

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα έκθεση αποτελεί το τελικό προϊόν του ερευνητικού προγράμματος που ανετέθη από τον ΟΑΣΠ στο Τμήμα Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Αθηνών. Το ερευνητικό αυτό πρόγραμμα με τίτλο: **"Μελέτη σχέσης μεταξύ σεισμικής δραστηριότητας-υδροθερμικής δράσης (κύρια υποθαλάσσιας), ηφαιστειότητας και τεκτονικών δομών στο ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου"**, υλοποιήθηκε σε συνεργασία των τομέων Οικονομικής Γεωλογίας και Γεωχημείας, Γεωφυσικής και Γεωθερμίας, Εφαρμοσμένης-Τεκτονικής Γεωλογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Αθηνών σε συνεργασία με τον τομέα Γεωλογίας- Φυσικής Γεωγραφίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Στόχος του ερευνητικού αυτού προγράμματος ήταν ο συσχετισμός των αποτελεσμάτων των μεταβολών των σεισμικών μετρήσεων με τα αποτελέσματα των μεταβολών των φυσικοχημικών μετρήσεων των υδροθερμικών νερών-ρευστών, του θαλασσινού νερού, των αερίων των ατμίδων κλπ. που υλοποιήθηκαν παράλληλα σε χρονικές περιόδους το 2001 και το 2003, με κοινές μετρήσεις, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις στους μόνιμους σταθμούς παρακολούθησης του Αγ.Νικολάου στην Π.Καμένη και των σταθμών του ΙΜΠΗΣ(Ινστιτούτο Μόνιμης Παρακολούθησης Ηφαιστείου Σαντορίνης) και η εξαγωγή συμπερασμάτων που θα οδηγήσουν στον συσχετισμό της σεισμικής με την ηφαιστειακή δράση και κατά συνέπεια ο εντοπισμός παραμέτρων πρόβλεψης σεισμικής δράσης εξ' αιτίας συνδυασμένης ηφαιστειακής –υδροθερμικής και τεκτονικής δράσης.

Είναι γνωστό και καλά τεκμηριωμένο ότι τα ηφαίστεια προκαλούν επίσης σεισμούς. Οι ηφαίστειο-τεκτονικοί σεισμοί πιστεύεται ότι αντιπροσωπεύουν το εύθραυστο σύστημα ρηγματώσεων ως αποτέλεσμα της παραμόρφωσης που προκαλείται από τις ηφαιστειακές διαδικασίες.

Συγκεκριμένα, στη Σαντορίνη, αναφέρεται πρόσφατη σεισμική δραστηριότητα (Μάρτιος 1992, Ιούνιος 2003) με μία σειρά σεισμών μεγέθους  $M=2.4-5.2$ , προερχόμενη από τη ΝΑ πλευρά της νήσου, καθώς και στην περιοχή της Παλαιάς και Νέας Καμένης κατά την περίοδο 1975-1976, με σεισμούς

μεγέθους  $M_3=4.1-4.9$ , πιθανότατα εξ' αιτίας εκτεταμένης υποθαλάσσιας υδροθερμικής δραστηριότητας, σε συνδυασμό με υπάρχουσες ενεργές νεοτεκτονικές δομές. Η υδροθερμική δραστηριότητα, κύρια η υποθαλάσσια, συνδέεται με την λειτουργία μεγάλης έκτασης υδροθερμικού συστήματος, το οποίο μέσω της έντονης κυκλοφορίας των υδροθερμικών ρευστών μεταφέρει σημαντικές ποσότητες θερμότητας και οδηγεί όχι μόνο σε μεταλλογένεση αλλά και σε σεισμική δραστηριότητα.

Ειδικότερα στο χώρο της Μεσογείου η βύθιση της ωκεάνιας σύστασης Αφρικανικής πλάκας κάτω από την ηπειρωτικής σύστασης Ευρασιατική, έχουν ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ενεργών ηφαιστειακών τόξων στην Τυρρηνία θάλασσα και στο νότιο Αιγαίο και τη μεγάλη σεισμική δραστηριότητα. Το φαινόμενο αυτό πέραν των άλλων οδηγεί σε υψηλή ροή θερμότητας (υψηλή γεωθερμική βαθμίδα) κατά μήκος του ηφαιστειακού τόξου του Αιγαίου και έτσι έχουμε την λειτουργία εντόνων ρευμάτων μεταφοράς θερμότητας μέσω των υδροθερμικών ρευστών. Ενώ, όμως τα ηφαιστειακά συστήματα έχουν ερευνηθεί διεξοδικά, ορισμένες υποθαλάσσιες περιοχές με έντονη υδροθερμική δραστηριότητα άρχισαν να μελετώνται συστηματικά μόνο κατά την τελευταία δεκαετία. Η σχετικά πρόσφατη σεισμική δραστηριότητα της Σαντορίνης (1992-1993), η οποία πιθανά αποτελεί συνδυασμένο αποτέλεσμα έντονης υδροθερμικής δράσης και νεοτεκτονικών δομών, έδειξε την σημαντική έλλειψη μελετών τέτοιων συστημάτων, που είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε έντονα σεισμικά φαινόμενα. **Είναι αναγκαία επομένως και στην περίπτωση αυτή η πρόγνωση. Μια πρόγνωση που στην περίπτωση αυτή συνδέεται με την μελέτη της εξέλιξης της έντονης υδροθερμικής-ηφαιστειακής δραστηριότητας.**

Υπάρχουν σήμερα ισχυρές ενδείξεις ότι, στο ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου, η υδροθερμική δράση (υποθαλάσσια και μη), σε συνδυασμό με την ηφαιστειότητα και τις υπάρχουσες νεοτεκτονικές δομές, οδηγούν σε σεισμική δραστηριότητα η οποία μερικές φορές δεν είναι αμελητέα (σεισμοί 1952, 1975, 1992, 1993). Είναι πιθανόν στην ευρύτερη περιοχή του ηφαιστειακού τόξου του Αιγαίου να λειτουργούν τρία είδη σεισμικών φαινομένων: Τα καθαρά τεκτονικής προέλευσης σεισμικά φαινόμενα, τα ηφαιστειακής προέλευσης που σχετίζονται με της άνοδο του μαγματικού υλικού και τα υδροθερμικής προέλευσης σεισμικά φαινόμενα σε μορφή «σμήνους» που σχετίζονται με τις

διαρρήξεις του φλοιού. Παράλληλα, έχει αποδειχθεί, ιδιαίτερα στην νήσο Σαντορίνη, ότι υπάρχει σύνδεση μεταξύ σεισμικών φαινομένων οφειλόμενα στην ηφαιστειακή και την συνεπακόλουθη υδροθερμική δραστηριότητα με αλλαγές στο χημισμό του θαλασσινού νερού εξ αιτίας της απελευθέρωσης μεγάλου όγκου αερίων από τις υποθαλάσσιες διαρρήξεις-διαφυγές των υδροθερμικών ρευστών.

Στην ίδια περιοχή, εξ άλλου, έχουν καταγραφεί από τοπικά ψηφιακά μικροσεισμικά δίκτυα, κατά τη διάρκεια πειραμάτων στις αρχές της δεκαετίας του '90, μικροσεισμοί με μεγέθη  $0.5 < MS < 4.2$ . Οι μικροσεισμοί αυτοί εντοπίζονται είτε μέσα στην καλδέρα (και πιθανά συσχετίζονται με υδροθερμική δραστηριότητα), είτε στην περιοχή του Κολούμπου. Οι σεισμογόνες πηγές των μικροσεισμών αυτών είναι χαρακτηριστικές σε περιοχές ηφαιστειακής δραστηριότητας- στο κεντρικό τμήμα της καλδέρας της Σαντορίνης.

Αυτό μπορεί να αποτελεί ένδειξη ότι η σεισμική δραστηριότητα συνδέεται άμεσα με την ηφαιστειακή και υδροθερμική δραστηριότητα στη Σαντορίνη.

Στην τελική έκθεση του ερευνητικού προγράμματος παρουσιάζονται οι εργασίες, οι μετρήσεις, τα τελικά αποτελέσματα και η τελική σύνθεση των τριών επιμέρους ερευνητικών ομάδων που εργάσθηκαν από κοινού για την υλοποίηση του προγράμματος. **Η πρώτη ομάδα μελέτησε τις τεκτονικές-νεοτεκτονικές δομές στη Σαντορίνη** οι οποίες μπορούν σε συνδυασμό με ηφαιστειακά-υδροθερμικά γεγονότα να προκαλέσουν σεισμική δραστηριότητα. **Η δεύτερη ομάδα υλοποίησε το τμήμα του προγράμματος που αναφέρεται στην Γεωχημική-Υδροθερμική-Ηφαιστειακή έρευνα.**

Στα πλαίσια της έρευνας αυτής έγιναν περιοδικές δειγματοληψίες με στόχο φυσικό-χημικές μετρήσεις στο ηφαιστειακό σύμπλεγμα της Σαντορίνης. Πιο συγκεκριμένα οι περιοχές δειγματοληψίας περιλαμβάνουν τις θερμές πηγές της Παλαιάς και Νέας Καμένης (στις θέσεις Άγιος Νικόλαος και όρμος Αφρόεσσας αντίστοιχα), τις ατμίδες της Νέας Καμένης τη θερμή πηγή της Πλάκας και την εγκαταλελειμμένη πηγή του Χριστού, οι δύο τελευταίες στο δυτικό τμήμα της νήσου Θήρας. Στα πλαίσια υλοποίησης του προγράμματος αυτού υλοποιήθηκε η εγκατάσταση και λειτουργία σταθμού συνεχούς καταγραφής περιβαλλοντικών και γεωχημικών παραμέτρων στον όρμο Αγίου Νικολάου της Π. Καμένης όπου και η ομώνυμη πηγή. Ο σταθμός αυτός ήδη

εγκαταστάθηκε και λειτουργεί είναι δε συνδεδεμένος τηλεμετρικά με το ΙΜΠΗΣ, και τα Πανεπιστήμια Αθηνών και Θεσ/νίκης.

**Η τρίτη ερευνητική ομάδα από τον Τομέα Γεωφυσικής-Γεωθερμίας του Τμήματος Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Αθηνών υλοποίησε το σεισμολογικό τμήμα του προγράμματος.** Στα πλαίσια της σεισμολογικής έρευνας, εκτός από τη μελέτη βιβλιογραφικών δεδομένων ιστορικής και ενόργανης σεισμικότητας, πραγματοποιήθηκε ανάλυση πρωτογενών στοιχείων μικροσεισμικότητας που συλλέχθηκαν σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση πραγματοποιήθηκε με την εγκατάσταση δικτύου 6 σεισμογράφων (SANNET-2001) στην ευρύτερη περιοχή από τον Ιούνιο έως τον Νοέμβριο του 2001. Η δεύτερη φάση πραγματοποιήθηκε με την εγκατάσταση δικτύου 5 σεισμογράφων (SANNET-2003), που εγκαταστάθηκε στη Σαντορίνη από τον Μάρτιο έως και τον Αύγουστο του 2003.

Τα αποτελέσματα της ερευνητικής εργασίας των 3 ομάδων συνετέθησαν με στόχο να διερευνηθεί η πιθανή η σύνδεση της μεταβολής της σεισμικότητας η οποία οφείλεται σε ηφαιστειακή, υδροθερμική δράση σε συνδυασμό με ενεργές νεοτεκτονικές, δομές με μεταβολές βασικών φυσικοχημικών παραμέτρων όπως π.χ. οι μεταβολές της στάθμης της θάλασσας, του δυναμικού οξειδοαναγωγής (Eh), της ροής CO<sub>2</sub> στα υδροθερμικά ρευστά, του pH κ.λπ. **Είναι φανερό ότι η ύπαρξη μιας τέτοιας σύνδεσης, μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο πρόγνωσης σεισμικών φαινομένων που συνδέονται ηφαιστειακή και υδροθερμική δράση.**

Παρουσιάζονται επίσης και σειρά προτάσεων που αφορούν την μελλοντική παρακολούθηση βασικών παραμέτρων της ηφαιστειακής και υδροθερμικής δραστηριότητας σαν στοιχεία πρόγνωσης σεισμικών φαινομένων (κυρίως ηφαιστειακής προέλευσης) στην ευρύτερη περιοχή της Σαντορίνης,

Οι εργασίες υπαίθρου της πρώτης φάσης έρευνας ξεκίνησαν τον Ιούνιο του 2001 και αφορούσαν εγκατάσταση ψηφιακών σεισμογράφων, περιοδικές δειγματοληψίες νερών και αερίων από θερμές πηγές και ατμίδες, εγκατάσταση σταθμού συνεχούς καταγραφής γεωχημικών παραμέτρων θερμών νερών, και τέλος αναγνωριστική τεκτονική μελέτη του βορειοανατολικού τμήματος της Σαντορίνης. Οι εργασίες υπαίθρου της δεύτερης φάσης έρευνας πραγματοποιήθηκαν τον Απρίλιο του 2003 και αφορούσαν συνέχεια των εργασιών της πρώτης φάσης.

## ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Η εκδήλωση έντονης ηφαιστειακής δράσης σε μια περιοχή με γνωστή προϊστορία είναι ένα φαινόμενο προβλέψιμο. Είναι προβλέψιμο διότι πριν την εκδήλωση έντονων ηφαιστειακών φαινομένων παρατηρούνται σημαντικά πρόδρομα φαινόμενα όπως σμήνη μικροσεισμών, ασυνήθη αύξηση θερμοκρασίας, αύξηση της απελευθέρωσης αερίων, γεωμορφολογικές και γεωφυσικές μεταβολές (κύρια του βαρυτικού και μαγνητικού πεδίου). Στην περιοχή της Σαντορίνης έχουν διερευνηθεί συστηματικά, μεμονωμένα χαρακτηριστικά του ηφαιστειακού γεωτεκτονικού πεδίου κατά τη διάρκεια πλήθους πειραμάτων, με αποτέλεσμα να έχουμε σήμερα μια επαρκή αντιπροσωπευτική εικόνα. Παρόλη όμως τη μέχρι τώρα προσπάθεια, καταδεικνύεται η σημαντική έλλειψη συνδυασμένων μελετών, τέτοιων, που θα μπορούσαν να οδηγήσουν στη διερεύνηση του συσχετισμού και της αλληλεξάρτησης των παραμέτρων του ηφαιστειακού γεωτεκτονικού πεδίου, με απώτερο στόχο την εκπόνηση ενός συστήματος/μοντέλου πρόβλεψης και διαχείρισης. Πρόβλεψης, τόσο της γένεσης και εξέλιξης μιας πιθανά έντονης υδροθερμικής-ηφαιστειακής δραστηριότητας, όσο και του κινδύνου από μια τέτοια δραστηριότητα. Διαχείρισης, με σκοπό την ελάττωση των δυσμενών αποτελεσμάτων από μια τέτοια δραστηριότητα στον άνθρωπο και το περιβάλλον του. Με την παρούσα μελέτη έγινε ένα μικρό, αλλά πρώτο βήμα προς αυτήν την κατεύθυνση. Στόχος μας ήταν να καταγράψουμε για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα (περίπου 10 μηνών) τοπικούς σεισμούς και κάποια φυσικοχημικά μεγέθη του υδροθερμικού πεδίου και να τα συγκρίνουμε μεταξύ τους.

***Οι συγκρίσεις, παρότι έγιναν για δεδομένα που πήραμε σε ένα χρονικό διάστημα μόλις 10 μηνών, απέδωσαν συστηματική ποιοτική συσχέτιση μεταξύ των μελετηθέντων μεγεθών, ιδιαίτερα για την περίοδο του 2003, οπότε είχαμε τοπικά σεισμική έξαρση.***

**Ένα γενικότερο μοντέλο που ερμηνεύει τις παρατηρήσεις μας θα μπορούσε να είναι το εξής:**

**Αύξηση υδροθερμικής δραστηριότητας (π.χ. λόγω ανόδου μάγματος) →  
Αύξηση σμήνους μικροσεισμών → Αύξηση περιεκτικότητας μαγματικών**

αερίων στα ζεστά νερά( $\text{CO}_2, \text{H}^+, \text{Cl}^-, \text{CH}_4$  κλπ. )  $\rightarrow$  Περιβάλλον όξινο (μείωση pH) και αναγωγικό (μείωση Eh).

Αναλυτικότερα:

Όταν παρατηρείται αύξηση της ροής  $\text{CO}_2$  στα υδροθερμικά ρευστά (αποτέλεσμα συνήθως ανόδου του μάγματος) παρατηρείται παράλληλα ελάττωση του pH, ελάττωση του δυναμικού οξειδαναγωγής. Οι τάσεις αυτές είναι φυσιολογικές αφού με την αύξηση της ροής του  $\text{CO}_2$  τα θερμικά ρευστά γίνονται πιο όξινα (ελάττωση του pH) και παράλληλα το περιβάλλον γίνεται πιο αναγωγικό (ελάττωση του Eh).

Η συστηματική σύγκριση των κοινών μετρήσεων σεισμολογικών δεδομένων και φυσικοχημικών παραμέτρων που έγιναν στον σταθμό του Αγ. Νικολάου στην Π. Καμένη σε ότι αφορά τις φυσικοχημικές παραμέτρους στην διάρκεια του 2001 και 2003 θεωρούμε ότι απέδωσαν ισχυρές ενδείξεις ότι φυσικοχημικές παράμετροι όπως η **ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ**, το **ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΟΞΕΙΔΟΑΝΑΓΩΓΗΣ (Eh)** το **pH**, η συγκέντρωση  $\text{CO}_2$  στα υδροθερμικά ρευστά, οι μεταβολές στάθμης της θάλασσας, μπορούν να αποτελέσουν δείκτες πρόγνωσης σεισμικών φαινομένων, που σχετίζονται με ηφαιστειακή δράση (άνοδο του μάγματος, αύξηση της υδροθερμικής και δραστηριότητας, και πιθανές ηφαιστειακές εκρήξεις). Παράλληλα οι μετρήσεις ραδονίου ιδιαίτερα την περίοδο της σεισμικής έξαρσης εντός του Ιουνίου του 2003 επιβεβαίωσαν την ισχυρή και ευθέως ανάλογη σχέση μεταξύ του σεισμικού δυναμικού και του εκλυόμενου ραδονίου(Σχήμα 13 Μέρος 2<sup>ο</sup>).

**Πρόταση:** Με (βάση τα παραπάνω είναι φανερό ότι η μελέτη φαινομένων (π.χ. γεωχημικών, υδροθερμικών, πρόδρομων σεισμικών και τεκτονικών), που συνδέονται με τις αυξομειώσεις της ηφαιστειακής και, κυρία, της υδροθερμικής δραστηριότητας σε σημαντικά κέντρα του ηφαιστειακού τόξου του Αιγαίου (Σαντορίνη, Μήλος, Κως, Νίσυρος), μπορούν να μας δώσουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τις πιθανότητες ύπαρξης εντόνων ηφαιστειακών και φυσικά σεισμικών συμβάντων στις περιοχές αυτές εξαιτίας της αλληλοεπίδρασης ηφαιστειότητας, υδροθερμικής δράσης (κύρια υποθαλάσσιας) και νεοτεκτονικών ενεργών δομών.

**Η ηφαιστειακή και σεισμική δραστηριότητα στη Σαντορίνη έδειξε την**

ανάγκη να φύγουμε από το στάδιο της παρατήρησης τέτοιων φαινομένων και να πάμε στο στάδιο της συστηματικής μελέτης και παρακολούθησης με στόχο την πρόγνωση αλλά και διαχείριση φαινομένων έντονης ηφαιστειακής και σεισμικής δραστηριότητας. Με δεδομένο ότι η υδροθερμική δραστηριότητα και κυρίως η υποθαλάσσια έχει ένα έντονο επεισοδιακό χαρακτήρα υπάρχει ανάγκη συστηματικής παρακολούθησης των σημαντικών παραμέτρων που συνδέονται μαζί της και την γειτνιάζουσα υποθαλάσσια περιοχή. Η προϊστορία της περιοχής αλλά και τα αποτελέσματα της πρόσφατης θεομηνίας στη νοτιοανατολική Ασία, καθιστά την παραπάνω αναγκαιότητα εκ των ουκ άνευ.

Με βάση τις ισχυρές ενδείξεις που απέδωσε η μελέτη μας, προτείνουμε την άμεση πύκνωση του δικτύου σταθμών μέτρησης φυσικοχημικών παραμέτρων συνεχούς καταγραφής, ειδικά σχεδιασμένων με βάση την εμπειρία που αποκτήθηκε από το παρόν πρόγραμμα, παράλληλα με την εγκατάσταση πρόσθετων σειсмоγράφων συμπληρωματικών του υπάρχοντος δικτύου (του ΙΜΠΗΣ και του Α.Π.Θ.). Η υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος θα μας δώσει την δυνατότητα βέλτιστης παρακολούθησης και κυρίως τη δυνατότητα συστηματικότερης και ασφαλέστερης διερεύνησης των δυνατοτήτων πρόγνωσης επερχομένων σεισμικών και άλλων συνοδών γεγονότων που συνδέονται με αύξηση της υδροθερμικής-μαγματικής δραστηριότητας και ηφαιστειακής δράσης στην ευρύτερη περιοχή τον νησιωτικού συμπλέγματος της Σαντορίνης.