

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΗΦΑΙΣΤΕΙΟΥ ΝΙΣΥΡΟΥ: ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΕΠΑΝΑΜΕΤΡΗΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ GPS & ΡΑΔΟΝΙΟΥ*

Ε. ΛΑΓΙΟΣ¹, Σ. ΧΑΪΔΑΣ², Ι. ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ² & Π. ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΣ²

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μόνιμο δίκτυο GPS παρακολούθησης του Ηφαιστείου Νισύρου, το οποίο συνίσταται από 17 σταθμούς κατανομημένους στην ευρύτερη περιοχή Νισύρου - Κω, και ένα δίκτυο 9 σταθμών παρακολούθησης εκλύσεως ραδονίου (Rn) εγκατεστάθη τον Ιούνιο του 1997. Τον Σεπτέμβριο του 1997 διενεργήθη επαναμέτρηση των δύο δικτύων. Παρατηρήθηκαν μικρομετακινήσεις των σταθμών GPS για το ενδιαμέσο χρονικό διάστημα, τόσο οριζόντιες όσο και κατακόρυφες. Οι οριζόντιες μετακινήσεις έχουν γενική κατεύθυνση προς ΝΝΑ, εκτός των σταθμών που είναι εγκατεστημένοι στο ΒΑ άκρο της Νισύρου, των οποίων η μετακίνηση έχει κατεύθυνση προς ΝΝΑ. Το μέγεθος των οριζόντιων μετακινήσεων κυμαίνεται από 13 ± 5 έως 37 ± 7 mm. Οι κατακόρυφες μετακινήσεις είχαν ανιρωτικό χαρακτήρα για όλους σχεδόν τους σταθμούς και εκτιμήθηκαν από 14 ± 7 έως 45 ± 10 mm. Γενικά, ο έντονος χαρακτήρας της παραμόρφωσης σε διάστημα μόλις τριών μηνών, η οποία παρατηρείται στη Νισύρο σε σχέση με την Ανατολική Κω, η αυξημένη εκλύση Ραδονίου (Rn) στο βόρειο άκρο της Νισύρου, και η, συνεχώς υφιστάμενη, ενεργή σεισμικότητα στην ευρύτερη θαλάσσια περιοχή Κω-Νισύρου, συνιστούν ανησυχητικά στοιχεία στην εξέλιξη της δυναμικής του Ηφαιστείου Νισύρου, η οποία χρήζει άμεσης παρακολούθησης.

ABSTRACT

A GPS network was established in the area of Nisyros Volcano, for the monitoring of crustal deformation during June 1997. The GPS network consists of 17 stations distributed on the islands of Nisyros and Kos. Another network of 9 stations was also established in Nisyros for the monitoring of Rn gas emission. During September 1997, both networks were remeasured. Displacements in the coordinates of the GPS stations were observed in both the horizontal and vertical directions. The horizontal displacements of the GPS stations were found to be between 13 ± 5 mm to 37 ± 7 mm, with direction of movement SSE for almost all of the stations. Only three stations on the NW of Nisyros showed displacements towards SSW. The vertical displacements of almost all the GPS stations showed uplift between 14 ± 7 and 45 ± 10 mm. Generally, the intense deformation observed in Nisyros with respect to East Kos, the increased measured values of Rn gas at the northern part of Nisyros, and the noticeable seismic activity in the marine area between Kos and Nisyros, which is still in progress, constitute abnormal aspects in the evolution of the dynamics of Nisyros Volcano, requiring its immediate surveillance.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Νισύρος (Ελλάς), GPS, Παραμόρφωση Φλοιού, Ραδόνιο, Παρακολούθηση Ηφαιστείου.

KEY WORDS: Nisyros (Hellas), GPS, Crustal Deformation, Radon, Monitoring.

* SURVEILLANCE OF NISSYROS VOLCANO: ESTABLISHMENT AND REMEASUREMENT OF GPS AND RADON NETWORKS.

¹ Assoc. Prof. University of Athens, Department of Geophysics & Geothermy, Panepistimiopolis, Ilissia, 157 84 Athens, Hellas.

² Mr University of Athens, Department of Geophysics & Geothermy, Panepistimiopolis, Ilissia, 157 84 Athens, Hellas.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το Ηφαιστείο Νισύρου, μαζί με αυτό της Σαντορίνης, συνιστούν τα πλέον ενεργά ηφαιστεία για τον Ελληνικό Χώρο. Το Ηφαιστείο Σαντορίνης έτυχε ιδιαίτερης προσοχής με την εφαρμογή πρόσφατου πολυκλαδικού ερευνητικού προγράμματος ουστηματικής παρακολούθησης, στα πλαίσια της οποίας εντάσσονται μόνιμα δίκτυα περιοδικών μετρήσεων παρακολούθησης διαφόρων παραμέτρων, όπως της σεισμικότητας (Delibasis et al. 1989, 1995), της παραμόρφωσης του εδάφους από τυχόν ανοδικές κινήσεις μάγματος με την εφαρμογή GPS, EDM και μικροβαρυτομετρίας (π.χ. Lagios et al. 1996, Lagios & Chailas 1996), όπως και άλλων συμπληρωματικών μεθόδων παρακολούθησης.

Ανάπαρτες όμως συγκριτικά ήταν οι επιστημονικές μελέτες στη Νίσυρο, σε ό,τι αφορά μεθόδους παρακολούθησης ηφαιστείου. Οι πλέον πρόσφατες πολυκλαδικές γεωφυσικές έρευνες στην ευρύτερη περιοχή του ΝΑ άκρου του Ελληνικού Ηφαιστειακού Τόξου (Κως, Νίσυρος) έγιναν στα πλαίσια διερεύνησης και εκτίμησης του γεωθερμικού δυναμικού της Κω (Lagios et al. 1994, 1998a, 1998b), όπως και του προσδιορισμού της γεωτεκτονικής και γεωηλεκτρικής δομής του γεωθερμικού πεδίου υψηλής ενθαλπίας στην Νίσυρο (Λάγιος 1991; Dawes & Lagios 1991; Lagios & Apostolopoulos 1995). Στα πλαίσια της γεωθερμικής έρευνας, έγιναν οι πρώτες μετρήσεις ραδονίου (Rn) στον κρατήρα "Στέφανος" της Νισύρου (Κοομάτος κ.ά. 1992, Liritzis et al. 1995), προκειμένου να εντοπισθούν ρήγματα με ενεργό κυκλοφορία υδροθερμικών ρευστών.

Η έναρξη όμως σεισμικής δραστηριότητας του τελευταίου έτους στην ευρύτερη (θαλάσσια) περιοχή, ως και η ενεργοποίηση ενός ρήγματος διχοχόμενου διά του οικισμού του Μανδρακίου (Νίσυρος), προσήλκυσε το επιστημονικό ενδιαφέρον, αλλά και κατέδειξε την έλλειψη, έστω και στοιχειωδών, μεθοδολογιών παρακολούθησης του Ηφαιστείου Νισύρου.

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στα δίκτυα παρακολούθησης (Εικ. 1), τα οποία πρόσφατα συνεστήθησαν, προκειμένου να καλύψουν τμήμα της παρακολούθησης του Ηφαιστείου Νισύρου, στα πλαίσια των αρμοδιοτήτων του ΟΑΣΠ και του Ευρωπαϊκού Κέντρου Πρόληψης και Πρόγνωσης των Σεισμών. Συνίστανται, αφ' ενός μεν στις μελέτες τοπικής παραμόρφωσης του φλοιού από πιθανές ανοδικές κινήσεις μάγματος ή/και σεισμική δραστηριότητα, με την εγκατάσταση και επαναμέτρηση ενός GPS δικτύου στη Νίσυρο και ευρύτερη περιοχή, αφ' ετέρου δε στην εγκατάσταση και, όσο το δυνατόν συχνότερη επαναμέτρηση, ενός δικτύου σταθμών μόνιμης εγκατάστασης μετρήσεως έκλυσης Rn .

2. ΣΥΝΤΟΜΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ - ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Οι πρώτες γεωλογικές εργασίες, οι οποίες έλαβαν χώρα στην Νίσυρο, ήταν από τους Desio (1931), Γεωργιά (1958), Davis (1967) και Di Paola (1974), οι οποίοι εδημοσίευσαν τα πρώτα γεωλογικά αποτελέσματα σχετικά με την δομή, τις περιόδους έκχυσης λάβας και την τεκτονική εξέλιξη του ηφαιστείου.

Οι πλέον, όμως, πρόσφατες είναι αυτές των Παπανικολάου και Λέγκα (1991), Βουγιουκαλάκη (1994) και Hardiman (1996). Σύμφωνα με την μελέτη των Παπανικολάου & Λέγκα (1991), τρεις περίοδοι έντονης τεκτονικής δραστηριότητας εντοπίζονται: προ-, συν- και μετα-καλδεραϊκός τεκτονισμός. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω έντονων τεκτονικών διεργασιών, οι ακόλουθες ρηξιγενείς ζώνες εντοπίζονται (Εικ. 2):

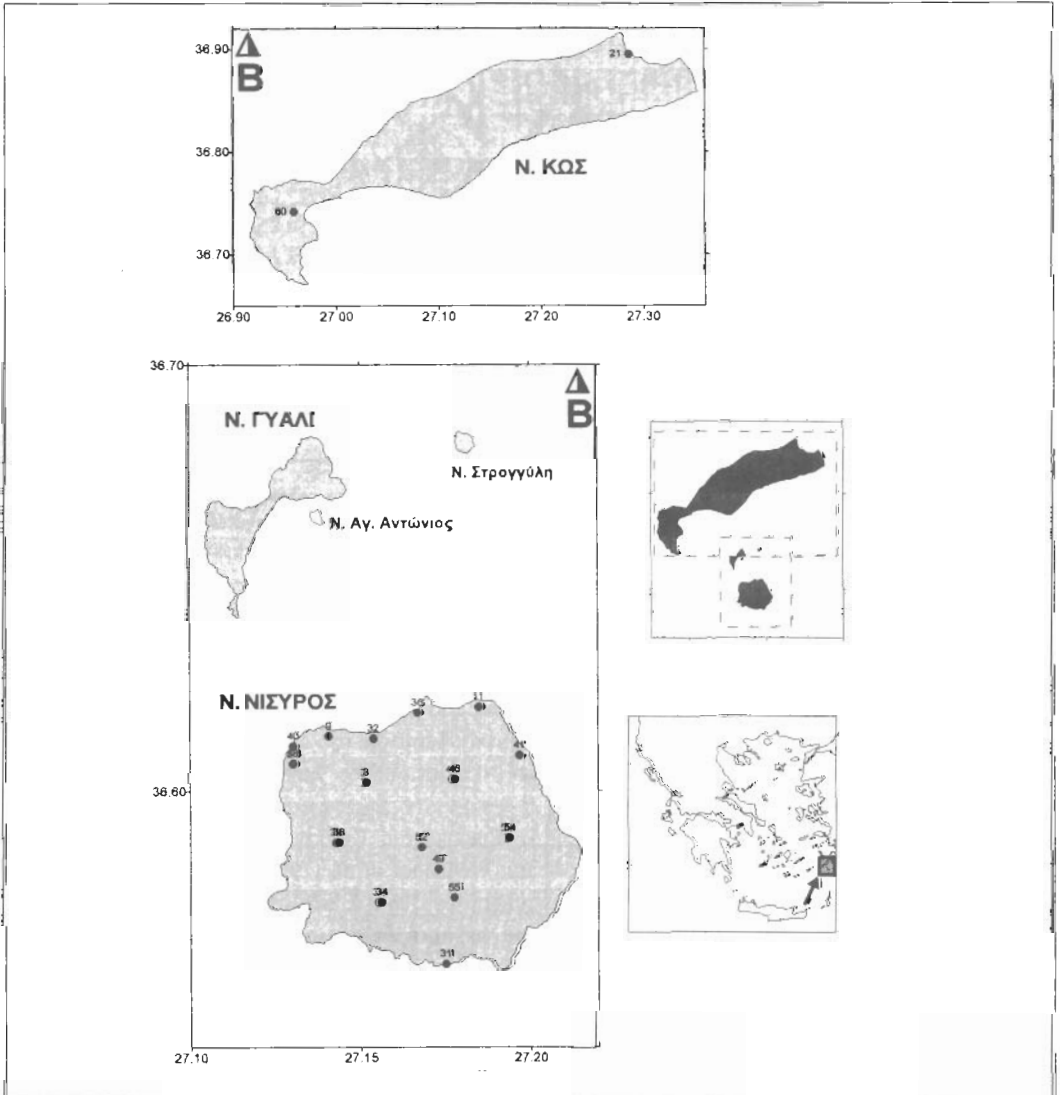
- Η ζώνη F1 με μετάπτωση προς τα ΝΑ και διεύθυνση ΒΑ-ΝΑ.
- Η ζώνη F2, που αρχίζει από το κέντρο της νότιας ακτής του νησιού, με διεύθυνση προς τα ΒΑ και απολήγει στο εσωτερικό της καλδέρας.
- Η ζώνη F3, που αρχίζει ανατολικά από το Μανδράκι, εκτείνεται προς τα ΝΑ και διασταυρώνεται με το ρήγμα F1 στο κέντρο περίπου του νησιού.
- Η ζώνη F4, που συνιστά μία στενή τάφρο, αρχίζει από το νότιο άκρο του νησιού και καταλήγει στο νότιο τμήμα της καλδέρας.

Κατά το σύγχρονο στάδιο εξέλιξης της Νισύρου παρατηρούνται μετακινήσεις όλων των παραπάνω

ρηξιγενών ζωνών, καθώς και η δημιουργία δευτερευόντων ρηγιμάτων με μικρότερα άλματα. Τέλος, κατά μήκος των μεγάλων ρηξιγενών ζωνών στο χώρο της καλδράς, παρατηρούνται εντονότερες επιφανειακές εξαλλοιώσεις, πολλές ατμίδες και έξοδος θερμών αερίων.

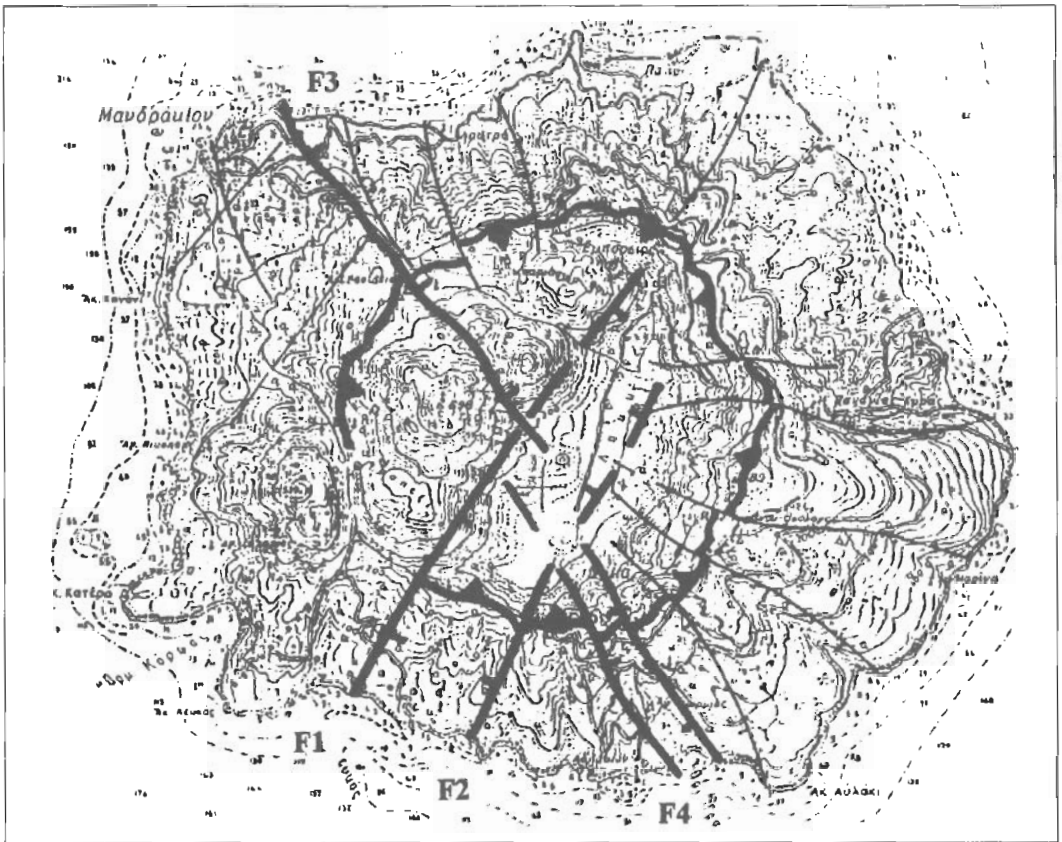
3. ΔΙΚΤΥΟ GPS

Έχει παρατηρηθεί ότι πριν την εκδήλωση ηφαιστειακών εκρήξεων, λαμβάνει συνήθως χώρα σημαντική παραμόρφωση του φλοιού, με την εκδήλωση έντονων οριζόντιων και κατακόρυφων κινήσεων, που οι τελευταίες είναι δυνατόν να ξεπερνούν και το 1 m (Sigmudsson, 1996). Οι παραμορφώσεις αυτές του Γήινου φλοιού είναι δυνατόν να οφείλονται : (i) Στην διαρκώς αυξανόμενη πίεση εντός μεζονών μαγματικών θαλάμων, (ii) Στα αποτελέσματα μαγματικών διεοδήσεων σε επιφανειακά στρώματα, (iii) Στην εκδήλωση μεγάλου μεγέθους σεισμών.



Εικόνα 1: Δίκτυο GPS παρακολούθησης Ηφαιστείου Νισύρου.

Figure 1: GPS Network for the Nisyros Volcano. Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

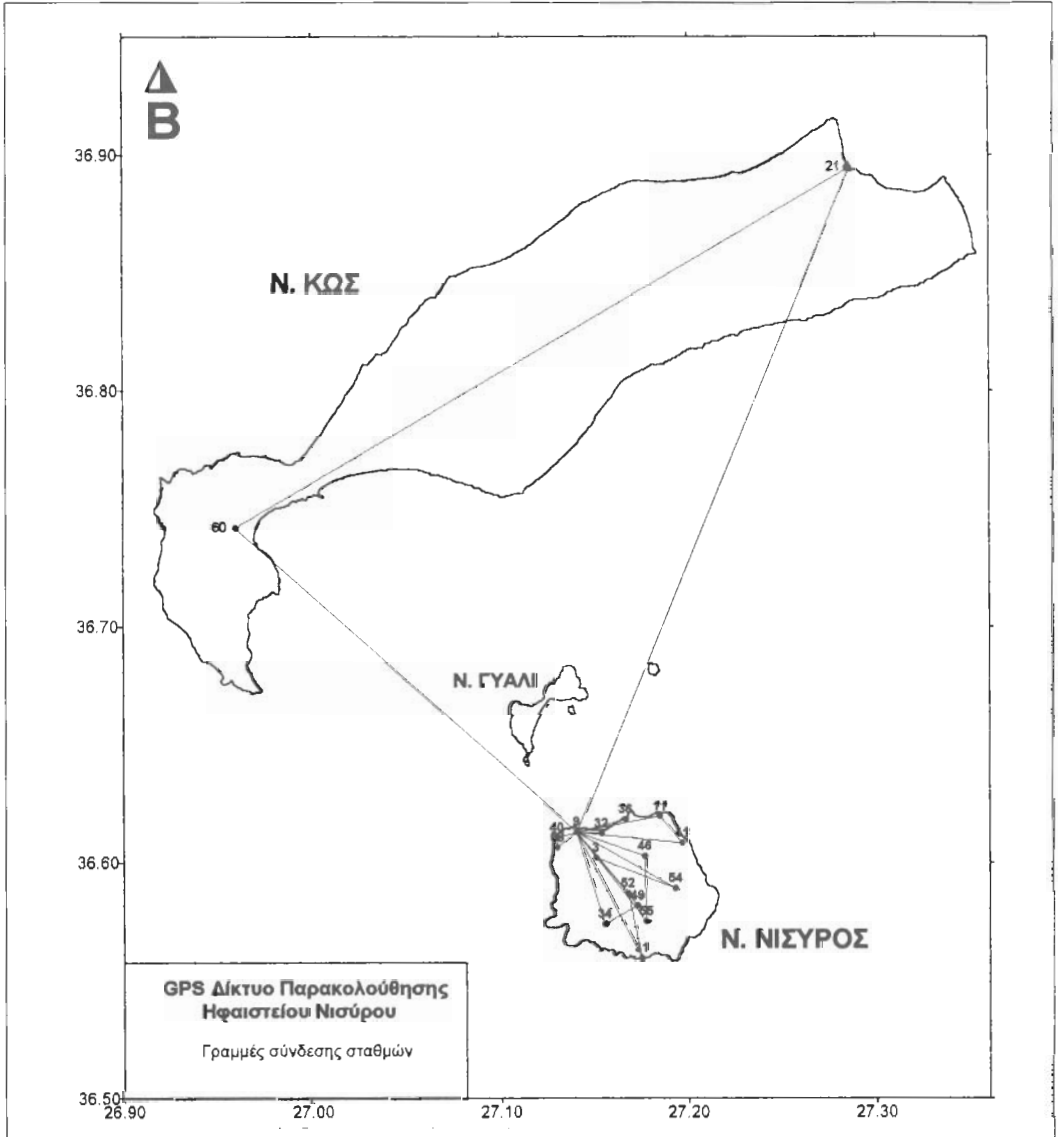


Εικόνα 2: Τοπογραφικός χάρτης Νισύρου εμφανίζον τις κύριες ρηγιγενείς ζώνες (Παπανικολάου & Λέκκας 1991).
Figure 2: Nissyros topographic map showing the main faulting zones (Papanikolaou & Lekkas 1991).

Κατά συνέπεια, οι γεωδαιτικές μέθοδοι παρακολούθησης των ηφαιστείων, είναι πολύ σημαντικές, σε ότι αφορά την συμβολή τους στην μελέτη και εκτίμηση του ηφαιστειακού κινδύνου, ως μέσο παροχής έγκαιρης προειδοποίησης, αλλά και στην ευρύτερη σπουδή της εν γένει δυναμικής των ηφαιστείων. Η αναγνώριση της αναγκαιότητας γεωδαιτικών (EDM, χωροσταθμίσεις ακριβείας, GPS κλπ.) και συναφούς μελέτης γεωφυσικών δικτύων (μικροβαρυτομετρικών), είχε ως αποτέλεσμα την εγκατάσταση ανάλογων δικτύων στην Σαντορίνη (Lagios, 1995; Lagios et al. 1996) για την παρακολούθηση του εκεί ηφαιστείου.

Στην Νίσυρο έγινε εφαρμογή του Παγκοσμίου Συστήματος Εντολισμού (GPS), λεπτομερειακή περιγραφή του οποίου εκτίθεται από τους Hofmann-Wellenhof et al. (1992). Οι GPS δορυφόροι, οι οποίοι ευρίσκονται σε τροχιά γύρω από την Γη, εκπέμπουν σήματα, στα οποία εμπεριέχεται, μεταξύ των άλλων, τόσο ο χρόνος, όσο και η ακριβής θέση της τροχιάς εκάστου δορυφόρου. Η απόσταση εκάστου δορυφόρου υπεράνω του οριζοντα (> 15°) και ενός δέκτη GPS, εγκατεστημένου στην επιφάνεια της Γης, υπολογίζεται από τον εκτιμηθέντα χρόνο, ο οποίος εκπέμπεται από τους δορυφόρους προς τους δέκτες. Όταν λοιπόν υφίσταται ένα δίκτυο από σταθμούς GPS, οι οποίοι και καταγράφουν ταυτόχρονα τα εκπεμπόμενα σήματα από τους υπεριοπτιάμενους δορυφόρους, τότε πολλά από τα υπεισερχόμενα σφάλματα είναι κοινά και αλληλοανααιρούνται. Έτσι, καθίσταται εφικτός ο προσδιορισμός των σχετικών συντεταγμένων των επίγειων σταθμών καταγραφής (GPS) με μεγάλη ακρίβεια, οι δε οριζόντιες αποστάσεις μεταξύ τους (baselines) είναι δυνατόν να υπολογισθούν με ακρίβεια της τάξεως του χιλιοστού (mm).

Σε γενικές γραμμές, η μέθοδος αυτή είναι ανεξάρτητη καιριζών συνθηκών και τοπογραφικών αναγλύφων, απαιτείται όμως εξειδικευμένη γνώση, σε ότι αφορά την ανάλυση και επεξεργασία των καταγραφών-δεδομένων GPS. Σε ότι αφορά την εκτίμηση τάξεως μεγέθους της αζοίβειας, η οποία επιτυγχάνεται στον προσδιορισμό των γεωδαιτικών συντεταγμένων (γεωγραφικού μήκους και πλάτους - λ & φ) μεταξύ δύο επίγειων σημείων, δίδεται από τον ακόλουθο εμπειρικό τύπο: $5\text{mm} \pm 0.03 \times 10^{-6} L$, όπου L η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο σημείων (Billham 1991). Επειδή οι παρατηρήσεις GPS στην Νίσυρο αναφέρονται ως προς την Ανατολική Κώ (No 21), η απόσταση (L) είναι περίπου 30 km, επομένως η θεωρητικώς αναμενόμενη αζοίβεια είναι 4-6 mm. Η κατακόρυφη όμως αζοίβεια μεταξύ δύο επίγειων σημείων είναι μικρότερη, ήτοι: $10\text{mm} \pm 1 \times 10^{-6} L$. Κατά συνέπεια, επειδή η Νίσυρος είναι μικρή σε έκταση (διάμετρος < 7km), η ποιοτική αζοίβεια των οριζοντιογραφικών συντεταγμένων αναμένεται να είναι περίπου $\pm 5\text{mm}$, ενώ για τα υψόμετρα $\pm 10\text{mm}$, περίπου.



Εικόνα 3: Γραμμές σύνδεσης Δικτύου GPS παρακολούθησης Ηφαιστείου Νισύρου.
Figure 3: Baselines of GPS network for the surveillance of Nisyros volcano.

3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΚΤΥΟΥ – ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Για την μελέτη της παραμόρφωσης στην περιοχή της Νισύρου, εγκατεστάθη, τον Ιούνιο 1997, γεωδαιτικό δίκτυο GPS αποτελούμενο από 17 σταθμούς (Εικ. 1). Εξ αυτών, δεκαπέντε (15) είναι εγκατεστημένοι στην Νίσυρο, και δύο (2) στην Κω. Η εγκατάσταση των σταθμών GPS στην Νίσυρο έγινε, κυρίως λόγω ευκολίας για άμεση πρόσβαση, με βάση το οδικό δίκτυο που προσφέρεται, με στόχο να επιτευχθεί ομοιογενής κάλυψη. Η μέση απόσταση μεταξύ δύο σταθμών GPS κυμαίνεται περί τα 2 περίπου χιλιόμετρα. Κατ' αυτόν τον τρόπο αναμένεται να μελετηθεί η παραμόρφωση της περιοχής με ικανοποιητική λεπτομέρεια. Οι σταθμοί, οι οποίοι εγκατεστάθηκαν στην Κω εξυπηρετούν δύο στόχους. Κατά πρώτον, συμβάλλουν στην εξέταση της παραμόρφωσης της ευρύτερης περιοχής, κατά δεύτερον, ο ένας εξ αυτών (No 21) χρησιμοποιήθηκε ως βάση αναφοράς για τους υπόλοιπους σταθμούς του δικτύου. Με βάση τις συνεχείς καταγραφές GPS στο σταθμό Διονύσου (του ΕΜΠ) Αττικής αναμένεται, επίσης, να εκτελεσθεί και μελλοντικός έλεγχος του όλου GPS δικτύου στην εν λόγω ευρύτερη περιοχή (Κως-Νίσυρος) του ΝΑ τμήματος του Ελληνικού Ηφαιστειακού Τόξου.

Κατά την εγκατάσταση του GPS δικτύου τον Ιούνιο 1997, ιδρύθησαν 16 σταθμοί, 15 στην Νίσυρο και ένας (No 21) στο ανατολικό άκρο της Κω (Εικ. 1). Κατά την πρώτη επαναμέτρηση του δικτύου (Αύγουστος-Σεπτέμβριος 1997), εγκατεστάθη ένας ακόμα σταθμός (No 60) στην δυτική Κω. Οι μετρήσεις GPS έγιναν με την χρήση γεωδαιτικών δεκτών GPS WILD SR299 δύο συχνοτήτων καταγραφής, L1 και L2. Η διάρκεια ταυτόχρονης καταγραφής σε κάθε σταθμό και βάση ήταν της τάξεως των 3 ωρών, περίπου. Το χρονικό αυτό διάστημα κρίνεται ως επαρκές, δεδομένης της μικρής σχετικά έκτασης (διάμετρος Νισύρου <7 km) του δικτύου. Για μεγαλύτερες όμως αποστάσεις σταθμών, όπως μεταξύ No 9 (Νίσυρος) και No 60 ή No 21 (Κως) (Εικ. 3), η περίοδος καταγραφής ήταν περί τις 24 ώρες.

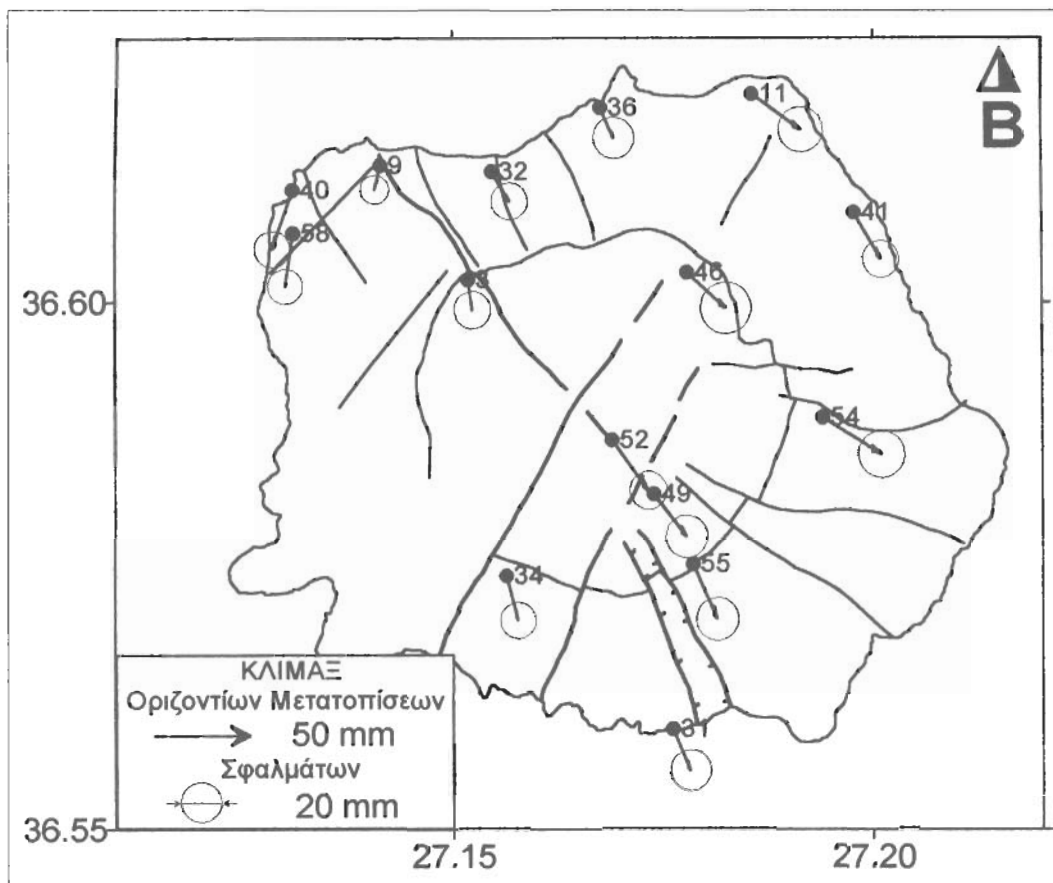
3.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η ανάλυση των δεδομένων GPS έγινε με την χρήση του λογισμικού LEICA Static Kinematic Software (S.K1. Version 2.11) 1996. Η επίλυση των γεωδαιτικών γραμμών έγινε στο ελλειψοειδές World Geodetic System 1984 (WGS'84). Ο σταθμός No 21 (Ανατολική Κως) επελέγη ως σταθμός αναφοράς του δικτύου. Οι συνορθωμένες τιμές των δύο περιόδων μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της τυχόν παραμόρφωσης, την οποία υπέστη η υπό μελέτη περιοχή στο ενδιαίεσο χρονικό διάστημα.

3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η ανάλυση και συνόρθωση των δεδομένων GPS αμφοτέρων των περιόδων (Ιούνιος και Σεπτέμβριος 1997) πραγματοποιήθηκαν χωριστά. Οι τιμές συνόρθωσης του δικτύου για τις δύο περιόδους είναι, αντιστοίχως, 5.5 mm και 2.3 mm. Οι συντεταγμένες των GPS σταθμών υπελογισθησαν υπό μορφή γεωγραφικού μήκους (λ), γεωγραφικού πλάτους (φ) και ελλειπτικού υψόμετρου (h). Οι διαφορές των εν λόγω συντεταγμένων, οι οποίες προέκυψαν για την περίοδο Ιουνίου-Σεπτέμβριος 1997, δείχνονται στον Πίνακα 1, μετά των υπολογισθέντων σφαλμάτων. Οι μετατοπίσεις των σταθμών GPS, οι οποίες προέκυψαν, σε ότι αφορά τις οριζοντιογραφικές συντεταγμένες, δείχνονται υπό μορφή διανυσμάτων στην εικόνα 4, μαζί με την αναπαράσταση των κυριότερων ρηξιγενών ζωνών, όπως και το χείλος της καλδέρας. Παρατηρείται ότι οι παρατηρηθείσες μεταβολές των συντεταγμένων κυμαίνονται από 13-37 mm, με σφάλμα το οποίο κυμαίνεται από 4-7 mm.

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 1, προέκυψαν επίσης και κατακόρυφες μεταβολές για τους περισσότερους σταθμούς. Μόνον οι σταθμοί No 41, 34 και 11 ευρίσκονται στα όρια του σφάλματος, που το τελευταίο κυμαίνεται για όλους τους σταθμούς από 5-10 mm. Στους υπόλοιπους σταθμούς υποδηλώνεται ανύψωση, που προσδιορίζεται στα 14-45 mm (ελλειπτικά υψόμετρα). Οι εν λόγω διαφορές των υπολογισθέντων ελλειπτικών υψόμετρων αναπαρίστανται γραφικά στην εικόνα 5, όπου οι ισοκαμπύλες έχουν χαραχθεί ανά 10 mm (το όριο του σφάλματος).



Εικόνα 4: Οριζόντιες μετατοπίσεις σταθμών GPS, Ιούνιος - Σεπτέμβριος 1997.

Figure 4: Horizontal displacements of GPS stations, June - September 1997.

Όπως διαπιστώνεται (Πίνακας 1), τα υπολογισθέντα αναλυτικώς σφάλματα, για μεν τις οριζόντιες μετακινήσεις, είναι ελαφρώς μεγαλύτερα από τα θεωρητικώς αναμενόμενα επίπεδα (4-6 mm) κατά 1-2 mm, ενώ, για τις κατακόρυφες μετατοπίσεις, είναι ελαφρώς μικρότερα από τις θεωρητικώς αναμενόμενες τιμές (9-11 mm) κατά 2-3 mm, περίπου.

4. ΔΙΚΤΥΟ ΡΑΔΟΝΙΟΥ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το Ραδόνιο (^{222}Rn) είναι προϊόν της αλυσωτής μετάπτωσης του Ουρανίου (^{238}U), ενώ το Θορόνιο (^{220}Rn) είναι προϊόν αλυσωτής μετάπτωσης του Θορίου (^{232}Th). Οι μετρήσεις των ισοτόπων Ραδονίου έγιναν με τον RM-1003 ανιχνευτή Ραδονίου (Pylon 1982), ο οποίος έχει την δυνατότητα αυτόματης λήψης μετρήσεων σε τρία διαδοχικά χρονικά διαστήματα προκαθορισμένης διάρκειας. Τοιουτοτρόπως σε κάθε μετρηθέν δείγμα των τριών αυτών περιόδων (C1, C2, C3), εάν το αέριο δείγμα, το οποίο εισέρχεται στο θάλαμο, περιέχει Ραδόνιο, οι τρεις διαδοχικές μετρήσεις C1, C2, C3 παρουσιάζουν αυξητική τάση. Εάν, όμως, το αέριο περιέχει κυρίως Θορόνιο, οι διαδοχικές μετρήσεις θα παρουσιάζουν πτωτική τάση. Η διαφορά αυτή σχετίζεται ευθέως με την διαφορά των χρόνων ημίσειας-ζωής των ισοτόπων (^{222}Rn & ^{220}Rn) και την δράση των θυγατρικών προϊόντων. Στην περίπτωση κατά την οποία υφίσταται μίγμα των δύο ισοτόπων, οι τρεις μετρήσεις επιτρέπουν τον καθορισμό των αντιστοιχών συγγεντορώσεων.

ΠΙΝΑΚΑΣ Ι
 Παρατηρηθείσες Διαφορές Συντεταγμένων
 ΛΥΓΟΥΣΤΟΣ-ΙΟΥΝΙΟΣ 1997

No	Λφ		Λλ		Δh	
	..	mm	..	Mm	..	mm
21	0.0000	-	0.0000	-	0	-
3	0.0001	±6	-0.0005	±5	40	±7
9	-0.0001	±4	-0.0004	±4	21	±4
11	0.0010	±7	-0.0006	±6	3	±9
31	0.0004	±6	-0.0007	±5	13	±8
32	0.0004	±6	-0.0005	±5	32	±6
34	0.0002	±6	-0.0008	±5	8	±7
36	0.0003	±6	-0.0005	±6	26	±8
40	-0.0004	±5	-0.0010	±5	28	±6
41	0.0006	±6	-0.0008	±5	-5	±7
46	0.0008	±8	-0.0006	±8	36	±9
49	0.0007	±7	-0.0007	±6	27	±8
52	0.0008	±6	-0.0009	±5	14	±7
54	0.0013	±7	-0.0006	±7	44	±9
55	0.0005	±7	-0.0009	±6	25	±8
58	-0.0002	±5	-0.0009	±5	29	±6

.. : Δεύτερα λεπτά της μούρας

Θεωρούμε C1, C2 και C3 την τελική τιμή μετρήσεων για τη προσαρμοσμένη χρονική περίοδο. Ως ανηγμένη τιμή ορίζουμε την τιμή μέτρησης, απαλλαγμένη από την τιμή του περιβάλλοντος και ανηγμένη στην μονάδα χρόνου δειγματοληψίας (π.χ. 1 min). Η τιμή Ραδονίου (R), σύμφωνα με το εγχειρίδιο του οργάνου RM-1003, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$R = 0.87 \cdot C3 + 0.32 \cdot C2 - 0.34 \cdot C1.$$

Η τιμή Θορονίου (T) προσδιορίζεται από την ολική τιμή C1, C2 και C3 ελαττωμένων κατά την τιμή του Ραδονίου:

$$T = C1 + C2 + C3 - R,$$

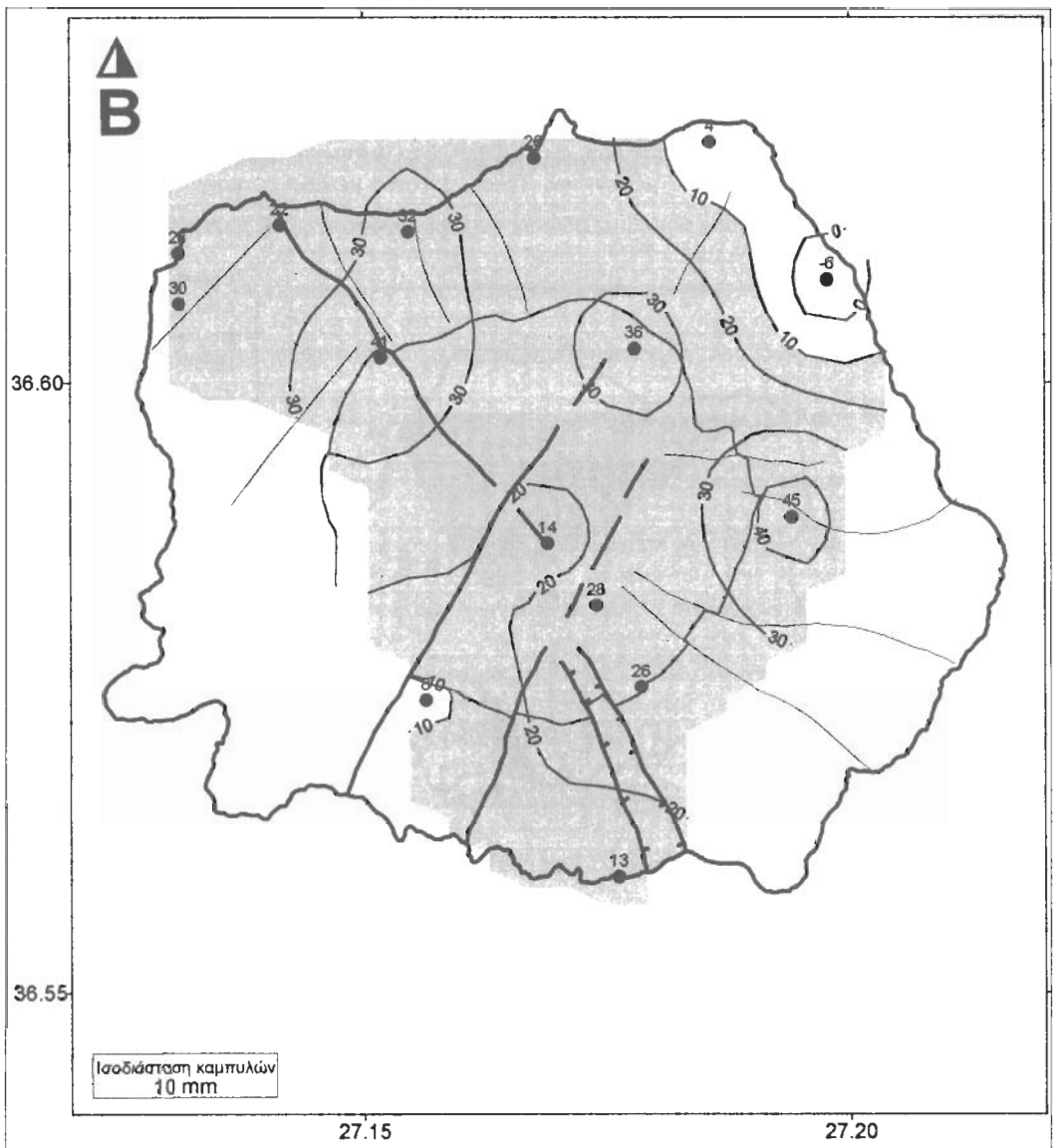
όπου T και R εκφράζουν τις συγκεντρώσεις Θορονίου και Ραδονίου σε c.p.m., και οι αριθμητικοί συντελεστές είναι αποτέλεσμα της ποσοτικής φθίνουσας μετάπτωσης των εμπλεκόμενων ισοτόπων Ραδίου.

4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΚΤΥΟΥ

Προκειμένου να μελετηθεί η μεταβολή της εκλάσεως Rn στην περιοχή της Νισύρου και ιδιαίτερα στο επίπεδο τμήμα της καλδέρας (Λαζι), εγκατεστάθη τον Ιούνιο 1997 μόνιμο δίκτυο σταθμών μέτρησης Rn αποτελούμενο από 9 σταθμούς (Εικ. 6). Ο κάθε σταθμός Rn αποτελείται από ειδική εγκατάσταση, η οποία προσαρμόσθη κατά μόνιμο τρόπο εντός του εδάφους, προκειμένου να διασφαλίζονται ομοιογενείς συνθήκες στην εισρόφιση των αερίων. Έτσι η εγκατάσταση αυτή συνίσταται σε ένα μεταλλικό σωλήνα μήκους 1 m και διαμέτρου 2.5 ιντσών, ο οποίος είναι πακτωμένος εντός του εδάφους, με προεξέχον τμήμα περί τα 30 cm. Το κάτω άκρο του σωλήνος εντός του εδάφους είναι ανοιχτό, ενώ στο έτερον άκρο έχει προσαρμοσθεί ειδική μεταλλική βαλβίδα.

4.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ Rn – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Λενεργήθησαν δύο σειρές μετρήσεων Rn, η πρώτη κατά την περίοδο Ιουνίου 1997, και η δεύτερη κατά την περίοδο Αυγούστου-Σεπτεμβρίου 1997. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων ελαμβάνετο μέριμνα για την καταγραφή της θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης. Στον πίνακα II παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων.



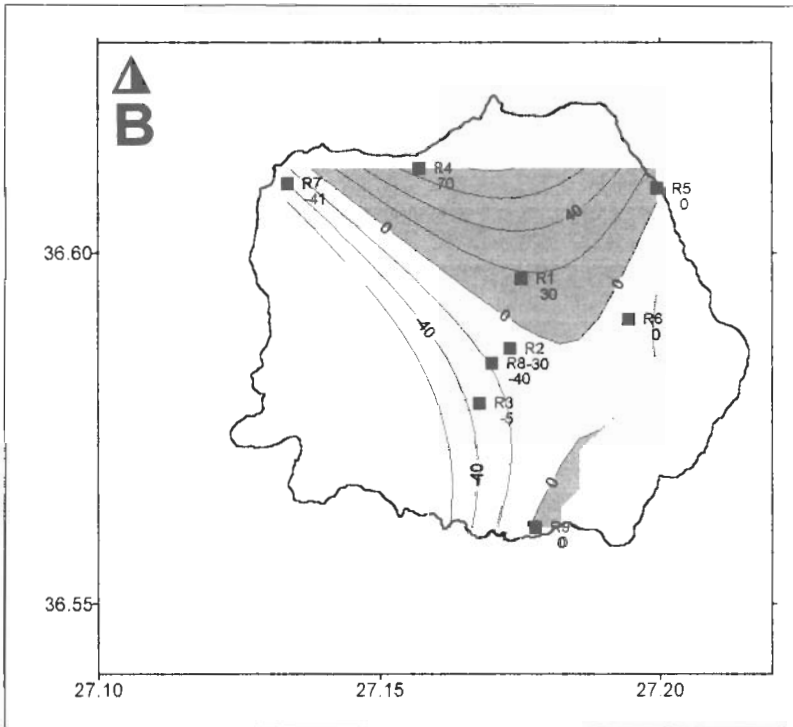
Εικόνα 5: Κατακόρυφες μετατοπίσεις Δικτύου GPS (ελλειπτικά υψόμετρα), Ιούνιος-Σεπτέμβριος 1997. Ισοαιετώλες ανά 10 mm. Σκιασμένη περιοχή υποδεικνύει παρατηρηθείσα ανύψωση.

Figure 5: Observed Vertical Displacements of GPS Network, June - September 1997. Contour level 10 mm. Shaded area represents uplift.

Κατά τον τρόπο αυτόν το R_p , το οποίο εισέρχεται κατά κατακόρυφο τρόπο και συσσωρεύεται εντός του σωλήνος, μετρείται από τον ανιχνευτή του RM-1003 (Pylon, 1982), ύστερα από ακριβή προσομοίωση των δύο μεταλλικών βαλβίδων, και απαγωγή του αερίου από τον σωλήνα προς τον θάλαμο του οργάνου.

Στην τελευταία στήλη του Πίνακα II παριστάνεται η παρατηρηθείσα μεταβολή (%) του R_p και T_h για κάθε σταθμό. Οι εν λόγω μεταβολές (αύξηση ή ελάττωση) έλλυσης R_p , παριστάνονται γραφικά στην εικόνα 6. Αν και ο αριθμός των σταθμών στο βόρειο άκρο είναι περιορισμένος, καθίσταται φανερό ότι αυξανόμενες τιμές έλλυσης R_p παρατηρούνται νότια του κέντρου πρώτου και

βόρειο άκρο της Νισύρου. Οι εν λόγω αυξημένες τιμές φθάνουν μέχρι και 70%. Παρατηρείται επίσης (Πίνακας II) ότι οι σταθμοί R3 και R8 παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλές τιμές. Οι σταθμοί αυτοί είναι εγκατεστημένοι ο μόνον R3 πλησίον του χείλους του κρατήρα του Στεφάνου, ο δε R8 σε αμύδα εντός της καλδέρας. Ιδιαίτερα δε χαμηλές τιμές παρουσιάζουν οι σταθμοί R6 και R9. Στους περισσότερους από τους σταθμούς (έξι σε σύνολο εννέα σταθμών) η μεταβολή είναι αρνητική (ελάττωση της εκλύσεως Rn και Th) μεταξύ των δύο περιόδων μετρήσεων. Τέλος, έντονες μεταβολές παρατηρήθηκαν στους σταθμούς R1, R2, R7 και R8.



Εικόνα 6:

Δίκτυο Rn Παρακολούθησης Ηφαίστειου Νισύρου. Ισοαμπίπλες ανά 20% ποσοστιαίας μεταβολής Rn.

Figure 6:

Rn Network for the Surveillance of Nisyros Volcano. Contour interval 20% of Rn change.

ΠΙΝΑΚΑΣ II

Παρατηρηθείσες Τιμές Rn Th
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ-ΙΟΥΝΙΟΣ 1997

No	ΙΟΥΝΙΟΣ 1997				ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 1997				Μεταβολή	
	Θερμ (°C)	Πίεση (mBar)	Rn Cpm	Th cpm	Θερμ. (°C)	Πίεση (mBar)	Rn cpm	Th cpm	Rn %	Th %
R1	33	1001	68	139	29	1010	87	165	28	19
R2	32	1001	50	87	31	1011	34	56	-32	-35
R3	32	1001	658	1205	29	1012	630	1174	-4	-3
R4	30	1013	24	67	27	1021	41	68	71	6
R5	33,7	1013	31	59	30	1020	31	54	0	8
R6	31	980	0	0	25	990	4	2	~0	~0
R7	32	1011	26	56	28	1019	15	34	-42	-39
R8	32	1003	1773	3350	25	1010	988	2295	-44	-31
R9	30	1000	0	0	30	1000	0	0	~0	~0

Γηφιακή Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

5. ΣΥΖΗΤΗΣΙΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την μελέτη των δεδομένων GPS, αλλά και από τις παρατηρούμενες μεταβολές του Ραδονίου, οι οποίες συνδέονται με την σεισμικότητα, που παρατηρείται στην ευρύτερη περιοχή, καθίσταται φανερό ότι, τόσο η περιοχή Νισύρου, αλλά πιθανότατα και η βορείως μέχρι την Κώ ευρύτερη θαλάσσια περιοχή, υφίσταται μία **τεκτονική διεργασία με έντονους ρυθμούς παραμόρφωσης**, η οποία εκφράζεται κυρίως σύμφωνα με τα παρακάτω:

(i) Με τις οριζόντιες και κατακόρυφες παραμορφώσεις, οι οποίες λαμβάνουν χώρα στην Νίσυρο σε σχέση με την Ανατολική Κώ. Η επαναμέτρηση του δικτύου GPS κατέδειξε ότι έλαβαν χώρα οριζόντιες μετακινήσεις από 13 ± 5 mm έως 37 ± 7 mm (Εικ. 4). Οι κατακόρυφες δε μετακινήσεις των σταθμών είναι ακόμη μεγαλύτερες (ελλειπτικά υψόμετρα), από 14 ± 7 mm μέχρι 45 ± 10 mm, υποδεικνύουσες ανύψωση (“διόγκωση”) του μεγαλύτερου τουλάχιστον τμήματος της Νισύρου (Εικ. 5), διότι στα άκρα δεν υφίστανται παρατηρήσεις.

(ii) Τα αυξημένα ποσοστά έκλυσης Rn (το οποίο σχετίζεται με την εκδήλωση σεισμικότητας) σε ωρισμένους σταθμούς στο βόρειο τμήμα της Νισύρου.

(iii) Με την παρατηρούμενη διαρκή σεισμική δραστηριότητα, η οποία παρατηρείται το τελευταίο έτος, ιδιαίτερα στην θαλάσσια περιοχή μεταξύ Κώ και Νισύρου. Προκαταρκτική ανάλυση σεισμολογικών δεδομένων από εγκατάσταση τοπικού δικτύου για βαρυπρόσθεσμα και τμηματικά χρονικά διαστήματα εκ μέρους του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Αστεροσκοπείου Αθηνών, κατέδειξε συστηματική συγγέντρωση επικέντρων στην θαλάσσια περιοχή μεταξύ Κω και Νισύρου, ως και του βορείου τμήματος της Νισύρου. Η εν λόγω σεισμικότητα, η οποία, ως ένα σημαντικό ποσοστό, είναι ηφαιστειογενούς χαρακτήρα (Σταυρακάκης, προσωπική επικοινωνία), πρέπει πιθανόν να έχει άμεση σχέση και με το ενεργοποιηθέν ρήγμα, το οποίο διέρχεται από το Μανδραζάκι (Νίσυρος) και πιθανότατα απολήγει βόρεια στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις του Γαλιούλι.

(iv) Πιθανότατα ανερχόμενο από μεγάλα βάθη μάγμα εξαστεί ιδιαίτερα έντονες πιέσεις στην ευρύτερη περιοχή, με αποτέλεσμα να διεγείρει παλαιότερα ρήγματα, όπως πιθανόν το διερχόμενο διά του Μανδραζαίου, το δε καθεστώς των ευρύτερων τάσεων διαφαίνεται ότι πιθανότατα εκδηλώνεται και μέσω των μεζονων τεκτονικών ζωνών, όπως η F3 (Εικ. 2), εκατέρωθεν της οποίας διαφοροποιείται η παρατηρηθείσα μικρομετακίνηση των σταθμών GPS (Εικ. 4) από τα ΝΝΑ (Νο 40, 58, 9) προς τα ΝΑ (υπόλοιποι σταθμοί). Η θεώρηση δε του ανερχόμενου μάγματος είναι απολύτως συμβατή με τις παρατηρούμενες ανιψωτικές εδαφικές κινήσεις της περιοχής.

(v) Οι έντονοι ρυθμοί παραμόρφωσης, στους οποίους υπόκειται η περιοχή, συνάγονται: (1) Από το μέγεθος των παρατηρηθεισών οριζοντίων μετακινήσεων (Εικ. 4), οι οποίες αποδίδονται σε πιθανή άνοδο μάγματος κυρίως βόρεια της Νισύρου. (2) Η παρατηρούμενη παραμόρφωση είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από αυτήν, η οποία οφείλεται και αποδίδεται στους σεισμούς της ευρύτερης περιοχής (Papazachos & Kiratzi, 1996), οι παρατηρηθείσες δε διευθύνσεις μετατόπισης παρουσιάζουν την ίδια διεύθυνση με το υφιστάμενο πεδίο τάσεων.

Όλα τα παραπάνω δεδομένα συνιστούν μια δυναμική εικόνα του Ηφαιστείου Νισύρου, η οποία είναι ανησυχητική και χορήγει άμεσης επιστημονικής προσοχής με την επέκταση των GPS δικτύων στην ευρύτερη περιοχή, την μόνιμη εγκατάσταση δικτύου συνεχούς καταγραφής διαφόρων εκλύσεων αερίων (Rn, He, CO₂ κλπ.), ως και την μόνιμη εγκατάσταση τοπικού σεισμολογικού δικτύου. Όλα τα παραπάνω συνιστούν τις ελάχιστες εφαιρούμενες παρακολούθησης του Ηφαιστείου Νισύρου, πιθανές εκρήξεις του οποίου, σε αντίθεση με τους σεισμούς, είναι δυνατόν να προβλεφθούν εγκαίρως.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα εξοχηματοδοτήθη από τον ΟΑΣΠ και το Ευρωπαϊκό Κέντρο Πρόγνωσης και Πρόληψης Σεισμών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- BILHAM, R. 1991. Earthquakes and sea level: space and terrestrial metrology on a changing planet. *Rev. of Geoph.* **29**, 1-29.
- ΒΟΥΓΓΙΟΥΚΛΑΚΗΣ Γ. 1994. Ηραστειακή στρωματογραφία και εξέλιξη της Νήσου Νισύρου. Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας **XXVIII/2**, 239-258.
- ΓΕΩΡΓΑΛΑΣ, Γ. 1958. Η Νήσος Νίσυρος. "Νισυριακά Χρονικά" **21**, 22-23.
- DAVIS, F. 1967. Zur Geologie und Petrologie der Inseln Nisyros und Jali (Dodecanes). *Προαττικά Αζαδ. Αθηνών* **42**, 235-252.
- DAWES, G.J.K. & LAGIOS, F. 1991. A magnetotelluric survey of the Nissyros Geothermal Field. *Geothermics* **20**, 225-235.
- DELIBASIS, N., CHAILAS, S. & LAGIOS, F. 1989. Surveillance of Thera Volcano - Microseismicity Monitoring. *Proc. 3rd Intern. Congress "Thera and the Aegean World"* **2**, Sept. 3-9, Santorini, Greece, 199-206.
- DELIBASIS, N., SAHPAZI, M., CHAILAS, S. & KARANTONIS, G. 1995. Microearthquake activity of the Santorini volcanic island during the period 1985-1989. *Ann. Geol. des Pays Hell.* **36**, 181-207.
- DESIO, A. 1931. Le isole Italiane del Egeo. *Memr. Carta Geol. d' Italia* 24.
- DI PAOLA, G. M. 1974. Volcanology and Petrology of Nisyros Island (Dodecanese, Greece). *Bull. Volc.* **38**, 944-987.
- HARDIMAN, J. C. 1996. Volcanology and dating of the caldera phase eruptions of Nisyros Volcano, Greece. *Proc. Course: The mitigation of volcanic hazards. European Commission D.G. SR&D.* 519-522.
- HOFMANN-WELLENHOF B., LICHTENEGGER, H. & COLLINS, J., 1992. *Global Positioning System, Theory and Practice.*, 326 pp. (Springer Verlag, Wien).
- ΚΟΣΜΑΤΟΣ Α., ΛΑΓΙΟΣ Ε., ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ Γ. & ΑΥΡΙΤΖΗΣ Ι., 1992. Εμφάνιση και συμπεριφορά των ισοτόπων του Ραδονίου σε Ελληνικά Γεωθερμικά πεδία. Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας **XXVIII/2**, 605-622.
- ΛΑΓΙΟΣ Ε. 1991. Μαγνητοτελλουρική έρευνα δομής των γεωθερμικού πεδίου Νισύρου. Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας **XXV/3**, 393-407.
- LAGIOS E. 1995. Microgravimetric Monitoring of the Santorini Volcano, Greece. *Proc. Intern. Workshop "New Challenges for Geodesy in Volcanoes Monitoring"*, June 14-16, 1993, Walferdange, Luxemburg, *Tire a part des Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie*, **8**, 293-305.
- LAGIOS E. & APOSTOLOPOULOS G. 1995. Integrated geophysical study of the geothermal system in the southern part of Nisyros Island, Greece. *Journal of Applied Geophysics* **34**, 55-61.
- LAGIOS E. & CHAILAS S. 1996. Monitoring of the local gravity in Santorini Volcano, 1984-1995. Paper pres. 2nd Workshop on European Laboratory Volcanoes, May 2-4, Santorini, Greece. European Commission D.G. SR&D. (in press).
- LAGIOS E., PAPANIKOLAOU D. & APOSTOLOPOULOS G. 1998a. Geophysical studies relating to the tectonic structure of Kos Island (Greece). *Proc. 8th Intern. Congress Geol. Soc. of Greece, Patras*, May 27-29 (this volume).
- LAGIOS E., GALANOPOULOS D., HOBBS B.A. & DAWES G.J.K. 1998b. Two-Dimensional magnetotelluric modelling of the **Kos Island** geothermal region (Greece). *Tectonophysics* (in press).
- LAGIOS E., GIANNOPOULOS J. & SIGMUNDSONN F. 1996. Global Positioning System (GPS) Monitoring on Santorini (Thera) Volcano. Paper pres. 2nd Workshop on European Laboratory Volcanoes, May 2-4, Santorini, Greece. European Commission D.G. SR&D. (in press).
- LAGIOS E., TZANIS A., DELIBASIS N., DRAKOPOULOS J. & DAWES G.K.J. 1994. Geothermal Exploration of Kos Island, Greece: Magnetotelluric and Microseismicity studies. *Geothermics* **23**, 267-281. Ψηφιακή Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

- LIRITZIS, I., LAGIOS, E. & KOSMATOS, D. 1995. Detailed radon isotope measurements in Nisyros and Susaki geothermal fields, Greece. *Comptes Rendus de l' Academie des Sciences* **321/IIa**, 473-480.
- ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ Δ. & ΛΕΚΚΑΣ Ε. 1991. Γεωλογική Δομή και Εξέλιξη του Ηφαιστείου της Νισύρου. Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας **XXV/1**, 405-419.
- PAPAZACHOS C.B. & KIRATZI A.A. 1996. A detailed study of the active deformation in the Aegean and surrounding area. *Tectonophysics* **253**, 129-153.
- PYLON ELECTRONIC DEVELOPMENT Co.1982. RM-1003 Radon Detector. Instruction manual, Ottawa, Canada.
- SIGMUDSSON, F. 1996. Crustal deformation at volcanoes. Proc. Course: The mitigation of volcanic hazards. European Commission D.G. SR&D. 237-257.