

ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑ, ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΓΡΑΝΙΤΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Καραβασίλη Ε.¹, Χριστοφίδης Γ.¹, Παπαστεφάνου Κ.², Κορωνάιος Α.¹ και Στούλος Σ.²

¹ Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ. 541 24 Θεσσαλονίκη, ekaravas@geo.auth.gr, christof@geo.auth.gr, koroneos@geo.auth.gr.

² Εργαστήριο Ατομικής και Πυρηνικής Φυσικής, Τομέας Πυρηνικής Φυσικής και Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων, Τμήμα Φυσικής, Α.Π.Θ. 541 24 Θεσσαλονίκη, cpapaste@auth.gr, stoulos@auth.gr.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Εξετάστηκαν 29 δείγματα γρανιτικών πετρωμάτων (με την έννοια του εμπορικού όρου) από διάφορες περιοχές της Βορείου Ελλάδος ως προς την ορυκτολογία, την πετρογραφία και τις στάθμες της ραδιενέργειας που εκπέμπουν. Μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις των ραδιενεργών στοιχείων ⁴⁰K, ²²⁶Ra και ²³²Th στα πετρώματα αυτά με τη φασματοσκοπία ακτίνων – γ και στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι τιμές της απορροφούμενης δόσης (D_a) (4,69 - 250,98 nGy h⁻¹), της ετήσιας ισοδύναμης δόσης (H_E) (0,02 – 1,23 mSv y⁻¹) και του δείκτη ενεργότητας (AI) (0,03 – 1,47 Bq kg⁻¹) με βάση το πρότυπο μοντέλο δωματίου, σύμφωνα με το οποίο ένας άνθρωπος διαμένει σε κατοικία χτισμένη από ένα υλικό που έχει συγκεκριμένες συγκεντρώσεις ⁴⁰K, ²²⁶Ra και ²³²Th (ειδικές ενεργότητες). Το σχήμα της κατοικίας είναι ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο με διαστάσεις 3 × 3 × 3 m³ με απείρως λεπτούς τοίχους, χωρίς πόρτες και παράθυρα. Μερικές τιμές οι οποίες είναι απαγορευτικές με το παραπάνω μοντέλο δωματίου, με ένα νεώτερο πιο ρεαλιστικό μοντέλο δωματίου το οποίο λαμβάνει υπόψη του όλα τα υλικά κατασκευής και στο οποίο ο γρανίτης χρησιμοποιείται μόνο για επίστρωση δαπέδου, είναι κάτω των ανώτατων επιτρεπόμενων ορίων και συνεπώς οι γρανίτες αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δομικά υλικά. Έγινε προσπάθεια για ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την έρευνα αυτή και στη συνέχεια έγινε σύγκριση των τιμών ραδιενέργειας (της απορροφούμενης δόσης, της ετήσιας ισοδύναμης δόσης και του δείκτη ενεργότητας) με εκείνες των εισαγόμενων γρανιτών του ελληνικού εμπορίου. Από τη σύγκριση αυτή προέκυψε ότι οι ελληνικοί γρανίτες έχουν γενικά μικρότερες στάθμες ραδιενέργειας από τους εισαγόμενους και θα μπορούσαν συνεπώς να χρησιμοποιηθούν παράλληλα με αυτούς.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη χώρα μας όπως και σε όλο τον κόσμο αυξάνεται συνεχώς η χρήση των γρανιτικών πετρωμάτων ως δομικών υλικών. Ο εμπορικός όρος γρανίτης περιλαμβάνει μια σειρά από όξινα έως ενδιάμεσα και βασικά πλουτωνικά πετρώματα, όπως είναι οι γρανίτες, οι γρανοδιορίτες, οι μονζονίτες, οι διορίτες, οι γάββροι, οι συηνίτες κ.ά. Η ποικιλία των χρωμάτων που έχουν, καθώς επίσης και η ανθεκτικότητά τους στη θέρμανση και στη θραύση τα κάνει ιδανικά για χρήση σε επιφάνειες, δάπεδα και σε επενδύσεις εσωτερικών και εξωτερικών χώρων.

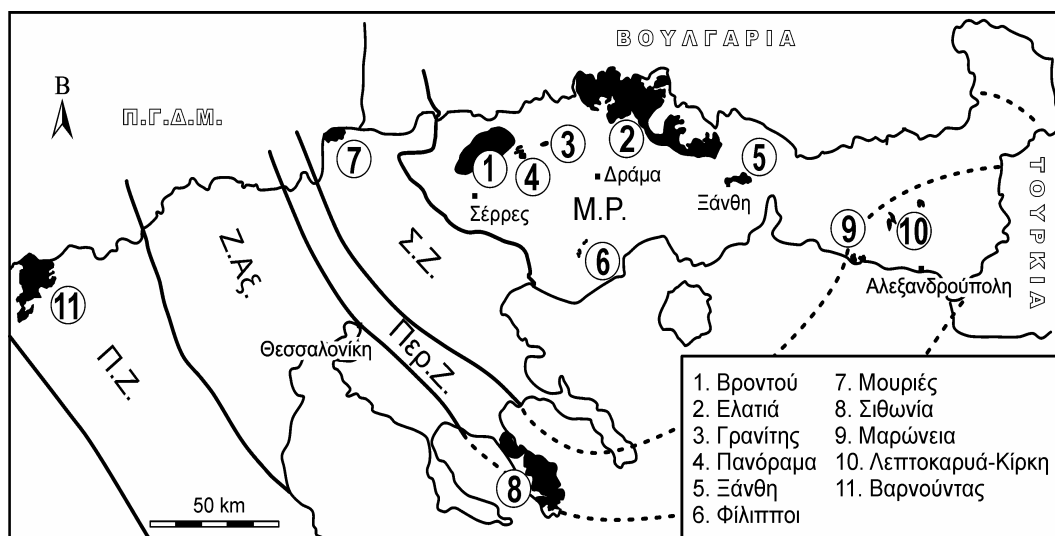
Παρά τη συχνή εμφάνιση και την ποικιλία τους όμως, στη χώρα μας η εξόρυξη γρανιτών για εμπορική χρήση είναι περιορισμένη έως ανύπαρκτη και οι ανάγκες στα συγκεκριμένα πετρώματα καλύπτονται με εισαγωγές από χώρες του εξωτερικού (Παυλίδου 2002).

Στην παρούσα εργασία μελετάται η ορυκτολογία, η πετρογραφία και η ραδιενέργεια των ελληνικών γρανιτικών πετρωμάτων και συγκρίνονται τα αποτελέσματα με εκείνα των εισαγόμενων γρανιτών. Η σύγκριση έχει στόχο τη διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης των πρώτων με ασφαλή επίπεδα ραδιενέργειας για το περιβάλλον και τον άνθρωπο-τουλάχιστον όσον αφορά την έκθεση στην

ακτινοβολία από φυσικές πηγές. Μια τέτοια σύγκριση μπορεί να δείξει αν οι ελληνικοί γρανίτες που μελετώνται μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δομικά υλικά.

2 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑ - ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΑ

Οι γρανίτες (με την εμπορική έννοια) που μελετήθηκαν σ' αυτή την εργασία προέρχονται από πλουτωνικά σώματα των γεωτεκτονικών ζωνών Ροδόπης, Σερβομακεδονικής, Περιροδοπικής και Πελαγονικής στη Β. Ελλάδα. Οι πλουτωνίτες από τους οποίους προέρχονται τα δείγματα είναι: Βαρνούντας Φλώρινας, Σιθωνία Χαλκιδικής, Μουριές Κιλκίς, Βροντού Σερρών, Πανόραμα, Γρανίτης και Ελατιά Δράμας, Φίλιπποι Καβάλας, Ξάνθη, Μαρώνεια και Λεπτοκαρυά Έβρου (Σχ. 1).



Σχήμα 1. Πλουτωνικά σώματα από τα οποία προέρχονται τα εξεταζόμενα δείγματα. (Π.Ζ. = Πελαγονική Ζώνη, Ζ.Α.Σ. = Ζώνη Αξιού, Περ.Ζ. = Περιροδοπική Ζώνη, Σ.Ζ. = Σερβομακεδονική Ζώνη, Μ.Ρ. = Μάζα Ροδόπης).

Οι πετρογραφικοί τύποι των δειγμάτων κυμαίνονται από αλκαλιγρανίτες, γρανίτες και γρανοδιοριίτες έως μονζονίτες και γάββρους. Η πετρογραφική ταξινόμηση έγινε με βάση το τρίγωνο QAP (I.U.G.S. 1973). Η γεωτεκτονική ζώνη στην οποία ανήκουν τα εξετασθέντα δείγματα, η περιοχή προέλευσής τους, ο πετρογραφικός τους τύπος, καθώς και η ορυκτολογία τους δίνονται στους πίνακες 1 και 2.

3 ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ

3.1 Εισαγωγή

Σύμφωνα με τον Heinrich (1958), τα ορυκτά που κυρίως ευθύνονται για τη ραδιενέργεια των όξινων και βασικών πετρωμάτων είναι το ζιρκόνιο, ο αλλανίτης που εξαιτίας της ραδιενέργειας εμφανίζεται με διαφορετικές μορφές, το ξενότιμο, ο μοναζίτης, ο τιτανίτης και ο απατίτης. Επίσης, εξαιρετικά ραδιενεργά αλλά σπάνια είναι τα ορυκτά ουραanioθορίτης, θοριανίτης, ευξενίτης, φθορίτης, θορίτης, πυρόχλωρο, σεβκινίτης, μπαστναεζίτης και νταβιδίτης. Εκτός από τα παραπάνω ορυκτά, στη ραδιενέργεια των πετρωμάτων είναι δυνατό να συνεισφέρουν και ορισμένα μεταλλικά ορυκτά όπως ο ιλμενίτης, ο σιδηροπυρίτης, ο αιματίτης, το ρουτίλιο και ο κολουμπίτης.

Τα στοιχεία ^{238}U (με τη μορφή U^{4+}), ^{40}K (με τη μορφή K^+) και ^{232}Th (με τη μορφή Th^{4+}), που είναι κυρίως υπεύθυνα για τη ραδιενεργό φύση των παραπάνω ορυκτών, είτε αποτελούν κύρια συστατικά τους, είτε αντικαθιστούν κάποια άλλα ιόντα μπαίνοντας έτσι στη δομή τους. Συγκεκριμένα, το U^{4+}

μπορεί να αντικαταστήσει το Zr^{4+} , το Th^{4+} , το Ca^{2+} , το Fe^{2+} και τις σπάνιες γαίες και μπαίνει στη δομή των οξειδίων και των ανυδρών φωσφορικών και πυριτικών ενώσεων. Το K^+ αποτελεί κύριο στοιχείο των καλιούχων αστρίων, των μαρμαρυγιών και βρίσκεται συχνά στις αμφιβόλους, γι' αυτό και συναντάται σε σημαντικές ποσότητες στα πυριγενή πετρώματα. Τέλος το Th^{4+} εκτός από το ότι αποτελεί κύριο στοιχείο κάποιων ορυκτών (μοναζίτης, θορίτης, θοριανίτης, ουρανοθορίτης), μπορεί να αντικαταστήσει το Zr^{4+} , το Ce^{4+} και άλλες σπάνιες γαίες και να συμμετάσχει έτσι στη δομή και άλλων ορυκτών. Συχνά, αντί του ^{238}U χρησιμοποιείται το ^{226}Ra το οποίο είναι προϊόν διάσπασης του πρώτου.

Πίνακας 1. Γεωτεκτονική ζώνη, περιοχή προέλευσης και πετρογραφικός τύπος των εξετασθέντων δειγμάτων

| ΔΕΙΓΜΑ | ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΖΩΝΗ | ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ | ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ |
|---------|-------------------|----------------------------------|--|
| B 7 | ΡΟΔΟΠΗ | ¹ ΒΡΟΝΤΟΥ | Γρανίτης |
| L 4 | | | Κεροσιλβικός γρανίτης |
| TS 10 | | | Κεροσιλβικός γρανίτης |
| SB 50 | | | Κεροσιλβικός γρανίτης |
| SB 36 | | | Κεροσιλβικός συνηίτης |
| SB 41 | | | Κεροσιλβικός χαλαζιακός μονζονίτης |
| SB 55 | | | Γάββρος |
| H 9 | | | ² ΕΛΑΤΙΑ |
| A 13 | | Γρανίτης | |
| D 15 | | Γρανίτης | |
| D 5 | | Βιοιτικός γρανοδιορίτης | |
| D 8b | | Βιοιτικός τοναλίτης | |
| DSK 17 | | Βιοιτικός τοναλίτης | |
| G 2 | | ³ ΓΡΑΝΙΤΗΣ | Γρανίτης |
| G 6 | | | Κεροσιλβικός – βιοιτικός γρανίτης |
| PR 27 | | ⁴ ΠΑΝΟΡΑΜΑ | Γρανίτης |
| P 6 | | | Χαλαζιακός μονζονίτης |
| MZ 500 | | ⁵ ΞΑΝΘΗ | Βιοιτικός – πυροξενικός χαλαζιακός μονζοδιορίτης |
| NG 5 | | | Γάββρος |
| YD 12 | | ⁶ ΦΙΛΙΠΠΟΙ | Βιοιτικός – κεροσιλβικός χαλαζιακός μονζοδιορίτης |
| MP 501 | ΣΕΡΒΟΜΑΚΕΔΟΝΙΚΗ | ⁷ ΜΟΥΡΙΕΣ | Βιοιτικός γρανίτης |
| STH 13 | ΠΕΡΙΟΔΟΠΙΚΗ | ⁸ ΣΙΘΩΝΙΑ | Λευκογρανίτης |
| STH 6 | | | Γρανίτης |
| STH 5 | | | Γρανοδιορίτης |
| STH 118 | | | Βιοιτικός γρανοδιορίτης |
| STH 450 | | | Κεροσιλβικός – βιοιτικός γρανοδιορίτης |
| MR 11 | | ⁹ ΜΑΡΩΝΕΙΑ | Κεροσιλβικός – βιοιτικός – πυροξενικός μονζονίτης |
| L 23a | | ¹⁰ ΛΕΠΤΟΚΑΡΥΑ - ΚΙΡΚΗ | Βιοιτικός – πυροξενικός – κεροσιλβικός χαλαζιακός μονζονίτης |
| KR 9 | ΠΕΛΑΓΟΝΙΚΗ | ¹¹ ΒΑΡΝΟΥΝΤΑΣ | Κεροσιλβικός – βιοιτικός χαλαζιακός μονζονίτης |

Τα δεδομένα του πίνακα είναι από τους: ^{1,3}Σολδάτος (προσωπική επικοινωνία), ²Σολδάτος (1985), ⁴Νταγκουνάκη (2000), ^{5,7,8}Χριστοφίδης (προσωπική επικοινωνία), ⁶Μαλέα (1993), ⁹Παπαδοπούλου (2003), ¹⁰Ελευθεριάδης (προσωπική επικοινωνία), ¹¹Κορωναίος (1991).

Οι συγκεντρώσεις του ^{40}K , του ^{226}Ra και του ^{232}Th των εξετασθέντων δειγμάτων μετρήθηκαν με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας ακτίνων – γ. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον πίνακα 3.

3.2 Βασικές έννοιες ραδιενέργειας

Η ραδιενέργεια των ραδιενεργών ισοτόπων δια της εκπομπής της α - , β - και γ - ακτινοβολίας μετρείται σε Becquerel (Bq) και αντιστοιχεί στη διάσπαση ενός ραδιενεργού πυρήνα ανά δευτερόλεπτο.

Πίνακας 2. Ορυκτολογική σύσταση των εξετασθέντων δειγμάτων. (Qtz: Χαλαζίας, Kfs: Καλιούχοι άστριοι, Pl: πλαγιόκλαστα, Hbl: Κερροσίλβη, Bt: Βιοτίτης, Ms: Μοσχοβίτης, Px: Πυρόξενοι, Ol: Ολιβίνης)

| ΔΕΙΓΜΑ | Qtz | Kfs | Pl | Hbl | Bt | Ms | Px | Ol | ΛΟΙΠΑ | ΣΥΝΟΛΟ |
|---------|------|------|------|------|------|-----|------|-----|-------|--------|
| B 7 | 23,7 | 29,9 | 35,4 | 3,8 | 4,8 | - | - | - | 2,4 | 100,0 |
| L 4 | 21,1 | 25,5 | 36,5 | 9,7 | 4,9 | - | - | - | 2,3 | 100,0 |
| TS 10 | 16,4 | 47,0 | 16,2 | 16,4 | 0,1 | - | - | - | 3,9 | 100,0 |
| SB 50 | 23,7 | 23,1 | 41,9 | 7,1 | 2,1 | - | - | - | 2,1 | 100,0 |
| SB 36 | 1,1 | 59,9 | 23,5 | 14,0 | - | - | - | - | 1,5 | 100,0 |
| SB 41 | 14,8 | 39,9 | 34,8 | 6,1 | 1,6 | - | - | - | 2,8 | 100,0 |
| SB 55 | - | - | 36,3 | - | - | - | 62,0 | 1,6 | 0,1 | 100,0 |
| H 9 | 24,0 | 66,0 | 6,7 | - | 3,3 | - | - | - | - | 100,0 |
| A 13 | 28,7 | 24,7 | 37,0 | - | - | 3,0 | - | - | 6,7 | 100,0 |
| D 15 | 26,2 | 35,6 | 32,2 | - | 2,0 | 1,2 | - | - | 1,4 | 100,0 |
| D 5 | 18,4 | 12,0 | 49,6 | 3,8 | 14,4 | - | - | - | 1,8 | 100,0 |
| D 8b | 16,4 | 0,8 | 60,4 | - | 15,6 | - | - | - | 5,8 | 100,0 |
| DSK 17 | 18,8 | - | 56,5 | 0,2 | 22,0 | - | - | - | 2,6 | 100,0 |
| G 2 | 34,8 | 44,7 | 18,1 | - | 2,0 | - | - | - | 0,4 | 100,0 |
| G 6 | 20,3 | 22,8 | 36,8 | 8,1 | 9,1 | - | - | - | 2,9 | 100,0 |
| PR 27 | 23,0 | 26,8 | 42,9 | 3,3 | 1,8 | - | - | - | 2,2 | 100,0 |
| P 6 | 11,4 | 36,3 | 45,4 | 4,5 | - | - | - | - | 2,4 | 100,0 |
| MZ 500 | 6,6 | 12,8 | 47,3 | 2,1 | 11,0 | - | 15,8 | - | 4,4 | 100,0 |
| NG 5 | - | 0,8 | 65,9 | - | 3,5 | - | 17,3 | 6,5 | 6,0 | 100,0 |
| YD 12 | 11,2 | 22,3 | 45,5 | 8,8 | 7,8 | - | - | - | 4,3 | 100,0 |
| MP 501 | 37,5 | 45,9 | 8,5 | - | 5,5 | 1,7 | - | - | 0,9 | 100,0 |
| STH 13 | 30,4 | 23,8 | 41,4 | - | 2,3 | 1,3 | - | - | 0,8 | 100,0 |
| STH 6 | 34,5 | 31,0 | 30,6 | - | 2,8 | 0,6 | - | - | 0,5 | 100,0 |
| STH 5 | 44,0 | 14,7 | 34,1 | - | 3,9 | 3,1 | - | - | 0,2 | 100,0 |
| STH 118 | 38,0 | 7,1 | 45,6 | - | 9,0 | - | - | - | 0,3 | 100,0 |
| STH 450 | 30,0 | 12,2 | 35,5 | 6,7 | 11,3 | - | - | - | 4,3 | 100,0 |
| MR 11 | 0,6 | 16,2 | 24,2 | 10,5 | 18,1 | - | 30,0 | - | 0,4 | 100,0 |
| L 23a | 10,3 | 27,3 | 38,0 | 9,6 | 5,5 | - | 6,1 | - | 3,2 | 100,0 |
| KR 9 | 10,6 | 29,0 | 33,9 | 11,0 | 12,4 | - | - | - | 3,1 | 100,0 |

Απορροφούμενη δόση D_a (absorbed dose) είναι η ενέργεια της ακτινοβολίας που απορροφάται από κάθε μονάδα μάζας ιστού, η δε μονάδα μέτρησής της είναι το Gray (Gy) και ισχύει ότι $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$ ιστού.

Η επίδραση που έχει η απορροφούμενη δόση στον ιστό από τον οποίο απορροφάται εξαρτάται από το είδος της ακτινοβολίας και εκφράζεται με την ετήσια ισοδύναμη δόση, H_E (effective dose).

Αυτή προκύπτει από την απορροφούμενη δόση πολλαπλασιαζόμενη με έναν παράγοντα (RBE = Relative Biological Effectiveness = Σχετική Βιολογική Δραστητικότητα) που είναι διαφορετικός για το κάθε είδος ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα για την α - ακτινοβολία ο παράγοντας αυτός είναι ίσος με 20, ενώ για την γ - ακτινοβολία είναι ίσος με τη μονάδα. Ως εκ τούτου, η ισοδύναμη δόση εκφράζει τις βιολογικές συνέπειες των ακτινοβολιών στον ανθρώπινο οργανισμό.

Η ισοδύναμη δόση μετριέται σε Sievert (Sv) και η μετατροπή της απορροφούμενης δόσης σε ισοδύναμη δόση γίνεται σύμφωνα με τη σχέση $1 \text{ Gy} = 0,7 \text{ Sv}$. Ο συντελεστής μετατροπής F είναι ίσος με $0,7 \text{ Sv Gy}^{-1}$ (UNSCEAR 1993).

3.3 Υπολογισμός απορροφούμενης δόσης (D_a), ετήσιας ισοδύναμης δόσης (H_E) και δείκτη ενεργότητας (AI)

Για τον υπολογισμό της απορροφούμενης δόσης από γρανιτικά πετρώματα χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο μοντέλο δωματίου (standard room model) που έχει ορίσει η Διεθνής Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (UNSCEAR 1993). Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο ένας άνθρωπος διαμένει σε κατοικία χτισμένη από ένα υλικό που έχει συγκεκριμένες συγκεντρώσεις ^{40}K , ^{226}Ra και ^{232}Th (ειδικές ενεργότητες). Η κατοικία έχει σχήμα ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου με διαστάσεις $3 \times 3 \times 3 \text{ m}^3$ με απείρως λεπτούς τοίχους, χωρίς πόρτες και παράθυρα.

Ο ρυθμός απορροφούμενης δόσης D_a (nGy h^{-1}) της γ - ακτινοβολίας δίνεται από τη σχέση (1) (UNSCEAR 1993):

$$D_a = \alpha_1 C_{K}^{40} + \alpha_2 C_{Ra}^{226} + \alpha_3 C_{Th}^{232}, \quad (1)$$

όπου:

- C_{K}^{40} = η ειδική ενεργότητα του ^{40}K (Bq kg^{-1})
- C_{Ra}^{226} = η ειδική ενεργότητα του ^{226}Ra (Bq kg^{-1})
- C_{Th}^{232} = η ειδική ενεργότητα του ^{232}Th (Bq kg^{-1})
- $\alpha_1 = 0,0417 \text{ nGy h}^{-1} / \text{Bq kg}^{-1}$
- $\alpha_2 = 0,462 \text{ nGy h}^{-1} / \text{Bq kg}^{-1}$
- $\alpha_3 = 0,604 \text{ nGy h}^{-1} / \text{Bq kg}^{-1}$

Ο ρυθμός απορροφούμενης δόσης D_a της ακτινοβολίας – γ που υπολογίζεται από τη σχέση (1) πρέπει σε κάθε περίπτωση να είναι μικρότερος ή ίσος των 80 nGy h^{-1} για να είναι επιτρεπτή η χρήση ενός οικοδομικού υλικού σε κατοικίες. Μέχρι και τη διπλάσια τιμή πάντως, δηλαδή 160 nGy h^{-1} ο ρυθμός απορροφούμενης δόσης D_a θεωρείται ανεκτός (UNSCEAR 2000).

Η ετήσια ισοδύναμη δόση H_E υπολογίζεται από τη σχέση (2) (UNSCEAR 1993).

$$H_E (\text{mSv y}^{-1}) = 10^6 D_a \text{TF} \quad (2)$$

όπου:

- D_a = ο ρυθμός απορροφούμενης δόσης ακτινοβολίας – γ (nGy h^{-1})
- T = ο χρόνος διαβίωσης ενός ατόμου σε εσωτερικούς χώρους ($T = 0,8 \times 24 \text{ h d}^{-1} \times 365 \text{ d y}^{-1} \approx 7000 \text{ h y}^{-1}$), όπου T είναι ο παράγοντας που δείχνει ότι ο άνθρωπος δαπανά 80 % του χρόνου της ζωής του σε εσωτερικούς χώρους (occupancy factor)
- F = ο συντελεστής μετατροπής ($F = 0,7 \text{ Sv Gy}^{-1}$)

Σύμφωνα με την κοινοτική οδηγία αρ. 112 (EC 1999) για ρυθμό απορροφούμενης δόσης ακτινοβολίας – γ, $D_a \leq 80 \text{ nGy h}^{-1}$, η σχέση (2) δίνει ετήσια ισοδύναμη δόση $H_E \approx 0,3 \text{ mSv y}^{-1}$, που είναι και η επιτρεπτή ετήσια ισοδύναμη δόση για κάθε ενήλικα άνθρωπο όταν διαβίει σε εσωτερικούς χώρους. Και εδώ μέχρι και για τη διπλάσια τιμή ($H_E = 0,6 \text{ mSv y}^{-1}$), η ετήσια ισοδύναμη δόση θεωρείται ανεκτή.

Η επίδραση της ραδιενέργειας στον ανθρώπινο οργανισμό εκφράζεται και με τον δείκτη ενεργότητας (Active Index, AI) που μετράται σε Bq kg^{-1} . Πολλές χώρες χρησιμοποιούν διαφορετικούς τύπους για τον υπολογισμό του δείκτη ενεργότητας ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των υλικών που διαθέτουν στην αγορά. Στην παρούσα εργασία ο δείκτης ενεργότητας των δειγμάτων δίνεται με βάση τον τύπο που καθιερώθηκε στην πρώην Σοβιετική Ένωση και στην πρώην Δυτική Γερμανία ($AI = C_{Ra} / 370 + C_{Th} / 260 + C_K / 4810$). Και εδώ χρησιμοποιείται το πρότυπο μοντέλο δωματίου. Για να είναι ασφαλές στη χρήση του ένα οικοδομικό υλικό από το οποίο κατασκευάζεται εξ ολοκλήρου ένα δωμάτιο, που έχει χαρακτηριστικά του πρότυπου μοντέλου, πρέπει ο δείκτης ενεργότητάς του να είναι μικρότερος ή το πολύ ίσος με τη μονάδα.

Οι τιμές της απορροφούμενης δόσης, της ετήσιας ισοδύναμης δόσης και του δείκτη ενεργότητας των εξετασθέντων δειγμάτων δίνονται στον πίνακα 3. Όπως φαίνεται από τον πίνακα 3, τα δείγματα SB 36, SB 41, TS 10, D 15, A 13, G 2, P 6 και MZ 500 έχουν απαγορευτικές τιμές απορροφούμενης δόσης ($D_a > 160 \text{ nGy h}^{-1}$) και ετήσιας ισοδύναμης δόσης ($H_E > 0,6 \text{ mSv y}^{-1}$). Τα δείγματα B 7, H 9, G 6 και MP 501 έχουν λίγο μικρότερες τιμές απορροφούμενης δόσης από το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο, ενώ η ετήσια ισοδύναμη δόση τους ξεπερνάει τα $0,6 \text{ mSv y}^{-1}$. Από τα υπόλοιπα δείγματα, οι γάββροι SB 55 και NG 5 έχουν πολύ μικρές τιμές D_a και H_E , ενώ επιτρεπτές είναι και οι τιμές των δειγμάτων YD 12, και STH 13. Σε όλα τα υπόλοιπα εξετασθέντα γρανιτικά πετρώματα οι τιμές απορροφούμενης και ετήσιας ισοδύναμης δόσης που μετρήθηκαν θεωρούνται ανεκτές.

Από τον ίδιο πίνακα είναι φανερό ότι έξι δείγματα, τα TS 10, G 2, A 13, SB 36, MZ 500 και P 6 έχουν δείκτη ενεργότητας πάνω από το επιτρεπόμενο όριο της μονάδας. Επίσης, άλλα επτά δείγματα (B 7, G 6, MP 501, D 15, H 9, MR 11, SB 41) παρουσιάζουν δείκτη ενεργότητας πάνω από $0,80 \text{ Bq kg}^{-1}$. Οι δύο γάββροι έχουν σχεδόν μηδενικούς δείκτες ενεργότητας, ενώ σχετικά μικρές τιμές υπολογίστηκαν για τους γρανοδιορίτες και τους τοναλίτες.

Πίνακας 3. Μονάδες ^{40}K , ^{226}Ra και ^{232}Th , απορροφούμενη δόση (D_a), ετήσια ισοδύναμη δόση (H_E) και δείκτης ενεργότητας (A_I) των εξετασθέντων δειγμάτων

| ΔΕΙΓΜΑ | ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ | ^{40}K | ^{226}Ra | ^{232}Th | D_a | H_E | A_I |
|---------|---|-----------------|-------------------|-------------------|--------|-------|-------|
| B 7 | Γρανίτης | 993 ± 13 | 88 ± 1 | 123 ± 2 | 156,36 | 0,77 | 0,92 |
| L 4 | Κεροσιλιβικός γρανίτης | 919 ± 12 | 54 ± 1 | 75 ± 1 | 108,57 | 0,53 | 0,63 |
| TS 10 | Κεροσιλιβικός γρανίτης | 1460 ± 16 | 90 ± 1 | 138 ± 2 | 185,81 | 0,91 | 1,08 |
| SB 50 | Κεροσιλιβικός γρανίτης | 717 ± 12 | 69 ± 1 | 70 ± 1 | 104,06 | 0,51 | 0,60 |
| SB 36 | Κεροσιλιβικός συηνίτης | 1466 ± 17 | 136 ± 1 | 152 ± 2 | 215,77 | 1,06 | 1,26 |
| SB 41 | Κεροσιλιβικός χαλαζιακός μονζονίτης | 1110 ± 14 | 109 ± 1 | 113 ± 2 | 164,90 | 0,81 | 0,96 |
| SB 55 | Γάββρος | 68 ± 4 | 1,4 ± 0,3 | 2 ± 0,3 | 4,69 | 0,02 | 0,03 |
| H 9 | Αλκαλιγρανίτης | 1111 ± 14 | 33 ± 1 | 124 ± 2 | 136,47 | 0,67 | 0,80 |
| A 13 | Γρανίτης | 1232 ± 16 | 231 ± 1 | 49 ± 1 | 187,69 | 0,92 | 1,07 |
| D 15 | Γρανίτης | 1448 ± 19 | 46 ± 1 | 130 ± 2 | 160,15 | 0,78 | 0,93 |
| D 5 | Βιοιτικός γρανοδιорίτης | 546 ± 11 | 41 ± 1 | 77 ± 1 | 88,22 | 0,43 | 0,52 |
| D 8b | Βιοιτικός τοναλίτης | 748 ± 10 | 44 ± 1 | 82 ± 1 | 101,05 | 0,50 | 0,59 |
| DSK 17 | Βιοιτικός τοναλίτης | 524 ± 10 | 41 ± 1 | 80 ± 1 | 89,11 | 0,44 | 0,53 |
| G 2 | Γρανίτης | 1632 ± 21 | 141 ± 1 | 195 ± 3 | 250,98 | 1,23 | 1,47 |
| G 6 | Κεροσιλιβικός – βιοιτικός γρανίτης | 1060 ± 13 | 106 ± 1 | 100 ± 1 | 153,57 | 0,75 | 0,89 |
| PR 27 | Γρανίτης | 987 ± 14 | 56 ± 1 | 66 ± 1 | 106,89 | 0,52 | 0,61 |
| P 6 | Χαλαζιακός μονζονίτης | 1177 ± 16 | 122 ± 1 | 143 ± 2 | 191,82 | 0,94 | 1,12 |
| MZ 500 | Βιοιτικός – πυροξενικός χαλαζιακός μονζοδιорίτης | 1304 ± 22 | 170 ± 2 | 189 ± 3 | 247,07 | 1,21 | 1,46 |
| NG 5 | Γάββρος | 64 ± 3 | 2,5 ± 0,3 | 6,5 ± 0,3 | 7,75 | 0,04 | 0,05 |
| YD 12 | Βιοιτικός – κεροσιλιβικός χαλαζιακός μονζοδιорίτης | 709 ± 10 | 28 ± 1 | 39 ± 1 | 66,06 | 0,32 | 0,37 |
| MP 501 | Βιοιτικός γρανίτης | 1386 ± 15 | 73 ± 1 | 95 ± 1 | 148,90 | 0,73 | 0,85 |
| STH 13 | Λευκογρανίτης | 892 ± 11 | 16,4 ± 0,4 | 18 ± 1 | 55,65 | 0,27 | 0,29 |
| STH 6 | Γρανίτης | 689 ± 11 | 68 ± 1 | 64 ± 1 | 98,80 | 0,48 | 0,57 |
| STH 5 | Γρανοδιорίτης | 693 ± 9 | 38 ± 0,5 | 43 ± 1 | 72,43 | 0,35 | 0,41 |
| STH 118 | Βιοιτικός γρανοδιорίτης | 777 ± 10 | 69 ± 1 | 80 ± 1 | 112,60 | 0,55 | 0,65 |
| STH 450 | Κεροσιλιβικός – βιοιτικός γρανοδιорίτης | 754 ± 14 | 56 ± 1 | 77 ± 1 | 103,82 | 0,51 | 0,60 |
| MR 11 | Κεροσιλιβικός – βιοιτικός – πυροξενικός μονζονίτης | 1051 ± 14 | 97 ± 1 | 99 ± 1 | 148,44 | 0,73 | 0,86 |
| L 23a | Βιοιτικός – πυροξενικός – κεροσιλιβικός χαλαζιακός μονζονίτης | 882 ± 13 | 64 ± 1 | 59 ± 1 | 101,98 | 0,50 | 0,58 |
| KR 9 | Κεροσιλιβικός – βιοιτικός χαλαζιακός μονζονίτης | 956 ± 14 | 50 ± 1 | 78 ± 1 | 110,08 | 0,54 | 0,63 |

*Με βάση τον τύπο που καθιερώθηκε στην Πρώην ΕΣΣΔ και στην πρώην Δ. Γερμανία

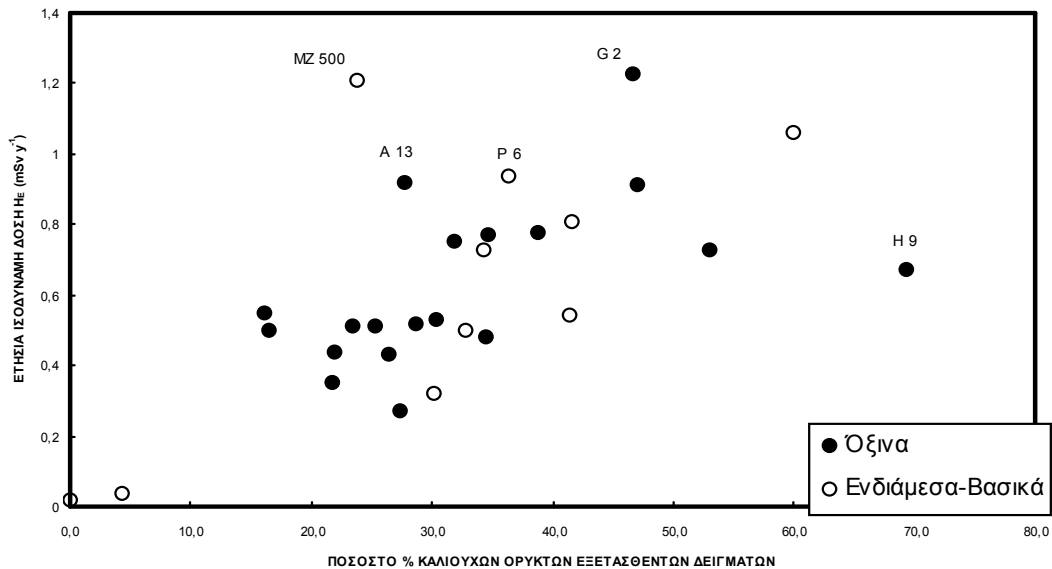
Στο σχήμα 2 δίνεται η ετήσια ισοδύναμη δόση για τα εξετασθέντα δείγματα των ελληνικών γρανιτών και των γρανιτών ελληνικού εμπορίου (Pavlidou et al. 2004). Συγκρίνοντας τους ελληνικούς με τους εισαγόμενους γρανίτες παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις οι γάββροι παρουσιάζουν πολύ μικρές τιμές απορροφούμενης δόσης, ετήσιας ισοδύναμης δόσης και δείκτη ενεργότητας. Αντίθετα, τα δύο ελληνικά δείγματα G 2 και MZ 500 που έχουν αρκετά αυξημένες τιμές ραδιενέργειας σε σχέση με τις επιτρεπτές στάθμες, δε φτάνουν τα πολύ αυξημένα επίπεδα του δείγματος BL (Balmoral).

4 ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Όπως διαπιστώθηκε, 13 από τα εξεταζόμενα δείγματα παρουσιάζουν τιμές ετήσιας ισοδύναμης δόσης μεγαλύτερες από $0,6 \text{ mSv } \gamma^{-1}$, που είναι το ανεκτό όριο, ενώ 6 από αυτά έχουν δείκτη ενεργότητας μεγαλύτερο της μονάδας. Ένα γρήγορο συμπέρασμα λοιπόν θα ήταν ότι αυτά τα δείγματα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως οικοδομικά υλικά επειδή κρίνονται επιβλαβή για το περιβάλλον και τον άνθρωπο.

μικρή συμμετοχή των γρανιτών επομένως στις διάφορες κατασκευές είναι αυτή που τους επιτρέπει να χρησιμοποιηθούν ακίνδυνα ως προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο.

Σε μια προσπάθεια να συνδέσουμε τα αποτελέσματα της εξέτασης των ελληνικών γρανιτών με την ορυκτολογική τους σύσταση προβάλλεται η ετήσια ισοδύναμη δόση των εξετασθέντων δειγμάτων σε συνάρτηση με το ποσοστό των καλιούχων ορυκτών που περιέχουν (καλιούχοι άστριοι, βιοτίτης, μοσχοβίτης) (Σχ. 3). Σε αυτό παρατηρούμε πως υπάρχει μια γενική τάση αύξησης της ετήσιας ισοδύναμης δόσης καθώς αυξάνεται το ποσοστό των καλιούχων ορυκτών, με κάποιες όμως εξαιρέσεις.



Σχήμα 3. Ετήσια ισοδύναμη δόση σε σχέση με το ποσοστό % των καλιούχων ορυκτών των εξετασθέντων δειγμάτων

Το δείγμα MZ 500 για παράδειγμα έχει πολύ υψηλή ισοδύναμη δόση ενώ τα καλιούχα ορυκτά σε αυτό απαντώνται σε μικρό ποσοστό. Στην περίπτωση αυτή η υψηλή ισοδύναμη δόση πιθανόν να οφείλεται στις μεγάλες τιμές θορίου και ραδίου (πίνακας 3). Επίσης το δείγμα A 13 έχει αρκετά υψηλή ισοδύναμη δόση χωρίς όμως να περιέχει μεγάλο ποσοστό καλιούχων ορυκτών. Το συγκεκριμένο δείγμα έχει τη μεγαλύτερη τιμή ραδίου από όλα τα υπόλοιπα και σε αυτό μάλλον οφείλεται η υψηλή ραδιενέργεια. Αξιοσημείωτο είναι ότι στο A 13 εντοπίστηκε κρύσταλλος μοναζίτη, ξενότιμου και οξειδίου ουρανίου και θορίου. Το δείγμα P 6 έχει σχετικά υψηλή ισοδύναμη δόση σε σχέση με άλλα δείγματα με τα οποία έχει παρόμοια ποσοστά καλιούχων ορυκτών. Η διαφορά αυτή προφανώς οφείλεται στα μεγάλα ποσά ραδίου και θορίου μια και το P 6 είναι μέσα στα πέντε δείγματα με το υψηλότερο ράδιο και θόριο. Το δείγμα G 2 έχει τη μεγαλύτερη τιμή ετήσιας ισοδύναμης δόσης χωρίς όμως να έχει και τα περισσότερα καλιούχα ορυκτά. Το γεγονός ότι το G 2 έχει το περισσότερο θόριο από όλα τα εξετασθέντα δείγματα και το ότι η περιεκτικότητά του σε ράδιο είναι επίσης πολύ υψηλή, πιθανώς συμβάλλει στην απαγορευμένη τιμή ισοδύναμης δόσης. Τέλος, το δείγμα H 9 έχει το μεγαλύτερο ποσοστό καλιούχων ορυκτών ενώ η ισοδύναμη δόση του δεν είναι πολύ υψηλή, κάτι το οποίο οφείλεται μάλλον στο πολύ χαμηλό ράδιο και θόριο. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα δείγματα H 9 και A 13 έχουν παρόμοια ποσά καλίου (πίνακας 3) ενώ παρουσιάζουν σημαντική διαφορά στις ποσότητες των καλιούχων ορυκτών τους. Αυτό συμβαίνει επειδή τα πλαγιόκλαστα του A 13 είναι σερικιτιωμένα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το ποσοστό του καλίου που περιέχει.

Οι δύο γάββροι που μελετήθηκαν παρουσιάζουν πολύ μικρές τιμές απορροφούμενης δόσης και δείκτη ενεργότητας. Κάτι τέτοιο εξηγείται από το ότι στη σύστασή τους δε συμμετέχουν ή συμμετέχουν σε πολύ μικρό ποσοστό τα ορυκτά απατίτης, ζirkόνιο, τιτανίτης, αλλανίτης, μοναζίτης και ξενότιμο τα οποία περιλαμβάνουν πρωτογενή ραδιενεργά ισότοπα (Heinrich 1958). Επίσης, δεν περιέχουν κύρια ορυκτά που είναι πλούσια σε κάλιο (καλιούχοι άστριοι), το οποίο συνεισφέρει σημα-

ντικά στη ραδιενεργό ακτινοβολία που εκπέμπουν τα διάφορα πετρώματα όπως διαπιστώθηκε στα δείγματα G 2, MZ 500, B 7, TS 10, G 6, MP 501, D 15, H 9, SB 36, MR 11, SB 41 και P 6. Πιθανώς για τον ίδιο λόγο στους τοναλίτες και στους γρανοδιορίτες που μελετήθηκαν, οι τιμές της ισοδύναμης δόσης και του δείκτη ενεργότητας είναι μέσα στα ανεκτά όρια, δείχνοντας έτσι ότι τα πρωτογενή ραδιενεργά ορυκτά που συμμετέχουν στη σύστασή τους δε συμβάλλουν σημαντικά στην ακτινοβολία που εκπέμπεται.

Από όλα τα παραπάνω λοιπόν προκύπτει ότι τα εξετασθέντα δείγματα ελληνικών γρανιτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δομικά υλικά μέσα στα πλαίσια του μοντέλου δωματίου που χρησιμοποίησαν οι Chen & Lin (1995), στο οποίο οι γρανίτες καλύπτουν μόνο το 2,2 % της ολικής κατασκευής.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Korwnaίos A. 1991. Ορυκτολογία, πετρολογία και γεωχημεία του πλουτωνίτη του Ανατ. Βαρνούντα (ΒΔ Μακεδονία). Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 451 σ.
- Μαλέα Α. 1993. Ορυκτολογία και πετρολογία των πλουτωνικών εμφανίσεων της περιοχής των Φιλιππών. Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 66 σ.
- Νταγκουνάκη Κ. 2000. Ο πλουτωνίτης του Πανοράματος Δράμας, ορυκτολογία – πετρολογία – γεωχημεία. Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 104 σ.
- Παπαδοπούλου Λ. 2003. Ισορροπία ορυκτών φάσεων, συνθήκες κρυστάλλωσης και εξέλιξη του πλουτωνίτη της Μαρώνειας, Θράκη. Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 4 – 94.
- Παυλίδου Σ. 2002. Εισαγόμενα πλουτωνικά πετρώματα που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα ως δομικά υλικά: Ορυκτολογία, πετρολογία, γεωχημεία, ραδιενέργεια και φυσικοχημικές ιδιότητες. Διατριβή ειδίκευσης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 100 σ.
- Σολδάτος Τ. 1985. Πετρολογία και γεωχημεία του πλουτωνίτη της Ελατιάς (Κεντρική Ροδόπη). Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 262 σ.
- Atomic Energy Council (AEC) 1992. Standard for natural radioactivity of fly ash as building materials. Taiwan, ROC: AEC.
- Chen C.-J. & Lin Y.-M. 1995. Assessment of building materials for compliance with regulations of roc. *Environment International*, Vol. 22 (1), 221 – 226.
- European Commission (EC) 1999. European Commission Report on Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials. Radiation Protection, No. 112, Luxembourg.
- Heinrich W.M.E. 1958. Mineralogy and geology of radioactive raw materials. McGraw – Hill Book Company, New York, 643 p.
- International Union of Geological Sciences (I.U.G.S.), Subcommission on the systematic of igneous rocks 1973. Classification and nomenclature of plutonic rocks. *N. Jb. Min. Mh.*, 1973, 149 – 164.
- Pavidou S., Koroneos A., Papastefanou C., Christofides G., Stoulos S. & Vavelides M. 2004. Natural radioactivity of granites used as building materials in Greece, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, τομ. XXXVI, Πρακτικά 10^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου, 113 - 120.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 1993. Sources and Biological Effects of Ionising Radiation. United Nations, New York.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations, New York.

ABSTRACT

MINERALOGY, PETROGRAPHY AND RADIOACTIVITY OF GREEK GRANITES

Karavasili E.¹, Christofides G.¹, Papastefanou C.², Koroneos A.¹ and Stoulos A.²

¹ Department of Mineralogy-Petrology-Economic Geology, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 541 24, Thessaloniki, ekaravas@geo.auth.gr, christof@geo.auth.gr, koroneos@geo.auth.gr.

² Laboratory of Atomic and Nuclear Physics, Aristotle University of Thessaloniki, 541 24, Thessaloniki, cpapaste@auth.gr, stoulos@auth.gr.

The mineralogy, petrography and natural radioactivity of 29 samples of Greek granites (according to the trade term "granite", which include mafic to felsic plutonic rocks) are examined. The ^{40}K , ^{226}Ra and ^{232}Th contents of granites have been measured by gamma spectrometry and then, the absorbed dose (D_a), the effective dose (H_E) and the active index (AI) were determined by the standard room model. Although the absorbed dose and the annual effective dose of 8 samples are higher than the upper limit of 160 nGy h^{-1} and $0,6 \text{ mSv y}^{-1}$, respectively, and the active index of 6 samples is higher than the upper limit of 1 Bq kg^{-1} , these samples could be used safely as building materials since the contribution of granite according to Chen & Lin's room model in buildings does not exceed 2,2 % of the total mass of the building. Finally, the natural radioactivity of the Greek granites that are examined is compared with the granites that are imported in Greece and are used as building materials. From this comparison the conclusion arises that the Greek granites have lower levels of natural radioactivity than the imported ones. Consequently, the investigated granites could be safely used as building materials as well as the imported granites.