

Γ. Μπασιάκος και Γ. Μανιάτης

Εργαστήριο Αρχαιομετρίας, Ινστιτούτο Επιστήμης Υλικών,
Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. "Δημόκριτος", 153 10 Αγία Παρασκευή Αττικής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μία νέα εφαρμογή της τεχνικής ESR στη χρονολόγηση ασβεστιτών που επιφλοιώνουν ρηξιγενείς επιφάνειες. Μελετήθηκε υλικό από δύο περιπτώσεις ρηγμάτων, ένα στη Μάνη Λακωνίας και ένα στη Βοιωτία. Για τη χρονολόγηση ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που εφορμάζεται στα παρόμοια σύστασης ασβεστιτικά σπηλαιοσποθέματα. Οι διαφορές που υπάρχουν στη γεωμετρία και στο περιβάλλον των επιφλοιωμάτων είναι δυνατόν να εισάγουν επιπρόσθετες αβεβαιότητες στους υπολογισμούς της ηλικίας. Τονίζεται η αναγκαιότητα συνδυασμού μελετών υπαίθρου, τεκτονικών και χρονολογικών ερευνών για την πλήρη αξιοποίηση της μεθόδου στην Τεχνική Γεωλογία και την αντισεισμική προστασία.

The paper deals with a new application of the ESR-technique for dating carbonate encrustations occurring on surfaces of tectonic rupture. Material from two pilot cases has been studied, one in Mani (Laconia) and one in Boeotia. The applied procedure was in generally the same as for calcitic speleothems since these materials are chemically similar with the above formations. Differences concerning the geometry and the environment of the encrustations may introduce additional uncertainties in age estimations. The necessity for in-situ investigation in combination with tectonic and dating studies is emphasized for successful utilisations of the technique to Engineering Geology as well as to research for determining the seismic risk.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η φασματοσκοπία του συντονισμού της ηλεκτρονικής στροφορμής (Electron Spin Resonance, E.S.R.) προτάθηκε από τον Zeller et al. (1967) για χρονολογήσεις με εφαρμογές στη Γεωλογία. Ο Ikeya (1975), παρουσίασε την πρώτη επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου στην χρονολόγηση σταλακτιτικού υλικού, ενώ τα τελευταία 10 χρόνια η μέθοδος βρίσκει εφαρμογή σε ένα διαρκώς αυξανόμενο αριθμό φυσικών υλικών γεωλογικής, ανθρωπολογικής και αρχαιολογικής σημασίας. Μέχρι σήμερα έχει

εφαρμοσθεί σε σπηλαιοσποθέματα, τραβερτίνες, απολιθώματα τρηματοφόρων και μαλακίων, κοράλια, ανθρακικό υλικά από πυρήνες γεωτρήσεων ανοικτών θαλασσών, γύψο, φθορίτες, χαλαζίες, πυριτικά υλικά ρηγμάτων, αδαμαντίνη και άλλα σκελετικά στοιχεία θηλαστικών του Τεταρτογενούς κ.α. (Grün, 1989). Από τα παραπάνω υλικά τα ανθρακικά ιζήματα ηλικίας 10^3 - 10^6 ετών μπορούν κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις που συζητούνται παρακάτω να χρονολογηθούν με ένα σφάλμα της τάξεως ± 20 - 30% . Με την εργασία αυτή παρουσιάζεται για πρώτη φορά μία επιτυχής εφαρμογή της χρονολογικής τεχνικής ESR σε ανθρακικά/τραβερτινώδη υλικά που σχετίζονται με ρήγματα και τεκτονικά φαινόμενα τα οποία συνέβησαν κατά τη διάρκεια του Τεταρτογενούς. Τέτοια υλικά μπορεί να είναι νεοτεκτονικές δομές όπως τα ασβεστικά πληρώματα πτεροειδών διακλάσεων, ασβεστιτικό υλικό συγκόλλησης κώνων παλαιών κορημάτων, είτε, συνηθέστερα, ασβεστιτικά επιφλοιώματα κατοπτρικών επιφανειών ρηγμάτων ή "γεώδη"-calcite en arbis, (Mattauer, 1973) κλπ.

Οι χρονολογήσεις με ESR συντεκτονικών και μετατεκτονικών ανθρακικών σχηματισμών μπορούν να προσφέρουν πολύ σημαντικές πληροφορίες για την αναγνώριση "αβέβαιων" ενεργών ρηγμάτων (Ambraseys, 1978), για μελέτες που αφορούν στην περιοδικότητα των σεισμικών φαινομένων ή για κατασκευές μεγάλων τεχνικών έργων (αντιδραστήρων, σιράγγων, φραγμάτων, αγωγών) κ.α.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΔΕΙΓΜΑΤΑ

2.1. Τεχνικές

Οι γενικές αρχές της χρονολογικής τεχνικής ESR, η οργανολογία, οι δυνατότητες και περιορισμοί της μεθόδου καθώς και οι εφαρμογές της στην Τεταρτογενή Γεωλογία έχουν περιγραφεί αναλυτικά από τους Hennig and Grün (1983), Grün (1989) κ.ά. Συνοπτικά αναφέρεται εδώ ότι η τεχνική βασίζεται στη μέτρηση, με φασματόμετρο ESR ενός σήματος το οποίο είναι μία συντονισμένη απορρόφηση μικροκυμάτων. Η ένταση της απορρόφησης αυτής είναι ανάλογη με την συνολική ραδιενεργό δόση που έχει συσσωρευθεί στο δείγμα και κατα συνέπεια με το χρόνο που έχει περάσει από την εποχή απόθεσης του σχηματισμού.

Όπως αποδεικνύεται παρακάτω, τα ασβεστιτικά επιφλοιώματα κατοπτρικών επιφανειών ρηγμάτων διαθέτουν σήματα ESR, κατάλληλα για χρονολόγηση. Γενικά η ηλικία ενός χρονολογήσιμου δείγματος υπολογίζεται από τη σχέση:

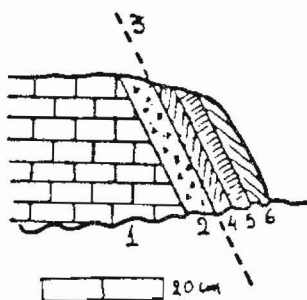
$$\text{Ηλικία ESR} = \text{ολική συσσωρευμένη δόση (AD)} / \text{ετήσια δόση (DR)} \quad (1)$$

Η AD προσδιορίζεται με φασματοσκοπία ESR. Η DR υπολογίζεται ανεξάρτητα με μετρήσεις φυσικής ραδιενέργειας στην περιοχή δειγματοληψίας, με ακριβείς προσδιορισμούς ραδιοστοιχείων στα δείγματα και υπολογισμούς που αφορούν στην ενέργεια και τη διεισδυτικότητα των διαφόρων ακτινοβολιών και στην μικροκατανομή ραδιενεργών στοιχείων.

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στα διάφορα στάδια υπολογισμού της ετήσιας δόσης είναι η θερμολυαυγεία, η φασματοσκοπία ακτίνων-γ, η τεχνική των τροχιών σχάσεων (Fission Tracks) κ.α.

2.2 Δείγματα - Επεξεργασία

Περιοχές δειγματοληψίας ήταν η Μόνη (Ν. Πελοπόννησος) και η Βοιωτία (Στ. Ελλάδα). Οι δύο αυτές περιοχές ανήκουν σε διαφορετικές γεωτεκτονικές ενότητες αλλά χαρακτηρίζονται από μεγάλη σεισμικότητα και πολλά ρήγματα και ακόμη δομούνται κυρίως από αλπικούς ανθρακικούς σχηματισμούς. Στην ομάδα δειγμάτων της Μάνης δειγματίστηκε η ασβεστιτική επιφλοώση μιας ρηξιγενούς επιφάνειας (δείγμα DR26a) και ο αντίστοιχος μητρικός ηωκαινικός ημιμετομορφωμένος ασβεστόλιθος (δείγμα DR26a-υποβ).



Σχ. 1. Σκαρίφημα δειγματοληψίας περιοχής Ελικώνας Βοιωτίας.

1. μητρικός ασβεστόλιθος με διακλάσεις
2. τεκτονικό μικρολατυνοπαγές
3. κατοπτρική επιφάνεια ρήγματος
- 4,5,6. ασβεστιτικά επιφλοιώματα της κατοπτρικής επιφάνειας.

Στην περιοχή Ελικώνα Βοιωτίας δειγματίστηκαν σε μία ζώνη διαρρήξεων (Σχ. 1) ο μητρικός ασβεστόλιθος (δείγμα BT-2), το τεκτονικό μικρολατυνοπαγές μιας κατοπτρικής επιφάνειας ρήγματος (BT-3) και το επιφανειακό επιφλοώμα (BT-4) της επιφάνειας. Το επιφλοώμα, πάχους περίπου 10 cm παρουσίαζε τρεις σαφείς διαστρώσεις σκοτεινόχρωμων και ανοιχτόχρωμων ταινιών ασβεστίτη. Οι διαστρώσεις αυτές διαχωρίστηκαν μηχανικά και χαρακτηρίστηκε με BT-4a η διάστρωση (4) που βρισκόταν σε επαφή με το λατυνοπαγές, με BT-4b η αμέσως επόμενη (5) και με BT-4γ η εξωτερική (6) που ήταν εκτεθειμένη στην ατμόσφαιρα. Από τις διαστρώσεις αυτές η BT-4a και BT-4γ επεξεργάσθηκαν για να μελετηθούν με φασματοσκοπία ESR.

Συλλέχθηκε ένα ακόμη δείγμα τεκτονικού μικρολατυνοπαγούς από ρήγμα της περιοχής Διστόμου Βοιωτίας για φασματοσκοπική μελέτη και σύγκριση με το BT-3.

Συνολικά έξι δείγματα από τη Μόνη και τη Βοιωτία που κατατάσσονται πετρολογικά σε τρεις ομάδες (βλ. Πίνακα 1) επεξεργάστηκαν για φασματοσκοπικές και χρονολογικές μελέτες με τη μέθοδο ESR.

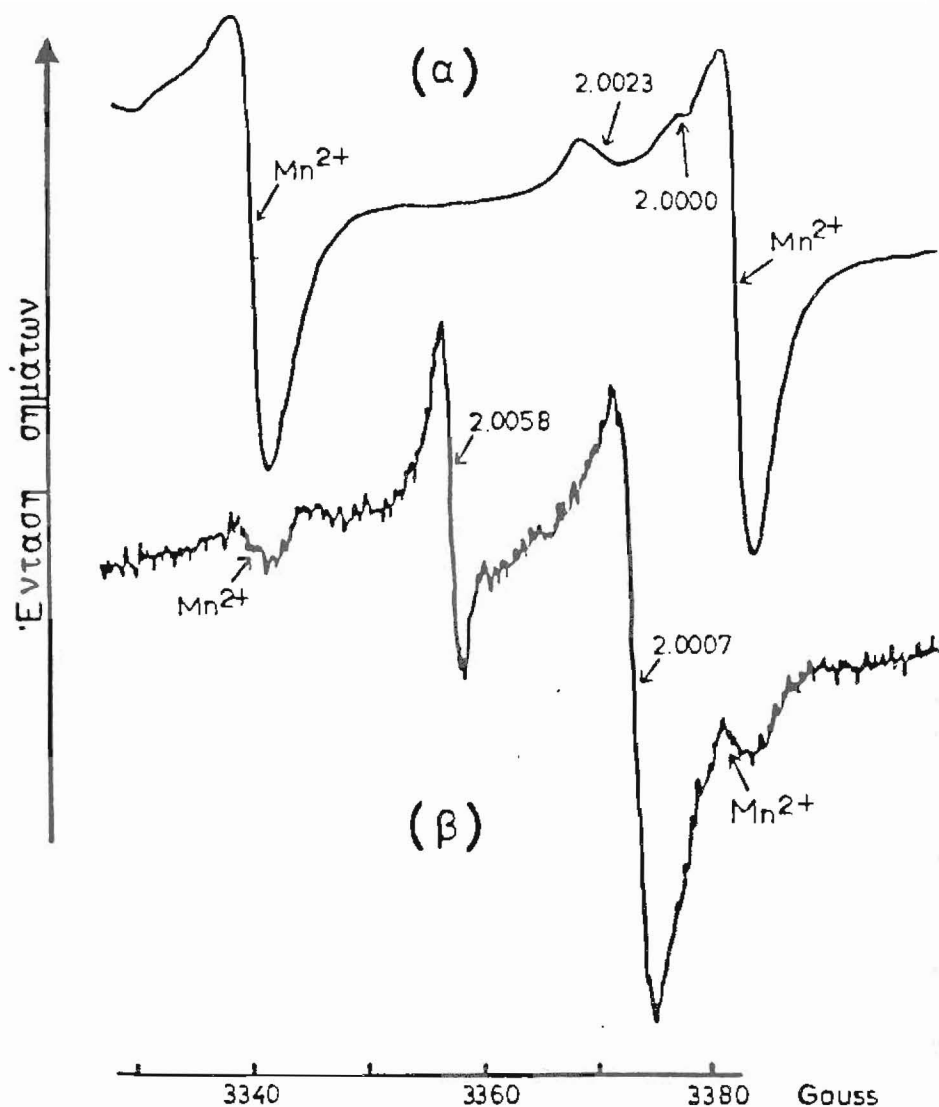
ΠΙΝΑΚΑΣ 1. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Κωδ. Δείγματος	Περιοχή	Περιγραφή
DR26a	Μάνη	ασβεστιτικό επιφλοΐωμα
DR26a-υποβ	Μάνη	μητρικός ασβεστόλιθος, ηωκαινικός, ημιμεταμορφωμένος
BT-2	Βοιωτία	μητρικός ασβεστόλιθος, κρητιδικός, στιφρός
BT-3	Βοιωτία	τεκτονικό μικρολατυποπαγές
BT-4a	Βοιωτία	ασβεστιτικό επιφλοΐωμα σε σε επαφή με λατυποπαγές
BT-4γ	Βοιωτία	ασβεστιτικό επιφλοΐωμα εκτεθειμένο στην ατμόσφαιρα

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

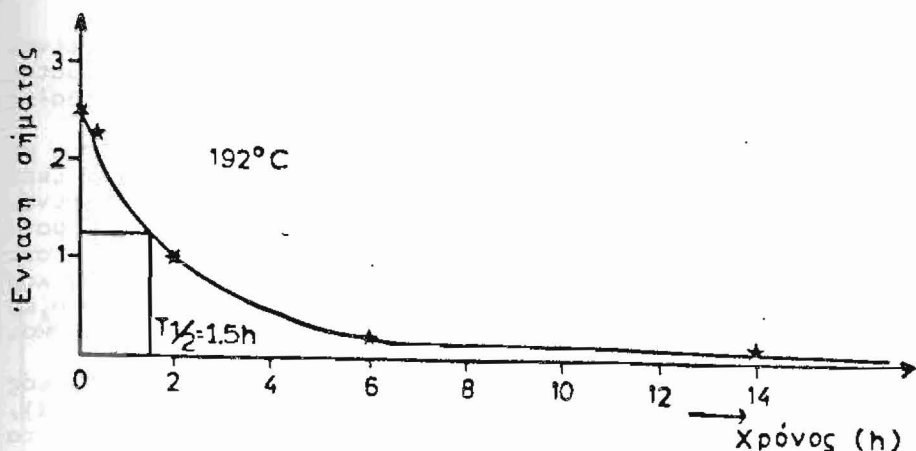
Δύο τυπικά φάσματα ESR από μητρικό ημιμεταμορφωμένο ασβεστόλιθο ρήγματος και από ασβεστιτικό επιφλοΐωμα της κατοπτρικής επιφάνειας φαίνονται στο Σχ. 2. Στα φάσματα των υλικών αυτών παρουσιάζεται μία σειρά κορυφών οι οποίες οφείλονται στις προσμίξεις και στις πλεγματικές ατέλειες του ασβεστίτη (Hennig & Grün, 1983). Κάθε κορυφή στο φάσμα έχει αυστηρά καθορισμένη θέση σε μία συγκεκριμένη τιμή του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου που εφαρμόζεται για μια ορισμένη συχνότητα των μικροκυμάτων. Έτσι υπολογίζεται μία στοθερά για κάθε κορυφή η οποία καλείται παράγων- g ή τιμή- g (Slichter, 1980). Ισχυρές απορροφήσεις από ιόντα Mn^{2+} είναι φανερές στο ασβεστολιθικό υπόβαθρο (Σχ. 2a) ενώ οι ίδιες απορροφήσεις είναι πολύ ασθενείς στο επιφλοΐωμα (Σχ. 2β). Στο ίδιο σχήμα (2a) φαίνονται ακόμη δύο μικρές κορυφές με τιμές $g=2.0023$ και $g=2.0000$, οι οποίες είναι χαρακτηριστικές σε πολλούς ημιμεταμορφωμένους ασβεστόλιθους και μάρμαρα (Maniatis et al., 1988). Στο Σχήμα 2β δύο έντονες απορροφήσεις με $g=2.0058$ και $g=2.0007$ είναι παρούσες οι οποίες παρτηρούνται συστηματικά σε σπηλαιοσποθέματα (Grün, 1985, Liritzis & Maniatis, 1989).

Για να γίνει δυνατή η χρονολόγηση κάποιου δείγματος και συνεπώς του αντίστοιχου σχηματισμού θα πρέπει να εντοπισθούν και χαρακτηρισθούν οι κορυφές που οφείλονται σε απορρόφηση ραδιενεργού ακτινοβολίας. Για το λόγο αυτό τα δείγματα θερμαίνονται και ακτινοβολούνται στο εργαστήριο.



Σχ. 2 Τυπικά φάσματα: α. μητρικού ασβεστόλιθου (δείγμα DR26α-υποβ, επάνω) και β. ασβεστιτικού επιφλοιώματος της ρηξιγενούς επιφάνειας (δείγμα DR26α, κάτω). Οι διαφορές των φασμάτων ESR υποδηλώνουν τις εντελώς διαφορετικές συνθήκες σχηματισμού των δύο ανθρακικών υλικών.

Η θέρμανση αποσκοπεί στο να διαπιστωθεί α) ποιών κορυφών η ένταση μειώνεται με την παροχή θερμικής ενέργειας και β) ο χρόνος και η θερμοκρασία τελικής εξαφάνισης. Η ακτινοβολία με τεχνητή ακτινοβολία -γ αποσκοπεί στο να διαπιστωθεί ποιών κορυφών η ένταση αυξάνεται με ραδιενεργό



Σχ. 3. Καμπύλη ισόθερμης επεξεργασίας του ασβεστιτικού επιφλοιώματος DR26a. Η μείωση του ύψους της κορυφής-παγίδας ηλεκτρονίων $g=2.0007$ με το χρόνο στους 192°C είναι εκθετική. Από την καμπύλη υπολογίζεται ότι ο χρόνος μέσης ζωής της παγίδας αυτής είναι $\tau=2,16$ ώρες.

ακτινοβολία, απόδειξη πως είναι ευαίσθητες σε αυτήν. Εάν λοιπόν μία κορυφή μειώνεται με τη θέρμανση και αυξάνεται με την ακτινοβολία σημαίνει πως οφείλεται σε παγιδευμένα μονήρη ηλεκτρόνια. Όταν το υλικό θερμαίνεται τα παγιδευμένα μονήρη ηλεκτρόνια επανασυνδέονται με θετικά ιόντα/κέντρα και ο πληθυσμός τους μειώνεται. Αντίστοιχα ο πληθυσμός αυτός αυξάνει όταν το υλικό ακτινοβολείται, λόγω δημιουργίας καινούργιων ζευγών ηλεκτρονίων-οπών από την ιονιστική δράση της ραδιενεργού ακτινοβολίας. Η διαπίστωση της ύπαρξης κορυφών που πληρούν αυτές τις δύο προϋποθέσεις σε ένα υλικό το καθιστά υποψήφιο για χρονολόγηση με την τεχνική της φασματοσκοπίας ESR (Hennig & Grün, 1983).

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται μία τυπική καμπύλη θερμικής επεξεργασίας του δείγματος DR26a που διαθέτει στο φάσμα του την κορυφή με $g=2.0007$. Παρατηρεί κανείς ότι η μείωση της έντασης της κορυφής αυτής με το χρόνο στους 192°C εμφανίζει μία εκθετική συμπεριφορά συμβιβαστή με την άποψη ότι η κορυφή αυτή οφείλεται σε μονήρη ηλεκτρόνια, παγιδευμένα σε κάποιας μορφής πλεγματική ατέλεια. Η ένταση της κορυφής πέφτει στο μισό σε 1.5 ώρα. Από την τιμή αυτή υπολογίζεται ότι ο μέσος χρόνος ζωής των ηλεκτρονίων σ'αυτές τις παγίδες είναι $\tau=2.16$ ώρες στους 192°C . Με συστηματικές μετρήσεις σε άλλες θερμοκρασίες και τελικά από διαγράμματα Arrhenius (θερμοκρασίας-μέσου χρόνου ζωής) υπολογίζεται ο μέσος χρόνος ζωής των ηλεκτρονίων στις συγκεκριμένες παγίδες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για τη συγκεκριμένη αυτή κορυφή ο μέσος χρόνος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος προσδιορίστηκε σε 5.2×10^5 έτη αποδεικνύοντας τη σταθερότητα και καταλληλότητά της για χρονολόγηση του υλικού.

Η θερμική επεξεργασία του ιδίου δείγματος απέδειξε ότι η κορυφή με $g=2.0058$ δεν δείχνει παρόμοια συμπεριφορά, συνεπώς

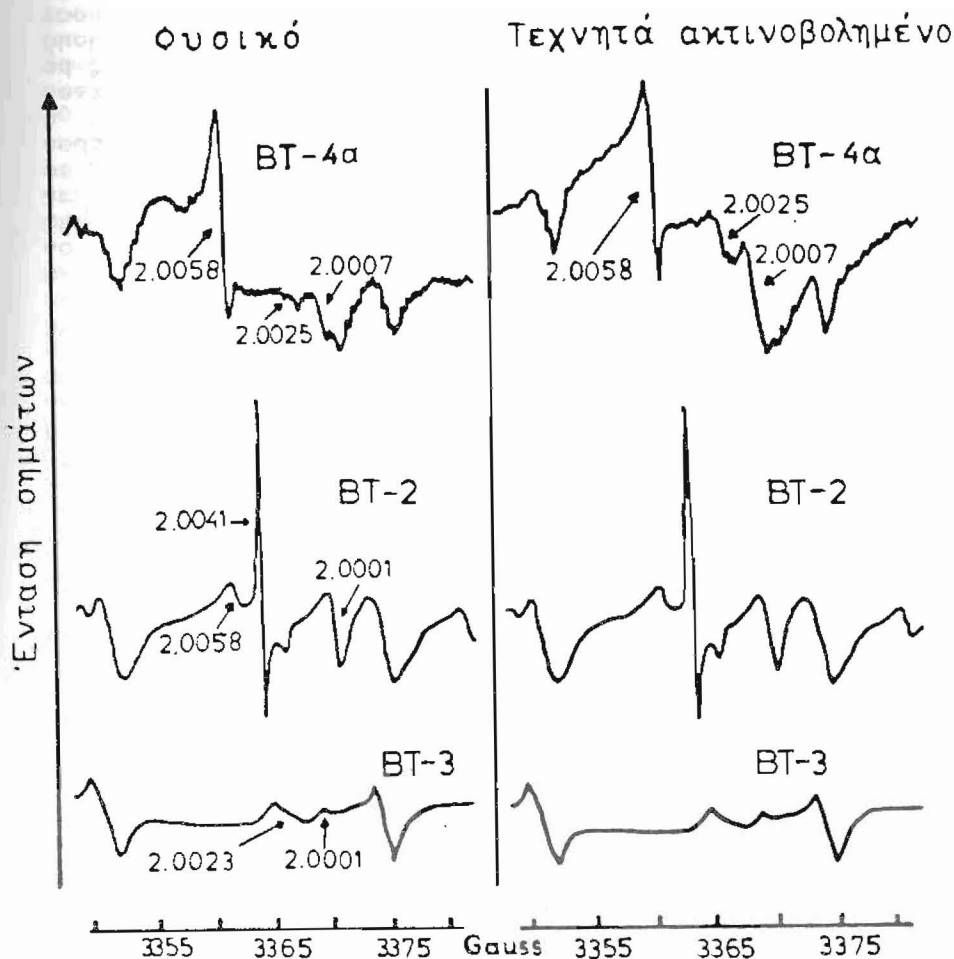
η πραγματική της φύση και καταλληλότητα για χρονολόγηση είναι αμφίβολη. Ακόμη, κατά τη θερμική επεξεργασία του δείγματος DR26a-υποβ. παρατηρήθηκε ότι ελάχιστες μεταβολές παρατηρούνται στις κορυφές με $g = 2.0023$ και $g = 2.0000$.

Στο Σχήμα 4 φαίνεται η επίδραση της ακτινοβολίας με ακτίνες-γ σε τυπικά δείγματα επιφλοιώματος, μητρικού σβεστόλιθου και τεκτονικού λατυποπαγούς της Βοιωτίας. Είναι σαφές ότι η κορυφή με $g = 2.0007$ που υπάρχει στα επιφλοιώματα (BT4-a) αυξάνει με την ακτινοβολία σημαντικά. Όσον αφορά στα φάσματα του μητρικού σβεστόλιθου και του τεκτονικού λατυποπαγούς, αυτά διαθέτουν από μία οειρά κορυφών, οι οποίες όμως δεν αχετίζονται με χρονολογικές πληροφορίες ούτε και επηρεάζονται απο την ακτινοβολία.

Συγκρίνοντας τα φάσματα ESR των δειγμάτων BT-2(μητρικός σβεστόλιθος) και BT-3(τεκτονικό λατυποπαγός) (Σχ. 4, BT-3), εκτός από την ομοιότητα ως προς το Μη διαπιστώνονται και τα εξής: Στην κεντρική περιοχή του φάσματος BT-3 εμφανίζεται μια σχετικά ευρεία κορυφή με $g = 2.0023$ η οποία δεν υπάρχει στο φάσμα του μητρικού σβεστόλιθου Βοιωτίας. Η κορυφή αυτή εμφανίζεται επίσης και σε φάσματα τεκτονικών λατυποπαγών άλλων περιοχών (π.χ. Διστόμου). Ακόμη, η κορυφή αυτή εμφανίζεται ουστηματικά και σε φάσματα μεταμορφωμένων σβεστολίθων (μαρμάρων) που προέρχονται από γνωστές μαρμαροφόρες περιοχές της χώρας (Maniatis et al., 1988), αλλά και σε φάσματα ημιμεταμορφωμένων σβεστολίθων (π.χ. Plattenkalk Μάνης, Σχ. 2α). Το γεγονός ότι τόσο οι μεταμορφωμένοι οχηματισμοί όσο και τα τεκτονικά λατυποπαγή έχουν σχηματισθεί σε ζώνες υψηλών πιέσεων (στατικών είτε κατευθυνόμενων), υποβάλει τη σκέψη ότι η κορυφή με $g = 2.0023$ μπορεί να αχετίζεται με φαινόμενα υψηλών πιέσεων.

Αντίστοιχα, από την σύγκριση φασμάτων των σβεσσιτιικών επιφλοιωμάτων DR-26a (Μάνης) και BT-4a, BT4γ (Βοιωτίας) διαπιστώνεται ότι όλα εμφανίζουν την κορυφή με $g = 2.0007$ η οποία είναι αποτέλεσμα συσώρευσης απορροφημένης φυσικής ραδιενέργειας. Η κορυφή αυτή όπως προαναφέρθηκε έχει ικανοποιητικό μέσο χρόνο ζωής, δηλαδή είναι αρκετά σταθερή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και άρα κατάλληλη για τη χρονολόγηση της γένεσης των σχηματισμών αυτών. Η ίδια κορυφή άλλωστε, χρησιμοποιείται για τη χρονολόγηση σβεσσιτιικών οπηλαιοαποθεμάτων και τραβερτινών (Grün et al., 1988, Grün, 1989). Στα επιφλοιώματα της Βοιωτίας εμφανίζεται επίσης η κορυφή με $g = 2.0025$ η οποία είναι και αυτή αποτέλεσμα συσώρευσης φυσικής ακτινοβολίας αλλά τα πειράματα θερμικής επεξεργασίας έδειξαν ότι είναι πολύ ασταθής σε θερμοκρασία περιβάλλοντος χάνοντας έτσι μεγάλο αριθμό από τα παγιδευμένα ηλεκτρόνια. Οι Hennig & Grün (1983) υπολόγισαν ότι η ασταθής αυτή κορυφή έχει μέσο χρόνο ζωής μόνο 2 χρόνια σε θερμοκρασία 10 °C, επομένως δεν προσφέρεται για χρονολογικές μελέτες με την τεχνική ESR.

Χρησιμοποιώντας λοιπόν την κορυφή με $g = 2.0007$ η συνολικά απορροφημένη δόση φυσικής ραδιενεργού ακτινοβολίας (AD)



Σχ. 4. ESR φάσματα ασβεστιτικού επιφλοιώματος, μητρικού ασβεστόλιθου και τεκτονικού λατυποπαγούς από κατοπτρική επιφάνεια ρήγματος περιοχής Ξλικών Βοιωτίας. Αριστερή στήλη: Φάσματα υλικών στη φυσική τους κατάσταση. Δεξιά στήλη: Φάσματα των ίδιων υλικών ύστε από ακτινοβολήση 150 Gy στο εργαστήριο. Με την ακτινοβολήση αυξάνουν οι ευαίσθητες κορυφές ($g=2.0007$ και $g=2.0025$) του ασβεστιτικού επιφλοιώματος BT-4α, το οποίο είναι χρονολογήσιμο με ESR. Οι κορυφές που εμφανίζονται στο μητρικό ασβεστόλιθο BT-2 και στο τεκτονικό λατυποπαγές BT-3 δεν σχετίζονται με χρονολογικές πληροφορίες ούτε επηρεάζονται από την ακτινοβολήση.

μπορεί να προσδιορισθεί με φασματοσκοπία ESR στα υλικά των επιφλοιωμάτων. Η διαδικασία προσδιορισμού της AD περιλαμβάνει ακτινοβολήση στο εργαστήριο με σταδιακά αυξανόμενο ποσό ραδιενεργού δόσης από 2 έως 150 Gy και μέτρηση της αύξησης της έντασης της κορυφής. Η γραφική παράσταση της έντασης με τη δόση δίνει κανονικά μία ευθεία γραμμή (built-up curve, Ikeya, 1978). Με τον τρόπο αυτό αφενός ελέγχεται η γραμμικότητα της προστιθέμενης ακτινοβολίας και αφετέρου προσδιορίζεται η συνολική φυσικά συσσωρευμένη δόση με προέκταση της ευθείας σε μηδέν ένταση. Ετσι προσδιορίστηκαν οι συνολικές δόσεις για το επιφλοιώμα του ρήγματος της Μάνης και για τα δύο από τα τρία αλεπόλληλα επιφλοιώματα του ρήγματος της Βοιωτίας. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 2.

Για τον υπολογισμό της ετήσιας δόσης ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

α. Προσδιορίσθηκε η περιεκτικότητα ουρανίου στα δείγματα με τη μέθοδο Fission Tracks όπως περιγράφεται από τους Wagner (1973) και Μπασιάκο (1983). Η ροή νετρονίων στη θερμική στήλη του ερευνητικού αντιδραστήρα του ΕΚΕΦΕ "Δημόκριτος" ήταν $2 \times 10^{10} \text{ n.cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}$ και τα δείγματα ακτινοβολήθηκαν επί 48h.

β. Μετρήθηκε η εξωτερική δόση (που συνίσταται από ακτινοβολία γ περιβάλλοντος και από κοσμική ακτινοβολία) με τη χρήση βαθμολογημένου φορητού φασματομέτρου ακτίνων γ (GIS-4, SCINTREX), τύπου καταφλίου με ανιχνευτή NaJ(Tl) 1×1 ", σταθερά χρόνου 100 sec, φάσμα ενεργειών 0.15 έως 3.0 MeV και γεωμετρία 2π.

γ. Αφαιρέθηκε εξωτερική επιφάνεια μέχρι βάθους 2 mm από τα δείγματα που συλλέχθηκαν. Αυτή η επεξεργασία απλοποιεί τις παραμέτρους που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς δοσιμετρίας (Grun, 1985). Τα δείγματα που μελετήθηκαν είχαν τελικά μορφή πλακωδών πρισμάτων διαστάσεων $25 \times 25 \times 3 \text{ mm}$.

Ο παράγων ετήσια δόση, (DR) της σχέσης (1) στο κεφάλαιο 2.1 αναλύεται ως εξής:

$$DR = DR_{\alpha} + DR_{\beta} + DR_{\gamma} + DR_c \quad (2) \quad (\text{Aitken, 1990}).$$

και το άθροισμα: $DR_{\alpha} + DR_{\beta}$ συνιστά την "εσωτερική" δόση από ακτινοβολίες α και β εκπεμπόμενες από ραδιενεργούς πυρήνες που περιέχονται στο πλέγμα των υπο μελέτη υλικών. (Η ακτινοβολία γ που επίσης εκπέμπεται από τους ίδιους πυρήνες θεωρείται ότι δεν συνεισφέρει στην εσωτερική δόση επειδή τα επιφλοιώματα δειγματοστάθηκαν σε μικρά πάχη, μέχρι 3mm.) (Hennig & Grün, 1983)

Η DR_{α} είναι η "αποτελεσματική" ετήσια δόση από ακτίνες α και ισούται με $k \times DR_{\alpha}$, όπου DR_{α} είναι η "πραγματική" ετήσια α -δόση και k είναι ο παράγων "αποτελεσματικότητας" των ακτίνων α που ορίζεται ως εξής:

$$k = \frac{\text{σήμα ESR ανά Gy για ακτίνες } \alpha \text{ ενέργειας } 3.7 \text{ MeV}}{\text{σήμα ESR ανά Gy για ακτίνες } \beta \text{ ή } \gamma}$$

Η τιμή του παράγοντα k ελήφθη ίση με 0.34 ± 0.8 (Grun, 1989).

Το άθροισμα των παραγόντων DR_γ και DR_c στην (2) συνιστά την "εξωτερική" δόση και προέρχεται από την ακτινοβολία -γ (του περιβάλλοντος του καθενός δείγματος) και από την κοσμική ακτινοβολία, αντιστοίχως. Το άθροισμα αυτό προσδιορίσθηκε, όπως προαναφέρθηκε, από τις μετρήσεις υπαίθρου με το φορητό φασματόμετρο. Για κάθε θέση δειγματοληψίας έγιναν τουλάχιστον 10 μετρήσεις με την ίδια σταθερά χρόνου ώστε να εξασφαλισθεί ικανοποιητική στατιστική. Η συγκέντρωση του ουρανίου στα δείγματα ήταν, όπως ανεμένετο για χερσαίους ασβεστίτες, πολύ μικρή. (βλ. Πίνακα 2). Η τιμή της υπεισέρχεται ως παράμετρος στον υπολογισμό της εσωτερικής δόσης.

Η συνεισφορά στη δόση από τα ραδιενεργά ισότοπα των στοιχείων Th, K, Rb και C θεωρείται αμελητέα για τα υλικά που μελετήθηκαν, λόγω της ελάχιστης συγκέντρωσης των ιχνοστοιχείων αυτών σε χερσαίους ασβεστίτες (Grün et al., 1988, Grün, 1989). Η υγρασία των δειγμάτων υπολογίστηκε σε ποσοτό επί τοις εκατό κατά βάρος και η τιμή της υπεισέρχεται ως παράμετρος στον προσδιορισμό της εσωτερικής δόσης.

Η λεπτομερής μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό της DR περιγράφεται από τους Hennig & Grün (1983) και Grün (1989) οι δε τιμές σταθερών παραμέτρων δίνονται από τους ανωτέρω και επί πλέον από τους Prescott & Stephan (1982), Mejdahl (1983), Aitken (1985) και Nambi & Aitken (1986). Στον Πίνακα 2, εκτός από τα αποτελέσματα των χρονολογήσεων, δίνονται και τα αποτελέσματα των μετρήσεων και αναλύσεων μαζί με τα αντίστοιχα σφάλματα. Από το χρονικό εύρος των διδόμενων ηλικιών προκύπτει ότι το ολικό σφάλμα χρονολόγησης είναι σήμερα της τάξεως του ±25%.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΧΡΟΝΟΛΟΓΗΣΕΩΝ ΕΠΙΦΛΟΙΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ESR

Δείγμα	DR26a	BT4a	BT4γ
AD (Gy)	77.5±8%	36.0±8%	39.5±8%
Περιεκτικότητα σε U (ppm)	0.09±5%	0.14±5%	0.21±5%
Υγρασία κ.β. (%)	12	15	15
Εσωτερική DR (mGy/a)	0.064±10%	0.095±10%	0.143±10%
Εξωτερική DR (mGy/a)	0.621±15%	0.670±15%	0.658±15%
Ηλικία (Ka)	+30 113 -23	+12 47 - 9	+13 49 - 9
Ηλικία μετά τον συνυπολογισμό της θερμικής αστάθειας της παγίδας g=2.0007 (Ka)	+30 124 -23	+12 49 -9	+13 51 -9

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στην εργασία αυτή δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στη φασματοσκοπική μελέτη με ESR των υλικών ρηγμάτων και στη διερεύνηση της καταλληλότητας για χρονολογικές μελέτες ορισμένων κορυφών του φάσματος που οφείλονται σε απορρόφηση φυσικών ραδιενεργών ακτινοβολιών. Η ουστηματική προσέγγιση των παραγόντων που είναι αποφασιστικοί στον ακριβή υπολογισμό της ετήσιας δόσης και επομένως και της ηλικίας καθώς και ο ρόλος του παλαιοπεριβάλλοντος αποτελούν αντικείμενα τρέχουσας μελέτης της ομάδας και θα είναι το θέμα μιας μελλοντικής εργασίας. Οι ηλικίες που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 απλώς υποδηλώνουν τη δυνατότητα που υπάρχει σήμερα να χρονολογηθούν οι τεταρτογενείς ανθρακικοί σχηματισμοί που δημιουργούνται σε ρηξιγενείς επιφάνειες πετρωμάτων. Η ακρίβεια των σχετικών υπολογισμών επιδέχεται σημαντικές βελτιώσεις.

Ιδιαίτερη σημασία στην ερμηνεία των χρονολογικών αποτελεσμάτων έχει η δειγματοληψία υπαίθρου και η προσεκτική παρατήρηση της θέσης του ή των επιφλοιωμάτων σε σχέση με τα τεκτονικά τεμάχη και του τεκτονικού μικρολατυποπαγούς, εάν αυτό υπάρχει.

Είναι ευνόητο ότι η χρονολόγηση των ασβεστιτικών επιφλοιωμάτων μιας κατοπτρικής επιφάνειας δεν σημαίνει ταυτόχρονα και προσδιορισμό της ηλικίας γένεσης του αντίστοιχου ρήγματος. Αξίζει να επισημανθεί όμως ότι αυτά τα ανθρακικής συστάσεως επιφλοιώματα συναντώνται συνηθέστατα στο υπαίθρο ακόμη και εάν η διάρρηξη έχει συμβεί σε μη ανθρακικούς σχηματισμούς (π.χ. φλύσχη, περιδοτίτες κλπ), γεγονός που παρέχει την δυνατότητα ευρύτερης εφαρμογής τέτοιων χρονολογικών μελετών σε διάφορα γεωγραφικά και γεωλογικά περιβάλλοντα.

Σαν παράδειγμα οναφέρεται η περίπτωση πληρώματος του οποίου η συνάφεια με τα τεμάχη του ρήγματος δεν έχει διαταραχθεί. Χρονολογήσεις σε τέτοια πληρώματα παρέχουν πληροφορίες για τα κάτω όρια του χρονικού διαστήματος κατά το οποίο το αντίστοιχο ρήγμα δεν έχει επαναδραστηριοποιηθεί.

Ενδιαφέρουσα επίσης είναι η περίπτωση κατά την οποία τα πληρώματα εμφανίζουν γραμμές προστριβής διαφορετικών διευθύνσεων οπουτωπμένες σε αλεπάλληλες στοιβάδες. (Παυλίδης & Μουντράκης, 1986). Οι χρονολογήσεις τέτοιων στοιβάδων συνεισφέρουν προς την κατανόηση των ενεργοποιήσεων των ρηγμάτων συναρτήσει του χρόνου.

Τα πολύστοιβα επιφλοιώματα μπορεί να οφείλονται είτε σε χρονολογικά διαφοροποιημένες φάσεις σχηματισμού ασβεσίτη, είτε σε επιμέρους μορφολογικά διάκριτες μικροφάσεις που ανήκουν σε μία ενιαία απόθεση. Για όλες τις περιπτώσεις η χρονολόγηση των διαφόρων στοιβάδων συνεισφέρει στην κατανόηση του τρόπου απόθεσης των επιφλοιωμάτων. Στην περίπτωση του Σχ. 1, η χρονολόγηση της 1ης και της 3ης στοιβάδας του επιφλοιώματος υποδηλώνει ότι αυτά αποτελούν επιμέρους φάσεις της ίδιας απόθεσης με μια διαφορά ηλικιών που εμπίπτουν στο

όριο του σφάλματος της μεθόδου.

Από τη μέχρι τώρα μελέτη φασμάτων ESR αλεπάλληλων επιφλοιωμάτων, φαίνεται ότι ασβεστιτικές στοιβάδες που αποτέθηκαν με χρονική διαφορά μικρότερη από 2-3.000 χρόνια είναι δύσκολο να διαχωρισθούν χρονικά σαν διαφοροποιημένα ιζηματογενή συμβάντα.

Παρά το γεγονός ότι το χρονολογικό όριο της τεχνικής ESR για σπηλαιοαποθέματα φθάνει μέχρι 10^6 χρόνια, εξαρτώμενο μεταξύ άλλων και από την παλαιοθερμοκρασία (Henning & Grun, 1983), εντούτοις ηλικίες νεοτεκτονικών δομών ανώτερες των 500.000 ετών πρέπει να γίνονται δεκτές με επιφύλαξη, αφού πρώτα ελεγχθούν με στρωματογραφικά κριτήρια και διασταυρωθούν, εάν είναι δυνατό, με χρονολογικά δεδομένα από άλλες ανεξάρτητες χρονολογικές τεχνικές.

Ανεξάρτητες προσπάθειες για χρονολογήσεις χαλαζία ρηγμάτων με σκοπό τον προσδιορισμό της τελευταίας κίνησης σε ρηξιγενείς ζώνες έχουν γίνει από τους Ikeya et al. (1982), Fukuchi (1988) κ.ό. με την τεχνική ESR. Παρά την πολυπλοκότητα του φάσματος που δίνει ο χαλαζίας και τις ειδικές συνθήκες φασματοσκοπίας που απαιτούνται για τη μελέτη του, η χρονολόγηση χαλαζία μπορεί επιπλέον να προσφέρει σημαντικές πληροφορίες για τη γένεση του ρήγματος, δεδομένου ότι τα χρονολογούμενα σήματα που εμφανίζονται στα φάσματα του υλικού αυτού έχουν πολύ μεγαλύτερη θερμική σταθερότητα και συνεπώς μεγαλύτερη μικροβιότητα απ'ότι τα αντίστοιχα σήματα του ασβεστίτη. Ερωτηματικό δημιουργούνται μόνο ως προς την ευρύτητα εφαρμογής της μεθόδου αυτής επειδή σε λίγα οχετικά ρήματα ο χαλαζίας δημιουργεί νεοτεκτονικές δομές, ιδιαίτερα σε χώρες που επικρατεί η αλπικού τύπου Γεωλογία και οι ανθρακικοί οχηματισμοί, όπως είναι η Ελλάδα.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η δυνατότητα χρονολόγησης ασβεστιτικών αποφλοιωμάτων που εμφανίζονται σε κατοπτρικές και άλλες ρηξιγενείς επιφάνειες αποδεικνύεται για πρώτη φορά με την εργασία αυτή. Τα υλικά αυτά αποτελούν ίσως τις περισσότερες κοινές νεοτεκτονικές δομές και σχετίζονται με κινήσεις τεμαχών κατά το Τεταρτογενές. Εμφανίζονται ακόμη και σε ζώνες διαρρήξεων μη ανθρακικών οχηματισμών.

- Στα φάσματα ESR των παραπάνω επιφλοιωμάτων εμφανίζονται κορυφές οφειλόμενες σε απορρόφηση ακτινοβολιών, οι οποίες, επειδή αυξάνονται αναλογικά με το χρόνο μπορούν να δώσουν πληροφορίες σχετικά με την ηλικία οχηματισμού τους.

- Τα φάσματα ESR των επιφλοιωμάτων εμφανίζουν τις ίδιες χρονολογούμενες κορυφές με τα ανθρακικά σπηλαιοαποθέματα και τους τραβερτίνες, υλικά τα οποία έχουν μελετηθεί περισσότερο για χρονολόγηση με την τεχνική ESR. Η ομοιότητα των φασμάτων πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι τα επιφλοιώματα και τα σπηλαιοαποθέματα οχηματίζονται υπό παρεμφερείς συνθήκες ιζηματογένεσης. Ωστόσο, κατά τους

υπολογισμούς της ετήσιας ροδιενεργού δόσης στα επιφλοιώματα είναι πιθανό να εισάγονται περισσότερα σφάλματα απ'ότι στα σπηλαιοαποθέματα, όπου τα παλαιοπεριβάλλον είναι περισσότερο ομοιογενές. Το γεγονός αυτό αλλά και η ενολλαγή της μικροτοπικής γεωμετρίας σε κάθε σημείο μιας ρηξιγενούς επιφάνειας ασυνέχειας επιβάλλουν την ανάγκη μελέτης ικανοποιητικού αριθμού δειγμάτων από κάθε ρήγμα σε περιπτώσεις πρακτικών εφαρμογών της τεχνικής.

- Διαπιστώθηκε σημαντική ομοιότητα των φασμάτων ESR μεταξύ μεταμορφωμένων αβεστολίθων (μαρμάρων) και τεκτονικών λατυποπαγών τα οποία προέρχονται από διαφορετικές περιοχές.

- Η χρονολόγηση αβεστίτη ρηγμάτων με ESR μπορεί να αξιοποιηθεί πλήρως μόνο αν συνδυαστεί με εφαρμοσμένες γεωλογικές και τεκτονικές έρευνες. Τέτοιες μελέτες μπορούν να είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στην Τεχνική Γεωλογία και να προσφέρουν ουσιαστική βοήθεια στην προσπάθεια για τη σεισμική θωράκιση της Χώρας.

Βιβλιογραφία

- Aitken, M.J., (1985), "Thermoluminescence dating", Academic Press, London, 1-359.
- Aitken, M.J., (1990), "Science-based dating in Archaeology", Longman, London, 1-274.
- Ambraseys, N.N., (1978), "Middle East - A reappraisal of the seismicity", Q.J. Engin. Geol., 11:19-32.
- Fukuchi, T., (1988), "Applicability of ESR dating using multiple centers to fault movement.- A case of the Itoiyawa-Shizouka tectonic line, a major fault in Japan", Quat. Sci. Rev., 7:509-514.
- Grün, R., (1985), "Beitrage zur ESR-Datierung", Sonderveröffentlichungen des Geol. Inst. der Univ. zu Köln, 59:1-157.
- Grün, R., (1989), "Die ESR-Altersbestimmungsmethode". Hochschultext Springer-Verlag, Heidelberg, 1-130.
- Grün, R., Schwarcz, H., Ford, D.C., Hentzsch, B., (1988) "ESR dating of spring deposited travertines", Quat. Sci. Rev., 7:429-432.
- Hennig, G.J., Grün, R., (1983), "ESR dating in Quaternary Geology", Quat. Sci. Rev., 2:157-238.

- Ikeya, M., (1975), "Dating a stalactite by electron paramagnetic resonance", *Nature*, 255:48-50.
- Ikeya, M., (1978), "Electron spin resonance as a method of dating", *Archaeometry*, 20:147-158.
- Ikeya, M., Miki, T., Tanaka, K., (1982), "Dating of fault by electron spin resonance on intrafault materials", *Science*, 215:1392-1393.
- Liritzis, Y., Maniatis, Y., (1989), "ESR experiments on Quaternary calcites and bones for dating purposes", *J. of Radioan. and Nucl. Chemistry*, 129/1:3-21.
- Maniatis, Y., Mandi, V., Nikolaou, A., (1988), "Provenance investigation of marbles from Delphi with ESR spectroscopy", In: Herz, N. and Waelkens, M. (eds.), *Classical Marble: Geochemistry, Technology, Trade* (Lucca, Italy) NATO ASI Series, 153:443-452.
- Mattauer, M., (1973), "Les deformations des materiaux de l'écorce terrestre", Hermann, Paris, 1-493.
- Mejdahl, V., (1983), "Feldspar inclusion dating of ceramics and burnt stones", *PACT*, 9:351-364.
- Μπασιλάκος, Ι.Ε., (1983), "Η χρήση των Τροχικών Σχάσεων (Fission Tracks) στην έρευνα ουρανίου", *ΕΕΑΕ, DEMO* 83/16G:1-39.
- Nambi, K.S.V., Aitken, M.J., (1986), "Annual dose conversion factors for TL and ESR dating". *Archaeometry*, 28:202-205.
- Παυλίδης, Σ., Μουντράκης, Δ., (1986), "Νεοτεκτονική", *Θεσσαλονίκη*, 1-135.
- Prescott, J.R., Stephan, L.G., (1982), "The contribution of cosmic radiation to the environmental dose for thermoluminescence dating.-Latitude, altitude and depth dependencies". *PACT*, 6:17-25.
- Slichter, C.P., (1980), "Principles of magnetic resonance", Springer-Verlag, Series in Solid State Science 1, New York, 1-397.
- Wagner, G.A., (1973), "Die Anwendung anätzbarer Partikelspuren zur geochemischen Analyse". *Fortschr. Min.* 51: 68-93.
- Zeller, E.J., Levy, P.W., Mattern, P.L., (1967), "Geologic dating by electron spin resonance". *Symp. on Radioact. Dating and Low Level Counting*, (I.A.E.A., Wien), *Proceedings*: 531-540.