

Επιστημονική Επιτηρίδα, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Τιμητική έκδοση στη μνήμη του ομότιμου καθηγητή Κ. Σολδάτου	Ειδικός τόμος 101	95-101	Θεσσαλονίκη 2012
--	----------------------	--------	---------------------

ΦΥΣΙΚΗ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΤΩΝ ΓΡΑΝΙΤΙΚΩΝ ΠΛΟΥΤΩΝΙΤΩΝ ΤΗΣ ΑΤΤΙΚΟΚΥΚΛΑΔΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ

Παπαδόπουλος Α.¹, Χριστοφίδης Γ.¹, Κορωναίος Α.¹, Παπαστεφάνου Κ.² και Στούλος Σ.²

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

² Τομέας Ατομικής και Πυρηνικής Φυσικής, Τμήμα Φυσικής, Α.Π.Θ. 541 24 Θεσσαλονίκη papastefanou@physics.auth.gr, stoulos@physics.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Εξετάζονται οι ειδικές ενεργότητες των ⁴⁰K, ²²⁶Ra και ²³²Th με τη χρήση φασματοσκοπίας ακτίνων γάμμα σε είκοσι τρία αντιπροσωπευτικά δείγματα από όλους του γρανιτικούς πλουτωνίτες της Αττικοκυκλαδικής ζώνης. Η μελέτη της φυσικής ραδιενέργειας σε πετρώματα και διακοσμητικούς φυσικούς λίθους, όπως ο γρανίτης, του οποίου η χρήση ως οικοδομικό υλικό έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια, είναι ένα σημαντικό θέμα στην προστασία από ακτινοβολίες του περιβάλλοντος, καθώς παρέχει τη δυνατότητα να αξιολογηθεί κάθε πιθανός κίνδυνος για την υγεία. Προκειμένου να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις στην υγεία από την πιθανή χρήση των γρανιτικών πετρωμάτων της Αττικοκυκλαδικής ζώνης ως δομικών υλικών, υπολογίστηκαν οι παρακάτω δείκτες ραδιενέργειας: ρυθμός απορροφούμενης δόσης ακτίνων γάμμα (D_a), ετήσια ισοδύναμη δόση (H_E), δείκτης ενεργότητας (AI) και δείκτης ακτίνων-γ (I_γ), οι οποίοι προτείνονται από διεθνείς οργανισμούς, όπως την Επιστημονική Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για τις Επιπτώσεις της Ατομικής Ακτινοβολίας και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (UNSCEAR, EC). Οι ενεργότητες και οι δείκτες ραδιενέργειας που προέκυψαν, συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα πλουτωνικών πετρωμάτων του ελληνικού εμπορίου, καθώς και με τους αντίστοιχους παγκόσμιους μέσους όρους.

ABSTRACT

NATURAL RADIOACTIVITY OF THE GRANITIC PLUTONS OF ATTICOCYCLADIC ZONE

Papadopoulos A.¹, Christofides G.¹, Koroneos A.¹, Papastefanou C.² and Stoulos S.²

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

² Department of Atomic and Nuclear Physics, Aristotle University of Thessaloniki, 541 24 Thessaloniki papastefanou@physics.auth.gr, stoulos@physics.auth.gr

Twenty three samples from the granitic plutons of Atticocycladic zone have been studied for their specific activity of ⁴⁰K, ²²⁶Ra and ²³²Th by using gamma-ray spectroscopy. The study of natural radioactivity present in rocks and ornamental stones, such as granite, the use of which as building material has been increased over the last years, is an important subject in environmental radiological protection as it provides the possibility to assess any associated health hazard. In order to assess the radiological impact from the investigated rocks, absorbed gamma dose rate (D_a), annual effective dose (H_E), activity index (AI) and gamma-ray index (I_γ) were estimated. The above specific activity concentrations and radioactivity indices were compared to those of plutonic rock samples that are imported in Greece, as well as to the respective average values.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

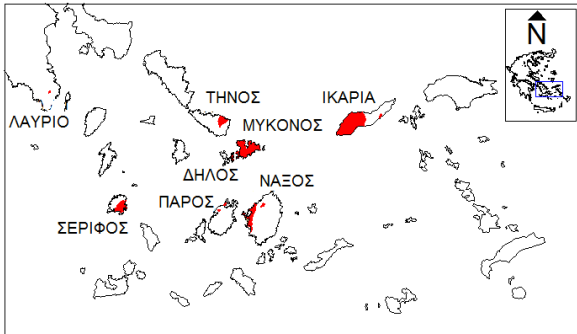
Οι γρανίτες, με την εμπορική έννοια του όρου, χρησιμοποιούνται ευρύτατα ως δομικά και διακοσμητικά υλικά. Τα πετρώματα αυτά, λόγω της ορυκτολογικής τους σύστασης, περιέχουν συχνά αυξημένα ποσοστά ραδιενέργειας. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιούνται δεδομένα για τη φυσική ραδιενέργεια γρανιτικών πετρωμάτων από την Αττικοκυκλαδική ζώνη με στόχο να αξιολογηθεί η καταλληλότητά τους για χρήση ως δομικών υλικών. Η μελέτη αυτή αποτελεί τμήμα μιας ερευνητικής προσπάθειας η οποία θα περιλαμβάνει όλους τους πλουτωνίτες της Ελλάδας με απώτερο σκοπό τη διερεύνηση της καταλληλότητάς τους συνολικά ως δομικά υλικά.

2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ

Η γεωλογία της Αττικοκυκλαδικής ζώνης, καθώς και η πετρογραφία, η γεωχημεία, η πετρογένεση και ηλικία των πλουτωνικών πετρωμάτων της έχει μελετηθεί συστηματικά από πολλούς ερευνητές (Altherr et al. 1982, Altherr et al. 1988, Buick 1991, Pe-Piper et al. 1997, Βέκιος 1999, Pe-Piper 2000, Altherr & Siebel 2002, Pe-Piper & Piper 2002, Pe-Piper et al. 2002, Μάστρακας 2006, Skarpelis et al. 2008, Iglseider et al. 2009, Stouraiti et al. 2010).

Η θέση των πλουτωνιτών της Αττικοκυκλαδικής ζώνης φαίνεται στο σχήμα 1. Από τα 23 δείγματα που μελετώνται, 1 δείγμα προέρχεται από το Λαύριο, ανά 2 δείγματα από την Τήνο, την Πάρο, τη Μύκονο και τη

Δήλο, 3 δείγματα από τη Σέριφο, 4 από τη Νάξο και 7 από την Ικαρία.



Σχήμα 1. Πλουτωνικά πετρώματα της Απτικοκυκλαδικής ζώνης

3 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η πετρογραφική ταξινόμηση των δειγμάτων (Πίν.1) έγινε με βάση το διάγραμμα Q'-ANOR των Streckeisen & Le Maitre (1979) και παρουσιάζεται στον πίνακα 1. Για να γίνει η προβολή των δειγμάτων σε αυτό το διάγραμμα, πρώτα υπολογίστηκε η δυνητική τους ορυκτολογική σύσταση με βάση τις χημικές τους αναλύσεις, οι οποίες έγιναν με ICP-ES στα εργαστήρια ACME του Καναδά. Αυτό έγινε με χρήση του λογισμικού GCD (GeoChemical Data) kit των Janousek et al (2008) υπολογίζοντας τη CIPW norm.

Οι τιμές της ειδικής ενεργότητας (σε Bq/kg) των σειρών ^{238}U και ^{232}Th και του ^{40}K για τα εξεταζόμενα δείγματα, προέκυψαν χρησιμοποιώντας τη φασματοσκοπία ακτίνων-γ και μετρήθηκαν στο Εργαστήριο Ατομικής και Πυρηνικής Φυσικής του τομέα Πυρηνικής Φυσικής και Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων του τμήματος Φυσικής του Α.Π.Θ. Χρησιμοποιήθηκαν δυο συστήματα φασματοσκοπίας ακτίνων-γ υψηλής ανάλυσης. Το πρώτο αποτελείται από ένα ομοαξονικό ανιχνευτή HPGe με απόδοση 42% και ανάλυση 1,9 keV σε φωτόνια ενέργειας 1,33 MeV, που καλύπτεται από $4''\text{Pb}$, 1mm Cd και 1mm Cu. Το δεύτερο αποτελείται

από έναν επίπεδο, χαμηλής ενέργειας ανιχνευτή γερμανίου (LEGe) με ανάλυση 0,7 keV σε φωτόνια ενέργειας 122 keV, που καλύπτεται από $1,3''\text{Pb}$, 1mm Cd και 1mm Cu. Στις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν υψηλής ποιότητας υλικά αναφοράς (IAEA, RG-set) με πυκνότητα παρόμοια αυτής των γρανιτικών πετρωμάτων μετά την κονιοποίηση.

Τα δείγματα αφού κονιοποιήθηκαν σε κοκκομετρία <800 μm, στη συνέχεια ξηράνθηκαν σε θερμοκρασία περίπου 60°C, με σκοπό να απομακρυνθεί η υγρασία που πιθανόν περιέχουν. Έπειτα τοποθετήθηκαν σε δοχεία κυλινδρικής γεωμετρίας διαμέτρου 55mm και ύψους 20mm, θεωρώντας πως τα ραδιονουκλίδια είναι ομογενώς κατανεμημένα στα δείγματα, ενώ η διάρκεια κάθε μέτρησης ήταν μέχρι 200000 sec.

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η ιδιότητα ορισμένων ασταθών πυρήνων να μεταπίπτουν σε άλλους σταθερότερους ή σταθερούς με εκπομπή σωματιδιακής ή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ονομάζεται ραδιενέργεια. Τα νουκλίδια με ασταθείς πυρήνες ονομάζονται ραδιενεργά νουκλίδια ή ραδιονουκλίδια.

Τα ραδιονουκλίδια που υπάρχουν στο περιβάλλον ταξινομούνται στις παρακάτω κατηγορίες:

• Φυσικά ραδιονουκλίδια

Τα πιο σημαντικά φυσικά πρωτογενή ραδιονουκλίδια είναι το ^{40}K , τα νουκλίδια της σειράς του θορίου (με μητρικό ραδιονουκλίδιο το ^{232}Th) του ουρανίου (με μητρικό ραδιονουκλίδιο το ^{238}U) και του ακτινίου (με μητρικό ραδιονουκλίδιο το ^{235}U). Τα φυσικά ραδιονουκλίδια, εκτός από το έδαφος και τα ορυκτά, βρίσκονται στο νερό, στον αέρα, στους ζώντες οργανισμούς, στις τροφές και στα δομικά υλικά, ακόμα και στο ανθρώπινο σώμα.

• **Κοσμογενή ραδιονουκλίδια** (αυτά που παράγονται από την αλληλεπίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα) π.χ. ^{14}C , ^{10}Be , ^{44}Ti και ^{22}Na .

• **Τεχνητά παραγόμενα ραδιονουκλίδια** (παράγονται τεχνητά, όπως σε πυρηνικούς αντιδραστήρες και επιταχυντές σωματιδίων) π.χ. ^{90}Sr , ^{60}Co , ^{99}Mo και ^{137}Cs .

Πίνακας 1. Δυνητική ορυκτολογική σύσταση και πετρογραφικός τύπος των εξεταζόμενων δειγμάτων.

		Q	C	Or	Ab	An	Di	Hy	Il	Hm	Tn	Ru	Ap	Σύνολο	Πετρ. Τύπος
Τήνος	FAL1	30	0,7	25,5	29,8	10,1	0	1,7	0,1	1,7	0	0,2	0,2	100	GRT
	FAL2	26,4	0,3	22,3	29	15,9	0	2,6	0,1	2,7	0	0,4	0,3	100	bi GRD
Μύκονος	TUM1	28,8	0	26,6	26,8	12,2	0	1,9	0,1	2,3	1	0	0,3	100	bi-hb GRT
	PLM1	25,2	0	21,5	26,4	17,6	0,9	2,6	0,1	3,6	1,7	0	0,4	100	bi GRD
Πάρος	NP2	30,2	1,7	27,1	29,5	8,4	0	1,1	0,1	1,5	0	0,2	0,2	100	GRT
	KP1	23,7	1,6	20,2	35,5	13,3	0	2	0,3	2,6	0	0,4	0,4	100	mu-bi GRD
Νάξος	APN1	24,7	0	24,6	25,4	16,5	0	3,8	0,1	3,5	0,8	0,2	0,4	100	bi GRD
	AAN1	27,7	0	26,1	24,6	14,5	0	2,9	0,1	2,9	0,7	0,2	0,3	100	bi GRD
	KAN1	30,9	1,2	27,9	27,4	9,1	0	1,6	0	1,4	0	0,3	0,2	100	GRT
	VN1	26,7	0	30,2	22,6	13,1	0,2	2,9	0,1	2,7	1,1	0	0,4	100	hb GRT
Ικαρία	API2	35,1	0,1	25,7	29,3	7,6	0	0,8	0,1	1,1	0	0,1	0,1	100	GRT
	AI1	32,8	0,3	27,8	29,1	7,7	0	0,9	0,1	1,1	0	0,1	0,1	100	GRT
	KI2	35,6	0,5	26	24,7	9,6	0	1,5	0,1	1,6	0	0,2	0,2	100	GRT
	MI1	26,8	0	23,7	29,1	14	0	2,9	0,1	2,7	0	0,4	0,3	100	bi GRD
	PI1	32,8	0,5	28,4	32,2	4,9	0	0,3	0,2	0,6	0	0	0,1	100	GRT
	KI1	36,9	0,9	25,3	25,6	8,2	0	1,2	0,1	1,5	0	0,2	0,1	100	GRT
Σέριφος	XI3	29,9	1,3	23,4	34,9	7,6	0	1,2	0,1	1,2	0	0,2	0,2	100	GRT
	KAS1	24,5	0	20,1	29,9	17,5	0	3,7	0,1	3,4	0	0,5	0,3	100	bi GRD
	KS1	19,1	0	22,1	36,1	14	2,4	2,9	0,1	1,7	1,3	0	0,3	100	bi-hb GRT
	XS1	21,1	0	19,7	30,4	19,7	0	4,1	0,1	3,5	0,9	0,2	0,3	100	hb-bi GRD
Λαύριο	L1	29,0	0,8	20,3	27,5	16,1	0	2,5	0	3,1	0	0,4	0,3	100	bi GRD
Δήλος	DEL1	23,9	0	22	27,9	17,3	0	3,8	0,1	3,7	0,6	0,3	0,4	100	bi GRD
	DEL2	32,3	0,8	31,3	23,9	8,7	0	1,1	0	1,5	0	0,2	0,2	100	GRT

(Q = χαλαζίας, C = κορούνδιο, Or = ορθόκλαστο, Ab = αβίτης, An = ανορθίτης, Di = διοψίδιος, Hy = υπερσθενής, Il = ιλμενίτης, Hm = αιματίτης, Tn = τιτανίτης, Ru = ρουτίλιο, Ap = απαίτης, Bi = βιοτίτης, Hb = κερροσίλβη), GRT = γρανίτης, GRD = γρανιοδίτης.

Οι ειδικές ενεργότητες των φυσικών ραδιονουκλιδίων των εξεταζόμενων δειγμάτων παρουσιάζονται στον πίνακα 2 (Παπαδόπουλος 2011).

Με σκοπό την προστασία από την πρόσθετη έκθεση σε ραδιενέργεια, έχουν προταθεί διάφοροι δείκτες της φυσικής ραδιενέργειας ενός δομικού υλικού. Οι

Πίνακας 2. Ειδική Ενεργότητα (Bq/kg) ραδιονουκλιδίων των σειρών ^{238}U και ^{232}Th και του ^{40}K των εξεταζόμενων δειγμάτων.

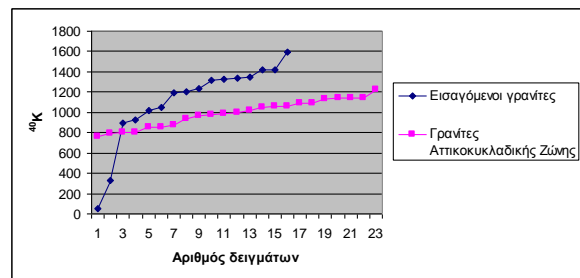
Δείγμα	Ραδιενεργός σειρά ^{238}U				Ραδιενεργός σειρά ^{232}Th				^{40}K	
	^{238}U	$\pm\sigma$	^{226}Ra	$\pm\sigma$	^{228}Ra	$\pm\sigma$	^{228}Th	$\pm\sigma$		$\pm\sigma$
FAL-1	71,0	6,0	80,0	1,0	67,0	2,0	73,0	1,0	1021,0	14,0
FAL-2	73,0	7,0	97,0	1,0	62,0	2,0	64,0	1,0	990,0	14,0
TUM-1	196,0	6,0	73,0	1,0	99,0	2,0	98,0	2,0	1094,0	16,0
PLM-1	72,0	7,0	81,0	1,0	83,0	1,0	82,0	2,0	853,0	12,0
NP-2	57,0	7,0	55,0	1,0	65,0	2,0	69,0	1,0	1095,0	16,0
KP-1	27,0	6,0	26,0	1,0	57,0	2,0	59,0	1,0	798,0	12,0
APN-1	81,0	8,0	82,0	1,0	105,0	3,0	106,0	2,0	996,0	14,0
AAN-1	87,0	9,0	76,0	1,0	86,0	2,0	88,0	1,0	962,0	15,0
KAN-1	31,0	6,0	33,0	1,0	72,0	2,0	76,0	1,0	1133,0	16,0
VN-1	99,0	8,0	100,0	1,0	132,0	2,0	131,0	3,0	1141,0	17,0
API-2	229,0	10,0	206,0	1,0	96,0	2,0	100,0	1,0	1064,0	12,0
AI-1	85,0	8,0	107,0	1,0	97,0	3,0	99,0	1,0	1138,0	15,0
KI-2	94,2	8,7	87,0	1,0	87,0	3,0	91,0	1,0	1046,0	16,0
MI-1	72,0	8,0	68,0	1,0	90,0	2,0	94,0	1,0	941,0	13,0
PI-1	179,0	9,0	183,0	1,0	65,0	2,0	63,0	1,0	1145,0	16,0
KI-1	67,0	8,0	74,0	1,0	81,0	2,0	85,0	1,0	1055,0	14,0
XI-3	71,0	7,0	83,0	1,0	41,0	1,0	39,0	2,0	974,0	15,0
KAS-1	48,0	7,0	49,0	1,0	46,0	1,0	49,0	1,0	807,0	10,0
KS-1	59,7	7,6	50,4	0,7	52,3	1,7	55,2	1,0	873,6	13,2
XS-1	67,0	5,0	65,0	1,0	46,0	1,0	47,0	2,0	761,0	15,0
L-1	66,0	7,0	62,0	1,0	57,0	2,0	59,0	1,0	788,0	12,0
DEL-1	56,0	8,0	53,0	1,0	99,0	2,0	104,0	2,0	851,0	13,0
DEL-2	44,0	7,0	41,0	1,0	80,0	2,0	83,0	1,0	1220,0	17,0
Τυπική Απόκλιση	51,4		41,9		22,6		22,7		134,2	
Μέση Τιμή	83,5		79,6		76,8		78,9		989,0	
Μέγιστο	229,0		206,0		132,0		131,0		1220,0	
Ελάχιστο	27,0		26,0		22,6		22,7		134,2	

Στον πίνακα 3, παρατίθενται οι τιμές ειδικής ενεργότητας φυσικών ραδιονουκλιδίων σε διάφορα πετρώματα σε παγκόσμια κλίμακα, όπως αυτές δίνονται από την UNSCEAR (1993). Τέλος, στον πίνακα 4 παρουσιάζονται στοιχεία για τις ειδικές ενεργότητες των φυσικών ραδιονουκλιδίων σε γρανιτικά πετρώματα του ελληνικού εμπορίου (Παυλίδου 2002). Μια σύγκριση των ειδικών ενεργοτήτων των γρανιτών της Αττικοκυκλαδικής ζώνης και των εισαγόμενων γρανιτών παρουσιάζεται στα σχήματα 2-4.

δείκτες που υπολογίστηκαν είναι οι εξής: **ρυθμός απορροφούμενης δόσης D_a (nGy/h)**, **ετήσια ισοδύναμη δόση H_E (mSv/y)**, **δείκτης ενεργότητας** και **δείκτης ακτίνων-γ**.

Πίνακας 3. Ειδικής ενεργότητα ^{226}Ra και ^{228}Ra (Bq/kg) διάφορων πετρωμάτων (UNSCEAR 1993).

Πέτρωμα	^{226}Ra		^{228}Ra	
	Μέση τιμή	Εύρος	Μέση τιμή	Εύρος
Γρανίτης	78	1-370	111	0,4-1030
Βασάλτης	11	0,4-41	10	0,2-3,6
Ασβεστόλιθος	45	0,4-340	60	0,1-540
Φαμμίτης/αργ. σχιστόλιθος	60	1-990	50	0,8-1470
Γνεύσιος	50	1-1800	60	0,4-420
Σχιστόλιθος	37	1-660	49	0,4-370



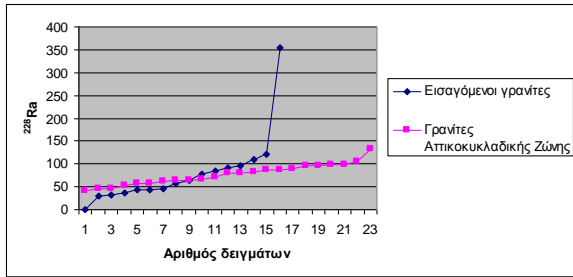
Σχήμα 2. Σύγκριση ειδικής ενεργότητας ^{40}K (Bq/kg) γρανιτών Αττικοκυκλαδικής ζώνης με εισαγόμενους γρανίτες

Πίνακας 4. Ειδικές ενεργότητες (Bq/kg) των ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K δειγμάτων του ελληνικού εμπορίου (Παυλίδου 2002).

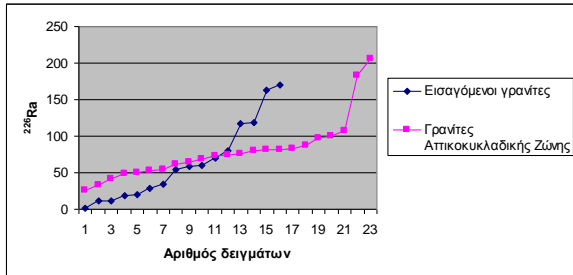
Ραδιενεργό ισότοπο	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Μέσος όρος συγκεντρώσεων	63,7	81	1104
Τυπική απόκλιση	53	79	407
Εύρος	1,6-170	<OA*-354	49-1592

*OA= Όριο Ανεπιχειρησιμότητας

Για τον υπολογισμό της απορροφούμενης δόσης, της ετήσιας ισοδύναμης δόσης και του δείκτη ενεργότητας, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο που έχει ορίσει η Επιστημονική Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για την Προστασία από Ακτινοβολίες (UNSCEAR 1993). Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, θεωρείται ότι ένας άνθρωπος διαμένει σε κατοικία χτισμένη από υλικό με συγκεκριμένες ειδικές ενεργότητες ^{40}K , ^{226}Ra και ^{232}Th , με διαστάσεις $3 \times 3 \times 3 \text{ m}^3$, με απείρως λεπτούς τοίχους, χωρίς πόρτες και παράθυρα (πρότυπο μοντέλο δωματίου, standard room model) και είναι κατασκευασμένη από ένα μόνο υλικό. Για τον υπολογισμό του δείκτη ακτίνων-γ, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο δωματίου διαστάσεων $4 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 2,8 \text{ m}$, με πάχος τοίχων 20 cm.



Σχήμα 3. Σύγκριση ειδικής ενεργότητας ^{226}Ra (Bq/kg) γρανιτών Αττικοκυκλαδικής ζώνης με εισαγόμενους γρανίτες.



Σχήμα 4. Σύγκριση ειδικής ενεργότητας ^{226}Ra (Bq/kg) γρανιτών Αττικοκυκλαδικής ζώνης με εισαγόμενους γρανίτες.

• Ρυθμός απορροφούμενης δόσης D_a (nGy/h)

Είναι ο ρυθμός μεταφοράς της ενέργειας που μεταφέρεται από μια δέσμη ιονίζουσας ακτινοβολίας και απορροφάται από τη μονάδα μάζας ιστών. Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$D(\text{nGy/h}) = \alpha_1 \times C_{40\text{K}} + \alpha_2 \times C_{232\text{Th}} + \alpha_3 \times C_{226\text{Ra}} \text{ όπου:}$$

$$C_{40\text{K}} = \text{η ειδική ενεργότητα του } ^{40}\text{K σε Bq/kg}$$

$$C_{232\text{Th}} = \text{η ειδική ενεργότητα του } ^{232}\text{Th σε Bq/kg}$$

$$C_{226\text{Ra}} = \text{η ειδική ενεργότητα του } ^{226}\text{Ra σε Bq/kg}$$

$$\alpha_1 = 0,0414 \text{ nGy/h/Bq/kg}$$

$$\alpha_2 = 0,623 \text{ nGy/h/Bq/kg}$$

$$\alpha_3 = 0,461 \text{ nGy/h/Bq/kg}$$

Συνήθως, τα σπίτια είναι κατασκευασμένα από διάφορα δομικά υλικά. Συνεπώς, η ραδιενεργός δόση στο εσωτερικό θα εξαρτάται από τις συγκεντρώσεις των φυσικών ραδιοϊσοτόπων στα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται. Για τον υπολογισμό του δείκτη αυτού, χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

$$(C_{\text{Th}}/A_{\text{Th}} \times f_{\text{Th}} + C_{\text{U}}/A_{\text{U}} \times f_{\text{U}} + C_{\text{K}}/A_{\text{K}} \times f_{\text{K}}) \times w_m$$

όπου C_{Th} , C_{U} , C_{K} οι ειδικές ενεργότητες του Th, U και K σε Bq/kg, ενώ τα f_{Th} , f_{U} και f_{K} είναι η συνεισφορά του καθενός ραδιοϊσοτόπου στη συνολική δόση. Οι τιμές των A_{Th} , A_{U} και A_{K} , όπως δίνονται από τη UNSCEAR (1993) είναι 50, 50 και 500 Bq/kg αντίστοιχα και αντιπροσωπεύουν τις τιμές της ειδικής ενεργότητας ανά μονάδα μάζας. Ο δείκτης w_m εκφράζει το ποσοστό συμμετοχής του κάθε δομικού υλικού στη συνολική μάζα του δωματίου. Για παράδειγμα, ένα δωμάτιο που είναι εξ' ολοκλήρου κατασκευασμένο από ένα δομικό υλικό, ο δείκτης w_m είναι 1, ένα δωμάτιο που είναι κατά 50% κατασκευασμένο από ένα δομικό υλικό, ο δείκτης w_m είναι 0,5 κτλ. Αν υποθέσουμε πλήρη κάλυψη της μάζας του πρότυπου δωματίου από ένα δομικό υλικό ($w_m = 1$), συγκεντρώσεις φυσικών ραδιοϊσοτόπων $C_{\text{Th}} = C_{\text{U}} = 50$ Bq/kg και $C_{\text{K}} = 500$ Bq/kg, ο ρυθμός απορροφούμενης δόσης θα είναι 80 nGy/h (UNSCEAR 1993). Αυτή η τιμή των 80 nGy/h χρησιμοποιείται σαν όριο διεθνώς για το ρυθμό απορροφούμενης δόσης. Ωστόσο, αν θεωρήσουμε ότι το 50% της επιφάνειας του πρότυπου μοντέλου δωματίου καλύπτεται από

γρανίτη, προκύπτει τιμή 160 nGy/h, η οποία είναι ανεκτή.

• Ετήσια ισοδύναμη δόση H_E (mSv/y)

Εκφράζει τις βιολογικές συνέπειες που προκύπτουν από έκθεση σε διαφορετικούς τύπους ακτινοβολίας (γ , α , νετρόνια, πρωτόνια κλπ) σε ένα ιστό ή όργανο στο διάστημα ενός έτους και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$H_E (\text{mSv/y}) = 10^{-6} \times D_a \times T \times F, \text{ όπου:}$$

D_a ο ρυθμός απορροφούμενης δόσης ακτινοβολίας- γ (nGy/h), T ο χρόνος διαβίωσης σε εσωτερικούς χώρους ($T = 0,8 \times 24 \text{ h d}^{-1} \times 365 \text{ d/y} \approx 7000 \text{ h/y}$, όπου 0,8 του T είναι ο παράγοντας που δείχνει ότι ο άνθρωπος δαπανά 80 % του χρόνου της ζωής του σε εσωτερικούς χώρους, occupancy factor). Ο χρόνος αυτός (7000 h/y) αποτελεί τον παγκόσμιο μέσο όρο (UNSCEAR 1993, 2000). F ο συντελεστής μετατροπής ($F = 0,7 \text{ Sv/Gy}$) της απορροφούμενης σε ισοδύναμη δόση (UNSCEAR 1993, 2000).

Το όριο για την ετήσια ισοδύναμη δόση είναι 1 mSv/y, ενώ δείγματα με ετήσια ισοδύναμη δόση $< 0,3$ mSv/y, δεν εμπίπτουν σε περιορισμούς (E.C. 1999).

• Δείκτης ενεργότητας AI

Διάφορες χώρες χρησιμοποιούν διαφορετικούς τύπους για τον προσδιορισμό της επίδρασης της ραδιενέργειας στον ανθρώπινο οργανισμό, τροποποιώντας τις προδιαγραφές, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των υλικών που οι ίδιες διαθέτουν στην αγορά. Η ποσότητα που υπολογίζεται ονομάζεται δείκτης ενεργότητας (Activity Index, AI). Ο τύπος που χρησιμοποιείται συχνότερα είναι αυτός της πρώην ΕΣΣΔ και της πρώην Δ. Γερμανίας:

$$AI = \frac{C_{\text{Ra}}}{370 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}} + \frac{C_{\text{Th}}}{260 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}} + \frac{C_{\text{K}}}{4810 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}}, \text{ όπου:}$$

C_{Ra} = η ειδική ενεργότητα του ^{226}Ra σε Bq/kg, C_{Th} = η ειδική ενεργότητα του ^{232}Th σε Bq/kg, C_{K} = η ειδική ενεργότητα του ^{40}K σε Bq/kg.

Ο δείκτης ενεργότητας θα πρέπει να είναι μικρότερος της μονάδας.

• Δείκτης ακτίνας- γ (I_γ)

Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$I_\gamma = \frac{C_{\text{Ra}}}{300 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}} + \frac{C_{\text{Th}}}{200 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}} + \frac{C_{\text{K}}}{3000 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}}, \text{ όπου:}$$

C_{Ra} = η ειδική ενεργότητα του ^{226}Ra σε Bq/kg, C_{Th} = η ειδική ενεργότητα του ^{232}Th σε Bq/kg, C_{K} = η ειδική ενεργότητα του ^{40}K σε Bq/kg.

Υλικά που χρησιμοποιούνται επιφανειακά ως πλακίδια (π.χ γρανίτες), με τιμές $I_\gamma < 2$ αυξάνουν την ετήσια ισοδύναμη δόση κατά 0,3 mSv/y, ενώ με τιμές $2 < I_\gamma < 6$ αντιστοιχούν σε αύξηση 1 mSv/y. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (E.C. 1999), υλικά με $I_\gamma < 2$, εξαιρούνται από περιορισμούς χρήσης, ενώ υλικά με $2 < I_\gamma < 6$ μπορούν να χρησιμοποιηθούν τοπικά, σε εξαιρετικές περιπτώσεις. Τέλος, η χρήση υλικών με $I_\gamma > 6$ δε συνιστάται.

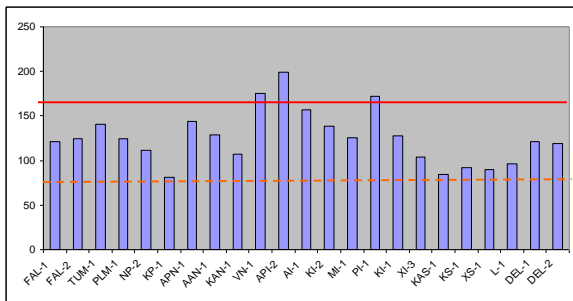
Οι τιμές των δεικτών ραδιενέργειας για τα δείγματα της μελέτης παρουσιάζονται στον πίνακα 5.

Οι τιμές των δεικτών ραδιενέργειας για τα εξεταζόμενα δείγματα, μαζί με τα όρια του καθενός παρουσιάζονται στα σχήματα 5-8.

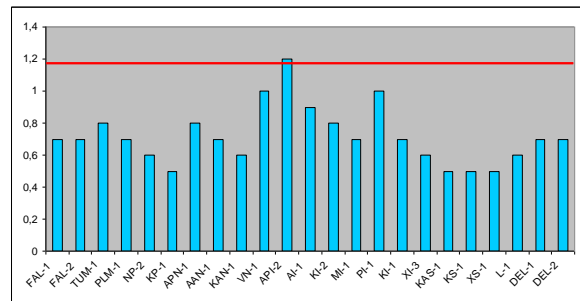
Στοιχεία για τις τιμές των εισαγόμενων γρανιτικών πετρωμάτων στην Ελλάδα παρουσιάζονται στον πίνακα 6 (Παυλίδου 2002).

Πίνακας 5. Τιμές των δεικτών ραδιενέργειας για τα εξεταζόμενα γρανιτικά πετρώματα.

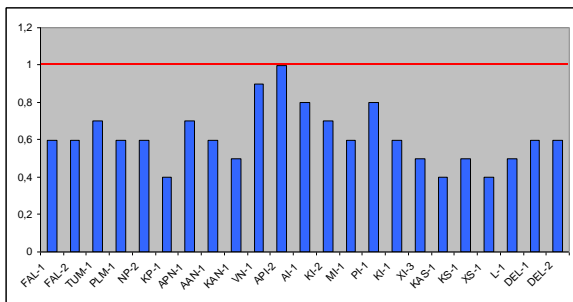
Δείγμα	D _a Απορροφούμενη δόση (nGy/h)	H _e Ετήσια ισοδύναμη δόση (mSv/y)	AI Δείκτης ενεργότητας	I _γ Δείκτης ακτίνων-γ
FAL-1	120,8	0,6	0,7	0,9
FAL-2	124,7	0,6	0,7	1,0
TUM-1	140,9	0,7	0,8	1,1
PLM-1	124,2	0,6	0,7	1,0
NP-2	111,6	0,6	0,6	0,9
KP-1	80,8	0,4	0,5	0,6
APN-1	144,2	0,7	0,8	1,1
AAN-1	128,4	0,6	0,7	1,0
KAN-1	106,8	0,5	0,6	0,8
VN-1	175,6	0,9	1,0	1,4
API-2	198,8	1,0	1,2	1,5
AI-1	156,4	0,8	0,9	1,2
KI-2	138,0	0,7	0,8	1,1
MI-1	126,0	0,6	0,7	1,0
PI-1	172,1	0,8	1,0	1,3
KI-1	128,1	0,6	0,7	1,0
XI-3	104,0	0,5	0,6	0,8
KAS-1	84,7	0,4	0,5	0,7
KS-1	92,0	0,5	0,5	0,7
XS-1	90,0	0,4	0,5	0,7
L-1	96,7	0,5	0,6	0,8
DEL-1	121,6	0,6	0,7	1,0
DEL-2	119,5	0,6	0,7	0,9
Τυπική Απόκλιση	29,9	0,2	0,2	0,2
Μέση Τιμή	125,5	0,6	0,7	1,0
Μέγιστο	198,8	1,0	1,2	1,5
Ελάχιστο	29,9	0,2	0,2	0,2



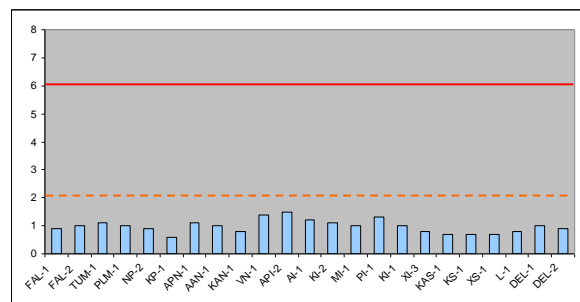
Σχήμα 5. Τιμές ρυθμού απορροφούμενης δόσης (D_a) με τα όρια των 80 και 160nGy/h.



Σχήμα 7. Τιμές δείκτη ενεργότητας (AI) με την οριακή τιμή 1.



Σχήμα 6. Τιμές ετήσιας ισοδύναμης δόσης (H_e) με το όριο του 1 mSv/y.



Σχήμα 8. Τιμές δείκτη ακτίνων-γ (I_γ) με τις οριακές τιμές 2 και 6.

Πίνακας 6. Τιμές των δεικτών ραδιενέργειας για τα γρανιτικά πετρώματα του ελληνικού εμπορίου (Παυλίδου 2002).

Όνομα	D _a Απορροφούμενη δόση (nGy/h)	H _e Ετήσια ισοδύναμη δόση (mSv/y)	AI Δείκτης Ενεργότητας	Iγ Δείκτης ακτίνων -γ
Τυπική Απόκλιση	79,9	0,4	0,5	0,6
Μέση Τιμή	125,4	0,6	0,7	1,0
Εύρος	8,4-364,8	0,01-1,8	0,02-2,2	0,1-2,9

5 ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα γρανιτικά πετρώματα της Αττικοκυκλαδικής ζώνης παρουσιάζουν παρόμοια ειδική ενεργότητα ²²⁶Ra και αρκετά χαμηλότερη ειδική ενεργότητα ²²⁸Ra σε σχέση με τις τιμές του μέσου όρου των γρανιτών της UNSCEAR (1993). Το ²²⁶Ra χρησιμοποιείται συχνά αντί του ²³⁸U και το ²²⁸Ra αντί του ²³²Th, καθώς θεωρούμε ότι βρίσκονται σε κατάσταση μόνιμης ραδιενεργού ισορροπίας με τα μητρικά τους ραδιονουκλίδια.

Η μέγιστη παρατηρούμενη τιμή ειδικής ενεργότητας σε ²²⁶Ra και ²²⁸Ra στα ελληνικά δείγματα είναι 206 και 131 Bq/kg αντίστοιχα, τιμές αρκετά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες των διεθνών (370 και 1030 Bq/kg αντίστοιχα).

Συγκρίνοντας τις τιμές ειδικής ενεργότητας των φυσικών ραδιονουκλιδίων των εξεταζόμενων γρανιτικών δειγμάτων του ελληνικού χώρου με τις αντίστοιχες των γρανιτών του ελληνικού εμπορίου (Πίν. 4), παρατηρείται ότι η μέση τιμή της ειδικής ενεργότητας του ²²⁶Ra των ελληνικών γρανιτών είναι ελαφρώς υψηλότερη αυτής των εισαγόμενων γρανιτών. Αντίθετα, σε ότι αφορά την ειδική ενεργότητα του ⁴⁰K και του ²²⁸Ra, η μέση τιμή των ελληνικών γρανιτών είναι χαμηλότερη αυτής των εισαγόμενων (989 έναντι 1104 Bq/kg και 76,8 έναντι 79 Bq/kg αντίστοιχα).

Από τα 23 εξεταζόμενα δείγματα, μόνο ένα δείγμα (API-2) από τον πλουτωνίτη της Ικαρίας παρουσιάζει τιμές δεικτών ραδιενέργειας πάνω από τα όρια για το ρυθμό απορροφούμενης δόσης, την ετήσια ισοδύναμη δόση και το δείκτη ενεργότητας. Παρόλα αυτά το συγκεκριμένο δείγμα, βάση του δείκτη ακτίνων-γ (Iγ), ανήκει στην κατηγορία των γρανιτών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν δομικά υλικά χωρίς περιορισμούς.

Από τους πίνακες 5 και 6, προκύπτει ότι τα εξεταζόμενα δείγματα παρουσιάζουν χαμηλότερους δείκτες ραδιενέργειας σε σχέση με τα εισαγόμενα, αν λάβουμε υπόψη όχι μόνο τις μέσες τιμές αλλά και την τυπική απόκλιση, όπως και τις μέγιστες τιμές.

Θα πρέπει να ληφθεί επίσης υπόψη ότι τα εξεταζόμενα δείγματα είναι όλα όξινης σύστασης και θεωρητικά είναι πιο εμπλουτισμένα σε U και Th, σε αντίθεση με τα εισαγόμενα, τα οποία είναι όξινα έως βασικά. Ο εμπλουτισμός των όξινων πετρωμάτων σε σχέση με τα βασικά, οφείλεται στο ότι το U και το Th είναι ασυμβίβαστα ιχνοστοιχεία και σαν τέτοια, συγκεντρώνονται στα τελευταία στάδια διαφοροποίησης του μάγματος, μπαίνοντας στο πλέγμα ορυκτών όπως το ζirkόνιο, ο απατίτης, ο αλλανίτης, ο μοναζίτης κτλ και αυξάνοντας έτσι τα επίπεδα ραδιενέργειας Faure (1986).

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα γρανιτικά πετρώματα της Αττικοκυκλαδικής μάζας παρουσιάζουν δείκτες ραδιενέργειας χαμηλότερους ή ίσους με τα όρια σε όλες τις περιπτώσεις, εκτός από ένα δείγμα του πλουτωνίτη της Ικαρίας. Ωστόσο, οι μέσες τιμές τόσο της ειδικής ενεργότητας των φυσικών ραδιονουκλιδίων, όσο και των δεικτών ραδιενέρ-

γειας είναι χαμηλότερες και του παγκόσμιου μέσου όρου για γρανίτες, αλλά και των εισαγόμενων στην Ελλάδα γρανιτικών πετρωμάτων.

Συνεπώς, τουλάχιστον από άποψη επιπέδων φυσικής ραδιενέργειας, οι ελληνικοί γρανίτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δομικά υλικά. Δεδομένης της μεγάλης σημασίας για την εθνική οικονομία, η πιθανότητα εξόρυξης των ελληνικών γρανιτικών πετρωμάτων θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω από την εξορυκτική βιομηχανία και να τύχει της δέουσας προσοχής

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βέκιος Π., 1999. Ιζηματολογική και γεωχημική μελέτη των silcrete σχηματισμών της νήσου Ικαρίας και η μετ' αυτών συνεδμεμένη ουρανίουχος μεταλλοφορία. Διδακτορική διατριβή. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 130σ.
- Μάστρακας Ν., 2006. Ο γρανίτης της Τήνου και οι συνδεόμενοι με αυτόν σχηματισμοί skarn. Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών. 228σ.
- Παπαδόπουλος Α. 2011. Φυσική ραδιενέργεια σε σχέση με την ορυκτολογία, γεωχημεία ουρανίου και θορίου μαγματικών πετρωμάτων από τον ελλαδικό χώρο: Συμβολή στη χρήση φυσικών δομικών υλικών. Διδακτορική Διατριβή, 283σ.
- Παυλίδου Σ., 2002. Εισαγόμενα πλουτωνικά πετρώματα που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα ως δομικά υλικά: Ορυκτολογία, Πετρολογία, Γεωχημεία, Ραδιενέργεια και Φυσικομηχανικές ιδιότητες. Διατριβή Ειδίκευσης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 100σ.
- Altherr R., & Siebel W., 2002. I-type plutonism in a continental back arc setting: Miocene granitoids and monzonites from the central Aegean Sea, Greece. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 143, 397–415.
- Altherr R., Henjes-Kunst F.J., Matthews A., Friedrichsen H., Hansen B.T., 1988. O–Sr isotopic variations in Miocene granitoids from the Aegean: evidence for an origin by combined assimilation and fractional crystallisation. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 100, 528–541.
- Altherr R., Kreuzer H., Wendt, I. Lenz, H., Wagner G.A., Keller J., Harre W., Hohndorf A., 1982. A late Oligocene/early Miocene high temperature belt in the Attic–Cycladic crystalline complex (SE Pelagonian, Greece). *Geologisches Jahrbuch* E23, 97–164.
- Buick I.S., 1991. The late Alpine evolution of an extensional shear zone, Naxos, Greece. *Journal of the Geological Society of London* 148, 93–103.
- European Commission (E.C.), 1999. Radiation Protection 112: Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials Directorate – General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection.
- Faure G., 1986. *Principles of Isotope Geology*, second ed. John Wiley & Sons, London, 464 pp.
- Iglseder C., Grasemann B., Schneider D.A., Petrakakis K., Miller C., Klötzli U.S., Thöni M., Zámolyi A., Rambousek C., 2009. I and S-type plutonism on Serifos (W-Cyclades, Greece). *Tectonophysics* 473, 69–83.
- Janousek V., Farrow C. & Erban V., 2008. *Geochemical Data Toolkit for Windows*. Available on <http://www.gla.ac.uk/gcdkit>, 188p.
- Pe-Piper, G., Kotopouli, C.N., Piper, D.J.W., 1997. Granitoid rocks of Naxos, Greece: regional geology and petrology. *Geological Journal* 32, 153–171.

- Pe-Piper G., 2000. Origin of S-type granites coeval with I-type granites in the Hellenic subduction system, Miocene of Naxos, Greece. *European Journal of Mineralogy* 12, 859–875.
- Pe-Piper G., Piper D.J.W., 2002. The igneous rocks of Greece: the anatomy of an orogen, Borntraeger, Berlin, 645pp.
- Pe-Piper, G., Piper, D.J.W., Matarangas, D., 2002. Regional implications of geochemistry and style of emplacement of Miocene I-type diorite and granite, Delos, Cyclades, Greece. *Lithos* 60, 47–66.
- Skarpelis N., Tsikouras B., Pe-Piper G., 2008. The Miocene igneous rocks in the Basal Unit of Lavrion (SE Attica, Greece): petrology and geodynamic implications. *Geological Magazine* 145, 1–15.
- Stouraiti C., Mitropoulos P., Tarney J., Barreiro B., McGrath A.M., Baltatzis E., 2010. Geochemistry and petrogenesis of late Miocene granitoids, Cyclades, southern Aegean: Nature of source components. *Lithos* 114, 337–352.
- Streckeisen A. & Le Maitre R.W., 1979. A chemical approximation to the modal QAPF classification of the igneous rocks. *N. Jb. Min. Abh.*, 136, 169-206.
- UNSCEAR, 1993. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionising Radiation Vol. I. United Nations, New York.
- UNSCEAR, 2000. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionising Radiation Vol. I. United Nations, New York.

