ePublishing
ΕΘΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗΣ NATIONAL DOCUMENTATION CENTRE

Open Schools Journal for Open Science

Τόμ. 3, Αρ. 7 (2020)

ΡΑΔΙΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΓΥΜΝΑΣΙΟΥ ΑΝΑΒΡΥΤΩΝ

Ορέστης Αλεξανδρής, Ιωάννης Ανανιάδης, Ζωή Νικολέττα Κουτσελίνη, Ευαγγελία Ευριδίκη Κυριακίδου, Βασίλειος Λεουτσάκος, Ιάσων Λουκάς, Βασίλειος Πέτρος Πάζας, Μενέλαος Πετσετάκης, Γεωργία Πριniωτάκη, Άδωνης Νικόλαος Τουτουντζης, Κωνσταντίνος παναγιώτης Χατζηαναστασίου, Αικατερίνη Χατζηπέτρου, Γεωργία Ρουμπέα, Αθανάσιος Κούκουλης

doi: 10.12681/osj.24346

Copyright © 2020, Ορέστης Αλεξανδρής, Ιωάννης Ανανιάδης, Ζωή Νικολέττα Κουτσελίνη, Ευαγγελία Ευριδίκη Κυριακίδου, Βασίλειος Λεουτσάκος, Ιάσων Λουκάς, Βασίλειος Πέτρος Πάζας, Μενέλαος Πετσετάκης, Γεωργία Πριniωτάκη, Άδωνης Νικόλαος Τουτουντζης, Κωνσταντίνος παναγιώτης Χατζηαναστασίου, Αικατερίνη Χατζηπέτρου, Γεωργία Ρουμπέα, Αθανάσιος Κούκουλης

Άδεια χρήσης Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0.

Βιβλιογραφική αναφορά:

Αλεξανδρής Ο., Ανανιάδης Ι., Κουτσελίνη Ζ. Ν., Κυριακίδου Ε. Ε., Λεουτσάκος Β., Λουκάς Ι., Πάζας Β. Π., Πετσετάκης Μ., Πριniωτάκη Γ., Τουτουντζης Ά. Ν., Χατζηαναστασίου Κ. π., Χατζηπέτρου Α., Ρουμπέα Γ., & Κούκουλης Α. (2020). ΡΑΔΙΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΓΥΜΝΑΣΙΟΥ ΑΝΑΒΡΥΤΩΝ. *Open Schools Journal for Open Science*, *3*(7). https://doi.org/10.12681/osj.24346

https://epublishing.ekt.gr | **e-Εκδότης:** ΕΚΤ | **Πρόσβαση:** 27/01/2026 07:27:30

Open Schools Journal
for Open Science

ΡΑΔΙΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΓΥΜΝΑΣΙΟΥ ΑΝΑΒΡΥΤΩΝ

Αλεξανδρής Ορέστης[1], Ανανιάδης Ιωάννης[1], Κουτσελίνη Ζωή Νικολέττα[1], Κυριακίδου Ευαγγελία Ευριδίκη[1], Λεουτσάκος Βασίλειος[1], Λουκάς Ιάσων[1], Πάζας Βασίλειος Πέτρος[1], Πετσετάκης Μενέλαος[1], Πρινιωτάκη Γεωργία[1], Τουτουντζής Άδωνης Νικόλαος[1], Χατζηαναστασίου Κων/νος Παναγιώτης[1], Χατζηπέτρου Αικατερίνη[1], Ρουμπέα Γεωργία[2], Κούκουλης Αθανάσιος[3]

[1] Πρότυπο Γυμνάσιο Αναβρύτων, Αθήνα, Ελλάδα,

[2] Δρ Φυσικός, Δ/ντρια Προτύπου Γυμνασίου Αναβρύτων, Αθήνα, Ελλάδα

[3] Δρ. Γεωλόγος Ενεργειακών Ορυκτών Πρώτων Υλών ΙΓΜΕ (Ινστιτούτο Γεωλογικών & Μεταλλευτικών Ερευνών), Αθήνα, Ελλάδα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Έχει πολύ μεγάλη σημασία η ραδιογεωλογική μελέτη του υποβάθρου, ιδιαίτερα όταν συνδέεται με την ποιότητα ζωής των ανθρώπων, όπως την ραδιοπροστασία από την εκπομπή των ακτινοβολιών α, β, γ, και την αντισεισμική θωράκιση από ρήγματα, που συνδέονται με διάφορα βάθη του υποβάθρου.

Στην παρούσα εργασία εκτός από τα ραδιογεωλογικά στοιχεία με τα οποία τεκμηριώνεται ο μηδενικός ραδιολογικός κίνδυνος από τη χαμηλή εκπομπή των ακτινοβολιών α, β και γ του εδάφους, παρουσιάζεται και ο εντοπισμός μια δομής ραδονίου με «σχετικά» υψηλές συγκεντρώσεις (από 2.900-4.137Bq/cm^3), που συνδέεται με ρήγμα μικρού βάθους του υποβάθρου.

Η δομή του ραδονίου έχει ΒΒΑ-ΝΝΑκή διεύθυνση, διατάσεις 750Χ250m,και βρίσκεται 500m περίπου δυτικά από το σχολείο μας. Οι «σχετικά» υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου της δομής

δεν μπορεί να προέρχονται από τους τοπικούς γεωλογικούς σχηματισμούς, παρά μόνο από τους «σχετικά» βαθύτερους ορίζοντες του υποβάθρου, δια μέσω ενός ρήγματος το οποίο δεν φθάνει μέχρι την επιφάνεια του εδάφους, διότι είναι καλυμμένο με Μειοκαινικά ιζήματα του όρους Πεντέλη. Επομένως το ρήγμα είναι μη ορατό, χαμηλής τάξεως (3^{ης}, 4^{ης}, κλπ.,), λόγω της υποδεέστερης δομής ραδονίου <5.000Bq/cm^3 με την οποία συνδέεται και άρα χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας.

ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ

ραδιογεωλογία, ακτινοβολία εδάφους, ραδόνιο-θορόνιο, ραδιοπροστασία, αντισεισμική θωράκιση, μη ορατό ρήγμα υποβάθρου

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ξεκινώντας την επαφή μας με επιβλέποντα του ΙΓΜΕ κ. Αθανάσιο Κούκουλη (Δρ Γεωλόγο Ενεργειακών Πρώτων Υλών), συζητήσαμε και οριστικοποιήσαμε τη συνεργασία μας, για να ελέγξουμε το μέγεθος των ακτινοβολιών του εδάφους, στην περιοχή του σχολείου μας.

Ο περιβαλλοντικός έλεγχος θα αφορούσε πιθανό πρωτογενή ή δευτερογενή εμπλουτισμό των ραδιενεργών γεωχημικών στοιχείων του εδάφους, που θα συνδεόταν με τη γεωλογική ιστορία και εξέλιξη της περιοχής (Κούκουλης Α., Καραγεωργίου Ε.Δ., 2008a-d,).

Η ραδιογεωλογική έρευνα στην ευρύτερη περιοχή του σχολείου μας, εκτός από τη διάκριση και συσχέτιση των ακτινοβολιών του εδάφους, θα εστιάσει στην πιθανή χωρική ανομοιογένεια των ραδιολογικών μεγεθών του εδάφους κυρίως από τα ραδιενεργά αέρια αυτού (ραδόνιο και θορόνιο), που μπορούν να εμπλουτιστούν δια των ρηγμάτων, από βαθύτερους ορίζοντες του υποβάθρου (KoukoulisA., Karageorgiou E. D., 2010).

Ο εντοπισμός ευδιάκριτων δομών εμπλουτισμένων σε ραδόνιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη χαρτογράφηση ενεργών τεκτονικών ζωνών και ρηγμάτων (Ioannides K. et al, 2003), για την πρόγνωση σεισμών (Βουγιουκαλάκης κ.α., 2000, Μητρόπουλος Π. κ.α., 2004), την έρευνα γεωθερμικών πεδίων, την παρακολούθηση της δραστηριότητας ηφαιστείων, κ.λπ.

Όταν φυσικά οι υψηλές συγκεντρώσεις του ραδονίου δεν έχουν καμία σχέση με τη ραδιενέργεια των τοπικών πετρωμάτων, την κυκλοφορία υπόγειων νερών, κ.λπ.

Ποσοτικοποιούνται τα βαθιά και μη ορατά ρήγματα από τις δομές του ραδονίου στην επιφάνεια του εδάφους, κάτι που είναι πολύ σημαντικό για την προστασία των κατοίκων από πιθανό σεισμικό κίνδυνο (Κούκουλης Α., 2016 a-b).

Η έρευνα αυτή επιβάλλεται και για ένα επιπρόσθετο λόγο, διότι μπορεί να καθοδηγήσει με βεβαιότητα την έρευνα ραδονίου στον εσωτερικό των κατοικιών (Ε.Ε.Α.Ε., κλπ.),οι οποίες είναι κτισμένες πάνω από δομές με υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου στο έδαφος. Έτσι, μπορεί η χώρα μας να ανταποκριθεί, εκ του ασφαλούς, στην οδηγία της ΕΕ (2013/59/Euratom), που την υποχρεώνει έως το έτος 2018 να έχει εθνικό επίπεδο αναφοράς για το ραδόνιο στην κατοικία, με μέση ετήσια συγκέντρωση <300 Bq/m^3.

Εν τω μεταξύ, σύμφωνα με την UNSCEAR (2008),το μεγαλύτερο ποσοστό από την ετήσια δόση ακτινοβολίας, που απορροφά ο μέσος κάτοικος του πλανήτη οφείλεται στο ραδόνιο (47%),γι' αυτό και κατατάσσεται στην υψηλότερη κατηγορία καρκινογόνων παραγόντων.

Άρα, η παρούσα συνεργασία με το ΙΓΜΕ έχει για να διερευνήσει και αποσαφηνίσει πολλαπλούς στόχους και αποτελεί μια μικρή, πλην όμως, πρώτη προσέγγιση του θέματος για ολόκληρο το λεκανοπέδιο της Αττικής.

Τέτοια έρευνα επιβάλλεται σε περιοχές με μεγάλες ομάδες πληθυσμού, ιδιαίτερα όταν η ευρύτερη έκταση αποτελεί τεκτονικό βύθισμα, το οποίο έχει πληρωθεί από μεταγενέστερα ιζήματα, που δεν επιτρέπουν τον εντοπισμό των βαθιών ρηγμάτων του γεωλογικού υποβάθρου.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η ανάπτυξη της έρευνας άρχισε στο εργαστήριο και στον προαύλιο χώρο του ερευνητικού φορέα (ΙΓΜΕ) και συνεχίστηκε με συστηματικές μετρήσεις σε προγραμματισμένα σημεία (Εικ. 1),στην περιοχή του σχολείου μας. Ομάδες από 2-3 μαθητές/τριες αποτελούσαν 3-4 συνεργεία, τα οποία με τους επιβλέποντές υλοποιούσαν σε κάθε θέση τις παρακάτω μετρήσεις:

Εικόνα 1: Προγραμματισμός των σημείων όπου θα πραγματοποιηθούν οι ραδιομετρήσεις στο έδαφος της ευρύτερης περιοχής του Πρότυπου Γυμνασίου Αναβρύτων, σε δορυφορική εικόνα(αριστερά) και πανοραμική άποψη αυτής, από ΒΒΑ-ΝΝΔ (δεξιά).

1) των συντεταγμένων της θέσεως μέτρησης με συσκευή GARMIN eTrex Vista,
2) της ακτινοβολίας γ ευρύτερα της θέσεως μέτρησης,
3) της συνολικής επιβάρυνσης των ακτινοβολιών α, β και γ, της ισοδύναμης δόσης και του ρυθμού δόσης,
4) του ραδόνιου και του θορονίου.

Για τη μέτρηση του ραδόνιου-θορονίου του εδάφους χρησιμοποιήθηκε όργανο «RTM-1688-2» της Sarad (Εικ. 2),με κατάλληλο εξοπλισμό για την αναρρόφηση αέρος του εδάφους, από ενσωματωμένη αντλία της συσκευής, σε θάλαμο 130 ml (0,25 l/min). Η ενεργότητα του ραδονίου μετρείται με ανιχνευτή ημιαγωγού, μέσω των βραχύβιων θυγατρικών του (Po-218) και καταγράφεται σε Bq/m^3 μαζί με τη θερμοκρασία και την ατμοσφαιρική πίεση (Bq/m^3, °C, mbar, στο SI και pCi/l, °FinHg στο US). Η ισορροπία μεταξύ διασπάσεων ραδονίου και δραστηριότητας Po-218 στον ανιχνευτή επέρχεται μετά από περίπου 5 χρόνους υποδιπλασιασμού, δηλ. μετά από 15 min περίπου, αφού ο χρόνος ημιζωής του Po-218 είναι 3,05 min. Το όργανο λειτουργεί συνεχώς ή διακοπτόμενα για κάθε διάστημα ολοκλήρωσης (5 λεπτών), με την ισορροπία μεταξύ της συγκέντρωσης του θορονίου και της δραστηριότητας στον

ανιχνευτή να επέρχεται άμεσα, διότι ο θυγατρικός του πυρήνας (το Po-216) έχει χρόνο ημιζωής <1 sec. Συνοπτικά, πριν από κάθε μέτρηση γίνεται : 1) άντληση για 15 min περίπου καθαρού αέρα, 2) διείσδυση του δειγματολήπτη στο έδαφος με σφύρα, σε βάθος 50cm περίπου, 3) σύνδεση με σωλήνα PVC του δειγματολήπτη και της εισόδου της συσκευής, 4) άντληση αέρα για περίπου 5 min και γεφύρωμα του κυκλώματος, δηλ. σύνδεση εισόδου-εξόδου, 5) μετρήσεις 5λεπτες έως την πτωτική τιμή, που μπορεί να είναι η 2η έως η 7η ή 8η μέτρηση, με τελική τιμή το μέσο όρο αυτών.

Εικόνα2: Αναλυτής ραδονίου-θορονίου «RTM-1688-2»,Sarad (πάνω αριστερά), σπινθηρόμετρο «SPP2», Saphymo-Stel (πάνω δεξιά), αυτόματος ανιχνευτής «Radiagem 2000» και εξωτερικοί φωρατές «SABG 15» και «SG-2R», Canberra (κάτω).

Για τη μέτρηση της ακτινοβολίας γ στην ευρύτερη θέση, χρησιμοποιήθηκε σπινθηρόμετρο «SPP2» της Saphymo-Stel, που διαθέτει ανιχνευτή NaI (Tl) 1,5"X1", υψηλής ευαισθησίας με κατώτερο όριο ενεργότητας 30 KeV, γρήγορο χρόνο απόκρισης και5 κλίμακες μέτρησης 150-500-1.500-5.000-15.000 c/s. (Εικ. 2).

Η ισοδύναμη δόση μετρήθηκε με όργανο «Radiagem 2000»,που διαθέτει ανιχνευτή Geiger-Müller,με ακρίβεια ανάγνωσης ≤±15%, εύρος ενεργότητας 40KeV-1,5MeV και εύρος μετρήσεων 0,1 μSv/h-100mSv/h (Εικ.2).

Για το ρυθμό δόσης έγινε συνδυασμός του «Radiagem 2000» με τον εξωτερικό φωρατή «SG-2R», που διαθέτει σπινθηρόμετρο NaI 2"X2", με εύρος μετρήσεων 0,01-50 nSveq/h κατά τη διάρκεια ανίχνευσης ενός φάσματος φωτονίων γάμα (Εικ.2).

Για τη μέτρηση της συνολικής επιβάρυνσης των ακτινοβολιών α, β και γ χρησιμοποιείται ο συνδυασμός του «Radiagem 2000» με τον εξωτερικό φωρατή «SABG 15»,που διαθέτει ανιχνευτή Geiger-Müller, ευαίσθητη επιφάνεια μετρήσεων 15,5 cm^2, κατώτερο όριο ενεργότητας 30 KeV και εύρος μετρήσεων από 1-1000 c/s (Σχ. 2). Ο επιθυμητός φωρατής και οι μονάδες μέτρησης επιλέγονται εύκολα, όπως και ο προγραμματισμός για το μέσο όρο 100 μετρήσεων.

Η δημιουργία των στατιστικών πινάκων και διαγραμμάτων έγινε στο excel, ενώ για τη δημιουργία των χαρτών χρησιμοποιήθηκε λογισμικό ESRI ArcGIS v.10, όπου μια επιφάνεια στο γεωγραφικό χώρο είναι ένα συνεχές πεδίο τιμών, οι οποίες διαφέρουν ως προς τη χωρική τους θέση και καλούνται χωρομεταβλητές. Η δημιουργία αυτή των χαρτών ακολουθεί στατιστικά μοντέλα όπου γίνεται μοντελοποίηση των φαινομένων που μεταβάλλονται συνεχώς στο χώρο και βασίζονται στη διαδικασία της χωρικής παρεμβολής (interpolation) (Κουτσόπουλος, 2006), με τη γεωστατιστική μέθοδο χωρικής συσχέτισης (kriging). Η γεωστατιστική μέθοδος Kriging, επιτυγχάνει την εκτίμηση των τιμών των μεταβλητών σε θέσεις που δεν ελήφθησαν δείγματα και έτσι προβλέπει τις τιμές για τη δημιουργία μίας επιφάνειας, όπως και στοιχεία για την ακρίβεια της πρόβλεψης (Δήμου, 2010).

ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στον Πίνακα 1 δίδονται τα στατιστικά περιγραφικά ραδιολογικά δεδομένα(μικρότερη, μεγαλύτερη τιμή, μέσος όρος, τυπική απόκλιση και συντελεστής μεταβλητότητας),από τις μετρήσεις στην επιφάνεια του εδάφους της ευρύτερης περιοχής του Πρότυπου Γυμνασίου Αναβρύτων.

Το ραδόνιο και το θορόνιο ξεχωρίζουν με τους υψηλούς συντελεστές μεταβολής (65% και 58%),που δηλώνουν μεγάλη ανομοιογένεια. Οι «σχετικά» υψηλές τιμές του ραδόνιου(μέγιστη τιμή 4502 Bq/m^3), δεν παρουσιάζουν καμία σχέση με την εκπομπή ακτινοβολίας α, β και γ από το τοπικό περιβάλλον (συντελεστές συσχέτισης μηδενικοί έως αρνητικοί, από r=0,27 έως r=-0,05).

Ο ρυθμός δόσης και η ισοδύναμη δόση διαφοροποιούνται ελαφρά, αλλά εξαρτώνται αποκλειστικά από το πεδίο εκπομπής (η μέτρηση του ραδονίου-θορονίου προϋποθέτει άλλη διάταξη),το οποίο παρουσιάζεται με χαμηλή ακτινοβολία γ (10 έως 25 c/s SPP2) και «σχετικά» ομοιογενές (μικρή ανομοιογένεια με συντελεστή μεταβολής από 17% έως 24%).

Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία στην περιοχή μελέτης μετρήθηκε με 96 τιμές(24 θέσεις μέτρησηςΧ4 μονάδες),για τη συνολική επιβάρυνση των α, β, γ ακτινοβολιών και την ακτινοβολία γ της ευρύτερης θέσεως. Όλες οι τιμές είναι πάρα πολύ χαμηλές και μικρότερες από αντίστοιχες άλλων περιοχών της χώρας ,όπου αποτελούν το 82% έως το 97% αυτών(Κούκουλης Α., 2016 a-b).

Αυτό μπορεί να ερμηνευτεί ως το αποτέλεσμα : α) των τοπικών εδαφογενετικών διεργασιών, με υλικά διάβρωσης αποκλειστικά από το όρος Πεντέλη, που έχουν χαμηλό περιεχόμενο σε ουράνιο-θόριο, β) τις μηδενικές διεργασίες δημιουργίας δευτερογενούς ουρανίου-θορίου, λόγω του μικρού χρόνου δράσης και του χαμηλού ανάγλυφου, που ισοδυναμούν με μικρή επίδραση στην επιφανειακή και υπόγεια απορροή και γ) τη μηδενική ανθρώπινη επιβάρυνση.

ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΓΥΜΝΑΣΙΟ ΑΝΑΒΡΥΤΩΝ									
Μέγεθος	Ισοδ. Δόση	Συνολική επιβάρυνση			Ρυθμός Δόσης		Επιβάρυνση γ	Ραδόνιο	Θορόνιο
Μονάδες	μSv/h	Bq/cm2	c/s	Bq(eq)	nSv/h	Kc/s	c/s (SPP2)	Bq/m3	Bq/m3
Ελάχ. τιμή	0,02	0,31	0,59	4,24	508	801	10	336	70
Μέγ.τιμή	0,11	0,54	1,05	8,16	1310	2000	25	4502	2926
Μέσος όρος	0,05	0,41	0,76	5,92	943	1441	17	2005	1148
Τυπ. Απόκλ.	0,02	0,07	0,13	1,00	219	328	4	1307	662
Σ.μεταβολής	46%	17%	17%	17%	23%	23%	24%	65%	58%

***Πίνακας 1** :Περιγραφικά ραδιολογικά στατιστικά στοιχεία (ελάχιστη, μέγιστη τιμή, μέσος όρος, τυπική απόκλιση και συντελεστής μεταβολής) από 6 ραδιολογικά μεγέθηκαι 9 μονάδες*

(ισοδύναμη δόση, συνολική επιβάρυνση ακτινοβολιών α, β και γ σε 3 μονάδες, ρυθμός δόσης σε 2 μονάδες, ακτινοβολία γ ευρύτερα της θέσεως, ραδόνιο και θορόνιο),από το έδαφος της ευρύτερης περιοχής του Πρότυπου Γυμνασίου Αναβρύτων.

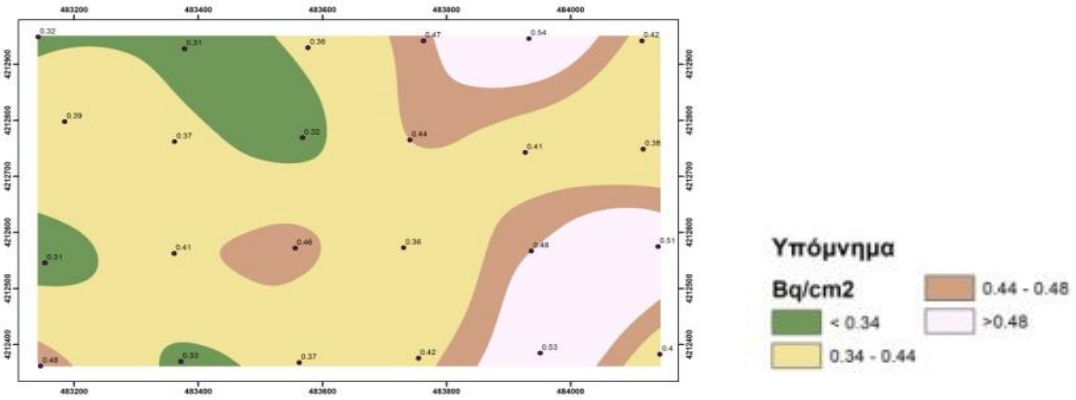
Σε αντίθεση, οι συγκεντρώσεις ραδονίου σε συγκεκριμένες δομές με εμπλουτισμούς >2.900 Bq/m^3, που αποτελούν το 29% του πληθυσμού παρουσιάζουν πλήρη αναντιστοιχία με το πολύ φτωχό σε U-Th τοπικό περιβάλλον, με αρνητικούς, μέτριους έως μηδενικούς συντελεστές συσχέτισης (r=-0,59 έως r=-0,05), από το οποίο δεν μπορεί να προέρχονται και να παράγονται. Επομένως οι συγκεντρώσεις αυτές του ραδονίου, κατά το μεγαλύτερο ποσοστό, οφείλονται σε εμπλουτισμό του εδάφους από διαρκή τροφοδοσία ραδονίου βαθύτερων οριζόντων του υποβάθρου, δια μέσου μη ορατών ρηγμάτων από την επιφάνεια του εδάφους. Τα ρήγματα αυτά, εάν κρίνουμε από τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του ραδονίου που είναι <5.000 Bq/m3,δεν δείχνουν να είναι μεγάλης τάξεως ρήγματα (1^{ης} ή 2^{ης}τάξεως),αλλά υποδεέστερα ρήγματα 3^{ης}, 4ης ή κλπ τάξεως.

Οι τιμές του ρυθμού δόσης (Σn=48, δηλ. 24 θέσεις μέτρησης Χ2 μονάδες) κυμαίνονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα, με μέτρια έως δυνατή σχέση με το τοπικό περιβάλλον (r=0,47 έως r=0,62) και σε σχέση με παρόμοιες μετρήσεις αστικών και περιαστικών περιοχών της χώρας αποτελούν το 71% έως το75% αυτών(Κούκουλης Α., 2016 a-b).

Ειδικά η ισοδύναμη δόση, που έχει σχέση με την προσλαμβάνουσα ακτινοβολία από τον άνθρωπο, παρουσιάζει μεγάλη ανομοιογένεια (σ/χ=46% ή αν εξαιρεθεί μια απομονωμένη τιμή των 0,11 μSv/hσ/χ=37%), με μηδενική έως αρνητική σχέση με το τοπικό περιβάλλον (r=0,01 έως r=-0,25) και μικρή σχέση με το ραδόνιο (r=0,22), κάτι που πρέπει να διευρυνθεί περαιτέρω, παρόλο που οι τιμές της κυμαίνονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα και αποτελούν μόνο το 22% περίπου παρόμοιων μετρήσεων αστικών και περιαστικών περιοχών της χώρας (Κούκουλης Α., 2016 a-b).

Για λόγους οικονομίας χώρου, από τα αποτυπώματα της χωρικής κατανομής των ραδιολογικών μεγεθών και μονάδων παρουσιάζονται τα αποτυπώματα για : α) τη συνολική επιβάρυνση των

ακτινοβολιών α, β και γ, σε Bq/cm^2 (Εικ. 3),β) την ισοδύναμη δόση, σε μSv/h (Εικ. 4)και γ) το ραδόνιο, σε Bq/m^3 (Εικ. 4).



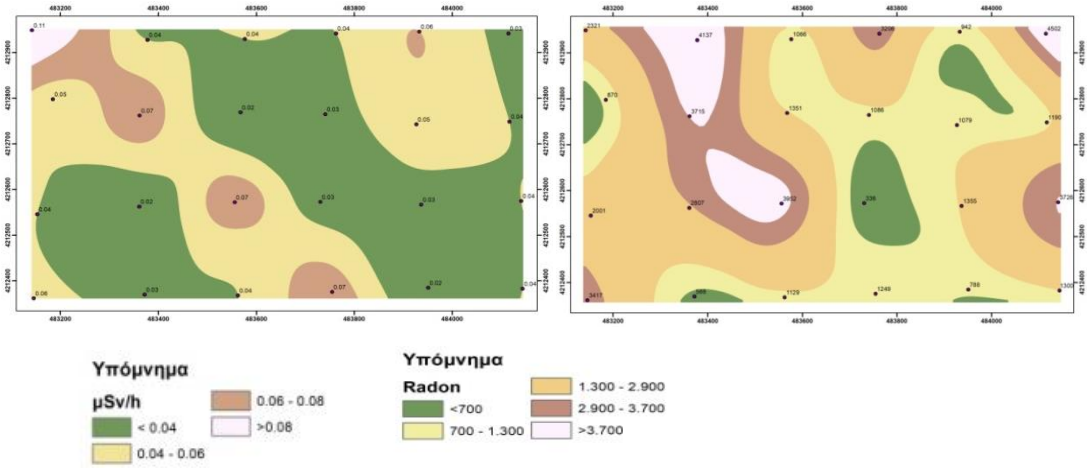
Εικόνα 3: Αποτύπωμα χωρικής κατανομής για τη συνολική επιβάρυνση των ακτινοβολιών α, β και γ, σε Bq/cm^2, με τις τιμές στα σημεία μέτρησης (από 0,31 έως 0,53Bq/cm^2) και τις γεωγραφικές συντεταγμένες (x,y), για την ευρύτερη περιοχή, από (483200,4212400) έως (484000,4212900).

Οι κλάσεις όλων των μεγεθών δημιουργήθηκαν από γραμμικά και αριθμητικά στατιστικά στοιχεία (διάγραμμα ευθείας Henry,καμπύλη συχνοτήτων, αριθμητικό υπολογισμό, χ±σ, χ±2σ, κλπ.).Οι πληροφορίες των κλάσεων που συνδέονται και προσδιορίζουν περισσότερο ή λιγότερο τα ίδια φαινόμενα (δηλαδή την εκπομπή ακτινοβολιών από τις διάφορες περιεκτικότητες των ραδιενεργών στοιχείων U, Th, Ra, K, Rn, κλπ. των τοπικών γεωλογικών σχηματισμών), επιτρέπουν να προσδιορίσουμε τις ιδιότητες του υποβάθρου και του εδάφους, από τις διάφορες επιρροές της τεκτονικής, τον κατακερματισμό των πετρωμάτων, την περατότητα, το πορώδες, την περιεκτικότητα σε άργιλο του εδάφους, τα υπόγεια νερά, κλπ..

Πρώτιστα όμως, τα ποσοστά διακύμανσης των διαφόρων ραδιολογικών μεγεθών συμβάλουν στο να εκτιμήσουμε το βαθμό της περιβαλλοντικής τους διαθεσιμότητας, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό, σε συνδυασμό με την «ποσοτικοποίηση» των γεωλογικών φαινομένων του υποβάθρου και του εδάφους (ρήγματα, περατότητα, κλπ.), λόγω της συσχέτισής των με τα ποσοτικά ραδιολογικά μεγέθη.

Πρόσθετα, οι παραπάνω συσχετίσεις γίνονται για αποστάσεις 250 m περίπου, κάτι που είναι πολύ χρήσιμο για την αντιμετώπιση των προβλημάτων του μηχανικού, που πρέπει να γνωρίζει καλά το υπόβαθρο και τα μη ορατά ρήγματα, κάτω από το έδαφος του αστικού και περιαστικού περιβάλλοντος.

Άρα, το μεγαλύτερο ενδιαφέρον της ραδιολογικής μελέτης παρουσιάζουν οι λεκάνες αστικών και περιαστικών περιοχών, που αποτελούν πλήρωση βυθισμάτων από ιζήματα και δεν επιτρέπουν τον προσδιορισμό των ρηγμάτων κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.



Εικόνα 4: Αποτύπωμα χωρικής κατανομής για :α) την ισοδύναμη δόση σε μSv/h (αριστερά) και β) το ραδόνιο σε Bq/cm^3 (δεξιά), με τις τιμές στα σημεία μέτρησης (από 0,02-0,11μSv/h και 336-4.502Bq/cm^3, αντίστοιχα) και τις γεωγραφικές συντεταγμένες (x,y), για την ευρύτερη περιοχή,από (483200,4212400) έως (484000,4212900).

Η αντιπαραβολή των αποτυπωμάτων της χωρικής κατανομής των διαφόρων ραδιολογικών μεγεθών δεν γίνεται τυχαία και πρέπει πάντα να συμβάλει σε μια αποδεκτή ερμηνεία των ραδιογεωλογικών φαινομένων και κατά μεγάλο ποσοστό αναμενόμενη. Εάν π.χ. οι εκπεμπόμενες ακτινοβολίες από την επιφάνεια του εδάφους εκφράζουν τη σχετική ανεπάρκεια σε ουράνιο, θόριο, κάλιο, κλπ., οι δομές εμπλουτισμού σε ραδόνιο εκφράζουν βαθύτερα μη ορατά ρήγματα, δια μέσου των οποίων τροφοδοτούνται, από βαθύτερους ορίζοντες του υποβάθρου.

Η συμβατότητα των παραπάνω επιβεβαιώνεται σε γνωστά και χαρτογραφημένα ρήγματα, όπου οι υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου εντοπίζονται πάνω από τα ρήγματα, ακολουθώντας τις μεταβολές της διεύθυνσης, της μετατόπισης, της κλίσης τους, κλπ. (Κούκουλης Α., 2016a-b).

Ιδιαίτερη είναι επίσης η κατανομή του θορονίου, που διαφοροποιείται ελαφρά σε σχέση με αυτή του ραδονίου και η διαφοροποίηση αυτή, συνδέεται περισσότερο με τις φυσικοχημικές ιδιότητες του θορονίου, παρά με την τεκτονική και τη γεωλογία της περιοχής. Κάτι το οποίο έχει τη σημασία του, αλλά προϋποθέτει περαιτέρω διερεύνηση και μελέτη, για την εξαγωγή πιθανών ωφέλιμων ερμηνειών και συμπερασμάτων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Από την παρούσα εργασία στο έδαφος της ευρύτερης περιοχής του Πρότυπου Γυμνασίου Αναβρύτων για τον έλεγχο της ραδιενέργειας, προκύπτουν πολλαπλά αποτελέσματα, τα οποία σε συνδυασμό και σύγκριση με άλλα αποτελέσματα στο έδαφος Αστικών και Περιαστικών περιοχών της χώρας (Κούκουλης Α., 2016a-b), δίνουν τη δυνατότητα για μια πιο ολοκληρωμένη εκτίμηση της χωρικής μεταβολής και διαθεσιμότητας των παρακάτω ραδιολογικών μεγεθών που μετρήθηκαν :

1) Οι εκπεμπόμενες ακτινοβολίες α, β και γ στην επιφάνεια του εδάφους παρουσιάζουν διακυμάνσεις, με τις χαμηλότερες τιμές (0,31-0,44 Bq/cm^2) να εμφανίζονται στα βορειοδυτικά, δυτικά και κεντρικά της περιοχής μελέτης και τις μεγαλύτερες, στο βόρειο-νότιο-ανατολικό κομμάτι της περιοχής (0,44-0,54 Bq/cm^2). Το σύνολο των ακτινοβολιών αυτών είναι γενικώς σε πολύ χαμηλά επίπεδα, με μέσους όρους μικρότερους από άλλες περιοχές της χώρας (0,41 έναντι 0,44 Bq/cm^2 ή 5,92 έναντι 6,75 Bq και 0,76 έναντι 0,83 c/s, αντίστοιχα).
2) Ο ρυθμός δόσης είναι επίσης σε πολύ χαμηλά επίπεδα, με μέσους όρους μικρότερους από άλλες περιοχές της χώρας (943 έναντι 1.169,5 nSv/h και 1,44 έναντι 2.01 Kc/s, αντίστοιχα).
3) Η στάθμη της υπόγειας συγκέντρωσης ραδονίου σχηματίζει συγκεκριμένη δομή στο βορειοδυτικό κομμάτι της περιοχής μελέτης, ΒΔ/ΝΑκής διεύθυνσης, που οριοθετείται από

«σχετικά» υψηλές τιμές ραδονίου (2.900-4.137 Bq/cm^3), περιβαλλόμενες από χαμηλές συγκεντρώσεις (336 έως 1.300 Bq/cm^3). Σημειακά και στα όρια της περιοχής μελέτης εμφανίζονται υψηλές τιμές ραδονίου (3.206, 3.417, 3.726 και 4.502 Bq/cm^3 στο βόρειο κεντρικό, το ΝΔκό, το ανατολικό-κεντρικό και το ΒΑκό κομμάτι, αντίστοιχα), που απαιτούν επιπλέον διερεύνηση, αν και γενικώς οι συγκεντρώσεις του ραδονίου είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα, με μέσο όρο μικρότερο από άλλες περιοχές της χώρας (2.005 έναντι 9.322Bq/cm^3, αντίστοιχα).

4) Η στατιστική μελέτη και η κατασκευή των χαρτών με τη μέθοδο Kriging επεκτάθηκε : α) για το ρυθμό δόσης, β) την ακτινοβολία γ στην ευρύτερη θέση μέτρησης και γ) το θορόνιο. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αναπαριστούν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο (μικρότερα σφάλματα) την εικόνα της περιοχής μελέτης, αναφορικά με τα παραπάνω ραδιολογικά μεγέθη και τη σχέση τους με τα τοπικά γεωλογικά φαινόμενα.
5) Η χαμηλή εκπομπή των ακτινοβολιών του εδάφους συνδέεται με τις τοπικές εδαφογενετικές διεργασίες και την ασθενή επίδραση ευρύτερων γεωδυναμικών διεργασιών.
6) Δεν υπάρχει απ’ ευθείας σχέση μεταξύ των ακτινοβολιών του εδάφους και των συγκεντρώσεων ραδονίου. Αντίθετα οι τελευταίες εντοπίζονται σε περιοχές με τη χαμηλότερη εκπομπή των ακτινοβολιών α, β και γ του εδάφους.
7) Η συγκέντρωση ραδονίου σε «σχετικά» υψηλά επίπεδα στο έδαφος της ευρύτερης περιοχής, διευκολύνεται από υποδεέστερα ρήγματα της περιοχής, τα οποία συνδέουν το υπόβαθρο της περιοχής με το έδαφος, δια μέσω των οποίων το ραδόνιο απελευθερώνεται από «σχετικά» μικρού βάθους ορίζοντες του υποβάθρου.
8) Με τον εντοπισμό του ραδονίου στην παραπάνω δομή έγινε διακριτό εντός του χάρτη της περιοχής μελέτης, ένα μη ορατό ρήγμα από την επιφάνεια του εδάφους, διεύθυνσης ΒΒΑ-ΝΝΑ, συνολικού μήκους 750 m και πλάτους 250m περίπου.
9) Ο κίνδυνος των ανθρώπων από την έκθεση στην ευρύτερη περιοχή του σχολείου, εκτιμήθηκε κατά προσέγγιση, με την ισοδύναμη δόση για την κατοικία, σύμφωνα με την Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ, η οποία για διάρκεια ζωής 70 ετών σε αυτή δίνει κίνδυνο θανάτου από καρκίνο του πνεύμονα1-5%,γιασυγκέντρωση ραδονίου ίση

με150 Bq/cm^{3}ή ισοδύναμη δόση 2rem/χρόνο, δηλ. 2,2831 μSv/h. Αν θεωρούσαμε την κατοικία από φυσικά υλικά της περιοχής, θα μπορούσαμε να συσχετίσουμε τον κίνδυνο από το έδαφος της ευρύτερης περιοχής του σχολείου (προσλαμβάνουσα δόση), με ένα πολύ μικρό κλάσμα του 1-5% (μέσος όρος ισοδύναμης δόσης περιοχής 0,0446/2,2831 μSv/h= 1/51 περίπου),ήτοι 0,0195-0,0977% ή 0,195-0,977‰. Δηλαδή ο κίνδυνος θανάτου από την προσλαμβάνουσα δόση του εδάφους είναι ένα μικρό ποσοστό, 2-10 περίπου κάτοικοι στους 10.000 κατοίκους, μετά από διάρκεια ζωής 70 ετών.

10) Η συμβολή της ραδιογεωλογικής έρευνας είναι πολύτιμη και για άλλες έρευνες, όπως : α) της ΕΕΑΕ, για τον έλεγχο του ραδονίου στον εσωτερικό χώρο των κατοικιών, ειδικά όταν βρίσκονται πάνω σε έδαφος με δομές υψηλών συγκεντρώσεων ραδονίου, β) της ιατρικής, τόσο για την κατανόηση των αιτιών και της συχνότητας παθήσεων που συνδέονται με τα παραπάνω στοιχεία, όσο και στην πρόληψη των παθήσεων αυτών, β) της αντισεισμικής προστασίας, με την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για αστικό ιστό (κατοικίες, σχολεία, νοσοκομεία, κλπ.), γ) της γεωλογίας, συνδέοντας το ραδόνιο και την ακτινοβολία των γεωλογικών σχηματισμών, με τις ιδιότητες αυτών (πετρολογικός έλεγχος ή κατακερματισμός των πετρωμάτων),του εδάφους (πορώδες, περατότητα, κλπ.) και των ρηγμάτων, που συνδέονται με διάφορα βάθη του υποβάθρου.

11) Η έρευνα αποκτά ευρύτερη προοπτική καθώς προωθεί την διεπιστημονικότητα, δηλαδή την συνεργασία επιστημόνων που ειδικεύονται σε διαφορετικούς τομείς για τη διεύρυνση της γνώσης σε νέες προοπτικές, με κοινωνικά οφέλη ιδιαίτερα σημαντικά, που βελτιώνουν την ανθρώπινη ζωή. Γι’ αυτό, προτείνεται να καθιερωθεί πανελλαδικά, απ’ όλα τα σχολεία και τους αρμόδιους φορείς.

12) Όσον αφορά το σχολείο μας, προγραμματίζουμε τη διεύρυνση των εκπαιδευτικών στόχων, με την εμπλοκή στη βιωματική έρευνα και άλλων μαθητών, υπό την επιστημονική συνεργασία και επίβλεψη του ερευνητικού φορέα, σε πιο σταθερή βάση μετην επέκταση της έρευνας, εκεί όπου διαπιστώθηκαν σημειακές μέγιστες συγκεντρώσεις ραδονίου, στα όρια της παρούσας περιοχής μελέτης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται στον επιβλέποντα του ΙΓΜΕ κ. Αθανάσιο Κούκουλη και τη Δ/ντρια του Σχολείου κα. Γεωργία Ρουμπέα για την πολύτιμη βοήθεια που μας παρείχαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας και για το κλίμα συνεχούς συνεργασίας που αναπτύχθηκε ανάμεσά μας.

Θερμές ευχαριστίες οφείλουμε στον κ. Γεν. Δ/ντή του ΙΓΜΕ, για την έγκριση και υποστήριξη της παρούσας συνεργασίας, καθώς και στους συντελεστές του έργου για την άριστη συνεργασία, τον κ. Α. Φωτιάδη και την κα Μ. Στεφούλη από τη Δ/νση Γεωλογικής Χαρτογράφησης, για την εκτύπωση των ορθοφωτοχαρτών (γεωλογικού, τεκτονικού και δειγματοληψίας) και την κα Α. Ζερβάκου, από το εργαστήριο Ψηφιακής Χαρτογραφίας της ίδιας Δ/νσης,για την πολύτιμη ψηφιακή επεξεργασία και εκτύπωση των χωρικών χαρτών κατανομής, από όλα τα ραδιολογικά μεγέθη που μετρήθηκαν.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Βουγιουκαλάκης, Γ., Βλάχου, Μ., και Καλιοτζής, Γ., 2000. *Μετρήσεις σε αέρια εδάφους στο λεκανοπέδιο Αττικής κατά το σεισμό του Σεπτεμβρίου 1999*, Αθήνα , ΙΓΜΕ, σ. 8.

[2] Canberra, Manuel utilisateur, Radiamètre portative, Radiagem-2000, code 76687 (2006), *Manuel utilisateur, Sonde gamma, SG-2R, code 75861 (2006), Manuel utilisateur, Sonde alpha, beta, gamma,* SABG 15,code 75287 (2004).

[3] ΕΕΑΕ (Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας), Αγ. Παρασκευή, Αθήνα, http://www.eeae.gr, Ελληνικός Κανονισμός Ακτινοπροστασίας, (2001). ΦΕΚ 216Β/5-3-2001.

[4] ΕΕ (Ευρωπαϊκή Επιτροπή), (2013). Οδηγία 2013/59/Euratom.

[5] IAEA (International Atomic Energy Agency), ICRP (Διεθνής Επιτροπή Ακτινοπροστασίας), (1999). *Προτάσεις για την «Προστασία του πληθυσμού από την έκθεση στο ραδόνιο μέσα στα κτίρια».*

[6] Ioannides K., Papachristodoulou C., K. Stamoulis K., Karamanis D., Pavlides S., Chatzipetros A., Karakala E. 2003. *Soil gas radon a tool for exploring active fault zones. Applied Radiation and Isotopes,* 59, 205-213.

[7] Κούκουλης Α., Καραγεωργίου Ε.Δ., 2008 (a-b-c-d) *Μετρήσεις-Αξιολόγηση ακτινοβολιών σε αστικές και περιαστικές περιοχές Ναυπλίου Ν. Αργολίδος-Σπάρτης Ν. Λακωνίας-Θρακομακεδόνων Ν. Αττικής-Δράμας Ν. Δράμας, Εκθέσεις ΙΓΜΕ*, Αθήνα.

[8] Koukoulis A., Karageorgiou E. D., 2010. *Radon, Geo-information for the planning of urban-suburban regions. The case of Nafplion city*, Greece, 12° Διεθνές Συνέδριο της ΕΓΕ, Πάτρα, 1457-1464.

[9] Κούκουλης Α.,2016 (a-b). *Πρωτοβάθμια ραδιολογική έρευνα υπο γεωλογικό έλεγχο στο Βόλο, Έκθεση ΙΓΜΕ, Αθήνα, σ. 57. Πρωτοβάθμια ραδιολογική έρευνα υπό γεωλογικό έλεγχο στην Ηγουμενίτσα,* Έκθεση ΙΓΜΕ, Αθήνα, σ. 53.

[10] Μητρόπουλος, Π., Notsu, K., Δελήμπασης, Ν., Κακαβάς, Ν. και Βουδούρης, Π. 2004. *Πρόγνωση σεισμικών δονήσεων στην περιοχή της βόρειας Εύβοιας με βάση τις μεταβολές της περιεκτικότητας του ραδονίου στα υπόγεια νερά.* Δελτίο της Ε.Γ.Ε. τομ. XXXVI/3, Πρακτικά, 10° Διεθνές Συνέδριο, Θεσσαλονίκη, 1356-1360.

[11] UNSCEAR (United Nations Scientific Committee for the Effects of Atomic Radiation), 2008. *Πηγές έκθεσης σε ακτινοβολία παγκοσμίως (δόσεις σε mSv*). ReportVol. I, AnnexB.