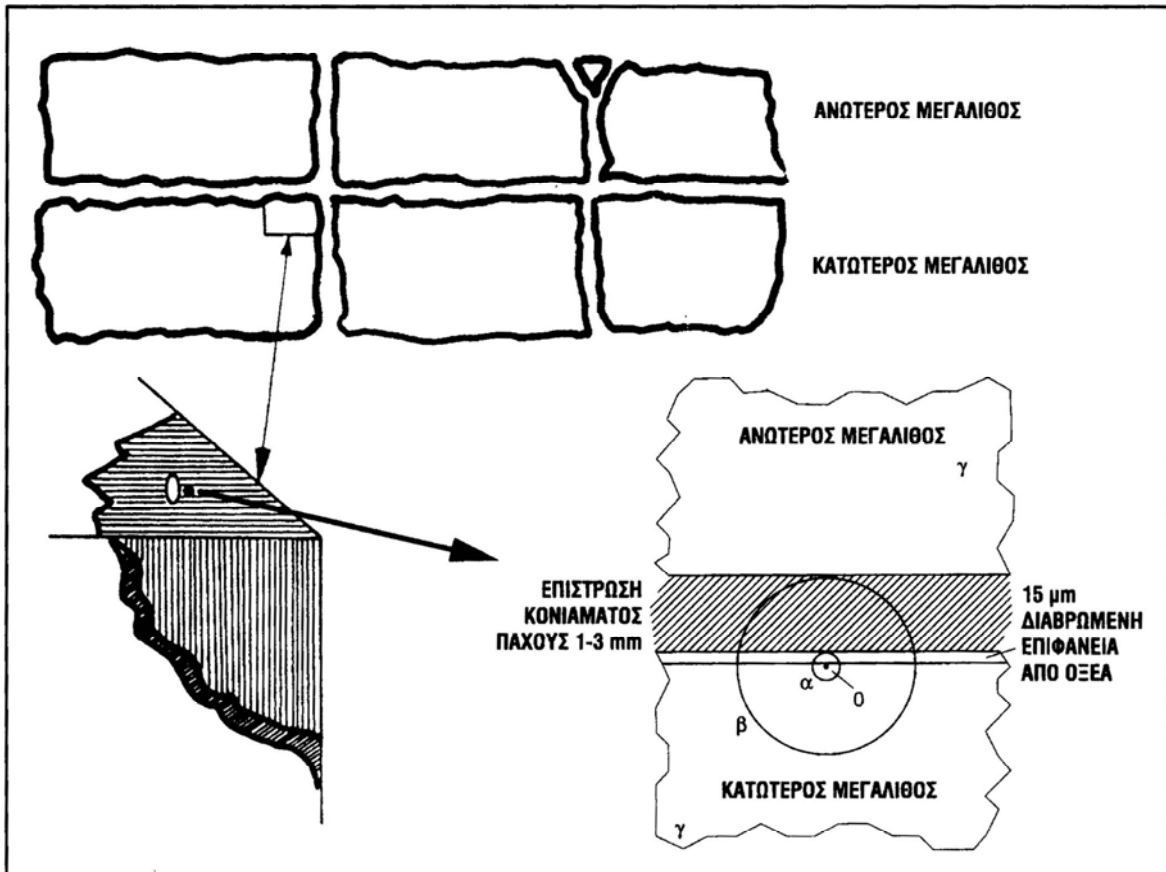
Στον ασβεστίτη ο χρόνος έκθεσης στο ηλιακό φως που απαιτείται για το άδειασμα των παγίδων είναι μεγαλύτερος από το χρόνο τοποθέτησής του στην κατασκευή και της κάλυψής του από άλλον. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μένει ένα σταθερό υπόλοιπο ηλεκτρονίων στις παγίδες, δηλαδή ένα υπολειπόμενο ποσό φωταύγειας. Το επιπλέον χρονικό διάστημα που είναι απαραίτητο για να αδειάσουν οι τελείως παγίδες κυμαίνεται από 10 μέχρι 80 ώρες και εξαρτάται από το είδος του ασβεστόλιθου (Liritzis et al., 1997a; Liritzis and Bakoroulos, 1997).

Το ποσό αυτό της φωταύγειας θα πρέπει κάθε φορά να υπολογίζεται. Αυτό πετυχαίνεται με τη μεθοδολογία του «οροπεδίου δόσης» και με τα πειράματα λεύκανσης που γίνονται είτε με φυσικό ηλιακό φως είτε με τεχνητό φως από προσομοιωτή ηλιακού φωτός (Liritzis et al., 1997b). Η παραμένουσα αυτή τιμή φωταύγειας θεωρείται και το σημείο «μηδενισμού χρόνου» από το οποίο και μέχρι τη στιγμή της δειγματοληψίας συσσωρεύεται η ολική δόση. Η χρονική περίοδος έκθεσης εξαρτάται από το λιθοξόο τεχνίτη. Πόσο χρόνο, δηλαδή, θα χρειαστεί για τη λάξευση του λίθου και την τοποθέτηση στην κατασκευή.

Τα φορτία – ηλεκτρόνια που γεμίζουν τις παγίδες παράγονται από ιονισμό και προέρχονται από την ακτινοβολία των φυσικών ραδιοϊσοτόπων του Ουρανίου (U), του Θωρίου (Th), του Καλίου (K) και του Ρουβιδίου (Rb), τα οποία υπάρχουν στο πέτρωμα και στο περιβάλλον ίζημα ή χώμα στο σημείο δειγματοληψίας, και στην κοσμική ακτινοβολία. Παρόμοιος είναι και ο μηχανισμός αγαλμάτων που βρίσκονται θαμμένα. Η ηλικία στην περίπτωση αυτή χαρακτηρίζει το χρόνο ταφής του αγάλματος.

### 3.1.1 Δειγματοληψία

Για τη διαδικασία της χρονολόγησης αρκεί ένα κομμάτι από το μνημείο περίπου 2 – 3cm από το σημείο επαφής δύο μεγάλιθων και συγκεκριμένα από τον κάτω μέγλιθο. Λαμβάνεται επίσης σκόνη από το συνδετικό υλικό των δύο μεγάλιθων, όταν αυτό υπάρχει, για μετρήσεις ετήσιας δόσης (κεφάλαιο 2ο). Μια σχηματική παράσταση της διαδικασίας παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 1.11).



Σχ. 1.11: Μεγάλιθος και επιφάνεια δειγματοληψίας, καθώς επίσης και δοσιμετρική γεωμετρία ακτινοβολιών που βομβαρδίζουν το επιφανειακό στρώμα του μεγάλιθου (Λυριτζής, 1998, 2005).

Η δειγματοληψία και εδώ γίνεται σε όσο το δυνατό πιο σκοτεινές συνθήκες. Μετά την αποκοπή του κομματιού από τον τοίχο, σημειώνεται η προς χρονολόγηση επιφάνεια και τοποθετείται σε μαύρη σακούλα.

Στο εργαστήριο η απόληψη της σκόνης για χρονολόγηση γίνεται σε συνθήκες φωτογραφικού θαλάμου, κάτω από κόκκινο ή πορτοκαλί φως. Αρχικά η επιφάνεια καθαρίζεται με κατάλληλα χημικά αντιδραστήρια, υδροχλωρικό οξύ, HCl, υπεροξείδιο του υδρογόνου, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, και στη συνέχεια με λίμα, περνώντας την ελαφριά πάνω από την επιφάνεια του δείγματος – πέτρωμα, παίρνουμε τη σκόνη που χρειαζόμαστε. Αναλυτικά η διαδικασία και το μέγεθος των κόκκων που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε δείγμα ξεχωριστά αναφέρονται στο 3ο κεφάλαιο στην αναλυτική περιγραφή της χρονολόγησής τους.

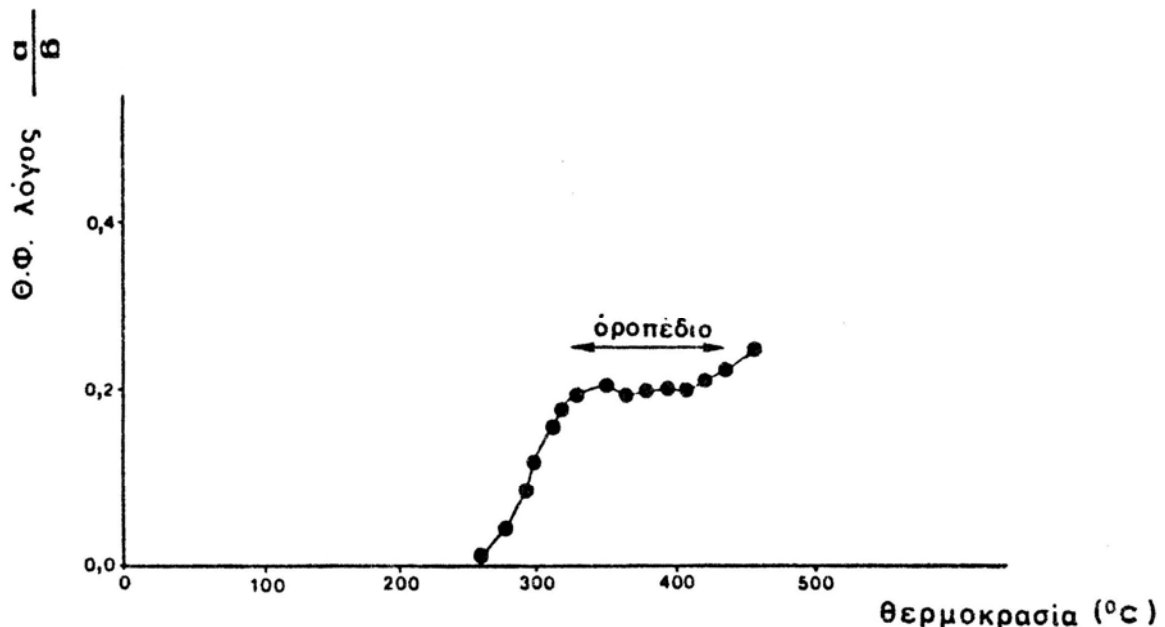
### 3.1.2 Καταλληλότητα δειγμάτων για χρονολόγηση

Τα δείγματα για να είναι κατάλληλα για χρονολόγηση με τη μέθοδο αυτή θα πρέπει να ακολουθούν κάποια κριτήρια πέρα από αυτά που αναφέρθηκαν για στην θερμοφωταύγεια (παράγραφος 2.3):

α) το φαινόμενο της λεύκανσης μετά από έκθεση σε ηλιακό φως ή ηλιακό προσομοιωτή, όπου ολική ή μερική λεύκανση χαρακτηρίζει τους κρυστάλλους. Η ολική λεύκανση μηδενίζει

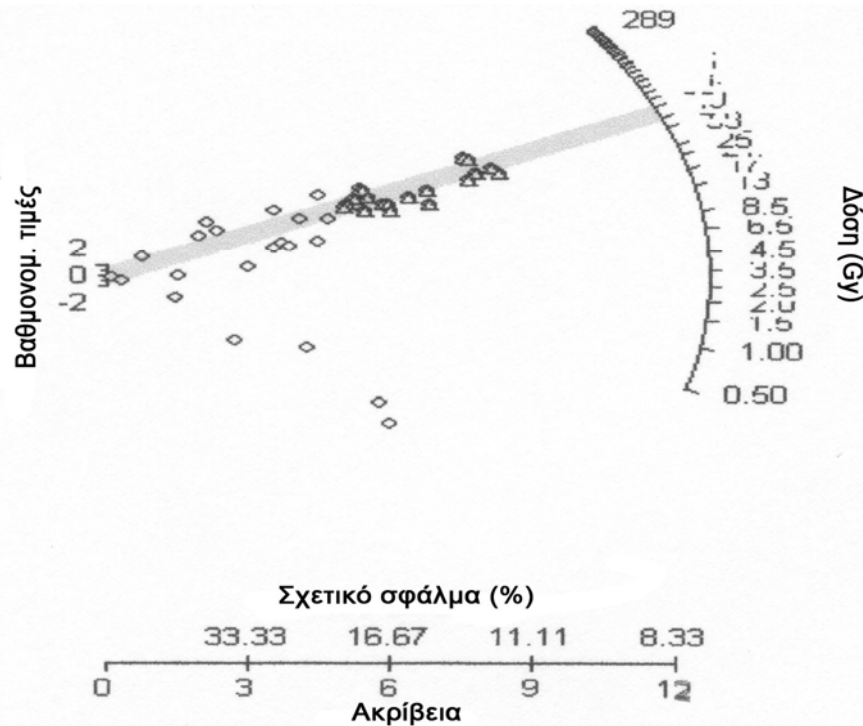
εντελώς τη φωταύγεια (συμβαίνει σε ογκόλιθους που περιέχουν χαλαζία ή άστριο) ή φθάνει σε οροπέδιο σταθερής φωταύγειας (συμβαίνει σε αγάλματα από μάρμαρο, σε πετρώματα ασβεστολιθικά). Η μερική λεύκανση υπονοεί μη μηδενική λεύκανση, ώστε θα πρέπει να προσδιοριστεί αυτό το παραμένον ποσό της φωταύγειας και μπορεί να συμβεί στην ταχεία τοποθέτηση λαξευμένων ασβεστολιθικών ογκόλιθων στον τοίχο.

Η μερική λεύκανση προσδιορίζεται από το τεστ οροπεδίου δόσεων, δηλαδή από την αφαίρεση της παραμένουσας θερμοφωταύγειας από τη φυσική θερμοφωταύγεια μετά από έκθεση σε φυσικό φως ή προσομοιωτή ηλιακού φωτός για διάφορα χρονικά διαστήματα και τον καθορισμό της ισοδύναμης ολικής δόσης ανά θερμοκρασία της καμπύλης της θερμοφωταύγειας. Η ισοδύναμη ολική δόση είναι ο μέσος όρος των τιμών που αποτελούν το μεγαλύτερο μήκος οροπεδίου (Σχ. 1.12) και αντιπροσωπεύει την υπολειπόμενη θερμοφωταύγεια στην αρχαία εποχή (Λυριτζής, 2005).



Σχ. 1.12: Τεστ οροπεδίου που εξηγεί τη σταθερότητα της θερμοφωταύγειας για το χρόνο που πέρασε (Διμήνι DM11). α) Φυσική θερμοφωταύγεια, β) φυσική θερμοφωταύγεια + 1000rad βήτα δόση (Λυριτζής, 1982).

Στην περίπτωση των ορυκτών του χαλαζία και του άστριου η ακριβής ισοδύναμη δόση από την άγνωστη λεύκανση μπορεί επίσης να καθοριστεί από ακτινωτά γραφήματα (Vafiadou et al., 2005) (radial plots (Galbraith et al., 1999) – σχ. 1.13).



Σχ. 1.13: Ακτινωτό διάγραμμα προσδιορισμού ισοδύναμης δόσης για το δείγμα 1A/B4, χρώμα από τη Φτελιά, Μυκόνου. Από τους 43 κόκκους (ανοιχτοί κύκλοι) που μετρήθηκαν οι 21 χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της τελικής τιμής (ανοιχτά τρίγωνα). Πρόκειται για τους κόκκους που έδωσαν ισοδύναμη δόση με σχετικό σφάλμα μικρότερο από 20%. Η μέση και τελική ισοδύναμη δόση για το δείγμα είναι  $41 \pm 5 \text{ Gy}$  (Vafiadou et al., 2005).

Η στατιστική αυτή μέθοδος εφαρμόστηκε κυρίως σε δείγματα που χρονολογήθηκαν με τη μέθοδο της οπτικά προτρεπόμενης φωταύγειας (παράγραφος 4) και με την τεχνική ανασύστασης μοναδικού κρυστάλλου, ώστε οι κρύσταλλοι με μερική λεύκανση να μην ακολουθούν τη γραμμική κατανομή (γκρι γραμμή στο σχήμα 1.13) αυτών με ολική λεύκανση, αλλά να απομακρύνονται από την τελική τιμή της ισοδύναμης ολικής δόσης η οποία υπολογίζεται από το πρόγραμμα των ακτινωτών γραφημάτων και σημειώνεται στο σχήμα 1.13 με την πρώτη γκρι γραμμή.

β) δεν πρέπει να συμβαίνουν τα φαινόμενα της προ-δόσης και της ανάρρωσης δόσης (recuperation) (Vafiadou et al., 2005; Λυριτζής, 2005).

### 3.2 Όργανο μετρήσεων

Οι μετρήσεις έγιναν στο Εργαστήριο Αρχαιομετρίας του τμήματος Φυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (Εικ. 1.1), όπως και οι μετρήσεις θερμοφωταύγειας.

Για το πείραμα της λεύκανσης χρησιμοποιήθηκε ηλιακό φως καθώς και τεχνητό φως από ηλιακό προσομοιωτή τύπου SOL2 της Dr. Hönle (Εικ. 1.2).



Εικ. 1.2: Εικόνα προσομοιωτή ηλιακού φωτός SOL2 (Εργαστήριο Αρχαιομετρίας Πανεπιστημίου Αιγαίου, Ρόδος).

Ο προσομοιωτής αποτελείται από έναν θάλαμο στον οποίο τοποθετούνται τα δείγματα. Στην οροφή βρίσκεται το σύστημα της λάμπας UV τύπου SOL – bulb 500S με ανακλαστήρα και με ένα φίλτρο H2 με μεταλλικό περίβλημα. Το σύστημα αυτό δίνει ένα φάσμα ακτινοβολίας πολύ κοντά σε αυτό του φυσικού φωτός από το υπεριώδες μέχρι και το υπέρυθρο (περίπου 295 – 3000nm). Πάνω από τη λάμπα υπάρχει ένα ανεμιστηράκι για την ψύξη του θαλάμου μετά το τέλος της έκθεσης του δείγματος στο φως της λάμπας.

Η αναλογία έκθεσης στον προσομοιωτή και έκθεσης στο ηλιακό φως είναι 1 προς 7 (μία ώρα μέσα στον προσομοιωτή αντιστοιχεί σε επτά ώρες έξω σε φυσικό φως).

### 3.3 Πρωτόκολλα προσδιορισμού Ισοδύναμης Δόσης

Όπως και στην περίπτωση της θερμοφωταύγειας, τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ισοδύναμης δόσης των δειγμάτων είναι αυτό των Προσθετικών Δόσεων Πολλαπλών Δισκίων και της Ανασύστασης Δόσεων Πολλαπλών Δισκίων.

Η τεχνική αυτή πήρε το όνομά της από το γεγονός ότι χρειάζονται πολλά δείγματα – δισκία για να παραχθεί το τμήμα εκείνο στο οποίο βρίσκεται η ισοδύναμη δόση, και επειδή εργαστηριακή δόση προστίθεται στη φυσική δόση. Είναι απαραίτητο στο πρωτόκολλο αυτό όλα τα δισκία να έχουν πανομοιότυπα χαρακτηριστικά φωταύγειας, όπως ευαισθησία στη δόση και το σχήμα της προκύπτουσας καμπύλης μετά τη μέτρηση του δισκίου, καθώς και η μάζα τους να είναι ίδιες. Το πιο σημαντικό είναι η υπόθεση ότι όλα τα δισκία έχουν «μηδενιστεί» στον ίδιο βαθμό. Δηλαδή θεωρούμε είτε ότι το όλο οίκημα έχει εκτεθεί σε αρκετό φως έτσι ώστε όλες οι ευαίσθητες στο φως παγίδες να έχουν αδειάσει, είτε ότι όλοι οι κόκκοι της σκόνης από την οποία

είναι φτιαγμένο το οίκημα, έχουν εκτεθεί ομοιόμορφα και στον ίδιο βαθμό στο ηλιακό φως έτσι ώστε όλες οι παγίδες σε κάθε κόκκο να έχουν εν μέρει αδειάσει στον ίδιο βαθμό. Στην πραγματικότητα βέβαια δε συμβαίνει κάτι τέτοιο. Για το λόγο αυτό φροντίζουμε τα δισκία να περιέχουν έναν αρκετά μεγάλο αριθμό από κόκκους σκόνης ώστε να υπολογίζονται κατά μέσον όρο επαρκώς όλα τα σχετικά χαρακτηριστικά.

Αρχικά τα πρωτόκολλα προσθετικών δόσεων πολλαπλών δισκίων προτάθηκαν για τη χρονολόγηση δειγμάτων κεραμικής, γιατί οι υψηλές θερμοκρασίες που εμπλέκονται στην κατασκευή τους είναι σίγουρο ότι αδειάζουν εντελώς όλα τα φωταυγή κέντρα και έτσι επιτυγχάνεται η ομοιογένεια στο «μηδενισμό» του θερμοφωταυγειακού «ρολογιού». Αντίθετα, στα υλικά τα οποία προέρχονται από ιζηματογενή πετρώματα και έχουν εκτεθεί στο ηλιακό φως, δεν είναι δυνατόν να βγει το συμπέρασμα ότι όλοι οι κόκκοι του υλικού έχουν ίδια ώρα έκθεσης. Παρόλα αυτά, τα πρωτόκολλα προσθετικών δόσεων χρησιμοποιούνται ευρέως για τη χρονολόγηση τέτοιων πετρωμάτων (Murray and Olley, 1999).

Πέρα όμως από όσα αναφέρθηκαν θα πρέπει να υπολογιστούν και αφαιρεθούν τα αποτελέσματα από τα πειράματα λεύκανσης και το οροπέδιο δόσεων.

### 3.4 Σφάλματα

Στην περίπτωση της μεθόδου αυτής και κυρίως στη χρονολόγηση των ασβεστολιθικών πετρωμάτων, τα σφάλματα στις μετρήσεις προέρχονται από:

α) τη μεγάλη διασπορά των μετρήσεων της φωταύγειας με την τεχνική των προσθετικών δόσεων, η οποία είναι και αυτή που χρησιμοποιείται κυρίως. Το σφάλμα που προκύπτει μπορεί να φτάσει και το 30%, το οποίο και ελαττώνεται με τη λήψη πολλαπλών μετρήσεων,

β) την περίπτωση της μερικής λεύκανσης. Κατά την αφαίρεση της παραμένουσας φωταύγειας από τη φυσική, στην περίπτωση αυτή, θα πρέπει το δείγμα να εκτίθεται στον ήλιο σε συχνά και κοντινά διαστήματα. Σε διαφορετική περίπτωση η ισοδύναμη ολική δόση που θα προκύψει θα έχει σφάλμα 20-30%,

γ) την καταστροφή της επιφάνειας της αρχικής λάξευσης είτε από τριβές με γειτονικό ογκόλιθο είτε από διάλυσης και διάβρωσης στον ίδιο τον ογκόλιθο. Φαινόμενα διάλυσης έχουμε στα πορώδη και μικρής σκληρότητας πετρώματα. Επίσης μπορεί να εμφανιστεί δευτερογενής ανάπτυξη άλατος ή ανάπτυξη φυτικής ύλης επάνω στο πέτρωμα τα οποία θα πρέπει να εντοπισθούν και να αντιμετωπιστούν ανάλογα, συνήθως με καθαρισμό με τη χρήση χημικών, υδροχλωρικού οξέως ή υπεροξειδίου του υδρογόνου, και τέλος

δ) την εσφαλμένη εκτίμηση του υδατικού περιεχομένου στο υλικό και το περιβάλλον. Η υγρασία μεταβάλλεται με το πέρασ του χρόνου έτσι ώστε να μην μπορούμε να πούμε με σιγουριά ότι το ποσοστό που έχει τώρα το περιβάλλον ενός δείγματος είναι ίδιο με αυτό που είχε πριν 1000 χρόνια ή και περισσότερο. Επίσης η υγρασία εξασθενεί της ακτινοβολίες α, β και γ, ώστε ο καθορισμός των ετήσιων δόσεων σε ξηρό δείγμα (όπως θα δούμε και στο δεύτερο

κεφάλαιο που αναφέρονται οι υπολογισμοί των ετήσιων δόσεων) να μην είναι ο αντιπροσωπευτικός και τα σφάλματα που μπορεί να προκύψουν στην ηλικία φτάνουν και το 15% (Λυριτζής, 2005).

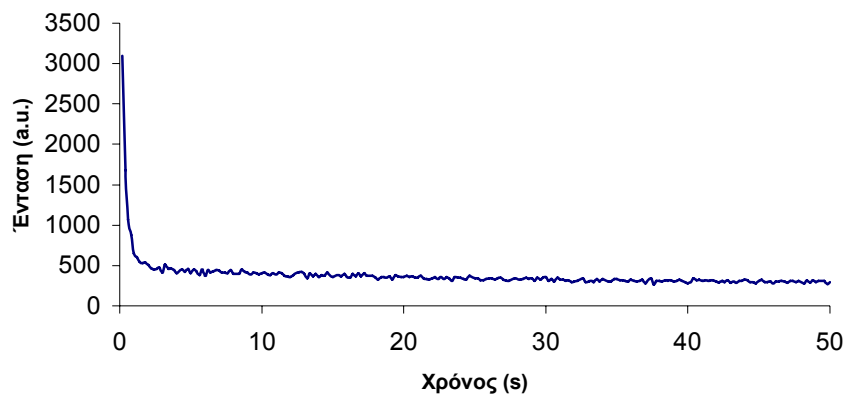
#### 4. Οπτικά Προτρεπόμενη Φωταύγεια

##### 4.1 Αρχές μεθόδου

Οι αρχές που διέπουν τη μέθοδο αυτή είναι οι ίδιες που διέπουν και αυτή της θερμοφωταύγειας. Η διαφορά εδώ είναι ότι το δείγμα δε θερμαίνεται για να εκδιωχθούν τα ηλεκτρόνια από τα φωταυγή κέντρα αλλά ακτινοβολείται με laser μονοχρωματικής ακτινοβολίας μπλε φωτός μήκους κύματος  $470\pm 30\text{nm}$  και υπέρυθρης ακτινοβολίας μήκους κύματος  $830\text{nm}$ .

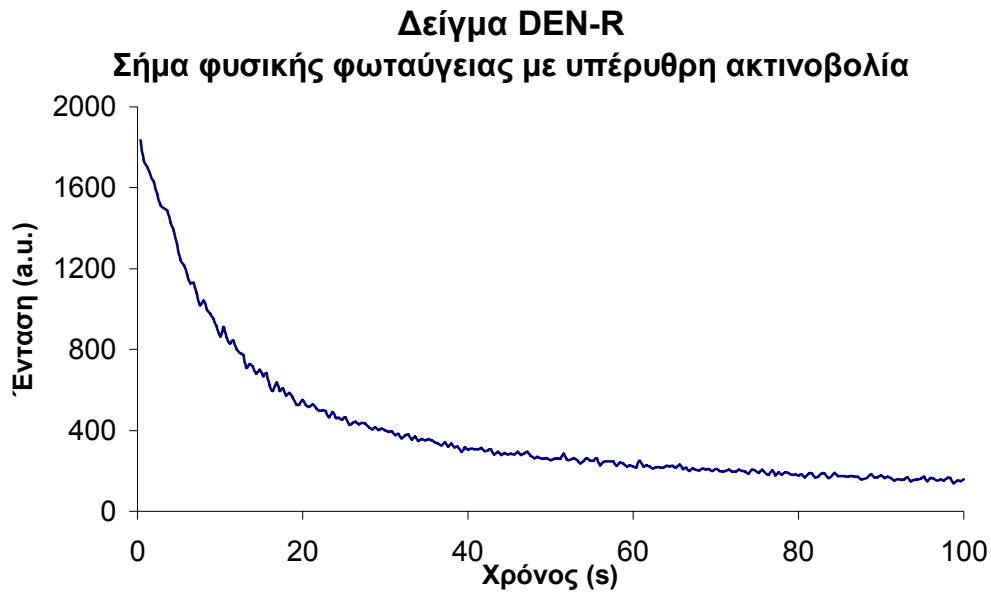
Η μέθοδος χρησιμοποιείται ευρέως στη χρονολόγηση γεωλογικών ιζημάτων αιολικής προέλευσης, θαλάσσιας ή ποτάμιας άμμου τα τελευταία 200.000 χρόνια (Murray and Olley, 2002; Liritzis, 2000; Liritzis et al., 2002), τέχνηργων, κεραμικής, κλιβάνους, εστίες, ακόμα και βραχογραφίες (Liritzis and Galloway, 1999; Liritzis et al., 1994; Roberts et al., 1997), υλικά δηλαδή που χρονολογούνται και με θερμοφωταύγεια, εκτός από τα ασβεστολιθικά (Galloway, 2002). Οι κρύσταλλοι του ασβεστίτη δε διεγείρονται από τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται για τη χρονολόγηση των άλλων υλικών. Αντίθετα ο χαλαζίας και ο άστριος που περιέχουν τα υπόλοιπα υλικά τα καθιστούν ιδανικά για χρονολόγηση με τη μέθοδο αυτή. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες χαλαζία (σχ. 1.14) και άστριου (σχ. 1.15) παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα καθώς και ένα δείγμα που αποτελείται και από τα δύο ορυκτά (σχ. 1.16 και σχ. 1.17).

**Δείγμα RHO-111**  
**Σήμα φυσικής φωταύγειας με Μπλε ακτινοβολία**

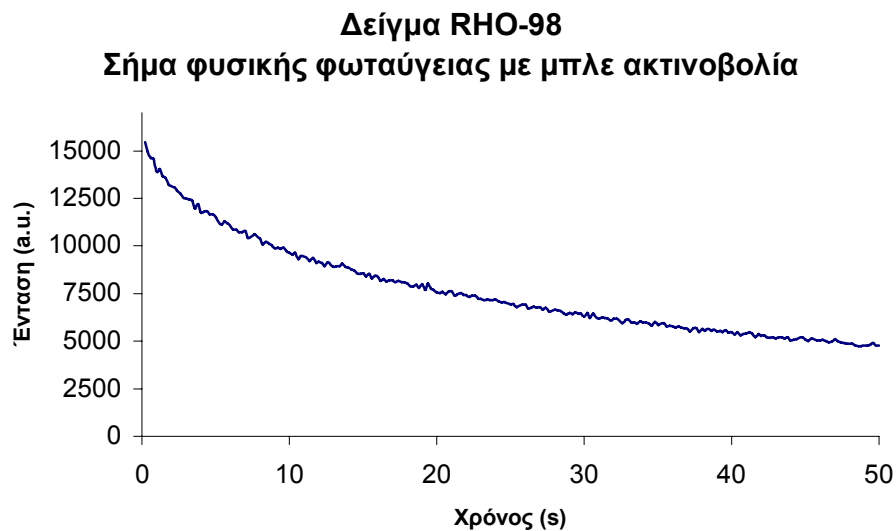




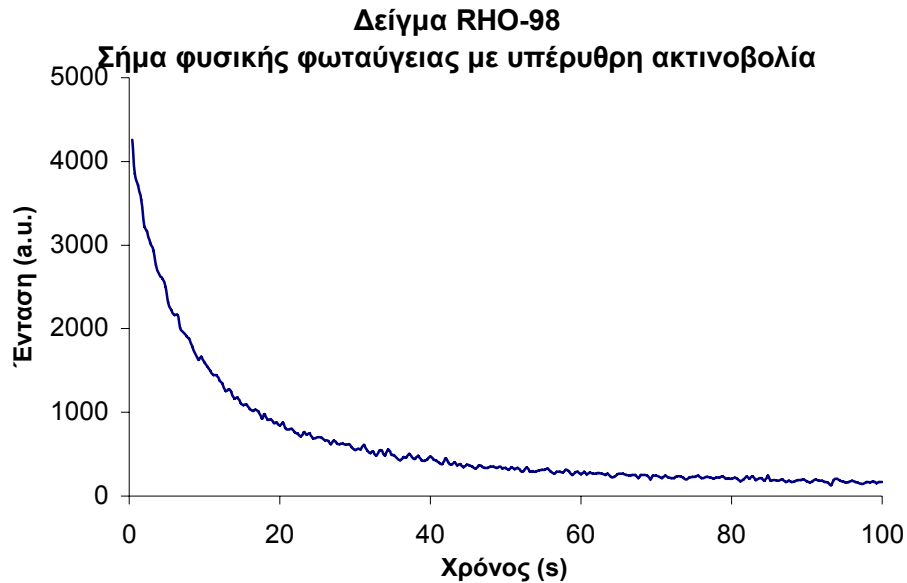
Σχ. 1.14: Απόκριση στο μπλε φως δείγματος που περιέχει 88% χαλαζία. Πρόκειται για το δείγμα ψαμμίτη RHO-111 (SETI IV). Μπορεί κανείς να διακρίνει την απότομη πτώση του σήματος μόλις στο πρώτα δευτερόλεπτα, γεγονός που χαρακτηρίζει το χαλαζία.



Σχ. 1.15: Απόκριση στο υπέρυθρο φως δείγματος που περιέχει άστριο. Πρόκειται για το δείγμα DEN-R (seq. db012, disc1). Μπορεί κανείς να διακρίνει την αργή συνιστώσα του σήματος που το κάνει να σβήνει αργά, γεγονός που χαρακτηρίζει τον άστριο. Το σήμα φτάνει σε πλατό μετά τα 40s (Vafiadou et al., 2005).



Σχ. 1.16: Απόκριση στο μπλε φως δείγματος που περιέχει άστριο και χαλαζία. Πρόκειται για το δείγμα γρανίτη RHO-98 (VT1). Μπορεί κανείς να διακρίνει τη γρήγορη και την αργή συνιστώσα του σήματος που έχουν ως συνέπεια το σήμα να σβήνει αργά και να φτάνει σε πλατό στους 5000 παλμούς περίπου.



Σχ. 1.17: Απόκριση στο υπέρυθρο φως δείγματος που περιέχει άστριο και χαλαζία. Πρόκειται για το δείγμα γρανίτη RHO-98 (VT1). Μπορεί κανείς να διακρίνει την αργή συνιστώσα του σήματος που το κάνει να σβήνει αργά, γεγονός που χαρακτηρίζει τον άστριο. Το σήμα φτάνει σε πλατό μετά τα 40s.

Θα πρέπει να πούμε εδώ ότι η μπλε ακτινοβολία διεγείρει τόσο τα ορυκτά του χαλαζία όσο και αυτά του αστρίου, ενώ η υπέρυθη μόνο αυτά του αστρίου (Λυριτζής, 2005). Έτσι στον καθαρό χαλαζία και στην ακτινοβολήση με μπλε φως η καμπύλη έχει μεγαλύτερη κλίση στα 3 πρώτα δευτερόλεπτα από ότι στο μεικτό δείγμα.

Η δειγματοληψία και στην περίπτωση αυτή γίνεται σε όσο πιο σκοτεινές συνθήκες γίνεται έτσι ώστε να μην εκτεθεί η προς χρονολόγηση επιφάνεια στο φως του ήλιου και η επεξεργασία του δείγματος στο εργαστήριο σε συνθήκες φωτογραφικού θαλάμου.

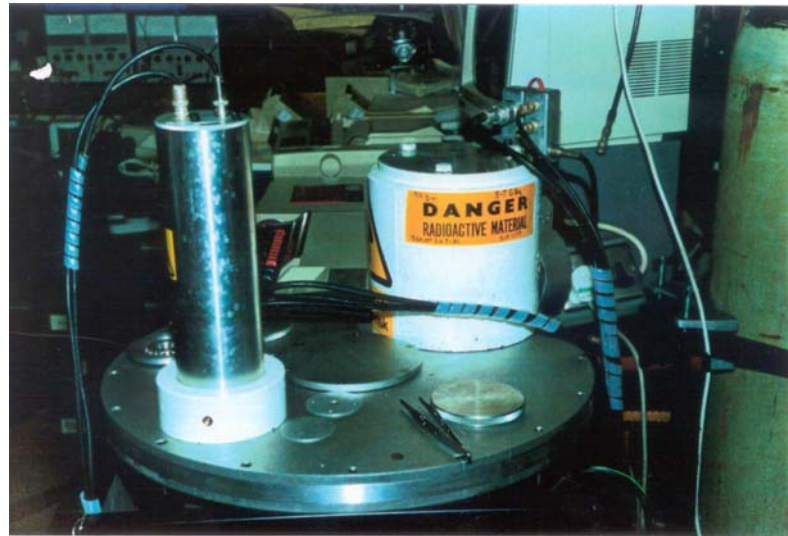
Οι παράγοντες που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα είναι οι ίδιοι με την περίπτωση της θερμοφωταύγειας. Τα σφάλματα που προκύπτουν στην περίπτωση των δειγμάτων με χαλαζία και άστριο είναι μικρότερα από αυτά της θερμοφωταύγειας. Σε καμένα υλικά η οπτική φωταύγεια δίνει σφάλμα  $\pm 3-7\%$ , ενώ στα ορυκτά αυτά μόλις 3-5%.

#### 4.2 Όργανο μετρήσεων

Μετρήσεις οπτικής φωταύγειας έγιναν στο Εργαστήριο Αρχαιομετρίας του Πανεπιστημίου του Εδιμβούργου, Εργαστήριο Αρχαιομετρίας του διεθνούς εργαστηρίου Risø, στο Roskilde της Δανίας και στο Εργαστήριο Αρχαιομετρίας του Ινστιτούτο Πολιτιστικής και Εκπαιδευτικής Τεχνολογίας (Ι.Π.Ε.Τ.) στην Ξάνθη.

Το σύστημα του Πανεπιστημίου του Εδιμβούργου είναι κατασκευασμένο από το προσωπικό του εργαστηρίου και αποτελείται από laser με μπλε, πράσινες και υπέρυθρες

διόδους, οι οποίες ακτινοβολούν στο δείγμα – δισκίο στο μέσο μιας πλάκας (Liritzis et al., 1996a; Galloway, 1992, 1994a, 1994b). Τα δισκία θερμαίνονται σε περιβάλλον αζώτου σε θερμοκρασίες 50-450°C με ρυθμό 4°C/s. Η ανίχνευση του φάρματος γίνεται από στο πράσινο από διόδους εκπομπής φωτός (LEDs) τύπου TLMP7513 (μ.κ. 330-390nm), με ένταση που φτάνει στο δείγμα στα 0,2mWcm<sup>-2</sup> και φίλτρα BG39, UG11, 7-59, 7-60, και στο υπερύθρου από διόδους εκπομπής φωτός (LEDs) τύπου TSUS5402 (μ.κ. 290-400nm), με ένταση που φτάνει στο δείγμα στα 50mWcm<sup>-2</sup> και φίλτρα BG39, 7-39. Η ακτονοβόληση των δισκίων γίνεται από πηγή βήτα σωματιδίων <sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y η οποία παρέχει 0,1165Gy/s. Το σύστημα φαίνεται στην εικ. 1.3.

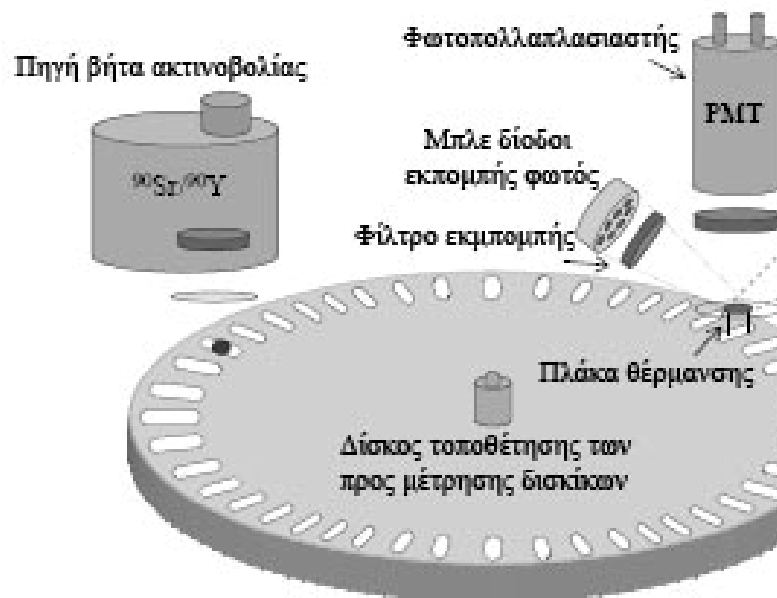


Εικ. 1.3: Συσκευή μέτρησης οπτικής φωταύγειας του Εργαστηρίου Αρχαιομετρίας του Πανεπιστημίου του Εδιμβούργου (Galloway, 1992).

Το σύστημα στα εργαστήρια Risøe στη Δανία και Ξάνθης είναι το ίδιο. Πρόκειται για έναν αυτοματοποιημένο μετρητή Risø TL/OSL εξοπλισμένο με Μπλε διόδους εκπομπής φωτός (LED) (~50mW/cm<sup>2</sup> στα 470±30nm) και Υπέρυθρο (IR) laser (~500mW/cm<sup>2</sup> στα 830nm) για πηγές εξομοίωσης φωταύγειας (Bøtter-Jensen et al., 2000). Η φωταύγεια ανιχνεύεται από φίλτρο 9mm U-340, και στον καταμετρητή (reader) είναι προσαρμοσμένη εσωτερική πηγή βήτα σωματιδίων <sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y, η οποία παρέχει στο σύστημα στην Ξάνθη δόση 0,0876Gy/s και σε αυτό της Δανίας 0,024Gy/s (Εικ. 1.4). Μια σχηματική αναπαράσταση του συστήματος με το δίσκο στον οποίο τοποθετούνται τα δισκία με τη σκόνη για χρονολόγηση φαίνεται στο σχ. 1.18.



Εικ. 1.4: Ο αυτοματοποιημένος μετρητής Risø TL/OSL (Bøtter-Jensen, 1997; Bøtter-Jensen et al., 2000).



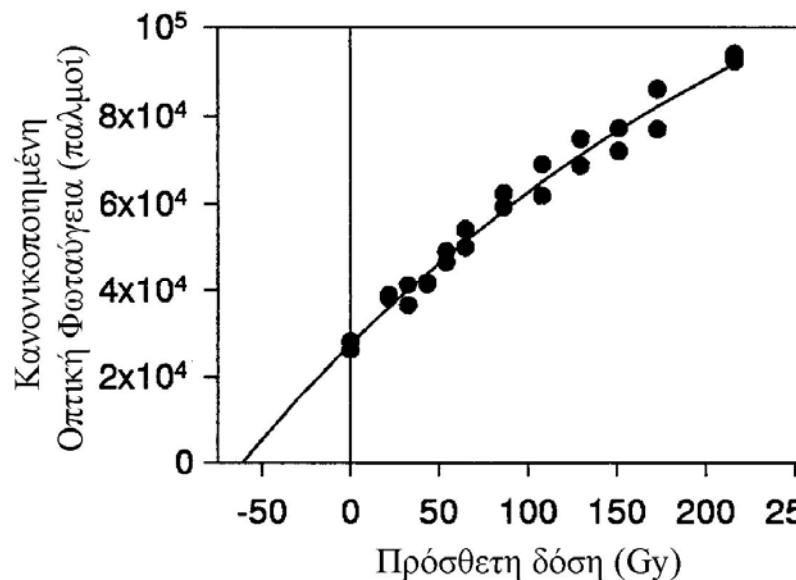
Σχ. 1.18: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος μέτρησης οπτικής φωταύγειας των εργαστηρίων Δανίας και Ξάνθης. Διακρίνονται ο δίσκος στον οποίο τοποθετούνται τα προς μέτρηση δισκία, η πηγή βήτα ακτινοβολίας, το μπλε και υπέρυθρο laser, ο ανιχνευτής και ο φωτοπολλαπλασιαστής (Thomsen, 2004).

#### 4.3 Τεχνικές και πρωτόκολλα μετρήσεων

##### 4.3.1 Πρωτόκολλα Πολλαπλών Δισκίων

Με τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο η τεχνική μεγάλων κόκκων χαλαζία. Από τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιήθηκαν κατά καιρούς, το πιο παλιό είναι το Πρωτόκολλο Προσθετικών Δόσεων Πολλαπλών Δισκίων, στην απλούστερη μορφή του οποίου χρησιμοποιούνται δύο δείγματα – δισκία όμοιων χαρακτηριστικών

(διάμετρος, βάρος, βαθμός «μηδενισμού» από τον ήλιο ή από θέρμανση, ευαισθησία στην ακτινοβόληση). Στο ένα δίνεται πρόσθετη εργαστηριακή δόση, μετράμε τη φωταύγεια των δύο δισκίων και κατασκευάζουμε διάγραμμα του σήματος με την εργαστηριακή δόση. Από την εξίσωση της ευθείας που προκύπτει υπολογίζεται η ισοδύναμη δόση. Στην πραγματικότητα βέβαια απαιτούνται πολύ περισσότερα δείγματα – δισκία από δύο, όσο περισσότερα τόσο πιο ακριβείς είναι οι υπολογισμοί (Murray and Olley, 1999). Έτσι η τιμή της ισοδύναμης δόσης εξαρτάται από την αλγεβρική εξίσωση η οποία χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των δεδομένων.



Σχ. 1.19: Καμπύλη ανάπτυξης δείγματος χαλαζία που προέρχονται από άμμο στη βορειοδυτική Αυστραλία. Οι μετρήσεις έγιναν σύμφωνα με την έρευνα που διεξάχθηκε για το άρθρο Murray et al., 1997 (δισκία με 3mg περίπου σκόνη, προθέρμανση στους 280°C για 10s μετά από κάθε ακτινοβόληση και πριν από κάθε μέτρηση). Η καμπύλη προσομοίωσης είναι της μορφής  $Y=A(1-e^{-bx})$  και η ισοδύναμη δόση που προκύπτει  $61 \pm 9$  Gy.

Επειδή που η χρήση των πρωτοκόλλων πολλαπλών δισκίων, όπως ειπώθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, απαιτεί πολλές παραδοχές για την εφαρμογή τους και παρόλο που αναγνωρίστηκε ότι συστηματικά υπερεκτιμούν ισοδύναμη δόση, και κατ' επέκταση, και την ηλικία υλικών με ιζηματογενή προέλευση, έγινε προσπάθεια να τροποποιηθούν τα

πρωτόκολλα αυτά. Το αποτέλεσμα ήταν μια σειρά νέων πρωτοκόλλων που επιτρέπουν στους ερευνητές να κάνουν μετρήσεις προσδιορισμού ισοδύναμης δόσης με ένα μόνο δισκίο.

#### 4.3.2 Πρωτόκολλα Μοναδικού Δισκίου

##### 4.3.2.1 Πρωτόκολλο Προσθετικών Δόσεων Μοναδικού Δισκίου

Η πρώτη υπόδειξη για τη δυνατότητα χρησιμοποίησης μοναδικού δισκίου με πρωτόκολλο πολλαπλών δόσεων έγινε από τους Huntley et al. το 1985. Στο άρθρο αυτό επισημαίνεται ότι αφού είναι δυνατή η μέτρηση σήματος οπτικά προτρεπόμενης φωταύγειας ακτινοβολώντας με οπτική πηγή για μικρό χρονικό διάστημα, θα είναι πρακτική η λήψη του φυσικού σήματος οπτικής φωταύγειας σε ένα δισκίο, χωρίς να αδειάσουν σημαντικά οι οπτικά ευαίσθητες παγίδες, πριν δοθεί εργαστηριακή δόση. Ένα από τα προβλήματα που προέκυψαν από την πρόταση αυτή είναι η προθέρμανση (preheating) που χρειάζεται το δείγμα πριν την ακτινοβολήση με laser για το άδειασμα των θερμικά ασταθών παγίδων ηλεκτρονίων και για τη διαδικασία μεταφοράς φορτίων στις οπτικά ευαίσθητες παγίδες (Rhodes, 1988; Godfrey-Smith et al., 1988; Godfrey-Smith and Haskell, 1993).

Πρόοδος στην επίλυση των προβλημάτων αυτών έγινε από τον Duller το 1991, ο οποίος παρουσίασε το αποκαλούμενο Πρωτόκολλο Προσθετικών Δόσεων Μοναδικού Δισκίου για δείγματα με άστριο, παρόλο που απαιτούσε για την εφαρμογή του δύο δείγματα – δισκία. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό το δείγμα προθερμαίνεται στους 220°C για 10 λεπτά πριν από κάθε μέτρηση για να αδειάσει η ασταθής φωτοκορυφή του καλιούχου αστρίου των 270°C. Μετά τη μέτρηση του φυσικού σήματος δίνεται μια βήτα δόση στο δισκίο, προθερμαίνεται και μετριέται. Ακτινοβολώντας λοιπόν το δείγμα με όλο και μεγαλύτερη δόση κατασκευάζουμε την καμπύλη ανάπτυξης του δείγματος

(growth curve). Το μειονέκτημα της διαδικασίας αυτής είναι ότι κάθε προθέρμανση αφαιρεί και μέρος του σταθερού σήματος μαζί με το ασταθές. Μετά την πρώτη ακτινοβόληση με βήτα, η προθέρμανση θα αδειάσει όλες τις ασταθείς παγίδες αλλά και ένα μέρος του σταθερού φυσικού σήματος. Είναι λοιπόν απαραίτητο να γίνει διόρθωση για την απώλεια του σήματος αυτού. Η απώλεια του σήματος μπορεί να καθοριστεί από ένα δεύτερο δισκίο το οποίο προθερμαίνεται και μετριέται αρκετές συνεχόμενες φορές χωρίς την ακτινοβόληση του δισκίου με πρόσθετη βήτα δόση.

Η μέτρηση γίνεται με σύντομη ακτινοβόληση του δισκίου στο υπέρυθρο για 0,1s. Το σύντομο χρονικό διάστημα της μέτρησης προκαλεί αμελητέα απώλεια σήματος. Παρόλα αυτά το σφάλμα σε μια τέτοια μέτρηση μπορεί να είναι σχετικά μεγάλο, ειδικά σε δείγματα με χαμηλό σήμα. Μια ακτινοβόληση για μισό δευτερόλεπτο βελτιώνει την ικανότητα αναπαραγωγής των μετρήσεων και η διόρθωση για την απώλεια του σήματος ενσωματώνεται στη διόρθωση για τις απώλειες λόγω προθέρμανσης (Duller, 1991).

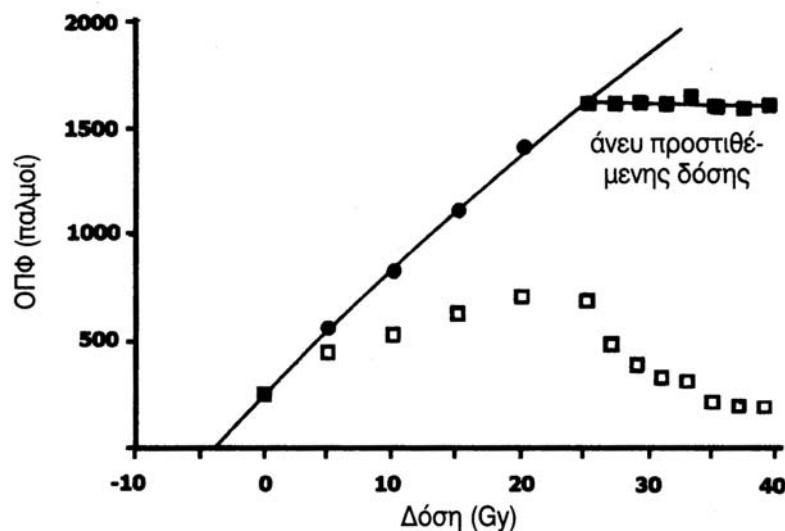
Αργότερα ο Galloway το 1996, το τροποποίησε έτσι ώστε να χρειάζεται πραγματικά μόνο ένα δισκίο. Στην ανάλυση αυτή προτείνεται η χρήση των μετρήσεων χωρίς την πρόσθετη βήτα δόση για τη διόρθωση της καμπύλης ανάπτυξης του δείγματος, βάση του γεγονότος ότι το αποτέλεσμα των μετρήσεων αυτών μπορεί να προσομοιωθεί από μια απλή μαθηματική συνάρτηση εξαρτώμενη μόνο από έναν παράγοντα, η οποία είναι της μορφής

$$f_n = 1 - a \cdot \ln(n)$$

(1.4)

όπου  $n$  ο αριθμός των επαναλαμβανόμενων προθερμάνσεων. Ο παράγοντας αυτός μπορεί να βρεθεί

εφαρμόζοντας και την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων στις μετρήσεις χωρίς την πρόσθετη δόση οι οποίες πραγματοποιούνται μετά το πέρας της διαδικασίας των προσθετικών δόσεων (ακτινοβόληση – προθέρμανση – μέτρηση). Στις συνεχόμενες αυτές μετρήσεις, όπως φαίνεται στο σχ. 1.20 και όπως άλλωστε είναι αναμενόμενο, το σήμα μειώνεται. Η διόρθωση που θα θεωρείται επιτυχή εάν οι μετρήσεις αυτές στο τέλος των υπολογισμών θα είναι περίπου ίσες.

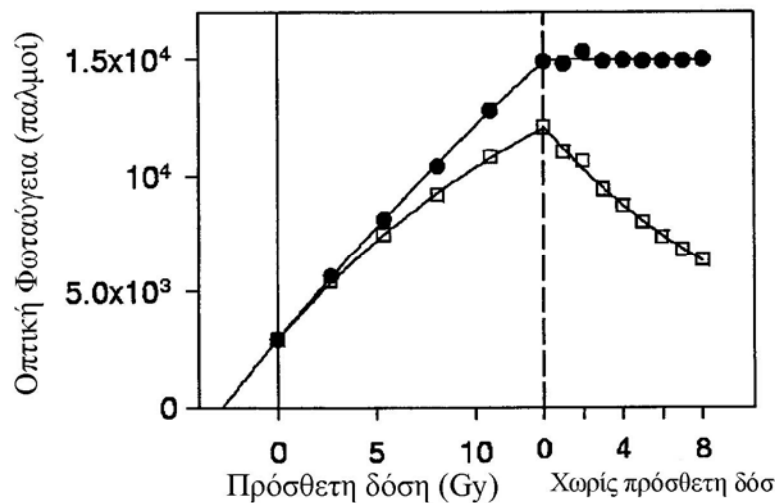


Σχ. 1.20: Προσδιορισμός ισοδύναμης δόσης με το πρωτόκολλο των προσθετικών δόσεων μοναδικού δισκίου (Λυριτζής, 2005).

Παράλληλα, μια παρόμοια εργασία από τον Murray το 1997 παρουσίαζε το Πρωτόκολλο Προσθετικών Δόσεων Μοναδικού Δισκίου για δείγματα χαλαζία. Αρχικά ένα δείγμα – δισκίο προθερμαίνεται για 10s στους 280°C. Στη συνέχεια γίνεται μέτρηση της οπτικά προτρεπόμενης φωταύγειας γίνεται για 0,1s από πηγή – λάμπα αλογόνου ή από διόδους μπλε φωτός (Bøtter-Jensen, 1997) και το δισκίο ακτινοβολείται με ακτινοβολία βήτα. Γίνεται προθέρμανση και πάλι και μέτρηση οπτικής φωταύγειας. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται αρκετές φορές με αυξανόμενες βήτα δόσεις (σχ. 1.21). Και στην περίπτωση αυτή όπως και με το υπέρυθρο φως έχουμε απώλεια σήματος



τόσο από τη διέγερση με την πηγή φωτός όσο και από την προθέρμανση του δείγματος. Ο παράγοντας διόρθωσης υπολογίζεται την καμπύλη που προκύπτει μετά από συνεχείς προθερμάνσεις και μετρήσεις οπτικής φωταύγειας, μετά το τέλος της διαδικασίας των προσθετικών δόσεων στο ίδιο δισκίο χωρίς πρόσθετη βήτα δόση. Η λογική για τον υπολογισμό του παράγοντα διόρθωσης είναι η ίδια με την προηγούμενη περίπτωση του αστρίου, μόνο που στο χαλαζία η συνάρτηση είναι της μορφής  $Y=ae^{-nx}$  όπου  $n$  ο αριθμός προθερμάνσεων του δισκίου.



Σχ. 1.21: Εφαρμογή του Πρωτοκόλλου Προσθετικών Δόσεων Μοναδικού Δισκίου σε δείγματα χαλαζία από την ανατολική ακτή του Queensland της Αυστραλίας. Τα σημεία με τα ανοιχτά τετράγωνα δείχνουν τα παρατηρούμενα αποτελέσματα. Τα τελευταία οχτώ μετρήθηκαν χωρίς να έχουν ακτινοβοληθεί πριν. Τα σημεία έχουν διορθωθεί με τη χρήση του ρυθμού πτώσης των οχτώ τελευταίων αυτών μετρήσεων, όπως περιγράφεται στο Murray et al., 1997. Τα διορθωμένα παρουσιάζονται με μαύρους κύκλους (Murray and Olley, 1999).

#### 4.3.2.2 Πρωτόκολλο Ανασύστασης Δόσεων Μοναδικού Δισκίου

Πρόσφατα οι Murray και Roberts (1998) πρότειναν ένα πρωτόκολλο ανασύστασης μοναδικού δισκίου για δείγματα χαλαζία. Στο πρωτόκολλο αυτό, αντίθετα με αυτό των προσθετικών δόσεων το σήμα της οπτικά προτρεπόμενης φωταύγειας αφαιρείται σχεδόν όλο κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης. Κατόπιν το σήμα αναπαράγεται από εργαστηριακή δόση. Επειδή όμως τέτοια αναπαραγωγή σήματος προκαλεί μεταβολές στην

ευαισθησία των δειγμάτων η μέθοδος αυτή μέχρι τότε δεν εφαρμοζόταν. Μάλιστα ο Duller για τα δείγματα αστρίου την είχε απορρίψει (Duller, 1991). Στην πρόταση των Murray και Roberts οι μεταβολές στην ευαισθησία διορθώνονται επιτυχώς. Το μοντέλο αυτό εξελίχθηκε γρήγορα και με τη μορφή που χρησιμοποιείται τελικά σήμερα παρουσιάζεται αναλυτικά από τους Murray και Wintle (2000). Στη μορφή του αυτή, το δισκίο αρχικά προθερμαίνεται μέχρι μια θερμοκρασία, συνήθως 160 – 300°C για 10s. Η μέτρηση του φυσικού σήματος οπτικής φωταύγειας γίνεται σε θερμοκρασία 125°C για 50-100s (ο χρόνος προσομοίωσης εξαρτάται από την ένταση και το μήκος κύματος της πηγής). Κατόπιν δίνεται δοκιμαστική βήτα δόση, συνήθως το 10-20% της ισοδύναμης δόσης, και το δείγμα θερμαίνεται στους 160°C για να αδειάσουν οι παγίδες που είναι ασταθείς στη θερμοκρασία δωματίου. Στη συνέχεια γίνεται μέτρηση του δισκίου και ο κύκλος επαναλαμβάνεται μετά την ακτινοβόληση με την πρώτη βήτα δόση ανασύστασης. Συνοπτικά τα βήματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1.1: Περιγραφή Πρωτοκόλλου Ανασύστασης Μοναδικού Δισκίου.

	Βήμα	Δείγμα χαλαζία
1.	Δόση Ανασύστασης $D_i$ (= 0 Gy αν $i=0$ , δηλ. μέτρηση φυσικής δόσης)	
2.	Προθέρμανση	160-300°C για 10s
3.	Μέτρηση ΟΠΦ	50 – 100s μπλε δίοδοι στους 125°C (= $L_i$ )
4.	Δοκιμαστική Δόση, $D_t$	
5.	Θέρμανση	160°C
6.	Μέτρηση ΟΠΦ	50 – 100s μπλε δίοδοι στους 125°C (= $T_i$ )

7.	Επαναλαμβάνονται τα βήματα 1. με 6. για τις δόσεις ανασύστασης συμπεριλαμβανομένου και μιας μηδενικής δόσης και της πρώτης δόσης ανασύστασης η οποία επαναλαμβάνεται.
----	---

Υπολογίζεται ο λόγος  $L_i/T_i$  για τη φυσική και τις δόσεις ανασύστασης και γίνεται διάγραμμα συναρτήσεως της εργαστηριακής δόσης,  $D_i$

Η δοκιμαστική δόση που δίνεται χρησιμοποιείται για τη διόρθωση λόγω μεταβολών της ευαισθησίας από τις συνεχείς προθερμάνσεις, υπολογίζοντας απλά το λόγο  $L_i/T_i$ . Επαναλαμβάνοντας τον κύκλο για πολλές εργαστηριακές δόσεις ανασύστασης, οι οποίες επιλέγονται να είναι όσο το δυνατόν κοντά στη ζητούμενη ισοδύναμη δόση, (σε μια τυπική μέτρηση υπολογισμού ισοδύναμης σε ένα δισκίο δίνονται τρεις δόσεις), κατασκευάζεται μια καμπύλη δόσης με την κανονικοποιημένη ένταση σήματος (καμπύλη ανάπτυξης δόσεων – growth curve ) (σχ 1.22).

Παρακάτω δίνονται περιληπτικά οι λόγοι για τους οποίους χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι του πίνακα 1.1 για το πρωτόκολλο αυτό (θερμοκρασία μέτρησης, προθέρμανση, προθέρμανση δοκιμαστικής δόσης).

Σε χαμηλές θερμοκρασίες, σε θερμοκρασίες δωματίου, ο ρυθμός διαφυγής των ηλεκτρονίων από τις παγίδες τους αυξάνει κατά 1% περίπου ανά °C (Aitken, 1998). Έχει παρατηρηθεί ότι μέτρηση οπτικής φωταύγειας σε υψηλότερες θερμοκρασίες έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη εξαγωγή φωτός και πιο απότομη πτώση του σήματος με το χρόνο (όπως το σήμα του σχ. 1.14). Σε υψηλότερη όμως θερμοκρασία υπάρχει και η ανταγωνιστική διεργασία της «θερμικής ανόπτησης», η οποία προκαλεί τη μείωση της αποδοτικότητας των φωταυγών κέντρων με την αύξηση της θερμοκρασίας (Chen and McKeever, 1997; Wintle, 1975). Εξαιτίας αυτής της διεργασίας, ο συνολικός αριθμός ηλεκτρονίων, το συνολικό ποσό φωτός, που δίνουν το σήμα οπτικής φωταύγειας είναι μικρότερος για υψηλότερες θερμοκρασίες.

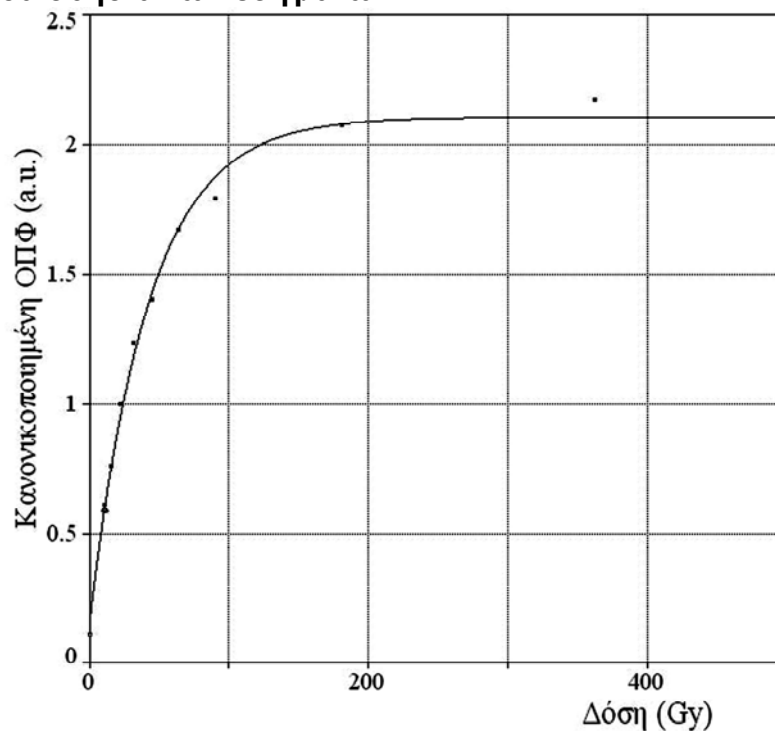
Με την προσομοίωση όμως με υψηλή ισχύ σε υψηλότερη θερμοκρασία υπάρχει το πρακτικό πλεονέκτημα της μείωσης του υποστρώματος, ειδικά για τα λιγότερο φωτεινά δείγματα, λόγω της νεαρής τους ηλικίας.

Επίσης έχει βρεθεί ότι κατά τη διάρκεια της μέτρησης οπτικής φωταύγειας ηλεκτρόνια μεταφέρονται μέσα και έξω από τη φωτοκορυφή των 110°C (Bailey 1997; Wintle and Murray, 1997; Murray and Wintle, 1998). Το φαινόμενο αυτό επηρέαζε το σχήμα του οπτικού σήματος (Murray and Wintle, 1998). Έχοντας ως δεδομένα τη δυσκολία της διατήρησης σταθερής θερμοκρασίας δωματίου και τα φαινόμενα που προαναφέρθηκαν οι Wintle και Murray (2000) πρότειναν η μέτρηση της οπτικά προτρεπόμενης φωταύγειας να γίνεται στους 125°C.

Αρκετοί ήταν οι λόγοι που οδήγησαν στη χρήση προθέρμανσης. Κατά την ακτινοβόληση ενός δείγματος, τόσο οι βαθιές – σταθερές όσο και οι ρηχές – ασταθείς παγίδες γεμίζουν. Οι

ρηχές παγίδες δε θα συνεισφέρουν στο σήμα φυσικής φωταύγειας, καθόσον δε μπορούν να κρατήσουν ένα μεγάλο μέρος ηλεκτρονίων καθ' όλο το χρονικό διάστημα που το υλικό ήταν θαμμένο. Εάν το σήμα της οπτικά προτρεπόμενης φωταύγειας καταγραφεί αμέσως μετά την ακτινοβόληση στο εργαστήριο, οι ρηχές παγίδες δε θα έχουν αδειάσει και θα συνεισφέρουν στο μετρούμενο εργαστηριακό σήμα φωταύγειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μειωμένη τελική ισοδύναμη δόση. Επιπλέον, κάποια από τα ηλεκτρόνια που θα διαφύγουν από τις ρηχές παγίδες, μπορεί να παγιδευτούν σε βαθιές παγίδες ή φωταυγή κέντρα. Στη φύση η διαδικασία αυτή θα συμβεί σε κάποιο βαθμό που εξαρτάται από τις συνθήκες ταφής του υλικού και σταθερότητας των παγίδων. Στο εργαστήριο όμως η διαδικασία αυτή δε συμβαίνει και οδηγεί σε υπερεκτίμηση της τελικής ισοδύναμης δόσης. Τέλος, έχει αποδειχθεί ότι η ευαισθησία του χαλαζία εξαρτάται ισχυρά από τις ακριβείς συνθήκες προηγούμενης χρήσης του. Συνεπώς, η απόκριση φωταύγειας δειγμάτων χαλαζία σε φυσική και εργαστηριακές δόσεις θα είναι διαφορετική (Aitken, 1998). Για τους λόγους αυτούς η προθέρμανση των δειγμάτων πριν από τη φυσική μέτρηση και πριν από τις δόσεις ανασύστασης είναι απαραίτητη.

**Τέλος, όσον αφορά την προθέρμανση πριν τη δοκιμαστική δόση, πραγματοποιείται για το άδειασμα των ρηχών παγίδων, όπως αυτών που σχετίζονται και τη φωτοκορυφή των 110°C, αλλά διατηρείται χαμηλά, για να μην προκαλέσει επιπλέον μεταβολές στην ευαισθησία των δειγμάτων.**



**Σχ 1.22: Καμπύλη ανάπτυξης δόσεων του δείγματος 1A/B4, χρώμα από τη Φτελιά Μυκόνου. Δόσεις που χρησιμοποιήθηκαν 11, 16, 23, 32, 45, 63, 91, 181, 363, 725Gy (seq. db006, disc3).**

Για την αξιοπιστία της μεθόδου αναπτύχθηκαν δύο απλοί έλεγχοι. Ο ένας είναι η επανάληψη στο τέλος της διαδικασίας, και μετά από πολλές ακτινοβολήσεις του δείγματος με μεγάλες δόσεις, της πρώτης και μικρότερης δόσης ανασύστασης. Για να δουλεύει σωστά η συνολική διαδικασία και για να έχουν διορθωθεί οι αλλαγές στην ευαισθησία του δισκίου μετά από συνεχείς ακτινοβολήσεις, άρα για να είναι αξιόπιστο το αποτέλεσμα θα πρέπει η διορθωμένη τιμή του σήματος θα πρέπει να είναι περίπου ίδια με την πρώτη ακτινοβολήση. Στο σχήμα 1.22 η καμπύλη ανασύστασης παρουσιάζεται με συνεχή γραμμή (η καμπύλη προσομοίωσης είναι της μορφής  $y=a+b(1-e^{-x})$ ) και η μέτρηση αυτή φαίνεται με το ανοιχτό τρίγωνο, το οποίο και πέφτει πολύ κοντά στην πρώτη μέτρηση.

Ο δεύτερος έλεγχος αφορά τη μέτρηση του διορθωμένου σήματος μετά από έκθεση του δισκίου σε μηδενική δόση. Αυτή θα πρέπει βεβαίως να είναι μηδενική, στην πραγματικότητα όμως παρατηρείται ένα πολύ μικρό σήμα. Η ανάρρωση δόσης (recuperation) συνδέεται με την μεταφορά ηλεκτρονίων λόγω της προθέρμανσης από παγίδες που είναι δύσκολο να αδειάσουν με οπτική προσομοίωση, στα φωταυγή κέντρα. Στο σχ. 1.22 η μέτρηση αυτή παρουσιάζεται με ανοιχτό τετράγωνο.

Για την περίπτωση των δειγμάτων αστρίου το πρωτόκολλο τροποποιήθηκε από τους Wallinga et. al.(2000). Μέχρι τώρα οι μεταβολές στην ευαισθησία των δειγμάτων που προκαλούνται από τις συνεχείς ακτινοβολήσεις και θερμάνσεις είχαν αποτρέψει τους επιστήμονες από το να χρησιμοποιήσουν τις τεχνικές μοναδικού δισκίου σε δείγματα αστρίου (Duller, 1991, 1995; Richardson, 1994). Χρησιμοποιήθηκε η ίδια λογική με αυτή των Murray και Wintle (2000) με τη δοκιμαστική βήτα δόση για τη διόρθωση της ευαισθησίας, μόνο που στην περίπτωση αυτή η μέτρηση του σήματος γίνεται με laser στο υπέρυθρο. Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων έδειξαν ότι και οι μεταβολές στην ευαισθησία διορθώνονταν ικανοποιητικά και προβλήματα ανάρρωσης δόσης δεν υπήρχαν. Επίσης έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με το πρωτόκολλο προσθετικών δόσεων μοναδικού δισκίου στα ίδια δείγματα με τις προκύπτουσες ισοδύναμες δόσεις να συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό. Παρόλα αυτά όμως

το πρωτόκολλο μοναδικού δισκίου δε διορθώνει το πρόβλημα της χαμηλής εκτίμησης της ηλικίας των δειγμάτων (Wallinga et al., 2000; Wallinga and Duller, 2000).

#### 4.4 Χρονολογήσεις με μετρήσεις Δειγμάτων Μοναδικού Κόκκου

Δεδομένου της εδραίωσης του πρωτοκόλλου μοναδικού δισκίου έγινε η σκέψη, η οποία κατόπιν υλοποιήθηκε, της χρήσης ξεχωριστών κόκκων χαλαζία ή αστρίου για τον προσδιορισμό της ισοδύναμης ολικής δόσης. Τα πρώτα πειράματα έδειξαν ότι δεν είναι τόσο εύκολο όσο φαινόταν αρχικά λόγω της διαφορετικής ευαισθησίας που δείχνει να έχει κάθε κόκκος, και ειδικά οι κόκκοι χαλαζία. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι κάποιιοι από τους κόκκους μπορεί να μη δώσουν καθόλου ή πολύ χαμηλό σήμα γι' αυτό και θα πρέπει να μετρηθεί μεγάλος αριθμός κόκκων και χρειάζεται ένας ανιχνευτής φωτός υψηλής ικανότητας. Σχεδόν σε όλα τα πειράματα που έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα τα δισκία (πρόκειται για τα κοινά ανοξειδωτα ή αλουμινένια δισκία) ετοιμάζονταν με το χέρι κάτω από μικροσκόπιο σε χαμηλό κόκκινο ή πορτοκαλί φωτισμό.

Οι πρώτοι που υπολόγισαν ηλικίες με τη μέθοδο αυτή ήταν οι Lamothe et al. (1994) με το πρωτόκολλο προσθετικών δόσεων με κόκκους αστρίου μεγέθους 500 – 1000μm από δείγματα άμμου ύστερου πλειστόκαινου (late glacial). Οι ηλικίες που προέκυψαν όμως είχαν μεγάλη διασπορά γύρω από τα 9500 χρόνια που έδωσε ο άνθρακας 14, από 30% πιο νέες, τις οποίες και απέδωσαν στο ανώμαλο παροδικό άδειασμα παγίδων, μέχρι και 7 φορές μεγαλύτερες, οι οποίες αποδόθηκαν σε ημιτελή μηδενισμό. Οι Lamothe και Auclair (1997) πρότειναν ένα σύνολο από εργαστηριακά πειράματα για να αναγνωριστούν τόσο το ανώμαλο άδειασμα παγίδων όσο και ο ημιτελής μηδενισμός και χρησιμοποίησαν ένα λόγο φυσικής δόσης προς δόση ανασύστασης, παρόμοιο με εκείνο των Murray et al (1995).

Η πρώτη δοκιμή σε χαλαζία πραγματοποιήθηκε από τους Murray και Roberts (1997). Χρησιμοποίησαν το πρωτόκολλο προσθετικών δόσεων και αυτό των δόσεων ανασύστασης σε κόκκους χαλαζία 90 – 125mm από δείγματα αιολικής εναπόθεσης από το σπήλαιο Allens στη Νότια Αυστραλία, τα οποία χρονολογήθηκαν μεταξύ 10000 και 11000 χρόνων με τη μέθοδο του ραδιάνθρακα, με θερμοφωταύγεια και πρωτόκολλα πολλαπλών δισκίων με οπτική φωταύγεια. Από ένα σύνολο 250 κόκκων οι μετρήσιμοι 53 έδωσαν ένα ευρύ φάσμα δόσεων, με το μέσο όρο των μετρήσεων όμως να συμπίπτει με τις ανεξάρτητες ηλικίες των άλλων μεθόδων.

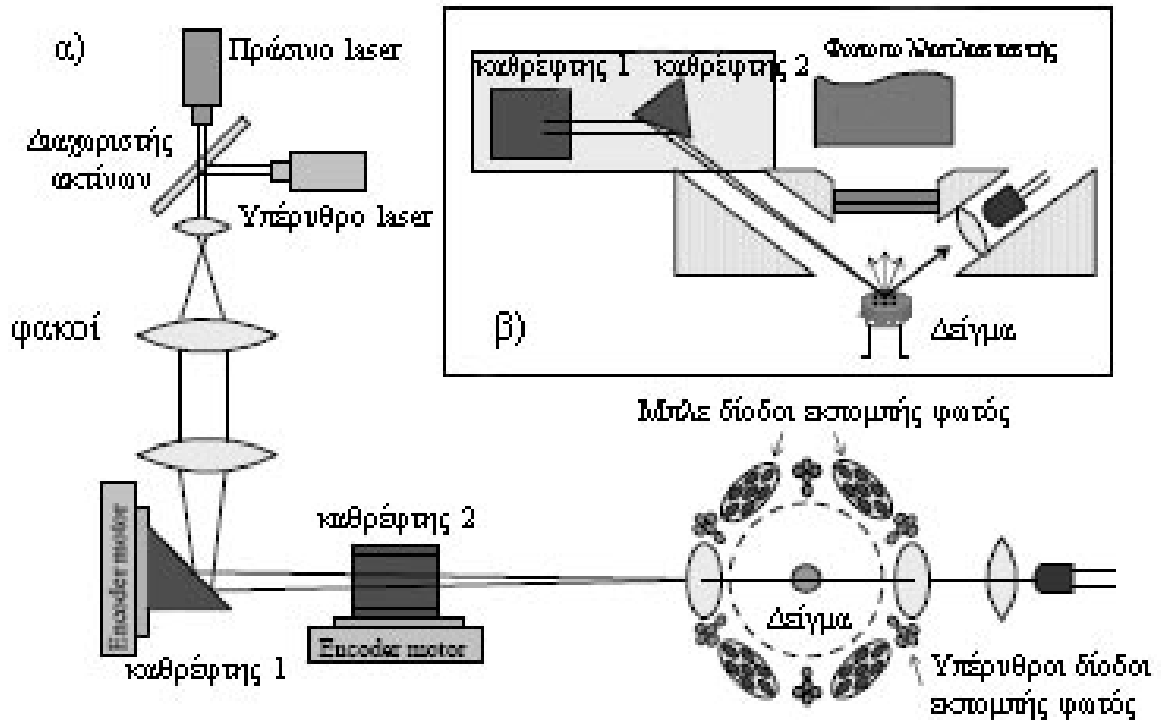
Η τελευταία μορφή του πρωτοκόλλου ανασύστασης δόσης μοναδικού δισκίου, η οποία χρησιμοποιεί δοκιμαστική δόση για τη διόρθωση προβλημάτων αλλαγής ευαισθησίας, εφαρμόστηκε πρώτη φορά σε κόκκους χαλαζία από δείγματα από το πέτρινο καταφύγιο (shelter) του Jinmium, στην επαρχία Kimberley της βόρειας Αυστραλίας (Roberts et al., 1998). Ο αρχαιολογικός αυτός χώρος, ο οποίος ήταν διάσημος για την πρόωρη ανθρώπινη παρουσία και τα ευρήματα αρχαίας τέχνης από πέτρα, με τη μέθοδο της θερμοφωταύγειας χρονολογήθηκε γύρω στο 50000 – 75000 χρόνια βάση δειγμάτων χαλαζία από άμμο η οποία συνόδευε circular

ευρήματα (engravings). Η ηλικία με θερμοφωταύγεια τέχνεργων των χώρων απόθεσης ήταν 116000 – 176000 χρόνια (Fullagar et al., 1996). Παρόλα αυτά, με συμβατικές μεθόδους οπτικής χρονολόγησης πολλαπλών δισκίων, οι Roberts et al. (1998) κατέληξαν σε ηλικία των 22000 χρόνων για τη βάση του χώρου απόθεσης (Roberts et al., 1998, 1999; Galbraith et al., 1999). Η ηλικία αυτή αμφισβήτησε την αρχαιότητα του χώρου. Τελικά τα αποτελέσματα των Fullagar et al. (1996) θεωρήθηκαν ως υπερεκτίμηση της πραγματικής ηλικίας του χώρου οφειλόμενη στην παρατηρούμενη διασπορά στα αποτελέσματα του πρωτοκόλλου των πολλαπλών δισκίων και στην ασυμφωνία με τη μέθοδο του ραδιάνθρακα.

Στις δόσεις που προέκυψαν από τα δείγματα αυτής της περιοχής με τη τεχνική του μοναδικού κόκκου υπήρχε μεγάλη διασπορά, η οποία ερμηνεύτηκε ως το αποτέλεσμα της ελλιπούς έκθεσης στον φως της ημέρας πολλών από τους κόκκους πριν από την ταφή του υλικού. Κάτω από αυτές τις συνθήκες πρότειναν ότι οι κόκκοι με τις μικρότερες δόσεις θα έδιναν την πιο αξιόπιστη ηλικία (το μοντέλο αυτό προτάθηκε από τους Galbraith και Laslett (1993) και σύμφωνα με το οποίο για τον υπολογισμό της ολικής δόσης χρησιμοποιούνται οι κόκκοι με τις μικρότερες δόσεις και έτσι υπολογίζεται η ελάχιστη ηλικία του δείγματος. Οι ηλικίες όμως που προέκυψαν με το μοντέλο αυτό είναι μεταγενέστερες από τις ισοδύναμες ηλικίες με τον άνθρακα 14. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι ελάχιστες ηλικίες ήταν νεότερες από το αναμενόμενο γιατί πιθανών να εισχώρησαν κόκκοι χώματος από ανώτερα στρώματα.

Οι Olley et al. (1999) μελέτησαν κόκκους από δύο πολύ νεότερους παραποτάμιους χώρους απόθεσης. Το συμπέρασμα από τα πειράματά τους ήταν ότι η εφαρμογή του πρωτοκόλλου ανασύστασης μοναδικού κόκκου σε κόκκους χαλαζία, χρησιμοποιώντας το πλήθος των κόκκων με χαμηλές δόσεις για τον προσδιορισμό της ολικής ισοδύναμης δόσης, ήταν ο καλύτερος τρόπος για να ληφθούν αξιόλογες ηλικίες για νεαρά ιζηματογενή παραποτάμια και ανομοιογενώς μηδενισμένα δείγματα, παρόλο που θα πρέπει να γίνει κατανοητό (acknowledge) ότι για κάθε δείγμα μεγαλύτερο από μερικές εκατοντάδες χρόνια, το σφάλμα προκύπτει από μικρά δείγματα – δισκία θα είναι αμελητέο.

Για τη μέτρηση κόκκων στον αυτοματοποιημένο μετρητή Risø TL/OSL έχει προσαρτηθεί μονάδα μονοχρωματικής πηγής φωτός με μήκος κύματος 532nm με ένταση περίπου 400W/cm<sup>2</sup>. Τα οπτικά φίλτρα είναι ίδια ενώ η εσωτερική πηγή βήτα σωματιδίων <sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y παρέχει δόση 0,10Gy/s (Duller et al., 2000) (Σχ. 1.23). Χρησιμοποιήθηκαν ειδικά κατασκευασμένα δισκάκια των 10mm στα οποία έχουν γίνει οπές διαμέτρου 300μm και βάθους 300μm και τοποθετήθηκε ένας κόκκος σε κάθε οπή.



Σχ. 1.23: Σχηματικό διάγραμμα του πρόσθετου συστήματος laser για μετρήσεις οπτικής φωταύγειας σε κόκκους (επανασχεδιασμένο από Bøtter-Jensen et al., 2000a). Οπτική φωταύγεια πετυχαίνεται με τη χρήση ακτίνας laser η οποία εστιάζεται από τρεις φακούς. Η θέση του στίγματος του laser στο δείγμα ρυθμίζεται μετακινώντας τους δύο καθρέφτες. α) Το σύστημα μετρήσεων οπτικής φωταύγειας κόκκων όπως φαίνεται κοιτώντας το από επάνω. β) Εγκάρσια τομή του συστήματος μέτρησης οπτικής φωταύγειας κόκκων (Thomsen, 2004).

Δεν είναι τυχαίο το γεγονός ότι οι περισσότερες εργασίες πάνω σε μοναδικούς κόκκους χαλαζία έχουν γίνει σε αυστραλιανά δείγματα. Ο χαλαζίας αυτός, μαζί με ορυκτά με χαλαζία από κάποια μέρη της Αφρικής και από περιοχές με χαμηλό γεωγραφικό πλάτος, θεωρείται από τους πιο λαμπρούς από άποψη φωταύγειας. Το σήμα φωταύγειας που προέρχεται από αρκετά δείγματα, ιδίως από περιοχές σε μεσαία και ψηλά γεωγραφικά μήκη, μπορεί να είναι πολύ χαμηλό για να ανιχνευθεί (Murray and Olley, 1999; McFee, 1998; Duller et al., 1999). Για το λόγο αυτό δεν μπορεί να προταθεί η μέθοδος χρονολόγησης μοναδικού κόκκου για όλα τα δείγματα, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι στο μέλλον η μέθοδος και τα όργανα μετρήσεων δε μπορούν να τροποποιηθούν και να εφαρμοστούν και σε δείγματα χαμηλής ισχύος και ημιτελώς μηδενισμένα.

#### 4.5 Πρόταση για νέα μέθοδο χρονολόγησης ασβεστολιθικών πετρωμάτων

Μια νέα προσέγγιση στη χρονολόγηση ασβεστολιθικών πετρωμάτων βασίστηκε στο γεγονός ότι αναλύσεις ακτίνων-Χ διάθλασης σε κάποια δείγματα (Πίνακας 1.2) έδειξαν



παρουσία από ένα μικρό ποσοστό ή ίχνη χαλαζία. Έτσι αφού ο ασβεστόλιθος δε δίνει σήμα οπτικής φωταύγειας (Galloway, 2002) και με θερμοφωταύγεια η διασπορά των σημείων στην τεχνική των προσθετικών δόσεων είναι μεγάλη, έγινε η σκέψη να απομονωθεί ο χαλαζίας από τα δείγματα αυτά και να μετρηθεί με μεθόδους οπτικής φωταύγειας ή ακόμα και με την τεχνική του μοναδικού κόκκου, μέθοδοι καλά καθορισμένες μέθοδοι (Liritzis et al., 1994, 1997a; Liritzis, 1995; Murray and Roberts, 1997), έτσι ώστε να μειωθεί το σφάλμα στην τελική ηλικία.

Πίνακας 1.2: Αποτελέσματα αναλύσεων ακτίνων – Χ διάθλασης σε ασβεστόλιθους.

Δείγμα	Ανάλυση Α – Χ Δ*
BTL1	97% ασβεστόλιθος, 3% χαλαζίας
VT3	~100% ασβεστόλιθος, ίχνη χαλαζία, δολομίτη, αλίτη
MTL3	~100% ασβεστόλιθος, ίχνη χαλαζία

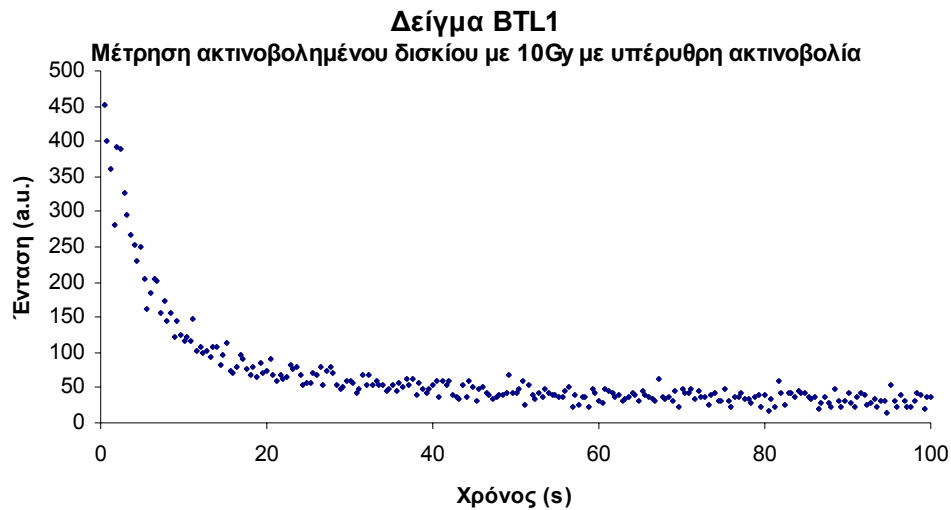
\* School of GeoSciences, Geology and Geophysics, Grand Institute, Πανεπιστήμιο Εδιμβούργου

Η διαδικασία έχει ως εξής (Liritzis and Vafiadou, 2005, Liritzis et al., 2005a,b): μετά τον ορυκτολογικό έλεγχο του πετρώματος με ακτίνες – Χ διάθλασης και τη διαπίστωση ότι έχει και χαλαζία, γίνεται απόληψη της σκόνης από το δείγμα – πέτρωμα σε συνθήκες φωτογραφικού θαλάμου, γίνεται διαχωρισμός του χαλαζία από την ασβεστολιθική σκόνη με τη χρήση υδροχλωρικού οξέος (HCl). Πιο συγκεκριμένα η σκόνη πλένεται για 5 με 6 ώρες σε 3,7% υδροχλωρικό οξύ σε αναλογία 50ml του οξέος για κάθε γραμμάριο σκόνης.

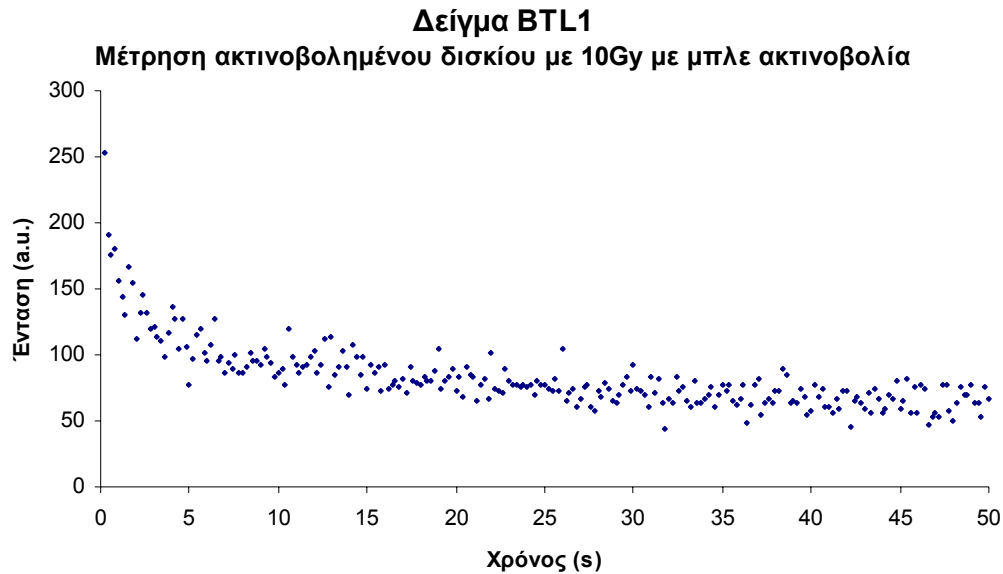
Η πρώτη προσπάθεια για να εξακριβωθεί ότι είναι δυνατή η όλη διαδικασία έγινε στο δείγμα BTL1 (δείγμα από μεγαλιθικό τοίχο σπιτιού στη Φιχτιά, περιοχή κοντά στις Μυκίνες, σε φυσικό φως. Η ανάλυση ακτίνων – Χ διάθλασης έδειξε ότι το πέτρωμα αυτό είναι ασβεστολιθικό με 3% χαλαζία. 20 γραμμάρια από το εσωτερικό του πετρώματος πλύθηκαν σε 1 λίτρο υδροχλωρικού οξέος 3,7% για 6 ώρες. Το διάλυμα μετά το πέρας των 6 ωρών φυγοκεντρήθηκε αρκετές φορές για να απομονωθεί το ίζημα, το οποίο μετά τη ζύγιση ήταν 1,3 γραμμάρια. Μικροσκοπική ανάλυση έδειξε ότι το ίζημα εκτός από χαλαζία περιέχει και άλλα ορυκτά, βιοτίτη, άστριο, mica κ.λ.π.. Στην περίπτωση του mica (βιοτίτης, μοσχοβίτης) και άλλων φυλοπυριτικών ορυκτών απαιτεί χημική επεξεργασία με  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_7$  (Kiely and Jackson, 1964, 1965) ενώ στην περίπτωση του άστριου ο διαχωρισμός θα πρέπει να γίνει χωρίς να επηρεαστεί ο χαλαζίας με πυκνό υδροφθορικό οξύ, 40%, για 40 λεπτά σε υλικό μεγέθους 180 – 250μm ή σε αραιό υδροφθορικό οξύ, 5% ή 10%, για 80 – 120 λεπτά, ή με  $\text{H}_2\text{FSi}_6$  για 30 ώρες ή και περισσότερο (Berger et al., 1980, Rees-Jones, 1995, Prasat, 2000, Roberts and Wintle, 2001, Stokes et al., 2003a,b; Mauz and Lang, 2004, Syers et al. 1968). Η διαπίστωση ότι ο άστριος έχει φύγει

γίνεται με μία μέτρηση με ακτινοβολήση στο υπέρυθρο με πρωτόκολλα μοναδικού δισκίου (Murray and Wintle, 2000) και λαμβάνοντας μηδενικό σήμα.

Το δείγμα μετρήθηκε με το πρωτόκολλο ανασύστασης δόσης μοναδικού δισκίου, με δόσεις ανασύστασης 3,5, 7, και 14Gy, δοκιμαστική δόση 3,5Gy, θερμοκρασία προθέρμανσης 200°C. Οι μετρήσεις έγιναν στους 125°C. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το ακτινοβολημένο δείγμα δίνει μετρήσιμο σήμα (σχ. 1.24 και 1.25), (το φυσικό έδωσε μηδενικό αφού η όλη επεξεργασία του δείγματος έγινε κάτω από λευκό φως που σημαίνει ότι όση φωταύγεια και να είχε μαζέψει το δείγμα όσο καιρό ήταν κλειστό μακριά από το φως της ημέρας, μόλις εκτέθηκε στον ήλιο σβήστηκε). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Ινστιτούτο Πολιτιστικής και Εκπαιδευτικής Τεχνολογίας (Ι.Π.Ε.Τ.) στην Ξάνθη.



Σχ. 1.24: Απόκριση ακτινοβολημένου δείγματος BTL1 με 10Gy στο υπέρυθρο. Στο σήμα δεν είναι μηδενικό που σημαίνει ότι έχει άστροιο.



Σχ. 1.25: Απόκριση ακτινοβολημένου δείγματος BTL1 με 10Gy στο μπλε φως.

Στη συνέχεια, αφού η πρώτη δοκιμή πέτυχε, ετοιμάστηκαν άλλα δύο δείγματα κάτω από κόκκινο φως αυτή τη φορά. Πρόκειται για τα MTL3 και RHO-99 από τις Μυκήνες και την Ναός της Κοιλιάδας του Μυκερίνου στην Αίγυπτο, αντίστοιχα. Μια ποσότητα από 0,1 γραμμάρια από κάθε δείγμα πλύθηκε σε 5ml υδροχλωρικού οξέος πυκνότητας 3,7% για 4 ώρες, στέγνωσε και εξετάστηκε κάτω από πολωτικό μικροσκόπιο. Η εξέταση αυτή έδειξε ότι τα πετρώματα αποτελούνται και από άλλα ορυκτά. Τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

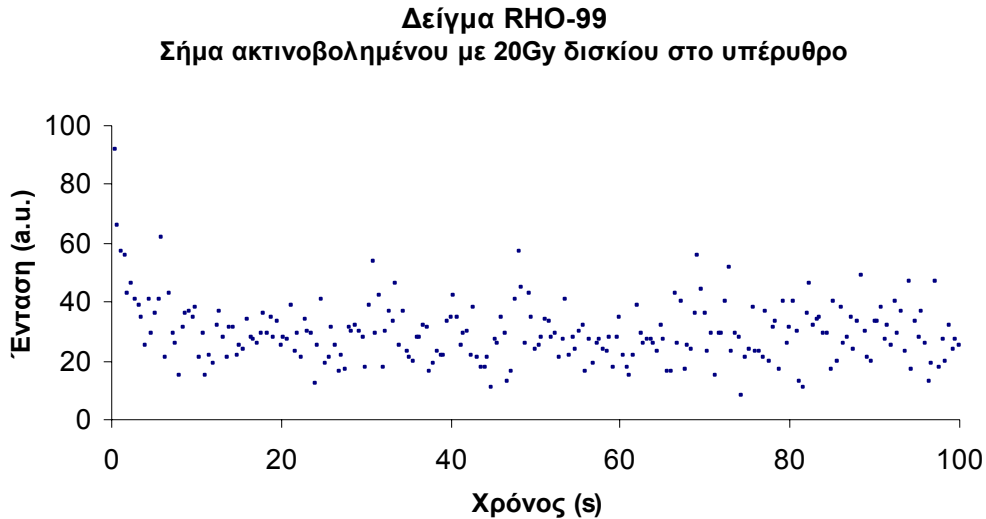
Πίνακας 1.3: Αναλύσεις ακτίνων – X διάθλασης και μικροσκοπικές παρατηρήσεις των ιζημάτων.

Δείγμα	Ανάλυση Ακτίνων – X διάθλασης*	Πρόσθετα ορυκτά που παρατηρήθηκαν σε πολωτικό μικροσκόπιο μετά από χημική επεξεργασία
RHO-99 (VT3)	~100% ασβεστόλιθος, ίχνη χαλαζία, δολομίτη, αλίτη	Άστριος, βιοτίτης (:)
MTL3	~100% ασβεστόλιθος, ίχνη χαλαζία	Άστριος (:)

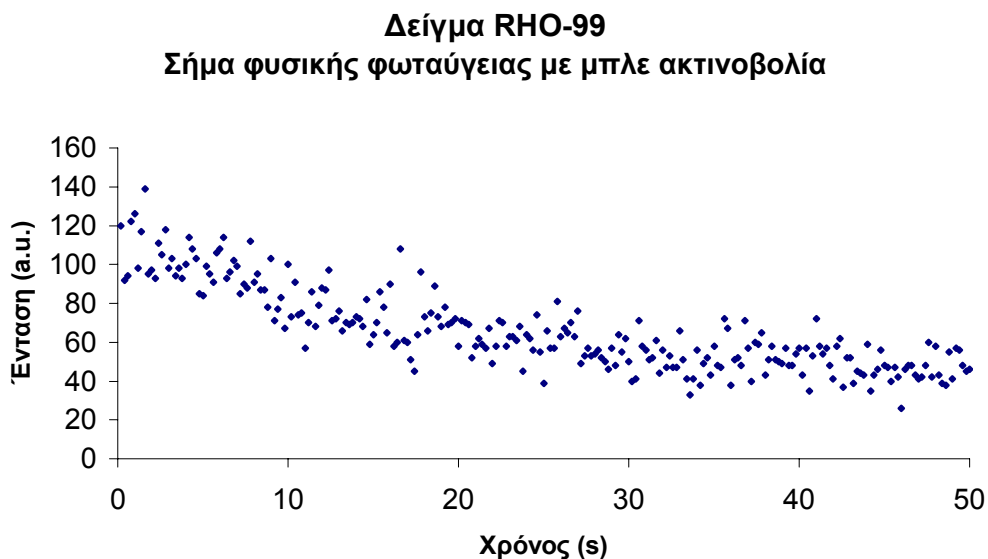
\* School of GeoSciences, Geology and Geophysics, Grand Institute, Πανεπιστήμιο Εδιμβούργου

Στα ιζήματα έγιναν μετρήσεις οπτικής φωταύγειας με μπλε και υπέρυθρο φως (Liritzis and Vafiadou, 2005, Liritzis et al., 2005a,b). Η τεχνική αυτή έδειξε ότι είναι δυνατός ένας τέτοιος διαχωρισμός και οι αναμενόμενες ηλικίες σε αυτά τα ασβεστολιθικά δείγματα με τεχνικές

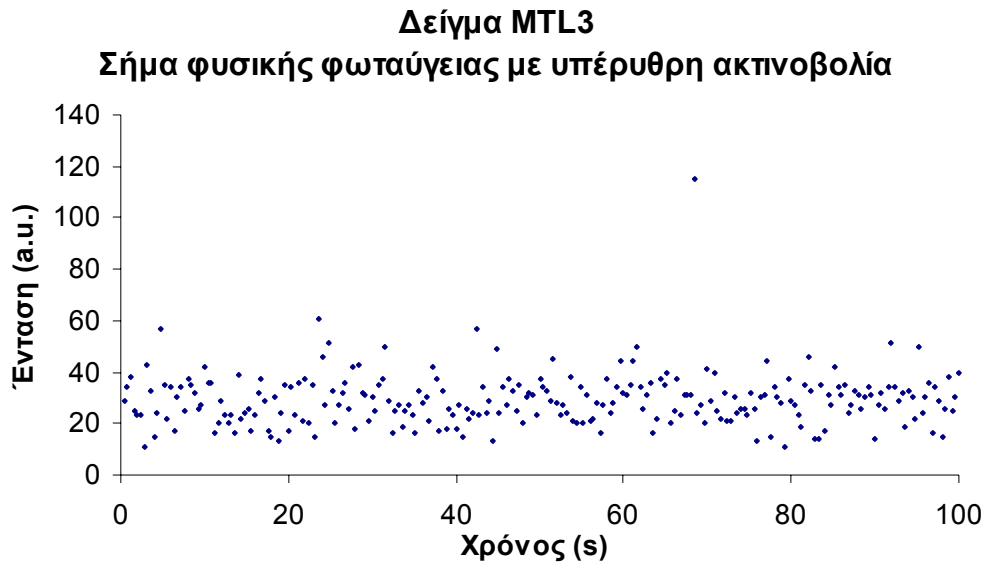
μοναδικού κόκκου ή μοναδικού δισκίου μπορούν να είναι ακριβείς. Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται τα σήματα των δειγμάτων από τις μετρήσεις αυτές (σχ. 1.26, 1.27, για το RHO-99 και 1.28-1.31 για το MTL3).



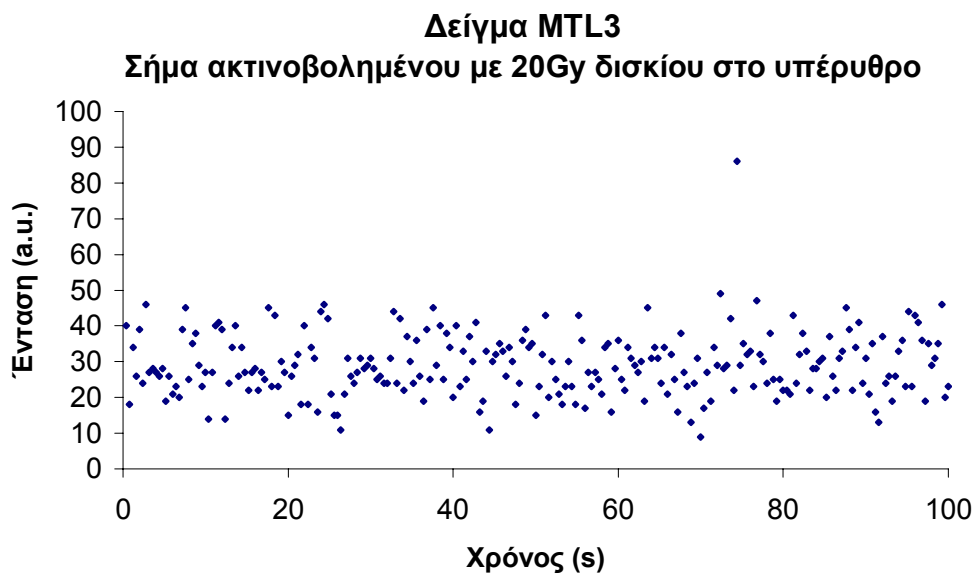
Σχ. 1.26: Απόκριση δείγματος RHO-99 (VT3) ακτινοβολημένου με 20Gy στο υπέρυθρο. Αν και το σήμα είναι πολύ χαμηλό (ξεκινάει από τους 95 παλμούς με το υπόστρωμα να είναι περίπου στους 30), υπάρχει άστριος στο δείγμα, μιας και το υπέρυθρο διεγείρει μόνο τον άστριο και όχι το χαλαζία.



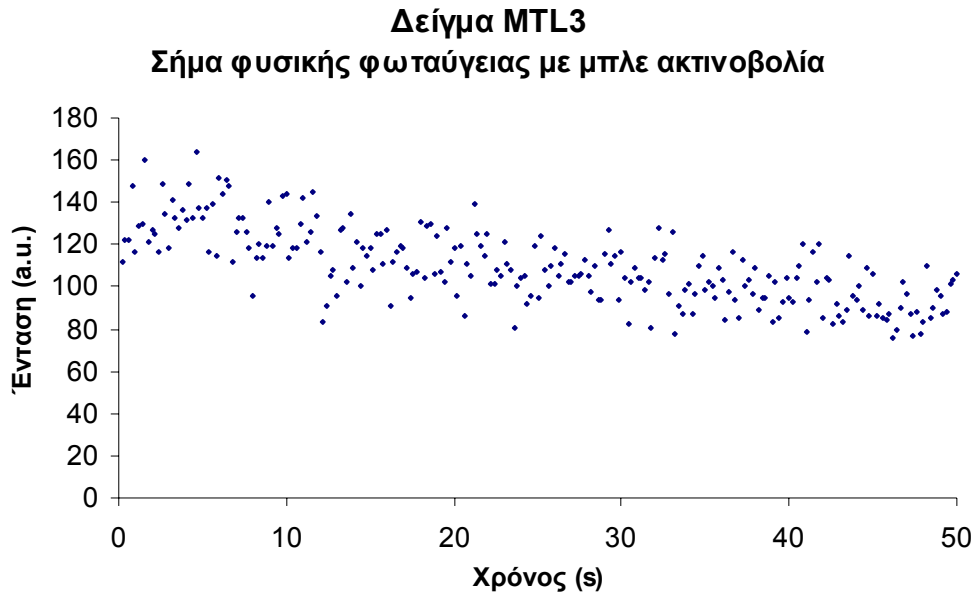
Σχ. 1.27: Απόκριση του φυσικού δείγματος RHO-99 (VT3) στο μπλε φως. Το σήμα είναι πολύ ασθενές. Η έντασή του ξεκινάει μόλις από τους 110 παλμούς περίπου και το υπόστρωμα είναι γύρω στους 60. Επιπλέον, από το σχήμα του διακρίνεται η παρουσία του αστρίου (σε πλατό μετά τα 20s).



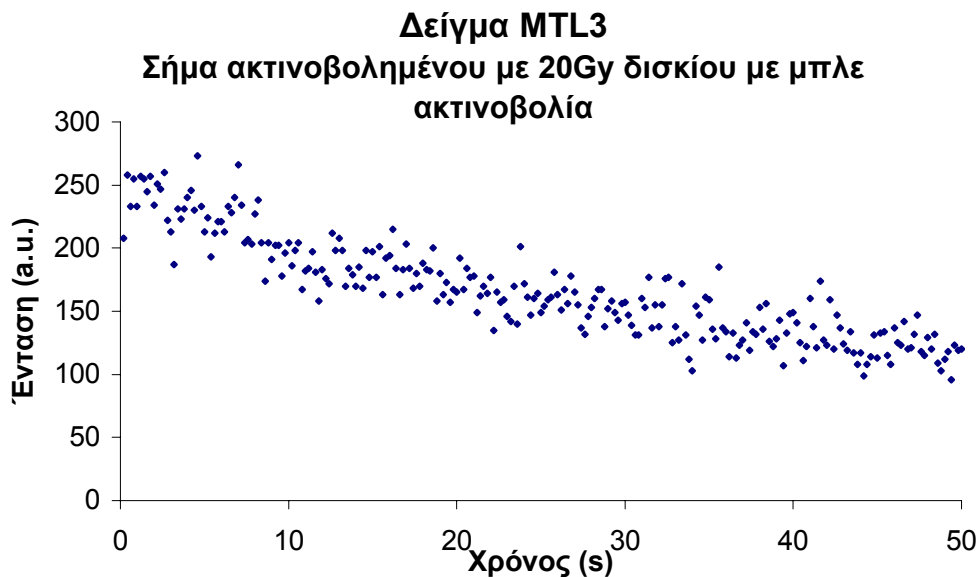
Σχ. 1.28: Απόκριση φυσικού δείγματος MTL3 στο υπέρυθρο. Το σήμα είναι μηδενικό γεγονός που δηλώνει απουσία αστρίου στο δείγμα (το υπέρυθρο διεγείρει μόνο τον άστριο).



Σχ. 1.29: Απόκριση του δείγματος MTL3 ακτινοβολημένου με 20Gy στο υπέρυθρο. Το σήμα είναι μηδενικό γεγονός που επιβεβαιώνει την απουσία αστρίου (το υπέρυθρο διεγείρει μόνο τον άστριο).



Σχ. 1.30: Απόκριση του φυσικού δείγματος MTL3 στο μπλε φως. Το σήμα είναι πολύ ασθενές. Ξεκινάει από τους 150 παλμούς με το υπόστρωμα να είναι στους 110. Το γεγονός ότι δεν πέφτει απότομα στα πρώτα δευτερόλεπτα, αλλά φτάνει σε πλατό μετά τα 20-25 δηλώνει παρουσία αστρίου, κάτι όμως που δεν επιβεβαιώνει η υπέρυθη ακτινοβολία.



Σχ. 1.31: Απόκριση του δείγματος MTL3 ακτινοβολημένου με 20Gy στο μπλε φως. Το σήμα είναι και πάλι ασθενές, ξεκινάει από 250 παλμούς και πέφτει αργά μέχρι τους 130 περίπου (υπόστρωμα). Το σχήμα του και πάλι δεν είναι ξεκάθαρο. Η πτώση αυτή τη φορά είναι πιο αργή, φτάνει σε πλατό μετά τα 35s, γεγονός που δείχνει ότι το δείγμα έχει εκτός από χαλαζία και άστριο.

Από τα διαγράμματα παρατηρεί κανείς ότι τα συμπεράσματα για το δείγμα RHO-99 (VT3) είναι πιο ασφαλή. Από το σχ. 1.26, το ακτινοβολημένο δισκίο με laser στο υπέρυθρο, συμπεραίνει κανείς ότι το δείγμα έχει άστριο, αφού όσο αδύναμο και να είναι το σήμα (μόλις από

τους 90 παλμούς και με υπόστρωμα στους 30) είναι ευδιάκριτη η πτώση του σήματος και το πλατό στο οποίο φτάνει, αν και δε θα περίμενε κανείς μια τόσο απότομη πτώση για τον άστριο. Στο σχ. 1.27 η μπλε ακτινοβολήση δείχνει την παρουσία και των δύο ορυκτών με την ομαλή πτώση του σήματος και το πλατό μετά τα 20s.

Αντίθετα, στο δείγμα MTL3 τα αποτελέσματα δεν είναι τόσο ξεκάθαρα. Ενώ το μηδενικό σήμα στο υπέρυθρο ήταν μια ένδειξη ότι άστριος στο δείγμα δεν υπάρχει, το φάσμα στο μπλε ανατρέπει την υπόθεση αυτή. Στην περίπτωση του χαλαζία η πτώση του σήματος είναι απότομη και συμβαίνει μόλις στα πρώτα δευτερόλεπτα. Εδώ έχουμε ακριβώς το αντίθετο. Πάντως και στις δύο περιπτώσεις οι πρώτες μετρήσεις ακτίνων  $-X$  διάθλασης δεν έδωσαν άστριο σε κανένα από τα δύο δείγματα.

Τα επόμενα βήματα για να καθοριστεί η μέθοδος, γιατί αν και από τα δύο δείγματα μόνο το ένα έδωσε σαφή αποτελέσματα, είναι να γίνουν μετρήσεις σε περισσότερα δείγματα. Μετρήσεις ακτίνων- $X$  διάθλασης και πριν την επεξεργασία από τα χημικά αλλά και μετά θα επιβεβαιώσει αν ο ασβεστόλιθος έφυγε και αν και πόσο χαλαζία έχει το υπόλοιπο του δείγματος. Τα πρώτα αποτελέσματα σε γενικές γραμμές ήταν ελπιδοφόρα.

## 5. Προσδιορισμός ισοδύναμης δόσης

### 5.1 Οπτική Θερμοφωταύγεια

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην οπτική θερμοφωταύγεια για τον προσδιορισμό της ΙΔ είναι δύο: η τεχνική των προσθετικών δόσεων πολλαπλών δισκίων και η τεχνική της ανασύστασης δόσης πολλαπλών δισκίων. Οι υπολογισμοί για τον προσδιορισμό της παρουσιάζονται παρακάτω:

#### 5.1.1 Τεχνική προσθετικών δόσεων πολλαπλών δισκίων.

Η διαδικασία του υπολογισμού της ισοδύναμης δόσης με τη μέθοδο της οπτικής θερμοφωταύγειας και την τεχνική των προσθετικών δόσεων πολλαπλών δισκίων σε λεπτόκοκκο υλικό συνοπτικά έχει ως εξής (Liritzis, 1994a,b, 2001; Liritzis et al., 1996a):

- 1) μέτρηση της φυσικής φωταύγειας
- 2) μέτρηση γεωλογικής φωταύγειας
- 3) μέτρηση της φυσικής φωταύγειας συν βήτα δόσης
- 4) μέτρηση της φυσικής φωταύγειας συν άλφα δόση

5) μέτρηση της λεύκανσης ως συνάρτηση του χρόνου έκθεσης φυσικού ή γεωλογικού υλικού σε φυσικό ή τεχνητό φως.

Στην περίπτωση που η προς χρονολόγηση σκόνη δίνει αρκετά δισκία, περισσότερα από 20, και η τεχνική των προσθετικών δόσεων δώσει καλά αποτελέσματα, τότε για το πείραμα της λεύκανσης χρησιμοποιούμε τα υπόλοιπα δισκάκια και όχι γεωλογικό υλικό.

Οι ισοδύναμες δόσεις υπολογίζονται από την καμπύλη προσομοίωσης της φωταύγειας φυσικής/φυσικής+βήτα ή άλφα δόση σε συνάρτηση της βήτα και άλφα δόσης αντίστοιχα, με γραμμική σχέση της μορφής

$$\Theta\Phi_{\alpha/\beta} = \Phi\Theta\Phi + \beta \cdot \Delta\delta\sigma\eta$$

(1.5)

όπου η  $\Phi\Theta\Phi$  είναι η φυσική φωταύγεια του δείγματος και  $\beta$  η κλίση της ευθείας φωταύγειας συναρτήσει δόσης. Η  $\Phi\Theta\Phi$  θεωρείται ελεύθερη παράμετρος στην προσομοίωση. Κρατείται σταθερή και ίση με την πειραματική τιμή της. Η ισοδύναμη δόση λαμβάνεται από τη σχέση:

$$I\Delta = \frac{\Phi\Theta\Phi}{\beta}$$

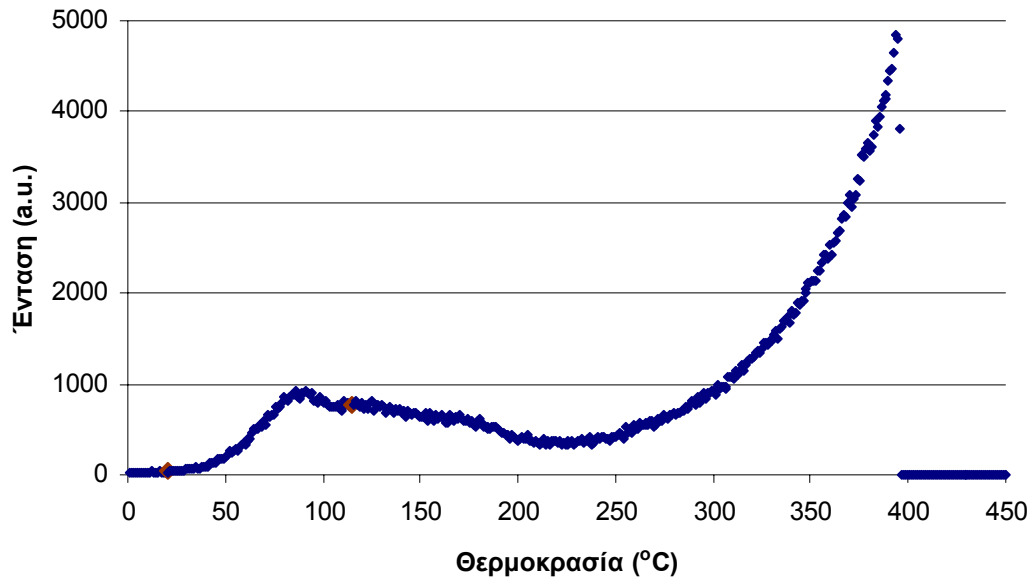
(1.6)

Αναλυτικότερα η διαδικασία προσδιορισμού ισοδύναμης δόσης έχει ως εξής:

Μετά το πέρας όλων των μετρήσεων υπολογίζονται τα εμβαδά των φωτοκορυφών των καμπύλων οι οποίες λήφθηκαν για κανονικοποίηση. Υπολογίζουμε το μέσο όρο των τιμών και διαιρούμε την τιμή κάθε φωτοκαμπύλης με το μέσο όρο. Το αποτέλεσμα χρησιμοποιείται ως όρος κανονικοποίησης για την αντίστοιχη καμπύλη. Ως παράδειγμα αναφέρουμε τους υπολογισμούς για το δείγμα RHO-56. Στον Πίνακα 1.4 φαίνεται οι καμπύλες με τους κωδικούς τους. Το n στην αρχή δηλώνει την καμπύλη κανονικοποίησης σε δισκίο με υλικό από την προς χρονολόγηση επιφάνεια, με g δηλώνεται η καμπύλη κανονικοποίησης γεωλογικού υλικού, με b η καμπύλη (φυσικής + βήτα ακτινοβολήσης), και με l οι καμπύλες λεύκανσης. Τα επόμενα δύο γράμματα, st, δηλώνουν το δείγμα ST2 (RHO-56). Για τις φυσικές και γεωλογικές φωτοκαμπύλες τα a, b, c, d, είναι ο αριθμός των μετρήσεων που έγιναν για κάθε περίπτωση (4 φυσικές και 3 γεωλογικές). Τα επόμενα στοιχεία αφορούν το χρόνο ακτινοβολήσης, αν πρόκειται για μέτρηση βήτα ακτινοβολήσης του δισκίου, π.χ. bst20mn σημαίνει ακτινοβολήση δισκίου για 20m, ή το χρόνο έκθεσης στον ήλιο όταν πρόκειται για το πείραμα λεύκανσης, π.χ. lst1hn σημαίνει έκθεση δισκίου στον ήλιο για μια ώρα. Το n στο τέλος του κωδικού δείχνει ότι πρόκειται για καμπύλη κανονικοποίησης. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 1.4 έγιναν πολλαπλές μετρήσεις



σε κάποιες περιπτώσεις, π.χ. Ist1h1n που δηλώνει ότι και το δισκίο αυτό εκτέθηκε στο φως για μια ώρα.



Σχ. 1.32: Καμπύλη κανονικοποίησης του πρώτου δισκίου που χρησιμοποιήθηκε για μέτρηση φυσικής φωταύγειας του δείγματος RHO-56. Η δόση είναι 6Gy και η περιοχή της οποίας πήραμε το εμβαδόν έχει σημειωθεί με κόκκινους ρόμβους.

Πίνακας 1.4: Υπολογισμός των παραγόντων κανονικοποίησης κάθε μέτρησης του δείγματος RHO-56 (ST2).

Κωδικός καμπύλης κανονικοποίησης	Εμβαδόν φωτοκαμπύλης	Παράγοντας κανονικοποίησης
nstan	46090	1,0753
nstbn	66968	1,5623
nstcn	99330	2,3173
nstdn	48811	1,1387
gstan	22991	0,5364
gatbn	23233	0,5420
gstcn	22969	0,5359
bst20mn	63692	1,4859
bst40mn	58273	1,3595

bst80mn	51127	1,1928
bst2hn	69772	1,6278
bst4hn	101667	2,3719
bst11hn	82864	1,9332
lst1hn	33188	0,7743
lst1h1n	24859	0,5800
lst2hn	22073	0,5150
lst3hn	28836	0,6727
lst3h1n	21870	0,5102
lst5hn	36267	0,8461
lst5h1n	25703	0,5996
lst7hn	25088	0,5853
lst7h1n	30081	0,7018
lst10hn	24077	0,5617
lst20hn	24237	0,5654
lst40an	23437	0,5468
lst40bn	36981	0,8628
Μέσος όρος	42864	

Στη συνέχεια, οι υπόλοιπες φωτοκαμπύλες, φυσικές, γεωλογικές, κ.λ.π., καθώς και τα υποστρώματα, χωρίζονται σε τραπέζια με βάση 10°C στην περιοχή θερμοκρασιών 200-400°C και υπολογίζονται τα εμβαδά. Από το ολικό σήμα αφαιρείται το εμβαδόν του υποστρώματος, υπολογίζοντας έτσι το καθαρό σήμα, και διαιρείται με τον παράγοντα κανονικοποίησης της καμπύλης, ο οποίος υπολογίστηκε πριν. Ως παράδειγμα παρουσιάζεται η πρώτη (α') μέτρηση φυσικής φωταύγειας (nsta) με παράγοντα κανονικοποίησης (Πίνακας 1.5), όπως φαίνεται από τον Πίνακα 1.4, 1,0753.

Πίνακας 1.5: Παράδειγμα υπολογισμού του καθαρού και κανονικοποιημένου σήματος για την πρώτη μέτρηση φυσικής θερμοφωταύγειας του δείγματος RHO-56 (ST2).

		Φυσικό σήμα α' μέτρησης	Υπόστρωμα	Καθαρό και κανονικοποιημένο φυσικό σήμα α' μέτρησης
nf=1,0753	200	8249	1654	6133,172
	210	15627	1683	12967,54
	220	29090	1635	25532,41
	230	52632	1782	47289,13

	240	87449	1896	79561,98
	250	129798	2043	118808,7
	260	159404	2403	146006,7
	270	155414	2630	142085
	280	125808	3219	114004,5
	290	104723	3665	93981,22
	300	104103	4439	92684,84
	310	117770	5423	104479,7
	320	137053	6550	121364,3
	330	153897	8167	135525
	340	160950	10362	140042,8
	350	157415	13413	133918
	360	151602	18018	124229,5
	370	150756	23868	118002,4

Με τις τελικές καθαρές και κανονικοποιημένες καμπύλες για κάθε μια μέτρηση ξεχωριστά γίνονται οι υπόλοιποι υπολογισμοί για τον προσδιορισμό της ισοδύναμης δόσης:

$$I\Delta = \frac{\Theta\Phi_{\beta} - \lambda\epsilon\acute{\upsilon}\kappa\alpha\nu\sigma\eta}{C_f}$$

(1.7)

όπου  $\Theta\Phi_{\beta}$  είναι η (φυσική + εργαστηριακή βήτα δόση) κανονικοποιημένη καμπύλη,  $\lambda\epsilon\acute{\upsilon}\kappa\alpha\nu\sigma\eta$  είναι οι κανονικοποιημένες καμπύλες του πειράματος της λεύκανσης και  $C_f$  ο παράγοντας

$$C_f = \frac{\Theta\Phi_{\beta} - \Phi\Theta\Phi}{\text{Βήτα Δόση}}$$

όπου και εδώ  $\Theta\Phi_{\beta}$  είναι η (φυσική + εργαστηριακή βήτα δόση) κανονικοποιημένη καμπύλη,  $\Phi\Theta\Phi$  είναι η φυσική κανονικοποιημένη καμπύλη, και  $\text{Βήτα Δόση}$  είναι η βήτα εργαστηριακή δόση που δόθηκε στο δισκίο για να πάρουμε την  $\Theta\Phi_{\beta}$  καμπύλη.

Μέχρι εδώ θεωρήθηκε ότι για τη λεύκανση έχουν χρησιμοποιηθεί δισκία με φυσικό υλικό. Στην περίπτωση όμως που χρησιμοποιηθεί γεωλογικό υλικό για το πείραμα αυτό θα πρέπει να υπολογιστεί ένας επιπλέον παράγοντας:

$$r_x = \frac{\Gamma\Theta\Phi}{\Omega\rho\epsilon\varsigma \acute{\epsilon}\kappa\theta\epsilon\sigma\eta\varsigma}$$

(1.8)

όπου  $\Gamma\Theta\Phi$  είναι η γεωλογική κανονικοποιημένη καμπύλη. Έτσι, οι καμπύλες ισοδύναμης δόσης προσδιορίζονται από τη σχέση:

$$I\Delta = \frac{\Theta\Phi_{\beta} - r_x}{C_f}$$

(1.9)

### 5.1.2 Τεχνική ανασύστασης δόσεων πολλαπλών δισκίων.

Και στην περίπτωση αυτή οι φωτοκαμπύλες και τα αντίστοιχα υποστρώματα χωρίζονται σε διαστήματα των 10°C στην περιοχή θερμοκρασιών 200-400°C. Αφαιρείται το υπόστρωμα και διαιρούμε τον αντίστοιχο παράγοντα κανονικοποίησης για κάθε μία καμπύλη, ο οποίος έχει υπολογιστεί όπως στην τεχνική προσθετικών δόσεων πολλαπλών δισκίων. Γίνεται διάγραμμα των εμβαδών συναρτήσει των δόσεων. Από τις καμπύλες αυτές υπολογίζεται η κλίση τους  $f$ , η οποία είναι ένας παράγοντας κανονικοποίησης που ισχύει για όλο το υλικό. Τελικά, η ισοδύναμη δόση προκύπτει βάση του τύπου:

$$I\Delta = \frac{\Phi\Theta\Phi - \lambda\epsilon\acute{\upsilon}\kappa\alpha\nu\sigma\eta}{f}$$

(1.10)

## 5.2 Οπτική φωταύγεια

### 5.2.1 Τεχνική προσθετικών δόσεων μοναδικού δισκίων.

Αρχικά γίνονται οι μετρήσεις της φυσικής φωταύγειας και των προσθετικών δόσεων, και μια σειρά μετρήσεων χωρίς προσθήκη δόσης στο δισκίο πριν την προθέρμανση. Κατόπιν γίνεται μια σειρά διαδοχικών προθερμάνσεων και μετρήσεων χωρίς βήτα ακτινοβολήση του δισκίου σε αριθμό όσες και ο αριθμός των μετρήσεων προσθετικών δόσεων και χωρίς πρόσθετη δόση. Στη συνέχεια κατασκευάζεται το διάγραμμα του αριθμού των διαδοχικών προθερμάνσεων και μετρήσεων χωρίς πρόσθετη δόση με το κλάσμα του αρχικού εναπομείναντος σήματος και υπολογίζεται η παράμετρος  $\alpha$  της σχέσης:

$$f(n) = 1 - \alpha \cdot \ln(n)$$

(1.11)

όπου  $n$  ο αριθμός των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων. Στη συνέχεια στο διάγραμμα των προσθετικών δόσεων με τους παλμούς γίνεται η διόρθωση στην καμπύλη βάση της μαθηματικής σχέσης που έδωσε ο Duller (1991):

$$S_{B_n} = I_n - \sum_{i=1}^{n-1} (S_{B_i} \times f_{(n-i+1)})$$

(1.12)

όπου  $n$  είναι ο αριθμός των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων, και  $S$  το σήμα φωταύγειας που οφείλεται στην ακτινοβόληση  $B_n$  και μπορεί να υπολογιστεί αφαιρώντας το άθροισμα των παραγόντων του προηγούμενου σήματος,  $S_{B_i}$  (Πίνακας 1.6, στήλη 3) οι οποίοι είναι πολλαπλασιασμένοι με τον κατάλληλο παράγοντα  $f_{n-i+1}$ , που προκύπτει για το συγκεκριμένο αύξοντα αριθμό μέτρησης από τη σχέση (1.11), από τη μετρούμενη φωταύγεια  $I_n$  (Πίνακας 1.6, στήλη 2). Η τέταρτη στήλη του Πίνακα 1.6, οι διορθωμένες μετρήσεις, υπολογίζονται αθροίζοντας τα προηγούμενα αποτελέσματα της στήλης 3. τέλος, τα τελικά αποτελέσματα προσομοιώνονται με μια εξίσωση και από την τομή της εξίσωσης αυτής με τον άξονα των δόσεων βρίσκεται η ζητούμενη ισοδύναμη δόση του δείγματος (Galloway, 1996).

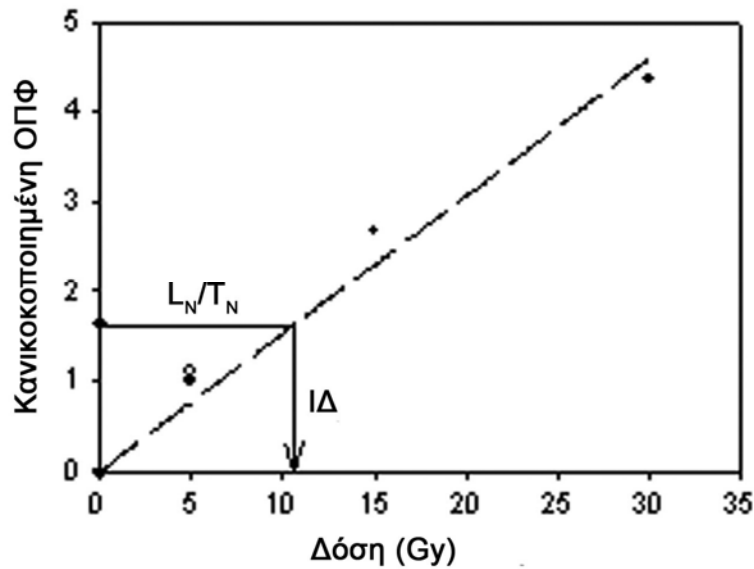
Πίνακας 1.6: Παράδειγμα μέτρησης και διόρθωσης με την τεχνική προσθετικών δόσεων μοναδικού δισκίου. Χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του δείγματος RHO-57 (ST3).

Ολική δόση (Gy)	Μετρούμενη φωταύγεια	Φωταύγεια λόγο της τελευταίας δόσης	Διορθωμένη φωταύγεια
Φυσική	2833	(2833)	(2833)
Φυσική + 30	5000	2877	5710
Φυσική +60	6333	2260	7978
Φυσική +90	7611	2304	10282
Φυσική +120	8222	1794	12076
Φυσική +150	8444	1383	13459
Φυσική +150	7389	-1287	12172
Φυσική +150	6444	856	13028
Φυσική +150	5889	241	13269
Φυσική +150	4722	-579	12690
Φυσική +150	4389	170	12860
Φυσική +150	4222	-231	12621

### 5.2.2 Τεχνική ανασύστασης δόσεων μοναδικού δισκίων.

Ανατρέχοντας στον Πίνακα 1.1, στην τεχνική αυτή αρχικά υπολογίζονται οι λόγοι  $L_i/T_i$ , όπου  $L_i$  η μέτρηση της δόσης ανασύστασης και  $T_i$  η μέτρηση της δοκιμαστικής δόσης. Κατόπιν

γίνεται το διάγραμμα των λόγων συναρτήσεως των δόσεων ανασύστασης, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.33 και προσδιορίζεται η ευθεία που περνάει από τα σημεία. Από το λόγο  $L_N/T_N$  που αφορά τη φυσική φωταύγεια και τη δοκιμαστική της δόση και από την εξίσωση της ευθείας αυτής υπολογίζεται η ισοδύναμη δόση του δείγματος.



Σχ. 1.33: Γραφική αναπαράσταση του πρωτοκόλλου ανασύστασης δόσεων μοναδικού δισκίου για τον προσδιορισμό της ισοδύναμης δόσης του δείγματος RHO-132 (sequence DB048, δείγμα 6). Η κανονικοποιημένη φυσική φωταύγεια ( $L_N/T_N$  - ρόμβος), το σημείο μηδέν (τρίγωνο) και η επαναλαμβανόμενη μέτρηση (ανοιχτός κύκλος) έχουν σχεδιαστεί. Η ισοδύναμη δόση υπολογίζεται από την προβολή της κανονικοποιημένης τιμής της φυσικής φωταύγειας στην καμπύλη που προέκυψε από τις κανονικοποιημένες τιμές φωταύγειας των δόσεων ανασύστασης.

## Κεφάλαιο 2ο

### Προσδιορισμός ετήσιων δόσεων

#### 2. Εισαγωγή

**Ε**πιστρέφοντας στην εξίσωση προσδιορισμού της ηλικίας ενός δείγματος, ο δεύτερος παράγοντας που θα πρέπει να προσδιοριστεί είναι η ετήσια δόση, η δόση δηλαδή που λαμβάνει το προς χρονολόγηση υλικό ανά έτος. Η δόση αυτή προέρχεται από το περιβάλλον, εξωτερική δόση, αλλά και από το ίδιο το υλικό, εσωτερική δόση (Λυριτζής, 1994). Για τον προσδιορισμό του ρυθμού δόσης ανά έτος, θα πρέπει να γνωρίζουμε το ρυθμό με τον οποίο γίνεται ο ιονισμός των ατόμων του δείγματος από τις διάφορες ακτινοβολίες. Μία μέθοδος προσέγγισης θα ήταν να γίνουν αναλυτικοί υπολογισμοί βασιζόμενοι στη διεισδυτικότητα κάθε μιας ακτινοβολίας και των συντελεστών απορρόφησης ενέργειας από τα συστατικά του δείγματος. Ευτυχώς όμως αυτή η περίπλοκη διαδικασία παρακάμφθηκε κάνοντας κάποιες παραδοχές. Για παράδειγμα, για να ισχύει η διατήρηση της ενέργειας απαιτείται μέσα σε δείγμα διαστάσεων μεγαλύτερων από την εμβέλεια των ακτινοβολιών, ο ρυθμός απορρόφησης ενέργειας θα είναι ίσος με το ρυθμό εκπομπής ενέργειας (Aitken, 1985). Πάντως για αρκετά υλικά η θεώρηση ότι τα συστατικά τους έχουν παρόμοιους συντελεστές απορρόφησης ενέργειας αληθεύει, και αυτό γιατί, ο άστριος και ο χαλαζίας, ορυκτά που μας ενδιαφέρουν άμεσα για τη χρονολόγηση με μεθόδους φωταύγειας, έχουν παρόμοια ενεργά ατομικά βάρη και ατομικούς αριθμούς, με μια απόκλιση μόλις 5%.

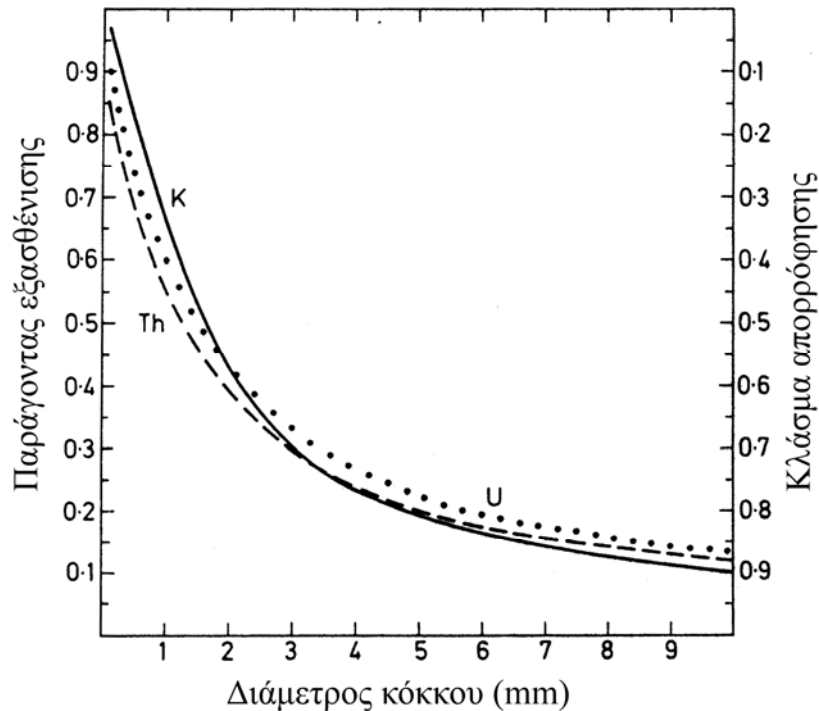
Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ο ρόλος των υπόγειων νερών, και γενικά της υγρασίας στον περιβάλλοντα χώρο ταφής των προς χρονολόγηση υλικών. Και αυτό γιατί το νερό, σε σύγκριση με τα συστατικά των υλικών, έχει συντελεστή απορρόφησης πάνω από 50% για την ακτινοβολία άλφα, 25% για τη βήτα και περίπου 14% για τη γάμα, (Aitken, 1985; Zimmerman, 1971). Το επίπεδο κορεσμού θεωρείται το άνω όριο για την επίδραση της υγρασίας στην τελική ηλικία. Για κεραμικά το επίπεδο αυτό μπορεί να είναι χαμηλό, περίπου 5%, όπως σε μια συμπαγή υφή, αλλά και να φτάνει τα 25%, όπως υλικά ακατέργαστα. Για το πορώδη υλικά, όπως το χώμα, το επίπεδο κορεσμού κυμαίνεται από 20-40%. Αν και δε μπορεί να γνωρίζει κανείς τις κλιματολογικές συνθήκες του παρελθόντος ή τις δραστηριότητες του ανθρώπου που θα μπορούσαν να προκαλέσουν ξήρανση μιας περιοχής, έγιναν προστάθειες υπολογισμού διορθωτικών παραγόντων για τη διόρθωση των ετήσιων δόσεων λόγω υγρασίας. Οι παράγοντες αυτοί δόθηκαν από τον Zimmerman το 1971. Έτσι, εάν οι ετήσιες δόσεις έχουν υπολογιστεί σε στεγνά υλικά, οι πραγματικές θα είναι:

$$\begin{aligned} \Delta_{\alpha} &= \frac{\Delta_{\alpha, \text{στεγνού υλικού}}}{1+1,50 \cdot \frac{\text{ποσοστό απορρόφησης υγρασίας}}{100}} \\ \Delta_{\beta} &= \frac{\Delta_{\beta, \text{στεγνού υλικού}}}{1+1,25 \cdot \frac{\text{ποσοστό απορρόφησης υγρασίας}}{100}} \\ \Delta_{\gamma} &= \frac{\Delta_{\gamma, \text{στεγνού υλικού}}}{1+1,14 \cdot \frac{\text{ποσοστό απορρόφησης υγρασίας}}{100}} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Το επόμενο ερώτημα που τίθεται είναι αν, λόγω της μικρής εμβέλειας των ακτίνων άλφα, το νερό παρεμβαίνει στην πορεία τους. Αν τα ίχνη τους βρίσκονται εξολοκλήρου αδιαπέραστα από το νερό υλικά, δε θα επηρεάζονται (Zimmerman, 1971).

Μια δεύτερη παραδοχή είναι η ομοιογένεια της ραδιενέργειας στο υλικό. Για τη βήτα ακτινοβολία η δόση μέσα στο κεραμικό δείγμα είναι περίπου ομοιόμορφη γιατί οι κόκκοι του υλικού είναι καλά αναμεμιγμένοι και συνήθως πολύ μικρότεροι από την εμβέλεια των βήτα σωμάτων. Στα υλικά όμως με μέγεθος της τάξης των 100μm θα πρέπει να γίνει διόρθωση λόγω εξασθένησης της ακτινοβολίας μέσα στον κόκκο. Δύο παράγοντες θα πρέπει να υπολογιστούν σχετικά με την εξασθένηση της βήτα ακτινοβολίας στο υλικό. Ο πρώτος είναι ο παράγοντας ο οποίος δηλώνει κατά πόσο μικρότερη είναι η μέση δόση σε ένα κόκκου δεδομένου μεγέθους σε σχέση με τη δόση με τη δόση των πολύ λεπτών κόκκων, στους οποίους η εξασθένηση είναι μηδενική. Ο δεύτερος παράγοντας αφορά κατά πόσο η δόση αυτή μειώνεται εάν ένα δεδομένο μέγεθος κόκκων μειωθεί εξαιτίας της χρήσης υδροφθορικού οξέως, γιατί το εξωτερικό στρώμα που δέχεται την πιο ισχυρή ακτινοβολία αφαιρείται με αυτή τη διαδικασία (όπως συμβαίνει με την άλφα ακτινοβολία). Οι παράγοντες αυτοί υπολογίστηκαν από τους Bell, 1979a και Mejdahl, 1979, με παράλληλες δημοσιεύσεις. Ο Bell υπολόγισε και τους δύο παράγοντες για μέγεθος αναφορικά με κόκκους 100μm και ο Mejdahl υπολόγισε τον πρώτο παράγοντα για κόκκους από 5μm μέχρι 10mm και τον δεύτερο και αυτός αναφορικά με κόκκους των 100μm. Ο Mejdahl ξεκίνησε υπολογίζοντας την εσωτερική δόση ενός κόκκους με βήτα ραδιενέργεια η οποία βρίσκεται μέσα σε ένα μη ραδιενεργό υλικό. Η εσωτερική δόση εξαρτάται από τη διάμετρο του κόκκου γιατί όσο πιο μεγάλος είναι ο κόκκος τόσο μεγαλώνει και η ενέργεια που εκπέμπεται λόγω βήτα εκπομπής. Το λόγος αυτής της εσωτερικής δόσης με το δόση άπειρα μεγάλου κόκκου που έχει τα ίδια επίπεδα ραδιενέργειας ορίζεται ως κλάσμα απορροφούμενης βήτα δόσης μηδέν. Ο λόγος ανάμεσα στη μέση βήτα δόση μέσα σε ένα μη ραδιενεργό κόκκο και τη δόση δε ένα ραδιενεργό υλικό στον οποίο βρίσκεται μέσα δίνονται από 1 μέχρι το μηδέν. Τα αποτελέσματα του Mejdahl (1979) φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα (σχ. 2.1) (Aitken, 1985).





Σχ. 2.1: Απορρόφηση της βήτα δόσης από τους κόκκους χαλαζία (διάγραμμα κατασκευασμένο από τα δεδομένα του Mejdahl (1979)). Ο αριστερός άξονας δίνει τη μέση βήτα δόση σε ελεύθερους ραδιενεργούς κόκκους χαλαζία εμφυτευμένους σε ραδιενεργό πηλό. Ο δεξιός άξονας δίνει τη μέση βήτα δόση ραδιενεργών κόκκων σε μη ραδιενεργό υλικό (Aitken, 1985).

Σημαντικό ρόλο παίζει και ο εσωτερικός ρυθμός δόσης του χαλαζία. Αρχικά ο Fleming (1970), όταν πρότεινε την τεχνική χρονολόγησης του χαλαζία για την κεραμική θεώρησε ότι οι κόκκοι χαλαζία δεν περιείχαν ραδιενεργά ισότοπα και μπορούσαν να αντιμετωπιστούν ως μη ραδιενεργά δοσίμετρα σε ραδιενεργό πηλό. Αργότερα οι Sutton και Zimmerman (1976) βρήκαν ότι ο χαλαζίας περιείχε ίχνη ουρανίου και θορίου και υπολόγισαν ότι η άλφα δόση που προέρχεται από το εσωτερικό του χαλαζία μπορεί να φτάσει και το 5% της ολικής δόσης, γι' αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν μας στην τελική ετήσια δόση. Ο Mejdahl (1987) υπολόγισε ότι η τιμή αυτή είναι  $0,10 \pm 0,03 \text{ Gy/ky}$ .

Ο ρυθμός της δόσης ανά έτος θεωρείται σταθερός. Αυτό όμως ισχύει μόνο όταν υπάρχει ραδιενεργός ισορροπία στη ραδιενεργό σειρά του ουρανίου-238. Κάτι τέτοιο συμβαίνει όταν δεν υπάρχει διαφυγή του ραδονίου-222, ούτε έκπλυση ή εμπλουτισμός του θαμμένου υλικού με φυσικά ραδιοϊσότοπα από υπόγεια νερά, χημικές αντιδράσεις με το ίζημα με το οποίο είναι σε επαφή. Στην περίπτωση που συμβαίνει κάτι τέτοιο η εξίσωση της ηλικίας αλλάζει. Υπεισέρχονται και οι ενεργότητες των ραδιοϊσοτόπων και οι σταθερές διάσπασής τους. Οι ποσότητες αυτές είναι μετρήσιμες και αφού η εξίσωση λυθεί ως προς το χρόνο υπολογίζεται η ζητούμενη ηλικία (Liritzis, 1989).

Η ετήσια δόση αποτελείται από τις επιμέρους άλφα, βήτα και γάμα δόσεις του δείγματος και του περιβάλλοντα χώρου και την κοσμική ακτινοβολία<sup>10</sup>. Η εξίσωση υπολογισμού της ετήσιας δόσης είναι:

$$E\Delta = \kappa\Delta_{\alpha} + \Delta_{\beta} + \Delta_{\gamma} + \Delta_c$$

(2.2)

όπου  $\Delta_{\alpha}, \Delta_{\beta}, \Delta_{\gamma}$  οι ετήσιες άλφα, βήτα και γάμα δόσεις, οι οποίες υπολογίζονται από τη συγκέντρωση ουρανίου, θορίου, καλίου και ρουβιδίου στο δείγμα,  $\Delta_c$  η κοσμική ακτινοβολία, και  $\kappa$  ο λόγος ευαισθησίας στην παραγωγή φωταύγειας από τη βήτα προς την άλφα ακτινοβολία του δείγματος για τον υπολογισμό της ισοδύναμης δόσης.

Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζεται μια τυπική γεωμετρία δείγματος, με τις ακτινοβολίες άλφα, βήτα και γάμα που βομβαρδίζουν την προς δειγματοληψία επιφάνεια. Η διαδικασία για τον υπολογισμό της τελικής τιμής της ετήσιας δόσης έχει ως εξής: αρχικά βρίσκονται οι συγκεντρώσεις ουρανίου, θορίου, καλίου και ρουβιδίου στο ίδιο το δείγμα και σε χώμα από τον περιβάλλοντα χώρο. Το κάλιο και το ρουβίδιο υπολογίζονται με μεθόδους χημικών αναλύσεων, ακτίνες X φθορισμού (Λυριτζής, 2005), νετρονική ενεργοποίηση (Λυριτζής, 2005; Παπαστεφάνου, 1999). Το ουράνιο και το θόριο με φασματοσκοπία γάμα με ανιχνευτή γερμανίου (Murray et al., 1987; Galloway and Liritzis, 1992), μετρητή άλφα σωματιδίων (Aitken, 1985) ή και νετρονική ενεργοποίηση (το σύστημα ακτίνων X φθορισμού δεν μπορεί να προσδιορίσει συγκέντρωση ουρανίου και θορίου σε φυσικά δείγματα γιατί η συγκέντρωσή τους στα δείγματα αυτά είναι κάτω από τα όρια ανίχνευσης του συστήματος). Η βήτα ακτινοβολία δείγματος και χώματος μπορεί να μετρηθεί απ' ευθείας με κατάλληλο εξοπλισμό, όπως μετρητή βήτα σωματιδίων με ανιχνευτή Geiger Muller (Botter-Jensen and Mejdahl, 1985, 1988) ή πλαστικό σπινθηριστή (Galloway and Liritzis, 1991). Με φορητό μετρητή (Liritzis and Galloway, 1981) έχουν γίνει μετρήσεις στον περιβάλλοντα χώρο των δειγμάτων (αναλυτικά οι μέθοδοι και τα συστήματα μετρήσεων παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους) (Liritzis, 2000). Το ουράνιο και το θόριο συνεισφέρουν και στις τρεις ετήσιες δόσεις, το κάλιο στις βήτα και γάμα, ενώ το ρουβίδιο μόνο στη βήτα.

Οι ετήσιες δόσεις βήτα και γάμα μπορούν επίσης να υπολογιστούν από το ρυθμό άλφα αλλά υπάρχει μεγαλύτερη εξάρτηση από το λόγο θορίου προς ουράνιο. Ένα δείγμα το οποίο έχει μόνο θόριο ή μόνο ουράνιο απομακρύνεται περίπου κατά 20% από τον παράγοντα μετατροπής από ρυθμό παλμών σε ρυθμό δόσεων για ίσες ενεργότητες. Αν και ακραίες

<sup>10</sup> η άλφα ακτινοβολία είναι ουσιαστικά γυμνοί πυρήνες ηλίου, η βήτα ηλεκτρόνια, και η γάμα φωτόνια. Εκείνο που τις διαφοροποιεί είναι η προέλευσή τους, από τον πυρήνα των ατόμων των στοιχείων.

αποκλίσεις στο λόγο των ενεργοτήτων δεν είναι συχνές είναι προτιμότερο για τον προσδιορισμό των ρυθμών δόσεων βήτα και γάμα να χρησιμοποιηθούν άλλες μέθοδοι (Aitken, 1985).

Μετά το πέρας των μετρήσεων γίνονται οι μετατροπές των συγκεντρώσεων των ιχνοστοιχείων σε ετήσιες δόσεις. Πολλές εργασίες έχουν γίνει για το σκοπό αυτό (Liritzis and Kokkoris, 1992; Kokkoris and Liritzis, 1997; Adamiec and Aitken, 1998; Carriveau and Troka, 1978; Bell, 1979b). Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζουμε τους ρυθμούς δόσεων σε Gy/ky για συγκέντρωση 1ppm των ιχνοστοιχείων του ουρανίου, του θορίου και του ρουβιδίου και για 1% του καλίου.

Πίνακας 2.1: Η συνεισφορά των ιχνοστοιχείων του K-40, Rb-87, Th-232 και U-238 στους ετήσιους ρυθμούς δόσεων άλφα, βήτα και γάμα

	Άλφα				Βήτα				Γάμα			
	Liritzis	Adamiec	Bell	Carriveau	Liritzis	Adamiec	Bell	Carriveau	Liritzis	Adamiec	Bell	Carriveau
K	0	0	0	0	0,8221	0,782	0,822	0,802	0,2460	0,243	0,247	0,248
Rb	0	0	0	0	0,00051	0,00038	0	0,00038	0	0	0	0
U	2,8315	2,78	2,784	2,7902	0,1468	0,146	0,147	0,146	0,1333	0,113	0,115	0,124
Th	0,7309	0,732	0,739	0,739	0,0274	0,0273	0,029	0,0275	0,0505	0,0476	0,0514	0,046

Για παράδειγμα, σε δείγμα που περιέχει 1ppm U-238, 3ppm Th-232, 50ppm Rb και 1%K-40, και θεωρώντας τιμή του λόγου ευαισθησίας άλφα/βήτα ίσο με 0,1, οι ετήσιες δόσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2, όπου και βλέπουμε ότι και οι τέσσερις εργασίες δίνουν κοντινά αποτελέσματα.

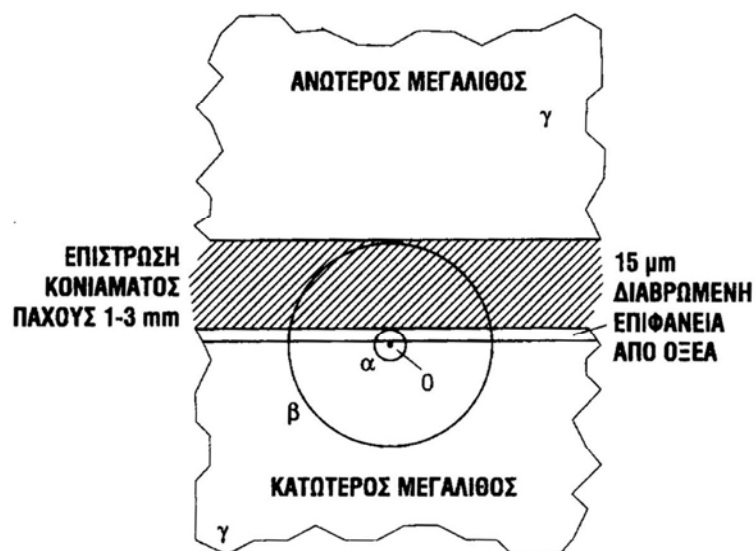
Πίνακας 2.2: Ετήσιες άλφα, βήτα και γάμα δόσεις σε Gy/ky με τους παράγοντες μετατροπής του πίνακα 2.1

	Liritzis	Adamiec	Bell	Carriveau
Άλφα ετήσια δόση	0,502	0,498	0,500	0,501
Βήτα ετήσια δόση	1,08	1,03	1,06	1,05
Γάμα ετήσια δόση	0,53	0,50	0,52	0,51

Μετά και τον υπολογισμό των επιμέρους ετήσιων δόσεων στο ίδιο το προς χρονολόγηση υλικό και στο χώμα που θα πρέπει απαραίτητως να το συνοδεύει (και του συνδετικού υλικού σε περίπτωση που υπάρχει) προχωράμε στον υπολογισμό της ολικής ετήσιας δόσης ως εξής:

Η ακτινοβολία  $\alpha$  έχει εμβέλεια περίπου 24 $\mu\text{m}$  με αφετηρία το σημείο από το οποίο λαμβάνεται η σκόνη για χρονολόγηση και αποδίδει το 100% της δόσης στο ίδιο το δείγμα. Ο καθαρισμός της επιφάνειας με αραιό υδροχλωρικό οξύ εισέρχεται σε βάθος μόνο μερικών δεκάδων μικρομέτρων και ουσιαστικά δεν επηρεάζει την άλφα δόση, αφού τα κατώτερα στρώματα της επιφάνειας θα έχουν ακτινοβοληθεί, μέχρι και σε βάθος 500 περίπου μικρομέτρων, όσο είναι και το στρώμα που λαμβάνεται για δειγματοληψία (Λυριτζής, 2005) (σχ. 2.2). Θα πρέπει να πούμε εδώ ότι αυτό ισχύει στην περίπτωση που η χρονολόγηση γίνεται με τη μέθοδο των λεπτών κόκκων χαλαζία. Στην περίπτωση που η χρονολόγηση γίνει με τη μέθοδο των μεγάλων κόκκων, στην οποία η σκόνη επεξεργάζεται με υδροφθορικό οξύ, το στρώμα που έχει επηρεάσει η άλφα ακτινοβολία χάνεται και δεν λαμβάνεται υπ' όψιν.

Η βήτα ακτινοβολία έχει εμβέλεια περίπου ένα χιλιοστό και πηγάζει κατά το ήμισυ από το ίδιο το πέτρωμα. Το υπόλοιπο μέρος οφείλεται το κονίαμα – συνδετικό υλικό, όταν υπάρχει. Στην περίπτωση που υπάρχει στρώμα αέρα ενδιάμεσα αυτό το 50% γίνεται αμελητέο και αυτό γιατί στο στρώμα αυτό η βήτα ακτινοβολία εισέρχεται μερικές δεκάδες χιλιοστά. Επιπλέον όταν η δέσμη εισέλθει στον υπερκείμενο ογκόλιθο θα εξασθενίσει ακόμα περισσότερο μόλις στα πρώτα μικρόμετρα και η ενέργειά της δε θα είναι ικανή να ionίσει τα άτομα που σα συναντήσει στην πορεία της μέχρι να σταματήσει (Λυριτζής, 2005).

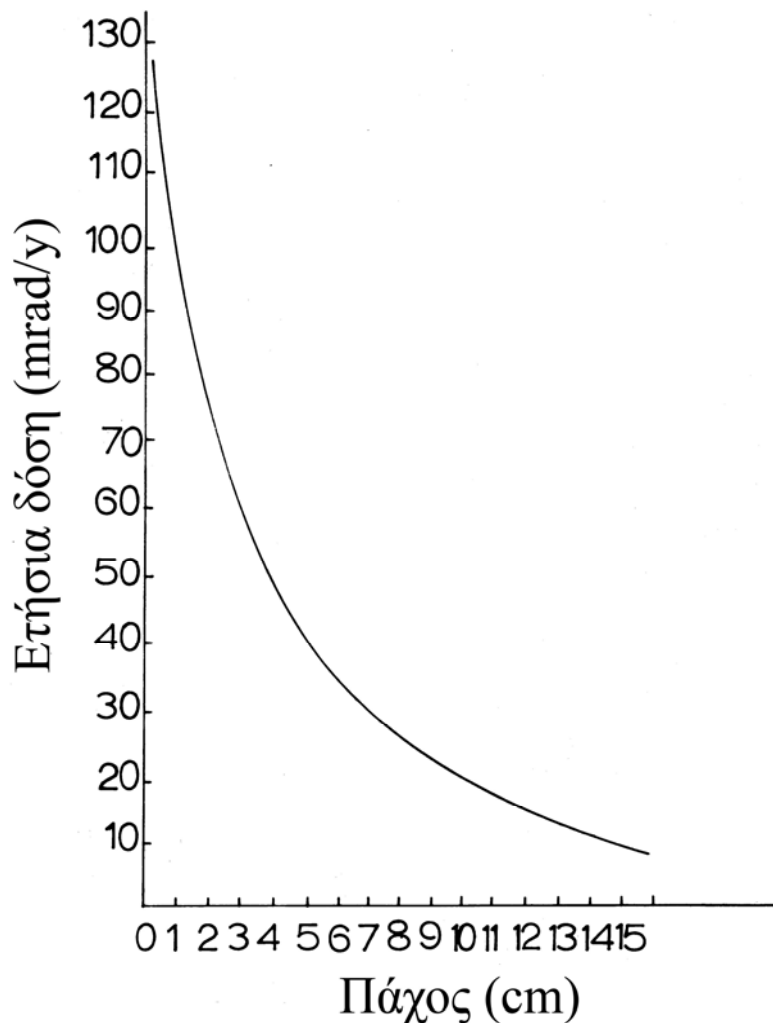


Σχ. 2.2: Σχηματική αναπαράσταση των εμβελειών των ακτίνων άλφα, βήτα και γάμα στο σημείο δειγματοληψίας σε ένα μέγαλιθο (Λυριτζής, 2005).

Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η εμβέλεια των άλφα και βήτα εξαρτάται από την ενέργεια των σωματιδίων και το συντελεστή απορρόφησης μάζας του υλικού.

Τέλος, η γάμα ακτινοβολία προέρχεται από τον περιβάλλοντα χώρο, από μια ακτίνα περίπου 35cm και περιλαμβάνει το ίδιο το δείγμα, π.χ. το πέτρωμα του τοίχου, το χώμα του δαπέδου και την κοσμική ακτινοβολία.

Σε ασβεστολιθικά πετρώματα η γάμα ακτινοβολία του περιβάλλοντος αποτελεί τον κύριο παράγοντα στην ετήσια δόση και η ακριβής μέτρησή της είναι υψίστης σημασίας, μιας και τα πετρώματα αυτά δίνουν πολύ χαμηλές άλφα και βήτα δόσεις με μεγάλο σφάλμα. Τα μνημεία που χρονολογούνται είναι συνήθως καλυμμένα από χώμα ή άμμο, τα οποία και συνεισφέρουν στην ισοδύναμη γάμα δόση του δείγματος, με αποτέλεσμα η σημερινή γάμα δόση να είναι μικρότερη από αυτή που θα είχε αν το μνημείο δεν είχε καλυφθεί. Το ποσό αυτό που λείπει για όσα χρόνια ήταν θαμμένο το μνημείο θα πρέπει να προστεθεί. Σε περίπτωση που το δείγμα που πήραμε δεν είναι πάνω στην επιφάνεια του μεγάλιθου αλλά σε κάποιο βάθος θα πρέπει να γίνει διόρθωση λόγω εξασθένησης της γάμα ακτινοβολίας στο χώμα (σχ. 2.3) (Liritzis, 1989).



Σχ. 2.3: Εξασθένηση της γάμα ακτινοβολίας διαμέσου μισού στρώματος ασβεστόλιθου σε επαφή με ομοιογενές και ραδιενεργό στρώμα χώματος (Liritzis, 1989).

Η κοσμική ακτινοβολία, όπως προαναφέρθηκε, συνεισφέρει στη γάμα ετήσια δόση του περιβάλλοντος. Η συνεισφορά της είναι πολύ μικρή και μπορεί να θεωρηθεί ίση με 0,15Gy/ky εκτός και αν το δείγμα είναι στην επιφάνεια. Στην περίπτωση αυτή η τιμή της είναι διπλάσια της προαναφερθείσας και μειώνεται γρήγορα μέχρι τα 30cm στο έδαφος. Από εκεί και μέχρι τα πέντε μέτρα τη εξασθένισή της είναι πιο ομαλή. Μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις χαμηλής ραδιενέργειας, ψηλού υψομέτρου, ή σε σημεία που τα δείγματα καλύπτονται από πολύ χοντρών τοιχώματα βαθιά στη γη, όπως παλαιολιθικά σπήλαια, χρειάζεται αναθεώρηση της αρχικής τιμής (Aitken, 1985; Prescott and Stefan, 1982). Αποτελείται από δύο συνιστώσες, από την πρωτογενή κοσμική ακτινοβολία η οποία προέρχεται από το διάστημα, πρωτόνια, σωμάτια α, γυμνοί πυρήνες βαρέων στοιχείων, νετρόνια, και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πολύ υψηλών ενεργειών, και τη δευτερογενή που παράγεται με τις πυρηνικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα μεταξύ των πρωτογενών ακτίνων και των πυρήνων των ατόμων στην ατμόσφαιρα, νετρόνια, πρωτόνια, πόνια, καόνια, ηλεκτρόνια και φωτόνια. Η έντασή της εξαρτάται από το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας και από την ενέργεια των σωματιδίων που την αποτελούν (Παπαστεφάνου, 1999).

Τέλος, αφού γίνουν όλες οι απαραίτητες διορθώσεις, στη βήτα και γάμα ακτινοβολία, όπου είναι απαραίτητο, προστίθεται η εσωτερική δόση του χαλαζία στα δείγματα που έχουν χαλαζία και υπολογίζεται η ολική ετήσια δόση.

## 2. Μέθοδοι χημικής ανάλυσης

Για τη χημική ανάλυση των αρχαιολογικών ευρημάτων έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς πολλές μέθοδοι. Κάποιες από αυτές τις μεθόδους προϋποθέτουν τη λήψη δείγματος από το αντικείμενο, γεγονός που τις καθιστά καταστρεπτικές. Αντίθετα, σε κάποιες άλλες περιπτώσεις υπάρχει η δυνατότητα της επί τόπου μέτρησης του αντικειμένου (μη καταστρεπτικές μέθοδοι). Στην περίπτωση των καταστρεπτικών μεθόδων θα πρέπει να επιλέγονται μέρη του αντικειμένου χωρίς αρχαιολογική αξία, χωρίς χρώμα, παραστάσεις ή οτιδήποτε θα βοηθούσε τον αρχαιολόγο στην ερμηνεία και χρονολόγησή του. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα νομίσματα και άλλα μεταλλικά αντικείμενα, επειδή ακριβώς είναι τα πιο σπάνια ευρήματα μιας ανασκαφής θα πρέπει να μείνουν άθικτα.

Η επιλογή της μεθόδου γίνεται κάθε φορά ανάλογα με το υλικό που θα πρέπει να αναλυθεί και ποια περιμένουμε να είναι περίπου η συγκέντρωση των στοιχείων που μας ενδιαφέρει, και αυτό γιατί κάθε μέθοδος έχει τα δικά της όρια ανίχνευσης. Καμία μέθοδος δεν ανιχνεύει όλα τα στοιχεία. Κάθε φορά θα πρέπει να γίνεται συνδυασμός μεθόδων ή προσεχτική επιλογή της ανάλογα με τη συγκέντρωση των στοιχείων που κάθε φορά αναζητά ο ερευνητής. Έτσι γνωρίζοντας ότι για τα ιχνοστοιχεία ουράνιο (U) και θόριο (Th) η συγκέντρωσή τους σε ένα

φυσικό δείγμα δε μπορεί να ξεπερνά μερικές δεκάδες ppm για τους γρανίτες, θα επιλεγεί για παράδειγμα η μέθοδος ανάλυσης με νετρονική ενεργοποίηση (παράγραφος 2.2) η οποία έχει κατώτατο όριο ανίχνευσης 1ppm και όχι η μέθοδος ακτίνων Χ φθορισμού με ελάχιστο όριο τα 50ppm (παράγραφος 2.1).

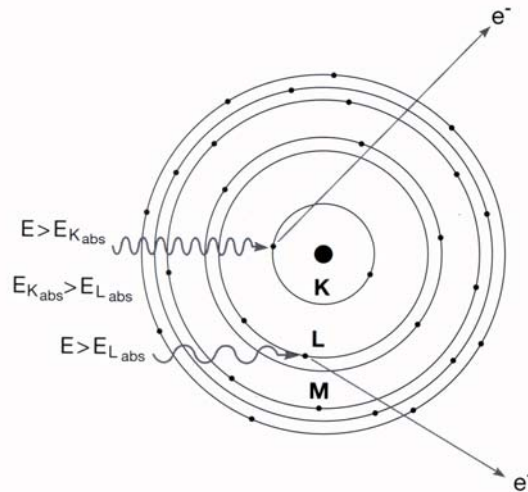
Μια ποσοτική ανάλυση υψηλής ακρίβειας για όλα τα χημικά στοιχεία που μπορούν να ανιχνευτούν είναι μια ιδιαίτερα επίπονη, χρονοβόρα και ακριβή, κυρίως, διαδικασία. Έτσι, ο αριθμός των στοιχείων κρατείται στο ελάχιστο δυνατό, και ανάλογος με το υλικό που κάθε φορά μελετάται, ώστε να είναι και πιο εύκολη η επεξεργασία των αποτελεσμάτων (Λυριτζής, 2005).

Η διαδικασία, σε κάθε μέθοδο, μέχρι τη λήψη των τελικών αποτελεσμάτων ακολουθεί τα παρακάτω στάδια. Αρχικά η δειγματοληψία, κατά την οποία δείγμα, δηλαδή μικρή ποσότητα, αποσπάται από το προς μέτρηση υλικό. Θα πρέπει η σύστασή του να είναι αντιπροσωπευτική του συνόλου. Σε περίπτωση υλικών ανομοιογενών, θα πρέπει να γίνονται πολλαπλές δειγματοληψίες από διάφορα σημεία του αρχικού υλικού. Το επόμενο στάδιο είναι η προετοιμασία του, η οποία εξαρτάται από τη μέθοδο που θα ακολουθηθεί. Στη συνέχεια είναι η ανάλυση και ο προσδιορισμός των ζητούμενων χημικών στοιχείων με τη μέθοδο η οποία έχει επιλεγεί, η επεξεργασία και η εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων και τέλος, το πιο σημαντικό βήμα, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

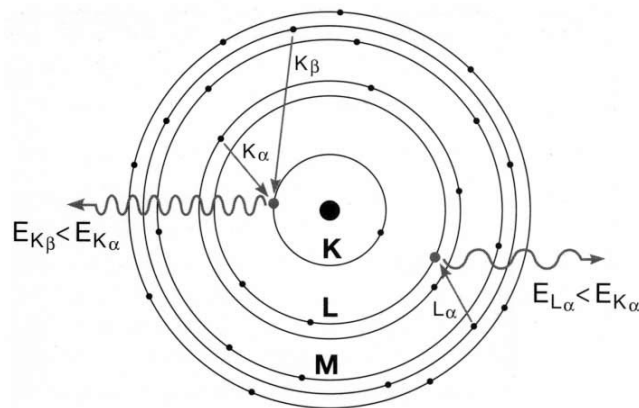
Στη συγκεκριμένη μελέτη θα αναλυθούν οι μέθοδοι ακτίνων-Χ φθορισμού και η ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση.

### *2.1 Φασματοσκοπία Ακτίνων-Χ Φθορισμού.*

Η φασματοσκοπία ακτίνων-Χ φθορισμού βασίζεται στο φυσικό φαινόμενο της μετακίνησης ηλεκτρονίων από τις εξωτερικές στις εσωτερικές στοιβάδες για την κάλυψη των κενών που άφησαν ηλεκτρόνια που εξοστρακίστηκαν μετά από ακτινοβόληση με πρωτογενείς ακτίνες-Χ (σχ. 2.4). Η μεταπήδηση των ηλεκτρονίων έχει σαν αποτέλεσμα την εκπομπή δευτερογενών ακτίνων-Χ (σχ. 2.5) των οποίων το μήκος κύματος κυμαίνεται από  $2 \times 10^{-5}$  μέχρι  $2 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ . Η ανάλυση των παλμών αυτών και των ενεργειών τους επιτρέπει την αναγνώριση του χημικού στοιχείου από το οποίο έφυγαν αρχικά τα ηλεκτρόνια και τον προσδιορισμό της συγκέντρωσής τους στο υλικό.



Σχ. 2.4: Εξοστράκιση ηλεκτρονίων από τις στιβάδες K και L στοιχείο μετά από ακτινοβόλησή του με πρωτογενής ακτίνες-X (de Vries and Vrebos, 1993).



Σχ. 2.5: Η εκπομπή ακτίνων -X φθορισμού μετά τη συμπλήρωση των κενών από ηλεκτρόνια από τις εξωτερικές στιβάδες (de Vries and Vrebos, 1993).

Αναλυτικότερα, η αναγνώριση των στοιχείων στηρίζεται στο γεγονός ότι κάθε ένα εκπέμπει δευτερογενείς ακτίνες X σε μήκος κύματος που το χαρακτηρίζει, το οποίο είναι διακριτό και εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό τους (Z). Στην περίπτωση των ακτινοβολιών  $K\alpha^{11}$  και  $L\alpha^{12}$ , οι οποίες είναι και οι σημαντικότερες τα μήκη κύματος προσδιορίζονται από τις σχέσεις:

$$\lambda_K = \frac{0,12}{(Z-1)^2}$$

(2.3)

<sup>11</sup> Συμβαίνει όταν η συμπλήρωση της K στιβάδας γίνεται από ηλεκτρόνιο της L στιβάδας

<sup>12</sup> Συμβαίνει όταν η συμπλήρωση της L στιβάδας γίνεται από ηλεκτρόνιο της M στιβάδας.



$$\lambda_L = \frac{0,65}{(Z - 7,4)^2}$$

(2.4)

Άρα ο προσδιορισμός του μήκους κύματος επιτρέπει τον προσδιορισμό του ατομικού αριθμού, Z, των στοιχείων, δηλαδή των στοιχείων του δείγματος. Από την ένταση των ακτίνων-X στο συγκεκριμένο μήκος κύματος λ, από το φάσμα που μας δίνει ο ανιχνευτής, προσδιορίζεται η συγκέντρωση του στοιχείου (Λυριτζής, 2005).

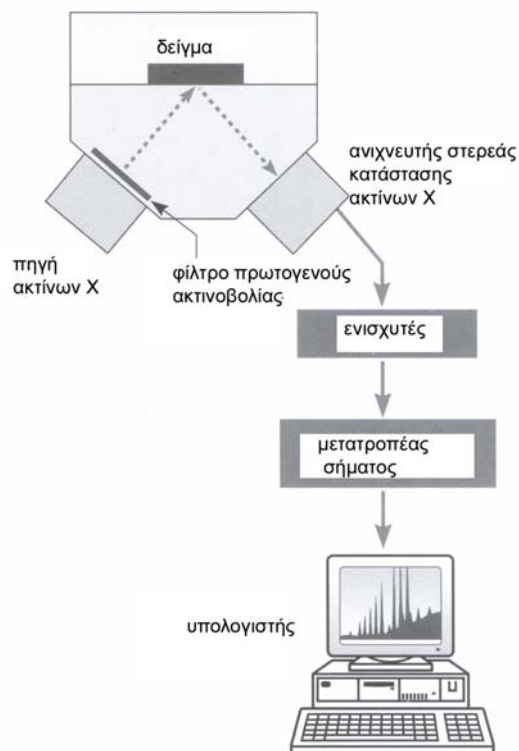
Η συσκευή φασματοσκοπίας ακτίνων-X φθορισμού είναι η TN Spectrace 9000, s/n Q-119, της Ολλανδικής εταιρίας Thermo Electron b.v. - MeasureTech Europe / ONIX (Εικ. 2.1). Διαθέτει τρεις ραδιενεργές πηγές, αμερικού (Am-241), καδμίου (Cd-109) και σιδήρου (Fe-55). Κάθε ραδιενεργή πηγή ανιχνεύει και διαφορετικό στοιχείο. Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται τα ραδιοϊσότοπα της συσκευής και τα χαρακτηριστικά τους. Οι πρωτογενείς ακτίνες-X προέρχονται από αυτές τις τρεις πηγές, οι οποίες ακτινοβολούν το δείγμα η μία μετά την άλλη, με τη βοήθεια ενός μηχανισμού ο οποίος περιστρέφει μια βάση στην οποία είναι τοποθετημένες οι πηγές.

Πίνακας 2.3: Τα ραδιοϊσότοπα της συσκευής φασματοσκοπίας ακτίνων-X φθορισμού TN Spectrace 9000.

Νουκλίδιο	Ενεργότητα (mCi)	Χρόνος ημιζωής	Εκπομπή	Στοιχεία που ανιχνεύει
<b>Fe-55</b>	50	2,7 χρόνια	5,9keV Mn K X-Rays	K, Ca, Ti, Cr
<b>Cd-109</b>	5-30	453 μέρες	22,1 keV Ag K X-rays 87,7keV γ	Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Zr, Mo, Hg, Pb, Rb, Th, U
<b>Am-241</b>	5	458 χρόνια	26,4keV γ 59,5keV γ	Ag, Cd, Sn, Ba, Sb



Εικ. 2.1: Ο ανιχνευτής TN Spectrace 9000 ακτίνων-Χ φθορισμού του εργαστηρίου Αρχαιομετρίας, του Πανεπιστημίου Αιγαίου στη Ρόδο.



Σχ. 2.6: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης για την ανίχνευση και την επεξεργασία των ακτίνων-Χ φθορισμού. Διακρίνονται η πηγή ακτίνων-Χ, το προς ανάλυση δείγμα, ο ανιχνευτής, το ηλεκτρονικό σύστημα και ο ηλεκτρονικός υπολογιστής (de Vries and Vreboos, 1993).

Το σύστημα αποτελείται από τη μονάδα ανάλυσης (probe unit) και το ηλεκτρονικό και καταγραφικό σύστημα. Από τις πηγές, οι πρωτογενείς ακτίνες-Χ κατευθύνονται στο δείγμα σε

λεπτή δέσμη προς το δείγμα ακτινοβολώντας το, τα άτομα των στοιχείων του δείγματος εκπέμπουν δευτερογενείς ακτίνες-Χ, ακτίνες-Χ φθορισμού. Οι ακτίνες αυτές διαχωρίζονται με βάση τις ενέργειές τους στα επιμέρους μήκη κύματος με τη χρήση περιθλασιόμετρου και ανιχνεύονται με ανιχνευτή στερεάς κατάστασης  $HgI_2$ . Μετά τον ανιχνευτή και μέσα στο ηλεκτρονικό σύστημα από την ανάλυση βρίσκεται το ποσό κάθε στοιχείου στο δείγμα (επί τις εκατό ή στο εκατομμύριο κατά βάρος).

Πολλά αρχαιολογικά υλικά μπορούν να αναλυθούν. Έχουν γίνει αναλύσεις σε κεραμικά, ειδώλια, γυάλινα και μεταλλικά αντικείμενα, πετρώματα, ιζήματα, πίνακες ζωγραφικής, τοιχογραφίες (χρωστικές). Θεωρητικά μπορεί να αναλύσει κάθε υλικό, είτε αυτούσιο, είτε κονιορτοποιημένο. Το γεγονός ότι η συσκευή είναι φορητή επιτρέπει μετρήσεις στο ύπαιθρο αλλά και σε μουσεία, καθιστώντας τη μέθοδο μη καταστρεπτική και ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις ανάγκης μελέτης μοναδικών και πολύτιμων εκθεμάτων. Μπορεί να τοποθετηθεί απ' ευθείας επάνω στην προς μέτρηση επιφάνεια ή, αν είναι μικρό το αντικείμενο, να τοποθετηθεί στο θάλαμο του οργάνου (Λυριτζής, 2005). Στην περίπτωση της σκόνης, χρησιμοποιείται υλικό κονιορτοποιημένο σε μέγεθος μικρότερο από 90 $\mu$ m. Η σκόνη τοποθετείται στον ειδικό δειγματολήπτη, ο οποίος και κλείνεται με δαχτυλίδι και μια ζελατίνη τύπου mylar X-ray film, πάχους 6 $\mu$ m της αμερικανικής εταιρίας Chemplex. Σκόνη λαμβάνεται από αντιπροσωπευτικό μέρος του υλικού. Σε περιπτώσεις ανομοιογένειας θα πρέπει να ληφθεί σκόνη από πολλαπλά σημεία του δείγματος, ή και να γίνουν πολλαπλές μετρήσεις και κάθε φορά να ανακινείται ο δειγματολήπτης. Φωτογραφία δειγματοληπτών με σκόνη φαίνονται στην εικ. 2.2.



Εικ. 2.2: Δειγματολήπτες με σκόνη για μέτρηση με τη μέθοδο ακτίνων-Χ φθορισμού με τη συσκευή TN Spectrace 9000.

Η ανάλυση των δειγμάτων είναι επιφανειακή γιατί οι ακτίνες-Χ διέρχονται μόνο μέχρι 200 $\mu$ m μέσα στο υλικό. Τα σφάλματα στη μέθοδο προέρχονται από το μέγεθος και το σχήμα των αντικειμένων. Σε περίπτωση που το αντικείμενο δεν είναι λείο ή επίπεδο η μέτρηση δεν

είναι ακριβής γιατί οι ακτίνες-Χ απορροφούνται από τον αέρα και δε φτάνουν στο δείγμα. Γενικά η γεωμετρία μέτρησης θα πρέπει να είναι η ίδια σε κάθε μετρούμενο υλικό, είτε αναφοράς είτε αρχαιολογικό. Έγιναν διάφορα πειράματα που αφορούν τόσο τη γεωμετρία κατά τη μέτρηση ενός δείγματος όσο και τη διεισδυτικότητα των ακτίνων στο δείγμα. Η διαδικασία και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε επόμενες παραγράφους.

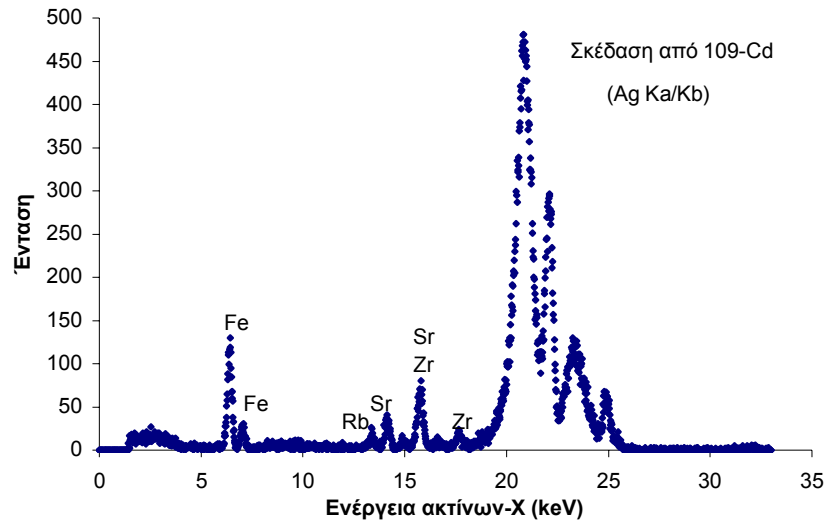
Αν και θεωρητικά τα σύγχρονα όργανα μπορούν να ανιχνεύσουν όλα τα στοιχεία, στην πράξη υπάρχουν όρια τόσο στα στοιχεία που ανιχνεύονται όσο και στη συγκέντρωσή τους. Για παράδειγμα, η ανάλυση μικρών ενεργειών κάτω από 5keV απαιτεί κενό ή ατμόσφαιρα ηλίου (He). Έτσι, και δεδομένου ότι οι ακτίνες-Χ απορροφούνται από τον αέρα, η οποία και αυξάνει ταχύτητα αυξανόμενου του μήκους κύματος, αποδεικνύεται ότι το κατώτερο όριο ανίχνευσης είναι περίπου για ατομικό αριθμό  $Z=22$ , δηλαδή για το τιτάνιο. Ανώτερο όριο στον ατομικό αριθμό δεν υπάρχει. Ανώτερο όριο τίθεται μόνο από το πάχος του δείγματος, όπως θα ειπωθεί σε επόμενες παραγράφους.

Κατώτερο όριο τίθεται και στη δυνατότητα ανίχνευσης ορισμένης συγκέντρωσης στοιχείου στο δείγμα. Σε κάποια ιχνοστοιχεία το όριο αυτό μπορεί να είναι 10-100ppm, εξαρτάται όμως από το είδος του υλικού και το χημικό στοιχείο. Έχει βρεθεί ότι αυξανόμενου του χρόνου καταμέτρησης κατά τέσσερις φορές, μικραίνει το κατώφλι ανίχνευσης δυο φορές (Potts et al., 2001).

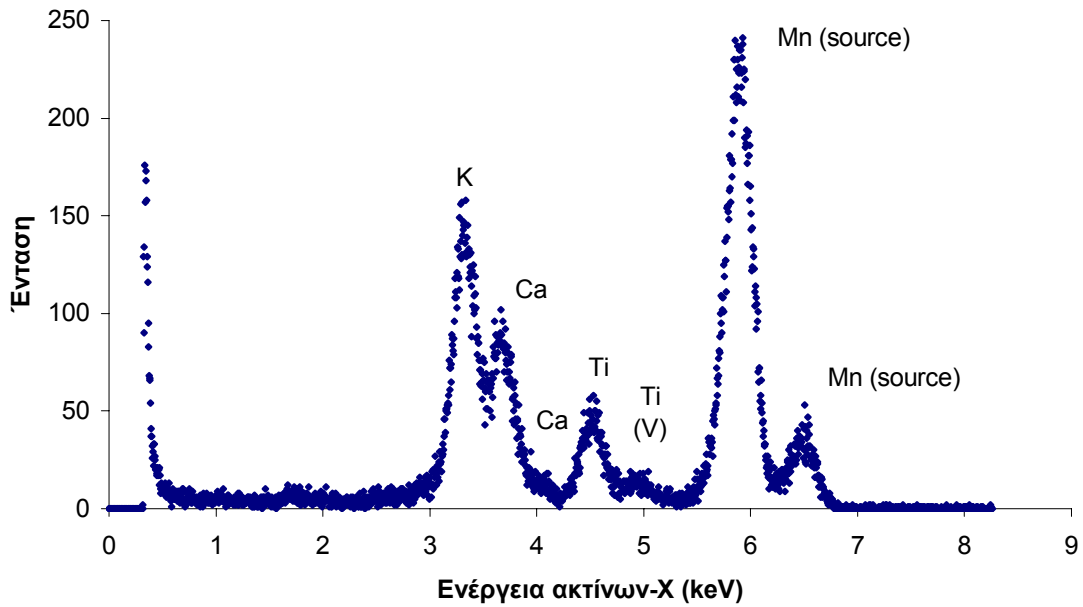
Κάποια παραδείγματα που μπορούν να δοθούν για την εφαρμογή της μεθόδου είναι ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης του καλίου και του ρουβιδίου για τον υπολογισμό της ετήσιας δόσης του δείγματος για τη χρονολόγησή του, η ανάλυση χρωστικών σε τοιχογραφίες και πίνακες ζωγραφικής η οποία δίνει δυνατότητα συντήρησής τους, χωρίς να καταστρέφει το έργο, και ο προσδιορισμός των χημικών στοιχείων σε πληθώρα αρχαιολογικών υλικών και η ομαδοποίησή τους ανάλογα με την προέλευσή τους (Liritzis et al., 2003).

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται παραδείγματα φασμάτων των δευτερογενών ακτίνων-Χ που λαμβάνονται από διάφορα υλικά. Στα διαγράμματα σημειώνονται τα στοιχεία που αντιστοιχούν στις κορυφές.

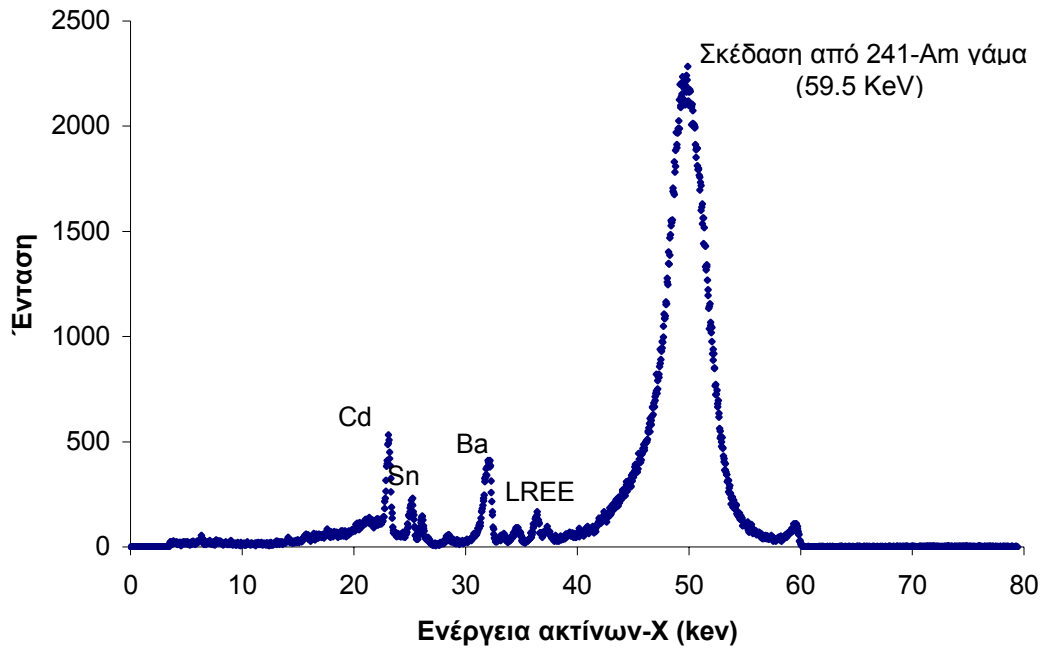
- Φάσματα γρανίτης, RHO-58 (ST4)



Σχ. 2.7: Φάσμα ενέργειας ακτίνων-Χ φθορισμού της πηγής Cd-109 για το δείγμα γρανίτη RHO-58 (ST4).

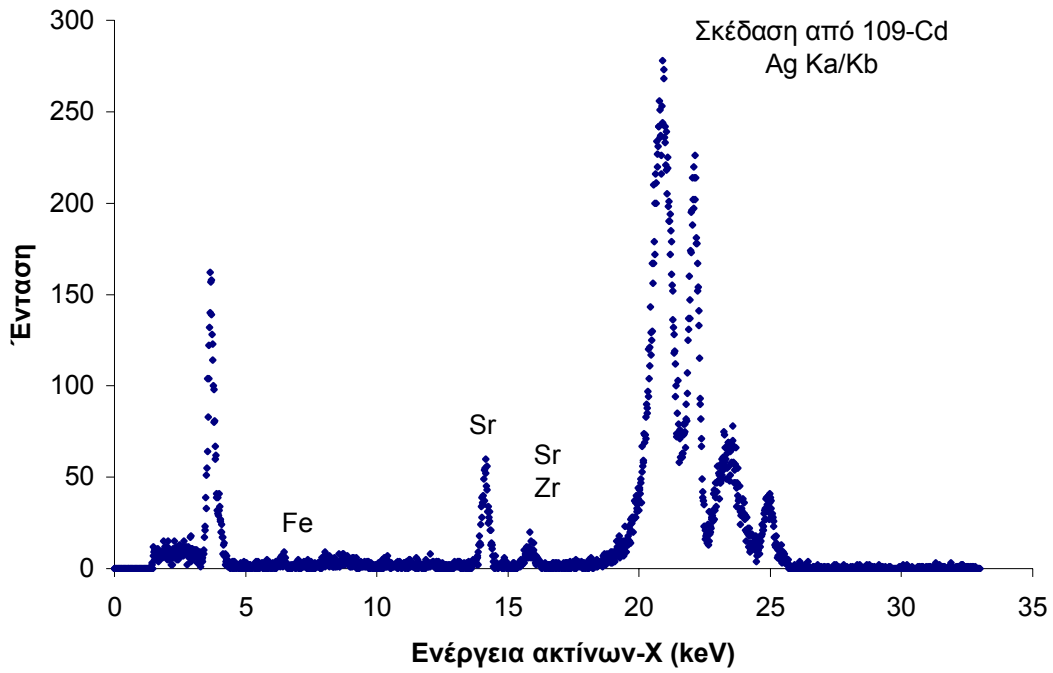


Σχ. 2.8: Φάσμα ενέργειας ακτίνων-Χ φθορισμού της πηγής Fe-55 για το δείγμα γρανίτη RHO-58 (ST4).

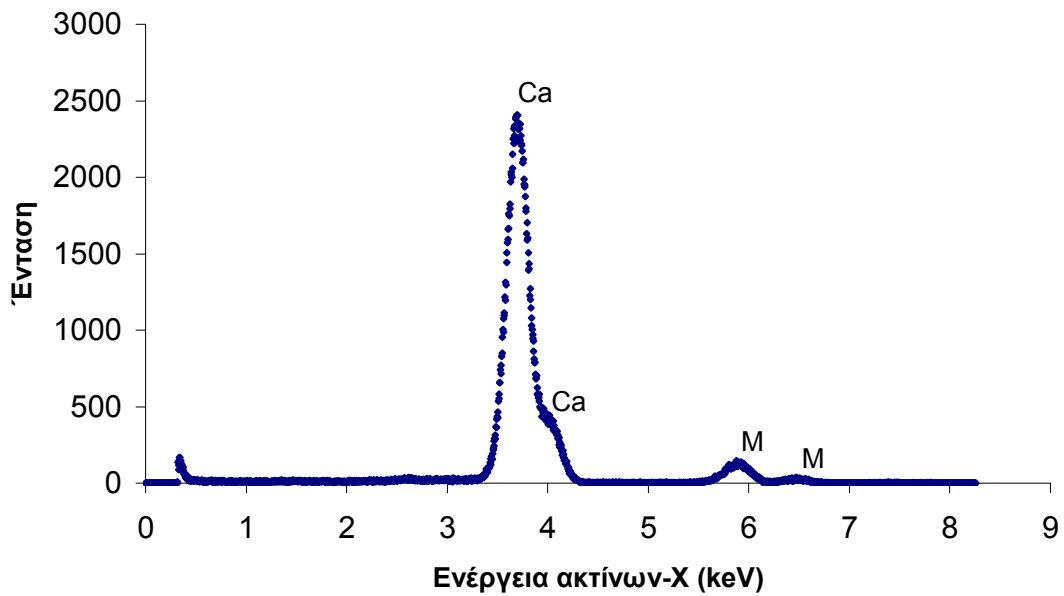


Σχ. 2.9: Φάσμα ενέργειας ακτίνων-Χ φθορισμού της πηγής Am-241 για το δείγμα γρανίτη RHO-58 (ST4).

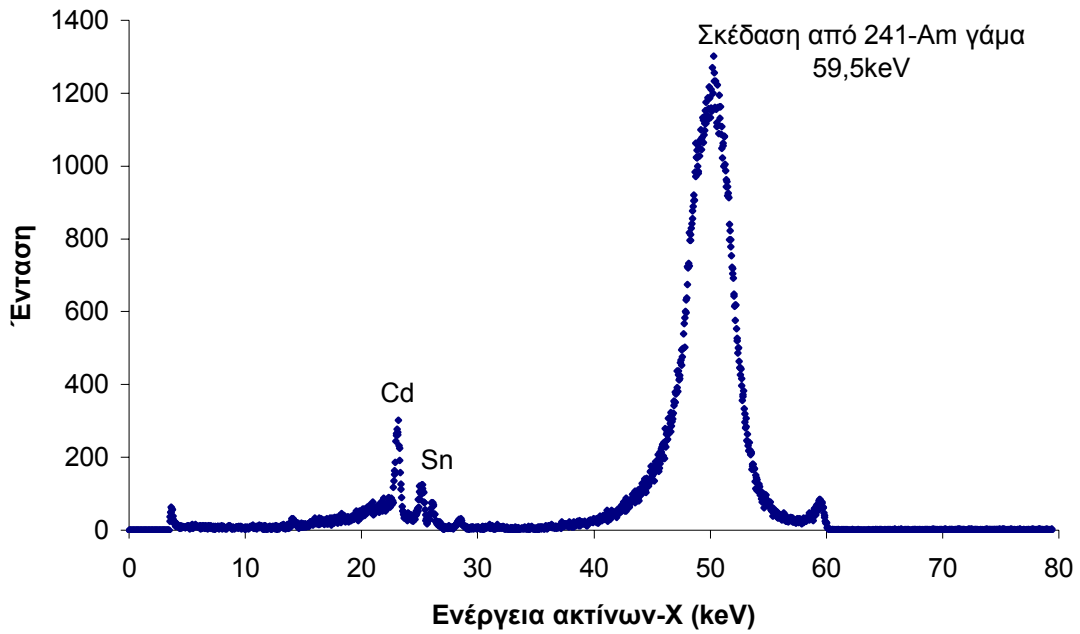
- Δείγμα ασβεστόλιθος, RHO-55 (ST1)



Σχ. 2.10: Φάσμα ενέργειας ακτίνων-X φθορισμού της πηγής Cd-109 για το δείγμα ασβεστόλιθου RHO-55 (ST1).

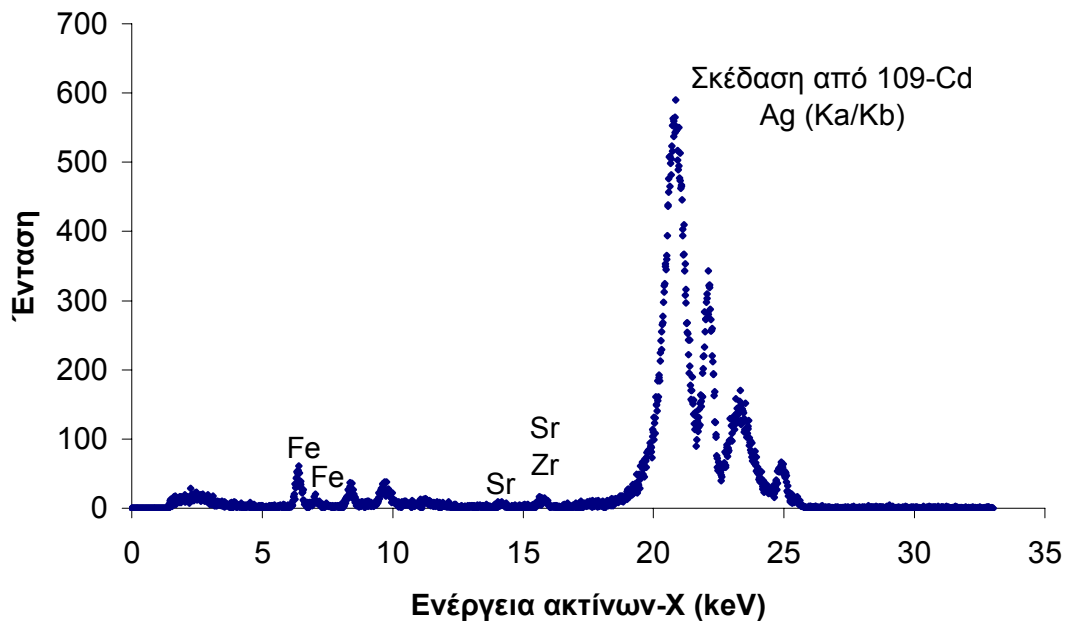


Σχ. 2.11: Φάσμα ενέργειας ακτίνων-X φθορισμού της πηγής Fe-55 για το δείγμα ασβεστόλιθου RHO-55 (ST1).



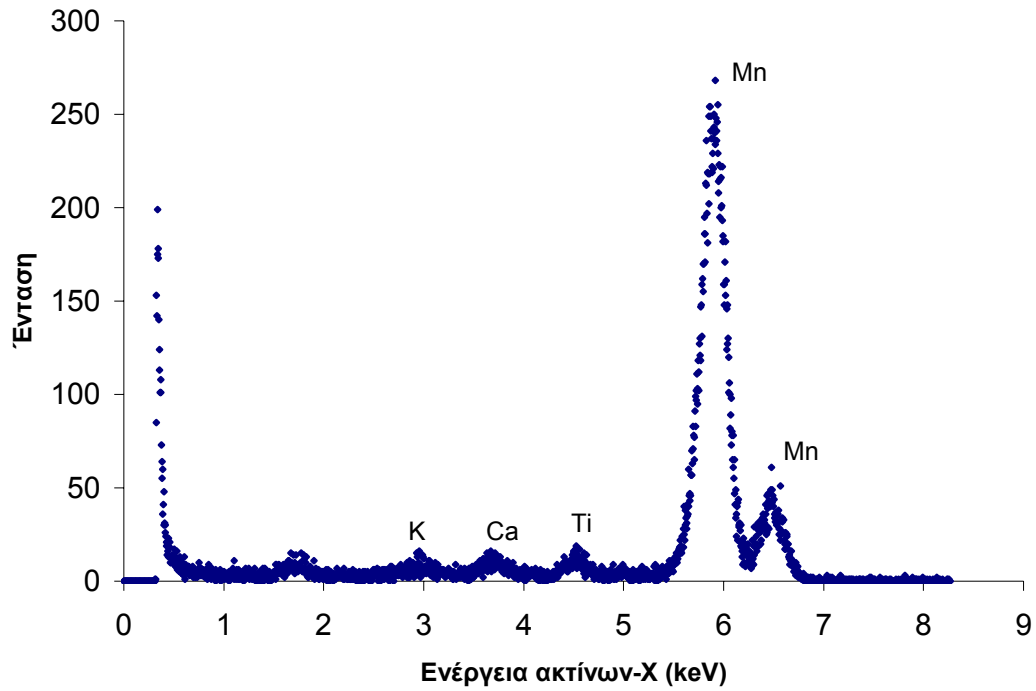
Σχ. 2.12: Φάσμα ενέργειας ακτίνων-X φθορισμού της πηγής Am-241 για το δείγμα ασβεστόλιθου RHO-55 (ST1).

- Δείγμα ψαμμίτης, RHO-138 (OS6)

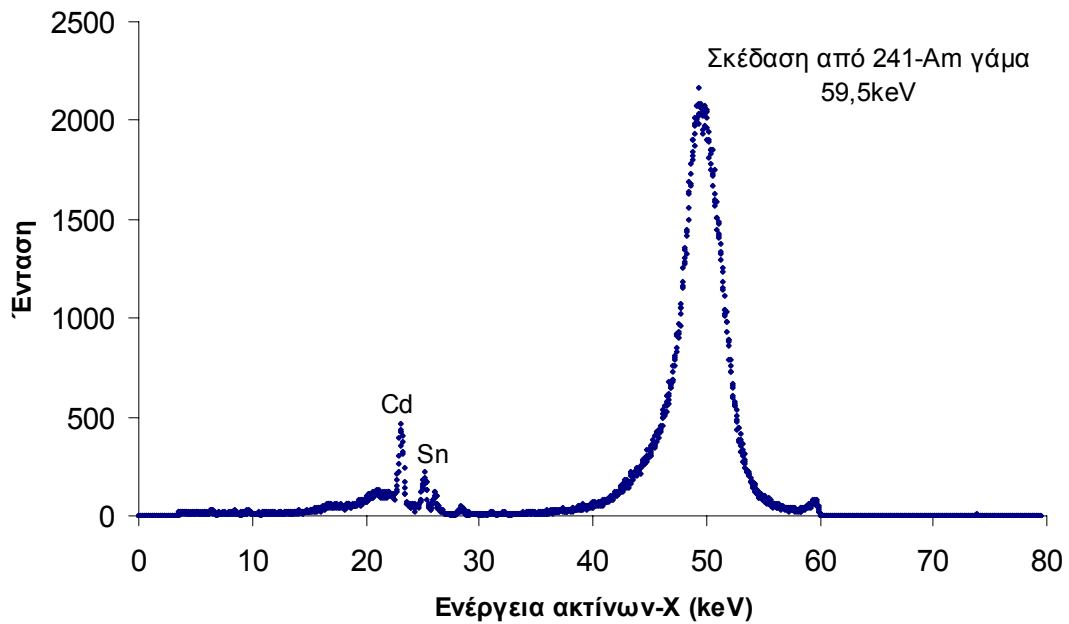


Σχ. 2.13: Φάσμα ενέργειας ακτίνων-X φθορισμού της πηγής Cd-109 για το δείγμα ψαμμίτη RHO-138 (OS6).



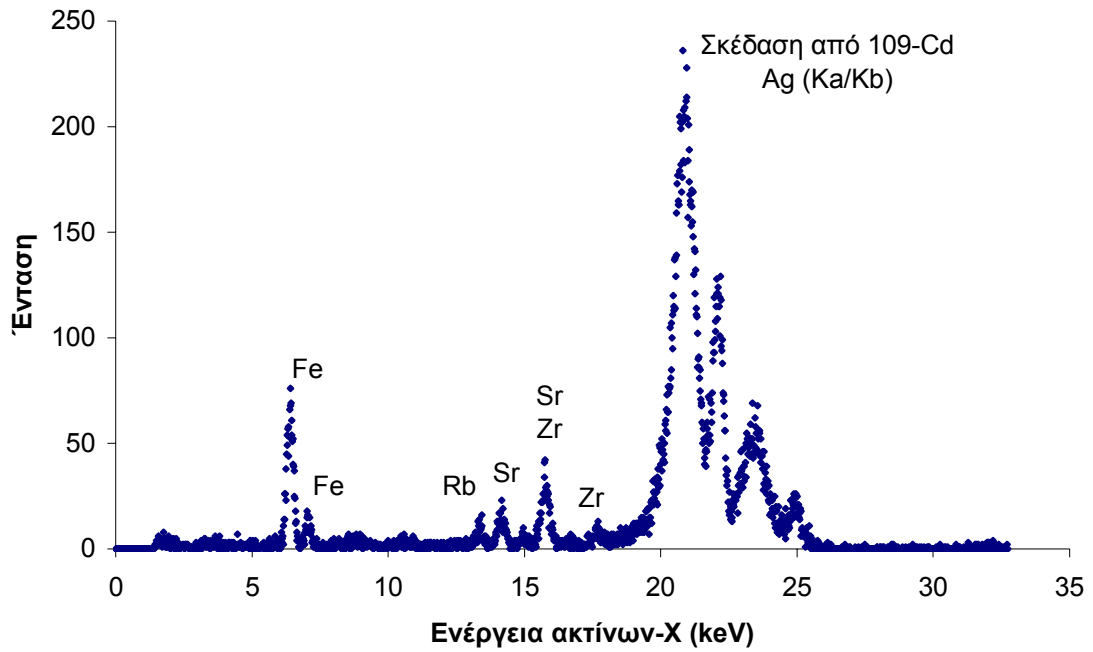


Σχ. 2.14: Φάσμα ενέργειας ακτίνων-X φθορισμού της πηγής Fe-55 για το δείγμα ψαμμίτη RHO-138 (OS6).

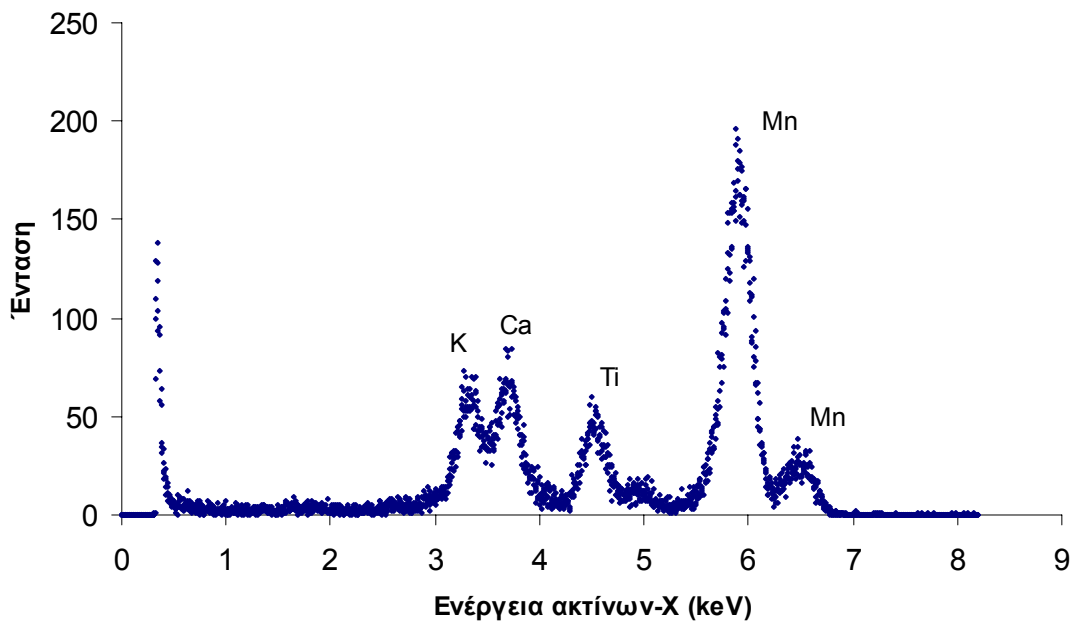


Σχ. 2.15: Φάσμα ενέργειας ακτίνων-X φθορισμού της πηγής Am-241 για το δείγμα ψαμμίτη RHO-138 (OS6).

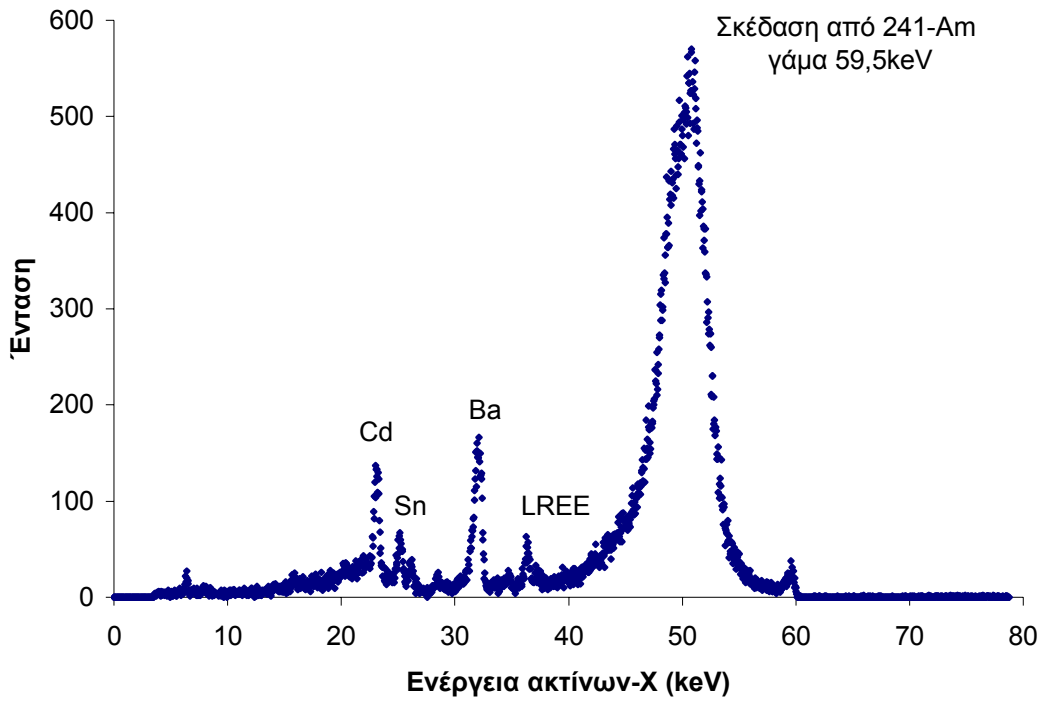
- Δείγμα ίζημα, MFS1 (A5, 1,45m), Φτελιά, Μύκονος



Σχ. 2.16: Φάσμα ενέργειας ακτίνων-X φθορισμού της πηγής Cd-109 για το δείγμα MFS1, ίζημα.

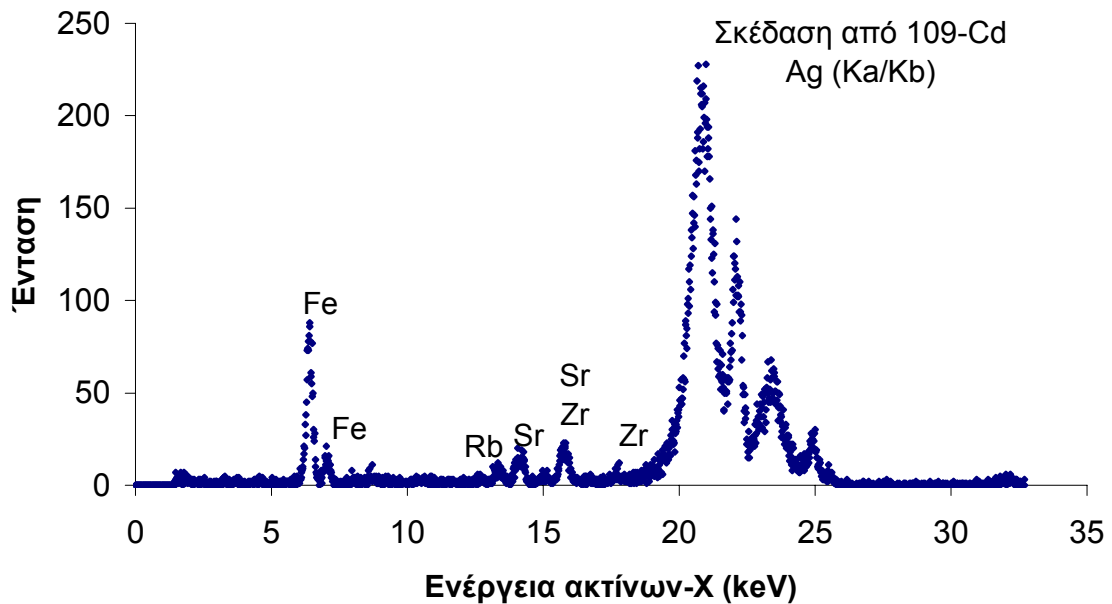


Σχ. 2.17: Φάσμα ενέργειας ακτίνων-X φθορισμού της πηγής Fe-55 για το δείγμα MFS1, ίζημα.

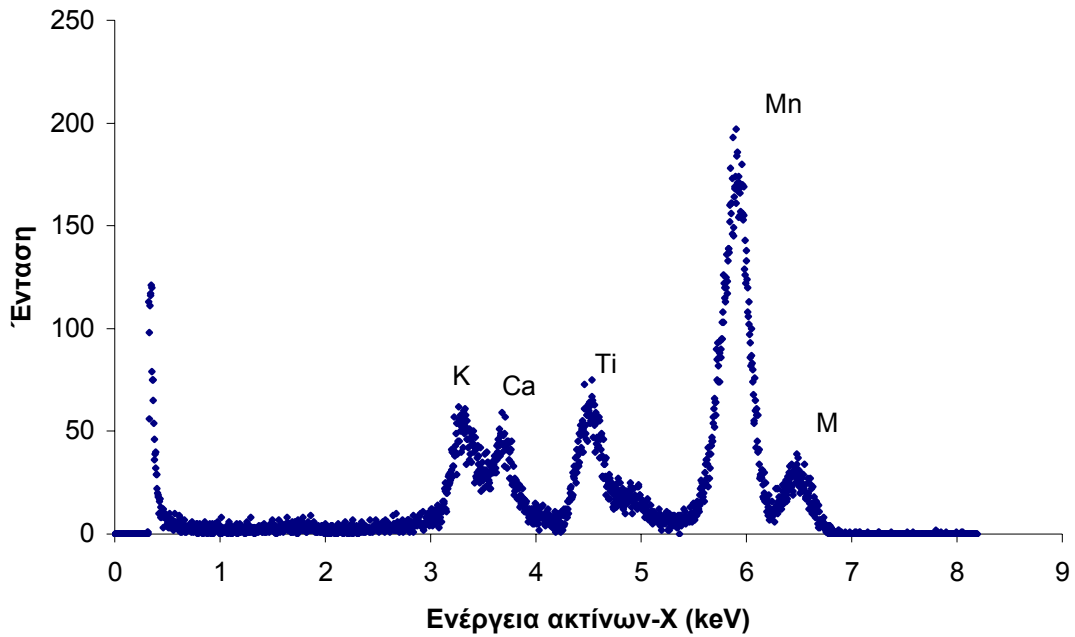


Σχ. 2.18: Φάσμα ενέργειας ακτίνων-X φθορισμού της πηγής Am-241 για το δείγμα MFS1, ίζημα.

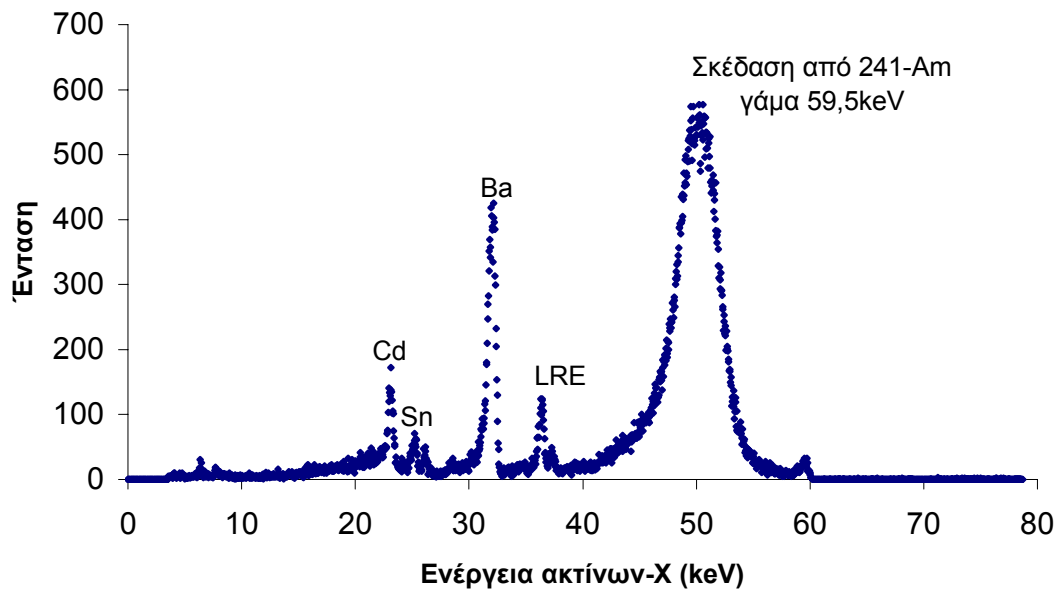
- Δείγμα κεραμικό, MFC1, A6/2/9,10, Φτελιά, Μύκονος.



Σχ. 2.19: Φάσμα ενέργειας ακτίνων-X φθορισμού της πηγής Cd-109 για το δείγμα MFC1, κεραμικό.



Σχ. 2.20: Φάσμα ενέργειας ακτίνων-X φθορισμού της πηγής Fe-55 για το δείγμα MFC1, κεραμικό.

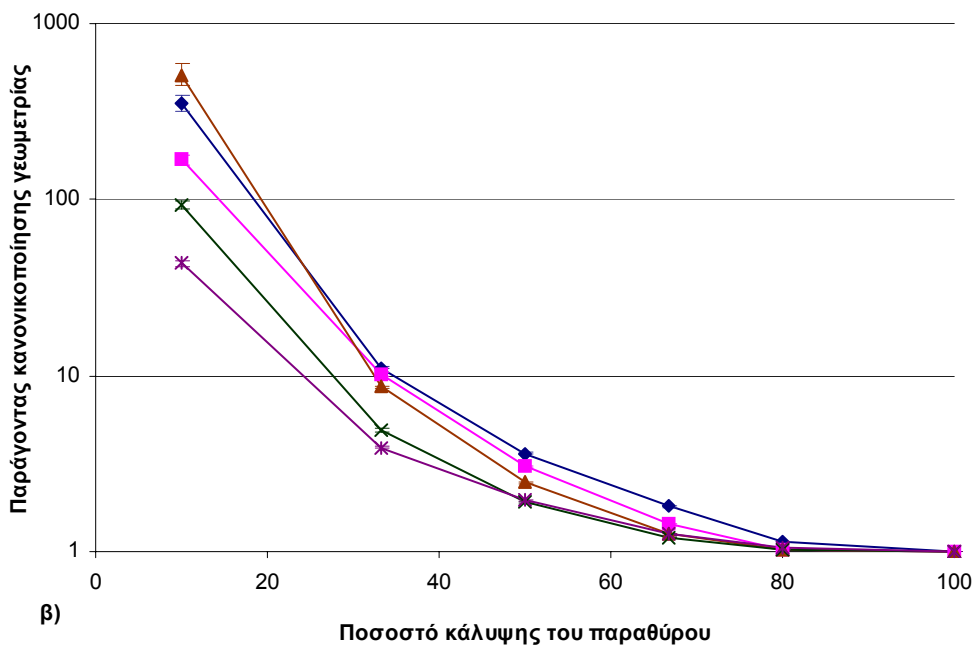
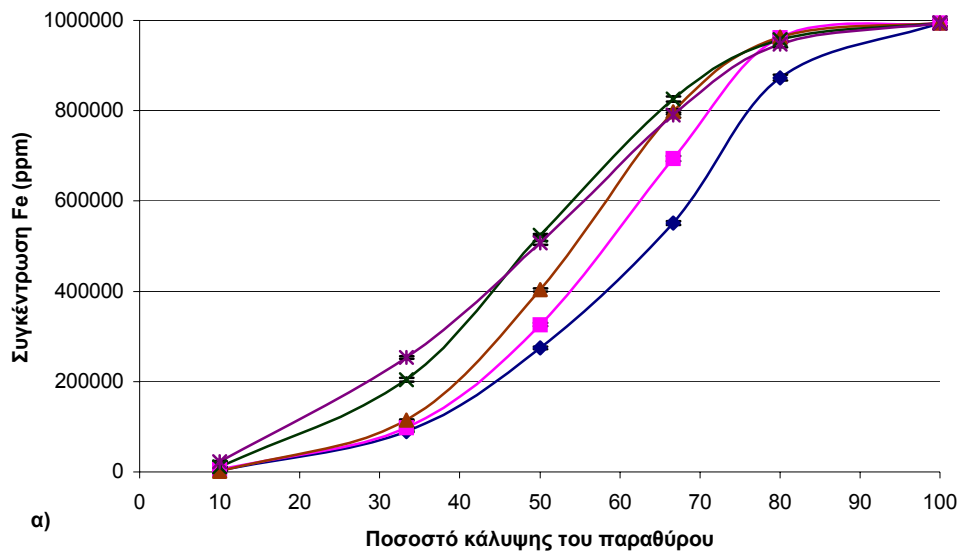


Σχ. 2.21: Φάσμα ενέργειας ακτίνων-X φθορισμού της πηγής Am-241 για το δείγμα MFC1, κεραμικό.

### 2.1.1 Γεωμετρία

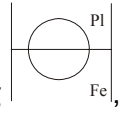
Στο πείραμα αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα δείγμα σιδήρου, καθαρό δείγμα αναφοράς για τον έλεγχο της λειτουργίας του συστήματος, που το συνόδευε όταν στάλθηκε από την εταιρία, σε διάφορα ποσοστά κάλυψης του παραθύρου του οργάνου, 100%, 80%, 65%, 50%, 33%, 10%. Το υπόλοιπο του παραθύρου καλυπτόταν από πλεξιγκλάς. Έγιναν μια σειρά μετρήσεις με

το δείγμα να βρίσκεται πάνω ή κάτω από το πλεξιγκλάς, όπως κοιτάμε το παράθυρο από επάνω, αριστερά και δεξιά του, αλλά και σε τυχαίες θέσεις με κλίση. Τα αποτελέσματα και η τοποθέτηση δείγματος και πλεξιγκλάς παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.

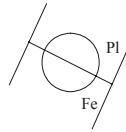


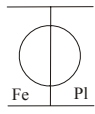
Σχ. 2.22: α) Η συγκέντρωση του Fe σε καθαρό δείγμα αναφοράς σε συνάρτηση του ποσοστού κάλυψης του παραθύρου του οργάνου από το δείγμα. β) Παράγοντες κανονικοποίησης γεωμετρίας σε συνάρτηση του ποσοστού κάλυψης του παραθύρου του οργάνου από το δείγμα. Η κλίμακα στην περίπτωση αυτή είναι λογαριθμική.

Και στις δύο περιπτώσεις η μπλε γραμμή αναφέρεται σε γεωμετρία της μορφής

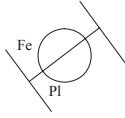


η ροζ αναφέρεται σε γεωμετρία της μορφής



, η μπροντό σε διάταξη , η πράσινη

στη μορφή



και η μοβ στη



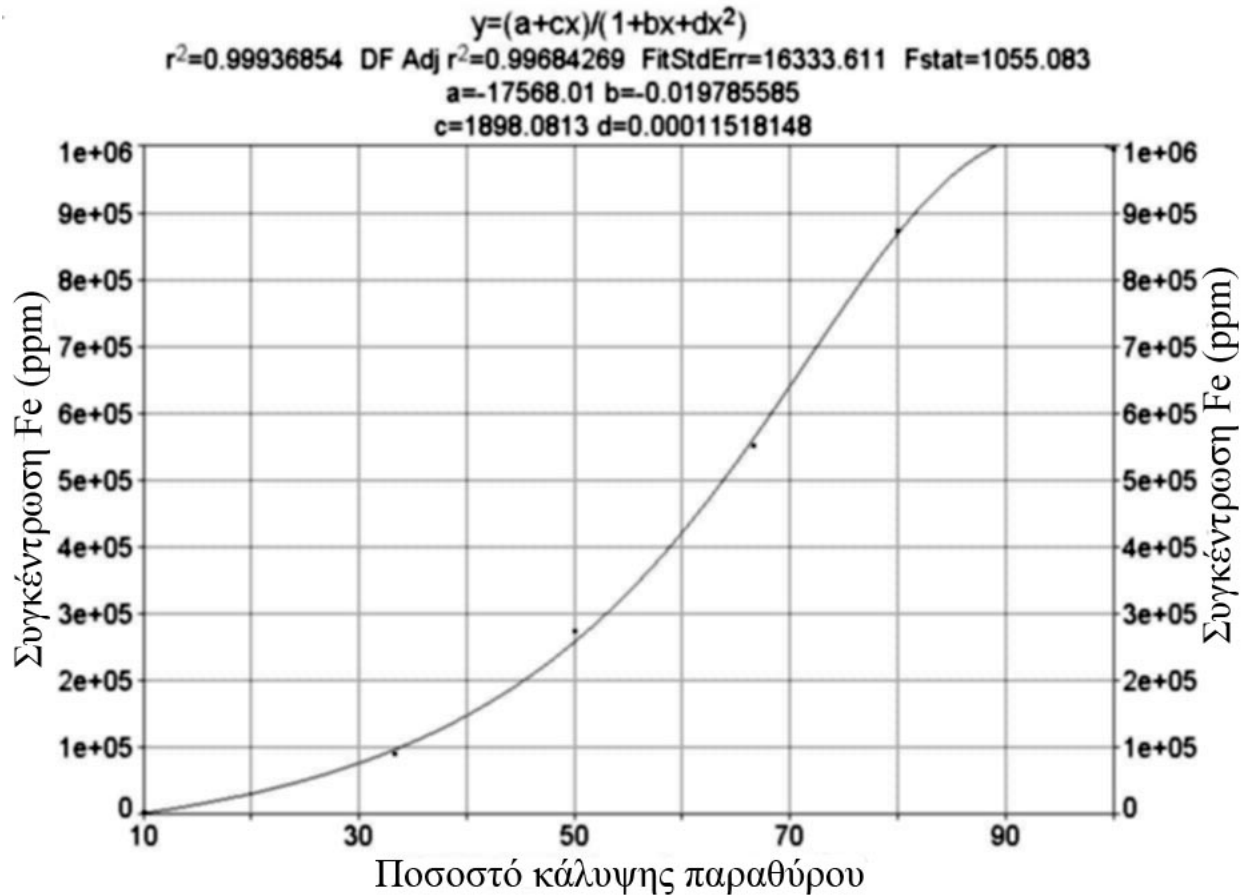
Παρατηρείται αύξηση της τιμής της συγκέντρωσης του σιδήρου όσο στρίβει το δείγμα, με μέγιστη στην τελευταία με το σίδηρο επάνω και το πλεξιγκλάς κάτω. Στη διάταξη αυτή οι ακτίνες από την πηγή του σιδήρου του οργάνου «βλέπουν» το δείγμα. Στις άλλες διατάξεις είναι μπροστά από το δείγμα.

Έγινε επίσης προσπάθεια προσομοίωσης της καμπύλης του ποσοστού κάλυψης του παραθύρου του οργάνου συναρτήσεως της συγκέντρωσης του σιδήρου στο δείγμα. Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Table Curve 2D ver. 5.0 (σχ. 2.23). Η εξίσωση είναι της μορφής:

$$y = \frac{a + cx}{1 + bx + dx^2}$$

(2.5)

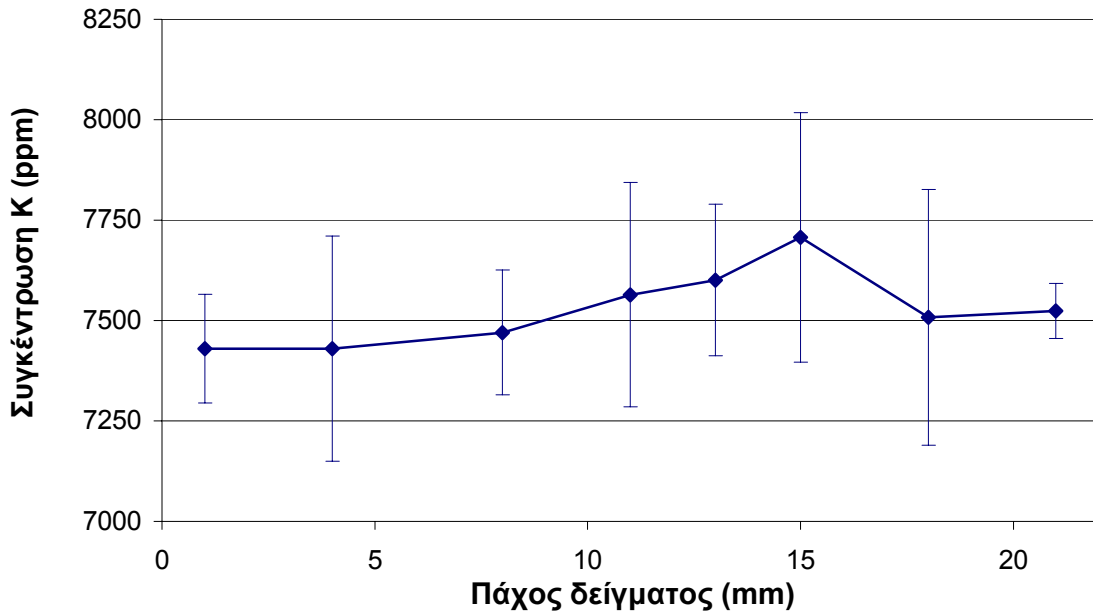
όπου  $x$  το ποσοστό κάλυψης του παραθύρου και  $y$  η συγκέντρωση του σιδήρου.



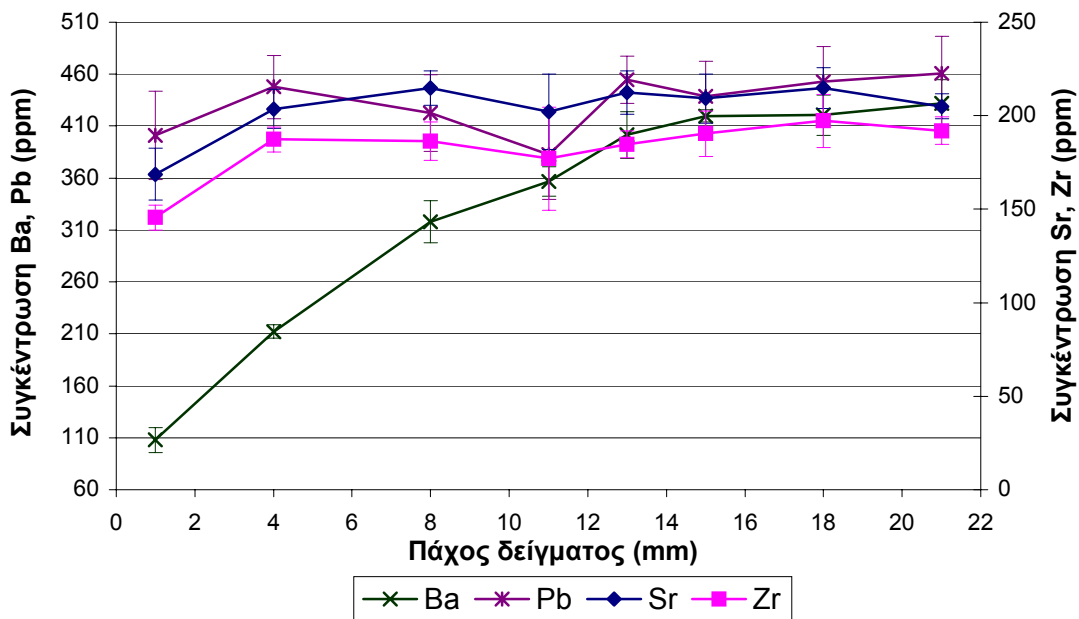
Σχ. 2.23: Καμπύλη προσομοίωσης του ποσοστού κάλυψης του παραθύρου του οργάνου συναρτήσει της συγκέντρωσης του σιδήρου στο δείγμα. Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Table Curve 2D ver. 5.0.

### 2.1.2 Πάχος δείγματος

Σε μια επόμενη μελέτη, έγιναν μετρήσεις του δείγματος BL4 (Potts et al., 1996) (μετάλλευμα ουρανίου-θωρίου της εταιρίας CCRMP) για διάφορα πάχη υλικού στο δειγματολήπτη, από ένα μέχρι και εικοσιένα χιλιοστά. Η εφαρμογή με την οποία έγιναν οι μετρήσεις ήταν η «Χώματος, Λεπτόκοκκων Σωματιδίων» και ο χρόνος καταμέτρησης τα 100s ανά πηγή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχ. 2.24 και 2.25. Μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι όσο αυξάνει το πάχος του δείγματος ανιχνεύονται με μεγαλύτερη ακρίβεια όλο και βαρύτερα στοιχεία. Για παράδειγμα, ενώ για το κάλιο αρκούν μερικά χιλιοστά υλικού, για το βάριο χρειάζονται τουλάχιστον δεκατρία χιλιοστά σκόνης για να ανιχνευτούν με ακρίβεια. Το σχήμα των καμπύλων των δύο αυτών στοιχείων στα διαγράμματα δείχνει ότι όσο αυξάνουμε το πάχος του δείγματος τόσο αυξάνει και η τιμή συγκέντρωσης που υπολογίζουμε, φτάνοντας σε ένα πλατό, το οποίο δείχνει την πραγματική συγκέντρωση του στοιχείου στο δείγμα, π.χ. του βαρίου 410ppm.



Σχ. 2.24: Μεταβολή της συγκέντρωσης του καλίου (Κ) με το πάχος του δείγματος BL4. Οι μετρούμενες τιμές είναι σταθερές μέσα στο σφάλμα μέτρησης, γεγονός που δηλώνει ότι μερικά χιλιοστά αρκούν για τον ακριβή προσδιορισμό του στοιχείου αυτού.



Σχ. 2.25: Μεταβολή της συγκέντρωσης των στοιχείων βαρίου (Ba), μολύβδου (Pb), στροντίου (Sr) και ζirkονίου (Zr) με το πάχος του δείγματος (στον αριστερό κάθετο άξονα είναι η συγκέντρωση του βαρίου και του μολύβδου και στον δεξί του ζirkονίου και του στροντίου). Για το βάριο απαιτείται πάχος το λιγότερο 13mm για να ανιχνευτεί με ακρίβεια η συγκέντρωσή του (410ppm), ενώ για τα άλλα τρία 5mm αρκούν.

Τα αποτελέσματα αυτά έδωσαν αφορμή για την πραγματοποίηση της επόμενης μελέτης.



### 2.1.3 Πείραμα κρίσιμου βάθους ανίχνευσης ιχνοστοιχείων

Για το πείραμα του κρίσιμου βάθους για 8 στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από το άρθρο των Potts et al. (1997). Στο άρθρο αυτό (Potts et al. 1997) μεταξύ των άλλων υπολογίστηκε το κρίσιμο βάθος ( $x$  σε  $\mu\text{m}$ ) ανίχνευσης των δευτερογενών ακτίνων  $X$  για την ανίχνευση του 99% της συγκέντρωσης 8 στοιχείων που υπάρχουν σε δείγματα αναφοράς αδενσίτη, βασάλτη και ρουλίτη. Οι μετρήσεις για την πραγματοποίηση του άρθρου έγιναν με συσκευή TN Spectrace 9000 φορητό αναλυτή ακτίνων  $X$  φθορισμού. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι ο βασάλτης BCR-1, ο αδενσίτης AGV-1 και ο ρουλίτης RGM-1 και τα στοιχεία K, Ca, Ti, Fe, Rb, Zr, Ba, και Ce. Για τα υπόλοιπα στοιχεία που ανιχνεύει το όργανο αυτό δεν έγινε μελέτη κρίσιμου βάθους.

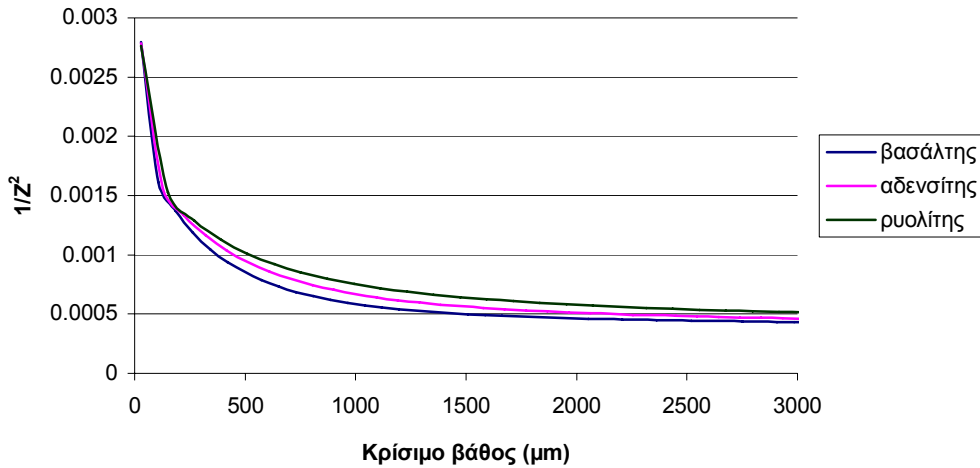
Η σκέψη ήταν να βρεθεί μια σχέση ανάμεσα στο βάθος ( $x$ ) στο οποίο διεισδύουν οι ακτίνες στα δείγματα για την ανίχνευση των 25 στοιχείων που ανιχνεύει η συσκευή TN Spectrace 9000 και στον ατομικό αριθμό ( $Z$ ) των στοιχείων αυτών. Έγιναν διαγράμματα του βάθους με το  $1/Z$  των οκτώ στοιχείων που χρησιμοποίησε ο Potts (K, Ca, Ti, Fe, Rb, Zr, Ba, και Ce) και του βάθους με το  $1/Z^2$  πάλι των ίδιων στοιχείων. Διαλέξαμε αυτού του τύπου τα διαγράμματα γιατί οι μορφές των καμπύλων που προέκυπταν ήταν πιο ευδιάκριτες από αυτές που προκύπτουν από τα διαγράμματα κρίσιμου βάθους και  $Z$  των στοιχείων. Με το πρόγραμμα Table Curve 2.0D κάναμε προσομοίωση διάφορων καμπύλων. Μετά τη συλλογή έγινε σύγκριση των καμπύλων αυτών. Σε πρώτη φάση διαλέξαμε τις πέντε πρώτες με το  $r^2$  να είναι πιο κοντά στη μονάδα και η μορφή τους να είναι ομαλή (να μην παρουσιάζουν δηλαδή πολλά σημεία καμπής). Στη συνέχεια μετά την πρώτη διαλογή, από τις εξισώσεις που προέκυψαν υπολογίσαμε το κρίσιμο βάθος για κάθε στοιχείο θέτοντας στην εξίσωση το  $1/Z^2$  (το  $y$  δηλαδή) κάθε στοιχείου και υπολογίζοντας το βάθος, δηλαδή το  $x$ . Οι υπολογισμοί, η επίλυση δηλαδή της εξίσωσης, έγιναν με τη βοήθεια του προγράμματος Mathcad 2000). Τελικά ως καλύτερη εξίσωση θεωρήσαμε αυτή που έδωσε τιμή κρίσιμου βάθους για κάθε στοιχείο πιο κοντά στη θεωρητική τιμή, κοντά σε αυτή δηλαδή που δίνεται στο Potts et. al. (1997).

Τελικά, οι καμπύλες που προσομοιώνουν καλύτερα είναι σε όλες τις περιπτώσεις αυτές του βάθους με το  $1/Z^2$  και για κάθε δείγμα της μορφής

$$y = a + b \ln x + c \ln^2 x + d \ln^3 x + e \ln^4 x + f \ln^5 x + g \ln^6 x$$

(2.6)

όπου  $x$  το κρίσιμο βάθος σε  $\mu\text{m}$  και  $y$  το  $\frac{1}{Z^2}$ .



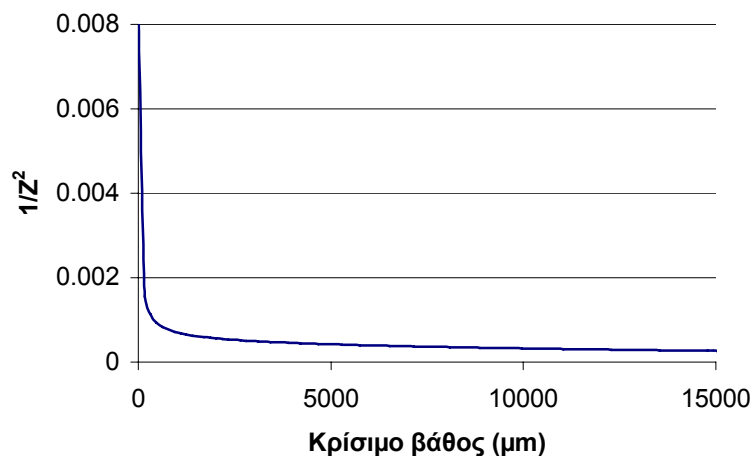
Σχ. 2.26: Εξάρτηση του ατομικού αριθμού των χημικών στοιχείων συναρτήσει του κρίσιμου βάθους ανίχνευσης των δευτερογενών ακτινών X των στοιχείων σε τρία υλικά, βασάλτη, ανδεσίτη και ρυολίτη. Η καμπύλη που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση είναι η  $y=a+b\ln x+c\ln^2 x+d\ln^3 x+e\ln^4 x+f\ln^5 x+g\ln^6 x$ . Με τον τρόπο αυτό δημιουργούμε οικογένεια καμπύλων για τον προσδιορισμό του κρίσιμου βάθους ανίχνευσης ενός στοιχείου σε ένα πέτρωμα.

Με την ίδια λογική εργαστήκαμε για την εύρεση της καμπύλης προσομοίωσης για την περίπτωση δείγματος χώματος. Τα δεδομένα για το κρίσιμο βάθος προέρχονται από το εγχειρίδιο του οργάνου. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα Na, Si, Ca, Fe, Rb, Nb, Rh, La, και Eu. Στην περίπτωση αυτή η εξίσωση που προέκυψε είναι της μορφής:

$$y = \frac{a + cx + ex^2 + gx^3}{1 + bx + dx^2 + fx^3 + hx^4}$$

(2.7)

όπου  $x$  το κρίσιμο βάθος σε  $\mu\text{m}$  και  $y$  το  $\frac{1}{Z^2}$ .



Σχ. 2.27: Εξάρτηση του ατομικού αριθμού των χημικών στοιχείων συναρτήσει του κρίσιμου βάθους ανίχνευσης των δευτερογενών ακτίνων Χ των στοιχείων σε χώμα.

Στη συνέχεια έγινε εφαρμογή των εξισώσεων αυτών για τον υπολογισμό του κρίσιμου βάθους όλων των στοιχείων που ανιχνεύει ο TN Spectrace 9000 φορητός αναλυτής ακτίνων Χ φθορισμού. Η επίλυση των εξισώσεων έγινε με το μαθηματικό πρόγραμμα Mathcad 2000. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα 2.4:

Πίνακας 2.4: Κρίσιμο βάθος των στοιχείων δειγμάτων χώματος και βασάλτη.

Στοιχείο	Z	Χώμα (cm)	Βασάλτης (cm)
<b>K</b>	19	0,003	0,003
<b>Ca</b>	20	0,004	0,003
<b>Ti</b>	22	0,007	0,005
<b>Cr</b>	24	0,012	0,008
<b>Mn</b>	25	0,015	0,011
<b>Fe</b>	26	0,018	0,015
<b>Co</b>	27	0,021	0,019
<b>Ni</b>	28	0,025	0,022
<b>Cu</b>	29	0,029	0,026
<b>Zn</b>	30	0,033	0,034
<b>As</b>	33	0,050	0,044
<b>Se</b>	34	0,058	0,049
<b>Rb</b>	37	0,089	0,066
<b>Sr</b>	38	0,103	0,072
<b>Zr</b>	40	0,140	0,087
<b>Mo</b>	42	0,190	0,107
<b>Ag</b>	47	0,401	0,227
<b>Cd</b>	48	0,457	0,291
<b>Sn</b>	50	0,582	0,421
<b>Sb</b>	51	0,650	0,476
<b>Ba</b>	56	1,030	0,692
<b>Hg</b>	80	3,525	1,475
<b>Pb</b>	83	3,904	1,800
<b>Th</b>	90	4,843	2,500
<b>U</b>	92	5,126	2,800

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του πίνακα με τα αποτελέσματα του πειράματος του πάχους στην προηγούμενη παράγραφο, και συγκεκριμένα για το βάριο, βλέπουμε ότι στην περίπτωση του χώματος απαιτείται υλικό 1cm και στο βασάλτη 7mm, ενώ προηγουμένως είδαμε ότι η ελάχιστη απαραίτητη ποσότητα ήταν 13mm. Το συμπέρασμα είναι ότι κάθε υλικό έχει τα δικά του χαρακτηριστικά και θα πρέπει να γίνει λεπτομερής μελέτη στα υλικά που χρησιμοποιούνται περισσότερο για να έχουμε ασφαλέστερα αποτελέσματα στις μετρήσεις και τους υπολογισμούς μας.

#### 2.1.4 Χρόνος καταμέτρησης

Στο πείραμα αυτό μετρήθηκε το ίδιο δείγμα (δείγμα ΟΥ3, μικρογρανίτης<sup>13</sup>) για χρόνους μέτρησης κάθε πηγής, 50s, 100s, 200s, 400s και 800s. Για καλύτερη στατιστική έγιναν πέντε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις για κάθε περίπτωση. Στο τέλος χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος των πέντε αυτών μετρήσεων. Η εφαρμογή που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση ήταν η «Χώματος, Λεπτόκοκκων Σωματιδίων». Μεταβολή στην ακρίβεια της τιμής της συγκέντρωσης των στοιχείων δεν παρατηρήθηκε, παρά μόνο μείωση του σφάλματος της μέτρησης όσο αυξανόταν ο χρόνος καταμέτρησης. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τα πιο σημαντικά στοιχεία. Δίνεται και οι συγκεντρώσεις των στοιχείων αυτών όπως δόθηκαν από τα εργαστήρια πιστοποίησης του δείγματος. Οι συγκεντρώσεις των στοιχείων είναι σε ppm. Τελικά, ένας τυπικός χρόνος καταμέτρησης είναι 100s ανά πηγή. Σε περιπτώσεις όμως που ο αριθμός των δειγμάτων που θα πρέπει να μετρηθούν δεν είναι μεγάλος θα μπορούσε να γίνει και 200s ανά πηγή.

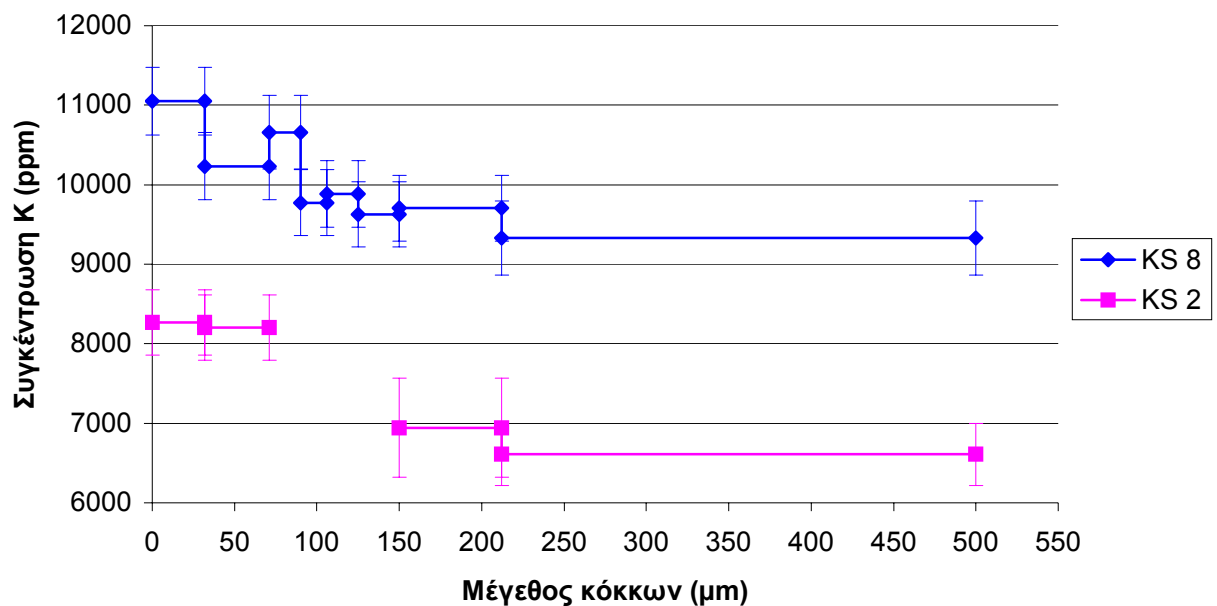
Πίνακας 2.5: Κάποια από τα αποτελέσματα του πειράματος μεταβολής του χρόνου μέτρησης στο δείγμα αναφοράς ΟΥ3. Οι συγκεντρώσεις των στοιχείων είναι σε ppm.

Στοιχείο Χρόνος καταμέτρησης ανά πηγή (s)	K	K(dev)	Ca	Ca(dev)	Ti	Ti(dev)	Mn	Mn(dev)	Fe	Fe(dev)	Zr	Zr(dev)	Rb	Rb(dev)
<b>ΟΥ3(ref.val)</b>	37755	780	1429	271	1344	78	699	47	26839	106	943	8	172	1
<b>50</b>	36583	856	3137	257	847	155	660	337	25233	853	1076	23	129	20
<b>100</b>	36143	602	2843	177	783	110	777	243	25897	610	1089	16	123	14
<b>200</b>	36298	426	2820	125	815	78	666	168	25224	426	1079	11	115	10
<b>400</b>	36077	301	2747	88	808	55	760	122	25427	303	1081	8	127	7
<b>800</b>	36253	213	2831	63	812	39	764	86	25278	214	1074	6	122	5

<sup>13</sup> GeoPT6. An international proficiency test for analytical geochemistry laboratories - report on round 4 (October 2000)

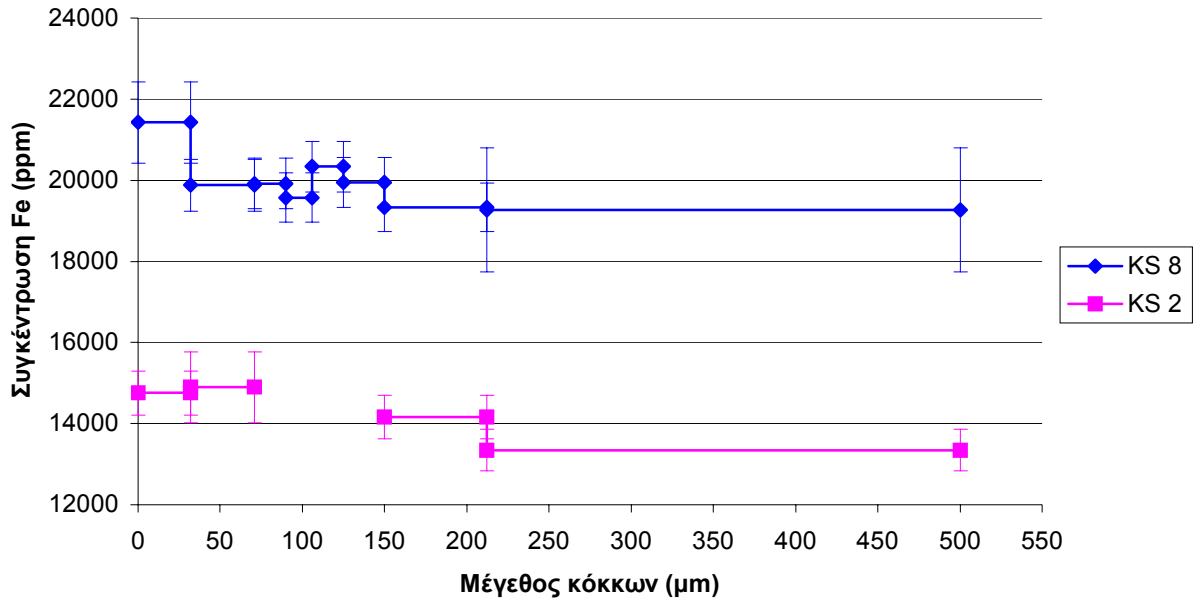
### 2.1.5 Διάμετρος κόκκων του δείγματος

Στη συνέχεια μελετήθηκε η μεταβολή της συγκέντρωσης καλίου (σχ. 2.28), ασβεστίου (σχ. 2.29), σιδήρου (σχ. 2.30) και τιτανίου (σχ. 2.31) με την αύξηση της διαμέτρου των κόκκων της σκόνης που μετριόνταν κάθε φορά σε κεραμικά δείγματα από την Κύπρο, KS2 και KS8<sup>14</sup>. Επιλέχθηκαν τα στοιχεία αυτά γιατί η συγκέντρωσή τους είναι ψηλότερη από όλα τα άλλα και οι παρατηρήσεις και τα συμπεράσματά μας θα είναι πιο ασφαλή. Η σκόνη χωρίστηκε στα μεγέθη 0-32 $\mu\text{m}$ , 32-71 $\mu\text{m}$ , 71-90 $\mu\text{m}$ , 90-106 $\mu\text{m}$ , 106-125 $\mu\text{m}$ , 125-150 $\mu\text{m}$ , 150-212 $\mu\text{m}$  και 212-500 $\mu\text{m}$ . Σε όποια διαγράμματα φαίνονται ασυνέχειες, σημαίνει ότι δεν υπήρχε υλικό διαθέσιμο στο μέγεθος αυτό. Η εφαρμογή που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις ήταν η «Χώματος, Λεπτόκοκκων Σωματιδίων» και ο χρόνος καταμέτρησης τα 100s ανά πηγή.

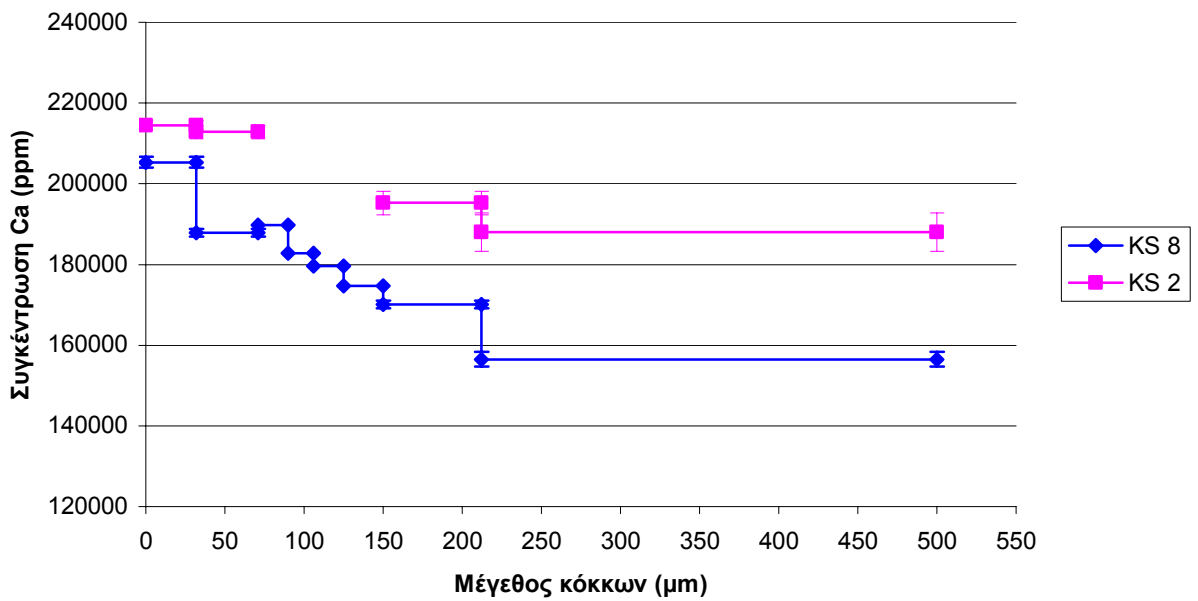


Σχ. 2.28: Η μεταβολή της συγκέντρωσης του καλίου στα κεραμικά δείγματα KS2 και KS8. Παρατηρείται σημαντική μείωσή της όσο αυξάνει το μέγεθος των κόκκων.

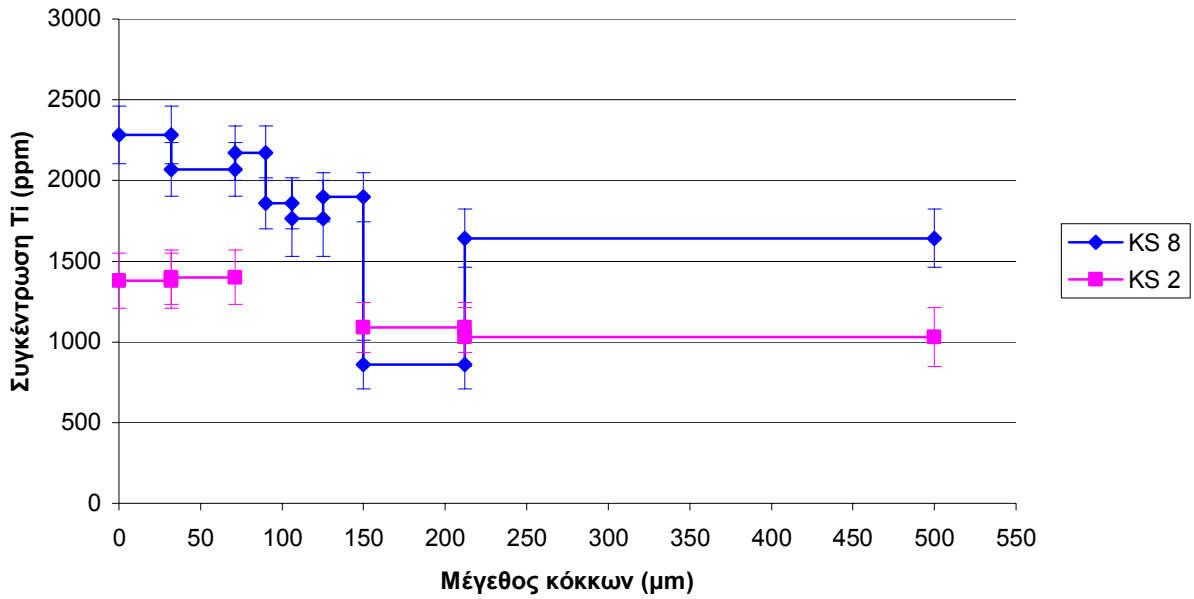
<sup>14</sup> Δείγματα από την περιοχή Σωτήρα, Κύπρου, από Καθ. Μαντζουράνη Ελένη



Σχ. 2.29: Η μεταβολή της συγκέντρωσης του σιδήρου στα κεραμικά δείγματα KS2 και KS8. Παρατηρείται μείωσή της όσο αυξάνει το μέγεθος των κόκκων.



Σχ. 2.30: Η μεταβολή της συγκέντρωσης του ασβεστίου στα κεραμικά δείγματα KS2 και KS8. Παρατηρείται σημαντική μείωσή της όσο αυξάνει το μέγεθος των κόκκων, ιδιαίτερα στο KS8.



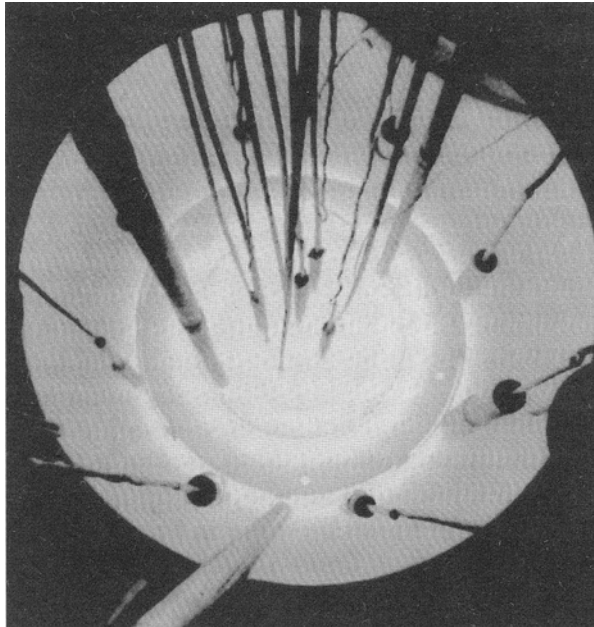
Σχ. 2.31: Η μεταβολή της συγκέντρωσης του τιτανίου στα κεραμικά δείγματα KS2 και KS8. Παρατηρείται μείωσή της όσο αυξάνει το μέγεθος των κόκκων.

Από τα διαγράμματα παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσης των και των τεσσάρων στοιχείων όσο αυξάνει η διάμετρος των κόκκων της μετρήσιμης σκόνης, με ένα πλάτο να εμφανίζεται για μεγέθη μικρότερα από τα 90μm. Σε γενικές γραμμές, όσο λεπταίνει ο κόκκος αυξάνει η ομοιομορφία του δείγματος και κατά την τοποθέτηση της σκόνης στο δειγματολήπτη δε μένουν κενά ανάμεσα στους κόκκους, με αποτέλεσμα οι ακτίνες να χτυπάνε το υλικό και να μην πέφτουν στα κενά ανάμεσα στους κόκκους, όπως συμβαίνει στα χοντρόκοκκα υλικά. Συμπερασματικά, το μέγεθος που χρησιμοποιούμε, σκόνη μικρότερη από 90μm δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα.

## 2.2 Νετρονική Ενεργοποίηση

Ενεργοποίηση είναι η σύλληψη θερμικών νετρονίων (νετρονίων με ενέργεια 0,025eV) από τους πυρήνες ενός στοιχείου. Είναι γνωστή ως αντίδραση (n,γ). Οι νέοι πυρήνες που προκύπτουν είναι συνήθως ραδιενεργοί και συνεπώς παρατηρήσιμοι, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα της ποσοτικής μέτρησης των πυρήνων ενός στοιχείου (συγκέντρωσή του στο υλικό) με τη μέτρηση της επαγόμενης ραδιενέργειας (Παπαστεφάνου, 1999).

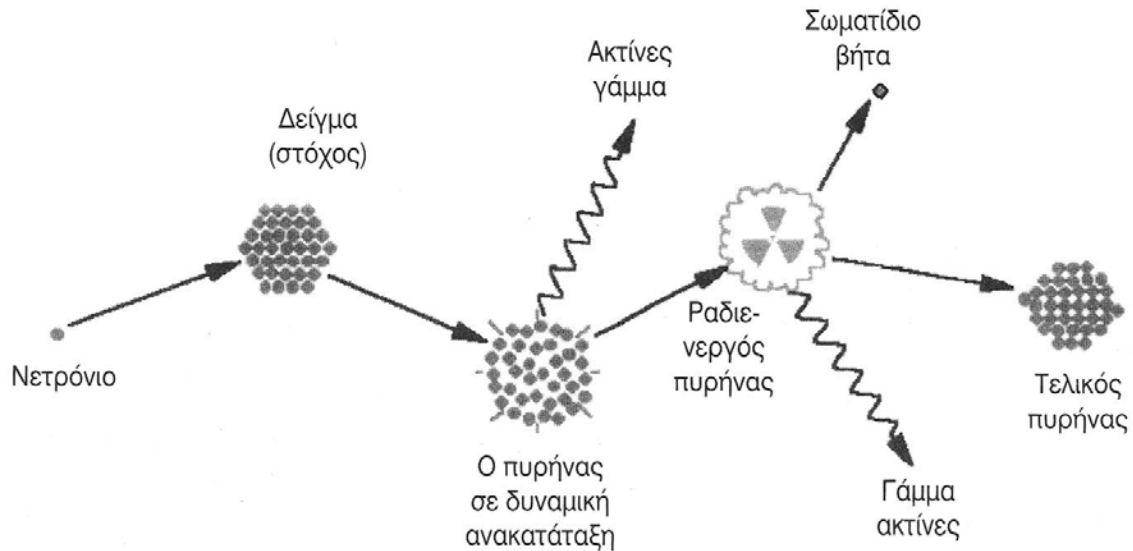
Οι μετρήσεις στην Ελλάδα γίνονται στον πυρηνικό αντιδραστήρα στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» (εικ. 2.3). Στην άκρη των καθετήρων που διακρίνονται στην εικόνα τοποθετούνται τα προς ακτινοβόληση δείγματα. Το νερό της δεξαμενής είναι το μέσο επιβράδυνσης των ενεργητικών νετρονίων.



Εικ. 2.3: Άποψη του πυρηνικού αντιδραστήρα στο ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος (Λυριτζής, 2005).

Απαιτούνται μόλις 50-100 χιλιοστά του γραμμαρίου υλικού για ανάλυση. Ο χρόνος ανάλυσης εξαρτάται από το χρόνο ημιζωής του προς ανάλυση ισότοπου. Στα βραχύζωα ισότοπα τα δεδομένα των μετρήσεων συλλέγονται αμέσως μετά το βομβαρδισμό, ενώ για τα μακρόζωα ισότοπα μετά από αρκετές εβδομάδες (Λυριτζής, 2005). Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλά αρχαιολογικά υλικά, κεραμικά, πηλούς ιζήματα, γυαλιά, οφιανούς, λίθινα οικοδομικά υλικά.

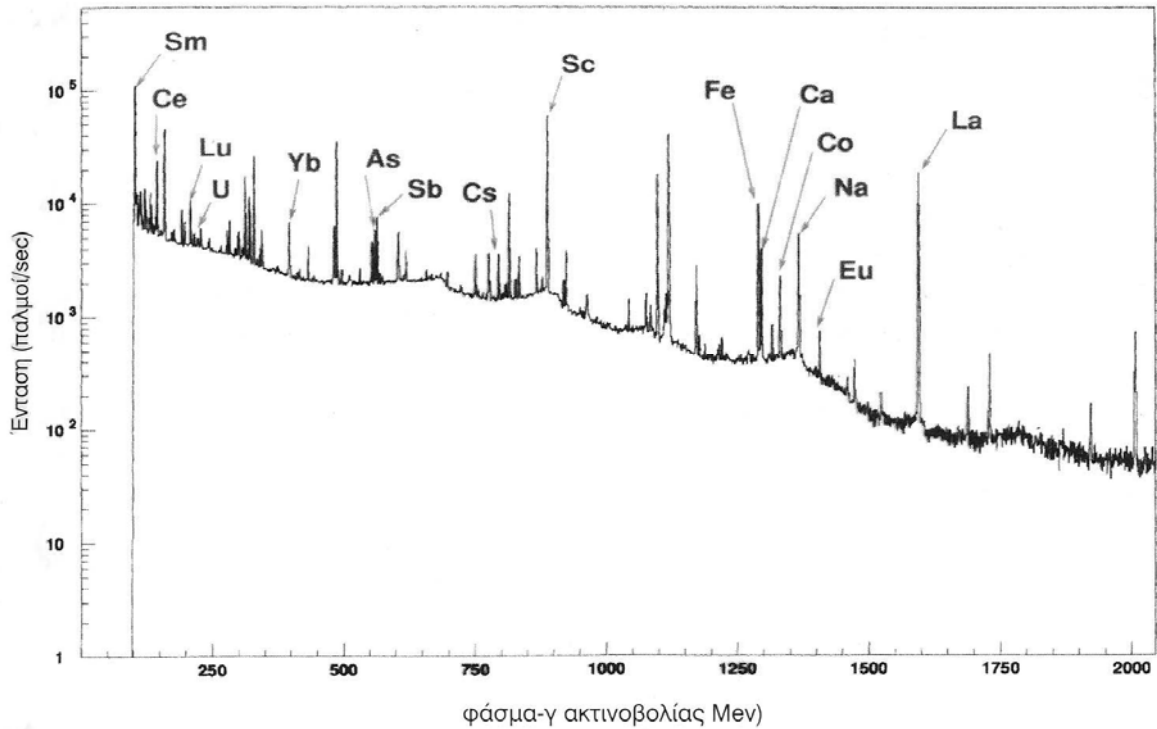




Σχ. 2.32: Σχηματική παρουσίαση της πυρηνικής αντίδρασης που λαμβάνει χώρα μέσα στον αντιδραστήρα (Λυριτζής, 2005).

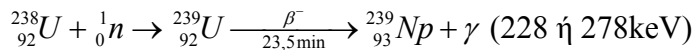
Στο σχ. 2.32 φαίνεται μια σχηματική αναπαράσταση της πυρηνικής αντίδρασης που λαμβάνει χώρα από τη στιγμή του βομβαρδισμού μέχρι το σχηματισμό του τελικού πυρήνα. Αρχικά το δείγμα βομβαρδίζεται με νετρόνια. Οι πυρήνες των ατόμων των στοιχείων του δείγματος αλληλεπιδρούν με τα νετρόνια, μετατρέπονται σε ασταθή ραδιενεργά ισότοπα. Ακολουθεί η διάσπαση των ισότοπων με ταυτόχρονη εκπομπή γάμμα ακτινοβολίας και η μετατροπή τους σε σταθερά ισότοπα με χαρακτηριστικό χρόνο ημιζωής (Nargolwalla and Przybylowicz, 1970).

Οι ακτίνες γάμα έχουν ενέργειες από 0,1 μέχρι 2MeV, ενέργειες που είναι χαρακτηριστικές του στοιχείου που αρχικά διεγέρθηκε. Ο καθορισμός των ενεργειών των ακτίνων αυτών προσφέρουν τη βάση για την αναγνώριση των στοιχείων και η έντασή τους δίνει τη συγκέντρωση του στοιχείου στο δείγμα. Το σχ. 2.33 δείχνει χαρακτηριστικό φάσμα ακτίνων γάμα. Οι κορυφές αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα στοιχεία.

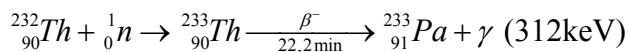


Σχ. 2.33: Χαρακτηριστικό φάσμα ακτίνων γάμα με τις κορυφές να αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα ιχνοστοιχεία (Λυριτζής, 2005).

Ως παράδειγμα αναφέρουμε την ενεργοποίηση των ισοτόπων U-238 και Th-232.



(2.9)



(2.10)

Με ανιχνευτή ακτινοβολίας γάμα, είτε Ge είτε NaI(Tl), μπορούμε να μετρήσουμε την ενεργότητα που αντιστοιχεί στο μέσο ρυθμό απαρίθμησης ή τον ολικό αριθμό κρούσεων που οφείλονται στις γάμα (Παπαστεφάνου, 1999).

### 2.3 Μετρητής άλφα σωματιδίων.

Η μέθοδος αυτή υιοθετήθηκε για τη χρονολόγηση με θερμοφωταύγεια σχετικά πρόσφατα και αναπτύχθηκε για την ανίχνευση χαμηλών ποσών άλφα ραδιενέργειας σε βιολογικούς ιστούς (Turner et al., 1958). Από τότε διατηρεί κεντρική θέση στα εργαστήρια παρά τις δυσκολίες στην

εφαρμογή της μεθόδου που παρουσιάστηκαν, με πιο χαρακτηριστικό τη διαφυγή του ραδιενεργού αερίου ραδονίου από το δείγμα.

Τρία θέματα θα πρέπει να μελετηθούν σχετικά με το ραδόνιο. Το πρώτο είναι η επίδρασή του στην ετήσια δόση. 100% διαφυγή του ραδονίου οδηγεί σε 25% μείωση της ετήσιας δόσης για την τεχνική των λεπτών κόκκων. Η πρώτη προσέγγιση του θέματος ήταν να γίνουν εργαστηριακές μετρήσεις της ποσότητας του διαφυγόντος ραδονίου, τόσο στο κεραμικό όσο και στο χώμα του περιβάλλοντος του κεραμικού. Πέρα από τις δυσκολίες που παρουσιάζει το εγχείρημα αυτό ως πείραμα, συμπεριλαμβανομένου και τη μεταβλητότητα της διαφυγής του ραδονίου με τις περιβαλλοντικές συνθήκες, η προσέγγιση αυτή έχει το μειονέκτημα ότι δεν καταπιάνεται με την πιθανότητα υπόγεια νερά να παρέσυραν το ραδόνιο. Μια καλύτερη προσέγγιση θα ήταν να μετρηθεί η κατακράτηση του ραδονίου σε κάποιον από τους θυγατρικούς πυρήνες, είτε στο μόλυβδο-210 με φασματομετρία γάμα, είτε στο πολώνιο-210 με άλφα φασματομετρία. Η ίδια προσέγγιση μπορεί να γίνει και για την κατακράτηση του ραδονίου στο χώμα. Όσον αφορά σε ποιες περιοχές είναι πιθανό να συναντήσει κανείς κεραμική με ισχυρή απώλεια ραδονίου, τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα έρχονται από περιοχές με πυριγενή γεωλογία.

Το δεύτερο αφορά τη διαταραχή στη μέτρηση της ραδιενέργειας και ειδικά στην άλφα ραδιενέργεια. Το πρόβλημα προκύπτει από το ίδιο το δείγμα από το οποίο έχουμε διαφυγή ραδονίου. Όταν αυτό είναι κλειστό στο δειγματολήπτη ο ρυθμός των παλμών μέτρησης αυξάνεται, γεγονός που δείχνει ότι έχουμε αποκατάσταση των αλυσίδων θορίου και ουρανίου. Η αποκατάσταση για τη σειρά του θορίου γίνεται στο χρόνο ημιζωής των 10 ωρών του μολύβδου-212 και για τη σειρά του ουρανίου στο χρόνο ημιζωής των 3,8 ημερών του ίδιου του ραδονίου (Aitken, 1985). Η ισορροπία, δηλαδή, επανέρχεται αν μείνει το δείγμα κλειστό για 4 μέρες περίπου πριν μετρηθεί. Το δύσκολο βέβαια είναι να συγκρατηθεί το ραδόνιο στο δειγματολήπτη, το οποίο και διαφεύγει εύκολα μέσα από ένα πλαστικό, για το λόγο αυτό δεν υπάρχει λόγος να μείνει το δείγμα πάνω από πέντε ή έξι μέρες κλειστό για να μετρηθεί.

Εκείνο για το οποίο γίνεται συχνά λόγος σε παλιότερες εργασίες είναι η περίπτωση της υπερκαταμέτρησης (overcounting). Δεν είναι σπάνιο, ακόμα και σε ανοιχτά δείγματα ο παρατηρούμενος ρυθμός παλμών να δίνει υψηλότερες τιμές ουρανίου και θορίου σε σύγκριση με τα αποτελέσματα μετρήσεων άλλων μεθόδων (Murray, 1982). Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται στην ανομοιογένεια του δείγματος με λεπτούς και μεγάλους κόκκους του προς μέτρηση υλικού. Λεπτοί κόκκοι, που πιθανόν να έχουν υψηλότερη ραδιενέργεια από τους μεγάλους, βρίσκονται σε απ' ευθείας επαφή με την οθόνη λόγω μεγέθους και ανάμεσα στα κενά των μεγάλων, με αποτέλεσμα να ελευθερώνουν περισσότερα άλφα (Aitken, 1985). Ένας ακόμη λόγος θα μπορούσε να είναι η δυνατότητα που έχει το ραδόνιο ως αέριο να διεισδύει στα κενά ανάμεσα στους κόκκους και στις σχισμές των κόκκων, να εγκλωβίζεται και να αυξάνεται,

καθιστώντας έτσι περισσότερα σωματάρια άλφα ικανά να φτάσουν στην οθόνη (Pernicka and Wagner, 1982).

Υπάρχει όμως και η περίπτωση της υποκαταμέτρησης (undercounting). Για κόκκους μεγέθους 100μm ή και μεγαλύτερων μια σημαντική ποσότητα άλφα σωματιδίων δεν θα καταφέρει να φτάσει στην οθόνη με αποτέλεσμα τα σωματάρια άλφα που καταμετρούνται να είναι λιγότερα από αυτά που φεύγουν πραγματικά από το δείγμα.

Σημαντική μείωση της υπερκαταμέτρησης πέτυχαν το 1983 οι Jensen και Prescott, χρησιμοποιώντας υλικό εξαιρετικά λεπτό (Jensen and Prescott, 1983), αλλά συνέστησαν λείανση με τετραβορικό λίθιο (lithium tetraborate) σε γυάλινο δισκίο ως έσχατη λύση. Με τον τρόπο αυτό κάθε πρόβλημα που παρουσιάζεται από τα κενά αέρος ή την ανομοιογένεια στο δείγμα εξαλείφεται.

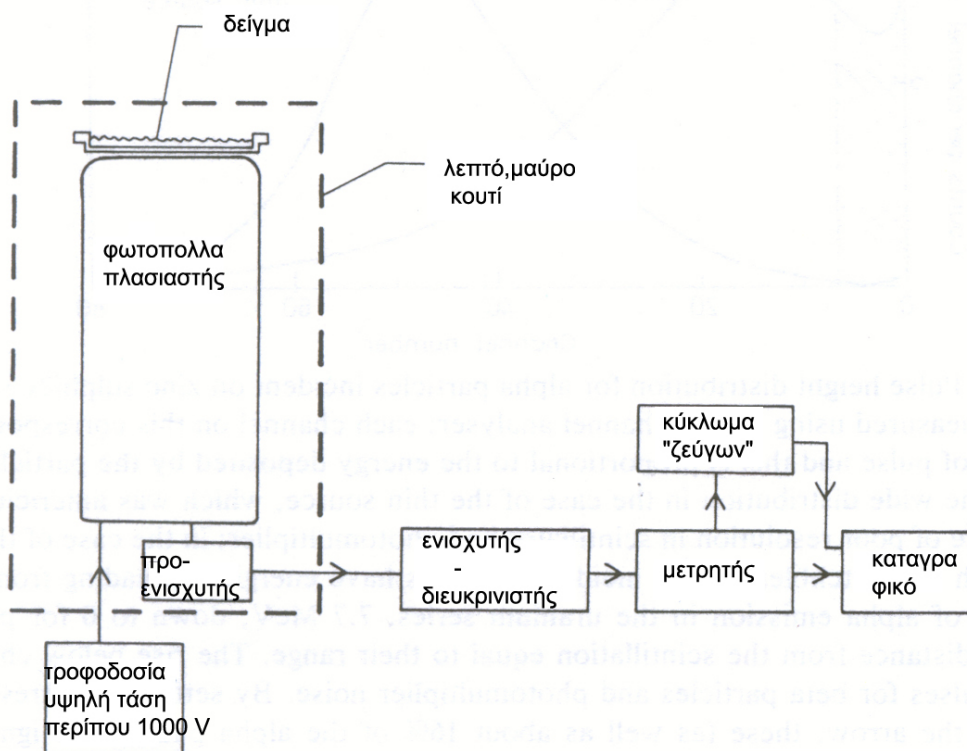
Το τρίτο θέμα έχει να κάνει με τη διαφυγή του ραδονίου ως δείκτη ραδιενεργής ανισορροπίας. Στην εξίσωση ηλικίας έχει θεωρηθεί ότι η ραδιενέργεια του δείγματος και του χώματος έχουν διατηρηθεί σταθερά από το σημείο μηδέν μέχρι και τη στιγμή της μέτρησης, δίνοντας σταθερή ετήσια δόση. Στην πραγματικότητα όμως τα πράγματα δεν είναι τόσο απλά. Υπάρχουν τρία είδη ραδιενεργής ανισορροπίας στον πυλώ. Αρχικά, αυτή του ουρανίου-234 σε σχέση με το ουράνιο-238. Ακόμα και περίπτωση πλεονασμού του ουρανίου-234 σε σχέση με το ουράνιο-238 να υπάρχει, ο χρόνος ημιζωής του δεύτερου (250000 χρόνια) είναι πολύ μεγαλύτερος από την περίοδο που εμείς αναζητούμε ηλικίες κεραμικής (10000 χρόνια), που σημαίνει ότι τυπικά έχουμε ισορροπία. Το ίδιο ισχύει και για την περίπτωση του θορίου-230. Αντίθετα όμως, ανισορροπία στο ράδιο-226, με χρόνο ημιζωής 1600 χρόνια, μετά το ψήσιμο του κεραμικού δηλώνει ότι ο βαθμός ανισορροπίας που μετράται σήμερα θα είναι πολύ μικρότερος από τον αρχικό και αυτό γιατί κατά τη διάρκεια της φωτιάς έχουμε διαφυγή του ραδονίου και κατά τη διάρκεια της ταφής η ισορροπία επανέρχεται. Παρόλα αυτά δεν είναι γνωστό εάν ανισορροπία υπήρχε και πριν το ψήσιμο ή εάν εμφανίστηκε ως αποτέλεσμα της διήθησης κατά την ταφή. Αν συμβαίνει το τελευταίο, τότε θεωρώντας ότι οι συνθήκες των υπόγειων νερών έχουν μείνει αμετάβλητες σε όλη την περίοδο της ταφής, ο βαθμός ανισορροπίας θα έχει μείνει περίπου σταθερός. Σημαντικός βαθμός ανισορροπίας του ραδίου (Meakins et al., 1978,1979; Mangini et al., 1983; Murray and Aitken, 1982; Carriveau and Harbottle, 1983) έχει παρατηρηθεί σε αρκετές περιπτώσεις δειγμάτων κεραμικής και σε δείγματα από σπήλαια (Liritzis, 1980, 1988), όπως επίσης και διαφυγή του ουρανίου από κεραμικά (Hedges and McLellan, 1976; Murray, 1981, 1982).

Επιστρέφοντας στη θεωρία και την πράξη της καταμέτρησης άλφα σωματιδίων, παραθέτουμε την εικ 2.4 παρουσιάζεται η συσκευή μέτρησης και στο σχ. 2.34, το διάγραμμα ροής της συσκευής. Πρόκειται για τον Low Level Alpha Counter 7286, Littlemore Scientific engineering. Η συσκευή αποτελείται από έναν φωτοπολλαπλασιαστή τύπου EMI 6097B, πάνω

στον οποίο τοποθετείται το προς μέτρηση δείγμα, έναν προενισχυτή και έναν ενισχυτή, και τέλος τον μετρητή και το καταγραφικό.



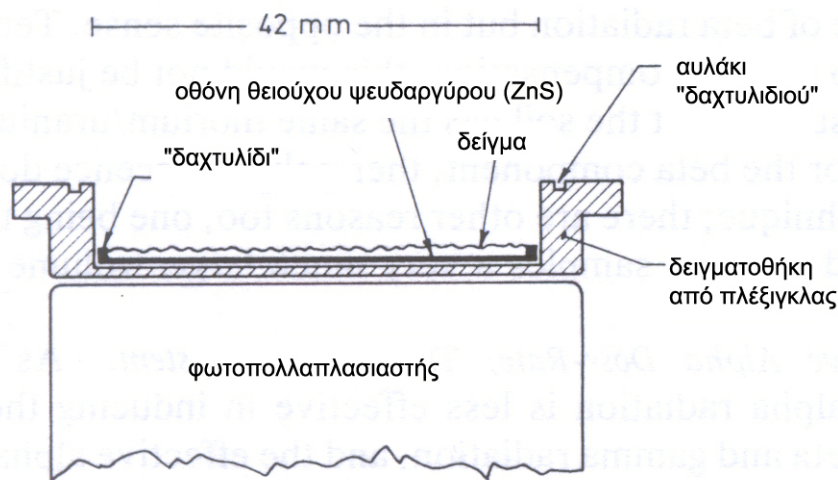
Εικ. 2.4: Μετρητής άλφα σωματιδίων του Εργαστηρίου Αρχαιομετρίας του Πανεπιστημίου Αιγαίου.



Σχ. 2.34: Διάγραμμα ροής του μετρητή άλφα σωματιδίων του Εργαστηρίου Αρχαιομετρίας του Πανεπιστημίου Αιγαίου (Aitken, 1985).

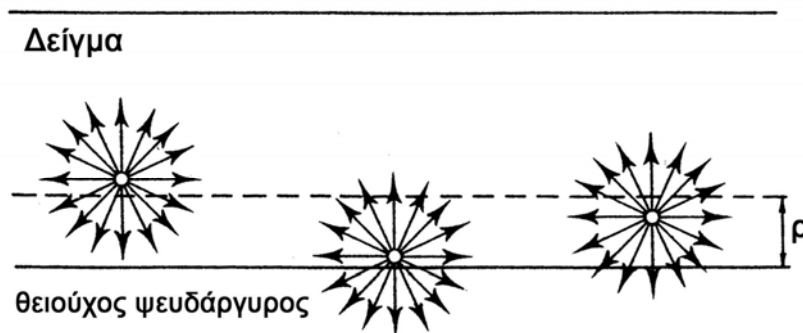
Το δείγμα αφού κονιορτοποιηθεί σε μέγεθος κόκκων μικρότερο από 90 $\mu$ m ξηραίνεται στους 80°C για εικοσιτέσσερις ώρες για να φύγει το ραδόνιο. Το δείγμα τοποθετείται στην ειδική

δειγματοθήκη από πλεξιγκλάς πάνω σε μια οθόνη θειούχου ψευδαργύρου. Σταθεροποιείται με ένα ανοξείδωτο δαχτυλίδι και κλείνεται με το καπάκι (σχ. 2.35). Ο δειγματολήπτης θα πρέπει να καθαρίζεται με κατάλληλα καθαριστικά ή μεθανόλη πριν από κάθε χρήση και δε θα πρέπει να χρησιμοποιούνται άλφα ραδιενεργά υλικά. Στη συνέχεια τοποθετείται στο φωτοπολλαπλασιαστή, κλείνεται με το μαύρο καπάκι και σκεπάζεται με μαύρο πανί. Και ο φωτοπολλαπλασιαστής είναι κλεισμένος σε ένα μαύρο κουτί λόγω της ευαισθησίας του στο φως.



Σχ. 2.35: Σχηματική αναπαράσταση του δειγματολήπτη για μετρητή σωματιδίων άλφα. Διακρίνονται η οθόνη θειούχου ψευδαργύρου, το δαχτυλίδι και το δείγμα (Aitken, 1985).

Το παρακάτω σχήμα είναι μια γραφική παράσταση του δείγματος πάνω στην οθόνη. Για τους πυρήνες που είναι πιο κοντά στην οθόνη σχεδόν τα μισά άλφα σωματίδια που παράγονται προκαλούν σπινθηρισμό. Για τους πυρήνες όμως που βρίσκονται πιο μακριά από μια απόσταση  $\rho$ , τα σωματίδια άλφα που παράγονται δε φτάνουν στην οθόνη του θειούχου ψευδαργύρου.



Σχ. 2.36: Σχηματική αναπαράσταση των πυρήνων του υλικού που είναι σε επαφή με την οθόνη του θειούχου ψευδαργύρου (Aitken, 1985).

Κατά μέσο όρο μόνο το ένα τέταρτο από τα σωμάτια που παράγονται από τους πυρήνες μέσα στο στρώμα  $\rho$  φτάνει στην οθόνη. Έχει βρεθεί ότι για τις σειρές του θορίου και του ουρανίου η τιμή του  $\rho$  είναι 25 $\mu\text{m}$  για υλικό πυκνότητας 2,6 $\text{gcm}^3$ , αλλά για τους πιο ενεργητικούς εκπομπούς άλφα η απόσταση αυτή διπλασιάζεται (Aitken, 1985). Έτσι για μια οθόνη διαστάσεων 42mm το ελάχιστο στρώμα υλικού που θα χρειαστεί για τη μέτρηση είναι 0,2g. Επειδή όμως υπάρχει πάντα η δυσκολία της ισοκατανομής της σκόνης πάνω στην οθόνη δεν είναι πρακτικό να χρησιμοποιείται λιγότερο από ένα γραμμάριο.

Το μεγάλο πλεονέκτημα του θειούχου ψευδαργύρου είναι ότι οι παλμοί που αντιστοιχούν σε σπινθηρισμούς από άλφα σωματίδια είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτούς που παράγονται από τα βήτα σωματίδια ή τη γάμα ακτινοβολία, ευνοώντας έτσι τον εύκολο αποκλεισμό των τελευταίων στο ηλεκτρονικό σύστημα. Για ένα τυπικό πήλινο σκεύος ή χώμα ανιχνεύονται περίπου 1000 παλμοί την ημέρα, εκατό φορές μεγαλύτερο ποσό από τους παλμούς του υποστρώματος από τις ραδιενεργές ακαθαρσίες της ίδιας της οθόνης (Aitken, 1985).

Κάθε σωμάτιο που φτάνει στην οθόνη προκαλεί την εκπομπή φωτοηλεκτρονίων, τα οποία κατευθύνονται προς την φωτοκάθοδο του φωτοπολλαπλασιαστή. Μέσα από το σύστημα των δυνόδων του φωτοπολλαπλασιαστή τα φωτοηλεκτρόνια πολλαπλασιάζονται δίνοντας στην άνοδο μετρήσιμο ηλεκτρικό παλμό, ένας παλμός για κάθε σπινθηρισμό. Μετά την ενίσχυση του ύψους των παλμών κατά μερικά βολτ, οδηγούνται στο σύστημα του διευκρινιστή ο οποίος δέχεται παλμούς μόνο μεγαλύτερους από την τάση κατωφλίου που έχει οριστεί. Οι παλμοί που περνάνε τροφοδοτούνται σε καταμετρητή και ο αριθμός των καταγεγραμμένων παλμών εκτυπώνεται.

Συνήθως το κατώφλι ρυθμίζεται έτσι ώστε ένα δείγμα το οποίο έχει μόνο τη σειρά του θορίου το 0,85 των άλφα παλμών να είναι πάνω από αυτό ενώ για ένα δείγμα με μόνο τη σειρά του ουρανίου το 0,82 των άλφα παλμών περνάνε από το διευκρινιστή. Συνεπώς για δείγμα που περιέχει ίσες ενεργότητες και από τις δύο σειρές το κατώφλι γίνεται 0,835. Το αποτέλεσμα είναι να μην περνάνε το διευκρινιστή παλμοί που προέρχονται από βήτα σωματίδια ή γάμα ακτινοβολία. Ένας πιο συνήθης τρόπος να ρυθμίζεται η τάση κατωφλίου είναι με τη χρήση ενός δείγματος αναφοράς. Η τάση αυτή είναι τα 0,25V.

Ένας τυπικός ρυθμός μέτρησης των άλφα σωματίων σε ένα δείγμα είναι περίπου 10 παλμοί ανά ks, το οποίο σημαίνει ότι το χρονικό διάστημα ανάμεσα στους παλμούς είναι 100s. Παρόλα αυτά στην αλυσίδα του θορίου περίπου το 3% των παλμών συμβαίνουν ανά ζεύγη και σε απόσταση 0,2s ο ένας από τον άλλον. Αυτό συμβαίνει γιατί ο άλφα εκπομπός πολώνιο-216 έχει χρόνο ημιζωής μόνο 0,145s και το επόμενο ραδιοϊσότοπο είναι και αυτό άλφα ραδιενεργό. Αν ο αριθμός των παλμών συμβαίνει σε χρόνο μικρότερο από 0,21s τότε καταγράφεται από ένα

κύκλωμα συμπτώσεων ως «ζεύγος» και ο ρυθμός ζευγών που καταγράφεται οφείλεται στη σειρά του θορίου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τυχαίες συμπτώσεις συνεισφέρουν σημαντικά στα πραγματικά ζεύγη και θα πρέπει να αφαιρεθούν. Παράλληλα με τα τυχαία ζεύγη υπάρχει και η συνεισφορά των «γρήγορων ζευγών» (σε αντίθεση με τα «αργά ζεύγη» της σειράς του θορίου), τα οποία οφείλονται στο χρόνο ημιζωής των 0,002s του πολώνιου-215 της σειράς του ουρανίου-235 (Aitken, 1985).

### 2.3.1 Παράγοντες κανονικοποίησης

Ο τρόπος προσδιορισμού της συγκέντρωσης Ουρανίου (U) και Θορίου (Th) σε δείγματα αρχαιολογικής προέλευσης και όχι μόνο (θεωρώντας κάθε υλικό που θέλουμε να γνωρίζουμε πόσο ουράνιο και θόριο περιέχει) στηρίζεται σε παράγοντες κανονικοποίησης οι οποίοι προσδιορίστηκαν από μετρήσεις σε μια σειρά δειγμάτων αναφοράς.

Τα δείγματα αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν και οι συγκεντρώσεις σε Ουράνιο και Θόριο που δίνουν οι εταιρίες κατασκευής τους, συνοψίζονται στον Πίνακα 2.6. Τα δείγματα αυτά μετά από ξήρανσή τους σε κλίβανο στους 80°C για 24 ώρες, τοποθετούνται στο δειγματολήπτη του οργάνου και αφήνονται κλειστά για τέσσερις μέρες για να επανέλθει η ραδιενεργός ισορροπία στις ραδιενεργές σειρές (αποκατάσταση ραδονίου). Μετά το πέρας του χρονικού αυτού διαστήματος μετριοούνται για πέντε με είκοσι μέρες. Ο χρόνος μέτρησης επιλέγεται ανάλογα με τη συγκέντρωση των δύο ιχνοστοιχείων στα υλικά (μικρή συγκέντρωση συνεπάγεται μεγάλος χρόνος μέτρησης, για να έχουμε καλύτερη στατιστική και μικρότερο σφάλμα).



Πίνακας 2.6: Δείγματα αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των παραγόντων κανονικοποίησης.

Δείγμα	Περιγραφή	Εταιρία	Συγκέντρωση U (ppm)	Συγκέντρωση Th (ppm)
G94 (Thomson et al., 1996)	Threlkeld microgranite	GIT-IWG	3,18±0,43	7,1±0,85
OU2 (Thomson et al., 1999)	Belford dolerite	GeoPT4	0,63±0,054	3,02±0,2
OU3 <sup>15</sup>	Nanhoron microgranite	GeoPT6	5,54±0,34	22,85±1,14
JG2 (Potts et al., 1992; Korotev, 1996)	Granite	GSJ	12,5±0,625	29,7±1,46
JG3 (Potts et al., 1992; Korotev, 1996)	granodiorite	GSJ	2±0,1	8±0,4
AC-E (Potts et al., 1992; Korotev, 1996)	microgranite	GIT-IWG	1,6±0,08	18,5±0,93
109A <sup>16</sup>	Calibration sand	New Brunswick Laboratory	3,7±0,18	104±5,2
105A <sup>17</sup>	Calibration sand	New Brunswick Laboratory	10±0,5	0
BC (SRM 679) (Potts et al., 1992; Korotev, 1996)	Brick clay	NIST	2,6±0,14	14±0,073
MONsoil (SRM 2711) (Gills, 1993)	soil	NIST	2,6±0,2	14±0,32

<sup>15</sup> GeoPT6. An international proficiency test for analytical geochemistry laboratories - report on round 4 (October 2000)

<sup>16</sup> New Brunswick laboratory, calibration sand, Littlemore scientific engineering

<sup>17</sup> New Brunswick laboratory, calibration sand, Littlemore scientific engineering

CFA (SRM 1633a) (Korotev, 1996)	ash	NIST	10,2±0,1	24,7±0,3
Bonn Ceramic std <sup>18</sup>	ceramic	University Bonn	5,3±0,48	15,64±0,44

Στον Πίνακα 2.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων, όπως αναγράφονται στην εκτύπωση του οργάνου, καθώς και ο παράγοντας κανονικοποίησης Ουρανίου (nfU) και Θορίου (nfTh) για κάθε δείγμα ξεχωριστά. Οι παράγοντες προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$nfU_{\delta} = \frac{\text{Μέσοι παλμοί } U}{\text{Συγκέντρωση } U} \text{ και } nfTh_{\delta} = \frac{\text{Μέσοι παλμοί } Th}{\text{Συγκέντρωση } Th}$$

(2.11)

όπου η συγκέντρωση των ιχνοστοιχείων είναι αυτή που δίνεται από τις εταιρίες κατασκευής εκάστοτε δείγματος.

Πίνακας 2.7: Αποτελέσματα μετρήσεων για τον προσδιορισμό ουρανίου και θορίου των δειγμάτων αναφοράς του πίνακα 2.6.

Δείγμα	Συγκέντρωσ η U (ppm)	Συγκέντρωσ η Th (ppm)	Μέσοι παλμοί U (counts)	Μέσοι παλμοί Th (counts)	nfU <sub>δ</sub> δείγματος (counts/ppm)	nfTh <sub>δ</sub> δείγματος (counts/ppm)
G94	3,18±0,43	7,1±0,85	44,49±4,07	33,08±3,91	13,99±2,28	4,66±0,78
OU2	0,63±0,054	3,02±0,2	11,14±2,01	9,48±1,92	17,68±3,53	3,14±0,67
OU3	5,54±0,34	22,85±1,14	97,03±8,29	110,32±8,08	17,51±1,84	4,83±0,43
JG2	12,5±0,625	29,7±1,46	182,34±14,4	145,78±14,06	14,59±1,36	4,91±0,53
JG3	2±0,1	8±0,4	33,12±2,54	36,42±2,45	16,56±1,52	4,55±0,38
AC-E	1,6±0,08	18,5±0,93	77,61±5,11	79,34±4,96	48,51±4,01	4,29±0,34
109A	3,7±0,18	104±5,2	178,3±48,8	391±48,1	48,19±13,41	3,76±0,50
105A	10±0,5	0	137,65±3,87	3,37±3,55	13,77±0,79	3,37 <sup>E</sup> 14±3,55 <sup>E</sup> 14
BC	2,6±0,14	14±0,073	24,16±3,58	32,29±3,46	9,29±1,47	2,31±0,25
MONsoi I	2,6±0,2	14±0,32	38,91±5,58	44,06±5,39	14,97±2,29	3,15±0,39
CFA	10,2±0,1	24,7±0,3	106,27±9,34	80,07±9,05	10,42±0,92	3,24±0,37
Bonn	5,3±0,48	15,64±0,44	86,73±5,38	47,17±5,17	16,36±1,80	3,02±0,34

<sup>18</sup> Archaeological Science Group, Institut für Stahlen- und Kernphysik, University Bonn, Nussallee 14-16, D-53113 Bonn

Οι τελικοί παράγοντες κανονικοποίησης προκύπτουν από το μέσο όρο των τιμών που είναι σημειωμένες με κίτρινο.

$$nfU = 15,68 \pm 0,73 \text{ counts/ppm} \text{ και } nfTh = 3,95 \pm 0,16 \text{ counts/ppm}$$

(2.12)

Επειδή ο παράγοντας κανονικοποίησης για το Ουράνιο των δειγμάτων AC-E και 109A είναι πολύ μεγαλύτερος, υπολογίστηκε και ένας άλλος παράγοντας το συγκεκριμένο ιχνοστοιχείο, ο οποίος περιλαμβάνει τον ολικό παράγοντα και αυτούς από των δύο αυτών δειγμάτων, ο οποίος και είναι:

$$nfU_1 = 37,46 \pm 4,67 \text{ counts/ppm}$$

(2.13)

Κατόπιν έγιναν υπολογισμοί των συγκεντρώσεων των δειγμάτων αναφοράς με τους παράγοντες αυτούς για να επαληθευθεί ότι τα αποτελέσματα που βγάζουν είναι σωστά και, τέλος, μετρήθηκαν και τα αρχαιολογικά δείγματα. Οι τύποι υπολογισμού συγκέντρωσης είναι:

$$\text{Συγκέντρωση } U = \frac{\text{Μέσοι παλμοί } U}{nfU} \text{ και } \text{Συγκέντρωση } Th = \frac{\text{Μέσοι παλμοί } Th}{nfTh}$$

(2.14)

Εκτός από τους γενικούς παράγοντες έγινε προσπάθεια διαχωρισμού των δειγμάτων ανάλογα με τον τύπο τους. Έτσι, για τους γρανίτες χρησιμοποιήθηκε ο παράγοντας κανονικοποίησης του δείγματος G94 και για τα δείγματα από χώμα αυτός του δείγματος MONsoil. Τα αποτελέσματα όλων των δειγμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.8. Παρουσιάζονται επίσης και οι τιμές που προέκυψαν από τους υπολογισμούς με τις εξισώσεις που δόθηκαν από τον Καθηγητή E. Rhodes, μετά από προσωπική επικοινωνία μαζί του και οι τιμές που έδωσε η μέθοδος της Νετρονικής Ενεργοποίησης για σύγκριση. Η συγκέντρωση Ουρανίου των δειγμάτων AC-E και 109A έχει υπολογιστεί με τον παράγοντα  $nfU_1$ . Σε γενικές γραμμές παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος των παραγόντων δίνει καλύτερα αποτελέσματα.

### 2.3.2 Εξισώσεις E. Rhodes (2002, προσωπική επικοινωνία)

Μετά από προσωπική επικοινωνία με τον Καθηγητή E. Rhodes, ο καθηγητής είχε την ευγενή καλοσύνη να μας στείλει ένα αρχείο στο πρόγραμμα Excel, με τις εξισώσεις προσδιορισμού συγκέντρωσης Ουρανίου και Θορίου από τις μετρήσεις του μετρητή άλφα σωματιδίων, οι οποίες είναι βασισμένες στο βιβλίο του M. J. Aitken (1985). Έτσι έχουμε:

$$\text{Συγκέντρωση } Th = \frac{\text{άλφα παλμοί που οφείλονται στο } Th /ks}{0,483}$$

(2.15)

και

$$\text{Συγκέντρωση } U = \frac{\text{άλφα παλμοί που οφείλονται στο } U /ks}{1,67}$$

(2.16)

όπου:

$$\text{άλφα παλμοί που οφείλονται στο } Th /ks = 21 \cdot \left( \frac{\text{ρυθμός αργών ζευγών ανά } /ks}{10} - \left( \frac{\text{ολικοί παλμοί άλφα } /10ks - \text{υπόστρωμα } /10ks}{10} \right)^2 \cdot \frac{0,38}{1000} \right)$$

και

$$\text{άλφα παλμοί που οφείλονται στο } U /ks = \frac{\text{ολικοί παλμοί άλφα } /10ks - \text{υπόστρωμα } /10ks}{10} - \text{άλφα παλμοί που οφείλονται στο } Th /ks$$

Θα πρέπει να πούμε ότι η περίοδος μέτρησης έχει καθοριστεί στα 10ks.

Πίνακας 2.8: Αποτελέσματα μετρήσεων για τον προσδιορισμό ουρανίου και θορίου σε όλα τα δείγματα που μετρήθηκαν καθ' όλη την εκπόνηση της συγκεκριμένης διατριβής, με τους παράγοντες κανονικοποίησης του Εργαστηρίου Αρχαιομετρίας, τις εξισώσεις του Καθ. Ε. Rhodes, και με νετρονική ενεργοποίηση.

Δείγμα	Τιμή U (γνωστή) (ppm)	Τιμή Th (γνωστή) (ppm)	U (ppm) nfU=15,68±0,73 nfU1=37,46±4,67	Th (ppm) nfTh=3,95±0,16	Εξισώσεις Rhodes		Νετρονική Ενεργοποίηση	
					U (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)	Th (ppm)
109A	3,7±0,18	104±5,2	4,76±1,43 (nfU1)	98,89±12,78	10,74±2,52	80,63±8,54		
105A	10±0,5	0	8,78±0,48	0,85±0,89	8,21±0,19	0,72±0,55		
BC	2,6±0,14	14±0,073	1,54±0,24	8,17±0,93	1,42±0,21	6,67±0,69		
OU3	5,54±0,34	22,85±1,1 4	6,19±0,60	27,90±2,32	5,80±0,45	22,77±1,50		
Bonn	5,3±0,48	15,64±0,4 4	5,53±0,43	11,93±1,39	5,17±0,29	9,74±0,96		
CFA	10,2±0,1	24,7±0,3	6,78±0,67	20,25±2,42	6,31±0,50	16,64±1,67		
Monsoil	2,6±0,2	14±0,32	2,48±0,37	11,14±1,43	2,31±0,32	9,09±1,05		
G94	3,18±0,43	7,1±0,85	2,84±0,29	8,37±1,04	2,64±0,23	6,83±0,76		
OU2	0,63±0,05 4	3,02±0,2	0,71±0,13	2,40±0,49	0,64±0,12	1,96±0,39		
JG3	2±0,1	8±0,4	2,11±0,19	9,21±0,72	1,96±0,15	7,52±0,48		
AC-E	1,6±0,08	18,5±0,93	2,07±0,29 (nfU1)	20,07±1,48	4,63±0,28	16,37±0,94		

JG2	12,5±0,62 5	29,7±1,46	11,61±1,07		36,87±3,84		10,92±0,75	30,29±2,50		
QAS2	?	?	0,48±0,04		0,70±0,13		0,42±0,05	0,57±0,10		
QAS3	?	?	0,42±0,04		0,89±0,15		0,36±0,05	0,72±0,12	0,42	1,02
ST5	?	?	1,51±0,18	1,70±0,33 (με nfU=13,99±2,28 του G94)	3,60±0,63	3,05±0,73 (με nfTh=4,66±0,78 του G94)	1,39±0,15	2,94±0,48	1,44	3,76
ST3	?	?	2,73±0,23	3,06±0,54 (με nfU=13,99±2,28 του G94)	18,08±1,0 2	15,34±2,66 (με nfTh=4,66±0,78 του G94)	2,55±0,67	14,75±0,69	3,49	35,1
ST4	?	?	0,83±0,29	0,93±0,35 (με nfU=13,99±2,28 του G94)	15,26±1,2 5	12,95±2,37 (με nfTh=4,66±0,78 του G94)	0,76±0,27	12,44±0,86	2,45	45,1
ST1	?	?	1,65±0,12		0,41±0,32		1,52±0,09	0,34±0,23	1,26	0,283
OT1	?	?	2,38±0,26	2,67±0,51 (με nfU=13,99±2,28 του G94)	7,51±0,97	6,37±1,31 (με nfTh=4,66±0,78 του G94)	2,21±0,21	6,13±0,68	2,78	7,73
OT2	?	?	1,06±0,16	1,19±0,26 (με nfU=13,99±2,28 του G94)	4,7±0,6	3,99±0,83 (με nfTh=4,66±0,78 του G94)	0,97±0,14	3,84±0,46	1,65	3,68
OS3	?	?	2,76±0,14		0,35±0,21		2,64±0,06	0,01±0,10		

OS5	?	?	0,30±0,14		3,57±0,57		0,25±0,13	2,91±0,44	0,509	3,05
OS6	?	?	0,66±0,05		0,96±0,15		0,59±0,05	0,78±0,12		
OS7	?	?	2,15±0,26	2,41±0,47 (με nfU=13,99±2,28 του G94)	9,31±0,97	7,90±1,53 (με nfTh=4,66±0,78 του G94)	2,00±0,21	7,59±0,70		
SETI I	?	?	0,92±0,06		0,28±0,11		0,83±0,04	0,23±0,08	0,97	0,168
SETI II	?	?	0,696±0,097		3,93±0,38		0,63±0,09	3,202±0,28 3		
SETI IV	?	?	1,32±0,19		6,41±0,75		1,22±0,17	5,23±0,56		
Mykerinus	?	?	2,37±0,24	2,65±0,49 (με nfU=13,99±2,28 του G94)	7,46±0,86	6,33±1,27 (με nfTh=4,66±0,78 του G94)	2,20±0,19	6,09±0,63	1,81	9,82
ITH-3	?	?	0,22±0,03		0,24±0,11		0,17±0,04	0,19±0,09	0,13	0,449
ITH-4	?	?	0,14±0,03		0,40±0,12		0,10±0,04	0,33±0,10	0,106	0,237
VT1	?	?	2,71±0,33	3,03±0,60 (με nfU=13,99±2,28 του G94)	14,26±1,3 1	12,10±2,27 (με nfTh=4,66±0,78 του G94)	2,52±0,28	11,63±0,91		
VT3	?	?	1,14±0,06		0,52±0,12		1,07±0,04	0,43±0,09	0,911	0
VT6	?	?	0,90±0,05		0,025±0,086		0,82±0,04	0,03±0,16	0	0
VT7	?	?	0,86±0,04		0,03±0,05		0,77±0,04	0,03±0,03	0,691	0
VT8	?	?	1,09±0,04		0,07±0,06		1,11±0,06	0,38±0,12		
VT9a	?	?	0,89±0,04		0,05±0,04		0,80±0,04	0,04±0,03		

VT9b	?	?	0			0			0,87±0,04	0,01±0,03	0,775	0
STR1_st	?	?	0,34±0,03			0,23±0,10			0,29±0,04	0,19±0,08	0	0,139
STR2_st	?	?	0,40±0,03			0,37±0,08			0,34±0,04	0,30±0,07		
STR2soil	?	?	1,63±0,21	1,71±0,33 (με nfU=14,97±2,29 του Monsoil)	4,84±0,76	6,08±1,19 (με nfTh=3,15±0,39 του Monsoil)	1,51±0,18	3,95±0,57				
Koumoula_stone	?	?	0,12±0,01			0,03±0,03			0,08±0,03	0,03±0,03		
Koumoula_soil	?	?	2,57±0,27	2,69±0,48 (με nfU=14,97±2,29 του Monsoil)	5,50±0,94	6,91±1,44 (με nfTh=3,15±0,39 του Monsoil)	2,38±0,22	4,50±0,71	1,79	9,82		
Elafokastro	?	?	0,07±0,01			0,05±0,05			0,034±0,03 4	0,035±0,03 5	0,047	0,057
MFS3	?	?	5,10±0,81	5,35±1,15 (με nfU=14,97±2,29 του Monsoil)	4,08 (risoe )	17,23±3,0 3	21,65±4,58 (με nfTh=3,15±0,39 του Monsoil)	25,7 (risoe)	4,77±0,66	14,06±2,20		



### 3. Συστήματα μετρήσεων ετήσιων δόσεων

#### 3.1 Φορητός μετρητής γάμα ακτινοβολίας

Οι φορητοί ανιχνευτές πυρηνικών ακτινοβολιών είναι ελαφριά ολοκληρωμένα συστήματα απαρίθμησης με βάση απαριθμητών Geiger Müller ή απαριθμητών σπινθηρισμών ή και με ανιχνευτών Ge-Li (φορητά επί οχήματος συστήματα) για ποιοτικές μετρήσεις πεδίου (Παπαστεφάνου, 1999). Τα φορητά όργανα, συνήθως, προσφέρουν πληροφορίες για την ύπαρξη ραδιενέργειας σε ένα χώρο και για την έντασή της, αλλά όχι για το είδος της, άλφα, βήτα ή γάμα, ή για την ενέργειά της. Έχει βρεθεί όμως ότι αν ρυθμιστεί ο διευκρινιστής του οργάνου να δέχεται ενέργειες πάνω από 0,37MeV, τότε οι ακτίνες που ανιχνεύει προέρχονται κυρίως από γάμα ακτινοβολία, αλλά και την κοσμική (Kirkegaard and Lønborg, 1974; Lønborg, 1984).

Το σύστημα που μελετάμε έχει βάση έναν απαριθμητή σπινθηρισμών με κρύσταλλο-σπινθηριστή NaI(Tl) διαστάσεων 2"x2". Η διευκρινιστική ικανότητα του οργάνου ρυθμίζεται με τη βοήθεια των γάμα ραδιενεργών πηγών του κοβαλτίου-60 (<sup>60</sup>Co) και του καισίου-137 (<sup>137</sup>Cs) (Liritzis and Galloway, 1981).

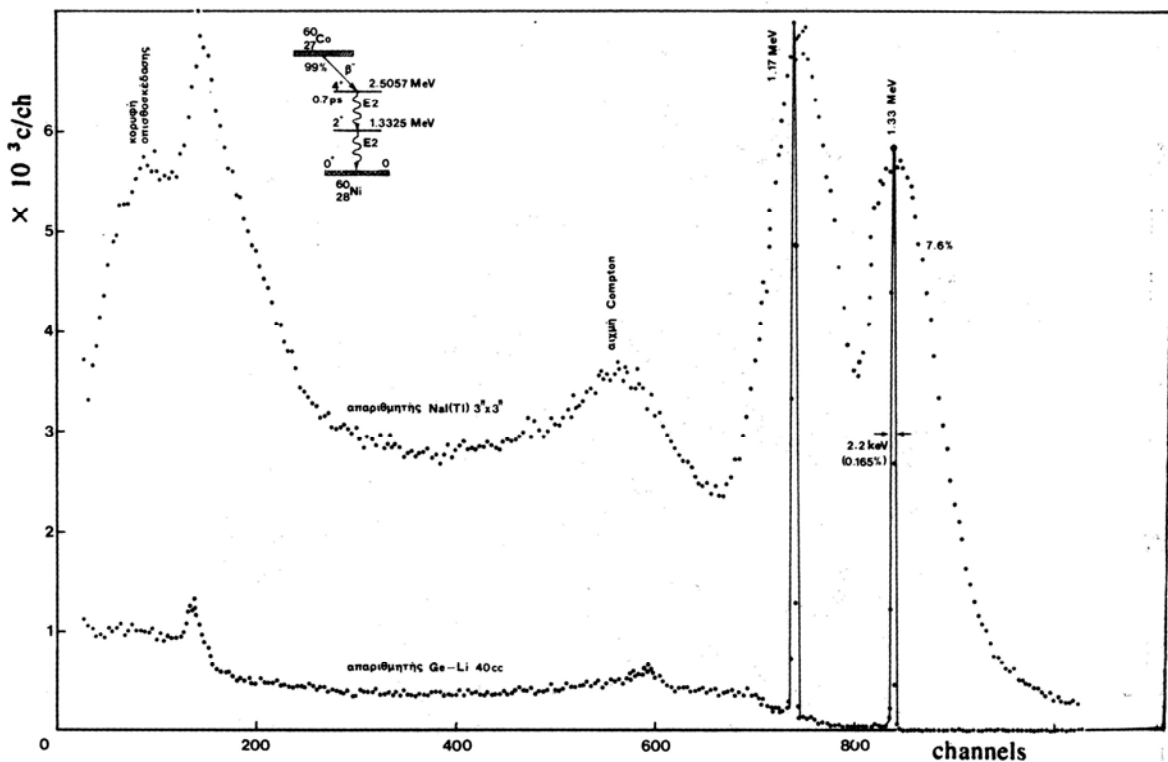
Η αρχή ανίχνευσης της γάμα ακτινοβολίας με απαριθμητή σπινθηρισμών έχει ως εξής: όταν ακτίνα γάμα διέλθει μέσα στον κρύσταλλο, αλληλεπιδρά με τα υλικά του κρυστάλλου μέσω των φαινομένων Compton, φωτοηλεκτρικού και δίδυμης γένεσης, ο κρύσταλλος διεγείρεται και κατά την αποδιέγερσή του παράγεται φως φθορισμού, σπινθήρας. Το φως αυτό μέσα από έναν οδηγό φωτός οδηγούνται στη φωτοκάθοδο του φωτοπολλαπλασιαστή από την οποία φεύγουν ηλεκτρόνια, τα οποία με την έξοδό τους από το φωτοπολλαπλασιαστή έχουν γίνει μετρήσιμος ηλεκτρικός παλμός. Ο παλμός αυτός, αφού μορφοποιηθεί από κατάλληλα ηλεκτρονικά (προενισχυτής, ενισχυτής), με έναν αναλυτή ύψους παλμών καταμετρείται.

#### 3.2 Απαριθμητής Γερμανίου

Ένα είδος απαριθμητών που χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως για την ανίχνευση ακτινοβολιών άλφα, βήτα και γάμα, είναι οι απαριθμητές Ge, Ge-Li, και Si-Li. Η αρχή ανίχνευσης έχει ως εξής: όταν ιονιστικό σωματίο εισχωρήσει στον απαριθμητή, στην πορεία του μέσα στον κρύσταλλο του απαριθμητή δημιουργεί ζεύγη οπών και ηλεκτρονίων. Οι οπές οδεύουν προς το αρνητικό και ηλεκτρόδιο και τα ηλεκτρόνια προς το θετικό. Το ηλεκτρικό αυτό ρεύμα προκαλεί πτώση τάσης στο άκρο κυκλώματος RC. Ο παλμός στην έξοδο είναι ανάλογος της ενέργειας του ιονιστικού σωματιδίου που έχει αποτεθεί μέσα στον απαριθμητή. Οι παλμοί αυτοί, αφού διαμορφωθούν κατάλληλα με προενισχυτή ύψους 50-100mV, ενισχύονται γραμμικά με ενισχυτή μέχρι ύψος 10V και στη συνέχεια αναλύονται με αναλυτή ύψους παλμών (Παπαστεφάνου, 1999).

Ο απαριθμητής Ge χρησιμοποιείται για την ανίχνευση γάμα ακτινοβολίας ενέργειας μέχρι 20MeV. Για ακτινοβολία γάμα ενέργειας μικρότερης από 150keV χρησιμοποιούνται απαριθμητές υπερκαθαρού γερμανίου. Ο απαριθμητής που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των δειγμάτων μας είναι υπερκαθαρού γερμανίου EG&G Lo-ax, διαμέτρου 51,8mm και πάχους 19,7mm. Η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή είναι 584eV για την κορυφή 122keV. Το προς μέτρηση δείγμα, αφού κονιορτοποιηθεί, τοποθετούνταν σε λεπτό δειγματολήπτη από πολυστερίνη εσωτερικής διαμέτρου 50mm και βάθους 25mm. Δείγμα και ανιχνευτής θωρακίζονταν μέσα σε μολύβι πάχους 100mm. Ο χρόνος μέτρηση ήταν πέντε μέρες (Galloway and Liritzis, 1992).

Τυπικό φάσμα ακτίνων γάμα φυσικών δειγμάτων παρουσιάζονται στο σχ. 2.37.



Σχ. 2.37: Γάμα φασματογράφημα του Co-60 με απαριθμητή Ge (α) και με απαριθμητή σπινθηρισμών (β), όπου καταδεικνύεται και η διαφορά της διακριτικής ικανότητάς τους (Παπαστεφάνου, 1999).

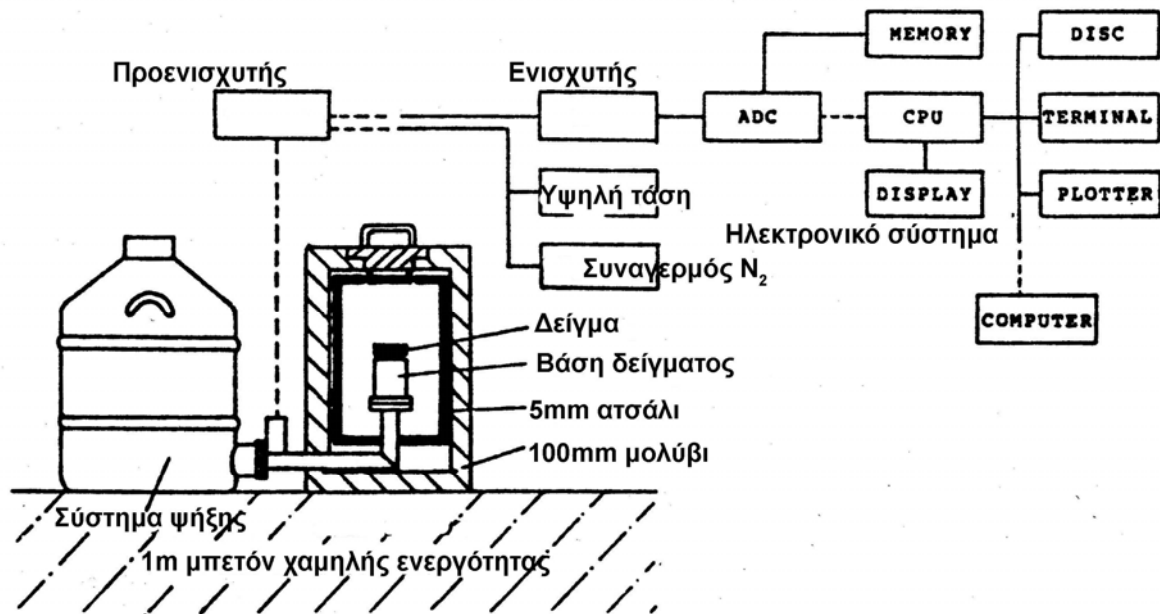
Ο απαριθμητής γερμανίου έχουν μεγάλη διακριτική ικανότητα. Η απόδοσή<sup>12</sup> τους κυμαίνεται από 10-42% και ο λόγος Peak-to-Compton<sup>13</sup> από 40:1-60:1.

### 3.3 Μετρητής γάμα ακτινοβολίας Risø

<sup>12</sup> Απόδοση του ανιχνευτή ορίζεται τη σχετική απόδοση της φωτοκορυφής, δηλ το υπό την φωτοκορυφή εμβαδόν (μετρούμενος ρυθμός) του ανιχνευτή.

<sup>13</sup> Λόγος P/C είναι το μέσο ύψος της αιχμής Compton σε φασματογράφημα του κοβαλτίου-60 από 1,040-1,096MeV προς το ύψος της φωτοκορυφής 1,33MeV του κοβαλτίου-60.

Ο φασματογράφος υψηλής διακριτικής ικανότητας παρουσιάζεται σχηματικά στο σχ. 2.38.



Σχ. 2.38: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος υψηλής διακριτικής ικανότητας γάμα φασματομετρίας του εργαστηρίου Risoe της Δανίας (Murray et al., 1987).

Πρόκειται για ένα σύστημα κατασκευασμένο από την εταιρία Canberra. Ο απαριθμητής είναι υπερκαθαρού γερμανίου, η διακριτική του ικανότητα είναι 1,83keV FWHM για την κορυφή των 1,33MeV του Κοβαλτίου-60 και 1,07keV FWHM για την κορυφή των 122keV του Κοβαλτίου-57, P/C 50,5:1 και απόδοση 19,2% συγκρινόμενος με την απόδοση κρυστάλλου 3"x3" NaI. Η απόσταση πηγής-ανιχνευτή είναι 25cm, η διάμετρος του 43,9mm και το μήκος του 55mm. Η απόσταση ανιχνευτής-παράθυρο είναι περίπου 5mm και το παράθυρο είναι από βηρύλλιο πάχους 500μm. Θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στον ενισχυτή. Η καλύτερη διακριτική ικανότητα σε χαμηλούς ρυθμούς μέτρησης δεν πετυχαίνεται απαραίτητα με τη χρήση ενισχυτών υψηλών αποδόσεων, καθώς συχνά η διακριτική ικανότητα συμβιβάζεται στο να παράγει σταθερή απόδοση σε ποικίλους ρυθμούς μέτρησης. Αναλύοντας περιβαλλοντικά δείγματα δεν πετυχαίνονται υψηλοί ρυθμοί μέτρησης και βρέθηκε ότι ενισχυτές χαμηλού κόστους είναι πιο αποδοτικοί.

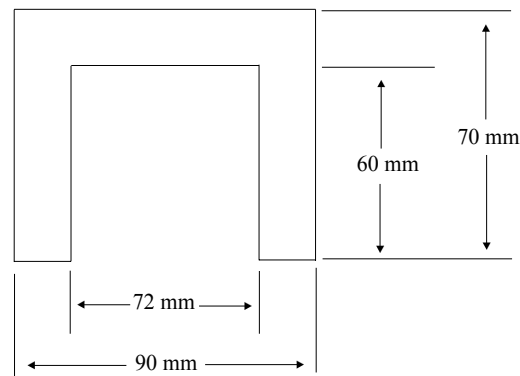
Η διακριτική ικανότητα του συστήματος αργότερα βελτιώθηκε ως προς την κορυφή των 122keV η οποία από τα 1,07keV FWHM έπεσα στα 800eV. Η ποικιλία στην ευαισθησία του συστήματος στις χαμηλές ενέργειες προκαλείται από την ποικιλία του πάχους του νεκρού στρώματος (dead layer) του γερμανίου.

Ένα σημαντικό στοιχείο που θα πρέπει να συζητηθεί είναι το υπόστρωμα. Μολύβι πάχους 100mm σε σειρά με 5-10mm από ασάλι ή χαλκό, θεωρούνται τα ιδανικότερα για την

ανακοπή των ακτίνων X υψηλών ενεργειών στο μολύβι και των φωτονίων του Pb-210 από την υπόλοιπη ασπίδα. Καλό θα ήταν να δοθεί προσοχή και στο κτίριο που θα στεγάσει τον ανιχνευτή. Ο συγκεκριμένος στεγάζεται σε κτίριο ντυμένο με τσιμέντο με μεταλλικές ίνες και κατασκευασμένο από μπετόν χαμηλής ενεργότητας ενός μέτρου περίπου. Παρά την όποια προσεχτική θωράκιση του ανιχνευτή, μετρήσεις υποστρώματος έδειξαν κορυφές σε ενέργειες που μας ενδιαφέρουν άμεσα. Έτσι, βάση του σκεπτικού των Bartels 1980 και Wogman 1981 ζητήθηκε από την εταιρία να κατασκευάσει ένα σύστημα ελέγχου για τη διατήρηση χαμηλής θερμοκρασίας.

Το παράθυρο του βηρυλλίου αργότερα αντικαταστάθηκε από μαγνήσιο, γιατί ενώ επέτρεπε την ανάλυση ακτίνων X χαμηλών ενεργειών συχνά μπορεί να περιέχει ουράνιο, άρα και τις γραμμές που παρατηρούνται στο φάσμα του υποστρώματος.

Επειδή για κάθε επεξεργασία δείγματος υπάρχουν κάποιες απαιτήσεις, όπως εύκολη προετοιμασία, αξιόπιστη συγκράτηση του ραδονίου, για το συγκεκριμένο σύστημα και μετά από δοκιμές, χρησιμοποιήθηκε η μορφή του δείγματος που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ. 2.39: Σχηματική παράσταση του δείγματος-κύπελλου που χρησιμοποιεί ο μετρητής γάμα ακτινοβολίας του εργαστηρίου Risø.

Πρόκειται για κύπελλο όγκου  $201\text{cm}^3$ . Η κατασκευή του έχει ως εξής: σε ένα καλούπι το οποίο αλείφεται με κερί, τοποθετούνται μείγμα του προς μέτρηση υλικού, περίπου 250g, το οποίο έχει κονιορτοποιηθεί μέγεθος μικρότερο από  $150\mu\text{m}$  και ξηρανθεί για 24 ώρες στους  $600^\circ\text{C}$ , ανακατεμένο με μια ρητίνη (αναλογία υλικού μέσα στο καλούπι περίπου 70%). Στην περίπτωση που το υλικό είναι λίγο, συμπληρώνεται από σκόνη στερεής ρητίνης, η οποία έχει κονιορτοποιηθεί σε μέγεθος μικρότερο από  $150\mu\text{m}$ , μειώνοντας έτσι το σφάλμα λόγω ανομοιογένειας του υλικού. Έχει βρεθεί ότι για δείγματα ορυκτών όγκου  $7\text{cm}^3$  αυτή η διαδικασία μειώνει τη διαφυγή του ραδονίου κατά 20% (Murray, 1981). Πριν τη μέτρηση και για να εξασφαλίσουμε τη ραδιενεργή ισορροπία, το κύπελλο αποθηκεύεται για 23 μέρες.

Επειδή το συνεχές μέρος του φάσματος του υποστρώματος εξαρτάται από τον τύπο του δείγματος και την παρουσία τυχαίων ραδιονουκλιδίων στον περιβάλλοντα χώρο, είναι δύσκολο να καθοριστούν ελάχιστα όρια ανίχνευσης του συστήματος. Παρόλα αυτά, επειδή κάθε σύστημα έχει και τα όριά του, καθορίστηκαν εμπειρικά για τη συγκεκριμένη γεωμετρία χρησιμοποιώντας δείγματα υλικών αναφοράς ουρανίου και θορίου σε ίσες ενεργότητες. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.9: Εμπειρικά όρια ανίχνευσης του συστήματος γάμα φασματομετρίας στο Risø.

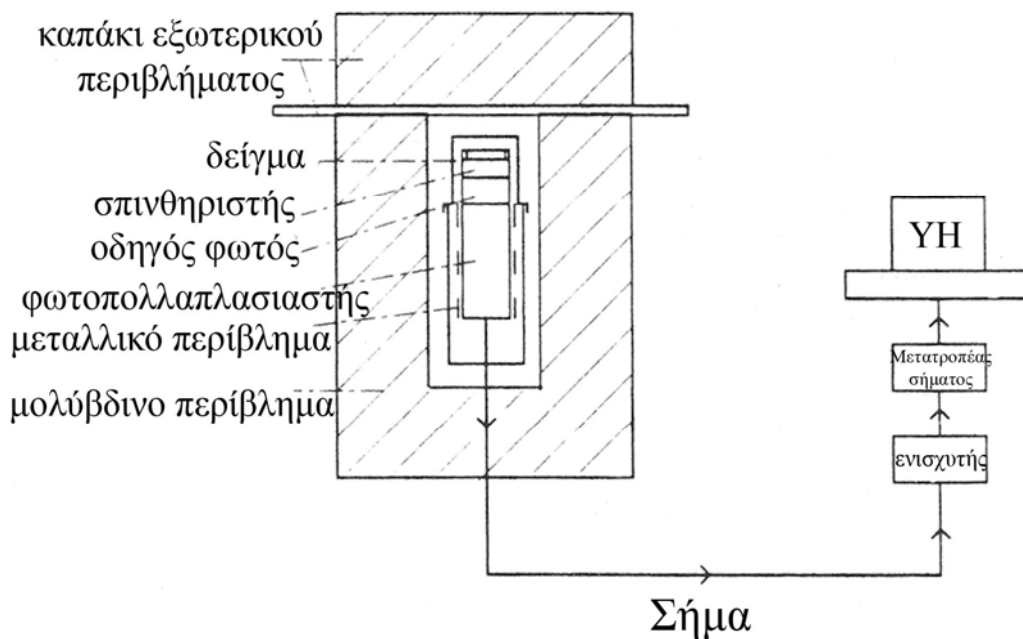
Νουκλίδιο	Κύπελλο όγκου 201cm <sup>3</sup> (Bq/kg)
U-238	5
Ra-226	0,4
Pb-210	10
Ra-228	1
Th-228	0,4

### 3.4 Πλαστικός σπινθηριστής βήτα σωματιδίων

Μέχρι την κατασκευή των πρώτων ανιχνευτών ακτίνων βήτα ο υπολογισμός της γινόταν έμμεσα, είτε με δοσίμετρα θερμοφωταύγειας (Mejdahl, 1978; Bailiff and Aitken, 1980; Bailiff, 1982; Liritzis and Galloway, 1982a,b), είτε με φασματοσκοπία ακτίνων γάμα με σπινθηριστή NaI, ο οποίος προσδιόριζε τη συγκέντρωση καλίου-40 καθώς και τις σειρές των ουρανίου-238, θορίου-232 για τη θεώρηση της ραδιενεργούς ισορροπίας (Aitken, 1978; Meakins et al., 1979), είτε ακόμα και με χημικές αναλύσεις, ακτίνων-Χ φθορισμού για τον προσδιορισμό του καλίου-40 και μετρήσεις σωματιδίων άλφα για τον προσδιορισμό ουρανίου-238 και θορίου-232 (Bell, 1977; Aitken, 1978; Liritzis and Galloway, 1982a). Πρόσφατα εμφανίστηκαν αναφορές για τη χρήση συστημάτων ανίχνευσης βήτα ακτινοβολίας (Bøtter-Jensen and Mejdahl, 1985, 1988; Liritzis and Danali-Cotsaki, 1988a). Η μόνη αναφορά για τη χρήση μετρητή σπινθηρισμών, η οποία αφορά σπινθηριστή του τύπου NE102A πάχους 2mm και διαμέτρου 70mm με έναν κωνικό οδηγό φωτός και ένα φωτοπολλαπλασιαστή διαμέτρου 50mm, όλα τοποθετημένα σε μολύβδινο περίβλημα (Sanderson, 1988).

Το ερώτημα είναι εάν σε ένα σύστημα μετρητή βήτα ακτινοβολίας, η συνεισφορά στο ρυθμό μέτρησης από τη σκέδαση μέσα στο δείγμα ποικίλει ανάμεσα στα δείγματα ώστε να απαιτείται οι ιδιότητες σκέδασης κάθε δείγματος να ληφθούν υπ' όψιν για τον προσδιορισμό της βήτα ετήσιας δόσης. Το ερώτημα προκύπτει γιατί τα βήτα σωματάρια σκεδαζόμενα από μια παχιά πηγή θα προσθέσει ένα παλμό στην αριθμό καταμετρημένων. Θα έχει γενικά χαμηλότερη ενέργεια από τα απ' ευθείας μετρούμενα σωματάρια και θα συνεισφέρει λιγότερο στην τελική δόση. Αφού τα φυσικά δείγματα ποικίλουν η σημασία της σκέδασης θα πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα για την καλιμπράρισμα του οργάνου.

Στο σύστημα που χρησιμοποιήθηκε ο σπινθηριστής ήταν ένα κομμάτι NE102A διαμέτρου 50mm και πάχους 20mm. Ένας οδηγός φωτός από πλεξιγκλάς, πάχους 30mm, οδηγεί το φως σε έναν φωτοπολλαπλασιαστή τύπου EMI 9814B εξοπλισμένο με μεταλλικό κάλυμμα. Ο φωτοπολλαπλασιαστής τροφοδοτείται με τάση 1850V. Το όλο σύστημα είναι θωρακισμένο με μολύβδινο περίβλημα πάχους 100mm για τη μείωση του υποστρώματος λόγω της γάμα ακτινοβολίας. Ο οδηγός φωτός αποτρέπει τα βήτα σωματίδια από το παράθυρο του φωτοπολλαπλασιαστή να φτάσουν το σπινθηριστή. Η διάταξη παρουσιάζεται σχηματικά στο σχ. 2.40.



Σχ. 2.40: Σύστημα μετρητή βήτα σωματιδίων με πλαστικό σπινθηριστή. Στο διάγραμμα διακρίνονται η θέση του δείγματος, ο σπινθηριστής, ο οδηγός φωτός, ο φωτοπολλαπλασιαστής, το μεταλλικό και το μολύβδινο περίβλημα του συστήματος (Galloway and Liritzis, 1991).

Σε ό,τι αφορά την επιλογή του πάχους του δείγματος θα πρέπει να γίνει κάποιος συμβιβασμός. Η χαμηλή ραδιενέργεια των φυσικών δειγμάτων καθιστά αδύνατη τη χρήση δειγμάτων λεπτού στρώματος για να αποφευχθεί παραμόρφωση του σχήματος του φάσματος λόγω σκέδασης των βήτα σωματίων μέσα στο ίδιο το δείγμα. Από την άλλη, αύξηση του πάχους του δείγματος πέρα από την εμβέλεια των περισσότερων βήτα σωματίων θα μπορούσε να αυξήσει την αναλογία των παλμών που οφείλονται στη γάμα ακτινοβολία του δείγματος.

Για την επιλογή του πάχους των δειγμάτων που θα χρησιμοποιούνταν τελικά στις μετρήσεις, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων σε δείγματα πάχους από 2 μέχρι 8mm σε ένα άλας του καλίου,  $K_2CO_3$ , σε τρία δείγματα μεταλλεύματος αναφοράς, BL-2, BL-4, DL1a, και ένα ίζημα, R-863202. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αύξηση στο ρυθμό μέτρησης με την αύξηση του πάχους οφειλόταν για τα μεταλλεύματα στα βήτα σωματίδια των σειρών ουρανίου και θορίου

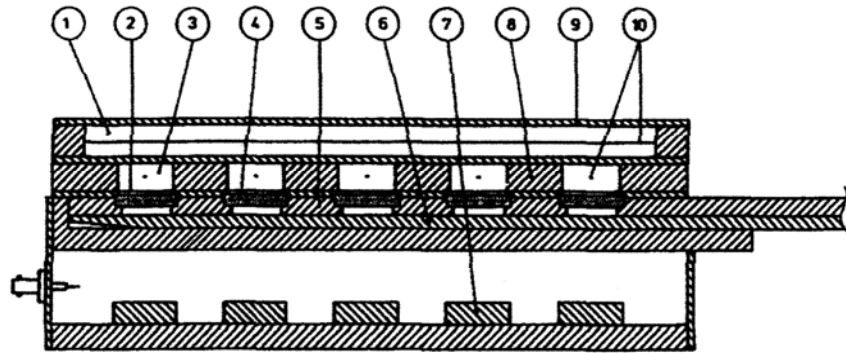
σε σύγκριση με τα βήτα του καλίου-40 που κυριαρχούν στο ίζημα και που είναι οι μόνοι εκπομποί στο καλιούχο άλας. Είναι πολύ πιθανό ένα μέρος της αύξησης να οφείλεται και στη γάμα ακτινοβολία του «επιπλέον» υλικού. Η ευαισθησία στη γάμα ακτινοβολίας που προέρχεται από δείγμα πάχους 2mm μελετήθηκε τοποθετώντας ένα φύλλο αλουμινίου μεταξύ του δείγματος και του σπινθηριστή, έτσι ώστε κανένα βήτα σωματίο να μη φτάνει στον ανιχνευτή, με τελικά αποτελέσματα να δείχνουν ότι το φάσμα που προέκυψε δε διαφέρει από το φάσμα του υποστρώματος που λαμβάνεται με μέτρηση χωρίς δείγμα.

Τελικά χρησιμοποιήθηκε ένα δείγμα πάχους 2mm, το οποίο απαιτούσε υλικό δείγματος βάρους 3g. Τα δείγματα κονιοροτοποιούνταν σε μέγεθος μικρότερο των 71 $\mu$ m. Ο δειγματολήπτης είναι ένα δαχτυλίδι από πλεξιγκλάς εσωτερικής διαμέτρου 38mm με τοιχώματα πάχους 6mm. Για την επίτευξη δειγμάτων με ομοιόμορφη κατανομή σκόνης, τα δείγματα ετοιμάζονταν πάνω σε μια μπρούντζινη υποδοχή. Το δαχτυλίδι τοποθετούνταν πάνω στην υποδοχή και ένα στρώμα σκόνης απλωνόταν ομοιόμορφα επάνω στην υποδοχή. Στη συνέχεια και μετά την εξομάλυνση της επιφάνειας, μια ζελατίνη τύπου cellulose nitrate πάχους 50 $\mu$ m σφράγιζε την επιφάνεια αυτή. Κατόπιν το σύστημα υποδοχής και δείγματος αναποδογυρίζονταν με προσοχή, αυτή απομακρύνονταν και το επάνω μέρος του δαχτυλιδιού σφραγιζόταν και αυτό με την ίδια ζελατίνη.

Το στρώμα της ζελατίνης ανάμεσα στο δείγμα και στο σπινθηριστή εμποδίζει τα σωματία άλφα να των φτάσουν, καθώς και στα βήτα σωματία με ενέργειες μικρότερες των 65keV τα οποία έχουν μικρή σημασία, μιας και η μέση ενέργεια των βήτα σωματίων φυσικού δείγματος είναι περίπου 550keV (Galloway and Liritzis, 1991).

### *3.5 Πολυμετρητής Χαμηλής Έντασης Βήτα Σωματιδίων (Risø)*

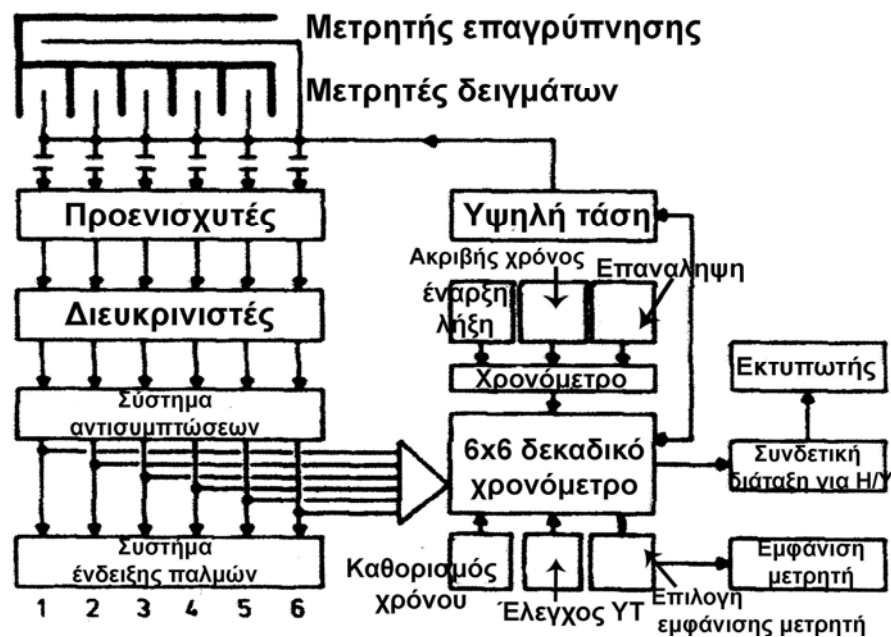
Το σύστημα των μετρητών χαμηλής έντασης ροής αερίων Geiger Müller και αναλογικών μετρητών για μετρήσεις άλφα και βήτα ακτινοβολιών σε για τη στατιστική στη φυσική ιατρική αναπτύχθηκαν στο Risø της Δανίας από πολύ νωρίς (Lippert, 1963) και οδήγησαν στους πολυμετρητές. Το 1982 η μέτρηση βήτα ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του K-40 σε δείγματα αστρίου για τη χρονολόγηση με θερμοφωταύγεια. Το 1983 δύο πολυμετρητές πέντε δειγμάτων εγκαταστάθηκαν στο ίδιο εργαστήριο για μετρήσεις βήτα σωματιδίων σε δείγματα αστρίου σε καθημερινή βάση. Μια σχηματική παράσταση του συστήματος φαίνεται στο σχ. 2.41.



Σχ. 2.41: Σχηματικά ο GM πολυμετρητής βήτα σωματιδίων GM-25-5. (1) μετρητής «επαγρύπνησης», (2) παράθυρο Mylar, (3) μετρητής δείγματος, (4) δείγμα, (5) δίσκος με πέντε θέσεις για δείγματα, (6) ανυψωτικός μηχανισμός, (7) προενισχυτής, (8) ακρυλικό περίβλημα, διαχωριστικό ανάμεσα στα δείγματα, (9) χάλκινος δίσκος, (10) άνοδος (Bøtter-Jensen and Mejdahl, 1985, 1988).

Πρόκειται για το σύστημα Low-level Multicounter system GM-25-5, το οποίο αποτελείται από μια μονάδα καταμέτρησης μηχανικής ροής αερίου το οποίο επικοινωνεί με πέντε αυτόνομους μετρητές GM και ένα κοινό μετρητή «επαγρύπνησης», ο οποίος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του υποστρώματος. Ο μετρητής αυτό μειώνει το υπόστρωμα που προκαλείται από την κοσμική ακτινοβολία, χρησιμοποιώντας μια τεχνική αντισυμπτώσεων. Κάθε θέση δείγματος έχει παράθυρο από ζελατίνη πυκνότητας μικρότερη από  $1\text{mg/cm}^2$  και διάμετρο 25mm. Οι μετρητές είναι τύπου ροής αερίου σχεδιασμένοι να επιτρέπουν ένα αέριο-μετρητή να ρέει συνεχώς ανάμεσα στο δείγμα και το στοιχείο «επαγρύπνησης». Ένας δίσκος που συρταρώνει στον πολυμετρητή επιτρέπει την ταυτόχρονη μέτρηση πέντε δειγμάτων. Ανυψωτικός μηχανισμός ελαχιστοποιεί την απόσταση δείγματος-παραθύρου πετυχαίνοντας μέγιστη απόδοση. Ο πολυμετρητής τοποθετείται σε μολύβδινο περίβλημα, συνήθως πάχους 100mm, για τη μείωση της ακτινοβολίας του υποστρώματος. Υπάρχει και ένα ηλεκτρονικό σύστημα για την επεξεργασία των σημάτων που παράγονται από τον GM απαριθμητή.





Σχ. 2.42: Διάγραμμα ροής του συστήματος μέτρησης βήτα σωματιδίων GM-25-5 (Bøtter-Jensen and Mejdahl, 1985, 1988).

Η διαδικασία καταμέτρησης έχει ως εξής: τα σωματίδια βήτα μετατρέπονται σε ηλεκτρικό παλμό στο σύστημα του GM, ένας προενισχυτής τροφοδοτεί το σήμα μέσω καλωδίου σε έναν ενισχυτή/διευκρινιστή, όπου οι παλμοί ενισχύονται επιπλέον και παίρνουν σχήμα. Οι παλμοί του υποστρώματος που παράγονται από την κοσμική ακτινοβολία μειώνονται από το σύστημα αντισυμπτώσεων που είναι συνδεδεμένο με το μετρητή «επαγρύπνησης». Ο ρυθμός των παλμών του υποστρώματος χάρις στο σύστημα αυτό είναι περίπου  $15\text{cpm}$  (περίπου  $0,1\text{Gy/ky}$ ). Στη συνέχεια, τροφοδοτείται ένα 6x6 δεκαδικό χρονόμετρο, όπου οι παλμοί από τα έξι κανάλια καταμέτρησης (πέντε δείγματος και ένας ο «επαγρύπνησης») «εμβαδοποιούνται» και εκτυπώνονται.

Η παροχή υψηλής τάσης μπορεί να ρυθμιστεί από 500-1150V. Υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου της σωστής λειτουργίας της τάσης, η οποία είναι μέσα στην τυπική απόκριση/πλατό τάσης του GM.

Συνήθως μετριοούνται δύο δείγματα από κάθε υλικό και στην πέμπτη θέση ένα υλικό αναφοράς για τον έλεγχο της μέτρησης. Η ακρίβεια του οργάνου είναι ψηλή και το σφάλμα μέτρησης τεσσάρων δειγμάτων ίδιου υλικού μπορεί να φτάσει μέχρι και το 0,5%. Επειδή όμως δεν υπάρχει πάντα ομοιογένεια σε όλα τα δείγματα το σφάλμα ανεβαίνει στο 3%. Το πολύ χαμηλό υπόστρωμα βοηθάει στο να μετρηθούν με ακρίβεια υλικά χαμηλής ραδιενέργειας, όπως ιζήματα, των οποίων η βήτα δόση είναι γύρω στα  $0,5\text{Gy/ky}$ .

Οι βασικοί στη βήτα ετήσια δόση συνεισφέρουν οι σειρές του Ουρανίου και του Θορίου και το κάλιο. Επειδή η σχετική συγκέντρωση των πηγών αυτών ποικίλει από δείγμα σε δείγμα το

σύστημα ρυθμίστηκε για κάθε ένα στοιχείο ξεχωριστά με ενώσεις Ουρανίου, Θορίου και Καλίου γνωστής ενεργότητας (Cross, 1968; Mejdahl, 1978b).

Για τη μέτρηση δειγμάτων χρειάζεται ακριβώς ένα γραμμάριο υλικού, το οποίο τοποθετείται σε δειγματολήπτη-κύπελλο εσωτερικής διαμέτρου 21mm, καλύπτεται με λεπτή μεμβράνη  $2,0\text{mg}/\text{cm}^2$  και με ένα μεταλλικό δαχτυλίδι το σύνολο κρατιέται σταθερό. Η διάρκεια της μέτρησης είναι εικοσιτέσσερις ώρες.

## Κεφάλαιο 3ο

### Χρονολόγηση Δειγμάτων

**Σ**το κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα δείγματα – πετρώματα που ελήφθησαν από διάφορους αρχαιολογικούς χώρους στην Ελλάδα και στην Αίγυπτο και οι λεπτομερείς υπολογισμοί για τον προσδιορισμό της ηλικία τους. Τόσο οι μέθοδοι προσδιορισμού και ο υπολογισμός της ισοδύναμης δόσης, όσο και οι φυσικές μέθοδοι χημικής ανάλυσης για τον υπολογισμό της ετήσιας δόσης παρουσιάστηκαν στα κεφάλαια 1 και 2.

### 3. Χρονολόγηση δειγμάτων από Αίγυπτο

#### 1.1 Περιοχή Ναός της Κοιλιάδας (Valley Temple), Μυκερίνου και Χεφρίνου

##### 1.1 ( 1 ) RHO-98 (υλικό: γρανίτης, προέλευση: γρανιτένιο τυφλό δωμάτιο, κωδικός VT1)



Εικ. 3.1: Δείγμα RHO-98, Ναός της Κοιλιάδας, Γκίζα, στο σύμπλεγμα της Πυραμίδας του Μυκερίνου, γρανίτης: Το δείγμα προέρχεται από τον εσωτερικό τοίχο γρανιτένιου δωματίου, τυφλό δωμάτιο, στην ένωση των δύο λαξευμένων ογκόλιθων, όπως δείχνει το βέλος. IV<sup>η</sup> Δυναστεία (2500-2400 π.Χ.) (Hassan, 1932-53; Reisner, 1931, 1955; Lehner, 1997). Στην εικόνα φαίνεται και ο μετρητής ακτινοβολίας γ (βλέπε κεφάλαιο 2ο, παράγραφος 3).

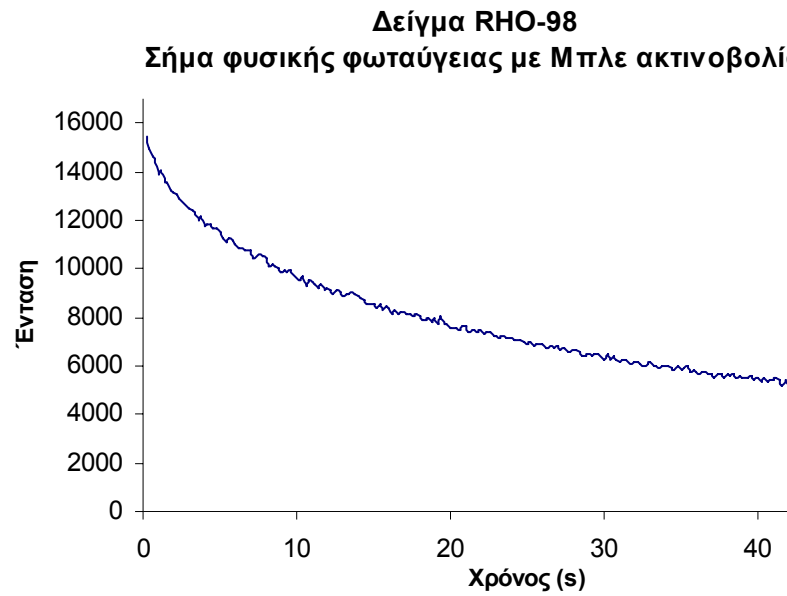
#### Προετοιμασία δείγματος RHO-98 – Προσδιορισμός ισοδύναμης δόσης

Η προετοιμασία του δείγματος έγινε στο Εργαστήριο Αρχαιομετρίας στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου, στη Ρόδο. Αρχικά η επιφάνεια δειγματοληψίας του πέτρινου δείγματος εμβαπτίζεται σε αραιό υδροχλωρικό οξύ (HCl), κατόπιν με 50 ελαφρά περάσματα με λίμα στην επιφάνεια δειγματοληψίας, σε βάθος 100μm περίπου, συλλέγουμε τη σκόνη προς χρονολόγηση (Liritzis et al., 1997). Το λιμάρισμα γίνεται προς μία φορά (όχι μπρος-πίσω) και όσο πιο απαλά γίνεται για να μην έχουμε θέρμανση του δείγματος και στη συνέχεια κατά τη μέτρηση, ψεύτικες ενδείξεις φωτός (τριβοφωταύγεια).

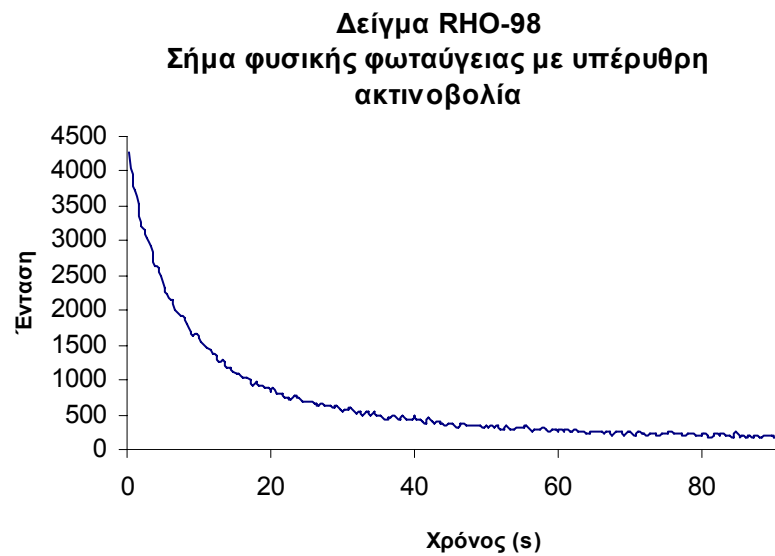
Η ποσότητα της σκόνης που πήραμε ήταν ελάχιστη γι' αυτό και για τη χρονολόγησή του προέκυψε μόνο ένα κυπελλάκι. Η μέτρηση για τον προσδιορισμό της  $IA$  έγινε στον αυτοματοποιημένο μετρητή Risø TL/OSL (Bøtter-Jensen et al., 2000). Η εσωτερική πηγή βήτα σωματιδίων  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  του συγκεκριμένου συστήματος παρέχει δόση  $0,0876\text{Gy/s}$ . Οι μετρήσεις για τον προσδιορισμό ισοδύναμης δόσης έγιναν στο Εργαστήριο Αρχαιομετρίας του Ινστιτούτο Πολιτιστικής και Εκπαιδευτικής Τεχνολογίας (Ι.Π.Ε.Τ.) στην Ξάνθη.

Για τις μετρήσεις οπτικής φωταύγειας χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο ανασύστασης δόσης μοναδικού δισκίου (single-aliquot regenerative-dose (SAR)) (Murray and Wintle, 2000) (η μέθοδος παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 1ο, παράγραφος 4). Η δοκιμαστική δόση ήταν  $13\text{Gy}$ , και οι δόσεις ανασύστασης  $13\text{Gy}$ ,  $26\text{Gy}$  και  $52\text{Gy}$ . Η θερμοκρασία προθέρμανσης ήταν  $200^{\circ}\text{C}$  για τις δόσεις ανασύστασης, με ρυθμό θέρμανσης  $5^{\circ}\text{C/s}$ , και  $160^{\circ}\text{C}$  για τη δοκιμαστική δόση, με ρυθμό θέρμανσης  $5^{\circ}\text{C/s}$ . Η προσομοίωση της φωταύγειας έγινε με Υπέρυθρο laser για χρόνο  $100\text{s}$ , στους  $125^{\circ}\text{C/s}$  με ρυθμό θέρμανσης  $5^{\circ}\text{C/s}$ , και με Μπλε φίλτρο για χρόνο  $50\text{s}$ , στους  $125^{\circ}\text{C/s}$  με ρυθμό θέρμανσης  $5^{\circ}\text{C/s}$ . Η ισοδύναμη δόση που προέκυψε είναι:

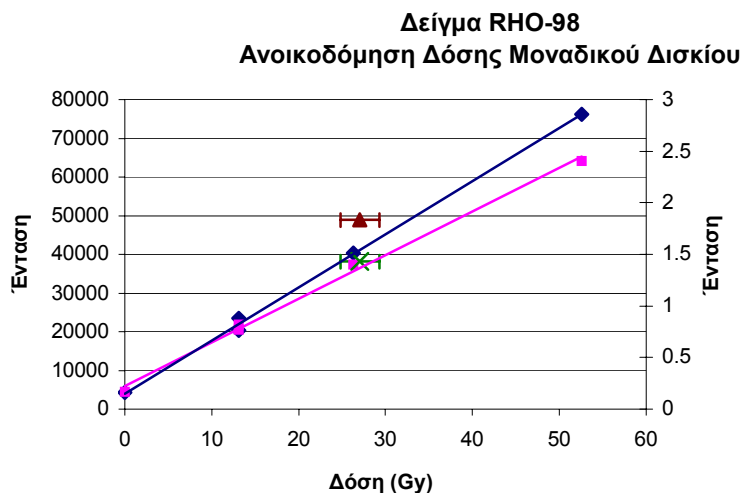
$$IA = 27,04 \pm 2,24\text{Gy}$$



Σχ. 3.1: Καμπύλη φυσικής φωταύγειας του δείγματος RHO-98 που λήφθηκε με Μπλε ακτινοβολία.



Σχ. 3.2: Καμπύλη φυσικής φωταύγειας του δείγματος RHO-98 που λήφθηκε με υπέρυθρη ακτινοβολία.



**Σχ. 3.3:** Καμπύλη ανασύστασης του δείγματος RHO-98 που προέκυψε από τη μπλε ακτινοβολία. Η μπλε καμπύλη προέκυψε από τα δεδομένα χωρίς τη χρήση της διορθωτικής μέτρησης (test dose). Το καφέ σημείο είναι η μέτρηση της φυσικής φωταύγειας στα 27,04Gy, χωρίς διόρθωση. Η ροζ καμπύλη προέκυψε από τα δεδομένα με διόρθωση (test dose). Το πράσινο σημείο είναι η μέτρηση της φυσικής φωταύγειας στα 27,04Gy, με διόρθωση.

*Χημική ανάλυση δείγματος RHO-98 –  
Υπολογισμός ετήσιων δόσεων*

Η χημική ανάλυση του πετρώματος έγινε με μετρητή άλφα σωματιδίων και ακτίνες Χ φθορισμού. Επίσης μετρήσεις ετήσιας δόσης έγιναν και με μετρητή Γερμανίου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα:

**Πίνακας 3.1:** Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων α, β και γ ετήσιων δόσεων του δείγματος RHO-98, ανά μέθοδο ανάλυσης (Liritzis and Kokkoris, 1992; Kokkoris and Liritzis, 1997).

Μετρητής Άλφα Σωματιδίων (nfU=15,68±0,73 nfTh=3,95±0,16 (total))	Μετρητής Άλφα Σωματιδίων (nfU=13,99±2,28 nfTh=4,66±0,78 (G94))	Μετρητής Άλφα Σωματιδίων (εξιιώσεις Rhodes (2002))
U=2,71±0,33    a <sub>1</sub> =18,10±1,34	U=3,03±0,60    a <sub>2</sub> =17,42±2,37	U=2,52±0,26    a <sub>3</sub> =15,64±0,99
Th=14,26±1,31    b <sub>1</sub> =4,21±0,08	Th=12,10±2,27    b <sub>2</sub> =4,20±0,12	Th=11,63±0,91    b <sub>3</sub> =4,11±0,07
K=4,11±0,06%    g <sub>1</sub> =2,03±0,08	K=4,11±0,06%    g <sub>2</sub> =1,96±0,13	K=4,11±0,06%    g <sub>3</sub> =1,88±0,06

Rb=81,8±11	Rb=81,8±11	Rb=81,8±11
------------	------------	------------

Μετρητής Γερμανίου	Μέσος όρος
a <sub>4</sub> =26,6±1,31	a=19,44±1,59
b <sub>4</sub> =4,17±0,21	b=4,17±0,13
g <sub>4</sub> =2,58±0,13	g=2,11±0,10

Οι μονάδες μέτρησης των ιχνοστοιχείων είναι σε ppm, οι ετήσιες δόσεις σε Gy/ky και των παραγόντων κανονικοποίησης για το μετρητή άλφα σωματιδίων counts/ppm.

Οι τιμές των K και Rb για τον υπολογισμό των ετήσιων δόσεων με το μετρητή σωματιδίων άλφα μετρήθηκαν με τον αναλυτή ακτίνων-χ φθορισμού.

Έγιναν μετρήσεις ετήσιας γάμα δόσης με φορητό μετρητή γάμα ακτινοβολίας:

$$dg_{portable} = 2,90 \pm 0,35 \text{ Gy/ky} .$$

#### Υπολογισμός ηλικίας δείγματος RHO-98

Η ετήσια άλφα δόση θα υπολογιστεί από το μέσο όρο των αποτελεσμάτων των τεσσάρων διαφορετικών μετρήσεων και θα πολλαπλασιαστεί επί 0,1. Θεωρούμε τη μισή άλφα ετήσια δόση γιατί το επάνω στρώμα σκόνης-κόκκων δεν είχαν από πάνω τους άλφα, με αποτέλεσμα οι κρύσταλλοι να ακτινοβοληθούν από παντού εκτός από πάνω. Θα θεωρήσουμε, επίσης, την άλφα ετήσια δόση όπως αυτή μετρήθηκε με το μετρητή γερμανίου, λόγω της μεγάλης διαφοράς με τα αποτελέσματα του μετρητή άλφα σωματιδίων.

$$da = a \cdot \frac{0,1}{2} \Rightarrow da = 1,33 \pm 0,07 \text{ Gy/ky}$$

Για τον υπολογισμό της βήτα ετήσιας δόσης υπολογίζεται από το μισό του μέσου όρου των τεσσάρων αποτελεσμάτων, πολλαπλασιασμένου επί τον παράγοντα εξασθένησης για το μέγεθος των κόκκων (Mejdahl, 1979) που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή της ολικής δόσης.

$$b_{atten} = 0,90 \text{ (Mejdahl, 1979)}$$

$$db = \frac{b}{2} \cdot b_{atten} \Rightarrow db = 1,88 \pm 0,06 \text{ Gy/ky}$$



Για την εξαγωγή της γάμα ετήσιας δόσης θα θεωρήσουμε το αποτέλεσμα του φορητού μετρητή, στην οποία μέτρηση εμπεριέχεται και η κοσμική ακτινοβολία. Επειδή το δείγμα ήταν περίπου 1cm πιο βαθιά από το σημείο που έγινε η μέτρηση (Liritzis, 1989) πρέπει να υπολογίσουμε μείωση της γάμα ακτινοβολίας κατά 30% περίπου.

$$dg = dg_{portable} - dg_{portable} \cdot 0,3 \Rightarrow dg=2,03 \pm 0,13 \text{ Gy/ky}$$

Θεωρούμε την ετήσια εσωτερική δόση χαλαζία (Mejdahl, 1987):

$$d_{internal\ quartz} = 0,10 \pm 0,03 \text{ Gy/ky} \text{ (Mejdahl, 1987)}$$

$$dr = 5,34 \pm 0,16 \text{ Gy/ky}$$

Τελικά από την εξίσωση ηλικίας (κεφάλαιο 1, παράγραφος 2) προκύπτει ότι η ηλικία του δείγματος είναι:

$$ΗΛΙΚΙΑ = 5064 \pm 474 \text{ π.Σ.} \Rightarrow ΗΛΙΚΙΑ = 3060 \pm 470 \text{ π.Χ.}$$

### 1.1 ( 2 ) RHO-99 (υλικό: ασβεστόλιθος, προέλευση: επάνω τυφλό δωμάτιο, κωδικός VT3)

Η ανάλυση ακτίνων Χ διάθλασης (XRD), έδειξε ότι το δείγμα αποτελείται από περίπου 100% ασβεστόλιθο και έχει ίχνη από χαλαζία (qtz), δολομίτη (dol) και αλίτη (halite) (School of GeoSciences, Geology and Geophysics, Grand Institute, University of Edinburgh).

#### *Προετοιμασία δείγματος RHO-99 – Προσδιορισμός ισοδύναμης δόσης*

Η προετοιμασία του δείγματος έγινε στο Εργαστήριο Αρχαιομετρίας, στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου στη Ρόδο. Αρχικά το δείγμα, η πλευρά δειγματοληψίας του πέτρινου δείγματος, εμβαπτίζεται σε αραιό υδροχλωρικό οξύ (HCl) με σκοπό την αφαίρεση οργανικών αλάτων και των επιδράσεων του καιρού στο πέτρωμα. Αφαιρούμε στρώμα των 50μm, περίπου, βυθίζοντας το δείγμα πέντε φορές στο οξύ για λίγα δευτερόλεπτα (Liritzis et al., 1997). Κατόπιν, με 50 ελαφρά περάσματα με λίμα στην επιφάνεια δειγματοληψίας πήραμε τη σκόνη προς χρονολόγηση, περίπου 200μm<sup>14</sup>. Το λιμάρισμα γίνεται προς μία φορά (όχι μπρος-πίσω) και όσο πιο απαλά γίνεται για να μην έχουμε θέρμανση του δείγματος και στη συνέχεια κατά τη μέτρηση, ψεύτικες ενδείξεις φωτός (τριβοφωταύγεια). Στη σκόνη που συγκεντρώθηκε έγιναν μετρήσεις θερμοφωταύγειας στο Εργαστήριο Ατομικής και Πυρηνικής Φυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου στη Θεσσαλονίκη. Η μέτρηση του δείγματος έγινε με τη μέθοδο της οπτικής θερμοφωταύγειας με το πρωτόκολλο προσθετικών δόσεων πολλαπλών δισκίων (multiple aliquot additive dose procedure) (κεφάλαιο 1ο , παράγραφος 3).

Η σκόνη που προέκυψε τοποθετείται σε δισκία, των οποίων η επιφάνεια καλύφθηκε με λεπτό στρώμα από λάδι σιλικόνης.

Για τη λεύκανση (bleaching) χρησιμοποιήθηκε σκόνη από το εσωτερικό της πέτρας και για το πείραμα εξομοιωτής ηλιακού φωτός (Hönle Sol 2).

Το δείγμα δεν έδωσε ολική δόση και είναι αδύνατη η χρονολόγησή του.

<sup>14</sup> έχει μετρηθεί με μικρόμετρο ακριβείας σε επίπεδα δείγματα ότι 50 περάσματα με τη λίμα ισοδυναμούν με 200μm περίπου.

## Χημική ανάλυση δείγματος RHO-99 – Υπολογισμός ετήσιων δόσεων

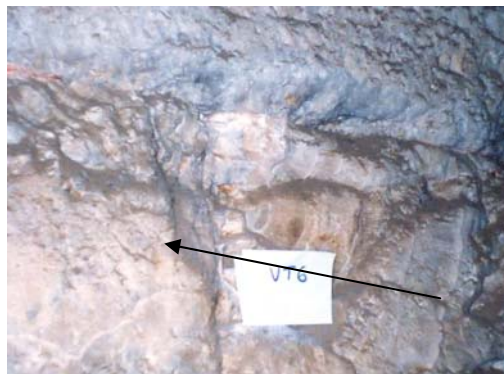
Η ανάλυση του δείγματος έγινε με νετρονική ενεργοποίηση (οι αναλύσεις έγιναν στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος» από τον Δρα. Κιλίκογλου), μετρητή άλφα σωματιδίων και ακτίνες Χ φθορισμού. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.2: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων α, β και γ ετήσιων δόσεων του δείγματος RHO-99, ανά μέθοδο ανάλυσης (Liritzis and Kokkoris, 1992; Kokkoris and Liritzis, 1997).

<b>Νετρονική Ενεργοποίηση</b>	<b>Μετρητής Άλφα Σωματιδίων (nfU=15,68±0,73 nfTh=3,95±0,16 (total))</b>	<b>Μετρητής Άλφα Σωματιδίων (εξισώσεις Rhodes (2002))</b>
U=0,911    a <sub>1</sub> =2,58±0,13	U=1,14±0,06    a <sub>2</sub> =3,61±0,19	U=1,04±0,04    a <sub>3</sub> =3,26±0,13
Th=0    b <sub>1</sub> =0,13±0,01	Th=0,52±0,12    b <sub>2</sub> =0,22±0,03	Th=0,43±0,09    b <sub>3</sub> =0,20±0,02
K=0%    g <sub>1</sub> =0,10±0,01	K=0,033±0,028%    g <sub>2</sub> =0,16±0,01	K=0,033±0,028%    g <sub>3</sub> =0,15±0,01
Rb=0	Rb=16,8±9,3	Rb=16,8±9,3

Οι μονάδες μέτρησης των ιχνοστοιχείων είναι σε ppm, οι ετήσιες δόσεις σε Gy/ky και των παραγόντων κανονικοποίησης για το μετρητή άλφα σωματιδίων counts/ppm.

Οι τιμές των K και Rb για τον υπολογισμό των ετήσιων δόσεων με το μετρητή σωματιδίων άλφα μετρήθηκαν με τον αναλυτή ακτίνων-χ φθορισμού.

**1.1 ( 3 ) RHO-103** (υλικό: αλάβαστρο, προέλευση: αλαβάστρινο δωμάτιο, κωδικός VT6)

Εικ. 3.2: Δείγμα RHO-103, Ναός της Κοιλιάδας, Γκίζα, στο σύμπλεγμα της Πυραμίδας του Μυκερίνου, αλάβαστρο: Το δείγμα λήφθηκε από την ένωση των δύο λαξευμένων ογκόλιθων εσωτερικού τοίχου αλαβάστρινου δωματίου, όπως δείχνει το βέλος. IV<sup>η</sup> Δυναστεία (2500-2400π.Χ.) (Hassan, 1932-53; Reisner, 1931, 1955; Lehner, 1997).

*Προετοιμασία δείγματος RHO-103 – Προσδιορισμός ισοδύναμης δόσης*

Η προετοιμασία των δειγμάτων και οι μετρήσεις θερμοφωταύγειας έγιναν στο Εργαστήριο Ατομικής και Πυρηνικής Φυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου στη Θεσσαλονίκη. Κατ' αρχάς, η πλευρά δειγματοληψίας του πέτρινου δείγματος εμβαπτίστηκε σε αραιό υδροχλωρικό οξύ (HCl) ώστε να αφαιρεθούν ανθρακικά άλατα και οι τυχόν καιρικές επιπτώσεις στο δείγμα, αφαιρώντας έτσι ένα στρώμα πάχους περίπου 50μm (Liritzis et al., 1997). Στη συνέχεια, με 50 περάσματα με λίμα στην επιφάνεια δειγματοληψίας παίρνουμε την απαραίτητη προς χρονολόγηση σκόνη, ένα στρώμα περίπου 200μm<sup>15</sup>. Το λιμάρισμα γίνεται

<sup>15</sup> έχει μετρηθεί με μικρόμετρο ακριβείας σε επίπεδα δείγματα ότι 50 περάσματα με τη λίμα ισοδυναμούν με 200μm περίπου.

προς μία φορά όχι μπρος-πίσω) και όσο πιο απαλά γίνεται για να μην έχουμε θέρμανση του δείγματος και στη συνέχεια κατά τη μέτρηση, ψεύτικες ενδείξεις φωτός (τριβοφωταύγεια).

Τα προς μέτρηση δείγματα ετοιμάστηκαν με τη μέθοδο Zimmerman (1971). Το μέγεθος των κόκκων που χρησιμοποιήσαμε ήταν μικρότερο από 40μm. Θα ήταν δύσκολο να χειριστούμε σκόνη μεγαλύτερου μεγέθους, αφού η σκόνη που τελικά θα μείνει θα είναι μεγέθους 2-10μm. Χωρίζουμε τη σκόνη σε δοκιμαστικούς σωλήνες και ρίχνουμε αρκετή ακετόνη, μέχρι τα δύο τρίτα περίπου του σωλήνα. Ανακινούμε τους σωλήνες και αφήνουμε για 20 λεπτά μέχρι να γίνει καθίζηση. Μετά το πέρας των 20 λεπτών αφαιρούμε το αιώρημα και κρατάμε το ίζημα. Γεμίζουμε το σωλήνα με ακετόνη και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία μέχρις ότου το αιώρημα που θα μένει να είναι καθαρή, όσο το δυνατόν, ακετόνη. Με τον τρόπο αυτό κρατάμε μέγεθος κόκκων σκόνης μικρότερο των 10μm.

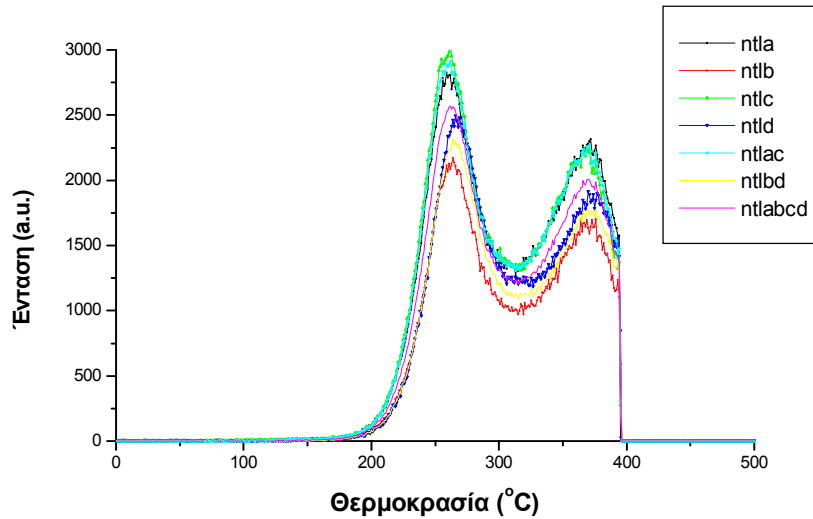
Στο επόμενο στάδιο, γεμίζουμε και πάλι το δοκιμαστικό σωλήνα με ακετόνη, ανακινούμε και μετά το πέρας 2 λεπτών φυλάσσουμε το αιώρημα αυτή τη φορά. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου το αιώρημα να είναι καθαρή ακετόνη. Με αυτή τη διαδικασία κρατάμε κόκκους μεγέθους μεγαλύτερους των 2μm.

Η ακετόνη έχει χαμηλό σημείο ζέσεως. Έτσι σε κλίβανο ξήρανσης σε χαμηλή θερμοκρασία και σε λίγο χρονικό διάστημα, μπορούμε να έχουμε μια πρώτη εκτίμηση για τη σκόνη που προέκυψε. Αν η σκόνη είναι λίγη, σε ένα γουδί, κατά προτίμηση αχάτινο (είναι πιο σκληρό από τα περισσότερα υλικά που επεξεργαζόμαστε, γουδί από άλλο υλικό θα μπορούσε να αλλοιώσει τη χημική σύσταση της σκόνης, προσθέτοντας χημικά στοιχεία στη σκόνη ανάλογα με το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένο, στην περίπτωση που το υλικό μας είναι πιο σκληρό από το υλικό κατασκευής του γουδιού κατά τη διαδικασία του θρυμματισμού), θρυμματίζουμε το υλικό που έμεινε και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία. Επειδή το σήμα TL του ασβεστόλιθου είναι αδύναμο, θα ήταν προτιμότερο να έχουμε το λιγότερο 1mg σκόνης σε κάθε δισκάκι.

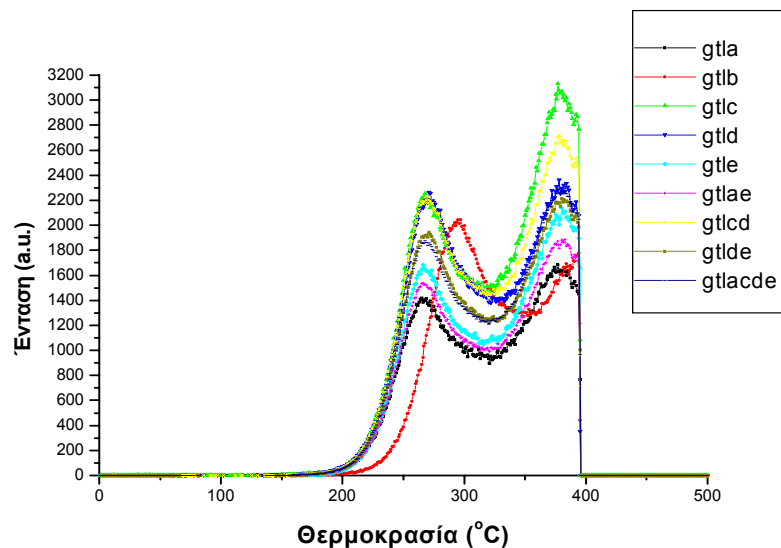
Η τοποθέτηση της σκόνης στα δισκάκια γίνεται σε διάλυμα ακετόνης, ως αιώρημα. Ανάλογα με την ποσότητα της σκόνης και το πόσα δισκάκια θα προκύψουν φτιάχνουμε διάλυμα ακετόνης έτσι ώστε σε κάθε ml διαλύματος να υπάρχει η ποσότητα της σκόνης που θέλουμε να «καθίσει» στο δισκάκι.

Η εξαγωγή της ολικής δόσης έγινε με τη μέθοδο της οπτικής θερμοφωταύγειας (κεφάλαιο 1ο, παράγραφος 3). Έγινε χρήση του πρωτοκόλλου προσθετικών δόσεων πολλαπλών δισκίων (multiple aliquot additive dose procedure). Μετρήθηκαν 4 φυσικές φωτοκαμπύλες (Σχ. 3.4) και 4 γεωλογικές (Σχ. 3.5). Χρησιμοποιήθηκαν πρόσθετες εργαστηριακές δόσεις 35Gy, 140Gy, 455Gy, 857Gy και 1841Gy. Μετά από κάθε μέτρηση κάναμε μέτρηση υποστρώματος και μέτρηση κανονικοποίησης 6Gy.

Για τη λεύκανση (bleaching) χρησιμοποιήθηκε σκόνη από το εσωτερικό της πέτρας και για το πείραμα φυσικό φως. Οι χρόνοι έκθεσης στον ήλιο είναι 1 ώρα, 3 ώρες, 5 ώρες, 7 ώρες, 10 ώρες, 20 ώρες και 40 ώρες (σχ. 3.7).



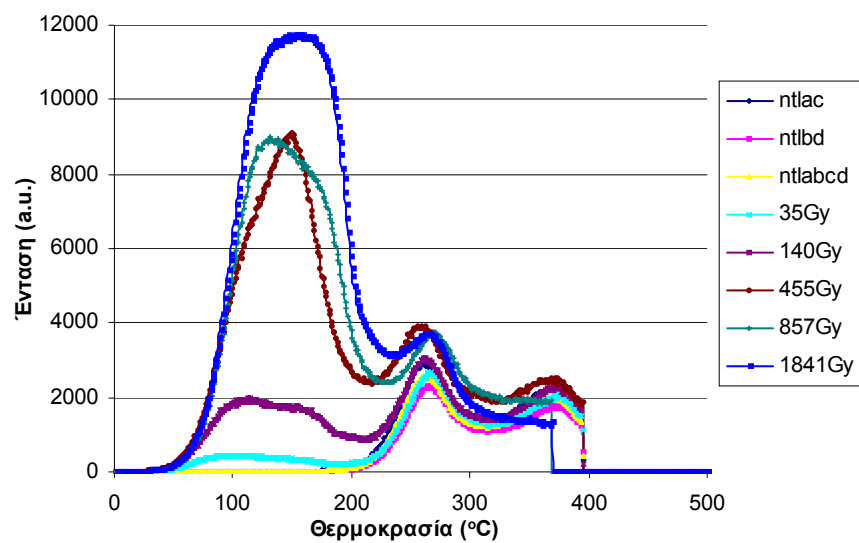
Σχ. 3.4: Διάγραμμα φωτοκαμπύλων φυσικής φωταύγειας δείγματος RHO-103. Στο διάγραμμα φαίνονται και οι μέσοι όροι από τις φωτοκαμπύλες που θεωρήσαμε για τους υπολογισμούς. Πρόκειται για τις ntlac, μέσο όρο των ntlb και ntlc, ntlbd, μέσο όρο των ntlb και ntltd, και ntlabcd, μέσο όρο των ntlb, ntlc και ntltd.



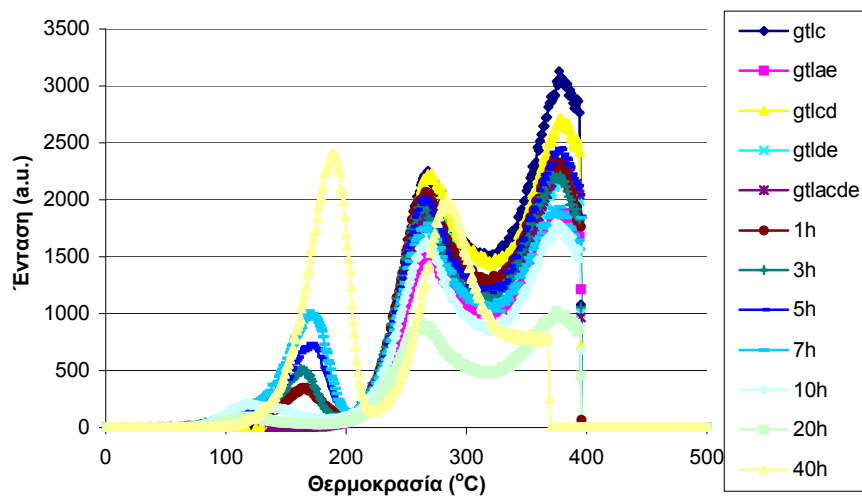
Σχ. 3.5: Διάγραμμα φωτοκαμπύλων γεωλογικής φωταύγειας δείγματος RHO-103. Στο διάγραμμα φαίνονται και οι μέσοι όροι από τις φωτοκαμπύλες που θεωρήσαμε για τους υπολογισμούς. Πρόκειται για τις gtlac, μέσο όρο των gtlb και gtlc, gtlcd, μέσο όρο των gtlc και gtltd, gtlde, μέσο

όρο των gtlc και glte, και gtlacde, μέσο όρο των gtlc, gtlc, gtlc και glte. Η φωτοκαμπύλη gtlb απορρίφθηκε.

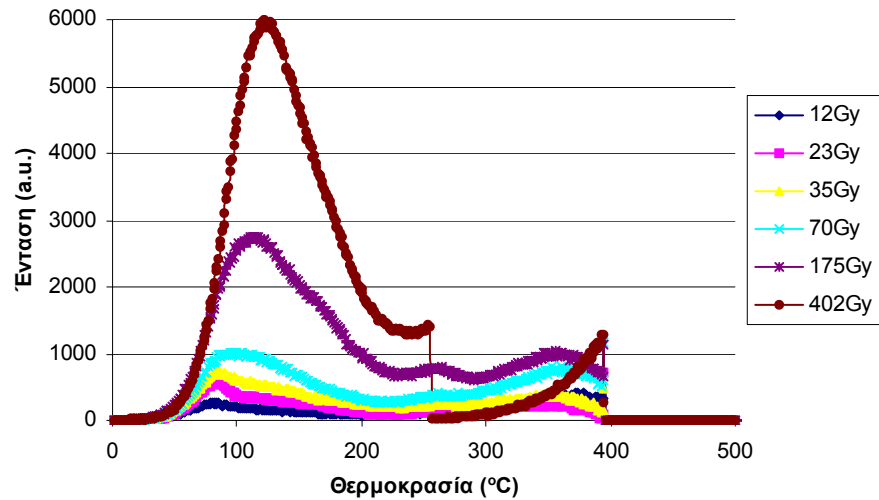
Για τον υπολογισμό της ισοδύναμης δόσης θεωρήσαμε διάφορους συνδυασμούς της φυσικής φωταύγειας και γεωλογικής φωταύγειας. Χρησιμοποιήσαμε το μέσο όρο των φυσικών φωτοκαμπύλων a και c με τις γεωλογικές φωτοκαμπύλες c, ae, cd, de και acde, το μέσο όρο των φωτοκαμπύλων b και d με τις ίδιες φωτοκαμπύλες και το μέσο όρο και των τεσσάρων με τις ίδιες πάλι φωτοκαμπύλες.



Σχ. 3.6: Διάγραμμα (φυσικής θερμοφωταύγειας + εργαστηριακής βήτα δόσης) δείγματος RHO-103. Οι δόσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι 35Gy, 140Gy, 455Gy, 857Gy και 1841Gy. Φαίνονται και οι φωτοκαμπύλες φυσικής θερμοφωταύγειας, ntlac, ntlbd και ntlabcd του σχ. 3.4.



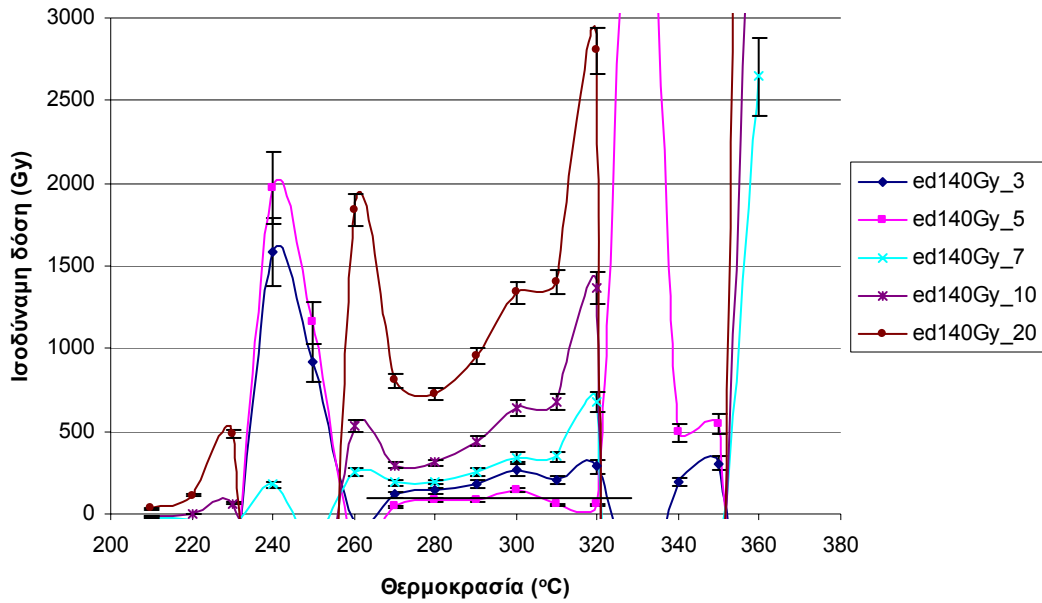
Σχ. 3.7: Διάγραμμα λεύκανσης δείγματος RHO-103. Παρουσιάζονται οι γεωλογικές φωτοκαμπύλες που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ισοδύναμης δόσης,  $gtlc$ ,  $gltae$ ,  $gtlcd$ ,  $gtlde$  και  $gtlacde$  του σχ. 3.5, καθώς και οι φωτοκαμπύλες που προέκυψαν με έκθεση του δείγματος στο φως του ήλιου. Οι χρόνοι έκθεσης είναι 1ώρα, 3ώρες, 5ώρες, 7ώρες, 10ώρες, 20 και 40ώρες.



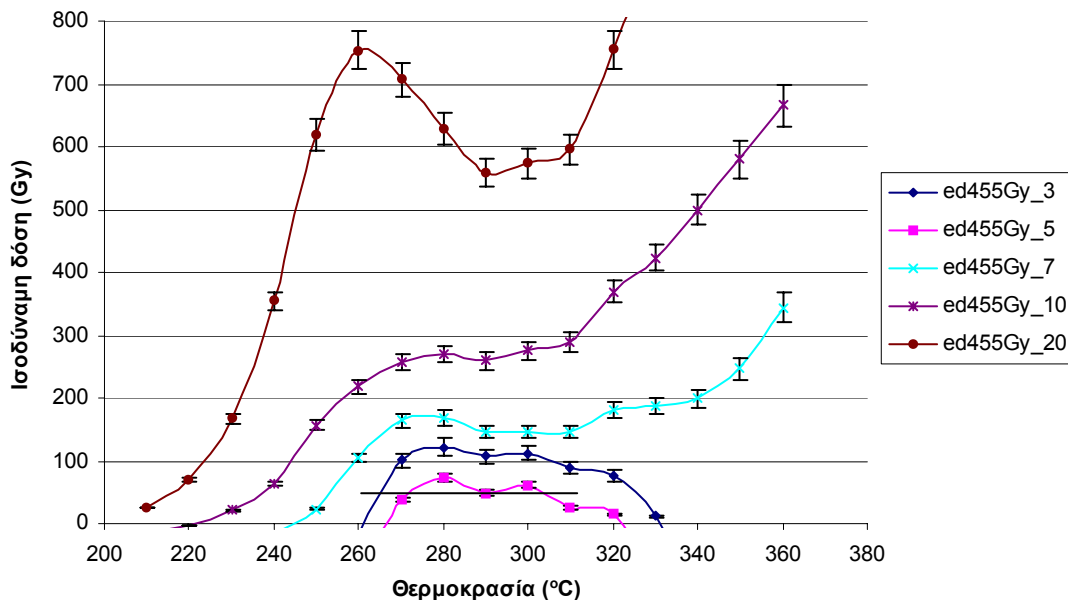
Σχ. 3.8: Διάγραμμα ανασύστασης δείγματος RHO-103. Οι δόσεις αντινοβόλησης είναι 12Gy, 23Gy, 35Gy, 70Gy, 175Gy και 402Gy.

Παρακάτω παρουσιάζουμε τις καμπύλες προσδιορισμού ισοδύναμης δόσης από το καλύτερο πλατό. Οι περιπτώσεις συνδυασμών που λείπουν έδωσαν αρνητικά αποτελέσματα ή δεν έδωσαν πλατό.



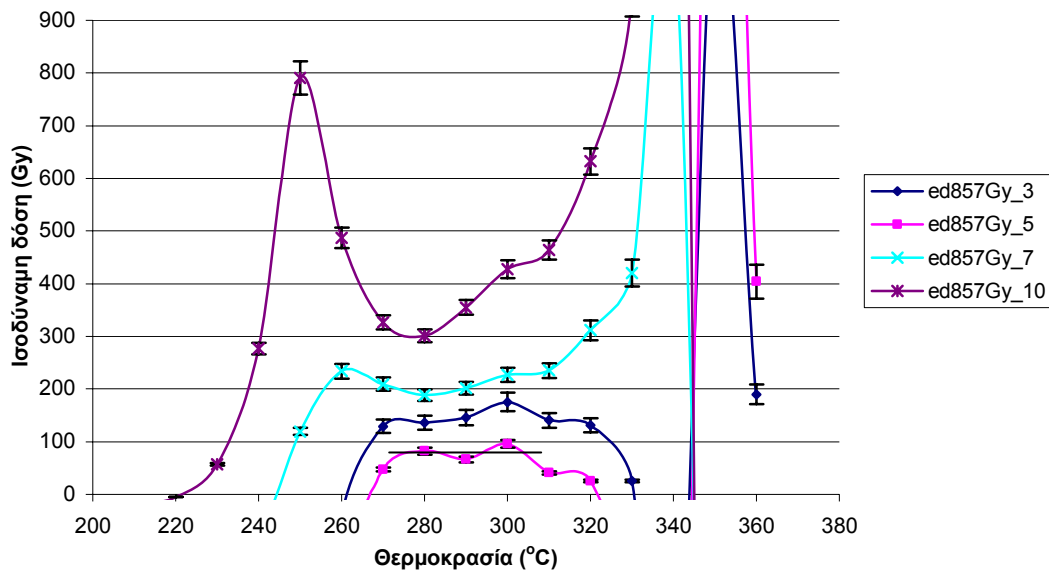


Σχ. 3.9: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των ntl(ac) και gtl(de), από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 140Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 3 ωρών, η ροζ για 5 ώρες, η κυανή για 7 ώρες, η μοβ για 10 ώρες και η καφέ για 20 ώρες. Το οροπέδιο που σημειώνεται προκύπτει για 5 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Η ισοδύναμη δόση που προκύπτει για την περιοχή 270-320°C, είναι  $78,1 \pm 14,7$  Gy.

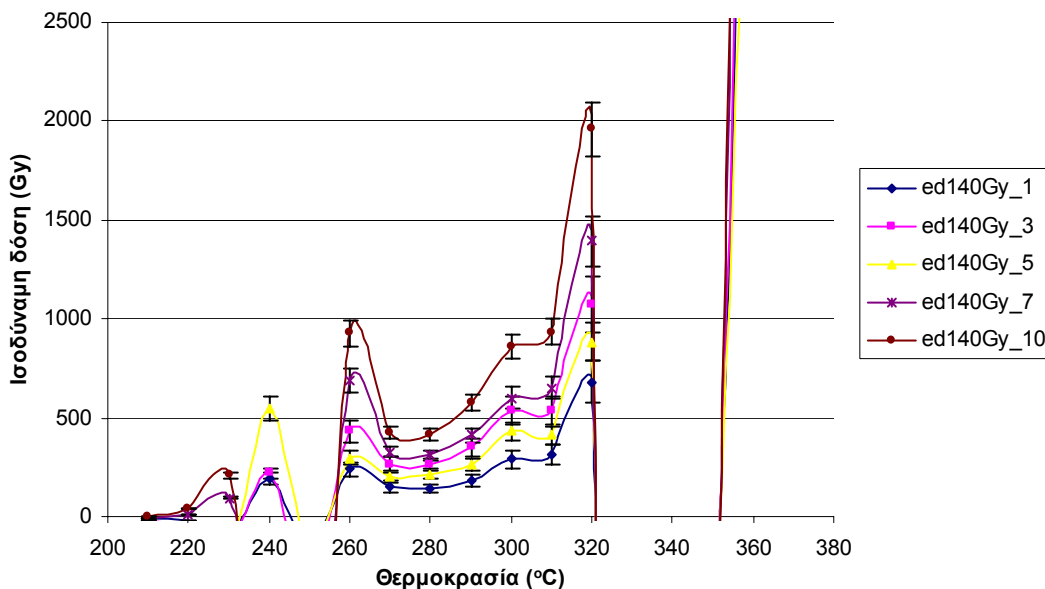


Σχ. 3.10: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των ntl(ac) και gtl(de) από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 455Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 3 ωρών, η ροζ για 5 ώρες,

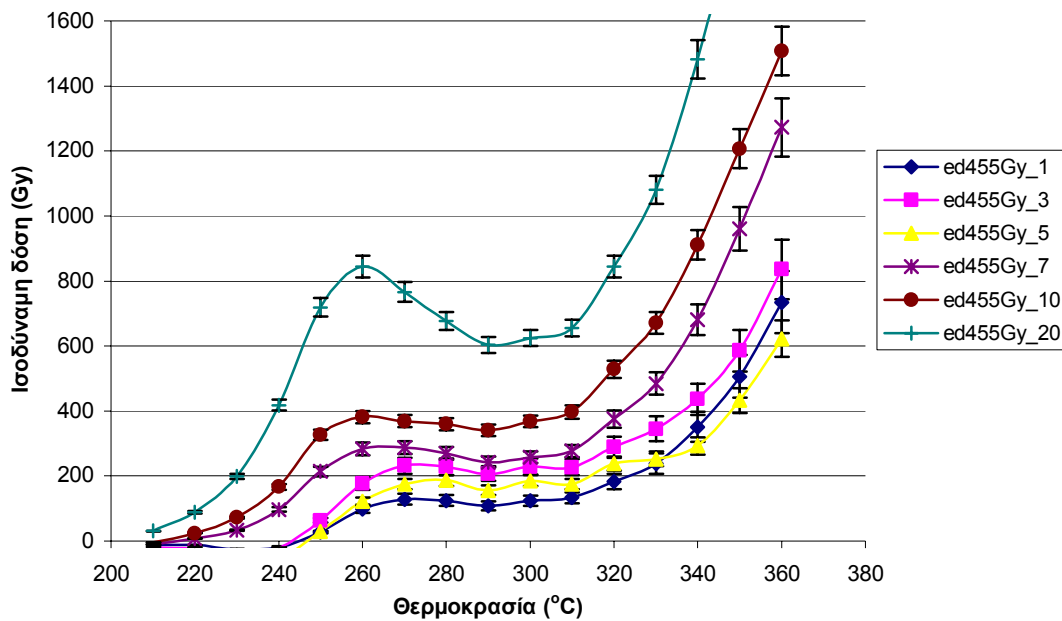
η κυανή για 7 ώρες, η μοβ για 10 ώρες και η καφέ για 20 ώρες. Το οροπέδιο που σημειώνεται προκύπτει για 5 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Η ισοδύναμη δόση που προκύπτει για την περιοχή 270-300°C, είναι  $55,2 \pm 7,9 \text{Gy}$ .



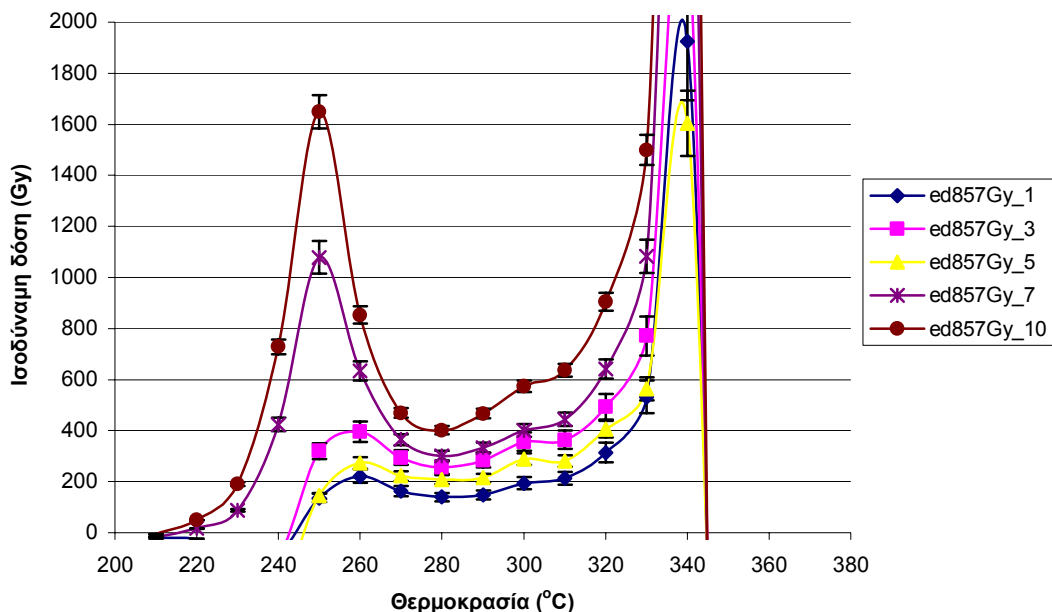
Σχ. 3.11: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των ntl(ac) και gtl(de) από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 857Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 3 ωρών, η ρόζ για 5 ώρες, η κυανή για 7 ώρες και η μοβ για 10 ώρες. Το οροπέδιο που σημειώνεται προκύπτει για 5 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Η ισοδύναμη δόση που προκύπτει για την περιοχή 280-300°C, είναι  $81,6 \pm 8,4 \text{Gy}$ .



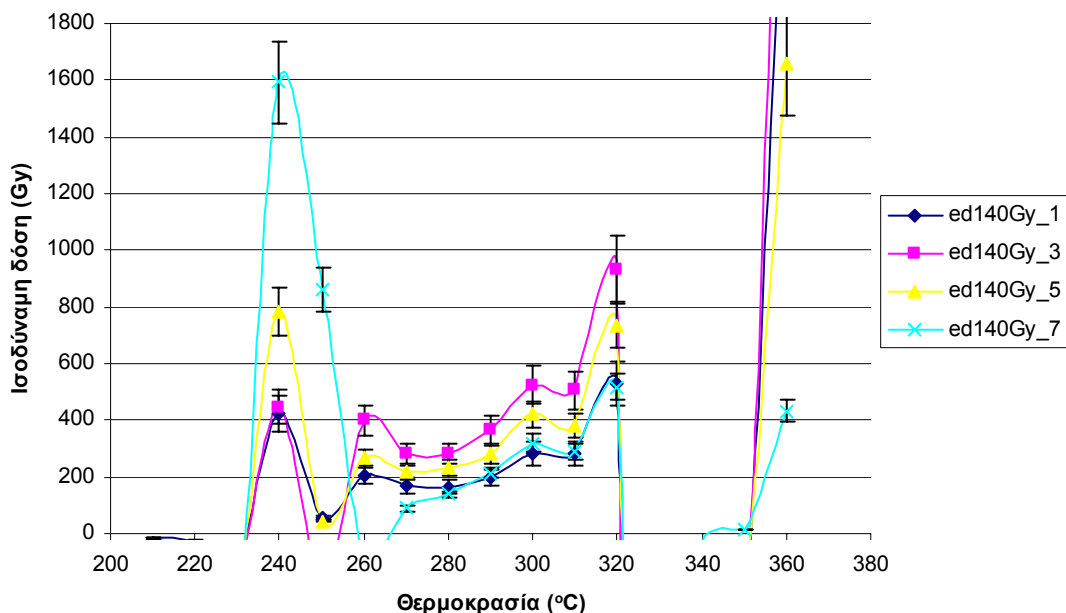
Σχ. 3.12: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των ntl(ac) και gtl(c) από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 140Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 1 ώρα, η ρόζ για 3 ώρες, η κίτρινη για 5 ώρες, η μοβ για 7 ώρες και η καφέ για 10 ώρες. Όλα τα οροπέδια που προέκυψαν δίνουν ισοδύναμη δόση μεγαλύτερη από 100Gy και δε λαμβάνονται υπ' όψιν.



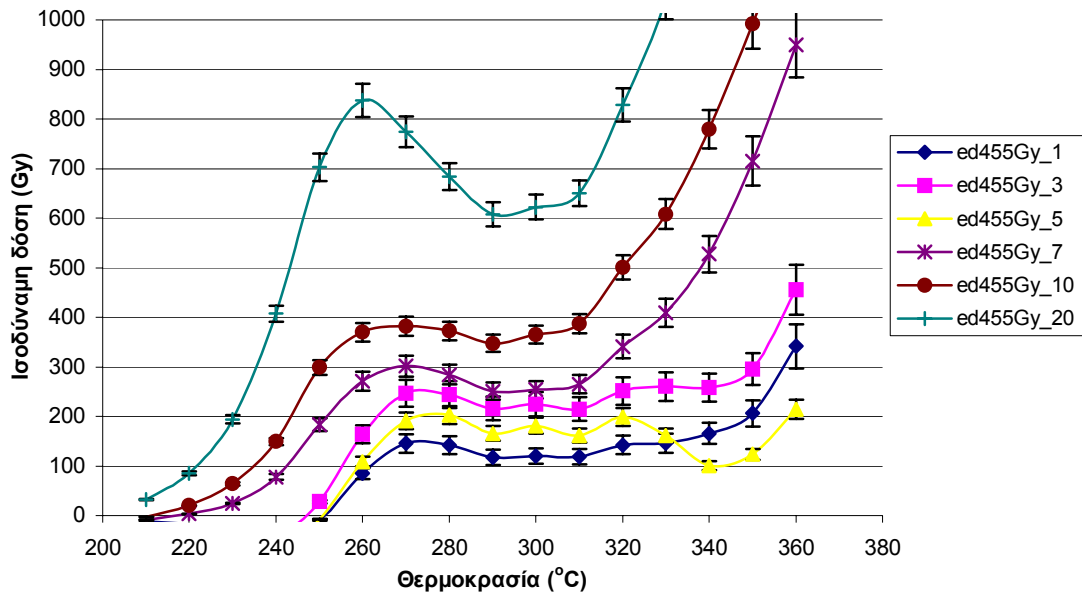
Σχ. 3.13: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των ntl(ac) και gtl(c) από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 455Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 1 ώρα, η ρόζ για 3 ώρες, η κίτρινη για 5 ώρες, η μοβ για 7 ώρες, η καφέ για 10 ώρες και η πράσινη με 20 ώρες έκθεσης στο φως. Όλα τα οροπέδια που προέκυψαν δίνουν ισοδύναμη δόση μεγαλύτερη από 100Gy και δε λαμβάνονται υπ' όψιν.



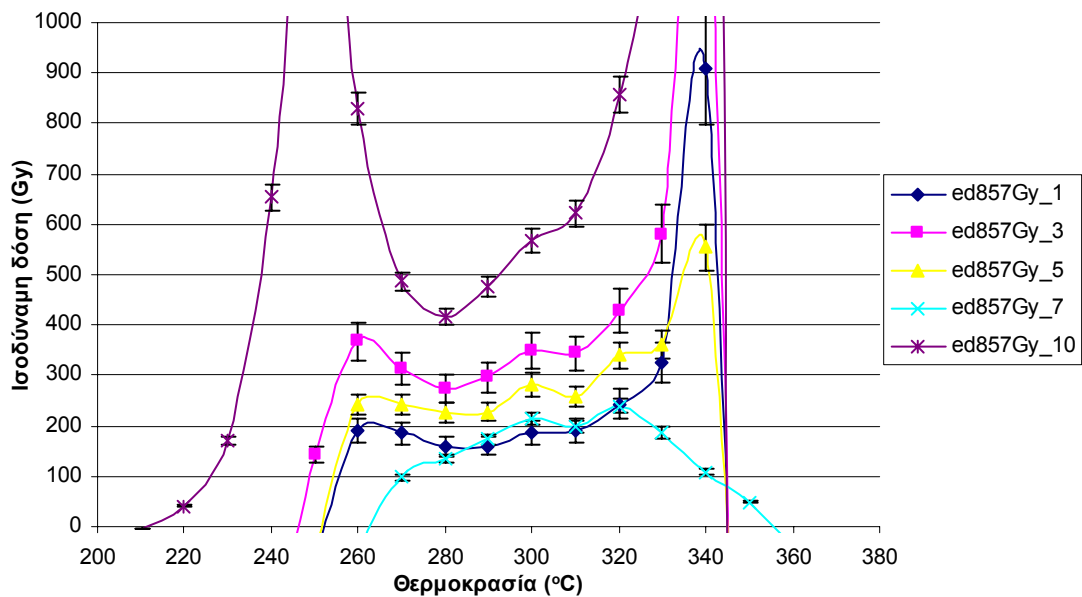
Σχ. 3.14: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των  $n_{tl}(ac)$  και  $g_{tl}(c)$  από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβολία 857Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 1 ώρα, η ρόζ για 3 ώρες, η κίτρινη για 5 ώρες, η μοβ για 7 ώρες και η καφέ για 10 ώρες. Όλα τα οροπέδια που προέκυψαν δίνουν ισοδύναμη δόση μεγαλύτερη από 100Gy και δε λαμβάνονται υπ' όψιν.



Σχ. 3.15: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των  $n_{tl}(ac)$  και  $g_{tl}(cd)$  από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβολία 140Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 1 ώρα, η ρόζ για 3 ώρες, η κίτρινη για 3 ώρες και η κυανή για 7 ώρες. Όλα τα οροπέδια που προέκυψαν δίνουν ισοδύναμη δόση μεγαλύτερη από 100Gy και δε λαμβάνονται υπ' όψιν.

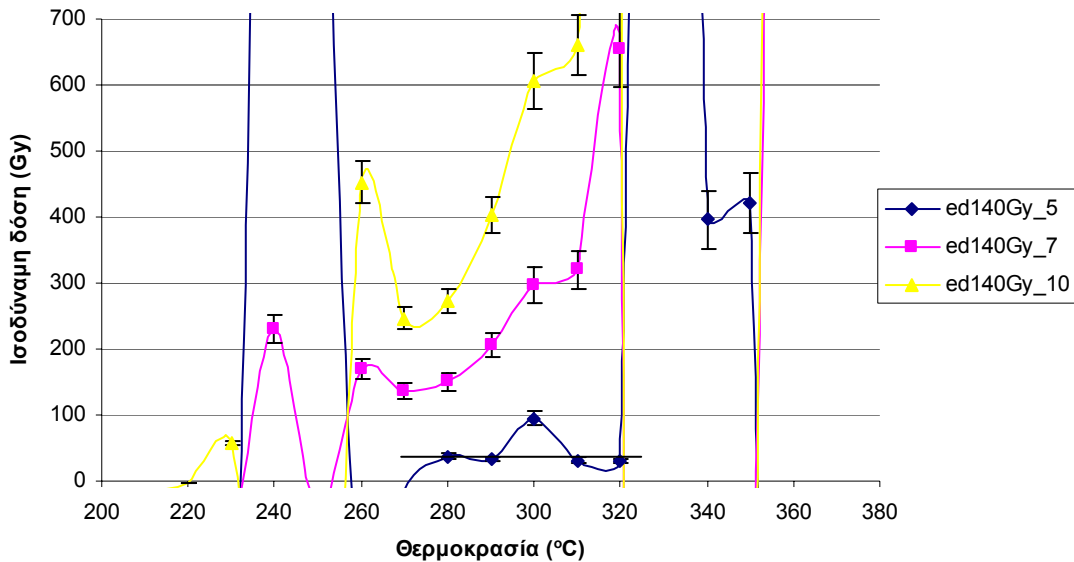


Σχ. 3.16: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των ntl(ac) και gtl(cd) από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβολία 455Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 1 ώρα, η ρόζ για 3 ώρες, η κίτρινη για 5 ώρες, η μοβ για 7 ώρες, η καφέ για 10 ώρες και η πράσινη με 20 ώρες έκθεσης στο φως. Όλα τα οροπέδια που προέκυψαν δίνουν ισοδύναμη δόση μεγαλύτερη από 100Gy και δε λαμβάνονται υπ' όψιν.

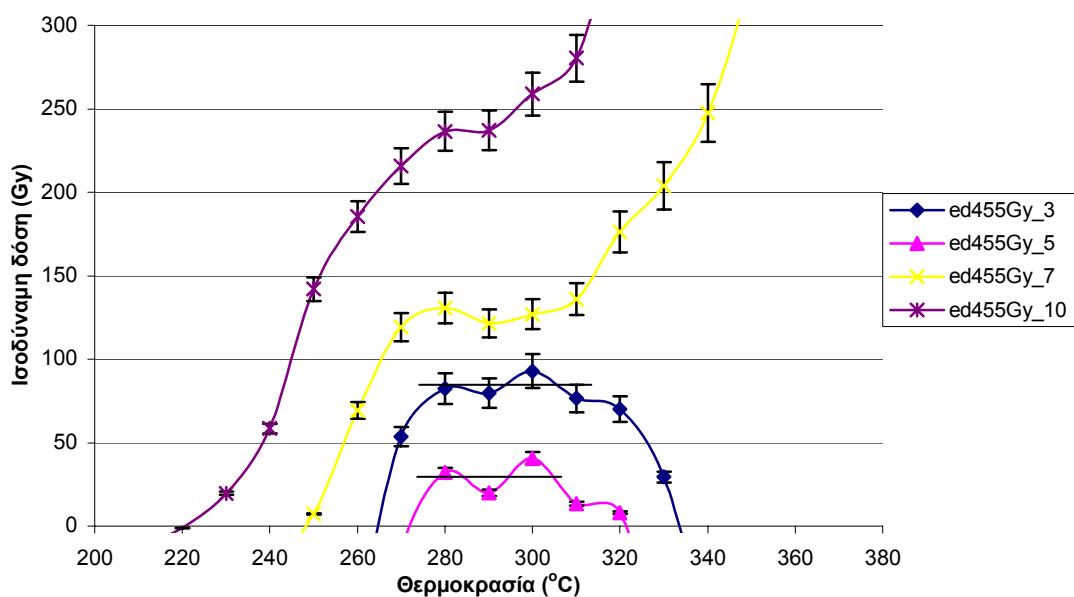


Σχ. 3.17: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των ntl(ac) και gtl(cd) από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με

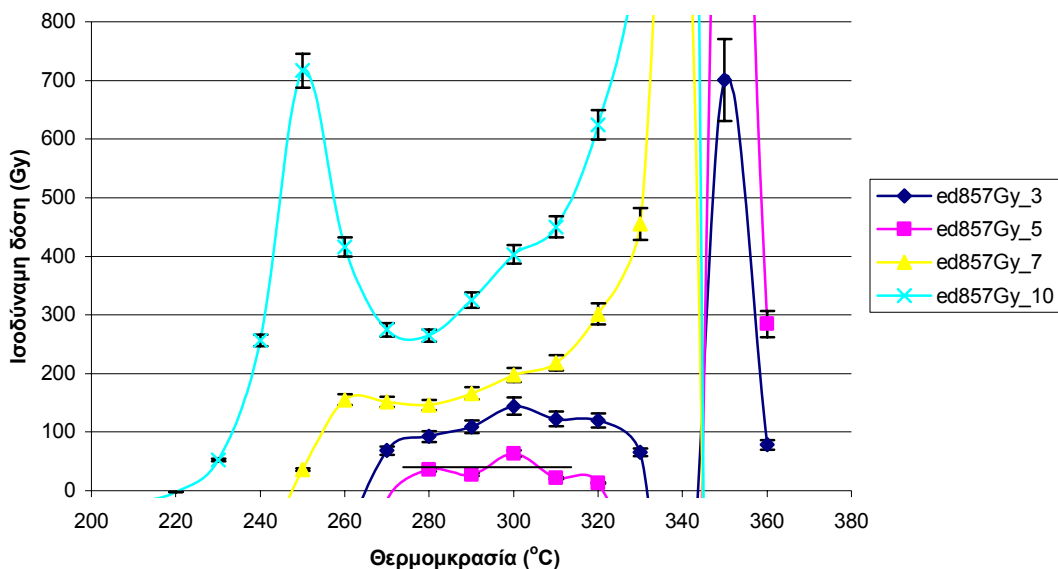
βήτα ακτινοβόληση 857Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 1 ώρα, η ρόζ για 3 ώρες, η κίτρινη για 5 ώρες, η κυανή για 7 ώρες και η μοβ για 10 ώρες. Όλα τα οροπέδια που προέκυψαν δίνουν ισοδύναμη δόση μεγαλύτερη από 100Gy και δε λαμβάνονται υπ' όψιν.



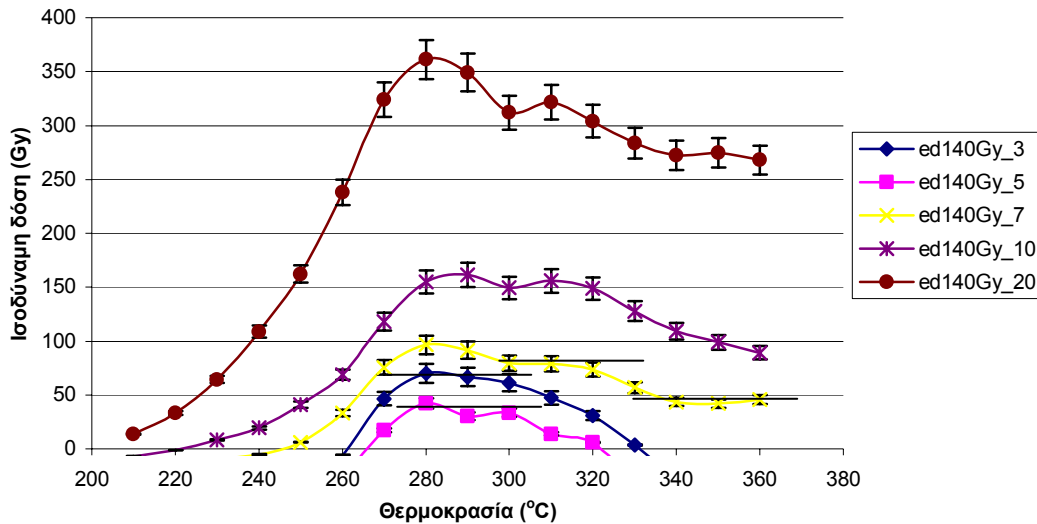
Σχ. 3.18: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των ntl(ac) και gtl(acde) από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 140Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 5 ωρών, η ρόζ για 7 ώρες και η κίτρινη για 10 ώρες. Το οροπέδιο που σημειώνεται προκύπτει για 5 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Η ισοδύναμη δόση που προκύπτει για την περιοχή 280-320°C, είναι  $36,96 \pm 1,61$ Gy.



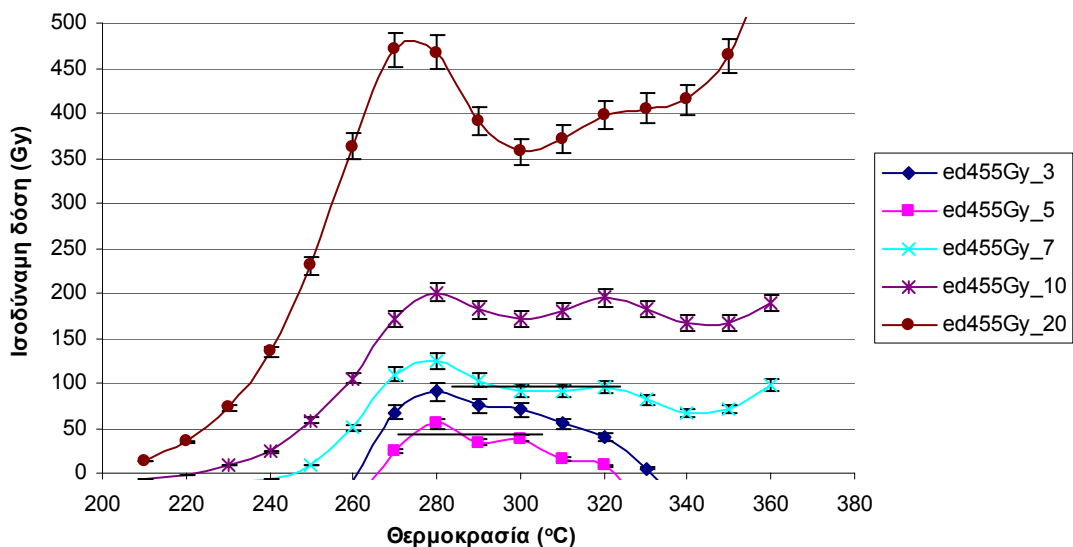
Σχ. 3.19: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των  $nI(ac)$  και  $gI(acde)$  από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 455Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 3 ωρών, η ρόζ για 5 ώρες, η κίτρινη για 7 ώρες, η μοβ για 10 ώρες. Το καλύτερο οροπέδιο προκύπτει για 3 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Η ισοδύναμη δόση που προκύπτει για την περιοχή 280-310°C, είναι  $82,9 \pm 3,5 Gy$ . Το οροπέδιο για τις 5 ώρες έκθεσης δίνει για την περιοχή 280-300°C ισοδύναμη δόση  $30,9 \pm 10,5 Gy$ .



Σχ. 3.20: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των  $nI(ac)$  και  $gI(acde)$  από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 857Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 3 ωρών, η ρόζ για 5 ώρες, η κίτρινη για 7 ώρες, η κυανή για 10 ώρες. Το οροπέδιο που σημειώνεται προκύπτει για 5 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Η ισοδύναμη δόση που προκύπτει για την περιοχή 280-310°C, είναι  $28,2 \pm 7,2 Gy$ .



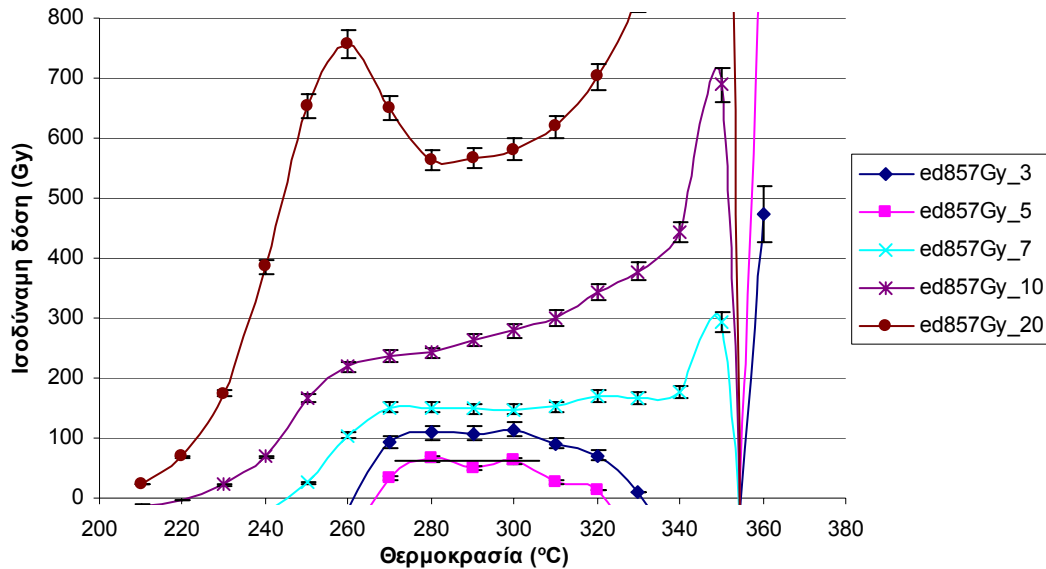
Σχ. 3.21: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των  $n_{tl}(bd)$  και  $g_{tl}(de)$  από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβολήση 140Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 3 ωρών, η ρόζ για 5 ώρες, η κίτρινη για 7 ώρες, η μοβ 10 ώρες και η καφέ 20 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Το καλύτερο οροπέδιο προκύπτει για 5 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Η ισοδύναμη δόση που προκύπτει για την περιοχή 280-300°C, είναι  $35,3 \pm 6,2$ Gy. Το οροπέδιο για τις 3 ώρες έκθεσης δίνει για την περιοχή 280-300°C ισοδύναμη δόση  $65,9 \pm 4,4$ Gy. Τα οροπέδια για τις 7 ώρες έκθεσης δίνουν για την περιοχή 300-320°C ισοδύναμη δόση  $77,3 \pm 3,4$ Gy και για την περιοχή 340-360°C ισοδύναμη δόση  $43,9 \pm 1,9$ Gy.



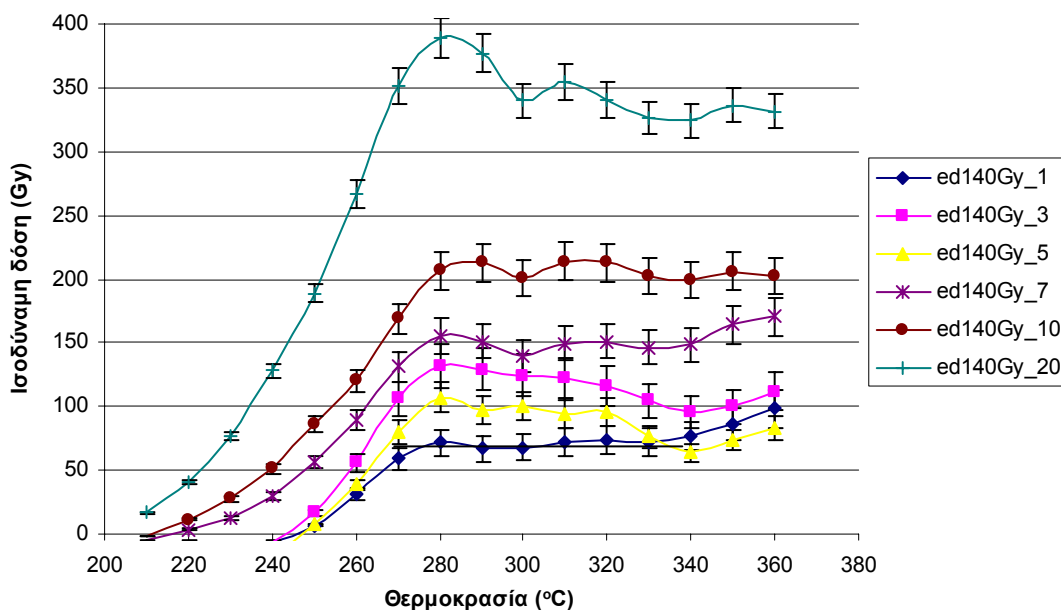
Σχ. 3.22: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των  $n_{tl}(bd)$  και  $g_{tl}(de)$  από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβολήση 455Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 3 ωρών, η ρόζ για 5 ώρες,



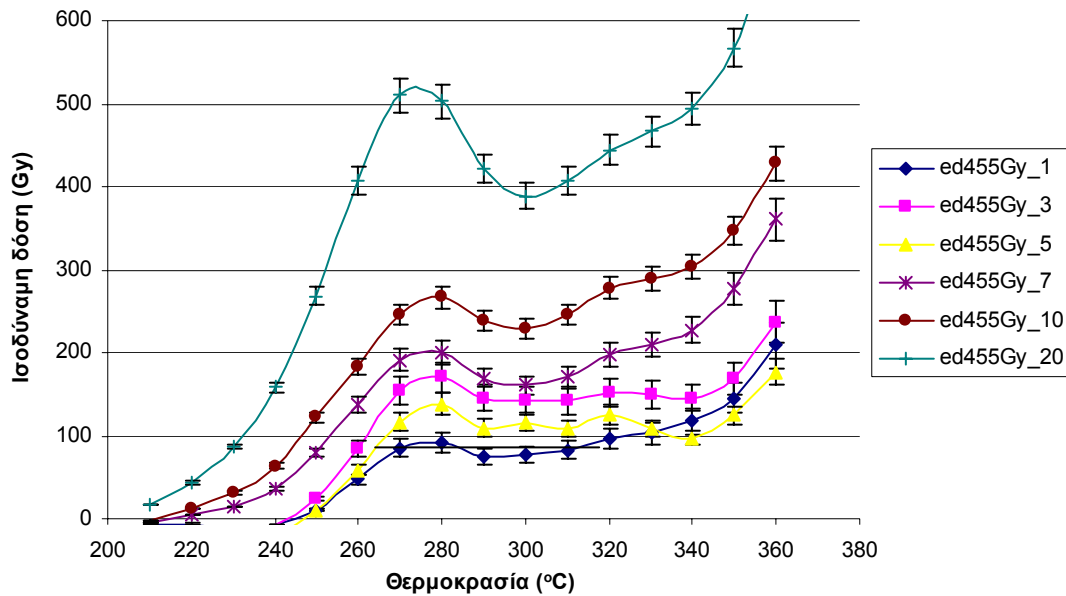
η κυανή για 7ώρες, η μοβ 10 ώρες, και η καφέ 20 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Το καλύτερο οροπέδιο προκύπτει για 5 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Η ισοδύναμη δόση που προκύπτει για την περιοχή 280-300°C, είναι  $42,3 \pm 7,1 \text{Gy}$ . Το οροπέδιο για τις 7 ώρες έκθεσης δίνει για την περιοχή 290-320°C ισοδύναμη δόση  $95,2 \pm 2,8 \text{Gy}$ .



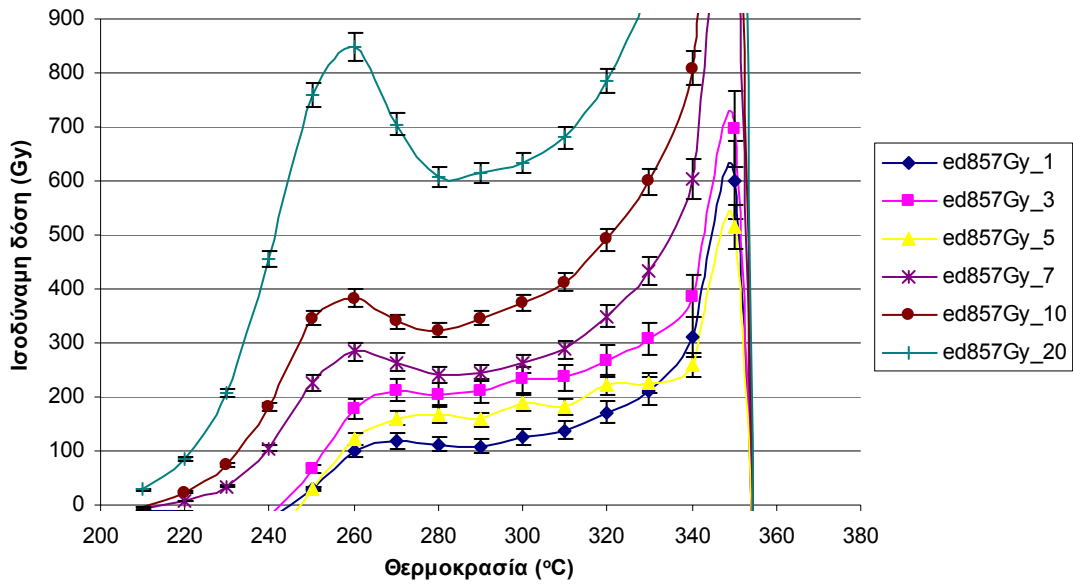
Σχ. 3.23: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των  $nI(bd)$  και  $gI(de)$  από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβολία 857Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 3 ωρών, η ρόζ για 5 ώρες, η κυανή για 7ώρες, η μοβ 10 ώρες και η καφέ 20 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Το καλύτερο οροπέδιο προκύπτει για 5 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Η ισοδύναμη δόση που προκύπτει για την περιοχή 280-300°C, είναι  $59,2 \pm 8,8 \text{Gy}$ .



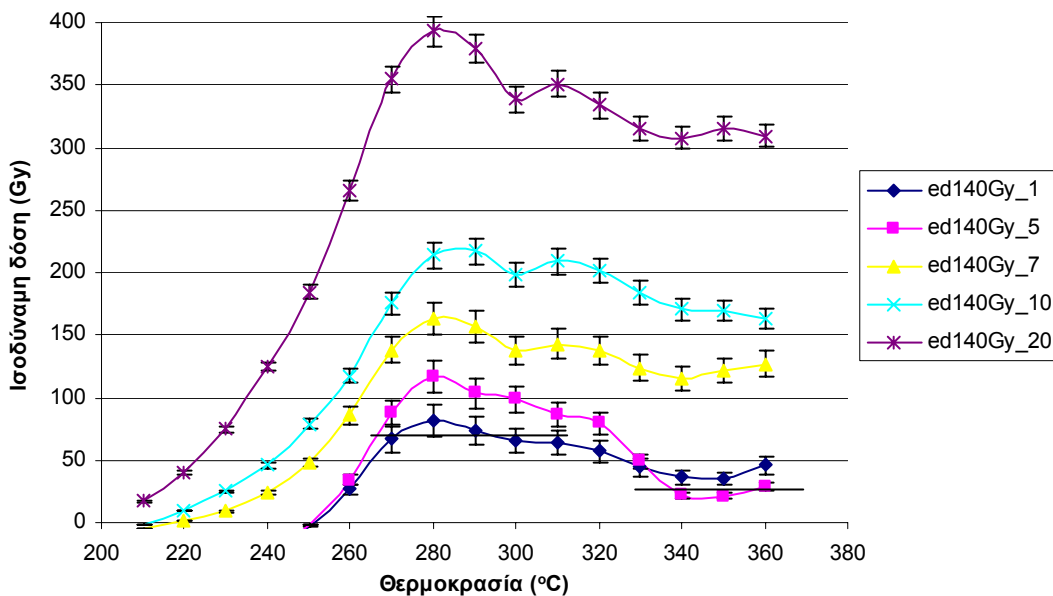
Σχ. 3.24: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των ntl(bd) και gtl(c) από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 140Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 1 ωρών, η ρόζ για 3 ώρες, η κίτρινη για 5 ώρες, η μοβ 7 ώρες, η καφέ 10 ώρες και η πράσινη 20 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Το καλύτερο οροπέδιο προκύπτει για 1 ώρα έκθεσης στον ήλιο. Η ισοδύναμη δόση που προκύπτει για την περιοχή 280-330°C, είναι  $70,7 \pm 1,1 \text{Gy}$ .



Σχ. 3.25: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των ntl(bd) και gtl(c) από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 455Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 1 ωρών, η ρόζ για 3 ώρες, η κίτρινη για 5 ώρες, η μοβ 7 ώρες, η καφέ 10 ώρες και η πράσινη 20 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Το καλύτερο οροπέδιο προκύπτει για 1 ώρα έκθεσης στον ήλιο. Η ισοδύναμη δόση που προκύπτει για την περιοχή 270-310°C, είναι  $82,7 \pm 3,1 \text{Gy}$ .

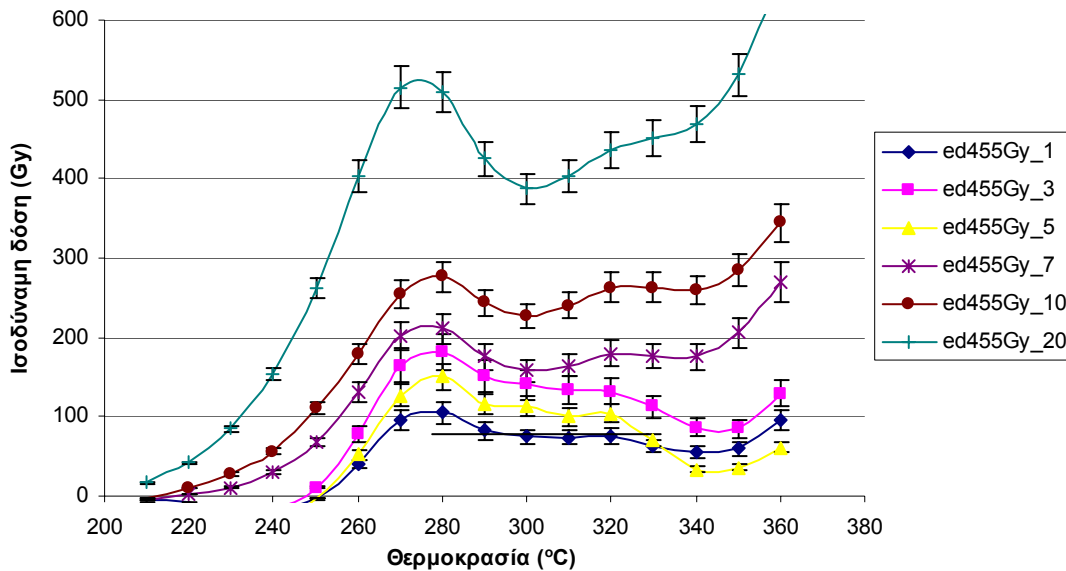


Σχ. 3.26: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των ntl(bd) και gtl(c) από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβολία 857Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 1 ωρών, η ρόζ για 3 ώρες, η κίτρινη για 5 ώρες, η μοβ 7 ώρες, η καφέ 10 ώρες και η πράσινη 20 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Όλα τα οροπέδια που προέκυψαν δίνουν ισοδύναμη δόση μεγαλύτερη από 100Gy και δε λαμβάνονται υπ' όψιν.

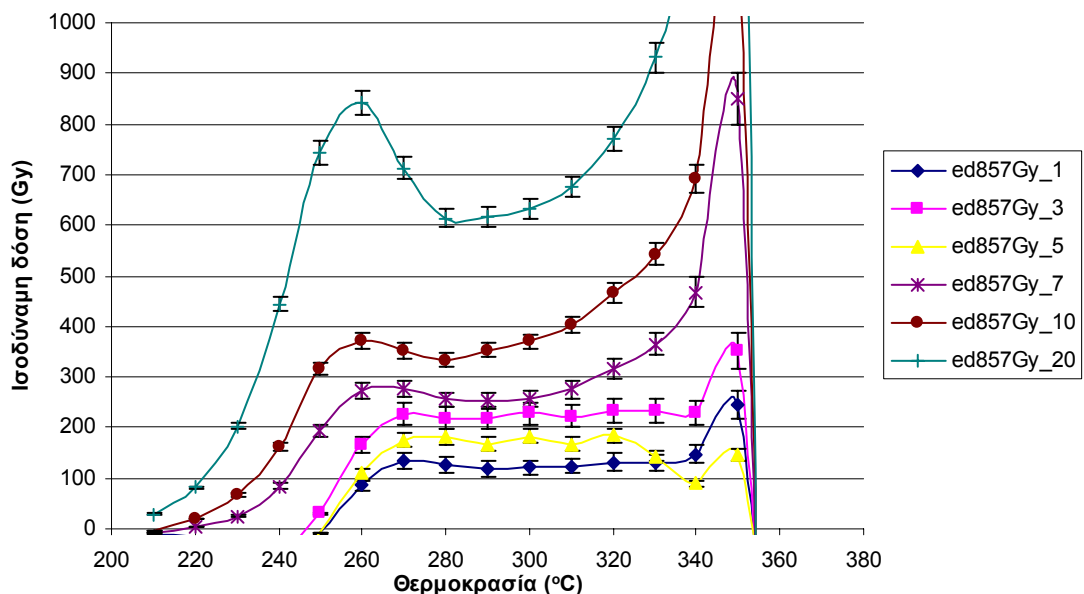


Σχ. 3.27: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των ntl(bd) και gtl(cd) από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβολία 140Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 1 ωρών, η ρόζ για 5 ώρες, η κίτρινη για 7 ώρες, η κυανή για 10ώρες και η μοβ 20 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Το καλύτερο

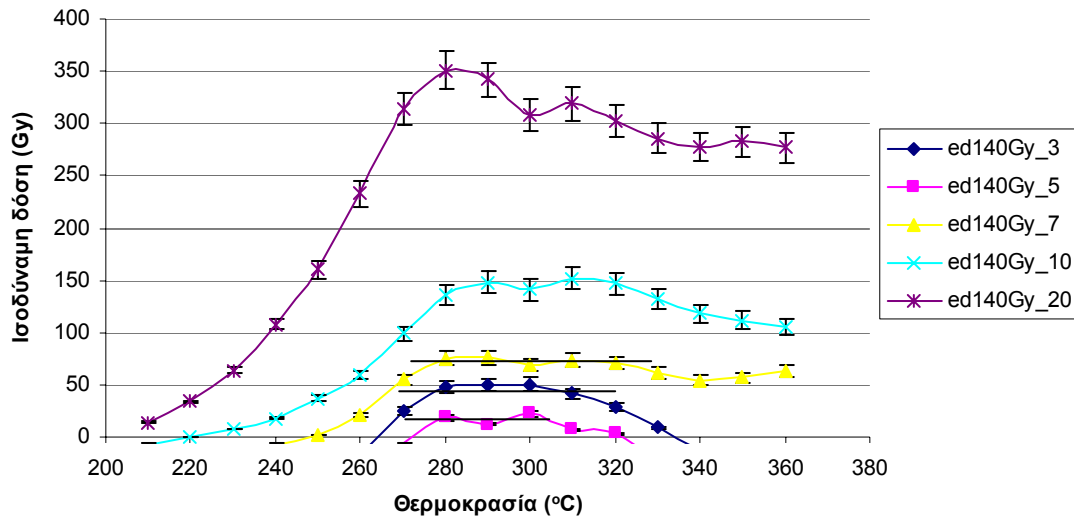
οροπέδιο προκύπτει για 1 ώρα έκθεσης στον ήλιο. Η ισοδύναμη δόση που προκύπτει για την περιοχή 270-310°C, είναι  $70,1 \pm 3,2 \text{ Gy}$ . Το οροπέδιο για τις 5 ώρες έκθεσης δίνει για την περιοχή 340-360°C ισοδύναμη δόση  $23,9 \pm 4,1 \text{ Gy}$ .



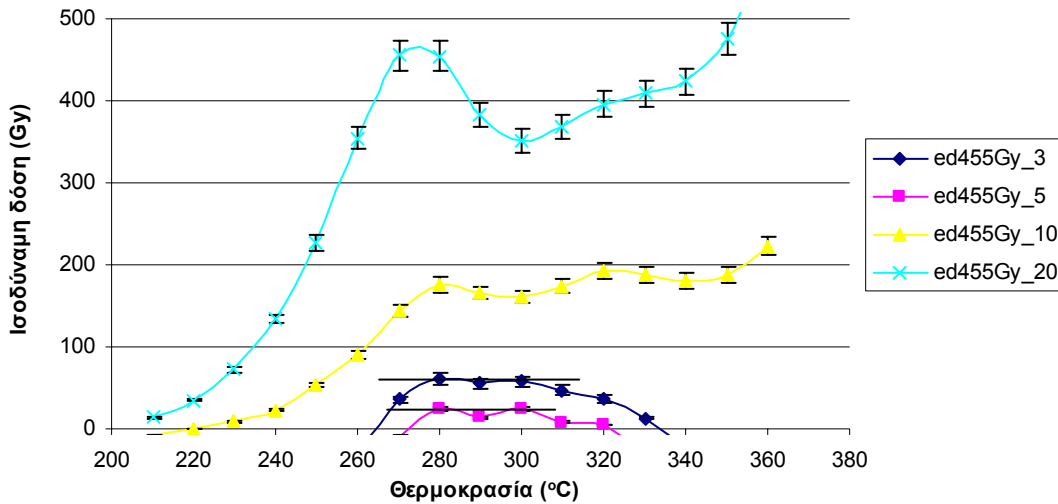
Σχ. 3.28: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των ntl(bd) και gtl(cd) από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβολία 455Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 1 ώρα, η ρόζ για 3 ώρες, η κίτρινη για 5 ώρες, η μοβ 7 ώρες, η καφέ 10 ώρες και η πράσινη 20 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Το καλύτερο οροπέδιο προκύπτει για 1 ώρα έκθεσης στον ήλιο. Η ισοδύναμη δόση που προκύπτει για την περιοχή 290-320°C, είναι  $76,3 \pm 1,9 \text{ Gy}$ .



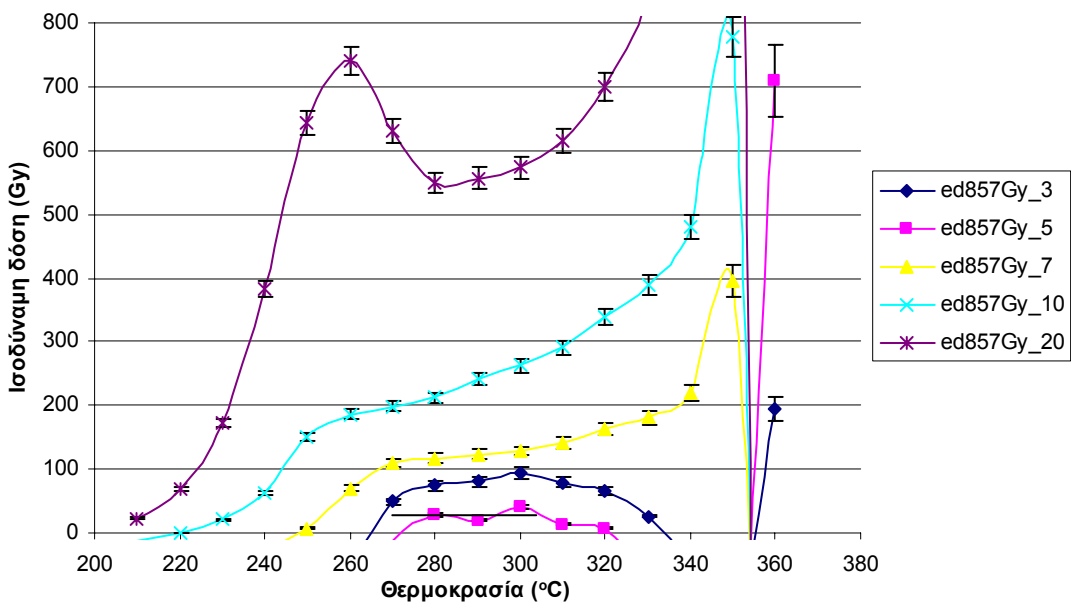
Σχ. 3.29: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των ntl(bd) και gtl(cd) από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 857Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 1 ωρών, η ρόζ για 3 ώρες, η κίτρινη για 5 ώρες, η μοβ 7 ώρες, η καφέ 10 ώρες και η πράσινη 20 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Όλα τα οροπέδια που προέκυψαν δίνουν ισοδύναμη δόση μεγαλύτερη από 100Gy και δε λαμβάνονται υπ' όψιν.



Σχ. 3.30: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των ntl(bd) και gtl(acde) από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 140Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 3 ωρών, η ρόζ για 5 ώρες, η κίτρινη για 7 ώρες, η κυανή για 10ώρες και η μοβ 20 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Το καλύτερο οροπέδιο προκύπτει για 7 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Η ισοδύναμη δόση που προκύπτει για την περιοχή 280-320°C, είναι  $72,9 \pm 1,3$  Gy. Το οροπέδιο για τις 3 ώρες έκθεσης δίνει για την περιοχή 280-300°C ισοδύναμη δόση  $49,2 \pm 1,0$  Gy. Το οροπέδιο για τις 5 ώρες έκθεσης δίνει για την περιοχή 280-300°C ισοδύναμη δόση  $17,7 \pm 2,9$  Gy.

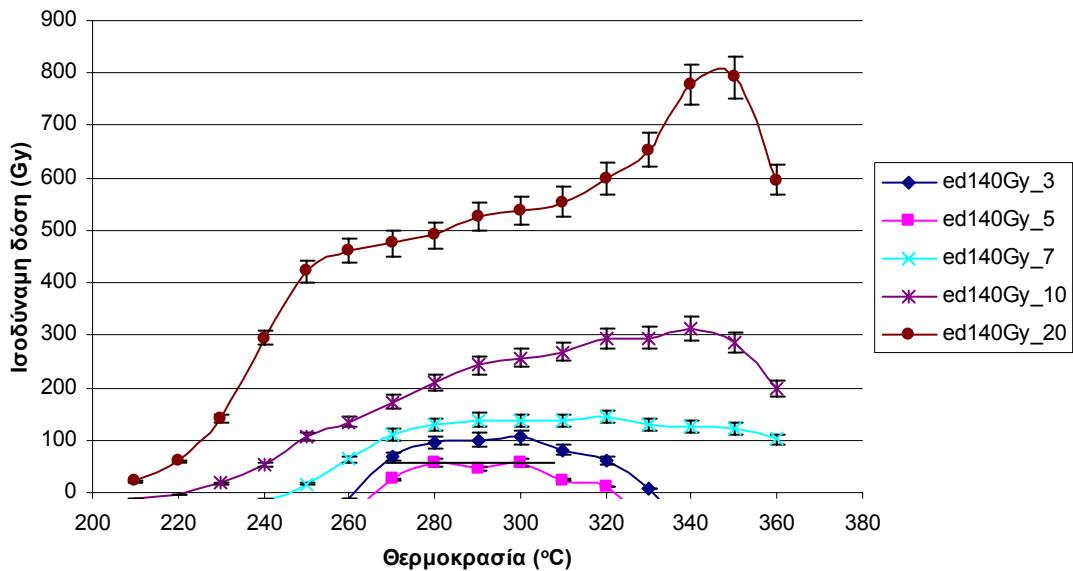


Σχ. 3.31: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των ntl(bd) και gtl(acde) από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 455Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 3 ωρών, η ρόζ για 5 ώρες, η κίτρινη για 10 ώρες και η κυανή για 20ώρες έκθεσης στον ήλιο. Το καλύτερο οροπέδιο προκύπτει για 3 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Η ισοδύναμη δόση που προκύπτει για την περιοχή 280-300°C, είναι  $58,3 \pm 1,6$ Gy. Το οροπέδιο για τις 5 ώρες έκθεσης δίνει για την περιοχή 280-300°C ισοδύναμη δόση  $21,0 \pm 3,6$ Gy.

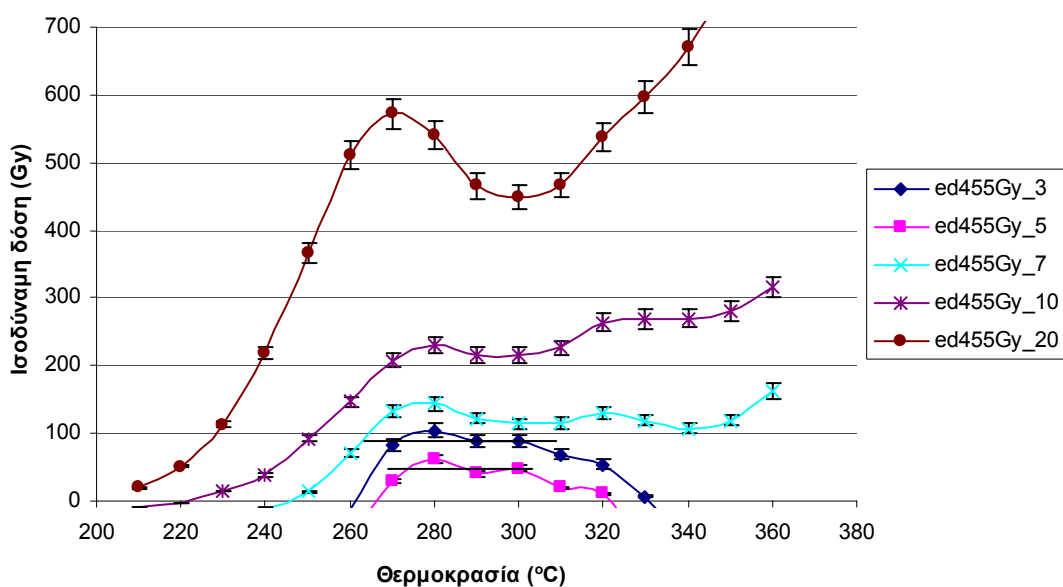


Σχ. 3.32: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των ntl(bd) και gtl(acde) από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 857Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 3 ωρών, η ρόζ για 5 ώρες, η κίτρινη για 7 ώρες, η κυανή για 10ώρες και η μοβ 20 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Το

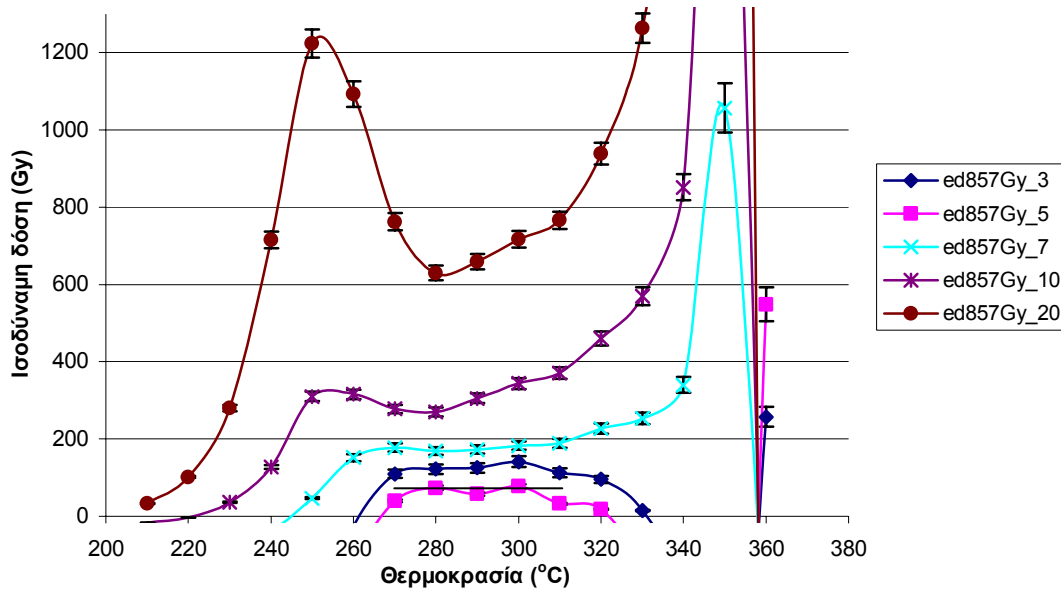
οροπέδιο προκύπτει για 5 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Η ισοδύναμη δόση που προκύπτει για την περιοχή 280-300°C, είναι  $30,1 \pm 6,1 \text{ Gy}$ .



Σχ. 3.33: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των  $nI(abcd)$  και  $gI(de)$  από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 140Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 3 ωρών, η ρόζ για 5 ώρες, η κυανή για 7 ώρες, η μοβ 10 ώρες και η καφέ 20 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Το οροπέδιο προκύπτει για 5 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Η ισοδύναμη δόση που προκύπτει για την περιοχή 280-300°C, είναι  $53,6 \pm 3,9 \text{ Gy}$ .

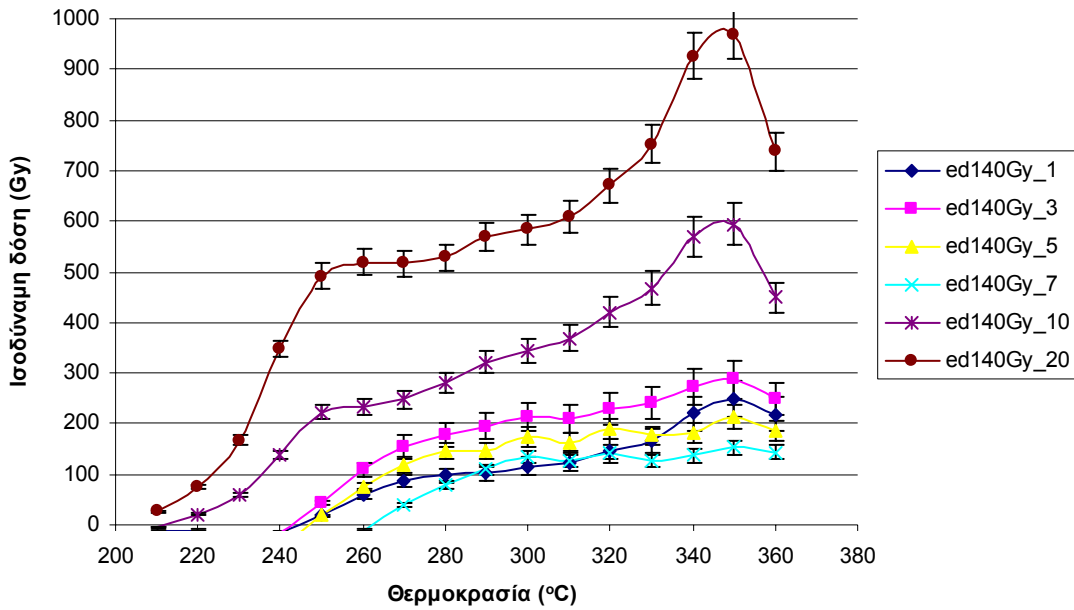


Σχ. 3.34: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των  $ntl(abcd)$  και  $gtl(de)$  από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 455Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 3 ωρών, η ρόζ για 5 ώρες, η κυανή για 7 ώρες, η μοβ 10 ώρες και η καφέ 20 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Το καλύτερο οροπέδιο προκύπτει για 3 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Η ισοδύναμη δόση που προκύπτει για την περιοχή 270-300°C, είναι  $91,0 \pm 4,8$ Gy. Το οροπέδιο για τις 5 ώρες έκθεσης δίνει για την περιοχή 280-300°C ισοδύναμη δόση  $50,6 \pm 6,6$ Gy.

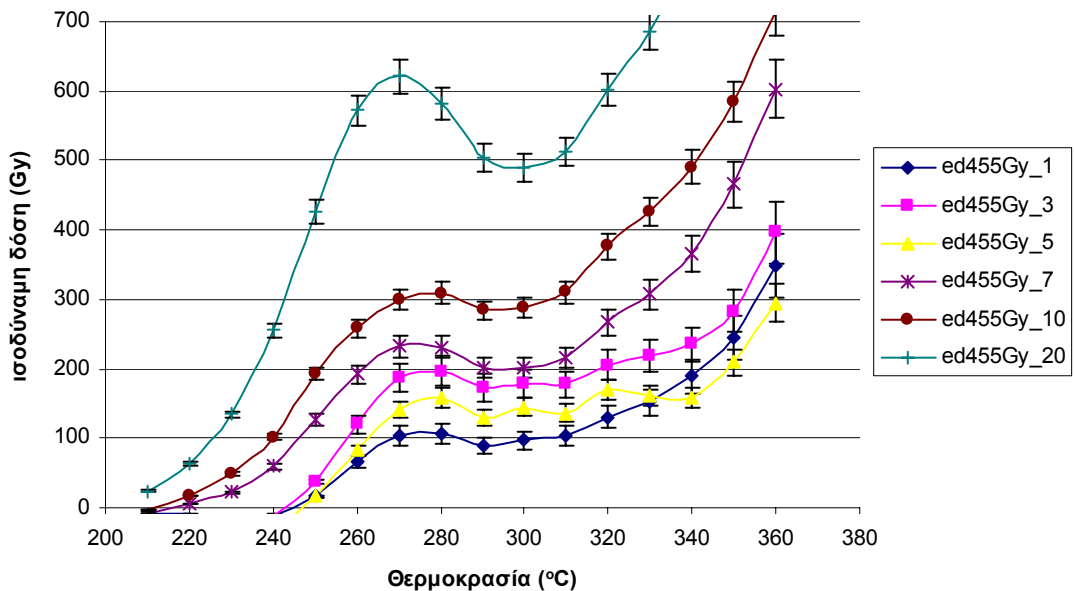


Σχ. 3.35: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των  $ntl(abcd)$  και  $gtl(de)$  από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 857Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 3 ωρών, η ρόζ για 5 ώρες, η κυανή για 7 ώρες, η μοβ 10 ώρες και η καφέ 20 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Το οροπέδιο προκύπτει για 5 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Η ισοδύναμη δόση που προκύπτει για την περιοχή 280-300°C, είναι  $69,3 \pm 6,1$ Gy.



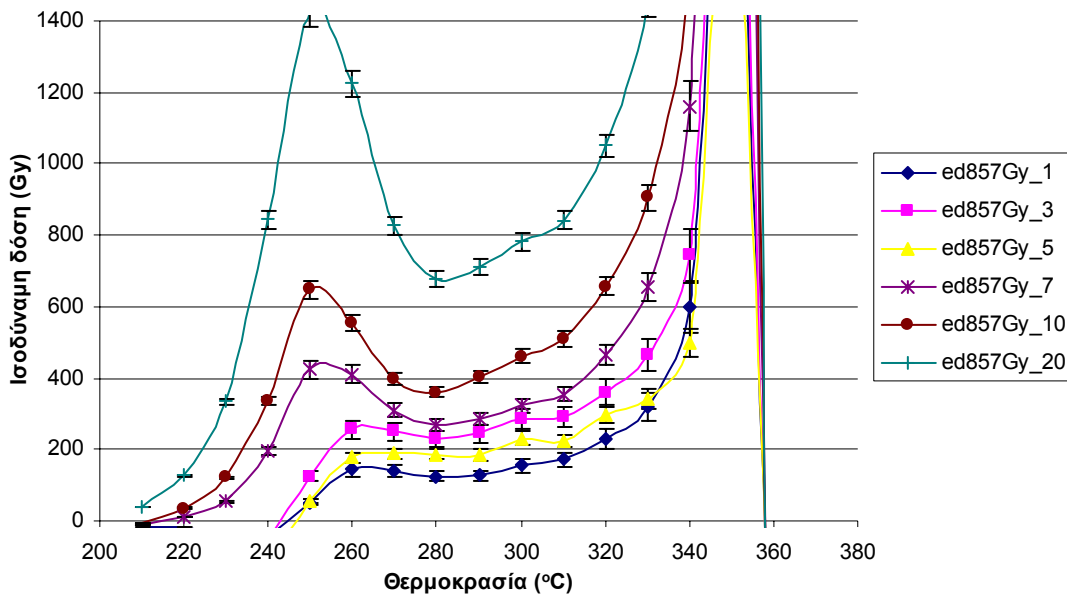


Σχ. 3.36: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των  $nI(a,b,c,d)$  και  $gI(c)$  από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 140Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 1 ωρών, η ρόζ για 3 ώρες, η κίτρινη για 5 ώρες, η κυανή για 7 ώρες, η μοβ 10 ώρες και η καφέ 20 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Όλα τα οροπέδια που προέκυψαν δίνουν ισοδύναμη δόση μεγαλύτερη από 100Gy και δε λαμβάνονται υπ' όψιν.

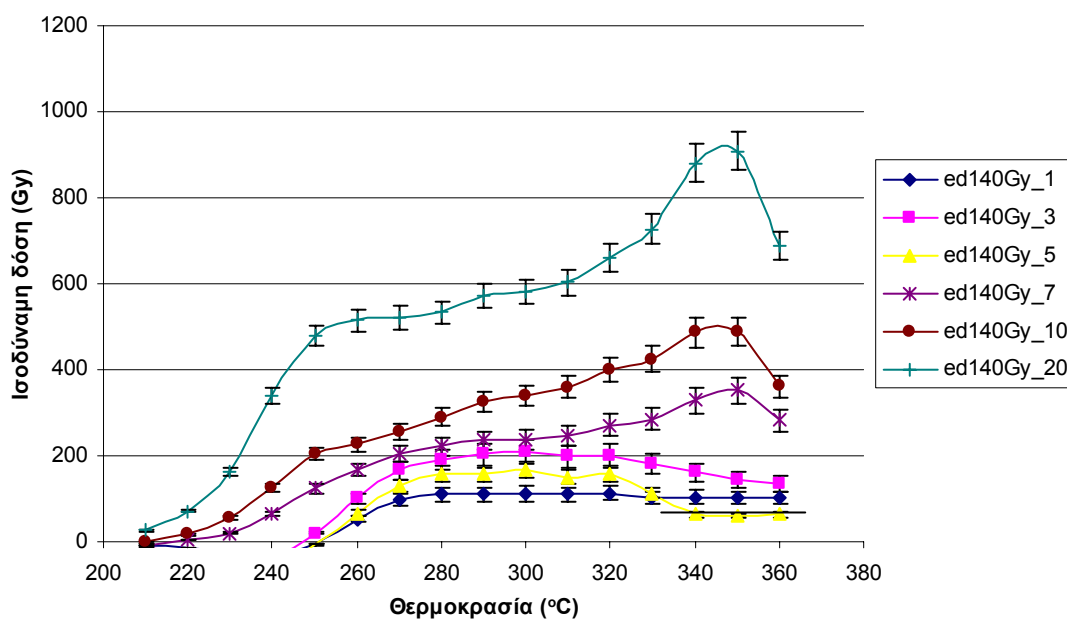


Σχ. 3.37: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των  $nI(a,b,c,d)$  και  $gI(c)$  από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 455Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 1 ωρών, η ρόζ για 3 ώρες, η κίτρινη για 5 ώρες, η μοβ 7 ώρες, η καφέ 10 ώρες και η πράσινη για 20 ώρες έκθεσης στον

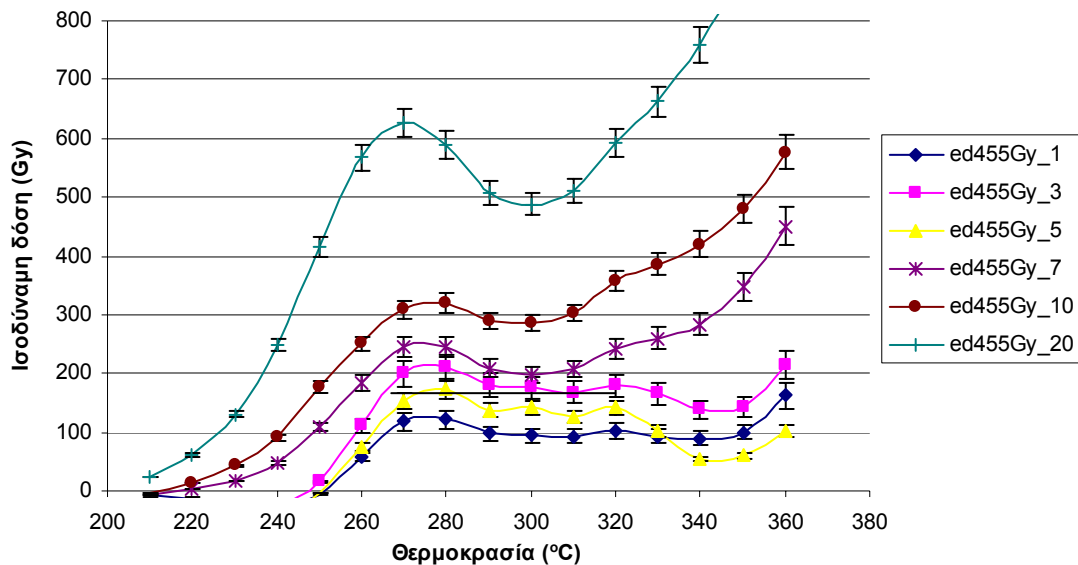
ήλιο. Όλα τα οροπέδια που προέκυψαν δίνουν ισοδύναμη δόση μεγαλύτερη από 100Gy και δε λαμβάνονται υπ' όψιν.



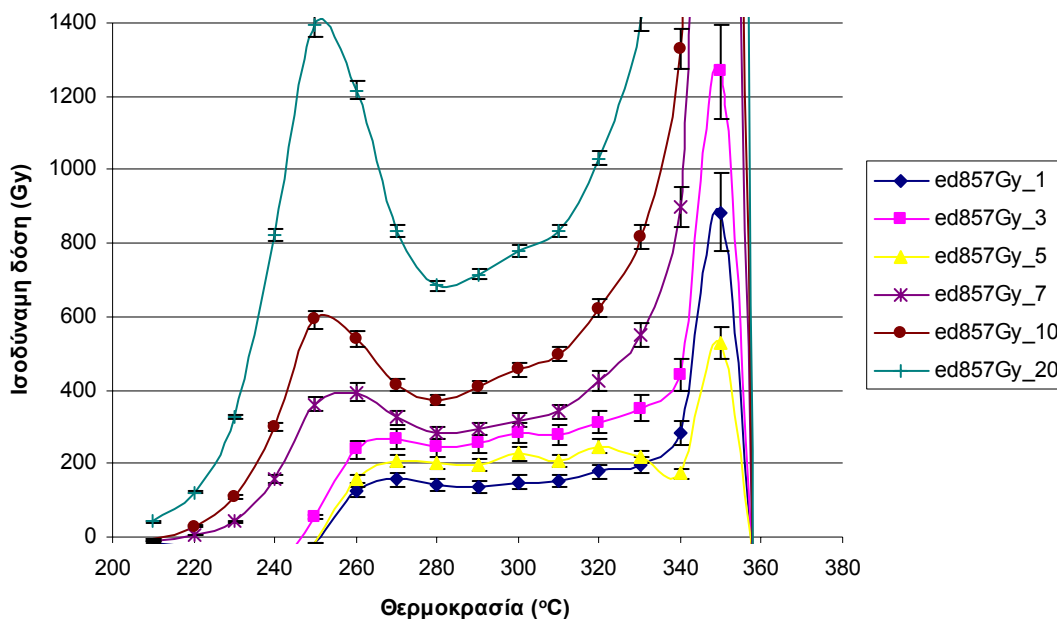
Σχ. 3.38: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των ntl(abcd) και gtl(c) από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 857Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 1 ωρών, η ρόζ για 3 ώρες, η κίτρινη για 5 ώρες, η μοβ 7 ώρες, η καφέ 10 ώρες και η πράσινη για 20 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Όλα τα οροπέδια που προέκυψαν δίνουν ισοδύναμη δόση μεγαλύτερη από 100Gy και δε λαμβάνονται υπ' όψιν.



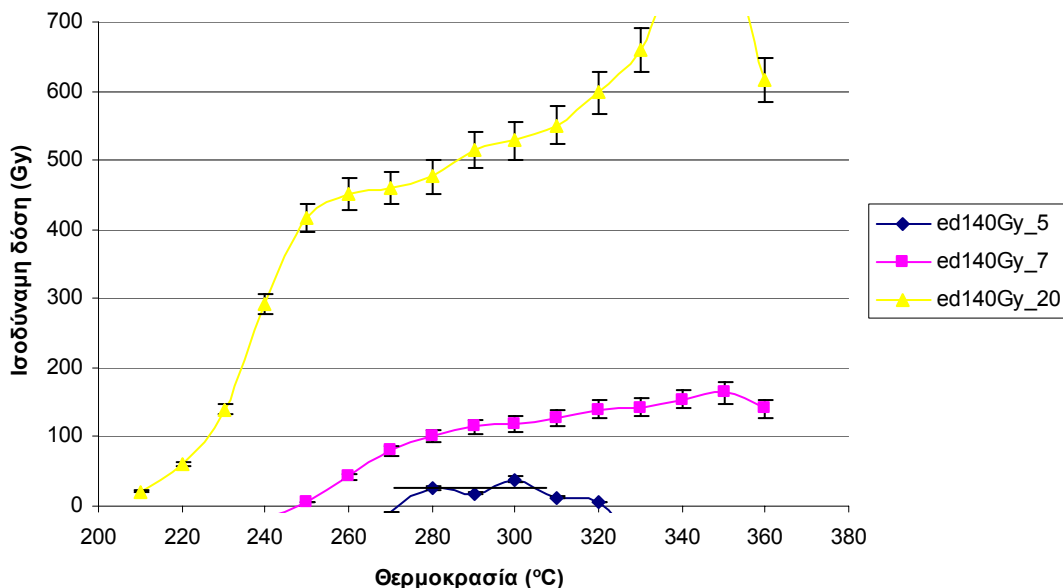
Σχ. 3.39: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των  $nI(abcd)$  και  $gI(cd)$  από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 140Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 1 ωρών, η ρόζ για 3 ώρες, η κίτρινη για 5 ώρες, η μοβ 7 ώρες, η καφέ 10 ώρες και η πράσινη για 20 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Το οροπέδιο προκύπτει για 5 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Η ισοδύναμη δόση που προκύπτει για την περιοχή 340-360°C, είναι  $62,5 \pm 1,0 \text{Gy}$ .



Σχ. 3.40: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των  $nI(abcd)$  και  $gI(cd)$  από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 455Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 1 ωρών, η ρόζ για 3 ώρες, η κίτρινη για 5 ώρες, η μοβ 7 ώρες, η καφέ 10 ώρες, η πράσινη για 20 ώρες και η γαλάζια 40 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Όλα τα οροπέδια που προέκυψαν δίνουν ισοδύναμη δόση μεγαλύτερη από 100Gy και δε λαμβάνονται υπ' όψιν.

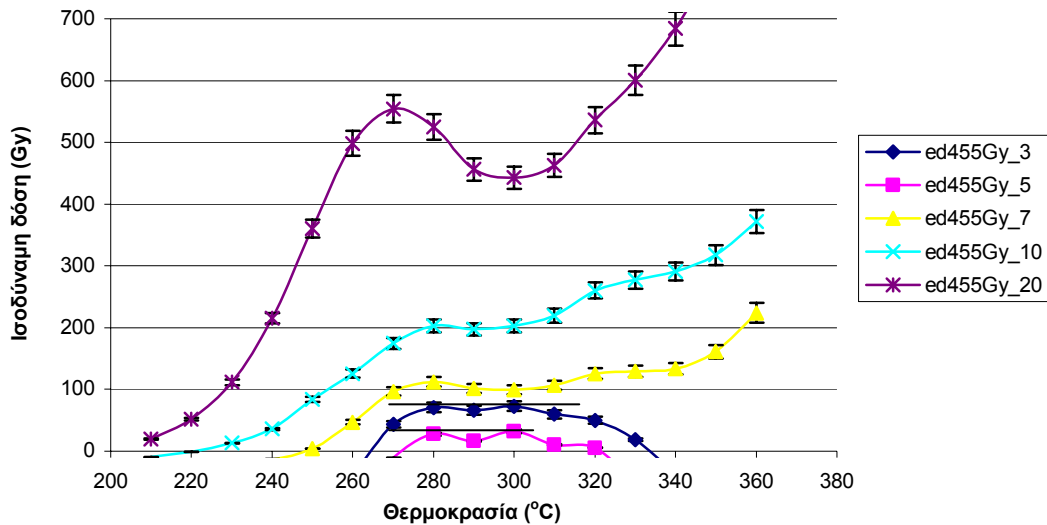


Σχ. 3.41: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των  $nI(abcd)$  και  $gI(cd)$  από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβολία 857Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 1 ωρών, η ρόζ για 3 ώρες, η κίτρινη για 5 ώρες, η μοβ 7 ώρες, η καφέ 10 ώρες, η πράσινη για 20 ώρες και η γαλάζια 40 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Όλα τα οροπέδια που προέκυψαν δίνουν ισοδύναμη δόση μεγαλύτερη από 100Gy και δε λαμβάνονται υπ' όψιν.

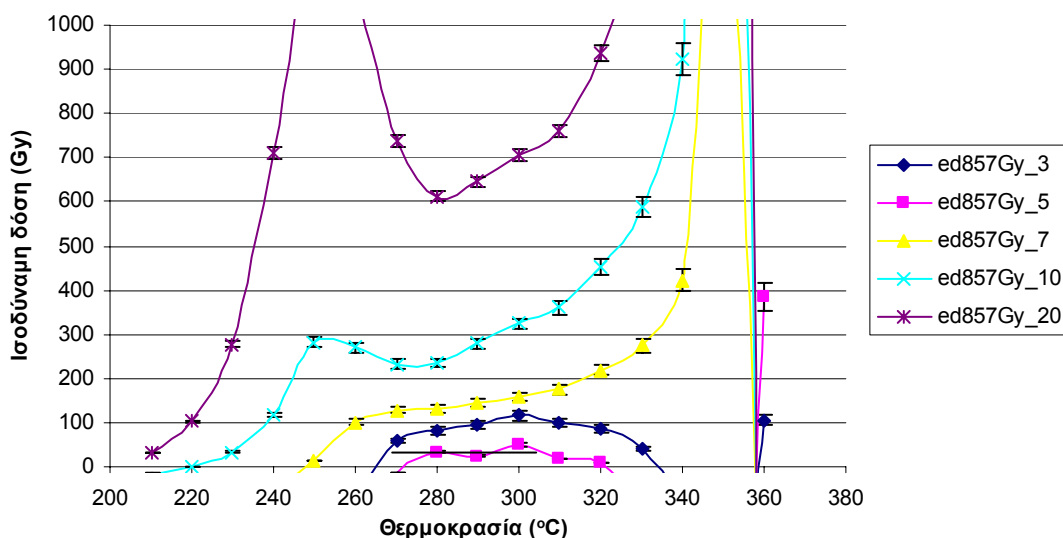


Σχ. 3.42: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των  $nI(abcd)$  και  $gI(acde)$  από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβολία 140Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 5 ωρών, η ρόζ για 7

ώρες και η κίτρινη για 20 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Το οροπέδιο προκύπτει για 5 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Η ισοδύναμη δόση που προκύπτει για την περιοχή 280-300°C, είναι  $27,3 \pm 4,7 \text{ Gy}$ .



Σχ. 3.43: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των  $nI(a,b,c,d)$  και  $gI(a,c,d,e)$  από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 455Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 3 ωρών, η ρόζ για 5 ώρες, η κίτρινη για 7 ώρες, η κυανή για 10 ώρες και η μοβ για 20 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Το καλύτερο οροπέδιο προκύπτει για 3 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Η ισοδύναμη δόση που προκύπτει για την περιοχή 280-310°C, είναι  $67,5 \pm 2,9 \text{ Gy}$ . Το οροπέδιο για τις 5 ώρες έκθεσης δίνει για την περιοχή 280-300°C ισοδύναμη δόση  $25,4 \pm 4,6 \text{ Gy}$ .



Σχ. 3.44: Προσδιορισμός της ισοδύναμης δόσης με το οροπέδιο δόσεων δείγματος RHO-103, με τη χρήση των  $nI(a,b,c,d)$  και  $gI(a,c,d,e)$  από σχ. 3.4 και σχ. 3.5 αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βήτα ακτινοβόληση 857Gy. Η μπλε γραμμή αφορά έκθεση στον ήλιο 3 ωρών, η ρόζ για 5

ώρες, η κίτρινη για 7 ώρες, η κυανή για 10 ώρες και η μοβ για 20 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Το οροπέδιο προκύπτει για 5 ώρες έκθεσης στον ήλιο. Η ισοδύναμη δόση που προκύπτει για την περιοχή 280-300°C, είναι 35,5±8,1Gy.

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά σε πίνακα τα πλατό που προέκυψαν στους αντίστοιχους χρόνους έκθεσης και οι ισοδύναμες δόσεις.

Πίνακας 3.3: Προτεινόμενα πλατό δείγματος RHO-103 – Ισοδύναμη δόση.

Χρόνος έκθεσης (ώρες)	Ισοδύναμη δόση (Gy)	Θερμοκρασία (°C)	Χρόνος έκθεσης (ώρες)	Ισοδύναμη δόση (Gy)	Θερμοκρασία (°C)
1	70,7±1,1	280-330	7	43,9±1,9	340-360
	82,7±3,1	270-310		95,2±2,8	290-300
	70,1±3,2	270-310		72,9±1,3	280-320
	76,3±1,9	290-320			
3	82,9±3,5	280-310			
	65,9±4,4	280-300			
	49,2±1,0	280-300			
	58,3±1,6	280-300			
	91,0±4,8	270-300			
	67,5±2,9	280-310			
5	78,1±1,7	270-320			
	55,2±7,9	270-300			
	81,6±8,4	280-300			
	36,96±1,61	280-320			
	30,9±10,5	280-300			
	28,2±7,2	280-310			
	35,3±6,2	280-300			
	42,3±7,1	280-300			

	59,2±8,8	280-300
	23,9±4,1	340-360
	17,7±2,9	280-300
	21,0±3,6	280-300
	30,1±6,1	280-300
	53,6±3,9	280-300
	50,6±6,6	280-300
	69,3±6,1	280-300
	62,5±1,0	340-360
	27,3±4,7	280-300
	25,4±4,6	280-300
	35,5±8,1	280-300

Παρατηρούμε ότι τα περισσότερα πλατό προκύπτουν για 5 ώρες έκθεσης του δείγματος, όμως οι δόσεις που προκύπτουν είναι πολύ μεγάλες για ασβεστόλιθο, ακόμα και η 17,7±2,9Gy η οποία έχει και μεγάλο σφάλμα (~17%), γεγονός που δείχνει ότι το δείγμα βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού και είναι αδύνατη η χρονολόγησή του.

*Χημική ανάλυση δείγματος RHO-103 – Υπολογισμός ετήσιων δόσεων*

Η ανάλυση του δείγματος έγινε με νετρονική ενεργοποίηση (οι αναλύσεις έγιναν στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος» από τον Δρα. Κιλίκογλου), μετρητή άλφα σωματιδίων και ακτίνες Χ φθορισμού.

Πίνακας 3.4: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων α, β και γ ετήσιων δόσεων του δείγματος RHO-103 ανά μέθοδο ανάλυσης (Liritzis and Kokkoris, 1992; Kokkoris and Liritzis, 1997).

Νετρονική Ενεργοποίηση		Μετρητής Άλφα Σωματιδίων (nfU=15,68±0,73 nfTh=3,95±0,16 (total))		Μετρητής Άλφα Σωματιδίων (εξισώσεις Rhodes (2002))	
U=0	a <sub>1</sub> =0	U=0,90±0,05	a <sub>2</sub> =2,57±0,15	U=0,82±0,04	a <sub>3</sub> =2,34±0,12

Th=0    b <sub>1</sub> =0	Th=0,025±0,086    b <sub>2</sub> =0,17±0,02	Th=0,03±0,06    b <sub>3</sub> =0,16±0,02
K=0%    g <sub>1</sub> =0	K=0,042±0,028%    g <sub>2</sub> =0,11±0,01	K=0,042±0,028%    g <sub>3</sub> =0,10±0,01
Rb=0	Rb=8±7,74	Rb=8±7,74

Οι μονάδες μέτρησης των ιχνοστοιχείων είναι σε ppm, οι ετήσιες δόσεις σε Gy/ky και των παραγόντων κανονικοποίησης για το μετρητή άλφα σωματιδίων counts/ppm.

Οι τιμές των K και Rb για τον υπολογισμό των ετήσιων δόσεων με το μετρητή σωματιδίων άλφα μετρήθηκαν με τον αναλυτή ακτίνων-χ φθορισμού.

**1.1 ( 4 ) RHO-104** (υλικό: αλάβαστρο, προέλευση: τοίχος αλαβάστρινου δωματίου, κωδικός VT7)

Η ανάλυση ακτίνων Χ διάθλασης (XRD) έδειξε ότι το δείγμα αποτελείται από 100% ασβεστόλιθο (School of GeoSciences, Geology and Geophysics, Grant Institute, University of Edinburgh).

*Προετοιμασία δείγματος RHO-104 – Προσδιορισμός ισοδύναμης δόσης*

Η προετοιμασία των δειγμάτων έγινε στο Εργαστήριο Αρχαιομετρίας, στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου στη Ρόδο. Αρχικά το δείγμα, η πλευρά δειγματοληψίας του πέτρινου δείγματος, εμβαπτίζεται σε αραιό υδροχλωρικό οξύ (HCl) με σκοπό την αφαίρεση οργανικών αλάτων και των επιδράσεων του καιρού στο πέτρωμα. Αφαιρούμε στρώμα των 50μm, περίπου, βυθίζοντας το δείγμα πέντε φορές στο οξύ για λίγα δευτερόλεπτα (Liritzis et al., 1997). Κατόπιν, με 50 ελαφρά περάσματα με λίμα στην επιφάνεια δειγματοληψίας πήραμε τη σκόνη προς χρονολόγηση, περίπου 200μm<sup>16</sup>. Το λιμάρισμα γίνεται προς μία φορά (όχι μπρος-πίσω) και όσο

<sup>16</sup> έχει μετρηθεί με μικρόμετρο ακριβείας σε επίπεδα δείγματα ότι 50 περάσματα με τη λίμα ισοδυναμούν με 200μm περίπου.



πιο απαλά γίνεται για να μην έχουμε θέρμανση του δείγματος και στη συνέχεια κατά τη μέτρηση, ψεύτικες ενδείξεις φωτός (τριβοφωταύγεια). Στη σκόνη που συγκεντρώθηκε έγιναν μετρήσεις θερμοφωταύγειας στο Εργαστήριο Ατομικής και Πυρηνικής Φυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου στη Θεσσαλονίκη.

Η σκόνη που προέκυψε τοποθετείται σε δισκία, των οποίων η επιφάνεια καλύφθηκε με λεπτό στρώμα από λάδι σιλικόνης.

Για τη λεύκανση (bleaching) χρησιμοποιήθηκε σκόνη από το εσωτερικό της πέτρας και για το πείραμα εξομοιωτής ηλιακού φωτός (Hönle Sol 2).

Το πρωτόκολλο που χρησιμοποιήθηκε (πρωτόκολλο προσθετικών δόσεων πολλαπλών δισκίων – multiple aliquot additive dose procedure) για τους υπολογισμούς της ισοδύναμης δόσης παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 1ο, παράγραφος 3. Το δείγμα δεν έδωσε ολική δόση και είναι αδύνατη η χρονολόγησή του.

#### Χημική ανάλυση δείγματος RHO-104 – Υπολογισμός ετήσιων δόσεων

Η ανάλυση του δείγματος έγινε με νετρονική ενεργοποίηση (οι αναλύσεις έγιναν στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος» από τον Δρα. Κιλίκογλου), μετρητή άλφα σωματιδίων και ακτίνες Χ φθορισμού. Τα αποτελέσματα και οι υπολογισμοί για τις ετήσιες α, β και γ δόσης, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.5: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων α, β και γ ετήσιων δόσεων του δείγματος RHO-104, ανά μέθοδο ανάλυσης (Liritzis and Kokkoris, 1992; Kokkoris and Liritzis, 1997).

Νετρονική Ενεργοποίηση	Μετρητής Άλφα Σωματιδίων ( $nfU=15,68\pm 0,73$ $nfTh=3,95\pm 0,16$ (total))	Μετρητής Άλφα Σωματιδίων (εξιιώσεις Rhodes (2002))
U=0,691 $a_1=1,96\pm 0,10$	U=0,86±0,04 $a_2=2,47\pm 0,12$	U=0,80±0,04 $a_3=2,56\pm 0,12$
Th=0 $b_1=0,10\pm 0,01$	Th=0,05±0,04 $b_2=0,13\pm 0,01$	Th=0,04±0,03 $b_3=0,13\pm 0,01$
K=0% $g_1=0,077\pm 0,04$	K=0% $g_2=0,098\pm 0,005$	K=0% $g_3=0,109\pm 0,005$
Rb=0	Rb=0	Rb=0

Οι μονάδες μέτρησης των ιχνοστοιχείων είναι σε ppm, οι ετήσιες δόσεις σε Gy/ky και των παραγόντων κανονικοποίησης για το μετρητή άλφα σωματιδίων counts/ppm.

Οι τιμές των K και Rb για τον υπολογισμό των ετήσιων δόσεων με το μετρητή σωματιδίων άλφα μετρήθηκαν με τον αναλυτή ακτίνων-χ φθορισμού.

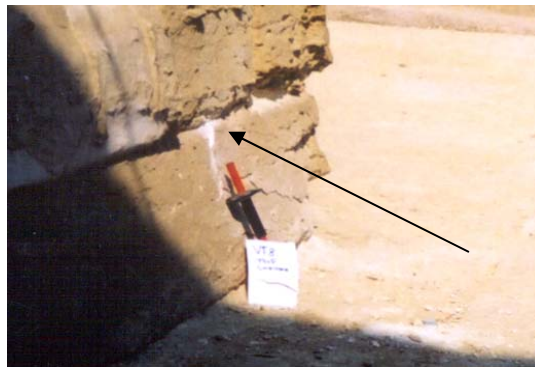
**1.1 ( 5 ) RHO-105** (υλικό: ασβεστόλιθος, προέλευση: οροφή ναού, κωδικός VT8)



Εικ. 3.3: Άποψη από την οροφή ναού στην περιοχή «Ναός της Κοιλιάδας», στη Γκίζα, στο σύμπλεγμα της Πυραμίδας του Χεφρίνου. Το σημείο δειγματοληψίας του δείγματος με κωδικό RHO-105 σημειώνεται με κύκλο.



Εικ. 3.4: Δείγμα RHO-105, Ναός της Κοιλιάδας, Γκίζα, στο σύμπλεγμα της Πυραμίδας του Χεφρίνου: Γενική άποψη της οροφής του ναού από όπου πήραμε το δείγμα. Φαίνεται επίσης και το σημείο δειγματοληψίας.



Εικ. 3.5: Δείγμα RHO-105, Ναός της Κοιλιάδας, Γκίζα, στο σύμπλεγμα της Πυραμίδας του Χεφρίνου, ασβεστόλιθος: Το δείγμα προέρχεται από τον εξωτερικό τοίχο στην οροφή ναού στην περιοχή, στην ένωση των δύο μεγάλιθων, όπως δείχνει το βέλος. IV<sup>η</sup> Δυναστεία (2740-2650π.Χ.) (Hassan, 1932-53; Reisner, 1955; Lehner, 1997).



Εικ. 3.6: Δείγμα RHO-105, Ναός της Κοιλιάδας, Γκίζα, στο σύμπλεγμα της Πυραμίδας του Χεφρίνου, ασβεστόλιθος: Το δείγμα από άλλη οπτική γωνία. Το σημείο δειγματοληψίας σημειώνεται με βέλος.

#### *Προετοιμασία δείγματος RHO-105 – Προσδιορισμός ισοδύναμης δόσης*

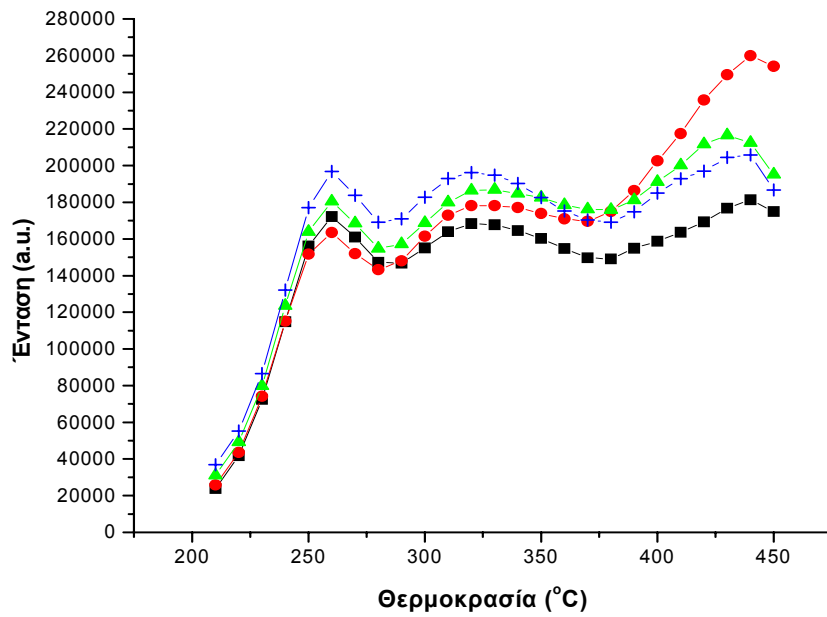
Η προετοιμασία των δειγμάτων έγινε στο Εργαστήριο Αρχαιομετρίας, στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου στη Ρόδο. Αρχικά το δείγμα, η πλευρά δειγματοληψίας του πέτρινου δείγματος, εμβαπτίζεται σε αραιό υδροχλωρικό οξύ (HCl) με σκοπό την αφαίρεση οργανικών αλάτων και των επιδράσεων του καιρού στο πέτρωμα. Αφαιρούμε στρώμα των 50μm, περίπου, βυθίζοντας το δείγμα πέντε φορές στο οξύ για λίγα δευτερόλεπτα (Liritzis et al., 1997). Κατόπιν, με 50 ελαφρά περάσματα με λίμα στην επιφάνεια δειγματοληψίας πήραμε τη σκόνη προς χρονολόγηση, περίπου 200μm<sup>17</sup>. Το λιμάρισμα γίνεται προς μία φορά (όχι μπρος-πίσω) και όσο πιο απαλά γίνεται για να μην έχουμε θέρμανση του δείγματος και στη συνέχεια κατά τη μέτρηση, φεύκτες ενδείξεις φωτός (τριβοφωταύγεια). Στη σκόνη που συγκεντρώθηκε έγιναν μετρήσεις θερμοφωταύγειας με τη μέθοδο προσθετικών δόσεων πολλαπλών δισκίων (multiple aliquot additive dose procedure), (κεφάλαιο 1ο, παράγραφος 3) στο Εργαστήριο Ατομικής και Πυρηνικής Φυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου στη Θεσσαλονίκη.

Η σκόνη που προέκυψε τοποθετείται σε δισκία, των οποίων η επιφάνεια καλύφθηκε με λεπτό στρώμα από λάδι σιλικόνης. Μετρήθηκαν 3 φυσικές φωτοκαμπύλες. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις πρόσθετες εργαστηριακές δόσεις των 26Gy, 53Gy και 79Gy (σχ. 3.45).

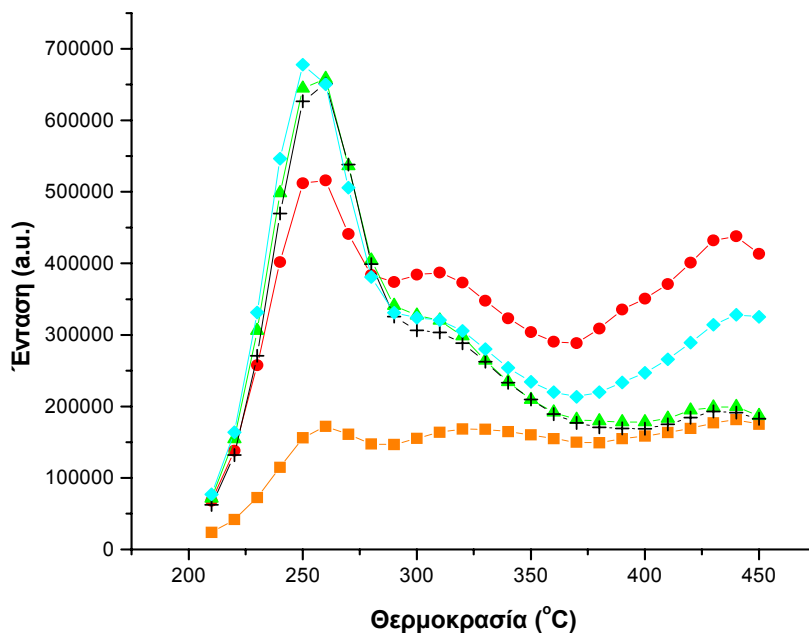
Για τη λεύκανση (bleaching) χρησιμοποιήθηκε σκόνη από το εσωτερικό της πέτρας και για το πείραμα εξομοιωτής ηλιακού φωτός (Hönle Sol 2). Οι χρόνοι έκθεσης που αντιστοιχούν σε έκθεση σε φυσικό φως, είναι 1 ώρα, 5 ώρες, 15 ώρες και 30 ώρες. Πήραμε δύο μετρήσεις για κάθε χρόνο έκθεσης και υπολογίσαμε το μέσο όρο (σχ. 3.46).

Μετά από κάθε μέτρηση κάναμε μέτρηση υποστρώματος και μέτρηση κανονικοποίησης με ακτινοβολία του δείγματος με 3Gy.

<sup>17</sup> έχει μετρηθεί με μικρόμετρο ακριβείας σε επίπεδα δείγματα ότι 50 περάσματα με τη λίμα ισοδυναμούν με 200μm περίπου.



Σχ. 3.45: Φωτοκαμπύλες φυσικής θερμοφωταύγειας και (φυσικής θερμοφωταύγειας + εργαστηρικής βήτα δόσης) για το δείγμα RHO-105. Με τη μαύρη γραμμή είναι ο μέσος όρος των τριών φυσικών φωτοκαμπύλων, με την κόκκινη η (φυσική+26Gy), με την πράσινη η (φυσική+53Gy) και με τη μπλε η (φυσική+79Gy).



Σχ. 3.46: Φωτοκαμπύλες γεωλογικής θερμοφωταύγειας και λεύκανσης του δείγματος RHO-105. Με πορτοκαλί είναι ο μέσος όρος των γεωλογικών φωτοκαμπύλων, με κόκκινο το αποτέλεσμα της έκθεσης του δείγματος για 1 ώρα στο φως του Sol2, με πράσινο η έκθεση των 5 ωρών, με

μαύρο η έκθεση των 15 ωρών και με κυανή η έκθεση των 30 ωρών. Η κάθε από τις παραπάνω καμπύλες είναι ο μέσος όρος των αντίστοιχων μετρήσεων.

Από το σχήμα 3.45 προκύπτει ότι μόνο στην περιοχή 300 - 360°C θα μπορούσε να δουλέψει η μέθοδος. Από τους 370°C και πάνω οι φωτοκαμπύλες των ntl+β δε συμπεριφέρονται ομαλά. Στο σχήμα 3.46 φαίνεται το πρόβλημα στη λεύκανση, όπου φαίνεται ότι δεν υπάρχει το φαινόμενο αφού οι φωτοκαμπύλες έκθεσης σε φως είναι πιο ψηλά από τη γεωλογική. Έτσι το δείγμα δεν έδωσε ολική δόση και είναι αδύνατη η χρονολόγησή του.

*Χημική ανάλυση δείγματος RHO-105 – Υπολογισμός ετήσιων δόσεων*

Η ανάλυση του δείγματος έγινε με μετρητή άλφα σωματιδίων και ακτίνες X φθορισμού. Οι ετήσιες δόσεις μετρήθηκαν και με μετρητή Γερμανίου και με πλαστικό σπινθηριστή. Τα αποτελέσματα και οι ετήσιες δόσεις που προέκυψαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.6: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων α, β και γ ετήσεων δόσεων του δείγματος RHO-105, ανά μέθοδο ανάλυσης (Liritzis and Kokkoris, 1992; Kokkoris and Liritzis, 1997).

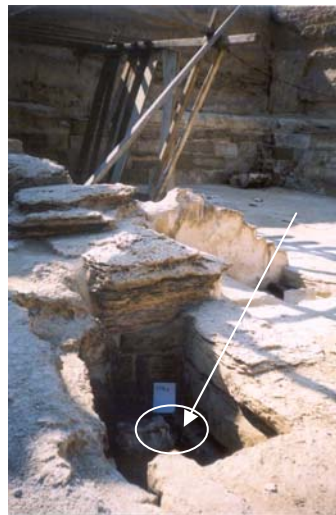
Μετρητής Γερμανίου	Πλαστικός Σπινθηριστής	Μετρητής Άλφα Σωματιδίων (nfU=15,68±0,73 nfTh=3,95±0,16 (total))	Μετρητής Άλφα Σωματιδίων (εξιιώσεις Rhodes (2002))
a <sub>1</sub> =3,21±0,45		U=1,09±0,04    a <sub>3</sub> =3,14±0,12	U=1,11±0,06    a <sub>4</sub> =3,42±0,19
b <sub>1</sub> =0,24±0,04	b <sub>2</sub> =0,19±0,02	Th=0,07±0,06    b <sub>3</sub> =0,19±0,02	Th=0,38±0,12    b <sub>4</sub> =0,20±0,02
g <sub>1</sub> =0,16±0,02		K=0,03±0,028 %    g <sub>3</sub> =0,13±0,01	K=0,03±0,028    g <sub>4</sub> =0,15±0,01
		Rb=0	Rb=0

Οι μονάδες μέτρησης των ιχνοστοιχείων είναι σε ppm, οι ετήσιες δόσεις σε Gy/ky και των παραγόντων κανονικοποίησης για το μετρητή άλφα σωματιδίων counts/ppm.

Οι τιμές των K και Rb για τον υπολογισμό των ετήσιων δόσεων με το μετρητή σωματιδίων άλφα μετρήθηκαν με τον αναλυτή ακτίνων-χ φθορισμού.

**1.1 ( 6 ) RHO-106** (υλικό: ασβεστόλιθος, προέλευση: εσωτερικός τοίχος οροφής ναού, κωδικός: VT9a)

Η ανάλυση ακτίνων Χ διάθλασης (XRD), έδειξε ότι το δείγμα αποτελείται από 100% ασβεστόλιθο (School of GeoSciences, Geology and Geophysics, Grand Institute, University of Edinburgh).



Εικ. 3.7: Άποψη από την οροφή ναού στην περιοχή Ναός της Κοιλιάδας στην Γκίζα στο σύμπλεγμα της Πυραμίδας του Χεφρίνου, από όπου πήραμε τα δείγματα RHO-106 και RHO-107. Το ακριβές σημείο δειγματοληψίας σημειώνεται με βέλος.



Εικ. 3.8: Δείγματα RHO-106, RHO-107, Ναός της Κοιλιάδας, Γκίζα, στο σύμπλεγμα της Πυραμίδας του Χεφρίνου, αλάβαστρο: Τα δείγματα είναι από το ίδιο σημείο από εσωτερικό τοίχο στην οροφή ναού στην περιοχή. Όταν βρέθηκαν ήταν καλυμμένα με άμμο. Το σημείο δειγματοληψίας είναι στην ένωση με γρανίτη, όπως δείχνει το βέλος. IV<sup>η</sup> Δυναστεία (2740-2650π.Χ.) (Hassan, 1932-53; Reisner, 1955; Lehner, 1997).

### *Προετοιμασία δείγματος RHO-106 – Προσδιορισμός ισοδύναμης δόσης*

Η προετοιμασία των δειγμάτων έγινε στο Εργαστήριο Αρχαιομετρίας, στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου στη Ρόδο. Αρχικά το δείγμα, η πλευρά δειγματοληψίας του πέτρινου δείγματος, εμβαπτίζεται σε αραιό υδροχλωρικό οξύ (HCl) με σκοπό την αφαίρεση οργανικών αλάτων και των επιδράσεων του καιρού στο πέτρωμα. Αφαιρούμε στρώμα των 50μm, περίπου, βυθίζοντας το δείγμα πέντε φορές στο οξύ για λίγα δευτερόλεπτα (Liritzis et al., 1997). Κατόπιν, με 50 ελαφρά περάσματα με λίμα στην επιφάνεια δειγματοληψίας πήραμε τη σκόνη προς χρονολόγηση, περίπου 200μm<sup>18</sup>. Το λιμάρισμα γίνεται προς μία φορά (όχι μπρος-πίσω) και όσο πιο απαλά γίνεται για να μην έχουμε θέρμανση του δείγματος και στη συνέχεια κατά τη μέτρηση, φεύγικες ενδείξεις φωτός (τριβοφωταύγεια). Στη σκόνη που συγκεντρώθηκε έγιναν μετρήσεις θερμοφωταύγειας με τη μέθοδο των προσθετικών δόσεων πολλαπλών δισκίων (multiple aliquot additive dose procedure) (κεφάλαιο 1ο, παράγραφος 3) στο Εργαστήριο Ατομικής και Πυρηνικής Φυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου στη Θεσσαλονίκη.

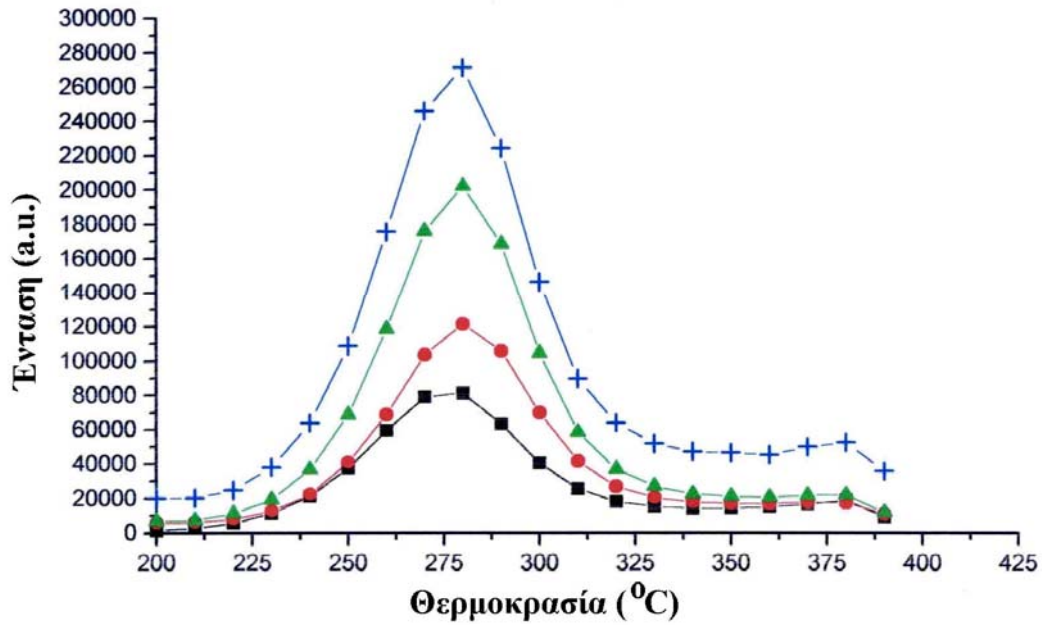
Η σκόνη που προέκυψε τοποθετείται σε δισκία, των οποίων η επιφάνεια καλύφθηκε με λεπτό στρώμα από λάδι σιλικόνης. Μετρήθηκαν 2 φυσικές φωτοκαμπύλες και τρεις φυσικές με την πρόσθεση βήτα εργαστηριακής ακτινοβολίας. Οι δόσεις είναι 28Gy, 57Gy και 85Gy (σχ. 3.47).

Για τη λεύκανση (bleaching) χρησιμοποιήθηκε σκόνη από το εσωτερικό της πέτρας και για το πείραμα εξομοιωτής ηλιακού φωτός (Hönle Sol 2). Οι ώρες έκθεσης του δείγματος που αντιστοιχούν σε φυσικό φως είναι: 2, 6 και 32 ώρες (σχ. 3.48).

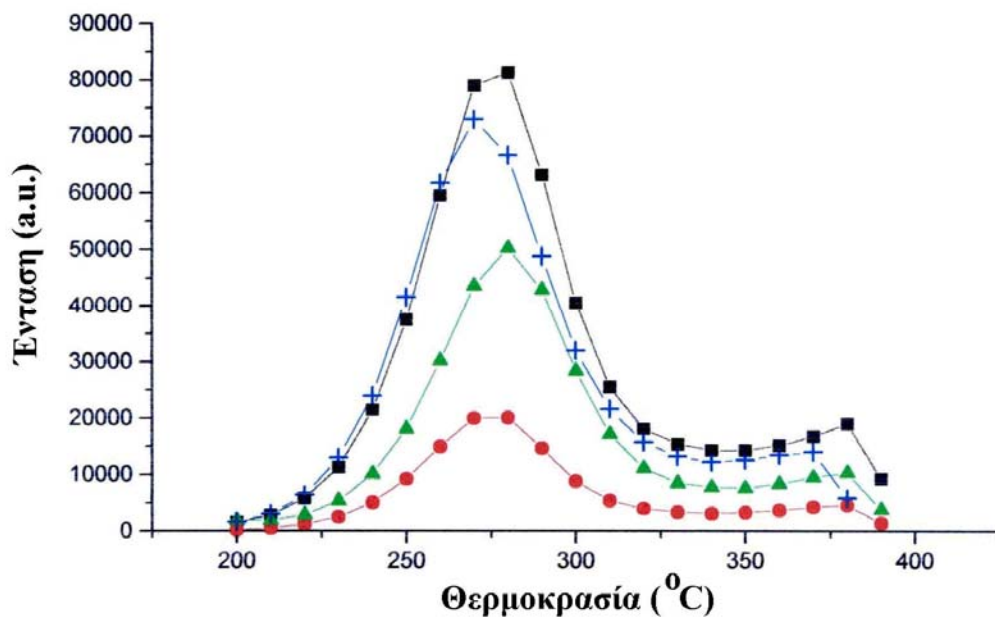
Μετά από κάθε μέτρηση, κάναμε μέτρηση του υποστρώματος και μέτρηση κανονικοποίησης με δόση 17Gy.

<sup>18</sup> έχει μετρηθεί με μικρόμετρο ακριβείας σε επίπεδα δείγματα ότι 50 περάσματα με τη λίμα ισοδυναμούν με 200μm περίπου.



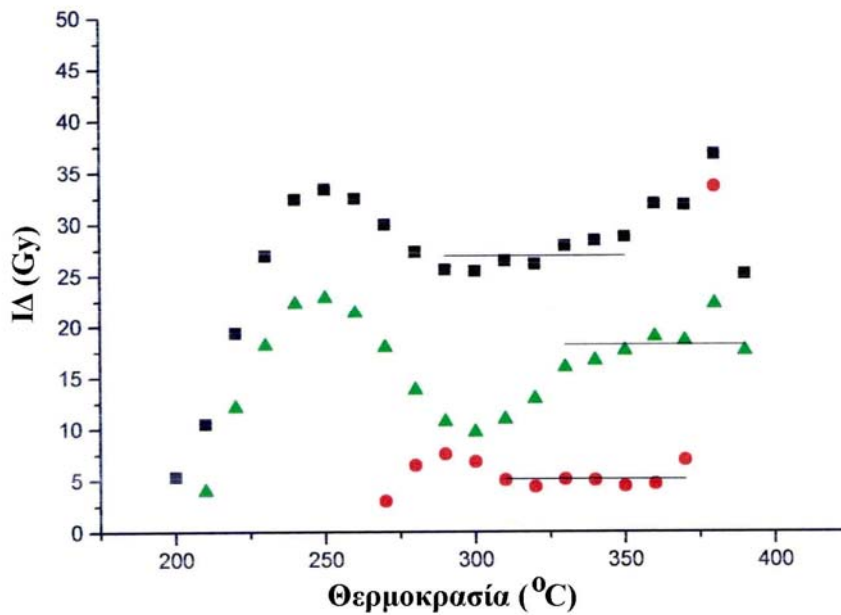


Σχ. 3.47: Φωτοκαμπύλες φυσικής θερμοφωταύγειας και (φυσικής θερμοφωταύγειας + εργαστηριακή βήτα δόση) του δείγματος RHO-106. Η μαύρη γραμμή είναι ο μέσος όρος των καμπύλων φυσικής φωταύγειας, η κόκκινη η φυσική+28Gy, η πράσινη η φυσική+57Gy και η μπλε είναι η φυσική+85Gy.



Σχ. 3.48: Φωτοκαμπύλες γεωλογικής φωταύγειας και λεύκανσης του δείγματος RHO-106. Η μαύρη γραμμή είναι η γεωλογική φωταύγεια, η κόκκινη είναι η γεωλογική μετά από 2 ώρες έκθεσης, η μπλε η γεωλογική μετά από 6 ώρες και η πράσινη η γεωλογική μετά από 32 ώρες έκθεσης.

Στο Σχήμα 3.49 παρουσιάζονται οι ισοδύναμες που προκύπτουν συναρτήσει της θερμοκρασίας. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνονται τα καλύτερα πλατό.



Σχ. 3.49: Καμπύλες ισοδύναμων δόσεων του δείγματος RHO-106, όπως αυτές προκύπτουν από τη μέθοδο των προσθετικών δόσεων σε πολλαπλά δισκία, για χρόνους έκθεσης σε φως 2 ώρες (μαύρα σημεία), 6 ώρες (κόκκινα σημεία) και 32 ώρες (πράσινα σημεία). Οι ευθείες γραμμές δείχνουν τα πιθανά πλατό.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα προτεινόμενα πλατό και οι ισοδύναμες δόσεις που προκύπτουν.

Πίνακας 3.7: Προτεινόμενα πλατό δείγματος RHO-106 – Ισοδύναμη δόση.

Χρόνος έκθεσης (ώρες)	Ισοδύναμη Δόση (Gy)	Θερμοκρασία (°C)
2	26,93±1,38	290 – 350
6	5,12±0,885	310 – 370
32	18,20±2,04	330 – 370

Τελικά η ισοδύναμη δόση είναι:

$$ID=5,12\pm0,885Gy$$

*Χημική ανάλυση δείγματος RHO-106 – Υπολογισμός ετήσιων δόσεων*

Οι μετρήσεις των ιχνοστοιχείων έγιναν στο δείγμα RHO-107 με Νετρονική Ενεργοποίηση (οι αναλύσεις έγιναν στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος» από τον

Δρα. Κιλίκογλου), μετρητή άλφα σωματιδίων, και ακτίνες Χ φθορισμού. Τα αποτελέσματα και οι ετήσιες δόσεις παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.8: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων α, β και γ ετήσιων δόσεων του δείγματος RHO-106, ανά μέθοδο ανάλυσης (Liritzis and Kokkoris, 1992; Kokkoris and Liritzis, 1997).

<b>Νετρονική Ενεργοποίηση</b>	<b>Μετρητής Άλφα Σωματιδίων (nfU=15,68±0,73 nfTh=3,95±0,16 (total))</b>	<b>Μετρητής Άλφα Σωματιδίων (εξιιώσεις Rhodes (2002))</b>
U=0,775    a=2,19±0,11	U=0,89±0,04    a <sub>2</sub> =2,56±0,12	U=0,80±0,04    a <sub>3</sub> =2,29±0,12
Th=0    b=0,11±0,01	Th=0,05±0,04    b <sub>2</sub> =0,13±0,01	Th=0,04±0,03    b <sub>3</sub> =0,12±0,01
K=0%    g=0,086±0,04	K=0%    g <sub>2</sub> =0,10±0,01	K=0%    g <sub>3</sub> =0,09±0,01
Rb=0	Rb=0	Rb=0

Οι μονάδες μέτρησης των ιχνοστοιχείων είναι σε ppm, οι ετήσιες δόσεις σε Gy/ky και των παραγόντων κανονικοποίησης για το μετρητή άλφα σωματιδίων counts/ppm.

Οι τιμές των K και Rb για τον υπολογισμό των ετήσιων δόσεων με το μετρητή σωματιδίων άλφα μετρήθηκαν με τον αναλυτή ακτίνων-χ φθορισμού.

Έχουν γίνει επίσης μετρήσεις ετήσιας γάμα δόσης με φορητό μετρητή γάμα ακτινοβολίας και μετρήσεις στο περιβάλλον χώμα, την άμμο της ερήμου:

$$dg_{portable} = 1,334 \pm 0,26 \text{ Gy/ky}$$

$$dg_{sand} = 0,27 \pm 0,01 \text{ Gy/ky}$$

#### Υπολογισμός ηλικίας δείγματος RHO-106

Η ετήσια άλφα δόση θα υπολογιστεί από το αποτέλεσμα που προέκυψε από το μέσο όρο, πολλαπλασιασμένο επί 0,1.

$$da = a \cdot 0,1 \Rightarrow da = 0,219 \pm 0,011 \text{ Gy/ky}$$

Για τον υπολογισμό της βήτα δόσης θεωρούμε το 50% της βήτα δόσης του ασβεστόλιθου.

$$db = \frac{b}{2} \Rightarrow db = 0,057 \pm 0,0023 \text{ Gy/ky}$$

Για τη γάμα ετήσια δόση παίρνουμε το  $\frac{1}{4}$  από τη γάμα της άμμου και ολόκληρη τη γάμα από το φορητό μετρητή που περιλαμβάνει και την κοσμική ακτινοβολία.

$$dg = dg_{portable} + \frac{dg_{sand}}{4} \Rightarrow dg = 1,402 \pm 0,067 \text{ Gy/ky}$$

$$dr = 1,678 \pm 0,068 \text{ Gy / ky}$$

Από την εξίσωση ηλικίας προκύπτει ότι η ηλικία του δείγματος είναι:

$$ΗΛΙΚΙΑ = 3051 \pm 542 \text{ π.Σ.} \Rightarrow ΗΛΙΚΙΑ = 1050 \pm 540 \text{ π.Χ.}$$

**1.1 ( 7 ) RHO-107** (υλικό: ασβεστόλιθος, προέλευση: εσωτερικός τοίχος οροφής ναού, κωδικός: VT9b)

Η ανάλυση ακτίνων Χ διάθλασης (XRD), έδειξε ότι το δείγμα αποτελείται από 100% ασβεστόλιθο (School of GeoSciences, Geology and Geophysics, Grand Institute, University of Edinburgh).

*Προετοιμασία δείγματος RHO-107 – Υπολογισμός ισοδύναμης δόσης*

Η προετοιμασία των δειγμάτων έγινε στο Εργαστήριο Αρχαιομετρίας, στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου στη Ρόδο. Αρχικά το δείγμα, η πλευρά δειγματοληψίας του πέτρινου δείγματος, εμβαπτίζεται σε αραιό υδροχλωρικό οξύ (HCl) με σκοπό την αφαίρεση οργανικών αλάτων και των επιδράσεων του καιρού στο πέτρωμα. Αφαιρούμε στρώμα των 50μm, περίπου, βυθίζοντας το δείγμα πέντε φορές στο οξύ για λίγα δευτερόλεπτα (Liritzis, et al., 1997). Κατόπιν, με 50 ελαφρά περάσματα με λίμα στην επιφάνεια δειγματοληψίας πήραμε τη σκόνη προς χρονολόγηση, περίπου 200μm<sup>19</sup>. Το λιμάρισμα γίνεται προς μία φορά (όχι μπρος-πίσω) και όσο πιο απαλά γίνεται για να μην έχουμε θέρμανση του δείγματος και στη συνέχεια κατά τη μέτρηση, ψεύτικες ενδείξεις φωτός (τριβοφωταύγεια). Στη σκόνη που συγκεντρώθηκε έγιναν μετρήσεις θερμοφωταύγειας με τη μέθοδο της προσθετικών δόσεων πολλαπλών δισκίων (multiple aliquot additive dose procedure) (κεφάλαιο 1ο, παράγραφος 3) στο Εργαστήριο Ατομικής και Πυρηνικής Φυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου στη Θεσσαλονίκη.

Η σκόνη που προέκυψε τοποθετείται σε δισκία, των οποίων η επιφάνεια καλύφθηκε με λεπτό στρώμα από λάδι σιλικόνης.

Για τη λεύκανση (bleaching) χρησιμοποιήθηκε σκόνη από το εσωτερικό της πέτρας και για το πείραμα εξομοιωτής ηλιακού φωτός (Hönle Sol 2).

Το δείγμα δεν έδωσε ολική δόση και είναι αδύνατη η χρονολόγησή του.

<sup>19</sup> έχει μετρηθεί με μικρόμετρο ακριβείας σε επίπεδα δείγματα ότι 50 περάσματα με τη λίμα ισοδυναμούν με 200μm περίπου.

Χημική ανάλυση δείγματος RHO-107 – Υπολογισμός ετήσιων δόσεων

Η ανάλυση του δείγματος έγινε με νετρονική ενεργοποίηση (οι αναλύσεις έγιναν στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος» από τον Δρα. Κιλίκογλου), μετρητή σωματιδίων άλφα και ακτίνες Χ φθορισμού. Τα αποτελέσματα και οι ετήσιες δόσεις παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.9: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων α, β και γ ετήσιων δόσεων του δείγματος RHO-107, ανά μέθοδο ανάλυσης (Liritzis and Kokkoris, 1992; Kokkoris and Liritzis, 1997).

<b>Νετρονική Ενεργοποίηση</b>	<b>Μετρητής Άλφα Σωματιδίων (nfU=15,68±0,73 nfTh=3,95±0,16 (total))</b>	<b>Μετρητής Άλφα Σωματιδίων (εξιιώσεις Rhodes (2002))</b>
U=0,775    a=2,19±0,11	U=0            a <sub>2</sub> =0	U=0,87±0,04    a <sub>3</sub> =2,47±0,12
Th=0        b=0,11±0,01	Th=0            b <sub>2</sub> =0	Th=0,01±0,03    b <sub>3</sub> =0,13±0,01
K=0%        g=0,086±0,04	K=0%            g <sub>2</sub> =0	K=0%             g <sub>3</sub> =0,10±0,01
Rb=0	Rb=0	Rb=0

Οι μονάδες μέτρησης των ιχνοστοιχείων είναι σε ppm, οι ετήσιες δόσεις σε Gy/ky και των παραγόντων κανονικοποίησης για το μετρητή άλφα σωματιδίων counts/ppm.

Οι τιμές των K και Rb για τον υπολογισμό των ετήσιων δόσεων με το μετρητή σωματιδίων άλφα μετρήθηκαν με τον αναλυτή ακτίνων-χ φθορισμού.

## Κεφάλαιο 4ο

### Σχόλια – Συμπεράσματα

#### 1. Πρόταση νέας μεθόδου χρονολόγησης ασβεστολιθικών πετρωμάτων

Οι μέθοδοι χρονολόγησης με φωταύγεια είναι διαπιστευμένες με πολλές πρακτικές εφαρμογές από πολλούς ερευνητές και αποτελέσματα ικανοποιητικά. Έχουν αναπτυχθεί συστήματα μετρήσεων τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως. Η δική μας συνεισφορά στις μεθόδους χρονολόγησης είναι η προσπάθεια χρονολόγησης εκείνων των ασβεστολιθικών πετρωμάτων που έχουν χαλαζία. Όπως ειπώθηκε, ο ασβεστόλιθος δε δίνει σήμα οπτικής φωταύγειας (Galloway, 2002), και με θερμοφωταύγεια το σφάλμα στην τελική ηλικία είναι σημαντικό. Αν υπολογιστεί κανείς ότι ο ασβεστόλιθος είναι ένα υλικό πολύ κοινό στη χρήση, ειδικά στον ελλαδικό χώρο (κτίσματα, αγάλματα), η μέθοδος αυτή θα βελτίωνε της υπάρχουσες χρονολογήσεις σε γνωστά μνημεία. Οι πρώτες μετρήσεις έδειξαν ότι ακόμα και αν δεν απομονώσουμε το χαλαζία, η εξάλειψη του ασβεστόλιθου με υδροχλωρικό οξύ είναι αρκετό. Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι, παρόλο που τα πετρώματα έχουν μόνο ίχνη χαλαζία και η ακτίνα του laser μπορεί να μην πιάσει όλους τους κόκκους επάνω στο δισκίο, οι οποίοι θα είναι ελάχιστοι σε κάθε δισκίο, μπορεί και μόνο ένας, οι αποκρίσεις των δισκίων σε μπλε και υπέρυθη ακτινοβολία είναι ικανοποιητικές και μπορούν να δώσουν ισοδύναμη δόση.

Η δυσκολία στην πράξη έγκειται στη λιγοστή αρχική ποσότητα δείγματος και στην ακόμα λιγότερη μετά τη χημική επεξεργασία του. Για το λόγο αυτό η όλη διαδικασία θα γίνει αρχικά σε γεωλογικό υλικό (σκόνη από το εσωτερικό της πέτρας), για να διαπιστωθεί η ορυκτολογική του σύσταση. Ανάλυση ακτίνων-Χ διάθλαση είναι απαραίτητη σε κάθε στάδιο, πρώτα για τη διαπίστωση ότι το πέτρωμα έχει χαλαζία και μετά την επεξεργασία για να επιβεβαιωθεί η παρουσία του. Στην περίπτωση που βρεθεί και άστριος μπορεί να διαλυθεί με υδροφθόριο για να έχουμε καθαρό σήμα χαλαζία. Η μέτρηση του προς χρονολόγηση υλικού, λόγω της μικρής ποσότητάς του, θα ήταν καλύτερα να γίνει με την τεχνική μοναδικού κόκκου. Τα αποτελέσματα θα είναι πιο αξιόπιστα, γιατί στο συγκεκριμένο σύστημα μετρήσεων η ακτίνα laser χτυπάει τον ίδιο τον κόκκο και όχι το δισκίο. Στις τεχνικές μοναδικού δισκίου που η ακτίνα ακτινοβολεί το δισκίο, με λίγη ποσότητα σκόνης και διάσπαρτη στο δισκίο (δε μπορεί να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη κατανομή λίγης σκόνης) μπορεί να μη χτυπήσει όλο το υλικό.

Είναι γνωστό ότι το σήμα από το υπέρυθρο προέρχεται από τον άστριο, ενώ το σήμα από το μπλε από το χαλαζία και τον άστριο (Sroogner, 1994). Οι συνιστώσες του μπλε σήματος

μπορούν να αναλυθούν είτε με τη μέθοδο του deconvolution (Kitis et al., 2002) είτε με την τεχνική της γραμμικής διαμόρφωσης (linear modulation, LM, Bulur, 1996; Bulur et al., 2000). Οι τεχνικές αυτές, μαζί με τα αποτελέσματα των ακτίνων-Χ διάθλασης, θα μπορούσαν να δώσουν μια ολοκληρωμένη εικόνα για το υλικό, και ορυκτολογικά και να ερμηνεύσουν το σχήμα των παραγόμενων σημάτων.

Συμπερασματικά, από της στιγμή που τα πρώτα δοκιμαστικά δείγματα έδωσαν μετρήσιμο σήμα, μπορούν να γίνουν μετρήσεις σε μη χρονολογημένα υλικά. Η εφαρμογή της σε δείγματα γνωστών ηλικιών θα είναι ένα άριστο τεστ και θα βοηθήσει στη βελτίωσή της.

## **2. Οι ηλικίες των χρονολογημένων δειγμάτων με μεθόδους φωταύγειας.**

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα δείγματα που χρονολογήθηκαν για την περάτωση αυτής της διατριβής (τα δείγματα που δεν έδωσαν ηλικία δεν συμπεριλήφθηκαν στον πίνακα). Οι ηλικίες που δίνουν οι μέθοδοι φωταύγειας αναφέρονται στη χρονολογία κατασκευής των μεγαλιθικών αυτών κτιρίων και είναι ο μόνος να χρονολογηθούν τα κτίρια αυτά απ' ευθείας και όχι μέσω των αρχαιολογικών ευρημάτων και αρχιτεκτονικών παρατηρήσεων. Επίσης οι τύποι πετρωμάτων με χαλαζία ή/και άστριο δίνουν μικρότερο σφάλμα από τους τα ασβεστολιθικά πετρώματα. Οι ηλικίες που υπολογίστηκαν σε σχέση με την αρχαιολογική ηλικία τους είναι σε γενικά ικανοποιητικές, πλην ελαχίστων εξαιρέσεων.

Τα δείγματα από την Κοιλιάδα του Ναού Μυκερίνου και Χεφρίνου, RHO-98 (VT1) και RHO-106 (VT9a) αντίστοιχα, είναι ένα παράδειγμα εξαίρεσης. Η ηλικία του RHO-98 (VT1) είναι  $3060 \pm 470$  π.Χ. μεγαλύτερη από την αναμενόμενη (αν και μόνο 90 χρόνια μακριά). Η ιδιαιτερότητα του δείγματος αυτού ήταν η ελάχιστη προς χρονολόγηση ποσότητα. Μόνο ένα δισκίο προέκυψε και σε αυτό το υλικό δεν ήταν ομοιόμορφο. Δεν υπήρχε η δυνατότητα κοσκινίσματος γιατί θα χάνονταν πολύτιμοι κόκκοι. Πρόκειται για ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα των προβλημάτων που προκύπτουν όταν και το υλικό είναι λίγο και ανομοιόμορφο. Για το λόγο αυτό η χρήση μόνο ενός δισκίου δεν ενδείκνυται, εκτός και αν δεν υπάρχει αρκετή σκόνη. Βέβαια, το ότι η διαφορά είναι μόλις 90 χρόνια, παρατηρώντας και το σχ. 3.3 (τα σημεία δεν είναι μακριά από την ευθεία), αν είχαμε ένα ακόμα δείγμα η στατιστική θα ήταν ακόμα καλύτερη και η τελική ηλικία πιο κοντά στην αρχαιολογική. Το RHO-106 (VT9a) έδωσε μικρότερη ηλικία πιθανώς λόγω ελλιπούς λεύκανσης. Ο ογκόλιθος δεν έμεινε αρκετή ώρα στον ήλιο με αποτέλεσμα το «ρολόι» του να μη μηδενιστεί.

Στην περίπτωση των δειγμάτων από το ναό της Σφίγγας, τα RHO-58 (ST4) και RHO-59 (ST5) μέσα στα όρια του σφάλματος συμπίπτουν με την αρχαιολογική ηλικία, το RHO-57 (ST3) παραπέμπει στη 18<sup>η</sup> Δυναστεία και στο μέρος του ναού πάνω στον οποίο ήταν χτισμένος ναός



του Αμένοφη Β΄. Στο RHO-56 (ST2) υπήρξε πρόβλημα πιθανώς με το χρόνο έκθεσης του ασβεστόλιθου στον ήλιο πριν την τοποθέτησή του στον τοίχο, όπως στο δείγμα RHO-106 (VT9a).

Τα δείγματα RHO-109 (SETI I) και RHO-111 (SETI IV) μέσα στα όρια του σφάλματος συμπίπτουν με τις αρχαιολογικές ηλικίες. Αντίθετα το δείγμα RHO-110 (SETI II), έδωσε ηλικία εσωτερικού και όχι επιφανειακού στρώματος. Το πέτρωμα αυτό είναι ψαμμίτη, υλικό, πορώδες και μαλακό. Μπορεί κατά τη δειγματοληψία να αφαιρέθηκε το επιφανειακό στρώμα.

Τα δείγματα RHO-138 (OS6) και RHO-139 (OS7) συμπίπτουν και αυτά με τις αρχαιολογικές ηλικίες μέσα στα όρια του σφάλματος (ο Σέθος 1<sup>ος</sup> βασίλεψε την περίοδο 1318-1304 π.Χ. και ο γιος του Ραμσής ο 2<sup>ος</sup> την περίοδο 1304-1237π.Χ.). Το κτίσμα χρονολογείται από τις αρχές του Μέσου Βασιλείου. Ο Σέθος 1<sup>ος</sup> το ανακατασκεύασε. Το δείγμα RHO-139 (OS7) προέρχεται από παλιό τμήμα του ναού.

Πίνακας 4.1: Συνοπτικός πίνακας χρονολογημένων δειγμάτων με μεθόδους φωταύγειας. με την αρχαιομετρική και αρχαιολογική ηλικία τους.

<b>Δείγμα</b>	<b>Αρχαιομετρική ηλικία</b>	<b>Αρχαιολογική ηλικία</b>
RHO-98 (VT1)	3060±470 π.Χ.	IV <sup>η</sup> Δυναστεία (2500-2400π.Χ.)
RHO-106 (VT9a)	1050±540 π.Χ.	IV <sup>η</sup> Δυναστεία (2740-2650π.Χ.)
RHO-56 (ST2)	2220±220 π.Χ.	IV <sup>η</sup> Δυναστεία (2740-2650π.Χ.)
RHO-57 (ST3)	1190±340 π.Χ.	IV <sup>η</sup> Δυναστεία (2740-2650π.Χ.)
RHO-58 (ST4)	2740±640 π.Χ.	IV <sup>η</sup> Δυναστεία (2740-2650π.Χ.)
RHO-59 (ST5)	3100±540 π.Χ.	IV <sup>η</sup> Δυναστεία (2740-2650π.Χ.)
RHO-109 (SETI I)	1580±340 π.Χ.	XIX <sup>η</sup> Δυναστεία (1300π.Χ.)
RHO-110 (SETI II)	3650±800 π.Χ.	XIX <sup>η</sup> Δυναστεία (1300π.Χ.)
RHO-111 (SETI IV)	1550±200 π.Χ.	XIX <sup>η</sup> Δυναστεία (1300π.Χ.)
RHO-138 (OS6)	1300±570 π.Χ.	Μέσο Βασίλειο (1800π.Χ.)
RHO-139 (OS7)	1980±110 π.Χ.	Μέσο Βασίλειο (1800π.Χ.)
RHO-129 (QAS1)	4700±850 π.Χ.	XV <sup>η</sup> Δυναστεία (1800-1500π.Χ.)
RHO-131 (QAS3)	320±128 μ.Χ	XV <sup>η</sup> Δυναστεία (1800-

		1500π.Χ.)
RHO-119 (MYK)	3450±950 π.Χ.	IV <sup>η</sup> Δυναστεία (2500-2400π.Χ.)
RHO-53 (OT1)	2930±600 π.Χ.	IV <sup>η</sup> Δυναστεία (2740-2650π.Χ.)
RHO-54 (OT2)	2870±570 π.Χ.	IV <sup>η</sup> Δυναστεία (2740-2650π.Χ.)
RHO-134 (KH1)	3100±660 π.Χ.	II <sup>ης</sup> Δυναστείας (2700-2600π.Χ.)
RHO-132 (KH1c)	2200±260 π.Χ.	II <sup>ης</sup> Δυναστείας (2700-2600π.Χ.)
RHO-133 (KH2c)	2490±300 π.Χ.	II <sup>ης</sup> Δυναστείας (2700-2600π.Χ.)
STR1	3500±320 π.Χ.	4000-2700 π.Χ.
Koumoula	2400±380 π.Χ.	3 <sup>η</sup> – 2 <sup>η</sup> χιλ. π.Χ.
Elafokastro	3200±820 π.Χ.	3 <sup>η</sup> – 2 <sup>η</sup> χιλ. π.Χ.
SARKN	9240±660 π.Χ.	12000-11000 π.Χ.
ITH3	2770±165 π.Χ.	3 <sup>ος</sup> αι. π.Χ.
ITH4	1100±500 π.Χ.	3 <sup>ος</sup> αι. π.Χ.
1A/B4	5450±600 π.Χ.	5300-4700 π.Χ.
1B/B4	5800±700 π.Χ.	5300-4700 π.Χ.

Στην περίπτωση των δειγμάτων από το μνημείο Qasr el-Sagha έχουμε γεωλογική ηλικία στο δείγμα RHO-129 (QAS1), το οποίο σημαίνει ότι η σκόνη που χρησιμοποιήθηκε για χρονολόγηση δεν ήταν επιφανειακή αλλά και από εσωτερικά στρώματα, και το RHO-131 (QAS3) παραπέμπει στην ελληνορωμαϊκή περίοδο, που σημαίνει ότι το κτίσμα υπέστη παρεμβάσεις την εποχή εκείνη.

Στα υπόλοιπα αιγυπτιακά δείγματα οι ηλικίες τους συμπίπτουν με τις αρχαιολογικές, πάντα μέσα στα όρια του σφάλματος. Στο δείγμα από την πυραμίδα του Μυκερίνου, RHO-119 (MYK), το σφάλμα είναι μεγάλο γιατί το σφάλμα στην ισοδύναμη δόση είναι επίσης μεγάλο. Μπορεί στο σχ. 3.217, στην καμπύλη προσδιορισμού ισοδύναμης δόσης να μην έχουμε διασπορά στα σημεία της, στο σχ. 3.216 στα σημεία της καμπύλης διόρθωσης η διασπορά είναι μεγάλη, αν και τελικά η διόρθωση είναι καλή (τα σημεία χωρίς πρόσθετη δόση του σχ. 3.217 είναι σε ευθεία γραμμή).

Τα δείγματα από τον ελλαδικό χώρο συμπίπτουν με τις αρχαιολογικές ηλικίες, πλην των δειγμάτων από Ιθάκη τα οποία είναι έξω από τα όρια.

### 3. Μέθοδοι χημικών αναλύσεων

Η μέθοδος ανάλυσης με ακτίνες-Χ φθορισμού είναι ευρέως διαδεδομένη. Μπορεί να αναλύσει χρωστικές σε ένα πίνακα ή μια τοιχογραφία βοηθώντας στη συντήρησή τους. Επίσης κάνοντας στατιστικές αναλύσεις πάνω στα αποτελέσματα μεγάλου αριθμού μετρήσεων δειγμάτων από διάφορες περιοχές, είναι δυνατή η ομαδοποίησή τους ανά περιοχή προέλευσης. Ανακρίβειες στις μετρήσεις υπεισέρχονται σε ότι αφορά τη μη καταστρεπτική χρήση της μεθόδου, σε περιπτώσεις που τα προς ανάλυση υλικά, δεν είναι επίπεδα και λεία, γιατί οι ακτίνες-Χ στον αέρα εξασθενούν γρήγορα.

Συνοπτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα πειράματα στη συσκευή ανίχνευσης ακτίνων-Χ φθορισμού (ανάλυση έγινε στο αντίστοιχο κεφάλαιο):

1. Η τιμή της συγκέντρωσης του σιδήρου αυξάνει με τη στροφή του δείγματος και παίρνει τη μέγιστη τιμή της όταν το δείγμα σιδήρου βρίσκεται επάνω από το πλεξιγκλάς (όπως κοιτάει κανείς από ψηλά το παράθυρο του οργάνου).
2. Όσο αυξάνει το πάχος του δείγματος που αναλύεται στο δειγματολήπτη, ανιχνεύονται τα βαριά στοιχεία με μεγαλύτερη ακρίβεια.
3. Το κρίσιμο βάθος ανίχνευσης για συγκεκριμένο στοιχείο είναι διαφορετικό για διαφορετικό υλικό. Οι διαφορές είναι μεγαλύτερες στα βαριά στοιχεία.
4. Με την αύξηση του χρόνου καταμέτρησης δεν παρατηρείται μεταβολή στην ακρίβεια της τιμής συγκέντρωσης ενός στοιχείου. Μειώνεται μόνο το σφάλμα στη μέτρηση.
5. Η συγκέντρωση των τεσσάρων πιο βασικών στοιχείων, K, Ca, Fe, Ti, μειώνεται με την αύξηση της διαμέτρου των κόκκων της μετρούμενης σκόνης. Στα λεπτόκοκκα υλικά υπάρχει ομοιομορφία στην κατανομή της σκόνης στο δειγματολήπτη. Δε μένουν κενά ανάμεσα στους κόκκους και οι ακτίνες-Χ δε χτυπάνε στα κενά. Μέγεθος σκόνης που χρησιμοποιείται: μικρότερο από 90 $\mu$ m.

Τέλος, σε ό,τι αφορά τους παράγοντες κανονποίησης, από τον πίνακα 2.8, τα αποτελέσματα που έδωσαν, συγκρινόμενα με αυτά που προέκυψαν με τις εξισώσεις από τον καθ. Ε. Rhodes, αλλά και με αυτά από νετρονική ενεργοποίηση, είναι ικανοποιητικά. Η σύγκριση γίνεται κυρίως με τα αποτελέσματα από τις εξισώσεις του καθηγητή, γιατί χρησιμοποιεί το ίδιο όργανο, που σημαίνει ότι η μέτρηση γίνεται με τις ίδιες συνθήκες και προϋποθέσεις (ίδιο μέγεθος σκόνης υλικού, ίδιοι σπινθηριστές, ίδιοι δειγματολήπτες, αναφορικά με τη γεωμετρία της μέτρησης). Συμπερασματικά, οι παράγοντες αυτοί είναι αξιόπιστοι.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διατριβή αυτή πραγματεύεται τη χρονολόγηση μεγαλιθικών μνημείων σε Ελλάδα και Αίγυπτο με μεθόδους φωταύγειας. Αρχικά δίνεται βάση στην παρουσίαση των μεθόδων χρονολόγησης, στις τεχνικές και τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό. Περιγράφονται οι αρχές των μεθόδων, ο τρόπος δειγματοληψίας και οι παράμετροι που επηρεάζουν κάθε στάδιο, από την προετοιμασία του δείγματος μέχρι και τη μέτρησή του. Αναφέρονται τα συστήματα μετρήσεων και δίνεται βάση στις τελευταίες εξελίξεις στον τομέα αυτό με την τεχνική χρονολόγησης μοναδικού κόκκου χαλαζία από το εργαστήριο Risø, στη Δανία και το σύστημα laser που έχει αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό. Γίνεται αναλυτική παρουσίαση των πρωτοκόλλων προσδιορισμού ισοδύναμης δόσης (της συνολικής δόσης που έλαβε το υλικό από τη στιγμή της ταφής του ή την τοποθέτησή του στον τοίχο για το χτίσιμο του μνημείου), προσθετικών δόσεων και ανασύστασης δόσεων, και του τρόπου υπολογισμού της με παραδείγματα. Ιδιαίτερη μνεία γίνεται σε μια νέα μέθοδο χρονολόγησης που προτείνεται για τα ασβεστολιθικά πετρώματα των οποίων η ορυκτολογική ανάλυση έδειξε ότι έχουν ίχνη χαλαζία. Δίνονται τα πρώτα αποτελέσματα και η ερμηνεία τους. Παρατηρήσεις και σχόλια γίνονται στο τελευταίο κεφάλαιο, καθώς επίσης και προτάσεις για τα πειράματα που θα μπορούσαν να γίνουν για την τεκμηρίωσή της.

Εκτός από τον προσδιορισμό της ισοδύναμης δόσης του δείγματος, σημαντικός είναι και ο υπολογισμός της ολικής ετήσιας δόσης, της δόσης, δηλαδή, που λάμβανε το θαμμένο υλικό από το περιβάλλον του (βήτα και γάμα ακτινοβολία περιβάλλοντος) και από τα ιχνοστοιχεία που το αποτελούν (άλφα, βήτα και γάμα ακτινοβολίες από το ίδιο το υλικό) ανά έτος. Πέρα από την παρουσίαση και ανάλυση των παραγόντων που υπεισέρχονται στον προσδιορισμό των ετήσιων δόσεων, την υγρασία του περιβάλλοντος, το μέγεθος των κόκκων που χρησιμοποιούνται στην εφαρμογή των πρωτοκόλλων προσδιορισμού ισοδύναμης δόσης, γίνεται περιγραφή των μεθόδων χημικής ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν και των συστημάτων προσδιορισμού των άλφα, βήτα και γάμα ετήσιων δόσεων. Βαρύτητα δίνεται στη μέθοδο ανάλυσης με ακτίνες -Χ φθορισμού και στη μελέτη που έχει γίνει για την εξάλειψη σφαλμάτων λόγω γεωμετρίας των δειγμάτων και του χρόνου καταμέτρησής τους. Μελετήθηκε επίσης το κρίσιμο βάθος ανίχνευσης των ιχνοστοιχείων του δείγματος και οι μεταβολές στη συγκέντρωση με την αύξηση της διάμετρος των κόκκων που χρησιμοποιούνται κάθε φορά για ανάλυση. Επίσης, στο μετρητή άλφα σωματιδίων παρουσιάζονται οι παράγοντες κανονικοποίησης οι οποίοι αναπτύχθηκαν στο εργαστήριο για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων ουρανίου και θορίου στο δείγμα και η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με τις εξισώσεις που μας χρησιμοποιούνται από τον καθ. Ed. Rhodes για τον ίδιο σκοπό. Οι παράγοντες αυτοί προέκυψαν σε μια προσπάθειά μας

---

να κατανοήσουμε τον τρόπο λειτουργίας του οργάνου με το σύστημα των ζευγών. Σχόλια και παρατηρήσεις δίνονται και στο τελευταίο κεφάλαιο.

Στη συνέχεια, γίνεται ο προσδιορισμός της ηλικίας κάθε δείγματος. Παρουσιάζονται αναλυτικά ο τρόπος προσδιορισμού της ισοδύναμης δόσης καθώς και των ετήσιων δόσεων, οι μέθοδοι και οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό αυτό. Χρονολογήθηκαν συνολικά σαράντα δείγματα, εκ των οποίων τα είκοσι οχτώ προέρχονται από την Αίγυπτο και τα δώδεκα από τον ελλαδικό χώρο. Ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων γίνεται στο τελευταίο κεφάλαιο.

Τέλος, σε παράρτημα δίνονται κάποια αρχαιολογικά στοιχεία για τα μνημεία (περιγραφή των χώρων, χρήση τους) και την ανασκαφή τους (ιστορικό ανασκαφής, ευρήματα).

## ABSTRACT

This thesis deals with the dating of megalithic monuments in Greece and Egypt with luminescence methods. Initially, the dating methods are presented, the techniques and the protocols that are used for this aim. The theory of the methods is described, the way of sampling and the parameters that influence each stage, from the preparation of sample until the final measurement. The measurement systems are reported and the last developments in this sector with the dating technique of unique quartz grain from the laboratory Risø, in Denmark and the system laser that has been developed for this purpose. An analytical presentation of the protocols used for the determination of the equivalent dose (the total dose that the archaeological material received from the moment of burial or his placement in the wall of the monument) and the calculations using examples. It is made particular mention of a new dating method that is proposed for the calcitic rock samples, the ones that the mineralogical analysis showed that have traces hails. The first results are presented and their interpretation. Observations and comments become in the last capital, as well as proposals for more experiments that would lead to the establishment of the method.

Apart from the determination of equivalent dose of a sample, it is also important the calculation of total annual dose, the dose that the buried material received from the environment (beta and gamma radiation of environment) and from the trace elements that constituting (alpha, beta and gamma radiation by himself the material) per year. Beyond the presentation and the analysis of factors that enter into the determination of annual doses, the humidity of environment, the size of grains that are used in the application of protocols of determination of equivalent dose, the methods of chemical analysis that were used and systems of determination alpha, beta and gamma annual doses are described. The analysis method of X-ray fluorescence and the study that has been made for the obliteration of faults because of the geometry of samples and their time of measurement is presented. Were studied also the critical depth of detection of trace elements on sample and the changes in the concentration with the increase of the diameter of grains that are used each time for analysis. Also, in the section concerning the alpha counting system and theory, the factors of normalization are presented which were developed in the laboratory for the determination of the concentration of uranium and thorium in the sample, and the comparison of our results with the results derived from the equations that are used by Prof Ed. Rhodes for the same aim. These factors resulted while we were trying to comprehend the way of operation of the alpha counting system with the pairs technique.

Afterwards, in the next chapter, the determination of age of each sample is presented. The way of the determination of equivalent and annual doses is analytically introduced, the

methods and the techniques that were used for this aim. Forty samples have been dated, from which the twenty eight emanate from Egypt and the twelve from the Greece. The comments on the results are represented in the last chapter.

Finally, in the appendix, archaeological information are given for the monuments (description of the place, its use) and the excavations (findings, past excavations).

## Παράρτημα

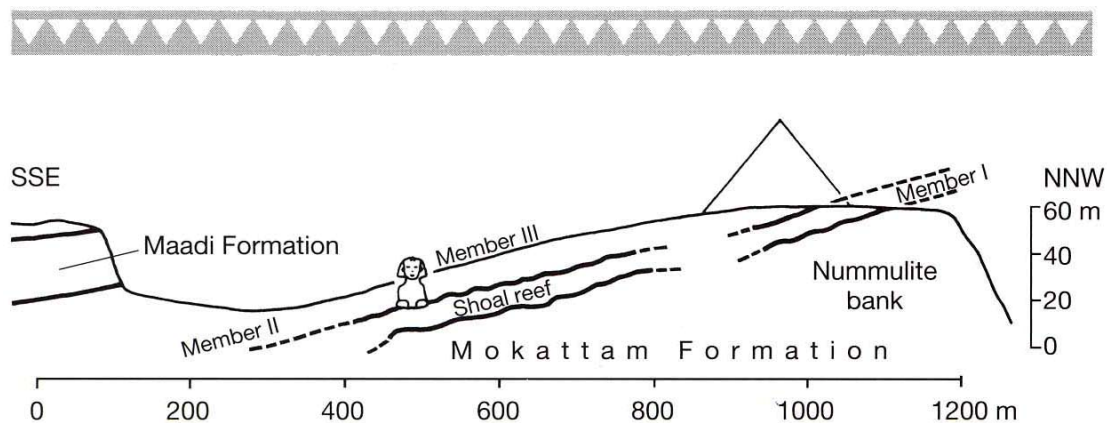
### 1. Αίγυπτος

#### 1.1 Περιοχή Γκίζα

##### 1.1.1 Ναός της Σφίγγας

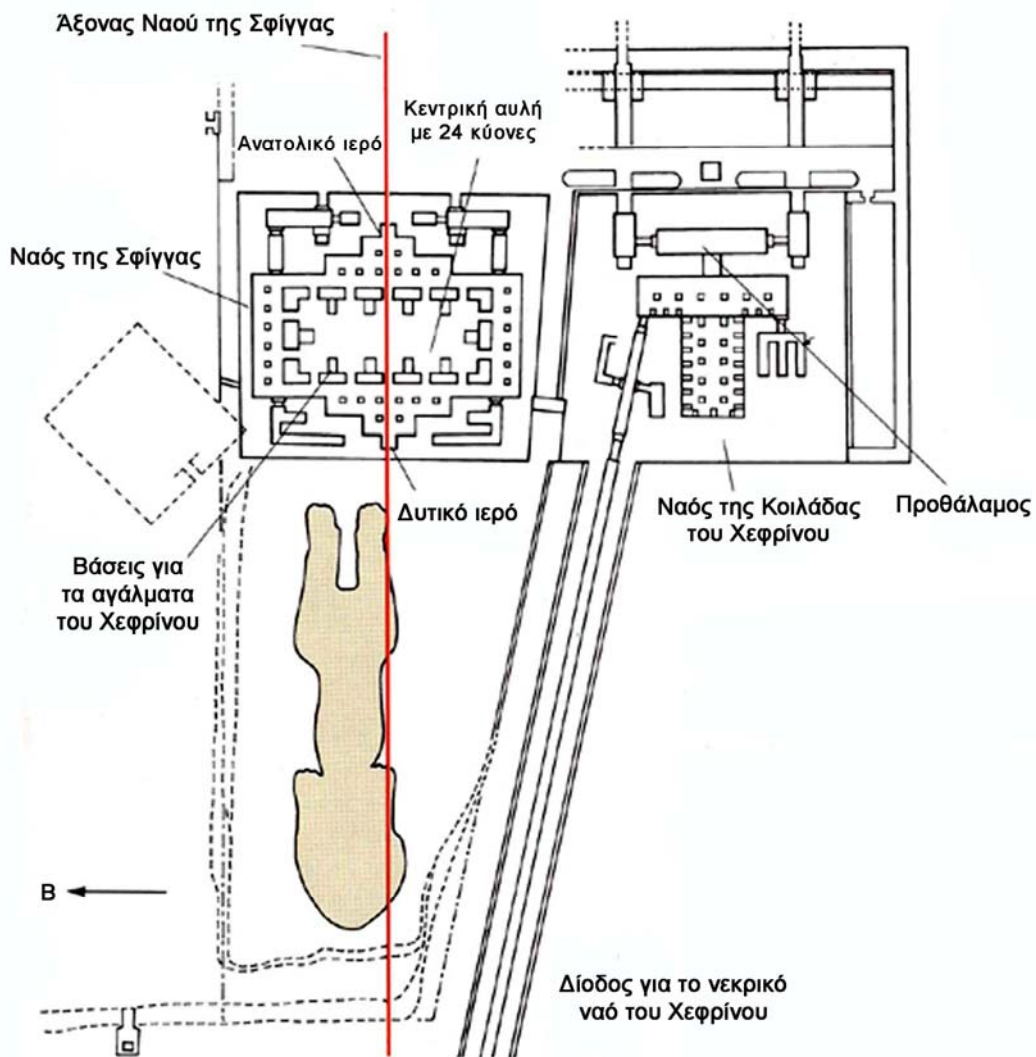
Μπροστά από τη Μεγάλη Σφίγγα βρίσκονται τα ερείπια ενός μικρού ναού, ο οποίος ανακαλύφθηκε από τον Baraize το 1925-1932 ενώ την καθάριζε από την άμμο.

Το δάπεδο του ναού είναι περίπου 2,5m χαμηλότερο από το επίπεδο της οροφής της ίδιας της Σφίγγας, το οποίο και κόβεται από τους σκληρούς ογκόλιθους του Member I (Εικ. π.1).



Εικ. π.1: Το υπέδαφος της περιοχής της Γκίζα αποτελείται από ασβεστόλιθο που ονομάζεται σχηματισμός Mokattam, κάνοντας έτσι την επιφάνειά της ιδανική για χτίσιμο. Κατεβαίνοντας την πλαγιά νοτιοανατολικά μια ακολουθία από στρώματα στα οποία εναλλάσσονται σκληρά και μαλακά πετρώματα. Οι Αιγύπτιοι απομάκρυναν τα μαλακά στρώματα για να αφαιρέσουν τα σκληρά σε ογκόλιθους για τις πυραμίδες, τους τάφους και τους ναούς. Γνωστά ως Member II και Member II, τα πετρώματα αυτά διακρίνονται στο σώμα της Μεγάλης Σφίγγας (Lehner, 1997).





Εικ. π.2: Σχηματική αναπαράσταση του Ναού της Σφίγγας και του Ναού της Κοιλιάδας του Χεφρίνου (Lehner, 1997).

Ο ναός φαίνεται να είναι αφιερωμένος στη Μεγάλη Σφίγγα, ξέρουμε όμως πολύ λίγα γι' αυτόν, γιατί δεν υπάρχουν κείμενα που να τον αναφέρουν. Ο Selim Bey Hassan, ο οποίος τον εξερεύνησε περαιτέρω το 1935-1936, ανέφερε ότι οι τραχείς ασβεστολιθικοί τοίχοι ήταν καλυμμένοι από γρανιτένιες πλάκες (Hassan, 1949). Εικοσιτέσσερις κίονες από κόκκινο γρανίτη σχηματίζουν μια κιονοστοιχία γύρω από την αυλή του ναού, η οποία ήταν στρωμένη με αλάβαστρο. Δώδεκα αγάλματα του Χεφρίνου, από κόκκινο γρανίτη και αυτά, κάθονταν σε κόχες κομμένες στο έδαφος μπροστά από κάθε κίονα φέροντας τη βάση κάθε αγάλματος στο ίδιο επίπεδο με το αλαβάστρινο πλακόστρωτο.

Μόνο εικασίες μπορούμε να κάνουμε για το συμβολισμό του ναού αφού είναι ανεπίγραφος. Ο Ricke που τον μελέτησε (1967-1970), βασιζόμενος σε παραλληλισμούς με το Νέο Βασίλειο, πρότεινε τα εξής (Ricke, 1970; Lehner, 1997; Edwards, 1995): οι εικοσιτέσσερις

κίονες αναπαριστούν τις εικοσιτέσσερις ώρες της ημέρας και της νύχτας και τα δώδεκα αγάλματα τις δώδεκα ώρες της ημέρας ή της νύχτας ή τους δώδεκα μήνες του έτους.

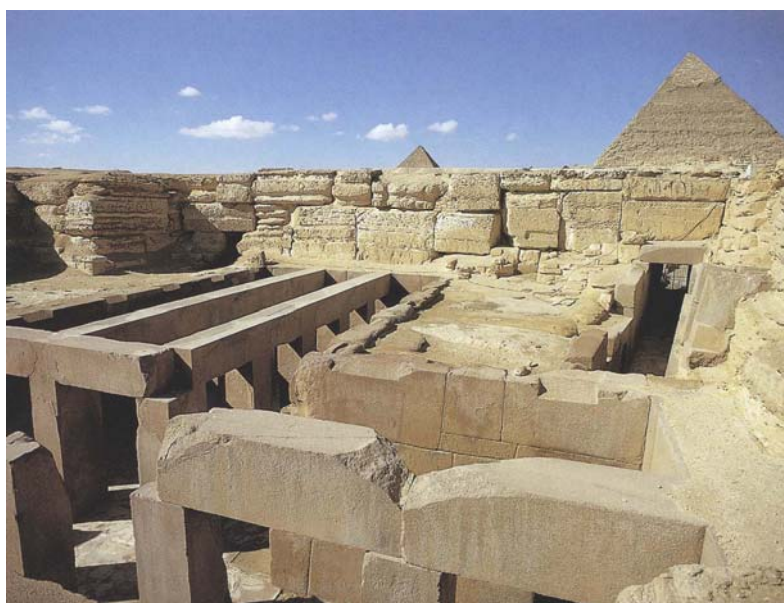
Ο ναός της Σφίγγας έχει το μοναδικό στοιχείο να έχει δύο ιερά στο ανατολικό και δυτικό άκρο, οι οποίοι πιθανότατα συνδέονται με την ανατολή και τη δύση του ηλίου. Μπροστά από κάθε ιερό υπάρχουν δύο κίονες, οι οποίοι σύμφωνα με τον Ricke (1970), συμβολίζουν τα χέρια και τα πόδια της θεάς Νουτ. Είναι ο μοναδικός γνωστός σε εμάς ναός από την 4<sup>η</sup> Δυναστεία που δεν ανεγέρθηκε για τον εορτασμό νεκρικής λατρείας και ήταν αφιερωμένο στο θεό Ήλιο με τις τρεις μορφές του, ως Κχεπρί το πρωί, ως Ρα το μεσημέρι και ως Ατούμ το απόγευμα.

Παρατηρώντας κανείς από το ναό τις ισημερίες, ο ήλιος φαίνεται να δύνει στο νότιο πόδι της Πυραμίδας του Χεφρίνου κατά μήκος της γραμμής του άξονα του ναού. Την ίδια στιγμή η σκιά της Σφίγγας και της Πυραμίδας συγχωνεύονται. Η Σφίγγα από μόνη της μοιάζει να συμβολίζει το Φαραώ να κάνει προσφορές στο θεό Ήλιο στην αυλή του ναού.

Στο θερινό ηλιοστάσιο ο ήλιος δύνει στο ίδιο σημείο του ορίζοντα για τρεις μέρες, προτού η θέση της δύσης του να αρχίσει να κινείται προς το νότο και πάλι. Κατά τη διάρκεια των τριών αυτών ημερών παρατηρώντας το ναό, ο ήλιος δύνει στο μέσο, ανάμεσα στις δύο μεγάλες πυραμίδες.

Το γεγονός ότι δε βρέθηκαν στον εσωτερικό χώρο τάφοι, εξηγεί την απουσία ιερέων και ιερειών και πιθανόν να μη χρησιμοποιήθηκε ποτέ. Ο ναός δεν ολοκληρώθηκε ποτέ, πιθανότατα εξαιτίας του θανάτου του Χεφρίνου. Την εποχή της 18<sup>ης</sup> Δυναστείας φαίνεται ότι είχε σκεπαστεί από άμμο, επειδή μια γωνία ενός μικρού ναού του Αμένοφη του Β΄ χτίστηκε πάνω στον τοίχο του περιβόλου του, κοντά στη βορειοδυτική γωνία.

### 1.1.2 Ο Ναός της Κοιλιάδας στο σύμπλεγμα της Πυραμίδας του Χεφρίνου



Εικ π.3: Γενική άποψη του Ναού της Κοιλιάδας του Χεφρίνου. Στο βάθος διακρίνεται και η Πυραμίδα (Lehner, 1997).

Δίπλα από το ναό της Σφίγγας βρίσκεται άλλο ένα κτίριο, το οποίο αρχικά θεωρήθηκε ναός σχετικός με τη Σφίγγα, αργότερα όμως αναγνωρίστηκε ως στοιχείο του πυραμιδικού συγκροτήματος του βασιλιά Χεφρίνου. Το κτίσμα ανακαλύφθηκε από τον Auguste Mariette το 1853 (Mariette et Rougé, 1854). Ήταν το πιο καλοδιατηρημένο κτίριο της 4<sup>ης</sup> Δυναστείας.

Ο ναός λειτουργούσε ως είσοδος στο όλο σύμπλεγμα της πυραμίδας. Είχε χτιστεί σε ένα σχεδόν τετράγωνο πλάτωμα και είχε διαστάσεις 44,80m από ανατολικά προς δυτικά και λίγο περισσότερο από βορρά προς νότο, εξαιτίας μιας ελαφριάς κλίσης προς τα έξω του βόρειου τοίχου, ενώ το ύψος φτάνει τα 13,10m. Ήταν χτισμένο από ακατέργαστο ασβεστόλιθο, επενδυμένο με λειασμένο κόκκινο γρανίτη. Οι είσοδοι του ναού ήταν κλειστές με μεγάλες μονόφυλλες πόρτες, πιθανώς από ξύλο κέδρου. Μια αποβάθρα ή ένα ανάχωμα υπήρχε μπροστά από το ναό της Σφίγγας, βάθους περίπου 16m, η οποία κατά πάσα πιθανότητα συνεχίζει νότια μπροστά από το Ναό της Κοιλιάδας. Από το σημείο αυτό ράμπες οδηγούν στις δύο πόρτες του ναού οι οποίες πιθανώς συμβολίζουν τη δυϊκότητα της Αιγύπτου (Άνω και Κάτω Αίγυπτος). Και οι δύο είσοδοι φυλάσσονταν από ένα ζευγάρι λιοντάρια ή, πιο πιθανά, σφίγγες μήκους 8m. Γύρω από κάθε είσοδο ήταν μια ταινία με ιερογλυφική γραφή που ανέφερε τα ονόματα και τους τίτλους του βασιλιά.

Ανάμεσα στις δύο πόρτες υπάρχει ένας προθάλαμος με καθαρά γρανιτένιους τοίχους και πάτωμα με λευκό αλάβαστρο, στο οποίο ο Mariette βρήκε ένα βαθύ λάκκο μέσα στον οποίο βρισκόταν ένα άγαλμα του Χεφρίνου από διορίτη (εικ. π.4). Το άγαλμα αυτό ήταν πιθανότατα τοποθετημένο στην αίθουσα σε σχήμα T, η οποία βρίσκεται μετά τον προθάλαμο, και τοποθετήθηκε στο λάκκο, για να διασωθεί από καταστροφή.



Εικ. π.4: Το άγαλμα του Χεφρίνου από διορίτη που βρήκε ο Mariette στον προθάλαμο του ναού (Edwards, 1995).

Η αίθουσα T αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος του ναού. Έχει και αυτή επένδυση από λειασμένο κόκκινο γρανίτη και αλαβάστρινο πάτωμα. Η οροφή στηρίζεται από δεκαέξι γρανιτένιους κίονες, πολλοί από τους οποίους βρίσκονται σήμερα στη θέση τους. Το μόνο φως της αίθουσας έμπαινε από σχισμές ψηλά στους πλαϊνούς τοίχους και, κατά ένα μέρος, από την κάτω επιφάνεια της επίπεδης γρανιτένιας οροφής. Είκοσι τρία βασιλικά αγάλματα από διορίτη, σχιστόλιθο και αλάβαστρο στέκονταν στο πλάι της αίθουσας, δεκαεφτά στο στέλεχος του T και έξι με ανατολικό προσανατολισμό στο κάθετο τμήμα. Το λιγοστό φως της αίθουσας δεν έπεφτε κατευθείαν πάνω στα αγάλματα. Αντανακλώνταν πρώτα στο πάτωμα και από τους τετράγωνους πεσσούς από κόκκινο γρανίτη που στήριζαν την οροφή.

Εκεί που η συστοιχία των αγαλμάτων τελειώνει στην αίθουσα T υπάρχει ένα άνοιγμα που οδηγεί σε διάδρομο από τον οποίο ξεκινάει μια κυκλική σκάλα. Η σκάλα αυτή δεξιόστροφα οδηγεί στην οροφή της κοιλάδας. Στη νότια πλευρά της οροφής βρισκόταν μια μικρή αυλή, ακριβώς πάνω από έξι αποθηκευτικούς χώρους, οι οποίοι ήταν τοποθετημένοι σε δύο ορόφους από τρία δωμάτια σε κάθε όροφο.

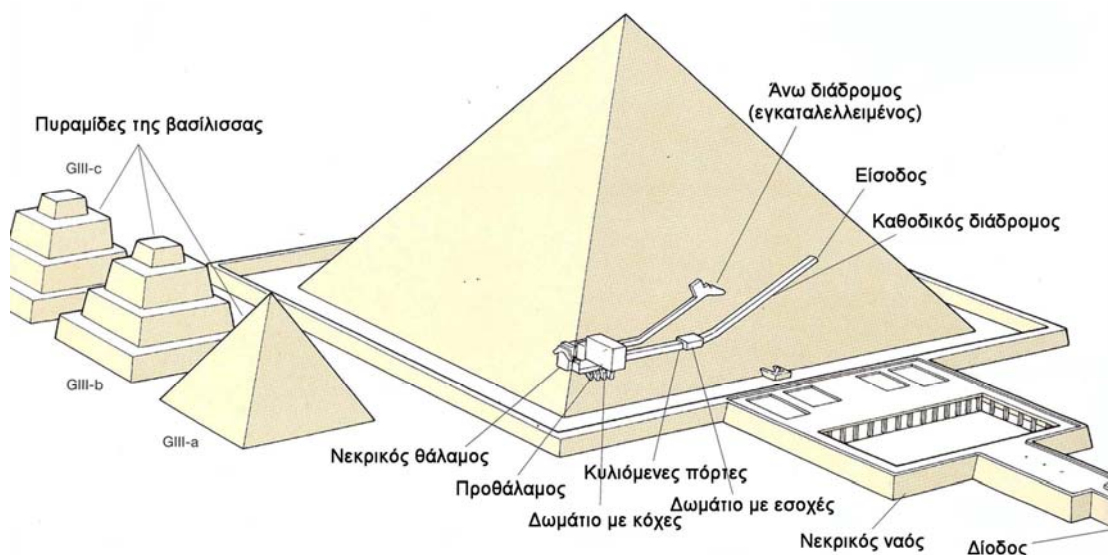
Σχετικά με τη χρήση του ναού οι απόψεις δίστανται. Σύμφωνα με τον Grdseloff (1941), σε ένα προσωρινό κίосκι χτισμένο στην οροφή, στο οποίο οδηγούσε ένα κεκλιμένο επίπεδο στρωμένο με αλάβαστρο από ένα πέρασμα έξω από τη βορειοδυτική γωνία της αίθουσας T, γίνονταν οι τελετές εξαγνισμού. Η ταρίχευση του σώματος θεωρούσε ότι γινόταν στον προθάλαμο. Αντίθετα, ο Abbe Drioton (1940) θεωρούσε ότι ο εξαγνισμός γινόταν στον προθάλαμο και η ταρίχευση στην οροφή. Ο H. Ricke, ωστόσο, θεωρούσε ότι η πραγματική

διαδικασία του εξαγνισμού και της ταρίχευσης έγιναν κάπου αλλού και επαναλαμβάνονταν με τελετουργικό τρόπο στο κτίριο αυτό, ο τελετουργικός εξαγνισμός στην αυλή μπροστά από το κτίριο και η τελετουργική ταρίχευση στην αίθουσα σχήματος T (Ricke, 1970).

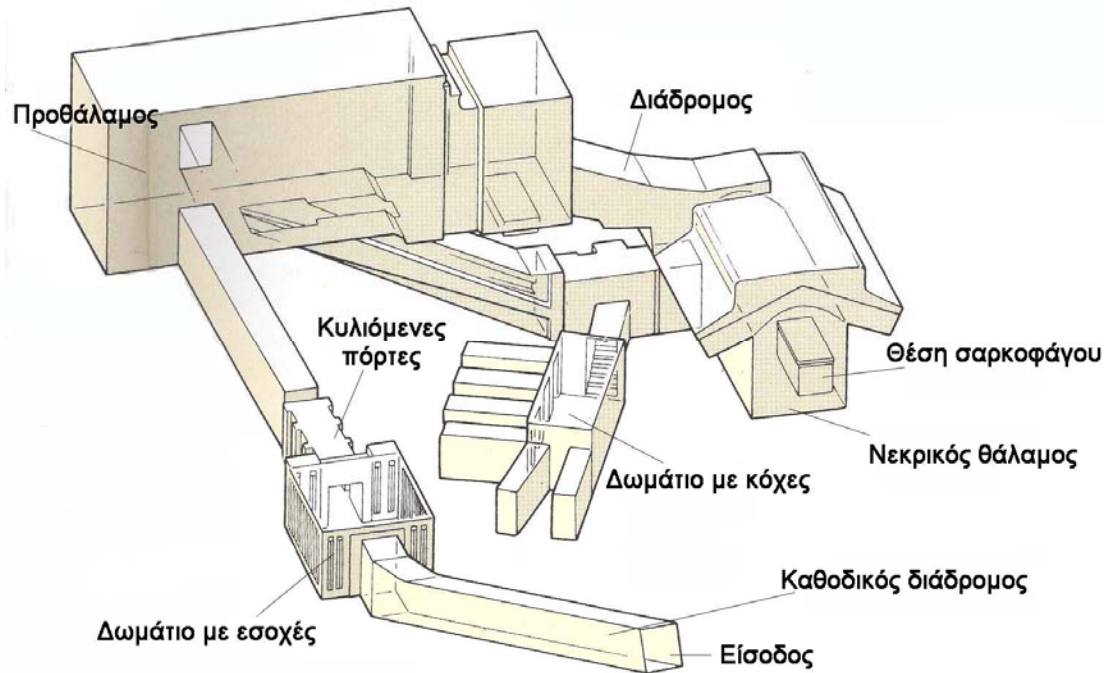
Μια τρίτη τελετή που έπρεπε να πραγματοποιηθεί στο κτίριο την νεκρικής κοιλάδας ήταν το 'Άνοιγμα του Στόματος'. Ιερείς, τουλάχιστον ένας από τους οποίους ήταν γιος του βασιλιά, πλησίαζαν κάθε ένα από τα είκοσι τρία αγάλματά του στην αίθουσα T, το ράντιζαν με νερό, το θυμίαζαν με λιβάνι, πρόσφεραν θυσίες μπροστά του, άγγιζαν το στόμα του με διάφορα εργαλεία, μεταξύ των οποίων με σκεπάρνι και σμίλη, έσταζαν γάλα στο στόμα του και το στόλιζαν με βασιλικά ενδύματα.

Μετά την τελετή, το φέρετρο που θα περιείχε το σώμα του βασιλιά θα τοποθετείτο στην αίθουσα και τα εντόσθια θα φυλάσσονταν προσωρινά στους τέσσερις από τους έξι αποθηκευτικούς χώρους που αναφέραμε πιο πάνω. Οι άλλοι δύο, κατά τους Ricke και Schott (Ricke, 1970; Lehner, 1997; Edwards, 1995), χρησίμευαν για την αποθήκευση των δύο στεμμάτων της Σαΐδας.

### 1.1.3 Η Πυραμίδα του Μυκερίνου



Εικ. π.5: Σχηματική αναπαράσταση της Πυραμίδας του Μυκερίνου (Lehner, 1997).



Εικ. π.6: Σχηματική αναπαράσταση του εσωτερικού της Πυραμίδας του Μυκερίνου (Lehner, 1997).

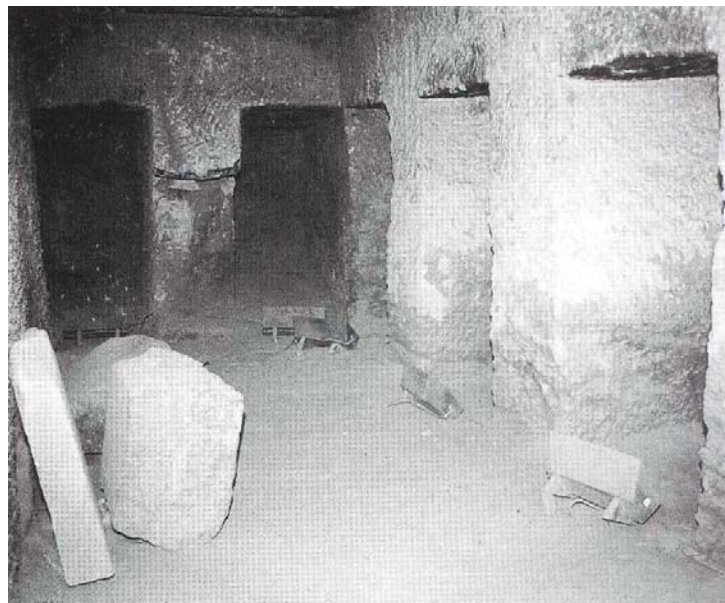
Η τρίτη πυραμίδα της ομάδας της Γκίζας βρίσκεται στη νοτιοδυτική γωνία της περιοχής. Παρόλο που είχε αποδοθεί στο Μυκερίνο από τον Ηρόδοτο και τον Διόδωρο τον Σικελιώτη, απόδειξη για το γεγονός αυτό δόθηκε μόλις το 1837-38 όταν ο συνταγματάρχης Howard Vyse ανακάλυψε το όνομα του Μυκερίνου γραμμένο με κόκκινη ώχρα στην οροφή του νεκρικού θαλάμου της δεύτερης από τις τρεις επικουρικές πυραμίδες του συγκροτήματος (Lehner, 1997). Ανασκαφές συνεχίστηκαν από τον G. A. Reisner την περίοδο 1905 με 1927 (Reisner, 1931).

Ο Μυκερίνος πέθανε μετά από 26 χρόνια βασιλείας αφήνοντας το συγκρότημα ημιτελές. Στην αποπεράτωσή του συνεισέφερε ο διάδοχός του, Σεπσεσκάφ, γεγονός που μαρτυρεί επιγραφή που βρέθηκε στα ερείπια του νεκρικού ναού. Τα κτίρια του Ναού της Κοιλιάδας και του Νεκρικού Ναού επισκευάστηκαν και τροποποιήθηκαν αργότερα, από ιερείς που λειτουργούσαν στο ναό κατά την 5<sup>η</sup> και 6<sup>η</sup> δυναστεία, σύμφωνα με τον Reisner.

Αν και η πυραμίδα αυτή είναι μικρότερη από τις άλλες δύο, με μάζα ίση με το 1/10 της μάζας της πυραμίδας του Χέοπα και με βάση μικρότερη από το 1/4 των άλλων δύο, ήταν η πιο πλούσια σε ευρήματα. Η κάθε πλευρά της βάσης της έχει μήκος 108,66m και έχει ύψος 65-66m. Το ανώτερο τμήμα της είναι επενδυμένο με λειασμένο ασβεστόλιθο, ενώ οι δεκαέξι κατώτεροι δρόμοι έχουν εξωτερική επένδυση από κόκκινο γρανίτη. Η αφαίρεση της άμμου από την είσοδο έδειξε ότι ο γρανίτης σ' εκείνο το τμήμα της βόρειας πλευράς έχει λειανθεί μέχρι το έδαφος. Τότε ήρθε στο φως μια επιγραφή η οποία λέει ότι ο Μυκερίνος πέθανε την 23<sup>η</sup> μέρα του 4<sup>ου</sup> μήνα του καλοκαιριού, χωρίς να αναφέρει έτος. Η επιγραφή είναι μεταγενέστερη της πυραμίδας και

χρονολογείται από την εποχή του Κχεμουάς, γιου του Ραμσή Β'. Η λείανση πρέπει να έγινε εκείνη την εποχή.

Η θέση της εισόδου είναι στη βόρεια πλευρά της πυραμίδας, όπως προαναφέρθηκε, και τέσσερα μέτρα από το έδαφος. Μέχρι το σημείο που εισέρχεται στο βράχο, ο επενδυμένος με γρανίτη διάδρομος της εισόδου κατεβαίνει με κλίση  $26^\circ$  για 31 μέτρα. Στο τέλος του βρίσκεται ένας προθάλαμος του οποίου οι τοίχοι είναι διακοσμημένοι με ανάγλυφες εσοχές. Ένας οριζόντιος διάδρομος με τρεις κυλιόμενες πόρτες από γρανίτη, προσαρμοσμένες σε κάθετες αυλακώσεις στους τοίχους έφραζαν ένα άλλον διάδρομο ο οποίος οδηγεί σε ένα τετράγωνο προθάλαμο, προσανατολισμένο ανατολικά προς δυτικά, με την ανατολική του άκρη ακριβώς κάτω από τον κάθετο άξονα της πυραμίδας. Άλλο ένα πέρασμα ανοίγει στον τοίχο του δωματίου, ακριβώς πάνω από το σημείο όπου το οριζόντιο πέρασμα μπαίνει, το οποίο μετά από ένα μικρό οριζόντιο τμήμα ανηφορίζει και σταματάει στον πυρήνα της πυραμίδας. Το πέρασμα αυτό πιθανότατα εγκαταλείφθηκε όταν το δάπεδο του προθαλάμου υπέστη βύθιση.



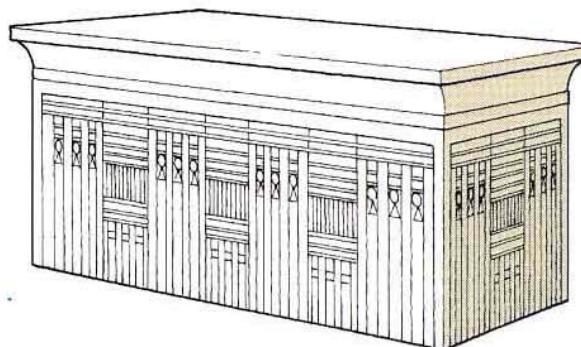
Εικ. π.7: Αποψη του δωματίου με τις έξι κόχες (Lehner, 1997).

Από το κέντρο του δαπέδου του προθαλάμου ξεκινάει ένα μικρό πέρασμα το οποίο κατηφορίζοντας δυτικά καταλήγει σε ένα μικρό οριζόντιο διάδρομο. Στα δεξιά βρίσκεται ένα ορθογώνιο δωμάτιο το οποίο προσεγγίζεται από μια σειρά σκαλοπατιών. Το δωμάτιο έχει τέσσερις βαθιές κόχες στον ανατολικό του τοίχο και άλλες δύο στο βόρειο, ενώ ολόκληρο το δωμάτιο φαίνεται να έχει λαξευτεί μέσα στο βράχο (εικ. π.7). Συνεχίζοντας στο διάδρομο, στο τέλος του βρίσκεται ο νεκρικός θάλαμος, ο οποίος είναι κατασκευασμένος μέσα σε έναν ορθογώνιο χώρο, καλυμμένο με γρανίτη (εικ. π.8). Το κάτω μέρος της αψιδωτής οροφής του έχει στρογγυλευτεί, δίνοντας την εντύπωση τοξωτής κάμαρας. Στο δωμάτιο αυτό ο

συνταγματάρχης Vyse ανακάλυψε μια ορθογώνια σαρκοφάγο (εικ. π.9) από βασάλτη της οποίας οι εξωτερικές πλευρές ήταν διακοσμημένες. Ήταν άδεια και της έλλειπε το σκέπασμα. Κομμάτια της όμως βρέθηκαν στο επάνω δωμάτιο μαζί με οστά και ανδρικά υφάσματα. Δυστυχώς, η σαρκοφάγος χάθηκε όταν το πλοίο Beatrice που τη μετέφερε στην Αγγλία βυθίστηκε στη Μεσόγειο.



Εικ. π.8: Άποψη του νεκρικού θαλάμου (Lehner, 1997).

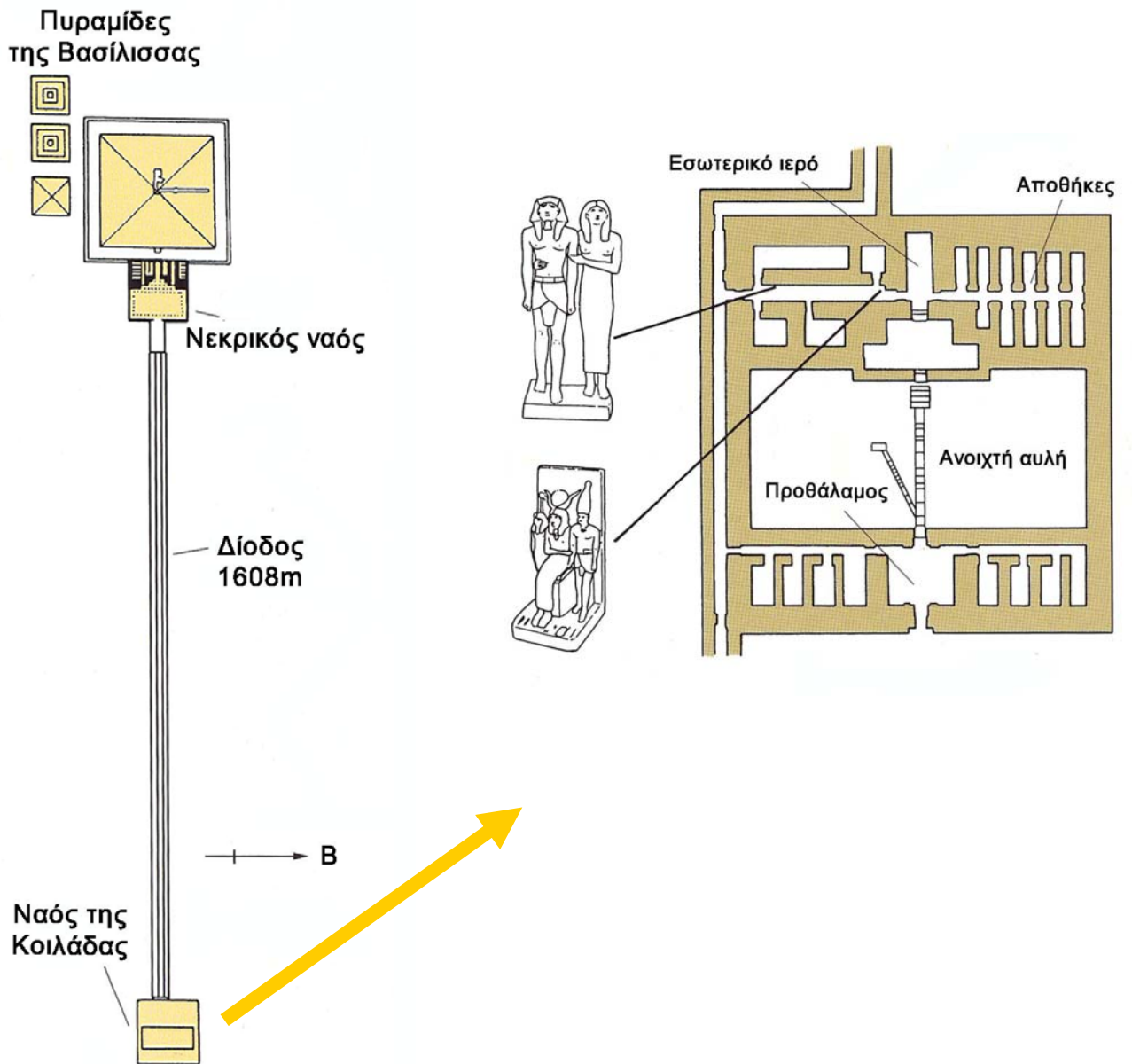


Εικ. π.9: Σχηματική αναπαράσταση της σαρκοφάγου του Μυκερίνου (Lehner, 1997).



Στο δωμάτιο αυτό ο Vyse βρήκε ακόμα ένα ξύλινο φέρετρο με ανθρώπινο σχήμα, το οποίο έφερε επιγραφή με το όνομα του Μυκερίνου. Το σχήμα του όμως παραπέμπει στη Σαϊτική εποχή. Χρονολόγηση με ραδιάνθρακα που έγινε στα οστά έδειξε ότι χρονολογούνται από την πρώιμη Χριστιανική εποχή. Το πώς βρέθηκαν τα οστά αυτά μέσα στην πυραμίδα δεν έχει εξηγηθεί ακόμα (Lehner, 1997; Edwards, 1995).

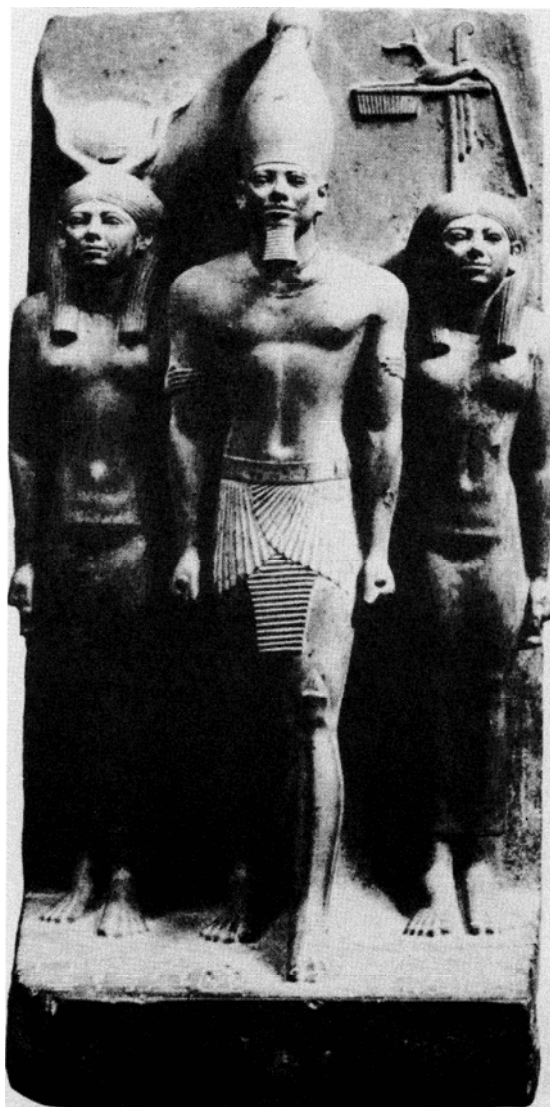
1.1.4 Ο Ναός της Κοιλιάδας στο σύμπλεγμα της Πυραμίδας του Μυκερίνου



Εικ. π.10: Διάγραμμα του συμπλέγματος της Πυραμίδας του Μυκερίνου (αριστερά) και του Ναού της Κοιλιάδας του (δεξιά) (Lehner, 1997).

Για να βρει την Κοιλιάδα του Ναού του Μυκερίνου ο Reisner πρόβαλε τον άξονα της διόδου από την είσοδο του Νεκρικού Ναού (Reisner, 1931). Ο ναός χτίστηκε σε δύο στάδια. Αρχικά, επί της βασιλείας του Μυκερίνου μπήκαν τα θεμέλια με μεγάλους ογκόλιθους από ασβεστόλιθο από τοπικό λατομείο, ενώ αργότερα ολοκληρώθηκε από τούβλα, από τον Σεπσεσκάφ, γιο του Μυκερίνου. Κατά την 6<sup>η</sup> δυναστεία και πιθανώς κατά τη βασιλεία του Πεπί Β', ανοικοδομήθηκε από την αρχή μετά από μεγάλη πλημμύρα.

Στο μικρό χώρο προσφορών του ναού, ο Reisner βρήκε τις βάσεις τεσσάρων αλαβάστρινων αγαλμάτων του Μυκερίνου. Στο εσωτερικό του ναού, στο ιερό, βρέθηκαν τα απομεινάρια και άλλων αγαλμάτων. Στις αποθήκες, πίσω από το κεντρικό ιερό, βρέθηκαν αγάλματα από σχιστόλιθο, σκαλισμένα σε τριάδες, οι οποίες αποτελούνταν από τη θεά Χαθόρ, το βασιλιά και μια από τις θεότητες του νομού (εικ. π.11). Ο Μυκερίνος σχεδίαζε να έχει σαράντα δύο τέτοιες τριάδες, που η κάθε μια θα τον απεικόνιζε και με διαφορετική κάθε φορά θεότητα. Ανακαλύφθηκαν όμως μόνο τέσσερα, καθώς και κάποια θραύσματα.



Εικ. π.11: Ένα από τα αγάλματα από σχιστόλιθο σκαλισμένα σε τριάδες που βρέθηκαν στο ναό (Edwards, 1995).

Ένα ακόμη σύμπλεγμα από σχιστόλιθο, το οποίο αποτελεί ένα από τα πιο θαυμάσια κομμάτια ολόκληρης της ιστορίας της αιγυπτιακής τέχνης, έφερε στο φως η πρώτη κιόλας ανασκαφή. Πρόκειται για το σύμπλεγμα του βασιλιά και της βασίλισσας Κχαμερνεμπτί Β΄ (εικ. π.12).

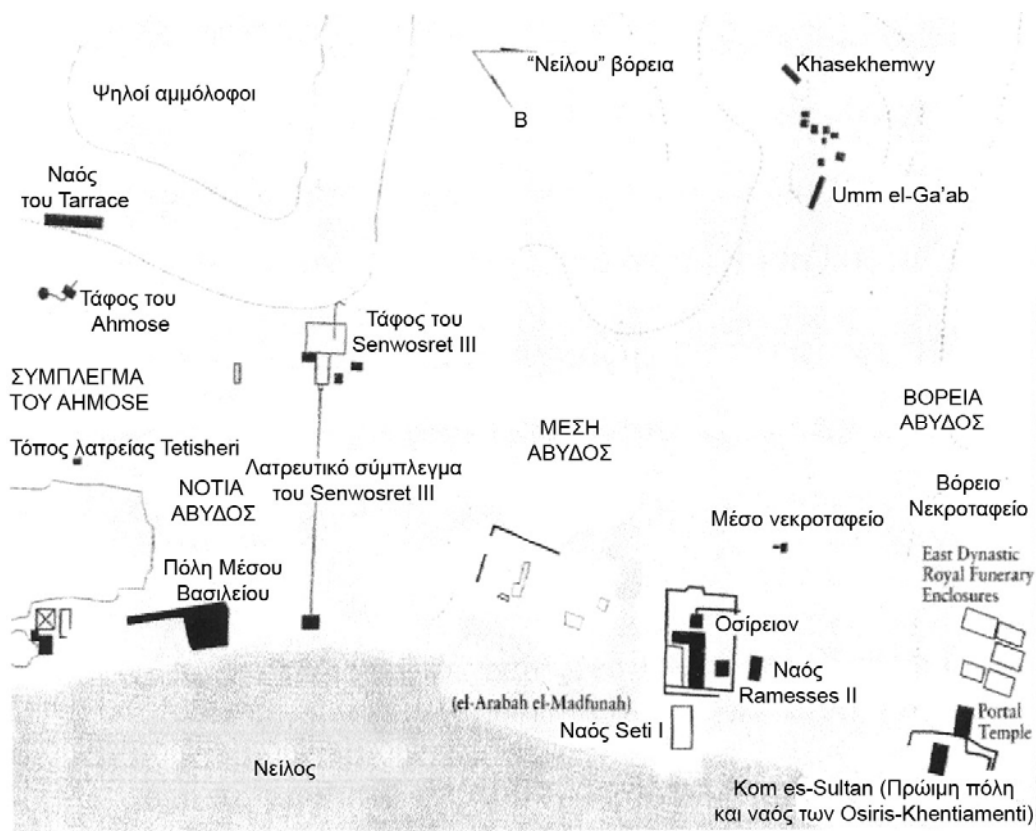


Εικ. π.12: Σύμπλεγμα από σχιστόλιθο του βασιλιά και της βασίλισσας Κχαμερνεμπτί Β' (Edwards, 1995).

Από τις 8 αναπαραστάσεις του προσώπου του βασιλιά, ούτε δύο δεν είναι ακριβώς ίδιες, αλλά στην πλειοψηφία τους τον απεικονίζουν με ελαφρώς εξόφθαλμα μάτια, στρογγυλεμένη μύτη και προεξέχον το κάτω χείλος.

Δεκαπέντε αγαλματίδια του Μυκερίνου έμειναν ημιτελή, ακόμα το σύμπλεγμα με τη βασίλισσα δεν είχε λειανθεί ολοκληρωτικά. Ο Reisner που τα εξέτασε λεπτομερώς, μπόρεσε να διακρίνει οκτώ στάδια κατασκευής, μερικά από τα οποία αντιστοιχούν σε διάφορα στάδια που απεικονίζονται σε ημιτελή αγάλματα από παραστάσεις εργαστηρίων γλυπτών οι οποίες έχουν βρεθεί σε τοιχογραφίες ιδιωτικών τάφων (Lehner, 1997; Edwards, 1995).

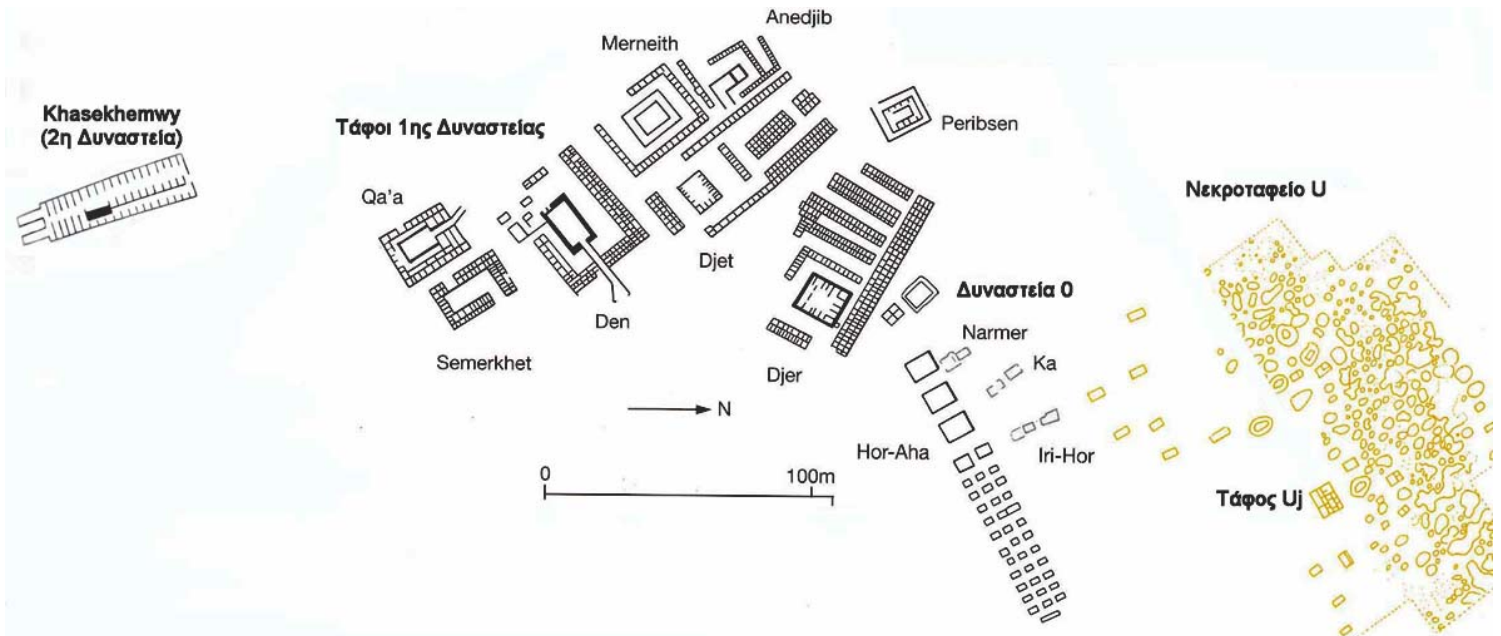
1.2 Περιοχή Άβυδος



Εικ. π.13: Χάρτης των μνημείων στην Άβυδο (Baines and Malek,2000).

Στην Άβυδο οι ψηλοί αμμόλοφοι σχηματίζουν ένα μεγάλο κοίλωμα, το οποίο διχοτομείται από ένα φαράγγι σχήματος V, δίνοντας την εντύπωση στους βασιλιάδες ότι εκεί θα πρέπει να ήταν η πύλη για τον άλλο κόσμο. Έτσι η Άβυδος έγινε θρησκευτικό κέντρο και πολλοί βασιλείς έκαναν εκεί τους τάφους τους. Οι Αιγύπτιοι τον τόπο αυτό τον ονομάζουν Umm el-Qa'ab που στα αραβικά σημαίνει «Μητέρα των δοχείων», λόγω του μεγάλου αριθμού κεραμικών και οστράκων που βρέθηκαν στην περιοχή.

## 1.2.1 Ταφικό σύμπλεγμα Khasekhemwy



Εικ. π.14: Σχεδιάγραμμα του νεκροταφείου του Umm el-Qa'ab στην Άβυδο (Lehner, 1997).

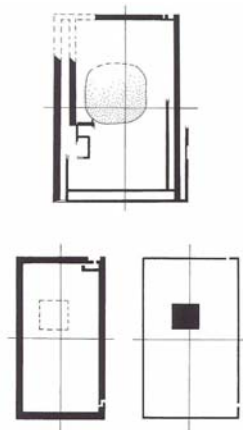
Στην ένωση του φαραγγιού με την καλλιεργήσιμη έκταση, οι βασιλείς τις πρώτης και δεύτερης δυναστείας έχτισαν το δεύτερο στοιχείο του συμπλέγματος των τάφων τους στην Άβυδο, μια μεγάλη παραλληλόγραμμη αυλή. Τα πιο πρώιμα παραδείγματα είναι καθορισμένα από τον περιβάλλοντα βοηθητικό τάφους, ενώ οι τελευταίοι έχουν περίφραξη από τοίχους με κόχες από τούβλα.

Εφτά βασιλιάδες και μια βασίλισσα της πρώτης Δυναστείας έχτισαν τους τάφους τους στην Άβυδο. Ένα σπάσιμο στην ακολουθία για τη δεύτερη Δυναστεία κάνει την ανίχνευση και την εξέλιξη των βασιλικών τάφων μέχρι τις πυραμίδες δύσκολη. Δε βρέθηκε ο τάφος του Hetepsekemwy, του διαδόχου του Qa'a στη βασιλική λίστα και του πρώτου βασιλιά της δεύτερης Δυναστείας. Ο τελευταίος βασιλιάς της Δυναστείας αυτής, Khasekem, άλλαξε το όνομά του σε Khasekhemwy («η εμφάνιση των δύο δυνάμεων») προφανώς μετά την κατάληξη της πολιτικής διαμάχης για τη διαδοχή. Ο τάφος του στην Άβυδο είναι μια σημαντική αναχώρηση από τον τετράγωνο τάφο, σε έναν μακρύ και ακανόνιστο λάκκο, χωρισμένο σε σαράντα αποθήκες.

Ο τάφος του Khasekhemwy ήταν ο πιο μεγάλος και κάλυπτε μια έκταση πάνω από 5000m<sup>2</sup>. Οι περισσότεροι ήταν άδειοι, αλλά αυτοί των Khasekhemwy και Peribsen έχουν ένα μικρό κτίριο το οποίο κάθεται πλάγια μέσα στην είσοδο στην νοτιοανατολική γωνία. Το κτίριο αυτό θα μπορούσε να στέγαζε το άγαλμα του βασιλιά ή προσφορές προς τον ίδιο.

Μια άλλη ερμηνεία, βλέπει τις περιφράξεις αυτές ως ακριβή αντίγραφα πραγματικών διαστάσεων των ανοιχτών αυλών για τις βασιλικές επιδείξεις στο παλάτι. Άλλη άποψη προτείνει ότι, τοποθετημένοι στην άκρη της καλλιεργήσιμης γης, έπαιξαν ρόλο παρόμοιο με αυτόν των Ναών των Κοιλάδων στις πυραμίδες, στην οποία περίπτωση το φαράγγι σχηματίζει μια μορφή φυσικού διαδρόμου (causeway) προς στους λόφους – τάφους. Τόσο στη μορφή όσο και στην τοποθεσία των εισόδων τους, οι περιφράξεις θα μπορούσαν επίσης να θεωρηθούν ως ο πρόδρομος των κοιλωμάτων του τοίχους που περιβάλλει το σύμπλεγμα του Djoser. Όταν ζωγραφίστηκε η περίφραξη του Khasekhemwy, όπως οι μασταμπάδες στη Σακκάρα, αναπαριστούσε τοίχους με ξύλινα πλαίσια.

Ο David O'Connor ανακάλυψε ίχνη του δαπέδου της περίφραξης του τάφου του Khasekhemwy (Lehner, 1997; O'Connor, 1989, 1991, 1995). Κοντά στο κέντρο βρήκε μια μικρή γραμμή από τούβλα τα οποία οδηγούσαν σε μια γωνία, υπονοώντας την επάνω πηγή ή το ανάχωμα. Ο O'Connor υποψιάζεται ότι αυτά είναι τα απομεινάρια ενός λόφου από τούβλα, μιας πρωτο-πυραμίδας.

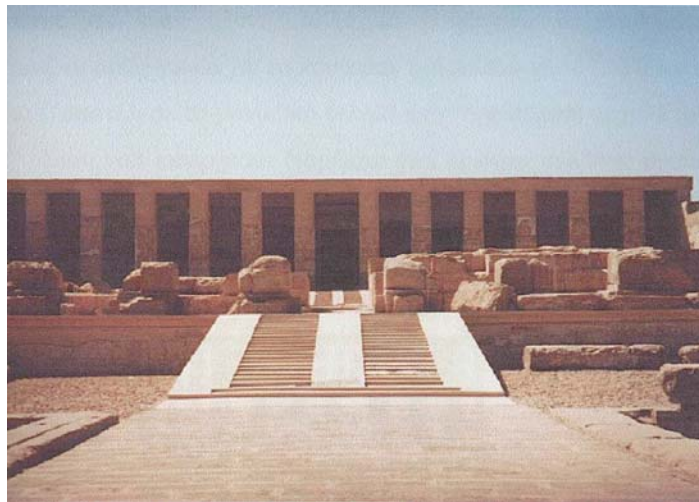


Εικ. π.15: Αφού βρήκε μια σειρά από τούβλα τα οποία θα μπορούσαν να ανήκουν σε ένα λόφο μέσα στην κοιλάδα του Khasekhemwy (κάτω αριστερά), ο David O'Connor ανακατασκεύασε την πρωτοπυραμίδα ελαφρώς βόρεια και δυτικά του κέντρου, μια θέση που είχε ο ναός στην Hierakonpolis (κορυφή) και η βαθμωτή πυραμίδα του Djoser (κάτω δεξιά) στις περιφράξεις του καθενός (Lehner, 1997).

Ακόμα πιο δραματική ήταν η ανακάλυψη μιας σειράς από δώδεκα θαμμένων βαρκών, ανατολικά του συμπλέγματος του Khasekhemwy. Κάθε μια ξύλινη βάρκα περικλείεται από τούβλα και συνδετικό υλικό για την κατασκευή του μικρού τοίχου λάσπη και ασβέστη. Το μήκος τους ποικίλει από δεκαεννιά μέχρι είκοσι εννιά μέτρα. Αυτός ο στόλος δυναμώνει τη σύγκριση με τις κοιλάδες περιφράξεις των πυραμίδων-ναών, οι οποίες ήταν σταθμοί σύνδεσης με τον Άδη (O'Connor, 1991, 1995).

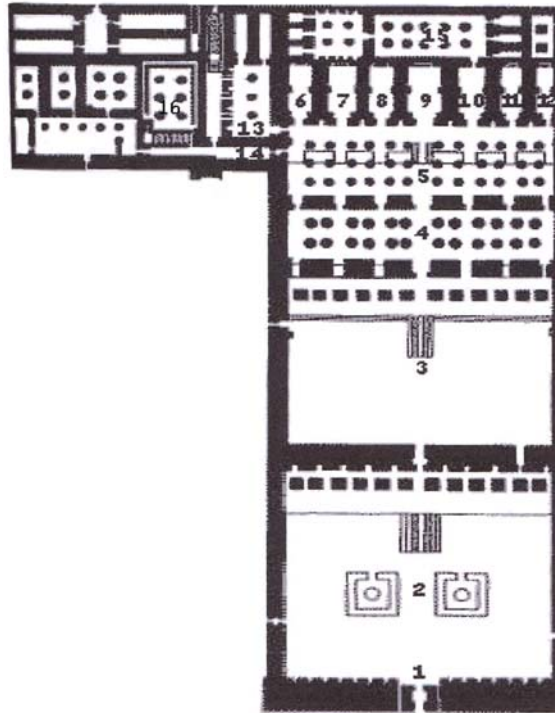


### 1.2.2 Ναός Σέθου του 1<sup>ου</sup>



Εικ. π.16: Πρόσοψη του ναού του Σέθου Ι (Baines and Malek,2000).

Από τους νεκρικούς ναούς στη Δυτική κοιλάδα των Θηβών δεσπόζει ο ναός του Σέθου Ι. Με σκοπό να επιβεβαιώσει την εγκυρότητα και την ορθότητα της πίστης του στους θεούς κατά τη διάρκεια της βασιλείας του, μετά την επαναστατική περίοδο βασιλείας του αιρετικού Ακενατών, έχτισε αυτό το ναό όπου οι θεοί θα λατρεύονταν με τις απαιτούμενες τιμές (David, 1981).



Εικ. π.17: Κάτοψη του ναού. Τα επιμέρους τμήματά του είναι: 1: Πρώτος πυλώνας, 2: Πρώτος προαύλιος χώρος, 3: Δεύτερος προαύλιος χώρος, 4: Πρώτη υπόστυλη αίθουσα, 5: Δεύτερη υπόστυλη αίθουσα, 6: Ιερό Σέθου Ι, 7: Ιερό Φθα, 8: Ιερό Ρα Χαράκτι, 9: Ιερό Άμμωνα Ρα, 10: Ιερό Όσιρι, 11: Ιερό Ίσιδας, 12: Ιερό Ωρου, 13: Αίθουσα Νεφερτούμ και Φθα-Σοκάρ, 14: Αίθουσα των Βασιλέων, 15: Άδυτο Όσιρι, 16: Ιερό με λέμβους (Baines and Malek, 2000).

Ο ναός δεν ήταν χτισμένος σε έναν άξονα. Τα βοηθητικά δωμάτια σχημάτιζαν ορθή γωνία με το κεντρικό τμήμα του ναού. Στο ναό εισέρχεται κανείς διαμέσου ενός πυλώνα (εικ. π.17, 1), ο οποίος σήμερα είναι κατεστραμμένος. Ακολουθεί μια αυλή (εικ. π.17, 2) με κιονοστοιχίες, η οποία όμως έχει και αυτή καταστραφεί. Στον ανατολικό τοίχο υπάρχουν ανάγλυφα με τους πολέμους και τα κατορθώματα του Ραμσή ΙΙ. Σύμφωνα όμως με τον Grimal (1994) υπάρχουν υπολείμματα της διακόσμησης του Σέθου σε ορισμένα σημεία.

Μια δεύτερη αίθουσα ακολουθεί διαμέσου ενός κεκλιμένου επιπέδου (εικ. π.17, 3). Η αίθουσα αυτή έχει δίοδο στο ΝΔ μέρος της και επικοινωνεί με τα διοικητικά κτίρια και τις αποθήκες. Και στην αίθουσα αυτή υπάρχουν ανάγλυφα του Ραμσή ΙΙ. Τόσο η πρώτη όσο και η δεύτερη διακοσμήθηκαν υπό την επίβλεψή του μετά το θάνατο του πατέρα του.

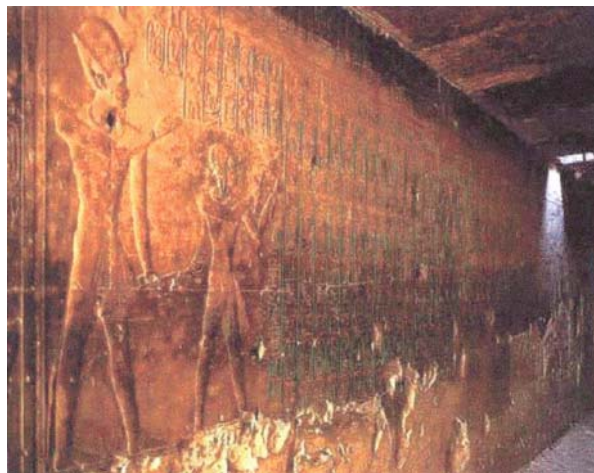
Ένα κεκλιμένο επίπεδο οδηγεί σε εξέδρα με δώδεκα τετράγωνους ασβεστολιθικούς κίονες με βάση από ψαμμίτη και από εκεί σε μια υπόστυλη αίθουσα με επτά πύλες (εικ. π.17, 4), η οποία στηρίζεται από είκοσι τέσσερις κίονες. Ακολουθεί δεύτερη υπόστυλη αίθουσα με επτά πύλες και αυτή (εικ. π.17, 5) αλλά με τριάντα έξι κίονες. Οι κίονες είναι τοποθετημένοι σε ζευγάρια σχηματίζοντας διαδρόμους που οδηγούν σε μια υπερυψωμένη πλατφόρμα με επτά δωμάτια-ιερά.

Στην πρώτη υπόστυλη αίθουσα, αριστερά και δεξιά κάθε διαδρόμου, υπάρχουν ανάγλυφα του Ραμσή ΙΙ με το θεό του ιερού που οδηγεί ο διάδρομος. Η πρώτη από τη δεύτερη υπόστυλη αίθουσα χωρίζεται από έναν τοίχο από ψαμμίτη. Η αίθουσα αυτή, σε αντίθεση με την πρώτη, είναι διακοσμημένη από το Σέθου Ι με ανάγλυφα, τα οποία από καλλιτεχνικής άποψης είναι ανώτερα από αυτά της πρώτης αίθουσας.

Τα ιερά από αριστερά προς τα δεξιά είναι: του Σέθου Ι (εικ. π.17, 6), του Φθα (εικ. π.17, 7), το οποίο είναι κατεστραμμένο, του Ρα Χαράκτι (εικ. π.17, 8), του Άμμωνα Ρα (εικ. π.17, 9), του Όσιρι (εικ. π.17, 10), της Ίσιδας (εικ. π.17, 11) και του Ωρου (εικ. π.17, 12).

Το ιερό του Όσιρι ήταν ανοιχτό στο πίσω τμήμα του και υπάρχει μια πύλη που οδηγεί σε δύο αίθουσες, το πρώτο και δεύτερο άδυτο ιερό προς τιμή του θεού. Στο μεγαλύτερο του οποίου η οροφή στηρίζεται από δέκα κίονες (εικ. π.17, 15) και στη δεξιά πλευρά του, υπάρχουν δύο μικροί χώροι και πίσω από αυτούς ένα κλειστό, τυφλό, δωμάτιο, στο οποίο φυλάσσονταν οι θησαυροί του ναού.

Στο πίσω μέρος της δεύτερης υπόστυλης αίθουσας υπάρχουν δύο εισοδοί. Η μια οδηγεί στην αίθουσα προς τιμήν του θεού Φθα-Σοκάρ (εικ. π.17, 13). Η αίθουσα αυτή καταλήγει σε δύο άδυτα προς τιμή του θεού και της Νεφερούμ. Η άλλη είσοδος οδηγεί στην αίθουσα των Βασιλέων (εικ. π.17, 14) και στο ιερό με τις λέμβους (εικ. π.17, 16). Στο δεξιό τοίχο της αίθουσας των Βασιλέων βρίσκεται η Λίστα των Βασιλέων (εικ. π.18) (Grimal, 1994).



Εικ. π.18: Η λίστα των Βασιλέων (Malek, 1999).

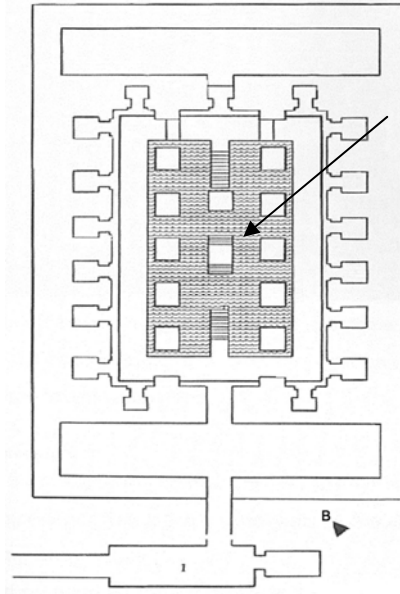
Ανάμεσα στην αίθουσα του Φθα-Σοκάρ και στο ιερό με τις λέμβους υπάρχει ένας σκοτεινός διάδρομος ο οποίος και οδηγεί στο Οσίριον.

### 1.2.3 Οσίριον

Το Οσίριον βρίσκεται στο πίσω μέρος του ναού του Σέθου Ι, σε χαμηλότερο επίπεδο και σε άμεση επαφή μαζί του. Αποτελεί ένα κενοτάφιο και σχεδιάστηκε με σκοπό να δίνει την

εντύπωση ενός υπόγειου βουνού ή νησιού, περιτρεχούμενου από κανάλια νερού (David, 1981). Από ανασκαφές που έγιναν το 1940 έφεραν στο φως έναν πέτρινο αγωγό, ο οποίος περνά κάτω από το ναό και τροφοδοτεί το κανάλι με νερό.

Αρχικά ο ναός θα πρέπει να ήταν στεγασμένος. Η μοναδική δυνατότητα πρόσβασης στο ναό είναι από το διάδρομο στο ναό του Σέθου Ι. Ο άξονας του κτιρίου είναι κάθετος με το διάδρομο αυτό.



Εικ. π.19: Η κάτοψη του Οσίριον. Με βέλος σημειώνεται η κεντρική αίθουσα.

Το κενοτάφιο αποτελείται από μια κεντρική αίθουσα χτισμένη σε πλατφόρμα και περιτριγυρισμένη από βαθύ κανάλι νερού και έναν εγκάρσιος θάλαμος με στέγη ερμητικά κλειστή σε σχέση με το υπόλοιπο κτίσμα (Helck et al., 1972-1996). Η κεντρική αίθουσα είναι διαστάσεων 30x20m και βρίσκεται 12,5m κάτω από την επιφάνεια της ερήμου (Murray, 1904). Εσωκλείει ένα μεγάλο νησί από ψαμμίτη με δέκα ορθογώνιους κίονες από κόκκινο γρανίτη, οι οποίοι στηρίζουν τις επιστήλιες δοκούς και την οροφή, και οι δύο κατασκευασμένοι από γραφίτη. Στο νησί αυτό είχε τοποθετηθεί η σαρκοφάγος του θεού Όσιρι (Badaway, 1966). Υπάρχουν τρεις πόρτες, μια στη νότια πλευρά, η οποία οδηγεί στο νότιο διαμέρισμα, μια στον ανατολικό τοίχο οδηγεί σε ένα κατηφορικό μονοπάτι και η τρίτη που οδηγεί στον βόρειο διάδρομο.

Η νότια πλευρά, γύρω από το περίγραμμα της πόρτας, έχει χαραγμένα κεφάλαια από τη Βίβλο των Νεκρών. Στον ανατολικό τοίχο η επικάλυψη έχει αφαιρεθεί από τους Ρωμαίους (Murray, 1904). Στο δυτικό τοίχο υπάρχει χαραγμένη η αναζωογόνηση του Όσιρι από τον Ώρο και το σύμβολο της ενότητας της Άνω και της Κάτω Αιγύπτου καθώς και η φιγούρα του βασιλιά Μερνεφθά, εγγονού του Όσιρι. Το διαμέρισμα της σαρκοφάγου είναι διακοσμημένο και αυτό από κομμάτια από τη Βίβλο των Νεκρών (Murray, 1904).

Στον εξωτερικό τοίχο υπάρχουν δεκαοχτώ εσοχές οι οποίες δεν έχουν ολοκληρωθεί, από έξι σε κάθε μακρά πλευρά και από τρεις στις άλλες δύο.

### 1.3 Περιοχή Φαγιούμ

#### 1.3.1 Ναός Qasr el-Sagha

Πρόκειται για έναν μικρό και χωρίς επιγραφές ναό, 8km βόρεια της λίμνης Birket Qarum, στο μπροστινό άκρο ενός οριζόντιου πλατώματος περίπου 34m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, στο βορειοδυτικό άκρο του Φαγιούμ (Arnold, 1977). Υπάρχει ένα ορθογώνιο κτίσμα χτισμένο από τούβλα εκεί κοντά με τις πλευρές του προσεχτικά ευθυγραμμισμένες με τα σημεία του ορίζοντα. Σύμφωνα με το Βρετανό Αιγυπτιολόγο Barry Kemp το κτίσμα βρισκόταν εκεί για να επιβλέπει τις μεταφορές του βασάλτη για το Gebel Katrani, βορειότερα του Φαγιούμ. Βρισκόταν στο τέλος ενός μακριού πλακόστρωτου δρόμου ο οποίος οδηγούσε στα ορυχεία βασάλτη στους κοντινούς λόφους (Kemp, 1992).

Αποτελείται από τρία επίπεδα. Στο ισόγειο, ένα 37-41cm μεγάλο στρώμα από εξαιρετικά ευαίσθητο ψαμμίτη, το οποίο πολύ δύσκολα διακρίνεται από το πέτρινο σε σειρά υπόβαθρο κάτω από τα θεμέλια. Ακολουθεί ένα βαρύ στρώμα 30cm από λευκό ψαμμίτη και τέλος, το τελευταίο επίπεδο, ένα 51-57cm μεγάλων στυλοβατών από πολύ σκληρό ασβεστόλιθο. Το υλικό κατασκευής ήταν μεγάλοι ογκόλιθοι από ψαμμίτη διαστάσεων 8,5x21,5m. Το Qasr el-Sagha είναι ο πρώτος γνωστός ναός κατασκευασμένος εξολοκλήρου από πέτρα (Helck, 1984).

Κανείς διασχίζει το ναό μέσα από μια μνημειώδη πύλη, η οποία έχει αφαιρεθεί ακριβώς από τους αρμούς από τον μπροστινό τοίχο. Δε διαθέτει υπόστυλη αίθουσα, πιθανώς επειδή δεν προοριζόταν για περίπλοκες τελετουργίες που θα απαιτούσαν μια τέτοια αίθουσα (Arnold, D. and Arnold, Do., 1979).

Δυστυχώς η απουσία πάσης φύσεως επιγραφής δυσκολεύει την ακριβή χρονολόγησή του. Το μοναδικό γραπτό στοιχείο με ιερογλυφικά σύμβολα ήταν το nb-tAwy, που σημαίνει «Ο βασιλιάς των δύο τόπων» (Arnold, D. and Arnold, Do., 1979). Τίποτα δεν είναι γνωστό για το Φαραώ που κατασκεύασε το ναό ή για το θεό στον οποίο ήταν αφιερωμένος. Κεραμικά όστρακα βρέθηκαν κοντά στο ναό καλύπτουν μια περίοδο από το Αρχαίο Βασίλειο μέχρι την Πτολεμαϊκή, τη Ρωμαϊκή και τους Ισλαμικούς χρόνους. Η Arnold (1977) υποστηρίζει ότι το κτίσμα είναι του Μέσου Βασιλείου βασιζόμενη στα εξής:

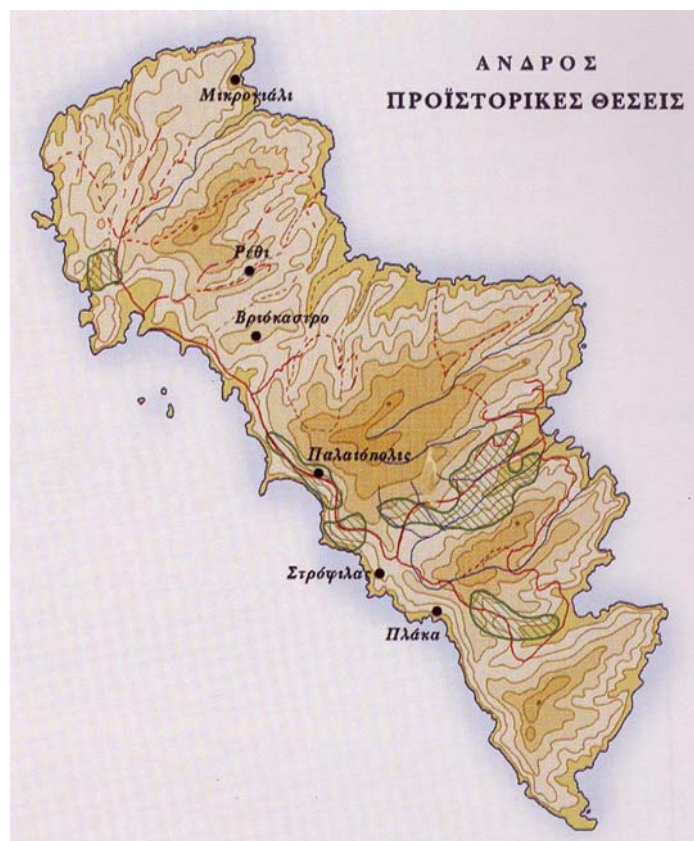
- 1) Απομεινάρια από αλαβάστρινα σκεύη που βρέθηκαν μέσα από την πρόσοψη του ναού, τα οποία και ανήκουν αδιαμφισβήτητα στο ιερό του ναού, χρονολογούνται στο Μέσο Βασίλειο.
- 2) Εξέταση ξύλινου ευρήματος με ραδιάνθρακα δείχνει ότι ο ναός θα πρέπει να χτίστηκε κατά τη XII Δυναστεία και από την περίοδο της βασιλείας του Sesostris II και μέχρι τη βασιλεία του Amenemhat II, 1895-1843π.Χ.

- 3) Οι ηλικίες που χρονολογούσαν το ναό στο Αρχαίο Βασίλειο βασίστηκαν κυρίως στην έλλειψη επιγραφών στους τοίχους του ναού. Το στοιχείο όμως αυτό θα μπορούσε επίσης να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι ο ναός δεν ολοκληρώθηκε.
- 4) Η θέση κάτω από το ναό ενός Φαραωνικού κτίσματος, καθώς και η παρουσία πέτρινων τάφων και οι καλυμμένες από πέτρινους ογκόλιθους ράμπες, τοποθετημένες στα νοτιοανατολικά του ναού, αποτελούν χαρακτηριστικά κτισμάτων του Μέσου Βασιλείου (Arnold, D. and Arnold, Do., 1979).

## 2. Ελλαδικός χώρος

### 2.1 Στρόφιλας, Άνδρος (Τελεβάντου, 2006)

Η Άνδρος είναι το βορειότερο και το δεύτερο σε μέγεθος νησί των Κυκλάδων. Πρόκειται για ένα νησί με στρατηγική θέση στο Αιγαίο και με πλούσια βλάστηση και καλλιεργήσιμες εκτάσεις, παράγοντες που το καθιστούν ευνοϊκό προς κατοίκηση. Ευρήματα από διάφορες θέσεις του νησιού μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το νησί κατοικούνταν ήδη από τη Νεότερη Νεολιθική II (Parathanassopoulos, 1981). Ο οικισμός του Στρόφιλα είναι ο μεγαλύτερος και ο μόνος που έχει ερευνηθεί ανασκαφικά. Χρονολογείται από την τελευταία φάση της Νεολιθικής (Τελική Νεολιθική ή Χαλκολιθική) (Τελεβάντου, 2001; Televantou, 2004; Κουτσούκου, 1993).



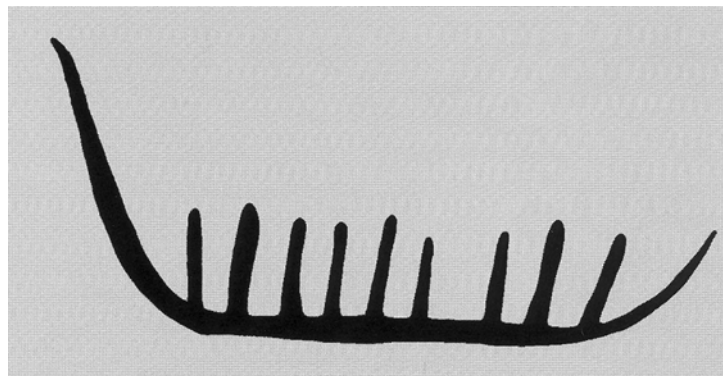
Εικ. π.20: Χάρτης της Άνδρου με τις σημαντικότερες προϊστορικές θέσεις το νησί.

Στο κέντρο περίπου της δυτικής ακτής του νησιού βρίσκεται το ακρωτήριο Στρόφιλας. Στην κορυφή του σχηματίζεται ένα μεγάλο σαν οχυρό οροπέδιο, με ασφαλές λιμάνι που εξασφαλίζει την προστασία των σκαφών και τη θαλάσσια δραστηριότητα, αλλά και την ασφάλεια του οικισμού από θαλάσσια επιδρομή. Στ όλη την επιφάνεια του οροπεδίου, σε μια έκταση εικοσιπέντε στρεμμάτων, διασώζονται ερείπια ενός αρκετά μεγάλου οικισμού.

Το οροπέδιο ήταν ευάλωτο από την ενδοχώρα και έτσι χτίστηκε ένα οχυρό με διπλό τείχος. Ένα τείχος στο χαμηλότερο τμήμα του οροπεδίου πάχους 0,80m και, σε απόσταση δεκαπέντε μέτρων από αυτόν, έναν άλλο, πιο παχύ, 1,60-1,25m και 5m στους προμαχώνες, με μήκος περίπου 100m. Στο δυτικό άκρο μια πύλη πλάτους 1,5m προστατεύεται από έναν ιδιαίτερα ισχυρό καμπυλόσχημο προμαχώνα. Το τοίχος του Στρόφιλα είναι το αρχαιότερο ως τώρα, με σαφή οχυρωματική αντίληψη στο Αιγαίο και το μοναδικό από την Τελική Νεολιθική περίοδο (Ασλάνης, 1998).

Ο οικισμός είναι αρκετά πυκνός με κτίσματα μεγάλου μεγέθους, ορθογώνια και αψιδωτά, κατασκευασμένα από πλακοειδείς λίθους της περιοχής και αρκετό πηλό για συνδετικό υλικό. Η εμφάνιση του τύπου του αψιδωτού κτιρίου είναι από τις αρχαιότερες, τόσο στο νησιωτικό Αιγαίο όσο και στην υπόλοιπη Ελλάδα. Μεγάλες άτακτες αποθέσεις οικοδομικού υλικού στο εσωτερικό του τείχους υποδηλώνει ότι ο οικισμός είχε υποστεί μεγάλη καταστροφή.

Οι ανασκαφές έφεραν στο φως πολλές βραχογραφίες οι οποίες αποτελούν σημαντικά σύνθετα δείγματα της τέχνης της βραχογραφίας που χρονολογούνται με ασφάλεια στην ύστατη νεολιθική περίοδο. Πρόκειται για επίκρουστες ή σκαλιστές βραχογραφίες με αφηγηματικό ή συμβολικό χαρακτήρα. Καλύπτουν επιφάνεια 200m<sup>2</sup> και βρίσκονται στην εξωτερική όψη του τείχους και κατά μήκος του τείχους, σε ένα χώρο λατρευτικής χρήσης. Απεικονίζουν στοιχεία σχετικά με τις δραστηριότητες των κατοίκων, πολλά ζώα, σκηνές από κυνήγι, και πολλά πλοία (εικ. π.21). Συγκεκριμένα, οι απεικονίσεις των πλοίων στον οικισμό φτάνουν έως τώρα τις τριάντα επτά, είτε μεμονωμένα είτε σε ομάδες. Τα περισσότερα δείχνουν να έχουν κατεύθυνση προς την πύλη και ίσως λειτουργούσαν ως οδηγοί για την είσοδο στον οικισμό.



Εικ. π.21: Βραχογραφία από το τείχος του νεολιθικού οικισμού Στρόφιλα, Άνδρος: πλοίο.

Η ποικιλία στις μορφές των πλοίων στις βραχογραφίες δίνει σημαντικά στοιχεία για το υψηλό επίπεδο της ναυπηγικής κατά τη Νεολιθική εποχή, διαφοροποιώντας την εντύπωση των ερευνητών μέχρι τώρα για μικρά και απλά πλοία. Αντίθετα διαπιστώνεται μια πολυμορφία πλοίων τόσο στο μέγεθος όσο και στον τύπο, με περισσότερο ή λιγότερο πλήρωμα, με καμπίνες ή πηδάλιο (Παπουτσάκης, 1972).

Πολλά ήταν επίσης και τα δείγματα κεραμικής, σε ποσότητα και ποικιλία, τα οποία και βρέθηκαν σε καλή κατάσταση. Βρέθηκε επίσης σημαντικός αριθμός λίθινων και οστέινων εργαλείων, τριβεία, κοπτήρες, πελέκεις, τέχνηρα από οφιανό. Τα πήλινα και οστέινα σφονδύλια τεκμηριώνουν την άσκηση της υφαντουργίας ενώ αποτυπώματα στη βάση πήλινων σκευών δίνουν στοιχεία για την ψαθοπλεκτική.

Τέλος, εξαιρετικό ενδιαφέρον έχουν τα χάλκινα αντικείμενα, όπως περόνες, σπείς, βελόνες, αιχμές δόρατος, τα οποία σε συνδυασμό με υποπροϊόντα επεξεργασίας που βρέθηκαν, δίνουν νέα στοιχεία για την πρώιμη μεταλλουργία στο Αιγαίο (Σωτηρακοπούλου, 1998; Renfrew, 1967; Zachos and Douzougli, 1999).

## 2.2 Δελφοί

### 2.2.1 Ελαφόκαστρο

Στη κορυφή της Ανατολικής Φαιδριάδας ύψους 1123m, σώζεται διπλή κυκλική οχύρωση από πολυγωνικές πέτρες, μεγάλου και μικρότερου μεγέθους. Το πάχος των τοίχων φθάνει τα 1,70m, ενώ διατηρούνται σε μέγιστο ύψος 2m. Ο Κεραμόπουλος θεωρεί ότι η οχύρωση προστάτευε την κάθοδο προς τους Δελφούς από τα βόρεια (Ντάσιος, 1989).

### 2.2.2 Κουμούλα

Νότια του Κωρύκειου Άντρου και στον χαμηλό ομώνυμο λόφο εντοπίστηκαν λείψανα προϊστορικού οικισμού (ΜΕ και ΥΕ περιόδου) (Ντάσιος, 1989).

## 2.3 Σπήλαιο Σαρακηνό, Βοιωτία

Η λίμνη της Κωπαΐδας βρίσκεται σε υψόμετρο 100m από τη φυσική λεκάνη της περιοχής, στη Βοιωτία. Η λίμνη, η οποία έχει αποξηρανθεί, κάλυπτε το μεγαλύτερο μέρος στο βόρειο μέρος της κοιλάδας της Χαιρώνειας και του Ορχομενού, και σχηματιζόταν από τα νερά των ποταμών Κηφισού και Μέλανος (Samson and Megaloudi, 2006; Sampson, 2006). Η λίμνη σχηματίστηκε από την κίνηση των τεκτονικών πλακών κατά τη διάρκεια του Πλειόκαινου και του Πλειστόκαινου (Παπαδοπούλου-Βруνιώτη, 1990). Τα ασβεστολιθικά πετρώματα των βουνών που την περιβάλλουν έχουν δημιουργήσει μικρά ή μεγάλα σπήλαια πολλά από τα οποία σε περιόδους χαμηλής στάθμης της λίμνης είχαν κατοικηθεί.

Μελέτες παλαιοπεριβάλλοντος ξεκίνησαν στην περιοχή από τη δεκαετία του 70 (Greig and Turner, 1974; Turner and Greig, 1975). Το 1994, με το πρόγραμμα Κωπαΐδας, ξεκίνησε εκ



νέου η μελέτη της περιοχής και των σπηλαίων της, από τα οποία καταλληλότερο για ανασκαφή ήταν αυτό του Σαρακηνού, το οποίο βρίσκεται σε πολύ μεγαλύτερο ύψος από την πεδιάδα. Πρόκειται για σπήλαιο μεγάλων διαστάσεων, με μεγάλη φωτεινή είσοδο και θέα προς την πεδιάδα (Sampson and Megaloudi, 2006). Η συστηματική του ανασκαφή μέχρι σήμερα έφερε στο φως πλήθος ευρημάτων που μαρτυρούν τη νεολιθική χρήση του σπηλαίου. Τεράστια ποσότητα κεραμικής, η οποία περιλαμβάνει όλο το φάσμα των γνωστών τύπων, πήλινα και μαρμάρια ειδώλια, κοσμήματα και μικροαντικείμενα από κόκκαλο και πέτρα. Βρέθηκαν επίσης εργαλεία από πυριτόλιθο και οψιανό, τα οποία δείχνουν ότι δεν κατασκευάστηκαν επί τόπου αλλά σε οικιστικά κέντρα μακριά από το σπήλαιο<sup>20</sup>. Τα οργανικά κατάλοιπα είναι πλούσια, οστά ζώων και οστρέων, και μεγάλη ποσότητα απανθρακωμένων σπόρων (Sampson and Megaloudi, 2006).

Η άριστη στρωματογραφία του σπηλαίου έχει δώσει μια ακολουθία των πολιτισμικών φάσεων από το σημερινό δάπεδο μέχρι το φυσικό δάπεδό του, τα οποία χρονολογούνται από τη Μέση Παλαιολιθική μέχρι τη Μέση Ελλαδική, οπότε και εγκαταλείφθηκε (Sampson, 2000). Το παλαιολιθικό στρώμα στην τομή Β είναι λεπτό και καλύπτει μόνο το πέτρινο υπόστρωμα, το οποίο ανήκει στις αρχές την Ανώτερης Παλαιολιθικής. Το γεγονός σε αυτό το στρώμα της πτώσης πέτρινων θραυσμάτων από την οροφή, αποδεικνύουν την ψυχρή κλιματική φάση που συμπίπτει με την περίοδο της Ανώτερης Παλαιολιθικής (Sampson, 2006). Χρονολόγηση με ραδιάνθρακα έδωσε για το στρώμα αυτό ηλικίες γύρω στο 12000-11000π.Χ. δηλαδή προς το τέλος της Ανώτερης Παλαιολιθικής (Sampson and Megaloudi, 2006; Sampson, 2006).

Παρόλη την πληθώρα των ευρημάτων το σπήλαιο δε μπορεί να αποτελούσε κατοικία σε μόνιμη βάση, τουλάχιστον στη Νεολιθική περίοδο και στην εποχή του Χαλκού. Ιδιαίτεροι λόγοι ανάγκαζαν τους ανθρώπους να καταφεύγουν στο σπήλαιο περιοδικά. Το περιβάλλον του σπηλαίου δεν είναι διαμορφωμένο για διαβίωση παρά το γεγονός ότι η είσοδός του είναι φωτεινή και σε ικανό ύψος (Sampson and Megaloudi, 2006).

## 2.4 Ιθάκη

---

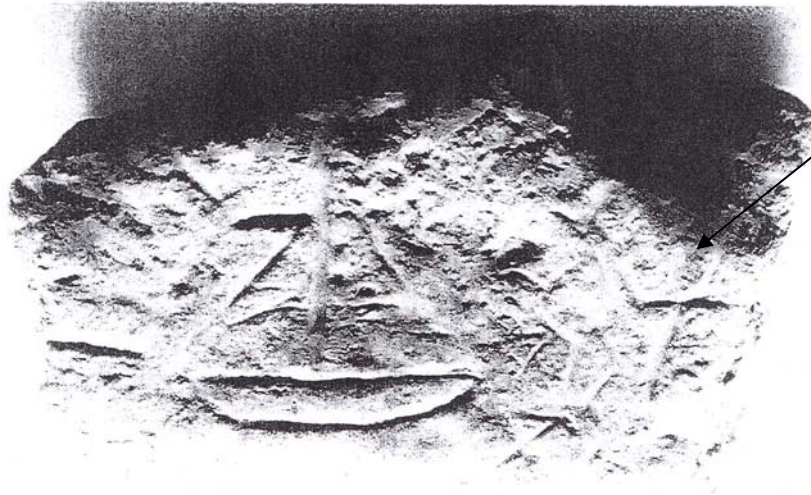
<sup>20</sup> η μελέτη τους γίνεται από τους J. Kozłowski και Γ. Φιλιππάκη.



Εικ. π.22: Χάρτης του νησιού. Με βέλος σημειώνεται η τοποθεσία των ανασκαφών<sup>21</sup>.

Η Ιθάκη ήταν σημαντικός εμπορικός σταθμός κατά την εποχή του Χαλκού για το Μινωικό ή το Μυκηναϊκό εμπόριο (Papadopoulos and Kontorli-Papadopolou, 2000; Owens, 1999a; Kontorli-Papadopolou et al., 2005). Υπάρχουν αποδείξεις της παρουσίας τόσο των Μινωιτών όσο και των Μυκηναίων στο νησί που φαίνεται από τα αρχαιολογικά ευρήματα των ανασκαφών του 2001 (Kontorli-Papadopolou, 2000, 2002; Kontorli-Papadopolou et al., 2005). Ανασκαφές του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων στην περιοχή Άγιος Αθανάσιος – «Σχολή του Ομήρου», στα σύνορα του χωριού Εξωγή με το χωριό Πλατρείθια στο βόρειο άκρο του νησιού, έφεραν στο φως ευρήματα, πήλινα όστρακα, με εμφανείς χαραγμένους χαρακτήρες που θυμίζουν σύμβολα γραμμικής γραφής, και συγκεκριμένα σε ένα πλημμυρισμένο θολωτό τάφο (Owens, 1999b). Πρόκειται για το σύμβολο AB09 (Kontorli-Papadopolou et al., 2005) με το ηχητικό ισοδύναμο «SE» (Godart, 1984; Duhoux, 1989). Ένα από τα πήλινα αυτά αντικείμενα και ένα σκίτσο της χαραγμένης παράστασης πάνω σε αυτό παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα.

<sup>21</sup> <http://www.ionion.com/greek/index.htm>



Εικ. π.23: Φωτογραφία του πήλινου αντικειμένου που βρέθηκε στην Ιθάκη, περιοχή «Σχολή του Ομήρου», στο οποίο διακρίνονται χαραγμένα σχέδια, μεταξύ άλλων και το σύμβολο AB09 (σημειώνεται με βέλος).



Εικ. π.24: Σκίτσο του πήλινου αντικειμένου τις εικόνας π.23 που βρέθηκε στην Ιθάκη, περιοχή «Σχολή του Ομήρου», στο οποίο διακρίνονται χαραγμένα σχέδια, μεταξύ άλλων και το σύμβολο AB09.



Εικ. π.25: Το σύμβολο AB09 της Γραμμικής Α που βρέθηκε σε πολλά πήλινα όστρακα στην περιοχή «Σχολή του Ομήρου» στην Ιθάκη.

Το σύμβολο αυτό έχει βρεθεί περίπου εξήντα φορές στη μινωική γραμμική Α σε ευρήματα σε διάφορες τοποθεσίες στην Κρήτη, καθώς και στη γραμμική Β στην Κνωσό και στην Πύλο (Olivier, 1967; Palaima, 1988).

## 2.5 Φτελιά, Μύκονος (Sampson, 2002)

Ο οικισμός της Φτελιάς είναι από τις πιο σημαντικές ανασκαφικές θέσεις της Ύστερης Νεολιθικής εποχής στις Κυκλάδες. Ο ανασκαφικός χώρος αποτελείται από διάφορες τάφρους οι οποίες έδωσαν πλούσια ευρήματα, κεραμικά, λεπίδες οψιανού, οστά ζώων, χάλκινα τέχνηρα. Έχουν επιβεβαιωθεί τέσσερις αρχιτεκτονικές φάσεις από τις οποίες διατηρείται καλύτερα η παλαιότερη. Ένα μεγάλο μέρος του οικισμού είναι κάτω από το επίπεδο της θάλασσας σε βάθος περίπου 4m. Η περιοχή εκτιμάται ότι καλύπτει 6500m<sup>2</sup>.

Η Μύκονος βρίσκεται στην ανατολική άκρη της αλυσίδας που διαμορφώνεται από τα βόρεια νησιά των Κυκλάδων, ευνοεί τα ταξίδια προς τα νησιά του ανατολικού Αιγαίου και τις ακτές της Μικράς Ασίας. Η αγγειοπλαστική του νησιού αν και έχει μερικές ομοιότητες με τα άλλα νησιά του Αιγαίου και της ηπειρωτικής Ελλάδας, έχει και πολλά ανεξάρτητα χαρακτηριστικά. Ο νεολιθικός οικισμός βρίσκεται στη Φτελιά της Μυκόνου, στο μυχό του κόλπου του Πανόρμου και βόρεια της οδού που οδηγεί στο χωριό Άνω Μερά. Η θέση είναι ακριβώς προσανατολισμένη στο βορρά και συνεπώς εκτεθειμένη στους ανέμους, πράγμα που θα καθιστούσε προβληματική τη διαβίωση σ' αυτήν το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου.

Η κεραμική που βρέθηκε στον οικισμό ποικίλει από κλειστά αγγεία, τετράποδα δοχεία, ασύμμετρα αγγεία, βαμμένα λευκά και κόκκινα, με το χρώμα να τοποθετείται μετά το ψήσιμο στη μαύρη στιλβωμένη επιφάνεια του αγγείου εσωτερικά και εξωτερικά, καθώς και πολύχρωμα αντικείμενα, μέχρι πήλινες φιγούρες, μικρά πήλινα σε σχήμα άγκυρας αντικείμενα, όστρακα με χαραγμένα σύμβολα. Βρέθηκαν επίσης πέτρινα τέχνηρα, λειασμένες πέτρες, πέλεκυς, ελαφρόπετρες, κοσμήματα. Βάση των στοιχείων αυτών, αλλά και βάση γεωμορφολογικών ερευνών, ο οικισμός τοποθετήθηκε χρονολογικά την Νεότερη Νεολιθική Ι, γεγονός που υποστηρίζεται και από δέκα χρονολογήσεις με ραδιάνθρακα, οι οποίες καλύπτουν την περίοδο από 5100-4500 π.Χ. (Facorellis and Maniatis, στο Sampson, 2002, p.309-315).

Ανάμεσα στα ευρήματα ήταν και πολλές αιχμές από βέλη και δόρατα, γεγονός που δείχνει ότι οι κάτοικοι είχαν ιδιαίτερη εξειδίκευση στο κυνήγι. Μικρή ποσότητα από οστά ψαριών δείχνει ότι δεν ασχολήθηκαν πολύ με το ψάρεμα.

## Βιβλιογραφία

### Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

- Aitken M.J. (1976). Thermoluminescent age evaluation and assessment of error limits: revised system. *Archaeometry*, **18**(2), 233-238.
- Aitken, M.J. (1985). *Thermoluminescence dating*. London: Academic Press.
- Aitken M.J. (1998). *An introduction to optical dating .The Dating of Quaternary Sediments by the Use of Photon-Stimulated Luminescence*. Oxford University Press, Oxford.
- Bailey, R.M. (1997). Optical detrapping of charge from the 110°C quartz TL region. *Ancient TL*, **15**, 7-10.
- Berger, G.W., Mulhern, P.J. & Huntley, D.J. (1980). Isolation of silt-sized quartz from sediments. *Ancient TL*, **11**, 8-9.
- Bøtter-Jensen, L. (1997). Luminescence techniques: instrumentation and methods. *Radiation Measurements*, **27**, 749-768.
- Bøtter-Jensen, L., Bulur, E., Duller, G.A.T., and Murray, A.S. (2000a). Advances in luminescence instrument systems. *Radiation Measurements*, **32**, 523-528.
- Chen R. and McKeever S.W.S. (1997). *Theory of thermoluminescence and related phenomena*. World Scientific Publishing, Singapore.
- Daniels F., Boyd C.A. and Saunders D.F. (1953). Thermoluminescence as a research tool. *Science*, **117**, 343-349.
- Duller G.A.T. (1991). Equivalent dose determination using single aliquots. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, **18**, 371-378.
- Duller, G.A.T. (1995). Luminescence dating using single aliquots: methods and applications. *Radiation Measurements*, **24**, 217-226.
- Duller, G.A.T., Bøtter-Jensen, L., Kohsiek, P., and Murray, A.S. (1999). A high-sensitivity optically stimulated luminescence scanning system for measurement of single sand-sized grains. *Radiation Protection Dosimetry*, **84**, 325-330.
- Duller, G.A.T., Bøtter-Jensen, L., and Murray, A.S. (2000). Optical dating of single sand-sized grains of quartz: sources of variability. *Radiation Measurements*, **32**, 453-457.
- Fleming S.J. (1966). Study of TL of crystalline extras from pottery, *Archaeometry*, **9**, 170-173.
- Fleming S.J. (1973). The predose technique: a new TL dating method, *Archaeometry*, **15**(1), 13-30.
- Fremlin J.H. and Srirath S. (1964). Thermoluminescence dating examples of non-uniformity of luminescence. *Archaeometry*, **7**, 58-62.

- Fullagar R.L.K., Price D.M. and Head L.M. (1996). Early human occupation of northern Australia: archaeology and thermoluminescence dating of Jinmium rock-shelter, Northern Territory. *Antiquity*, **70**, 751-773.
- Furetta, C., and Weng, P-S. (1998). *Operational Thermoluminescence Dosimetry*, World Scientific.
- Galbraith, R.F., and Laslett, G.M. (1993). Statistical models for mixed fission track ages. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, **21**, 459-470.
- Galbraith, R.F., Roberts, R.G., Laslett, G.M., Yoshida, H., and Olley, J.M. (1999). Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinmium rock shelter, northern Australia: Part 1, Experimental design and statistical models. *Archaeometry*, **41**, 339-364.
- Galloway, R.B. (1992). Towards the use of green light emitting diodes for the optically stimulated luminescence dating of quartz and feldspar. *Meas. Sci. Technol.*, **3**, 330-335.
- Galloway, R.B. (1994a). On the stimulation of luminescence with green light emitting diodes. *Radiation Measurements*, **23**, 547-550.
- Galloway, R.B. (1994b). Comparison of the green- and infrared-stimulated luminescence of feldspar. *Radiation Measurements*, **23**, 617-620.
- Galloway R.B. (1996). Equivalent dose determination using only one sample: alternative analysis of data obtained from infrared stimulation of feldspar. *Radiation Measurements*, **26**, 103-106.
- Galloway, R.B. (2002). Does limestone show useful optically stimulated luminescence? *Ancient TL*, **20**, 1, 1-5.
- Godfrey-Smith, D.I, Huntley D.J. and Chen W.-H. (1988). Optical Dating Studies of Quartz and Feldspar Sediment Extracts. *Quaternary Science Reviews*, **7**, 373-380.
- Godfrey-Smith, D. I. and Haskell, E. H. (1993). Application of optically stimulated luminescence to the dosimetry of recent radiation events involving low total absorbed doses. *Health Physics*, **65**, 396-404.
- Huntley, D.J., Godfrey D.I. and Thewalt, M.L.W. (1985). Optical dating of sediments. *Nature*, **313**, 105-107.
- Ichikawa Y. (1965). Dating of ancient ceramics by thermoluminescence. *Bull. Inst. Chem. Res., Kyoto University*, **43**, 1-8.
- Kennedy G.C. and Knopff L. (1980). Dating by thermoluminescence. *Archaeology*, **13**, 147-148.
- Kiely, P.V., & Jackson, M.L. (1964). Selective dissolution of micas from potassium feldspars by sodium pyrosulfate fusion of soils and sediments. *Am. Mineral.*, **49**, 1648-1659.
- Kiely, P.V., & Jackson, M.L. (1965). Quartz, feldspar, and mica determination for soils by sodium pyrosulfate fusion. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **29**, 159-163.
- Κυριάκος Δ.Σ., Μπλέρης Γ.Λ. (1992). *Φυσική: Θερμότητα – Ηλεκτρισμός*. Εκδόσεις Art of Text, Θεσσαλονίκη.

- Lamothe, M, Balescu, S., and Auclair, M., (1994). Natural IRSL intensities and apparent luminescence ages of single feldspar grains extracted from partially bleached sediments. *Radiation Measurements*, **23**, 555-561.
- Lamothe, M., and Auclair, M., (1997). The fadia method: a new approach in luminescence dating using the analysis of single feldspar grains. *Radiation Measurements*, **27**, 107-118.
- Λυριτζής, Ι. (1977). Ο προορισμός της ηλικίας με θερμοφωταύγεια σαν αρχαιομετρική μέθοδος. *Άνθρωπος*, **4** (1-2), 174-191.
- Λυριτζής, Ι. (1982). Αρχαιομετρία, μια νέα αναδυόμενη επιστήμη. *Αρχαιολ. Αναλ. Αθηνών XIV*, **1**, 85-92.
- Liritzis Y. (1985). Determination of annual gamma dose-rates in archaeological sites: effects on response and seasonal variation. *Revue d' Archaeometrie*, **9**, 19-25.
- Λυριτζής, Ι., (1994). *Αρχαιομετρία. Μέθοδοι χρονολόγησης στην αρχαιολογία*. Καρδαμίτσα, Αθήνα.
- Liritzis I. (1994a). Archaeometry: Dating the past. *EKISTICS*, **368/369**, 361-366.
- Liritzis I. (1994b). A new dating method by thermoluminescence of carved megalithic stone building. *Comptes Rendus de l' Académie des Sciences*, Paris t.319, série **ii**, 603-610.
- Liritzis, I., Galloway, R.B., and Theocaris, P.S. (1994). Thermoluminescence dating of ceramics revisited: optical stimulated luminescence of quartz single aliquot with green light emitting diodes. *J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett.*, **188** (3), 189-198.
- Liritzis, I. (1995). Alternative determination of equivalent dose by green light emitting diodes optically stimulated luminescence using the unstable luminescence. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **190**, 1, 13-21.
- Liritzis, I., Foti, F., Guibert, P., Schvoerer, M. (1996a). Solar bleaching of thermoluminescence of calcites. *Nucl. Instr. Meth. B*, **117**, 260-268.
- Liritzis, I., Michael, C., and Galloway, R.B., (1996b). A significant Aegean volcanic eruption during the second millennium B.C. revealed by thermoluminescence dating. *Geoarchaeology International*, **11**, 4, 361-371.
- Liritzis I. and Bakopoulos Y. (1997). Functional behaviour of solar bleached thermoluminescence in calcites. *Nucl. Instr. Meth. B*, **132**, 87-92.
- Liritzis, I., Galloway, R.B., and Hong, D.G. (1997a). Single aliquot dating of ceramics by green light stimulation of luminescence from quartz. *Nucl. Instr. Methods B*, **132**, 457-467.
- Liritzis, I., Guibert, P., Foti, F., and Schvoerer, M. (1997b). The Temple of Apollo (Delfi) strengthens novel thermoluminescence dating method. *Geoarchaeology International*, **12**, 479-496.
- Λυριτζής, Ι. (1998). *Το Μυστήριο των Ελληνικών πυραμιδοειδών*. Ακαδημία Δελφικών Μελετών, Αθήνα.
- Liritzis I. and Galloway R.B. (1999). Dating implications from solar bleaching of thermoluminescence of ancient marble. *J Radioanal. Nucl. Chem.* **241**, 2, 361-368.

- Liritzis, I. (2000). Advances in thermo- and opto-luminescence dating of environmental materials (secondary deposits): Part I: Techniques. *Global Nest: The Int. J.*, **2**, 1, 3-27, and Part II: Applications, *Global Nest*, **2**, 1, 29-49.
- Liritzis I. (2001). Searching for precision of a new “luminescence clock” in dating calcitic rocks. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **247**, 3, 727-730.
- Liritzis, I., Vafiadou, A., Murray, A.S. and Sampson, A. (2002). OSL dating of rock and soil of Neolithic Ftelia, Mykonos. In Sampson.A (ed), *The Neolithic settlement at Ftelia, Mykonos*. Univ. of the Aegean, Dept. of Mediterranean Studies publ., 273-278.
- Λυριτζής, Ι. (2005). *Φυσικές επιστήμες στην αρχαιολογία*, Τυπωθήτω – Δαρδανός, Αθήνα.
- Liritzis, I., and Vafiadou, A. (2005). Dating of megalithic masonry. Internat Conference, *The Archaeology of World Megalithic Cultures*, Rhodes 28-31 Oct. 2004. Proceedings in *Mediterranean Archaeology & Archaeometry*, **5** (1), 25-38.
- Liritzis, I., Sideris, C., Mitsis J. and Vafiadou A. (2005a). Mineralogical, petrological and radioactivity aspects of building material from Egyptian Old Kingdom monuments. *Geoarchaeology* (submitted).
- Liritzis, I., Drivaliari, N., & Vafiadou, A. (2005b). OSL dating of mineral extracts from limestone monuments. *Ancient TL* (to be submitted).
- Mauz, B., and Lang, A. (2004). Removal of feldspar-derived luminescence component from polymineral fine silt samples for optical dating applications: evaluation of chemical treatment protocols & quality control procedures. *Ancient TL*, **22**, 1, 1-8.
- Murray A.S. (1982). Studies of the stability of radioisotope concentrations and their dependence on grain size. *PACT*, **6**, 216-223.
- Murray, A.S., Olley, J.M., and Caitcheon, G.C. (1995). Measurement of equivalent doses in quartz from contemporary water-lain sediments using optically stimulated luminescence. *Quaternary Science Reviews*, **14**, 365-371.
- Murray A.S., Roberts, R.G. and Wintle, A.G. (1997). Equivalent dose measurement using a single aliquot of quartz. *Radiation Measurements*, **27**, 171-184.
- Murray A.S., and Roberts R.G. (1997). Determining the burial time of single grains of quartz using optically stimulated luminescence. *Earth & Planet. Sci. Lett*, **152**, 163-180.
- Murray, A.S. and Roberts R.G. (1998). Measurement of the equivalent dose in quartz using a regenerative – dose single – aliquot protocol. *Radiation Measurements*, **29**, 503-515.
- Murray, A.S. and Wintle, A.G. (1998). Factors controlling the shape of the OSL decay curve in quartz. *Radiation Measurements*, **29**, 65-79.
- Murray, A.S., and Olley, J.M. (1999). Determining Sedimentation Rates using Luminescence dating. *GeoResearch Forum*, **5**, 121-144.
- Murray, A.S., and Wintle A.G. (2000). Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements*, **32**, 57-73.



- Murray, A.S. and Olley, J.M. (2002). Precision and accuracy in the optically stimulated luminescence dating of sedimentary quartz. *Geochronometria*, **21**, 1-16.
- McFee, C.J. (1998). The measurement of single grain IRSL EDs using an imaging photon detector. *Quaternary Science Reviews (Quaternary GeoChronology)*, **17**, 1001-1008.
- McKeever, S.W.S. (1985). *Thermoluminescence of Solids*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Παπαστεφάνου Κ.Π. (1999). *Φυσική ακτινοβολιών και Εφαρμογές Ραδιοϊσοτόπων*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Olley, J.M., Caitcheon, G.C, and Roberts, R.G. (1999). The origin of dose distributions in fluvial sediments, and the prospect of dating single grains from fluvial deposits using optically stimulated luminescence. *Radiation Measurements*, **30**, 207-217.
- Prasad, S. (2000). HF treatment for isolation of fine grain quartz for luminescence dating. *Ancient TL*, **18**, 15-17.
- Rees-Jones, J. (1995). Optical dating of young sediments using fine grain quartz. *Ancient TL*, **13**, 9-14.
- Rhodes E.J. (1988). Methodological considerations in the optical dating of quartz. *Quaternary Science Reviews*, **7**, 395-400.
- Richardson, C.A. (1994). Effects of bleaching on the sensitivity to dose of the infrared-stimulated luminescence of potassium-rich feldspar from Ynyslas, Wales. *Radiation Measurements*, **23**, 587-591.
- Roberts, R., Walsh, G., Murray, A., Olley, J., Jones, R., Morwood, M., Tuniz, C., Lawson, E., Macphail, M., Bowdery, D. and Naumann, I. (1997). Luminescence dating of rock art and past environments using mud-wasp nests in northern Australia. *Nature*, **387**, 696-699.
- Roberts, R. G., Bird, M., Olley, J., Galbraith, R. F., Lawsen, E., Laslett, G., Yoshida, H., Jones, R., Fullagar, R., Jacobsen, G., and Hua, Q. (1998). Optical and radiocarbon dating at Jinmium rock shelter in Northern Australia. *Nature*, **393**, 358-362.
- Roberts, R. G., Galbraith, R. F., Olley, J. M., Yoshida, H., and Laslett, G. M. (1999). Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinmium rock shelter, Northern Australia: Part II, results and implications. *Archaeometry*, **41**, 2, 365-395.
- Roberts, H.M., & Wintle, A.G. (2001). Equivalent dose determinations for polymineralic fine-grains using for SAR protocol: application to a Holocene sequence of the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Science Reviews*, **20**, 859-863.
- Stokes, S., Ingram, S., Aitken, M.J., Sirocko, F., Anderson, R., & Leuschner, D. (2003a). Alternative chronologies for Late Quaternary (Last Interglacial-Holocene) deep sea sediments via optical dating of silt-sized quartz. *Quaternary Science Reviews*, **22**, 925-941.

- Stokes, S., Hetzel, R., Bailey, R.M., & Mingxin, T. (2003b). Combined IRSL-OSL single aliquot regeneration (SAR) equivalent dose ( $D_e$ ) estimates from source proximal Chinese loess. *Quaternary Science Reviews*, **22**, 975-983.
- Syers, J.K., Chapman, S.L., Jackson, M.L., Rex, R.W., & Clayton, R.N. (1968). Quartz isolation from rocks, sediments, & soils for determination of oxygen isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **32**, 1022-1024.
- Thomsen, K.J (2004). Optically Stimulated Luminescence Techniques in Retrospective Dosimetry using Single Grains of Quartz extracted from Unheated Materials, PhD Thesis, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- Tite M.S. and Waine J. (1962). Thermoluminescence dating: a re-appraisal. *Archaeometry*, **5**, 53-79.
- Vafiadou, A., Murray, A.S. and Liritzis, I. (2005). Optical stimulated luminescence dating investigations of rock and underlying soil from three case studies. *JAC* (in press).
- Wallinga, J., and Duller, G.A.T (2000). The effect of optical absorption on the infrared stimulated luminescence age obtained on coarse-grain feldspar. *Quaternary Science Reviews*, **19**, 1035-1042.
- Wallinga, J, Murray, A.S., Duller, G.A.T. (2000). Underestimation of equivalent dose in feldspar single-aliquot procedures. *Radiation measurements*, **32**, 691-695.
- Wallinga, J., Murray, A., Wintle, A., (2000). The single-aliquot regenerative-dose (SAR) protocol applied to coarse grain feldspar. *Radiation Measurements*, **32**, 529-533.
- Wintle, A.G. (1975). Thermal quenching of thermoluminescence in quartz. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **41**, 107-113.
- Wintle, A.G. and Murray, A.S. (1997). The relationship between quartz thermoluminescence, photo-transferred thermoluminescence, and optically stimulated luminescence. *Radiation Measurements*, **27**, 611-624.
- Wintle, A.G. and Murray, A.S. (2000). Quartz OSL: Effects of thermal treatment and their relevance to laboratory procedures. *Radiation Measurements* **32**, 387-400.
- Zimmerman D.W. (1978). TL dating using zircon grains. *PACT*, **2/3**, 458-465.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

- Adamiec, G., and Aitken, M. (1998). Dose-rate conversion factors: update. *Ancient TL*, b (2), 37-50.
- Aitken, M.J. (1978). Dose-rate evaluation. *PACT J*, **2**, 18-34.
- Aitken, M.J. (1985). *Thermoluminescence dating*. London: Academic Press.
- Bailliff, I., and Aitken M.J. (1980). Use of thermoluminescence dosimetry for evaluation of internal beta dose-rate in archaeological dating. *Mucl. Instru. Meth*, **173**, 423-429.
- Bailliff, I. (1982). Beta TLD apparatus for small samples. *PACT J*, **6**, 72-75.

- Bartels, O.G. (1980). Radioactivity from the uranium and thorium series in nonferrous metals. *Health Physics*, **38**, 89-90.
- Bell, W.T. (1977). Thermoluminescence dating: revised dose-rate data. *Archaeometry*, **19**, 99-100.
- Bell, W.T. (1979a). Attenuation factors for the absorbed radiation dose in quartz grains for thermoluminescence dating. *Ancient TL*, **8**, 2-13.
- Bell, W.T. (1979b). Thermoluminescence dating: Radiation dose-rate data. *Archaeometry*, **21**, 2, 243-243.
- Bøtter-Jensen, L and Mejdahl, V. (1985). Determination of potassium in feldspars by beta counting using GM multicounter system. *Nucl. Tracks*, **10**, 663-666.
- Bøtter-Jensen, L and Mejdahl, V. (1988). Assessment of beta dose-rate using a GM multicounter system. *Nucl. Tracks and Radiat. Meas.*, **14**, 187-191.
- Carriveau, G.W., and Troka, W. (1978). Annual dose rate calculations for TL dating. *Archaeophysika*, **10**, 406-422.
- Carriveau, G.M., and Harbottle, G. (1983). Ban Chiang pottery: thermoluminescence dating problems. *Antiquity*, **57**, 56-59.
- Cross W. G. (1968). Variation of beta dose attenuation in different media. *Phys. Med. Biol.* **13**, 611-618.
- De Vries, J.L., and Vrebos B.A.R. (1993). Handbook of X-ray Spectrometry, R.E. Van Grieken and A.A. Markowicz, eds, NewYork: Marcel Deeker
- Fleming, S.J. (1970). Thermoluminescence dating: refinement of the quartz inclusion method. *Archaeometry*, **12**, 135-145.
- Gills, T. E. (1993). *Certificate of Analysis, Standard Reference Material 2711*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.
- Galloway, R.B., and Liritzis, Y. (1991). Scattering in beta dosimetry by beta particle counting. *Nucl. Tracks and Radiat. Meas.*, **18**, 239-247.
- Galloway, R.B. and Liritzis, Y. (1992). Provenance of Aegean volcanic tephros by high resolution gamma-ray spectrometry. *Nucl. Geophys.*, **6** (3), 405-411.
- Hedges, R.E.M., and McLellan, M. (1976). On the cation exchange capacity of fired clays and its effect on the chemical and radiometric analysis of pottery. *Archaeometry*, **18**, 203-207.
- Jensen, H.E., and Prescott, J.R. (1983). The thick-source alpha particle counting technique: comparison with other techniques and solutions to the problem of overcounting. *PACT*, **9**, 25-36.
- Kokkoris M. and Liritzis Y. (1997). Dose versus time for U-Disequilibrium and revised dose-rate data for TL/ESR dating. *European journal of PACT*, **45**, 5, 281-294.
- Korotev, R.L. (1996). Self-Consistent Compilation of Elemental Concentration Data for 93 Geochemical Reference Samples. *Geostandards Newsletter*, **20**, 217-245.

- Kirkegaard, P. and Lovborg, L. (1974). Computer modelling of terrestrial gamma-radiation fields. Risø Report No. 303.
- Lippert, J. (1963). Low level counting. Risoe report No. 44.
- Liritzis, I. (1980). U-234/Th-230 Dating of Petralona Speleothems. *Anthropos*, **7**, 215-241.
- Liritzis, Y., and Galloway, R.B., (1981). Correlation of variations in the gamma-ray dose-rate in soil with meteorological factors. *Archaeometry*, **23** (1), 109-113.
- Liritzis, Y., and Galloway, R.B. (1982a). A comparison of two techniques for the determination of the beta dose-rate in ceramics for thermoluminescence dating. *Nucl. Instrum. Meth*, **192**, 555-558.
- Liritzis, Y., and Galloway, R.B. (1982b). A new approach to the beta dosimetry of ceramics for thermoluminescence dating. *Nucl. Instrum. Meth*, **201**, 503-506.
- Liritzis, I. (1988). Signs of Variations of Uranium and Thorium isotopes in Cave sediments. *Ann. Geol. Pays Hellenique*, **33**, 433-441.
- Liritzis I., and Danali-Cotsaki, S. (1988a). Beta dose rates derived from gamma spectroscopy and low beta anticoincidence system of various environmental materials, mainly of archaeological origin. *Sci. Tot. Env.*, **70**, 41-54.
- Liritzis, Y. (1989). Dating of calcites: some aspects of radiation survey in caves and dose-rates. *Annales Geologiques des pays helleniques*, **34** (1), 123-136.
- Liritzis Y. and Kokkoris M. (1992). Revised Dose-rate Data for Thermoluminescence/ESR Dating. *Nucl. Geophys.*, **6**, 3, 423-443.
- Λυριτζής, Ι. (1994). *Αρχαιομετρία. Μέθοδοι χρονολόγησης στην αρχαιολογία*, Καρδαμίτσα, Αθήνα.
- Liritzis, I. (2000). Advances in thermo- and opto- luminescence dating of environmental materials (sedimentary deposits). Part I: Techniques. *Global Nest: the Int. J.*, **2** (1), 3-27.
- Liritzis I., Tsamasfyrou I. and Vafiadou A. Chemical analysis of prehistoric obsidian and ceramics by EDXRF and statistical groupings: Methodology, errors, examples. 4<sup>th</sup> Symposium on Archaeometry of the Hellenic Society of Archaeometry, Athens 28-31 May 2003 (Abstract book.)
- Λυριτζής, Ι. (2005). *Φυσικές επιστήμες στην αρχαιολογία*, Τυπωθήτω – Δαρδανός, Αθήνα.
- Løvborg, L. (1984). The calibration of portable and airborne gamma-ray spectrometers - Theory, problems, and facilities. Riso National Laboratory, DK-4000 Roskilde, Denmark, Report Riso-M-2456 .
- Mangini, A., Pernicka, E., and Wagner, G.A. (1983). Dose-rate determination by radiochemical analysis. *PACT*, **9**, 49-56.
- Meakins, R.L, Dickson, B.L., and Kelly, J.C. (1978). The effect of thermoluminescence dating of disequilibrium in the uranium decay chain. *PACT*, **2**, 97-103.
- Meakins, R.L, Dickson, B.L., and Kelly, J.C. (1979). Gamma ray analysis of K, U and Th for dose-rate estimation in thermoluminescence dating. *Archaeometry*, **21**, 79-86.

- Mejdahl, V. (1978). A thermoluminescence technique for beta ray dosimetry. *PACT J*, **2**, 35-47.
- Mejdahl V. (1978b). Thermoluminescence dating: a thermoluminescence technique for beta-ray dosimetry. *Eur. PACT J.*, **2**, 35-47.
- Mejdahl V. (1979). Thermoluminescence dating: beta-dose attenuation in quartz grains. *Archaeometry*, **21**, 61-72.
- Mejdahl V. (1987). Internal radioactivity in quartz and feldspar grains. *Ancient TL* **3**(2), 21-26.
- Murray, A.S. (1981). Environmental radioactivity studies relevant to thermoluminescence dating, Unpublished D. Phil. Thesis, Faculty of Physical Sciences, Oxford University.
- Murray, A.S. (1982). Studies of stability of radioisotope concentrations and their dependence on grain size. *PACT*, **6**, 216-223.
- Murray, A.S., and Aitken, M.J. (1982). The measurement and importance of radioactive disequilibria in TL samples. *PACT*, **6**, 155-169.
- Murray, A.S., Marten, R., Johnston, A., and Martin, P. (1987). Analysis for naturally occurring radionuclides at environmental concentrations, by gamma spectrometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **115**, 263-288.
- Nargolwalla, S.S., and Przybylowicz, E.P. (1970). *Activation analysis with neutron generators*, J. Wiley & Sons, London
- Παπαστεφάνου, Κ. Π. (1999). *Φυσική ακτινοβολιών και Εφαρμογές Ραδιοϊσοτόπων*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Pernicka, E., and Wagner, G.A. (1982). Radioactive equilibrium and dose-rate determination in TL dating. *PACT*, **6**, 132-144.
- Potts, P.J., Tndle, A.G., and Webb, P.C. (1992). *Geochemical reference material compositions*, CRC Press Inc.
- Potts, J.P., Williams-Thorpe, O., and Webb, C.P. (1997). The bulk analysis of silicate rocks by portable X-Ray fluorescence: Effect of sample mineralogy in relation to the size of the excited volume, Geostandards Newsletter. *The Journal of Geostandards and Geoanalysis*, **21**, 1, 29-41.
- Potts, P.J., Ellis, A.T., Kregsamer, P., Marshall, J., Streli, C., West, M., Wobrauschek, P. (2001). Atomic spectrometry update. X-ray fluorescence spectrometry. *J. Anal. At. SApectrom.*, **16**, 1217-1237.
- Prescott, J.R., and Stefan, L.G. (1982). Contribution of cosmic radiation to environmental dose. *PACT*, **6**, 17-25.
- Rhodes, E. (2002). *Προσωπική επικοινωνία*.
- Sanderson, D.C.W. (1988). Thick source beta counting (TSBC): a rapid method for measuring coefficient of electrons. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, **14**, 203-207.
- Thompson, M., Potts, P.J., and Webb, P.C. (1996). GeoPT1. International proficiency test for analytical geochemistry laboratories - Report on round 1 (July 1996). *Geostandards Newsletter*, **20**, 2, 277-287.

- Thompson, M., Potts, P.J., Kane, J.S., Webb, P.C., and Watson, J.S. (2000). *GeoPT4*. An international proficiency test for analytical geochemistry laboratories - report on round 4 (March 1999). *Geostandards Newsletter: The Journal of Geostandards and Geoanalysis*, **24**, 1, 135
- Turner, R. C., Radley, J.M., and Mayneord, W.V. (1958). The alpha-ray activity of human tissues. *British Journal of Radiology*, **31**, 397-402.
- Wogman, N.A. (1981). Natural contamination in radionuclides detection system IEEE Trans. *Nucl. Sci.*, 275-281.
- Zimmerman, D.W. (1971). Thermoluminescent dating using fine grains from pottery. *Archaeometry*, **13**, 29-52.

### Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

- Arnold, D. and Do (1979). *Der Tempel Qasr el-Sagha*. Mainz.
- Brand, P. J. (2000). *The Monuments of Seti I*. Leiden.
- Bøtter-Jensen, L and Mejdahl, V. (1985). Determination of potassium in feldspars by beta counting using GM multicounter system. *Nucl. Tracks*, **10**, 663-666.
- Bøtter-Jensen, L and Mejdahl, V. (1988). Assessment of beta dose-rate using a GM multicounter system. *Nucl. Tracks and Radiat. Meas.*, **14**, 187-191.
- Bøtter-Jensen L., Jungner, H. and Mejdahl, V. (1993). Recent Developments of OSL Techniques for Dating Quartz and Feldspars. *Radiation Protection Dosimetry*, **47**, 643-648.
- Bøtter-Jensen, L., Duller, G.A.T., and Murray, A.S. (2000). Advances in luminescence instrument systems. *Radiation Measurements*, **32**, 523-528.
- Bulur, E. (1996). An alternative technique for optically stimulated luminescence (OSL) experiment. *Radiation Measurements* **26**, 701-709.
- Bulur, E., Bøtter-Jensen L., and Murray, A.S. (2000). Optically stimulated luminescence from quartz measured using the linear modulation technique. *Radiation Measurements*, **32**, 407-411.
- Calverley, M. and Broome, M.F. (1933-1958). *The Temple of Sethos I at Abydos*, 4 vols.. London.
- Dreyer, G. (1992). The royal tombs of Abydos, in *The Near East in Antiquity: German Contributions to the Archaeology of Jordan, Syria, Lebanon, and Egypt*, **Vol. III**, 93-104, Amman.
- Dreyer, G. (1992). Recent discoveries at Abydos Cemetery U, in E.C.M. van den Brick (ed.), *The Nile Delta in Transition 4<sup>th</sup>-3<sup>rd</sup> Millennium BC*, 293-9, Tel Aviv
- Duller G.A.T. (1991). Equivalent dose determination using single aliquots. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, **18**, 371-378.
- Duller, G.A.T (1994c). A new method for analysis of infrared stimulated luminescence data from potassium feldspars. *Radiation Measurements*, **23**, 281-285.
- Duller, G.A.T., Bøtter-Jensen, L., and Murray, A.S. (2000). Optical dating of single sand-sized grains of quartz: sources of variability. *Radiation Measurements*, **32**, 453-457.

- Esmael, F. A. (1992). (ed.), Book of Proceedings: *The First International Symposium on the Great Sphinx*. Cairo.
- Galbraith, R.F., Roberts, R.G., Laslett, G.M., Yoshida, H., and Olley, J.M. (1999). Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinmium rock shelter, northern Australia: Part 1, Experimental design and statistical models. *Archaeometry*, **41**, 339-364.
- Galloway, R.B. (1992). Towards the use of green light emitting diodes for the optically stimulated luminescence dating of quartz and feldspar. *Meas. Sci. Technol.*, **3**, 330-335.
- Galloway, R.B. (1994a). On the stimulation of luminescence with green light emitting diodes. *Radiation Measurements*, **23**, 547-550.
- Galloway, R.B. (1994b). Comparison of the green- and infrared-stimulated luminescence of feldspar. *Radiation Measurements*, **23**, 617-620.
- Galloway, R.B. (1996). Equivalent dose determination using only one sample: alternative analysis of data obtained from infrared stimulation of feldspar. *Radiation Measurements*, **26**, 103-106.
- Gauri, K. L. (1981). Deterioration of stone on the Great Sphinx. *NARCE*, **114** (Spring), 35-47.
- Gauri, K.L. (1984). Geologic study of the Sphinx. *NARCE*, **127**, 24-43.
- Ginter, B., Heflik W., Kozlowski, J.K., and Śliwa J. (1980). Excavations in the region of Qasr el-Sagha, 1979. Contributions to the Holocene geology, the Predynastic and Dynastic Settlements in the northern Fayum desert,' *MDAIK* 36.
- Hassan, S. (1932-53). *Excavations at Giza. 10 vols.* Oxford and Cairo.
- Hassan, S. (1949). *The Sphinx: Its History in the Light of Recent Excavations*. Cairo.
- Jain, M. (2001). *Προσωπική επικοινωνία*.
- Kemp, B.J. (1966). Abydos and the royal tombs of the First Dynasty. *JEA*, **52**, 13-22.
- Kemp, B.J. (1967). The Egyptian First Dynasty royal cemetery. *Antiquity*, **41**, 22-32.
- Kemp, B.J. (1968). 'The Osiris Temple at Abydos,' *Mitteilungen des Deutschen Archaeologisches Institute Kairo*, **23**, 138-155.
- Kokkoris, M. and Liritzis Y. (1997). Dose versus time for U-Disequilibrium and revised dose-rate data for TL/ESR dating. *European journal of PACT*, No. 45. IV. 5, 281 – 294
- Lehner, M. (1991). *Archaeology of an Image: The Great Sphinx of Giza*. Ph.D., Yale University
- Lehner, M. (1997). *The Complete Pyramids*. Thames & Hudson Ltd, London.
- Li, S.H. and Chen, G. (2001). Studies of thermal stability of trapped charges associated with OSL from quartz. *Journal of Physics D - Applied Physics*, **34**, 493-498.
- Liritzis Y. (1989). Dating of calcites: Some aspects of radiation survey in caves and dose-rates. *Annales Géologiques des Pays Helléniques*, **34/1**, 123-136.
- Liritzis Y. and Kokkoris M. (1992). Revised Dose-rate Data for Thermoluminescence/ESR Dating. *M. Nucl. Geophys.*, **6**, 3, 423-443.

- Liritzis, I., Foti, F., Guibert, P., Schvoerer, M. (1996). Solar bleaching of thermoluminescence of calcites. *Nucl. Instr. Meth. B*, **117**, 260-268.
- Liritzis I., Guibert P., Foti F. and Schvoerer M. (1997b). The Temple of Apollo (Delphi). Strengthens novel Thermoluminescence Dating Method. *Geoarchaeology: An International Journal*, **12**, 5, 479-496.
- Liritzis, I., and Galloway, R.B. (1999). Dating implications from solar bleaching of TL of ancient marble. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **241**, 361-368.
- Mariette, A. (1869-1880). Abydos. 2 vols. Paris.
- Mejdahl, V. (1979). Thermoluminescence dating: beta-dose attenuation in quartz grains. *Archaeometry*, **21**, 61-72
- Mejdahl, V. (1987). Internal radioactivity in quartz and feldspar grains. *Ancient TL*, **3**(2), 21-26.
- Murray, A.S., Marten, R., Johnston, A., and Martin, P. (1987). Analysis for naturally occurring radionuclides at environmental concentrations, by gamma spectrometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **115**, 263-288.
- Murray, A.S., and Wintle A.G. (2000). Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements*, **32**, 57-73.
- Ντάσιος, Φ. (1989). Συμβολή στην τοπογραφία της αρχαίας Φωκίδας. *Φωκικά Χρονικά, Περίοδος Β΄*, 18-97.
- Olley, J.M., Roberts, R.G., and Murray, A.S. (1997). Disequilibria in the uranium decay series in sedimentary deposits at Allen's Cave, Nullarbor Plain, Australia: Implications for dose rate determinations. *Radiation Measurements*, **27**, 433-443.
- Papadopoulos, Th., and Kontorli-Papadopoulou, L. (2000). Minoan relations with West Greece and the Ionia Islands in the Late Bronze age, (in Greek), Proceedings of the 8<sup>th</sup> Cretological Congress (Heraklion, September 1996), Vol A2, 519-530.
- Petrie, W.M.F. (1901). *The Royal Tombs of the Earliest Dynasties*, Part II. London.
- Reisner, G. (1931). *Mycerinus. The Temples of the Third Pyramid at Giza*. Cambridge, MA.
- Reisner, G. (1955). *A History of the Giza Necropolis*. Vol. 1. Cambridge, MA.
- Sampson, A. (2002). *The Neolithic settlement at Ftelia, Mykonos*. University of the Aegean, Dept. of Mediterranean Studies, Rhodes, Greece, 309-315.
- Spooner, N.A. (1994). On the optical dating signal from quartz. *Radiation Measurements*, **23**, 593-600.
- Stuiver, M. and Reimer, P.J. (1993). Extended 14C Data Base and Revised Calib 3.0 14C Age Calibration Program. *Radiocarbon*, **35** (1), 215-230.
- Stuiver, M., and Pearson, G.M. (1993). High-precision bidecadal calibration of the radiocarbon time scale, AD 1950-500BC and 2500-6000 BC. *Radiocarbon*, **35**(1), 1-23.
- Stuiver, M., and Braziunas, T.F. (1993). Sun, ocean, climate and atmospheric 14CO<sub>2</sub>: an evaluation of causal and spectral relationships. *The Holocene*, **3**, 289-305 (original dataset) .



- Stuiver, M., Reimer, P.J., Bard, E., Beck, J.W., Burr, G.S., Hughen, K.A., Kromer, B., McCormac, F.G., v.d. Plicht, J., and Spurk, M. (1998a). INTCAL98 Radiocarbon age calibration, 24000-0 calBP. *Radiocarbon*, **40**, 1041-1083.
- Stuiver, M., Reimer, P.J., and Braziunas, T.F. (1998b). High-precision radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples. *Radiocarbon*, **40**, 1127-1151. (revised dataset).
- Tso, M.Y.W., Wong, N.W.L., and Li, S.H. (1996). Determination of lifetime of infrared stimulated signals from potassium and sodium feldspars. *Radiation Protection Dosimetry*, **66**, 387-389.
- Vafiadou, A., Murray, A.S. and Liritzis, I. (2005). Optical stimulated luminescence dating investigations of rock and underlying soil from three case studies. *JAC* (in press).
- Wallinga, J., Murray, A., and Wintle, A. (2000a). The single-aliquot regenerative-dose (SAR) protocol applied to coarse-grain feldspar. *Radiation Measurements*, **32**(5-6), 529-533.
- Wallinga, J., Murray, A., and Duller, G. (2000b). Underestimation of equivalent dose in single-aliquot optical dating of feldspars caused by preheating. *Radiation Measurements*, **32**, 691-695.
- Wallinga, J., Murray, A.S., and Bøtter-Jensen, L. (2002). Measurement of the dose in quartz in the presence of feldspar contamination. *Radiation Protection Dosimetry*, **101**, 367-370.
- Wintle, A.G. and Murray, A.S. (1998). Towards the development of a preheat procedure for OSL dating of quartz. *Radiation Measurements*, **29**, 81-94.
- Zimmerman D. W. (1971). Luminescence dating using fine grains from pottery. *Archaeometry*, **13**(1), 29-56.

#### Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

- Bulur, E. (1996). An alternative technique for optically stimulated luminescence (OSL) experiment. *Radiation Measurements* **26**, 701-709.
- Bulur, E., Bøtter-Jensen L., and Murray, A.S. (2000). Optically stimulated luminescence from quartz measured using the linear modulation technique. *Radiation Measurements*, **32**, 407-411.
- Galloway, R.B. (2002). Does limestone show useful optically stimulated luminescence? *Ancient TL*, **20**, 1, 1-5.
- Kitis, G., Liritzis, I. and Vafiadou, A. (2002). Deconvolution of optical stimulated luminescence decay curves. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol.254, No.1, 143-149.
- Spooner, N.A. (1994). On the optical dating signal from quartz. *Radiation Measurements*, **23**, 593-600.

#### Παράρτημα

Arnold, D. (1977). *Fajjum*. LÄ 2.

Arnold, D. and Do (1979). *Der Tempel Qasr el-Sagha*. Mainz.

- Ασλάνης, Ι. (1998). Η πρώτη εμφάνιση οχυρώσεων σε προϊστορικούς οικισμούς του αιγαιακού χώρου, στο Λ.Γ. Μενδώνη και Α.Ι. Μαζαράκης Αινιάν (επιμ.), *Κέα – Κύθνος: Ιστορία και Αρχαιολογία*, Αθήνα, 111-112.
- Badaway, A. (1966). *A history of Egyptian architecture*. Berkeley.
- Baines, J. and Malek, J. (2000). *Cultural Atlas of Ancient Egypt*. Oxford - New York.
- David, R. (1981). *A guide to religious ritual at Abydos*. Warminster.
- Drioton, É. (1940). Review of Grdseloff, B. Das Reinigungszelt, in *Ann. Serv.*, XL, 1007-14.
- Duhoux, Y. (1989). Le linéaire A : problèmes de déchiffrement, Problems in Decipherment. *Louvain-la-Neuve*, 59-119.
- Edwards, L.S. (1995). *Οι πυραμίδες της Αιγύπτου*, Μετ. Δημ. Παπαγεωργίου, Φόρμυξ, Αθήνα.
- Grdseloff, B. (1941). *Das ägyptische Reinigungszelt*. Cairo.
- Greig, J.R.A. and Turner, J. (1974). Some pollen diagrams from Greece and their archaeological significance. *JAS*, 1, 177-194.
- Grimal, N. (1994). *A history of Ancient Egypt*. Trans. by I. Shaw, Oxford.
- Godart, L. (1984). Du linéaire A au linéaire B. *Hommages à Henri van Effenterre*, 121-128.
- Hassan, S. (1949). *The Sphinx: Its History in the Light of Recent Excavations*, Cairo.
- Helck, W., Otto, E. and Westendorf, W. (eds.) (1972-1996). *Lexikon der Ägyptologie*. Wiesbaden.
- Helck, W. (1984). *Qasr el-Sagha*. LÄ 5.
- Kemp, B. (1992). *Anatomy of a Civilization*. London.
- Kontorli-Papadopoulou, L. (2000). Searching for the Homeric Ithaca, Recent Archaeological excavations (1994-2000), ERANOS, *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Symposium on the Odyssey, 2-7 September 2000*, 317-330 (in Greek).
- Kontorli-Papadopoulou, L. (2002). Ithaki, *CORPUS special edition, Archaeology in Greece*, 147-151.
- Kontorli-Papadopoulou, L., Papadopoulos, Th, and Owens, G. (2005). A possible linear sign from Ithaca (AB09 "SE")?. *KADMOS, Zeitschrift für vor- und frühgriechische Epigraphic*, XLIV, 183-186.
- Κουτσούκου, Α. (1993). Αρχαιολογική επιφανειακή έρευνα στη βορειοδυτική Άνδρο. *Ανδριακά Χρονικά*, 21, 99-104.
- Lehner, M. (1997). *The Compleat Pyramids*, Thames & Hudson Ltd, London.
- Mariette, A. and Rougé, M.d. (1854). Note sur le fouille executées par Mariette autour du grand Sphinx de Giseh. Lettre de Mariette citées par M. de Rougé, l' Athenaeum française 3e anée, no 28.
- Malek, J. (1999). *Egyptian Art*. London.
- Murray, M.A. (1094). *The Osireion at Abydos*. British School of Egyptan Archeology n°1, London.
- Ντάσιος, Φ. (1989). Συμβολή στην τοπογραφία της αρχαίας Φωκίδας. *Φωκικά Χρονικά, Περίοδος Β´*, 18-97.
- O'Connor, D. (1989). New Funerary enclosure (Talbezirke) of the Early Dynastic Period at Abydos. *JARCE*, 26, 51-86.

- O'Connor, D. (1991). Boat graves and pyramid origins. *Expedition*, **33**, 5-17.
- O'Connor, D. (1995). The earliest royal boat graves. *EA*, **6**, 3-7.
- Olivier, J.-P. (1967). *Les scribes de Cnossos. Essai de classement des archives d'un palais mycénien*, Roma.
- Owens, G. (1999a). Linear A in the Aegean: The further travels of the Minoan Script. A study of the 30+extra-Cretan Minoan inscriptions. *Aegaeum*, **20**, 583-598.
- Owens, G. (1999b). Re-discovered fragments of Linear B tablets from Knossos now, in the *Ashmolean Museum*, Oxford, *Talanta* 30-31 (1998-99), 155-158.
- Palaima, T.G. (1988). *The Scribes of Pylos*, Roma.
- Papadopoulos, Th., and Kontorli-Papadopoulou, L. (2000). Minoan relations with West Greece and the Ioniaian Islands in the Late Bronze age, (in Greek), *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Cretological Congress (Heraklion, September 1996)*, Vol **A2**, 519-530.
- Παπαδοπούλου-Βρυνιώτη, Κ. (1990). Γεωμορφολογική μελέτη της περιοχής Κωπαΐδας, Διδ. Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Parathanassopoulos, G.A. (1981). *Neolithic and Cycladic Civilization*, Athens.
- Παπουτσάκης, Χ. (1972). Οι βραχογραφίες στ' Ασφέντου των Σφακίων. *Κρητικά Χρονικά*, **24**, 107-139.
- Reisner, G.A., Mycerinus, *The Temples of the Third Pyramid at Giza*, Cambridge, MA, 1931.
- Renfrew, C. (1967). Cycladic metallurgy and the Aegean Early Bronze Age. *AJA*, **71**, 1-20.
- Ricke, H. (1970). *Der Harmchistempel des Chefren in Giseh (Beiträge zur Ägyptischen Bauforschung und Altertumskunde, Vol. 10)*, Wiesbaden.
- Sampson A. (2000). The Sarakenos Cave and the occupation of Caves in the Kopais Basin. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Congress of Boeotian Studies*, 192.
- Sampson, A. (2002). *The Neolithic settlement at Ftelia, Mykonos*, University of the Aegean, Dept. of Mediterranean Studies, Rhodes.
- Sampson, A. and Megaloudi, F. (2006). The Sarakenos Cave. Contribution to the cultural sequence and to palaeoeconomy in the Neolithic of Central Greece, *proceedings of the Conference "Archaeological research in Thessaly and Central Greece"*, 593-606.
- Sampson, A. (2006). The Sarakenos Cave and the palaeoenvironment in the Kopais Basin, Central Greece. *The Ancient World. Coins, cults, history and inscriptions*, **37**, 46-53.
- Turner, J., and Greig, J.R.A. (1975). Some Holocene pollen diagrams from Greece. *Revue of Palaeobotany and Palaeoecology*, **20**, 171-204.
- Σωτηρακοπούλου, Π. (1998). *Ακρωτήρι Θήρας: Η Νεολιθική και η Πρώιμη Εποχή του Χαλκού επί τη βάση της κεραμική*, Αθήνα.
- Τελεβάντου, Χ. (2001). Στρόφιλας. Ένας νεολιθικός οικισμός στην Άνδρο. ΑΓΚΥΡΑ 1, Δελτίο της Καϊρείου Βιβλιοθήκης, 203-211.

Televantou, CH. (2004). Strofilas – A Neolithic settlement on Andros, in *Ορίζων, A Colloquium on the Prehistory of the Cyclades*, McDonald Institute for Archaeological Research University of Cambridge.

Τελεβάντου, Χ. (2006). Ο οικισμός του Στρόφιλα στην Άνδρο, στο Σάμψων Α. *Προϊστορία του Αιγαίου. Παλαιολιθική – Μεσολιθική – Νεολιθική*, Εκδόσεις Ατροπός, 185-194.

Zachos, K., and Douzougli, A. (1999). Aegean Metallurgy: How early and how independent?, in P.P. Betancourt, V. Karageorghis, R. Laffineur & W.-D. Niemeier (eds), *Meletemata. Studies in Aegean Archaeology presented to Malcolm H. Wiener, Aegaeum 20*, III, Liège, 959-967.