



# ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ  
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ

ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΩΝ ΚΙΝΔΥΝΩΝ

ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ

**Ηφαιστειακή δραστηριότητα και συστήματα παρακολούθησης –  
Η περίπτωση των ηφαιστείων της Σαντορίνης και της Αίτνας**

Μεταπτυχιακή εργασία

**Σαβίνα Καρέζου**



Αθήνα, 2022





**HAROKOPIO UNIVERSITY**

SCHOOL OF ENVIRONMENT, GEOGRAPHY AND APPLIED  
ECONOMICS  
DEPARTMENT OF GEOGRAPHY  
POSTGRADUATE PROGRAMME APPLIED GEOGRAPHY AND SPATIAL  
PLANNING  
COURSE MANAGEMENT OF NATURAL AND HUMAN INDUCED  
DISASTERS

**Volcanic activity and monitoring systems –  
The cases of Santorini's and Etna's volcanoes**

Master Thesis

**Savina Karezou**



Athens, 2022





# **ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ  
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ**

**ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ**

**ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΩΝ ΚΙΝΔΥΝΩΝ**

**ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ**

## **Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή**

**Ευθύμιος Καρύμπαλης**

**Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο**

**Ισαάκ Παρχαρίδης**

**Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο**

**Ευαγγελία Δράκου**

**Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο**



Η Σαβίνα Καρέζου

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

- 1)** Είμαι ο κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και από όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων.
  
- 2)** Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.
  
- 3)** Όπου υφίστανται δικαιώματα άλλων δημιουργών έχουν διασφαλιστεί όλες οι αναγκαίες άδειες χρήσης ενώ το αντίστοιχο υλικό είναι ευδιάκριτο στην υποβληθείσα εργασία.



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με την ολοκλήρωση της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που με στήριξαν και με βοήθησαν κατά τη διάρκεια της ενασχόλησής μου με αυτή.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Ε. Καρύμπαλη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, τη βοήθεια και τις γνώσεις που μου προσέφερε όλο αυτό το διάστημα.

Ακόμα, είμαι ευγνώμων για την υποστήριξη και την ενθάρρυνση που μου παρείχαν οι φίλοι και οι συμφοιτητές μου κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου η οποία είναι πάντα δίπλα μου και με στηρίζει με κάθε δυνατό τρόπο.



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| Περίληψη στα Ελληνικά.....                        | 13 |
| Abstract.....                                     | 15 |
| Κατάλογος Εικόνων.....                            | 17 |
| Κατάλογος Πινάκων.....                            | 22 |
| Συντομογραφίες.....                               | 21 |
| Εισαγωγή.....                                     | 23 |
| Κεφάλαιο 1: Ηφαιστεια.....                        | 25 |
| 1.1. Γενικά περί ηφαιστείων.....                  | 25 |
| 1.2. Γεωγραφική κατανομή ηφαιστείων.....          | 27 |
| 1.3. Δομή ηφαιστείων.....                         | 30 |
| 1.4. Τύποι ηφαιστείων.....                        | 31 |
| 1.5. Ηφαιστειακά αναβλήματα.....                  | 41 |
| 1.6. Επιπτώσεις ηφαιστείων.....                   | 43 |
| 1.7. Πρόγνωση ηφαιστειακής δραστηριότητας.....    | 53 |
| 1.8. Πρόδρομα φαινόμενα ηφαιστειακής έκρηξης..... | 54 |
| Κεφάλαιο 2: Παρακολούθηση ηφαιστείων.....         | 55 |
| 2.1. Όργανα παρακολούθησης ηφαιστείων.....        | 55 |
| 2.2. Τρόποι παρακολούθησης ηφαιστείων.....        | 56 |
| 2.2.1. Σεισμική δραστηριότητα.....                | 56 |
| 2.2.2. Εδαφική παραμόρφωση.....                   | 57 |
| 2.2.3. Εκπομπές ηφαιστειακών αερίων.....          | 57 |
| 2.2.4. Τεχνικές τηλεανίχνευσης.....               | 59 |
| 2.2.5. Χρήση θερμικής ακτινοβολίας.....           | 65 |
| 2.3. Ετοιμότητα.....                              | 68 |
| 2.4. Προβλήματα πρόγνωσης.....                    | 69 |
| 2.5. Μετριάσμος κινδύνου.....                     | 70 |
| Κεφάλαιο 3: Το ηφαίστειο της Σαντορίνης.....      | 73 |
| 3.1. Γεωδυναμικό πλαίσιο.....                     | 73 |
| 3.2. Γεωλογία - Μορφολογία.....                   | 74 |
| 3.3. Σχηματισμός του νησιού.....                  | 78 |
| 3.4. Μινωική έκρηξη.....                          | 80 |
| 3.5. Η δημιουργία των νησίδων.....                | 82 |
| 3.5.1. Παλαιά Καμένη.....                         | 83 |
| 3.5.2. Νέα Καμένη.....                            | 85 |
| 3.5.3. Η τελευταία έκρηξη (1950).....             | 90 |
| 3.6. Τα πετρώματα των Καμένων.....                | 91 |
| 3.7. Η έκρηξη του Κολούμπο.....                   | 93 |
| 3.8. Η κατάσταση του ηφαιστείου σήμερα.....       | 95 |

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| Κεφάλαιο 4: Συστήματα παρακολούθησης του ηφαιστείου της Σαντορίνης..... | 97  |
| 4.1. Ι.Μ.Π.Η.Σ.....                                                     | 97  |
| 4.2. Σεισμική παρακολούθηση.....                                        | 99  |
| 4.3. Γεωδαιτική παρακολούθηση.....                                      | 102 |
| 4.4. Χημική παρακολούθηση.....                                          | 106 |
| 4.5. Θερμική παρακολούθηση.....                                         | 109 |
| 4.6. Τηλεμετρικό δίκτυο παρακολούθησης.....                             | 111 |
| Κεφάλαιο 5: Το ηφαίστειο της Αίτνας.....                                | 115 |
| 5.1. Κύρια χαρακτηριστικά.....                                          | 115 |
| 5.2. Τεκτονικό υπόβαθρο.....                                            | 117 |
| 5.3. Γεωλογική ιστορία.....                                             | 117 |
| 5.4. Σεισμοτεκτονικό καθεστώς.....                                      | 123 |
| 5.5. Ηφαιστειακή δραστηριότητα.....                                     | 124 |
| Κεφάλαιο 6: Συστήματα παρακολούθησης του ηφαιστείου της Αίτνας.....     | 128 |
| 6.1. Παρακολούθηση ροής λάβας.....                                      | 128 |
| 6.2. Παρακολούθηση σεισμικής δραστηριότητας.....                        | 132 |
| 6.3. Παρακολούθηση μέσω υπόηχων.....                                    | 135 |
| 6.4. Παρακολούθηση ηφαιστειακής τέφρας.....                             | 139 |
| 6.5. Παρακολούθηση εδαφικής παραμόρφωσης.....                           | 143 |
| 6.6. Γεωχημική παρακολούθηση.....                                       | 149 |
| Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα.....                                           | 154 |
| Βιβλιογραφία.....                                                       | 156 |
| I. Ελληνική.....                                                        | 156 |
| II. Ξενόγλωσση.....                                                     | 158 |
| III. Διαδικτυακές πηγές.....                                            | 165 |

## Περίληψη στα Ελληνικά

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σαν θέμα τη μελέτη της ηφαιστειακής δραστηριότητας της Σαντορίνης και της Αίτνας και των συστημάτων παρακολούθησής τους. Στόχος αυτής της εργασίας είναι η ανάλυση του φαινομένου των ηφαιστειών και πιο συγκεκριμένα πως δημιουργούνται, ποια είναι τα είδη τους και ποιοι είναι οι τρόπους με τους οποίους γίνεται η παρακολούθηση της δραστηριότητάς τους. Επιπλέον στόχο αποτελεί η παρουσίαση των δύο ηφαιστειών από την αρχή δημιουργίας τους, τα στάδια εξέλιξής τους μέσα στο χρόνο καθώς και οι τρόποι με τους οποίους παρακολουθείται η δραστηριότητά τους.

Η εργασία είναι δομημένη σε έξι μέρη. Πιο συγκεκριμένα:

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφεται το ηφαίστειο σαν γεωμορφή, τα επιμέρους μορφολογικά του χαρακτηριστικά καθώς και η δομή και η δράση των ηφαιστειών. Αναλύονται το πώς και που δημιουργούνται τα ηφαίστεια, πως το αποθηκευμένο μάγμα φθάνει στην επιφάνεια και τα ηφαιστειακά αναβλήματα, δηλαδή τα υλικά που απελευθερώνονται κατά την έκρηξη του ηφαιστείου. Επιπλέον, περιγράφονται οι τύποι και οι μορφές ηφαιστειών και τέλος γίνεται μία αναφορά στα πρόδρομα φαινόμενα των ηφαιστειακών εκρήξεων.

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναλύονται τα συστήματα παρακολούθησης των ηφαιστειών. Περιγράφεται η δυνατότητα παρακολούθησης της εδαφικής παραμόρφωσης, της σεισμικής παρακολούθησης μέσω των νέων τεχνολογιών (GPS , EDM , κάμερες Web κλπ.) και μέσω της τηλεπισκόπησης η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντική στον τομέα αυτό, καθώς με τη βοήθεια αυτής γίνονται σημαντικές μελέτες - παρατηρήσεις. Ακόμη, διευκρινίζονται οι τεχνικές με τις οποίες καταγράφονται τα αέρια και τα αερολύματα που απελευθερώνονται από την έκρηξη, οι ροές λάβας αλλά και οι θερμικές ανωμαλίες του τόπου.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται η μορφολογία της Σαντορίνης, η δημιουργία και η ιστορία του ηφαιστείου. Περιγράφονται αναλυτικά η ιστορική ηφαιστειακή δραστηριότητα του νησιού με όλες τις εκρήξεις που έχουν πραγματοποιηθεί ώστε να λάβει τη σημερινή του μορφή, τα αποτελέσματα και τις επιδράσεις αυτών. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στη σημερινή κατάσταση/μορφή του ηφαιστείου.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφεται το ολοκληρωμένο δίκτυο παρακολούθησης του ηφαιστείου και η σημασία και η δραστηριότητα του Ινστιτούτου Μελέτης και Παρακολούθησης του

Ηφαιστείου της Σαντορίνης (ΙΜΠΗΣ). Επιπλέον επιχειρείται η παρουσίαση των συστημάτων αυτών με φωτογραφικό υλικό.

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται αρχικά ορισμένα κύρια χαρακτηριστικά του ηφαιστείου της Αίτνας ενώ γίνεται αναφορά στο τεκτονικό υπόβαθρο της περιοχής σε συνδυασμό με τη γεωλογική της ιστορία. Επιπλέον γίνεται λόγος για τη σεισμικότητα αλλά και την ηφαιστειακή δραστηριότητα της ευρύτερης του ηφαιστείου περιοχής.

Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναφέρονται τα συστήματα και τα δίκτυα παρακολούθησης του ηφαιστείου της Αίτνας. Ειδικότερα, αναλύεται η παρακολούθηση της σεισμικής δραστηριότητας της περιοχής, των ρών λάβας, της εδαφικής παραμόρφωσης, των εκπομπών ηφαιστειακής τέφρας και της έκλυσης των ηφαιστειακών αερίων αλλά και η παρακολούθηση μέσω υπόηχων.

Τέλος, καταγράφεται μια σύνοψη συμπερασμάτων και ιδεών που σχετίζονται με τη σημασία και την βοήθεια των συστημάτων παρακολούθησης των ηφαιστειών γενικά και ειδικά αυτών των περιοχών μελέτης.

**Λέξεις κλειδιά:** Ηφαίστειο, ηφαιστειακή δραστηριότητα, συστήματα παρακολούθησης, Σαντορίνη, Αίτνα

## Abstract

This dissertation is a study of the volcanic activity and volcanic monitoring systems of Santorini Island and Etna. The phenomenon of volcanoes is analyzed and more specifically how volcanoes are created, what are the main volcano types and the ways in which they are monitored. The aim is to present the Santorini and Etna volcanoes from the beginning of their creation, their evolutionary stages through time and the ways they are monitored.

The thesis is structured in six chapters. Specifically:

The 1<sup>st</sup> chapter describes the volcanoes as landforms, their morphological features and the parts they consist of, as well as their structure and action. Specifically, it examines how the volcanoes are created, how magma reaches the surface, the volcanic debris created during the volcanic eruptions. This chapter describes also the types and the forms of volcanoes and the precursor phenomena of volcanic eruptions.

The 2<sup>nd</sup> chapter analyzes the methods volcanoes are monitored. It depicts the possibility of monitoring ground deformation, seismic monitoring via new technologies (e.g. GPS, EDM, Web cameras, etc.). Additionally, this chapter deals with the remote sensing techniques, which have significantly helped in conducting serious and important studies and surveys on volcanoes monitoring. Furthermore, the techniques used to record the gases and aerosols released by the explosion, the lava flows and the thermal anomalies of the region are also clarified.

The 3<sup>rd</sup> chapter presents the morphology of Santorini island, the creation and history of the volcano. A description of the historical volcanic activity of the island with all its explosions and their effects is also attempted. Additionally, this chapter discusses the status and the morphology of the volcano today.

The 4<sup>th</sup> chapter describes the integrated volcanic monitoring network, the significance and the activities of the Institute of Study and Monitoring of the Santorini Volcano (IMPIS). Furthermore, these systems and their functioning are presented through photographic material.

The 5<sup>th</sup> chapter presents some of the main features of Mount Etna and its tectonic background in conjunction with its geological history. In addition, the seismicity of the volcanic area and its volcanic activity are mentioned.

The 6<sup>th</sup> chapter deals with the presentation of the monitoring systems and networks of Mount Etna. In particular, the monitoring of seismic activity in the area, lava flows, ground deformation, volcanic ash and volcanic gases release, as well as monitoring through infrasound are analyzed.

The last part of the dissertation contains the concluding remarks regarding the ways of volcanic monitoring systems in general and specifically for the two case studies.

**Key Words:** Volcano, volcanic activity, monitoring systems, Santorini, Etna

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικ. 1. Μέρη ηφαιστείου.....                                                                                                              | 26 |
| Εικ. 2. Κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών της γης.....                                                                                    | 27 |
| Εικ. 3. Παγκόσμια κατανομή ηφαιστειών.....                                                                                                | 29 |
| Εικ. 4. Ηφαίστειο Mauna Loa στη Χαβάη.....                                                                                                | 34 |
| Εικ. 5. Ο κρατήρας του Βεζούβιου.....                                                                                                     | 37 |
| Εικ. 6. Τύποι ηφαιστειακών εκρήξεων.....                                                                                                  | 38 |
| Εικ. 7. Η εκρηκτικότητα διαφόρων τύπων ηφαιστειών με το ανάλογο αποτέλεσμα στο ύψος της τέφρας.....                                       | 39 |
| Εικ. 8. Η καλδέρα της Σαντορίνης.....                                                                                                     | 41 |
| Εικ. 9. Εκπομπές ηφαιστειακών αερίων στην Ελλάδα σύμφωνα με το επικρατές αέριο.....                                                       | 43 |
| Εικ. 10. Δομή ηφαιστείου και πιθανοί κίνδυνοι λόγω έκρηξής του.....                                                                       | 44 |
| Εικ. 11. Mount Mayon στις Φιλιππίνες.....                                                                                                 | 45 |
| Εικ. 12. Ροές λάβας.....                                                                                                                  | 46 |
| Εικ. 13. Έκρηξη του ηφαιστείου Pinatubo στις Φιλιππίνες το 1991.....                                                                      | 49 |
| Εικ. 14. Ηφαιστειακά νέφη από το ηφαίστειο Pinatubo στις Φιλιππίνες το 1991.....                                                          | 50 |
| Εικ. 15. Η έκρηξη του ηφαιστείου στο όρος της Αγίας Ελένης το 1980.....                                                                   | 51 |
| Εικ. 16. Στιγμιότυπο προβολής κάμερας Web από τους κρατήρες του ηφαιστείου της Αίτνας.....                                                | 59 |
| Εικ. 17. Ηφαιστειακοί θύσανοι.....                                                                                                        | 60 |
| Εικ. 18. Θόλος λάβας.....                                                                                                                 | 60 |
| Εικ. 19. Παρατήρηση θερμικών ανωμαλιών.....                                                                                               | 61 |
| Εικ. 20. Παρακολούθηση ροών λάβας.....                                                                                                    | 62 |
| Εικ. 21. Παρακολούθηση αλλαγών στην τοπογραφία και στην εδαφική κάλυψη.....                                                               | 62 |
| Εικ. 22. Γεωμετρία λήψης στερεοσκοπικών εικόνων από τον δορυφόρο SPOT.....                                                                | 63 |
| Εικ. 23. Γεωμετρία λήψης στερεο-ζεύγους από τον δορυφόρο Terra και το όργανο καταγραφής ASTER.....                                        | 64 |
| Εικ. 24. Εξοπλισμός τεχνολογίας LIDAR.....                                                                                                | 64 |
| Εικ. 25. Παρακολούθηση παραμόρφωσης του εδάφους.....                                                                                      | 65 |
| Εικ. 26. Εικόνες του δορυφόρου Landsat-7 πάνω από το ηφαίστειο Pacaya στη Γουατεμάλα λίγο πριν την έκρηξη στις 2 Μαρτίου 2014.....        | 68 |
| Εικ. 27. Ηφαιστειακή στάχτη από την έκρηξη του ηφαιστείου της Αγίας Ελένης το 1980.....                                                   | 72 |
| Εικ. 28. Θέση της Σαντορίνης σε σχέση με τον ελλαδικό χώρο.....                                                                           | 73 |
| Εικ. 29. Χάρτης Σαντορίνης.....                                                                                                           | 74 |
| Εικ. 30. Τρισδιάστατη απεικόνιση της καλδέρας της Σαντορίνης.....                                                                         | 76 |
| Εικ. 31. Γραμμές Καμένης και Κολούμπο.....                                                                                                | 77 |
| Εικ. 32. Ηφαιστειακός χάρτης Παλαιάς και Νέας Καμένης.....                                                                                | 77 |
| Εικ. 33. Η νήσος Στρογγύλη.....                                                                                                           | 78 |
| Εικ. 34. Η εξέλιξη του σχηματισμού της καλδέρας της Σαντορίνης πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την έκρηξη του 1700π.Χ.....                | 79 |
| Εικ. 35. Κλιμακοστάσιο οικίας την Ύστερη Εποχή του Χαλκού στο Ακρωτήρι ύστερα από τους σεισμούς που προηγήθηκαν της μινωικής έκρηξης..... | 81 |
| Εικ. 36. Δεκάδες μέτρα πάχους λευκής τέφρας από τη μινωική έκρηξη στη Σαντορίνη.....                                                      | 82 |
| Εικ. 37. Οι ανατολικοί άνεμοι της στρατόσφαιρας άπλωσαν τη λεπτή στάχτη από τη μινωική έκρηξη στο ανατολικό Αιγαίο και τη Μικρά Ασία..... | 82 |
| Εικ. 38. Έκρηξη του 197 π.Χ. και δημιουργία νήσου Ιερά.....                                                                               | 83 |
| Εικ. 39. Έκρηξη του 46-47 μ.Χ.....                                                                                                        | 84 |
| Εικ. 40. Παλαιά καμένη ύστερα από την έκρηξη το 726.....                                                                                  | 84 |

|                                                                                                                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Εικ. 41. Η λάβα από την έκρηξη το 726 στο ΒΑ ακρωτήριο της Παλαιάς Καμένης.....                                                                                                                                              | 85  |
| Εικ. 42. Σχηματισμός Μικρής Καμένης από την έκρηξη το 1570.....                                                                                                                                                              | 85  |
| Εικ. 43. Σχηματισμός Νέας Καμένης από την έκρηξη το 1707.....                                                                                                                                                                | 86  |
| Εικ. 44. Σχηματισμός Νέας Καμένης το 1925.....                                                                                                                                                                               | 87  |
| Εικ. 45. Έκρηξη της Δάφνης τον Ιανουάριο του 1926.....                                                                                                                                                                       | 88  |
| Εικ. 46. Σχηματισμός Καμένων το χρονικό διάστημα 1939-1941.....                                                                                                                                                              | 89  |
| Εικ. 47. Ο θόλος Τριτώνας κατά την έκρηξη στις 22 Αυγούστου 1939.....                                                                                                                                                        | 89  |
| Εικ. 48. Ο θόλος Φουκέ κατά την έκρηξη στις 25 Νοεμβρίου 1939.....                                                                                                                                                           | 90  |
| Εικ. 49. Έκρηξη ηφαιστείου Σαντορίνης 1950.....                                                                                                                                                                              | 90  |
| Εικ. 50. Σχηματισμός Καμένων το 1950.....                                                                                                                                                                                    | 91  |
| Εικ. 51. Σύμπλεγμα κρυστάλλων ολιβίνη, πυρόξενου και άστριου φωτογραφημένα στο<br>πολωτικό μικροσκόπιο.....                                                                                                                  | 92  |
| Εικ. 52. Λάβες που έχουν υποστεί ταχεία ψύξη, στις βορειοδυτικές πλαγιές του θόλου Νίκη...92                                                                                                                                 |     |
| Εικ. 53. Λάβες που ψύχθηκαν αργά, στον όρμο του Αγίου Νικολάου της Παλαιάς Καμένης.....93                                                                                                                                    |     |
| Εικ. 54. Τρισδιάστατη απεικόνιση της σημερινής μορφολογίας του ηφαιστείου του<br>Κολούμπου.....                                                                                                                              | 93  |
| Εικ. 55. Η κορυφή του ηφαιστείου του Κολούμπου αποτελεί σήμερα ένα βυθό σπαρμένο με<br>την ελαφρόπετρα της έκρηξης του 1650.....                                                                                             | 94  |
| Εικ. 56. Σχηματική απεικόνιση της έκρηξης Κολούμπο το χρονικό διάστημα 1649-1650.....94                                                                                                                                      |     |
| Εικ. 57. Εργασίες για την παρακολούθηση του ηφαιστείου.....                                                                                                                                                                  | 97  |
| Εικ. 58. Συστήματα παρακολούθησης στη Σαντορίνη.....                                                                                                                                                                         | 98  |
| Εικ. 59. Τοπικό Μόνιμο Δίκτυο παρακολούθησης του Ι.Μ.Π.Η.Σ.....                                                                                                                                                              | 99  |
| Εικ. 60. Σεισμογράφοι για την παρακολούθηση του ηφαιστείου της Σαντορίνης.....                                                                                                                                               | 100 |
| Εικ. 61. Σεισμολογικό δίκτυο Σαντορίνης.....                                                                                                                                                                                 | 100 |
| Εικ. 62. Σεισμολογικός σταθμός THR6 του δικτύου του ΙΜΠΗΣ που είναι εγκατεστημένος<br>στην περιοχή του Ακρωτηρίου.....                                                                                                       | 101 |
| Εικ. 63. Οικίσκος σεισμολογικού σταθμού CMBO στην περιοχή του Ακρωτηρίου Κολούμπο<br>στη βόρεια Θήρα.....                                                                                                                    | 101 |
| Εικ. 64. Θέσεις μόνιμων σταθμών του GNSS δικτύου του Ι.Μ.Π.Η.Σ. στη Σαντορίνη.....                                                                                                                                           | 102 |
| Εικ. 65. Κεραία (αριστερά) του μόνιμου σταθμού GNSS-AFAL στην Οία και ο δέκτης και τα<br>εξαρτήματά του (δεξιά).....                                                                                                         | 104 |
| Εικ. 66. Το δίκτυο των παλιροιογράφων στη Σαντορίνη με 4 σταθμούς και 1 των<br>θερμοπηγών Αγ. Νικολάου.....                                                                                                                  | 105 |
| Εικ. 67. Δίκτυα Παλιροιογράφων.....                                                                                                                                                                                          | 105 |
| Εικ. 68. Γεωφυσικοί-Γεωχημικοί σταθμοί του Ι.Μ.Π.Η.Σ. στη Σαντορίνη.....                                                                                                                                                     | 106 |
| Εικ. 69. Σταθμός παρακολούθησης εδαφικής ροής CO <sub>2</sub> στη Νέα Καμένη.....                                                                                                                                            | 107 |
| Εικ. 70. Ενδείξεις μετρήσεων ροής CO <sub>2</sub> , θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης.....                                                                                                                               | 109 |
| Εικ. 71. Σταθμοί θερμικής παρακολούθησης της μέγιστης θερμοκρασίας των ατμίδων της<br>Νέας Καμένης.....                                                                                                                      | 110 |
| Εικ. 72. Τηλεμετρικό δίκτυο GPS για την παρακολούθηση του ηφαιστείου της Σαντορίνης.....                                                                                                                                     | 112 |
| Εικ. 73. Οι έντεκα μόνιμοι σταθμοί GPS της Σαντορίνης.....                                                                                                                                                                   | 114 |
| Εικ. 74. Αριστερά: σχηματικός χάρτης των κεντρικών κρατήρων του ηφαιστείου της Αίτνας.<br>Δεξιά: λήψη φωτογραφίας τον Αύγουστο του 2007 κατά τη διάρκεια της<br>δραστηριότητας παρακολούθησης του INGV-CT με ελικόπτερα..... | 115 |
| Εικ. 75. Το ηφαίστειο της Αίτνας.....                                                                                                                                                                                        | 116 |
| Εικ. 76. Ηφαίστειο Αίτνας.....                                                                                                                                                                                               | 118 |
| Εικ. 77. Ενεργά ρήγματα που έχουν χαρτογραφηθεί από σεισμοτεκτονικά δεδομένα.....                                                                                                                                            | 121 |
| Εικ. 78. Στήλη έκρηξης που δημιουργήθηκε κατά τη δραστηριότητα της 24ης Ιουλίου 2001...122                                                                                                                                   |     |

|                                                                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Εικ. 79. Πίνακας κύριων και πλευρικών εκρήξεων που εξέπεμψαν μεγάλους όγκους λάβας<br>το χρονικό διάστημα 1981 – 2018.....                                                                              | 127 |
| Εικ. 80. Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο (DEM) της κορυφής του όρους Αίτνα.....                                                                                                                              | 129 |
| Εικ.81. Λήψη από το διαστημικό απεικονιστικό ραντάρ SIR-C/X-SAR του διαστημικού<br>λεωφορείου Endeavour στις 11 Οκτωβρίου του 1994.....                                                                 | 129 |
| Εικ. 82. Χάρτης ροής λάβας των ετών 2017, 2018 και 2019 σε σκιασμένο ανάγλυφο.....                                                                                                                      | 131 |
| Εικ. 83. Ορθοεικόνες του εξαερισμού.....                                                                                                                                                                | 132 |
| Εικ. 84. Σεισμικοί σταθμοί που βρίσκονται το 2013 στη Σικελία και τη Νότια Καλαβρία.....                                                                                                                | 134 |
| Εικ. 85. Υποηχητικά σήματα από το ηφαιστείο της Αίτνας που σχετίζονται με το συντριβάνι<br>λάβας που καταγράφηκαν στις 21 Μαΐου 2016 στις συστοιχίες ETN, IS48, AMT και<br>OHP.....                     | 136 |
| Εικ. 86. Χάρτης της Ανατολικής Μεσογείου που δείχνει τη θέση του ηφαιστείου της Αίτνας<br>και τις απομακρυσμένες συστοιχίες υπερήχων.....                                                               | 137 |
| Εικ. 87. Χρόνος έκδοσης VAA από την Toulouse VAAC.....                                                                                                                                                  | 138 |
| Εικ. 88. Το λογισμικό VISUALGRIB μπορεί να σχεδιάσει την πρόβλεψη της διεύθυνσης<br>και της ταχύτητας του ανέμου, της νεφοκάλυψης, της θερμοκρασίας και της<br>βροχόπτωσης για δύο ημέρες.....          | 140 |
| Εικ. 89. Δορυφόρος SEVIRI.....                                                                                                                                                                          | 141 |
| Εικ.90. Εικόνες από το δορυφόρο SEVIRI που δείχνουν τη διασπορά του λοφίου με<br>κατεύθυνση προς τα NA στις 24 Νοεμβρίου 2006 στις 08:30 GMT από τα μοντέλα<br>FALL3D και HAZMAP.....                   | 142 |
| Εικ. 91. Μετατόπιση του ηφαιστειακού νέφους που διαμορφώθηκε από το μοντέλο<br>διασποράς TERHRA που αντανακλά την αλλαγή της κατεύθυνσης του ανέμου<br>από NA σε NNA στις 24 Νοεμβρίου 2006.....        | 142 |
| Εικ. 92. Εγκαταστάσεις σταθμών παρακολούθησης της κλίσης του ηφαιστείου.....                                                                                                                            | 144 |
| Εικ. 93. Μοτίβα διανυσμάτων μετατόπισης φάσεων πληθωρισμού.....                                                                                                                                         | 144 |
| Εικ. 94. Χάρτης Αίτνας με τα διαφορετικά δίκτυα γεωδαιτικής παρακολούθησης.....                                                                                                                         | 146 |
| Εικ. 95. Χάρτης των μόνιμων δικτύων κλίσης και σεισμού που λειτουργούν στην Αίτνα.....                                                                                                                  | 147 |
| Εικ.96. Χάρτης των τριών αισθητήρων (PLC, PDN και ECP) που έχουν τοποθετηθεί στην<br>περιοχή της κορυφής του ηφαιστείου της Αίτνας.....                                                                 | 148 |
| Εικ. 97. Επιβάρυνση μάζας SO <sub>2</sub> που συλλέχθηκε από τον TROPOMI/S5P στις 30 Μαΐου<br>2019.....                                                                                                 | 150 |
| Εικ. 98. Χάρτης του όρους Αίτνα που δείχνει τη θέση του δικτύου αερίου.....                                                                                                                             | 151 |
| Εικ. 99. Παράδειγμα μεθόδων που χρησιμοποιούνται για το φιλτράρισμα των δεδομένων<br>ροής CO <sub>2</sub> που εξάγεται από το σταθμό που επηρεάζεται περισσότερο από<br>μετεωρολογικές παραμέτρους..... | 152 |
| Εικ. 100. Επιρροή της βροχόπτωσης στον σταθμό 3c του δικτύου.....                                                                                                                                       | 153 |

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

|                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Πίν.1: Είδος σωματιδίων τέφρας και πυκνότητα αυτών.....                                                                                     | 31  |
| Πίν.2: Οι εκτάσεις του νησιωτικού συμπλέγματος της Σαντορίνης ανά νησί.....                                                                 | 75  |
| Πίν.3: Βασικές πληροφορίες για τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τον τρόπο λειτουργίας κάθε μόνιμου σταθμού GNSS του δικτύου του Ι.Μ.Π.Η.Σ..... | 103 |
| Πίν.4: Οι έντεκα μόνιμοι σταθμοί GPS της Σαντορίνης.....                                                                                    | 113 |

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ/ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

|          |                                                                     |
|----------|---------------------------------------------------------------------|
| ΑΠΘ      | Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης                              |
| ΓΓΕΤ     | Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας                           |
| ΕΑΓΜΕ    | Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών                  |
| ΕΕ       | Ευρωπαϊκή Ένωση                                                     |
| ΕΚΠΑ     | Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών                        |
| ΕΛΚΕΘΕ   | Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών                                   |
| ΕΜΠ      | Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο                                         |
| ΗΠΑ      | Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής                                         |
| ΙΜΠΗΣ    | Ινστιτούτο Μελέτης και Παρακολούθησης του Ηφαιστείου της Σαντορίνης |
| ΚΔΔ      | Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου                                           |
| ΜΜΕ      | Μέσα Μαζικής Επικοινωνίας                                           |
| ΟΑΣΠ     | Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού & Προστασίας                    |
| ΠΕΝΕΔ    | Πρόγραμμα Ενίσχυσης Ερευνητικού Δυναμικού                           |
| COSPECS  | Correlation Spectors                                                |
| DEM      | Digital ElevationModels                                             |
| EDM      | Electrooptical Distance Measurements                                |
| ESA      | European Space Agency                                               |
| EUMETSAT | Eumetcast Satellite                                                 |
| GNSS     | Global Navigation Satellite System                                  |
| GPS      | Global Position System                                              |
| IAVW     | International Airways Volcano Watch                                 |
| ICAO     | International Civil Aviation Organization                           |
| INGV-CT  | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia sezione di Catania   |
| InSAR    | Interferometric Synthetic Aperture Radar                            |
| JMA      | Japan Meteorological Agency                                         |
| LIDAR    | Light Detection and Ranging                                         |
| PPP      | Precise Point Positioning                                           |
| SEVIRI   | Spin Enhanced Visible and Infrared Imager                           |
| TOMS     | Total Ozone Mapping Spectrometer                                    |
| TROPOMI  | Tropospheric Monitoring Instrument                                  |

|      |                                 |
|------|---------------------------------|
| UAV  | Unmanned Aerial Vehicle         |
| USGS | United States Geological Survey |
| VAAC | Volcanic Ash Advisory Centers   |

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ικανότητα συλλογής πληροφοριών για τον κόσμο και παρουσίασης με τρόπους που μπορούν να γίνουν αντιληπτοί από την ανθρώπινη οπτική, αποτελεί τον υψηλότερο στόχο της απεικονιστικής επιστήμης στην τηλεπισκόπηση. Σε όλες τις εφαρμογές, από την περιβαλλοντική παρακολούθηση μέχρι τη συλλογή πληροφορίας περισσότερο εξειδικευμένων επιστημονικών δεδομένων, αναφαίνεται η ανάγκη για απόκτηση ακριβέστερων πληροφοριών με γρήγορους και αποτελεσματικούς τρόπους. Ακριβώς αυτή η ανάγκη έχει οδηγήσει στη μελέτη και ανάπτυξη εξαιρετικών τεχνολογιών, που βοηθούν τους επιστήμονες στην κατανόηση και αντιμετώπιση φαινομένων που θα μπορούσαν ακόμη και να απειλούν τον πλανήτη μας.

Ποτέ πριν ο άνθρωπος δεν μπορούσε να εξετάσει τη γη καθώς και τα διάφορα περιβαλλοντικά φαινόμενα με τόση ακρίβεια. Φυσικά φαινόμενα, όπως σεισμοί, κυκλώνες, καταιγίδες, πλημμύρες, ηφαιστειακές εκρήξεις καθώς και άλλα επικίνδυνα και καταστροφικά φαινόμενα στη στεριά και στη θάλασσα, αποτέλεσαν, κατά τη διάρκεια της ιστορίας, αντικείμενα φόβου, προλήψεων και δεισιδαιμονιών. Σήμερα, με τη βοήθεια της δορυφορικής τεχνολογίας, μπορούν να παρατηρηθούν και να γίνουν αντιληπτές οι ιδιομορφίες και η πολυπλοκότητα του πλανήτη, να γίνουν κατανοητές οι αιτίες των διαφόρων περιβαλλοντικών και μετεωρολογικών φαινομένων και ενδεχομένως να αναπτυχθούν τρόποι άμυνας και αντιμετώπισης αυτών.

Η παρακολούθηση του γήινου οικοσυστήματος αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές της τηλεπισκόπησης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται πλατφόρμες τόσο στον αέρα όσο και στο διάστημα, οι οποίες παρέχουν τη δυνατότητα κατανόησης των καιρικών συστημάτων, των κλιματολογικών μεταβολών καθώς και των διαφόρων γεωλογικών φαινομένων, από μια παγκόσμια οπτική.

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις αποτελούν μερικές από τις πιο έντονες και βίαιες διεργασίες στη Γη. Σε πολλές περιπτώσεις αναγκάζουν τους κατοίκους περιοχών κοντά σε ενεργά ηφαίστεια να εγκαταλείψουν τη γη και τις οικίες τους, μερικές φορές για πάντα. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα τα τελευταία 300 χρόνια έχει προκαλέσει το θάνατο περισσότερων από 250.000 ανθρώπων, καταστρέφοντας ολόκληρες πόλεις και δάση και διαταράσσοντας έντονα τις τοπικές οικονομίες. Τα ηφαίστεια μπορεί να ενέχουν σημαντικούς φυσικούς κινδύνους για ανθρώπους που βρίσκονται κοντά σε αυτά κυρίως εξαιτίας πολλών διεργασιών και

φαινομένων που σχετίζονται με τη δραστηριότητά τους όπως: α) πυροκλαστικές εκρήξεις που είναι ικανές να καλύψουν εκτενείς περιοχές με καυτή τέφρα, σκόνη και καπνό μέσα σε λίγες ώρες ή λεπτά, β) φλεγόμενα υλικά, εκτοξευόμενα από τον κρατήρα του ηφαιστείου, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν πυρκαγιές σε πόλεις και δάση ενώ ποτάμια λάβας μπορούν να καταστρέψουν τα πάντα στο πέρασμά τους αλλάζοντας εντελώς το τοπίο, γ) καταρρακτώδεις βροχοπτώσεις ή των καλυμμάτων πάγου ενός ηφαιστείου μπορούν να εκκινήσουν τεράστιες λασποροές για ολόκληρα χιλιόμετρα καλύπτοντας πόλεις και χωριά στο πέρασμά τους, δ) τεράστιες ποσότητες αερίων και στάχτης απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα, όπου μερικές φορές μπορούν να επηρεάσουν το κλίμα σε παγκόσμια κλίμακα. Η παρακολούθηση των ηφαιστείων λοιπόν συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση της ηφαιστειακής δραστηριότητας, στη βελτιστοποίηση της αξιολόγησης των κινδύνων που εγκυμονούν και επομένως στο μετριασμό τους.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ηφαιστεια

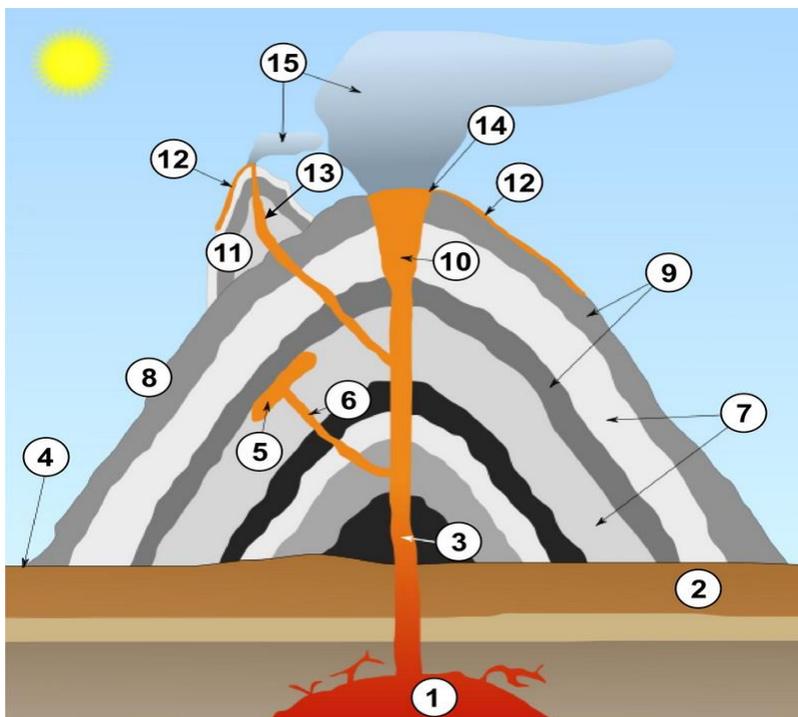
## 1.1. Γενικά περί ηφαιστειών

Ηφαιστειότητα καλείται η δραστηριότητα και όλα τα φαινόμενα που συνδέονται με την άνοδο και έξοδο εκρηξιγενούς (τηγμένου) υλικού από το εσωτερικό της γης στην επιφάνεια. Ως ηφαιστειο ορίζεται η γεωμορφή που σχετίζεται με τη δίοδο τηγμένου υλικού και αερίων από το εσωτερικό στην επιφάνεια της γης, με τη μορφή λάβας (Καρύμπαλης, 2008). Η περιοχή γύρω από το κυρίως ηφαιστειο καλείται ηφαιστειακή περιοχή και χαρακτηριστικό της είναι η σύσταση των πετρωμάτων της (ηφαιστειακά πετρώματα), κυρίως ασβεσταλκαλικών (πλούσιων σε ασβέστιο), αλκαλικών (πλούσιων σε νάτριο) και καλιούχων (πλούσιων σε κάλιο).

Τα ηφαιστεια έχουν ορισμένα γεωλογικά γνωρίσματα όπως είναι ο ηφαιστειακός πόρος (volcanic vent), το άνοιγμα δηλαδή στην επιφάνεια της γης απ' όπου εξέρχεται ηφαιστειακό υλικό κατά την έκρηξη. Κάθε ηφαιστειο διαθέτει ένα κεντρικό πόρο (central vent), πάνω από τον οποίο δημιουργείται μια μικρή ταπείνωση που καλείται κεντρικός κρατήρας ή κρατήρας κορυφής (summit crater). Το ηφαιστειακό οικοδόμημα σχηματίζεται από την έκρηξη ηφαιστειακού υλικού, το οποίο συσσωρεύεται και στερεοποιείται πέριξ του κεντρικού αγωγού του ηφαιστειού, συνήθως με τη μορφή κώνου ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις μορφολογικά διαμορφώνει ένα βουνό. Συνήθως είναι προσωρινός σχηματισμός, που μεταβάλλεται μετά από μία ηφαιστειακή ενέργεια ή καταστρέφεται μετά από μια βίαιη έκρηξη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η δημιουργία των νησιών της Χαβάης, όπου η έκρηξη έγινε στο βυθό της θάλασσας και η λάβα που συσσωρεύτηκε γύρω από τον κρατήρα ήταν τόση που δημιούργησε βουνό που εξήλθε στην επιφάνεια. Ο κεντρικός πόρος συνδέεται στο βάθος με το μαγματικό θάλαμο (magma chamber) που είναι ο βασικός ταμιευτήρας του ηφαιστειακού υλικού. Βέβαια η έκχυση των ηφαιστειακών υλικών πολλές φορές γίνεται από περισσότερους του ενός πόρων που βρίσκονται στις πλευρές του κώνου. Οι πλευρές (flanks) του ηφαιστειού είναι συνήθως ασταθείς και περιέχουν κατακόρυφες ρηγματώσεις που επικοινωνούν με τον κύριο μαγματικό θάλαμο ή με κάποιο δευτερεύοντα μαγματικό θάλαμο σε μικρότερο βάθος. Συχνά αυτές οι ρηγματώσεις αποτελούν φλέβες τροφοδοσίας πλευρικών εκρήξεων (flank eruptions) καθώς μάγμα εκχύνεται περιοδικά στις πλευρές του ηφαιστειακού οικοδομήματος. Οι εκρήξεις αυτές δημιουργούν κώνους ηφαιστειακού υλικού που ονομάζονται παρασιτικοί κώνοι (parasitic cones). Επίσης οι ρηγματώσεις μπορούν να

αποτελέσουν διεξόδους διαφυγής ηφαιστειακών αερίων δημιουργώντας έτσι τις ατμίδες ή φουμαρόλες (fumaroles).

Το μάγμα είναι υπόγειο, τηγμένο πέτρωμα που είναι διάπυρο και περιέχει αρκετά αέρια και συγκεντρώνεται στους μαγματικούς θαλάμους. Είναι ικανό να παρεισφρήσει στα παρακείμενα πετρώματα, να εξέλθει στην επιφάνεια με τη μορφή λάβας, και να προκαλέσει εκρηκτική εκτίναξη τέφρας με τη μορφή πυροκλαστικών πετρωμάτων. Είναι μία σύνθετη, υγρή ουσία, με τις θερμοκρασίες της να κυμαίνονται από 700°C έως 1300°C. Οι μορφές της ηφαιστειακής δραστηριότητας εξαρτώνται από τον τρόπο που έρχεται το μάγμα στην επιφάνεια και από τη σύστασή του. Η βιαιότητα των εκρήξεων είναι αποτέλεσμα της χημικής σύστασης του μάγματος. Τα μάγματα που περιέχουν μεγάλο ποσοστό πυριτίου ( $\text{SiO}_2 > 65\%$ ) ονομάζονται όξινα και έχουν μεγάλα ποσοστά αερίων και μικρή πυκνότητα. Όταν αυτά φθάνουν στην επιφάνεια έχουν θερμοκρασία που ανέρχεται στους 900°C περίπου. Τέτοια μάγματα εκρήγνυνται όταν η πίεσή τους υπερβεί το βάρος των υπερκείμενων στρωμάτων. Αντίθετα, όταν το ποσοστό του πυριτίου είναι σχετικά μικρό ( $\text{SiO}_2 < 50\%$ ) το μάγμα λέγεται βασαλτικό, είναι λιγότερο βίαιο σε εκρήξεις από το πυριτικό και φθάνοντας στην επιφάνεια έχει θερμοκρασία γύρω στους 1200°C.

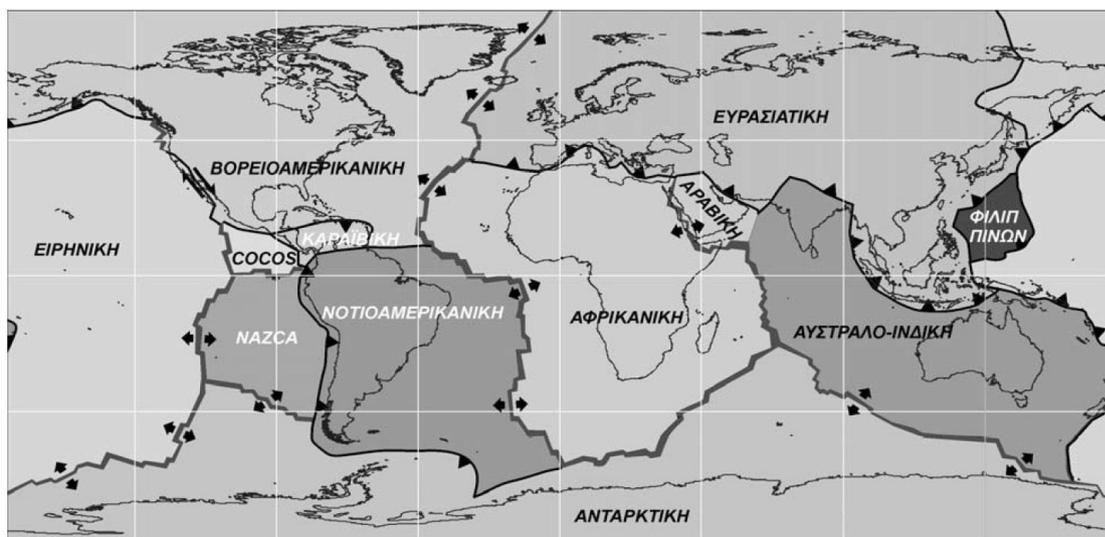


Εικόνα 1: Μέρη ηφαιστείου [Πηγή: [http://www.geo.auth.gr/765/2\\_landforms/21\\_volcano\\_types.htm](http://www.geo.auth.gr/765/2_landforms/21_volcano_types.htm) (Ανάκτηση 26-11-21)]

|                        |                               |                        |
|------------------------|-------------------------------|------------------------|
| 1. Μαγματικός θάλαμος  | 6. Φλέβα τροφοδοσίας          | 11. Παρασιτικός κώνος  |
| 2. Υπόβαθρο            | 7. Παλαιότερα στρώματα τέφρας | 12. Ρεύματα λάβας      |
| 3. Κεντρικός αγωγός    | 8. Πλευρά του ηφαιστείου      | 13. Πλευρικός πόρος    |
| 4. Βάση του ηφαιστείου | 9. Παλαιότερα ρεύματα λάβας   | 14. Κεντρικός κρατήρας |
| 5. Παρείσακτη κοίτη    | 10. Κεντρικός πόρος           | 15. Σύννεφο στάχτης    |

## 1.2. Γεωγραφική κατανομή ηφαιστείων

Η ηφαιστειότητα είναι παγκόσμιο φαινόμενο και άρρηκτα συνδεδεμένο με την τεκτονική των λιθοσφαιρικών πλακών. Όπως παρατηρείται τα ηφαίστεια συγκεντρώνονται σε ορισμένες γεωγραφικές θέσεις όπου αποτελούν όρια μεγάλων λιθοσφαιρικών πλακών. Ο φλοιός της γης, είτε είναι ηπειρωτικός, είτε ωκεάνιος, χωρίζεται σε μεγάλα τμήματα που ονομάζονται λιθοσφαιρικές πλάκες. Βέβαια μια λιθοσφαιρική πλάκα μπορεί να αποτελείται και από ηπειρωτικό και από ωκεάνιο φλοιό. Οι πλάκες αυτές κινούνται πάνω σε ένα παχύρρευστο στρώμα του μανδύα που βρίσκεται ακριβώς από κάτω τους. Κατά τη διάρκεια σύγκλισης ή απομάκρυνσής τους, αυτές αλληλεπιδρούν με άλλα γήινα υλικά στα όρια των πλακών και παράγουν λειωμένους βράχους που καλούνται μάγμα και περιέχει μικρά αλλά σημαντικά ποσά διαλυμένων αερίων, συνήθως υδρατμούς και διοξείδιο του άνθρακα. Μόλις το μάγμα εκραγεί επάνω στη γήινη επιφάνεια αναφέρεται ως λάβα.



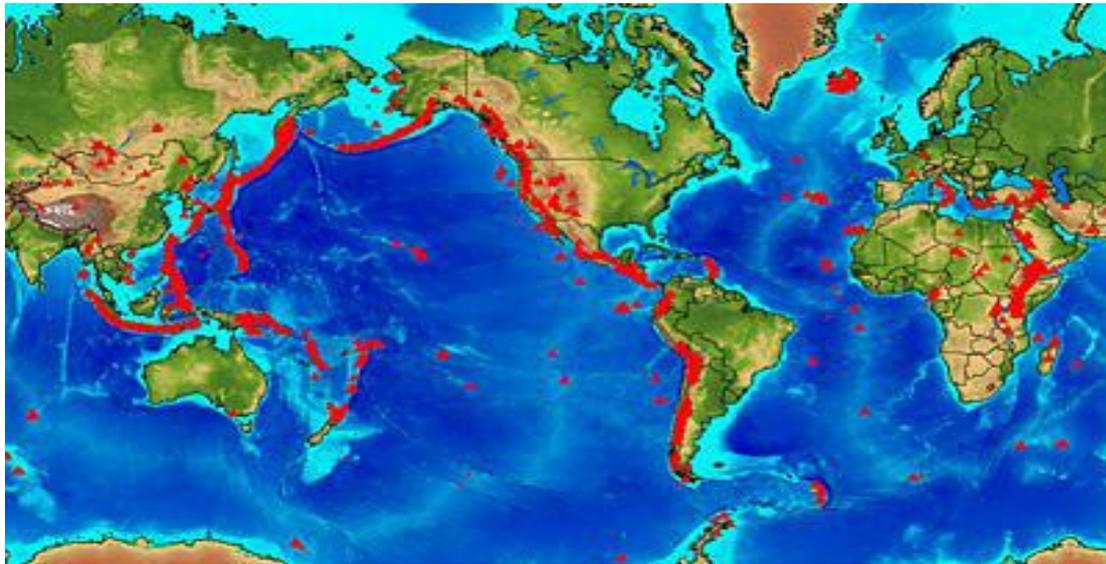
Εικόνα 2: Κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών της γης [Πηγή: Λέκκας, 2007]

Όταν δύο πλάκες απομακρύνονται, τότε μάγμα βασικής σύστασης (με περιεκτικότητα σε Si από 46% έως 53%) ανεβαίνει από την περιοχή του μανδύα και ψύχεται στον ωκεάνιο πυθμένα. Συνεπώς, στα σημεία απομάκρυνσης των πλακών, δηλαδή κατά μήκος των μεσο-ωκεάνιων ραχών, δημιουργούνται υποθαλάσσια ηφαίστεια και η λάβα που αυτά δημιουργούν καλύπτει τα ίχνη που υποδηλώνουν την απομάκρυνση των πλακών και δημιουργεί νέο ωκεάνιο φλοιό κατά μήκος των μεσο-ωκεάνιων ραχών. Στον ηπειρωτικό φλοιό το 15% των ενεργών ηφαιστείων βρίσκεται σε περιοχές απομακρύνσεις πλακών. Για παράδειγμα, κατά μήκος της Μεσο-Ατλαντικής ράχης, υπάρχουν ηφαίστεια στην Ισλανδία, στις Αζόρες και στην τεκτονική τάφρο της Ανατολικής Αφρικής.

Ηφαίστεια εμφανίζονται επίσης εκεί που έχουμε σύγκλιση λιθοσφαιρικών πλακών ή σε περιοχές που οι πλάκες κινούνται παράλληλα μεταξύ τους και χαρακτηρίζονται από πολύ ψηλές κορυφές που βρίσκονται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Τα ηφαίστεια αυτά δεν δημιουργούνται ακριβώς στο σημείο σύγκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών, όπου η ωκεάνια πλάκα λόγω της μεγαλύτερης της πυκνότητας βυθίζεται κάτω από την ηπειρωτική. Στο σημείο σύγκλισης σχηματίζεται βαθιά ωκεάνια τάφρος με τα ηφαίστεια να δημιουργούνται στην επιφάνεια της ηπειρωτικής πλάκας, περίπου 200 km από το σημείο σύγκλισης σε μια περιοχή, όπου η καταβυθιζόμενη πλάκα έχει φτάσει σε βάθος 100 km. Στο βάθος αυτό, οι υψηλές θερμοκρασίες, τα χαμηλά σημεία τήξης των πετρωμάτων που βυθίστηκαν και η προσθήκη νερού και διοξειδίου του άνθρακα από τα ιζήματα του θαλάσσιου πυθμένα που συμπαρασύρθηκαν από την καταβυθιζόμενη πλάκα, δημιουργούν ιδανικές συνθήκες για το σχηματισμό μεγάλων ποσοτήτων μάγματος, το οποίο ανέρχεται στην επιφάνεια της γης. Η λάβα αυτών των ηφαιστειών έχει περισσότερο πυριτική σύσταση από το μάγμα που προέρχεται κατευθείαν από τον μανδύα. Τα περισσότερα ορατά και ενεργά ηφαίστεια στον κόσμο βρίσκονται εκεί που δύο πλάκες συγκρούονται και η μία βυθίζεται κάτω από την άλλη. Ο Ειρηνικός ωκεανός περιβάλλεται σε τρεις πλευρές από υποβυθιζόμενα όρια πλακών. Ως αποτέλεσμα, μεγάλο δαχτυλίδι από ηφαίστεια περιτριγυρίζει τον ωκεανό – το γνωστό δαχτυλίδι της φωτιάς.

Υπάρχουν και μερικά ηφαίστεια που βρίσκονται στο μέσο μιας πλάκας και ονομάζονται «θερμές κηλίδες» (“hot spots”). Στήλη βασαλτικού μάγματος υψηλής θερμοκρασίας που βρίσκεται στον μανδύα κάτω από τις κινούμενες πλάκες, λόγω της μικρότερης πυκνότητάς της από τα πετρώματα που την περιβάλλουν, ανέρχεται εύκολα προς τα πάνω διεισδύοντας μέσα στα πετρώματα της υπερκείμενης πλάκας, έρχεται σε επαφή με το στερεό φλοιό, τον οποίο λιώνει και δημιουργεί τα συγκεκριμένα ηφαίστεια. Καθώς η πλάκα κινείται και περνά από σημεία hot-spot, νέα ηφαίστεια σχηματίζονται, όμοια με τα παλιότερα που είχαν δημιουργηθεί στις ίδιες ακριβώς γεωγραφικές θέσεις. Τα παλιά αυτά ηφαίστεια ακολουθούν την κίνηση της πλάκας και απομακρύνονται από την αρχική τους θέση, δημιουργώντας έτσι μια σειρά ενεργών και ανενεργών ηφαιστειών. Το ανερχόμενο μάγμα δημιουργείται από την εξαναγκασμένη άνοδο ρευστών μαζών του μανδύα λόγω φαινομένων άντλησης (upwelling) που οφείλονται σε θερμικά ρεύματα ανάδευσης, που υπάρχουν σε αυτόν. Στην κατηγορία αυτή εμπίπτει το 5% των ενεργών ηφαιστειών, με χαρακτηριστικό

παράδειγμα τα ηφαίστεια της Χαβάης που βρίσκονται στην Ειρηνική πλάκα σε απόσταση 4.000 km από το κοντινότερο όριο πλάκας (Βουβαλίδης, 2011).



Εικόνα 3: Παγκόσμια κατανομή ηφαιστειών [Πηγή: ESA]

Βέβαια για να γίνει αντιληπτός ο τρόπος λειτουργίας ενός ηφαιστείου σε μια συγκεκριμένη περιοχή είναι απαραίτητο να κατανοήσουμε την αλληλεπίδραση μεταξύ τεκτονικής, των διαδικασιών παραμόρφωσης και της μεταφοράς μάγματος στη λιθόσφαιρα (Petford et al., 2000). Τα δίκτυα θραύσης ρηγμάτων (fault-fracture networks) που η παραμόρφωση προκάλεσε, θεωρούνται ως αποτελεσματικές δίοδοι, μέσω των οποίων το μάγμα μεταφέρεται, αποθηκεύεται και τελικά ξεσπά στην επιφάνεια της Γης (Petford et al., 2000). Στα ενεργά ηφαίστεια, το μάγμα ανεβαίνει προς την επιφάνεια και μπορεί να μείνει στάσιμο σε διαφορετικά επίπεδα στη λιθόσφαιρα, η οποία δίνει στο σώμα του μάγματος διαφορετικό σχήμα και μέγεθος (Marsh, 2000). Σχεδόν όλες οι ηφαιστειακές εκρήξεις τροφοδοτούνται από μάγμα, μέσω φλεβών (dykes) και κεκλιμένων επιφανειών (inclined sheets), των οποίων η εκκίνηση και σταδιακή διάδοση στην επιφάνεια ή εναλλακτικά η σύλληψη σε κάποιο βάθος μέσα στο ηφαίστειο, εξαρτάται από την κατάσταση (stress state) που βρίσκεται το ηφαίστειο (Gudmundsson, 2006). Στην επιφάνεια των ενεργών ηφαιστειακών δομημάτων, η πλειοψηφία των εκρηκτικών φλεβών (fissures) έχουν έναν ακτινωτό σχηματισμό ενώ οι εφαπτόμενες ή πλάγιες σχισμές είναι σπάνιες. Ωστόσο, σε πολλές διαβρωμένες ηφαιστειακές δομές, οι φλέβες (dykes) και οι εκρηκτικές σχισμές που τροφοδοτούνται από τα αναχώματα, συνήθως έχουν πιο πολύπλοκα σχήματα, που προκύπτουν από τις περιφερειακές εντάσεις, τις μαγματικές δεξαμενές και τις ανισοτροπίες ή παραλλαγές στην τοπογραφία (Acocella et al., 2009).

### 1.3. Δομή ηφαιστείων

Τα ηφαίστεια είναι θέσεις όπου δημιουργείται καινούρια γη, χερσαία ή υποθαλάσσια και αντιπροσωπεύουν ένα ανώτερο επίπεδο γεωλογικών διεργασιών. Μερικές φορές οι διεργασίες μπορεί να είναι πολύ αργές, και άλλες φορές είναι πολύ γρήγορες και δραστικές, με τη μορφή εκρήξεων και σεισμών. Οφείλονται στην εσωτερική δυναμική της γης και επομένως δημιουργούνται όπου το μάγμα, τηγμένο πέτρωμα που βρίσκεται βαθιά στη γη, βρει διέξοδο προς την επιφάνεια. Όταν υπόγεια πυρακτωμένα πετρώματα (μάγμα) μετακινούνται μέσα από τις ρωγμές του εξωτερικού στρώματος της γης (λιθόσφαιρα) και φτάνουν στην επιφάνεια του φλοιού της γης, δημιουργείται ένα ηφαίστειο. Το μάγμα, εξερχόμενο στην επιφάνεια, ψύχεται και στερεοποιείται σε μορφή λάβας προκαλώντας εκρηκτική εκτίναξη τέφρας με τη μορφή πυροκλαστικών πετρωμάτων.

Ειδικότερα, το μάγμα που εντοπίζεται στον μαγματικό θάλαμο, μέσω των ηφαιστειακών αγωγών ή των φλεβών τροφοδοσίας, δηλαδή μεγάλων ρωγμών ή διασταύρωσης ρωγμών του φλοιού της γης (ενεργά ρήγματα) καταλήγουν στον ηφαιστειακό πόρο, ο οποίος εντοπίζεται εντός μιας κοιλότητας που καλείται κρατήρας. Ο πόρος και ο πυθμένας του κρατήρα καλύπτονται από στερεοποιημένη ή κατακερματισμένη λάβα στα ενδιάμεσα διαστήματα της ηφαιστειακής δράσης, όταν το μόνο στοιχείο δραστηριότητας του ηφαιστείου είναι η εκπομπή ατμίδων, δηλαδή θερμών αερίων και ατμών από κοιλότητες του εδάφους.

Η ηφαιστειακή δράση κυμαίνεται μεταξύ δυο ακραίων τύπων: στον έναν τύπο το φτωχό σε αέρια μάγμα φθάνει στην επιφάνεια λίγο ή πολύ ήρεμα, ως συνεχές μέσο, και εκχύνεται από τον ηφαιστειακό πόρο δημιουργώντας ρεύματα λάβας όταν είναι λεπτόρρευστο ή θόλους λάβας όταν είναι παχύρρευστο. Στον άλλο τύπο το πλούσιο σε αέρια μάγμα τροφοδοτεί εκρήξεις. Τότε η λάβα εκτινάσσεται κατακερματισμένη από τον ηφαιστειακό πόρο, ως τέφρα. Η τέφρα ονομάζεται και πυροκλαστικό υλικό, ενώ ονομάζεται ηφαιστειακή σποδός ή στάχτη. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν δύο τρόποι μετακίνησης και απόθεσης της τέφρας. Ο ένας είναι η ελεύθερη πτώση από το ύψος στο οποίο έχει εκτιναχθεί και έτσι αποτίθενται τα στρώματα τέφρας πτώσης ενώ ο δεύτερος είναι η μετακίνηση της τέφρας ως ένα πυκνό ρευστό μείγμα θραυσμάτων μάγματος και αερίων που ρέει με μεγάλες ταχύτητες και θερμοκρασίες στις πλαγιές του ηφαιστείου. Οι ροές αυτές ονομάζονται πυροκλαστικά ρεύματα τέφρας. Στη μεγάλη πλειονότητα των ηφαιστείων συναντάται όλο το φάσμα δράσεων μεταξύ των δυο ακραίων τύπων, της έκχυσης και της έκρηξης.

Η πυκνότητα των μεμονωμένων σωματιδίων μπορεί να ποικίλει από 700-1200 kg/m<sup>3</sup> για ελαφρόπετρα (pumice), 2350-2450 kg/m<sup>3</sup> για θραύσματα γυαλιού, 2700 με 3300 kg/m<sup>3</sup> για κρυστάλλους, και 2600 με 3200 kg/m<sup>3</sup> για λίθινα σωματιδίων. Από τα πιο συμπαγείς και πιο πυκνά σωματίδια που εναποτίθενται κοντά στην πηγή, θραύσματα γυαλιού και ελαφρόπετρας εμπεριέχονται σε εναποθέματα τέφρας σε μακρινές τοποθεσίες.

| Είδος σωματιδίου τέφρας | Πυκνότητα                    |
|-------------------------|------------------------------|
| Pumice fragments        | 700-1200 kg/m <sup>3</sup>   |
| Volcanic glass shards   | 2350-2450 kg/m <sup>3</sup>  |
| Crystals and minerals   | 2700-3300 kg/m <sup>3</sup>  |
| Other rock fragments    | 26000-3200 kg/m <sup>3</sup> |

Πίνακας 1: Είδος σωματιδίων τέφρας και πυκνότητα αυτών [Πηγή: Μιχαήλ, 2017].

## 1.4. Τύποι ηφαιστειών

Τα ηφαίστεια ανάλογα με το σημείο στο οποίο εξέρχεται το μάγμα, χαρακτηρίζονται ως χερσαία, αν η έξοδος γίνεται στη στεριά και ως υποθαλάσσια, αν η έξοδος γίνεται στο νερό. Επιπλέον, τα ηφαίστεια είναι δυνατό να διακριθούν και στις τρεις παρακάτω κατηγορίες ανάλογα με τη χρονική περίοδο που έδρασαν:

- Σβησμένα ηφαίστεια. Είναι αυτά που δεν έχουν εκραγεί κατά τη διάρκεια των ιστορικών χρόνων. Ακόμη κι αν ένα ηφαίστειο θεωρείται ανενεργό, μπορεί και πάλι να μεταπέσει στην κατηγορία των ενεργών στο μέλλον.
- Ανενεργά ηφαίστεια. Χαρακτηρίζονται εκείνα όπου κατά τη σύγχρονη περίοδο δεν έχουν δώσει εκρήξεις, έχουν όμως παρουσιάσει δραστηριότητα κατά τους ιστορικούς χρόνους. Τα περισσότερα ηφαίστεια παρουσιάζουν συνήθως μικρής διάρκειας επεισόδια, που διαρκούν από λίγες μέρες έως λίγα χρόνια και μετά αδρανούν για δεκάδες, εκατοντάδες ή χιλιάδες χρόνια. Κατά τη διάρκεια της περιόδου αδράνειας το εν υπνώσει η κοιμώμενο ηφαίστειο μπορεί να είναι τελείως ήσυχο ή μπορεί να εκπέμπει αέρια και ατμούς που προδίδουν την ενεργή του κατάσταση.
- Ενεργά ηφαίστεια: είναι εκείνα που συνεχίζουν και σήμερα τη δραστηριότητά τους. Ορισμένα ηφαίστεια είναι ενεργά για μεγάλα χρονικά διαστήματα, όπως το Στρόμπολι, στα νησιά του Αιόλου, το οποίο χαρακτηρίζεται από συνεχή δράση, τουλάχιστον τα τελευταία 3.000 - 4.000 χρόνια.

Επειδή όμως κάποια ηφαίστεια χαρακτηρίζονται από μεγάλες περιόδους ηρεμίας (έως και πολλών χιλιάδων ετών) και η διάρκεια των ιστορικών καταγραφών είναι πολύ διαφορετική από χώρο σε χώρο (π.χ. Μεσόγειος-Νέα Ζηλανδία) σήμερα θεωρούμε ως ενεργά τα ηφαίστεια που έδρασαν τα τελευταία 10.000 - 20.000 χρόνια και βρίσκονται σε τεκτονικές ενεργές περιοχές που κάνουν πιθανή την επαναδραστηριοποίησή τους.

Τα ηφαίστεια δεν παρουσιάζουν όλα τον ίδιο τρόπο δράσης συνεπώς μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τη φύση της δραστηριότητάς τους, δηλαδή ήρεμη ή εκρηκτική. Όπως έχει προαναφερθεί η ήρεμη δραστηριότητα περιλαμβάνει τη σχετικά ομαλή έκχυση ποσοτήτων λάβας, συνήθως βασαλτικής συστάσεως. Τα αέρια απελευθερώνονται εύκολα από τη λάβα, η οποία γεμίζει τον κρατήρα του ηφαιστείου και υπερχειλίζοντας από αυτόν, μπορεί ρέοντας να φθάσει σε σημαντική απόσταση από τον κρατήρα. Η εκρηκτική δραστηριότητα είναι συνδεδεμένη με την παραγωγή πυροκλαστικών υλικών που περιλαμβάνουν τέφρα, βόμβες και βολίδες. Η λάβα είναι πιθανό να στερεοποιηθεί σχηματίζοντας ένα είδος πώματος του κρατήρα και συνεπώς να διακοπεί για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα η εξωτερική δραστηριότητα του ηφαιστείου. Κατά το χρονικό αυτό διάστημα τα αέρια που συσσωρεύονται κάτω από τον κρατήρα αποκτούν μεγάλες πιέσεις μέχρις ότου το «πώμα» του πόρου και του κρατήρα ανατιναχθεί με έκρηξη ή με μια σειρά εκρήξεων. Η απότομη απελευθέρωσή τους κατακερματίζει τα μαγματικά υλικά και εκσφενδονίζει τα τεμάχια σε μεγάλες αποστάσεις. Ένα ηφαίστειο συχνά εμφανίζει και εκρηκτική και ήρεμη φάση κατά τη διάρκεια της ιστορίας των εκρήξεων του και μπορεί να μεταβληθεί από ήρεμη σε εκρηκτική κατά τη διάρκεια μίας εκρήξεως.

Μία περισσότερο ακριβής μέθοδος ταξινόμησης των ηφαιστείων βασίζεται στα χαρακτηριστικά των εκρήξεων, το είδος των προϊόντων της έκρηξης και την πίεση των αερίων, αποτελούμενη από τέσσερις τύπους ηφαιστείων. Το είδος του εκρηξιγενούς υλικού που εξέρχεται από τα ηφαίστεια μπορεί να έχει σχέση με τον ήρεμο ή με τον εκρηκτικό τύπο δραστηριότητας που εμφανίζεται στο εκάστοτε ηφαίστειο (Δερμιτζάκης & Λέκκας, 2010).

Οι τύποι των ηφαιστείων σύμφωνα με την εκρηκτικότητά τους είναι:

- i) Ασπιδωτά ηφαίστεια (Shield Volcanoes) ή ηφαίστεια Χαβάιου τύπου

Τα ασπιδωτά ηφαίστεια αποτελούν τα μεγαλύτερα ηφαίστεια στη Γη. Είναι ευρεία βουνά που θυμίζουν τρούλο με τη μέση επιφανειακή τους κλίση να μην ξεπερνά τις μερικές μοίρες. Κατά

κάποιο τρόπο θυμίζουν πολεμικές ασπίδες πάνω στο έδαφος και έτσι παίρνουν και το όνομά τους. Χαρακτηρίζονται συχνά από εκρήξεις που δεν είναι βίαιες, γεγονός που οφείλεται κυρίως στη χαμηλή περιεκτικότητα του μάγματος σε διοξείδιο του πυριτίου (περίπου 50%) αλλά και στην εύκολη απελευθέρωση των αερίων του μάγματος όταν αυτό φθάνει στην επιφάνεια. Τυπικά δημιουργούνται από εκρήξεις βασαλτικής λάβας, στην οποία η περιεκτικότητα σε ηφαιστειακή σκόνη και τέφρα είναι μικρή. Βασάλτης είναι ο κύριος τύπος πετρώματος που δημιουργείται από το μάγμα των συγκεκριμένων ηφαιστειών και αποτελείται από αστρίους και σιδηρομαγνητικά ορυκτά.

Όταν ένα ασπιδωτό ηφαίστειο ενεργοποιείται, η λάβα τείνει να ρέει στα πρηνή του ηφαιστείου αντί να εκρήγνυται βίαια στην ατμόσφαιρα. Μέσα στον κρατήρα υπάρχει «λίμνη» λάβας που κοχλάζει. Οι χαμηλού ιξώδους λάβες όταν εξέρχονται από αγωγούς ή ανοίγματα στην κορυφή του ηφαιστείου είναι πολύ θερμές και μπορούν να ρέουν εύκολα για χιλιόμετρα στις χαμηλές κλίσεις. Καθώς ψύχεται, το ιξώδες του αυξάνεται με αποτέλεσμα να στερεοποιούνται σε λεπτά στρώματα (με πάχος εκατοστών) σχεδόν ομοιόμορφου πάχους. Επομένως τα ηφαίστεια Χαβάιου τύπου αποτελούν τη συσσώρευση λάβας από επαναλαμβανόμενες εκρήξεις λάβας χαμηλού ιξώδους που τελικά χτίζει ένα ασπιδωτό ηφαίστειο, δημιουργώντας έτσι το πλατύ σχήμα που τα χαρακτηρίζει.

Τα ασπιδωτά ηφαίστεια παρόλο που δομούνται από τις ροές της λάβας μπορούν να παράγουν και μεγάλες ποσότητες πυροκλαστικών υλικών (τέφρας), περιλαμβάνοντας διάφορα είδη ηφαιστειακών υλικών τα οποία εκσφενδονίζονται με εκρήξεις από το ηφαίστειο. Οι κόκκοι των υλικών αυτών κυμαίνονται σε διάμετρο από τη στάχτη (λιγότερο από 2 mm έως 32 mm), μέχρι «μπλοκ» ή «βόμβες» μεγαλύτερα από 64 mm.

Έχουν χαμηλό ανάγλυφο και πλατιά βάση με διάμετρο που κυμαίνεται από μερικά km έως πάνω από 100 km ενώ το ύψος τους είναι περίπου το 1/20 του πλάτους. Οι κατώτερες πλευρές είναι συνήθως ομαλές (2-3°), προχωρώντας προς την κορυφή οι μεσαίες πλευρές είναι πιο απότομες (~10°) και στην κορυφή το οικοδόμημα γίνεται επίπεδο. Η μορφή τους λοιπόν είναι κυρτή προς τα πάνω. Κοντά στην κορυφή, η κλίση είναι ελάχιστη λόγω της γρήγορης ροής της λάβας προς τα πρηνή και έτσι συσσωρεύεται μόνο σε πολύ λεπτά στρώματα. Όσο πιο μακριά ρέει η λάβα από την πλαγιά, τόσο πιο ψυχρή και ιξώδεις γίνεται, έτσι οι κλίσεις πρέπει να είναι πιο έντονες για να συνεχιστεί η ροή της. Βέβαια οι μικρές κλίσεις στα ασπιδωτά ηφαίστεια μπορεί να τα κάνουν να μοιάζουν αρκετά μικρότερα από το πραγματικό τους μέγεθος.

Η πιο χαρακτηριστική περιοχή εμφάνισης αυτού του τύπου ηφαιστειών είναι η Χαβάη. Το ηφαίστειο Mauna Kea θεωρείται μη ενεργό (η τελευταία του έκρηξη χρονολογείται περίπου 2000 χρόνια πριν από σήμερα) σε αντίθεση με τα Mauna Loa και Kilauea. Ο κρατήρας του Mauna Loa έχει διάμετρο περίπου 5 km, η κλίση των κλιτύων του είναι 4° - 5° και το ύψος του ηφαιστείου φθάνει τα 4.194 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας (ή 9.000 m πάνω από τον πυθμένα του ωκεανού). Το κωνικό ανάγλυφο συνεχίζει και κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας καταλήγοντας σε μια βάση με διάμετρο 400 km. Άλλες περιοχές της γης που φιλοξενούν μεγάλες εξαπλώσεις βασαλτικών ηφαιστειών είναι η Ινδία, η Βραζιλία, η Ν. Αφρική και η Ανταρκτική. Τα άνω τμήματα πολλών μεγάλων ηφαιστειών αναδύονται ως νησιά από τον ωκεανό, συμπεριλαμβανομένων και της Ταϊτής, η Σαμόα, τα Γκαλαπάγκος και πολλά άλλα.



Εικόνα 4: Ηφαίστειο Mauna Loa στη Χαβάη [Πηγή: Google].

- ii) Σύνθετος τύπος ηφαιστειών (Composite volcanoes) ή Στρομπόλιος (Strombolian eruptions)

Τα σύνθετα ηφαίστεια είναι γνωστά για τις πολύ υψηλές κωνικές δομές τους με απότομες πλαγιές που γίνονται όλο και πιο απόκρημνες κοντά στην κορυφή όπου υπάρχει ο κρατήρας και χαρακτηρίζονται από ανδρική λάβα μέσης περιεκτικότητας σε διοξείδιο του πυριτίου (περίπου 60%), η οποία έχει μεγαλύτερο ιξώδες από εκείνη που εμφανίζεται στα ασπιδωτά ηφαίστεια, γι' αυτό και η ροή είναι βραδύτερη. Η δραστηριότητα των ηφαιστειών αυτών είναι λίγο περισσότερο εκρηκτική. Οι μεγάλες ποσότητες αερίων υψηλών πιέσεων απελευθερώνονται απότομα δημιουργώντας περιοδικές ή ακανόνιστες εκρήξεις που συχνά είναι βίαιες αλλά ανεπαρκείς για να καταστρέψουν το ηφαιστειακό οικοδόμημα. Κύριο χαρακτηριστικό είναι οι ενδιστρώσεις λάβας και πυροκλαστικών υλικών στο χώρο γύρω από τον κρατήρα, τα οποία συμβάλλουν στη δόμηση το ηφαιστειακού κώνου.

Ο κύριος τύπος πετρώματος που δημιουργούν τα σύνθετα ηφαίστεια είναι ο ανδεσίτης, που αποτελείται κυρίως από ανθρακικό νάτριο καθώς και οι άστριοι πλούσιοι σε ασβέστιο και τα σιδηρομαγνητικά ορυκτά με μικρή περιεκτικότητα σε χαλαζία.

Τα σύνθετα ηφαίστεια εμφανίζουν τόσο εκρηκτική δραστηριότητα όσο και ροές λάβας. Πιο συγκεκριμένα, όταν το ηφαιστειο εκρήγνυται, προκύπτει ροή λάβας σε μικρή απόσταση από τον κρατήρα του ηφαιστείου καθώς και απόθεση εκτινασσόμενης τέφρας. Τα χονδρόκοκκα κλάσματα του εκτινασσόμενου μάγματος μεγέθους κροκάλας πέφτουν σε μικρή απόσταση από τον κρατήρα ενώ παράλληλα σχηματίζεται ένα θερμό σύννεφο από αέρια και στάχτη το οποίο εξαιτίας της πυκνότητάς του ρέει γρήγορα προς τα κατόντη, στις πλαγιές του ηφαιστειακού κώνου, καταστρέφοντας ό,τι συναντήσει στο πέρασμά του και αποθέτοντας στρώσεις πυροκλαστικού υλικού. Αποτελείται δηλαδή από στρώσεις λάβας και τέφρας και γι' αυτό ονομάζονται και στρωματο-ηφαίστεια (strato-volcanoes). Η κλίση των πρानών του ηφαιστειακού κώνου είναι μεγαλύτερη σ αυτόν τον τύπο ηφαιστείων σε σχέση με τον προηγούμενο και συνήθως φθάνει τις 30° - 45°.

Λόγω της εκρηκτικής τους δραστηριότητας και της σχετικά συχνής ενεργοποίησής τους, είναι υπεύθυνα για τους μεγαλύτερους ηφαιστειακούς κινδύνους και έχουν προκαλέσει θανάτους και καταστροφές κατά την ιστορία. Περιοχές εμφάνισης αυτού του τύπου των ηφαιστείων είναι το νησί Stromboli, βόρεια της Σικελίας, στην Ιταλία απ' όπου πήρε και την ονομασία του, το οποίο δίνει έκρηξη ανά 12 λεπτά περίπου με λάμψη γι αυτό θεωρείται και ως «Ο φάρος της Μεσογείου», η Αίτνα (Ιταλία), το Erebus στην Ανταρκτική, το Fujiyama στην Ιαπωνία, τα όρη Αγία Ελένη και Rainier, τα οποία βρίσκονται στην πολιτεία Washington (ΗΠΑ).

### iii) Βουλκάνιος τύπος (Vulcanian eruptions) ή ηφαιστειακού θόλου

Η ονομασία τους προέρχεται από το νησί Vulcano στην Ιταλία. Οι αρχαίοι Ρωμαίοι λόγω των ισχυρών εκρήξεων πίστευαν ότι εκεί βρισκόταν το σιδηρουργείο του θεού της φωτιάς "Vulcan", ομόλογου του Έλληνα θεού Ήφαιστου. Από αυτόν πήρε το νησί το όνομά του και κατ' επέκταση δημιουργήθηκε η λέξη "volcano", η σημερινή ονομασία των ηφαιστείων στις περισσότερες γλώσσες.

Τα ηφαίστεια τύπου ηφαιστειακού θόλου χαρακτηρίζονται από λάβα με υψηλό ιξώδες (περίπου 70%), μεγαλύτερο από εκείνο του Στρομπόλιου τύπου. Ο συνήθης τύπος πετρώματος που παράγουν είναι οι ρυόλιθοι που αποτελείται κυρίως από καλιούχους και νατριούχους

αστρίους, χαλαζία και μικρά ποσά σιδηρομαγνητικών ορυκτών. Η εκρηκτική δραστηριότητα είναι πολύ βίαιη αλλά όχι μεγάλης διάρκειας και συχνά καταστρέφει μέρος της ηφαιστειακής κατασκευής. Στο τέλος κάθε δραστηριότητας ο κρατήρας φράσσεται λόγω στερεοποίησης του μάγματος. Το οικοδόμημα δεν επιτρέπει την διαφυγή αερίων με αποτέλεσμα την πρόκληση απροειδοποίητων ισχυρών εκρήξεων με δημιουργία πυροκλαστικών ροών. Σε περιόδους βίαιων εκρήξεων ανατινάσσεται όλος ο παλαιότερος κρατήρας και στη θέση του δημιουργείται τοπογραφική ταπείνωση που ονομάζεται κρατήρας έκρηξης. Σε κάθε νέα έκρηξη ανατινάσσεται όλος ο παλιός κρατήρας και η νέα λαβα που ακολουθεί επανατροφοδοτεί τον θόλο. Μετά από κάθε εκρηκτική δραστηριότητα αυτού του τύπου παρατηρούνται ηφαιστειακά νέφη από αέρια και σκόνη ύψους έως και 10 km. Οι πλευρές τους είναι απότομες και βραχώδεις και αποτελούνται σχεδόν αποκλειστικά από πυροκλαστικά υλικά. Οι πυροκλαστικές ροές δύναται να κινηθούν με μεγάλες ταχύτητες έως και 20 km από το ηφαίστειο δημιουργώντας και λασποροές στην περίπτωση που βρουν νερό ή χιόνι στο διάβα τους. Ηφαιστεια αυτού του τύπου βρίσκονται στην Ιταλία (νησί Vulcano βόρεια της Σικελίας, Βεζούβιος), Krakatau και Bezymianny στην Καμτσάτκα, το όρος Lassen στη βορειοανατολική Καλιφόρνια.

iv) Τύπος ηφαιστειακού κώνου στάχτης ή τύπος Πελέ (Peleean eruptions)

Ο τύπος αυτός έκρηξης παρατηρήθηκε κατά τη δραστηριότητα του ηφαιστείου του όρους Πελέ στη Μαρτινίκα, υπερπόντια περιοχή της Γαλλίας στην Καραϊβική, στις 8 Μαΐου του 1902 από την έκρηξη του οποίου θανατώθηκαν περίπου 30.000 κάτοικοι της γειτονικής πόλης του Αγίου Πέτρου. Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτού του τύπου είναι η «φλεγόμενη νεφέλη» θερμοκρασίας 800°C που εξήλθε πλευρικά του ηφαιστείου και ο σχηματισμός πώματος μορφής οβελίσκου από ιξώδη λάβα στη θέση του παλαιού κρατήρα. Το ύψος του οβελίσκου στην περίπτωση του ηφαιστείου του όρους Πελέ έφθανε τα 400 m και με την πάροδο των ωρών σταδιακά κατέρρευσε. Ο σχηματισμός του οβελίσκου συνοδεύτηκε από ασυνεχή εκρηκτική δραστηριότητα και απελευθέρωση τέφρας που κατέκλυσε την πόλη του Αγίου Πέτρου. Βέβαια η ύπαρξη του φλεγόμενου νέφους δεν συνοδεύεται πάντα από το σχηματισμό του οβελίσκου όπως για παράδειγμα η περίπτωση του ηφαιστείου St. Vincent 144 km νότια της Μαρτινίκα, όπου έλαβε χώρα ακτινωτή έξοδος των υπέρθερμων αερίων. Πρόκειται για το δυνητικά καταστροφικότερο εκρηκτικό τύπο καθώς από τον κεντρικό κρατήρα του ηφαιστείου εκτινάσσονται πυρακτωμένα νέφη και μεγάλες ποσότητες πτητικών συστατικών. Εκρήξεις αυτού του τύπου παρατηρήθηκαν σε αρκετά ηφαίστεια των Φιλιππίνων.

Οι κώνοι στάχτης είναι σχετικά μικρά ηφαιστειακά όγκοι τα οποία σχηματίζονται από τέφρα και μεγαλύτερα κομμάτια ηφαιστειακής στάχτης όπως οι ηφαιστειακές βόμβες. Οι βόμβες σχηματίζονται από σταγόνες εκσφενδονισμένη λάβας οι οποίες περιστρέφονται στον αέρα και παίρνουν σφαιρικό σχήμα. Οι κώνοι στάχτης δημιουργούνται από τη συσσώρευση στάχτης κοντά σε ένα ηφαιστειακό αγωγό. Συχνά συναντώνται στους πρόποδες μεγαλύτερων ηφαιστειών ή κοντά σε ρωγμές. Έχουν σχετικά ευθείς απότομες πλευρές με κλίση της τάξης των  $20^{\circ}$  -  $35^{\circ}$  διότι τα χαλαρά, χοντρά τεμάχια πυροκλαστικών θραυσμάτων είναι ασταθή σε πιο απότομες κλίσεις και μεγάλους κρατήρες καθώς το μέγεθος ανοίγματός τους είναι σχετικά μεγάλο σε σχέση με τον όγκο τους.

v) Πλίνιος τύπος (Plinian eruptions) ή Βεζούβιου

Το όνομά του προέρχεται από τον Ρωμαίο πολιτικό Πλίνιο ο οποίος περιέγραψε την έκρηξη του Βεζούβιου στις 24 Αυγούστου το 79 μ.Χ. που ήταν αυτόπτης μάρτυρας της καταστροφής. Η έκρηξη δημιούργησε μία τεράστια στήλη από τέφρα, καθώς επίσης πυροκλαστικές ροές και εκτεταμένες αποθέσεις στάχτης με αποτέλεσμα να καταστρέψει ολοκληρωτικά και να εξαφανίσει μέσα στη λάβα τρεις μεγάλες πόλεις, την Πομπηία, την Ηράκλεια και τις Στάβιες και να προκαλέσει το θάνατο τουλάχιστον 2.000 ανθρώπων.



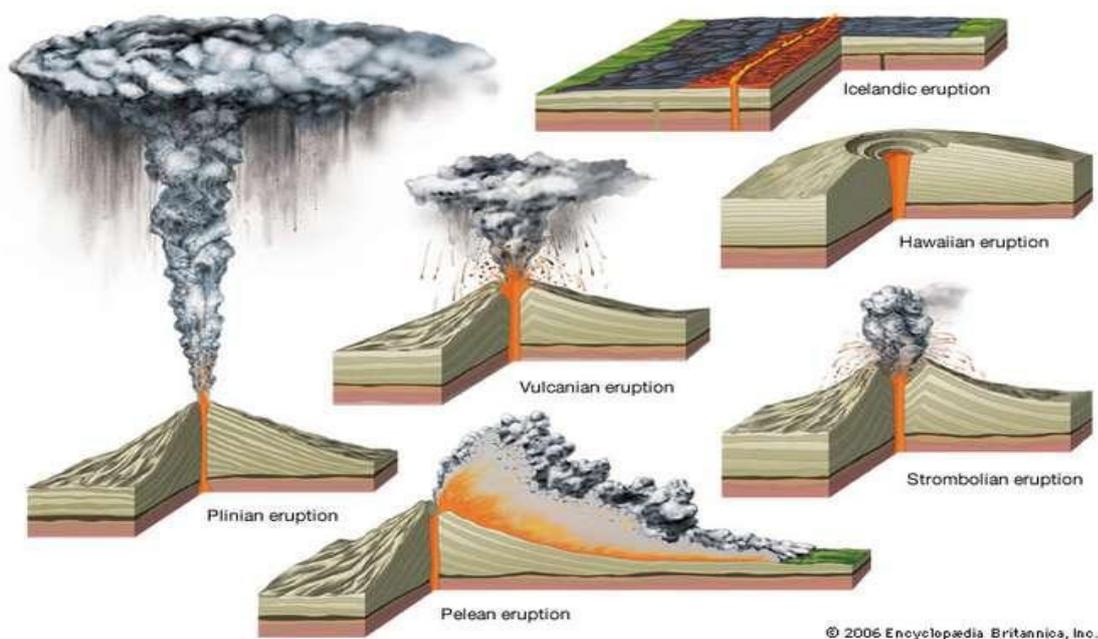
Εικόνα 5: Ο κρατήρας του Βεζούβιου [Πηγή: [http://www.geo.auth.gr/765/4\\_eruptions/46\\_plinian.htm](http://www.geo.auth.gr/765/4_eruptions/46_plinian.htm) (Ανάκτηση 16-11-2021)]

Οι πλινιακές εκρήξεις είναι βίαια εκρηκτικά επεισόδια που παράγουν τεράστιες μεταγωγικές στήλες τέφρας και αερίων που ανέρχονται σε ύψος έως 45 km στη στρατόσφαιρα με ταχύτητα εξόδου των υλικών της τάξης των μερικών εκατοντάδων μέτρων το δευτερόλεπτο ενώ η διάρκεια των εκρήξεων κυμαίνεται από μερικές ώρες έως και ημέρες. Παράδειγμα αποτελεί η

έκρηξη του Pinatubo στις Φιλιππίνες το 1991 κατά την οποία τα ηφαιστειακά αέρια εκτοξεύτηκαν σε ύψος περίπου 30 km. Οι περιοχές που βρίσκονται γύρω από τέτοια ηφαίστεια είναι εκτεθειμένες στην ηφαιστειακή τέφρα αλλά και στα προϊόντα της πυροκλαστικής δραστηριότητας του ηφαιστείου καθώς και στις ηφαιστειακές λασποροές (lahars). Όταν η εκρηκτική στήλη καταρρεύσει σχηματίζονται καυτές πυροκλαστικές ροές που κατέρχονται τις πλευρές του ηφαιστείου με τεράστια ταχύτητα. Επιπλέον, με την προσθήκη νερού, που προέρχεται από την τήξη χιονιού ή πάγου, και την ανάμειξή του με τα πυροκλαστικά υλικά δημιουργούνται λασπορεύματα (lahars), τα οποία έχουν τη συνοχή του τσιμέντου και ρέουν σαν μανιασμένοι χείμαρροι. Σε μεγάλες πλινιακές εκρήξεις και καθώς ο μαγματικός θάλαμος κάτω από το ηφαίστριο αδειάζει, μπορεί να προκληθεί κατάρρευση του ηφαιστειακού οικοδομήματος και δημιουργία καλδέρας. Ορισμένες πλινιακές εκρήξεις κατά τη διάρκεια του 20<sup>ου</sup> αιώνα αποτελούν τα ηφαίστεια Novarupta (Αλάσκα, 1912), Agung (Ινδονησία, 1963), Αγίας Ελένης (ΗΠΑ, 1980), El Chichon (Μεξικό, 1982), Spurr (Αλάσκα, 1992) κ.α.

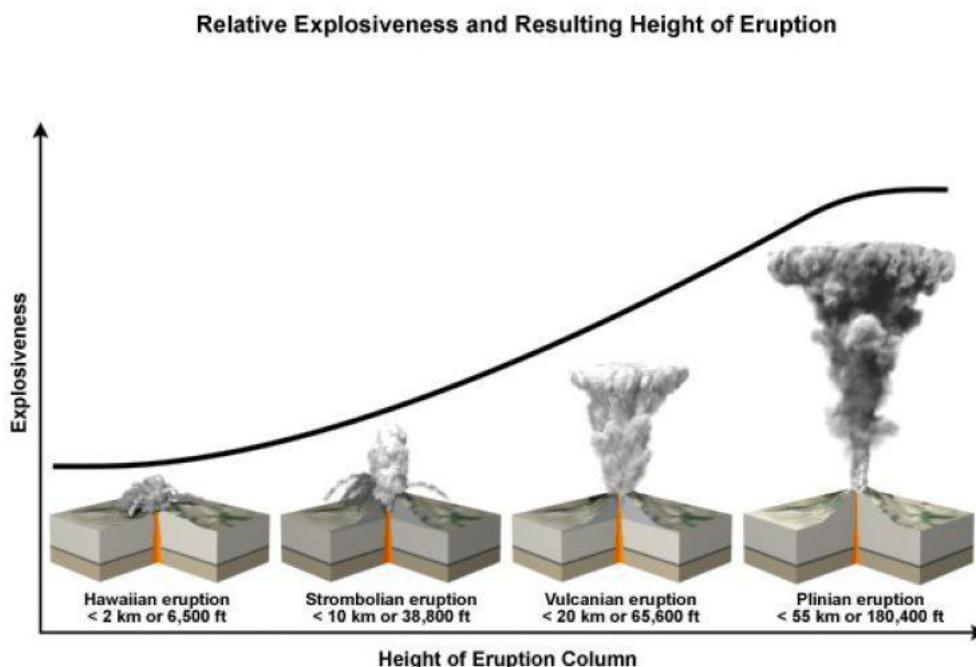
vi) Ισλανδικός τύπος (Iceland type eruptions)

Τα ηφαίστεια ισλανδικού τύπου δημιουργούν μεγάλης κλίμακας εκχύσεις λάβας με μεγάλη ρευστότητα και κίνηση. Μετά από την έκρηξή τους σχηματίζονται μικρά ηφαιστειακά οικοδομήματα κατά μήκος των ρωγμών σε σχήμα κώνου. Βρίσκονται κυρίως σε περιοχές όπου ο φλοιός έχει ασυνέχειες σε μεγάλο βάθος όπου το μάγμα μετακινείται πιο εύκολα.



Εικόνα 6: Τύποι ηφαιστειακών εκρήξεων [Πηγή: <https://cdn.britannica.com/s:700x450/48/4948-004-9AC9A872.jpg> (Ανάκτηση 16-11-2021)]

Ένα επιπλέον παράδειγμα σύγκρισης των ηφαιστειών με βάση την εκρηκτικότητά τους αποτελεί το ακόλουθο διάγραμμα όπου απεικονίζεται το μέγιστο ύψος της ηφαιστειακής τέφρας σε σχέση με τα είδη των ηφαιστειακών εκρήξεων.



Εικόνα 7: Η εκρηκτικότητα διαφόρων τύπων ηφαιστειών με το ανάλογο αποτέλεσμα στο ύψος της τέφρας [Πηγή: USGS, the COMET program]

Αν περιορίσουμε την κατηγοριοποίηση με βάση μόνο τα δομικά τους χαρακτηριστικά προκύπτουν επιπλέον οι κάτωθι κατηγορίες ηφαιστειών:

i) Βασαλτικά υψίπεδα – Plateaux

Στην περίπτωση των ηφαιστειών όπου η λάβα τους χαρακτηρίζεται ως βασαλτική και ύστερα από αρκετές διαδοχικές εκρήξεις δημιουργεί οροπέδια λάβας. Σε κάποιες περιπτώσεις, το οροπέδιο λάβας μπορεί να αποτελεί τμήμα ενός ενιαίου ηφαιστείου όπως στην περίπτωση της Βρετανικής Κολομβίας, μιας δυτικής επαρχίας του Καναδά με έκταση 1.800 km<sup>2</sup> και 860 km<sup>2</sup> όγκο. Βέβαια η συγκεκριμένη μορφή λάβας έχει χαμηλό ιξώδες και επομένως οι εκρήξεις δεν είναι βίαιες.

ii) Καλδέρες

Ένα από τα πιο καταστροφικά φυσικά φαινόμενα, είναι μία ηφαιστειακή έκρηξη τόσο ισχυρή, που να καταστρέφει ολόκληρο το κεντρικό τμήμα του ηφαιστείου. Ειδικότερα, όταν η έκρηξη ενός ηφαιστείου είναι τόσο ισχυρή ώστε να εκτιναχθούν στην ατμόσφαιρα εξαιρετικά μεγάλες

ποσότητες υλικού και παράλληλα να καταστραφεί όλο το κεντρικό τμήμα με κατάρρευση της κορυφής του ηφαιστείου, τότε δημιουργείται μετά την έκρηξη μια μεγάλη κοιλότητα που ονομάζεται καλδέρα. Ο σχηματισμός μιας καλδέρας ξεκινάει με την έκρηξη του ηφαιστείου κατά την οποία εκτινάσσεται στάχτη και σκόνη από τεμάχια ηφαιστειακού γυαλιού σε μεγάλο ύψος. Κατά την εκτίναξη μεταφέρεται μάγμα από το μανδύα. Ένα μεγάλο κυκλικό μπλοκ καταρρέει μέσα στο θάλαμο του μάγματος. Σύννεφο από καυτή στάχτη και ηφαιστειακό γυαλί ανεβαίνει από τη δακτυλιοειδή διάρρηξη και απλώνεται στην επιφάνεια σαν πυροκλαστική ροή. Η καλδέρα μεγαλώνει καθώς μπλοκ από το χείλος της καλδέρας γλιστρούν μέσα στο βαθύ κοίλωμα. Η καλδέρα είναι μία σχεδόν κυκλική λεκάνη, με διάμετρο ενός χιλιομέτρου ή μεγαλύτερη και με απότομες κλίσεις. Αν και μερικά από τα άνω τμήματα του ηφαιστείου διοχετεύονται προς τα έξω με μορφή θραυσμάτων, τα περισσότερα από αυτά εγκαθίστανται μέσα στην κοιλότητα που σχηματίζεται από την έκρηξη, κάτω από το προηγούμενο ηφαίστειο. (Strahler, 2006). Βέβαια για κάποιον μπορεί να είναι δύσκολο να ξεχωρίσει μια καλδέρα από έναν κρατήρα. Μια καλδέρα έχει διάμετρο μεγαλύτερη από 1 km και σχηματίζεται από καθίζηση ενώ ο κρατήρας έχει διάμετρο μικρότερη από 1 km και σχηματίζεται από καθίζηση ή έκρηξη. Επιπλέον ένας κρατήρας μπορεί να περιέχει δόμους λάβας. Οι καλδέρες μπορούν να διακριθούν σε τρεις ομάδες, ανάλογα με τη μορφή τους και τον τρόπο δημιουργίας τους:

- Καλδέρες τύπου Crater-Lake (Crater-Lake type calderas) που προέρχονται από την κατάρρευση στρωματοηφαιστειών.
- Βασαλτικές καλδέρες (basaltic calderas) που προέρχονται από την κατάρρευση ασπιδωτών ηφαιστειών. Στην περίπτωση των ασπιδωτών ηφαιστειών μπορεί να εμφανιστεί καλδέρα κορυφής, η οποία είναι ένα απότομο βύθισμα που συχνά ξεπερνά τα 10 km σε διάμετρο.
- Ανυψωμένες καλδέρες (resurgent calderas).

Χαρακτηριστική καλδέρα είναι αυτή του ηφαιστείου της Σαντορίνης.



Εικόνα 8: Η καλδέρα της Σαντορίνης [Πηγή: <http://www.economy365.gr/article/115070/epistimones-gia-ifaisteio-santorinis-endehomei-nea-ekrivi-tha-ginei-sto-idio-simeio> (Ανάκτηση 16-11-21)]

## 1.5. Ηφαιστειακά αναβλήματα

Τα υλικά που παράγονται κατά την έκρηξη των ηφαιστείων διακρίνονται σε στερεά, υγρά και αέρια. Η ποιότητα των αναβλημάτων είναι διαφορετική από ηφαίστειο σε ηφαίστειο και από έκρηξη σε έκρηξη.

### i) Στερεά αναβλήματα

Πρόκειται για υλικά σε στερεή μορφή που αποσπώνται λόγω των βίαιων εκρήξεων από τον κρατήρα του ηφαιστείου. Εάν τα υλικά αυτά είναι τεμάχια πετρωμάτων ανήκουν στα περιβάλλοντα του κρατήρα. Τα περισσότερα όμως είναι τεμάχια λάβας που εξέρχονται από τον ηφαιστειακό πόρο. Τα τεμάχια αυτά είτε είναι σε ημιστερεή κατάσταση, είτε είναι στερεά και προέρχονται από παλαιά λάβα που στερεοποιήθηκε μέσα στον κρατήρα. Τα στερεά αναβλήματα μπορεί να είναι βολίδες ή βόμβες, λιθάρια, κίσηρη ή ελαφρόπετρα, ηφαιστειακή άμμος, ηφαιστειακή τέφρα, σποδός, ηφαιστειακοί τόφφοι και οι τοφφίτες.

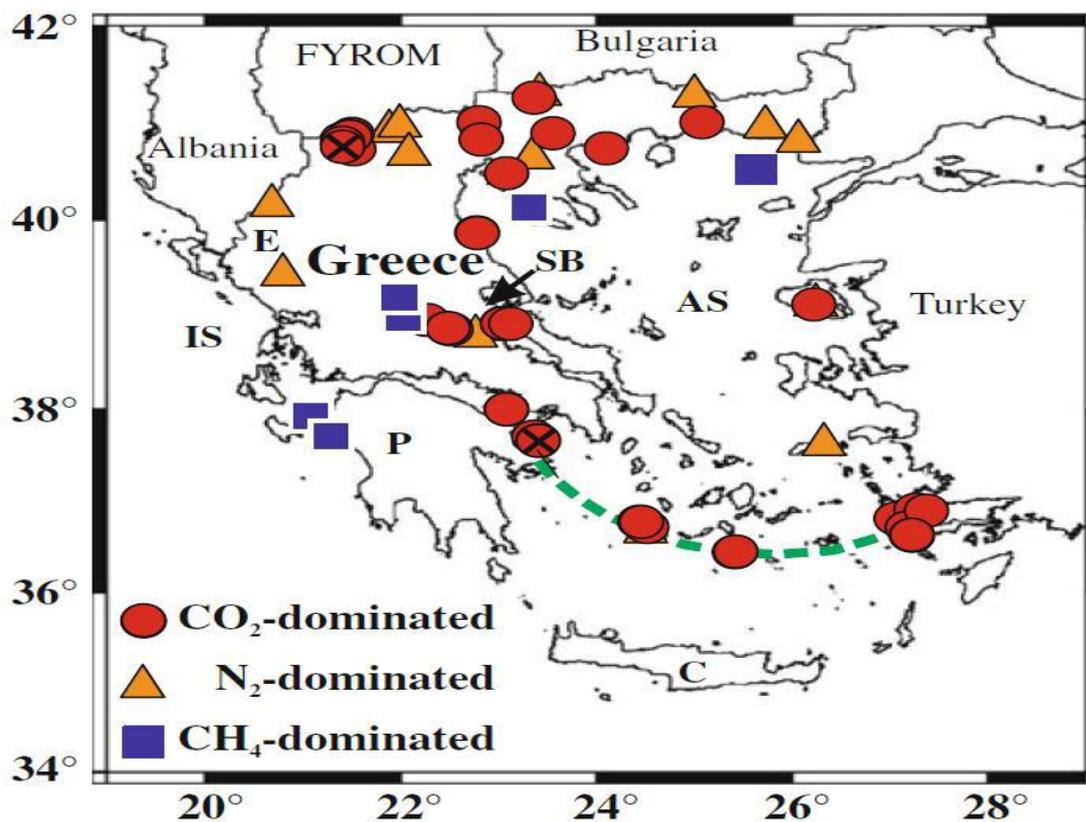
### ii) Υγρά αναβλήματα

Τα ρευστά αναβλήματα των ηφαιστείων είναι το νερό και η λάβα που σε ρευστή και διάπυρη κατάσταση εγκλείει διάφορα αέρια και υδρατμούς. Το νερό σε υψηλές θερμοκρασίες σαν αυτές δεν βρίσκεται σε ρευστή κατάσταση αλλά έχει τη μορφή υδρατμών, που ανέρχονται στην ατμόσφαιρα, υγροποιούνται και πέφτουν σαν βροχή. Είναι συνηθισμένο γεγονός μετά

από ηφαιστειακές εκρήξεις να ακολουθούν καταρρακτώδης βροχές. Μία άλλη περίπτωση παρουσίας μεγάλων ποσοτήτων νερού, χωρίς να σχετίζονται τα ρευστά αναβλήματα είναι εκείνη της λάβας που καθώς εξέρχεται από τον κρατήρα και προκαλεί την τήξη του χιονιού που καλύπτει τις κορυφές των πολύ υψηλών ηφαιστειών. Σε πολλές τέτοιες περιπτώσεις δημιουργήθηκαν πλημμύρες με καταστροφικά αποτελέσματα. Από τα ρευστά αναβλήματα των ηφαιστειών το κυριότερο είναι η λάβα, δηλαδή το μάγμα που έχει χάσει τα αέρια του, πριν ακόμη βγει από το κρατήρα του. Στην κατηγορία αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι ανήκουν και οι ηφαιστειακές λασποροές (Lahar) αν και η δημιουργία τους πολλές φορές δεν σχετίζεται άμεσα με έκρηξη.

### iii) Αέρια αναβλήματα:

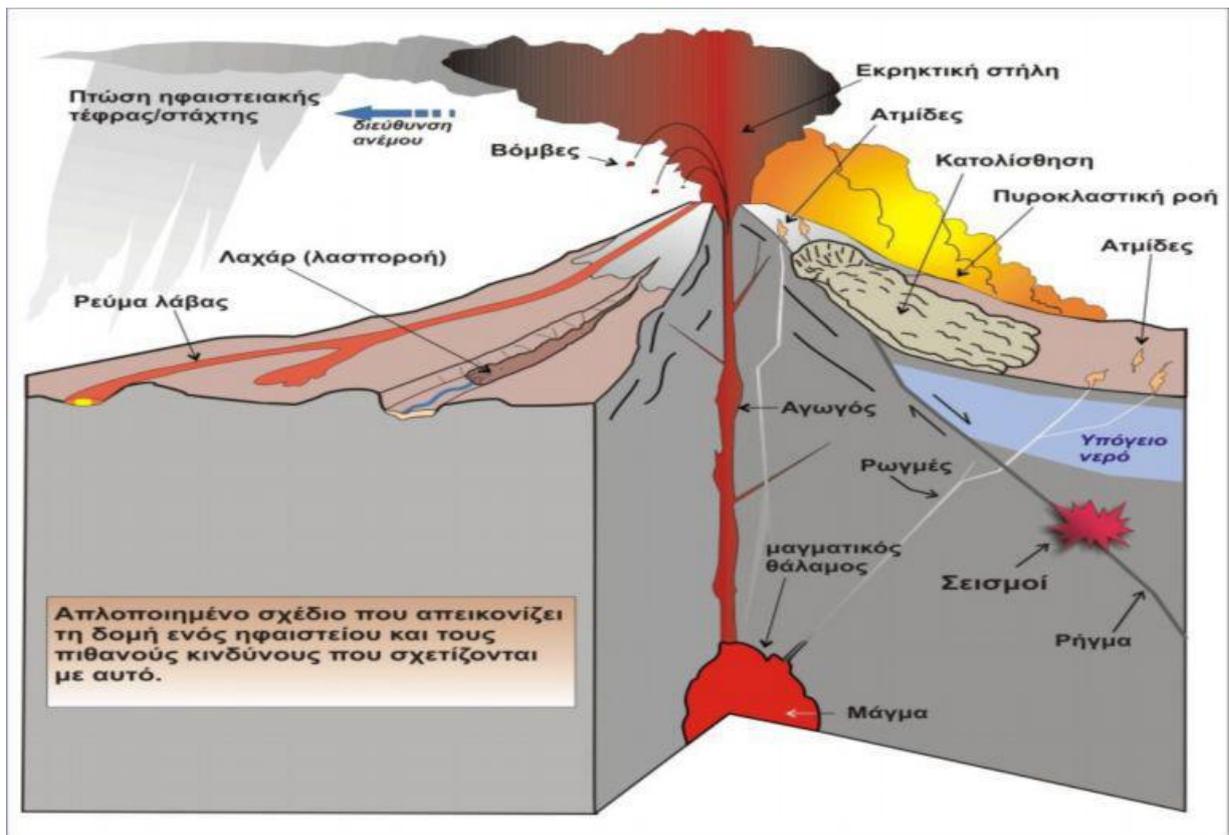
Τα αέρια αναβλήματα των ηφαιστειών είναι η δυναμική έκφραση των εκρήξεων, διότι συμπαρασύρουν κατά τη βίαιη ανέξοδο τους τα στερεά και ρευστά υλικά και τα εκσφενδονίζουν στον αέρα. Από τα αέρια αναβλήματα τα πλέον σημαντικά είναι οι υδρατμοί που εκτινάσσονται σε μεγάλες ποσότητες κατά τις εκρήξεις. Σε ορισμένες περιπτώσεις έχει διαπιστωθεί η παρουσία υδρογόνου και σπανίως οξυγόνου, ενώ είναι συχνή η παρουσία μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα, του διοξειδίου του θείου, του υδρόθειου και του φθορίου. Μερικά από τα αέρια αυτά αναφλέγονται κατά την έξοδό τους και σχηματίζουν φλόγες. Κατά τη βίαιη εκτίναξή τους τα αέρια ανέρχονται σε σημαντικό ύψος στην ατμόσφαιρα και συμπαρασύρουν και στερεά αναβλήματα, όπως είναι ηφαιστειακή άμμος και ηφαιστειακή σποδός. Έτσι τα νέφη που δημιουργούνται είναι πλήρη από τα υλικά αυτά. Ένα ιδιαίτερο είδος νεφών είναι τα φλεγόμενα νέφη. Πρόκειται για μίγμα αερίων, με υψηλή θερμοκρασία άνω των 1000°C, σποδού, άμμου και διάπυρης λάβας. Τα φλεγόμενα νέφη καταπίπτουν με μεγάλη ταχύτητα από την κορυφή στις παρυφές του ηφαιστείου και καταστρέφουν ότι συναντήσουν.



Εικόνα 9: Εκπομπές ηφαιστειακών αερίων στην Ελλάδα σύμφωνα με το επικρατές αέριο [Πηγή: D'Alessandro, Kyliakopoulos, 2013]

## 1.6. Επιπτώσεις ηφαιστειών

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα έχει τεράστιες επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον αλλά και σε διάφορους τομείς του ανθρωπογενούς περιβάλλοντος, όπως είναι η οικονομία, ο τουρισμός και η υγεία σε παγκόσμια κλίμακα ενώ εξαρτώνται από την τοπογραφία, την πυκνότητα δόμησης και την πληθυσμιακή πυκνότητα της περιοχής που βρίσκεται κοντά στο σημείο της έκρηξης, τις υποδομές καθώς και από την ύπαρξη και την αποτελεσματικότητα των συστημάτων προειδοποίησης. Βέβαια οι επιπτώσεις της ηφαιστειακής δραστηριότητας είναι δυνατόν να διακριθούν σε πρωτογενείς και δευτερογενείς. Στις πρωτογενείς εντάσσονται όλα τα άμεσα αποτελέσματα που μπορούν να προκληθούν όπως είναι ο κίνδυνος ανθρώπινων ζώων και περιουσιών σε απόσταση εκατοντάδων χιλιομέτρων μακριά από τη γεωγραφική θέση του ηφαιστείου. Μετά από μια ηφαιστειακή έκρηξη δύναται να ακολουθήσουν φαινόμενα όπως πτώσεις βράχων, πλημμύρες, πυρκαγιές ενώ συνήθως πριν τις εκρήξεις παρατηρείται και σεισμική δραστηριότητα (Λέκκας, 2015). Στις δευτερογενείς εμπίπτουν οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις τόσο στο περιβάλλον όσο και στην ανθρώπινη δραστηριότητα, όπως μεταβολές στο κλίμα, καταστροφή βιοτόπων και οικιστικών χώρων.



Εικόνα 10: Δομή ηφαιστείου και πιθανοί κίνδυνοι λόγω έκρηξης του [Πηγή: <https://sites.google.com/site/geologikoergastirio/ephaisteia-aitia> (Ανάκτηση 16-11-2021)]

Εκτός όμως από τις αρνητικές επιπτώσεις των ηφαιστειακών εκρήξεων υπάρχουν και ορισμένα θετικά παραδείγματα καθώς η λάβα και η τέφρα περιλαμβάνουν εκτός των άλλων και πλούσια θρεπτικά συστατικά με αποτέλεσμα να αυξάνεται η γονιμότητά του εδάφους. Τα ηφαίστεια είναι επίσης πολύ καλές πηγές γεωθερμικής ενέργειας. Δηλαδή φυσικής θερμικής ενέργεια της Γης που διαρρέει από το θερμό εσωτερικό του πλανήτη προς την επιφάνεια με ρεύματα μεταφοράς, στις ζώνες κοντά στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών, λόγω ηφαιστειακών και υδροθερμικών φαινομένων

(<https://sites.google.com/site/amesidemocratiaellenon/geothermike-energeia>, Ανάκτηση 26-11-2021). Τέλος, τα ηφαίστεια σχηματίζουν πανέμορφα τοπία που προσελκύουν τον παγκόσμιο τουρισμό και κατ' επέκταση στηρίζουν και αυξάνουν τις εκάστοτε τοπικές οικονομίες όπως το Mount Mayon στις Φιλιππίνες το οποίο είναι διάσημο για το τέλει σχήμα του κώνου του, όμως σε ορισμένες περιπτώσεις οι εκρήξεις τους τον περιορίζουν λόγω φόβου επανεκδήλωσης του φαινομένου και της επικινδυνότητάς του.



Εικόνα 11: Mount Mayon στις Φιλιππίνες [Πηγή: BBC]

Αναλυτικά, καταστροφικά γεγονότα που μπορούν να προκληθούν από ηφαίστεια είναι:

i) Ροές λάβας και δομοί λάβας

Δημιουργούνται όταν τηγμένο πέτρωμα (μάγμα) φτάσει στους πρόποδες του ηφαιστείου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, όσο μεγαλύτερο είναι το ιξώδες της λάβας και επομένως όσο περισσότερο διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) περιέχει τόσο δυσκολότερα ρέει. Οι βασαλτικές λάβες που είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε διοξείδιο του πυριτίου δημιουργούν ποτάμια λάβας που κινούνται γρήγορα (με ταχύτητα 10 έως 30 μίλια την ώρα) ή διασκορπίζονται κινούμενες σε εκτεταμένα λεπτά στρώματα πλάτους αρκετών χιλιομέτρων. Στα νησιά της Χαβάης ροές βασαλτικής λάβας από το ηφαίστειο Kilauea έχουν καταστρέψει πάνω από 200 κατοικίες από το 1983. Μπορούν να καταστρέψουν άμεσα δάση, κτίρια και άλλες δομές της ζωής και της δημόσιας και ιδιωτικής περιουσίας με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα στην οικονομία. Επιπλέον η καταστροφή κτιρίων είναι δυνατόν να επιφέρει τραυματισμό, έως και θάνατο ανθρώπων και ζώων.

Αντίθετα οι ροές ανδεσιτικής λάβας, που είναι υψηλότερης περιεκτικότητας σε πυρίτιο, είναι παχύρρευστες και μπορούν να μετακινηθούν μόνο σε μικρή απόσταση από τον κρατήρα. Οι λάβες αυτές συνήθως εκτοξεύονται βίαια από τον κρατήρα και σχηματίζουν ανώμαλες μάζες που ονομάζονται δόμοι λάβας. Μεταξύ των ετών 1980 και 1986 ένας δόμος λάβας στο βουνό της Αγίας Ελένης έφθασε σε ύψος τα 304,8 m και σε πλάτος τα 1.066,8 m.



Εικόνα 12: Ροές λάβας [Πηγή: Blodgett & Keller, 2005]

## ii) Ροές πυροκλαστικών υλικών

Αποτελούν συγκεντρώσεις στάχτης, στερεών υλικών όπως θραυσμάτων πετρωμάτων και αερίων πολύ υψηλής θερμοκρασίας και μεγάλης ταχύτητας που κυλούν κατά μήκος των πλαγιών του ηφαιστειακού κώνου κατά τη διάρκεια της έκρηξης ή όταν η απόκρημνη πλαγιά ενός ηφαιστειακού δόμου καταρρεύσει. Η θερμοκρασία των ροών είναι πιθανό να ανέρχεται έως και  $850^{\circ}\text{C}$  και η ταχύτητά τους έως και  $240\text{ km/h}$ . Συχνά ακολουθούν το κοιλαδικό σύστημα της περιοχής γύρω από το ηφαίστειο και μπορούν να καταστρέψουν και να αποτεφρώσουν οτιδήποτε συναντήσουν στο πέρασμά τους. Οι κινήσεις πυροκλαστικών υλικών χαμηλότερης πυκνότητας ονομάζονται πυροκλαστικές κατακλύσεις. Η δραστηριοποίηση του ηφαιστείου της Αγίας Ελένης προκάλεσε μια σειρά από επιμέρους εκρήξεις που προκάλεσαν μια τεράστια κατάκλιση από πυροκλαστικά υλικά καταστρέφοντας μια έκταση  $595,7\text{ km}^2$ . Είναι χαρακτηριστικό ότι δένδρα με μεγάλου πάχους κορμούς έπεφταν σαν γρασίδι μέχρι και σε απόσταση  $24.140,16\text{ m}$  από το ηφαίστειο.

Όταν υπάρχει δραστηριότητα με πυροκλαστικές ροές τα αιωρήματα εκτινάσσονται με πολύ ισχυρές εκρήξεις στην ατμόσφαιρα. Τα υλικά μπορεί να καλύψουν πολλά τετραγωνικά χιλιόμετρα και οι καταστροφές να είναι πολύ σημαντικές με επιβλαβείς επιπτώσεις (Λέκκας, 2000).

## iii) Ηφαιστειακά αέρια

Τα ηφαίστεια κατά τη διάρκεια των εκρήξεων εκπέμπουν μεγάλες ποσότητες αερίων. Ακόμη όμως και στην περίπτωση όπου δεν βρίσκεται σε κατάσταση παροξυσμού ηφαιστειακά αέρια φθάνουν στην επιφάνεια μέσω υπεδαφικών ρωγμών και διακλάσεων και εκλύονται μέσω μικρών ανοιγμάτων που ονομάζονται φουμαρόλες. Τα αέρια που απελευθερώνονται κατά τη

διάρκεια της ηφαιστειακής δραστηριότητας είναι οι υδρατμοί, το διοξείδιο του θείου, το υδρόθειο, το διοξείδιο και το μονοξείδιο του άνθρακα, με περισσότερο συνήθη τους υδρατμούς (αποτελούν το 90% των συνολικών αερίων), το διοξείδιο του άνθρακα και το διοξείδιο του θείου. Η μεγαλύτερη ποσότητα των υδρατμών είναι υπόγειο νερό υδροφόρων οριζόντων που εξαιτίας της μαγματικής δραστηριότητας θερμαίνεται και μετατρέπεται σε ατμό.

Το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ) αντιδρά με το νερό της ατμόσφαιρας και παράγει την όξινη βροχή, που αποτελεί μία απειλή με ευρείες συνέπειες καθώς έχει αρνητική επιρροή στην ποιότητα της ανθρώπινης ζωής, στην περιβαλλοντική σταθερότητα και στη βιωσιμότητα του οικοσυστήματος. Ειδικότερα, η όξινη βροχή έχει ως αποτέλεσμα την όξυνση του εδάφους, η οποία αυξάνει την ανταλλαγή ιόντων υδρογόνου και θρεπτικών κατιόντων όπως το κάλιο (K), το μαγνήσιο (Mg) και το ασβέστιο (Ca) στο έδαφος. Αυτά τα κατιόντα απελευθερώνονται στο έδαφος και μπορούν να εκπλυθούν γρήγορα σε διάλυμα εδάφους μαζί με θειικό άλας από την εισροή οξέος. Η επαγόμενη από οξύ έκλυση οδηγεί σε ανεπάρκεια θρεπτικών συστατικών στα προσβεβλημένα εδάφη και αυτή η απώλεια γονιμότητας του εδάφους, οδηγεί σε μείωση της ανάπτυξης των φυτών και δέντρων (Armstrong, 2016).

Παράλληλα, οι υψηλές συγκεντρώσεις όξινης απόθεσης καταστρέφουν τους υδάτινους πόρους. Αυτό αποτελεί κυρίως πρόβλημα σε περιοχές όπου οι αντιδράσεις με αλκαλικό έδαφος δεν μπορούν να εξουδετερώσουν τις όξινες εισροές. Όταν η όξινη βροχή καταλήξει σε ένα ποτάμι ή μια λίμνη χωρίς αλκαλικά πετρώματα, τότε ανεβάζει την οξύτητα του νερού. Με την αύξηση αυτή, τα αυγά των ψαριών και των αμφιβίων καταστρέφονται (Βουτυράκης, 2005). Στη συνέχεια, τα διάφορα βακτήρια πεθαίνουν. Χωρίς βακτήρια, οι βιολογικές διασπάσεις δεν γίνονται και φύλλα και άλλα οργανικά υλικά συγκεντρώνονται στον πυθμένα. Μελέτες καταδεικνύουν ότι εκατοντάδες λίμνες τόσο στην Β. Ευρώπη όσο και στις ΗΠΑ και στον Καναδά είναι τόσο όξινες ώστε όλος ο πληθυσμός των ψαριών έχει αισθητά επηρεαστεί (Μελάς κ.α., 2000). Έμμεσες επιπτώσεις που μπορούν ακόμη να προκληθούν στην υγεία λόγω καταστροφής ή μόλυνσης των καλλιεργειών και των συστημάτων παροχής νερού είναι ο υποσιτισμός και η λειψυδρία.

Επιπλέον, αρνητικές επιπτώσεις επιφέρει στην ανθρώπινη υγεία εντείνοντας αναπνευστικά προβλήματα, κεφαλαλγίες, κλονισμό του νευρικού συστήματος κλπ (Μελάς κ.α., 2000). Ενδεικτικά, στην περίπτωση του ηφαιστείου Huaynarutina στο Περού το διοξείδιο του θείου

πιθανολογείται ότι προκάλεσε τον ρωσικό λιμό του 1601-1603 ενώ επιπλέον προκάλεσε τον θάνατο περίπου 2 εκατομμυρίων ανθρώπων (Davis, 2008). Τέλος, η όξινη βροχή προσβάλλει και διαβρώνει τα μάρμαρα, τους ασβεστόλιθους και άλλα πετρώματα, απειλώντας τη βιωσιμότητα πολιτιστικών κληροδοτημάτων (Βουτυράκης, 2005).

Επίσης, το θείο αντιδρώντας με το νερό της ατμόσφαιρας δημιουργεί αερολύματα τα οποία απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία και την αντανακλούν στο διάστημα. Κάτι τέτοιο περιγράφει ο Πλούταρχος για την έκρηξη της Αίτνα στην Ιταλία το 44 π.Χ. όπου κρύφτηκε ο Ήλιος και το κρύο που δημιουργήθηκε κατέστρεψε τις καλλιέργειες και δημιούργησε τον λιμό στη Ρώμη και την Αίγυπτο (Robock, 2000). Οι μεγάλες ηφαιστειακές εκρήξεις, όπως αυτή της 15<sup>ης</sup> Ιουνίου του 1991 στο Pinatubo στις Φιλιππίνες, απελευθερώνουν τεράστια ποσά SO<sub>2</sub> στην στρατόσφαιρα όπου ενώνεται με το νερό σχηματίζοντας ένα αεροζόλ θειικού οξέως. Το αεροζόλ αυτό προκαλεί την ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας πίσω στο διάστημα μειώνοντας αρκετά τη θερμοκρασία του αέρα στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Επιπλέον το αεροζόλ αυτό προκαλεί την καταστροφή της οζονόσφαιρας, η οποία ως γνωστόν δρα σαν φίλτρο για την βλαβερή ηλιακή ακτινοβολία.

Μεγάλη συμβολή στην πρόκληση αναπνευστικών προβλημάτων έχει και το υδρόθειο (H<sub>2</sub>S) το οποίο είναι πολύ τοξικό και άοσμο και δημιουργεί σοβαρούς ερεθισμούς στο αναπνευστικό το οποίο μπορεί να φτάσει έως και σε οίδημα εάν η έκθεση είναι μακράς διάρκειας. Ένα παράδειγμα είναι ότι η έκθεση σε 500 ppm για 5 λεπτά προκαλεί αναισθησία και θάνατο.

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) είναι βαρύτερο από τον ατμοσφαιρικό αέρα με αποτέλεσμα να επικάθεται στα κατώτερα στρώματα κοντά στην επιφάνεια της γης σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις που σε αρκετές περιπτώσεις είναι θανατηφόρες για τον άνθρωπο και τα ζώα.

Επιπλέον το φθόριο που σε μεγάλες ποσότητες είναι τοξικό μπορεί να απορροφηθεί από την ηφαιστειακή στάχτη και στην συνέχεια να πέσει μαζί της στο έδαφος δηλητηριάζοντας καλλιέργειες, βοσκοτόπια και επηρεάζοντας το υπόγειο νερό.

Τα ηφαιστειακά αέρια προϊόντα εκτός από τη μεταβολή που επιφέρουν στην ακτινοβολία στην στρατόσφαιρα, επηρεάζουν σημαντικά και την χημεία της. Συγκεκριμένα από τις αντιδράσεις που παράγουν καταστρέφεται το όζον (O<sub>3</sub>) με άμεση επιρροή στην υπεριώδη ακτινοβολία. Παράδειγμα αποτελεί η έκρηξη του ηφαιστείου St Helens (Αγίας Ελένης) στις ΗΠΑ όπου διατηρήθηκε η τοπική θερμοκρασία σε 15°C για 15 περίπου ώρες (Κυριακόπουλος, 2014).

Μια ακόμη περίπτωση ηφαιστειακής έκρηξης που είχε επιπτώσεις στην οικονομία είναι η περίπτωση του ηφαιστείου Eyjafjallajökull στην Ισλανδία το 2010 η οποία επηρέασε τις αερομεταφορές διότι τα ηφαιστειακά αέρια που ανέβηκαν σε 10 km ύψος περίπου, διασκορπίστηκαν σε όλη την Βόρεια Ευρώπη με αποτέλεσμα τη διακοπή των πτήσεων όλων των αεροσκαφών για τουλάχιστον μια εβδομάδα. Έτσι επηρεάστηκε το διεθνές εμπόριο από την διακίνηση των αγαθών μέσω αεροσκαφών. Οι χώρες που η οικονομία τους βασίζεται σε εισαγωγές και εξαγωγές υπέστησαν βαρύ πλήγμα σύμφωνα με το U.S. International Trade Commission. Επιπλέον τον Μάρτιο του 1991 λόγω της έκρηξης του ηφαιστείου Pinatubo στις Φιλιππίνες περισσότερα από 20 αεροσκάφη υπέστησαν ζημιές γεγονός που επηρέασε αρκετά την οικονομία της χώρας.



Εικόνα 13: Έκρηξη του ηφαιστείου Pinatubo στις Φιλιππίνες το 1991 [Πηγή: [https://3otiko.blogspot.com/2017/10/blog-post\\_58.html](https://3otiko.blogspot.com/2017/10/blog-post_58.html)] (Ανάκτηση 16-11-2021)]

#### iv) Ηφαιστειακές στήλες και ηφαιστειακά νέφη

Προϊόντα της ηφαιστειακής δραστηριότητας είναι οι ηφαιστειακές στήλες και τα ηφαιστειακά νέφη έκρηξης. Ως ηφαιστειακή στήλη ορίζεται η ανύψωση με μεγάλη δύναμη πετρωμάτων, τηγμένων σταγονιδίων και αερίων στην ατμόσφαιρα ύστερα από μία ηφαιστειακή έκρηξη ενώ τα ηφαιστειακά νέφη δημιουργούνται από τα ηφαιστειακά αέρια που παρασύρονται από τον άνεμο σε αρκετά μεγάλη απόσταση από το ηφαίστειο.



Εικόνα 14: Ηφαιστειακά νέφη από το ηφαίστειο Pinatubo στις Φιλιππίνες το 1991 [Πηγή: Λέκκας, 2000]

Τα μεγαλύτερα από τα στερεά πετρώματα που εκσφενδονίζονται καλούνται βόμβες και συνήθως πέφτουν στο έδαφος σε μικρή απόσταση από τον κρατήρα του ηφαιστείου (περίπου 3 km). Αντίθετα τα πετρώματα με μικρότερη διατομή ανυψώνονται εντός του ηφαιστειακού αέρα φθάνοντας σε μεγάλο ύψος, δημιουργώντας μια ηφαιστειακή στήλη. Η στήλη αυτή μπορεί να αναπτυχθεί ταχύτατα φθάνοντας σε ύψος 19.312,13 m πάνω από το ηφαίστειο που την προκάλεσε μέσα σε χρονικό διάστημα μικρότερο των 30 λεπτών σχηματίζοντας ένα ηφαιστειακό νέφος το οποίο παρασύρεται από τους επικρατούντες ανέμους σε αρκετά μεγάλη απόσταση από το ηφαίστειο. Σε ορισμένες περιπτώσεις τα ηφαιστειακά νέφη μπορούν να εκτείνονται εκατοντάδες χιλιόμετρα μακριά από το ηφαίστειο που τα δημιούργησε, όπως στην περίπτωση της έκρηξης της 18<sup>ης</sup> Μαΐου του 1980 του ηφαιστείου της Αγίας Ελένης στην Washington η στάχτη παρασύρθηκε από τον άνεμο και έπεσε σε απόσταση 56.979,5 km<sup>2</sup> στις δυτικές ΗΠΑ.



Εικόνα 15: Η έκρηξη του ηφαιστείου στο όρος της Αγίας Ελένης το 1980 [Πηγή: <https://www.mixanitouxronou.gr/o-fotografos-poy-kategrapse-tin-ekruxi-toy-ifasteioy-kai-to-thanato-toy-niotho-oti-vriskomai-sta-prothyra-prin-ginei-kati-egrafe-kai-ezise-gia-ligo-ti-megalyteri-katolisthisi-tis-istorias/> (Ανάκτηση 16-11-2021)]

Τα νέφη προκαλούν μεγάλης κλίμακας βροχή από στάχτη η οποία μπορεί να προκαλέσει την κατάρρευση κτιρίων, την καταστροφή γεωργικών εκτάσεων και προβλήματα στην αεροπλοΐα. Βέβαια η έκταση και οι επιπτώσεις της ζημιάς που μπορεί να επέλθει σε ένα αεροσκάφος το οποίο πετά μέσα από ηφαιστειακή σκόνη είναι συνάρτηση του χρόνου έκθεσης, της συγκέντρωσης σε υλικά του ηφαιστειακού νέφους και των ενεργειών που θα κάνει το πλήρωμα για να βγει από αυτό. Τα τελευταία 15 έτη έχουν συντριβεί περίπου 80 εμπορικά αεροσκάφη καθώς πετούσαν σε ηφαιστειακά νέφη που τους προκάλεσαν μηχανικά προβλήματα.

#### ν) Ηφαιστειακές κατολισθήσεις

Κατολίσθηση είναι η γρήγορη κίνηση πετρώδους υλικού με ή χωρίς περιεκτικότητα νερού χιονιού και/ή πάγου κατά μήκος μιας απόκρημνης πλαγιάς. Στην περίπτωση όπου οι κινήσεις λόγω βαρύτητας αφορούν ηφαιστειακά υλικά ονομάζονται ηφαιστειακές κατολισθήσεις. Οι ηφαιστειακές κατολισθήσεις ποικίλουν σε μέγεθος και έκταση από μικρής κλίμακας κινήσεις χαλαρών ηφαιστειακών κορημάτων κατά μήκος της επιφάνειας των πλαγιών ενός ηφαιστείου έως μαζικές καταρρεύσεις όλου του ηφαιστειακού οικοδομήματος ή των πλευρών του κώνου. Τα ηφαίστεια των οποίων οι ηφαιστειακοί κώνοι έχουν μεγάλη μορφολογική κλίση είναι περισσότερο επιρρεπή σε κατολισθητικά φαινόμενα. Τα ηφαιστειακά υλικά, στρώματα θραυσμάτων πετρωμάτων και στάχτη που κινούνται κατά μήκος του ηφαιστειακού κώνου λόγω βαρύτητας ευνοούνται λόγω της χαλαρότητας που τα χαρακτηρίζει και λόγω της

κυκλοφορίας θερμών νερών που σε αρκετές περιπτώσεις μετατρέπει αρκετά ηφαιστειακά υλικά σε μαλακά και ολισθηρά αργιλικά ορυκτά.

Οι ηφαιστειακές κατολισθήσεις στις πλαγιές των ηφαιστείων πυροδοτούνται όταν εκρήξεις, έντονη βροχόπτωση ή μεγάλες σεισμικές δονήσεις αποσταθεροποιήσουν τα υλικά των ηφαιστειακών κώνων προκαλώντας την απόσπασή τους και την ολίσθησή τους υπό την επίδραση της βαρύτητας προς τοπογραφικά χαμηλότερες περιοχές. Έχει διαπιστωθεί ότι κατά μήκος των πλαγιών του βουνού Rainer στην Wasinghton έχουν κυλίσει τουλάχιστον πέντε μεγάλες ηφαιστειακές κατολισθήσεις κατά τα τελευταία 6.000 έτη. Η μεγαλύτερη ηφαιστειακή κατολίσθηση των ιστορικών χρόνων συνέβη με την έναρξη της μεγάλης έκρηξης του ηφαιστείου της Αγίας Ελένης το 1980.

Σε αρκετές περιπτώσεις τα υλικά των ηφαιστειακών κατολισθήσεων μαρτυρούν τα φαινόμενα που προκάλεσαν την απόθεσή τους. Για παράδειγμα η πόλη Weed στην California είναι χτισμένη πάνω σε μια τεράστια ροή ηφαιστειακών κορημάτων που κινήθηκε στις πλαγιές του ηφαιστείου Shast περίπου 30.0000 έτη πριν από σήμερα. Αυτή η παλαιά κατολίσθηση ταξίδεψε σε απόσταση μεγαλύτερη από 48.280 m από το ηφαίστειο κατακλύζοντας μια έκταση περίπου 673,4 km<sup>2</sup>.

#### vi) Ηφαιστειακές λασποροές (Lahars)

Αποτελούν ροές ηφαιστειακών υλικών (μίγμα λάσπης και πετρωμάτων) με μεγάλη περιεκτικότητα σε νερό που κινούνται καθοδικά στις πλαγιές και τις κοιλάδες των ηφαιστείων και στη συνέχεια στις κοίτες πιθανών υδρογραφικών δικτύων που βρίσκονται στην περιοχή διανύοντας απόσταση μεγαλύτερη των 80.467,2 m και με ταχύτητα έως 74km/h. Η περιεκτικότητα των λασποροών σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να ανέρχεται στο ποσοστό των 60-90% θραυσμάτων πετρωμάτων με διάμετρο μεγαλύτερη των 10 m και έχουν την όψη ταχύτατων ποταμιών τσιμέντου. Μεγαλύτερες επιπτώσεις έχουν σε κοντινές αποστάσεις από την πηγή τους εφόσον δύναται να παρασύρουν δέντρα, κτίρια, ογκόλιθους και να καταστρέψουν κι άλλες δομές της ζωής και της δημόσιας και ιδιωτικής περιουσίας όπως για παράδειγμα δρόμους, χωράφια ακόμα και ολόκληρους οικισμούς ενώ στις χαμηλότερες τοπογραφικά περιοχές όπου καταλήγουν βυθίζουν στη λάσπη όσα έχουν παρασύρει κατά τη διάρκεια την πορείας τους, δημιουργώντας τεράστια προβλήματα στην οικονομία των περιοχών. Βέβαια η καταστροφή των κτιρίων είναι δυνατόν να επιφέρει τραυματισμό, έως και θάνατο ανθρώπων και ζώων.

Οι ηφαιστειακές λασποροές συνδέονται σχεδόν πάντοτε με στρωματοηφαίστεια, διότι αυτά εκρήγνυνται βίαια και δημιουργούν πυροκλαστικές ροές. Επιπλέον, οι ψηλοί και απότομοι κώνοι τους καλύπτονται από χιόνια και πάγο, το λιώσιμο των οποίων είναι υπεύθυνο για το νερό που δημιουργεί τις λασποροές. Η ποσότητα του νερού μπορεί επίσης να προέλθει από παγετώνα που έλιωσε κατά τη διέλευση μιας ροής πυροκλαστικών υλικών, από έντονη βροχοπτώση, ή σπανιότερα από την αποδέσμευση του νερού της λίμνης ενός κρατήρα που απελευθερώθηκε μετά τη διάρρηξη των τοιχωμάτων του. Βέβαια οι κώνοι των στρωματοηφαιστειών αποτελούνται από χαλαρά πυροκλαστικά υλικά που διαβρώνονται εύκολα, ενώ τα πρηνή τους εσωτερικά είναι ασταθή λόγω της αλλοίωσης από υδροθερμικά ρευστά, γεγονός που συμβάλει και αυτό στην δημιουργία των λασποροών. Ηφαιστειακές λασποροές όμως μπορούν να πραγματοποιηθούν και σε χρονικά διαστήματα όπου το ηφαίστειο βρίσκεται σε ηρεμία. Σε αυτή την περίπτωση οι επιπτώσεις είναι περισσότερο καταστροφικές καθώς ο πληθυσμός που κατοικεί στις περιοχές πέριξ του ηφαιστείου αλλά ιδιαίτερα εκείνου που βρίσκεται μακριά από αυτό είναι απροετοίμαστος.

Η ιστορία δείχνει ότι τα Lahars αποτελούν την περισσότερο επικίνδυνη και θανατηφόρα από τις ηφαιστειακές καταστροφές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η έκρηξη του ηφαιστείου της Αγίας Ελένης το 1980 όπου σκοτώθηκαν 24.000 ζώα. Επίσης, οι ηφαιστειακές λασποροές αποτελούν ένα φυσικό κίνδυνο για πιθανή καταστροφή πόλεων και οικισμών που βρίσκονται στα κατάντη ηφαιστειών που καλύπτονται από παγετώνες (Καρύμπαλης, 2014).

## **1.7. Πρόγνωση ηφαιστειακής δραστηριότητας**

Κάθε χρόνο εκρήγνυνται, ενδεικτικά, περίπου 50 ηφαίστεια παγκοσμίως. Στις περιπτώσεις βίαιων εκρήξεων η επικινδυνότητα για τους κατοίκους των γύρω περιοχών είναι αρκετά υψηλή. Με την πάροδο του χρόνου όλο και μεγαλύτερο ποσοστό ατόμων κατοικεί σε περιοχές με μεγάλη τρωτότητα ως προς τις ηφαιστειακές εκρήξεις. Γι' αυτό λοιπόν κρίνεται αναγκαία η πρόβλεψη των ηφαιστειακών δραστηριοτήτων. Για παράδειγμα η πόλη Porocatepelt που βρίσκεται νότια της πόλης του Mexico ενώ είχε υποστεί κατά το παρελθόν τις αρνητικές επιπτώσεις από την ηφαιστειακή δραστηριότητα επανεγκαταστάθηκε στην ίδια θέση θέτοντας σε κίνδυνο 1.000.000 ανθρώπους. Ίδιος περίπου αριθμός ανθρώπων κατοικούν στην Νάπολη της Ιταλίας θέτοντας τη ζωή τους σε κίνδυνο από μια ενδεχόμενη έκρηξη του Βεζούβιου. Οι ηφαιστειακές εκρήξεις αποτελούν γεωλογικά φαινόμενα τα οποία δύναται να προβλεφθούν με την προϋπόθεση να παρακολουθείται και να ελέγχεται μεθοδικά η δραστηριότητα των

ηφαιστειών. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα μπορεί να παρακολουθηθεί από πολυάριθμους δείκτες αλλά λόγω του κόστους και των προβλημάτων προσπέλασης, ο έλεγχος είναι εντατικός σε 12 περίπου ηφαίστεια παγκοσμίως. Είναι σχεδόν απίθανο να προβλεφθεί με ακρίβεια η ηφαιστειακή δραστηριότητα στο άμεσο μέλλον, γι' αυτό κρίνεται απαραίτητη η κατανόηση της συμπεριφοράς και του ιστορικού του ηφαιστείου με αποτέλεσμα ο σχεδιασμός της αντιμετώπισης μιας ενδεχόμενης ηφαιστειακής καταστροφής να είναι πιο αποτελεσματικός. Ένα πρόβλημα που υπάρχει είναι πως οι περισσότερες τεχνικές πρόγνωσης απαιτούν εμπειρία με πραγματικές εκρήξεις. Επομένως είναι πιο εύκολο να πραγματοποιηθούν εκρήξεις στα νησιά της Χαβάης λόγω της αυξημένης εμπειρίας στη συγκεκριμένη περιοχή.

## **1.8. Πρόδρομα φαινόμενα ηφαιστειακής έκρηξης**

Στις περισσότερες περιπτώσεις πριν από τις ηφαιστειακές εκρήξεις παρατηρούνται ορισμένα φαινόμενα, ωστόσο υπάρχουν και περιπτώσεις όπου τα ηφαίστεια εκρήγνυνται χωρίς καμία προειδοποίηση. Τα πρόδρομα φαινόμενα που συνοδεύουν μια έκρηξη είναι τα ακόλουθα:

- Σεισμική δραστηριότητα: παρατηρείται αύξηση της σεισμικής δραστηριότητας σε τοπικό επίπεδο καθώς και υπόκωφη βοή.
- Εδαφικές παραμορφώσεις: αποτελούν διογκώσεις ή ανοδικές κινήσεις στον ηφαιστειακό κώνο και αλλαγές στις κλίσεις των πρηνών κοντά στο ηφαίστειο.
- Υδροθερμικά φαινόμενα: σε αυτά εντάσσονται αυξημένες παροχές θερμών πηγών αυξημένες απελευθερώσεις αερίων στις φουμαρόλες, αύξηση της θερμοκρασίας των θερμών πηγών ή των εκπομπών αερίων από τις φουμαρόλες, αύξηση θερμοκρασίας των λιμνών του κρατήρα, τήξη χιονιού ή πάγου στο ηφαίστειο και καταστροφή της βλάστησης στα πρηνή του ηφαιστείου.
- Χημικές αλλαγές: η χημική σύσταση των εκπεμπόμενων αερίων αλλάζει.

Τα πρόδρομα ηφαιστειακά φαινόμενα δεν έχουν προκαθορισμένο χρονικό διάστημα που παρατηρούνται καθώς αυτό μπορεί να κυμανθεί από μερικές ημέρες έως και ένα χρόνο ή περισσότερο πριν από την έκρηξη του ηφαιστείου. Πολλές φορές η αυξημένη πρόδρομη δραστηριότητα δεν συνοδεύεται από έκρηξη καθώς το μάγμα είναι πιθανό να παραμείνει στο υπέδαφος και να μη φθάσει στην επιφάνεια (Λέκκας & Ανδρεαδάκης, 2015).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Παρακολούθηση ηφαιστειών

### 2.1. Όργανα παρακολούθησης ηφαιστειών

Τα όργανα που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και την καταγραφή των πρόδρομων φαινομένων ενός ηφαιστείου είναι τα ακόλουθα:

- Σεισμογράφοι, οι οποίοι καταγράφουν τις σεισμικές δονήσεις που προκαλούνται στην ευρύτερη περιοχή του ηφαιστείου λόγω της ανόδου του μάγματος. Σύμφωνα με καταγραφές των σεισμογράφων, το μέγεθος των σεισμών ανέρχεται έως 5 Richter ενώ οι συχνότητές τους έως 700 ημερησίως.
- Tiltmeters για τη μέτρηση των κλίσεων, geodimeters που αποτελεί οπτικό ηλεκτρονικό τοπογραφικό όργανο μέτρησης της απόστασης καθώς και μέθοδοι τηλεπισκόπησης για την καταγραφή των μεταβολών υψομέτρου (εδαφικές παραμορφώσεις) περιμετρικά αλλά και στις πλευρές του ηφαιστείου. Οι πιο σύγχρονες και δαπανηρές μέθοδοι μέτρησης της εδαφικής παραμόρφωσης με τις μεθόδους της τηλεπισκόπησης είναι με τη χρήση δορυφόρων. Ειδικότερα τα GPS (Global Position System) έχουν τη δυνατότητα να μετρούν οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις του εδάφους, και τα Satellite Radar Interferometry, τα οποία με κατάλληλες δορυφορικές εικόνες διαφορετικών χρονικών περιόδων παρατηρούν τις παραμορφώσεις του εδάφους γύρω από το ηφαίστειο. Η δέσμη του ραντάρ μπορεί να περάσει μέσα από τα σύννεφα. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στις τροπικές περιοχές, όπου τα σύννεφα συχνά συσκοτίζουν τις οπτικές παρατηρήσεις.
- Correlation Spectrometers (COSPECS) και total ozone mapping spectrometer (TOMS) για τη μέτρηση των ποσών SO<sub>2</sub> που εκλύεται από το ηφαίστειο.
- Μόνιμοι σταθμοί δορυφορικών συστημάτων παγκόσμιας πλοήγησης (Global Navigation Satellite Systems - GNSS)
- Κάμερες Web

## 2.2. Τρόποι παρακολούθησης ηφαιστειών

### 2.2.1. Σεισμική δραστηριότητα

Αρκετά ηφαίστεια εμφανίζουν μια συνεχή φυσιολογική ασθενή σεισμική δραστηριότητα. Η αύξηση της συχνότητας των δονήσεων μπορεί να αποτελεί μια προειδοποίηση για ενδεχόμενη ηφαιστειακή έκρηξη. Τα τελευταία 20 χρόνια, ευρυζωνικοί σεισμικοί αισθητήρες έχουν επιτρέψει την ανίχνευση σεισμικών σημάτων από ηφαιστειακούς σεισμούς σε ευρύ εύρος συχνοτήτων, επιτρέποντας στους σεισμολόγους των ηφαιστειών να διακρίνουν διαφορετικά είδη ηφαιστειακών γεγονότων και να αποδίδουν διαφορετικά σήματα σε διαφορετικές ηφαιστειακές διεργασίες. Το μάγμα που διεισδύει ανάμεσα στα πετρώματα, πληρώνοντας τα κενά και προσπαθώντας να φθάσει στη γήινη επιφάνεια, μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία σμήνους σεισμών. Η ηφαιστειακή αυτή σεισμικότητα έχει τρεις κύριες μορφές, τους σεισμούς μικρής περιόδου, μακράς περιόδου και τις αρμονικές δονήσεις.

Σεισμοί μικρής περιόδου: μοιάζουν στα χαρακτηριστικά με τους σεισμούς που οφείλονται στην δραστηριοποίηση των ρηγμάτων. Προκαλούνται από τη θραύση των μικρής αντοχής πετρωμάτων του φλοιού της γης καθώς πιέζονται από το μάγμα κατά τη διάρκεια της ανοδικής του κίνησης προς την επιφάνεια. Αυτοί οι μικρής περιόδου σεισμοί είναι ενδείξεις της ανάπτυξης ενός μαγματικού σώματος κοντά στην επιφάνεια.

Σεισμοί μακράς περιόδου: σχετίζονται με τις αυξημένες πιέσεις αερίων στο «σύστημα σωληνώσεων» ενός ηφαιστείου. Οι σεισμοί αυτοί μοιάζουν αρκετά με τους ήχους που ακούγονται στο σύστημα των υδραυλικών σωληνώσεων των σπιτιών.

Οι αρμονικές δονήσεις παρατηρούνται όταν υπάρχει μεγάλη κινητικότητα του μάγματος κάτω από την επιφάνεια.

Στην πραγματικότητα η ηφαιστειακή σεισμικότητα είναι πολύπλοκη και συχνά η ερμηνεία της είναι δύσκολη. Η αυξημένη πάντως δραστηριότητα είναι πολύ ανησυχητική ειδικά όταν μακράς περιόδου σεισμοί κυριαρχούν με την πάροδο του χρόνου και εμφανίζονται επεισόδια αρμονικών δονήσεων.

### **2.2.2. Εδαφική παραμόρφωση**

Υπάρχουν τρεις πρωταρχικές πηγές παραμόρφωσης του γήινου φλοιού, οι αλλαγές πίεσης στους μαγματικούς θαλάμους, οι μαγματικές παρεισφρήσεις και οι σεισμοί. Επομένως η παραμόρφωση του εδάφους περιμετρικά του ηφαιστείου αποτελεί ένδειξη ότι το μάγμα έχει συγκεντρωθεί πολύ κοντά στην επιφάνεια. Οι αλλαγές πίεσης στο εσωτερικό των ηφαιστείων συχνά προκαλούν εύκολα μετρήσιμες παραμορφώσεις των ηφαιστειακών πλαγιών με αποτέλεσμα οι επιστήμονες να αναζητούν τις μεταβολές στο ρυθμό των παραμορφώσεων. Επιπλέον τα πεδία των επιφανειακών παραμορφώσεων εξαρτώνται από την εσωτερική κατασκευή των ηφαιστείων και τις διαβάσεις του μάγματος. Τα μεγέθη της παραμόρφωσης των ανενεργών ηφαίστειων είναι συνήθως μερικά mm ή cm ανά έτος, αλλά μπορούν και να υπερβούν το ένα μέτρο κατά τη διάρκεια των εκρήξεων. Στην περίπτωση όπου η συνεχής παραμόρφωση των ηφαιστείων συνοδεύεται από μια αντίστοιχη αύξηση των εκπομπών SO<sub>2</sub> και της συχνότητας των αρμονικών δονήσεων είναι σχεδόν βέβαιη ένδειξη ενός επερχόμενου γεγονότος. Επομένως η γεωδαιτική παρακολούθηση των ηφαιστείων είναι πολύ σημαντική στο μετριασμό του ηφαιστειακού κινδύνου και μπορεί να είναι κρίσιμη στην παροχή γρήγορης προειδοποίησης μιας έκρηξης.

Οι γεωδαιτικές τεχνικές που συμπληρώνουν τις μεθόδους παρακολούθησης έχουν εφαρμοσθεί εκτενέστερα σε ενεργά ηφαίστεια. Η γεωδαιτική παρακολούθηση ενός ηφαιστείου περιλαμβάνει την εγκατάσταση μακροπρόθεσμων συστημάτων παρακολούθησης, αλλά και περιοδικών μετρήσεων ενός σταθερού γεωδαιτικού δικτύου τη χρήση κλασικών επίγειων τεχνικών ή της τεχνικής GPS (Global Positioning System). Η τεχνολογία της Συμβολομετρίας Ραντάρ (Interferometry Synthetic Aperture Radar, InSAR) αποτελεί πρόσθετο μέσο παρακολούθησης ηφαιστειακών περιοχών και δύναται άκρως να χρησιμοποιηθεί στην παρακολούθηση της εδαφικής παραμόρφωσης ενεργών ηφαιστείων.

### **2.2.3. Εκπομπές ηφαιστειακών αερίων**

Η παρακολούθηση των ηφαιστειακών αερίων μπορεί να αποβεί χρήσιμη στην πρόβλεψη των ηφαιστειακών εκρήξεων καθώς όταν αυξάνεται η δραστηριότητα του μάγματος στο μαγματικό θάλαμο τότε αυτό ανέρχεται στην επιφάνεια με αποτέλεσμα να ελαττώνεται η πίεση του ενώ ταυτόχρονα να εκλύονται τα αέρια που περιέχει. Η σταδιακή λοιπόν αύξηση των εκλυόμενων ποσοτήτων των αερίων συνήθως προμηνύει την άφιξη όλο και περισσότερου μάγματος από το

εσωτερικό της γης στην επιφάνεια. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το ηφαίστειο Pinatubo στις Φιλιππίνες όπου στις 13 Μαΐου το 1991 απελευθερώθηκαν 500 τόνοι  $\text{SO}_2$ . Δύο εβδομάδες αργότερα οι εκπομπές αυξήθηκαν σε 5.000 τόνους, συνεπώς δεκαπλασιάστηκαν ενώ στις 12 Ιουνίου πραγματοποιήθηκε η έκρηξη του ηφαιστείου. Στις περιπτώσεις όμως όπου παρατηρείται μείωση των ποσοτήτων των εκλυόμενων αερίων, δημιουργείται αύξηση της πίεσης κάτω από το ηφαίστειο καθώς σφραγίζονται οι δίοδοι εξόδου από το στερεοποιημένο μάγμα με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι πιθανότητες μίας βίαιης έκρηξης.

Η μέτρηση της σύστασης και του σχετικού όγκου των αερίων που εκλύονται από τα ηφαίστεια πριν από την έκρηξή τους γίνεται με τις παρακάτω μεθόδους:

i) Άμεσες μετρήσεις:

Τα αέρια που εξέρχονται από τις ατμίδες συλλέγονται σε φιάλες και αναλύονται σε γεωχημικά εργαστήρια. Μολονότι αυτή η μέθοδος παρέχει χρήσιμα δεδομένα, είναι αρκετά επικίνδυνη για τους επιστήμονες, καθώς επίσης τα συλλεγόμενα δείγματα αερίων μολύνονται από τον ατμοσφαιρικό αέρα.

ii) Correlation spectrometer (COSPEC):

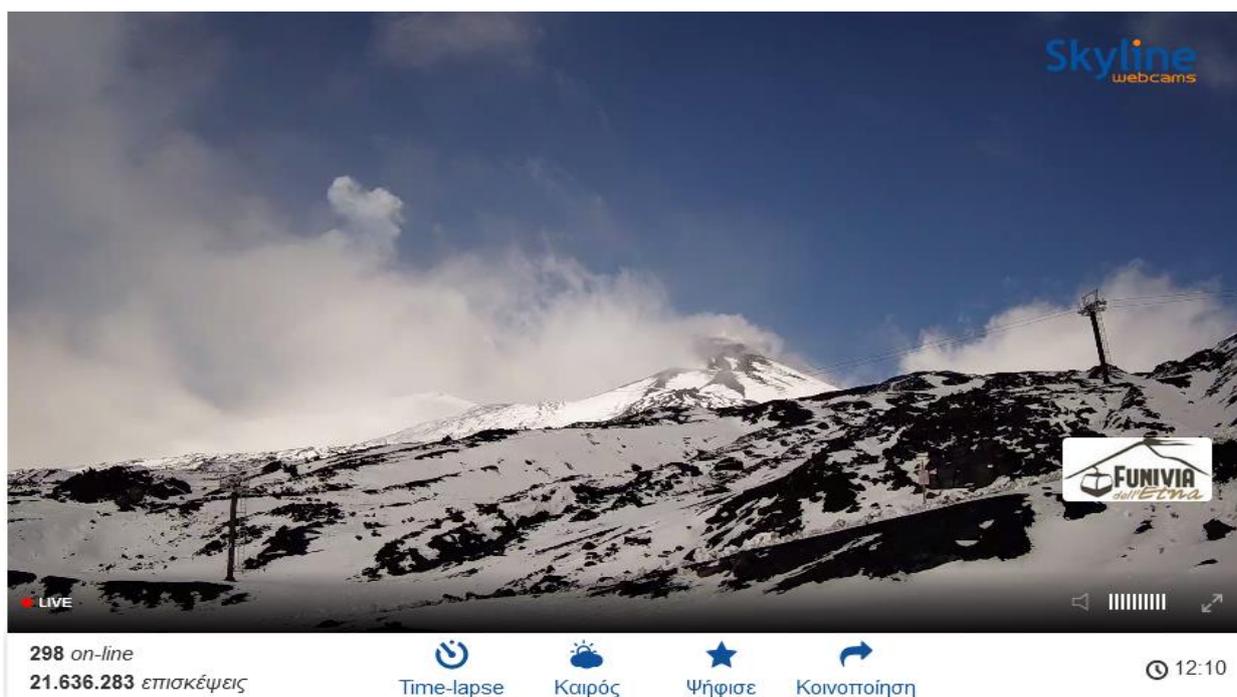
Ο φασματογράφος συσχέτισης κατασκευάστηκε στη δεκαετία του 1970 για την παρακολούθηση των αναθυμιάσεων του  $\text{SO}_2$  από τις καμινάδες των εργοστασίων και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις εξ αποστάσεως μέτρησης. Στην περίπτωση των ηφαιστείων η παρακολούθηση γίνεται είτε από το έδαφος, είτε από αυτοκίνητο, είτε από ελικόπτερο. Οι πιο σύγχρονοι φασματογράφοι είναι φασματογράφοι υπέρυθρου (infrared spectrometers) που μετρούν το ποσοστό της υπέρυθρης ακτινοβολίας που απορροφάται από το  $\text{CO}_2$  και άλλα αέρια.

iii) Total ozone mapping spectrometer (TOMS):

Εφαρμόζεται για μετρήσεις ευρείας κλίμακας και καταγράφει την κατανομή και την ποσότητα του  $\text{SO}_2$  που απελευθερώνεται στη στρατόσφαιρα από τις ηφαιστειακές εκρήξεις, μετρώντας το όζον με φασματική χαρτογράφηση του ολικού όζοντος. Το όργανο αυτό αρχικά χρησιμοποιήθηκε στους δορυφόρους Nimbus-7 και Meteor-3. Από το 1997 όμως κι ύστερα βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη Γη πιο σύγχρονα όργανα που δίνουν λεπτομερέστερες πληροφορίες.

iv) Κάμερες Web:

Αποτελούν κάμερες που τοποθετούνται στο έδαφος και παρακολουθούν τα ηφαιστεια ενώ ταυτόχρονα προβάλλονται σε ζωντανή μετάδοση στο διαδίκτυο. Στον σύνδεσμο <https://www.skylinewebcams.com/el/webcam/italia/sicilia/catania/vulcano-etna-sud.html> (Ανάκτηση 19-11-2021) προβάλλονται οι κρατήρες του ηφαιστείου της Αίτνα σε υψόμετρο 2.505 m, ιδανικό σημείο για την παρακολούθηση των κρατήρων για ενδεχόμενη έκρηξη.



Εικόνα 16: Στιγμιότυπο προβολής κάμερας Web από τους κρατήρες του ηφαιστείου της Αίτνας [Πηγή: <https://www.skylinewebcams.com/el/webcam/italia/sicilia/catania/vulcano-etna-sud.html> (Ανάκτηση 19-11-2021)]

#### 2.2.4. Τεχνικές τηλεανίχνευσης

Για την παρακολούθηση των φαινομένων που πραγματοποιούνται τόσο πριν από μία ηφαιστειακή έκρηξη όσο και μετά από αυτή χρησιμοποιούνται τεχνικές μέσω δορυφορικής τηλεανίχνευσης. Τα φαινόμενα που μπορούν να παρατηρηθούν είναι ηφαιστειακοί θύσανοι, θερμικές ανωμαλίες του τόπου, ροές λάβας, αλλαγές στην τοπογραφία και την εδαφική κάλυψη της περιοχής και παραμόρφωση του εδάφους.

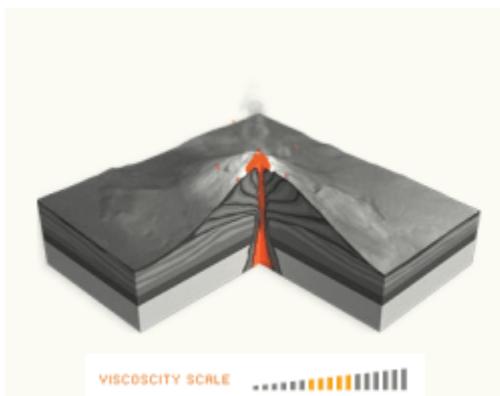
Ηφαιστειακοί θύσανοι: αποτελούν ένα είδος νεφών, τα οποία έχουν λευκή και διάφανη όψη και εκλύονται λόγω ηφαιστειακών διεργασιών. Είναι απαραίτητη η παρατήρησή τους για τη διατήρηση της ασφάλειας της εναέριας κυκλοφορίας, ο έλεγχος της κλιματικής τους επίδρασης αλλά και η παρακολούθηση της εκρηκτικής δραστηριότητας των ηφαιστειών. Οι

πληροφορίες που συλλέγονται αφορούν τη διασπορά, το ύψος και τη θερμοκρασία του θυσάνου αλλά και η συγκέντρωση σε SO<sub>2</sub>. Η τηλεανίχνευσή τους γίνεται μέσω ορισμένων δορυφόρων, όπως ο NOAA (AVHRR), Meteosat (Seviri), Terra/Aqua (MODIS, ASTER), Landsat, SPOT οι οποίοι έχουν απαιτούμενη χωρική διακριτική ικανότητα μεγαλύτερη από 1 km ενώ απαιτούμενη χρονική διακριτική ικανότητα από τον πραγματικό χρόνο έως λίγες ημέρες (ESA).



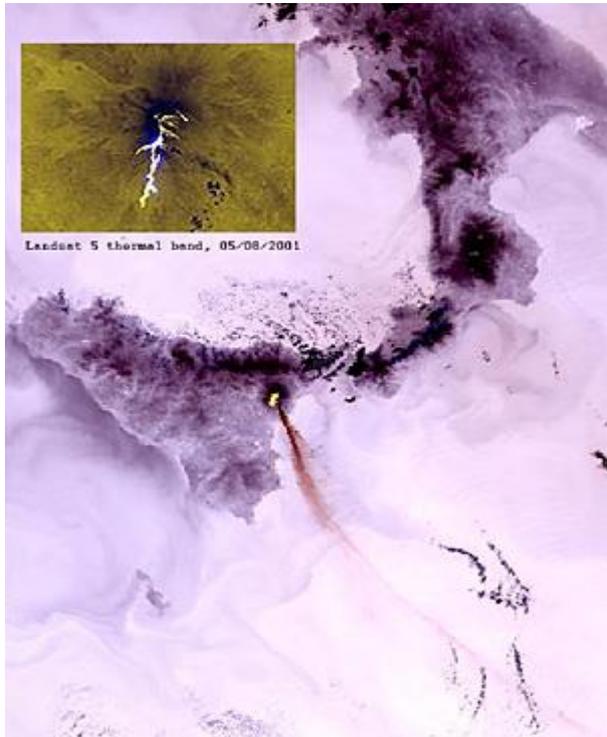
Εικόνα 17: Ηφαιστειακοί θύσανοι [Πηγή: ESA]

Θερμικές ανωμαλίες: Εντοπίζονται καυτά σημεία σε απομακρυσμένα ηφαίστεια, παρακολουθούνται οι θόλοι λάβας και οι ροές λάβας και μελετάται ο χρόνος ψύξης των ροών λάβας σε κάθε περίπτωση ώστε να εντοπιστούν πιθανές ηφαιστειακές εκρήξεις αλλά και να βρεθούν τρόποι μείωσης των επιπτώσεων τους.



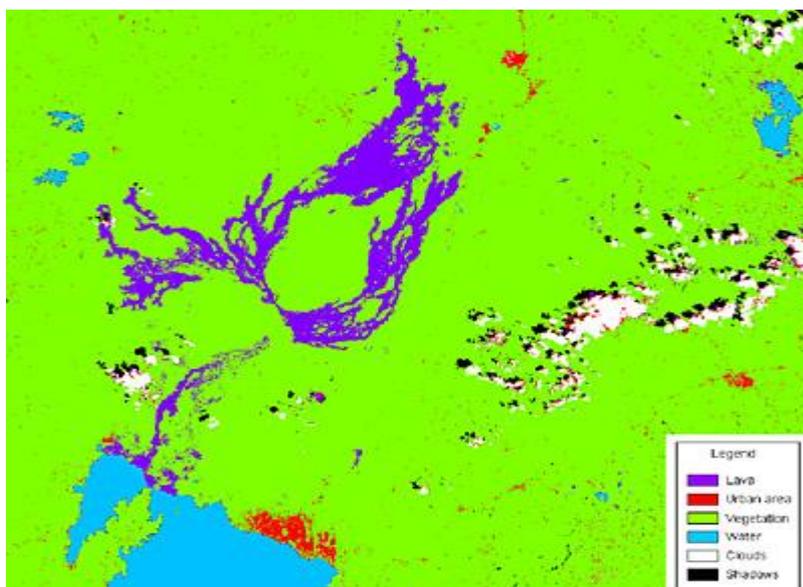
Εικόνα 18: Θόλος λάβας [Πηγή: [http://www.geo.auth.gr/765/2\\_landforms/26\\_lava\\_domes.htm](http://www.geo.auth.gr/765/2_landforms/26_lava_domes.htm) (Ανάκτηση: 20-11-2021)]

Οι δορυφόροι που χρησιμοποιούνται είναι οι Terra/Aqua (MODIS), NOAA (AVHRR), ASTER, Landsat με απαιτούμενη χωρική διακριτική ικανότητα μεγαλύτερη από 1 km ενώ απαιτούμενη χρονική διακριτική ικανότητα από τον πραγματικό χρόνο έως λίγες ημέρες (ESA).



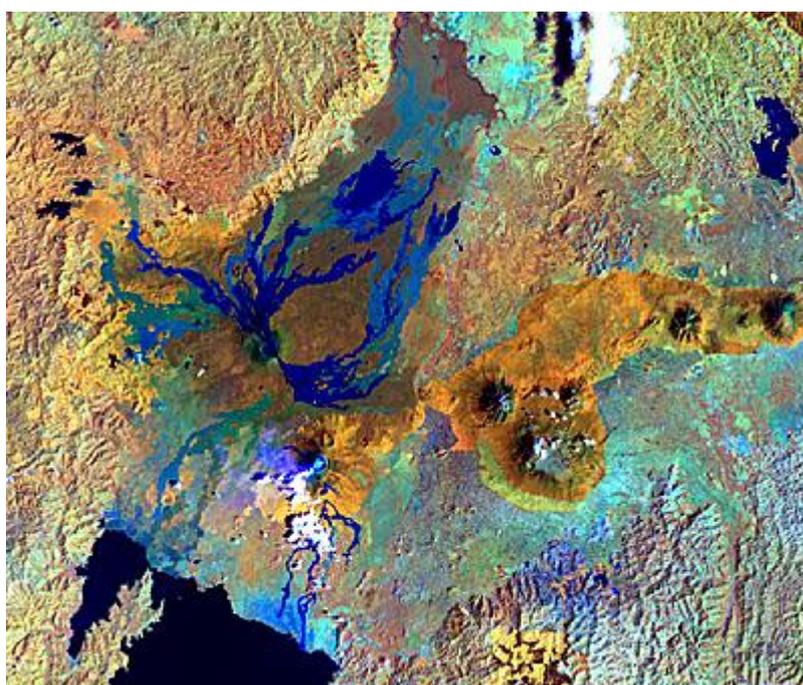
Εικόνα 19: Παρατήρηση θερμικών ανωμαλιών [Πηγή: ESA]

**Ροές λάβας:** οι πληροφορίες που λαμβάνονται από την παρακολούθηση των ροών λάβας που εξέρχονται ύστερα από μία ηφαιστειακή έκρηξη είναι η ανίχνευση της λάβας και η ταξινόμηση των διαφορετικών ηλικιών της λάβας. Ο λόγος που παρατηρούνται μέσω των δορυφόρων είναι η αξιολόγηση των τύπων εδαφικής κάλυψης που επηρεάζονται από τη λάβα, εάν πληθυσμοί ή υποδομές όπου ρέει η λάβα βρίσκονται σε κίνδυνο καθώς επίσης και για τη μελέτη της ανίχνευσης λάβας και της αλλαγής της με την πάροδο του χρόνου. Οι δορυφόροι για τη συγκεκριμένη παρακολούθηση είναι οπτικά όργανα (Landsat, SPOT, ASTER), εικόνες ραντάρ και συμβατά προϊόντα ραντάρ με απαιτούμενη χωρική διακριτική ικανότητα 5-50 m και απαιτούμενη χρονική διακριτική ικανότητα εβδομάδες έως χρόνια (ESA).



Εικόνα 20: Παρακολούθηση ροών λάβας [Πηγή: ESA]

### Τοπογραφία και εδαφική κάλυψη:

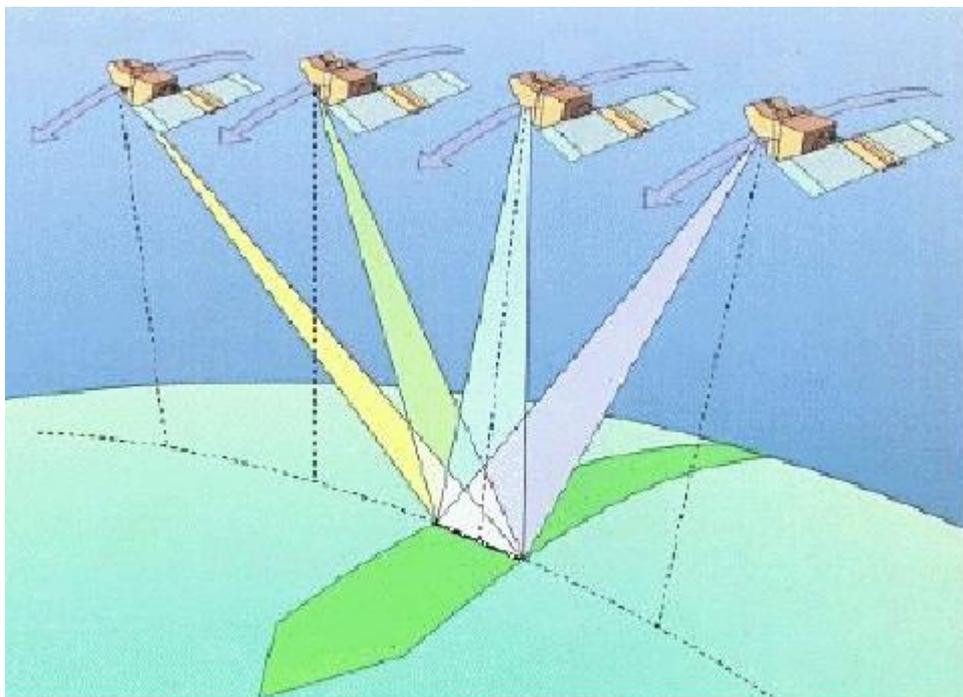


Εικόνα 21: Παρακολούθηση αλλαγών στην τοπογραφία και στην εδαφική κάλυψη [Πηγή: ESA]

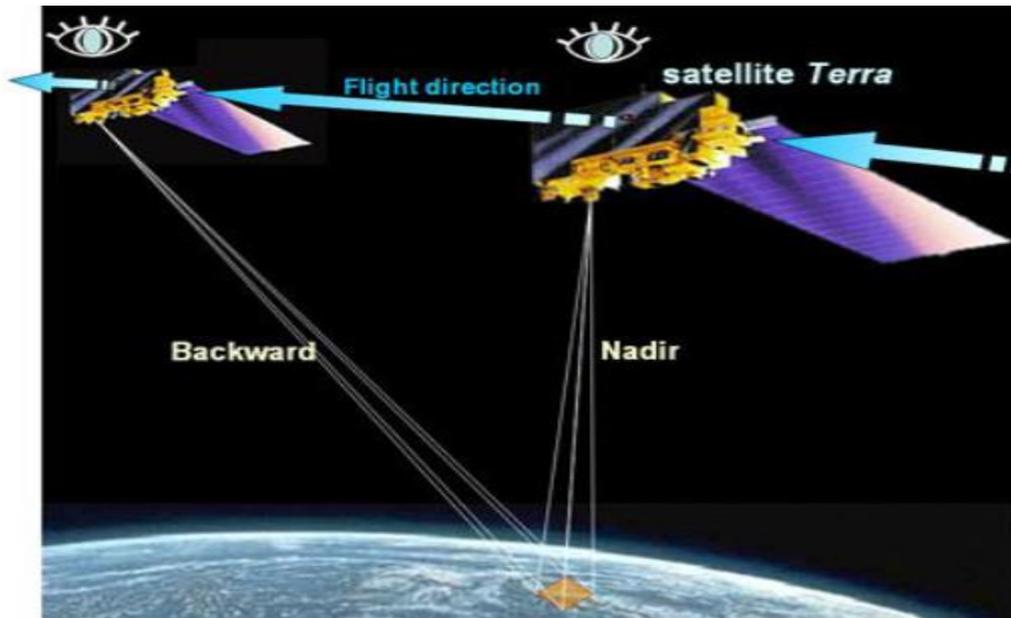
Κατά τη διάρκεια των πρόδρομων φαινομένων των ηφαιστειακών εκρήξεων παρατηρούνται παραμορφώσεις των ηφαιστειακών πλαγιών αλλά και γενικότερες τροποποιήσεις της επιφάνειας της γης από τη λάβα και τις πυροκλαστικές εναποθέσεις. Γι' αυτό κρίνεται αναγκαία η 3D χαρτογράφηση των αλλαγών που προκλήθηκαν για την αξιολόγηση των κινδύνων και για την παρακολούθηση της αποκατάστασης μιας περιοχής. Επιπλέον σημαντική πληροφορία για περιβαλλοντικούς σκοπούς είναι η παρατήρηση της βλάστησης και οι διαδοχές της ύστερα από μια ηφαιστειακή έκρηξη. Μέσω της παρακολούθησης των αλλαγών

στην τοπογραφία και την εδαφική κάλυψη των περιοχών δημιουργούνται DEM υψηλής ανάλυσης (ESA). Τα DEM (Digital Elevation Models) αναπαριστούν την επιφάνεια του γήινου ανάγλυφου και επομένως παρέχουν τις υψομετρικές πληροφορίες οι οποίες καθίστανται απαραίτητες για τη διαδικασία ανάλυσης και επεξεργασίας των πληροφοριών. Επιπλέον με την επεξεργασία του DEM απορρέουν πληροφορίες για τον διαχωρισμό του υδρογραφικού δικτύου από τη λεκάνη απορροής (FlowDirection) και τις κλίσεις (slope) της περιοχής με αποτέλεσμα η κατανόηση του ανάγλυφου να γίνεται ακόμα καλύτερη. Η δημιουργία των DEMs από τηλεπισκοπικά δεδομένα πραγματοποιείται με δύο κύριες μεθόδους, η πρώτη σχετίζεται με τεχνικές που χρησιμοποιούν αεροφωτογραφίες (φωτογραμμετρίας), δορυφορικές εικόνες στο ορατό και κοντινό υπέρυθρο ή τα δεδομένα από ραντάρ και η δεύτερη με την τεχνική της συμβολομετρίας ραντάρ.

Για τη συλλογή των απαιτούμενων δεδομένων χρησιμοποιούνται οπτικοί δορυφόροι Stereo υψηλής ανάλυσης οι οποίοι παρακολουθούν τους πίδακες φορτισμένων σωματιδίων που εκτινάσσονται και έχουν απαιτούμενη χωρική διακριτική ικανότητα 1 m ενώ χρονική ώρες έως χρόνια. Η τεχνική μέσω της στερεοσκοπικής παρατήρησης περιλαμβάνει την εξαγωγή της πληροφορίας του ανάγλυφου από τις στερεοσκοπικά επικαλυπτόμενες εικόνες, συνήθως αεροφωτογραφίες, εικόνες SPOT ή ASTER, ή/και ραντάρ.



Εικόνα 22: Γεωμετρία λήψης στερεοσκοπικών εικόνων από τον δορυφόρο SPOT που παρέχει ένα σύντομο χρονικό διάστημα επανάληψης λήψης 1 έως 3 ημερών [Πηγή: Παρχαρίδης, 2015].



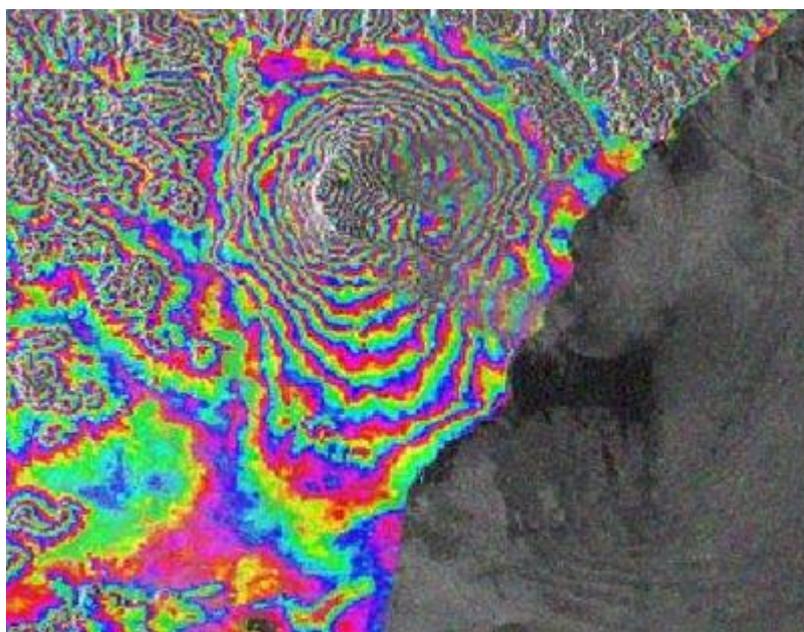
Εικόνα 23: Γεωμετρία λήψης στερεο-ζεύγους από τον δορυφόρο Terra και το όργανο καταγραφής ASTER [Πηγή: Παρχαρίδης, 2015]

Επιπλέον χρησιμοποιούνται εναέριες εικόνες και η τεχνολογία LIDAR. Η τεχνολογία LIDAR (Light Detection and Ranging), στοχεύει στον υπολογισμό των αποστάσεων και στην αποτύπωση του περιβάλλοντος χώρου μέσω της εκπομπής παλμικής ακτινοβολίας λέιζερ. Μέσω του γυροσκοπίου, το οποίο αποτελεί ταυτόχρονα πομπό και δέκτη, εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα χιλιάδες παλμοί λέιζερ ανά δευτερόλεπτο. Κάθε παλμός ανακλάται σε αντικείμενο, επιστρέφει στο γυροσκόπιο και καταγράφεται. Ο χρόνος της διαδρομής του κάθε παλμού υπολογίζεται με ρολόι ακριβείας και μετατρέπεται σε απόσταση.



Εικόνα 24: Εξοπλισμός τεχνολογίας LIDAR [Πηγή: <https://www.geoerga.gr/el/service/s02-lidar-scanning> (Ανάκτηση 21-11-2021)]

Παραμόρφωση εδάφους: Όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι αναγκαία η παρακολούθηση του χρονικού διαστήματος των πρόδρομων φαινομένων μιας ηφαιστειακής έκρηξης. Θα πραγματοποιηθεί ανίχνευση φουσκώματος και ξεφουσκώματος των πλαγιών του ηφαιστείου, ανίχνευση ανήσυχης κατάστασης, παρακολούθηση των σχισμών και των αναχωμάτων, παρακολούθηση ενεργών σφαλμάτων, παρακολούθηση καθίζησης ρών λάβας και επιτήρηση ασταθών περιοχών. Οι δορυφόροι έχουν απαιτούμενη χωρική διακριτική ικανότητα 1-50 m, απαιτούμενη χρονική διακριτική ικανότητα από τον πραγματικό χρόνο έως λίγους μήνες και αποτελούν ζεύγη συμβολομετρικών εικόνων δορυφόρων ραντάρ (Envisat, ERS, ALOS, TerraSAR-X, JERS) (ESA).



Εικόνα 25: Παρακολούθηση παραμόρφωσης του εδάφους [Πηγή: ESA]

### **2.2.5. Χρήση θερμικής ακτινοβολίας**

Τα περισσότερα ηφαίστεια παγκοσμίως είναι απρόσιτα επομένως για την πλήρη κατανόηση της ηφαιστειακής δραστηριότητάς τους είναι απαραίτητη η χρήση των εφαρμογών της τηλεπισκόπησης, οι οποίες χρησιμοποιούν θερμική και μεση-υπέρυθρη ακτινοβολία, με πιο συχνή τη χρήση των δορυφόρων AVHRR και MODIS.

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα τα τελευταία 300 χρόνια έχει σκοτώσει πάνω από 250.000 ανθρώπους, καταστρέφοντας ολόκληρες πόλεις και δάση και διαταράσσοντας έντονα τις τοπικές οικονομίες, ενώ σε πολλές περιπτώσεις κάτοικοι περιοχών κοντά σε ενεργά ηφαίστεια έχουν αναγκαστεί να εγκαταλείψουν τη γη και τις οικίες τους, μερικές φορές για πάντα. Γι' αυτό από τα μέσα της δεκαετίας του 1990

αναπτύχθηκε μια διαδικασία όπου σκοπός της ήταν να αντιμετωπιστεί το γεγονός ότι η παρακολούθηση της δυναμικής φύσης των ηφαιστειακών εκρήξεων επωφελείται από την τακτική συλλογή των θερμικών δεδομένων σε υψηλή συχνότητα. Ως αποτέλεσμα, οι επιστήμονες άρχισαν να βρίσκουν λύσεις χρησιμοποιώντας δεδομένα χαμηλής χωρικής ανάλυσης από μετεωρολογικούς δορυφόρους, οι οποίοι συλλέγουν δεδομένα είτε σε ωριαία είτε σε καθημερινή βάση.

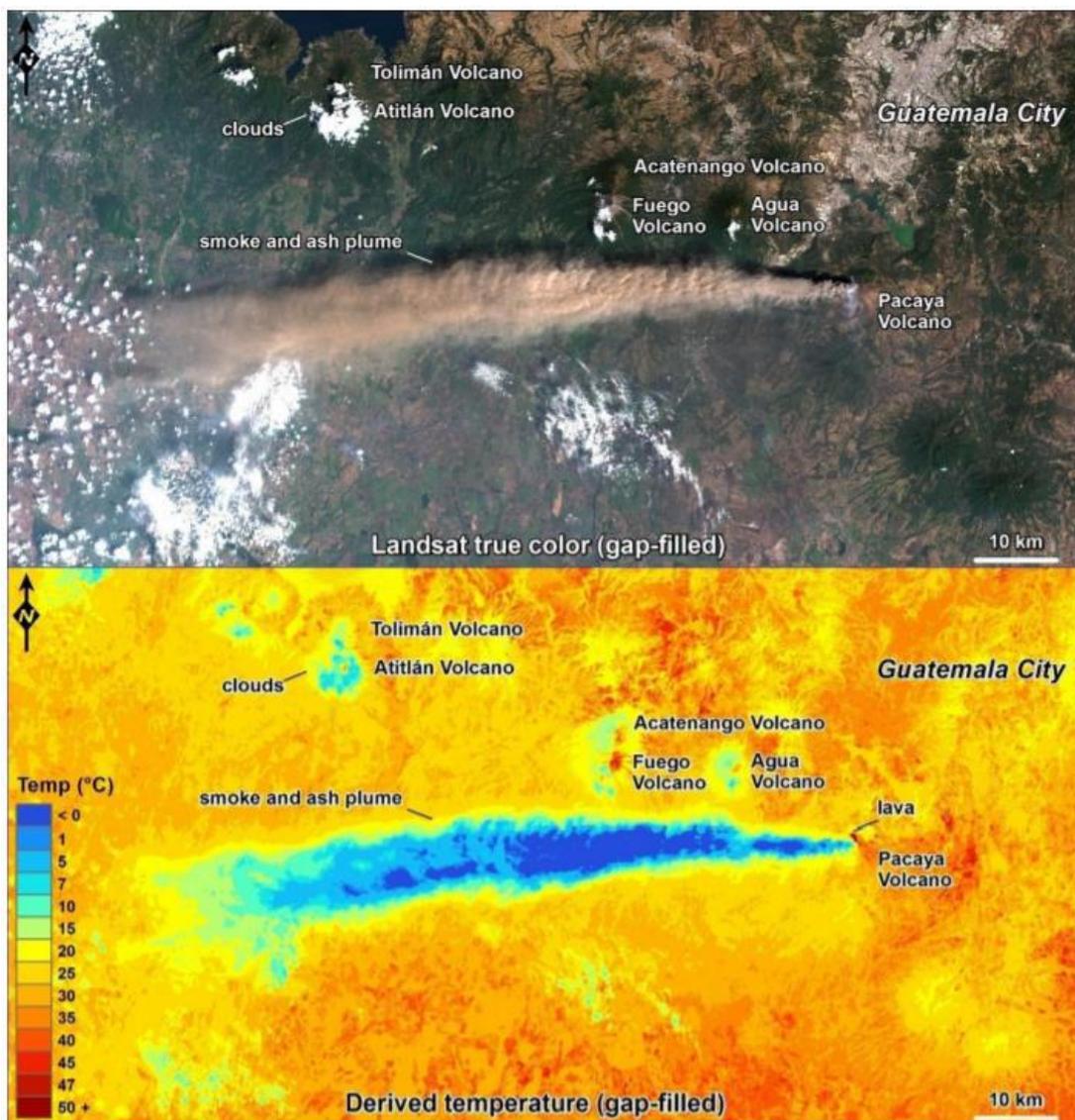
Χρησιμοποιώντας τους αισθητήρες AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) και ATSR (Along-Track Scanning Radiometer), οι επιστήμονες έδειξαν ότι με την προσαρμογή των τεχνικών που αναπτύχθηκαν με τη χρήση των δεδομένων Landsat TM, αυτοί οι χαμηλής χωρικής ανάλυσης αισθητήρες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για συγκεντρώσουν και να καταγράψουν όλες τις χρονολογίες εκρήξεων και να εκτελέσουν αναδρομικές αναλύσεις ολόκληρων εκρηκτικών επεισοδίων (Higgins et al., 1997, Wooster & Rothery, 1997). Παράλληλα με το έργο αυτό, κατά τη δεκαετία του 1990 έγιναν προσπάθειες για τη χρήση θερμικών δορυφορικών δεδομένων ώστε να συμβάλουν στην παρακολούθηση των ηφαιστειών σε πραγματικό χρόνο. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη αλγόριθμων για την αυτόματη ανίχνευση και την έγκαιρη ειδοποίηση σε περίπτωση έντονης ηφαιστειακής δραστηριότητας ή σε αλλαγές των εκάστοτε δραστηριοτήτων ενός ηφαιστείου. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην αυξανόμενη χρήση των δεδομένων AVHRR σε ένα επιχειρησιακό περιβάλλον ως μέρος των προσπαθειών για την παρακολούθηση του ηφαιστείου στο Πανεπιστήμιο Fairbanks της Αλάσκας (Dean et al., 2000).

Δεν υπάρχει μέχρι στιγμής κάποιος δορυφόρος ή επίγειος αισθητήρας ο οποίος να έχει σχεδιαστεί αποκλειστικά για ηφαιστειακές εφαρμογές. Ωστόσο υπάρχουν πολλοί θερμικοί αισθητήρες σχεδιασμένοι για στρατιωτικές, αστικές και βιομηχανικές εφαρμογές, οι οποίοι μπορούν να προσαρμοστούν και για ηφαιστειακές εφαρμογές. Έτσι, οι ηφαιστειολόγοι έπρεπε να χρησιμοποιήσουν αισθητήρες και δεδομένα που δεν προορίζονταν γι' αυτόν τον σκοπό. Για παράδειγμα, τα δεδομένα από μετεωρολογικούς δορυφόρους παρέχουν δεδομένα σε μήκη κύματος που είναι κατάλληλα για την εξέταση ηφαιστειακών hot-spots, επειδή όμως οι μετεωρολόγοι ενδιαφέρονται συνήθως για χαμηλές θερμοκρασίες που σχετίζονται με τις κορυφές σύννεφων και θερμοκρασίες περιβάλλοντος που συνδέονται με την επιφάνεια του εδάφους, το ανώτερο όριο αυτών των αισθητήρων (σε όρους μέτρησης θερμοκρασίας) είναι συχνά χαμηλό, πράγμα που σημαίνει ότι ακόμη και από ένα αρκετά μικρό ηφαιστειογενές hot-spot η μέτρηση της θερμοκρασίας δεν είναι σωστή (Harris, 2013).

Η έναρξη της νέας χιλιετίας έφερε ένα μεγάλο βήμα προς το εύρος των διαθέσιμων πόρων για την ανάλυση των θερμικών φασματικών ταυτοτήτων των ηφαιστειών, με την εκτόξευση ορισμένων δορυφόρων της NASA όπως είναι ο δορυφόρος Terra, ο Landsat7, ο Aqua και ο EO-1. Όλοι αυτοί οι δορυφόροι μεταφέρουν αισθητήρες που επιτρέπουν τη θερμική καταγραφή των ενεργών ηφαιστειών που επρόκειτο να μελετηθούν από το διάστημα. Ως αποτέλεσμα, καθιερώθηκε το πρώτο παγκόσμιο σύστημα δορυφορικής παρακολούθησης ηφαιστειών, με το οποίο παρακολουθούνται όλα τα ενεργά και δυνητικά ενεργά ηφαιστεια της Γης σε καθημερινή βάση (Μιχαήλ, 2017).

Σήμερα, τα θερμικά δεδομένα από δορυφορικούς αισθητήρες γίνονται όλο και πιο φθηνά και σε πολλές περιπτώσεις διατίθενται ελεύθερα. Για παράδειγμα, τα δεδομένα MODIS είναι διαθέσιμα σε διάφορες μορφές 24 βαθμονομήσεων και γεωμετρικών διορθώσεων χωρίς κόστος από τη NASA μέσα σε λίγες ώρες από τη λήψη των δεδομένων, επίσης τα δεδομένα από δορυφόρους της σειράς Landsat είναι διαθέσιμα δωρεάν.

Γενικότερα, παρά τη μη ύπαρξη κάποιου αισθητήρα σε τροχιά αποκλειστικά για την παρακολούθηση ηφαιστειών, η θερμική τηλεπισκόπηση έχει προσφέρει μοναδικά και διαφωτιστικά στιγμιότυπα της συμπεριφοράς των ηφαιστειών καθώς αυτά μπορεί να εποπτεύονται, αποκαλύπτοντας τις τάσεις της δραστηριότητάς τους που βοηθούν στη δυνατότητα πρόβλεψης και επιτρέπουν την εξ αποστάσεως αξιολόγηση της επικινδυνότητας (Blackett 2014).



Εικόνα 26: Εικόνες του δορυφόρου Landsat-7 πάνω από το ηφαιστειο Pacaya στη Γουατεμάλα λίγο πριν την έκρηξη στις 2 Μαρτίου 2014 [Πηγή: NASA].

### 2.3. Ετοιμότητα

Η καλύτερη προειδοποίηση των ηφαιστειακών εκρήξεων προσδιορίζει πού και πότε μια πιθανή έκρηξη θα πραγματοποιηθεί, καθώς και το είδος και το μέγεθος μιας έκρηξης που αναμένεται, αλλά τέτοιου είδους ακριβείς προβλέψεις δεν είναι πάντα εφικτές. Οι πιο ακριβείς προβλέψεις είναι αυτές που οι επιστήμονες προβλέπουν μια έκρηξη ώρες ή μέρες πριν, σύμφωνα με σημαντικές αλλαγές στην ηφαιστειακή δραστηριότητα, στη διαμόρφωση του εδάφους και στην εκπομπή αερίων. Η ενασχόληση με τις προηγούμενες εκρήξεις έχει δείξει ότι τέτοιου είδους αλλαγές προηγούνται συνήθως κάποιες μέρες ή ώρες πριν την έκρηξη.

Υπάρχει ένας κωδικός χρωμάτων ο οποίος κατηγοριοποιεί τα στάδια της ηφαιστειακής δραστηριότητας αλλά και το βαθμό επικινδυνότητάς του με βάση τις φάσεις. Το πράσινο χρώμα αντιστοιχεί στην ήρεμη φάση του ηφαιστείου, με κανονική σεισμικότητα και διαφυγή αερίων. Με το κίτρινο χρώμα σηματοδοτούνται τα ηφαίστεια που βρίσκονται σε διέγερση και η σεισμικότητά τους αυξάνεται. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι πιθανή η ηφαιστειακή δραστηριότητα στις επόμενες εβδομάδες είτε με είτε χωρίς προειδοποίηση καθώς και η διαφυγή ηφαιστειακών αερίων και ατμών. Αντίστοιχα το πορτοκαλί χρώμα φανερώνει μικρή φρεατική έκρηξη, διαφυγή αερίων μικρότερη από 7.620 m από το επίπεδο της θάλασσας ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται και ο αριθμός των τοπικών σεισμών. Τέλος με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι περιπτώσεις όπου μεγάλη φρεατική έκρηξη βρίσκεται σε εξέλιξη, η διαφυγή των αερίων είναι μεγαλύτερη από 7.620 m από το επίπεδο της θάλασσας και σεισμοί μεγάλης έντασης πραγματοποιούνται ακόμα και σε απομακρυσμένες περιοχές από το ηφαίστειο (Λέκκας και Ανδρεαδάκης, 2015).

## **2.4. Προβλήματα πρόγνωσης**

Οι ηφαιστειολόγοι έχουν καταφέρει να προβλέπουν την πιθανότητα μιας ηφαιστειακής έκρηξης, υπάρχουν όμως κάποια προβλήματα με σημαντικότερα τα ακόλουθα:

- Αδυναμία προσδιορισμού με ακρίβεια του χρόνου και της σχετικής σφοδρότητας της έκρηξης
- Πιθανή λανθασμένη ένδειξη ηφαιστειακής δραστηριότητας καθώς ορισμένες φορές το μάγμα που ανέρχεται από τον μαγματικό θάλαμο προς την επιφάνεια της γης προκαλεί μεταβολές που εμπίπτουν στα πρόδρομα φαινόμενα μιας ηφαιστειακής έκρηξης αλλά τελικά το μάγμα μπορεί να ψυχθεί στο εσωτερικό της γης κάτω από το ηφαίστειο και να μην προκληθεί βίαιη έκρηξη.
- Το γεγονός ότι αρκετά ηφαίστεια δραστηριοποιούνται μια φορά κάθε μερικές χιλιάδες χρόνια ενώ ταυτόχρονα το κόστος για την παρακολούθησή τους είναι αρκετά υψηλό έχει ως λογικό επακόλουθο να μην παρακολουθούνται όλες οι ηφαιστειακές περιοχές αλλά να γίνεται επιλογή των πιο σημαντικών με βάση την ενεργότητά τους.

## 2.5. Μετρίασμός κινδύνου

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις προκαλούν αρκετές αρνητικές επιπτώσεις καθώς μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στην υγεία, να προκαλέσουν θανάτους, να καταστρέψουν περιουσίες ακόμα και σε μεγάλες από αυτά αποστάσεις αλλά και να επηρεάσουν το παγκόσμιο κλίμα. Για την αντιμετώπιση των κινδύνων που μπορούν να προκληθούν υπάρχουν τέσσερις τρόποι. Αρχικά γίνεται προσπάθεια αποφυγής της καταστροφής, αν και αποτελεί σχεδόν απίθανο σενάριο, προσπάθεια αλλαγής της πορείας της καταστροφής και περιορισμός των αρνητικών επιπτώσεων και στη συνέχεια δράσεις που αποσκοπούν στην προστασία των περιοχών από τη μελλοντική εξέλιξη της καταστροφής. Σημαντικές είναι και οι ενέργειες που σχετίζονται με την πρόληψη, όπως είναι οι ενέργειες δημιουργίας σχεδίων αντίδρασης στην καταστροφή για κάθε περιοχή ξεχωριστά πριν την εκδήλωση της καταστροφής.

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις αποτελούν ένα φαινόμενο που δεν μπορεί να περιοριστεί γι' αυτό έχουν ενισχυθεί οι διαδικασίες πρόβλεψης αλλά και πρόληψής τους. Αρκετά σημαντική είναι η ενίσχυση των κατασκευών στις περιοχές όπου η επικινδυνότητα λόγω ηφαιστειακής έκρηξης είναι αυξημένη, γεγονός που πραγματοποιείται με την ενίσχυση των οροφών των κτιρίων ώστε να αντέχουν σε μεγάλο βάρος ηφαιστειακής στάχτης καθώς και την κατασκευή έργων προστασίας όπως τοιχία με σκοπό την αλλαγή της πορείας των ροών λάβας και την απομάκρυνσή της από κατοικημένες περιοχές. Τέτοιες ενέργειες έχουν κατά καιρούς γίνει με επιτυχία αλλά έχουν περιορισμένα αποτελέσματα σε μεγάλης κλίμακας εκρήξεις. Η συγκεκριμένη διαδικασία είναι πιο αποτελεσματική στις περιοχές που πρόκειται να χτιστούν. Σε αυτές τις περιπτώσεις πραγματοποιείται μελέτη εκτίμησης του κινδύνου ώστε αν κριθεί αναγκαίο να βρεθεί μια πιο ασφαλής τοποθεσία με αποτέλεσμα τη μετρίαση του κινδύνου σε εκείνη την περιοχή.

Επιπλέον σημαντικό ρόλο κατέχει και η εκπαίδευση των πολιτών που ζουν στις συγκεκριμένες περιοχές, η οποία πρέπει να είναι συνεχής και φυσικά πολύ πριν την εμφάνιση των σημάτων προειδοποίησης. Ταυτόχρονα αναγκαία θεωρείται και η ύπαρξη σχεδίου εκκένωσης, για το οποίο θα πρέπει να είναι έγκαιρα ενημερωμένοι οι κάτοικοι αλλά και η ύπαρξη σωστής και άμεσης επικοινωνίας μεταξύ επιστημόνων, πολιτών, φορέων και ΜΜΕ.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα που φανερώνει τη σημασία της οργάνωσης και του συντονισμού αποτελεί μια ηφαιστειακή τραγωδία που πραγματοποιήθηκε το 1985 στην πόλη Armero από την έκρηξη του Nevado del Ruiz προκαλώντας το θάνατο 22.000 ανθρώπων.

Παρόλο που υπήρχαν συστήματα παρακολούθησης του ηφαιστείου τα οποία λειτούργησαν και οι επιστήμονες είχαν προειδοποιήσει ότι ήταν πιθανό να λάβει χώρα μια μεγάλη έκρηξη και είχε σχεδιαστεί ένας χάρτης τρωτότητας της περιοχής, όπου η πόλη Armero είχε συμπεριληφθεί στις περιοχές υψηλής τρωτότητας οι επιπτώσεις ήταν καταστροφικές. Προκλήθηκε μια ηφαιστειακή λασποροή (lahar) που κινήθηκε ταχύτατα κατά μήκος του ποταμού Lagunillas προκαλώντας το θάνατο του 90% των κατοίκων της πόλης Armero. Αιτία αυτού αποτέλεσε η αστοχία στις επικοινωνίες.

Αντίθετα παράδειγμα καλού συντονισμού και αποφυγής απώλειας ζωών αποτελεί η περίπτωση της έκρηξης του ηφαιστείου Vathajoekull στην Ισλανδία που πραγματοποιήθηκε στις 29 Σεπτεμβρίου του 1996. Το ηφαίστειο βρισκόταν κάτω από κάλυμμα πάγου και η έκρηξη προκάλεσε την τήξη περίπου 3 km<sup>3</sup> πάγου. Οι εγκαταστάσεις παρακολούθησης του ηφαιστείου προέβλεψαν το περιστατικό και λόγω εμπειρίας από το παρελθόν οι επιστήμονες προέβλεψαν ότι θα προκαλούταν μια μεγάλη πλημμύρα στον ποταμό Skeidog από την πολύ μεγάλη ποσότητα νερού που θα αποδεσμευόταν. Η πλημμύρα πραγματοποιήθηκε στις 5 Νοεμβρίου του 1996 και ο μικρός αυτός ποταμός έγινε ο δεύτερος σε παροχή μεγαλύτερος ποταμός της γης. Αν και οι υλικές ζημιές σε γέφυρες, δρόμους, κτιριακές εγκαταστάσεις και ήταν τεράστιες φθάνοντας σε κόστος τα 15.000.000 δολάρια, λόγω του καλού συντονισμού και της έγκαιρης προειδοποίησης δεν χάθηκαν ανθρώπινες ζωές.

Άλλη μια περίπτωση επιτυχημένης παρακολούθησης αποτελεί το ηφαίστειο της Αγίας Ελένης το 1980. Οι ηφαιστειολόγοι ενέτειναν την προσοχή τους λόγω ενός μικρού σεισμού που πραγματοποιήθηκε στις 20 Μαρτίου. Με την πάροδο του χρόνου η σεισμική δραστηριότητα, οι αυξημένες εκπομπές ηφαιστειακών αερίων και η εδαφική παραμόρφωση συνοδεύτηκαν από μικρές εκρήξεις με έκλυση στάχτης και ατμών οπότε τα συστήματα παρακολούθησης εντατικοποιήθηκαν και προσδιορίστηκαν ζώνες τρωτότητας γύρω από το ηφαιστειακό βουνό. Μερικές εξ αυτών εγκαταλείφθηκαν εντελώς ενώ μερικές περιορισμένες σε έκταση περιοχές θεωρήθηκαν ασφαλείς και δεν εκκενώθηκαν. Συνολικά η καταστροφή που προκλήθηκε ανέρχεται στα 1,8 δις δολάρια αλλά οι θανόντες ανήλθαν μόνο στους 68. Χωρίς την αποτελεσματική παρακολούθηση του ηφαιστείου και του χάρτες τρωτότητας θα ήταν σίγουρα μεγαλύτερος ο αριθμός των ανθρώπινων ζωών που θα χάνονταν (Καρύμπαλης, 2008).



Εικόνα 27: Ηφαιστειακή στάχτη από την έκρηξη του ηφαιστείου της Αγίας Ελένης το 1980 [Πηγή: USGS]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Το ηφαίστειο της Σαντορίνης

### 3.1. Γεωδυναμικό πλαίσιο

Η Σαντορίνη ή Θήρα είναι ένα νησί που βρίσκεται στο Νότιο Αιγαίο Πέλαγος και ανήκει στο νησιωτικό σύμπλεγμα των Κυκλάδων. Η γεωγραφική της θέση εντοπίζεται μεταξύ των παραλλήλων από 36 19' 56'' έως 36 28' 40'' βόρειου γεωγραφικού πλάτους και μεταξύ των μεσημβρινών από 25 19' 22'' έως 25 29' 13'' ανατολικού γεωγραφικού μήκους.



Εικόνα 28: Θέση της Σαντορίνης σε σχέση με τον ελλαδικό χώρο [Πηγή: <https://www.greeka.com/cyclades/santorini/santorini-map.htm>] (Ανάκτηση 27-11-21)]

Η Σαντορίνη βρίσκεται στο ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου, 140 km βόρεια της Κρήτης και η ηφαιστειακή της δραστηριότητα είναι αποτέλεσμα της καταβύθισης της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική. Η καταβύθιση γίνεται με ταχύτητα 5 cm/έτος προς τα βορειοανατολικά με γωνία 30°-40°, και το όριο μεταξύ των δύο πλακών βρίσκεται στην ελληνική τάφρο νότια της Κρήτης. Στο ηφαιστειακό τόξο του νοτίου Αιγαίου εντάσσονται τα ηφαίστεια των Μεθάνων, της Μήλου, της Σαντορίνης και της Νισύρου όπου δημιουργήθηκαν από τα λιωμένα πετρώματα της Αφρικανικής πλάκας όταν ανέρχονται στην επιφάνεια της γης. Το σύμπλεγμα της Σαντορίνης αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα τεταρτογενή ηφαιστειακά

κέντρα του Νοτίου Αιγαίου και το πιο ενεργό εξ αυτών ενώ πραγματοποιούνται σεισμοί βάθους 150-170 km (Parazachos & Kiratzi 1996).

Η Σαντορίνη αποτελείται από τρία νησιά, τη Θήρα, τη Θηρασιά και το Ασπρονήσι, τα οποία περιβάλλουν την καλδέρα, που σχηματίστηκε κατά τη διάρκεια της Μινωικής έκρηξης, που σημειώθηκε στο νησί κατά την Ύστερη Εποχή του Χαλκού, από την κατάρρευση μίας παλαιότερης καλδέρας. Εσωτερικά αυτής βρίσκονται τα νησιά της Νέας και Παλαιάς Καμμένης, τα οποία σχηματίστηκαν από την ηφαιστειακή δραστηριότητα που επακολούθησε την μινωική έκρηξη. Στο ηφαιστειακό σύμπλεγμα όμως ανήκει και το υποθαλάσσιο ηφαίστειο Κολούμπο. Η καλδέρα έχει διάμετρο 11 km από το βορρά προς το νότο και 7,5 km από ανατολικά προς δυτικά, εκτείνεται στα 83 km<sup>2</sup>, το βάθος της ανέρχεται στα 390 m ενώ τα τείχη της υψώνονται στα 367 m από την επιφάνεια της θάλασσας.



Εικόνα 29: Χάρτης Σαντορίνης [Πηγή: <https://m.naftemporiki.gr/story/1347288> (Ανάκτηση 27-11-2021)]

### 3.2. Γεωλογία – Μορφολογία

Η έκταση της Σαντορίνης είναι 89,07 km<sup>2</sup>, με το νησί της Θήρας να καταλαμβάνει τη μεγαλύτερη έκταση και το Ασπρονήσι τη μικρότερη και το μήκος της ακτογραμμής της είναι 67 km. Το νησιωτικό σύμπλεγμα αποτελείται από ηφαιστειακά πετρώματα που σχηματίστηκαν από εκατοντάδες εκρήξεις κατά τη διάρκεια των τελευταίων 2 εκατομμυρίων ετών. Στην νοτιανατολική πλευρά της Θήρας και στο τοίχος της καλδέρας κοντά στο λιμάνι του Αθηνιού

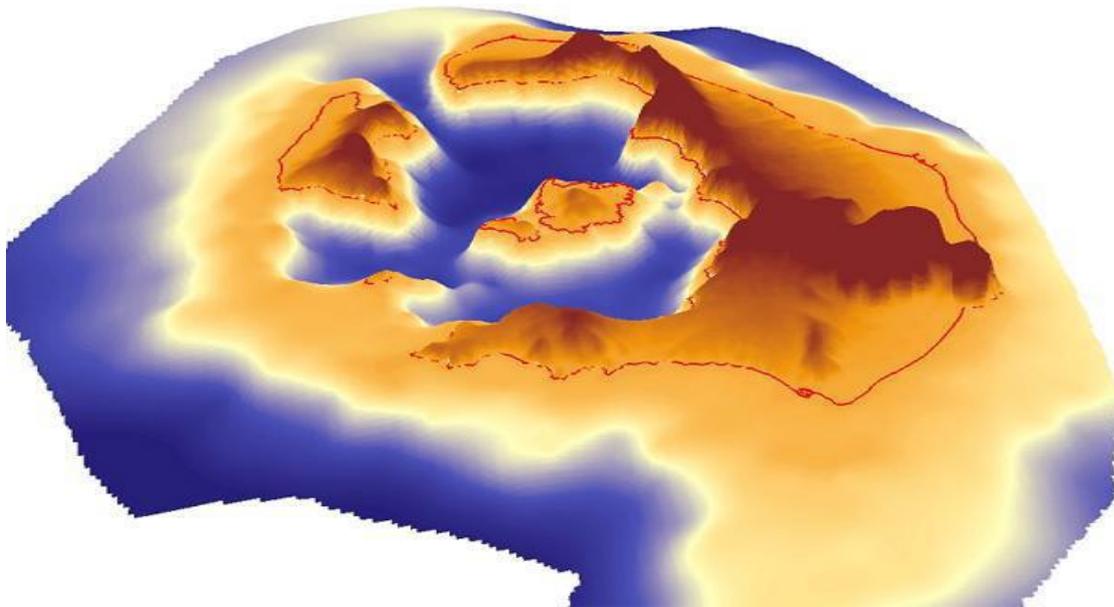
παρατηρούνται κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα που αποτελούνται κυρίως από φυλλίτες και μάρμαρα από τη Μεσοζωική στην νωρίτερη Καινοζωική εποχή.

Η Σαντορίνη ανήκει ως προς την έκταση της στα μικρά νησιά, τα οποία αποτελούν και την πλειονότητα του ελληνικού χώρου. Τα μικρά νησιά αντιμετωπίζουν περιορισμούς ως προς τη γεωμορφολογία τους (έλλειψη χώρων για παραγωγικές δραστηριότητες, προβλήματα χρήσεων γης και ανεπάρκειας ύδρευσης), ως προς τον περιμετρικό χαρακτήρα τους (προβλήματα σε υποδομές και υπηρεσίες) και ως προς το περιβάλλον τους (φυσικό όσο και το ανθρωπογενές).

| Περιοχή        | Έκταση(km <sup>2</sup> ) |
|----------------|--------------------------|
| ΑΣΠΡΟΝΗΣΙ      | 0,12                     |
| ΠΑΛΑΙΑ ΚΑΜΜΕΝΗ | 0,51                     |
| ΝΕΑ ΚΑΜΜΕΝΗ    | 3,33                     |
| ΘΗΡΑΣΙΑ        | 9,19                     |
| ΘΗΡΑ           | 75,92                    |
| Σύνολο         | 89,07                    |

Πίνακας 2: Οι εκτάσεις του νησιωτικού συμπλέγματος της Σαντορίνης ανά νησί [Πηγή: Τσιμπιρή, 2017]

Το σημερινό ανάγλυφο είναι ηφαιστειογενές, αρκετά πεδινό στο μεγαλύτερο μέρος του ενώ από την πλευρά του ηφαιστείου είναι βραχώδες, απόκρημνο και το έδαφος εύφορο. Στο νότιο τμήμα του νησιού βρίσκεται η υψηλότερη κορυφή το Μέσα Βουνό νοτιοδυτικά της περιοχής του Προφήτη Ηλία με ύψος 567 m και το βουνό Γαβρίλος. Στο βόρειο τμήμα του νησιού συναντά κανείς το Μεγάλο Βουνό με ύψος 350 m και τον Μικρό Προφήτη Ηλία βουνό 340 m. Οι ακτές, ιδιαίτερα στην ανατολική πλευρά, είναι εξαιρετικά ομαλές, χωρίς έντονο διαμελισμό, σχηματίζοντας όμορφες παραλίες. Αποτελείται από έξι όρμους: το Αμμούδι, την Αρμένη, το Μουζάκι, τα Φηρά, το Αθηνικό και τον Μπάλο. Γενικά, η Σαντορίνη είναι άνυδρη και ξερή, χωρίς λίμνες, ποταμούς ή χαράδρες. Τα περισσότερα Κυκλαδίτικα νησιά αντλούν κυρίως νερό από τα υπόγεια ύδατα καθώς υπάρχει έλλειψη επιφανειακών υδάτων. Έτσι και στη Σαντορίνη η ύδρευση στηρίζεται κυρίως στα υπόγεια ύδατα και σε γεωτρήσεις, ενώ παλαιότερα στη συλλογή βρόχινου νερού. Επάρκεια υδάτων φαίνεται να υπήρχε στο νησί καθώς ευρήματα από ανασκαφές στην προϊστορική πόλη του Ακρωτηρίου μαρτυρούν ότι πραγματοποιούνταν καλλιέργεια αμπελιού από τον 17<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. και επιπλέον υπήρχαν λουτρά στην περιοχή. Στη νήσο υφίστανται τρεις κύριες πηγές καθώς και τέσσερις ιαματικές πηγές (Τσιμπιρή, 2017).



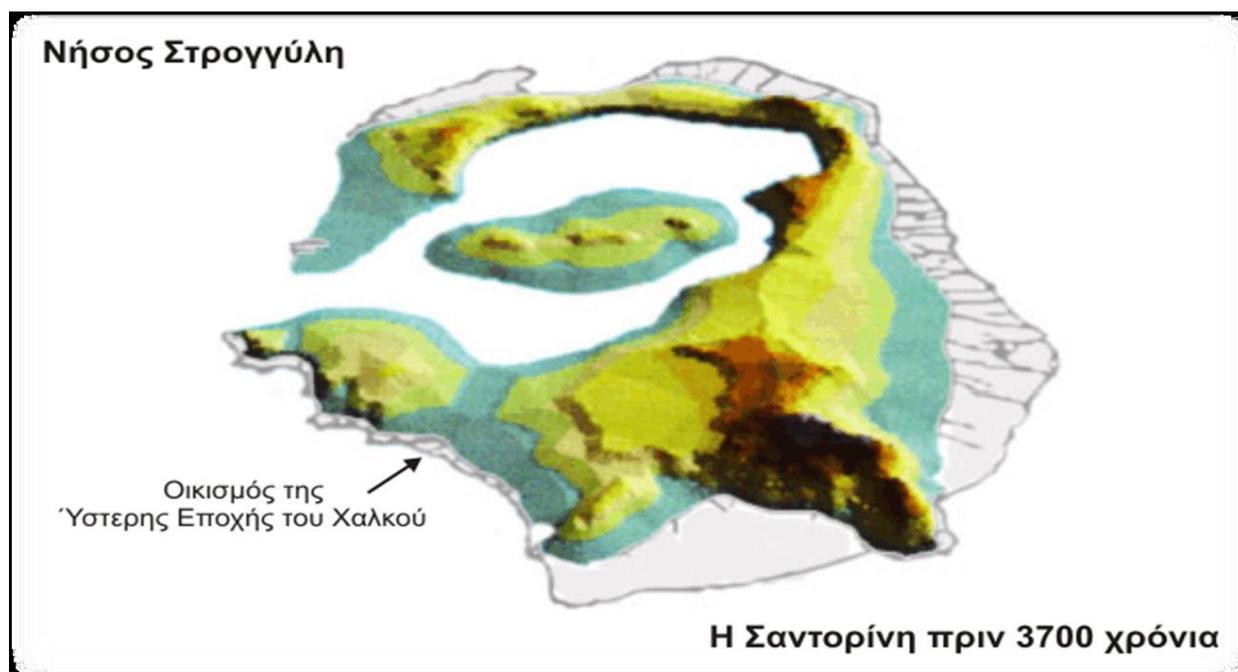
Εικόνα 30: Τρισδιάστατη απεικόνιση της καλδέρας της Σαντορίνης [Πηγή: Μιχαήλ, 2017]

Η καταβύθιση της λιθοσφαιρικής πλάκας της Αφρικής προκάλεσε τον σχηματισμό ενός ενεργού ηφαιστειακού τόξου που εκτείνεται από τον Ισθμό της Κορίνθου έως τη Νίσυρο. Η Σαντορίνη βρίσκεται στη μέση του ηφαιστειακού τόξου όπου δημιουργήθηκε μία ζώνη ρηγμάτων με δύο παράλληλες γραμμές ρηγμάτωσης (BA-NΔ), τη γραμμή Καμμένης και τη γραμμή Κολούμπο. Η ζώνη αυτή ενώνει τα νησάκια Χριστιανά, το νησιωτικό σύμπλεγμα της Σαντορίνης και το υποθαλάσσιο ηφαίστειο του Κολούμπο (Τσιμπίρη, 2017: 18). Η γραμμή της Καμμένης αποτελείται από τα νησιά της Παλαιάς και της Νέας Καμμένης καθώς και από αποθέματα της ακτής του υποθαλάσσιου ηφαιστείου Κολούμπο, βόριο-ανατολικά της Θήρας και σε αυτή εμφανίζεται σήμερα η ηφαιστειακή δράση και η δράση των υδροθερμικών ρευστών. Η γραμμή του Κολούμπο είναι παράλληλη με της Καμμένης, εντάσσεται στο βόρειο μέρος της Θήρας, περνάει από την στάχτη κώνου του Μεγάλου Βουνού και του Κόκκινου Βουνού και από το δακτύλιο ηφαιστειακής πέτρας του ακρωτηρίου Κολούμπο.



### 3.3. Σχηματισμός νησιού

Η Σαντορίνη είναι μια από τις πιο θαυματικές καλδέρες στον κόσμο. Η σημερινή ημικυκλική και περισσότερο πεταλοειδής μορφή της νήσου οφείλεται στις ηφαιστειακές εκρήξεις χιλιάδων ετών που μετέβαλαν το αρχικό κυκλικό σχήμα της (πιθανόν και η ονομασία Στρογγύλη). Ουσιαστικά, η Θήρα (Σαντορίνη) και τα νησάκια Θηρασιά και Ασπρονήσι είναι τα απομεινάρια του ηφαιστειογενούς νησιού Στρογγύλη.

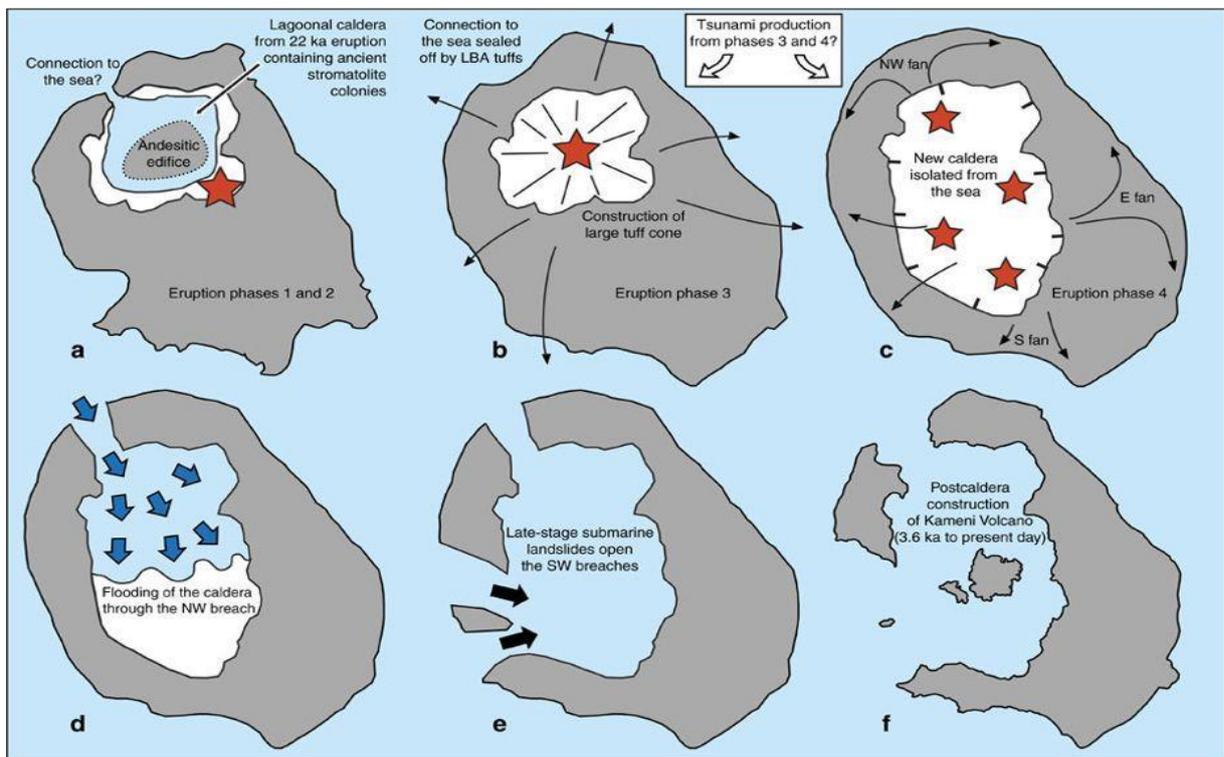


Εικόνα 33: Η νήσος Στρογγύλη [Πηγή: Μιχαήλ, 2017]

Πέντε εκατομμύρια χρόνια πριν, η Σαντορίνη ήταν ένα μικρό νησάκι, με διάμετρο περίπου 6 km, στη θέση της ΝΑ Θήρας. Η πρώτη ηφαιστειακή δραστηριότητα εκδηλώθηκε ΝΔ του νησιού πριν 2,5 εκατομμύρια χρόνια δημιουργώντας ένα μεγάλο ηφαιστειακό οικοδόμημα στην περιοχή που βρίσκονται τη σημερινή εποχή οι νησίδες των Χριστιανών. Στη στενή περιοχή του νησιώτικου συμπλέγματος της Σαντορίνης, το μάγμα αναβλύζει για πρώτη φορά από τα έγκατα της γης πριν περίπου 1 εκατομμύριο χρόνια. Τα παλαιότερα ηφαιστειακά κέντρα εντοπίζονται στη νοτιοδυτική Θήρα, στην περιοχή του Ακρωτηρίου με τα πρώτα ηφαιστειακά αναβλήματα να αποτίθενται στη θάλασσα σε βάθος 200–300 m. Με τη συσσώρευση των ηφαιστειών και τη θερμική αναθόλωση της περιοχής, φτάνουν τα ηφαιστειακά κέντρα να χερσεύουν και να σχηματίζουν τους σημερινούς λόφους του Ακρωτηρίου, από το Φάρο ως τον Αρχάγγελο. Στη συνέχεια, πριν 500.000 χρόνια περίπου, δημιουργήθηκε στα βόρεια του νησιού το ηφαίστειο της Περιστερίας, το οποίο παρήγαγε ανδεσιτικές λάβες. Το ύψος του δεν ξεπερνούσε τα 400 m και η κορυφή του βρισκόταν λίγες εκατοντάδες μέτρα δυτικότερα από τη

σημερινή κορυφή του Μικρού Προφήτη. Σήμερα υπολείμματα του ηφαιστείου αυτού βρίσκονται στο Μικρό Προφήτη Ηλία και το Μεγάλο Βουνό. Συγχρόνως μικρότερα ηφαίστεια ήταν ενεργά προς τα νότια, στον Μπάλο, τη Κόκκινη Παραλία και τη Κοκκινόπετρα (Μιχαήλ, 2017).

Πριν 200.000 χρόνια, δημιουργείται το ασπιδωτό ηφαίστριο της Θήρας, περίπου στο κέντρο της σημερινής καλδέρας, που ενώνει μέσω εκχύσεων λάβας όλα τα επιμέρους νησιά. Αυτή η φάση τελειώνει με μια σειρά ισχυρών εκρήξεων που δημιουργεί την πρώτη καλδέρα. Περίπου κάθε 20.000 χρόνια εκδηλώνεται μια τεράστια έκρηξη που τινάζει δειλά στρώματα τέφρας που καλύπτουν όλη την περιοχή και οικοδομούν μεγάλο μέρος της. Ο κυριότερος όγκος στάχτης καταλήγει στη βαθιά θάλασσα, ενώ η λεπτότερη τινάζεται δεκάδες χιλιόμετρα ψηλά. Καθώς δεκάδες κυβικά χιλιόμετρα λιωμένο πέτρωμα έχουν τιναχθεί στον αέρα, αδειάζει η περιοχή στην οποία ήταν αποθηκευμένο το μάγμα και τα πετρώματα που βρίσκονται πάνω από αυτήν, κατακρημνίζονται σε βάθη αρκετών χιλιομέτρων, δημιουργώντας μια τεράστια χοάνη που αμέσως κατακλύζεται από τη θάλασσα. Μέσα στην κοιλότητα αυτή, συνεχίζει μετά την έκρηξη να αναβλύζει το μάγμα και σταδιακά την γεμίζει και αρχίζει να οικοδομεί ένα χερσαίο όρος, ένα νέο ηφαιστειακό οικοδόμημα.



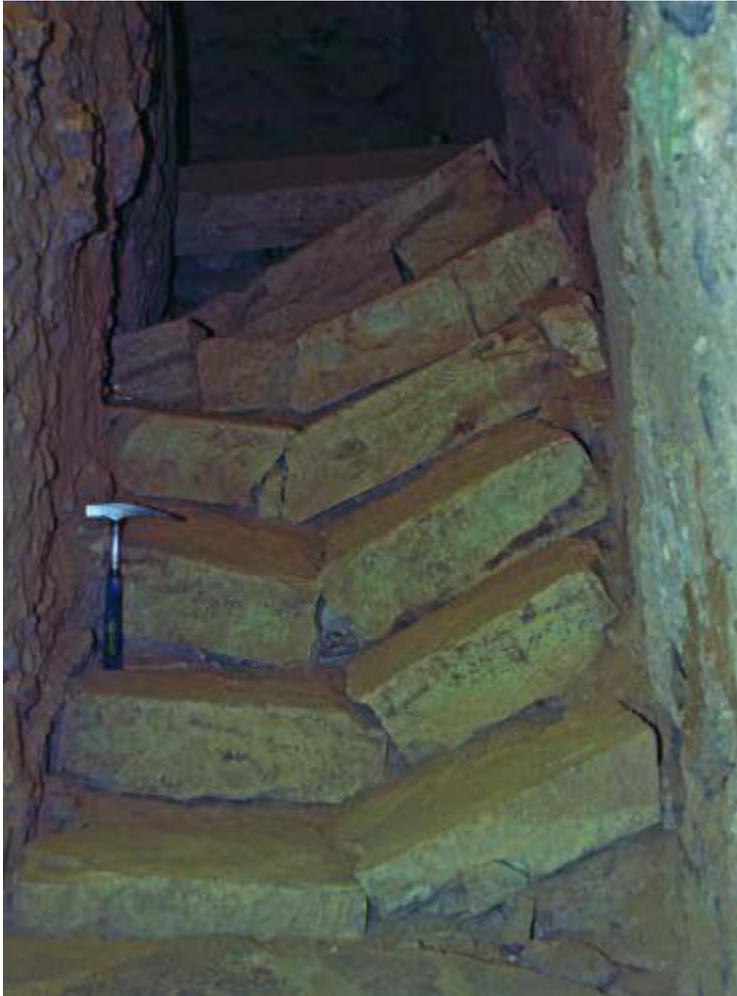
Εικόνα 34: Η εξέλιξη του σχηματισμού της καλδέρας της Σαντορίνης πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την έκρηξη του 1700π.Χ. (a-c): Μορφολογία του ηφαιστείου πριν από τις εκρήξεις και η κύρια φάση της έκρηξης, (d-e): Άνοιγμα του Βορειοδυτικού και του Νοτιοδυτικού πορθμού μετά την έκρηξη, (f): Το σημερινό ηφαιστειακό τοπίο. [Πηγή: Nomikou, et al., 2016]

Οι πρώτες ιστορικές ενδείξεις για το νησί της Σαντορίνης μαρτυρούν την κατοίκηση του χώρου από την ύστερη Νεολιθική περίοδο και την Πρώιμη εποχή του Χαλκού. Ευρήματα από την περιοχή του Ακρωτηρίου φανερώνουν την ύπαρξη ενός οικισμού ο οποίος είχε αναπτύξει εμπορικές, οικονομικές και πολιτιστικές σχέσεις με την Κρήτη και την Ηπειρωτική Ελλάδα. Αφού το νησί εγκαταλείφθηκε για δύο ή τρεις αιώνες κατοικήθηκε ξανά κατά τη Μινωική περίοδο και επιλέχθηκε τον 13<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. από τους Φοίνικες οι οποίοι το ονόμασαν Καλλίστη λόγω της ομορφιάς του. Τον 12<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. αποτέλεσε αποικία των Λακεδαιμονίων με επικεφαλής τον Θήρα από όπου προέκυψε και το όνομα του νησιού «Θήρα» και τον 6<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. έκοψε το δικό της νόμισμα. Κατά τη διάρκεια του Πελοποννησιακού πολέμου συνδέθηκε με τη Σπάρτη (Αποστολάκη, 2007).

### **3.4. Μινωική έκρηξη**

Η τελευταία μεγάλη έκρηξη του ηφαιστείου της Σαντορίνης πραγματοποιήθηκε γύρω στο 1.600 π.Χ. στο τέλος της Ύστερης Εποχής του Χαλκού, η οποία κατέστρεψε ολοκληρωτικά το νησί. Η θάλασσα εισέρχεται μεταξύ Φάρου και Ασπρονησίου σε μία κεντρική καλδέρα που στο κέντρο της χέρσευε η κορυφή ενός υποθαλάσσιου ηφαιστείου αντίστοιχου με τις σημερινές Παλαιά και Νέα Καμένη.

Η μινωική έκρηξη προαναγγέλλεται από μία έντονη σεισμική κρίση, η οποία εκδηλώνεται αρκετούς μήνες πριν από την έναρξη της έκρηξης και καθιστά σχεδόν αδύνατη τη ζωή στο νησί. Οι κάτοικοι του νησιού εγκατέλειψαν την κατεστραμμένη πόλη και τους οικισμούς τους, μεταφέροντας νεκρούς, τραυματίες και πολύτιμα αγαθά. Είναι πιθανό να εγκατέλειψαν και το νησί πριν από την έκρηξη, προειδοποιημένοι από πολύ μικρές εκρήξεις που άρχισαν να εκδηλώνονται στις τότε Καμένες. Δεν αποκλείεται όμως η έκρηξη να τους πρόλαβε πάνω στο νησί, συγκεντρωμένους σε ανοιχτά μέρη ή κοντά στο λιμάνι καθώς προσπαθούσαν να αποπλεύσουν, όπως συνέβη στην Ιταλία κατά την έκρηξη του Βεζούβιου το 79 μ.Χ., η οποία κατέστρεψε την Πομπηία και τις γύρω περιοχές.



Εικόνα 35: Κλιμακοστάσιο οικίας την Ύστερη Εποχή του Χαλκού στο Ακρωτήρι ύστερα από τους σεισμούς που προηγήθηκαν της μινωικής έκρηξης [Πηγή: [www.santorini.net](http://www.santorini.net) (Ανάκτηση 1-12-21)]

Εντός διαστήματος 4-6 ημερών εκτοξεύτηκαν στον αέρα 90 δισεκατομμύρια τόνοι λιωμένου πετρώματος. Κατά την έκρηξη παράχθηκε ελαφρόπετρα και ηφαιστειακή στάχτη όπου κάλυψαν όλη την έκταση του εναπομείναντος νησιού. Η πολύ λεπτή στάχτη και τα σταγονίδια θειικού οξέος εισχώρησαν στη στρατόσφαιρα, σε ύψη μεγαλύτερα των 15 km επηρεάζοντας όλο τον πλανήτη. Το μέγεθος της έκρηξης ήταν τουλάχιστον τριπλάσιο από την έκρηξη του Pinatumbo στις Φιλιππίνες. Ίχνη από τα ηφαιστειακά αναβλήματα της μινωικής έκρηξης έχουν εντοπιστεί σήμερα στους παγετώνες της Γροιλανδίας, ενώ ο «ηφαιστειακός χειμώνας» που προκάλεσαν, καθώς μειώθηκε η μέση γήινη θερμοκρασίας κατά 1-2°C, έχει καταγραφεί στους δακτυλίους δέντρων των ΗΠΑ. Η κατακρήμιση του ηφαιστείου μέσα στην τεράστια υπόγεια σπηλιά που δημιουργήθηκε από την εκτίναξη των λιωμένων πετρωμάτων, δημιούργησε τη σημερινή καлдέρα της Σαντορίνης, προκαλώντας ένα τεράστιο παλιρροϊκό κύμα (τσουνάμι) που σάρωσε τις ακτές του Αιγαίου και τα παράλια της ανατολικής Μεσογείου.



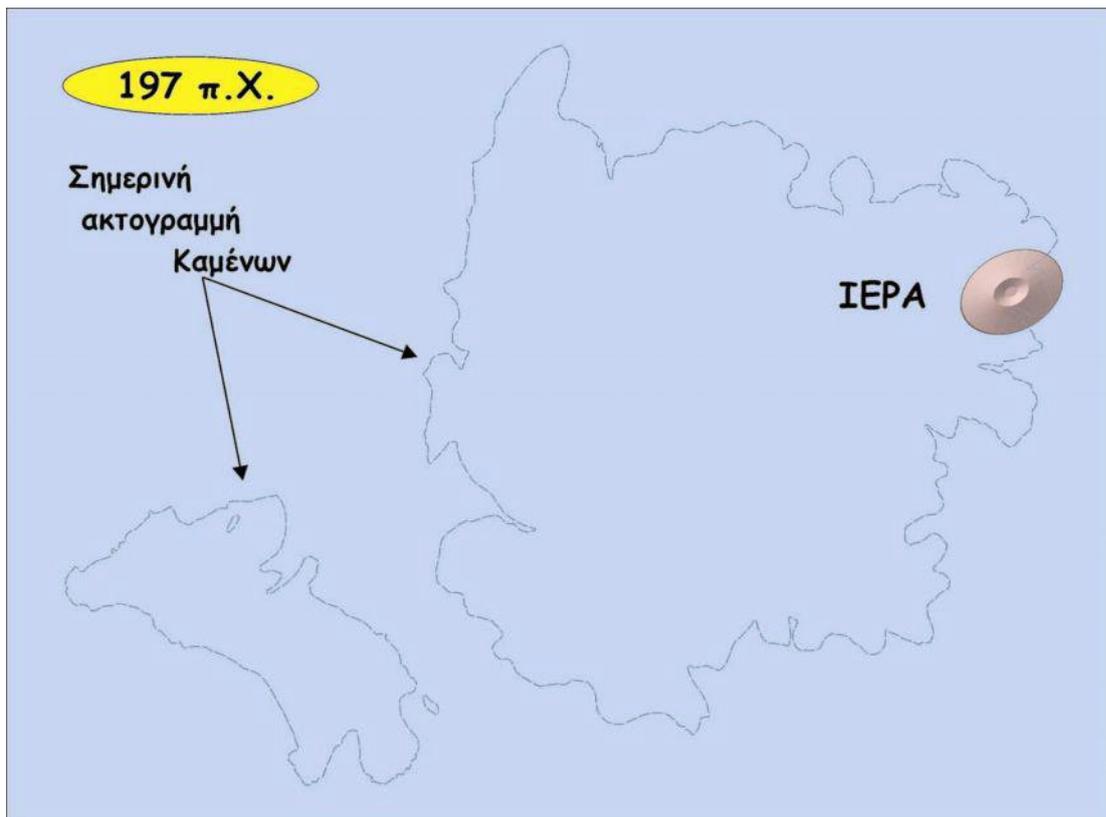
Εικόνα 36: Δεκάδες μέτρα πάχους λευκής τέφρας από τη μινωική έκρηξη στη Σαντορίνη [Πηγή: [www.santorini.net](http://www.santorini.net) (Ανάκτηση 1-12-21)]



Εικόνα 37: Οι ανατολικοί άνεμοι της στρατόσφαιρας άπλωσαν τη λεπτή στάχτη από τη μινωική έκρηξη στο ανατολικό Αιγαίο και τη Μικρά Ασία. Εντός της καμπύλης εντάσσονται οι περιοχές όπου το πάχος της στάχτης ανήλθε στα 5cm. [Πηγή: ΕΛΚΕΘΕ]

### 3.5. Η δημιουργία των νησίδων

Ύστερα από την μινωική έκρηξη, το παχύρρευστο χωρίς αέρια μάγμα που απέμεινε στον μαγματικό θάλαμο, συνέχιζε να εξέρχεται, αργά και ήπια, κατά τακτά χρονικά διαστήματα. Από το 1600 π.Χ. έως το 197 π.Χ. εκδηλώθηκαν περιοδικά πλήθος εκχύσεις που δόμησαν ένα μεγάλο υποθαλάσσιο ηφαιστειακό βουνό, κορυφές του οποίου είναι οι Καμένες. Η πρώτη χερσαία δράση καταγράφηκε το 197 π.Χ. από το σπουδαίο Έλληνα γεωγράφο Στράβωνα. Το νησάκι ονομάστηκε Ιερά και Ρόδιοι αλλά διαβρώθηκε σε σύντομο χρονικό διάστημα από τα κύματα καθώς αποτελούταν από θραύσματα λάβας και ελαφρόπετρα ενώ απέμεινε ως ύφαλος, γνωστός με το όνομα Μπάγκος.



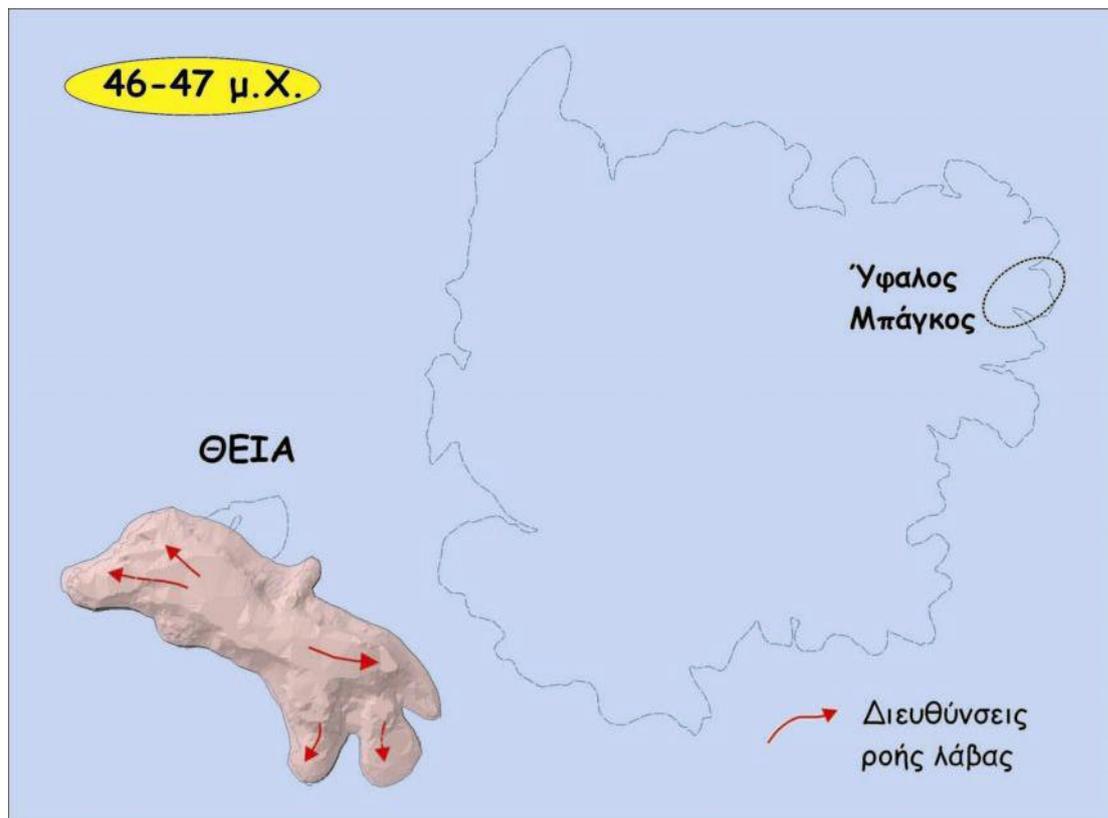
Εικόνα 38: Έκρηξη του 197 π.Χ. και δημιουργία νήσου Ιερά [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ]

Από τότε έως σήμερα έχουν καταγραφεί 8 ακόμη εκρήξεις (46-47, 726, 1570-1573, 1707-1711, 1866-1870, 1925-1928, 1939- 1941, 1950 μ.Χ. ), οι οποίες οικοδόμησαν την Παλαιά και τη Νέα Καμένη, τη νεότερη χέρσο της ανατολικής Μεσογείου. Όλες οι ιστορικές ενδοκαλδερικές εκρήξεις ήταν ήπιες και δεν δημιούργησαν σοβαρά προβλήματα στους κατοίκους του νησιού.

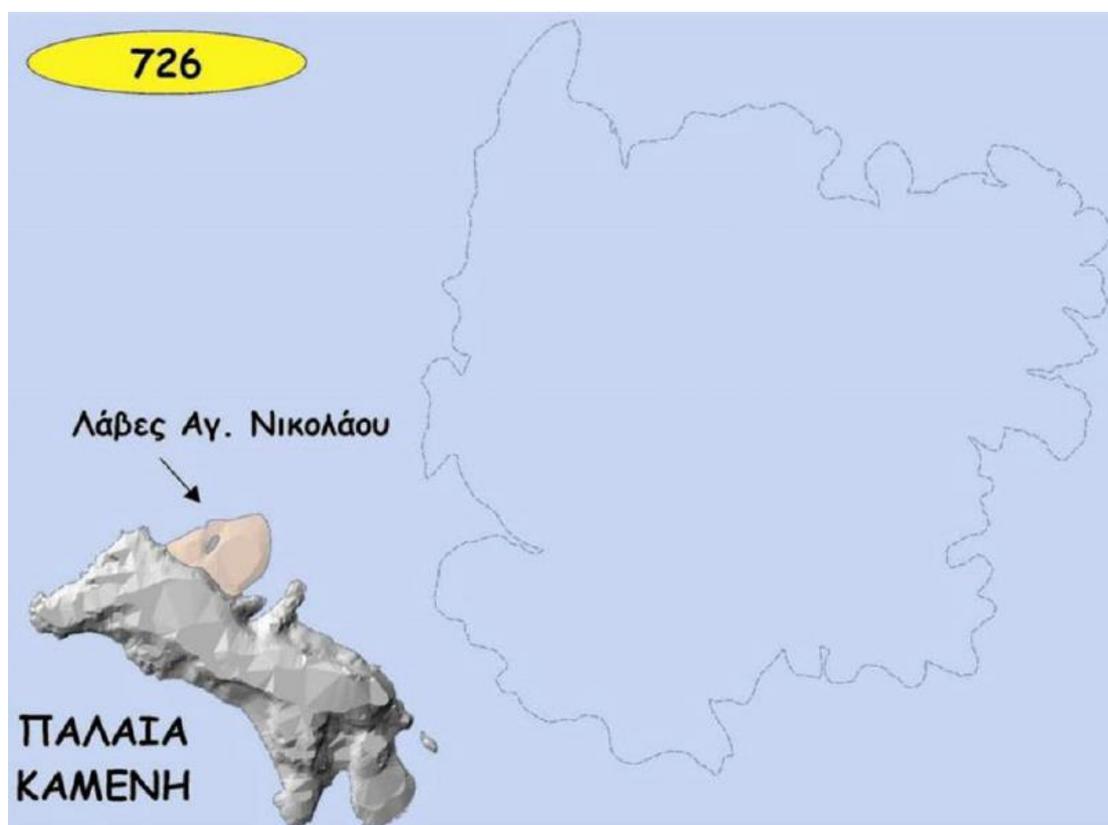
### 3.5.1. Παλαιά Καμένη

Πιο συγκεκριμένα, στα τέλη του 46 μ.Χ. με τις αρχές του 47 μ.Χ. πραγματοποιήθηκε νέα έκρηξη στο ηφαίστειο. Μεγάλες ποσότητες μάγματος αναβλύζουν δύο χιλιόμετρα νοτιοδυτικά της Ιεράς δημιουργώντας το νησί της Παλαιάς Καμένης. Την εποχή εκείνη το νησί ονομάστηκε Θεία και είχε περίμετρο 5.550 m, όπως κατέγραψε ο Aurelius Victor στην *Historia Romana*. Ο κατατεμαχισμός της από μεγάλες ρωγμές και ρήγματα και οι κατακρημνίσεις των ακτών στα επόμενα χρόνια της έδωσαν τη σημερινή μορφή. Τους επόμενους 7 αιώνες το ηφαίστειο παρέμεινε ανενεργό ενώ επαναδραστηριοποιήθηκε με βίαιο τρόπο το 726. Σφοδρές ηφαιστειακές εκρήξεις εκτίναξαν ελαφρόπετρα και ηφαιστειακή στάχτη σε αρκετά χιλιόμετρα ύψος ενώ κατέλαβαν όλη την έκταση του Αιγαίου φτάνοντας έως τη Μικρά Ασία. Ποσότητες από τη συγκεκριμένη ηφαιστειακή τέφρα έχουν βρεθεί σήμερα στην Παλαιά Καμένη. Στις βορειοανατολικές ακτές της Παλαιάς Καμένης, βόρεια από τον όρμο του αγίου Νικολάου έχει

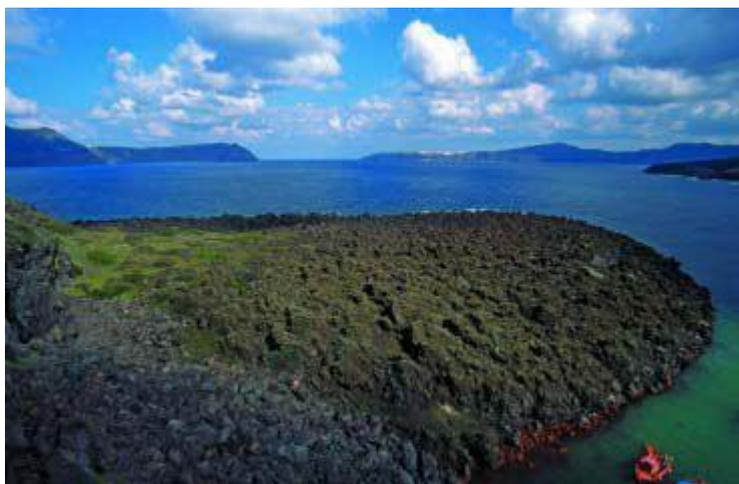
επίσης εντοπιστεί μάγμα από την έκρηξη που παρατηρείται με τη μορφή μαύρης λάβας (Μιχαήλ, 2017).



Εικόνα 39: Έκρηξη του 46-47 μ.Χ. [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ]



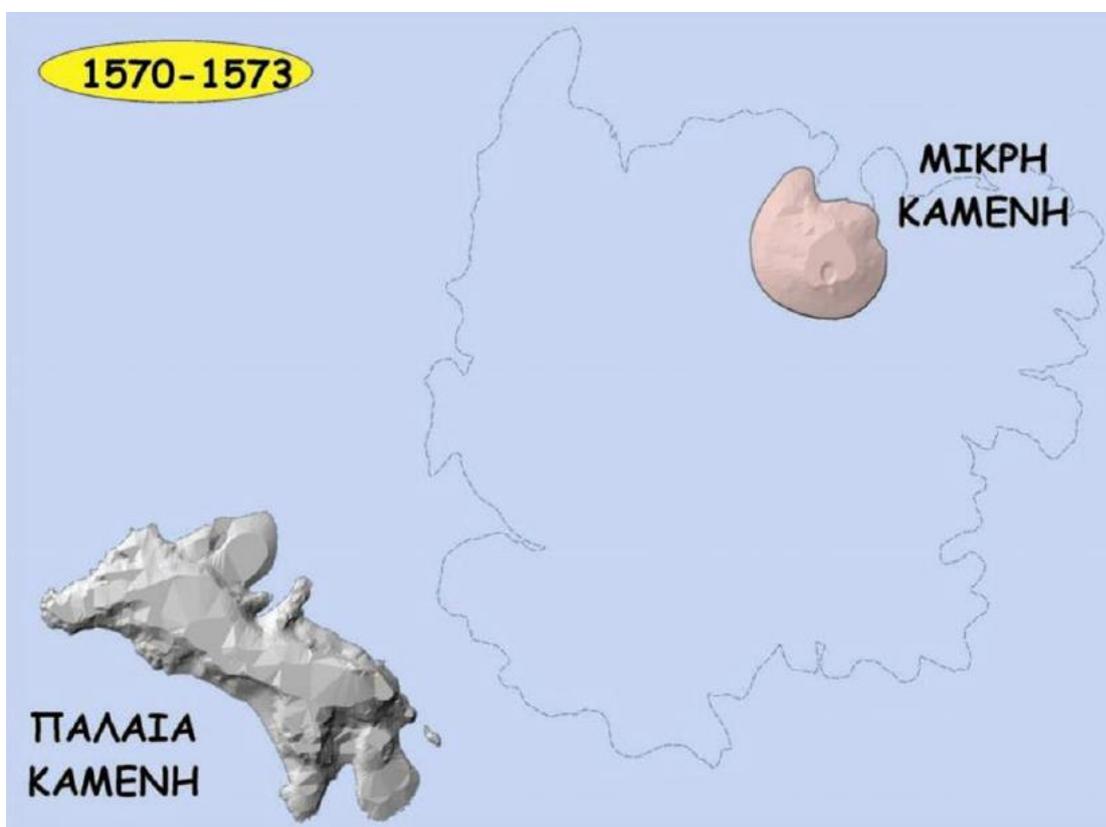
Εικόνα 40: Παλαιά καμένη ύστερα από την έκρηξη το 726 [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ]



Εικόνα 41: Η λάβα από την έκρηξη το 726 στο ΒΑ ακρωτήριο της Παλαιάς Καμένης [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ]

### 3.5.2. Νέα Καμένη

Η επόμενη ηφαιστειακή δραστηριότητα στην περιοχή πραγματοποιήθηκε το 1570, ύστερα από 800 χρόνια, σε μία περιοχή κοντά στον ύφαλο Μπάγκο (Εικόνα 42) όπου πραγματοποιήθηκαν πολλές εκρήξεις και εκχύσεις παχύρευστου μάγματος. Είχε διάρκεια περίπου 3 χρόνια με αποτέλεσμα την οικοδόμηση ενός μικρού νησιού με διάμετρο 400 m και ύψος 70 m, το οποίο ονομάστηκε Μικρή Καμένη. Είχε σχήμα θόλου με κρατήρα βάθους 20 m στην κορυφή του.

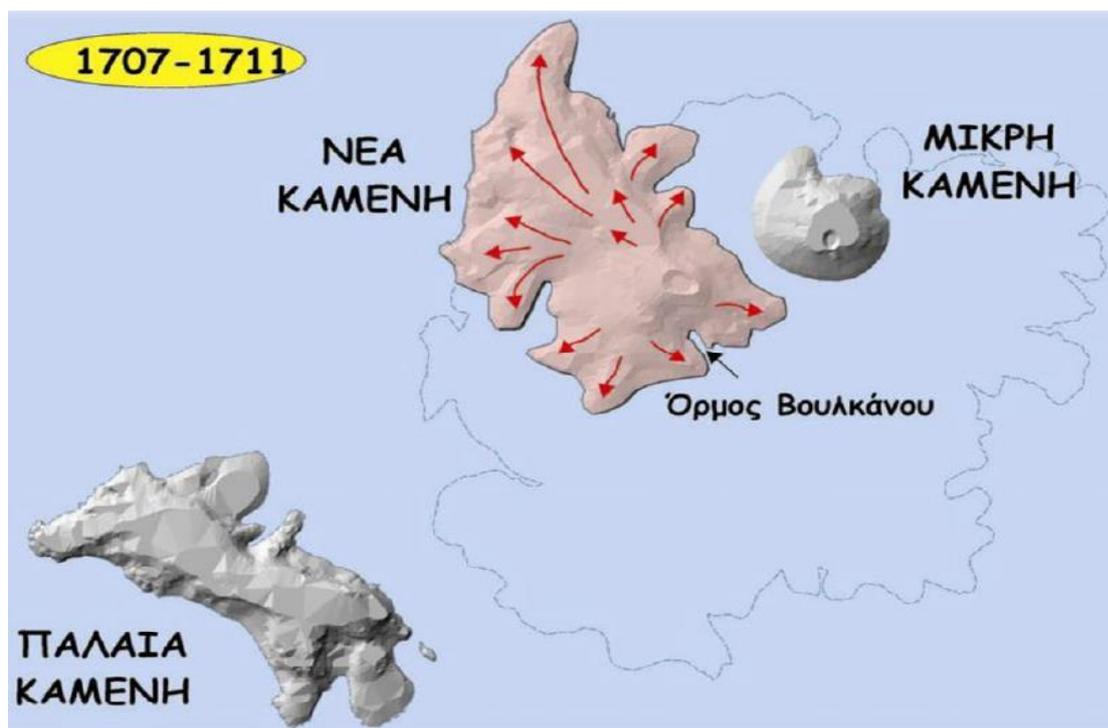


Εικόνα 42: Σχηματισμός Μικρής Καμένης από την έκρηξη το 1570 [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ]

Στη συνέχεια, το 1707, έπειτα δηλαδή από 135 έτη, εκδηλώθηκε η επόμενη ηφαιστειακή δραστηριότητα. Λίγες ημέρες πριν όμως, στις 18 και 21 Μαΐου, πραγματοποιήθηκε σεισμική δραστηριότητα όπου προανήγγειλε τη μετέπειτα έκρηξη. Δύο ημέρες αργότερα, δυτικά της Μικρής Καμένης, οι κάτοικοι της Σαντορίνης παρατήρησαν την ανύψωση του βυθού που μετατρεπόταν σε στεριά φέρνοντας στην επιφάνεια μεγάλες ποσότητες οστρέων. Η νήσος που ανήλθε ονομάστηκε Ασπρονήσι καθώς ήταν καλυμμένη από λευκή ελαφρόπετρα. Μία εβδομάδα αργότερα εκχύθηκε παχύρρευστο μάγμα δημιουργώντας μία ακόμη νησίδα βορειότερα του Ασπρονησίου που ονομάστηκε Μαυρονήσι λόγω της μαύρης στερεοποιημένης λάβας.

Μετά από λίγες ημέρες εκδηλώθηκαν οι πρώτες ηφαιστειακές εκρήξεις που εκσφενδόνισαν στον αέρα ηφαιστειακή τέφρα και βολίδες σε ύψος έως και 2 km. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα διήρκεσε περίπου 4 χρόνια και, ως το Σεπτέμβρη του 1711, έχει δημιουργηθεί δίπλα στη Μικρή Καμένη μια δεύτερη νησίδα με το όνομα Νέα Καμένη. Στις ΝΑ ακτές του νησιού και ιδιαίτερα στον όρμο Βουλκάνου, υπήρχαν θερμές πηγές που αποτέλεσαν το λόγο δημιουργίας κατοικιών στην περιοχή, αυξάνοντας έτσι τον τουρισμό.

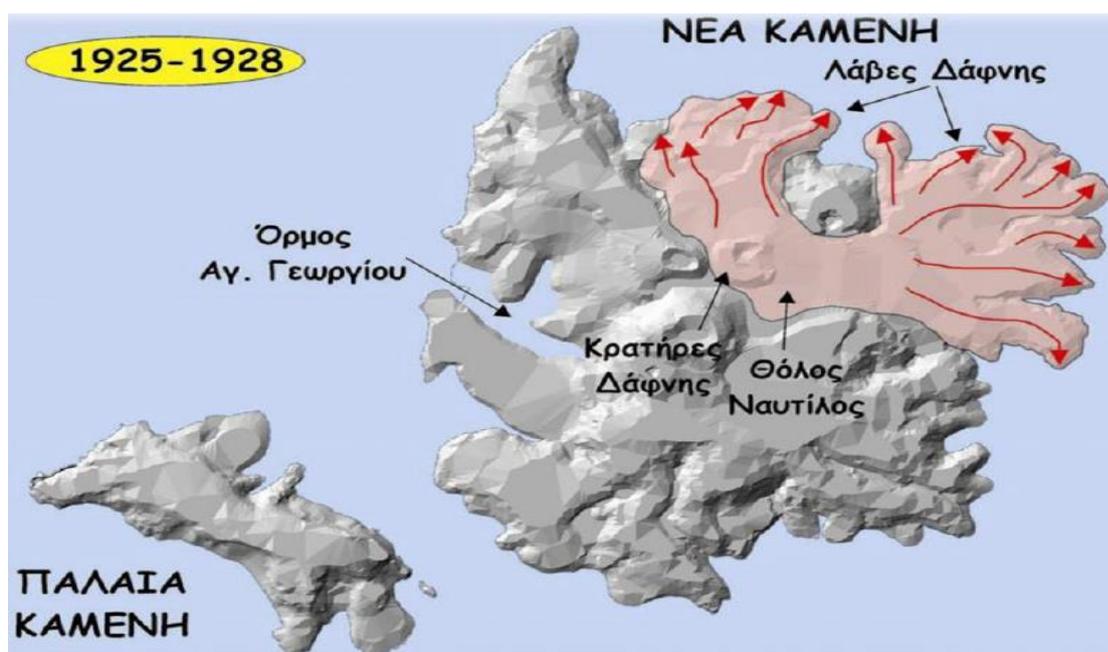
Οι τεράστιες ποσότητες λάβας που εκχύνονταν κατά τη διάρκεια των 4 χρόνων τριπλασίασαν την επιφάνεια της Νέας Καμένης ενώ ένα μικρό κανάλι διαχώριζε τη Νέα από την Παλαιά Καμένη.



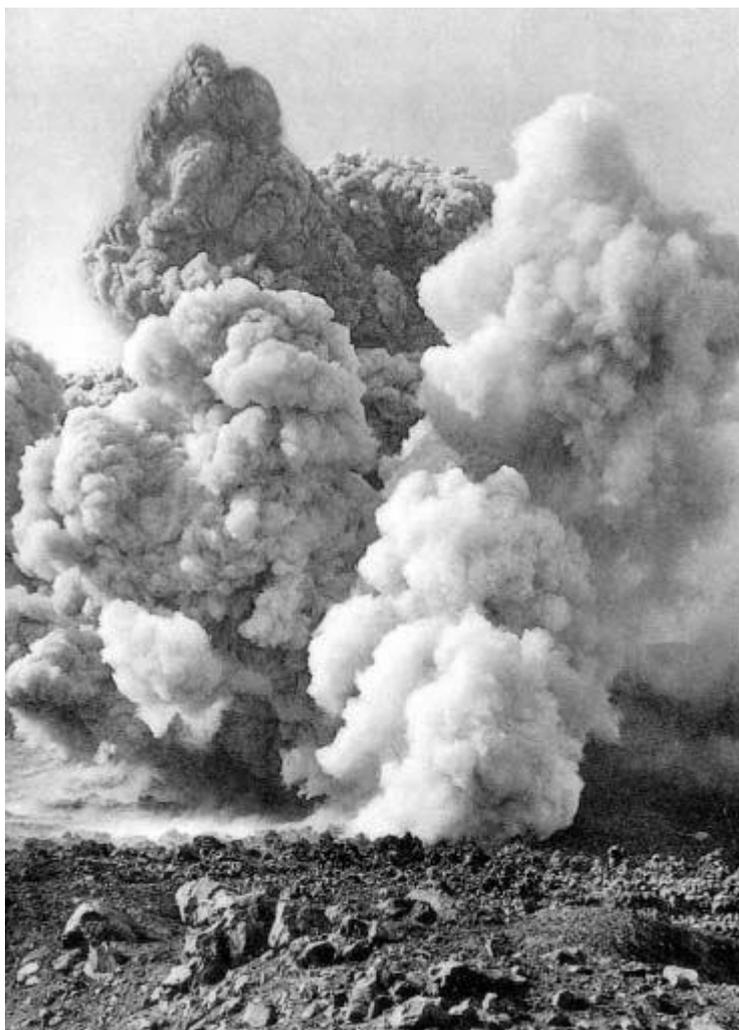
Εικόνα 43: Σχηματισμός Νέας Καμένης από την έκρηξη το 1707 [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ]

Η επόμενη ηφαιστειακή έκρηξη στην περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκε το 1925. Το χρονικό διάστημα μεταξύ όλων των ηφαιστειακών δραστηριοτήτων επικρατούσε αδράνεια του ηφαιστείου. Όπως και στην έκρηξη του 1707, προηγήθηκαν σεισμικές δονήσεις που προανήγγειλαν την έκρηξη. Επιπλέον στην περιοχή των Κόκκινων Νερών παρατηρήθηκε αύξηση της θερμοκρασίας της θάλασσας ενώ οι ανατολικές ακτές της Νέας Καμένης άρχισαν να βυθίζονται. Η ηφαιστειακή έκρηξη πραγματοποιήθηκε στις 11 Αυγούστου. Οι πίδακες νερού και υδρατμών που εκτινάχθηκαν στα Κόκκινα Νερά μετατράπηκαν σε εκρηκτικές στήλες λάβας και στάχτης που εκτινάχθηκαν σε ύψος 3.200 m ενώ οι ηφαιστειακές βολίδες εκτοξεύθηκαν σε απόσταση μεγαλύτερη των 850 m. Λίγες ημέρες αργότερα το ηφαιστειακό κέντρο μετακινήθηκε 200 m νοτιοδυτικά. Στη συγκεκριμένη θέση δημιουργήθηκαν κρατήρες από θραύσματα λάβας, τουλάχιστον 5 από τους οποίους παρατηρούνται και τη σημερινή εποχή.

Κατά τη διάρκεια της έκρηξης παράχθηκαν 100M m<sup>3</sup> λάβας ενώνοντας τη Μικρή με τη Νέα Καμένη και αυξάνοντας αισθητά τη χερσαία επιφάνεια του νησιού. Τόσο στις λάβες όσο και στους κρατήρες δόθηκε το όνομα Δάφνη, από το όνομα του πρώτου πολεμικού πλοίου, το οποίο έφτασε στην περιοχή αμέσως μετά την έκρηξη. Η δραστηριότητα διήρκεσε 2 χρόνια, έως τον Μάιο του 1926. Μια σύντομη επαναδραστηριοποίηση εκδηλώθηκε τους τρεις πρώτους μήνες του 1928 και δημιούργησε, ανατολικά των κρατήρων της Δάφνης, ένα μικρό θόλο λάβας που ονομάστηκε Ναυτίλος ο οποίος δεν είναι δυνατόν να παρατηρηθεί σήμερα γιατί καλύφθηκε από τις λάβες της επόμενης έκρηξης.



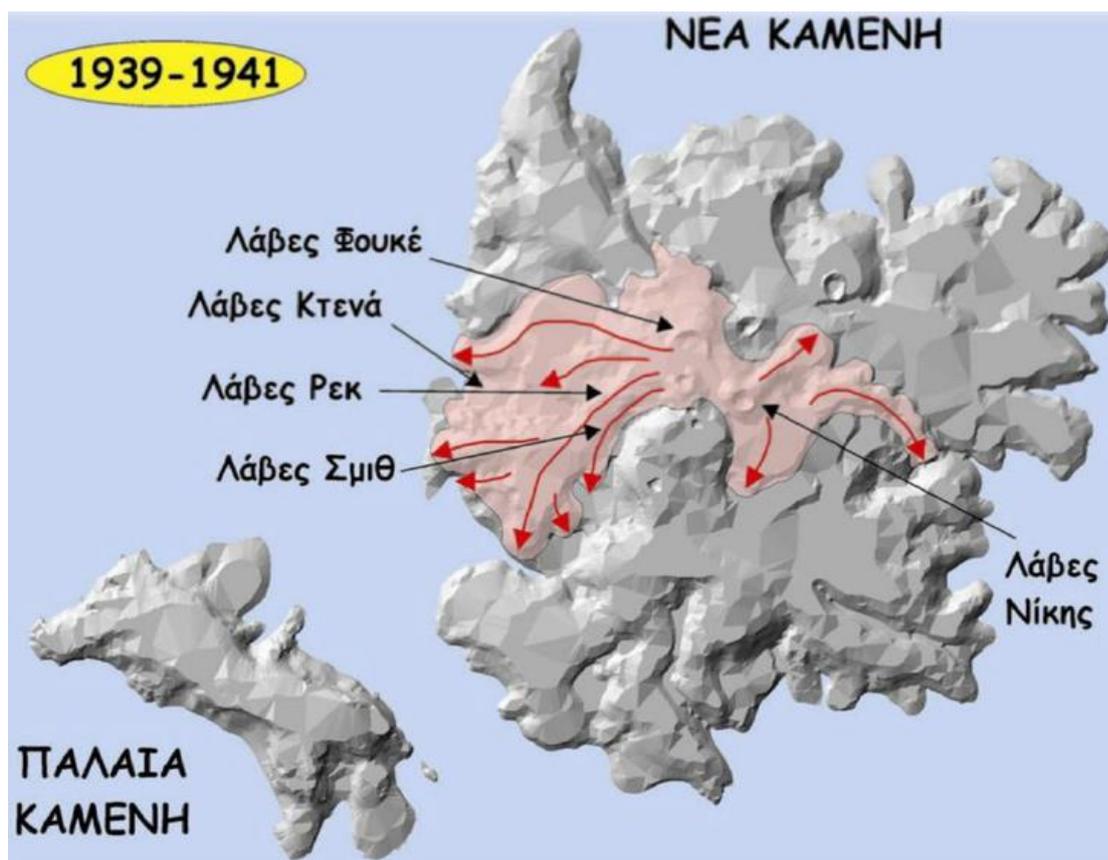
Εικόνα 44: Σχηματισμός Νέας Καμένης το 1925 [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ]



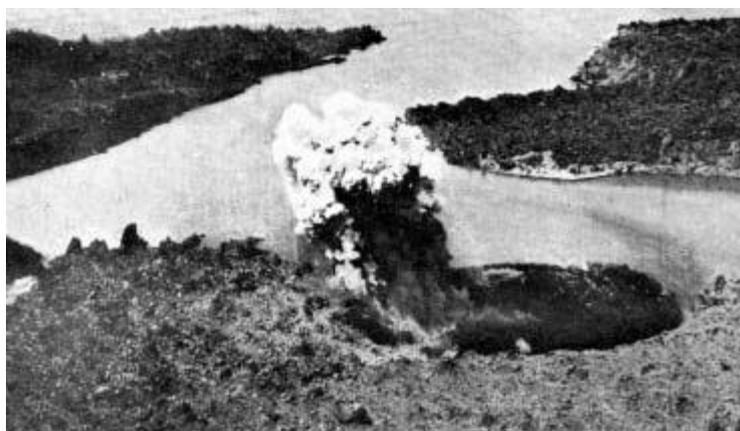
Εικόνα 45: Έκρηξη της Δάφνης τον Ιανουάριο του 1926 [Πηγή: Μιχαήλ, 2017]

Στις αρχές Μαΐου του 1939 παρατηρήθηκε αύξηση της θερμοκρασίας του νερού και καθίζηση των ακτών. Στις 20 Αυγούστου πραγματοποιήθηκε υποθαλάσσια έκρηξη στο λιμάνι του Αγίου Γεωργίου δημιουργώντας τον θόλο που ονομάστηκε Τρίτωνα. Ύστερα από ένα μήνα η ηφαιστειακή δραστηριότητα μετατοπίστηκε λίγες εκατοντάδες μέτρα προς τα βορειοανατολικά και δημιούργησε ένα θόλο και ρεύματα λάβας, που τους δόθηκε το όνομα Κτενά, ενός σπουδαίου γεωλόγου μελετητή των εκρήξεων της Καμένης. Οι λάβες αυτές γέμισαν το λιμάνι του Αγ. Γεωργίου καλύπτοντας το θόλο Τρίτωνα. Από το Νοέμβριο του 1939 ως τον Ιούλιο του 1940, η ηφαιστειακή δραστηριότητα μετατοπίστηκε ακόμη πιο βορειοανατολικά δημιουργώντας το θόλο και τα ρεύματα λάβας του Φουκέ, από το όνομα του Γάλλου φυσιοδίφη, μελετητή της Σαντορίνης και των εκρήξεων της Καμένης. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν άλλα δύο κέντρα που παρήγαγαν θόλους και λάβα καλύπτοντας τις δυτικές πλαγιές της Νέας Καμένης, και έλαβαν τα ονόματα των ηφαιστειολόγων Σμιθ και Ρεκ που μελέτησαν την έκρηξη του 1925. Οι προαναφερθείσες εκρηκτικές δραστηριότητες χαρακτηρίζονται ως ήπιας έντασης καθώς η ηφαιστειακή στάχτη δεν ξεπέρασε τα 1200 m.

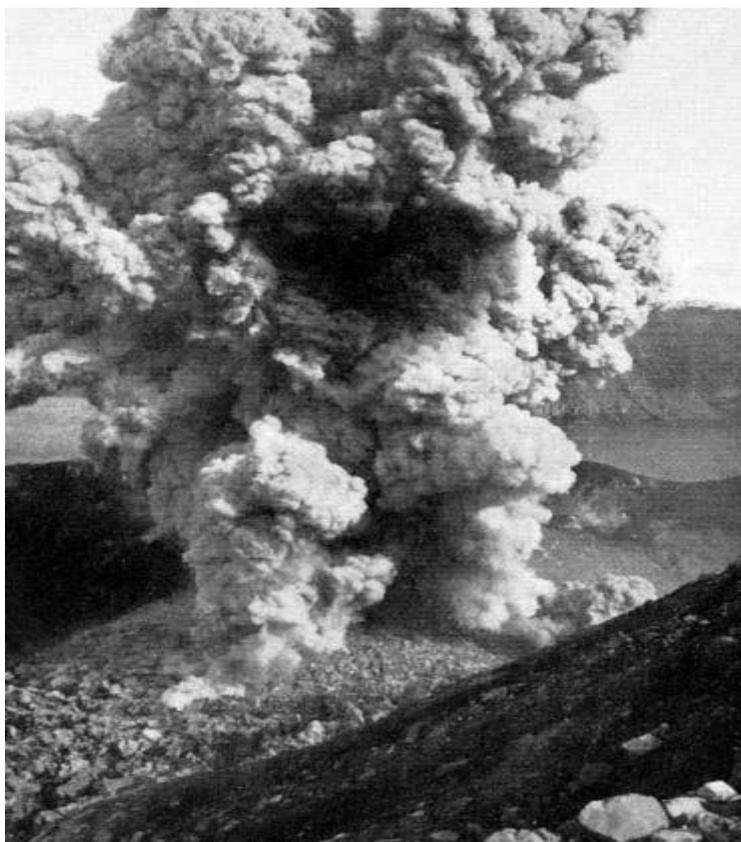
Αντίθετα στα τέλη του Αυγούστου του 1940 εκδηλώθηκαν δύο μεγάλες εκρήξεις που εκτόξευσαν τα παλαιότερα πετρώματα και δημιούργησαν δύο κρατήρες διαμέτρου 50 m που πλέον αποτελούν αξιοθέατο αφού δεν εξέρχεται μάγμα. Παχύρρευστο μάγμα άρχισε να αναβλύζει 100 m ανατολικά των δύο αυτών κρατήρων σε χρονικό διάστημα 3 μηνών από την προηγούμενη έκρηξη διαρκώντας 8 μήνες. Δημιούργησε τις λάβες της Νίκης, όνομα εμπνευσμένο από τις νίκες των ελληνικών στρατευμάτων στην Αλβανία και κάλυψαν τις ανατολικές πλαγιές του νησιού.



Εικόνα 46: Σχηματισμός Καμένων το χρονικό διάστημα 1939-1941 [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ]



Εικόνα 47: Ο θόλος Τριτώνας κατά την έκρηξη στις 22 Αυγούστου 1939 [Πηγή: Μιχαήλ, 2017]



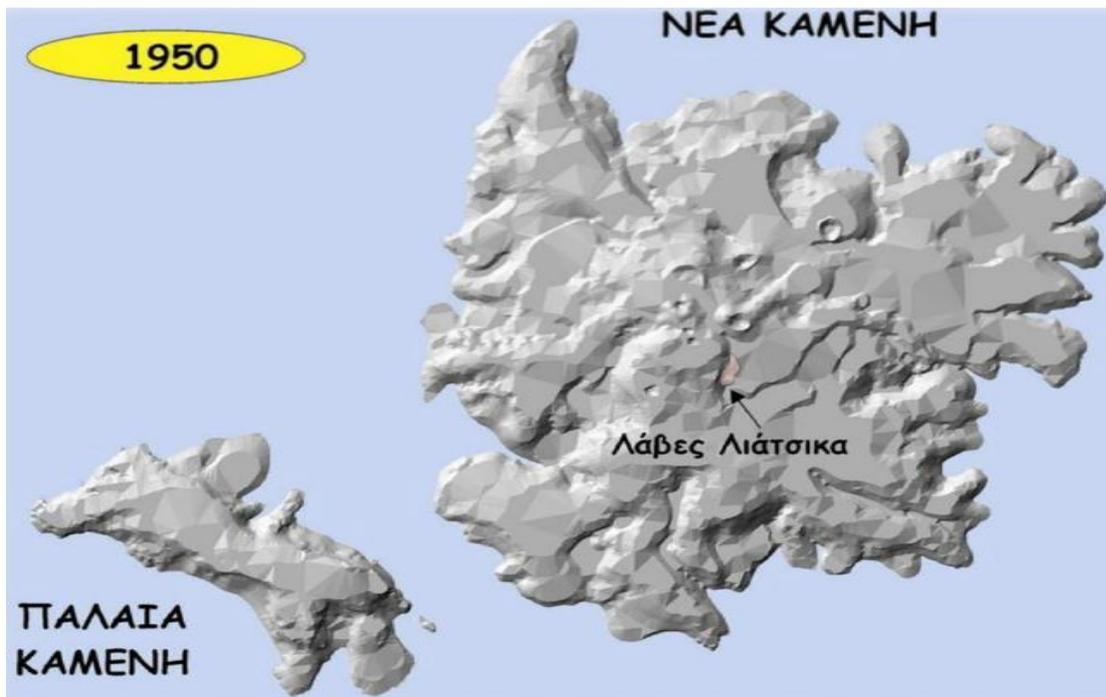
Εικόνα 48: Ο θόλος Φουκέ κατά την έκρηξη στις 25 Νοεμβρίου 1939 [Πηγή: Μιχαήλ, 2017]

### 3.5.3. Η τελευταία έκρηξη (1950)

Η τελευταία ηφαιστειακή έκρηξη στη Σαντορίνη και σε όλο τον Ελλαδικό χώρο εκδηλώθηκε στις αρχές Ιανουαρίου του 1950. Τον Αύγουστο του προηγούμενου χρόνου πραγματοποιήθηκαν μικρές σεισμικές δονήσεις που προανήγγειλαν την έκρηξη. Στις 10 Ιανουαρίου η έκρηξη που έλαβε χώρα τίναξε τα πετρώματα στους νότιους πρόποδες του θόλου Νίκη ενώ μάγμα άρχισε να αναβλύζει στην περιοχή. Η ηφαιστειακή τέφρα εκτινάχθηκε σε ύψος 1.000 m και οι βολίδες σε απόσταση 850 m από τον κρατήρα. Έως τις 2 Φεβρουαρίου εκρήξεις και έκχυση μάγματος παρήγαγαν τα νεώτερα πετρώματα της Ελλάδας, τις λάβες Λιάτσικα. Το όνομα δόθηκε στη μνήμη ενός γεωλόγου μελετητή της Καμένης.



Εικόνα 49: Έκρηξη ηφαιστείου Σαντορίνης 1950 [Πηγή: Μιχαήλ, 2017]



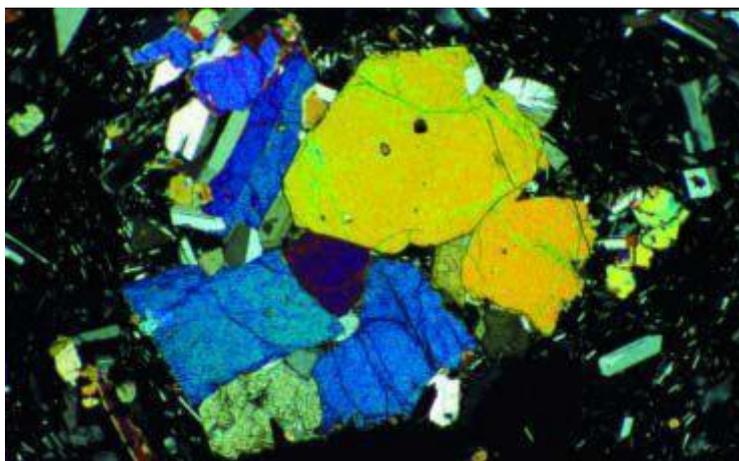
Εικόνα 50: Σχηματισμός Καμένων το 1950 [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ.]

### 3.6. Τα πετρώματα των Καμένων

Το λιωμένο πέτρωμα που τροφοδότησε τα ηφαιστειακά κέντρα των Καμένων, βρίσκεται σε βάθος 2-4 km κάτω από τα νησιά και σε θερμοκρασίες 950-1000°C. Τα πετρώματα των Καμένων αποτελούνται από λάβες, οι οποίες έχουν την ίδια χημική σύσταση αλλά παρουσιάζουν ελάχιστες διαφορές μεταξύ τους ως προς τη μορφή τους. Εντάσσονται στην κατηγορία των δακίτων, ένα ηφαιστειακό πέτρωμα που το 65-67% αυτού αποτελείται από διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ), το 13-15% από οξείδιο του αργιλίου ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ενώ το 2-5% αποτελείται από άλλα στοιχεία όπως σίδηρο, ασβέστιο, κάλιο, νάτριο, μαγνήσιο. Αυτά τα στοιχεία εμπεριέχονται τόσο στο άμορφο ηφαιστειακό γυαλί όσο και στους κρυστάλλους των ορυκτών που, μαζί με το γυαλί, αποτελούν αυτά τα πετρώματα.

Στους δακίτες της Νέας και της Παλαιάς Καμένης συναντώνται τα ακόλουθα κύρια ορυκτά:

- Αστρίους: αποτελούν ορυκτά του πυριτίου και αργιλίου σε λευκούς διαυγείς κρυστάλλους
- Πυροξένους: αποτελούν ορυκτά του πυριτίου, ασβεστίου, σιδήρου και μαγνησίου σε σκούρους πράσινους έως μαύρους κρυστάλλους και
- Ολιβίνες: που εντάσσονται στα ορυκτά του μαγνησίου, σιδήρου και πυριτίου σε μέλι έως φαιοπράσινους διαυγείς κρυστάλλους



Εικόνα 51: Σύμπλεγμα κρυστάλλων ολιβίνη (κίτρινο και μωβ), πυρόξενου (γαλαζοπράσινο έως φαιό πράσινο) και άστριου (τεφρό έως λευκό) φωτογραφημένα στο πολωτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση 100X) [Πηγή: <http://santorini.hcmr.gr> (Ανάκτηση 3-12-21)]

Οι διαφορές που παρατηρούνται στις λάβες σχετίζονται με τη διαφορετική τους απόχρωση και οφείλονται στη διαφορετική ταχύτητα ψύξης. Οι λάβες που εμφανίζονται με έντονα μαύρο χρώμα και περισσότερο θρυμματισμένες, όπως οι περισσότερες από αυτές της Νέας Καμένης, έχουν υποστεί πολύ γρήγορη ψύξη με αποτέλεσμα να περιέχουν μεγάλο ποσοστό ηφαιστειακού γυαλιού που τους δίνει τη συγκεκριμένη όψη. Αντίθετα, η πιο αργή ψύξη επιτρέπει την δημιουργία πολλών κρυσταλλικών ορυκτών, με αποτέλεσμα η λάβα να παίρνει ένα ανοιχτό τεφρό χρώμα και πιο κοκκώδη μορφή. Τέτοιες είναι οι περισσότερες λάβες τις Παλαιάς Καμένης.



Εικόνα 52: Λάβες που έχουν υποστεί ταχεία ψύξη, στις βορειοδυτικές πλαγιές του θόλου Νίκη [Πηγή: Google]

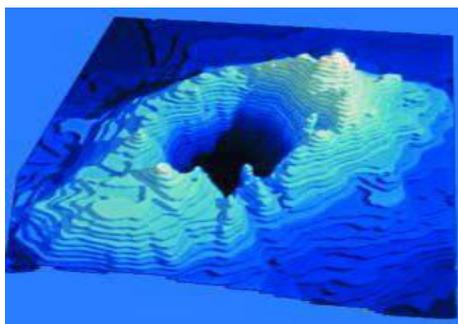


Εικόνα 53: Λάβες που ψύχθηκαν αργά, στον όρμο του Αγίου Νικολάου της Παλαιάς Καμένης. Το κόκκινο χρώμα είναι επίχρισμα σκουριάς (οξειδία σιδήρου) από τα υδροθερμικά διαλύματα, ενώ στην θάλασσα διακρίνονται και φυσαλίδες αερίου, οι οποίες εξέρχονται μαζί με το θερμό νερό [Πηγή: <http://santorini.net> (Ανάκτηση 3-12-21)]

### 3.7 Η έκρηξη του Κολούμπο

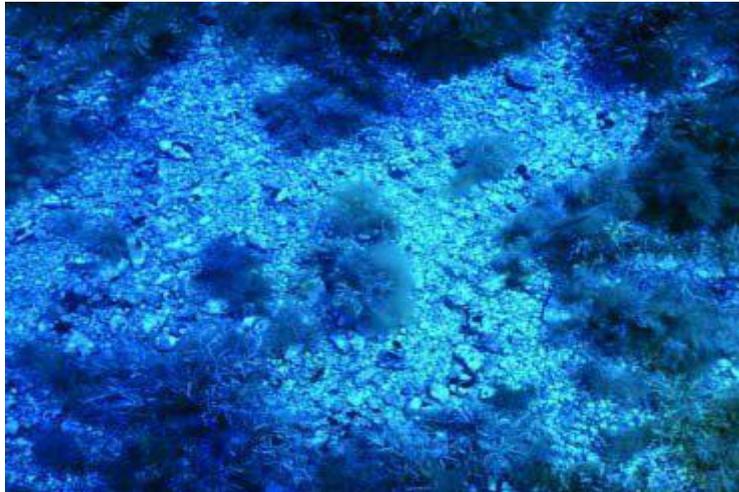
Η μοναδική ιστορική έκρηξη που εκδηλώθηκε στη Σαντορίνη έξω από το χώρο της καλδέρας, είναι αυτή του Κολούμπο, το Σεπτέμβρη του 1650, στον υποθαλάσσιο χώρο 8 km βορειοανατολικά του νησιού, μεταξύ Θήρας και Αμοργού.

Το λιωμένο πέτρωμα που αναβλύζει ήπια στο βυθό οικοδομεί ως τον Σεπτέμβρη του 1650 ένα υποθαλάσσιο ηφαίστειο με περίμετρο 30 km και ύψος 300 m που η κορυφή του μόλις ξεπρόβαλε από την επιφάνεια της θάλασσας ενώ ταυτόχρονα παρατηρούνται μικρές εκρήξεις. Η μεγάλη έκρηξη πραγματοποιήθηκε στις 29 Σεπτεμβρίου, όπου τέσσερα δισεκατομμύρια τόνοι λιωμένο πέτρωμα τινάχθηκαν στην ατμόσφαιρα, σε ύψος μερικών χιλιάδων μέτρων και η ελαφρόπετρα που επέπλεε στη θάλασσα έμοιαζε με στεριά περιμετρικά του ηφαιστείου. Το κεντρικό τμήμα του ηφαιστείου κατακρημνίστηκε στο κενό που είχε δημιουργηθεί από την εκτίναξη του μάγματος δημιουργώντας μια υποθαλάσσια καλδέρα βάθους 500 m και διαμέτρου 3 km και παλιρροϊκό κύμα ύψους 10 m που σάρωσε τις ακτές τις Σαντορίνης και του Αιγαίου. Το μεγαλύτερο ποσοστό των ηφαιστειακών αερίων που παράχθηκαν ήταν υδρόθειο και προκάλεσε το θάνατο 50 ανθρώπων και περισσότερων από 1.000 ζώων.



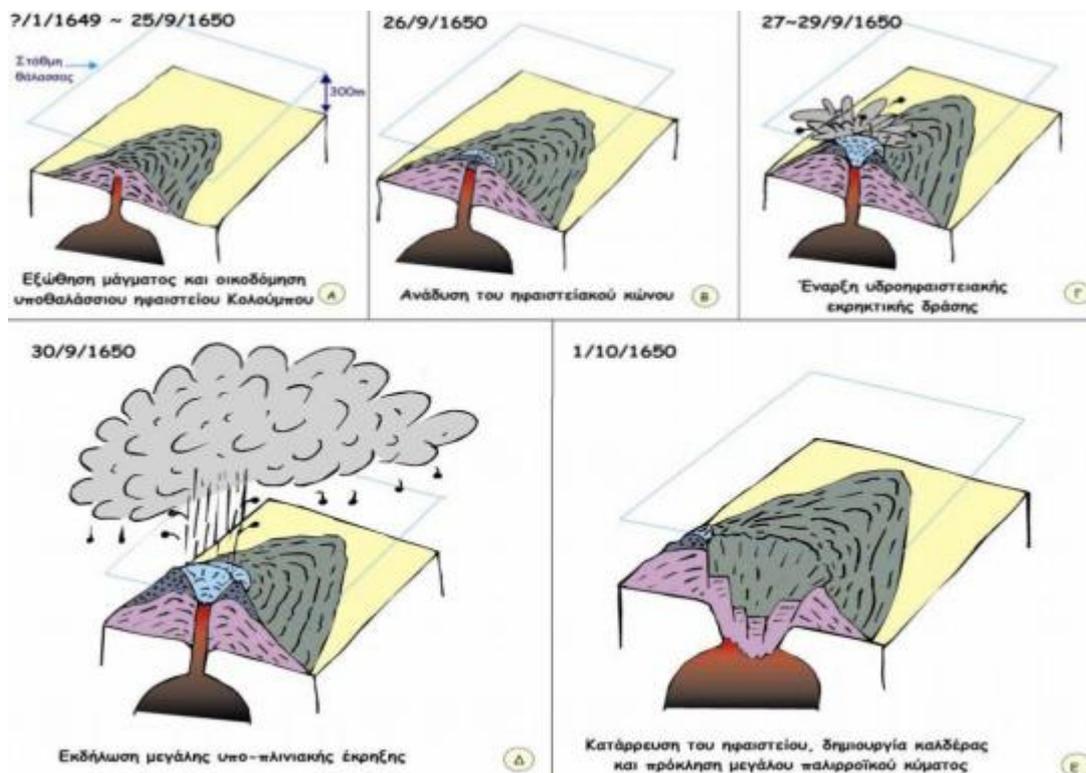
Εικόνα 54: Τρισδιάστατη απεικόνιση της σημερινής μορφολογίας του ηφαιστείου του Κολούμπο [Πηγή: Βουλαδάκη και Παπαδημητρίου, 2007]

Μικρές εκρήξεις συνεχίστηκαν να εκδηλώνονται στην περιοχή του Κολούμπου έως τις 10 του Οκτώβρη του 1650 ενώ στις 6 Δεκεμβρίου σταμάτησαν και οι εκλύσεις αερίων και από τότε το ηφαίστειο είναι σε κατάσταση ηρεμίας. Η μικρή νησίδα που είχε μείνει πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας διαβρώθηκε από τα κύματα σε μικρό χρονικό διάστημα. Το υψηλότερο σημείο του ηφαιστείου βρίσκεται σήμερα 18m κάτω από τη στάθμη της θάλασσας.



Εικόνα 55: Η κορυφή του ηφαιστείου του Κολούμπου αποτελεί σήμερα ένα βυθό σπαρμένο με την ελαφρόπετρα της έκρηξης του 1650 [Πηγή: Google]

Η έκρηξη του Κολούμπου είναι η μεγαλύτερη έκρηξη που εκδηλώθηκε την τελευταία χιλιετία στην Ανατολική Μεσόγειο και απεικονίζεται σταδιακά στην Εικόνα 56.



Εικόνα 56: Σχηματική απεικόνιση της έκρηξης Κολούμπου το χρονικό διάστημα 1649-1650 [Πηγή: [Πηγή: Βουλαδάκη και Παπαδημητρίου, 2007]

### 3.8 Η κατάσταση του ηφαιστείου σήμερα

Μετά την έκρηξη που πραγματοποιήθηκε το 1950, τα ηφαιστειακά κέντρα των Καμένων βρίσκονται σε κατάσταση ηρεμίας. Οι μόνες επιφανειακές εκδηλώσεις που θυμίζουν την ύπαρξη του μάγματος κάτω από τα νησιά είναι οι πολυάριθμες θερμές πηγές που αναβλύζουν στις ακτές τους και η διαφυγή θερμών αερίων με θερμοκρασία 93-97°C από τις ατμίδες των κεντρικών κρατήρων της Νέας Καμένης. Τα αέρια αποτελούνται κυρίως από διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), υδρατμούς και θερμό ατμοσφαιρικό αέρα ενώ σε μικρό ποσοστό είναι άλλα αέρια όπως το υδρόθειο, το μεθάνιο κλπ. Στα σημεία που διαφεύγουν αποθέτουν ορυκτά του θείου, γύψο και άλλα υδροθερμικά ορυκτά.

Πλέον έχει εγκατασταθεί στην περιοχή των Καμένων αλλά και στην ευρύτερη περιοχή της Σαντορίνης ένα δίκτυο παρακολούθησης δεκάδων φυσικών και χημικών παραμέτρων (θερμοκρασία και χημική σύσταση των ατμίδων και θερμών νερών σεισμική δραστηριότητα, στάθμη της θάλασσας και ανάγλυφο περιοχής, βαρυτικό και μαγνητικό πεδίο κ.α.). Το δίκτυο εξασφαλίζει την καταγραφή οποιουδήποτε φαινομένου ή συμβάντος που θα μπορούσε να σημαίνει πιθανή επαναδραστηριοποίηση του ηφαιστείου και εγγυάται την έγκαιρη λήψη μέτρων έτσι ώστε οι επισκέπτες των νησιών να μη διατρέξουν κανένα κίνδυνο από ενδεχόμενη ενεργοποίηση του ηφαιστείου.

Επιπλέον, για το ηφαίστειο της Σαντορίνης έχει εκδοθεί ένα σχέδιο έκτακτης ανάγκης, το οποίο χαρακτηρίζεται από την κωδική ονομασία «Τάλως». Πιο συγκεκριμένα, αποτελεί το σχέδιο διαχείρισης εκτάκτων αναγκών σε περίπτωση που πραγματοποιηθεί έκρηξη στο ηφαίστειο της Σαντορίνης και εντάσσεται στα πλαίσια του Γενικού Σχεδίου Πολιτικής Προστασίας με τη συνθηματική λέξη «Ξενοκράτης». Ενεργοποιείται και εφαρμόζεται για την λήψη μέτρων και την υλοποίηση δράσεων αυξημένης ετοιμότητας εν όψει επαπειλούμενου κινδύνου για την εκδήλωση ηφαιστειακής δράσης στο ηφαιστειακό σύμπλεγμα της Σαντορίνης λαμβάνοντας υπόψη τον χαρακτηρισμό της κατάστασης επιφυλακής (alert level) που καθορίζεται από την Μόνιμη Επιστημονική Επιτροπή Παρακολούθησης Ελληνικού Ηφαιστειακού Τόξου (ΜΕΕΠΕΗΤ) αλλά και αντιμετώπισης των εκτάκτων αναγκών και της άμεσης/βραχείας διαχείρισης των συνεπειών από την εκδήλωση Ηφαιστειακής Δραστηριότητας.

Σκοπός του είναι η άμεση και συντονισμένη απόκριση των εμπλεκόμενων φορέων σε κεντρικό, περιφερειακό και τοπικό επίπεδο της Σαντορίνης για την αποτελεσματική αντιμετώπιση εκτάκτων αναγκών που θα προκύψουν από μια πιθανή εκδήλωση ηφαιστειακής

δραστηριότητας αλλά και η άμεση διαχείριση των συνεπειών της. Οι δράσεις αυτές αποβλέπουν στην προστασία της ζωής, της υγείας και της περιουσίας των πολιτών, καθώς και στην προστασία του φυσικού περιβάλλοντος, των πλουτοπαραγωγικών πηγών και των υποδομών της χώρας.

Στο σχέδιο «Τάλως» υπογραμμίζεται ότι η εκδήλωση ηφαιστειακής δραστηριότητας στο σύμπλεγμα της Σαντορίνης μπορεί να προκαλέσει:

- Τραυματισμούς
- Απώλειες ανθρώπινων ζωών
- Αίσθημα ανασφάλειας του πολίτη
- Καταστροφές στις υποδομές της χώρας
- Άμεσες και έμμεσες οικονομικές απώλειες από καταστροφές στις περιουσίες των πολιτών, στον πρωτογενή τομέα (γεωργία, κτηνοτροφία), σε διάφορες υποδομές της χώρας (δίκτυα ηλεκτρισμού, τηλεπικοινωνιών κ.λπ.), καθώς και συνέπειες στον τουρισμό εν γένει.

Το σχέδιο περιγράφει ακόμη, το ρόλο και την ευθύνη που αναλαμβάνει κάθε θεσμικός φορέας (Περιφέρεια Ν. Αιγαίου, Δήμος Θήρας, Πυροσβεστική, Αστυνομία κ.λπ.) για την ολοκλήρωση του σχεδιασμού και το σωστό συντονισμό δράσεων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Συστήματα παρακολούθησης του ηφαιστείου της Σαντορίνης

### 4.1. Ι.Μ.Π.Η.Σ.

Το 1993-1995 δημιουργήθηκε το Ηφαιστειολογικό Παρατηρητήριο και τα δίκτυα παρακολούθησης του ηφαιστείου της Σαντορίνης, χρηματοδοτούμενο από την ΕΕ. Για τη συνέχιση του έργου του ιδρύθηκε το καλοκαίρι του 1995 το Ινστιτούτο Μελέτης και Παρακολούθησης του Ηφαιστείου Σαντορίνης (Ι.Μ.Π.Η.Σ.) ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός. Ο κύριος στόχος του είναι η προώθηση της ηφαιστειακής έρευνας στο νησί και, πιο συγκεκριμένα, πώς να επιτευχθεί η ακριβέστερη δυνατή αξιολόγηση σχετικά με τα ηφαιστειακά φαινόμενα, καθώς και η αύξηση της πιθανότητας μιας ακριβούς πρόβλεψης τυχόν μελλοντικής ηφαιστειακής έκρηξης. Το Ινστιτούτο παρέχει στη Σαντορίνη ένα πλήρες σύστημα παρακολούθησης, το οποίο είναι ζωτικής σημασίας για την έγκαιρη πρόβλεψη μια πιθανής ηφαιστειακής έκρηξης και αναλαμβάνει την ευθύνη να απορρίψει τυχόν ψευδείς δηλώσεις ή φήμες σχετικά με μια αρνητική κατάσταση του ηφαιστείου.



Εικόνα 57: Εργασίες για την παρακολούθηση του ηφαιστείου [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ.]

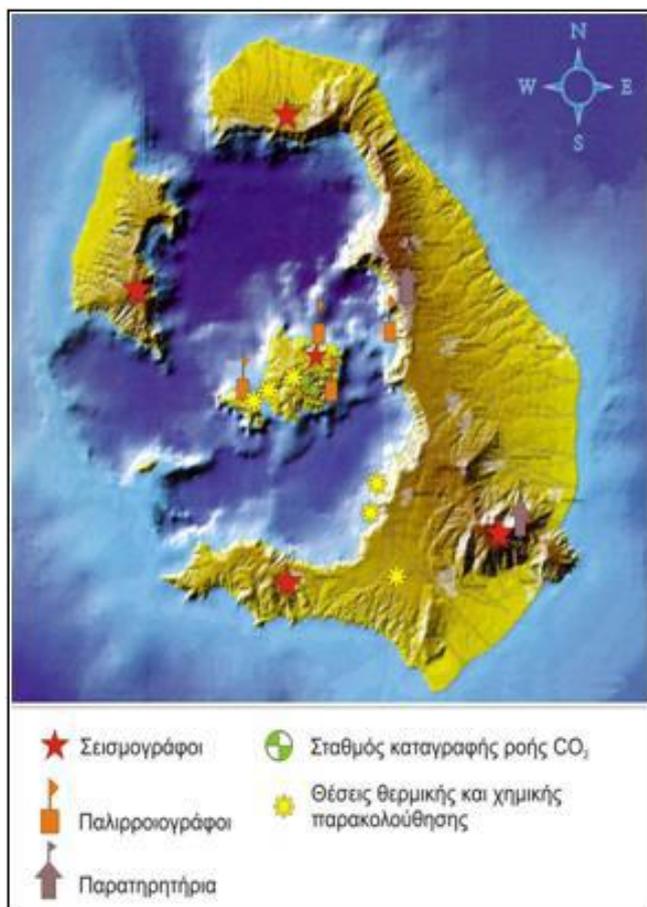
Τα άτομα που δραστηριοποιούνται είναι καθηγητές και ερευνητές από το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, το Πανεπιστήμιο Πατρών, το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών. Επιπλέον, μεταξύ των ιδρυτικών μελών του, το Ι.Μ.Π.Η.Σ. περιλαμβάνει την πλειοψηφία των

Ελλήνων επιστημόνων που συμμετείχαν στο Ηφαιστειολογικό Παρατηρητήριο της Ε.Ε., μέλη των πολιτικών αρχών της Σαντορίνης και μέλη του κοινού που ενδιαφέρονται για τα ηφαιστειακά φαινόμενα της ομάδας της Σαντορίνης. Αποτελείται από ένα 7-μελές Διοικητικό Συμβούλιο καθώς και από μία 5-μελής Επιστημονική Επιτροπή ενώ υπάρχουν και 85 ενεργά μέλη όπου η βοήθειά τους είναι σημαντική.

Στο Ι.Μ.Π.Η.Σ. δόθηκε οικονομική υποστήριξη από τον Δήμο Θήρας και κατά περιόδους από την Περιφέρεια Ν. Αιγαίου, το Υπουργείο Αιγαίου, τη Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας, τους τοπικούς φορείς, την Τράπεζα Πειραιώς, και από τον Ο.Α.Σ.Π..

Υπάρχει βέβαια και γενική υποστήριξη από Τοπικά Ιδρύματα και Αρχές (π.χ. Ίδρυμα Θήρας, Ίδρυμα Λουκά και Ευάγγελου Μπελλώνια, Ένωση Λεμβούχων Σαντορίνης, ιδιώτες, κλπ.).

Για την επίτευξη του στόχου του, το Ινστιτούτο διαθέτει 5 δίκτυα παρακολούθησης, χημικό, σεισμικό, θερμικό, γεωδαιτικό και θαλάσσιας στάθμης ενώ υπάρχουν και δύο μικρά παρατηρητήρια σε συνεργασία με το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, την Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΕΑΓΜΕ).



Εικόνα 58: Συστήματα παρακολούθησης στη Σαντορίνη [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ.]

Στην Εικόνα 59 απεικονίζονται με μεγαλύτερη ευκρίνεια οι μέθοδοι λήψης των απαραίτητων δεδομένων για τη ηφαιστειακή παρακολούθηση του νησιού. Πιο αναλυτικά με κόκκινους κύκλους αναπαριστώνται οι σεισμολογικοί σταθμοί, με μπλε καρφίτσες οι σταθμοί GNSS, με τετράγωνο ο σταθμός CO<sub>2</sub> και με πορτοκαλί κύκλους οι σταθμοί θερμικής παρακολούθησης.



Εικόνα 59: Τοπικό Μόνιμο Δίκτυο παρακολούθησης του Ι.Μ.Π.Η.Σ. [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ.]

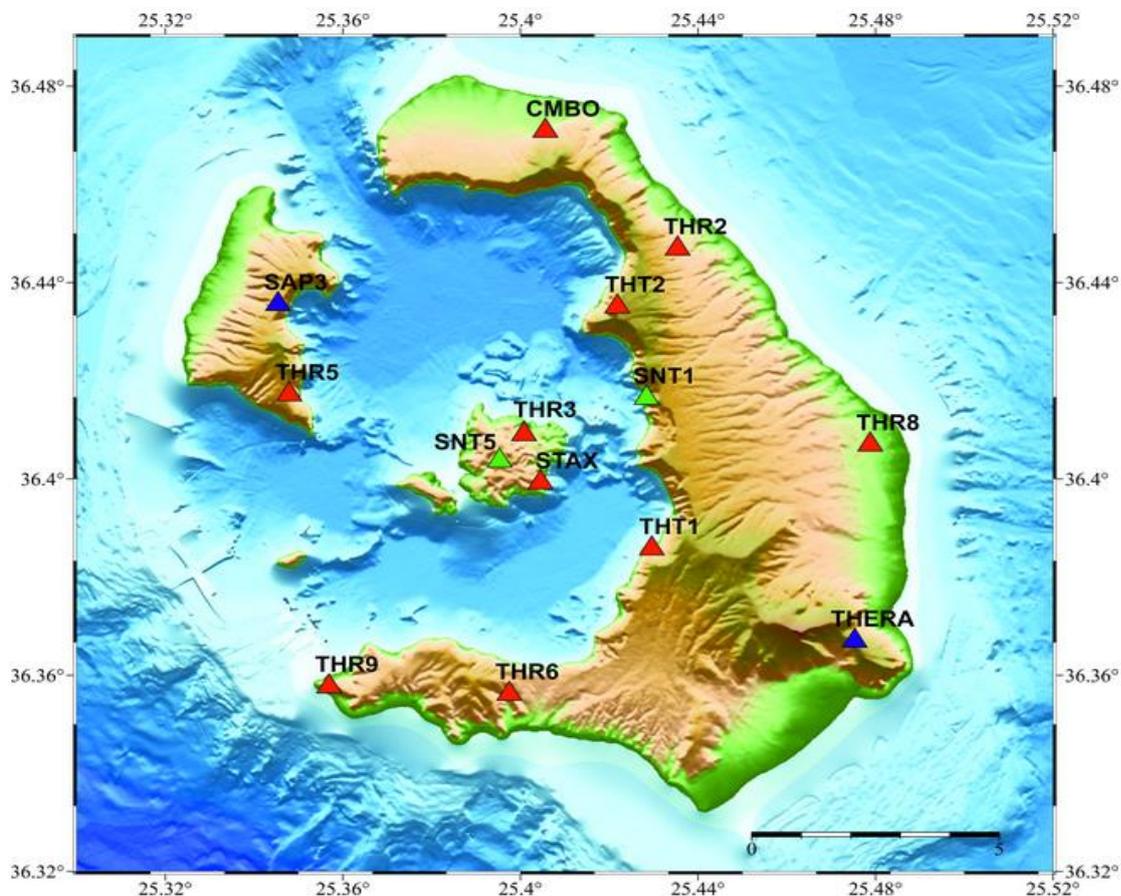
## 4.2. Σεισμική παρακολούθηση

Η μακροχρόνια διεθνής εμπειρία σε ενεργά ηφαίστεια έχει δείξει ότι η πιο αποτελεσματική μέθοδος παρακολούθησής τους είναι η σεισμική. Οι μικροσεισμοί που προκαλούνται κατά την άνοδο του μάγματος στην επιφάνεια μπορούν να καταγραφούν με μεγάλη ακρίβεια από σειсмоγράφους ενός ειδικά σχεδιασμένου τοπικού δικτύου. Η ακριβής θέση των εστιών των μικροσεισμών και ο προσδιορισμός της πιθανής μετανάστευσής τους καθιστούν δυνατή ανά πάσα στιγμή την εκτίμηση της θέσης του ανερχόμενου μάγματος στο δρόμο του προς την επιφάνεια, της ταχύτητας ανόδου και της πιθανής θέσης εξόδου του πολύ πριν από την έκρηξη. Αυτό επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση και τη λειτουργία ενός μόνιμου δικτύου σεισμολογικών σταθμών με επαρκή αριθμό σειсмоγράφων σε επιλεγμένα σημεία στην ευρύτερη περιοχή των ηφαιστειών.



Εικόνα 60: Σεισμογράφοι για την παρακολούθηση του ηφαιστείου της Σαντορίνης [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ.]

Στη Σαντορίνη υπάρχουν 10 μόνιμοι σεισμικοί σταθμοί οι οποίοι απεικονίζονται με τρίγωνα κόκκινου χρώματος στον χάρτη της Εικόνας 61 και λειτουργούν σε συνεργασία του Ι.Μ.Π.Η.Σ. και του Σεισμολογικού Σταθμού του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Επιπλέον υπάρχουν άλλοι δύο σεισμολογικοί σταθμοί στην περιοχή που λειτουργούν από το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και ακόμη δύο από το Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών που στον χάρτη της Εικόνας 61 αναπαριστώνται με μπλε και πράσινα τρίγωνα αντίστοιχα.



Εικόνα 61: Σεισμολογικό δίκτυο Σαντορίνης [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ.]



Εικόνα 62: Σεισμολογικός σταθμός THR6 του δικτύου του ΙΜΠΗΣ που είναι εγκατεστημένος στην περιοχή του Ακρωτηρίου [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ.]

Η μετάδοση των δεδομένων από τους σεισμολογικούς σταθμούς γίνεται σε πραγματικό χρόνο (real time). Η ανάλυση και ερμηνεία των δεδομένων είναι άμεση καθώς το σύνολό τους ψηφιοποιείται και μεταδίδεται μέσω ψηφιακής κεραίας στο κεντρικό κτίριο του Ι.Μ.Π.Η.Σ.. Τα καταγεγραμμένα δεδομένα, τα οποία αποτελούν ένα από τα κύρια εργαλεία για τη σωστή και συνεχή παρακολούθηση του ηφαιστείου της Σαντορίνης, μεταδίδονται στον Κεντρικό Σεισμολογικό Σταθμό του Εργαστηρίου Γεωφυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, σε πραγματικό χρόνο, μέσω ADSL σύνδεσης. Για λόγους ασφαλείας υπάρχει επίσης ένας σταθμός μετάδοσης μέσω δορυφόρου εγκατεστημένος στη θέση του σεισμολογικού σταθμού CMBO. Στη Θεσσαλονίκη, πραγματοποιείται συνεχής επεξεργασία των σεισμολογικών δεδομένων όλο το 24ωρο από τους σεισμολόγους του Εργαστηρίου Γεωφυσικής του Α.Π.Θ. ([http://geophysics.geo.auth.gr/ss/station\\_index.html](http://geophysics.geo.auth.gr/ss/station_index.html)).

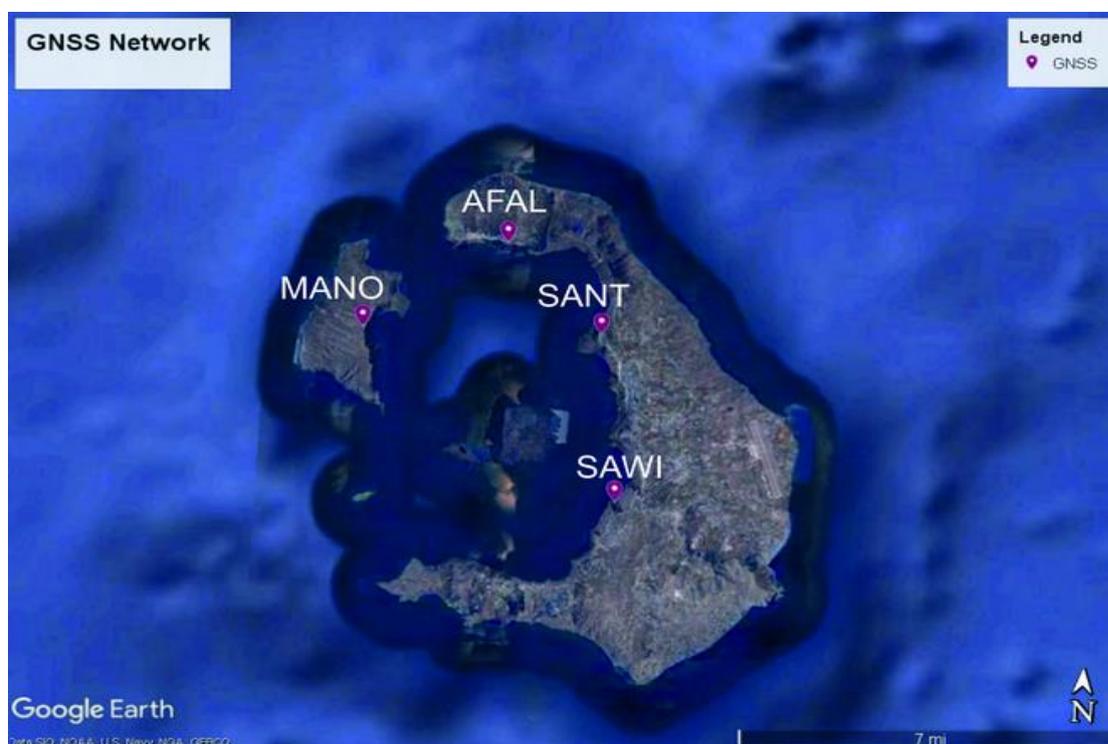


Εικόνα 63: Οικίσκος σεισμολογικού σταθμού CMBO στην περιοχή του Ακρωτηρίου Κολούμπο στη βόρεια Θήρα [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ.]

### 4.3. Γεωδαιτική παρακολούθηση

Το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS) είναι ένα παγκόσμιο σύστημα δορυφορικής πλοήγησης (GNSS) το οποίο χρησιμοποιώντας τα σήματα που μεταδίδονται από δορυφόρους GPS, μπορεί να υπολογίσει τις θέσεις των επίγειων δεκτών με υψηλή ακρίβεια, καθιστώντας δυνατή την παρακολούθηση της κίνησης των σημείων στην επιφάνεια της Γης με την πάροδο του χρόνου. Τα δεδομένα GPS παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τις υποκείμενες διεργασίες που οδηγούν σε παρατηρούμενη παραμόρφωση, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με άλλους τύπους δεδομένων.

Η ηφαιστειακή παραμόρφωση χαρακτηρίζεται συχνά από παροδικά σήματα. Το μάγμα ή τα υδροθερμικά υγρά μεταναστεύουν κάτω από το ηφαιστειακό οικοδόμημα, προκαλώντας "φούσκωμα" ή "ξεφούσκωμα" και μερικές φορές καταλήγουν σε εισχώρηση ή έκρηξη. Οι απότομες πλευρές των ηφαιστειών είναι συχνά ασταθείς, οδηγώντας σε κατολισθήσεις και σε ορισμένες περιπτώσεις κατάρρευση μεγάλων τμημάτων του οικοδομήματος. Το GPS είναι πολύ κατάλληλο εργαλείο για την παρακολούθηση αυτών των τύπων σημάτων παραμόρφωσης και πολλά από τα ηφαίστεια σε όλο τον κόσμο έχουν εγκαταστήσει δέκτες GPS για το σκοπό αυτό.



Εικόνα 64: Θέσεις μόνιμων σταθμών του GNSS δικτύου του Ι.Μ.Π.Η.Σ. στη Σαντορίνη [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ.]

Στο νέο δίκτυο του Ι.Μ.Π.Η.Σ. υπάρχουν 4 γεωλογικοί σταθμοί σύγχρονης τεχνολογίας, ένας από τους οποίους, ο σταθμός SAWI, είναι ευγενική χορηγία της εταιρείας METRICA. Οι σταθμοί χρησιμοποιούν τα παγκόσμια συστήματα λήψης γεωδαιτικών δεδομένων, GPS, GLONASS, GALILEO και BEIDOU. Στον Πίνακα 3 αναγράφονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τον τρόπο λειτουργίας κάθε μόνιμου σταθμού.

| Όνομα σταθμού | Γεωγ. Πλάτος | Γεωγ. Μήκος | Υψόμετρο (m) | Τοπωνύμιο  | Τύπος Δέκτη        | Κεραία     | Ρυθμός καταγραφής | Δορυφορικά Συστήματα       | Επικοινωνία |
|---------------|--------------|-------------|--------------|------------|--------------------|------------|-------------------|----------------------------|-------------|
| AFAL          | 36° 27'      | 25° 23'     | 196          | Οία        | Leica GRX1200GGpro | Leica AR10 | 30 sec            | GPS+Glonass                | Dynamic IP  |
| MANO          | 36° 26'      | 25° 20'     | 206          | Θηρασιά    | Leica GRX1200GGpro | Leica AR10 | 30 sec            | GPS+Glonass                | Dynamic IP  |
| SAWI          | 36° 23'      | 25° 26'     | 340          | Πύργος     | Leica GR30         | Leica AR10 | 30 sec            | GPS+Glonass+Galileo+Beidou | Dynamic IP  |
| SANT          | 36° 26'      | 25° 25'     | 370          | Ημεροβίγλι | Leica GR10         | Leica AR10 | 30 sec            | GPS+Glonass                | Dynamic IP  |

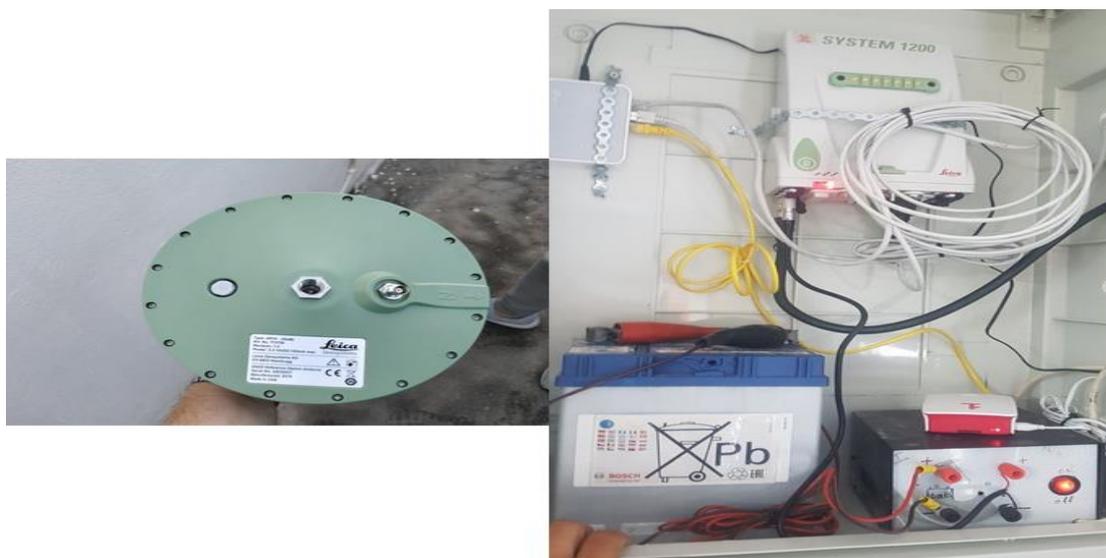
Πίνακας 3: Βασικές πληροφορίες για τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τον τρόπο λειτουργίας κάθε μόνιμου σταθμού GNSS του δικτύου του Ι.Μ.Π.Η.Σ. [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ.]

Η δυνατότητα ελέγχου από απόσταση της σωστής λειτουργίας κάθε σταθμού GNSS οδήγησε την ομάδα Επίγειας Παραμόρφωσης να εγκαταστήσει μια ηλεκτρονική συσκευή Raspberry Pi σε όλους τους GNSS σταθμούς του Ι.Μ.Π.Η.Σ.. Το Raspberry Pi είναι ένας εξαιρετικά μικρός υπολογιστής και χαρακτηρίζεται από την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία του. Κυκλοφόρησε το 2012, φτάνοντας σήμερα στις νέες εκδόσεις του, το Raspberry Pi 3 και 4, οι οποίες διατέθηκαν από το Ι.Μ.Π.Η.Σ.. Διαθέτει τετραπύρρηνο επεξεργαστή ARM στα 1,5GHz, 16 GB RAM, 4 θύρες USB 2.0 και HDMI. Έτσι, μπορεί να συνδεθεί σε τηλεόραση / οθόνη και τυπικά περιφερειακά, επιτρέποντας την περιήγηση στο διαδίκτυο και τον έλεγχο απομακρυσμένης μεταφοράς δεδομένων.

Σε όλα τα σύγχρονα υψηλής τεχνολογίας δίκτυα παρακολούθησης της επίγειας παραμόρφωσης και ειδικά για τη μέτρηση υψηλής ακρίβειας των επίγειων αποκλίσεων στις 3 διαστάσεις του χώρου, εκτός από τη σωστή εγκατάσταση των μηχανημάτων λήψης δεδομένων απαιτείται, η πολύ καλή ποιότητα των εισερχόμενων σημάτων. Εφαρμόζοντας το λογισμικό ελέγχου των σταθμών GNSS που χρησιμοποιούνται διεθνώς, η επιστημονική ομάδα του Ι.Μ.Π.Η.Σ. πραγματοποιεί έλεγχο ποιότητας δεδομένων για όλους τους σταθμούς GNSS του

μόνιμου δικτύου του. Επίσης, τα δεδομένα από όλους τους σταθμούς υποβάλλονται σε επεξεργασία σε τακτά χρονικά διαστήματα χρησιμοποιώντας διάφορα λογισμικά που είναι εγκατεστημένα στον διακομιστή της ερευνητικής ομάδας στο Α.Π.Θ.. Μετά τον αρχικό έλεγχο ποιότητας των δεδομένων, ακολουθεί το στάδιο ανάλυσης και επεξεργασίας, προκειμένου να προσδιοριστεί με ακρίβεια η θέση των σταθμών χρησιμοποιώντας τον σχετικό στατικό προσδιορισμό διασφαλίζοντας την υψηλή ποιότητα της θέσης των σταθμών GNSS του δικτύου του Ι.Μ.Π.Η.Σ..

Στο πρώτο στάδιο της επεξεργασίας των δεδομένων εφαρμόζεται η τεχνική PPP (Precise Point Positioning) η οποία χαρακτηρίζεται από αρκετά καλή ακρίβεια, συνεχή κάλυψη μετρήσεων, γρήγορη διαθεσιμότητα και υψηλή λειτουργικότητα. Η συγκεκριμένη διαδικτυακή εφαρμογή μπορεί να υπολογίσει τη θέση ενός δέκτη (χρήστη) οπουδήποτε στη Γη χρησιμοποιώντας μόνο τις παρατηρήσεις του. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν χρησιμοποιούνται ως κατά προσέγγιση συντεταγμένες για την επόμενη φάση. Στο τελευταίο βήμα επεξεργασίας, η τελική λύση καθώς και η συνεχής παρακολούθηση (σε καθημερινή βάση) των συντεταγμένων των GNSS σταθμών πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας το λογισμικό Bernese GNSS (v5.2) που εκτελείται σε πλατφόρμες Linux στο Α.Π.Θ.. Μέχρι σήμερα, τα προς επεξεργασία δεδομένα διατίθενται μόνο από δορυφορικά συστήματα GPS και GLONASS. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι ψευδοαποστάσεις κώδικα και φάσης στις δύο συχνότητες. Για την επίτευξη της λύσης απαιτείται τόσο η χρήση εφημερίδων ακριβείας και διορθώσεων των δορυφορικών χρονομέτρων, όπως εξάγονται από την IGS και χρησιμοποιούνται από τις εν λόγω υπηρεσίες.

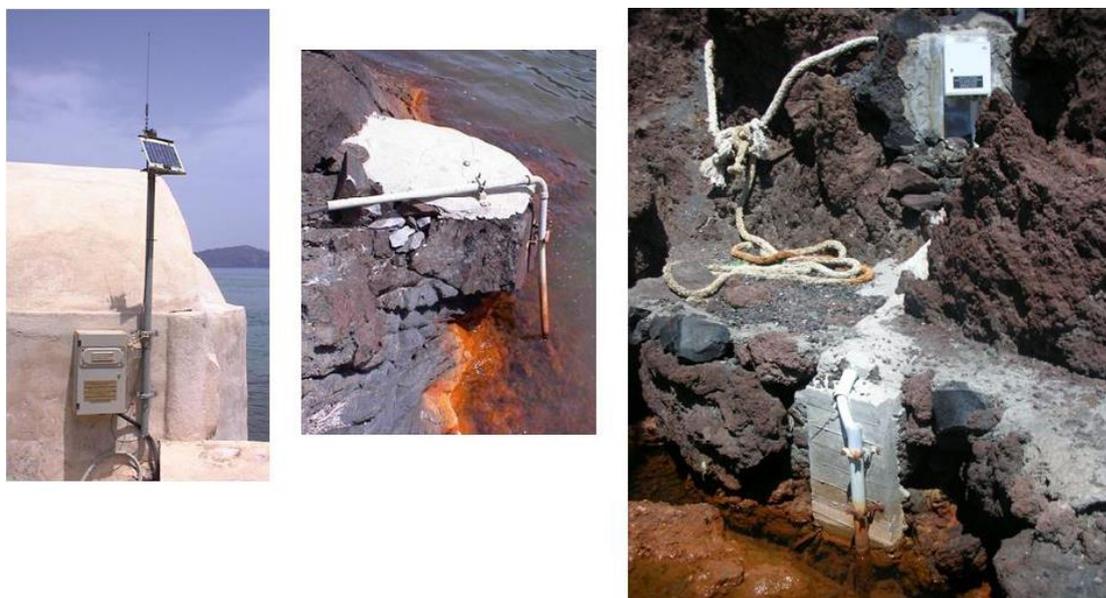


Εικόνα 65: Κεραία (αριστερά) του μόνιμου σταθμού GNSS-AFAL στην Οία και ο δέκτης και τα εξαρτήματά του (δεξιά) [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ.]

Επιπλέον υπάρχουν 19 σταθμούς για περιοδικές μετρήσεις με υπεύθυνο το Πανεπιστήμιο Πατρών και 4 σταθμοί μέτρησης της διακύμανσης της στάθμης και της θερμοκρασίας της θάλασσας σε συνεργασία με το Α.Π.Θ..



Εικόνα 66: Το δίκτυο των παλιρροιογράφων στη Σαντορίνη με 4 σταθμούς και 1 των θερμοπηγών Αγ. Νικολάου [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ.]



Εικόνα 67: Δίκτυα Παλιρροιογράφων [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ.]

#### 4.4. Χημική παρακολούθηση

Κατά τη διάρκεια της επανενεργοποίησης του ηφαιστείου, οι αέριες και οι υγρές φάσεις που αποτελούν μέρος του νέου μάγματος, φτάνουν ταχύτερα από αυτό στην επιφάνεια του εδάφους, αλλάζοντας δραστικά τη χημική σύσταση των θερμών αερίων (ατμίδων) και των υγρών (θερμές πηγές).

Η πιο άφθονη φάση αερίου, μετά το νερό, είναι το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) ενώ υψηλές ποσότητες αυτού απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα από ενεργές ηφαιστειακές περιοχές όχι μόνο κατά τη διάρκεια εκρήξεων αλλά και στις περιόδους ηρεμίας των ηφαιστειών γι' αυτό είναι αναγκαία η συνεχής καταγραφή εδαφικής ροής  $\text{CO}_2$ . Στην πιο ενεργή περιοχή της Νέας Καμένης έχει εγκατασταθεί ένας σταθμός συνεχούς παρακολούθησής του, όπου απεικονίζεται με άσπρο τετράγωνο στην Εικόνα 68. Οι πορτοκαλί κύκλοι αντιστοιχούν στους σταθμούς μέτρησης της θερμοκρασίας που έχουν τοποθετηθεί στη νήσο.



Εικόνα 68: Γεωφυσικοί-Γεωχημικοί σταθμοί του Ι.Μ.Π.Η.Σ. στη Σαντορίνη [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ.]

Οι κύριες τιμές ροής ανά ημέρα, οι οποίες καταγράφονται από τον σταθμό της Νέας Καμένης καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου παρακολούθησης, κυμαίνονται μεταξύ 5 και 50 ppm/sec, ενώ οι μέγιστες καταχωρημένες τιμές δεν υπερβαίνουν τα 150 ppm/sec. Αυτές οι τιμές θεωρούνται χαρακτηριστικές για τη χρονική περίοδο ανάπαυσης του ηφαιστείου.

Η ηφαιστειακή εκκένωση  $\text{CO}_2$  πραγματοποιείται από τους δύο ενεργούς κρατήρες, ως διάπειρα και ατμίδες αλλά και από τις πλευρές του ηφαιστείου ως διάχυτες εδαφικές εκπομπές. Επομένως, η παρατήρηση που βασίζεται στην παρακολούθηση της εδαφικής ροής

CO<sub>2</sub> μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ασφαλή απόσταση από ενεργούς κρατήρες, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό κατά τις προ-εκρηκτικές και εκρηκτικές περιόδους.

Στη Σαντορίνη, μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων μέτρησης της ροής CO<sub>2</sub>, χρησιμοποιείται η μέθοδος του θαλάμου συσσώρευσης ή η μέθοδος κλειστού θαλάμου εφόσον είναι η καλύτερη τεχνική μέτρησης των τιμών ροής CO<sub>2</sub> ηφαιστειολογικού ενδιαφέροντος, καθώς δεν απαιτεί διορθωτικό παράγοντα ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εδάφους.



Εικόνα 69: Σταθμός παρακολούθησης εδαφικής ροής CO<sub>2</sub> στη Νέα Καμένη [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ.]

Το όργανο που χρησιμοποιείται για την καταγραφή αποτελείται από:

1. Ένα θάλαμο συσσώρευσης,
2. ένα φασματοφωτόμετρο IR Drager Polytron, για τη μέτρηση του CO<sub>2</sub> στο εύρος από 0 έως 20,000 mmol/mol και
3. ένα εξειδικευμένο καταγραφικό δεδομένων: WEST System's Soil gas station.

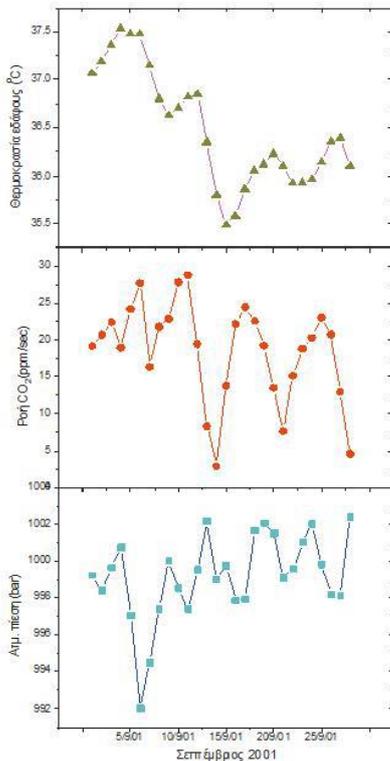
Ο θάλαμος συσσώρευσης ακουμπάει στο έδαφος 3-4 min/h. Κατά τη διάρκεια αυτών των λεπτών το αέριο εξάγεται συνεχώς από το θάλαμο, αποστέλλεται στο φασματοφωτόμετρο IR και στη συνέχεια εγχύεται ξανά στο θάλαμο. Ο τελευταίος είναι εξοπλισμένος με μια συσκευή ανάμιξης για τη βελτίωση της ανάμιξης των αερίων. Οι τιμές του CO<sub>2</sub> εντός του θαλάμου

συσσώρευσης λαμβάνονται από τον καταγραφέα δεδομένων. Το χείλος του θαλάμου έχει σχεδιαστεί για να είναι σωστά τοποθετημένο στο έδαφος ώστε να εξαλείφεται η είσοδος του ατμοσφαιρικού αέρα, ο οποίος θα μπορούσε να προκαλέσει σημαντικά σφάλματα, ειδικά τις μέρες με αέρα. Ο θάλαμος συνδέεται με την ατμόσφαιρα μέσω μιας πολύ μικρής οπής στο επάνω μέρος του για να διασφαλιστεί ότι η πίεση στο εσωτερικό του είναι πάντα ίση με την ατμοσφαιρική.

Ο σταθμός αερίου είναι ένας εξειδικευμένος καταγραφέας δεδομένων, ο οποίος μπορεί να διαβάσει έως και 24 αναλογικά σήματα και να διαχειριστεί τη μέτρηση ροής, μειώνοντας και ανυψώνοντας τον θάλαμο συσσώρευσης κάθε ώρα. Ο σταθμός αερίου τροφοδοτείται με ηλιακό πάνελ και εφεδρική μπαταρία. Το όργανο έχει σχεδιαστεί για να αντιστέκεται στη σκληρή χημική επίθεση, λόγω των θειϊκών αερίων που τυπικά συναντώνται στα ηφαιστειακά περιβάλλοντα. Τα ληφθέντα δεδομένα αποθηκεύονται τοπικά σε δίσκο τύπου SSD και μεταδίδονται στο κύριο κέντρο με σύστημα ραδιοτηλεμετρίας.

Η θέση της εγκατάστασης στην κορυφή του θόλου «Γεώργιος» στο νησάκι της Νέας Καμένης, επιλέχθηκε μετά από αρκετές χαρτογραφήσεις εδαφικών ροών που πραγματοποιήθηκε με ένα φορητό μετρητή ροής διοξειδίου του άνθρακα και αποδείχθηκε ότι ήταν η θέση με τη μέγιστη διάχυση εδαφικής ροής CO<sub>2</sub>. Οι χάρτες εδαφικής ροής CO<sub>2</sub> σε ενεργά ρήγματα και διαρρήξεις οι οποίες λειτουργούν ως οδοί ανόδου των βαθιών γεωθερμικών ή μαγματικών αερίων πλούσιων σε CO<sub>2</sub>, είναι ιδιαίτερα εμφανείς και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της συνολικής διάχυσης CO<sub>2</sub> που εξάγεται από ολόκληρο το σύστημα. Επιπλέον, αυτοί οι χάρτες επιτρέπουν την επιλογή περιορισμένων περιοχών όπου μπορούν να πραγματοποιηθούν επαναλαμβανόμενες μετρήσεις της εδαφικής ροής CO<sub>2</sub> για τη διερεύνηση της χρονικής εξέλιξης του συστήματος.

Έχει παρατηρηθεί ότι η εδαφική ροή CO<sub>2</sub> επηρεάζεται από αλλαγές στην πίεση, όπως είναι αναμενόμενο, εάν η μεταφορά του αερίου πραγματοποιείται κυρίως μέσω απορρόφησης. Άλλες μετεωρολογικές παράμετροι όπως η βροχή, η θερμοκρασία του εδάφους και του αέρα και η υγρασία μπορεί να επηρεάσουν τις συγκεντρώσεις σε εδαφικά αέρια και σε ροές. Επομένως, η παρακολούθηση της ροής CO<sub>2</sub> για την ηφαιστειακή παρακολούθηση πρέπει να περιλαμβάνει την απόκτηση μετεωρολογικών δεδομένων. Για το λόγο αυτό, η συσκευή συνεχούς παρακολούθησης είναι εξοπλισμένη με βαρομετρικό μανόμετρο, ανιχνευτή θερμοκρασίας εδάφους και μετρητή θερμοκρασίας αέρα.



**Συνεχής μέτρηση ροής διοξειδίου, θερμοκρασίας εδάφους και ατμ. πίεσης**



Εικόνα 70: Ενδείξεις μετρήσεων ροής CO<sub>2</sub>, θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ.]

#### 4.5. Θερμική παρακολούθηση

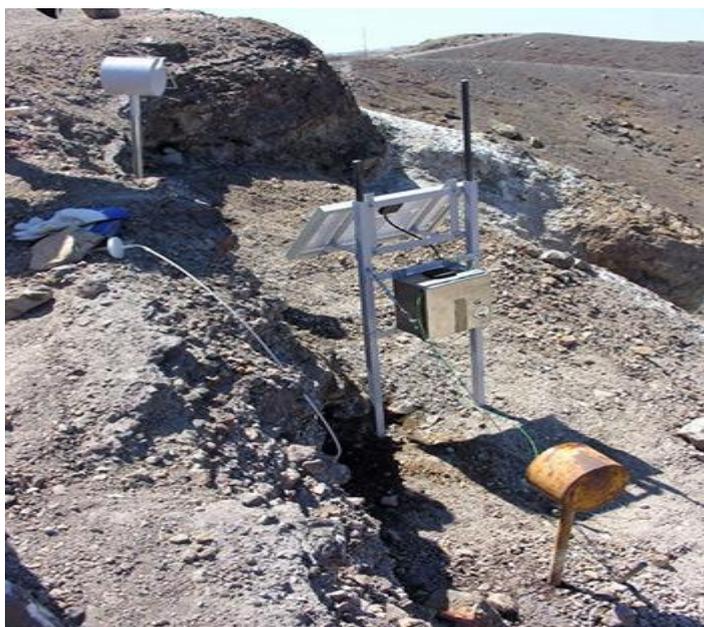
Η θερμοκρασία είναι μία από τις φυσικές παραμέτρους ενός ηφαιστείου που καταγράφουν χαρακτηριστική αύξηση κατά τις περιόδους επανενεργοποίησης και επομένως αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία ενός ολοκληρωμένου συστήματος παρακολούθησης. Στη Σαντορίνη πραγματοποιείται συνεχής καταγραφή της θερμοκρασίας των ατμίδων της Νέας Καμένης και της θερμοκρασίας του εδάφους στην περιοχή μέτρησης ροής CO<sub>2</sub>, καθώς και στη θερμή πηγή της Παλαιάς Καμένης (όρμος Αγ. Νικολάου). Επιπλέον καταγράφεται περιοδικά η θερμοκρασία (3-4 φορές ετησίως) για τις θερμές πηγές της Νέας Καμένης (όρμος Αφροέσσας) και της Θήρας (Πλάκα, Άθερμης Χριστού), καθώς στη βαθιά γεώτρηση του Ε.Α.Γ.Μ.Ε. στη νότια Θήρα. Οι ατμίδες συγκεντρώνονται στην κορυφή και στην ανατολική πλευρά του θόλου του Γεωργίου, που χτίστηκε κατά τη διάρκεια της ηφαιστειακής δραστηριότητας του 1866-1870, και κυρίως στο ανατολικό χείλος δύο υδροθερμικών αεραγωγών ("διπλή εκρηκτική χοάνη") που σχηματίστηκε τον Αύγουστο του 1940, κατά τη διάρκεια της ηφαιστειακής δραστηριότητας του 1939-1940.

Τα θερμά αέρια έχουν θερμοκρασία που κυμαίνεται από 60°C έως 90°C, η οποία εξαρτάται κυρίως από το υψόμετρο (οι θέσεις με μεγαλύτερο υψόμετρο καταγράφουν την υψηλότερη

θερμοκρασία). Η μέγιστη καταχωρημένη θερμοκρασία στη Νέα Καμένη παρουσιάζει μια διακύμανση περίπου 3°C (94°C~97°C).

Κατά μήκος των ακτών της Παλαιάς και της Νέας Καμένης υπάρχουν πολλές διαρροές θερμού ύδατος. Οι σημαντικότερες είναι δύο θερμές πηγές στην ανατολική και δυτική ακτή του ισθμού μεταξύ Νέας και Παλαιάς Καμένης, κατά μήκος της ενεργού τεκτονικής γραμμής της Καμένης. Οι μέγιστες καταγεγραμμένες θερμοκρασίες που καταγράφονται εδώ είναι 34°C για τις θερμές πηγές του όρμου Νέας Καμένης Αφροέσσας και 38°C για τον όρμο της Παλαιάς Καμένης του Αγίου Νικολάου. Η θερμοκρασία παρουσιάζει διακυμάνσεις 2 ~ 3°C ανάλογα με τις μετεωρολογικές συνθήκες (εποχή, άνεμος, παλίρροια, ρεύματα). Μια βαθιά γεώτρηση (~220m) που πραγματοποιήθηκε στην Παλαιά Καμένη κοντά στη θερμή πηγή με στόχο τη μελέτη του υδροθερμικού συστήματος της περιοχής κατέγραψε μέγιστη θερμοκρασία 29°C σε βάθος 8 - 10m.

Στο νησί της Θήρας οι θερμές εκδηλώσεις βρίσκονται στα δυτικά και νότια περιθώρια του προηφαιστειακού υποβάθρου όπου υπάρχουν τρεις κύριες θερμές πηγές: η Πλάκα (μέση θερμοκρασία 33.6°C), η Άθερμη Χριστού (μέση θερμοκρασία 56°C) στις κεντρικές-ανατολικές ακτές των πλαγιών της καλδέρας και η θερμή πηγή Βλυχάδα (μέση θερμοκρασία 33.2°C) στη νότια ακτή του νησιού. Και οι τρεις θερμές πηγές εκρέουν στην παραλία. Μια βαθιά εξερευνητική γεώτρηση του Ε.Α.Γ.Μ.Ε. στην περιοχή της Αγίας Άννας στη νότια Θήρα, συναντά έναν θερμό υδροφορέα με σταθερή μέγιστη θερμοκρασία 52.2°C σε βάθος 365m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.



Εικόνα 71: Σταθμοί θερμικής παρακολούθησης της μέγιστης θερμοκρασίας των ατμίδων της Νέας Καμένης [Πηγή Ι.Μ.Π.Η.Σ.]

## 4.6. Τηλεμετρικό δίκτυο παρακολούθησης

Από την άνοιξη του 2006, το Εργαστήριο Γεωδαισίας και Γεωδαιτικών Εφαρμογών του Πανεπιστημίου Πατρών, σε συνεργασία με ερευνητική ομάδα του Πανεπιστημίου GeorgiaTech (συνεργάτης Dr A. Newman) και της UNAVCO (Διαπανεπιστημιακού consortium Πανεπιστημίων των ΚΠ.Α. του οποίου το Εργαστήριο Γεωδαισίας Παν. Πατρών, είναι αλλοδαπό μέλος), ανέλαβε το έργο της εγκατάστασης τηλεμετρικού δικτύου GPS με σκοπό την παρακολούθηση των μετακινήσεων του ηφαιστείου της Σαντορίνης. Το έργο εντάχθηκε στο ερευνητικό πρόγραμμα ΠΕΝΕΔ 2003 και χρηματοδοτείται από τη ΓΓΕΤ (Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας) και το Ι.Μ.Π.Η.Σ..

Το δίκτυο αποτελείται από τρεις μόνιμους σταθμούς GPS, καθένας από αυτούς έχει δυνατότητα συνεχούς και ακριβούς προσδιορισμού των συντεταγμένων του. Η μελέτη των συνεχών και μακροχρόνιων καταγραφών των συντεταγμένων κάθε σταθμού παρέχουν αποτελέσματα για πιθανές μετακινήσεις του ηφαιστείου οι οποίες οφείλονται σε ροές λάβας. Στη συνέχεια αναγράφονται οι τρεις σταθμοί και τα στοιχεία αυτών.

- Κεντρικός σταθμός:

Όνομασία: NOMI

Τοποθεσία: Φύρα – Σαντορίνης (Συνεδριακό Κέντρο «Νομικός»)

Τροφοδοσία: Μόνιμη εγκατάσταση παροχής ρεύματος

Μετρήσεις: Αποθηκεύονται σε δέκτη και μέσω router διοχετεύονται στο Internet

Εγκατάσταση και έναρξη λειτουργίας: Μάιος 2006

- Περιφερειακός Σταθμός 1:

Όνομασία: KERA

Τοποθεσία: Θηρασιά

Τροφοδοσία: Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στοιχείων. Τις περιόδους με χαμηλή ηλιοφάνεια παρουσιάζει διακοπές στις μετρήσεις.

Μετρήσεις: Αποθηκεύονται σε δέκτη και μέσω ραδιοζεύξης (radiolink) αποστέλλονται στον κεντρικό σταθμό απ' όπου διοχετεύονται στο Internet

Εγκατάσταση και έναρξη λειτουργίας: Μάιος 2006

- Περιφερειακός Σταθμός 2:

Όνομασία: ΡΚΜΝ

Τοποθεσία: Παλαιά Καμμένη

Τροφοδοσία: Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στοιχείων. Τις περιόδους με χαμηλή ηλιοφάνεια παρουσιάζει διακοπές στις μετρήσεις.

Μετρήσεις: Αποθηκεύονται σε δέκτη και μέσω ραδιοζεύξης (radiolink) αποστέλλονται στον κεντρικό σταθμό απ' όπου διοχετεύονται στο Internet

Εγκατάσταση και έναρξη λειτουργίας: Η εγκατάσταση του σταθμού πραγματοποιήθηκε το Μάιο του 2006, αλλά λόγω ορισμένων προβλημάτων που προέκυψαν, ο σταθμός άρχισε να λειτουργεί τον Ιούνιο του 2008.

Περισσότερες πληροφορίες για τη λειτουργία του δικτύου διατίθενται στην ιστοσελίδα της UNAVCO.



Εικόνα 72: Τηλεμετρικό δίκτυο GPS για την παρακολούθηση του ηφαιστείου της Σαντορίνης. Α) Κεντρικός σταθμός, Β) Περιφερειακός σταθμός 1, Γ) Περιφερειακός σταθμός 2 [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ.].

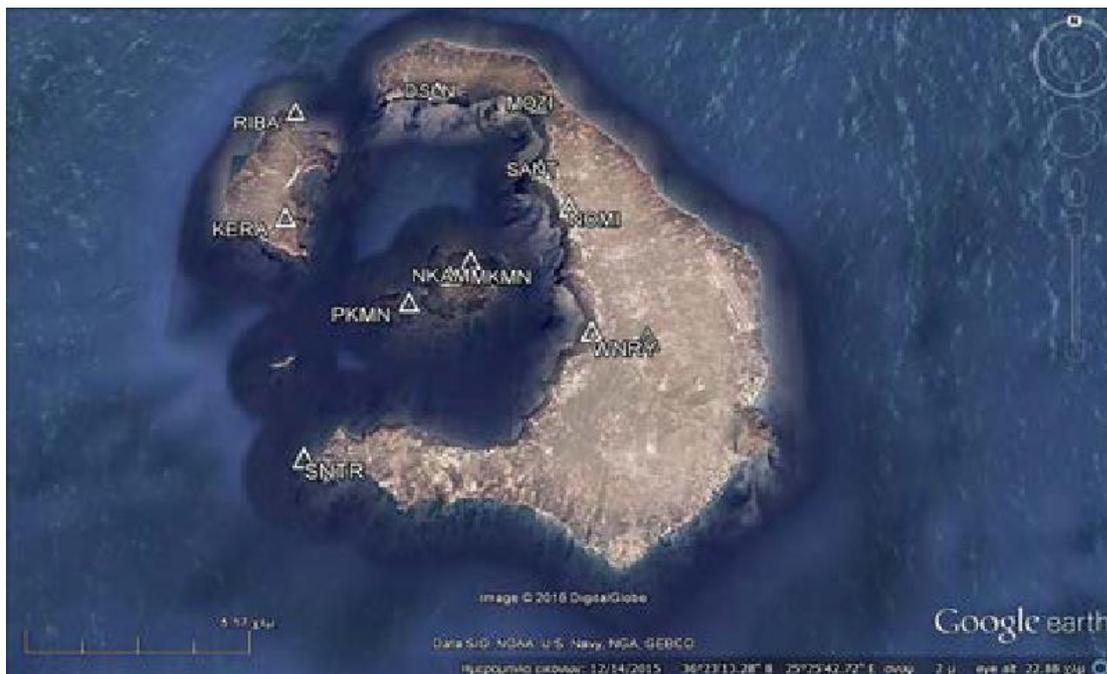
Διάφορα ιδρύματα έχουν εγκαταστήσει μόνιμους σταθμούς GPS στην περιοχή της Σαντορίνης, οι οποίοι τον Σεπτέμβρη του 2012 έφταναν το αριθμό των 11. Αυτό το αρκετά πυκνό δίκτυο τοποθετήθηκε κατά το μεγαλύτερο μέρος μετά τα μέσα του 2011 καθώς από τις αρχές του

2011 υπήρχαν ενδείξεις αφύπνισης του ηφαιστείου της Σαντορίνης. Πιο συγκεκριμένα οι σταθμοί SNTR, MKAM και SANT τοποθετήθηκαν από τον Τομέα Γεωφυσικής και Γεωθερμίας του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (ΕΚΠΑ), οι DSLN και WNRV από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ) και η UNAVCO είχε τοποθετήσει το 2006 τους NOMI, KERA και PKMN ενώ στη συνέχεια τοποθέτησε και τους σταθμούς RIBA, MOZI και MKMN.

| A/A | ΟΝΟΜΑΣΙΑ | ΠΕΡΙΟΧΗ       |
|-----|----------|---------------|
| 1   | KERA     | ΘΗΡΑΣΙΑ       |
| 2   | MOZI     | ΘΗΡΑ          |
| 3   | NOMI     | ΘΗΡΑ          |
| 4   | RIBA     | ΘΗΡΑΣΙΑ       |
| 5   | PKMN     | ΠΑΛΑΙΑ ΚΑΜΕΝΗ |
| 6   | SANT     | ΘΗΡΑ          |
| 7   | DSLN     | ΘΗΡΑ          |
| 8   | WNRV     | ΘΗΡΑ          |
| 9   | SNTR     | ΘΗΡΑ          |
| 10  | MKAM     | ΝΕΑ ΚΑΜΕΝΗ    |
| 11  | MKMN     | ΝΕΑ ΚΑΜΕΝΗ    |

Πίνακας 4: Οι έντεκα μόνιμοι σταθμοί GPS της Σαντορίνης [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ.]

Το Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου (ΚΔΔ) και το εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαισίας του ΕΜΠ, επεξεργάζονται τα δεδομένα από αυτούς τους σταθμούς GPS από τις αρχές του 2011. Το δίκτυο είναι ενσωματωμένο στο σχήμα αυτόματης επεξεργασίας που αναπτύσσεται από το ΚΔΔ και τα αποτελέσματα αναλύονται με σκοπό την απόκτηση «εικόνας» για τα υποκείμενα γεωφυσικά φαινόμενα. Λόγω της μοναδικής δραστηριότητας της καλδέρας, είναι κρίσιμη η στενή παρακολούθηση του δικτύου. Για αυτόν τον λόγο, γίνεται μια ταχεία επίλυση συντεταγμένων κάθε 24 ώρες, που μπορεί να βρεθεί στην ιστοσελίδα του ΚΔΔ σε μορφή χρονοσειρών (Ρόζη, 2016).

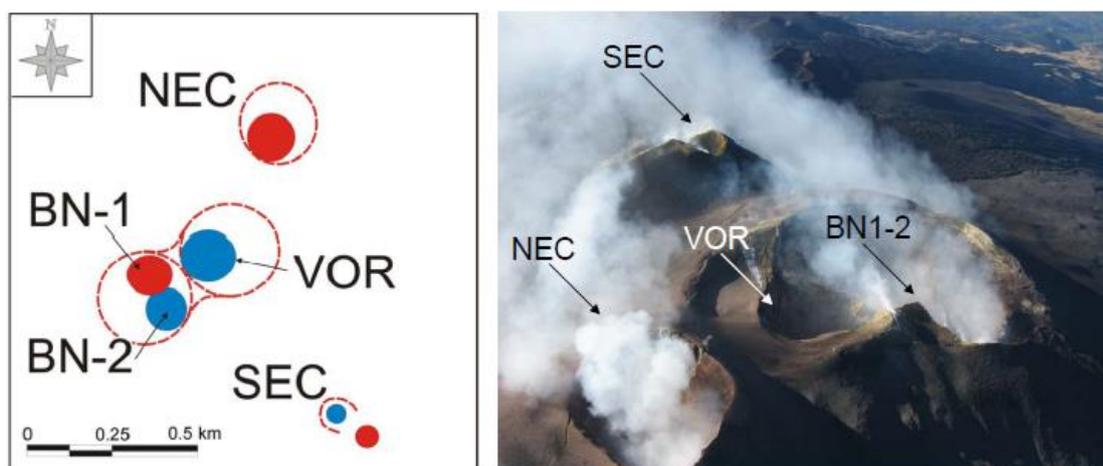


Εικόνα 73: Οι έντεκα μόνιμοι σταθμοί GPS της Σαντορίνης [Πηγή: Ι.Μ.Π.Η.Σ.]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Το ηφαίστειο της Αίτνας

### 5.1. Κύρια χαρακτηριστικά

Η Αίτνα αποτελεί ένα από τα πιο ενεργά ηφαίστεια στην Ευρώπη και βρίσκεται στην πυκνοκατοικημένη ανατολική ακτή της Σικελίας, στο νότιο τμήμα της Ιταλία. Χαρακτηρίζεται από τη σχεδόν συνεχή εκρηκτική δραστηριότητα των τεσσάρων κρατήρων της κορυφής της (NEC, SEC, VOR, BN-1 και BN-2) και από συχνές φλεβικές εκρήξεις στις πλαγιές της. Από την δραστηριότητα του ηφαιστείου το 2011 σχηματίστηκε ένας νέος κώνος στην ανατολική πλευρά του, ο Νέος Νοτιοανατολικός Κρατήρας (NSEC). Αν και οι εκρήξεις του μπορεί να είναι μερικές φορές πολύ καταστροφικές, γενικά δεν θεωρείται ιδιαίτερα επικίνδυνο και χιλιάδες κάτοικοι ζουν στις πλαγιές του ηφαιστείου και τις γύρω περιοχές.



Εικόνα 74: Αριστερά: σχηματικός χάρτης των κεντρικών κρατήρων του ηφαιστείου της Αίτνας, Βορειοανατολικός κρατήρας (NEC), Voragine (VOR), Bocca Nuova (BN-1, BN-2) και Νοτιοανατολικός κρατήρας (SEC). Οι γραμμές περιγράμματος αντιπροσωπεύουν το χείλος του κρατήρα (φωτογραφία ευγενική προσφορά του INGV-CT). Δεξιά: λήψη φωτογραφίας από τον Δ. Ανδρόνικο τον Αύγουστο του 2007 κατά τη διάρκεια της δραστηριότητας παρακολούθησης του INGV-CT με ελικόπτερα [Πηγή: Scollo et. al., 2009].

Η ονομασία Αίτνα μπορεί να προέρχεται από την ελληνική λέξη αίθω, που σημαίνει «καίγομαι», ή τη φοινικική λέξη «attano». Οι Άραβες ονόμαζαν το βουνό Gibel Utlamat, το βουνό της φωτιάς. Η ονομασία αυτή εξελίχτηκε αργότερα σε Mons Gibel κι έτσι στην τοπική διάλεκτο το ηφαίστειο ονομάζεται Mongibeddu. Για τη δημιουργία του ηφαιστείου υπάρχουν αρκετοί μύθοι. Στην Ελληνική μυθολογία, ο Αίολος είχε φυλακίσει τους ανέμους στις σπηλιές κάτω από την Αίτνα. Ο Γίγαντας Εγκέλαδος καταπλακώθηκε από το όρος Αίτνα, σύμφωνα με τον ποιητή Αισχύλο, και ήταν η αιτία των ηφαιστειακών εκρήξεων. Ένας άλλος μύθος αποδίδει την ηφαιστειακή δραστηριότητα της Αίτνας στο Γίγαντα Τυφώνα, ο οποίος είχε πολύ

μεγαλύτερη δύναμη από τα υπόλοιπα παιδιά της Γαίας ενώ το σώμα του μέχρι τη μέση έμοιαζε με άνθρωπο και το υπόλοιπο με σώμα κουλουριασμένων φιδιών. Από τα μάτια τους έβγαине φωτιά και από το στόμα τους κραυγές και συριγμοί. Όταν ο Τυφώνας μεγάλωσε ανέβηκε στον Όλυμπο για να εκδικηθεί τους θεούς επειδή αποδεκάτισαν τους Γίγαντες. Εκεί εκσφενδόνιζε βράχους και μαινόταν με οργή και εκκωφαντικές βοές, οπότε για να γλυτώσουν οι θεοί κατέφυγαν στην Αίγυπτο, όπου κρύφτηκαν μεταμορφωμένοι σε ζώα. Ύστερα από αλληπάλληλες συγκρούσεις με το Δία, ο Τυφώνας κατέφυγε τελικά στη Σικελία, όπου ο Δίας τον κεραυνοβόλησε, του πέταξε το όρος Αίτνα που τον σκέπασε ώστε να παραμείνει στα έγκατα της γης. Από τότε ο Τυφώνας οργισμένος δονεί κατά καιρούς τη γη. Σύμφωνα με τη Ρωμαϊκή μυθολογία, ο Vulcan, ο θεός της φωτιάς (αντίστοιχος με το θεό Ήφαιστο της ελληνικής μυθολογίας), είχε το εργαστήριό του κάτω από την Αίτνα και εξαιτίας των δραστηριοτήτων του προκαλούνται σεισμοί και ηφαιστειακές εκρήξεις.



Εικόνα 75: Το ηφαίστειο της Αίτνας [Πηγή: <https://www.meteorologiaenred.com/el/volcan-etna.html> (Ανάκτηση 16-1-2022)]

Το βουνό Αίτνα αποτελεί ένα σύνθετο, βασαλτικό ηφαίστειο του τεταρτογενούς και η λάβα του έχει βασικό pH, με χαμηλή περιεκτικότητα σε  $\text{Si}_2\text{O}_3$ . Τα ηφαίστεια που παράγουν αυτού του είδους τη λάβα δεν είναι πολύ εκρηκτικά. Βρίσκεται σε μία περιοχή σύνθετου γεωδυναμικού καθεστώτος, όπου μεγάλα διαρθρωτικά όρια διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις δυναμικές διεργασίες του ηφαιστείου. Καλύπτει μία έκταση περίπου  $1.190 \text{ km}^2$ , έχει διάμετρο  $140 \text{ km}$ , όγκο περίπου  $500 \text{ km}^3$  και φτάνει στο μέγιστο υψόμετρο των  $3330 \text{ m}$ . Στην κορυφή του ηφαιστείου βρίσκονται τέσσερις ενεργοί κρατήρες, ο Voragine, ο Bocca Nuova, ο Νοτιοανατολικός Κρατήρας και ο Βορειοανατολικός κρατήρας.

Επειδή ο μαγματικός θάλαμος της Αίτνας βρίσκεται βαθιά μέσα στη λιθόσφαιρα, η χημική σύσταση των πετρωμάτων σε αυτή την περιοχή μοιάζει πολύ με εκείνη του μανδύα της Γης. Η διαφορά τους έγκειται κυρίως στις αποθέσεις νατρίου και καλίου που συμβαίνουν όταν η βασαλτική λάβα περνάει στο ανώτερο στρώμα του φλοιού της γης. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τα περισσότερα έκχυτα ηφαιστειογενή πετρώματα της περιοχής αυτής αποτελούνται από ανδεσίτη.

Παρά την συνεχή εκρηκτικότητά του, πάνω από το 25% του πληθυσμού της Σικελίας ζει στις πλαγιές του ηφαιστείου της Αίτνας, το οποίο αποτελεί την κύρια πηγή εισοδήματος του νησιού, συμπεριλαμβανομένης της γεωργίας, λόγω του πλούσιου ηφαιστειακού εδάφους του και του τουρισμού. Από τη στάθμη της θάλασσας μέχρι την κορυφή του βουνού, το τοπίο και οι αλλαγές των οικοτόπων είναι εκπληκτικές, μαζί με τα πλούσια φυσικά θαύματα. Όλα αυτά καθιστούν αυτό το μέρος μοναδικό για πεζοπόρους, φωτογράφους, φυσιολόγους, ηφαιστειολόγους, πνευματική ελευθερία και λάτρεις της φύσης της γης και του παραδείσου. Η Ανατολική Σικελία εμφανίζει μεγάλη ποικιλία τοπίων, αλλά από γεωλογική άποψη, προσφέρει επίσης απίστευτη ποικιλία.

## **5.2. Τεκτονικό υπόβαθρο**

Το ηφαίστειο βρίσκεται στη σύνδεση μπροστά από την οροσειρά των Απέννινων και στις BBD-NNA ρηγματικές πτυχές της τάφρου της Μάλτας, πάνω σε αργιλώδη-αμμώδη ιζήματα Πλειόκαινου-Πλειστόκαινου. Η τάφρος της Μάλτας είναι μία περιφερειακή τεκτονική δομή που ελέγχει το νοτιοανατολικό άκρο της υφαλοκρηπίδας της Σικελίας, σηματοδοτώντας το όριο της με την λεκάνη του Ιονίου στα ανατολικά. Η τάφρος τέμνει την ακτή της Σικελίας στα ανατολικά της Αίτνας, δημιουργώντας αρκετά ενεργά ρήγματα όπως το σύστημα ρηγμάτων Timpe (Μιτουλάκη, 2015).

Τα πιο σημαντικά τεκτονικά χαρακτηριστικά του ηφαιστείου είναι εμφανή στην ανατολική και νοτιοανατολική πλευρά του, όπου υπάρχουν σαφέστερα μορφολογικές ενδείξεις των υπαρχόντων ρηγμάτων. Τα σεισμογενή ρήγματα μπορεί να σχετίζονται με την BBD-NNA τάφρο της Μάλτας η οποία αποτελεί την κύρια λιθοσφαιρική δομή στην ανατολική Σικελία, ενώ άλλα σεισμογενή ρήγματα, τα οποία όμως δεν είναι εμφανή στην επιφάνεια, μπορεί να συνδέονται με BA-NΔ, ABA-ΔNΔ συστήματα ρηγμάτων που ελέγχουν την τεκτονική εξέλιξη του βόρειου περιθωρίου του οροπεδίου των Ιβλίων (Torelli et al., 1998). Η ανατολική πλευρά του

ηφαιστείου χαρακτηρίζεται συχνά από χαμηλού εστιακού βάθους σεισμούς (<7km) και από φαινόμενο ερπυσμού κατά μήκος μερικών ρηγμάτων. Αντίθετα, η δυτική πλευρά του όρους Αίτνα, χαρακτηρίζεται συνήθως από σεισμικότητα μεγαλύτερου εστιακού βάθους (>5km) και θεωρείται ο πιο σταθερός τομέας του ηφαιστείου. Στη δυτική πλευρά, δεν υπάρχουν παρά ελάχιστα μορφολογικά στοιχεία ρηγμάτων, όπως ορισμένα μικρά τμήματα ρηγμάτων που παρατηρούνται στην νοτιοδυτική κλιτύ (ρήγμα Ragalna). Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι τα ρήγματα με μορφολογικές εκφάνσεις μπορεί να αντιπροσωπεύουν μόνο ένα μέρος των τεκτονικών δομών που παρουσιάζει η περιοχή της Αίτνας τα οποία μπορεί να έχουν καλυφθεί από ηφαιστειακά προϊόντα (Azzaro, 1999).



Εικόνα 76: Ηφαίστειο Αίτνας [Πηγή: <https://www.dw.com/en/etna-europes-highest-active-volcano/a-57675986> (Ανάκτηση 15-01-2022)]

Ορισμένες από τις κύριες τεκτονικές μορφές που βρίσκονται στο ηφαίστειο της Αίτνας είναι οι ακόλουθες:

→ Το σύστημα ρηγμάτων Mascalucia-Trecastagni (MTFS)

Το σύστημα αυτό είναι μία ασυνέχεια που αναπτύσσεται στην νότια κλιτύ του όρους Αίτνα μεταξύ των οικισμών Trecastagni και San Giovanni la Punta. Είναι μία ενεργός δομή με διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ, στην πυκνοκατοικημένη νότια κλιτύ της Αίτνας, η οποία χαρακτηρίζεται από μορφολογικά εμφανείς θραύσεις και κινήσεις κανονικού και δεξιού-πλευρικού τύπου που επηρεάζουν άμεσα τους δρόμους και τα κτήρια της περιοχής, εξαιτίας των σεισμών μικρού

εστιακού βάθους που πραγματοποιούνται και του ερπυσμού (Bonforte et al., 2012). Το ρήγμα επηρεάζεται από συνεχείς δυνάμεις με περιοδικές επιταχύνσεις που συνοδεύονται από μικρού εστιακού βάθους σεισμικότητα με τυπικά εστιακά βάθη 1-2 km. Οι Rust και Neri (1996), αναφέρουν ότι το σύστημα ρηγμάτων Trecastagni-Mascalucia είναι πιθανόν να προήλθε από διαφορικές μετακινήσεις εντός του τομέα κατάρρευσης του ηφαιστείου.

→ Το σύστημα ρηγμάτων Timpe (TFS)

Αποτελεί το σημαντικότερο δομικό χαρακτηριστικό του ηφαιστείου ενώ βρίσκονται στο βάθος του Ιονίου Πελάγους. Το ρήγμα Acireale στα νότια και το ρήγμα Moscarello στα βόρεια, αποτελούν τα κύρια στοιχεία του συστήματος ρηγμάτων Timpe. Το ρήγμα Alfio αποτελεί το βορειότερο άκρο του συστήματος. Το σύστημα αυτό συνδέεται με μικρού εστιακού βάθους σεισμούς (<7km) και με την εμφάνιση σεισμών με μεγέθους περίπου 4,5 της κλίμακας Richter (Azzaro et al., 2000).

→ Το σύστημα ρηγμάτων Pernicana (PF)

Το σύστημα αυτό αποτελεί την πιο ενεργή τεκτονική δομή της όρους Αίτνα. Έχει μία σύνθετη τεκτονική δομή με διεύθυνση Α-Δ, η οποία συνορεύει με τη βόρεια ολισθαίνουσα πλαγιά (Μιτουλάκη, 2015). Αυτό το σύστημα ρηγμάτων εκτείνεται από τα Βορειοανατολικά του ηφαιστείου προς την ακτογραμμή, σε μία απόσταση περίπου 18 km (Acocella & Neri, 2005). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, σεισμοί έντασης  $2 < M < 4,2$  και εστιακού βάθους 2-3 km μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές ζημιές στις υποδομές, καθώς και επιφανειακά ρήγματα πλευρικής παραμόρφωσης (Bonforte et al., 2007b)

→ Το σύστημα ρηγμάτων Ragalna (RF)

Βρίσκεται στην νοτιοδυτική κλιτύ του ηφαιστείου και αποτελείται από δύο δομές που συνδέονται μεταξύ τους, όπου η κύρια εκτείνεται 5 km με διεύθυνση βόρεια προς την κορυφή. Μελέτες του συστήματος αυτού στο πεδίο δείχνουν κυρίαρχες εκτατικές παραμορφώσεις, καθώς η δομή των ρηγμάτων του συστήματος είναι τριγωνική (Rust & Neri, 1996). Το ηφαίστειο χαρακτηρίζεται επίσης από μία ιδιότυπη διάταξη των εκρηκτικών φλεβών που αποκλίνουν από την ακτινική κατανομή, η οποία αποτελεί τυπικό χαρακτηριστικό της δομής των στρωματοηφαιστείων. Οι φλεβικές αυτές δομές είναι συγκεντρωμένες σε τρεις τομείς του ηφαιστείου που ονομάζονται η ΒΑ τεκτονική τάφρος, η Νότια τεκτονική τάφρος και η Δυτική τεκτονική τάφρος (Μιτουλάκη, 2015).

i) ΒΑ τεκτονική τάφρος

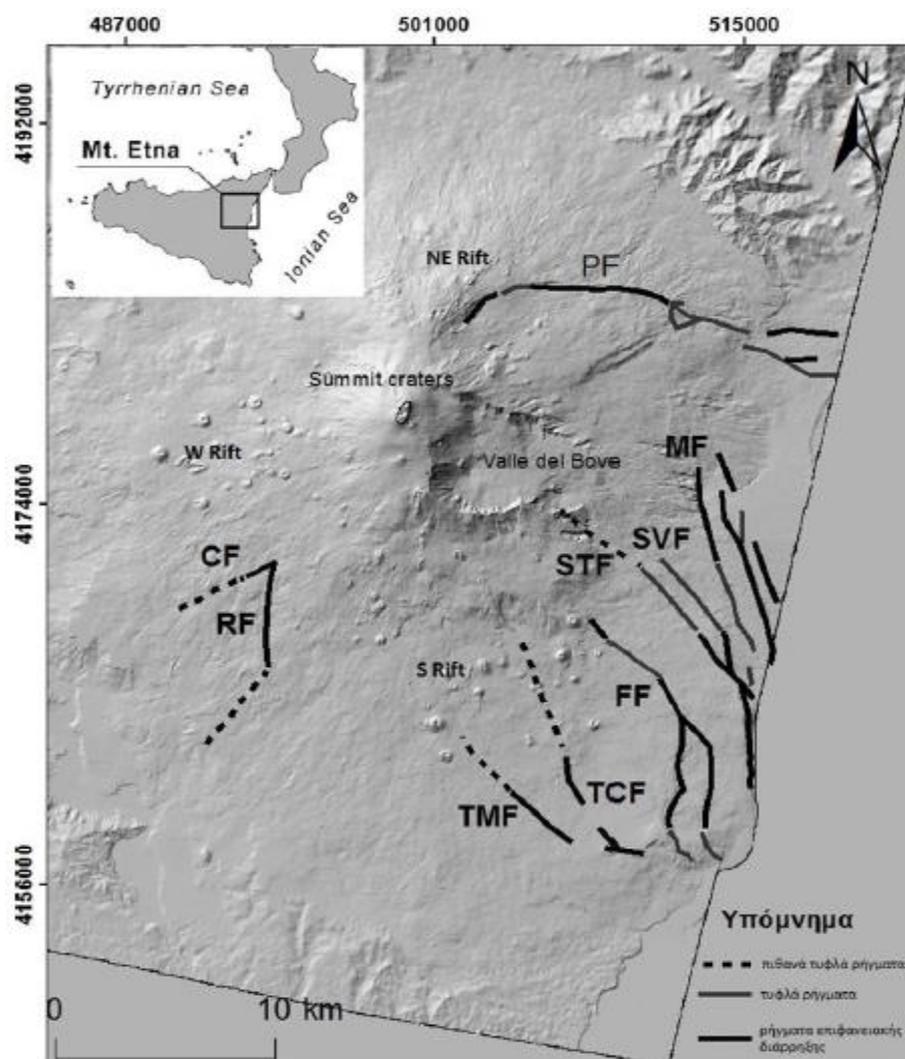
Βρίσκεται στη βορειοανατολική πλαγιά του ηφαιστείου και από την κορυφή σχηματίζει μία τοπογραφική ράχη 5km μήκους και 2km πλάτους αποτελούμενη από εκρηκτικές φλέβες, κρατήρες και πυροκλαστικούς κώνους. Το σμήνος των εκρηκτικών φλεβών έχει άξονες διασποράς που κυμαίνονται από 15°Α μέχρι 50°Α, που δείχνει μία σταδιακή στροφή προς τα δεξιά κατά μήκος του ρήγματος προς τα ΒΑ (Tibaldi & Groppelli, 2002). Η βορειοανατολική πλευρά δείχνει ένα άλλο μικρότερο πλήθος φλεβών και κώνων από τη βόρεια πλαγιά της Valle del Bove, με άξονες διασποράς που κυμαίνονται από τις 70°Α μέχρι τις 90°Α και με την κύρια τάση να είναι ΑΒΑ (Μιτουλάκη, 2015).

ii) Νότια τεκτονική τάφρος

Η νοτιοανατολική πλευρά χαρακτηρίζεται από μια διάσπαρτη κατανομή εκρηκτικών φλεβών και κώνων και στην ευρύτερη περιοχή της τάφρου βρίσκεται και το υπό μελέτη ρήγμα Trecastagni. Σε ένα τομέα εύρους πάνω από 12 km οι άξονες των φλεβών κυμαίνονται από 200°Α μέχρι 140°Α. Η κύρια ζώνη της τάφρου αναπτύσσεται από τα ΝΑ και του ΝΔ χείλους της Valle del Bove κατά μήκος μίας ΝΝΑ διεύθυνσης και στη συνέχεια συνεχίζει νοτιοανατολικά, όπως το χείλος τείνει σε μία ανατολική κατεύθυνση. Στη νότια κλιτύ του ηφαιστείου, σχηματίζονται διάσπαρτα σύνολα Β-Ν προς ΝΝΔ-ΒΒΑ φλεβικών δομών που εκτείνονται από την περιοχή Montagnola μέχρι τον οικισμό Nicolosi, σε μία απόσταση περίπου 10 km (Μιτουλάκη, 2015).

iii) Δυτική τεκτονική τάφρος

Στη δυτική πλευρά, εκρηκτικές φλέβες και κώνοι είναι κατανεμημένα περισσότερο ακτινικά, ακόμη και αν η συγκέντρωση αυτών των στοιχείων εμφανίζεται πάνω σε ένα τομέα εύρους 4,5 km ανάμεσα στις 245°Α και 280°Α σηματοδοτώντας τη λεγόμενη Δυτική τεκτονική τάφρο η οποία χαρακτηρίζεται από ΔΝΔ και Δ τάσεις του εκρηκτικού της άξονα (Μιτουλάκη, 2015).



Εικόνα 77: Ενεργά ρήγματα που έχουν χαρτογραφηθεί από σεισμοτεκτονικά δεδομένα. Συντομογραφίες ρηγμάτων: CF: Calcerana Fault, RF: Ragalna Fault, TMF: Tremestieri Fault, TCF: Trecastagni Fault, FF: Fiandaca Fault, STF: S. Tecla Fault, SLF: S. Leonardello Fault, MF: Moscarello Fault, PF: Percana Fault [Πηγή: Μιτουλάκη, 2015]

### 5.3. Γεωλογική ιστορία

Σύμφωνα με τους Branca et al. (2007), οι απαρχές της ηφαιστειακής δραστηριότητας στην περιοχή οφείλονται στην προς το βορρά μετακίνηση της Πλειο-Πλειοστοκαινικής μαγματικής πηγής των Ιβλίων. Η ηφαιστειότητα ξεκίνησε πριν από περίπου 500.000 χρόνια με υποθαλάσσιες εκρήξεις στην λεκάνη υποβύθισης Gela-Catania. Πριν από περίπου 300.000 χρόνια συνέβησαν φλεβικού τύπου εκρήξεις (κατά μήκος μίας διάρρηξης στο φλοιό) στην αρχαία προσχωσιγενή πεδιάδα του ποταμού Simeto σχηματίζοντας ένα οροπέδιο από λάβα. Πριν σχεδόν 220.000 χρόνια, εκρηκτική δραστηριότητα εντοπίζεται κυρίως κατά μήκος των ακτών του Ιονίου, όπου φλεβικού τύπου εκρήξεις οικοδομούν ένα ασπιδωτό ηφαίστειο. Περίπου 127.000 έτη πριν, η ηφαιστειακή δραστηριότητα μετατοπίζεται προς τα δυτικά, προς το κεντρικό δηλαδή τμήμα του σημερινού ηφαιστείου (Branca et al., 2007). Η αλλαγή αυτή

προκάλεσε μεταβολή στην ηφαιστειακή χημική σύνθεση, καθώς και στο είδος της ηφαιστειότητας, η οποία από φλεβική έγινε κεντρικού αγωγού και μετατοπίστηκε προς τα δυτικά. Η σταθεροποίηση του αγωγικού συστήματος του ηφαιστείου σηματοδότησε την έναρξη της κατασκευής πολυγονικών (polygenetic) οικοδομημάτων (πχ. το ηφαίστειο Trifoglietto) στην Valle del Bove από περίπου 107 με 65 χιλιάδες χρόνια πριν. Πριν 57.000 χρόνια, μια ακόμη μετακίνηση προς τα δυτικά του αγωγικού συστήματος ξεκίνησε να «χτίζει» το στρωματοηφαίστειο που αντιπροσωπεύει τον κύριο όγκο του σημερινού ηφαιστειακού οικοδομήματος της Αίτνας. Αυτό το ηφαιστειακό κέντρο φτάνει την μέγιστη επιφανειακή του κάλυψη πριν περίπου 40.000 χρόνια μέχρι και 15.000 χρόνια, όταν τέσσερις πλινιακές εκρήξεις σχηματίζουν μία μεγάλη καλδέρα, που ιστορικά ονομάζεται κρατήρας Ellittico. Η τελευταία εξελικτική φάση αυτής της διαδικασίας έλαβε χώρα κατά τη διάρκεια του Ολόκαινου, όταν η εκρηκτική δραστηριότητα συνεχίστηκε μέσα στην καλδέρα και επεκτάθηκε και έξω από αυτήν για να καλύψει τον κρατήρα Ellittico, σχηματίζοντας την ηφαιστειακή διαδοχή του παρόντος ενεργού ηφαιστειακού κέντρου (Branca et al., 2007).



Εικόνα 78: Στήλη έκρηξης που δημιουργήθηκε κατά τη δραστηριότητα της 24ης Ιουλίου 2001. Η φωτογραφία λήφθηκε κατά τη δραστηριότητα παρακολούθησης του INGV-CT [Πηγή: Scollo et. al., 2009]

## 5.4. Σεισμοτεκτονικό καθεστώς

Ο ανατολικός τομέας του ηφαιστείου, ο οποίος διασχίζεται από το σύστημα ρηγμάτων Timpe, είναι ιδιαίτερα ενεργός από άποψη σεισμικότητας, τόσο σε ότι αφορά την πληθώρα των σεισμικών γεγονότων, όσο και τη μέγιστη έντασή τους στο επίκεντρο καθώς τα ρήγματα που το αποτελούν είναι πηγή των ισχυρότερων σεισμών που έχουν καταγραφεί στους σεισμικούς καταλόγους των τελευταίων ετών. Ύστερα από παρατήρηση της συμπεριφοράς του για διάστημα περίπου 200 ετών, χαρακτηρίζεται από μέση περιοδικότητα 20 ετών για σοβαρά, καταστροφικά γεγονότα και επομένως το συγκεκριμένο σύστημα θεωρείται ιδιαίτερα σημαντικό από άποψη σεισμικής επικινδυνότητας. Τα άλλα συστήματα ρηγμάτων χαρακτηρίζονται από μέτριας έως ισχυρής έντασης σεισμούς κατά μήκος των ρηγμάτων Pernicana και Tremestieri, όπως επίσης και από μικρότερη σεισμικότητα στο νοτιοδυτικό τομέα του ηφαιστείου. Ενώ δεν διατίθενται σεισμικά αποτελέσματα για την ερημική περιοχή περίξ των ενεργών κρατήρων του ηφαιστείου, υπάρχουν δεδομένα που παρουσιάζουν μία επαναλαμβανόμενη σεισμική δραστηριότητα κατά μήκος του ρήγματος Pernicana (Alparone et al., 2012b), καθώς κατά τη διάρκεια των ηφαιστειακών εκρήξεων τα έτη 2001, 2002-2003 και 2008-2009 υπήρξαν σεισμικά σμήνη (Patane et al., 2003; Barberi et al., 2004). Το σύστημα ρηγμάτων Pernicana εκτείνεται 20 km και αποτελείται από δύο βασικά τμήματα, το δυτικό που εμφανίζεται σαν ένα πλάγιας μετατόπισης ρήγμα και το ανατολικό που παρουσιάζεται ως μία κατακερματισμένη ρηγματική ζώνη που στερείται μορφολογικής έκφρασης (Acocella & Neri, 2005). Ενώ ο κύριος μηχανισμός ενεργοποίησης του ρήγματος Pernicana είναι ακόμα υπό συζήτηση ως ενεργός ή παθητικός, είναι ευρέως αποδεκτό ότι αποτελεί την πιο ενεργή δομή του ηφαιστείου.

Όσον αφορά τα ρήγματα που δεν είναι εμφανή, μπορούν να γίνουν αντιληπτά από επιφανειακές ρωγμές μετασεισμικής μετατόπισης ή ερπυσμού αλλά γενικά αποτελούν ένα βραχυχρόνιο χαρακτηριστικό καθώς είναι ορατά μόνο αν το ίχνος του ρήγματος διασχίσει ανθρωπογενείς δομές (Azzaro, 1999).

Το σύστημα ρηγμάτων Ragalna εμφανίζεται στη ΝΔ πλευρά και αποτελείται από δύο δομές που συνδέονται στο ανερχόμενο τμήμα τους με μία ακμή που το σχήμα της μοιάζει με διασταύρωση (Rust et al., 2005). Η σημερινή δραστηριότητα χαρακτηρίζεται από ένα αξιοσημείωτο ασεισμικό ερπυσμό δεξιόστροφης μετατόπισης πλάγιας ολίσθησης και από μία μέτρια σεισμικότητα, μικρού εστιακού βάθους και μικρής έντασης ( $ML < 3,7$ ). Στην νότια

πλευρά, το σύστημα ρηγμάτων Trecastagni-Mascalucia ορίζει ένα τεκτονικό σύστημα που εκτείνεται για περίπου 10 km από το νοτιότερο άκρο της νότιας τεκτονικής τάφρου μέχρι και μερικά χιλιόμετρα δυτικά της ακτογραμμής. Παρά το γεγονός ότι τα ρήγματα δεν είναι απολυτός προσδιορισμένα από άποψη μορφολογίας χαρακτηρίζονται από σημαντική δυναμική, με πολύ μικρού εστιακού βάθους σεισμικότητα, μέτρια ένταση ( $ML < 3,7$ ) και κυρίως από ρηγματικό ερπυσμό (Azzaro, 2004).

Τα ρήγματα στη βορειοανατολική πλευρά, παρά την εντυπωσιακή μορφολογία τους, δεν εμφανίζονται ενεργά κατά τους ιστορικούς χρόνους, δεδομένης της έλλειψης σεισμικότητας ή οποιασδήποτε επιφανειακής ρηγμάτωσης.

Οι παραπάνω δομές κατέχουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στον έλεγχο των κινήσεων προς τη θάλασσα της ανατολική πλευράς του ηφαιστείου και αποτελούν δομικό όριο μεταξύ του ασταθούς τομέα προς το βορρά και του σχετικά σταθερού τομέα προς τα νότια (Solaro et al., 2010).

## **5.5. Ηφαιστειακή δραστηριότητα**

Τα τελευταία 400 χρόνια, στο ηφαίστειο της Αίτνας έχουν πραγματοποιηθεί 60 εκρήξεις, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι κρατήρες της κορυφής παρουσιάζουν συνεχή εξαερισμό και επαναλαμβανόμενη εκρηκτική δραστηριότητα στους ηφαιστειακούς πόρους του πυθμένα του κρατήρα (Branca & Del Carlo, 2004). Οι κύριοι τύποι ηφαιστειακής δραστηριότητας είναι δύο, η συνεχής δραστηριότητα των κρατήρων της κορυφής και οι περιοδικές πλευρικές εκρήξεις. Η πρώτη χαρακτηρίζεται από φάσεις εξαέρωσης που εναλλάσσονται με ήπια δραστηριότητα τύπου *strombolian*, με περιστασιακούς πίδακες και υπερχειλίσες λάβας καθώς οι κρατήρες κορυφής είναι σχεδόν συνεχώς ενεργοί. Οι πλευρικές εκρήξεις λαμβάνουν χώρα στους πλευρικούς πόρους συνήθως κατά μήκος των ρηγματικών συστημάτων και χαρακτηρίζονται από διάδοση αναχωμάτων που σχετίζονται με το άνοιγμα εκρηκτικών θραυσμάτων, γενικά προσανατολισμένο σε δύο κύριες ζώνες ρήγματος: το βορειοανατολικό (BA) ρήγμα και το νότιο (N) ρήγμα. Μετά την μεγάλη πλευρική έκρηξη των ετών 1991-1993, η Αίτνα έμεινε αδρανής μέχρι το δεύτερο εξάμηνο του 1995, όταν η εκρηκτική δράση της κορυφής της συνεχίστηκε. Από τα μέσα του 1995 έως τα μέσα του 2001, μία προοδευτική αύξηση της εκρηκτικής δραστηριότητας έλαβε χώρα, η οποία εκδηλώθηκε μέσω πιδάκων λάβας και υπερχειλίσων λάβας από πολλούς κρατήρες της κορυφής (Μιτουλάκη, 2015). Από το 2001 μέχρι το 2003 δύο μεγάλες εκρήξεις, που χαρακτηρίζονταν από ιδιαίτερα έντονη εκρηκτική

δραστηριότητα, έλαβαν χώρα στη νότια και στη βορειοανατολική κλιτύ του ηφαιστείου. Για 20 μήνες μέχρι το Σεπτέμβριο του 2004 η Αίτνα παρέμεινε ήρεμη, όταν μία έκρηξη που διέφερε σημαντικά από τις δύο προηγούμενες, ξέσπασε ουσιαστικά με έναν εξαερισμό μάγματος από δύο ηφαιστειακούς πόρους στην Valle del Bove. Ύστερα από 15 μήνες κυρίως εξαερισμού, η εκρηκτική δραστηριότητα συνεχίστηκε στην ανατολική πλευρά του NA κρατήρα στο τέλος του 2006 με δραστηριότητα τύπου strombolian, πίδακες λάβας και υπερχειλίσσεις λάβας. Κατά τη διάρκεια του 2007, παρουσιάστηκαν αντίστοιχα άλλα έξι επεισόδια έντονης δραστηριότητας. Στη συνέχεια μετά από την εμφάνιση ενός πίδακα λάβας στις 10 Μαΐου του 2008 στον NA κρατήρα, μία καινούργια έκρηξη στις 13 Μαΐου έλαβε χώρα από μία εκρηκτική φλέβα η οποία διέρρηξε την ανατολική περιοχή της κορυφής. Αυτή η έκρηξη, η οποία έληξε στις 9 Ιουλίου του 2009 χαρακτηρίστηκε από έντονη δραστηριότητα τύπου Χαβάης στην αρχή και από μία μακρά φάση σταδιακής μείωσης σε δραστηριότητα τύπου strombolian και ροών λάβας για του επόμενους μήνες (Aloisi et al., 2009). Στις 12 Αυγούστου 2011, η Αίτνα είχε τη δέκατη βίαιη αλλά σύντομη έκρηξη κατά τη διάρκεια του έτους, όπου εκτοξεύθηκε τέφρα και SO<sub>2</sub>. Αντίστοιχα και το 2012, η στήλη τέφρας που εκτοξεύθηκε ανήλθε στα 5.000 m από την επιφάνεια της θάλασσας ενώ η λάβα έρρεε από έναν κρατήρα στη νοτιοανατολική πλευρά του ηφαιστείου. Η επόμενη έκρηξη έλαβε χώρα το 2013 όπου παράχθηκε ένα σύννεφο διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>) με περιοδικό μείγμα ηφαιστειακής τέφρας ενώ σύμφωνα με δεδομένα από το μετεωρολογικό σταθμό Trapani στη Σικελία το ύψος του νέφους που δημιουργήθηκε ήταν περίπου 8 km. Το πλησιέστερο αεροδρόμιο και ο εναέριος χώρος αναγκάστηκαν να κλείσουν προσωρινά, αλλά η έκρηξη δεν απαιτούσε την εκκένωση κανενός ορεινού χωριού. Οι επόμενες εκρήξεις με μεγάλες εκχύσεις διοξειδίου του θείου και ροές λάβας πραγματοποιήθηκαν κατά σειρά τα έτη 2015, 2016, 2017 ενώ στην έκρηξη που πραγματοποιήθηκε τα Χριστούγεννα του 2018 η τέφρα και το SO<sub>2</sub> ταξίδεψαν προς τα ανατολικά σε όλη την κεντρική Μεσόγειο. Τον Δεκέμβριο του 2020 υπήρξαν αρκετοί παροξυσμοί από το ηφαίστειο, ιδιαίτερα από τις 12 Δεκεμβρίου κι έπειτα. Ο ισχυρότερος παροξυσμός που παρατηρήθηκε μέσω των δορυφορικών εικόνων ήταν στις 21 Δεκεμβρίου, η εκδήλωσή του διήρκεσε λιγότερο από δύο ώρες και η κίνηση του νέφους SO<sub>2</sub> ήταν εκτεταμένη καθώς έφτασε μέχρι την Τουρκία. Σειρά σεισμών, σημειώθηκαν από το απόγευμα της 31<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου 2020 έως το πρωί της 2<sup>ας</sup> Ιανουαρίου, κυρίως κάτω από τη νότια πλευρά του ηφαιστείου. Καταγράφηκαν σαράντα σεισμοί μεγέθους έως 3,8 Richter. Οι σποραδικές εκρήξεις συνεχίστηκαν τον Ιανουάριο του 2021 ενώ στις 24 Ιανουαρίου, μετά από πιο σποραδικές εκρήξεις, καταγράφηκαν τουλάχιστον 50 μικροί σεισμοί. Στις 16 Φεβρουαρίου 2021, η Αίτνα ξεκίνησε μια σειρά από πολύ θεαματικά

επεισόδια έκρηξης με σιντριβάνια λάβας ενώ μέρος της Σικελίας καλύφθηκε με μαύρη στάχτη. Συνολικά, οκτώ σύντομοι παροξυσμοί (με διάρκειες περίπου 2-3 ώρες) παρατηρήθηκαν από το δορυφόρο Meteosat-11 την περίοδο 16-28 Φεβρουαρίου, διοχετεύοντας αρκετή ποσότητα τέφρας και διοξειδίου του θείου στην ατμόσφαιρα. Η πρώτη από τις οκτώ εκρήξεις σημειώθηκε στις 16 Φεβρουαρίου περίπου στις 16:00 UTC (17:00 τοπική ώρα), δημιουργώντας ένα ψηλό λοφίο τέφρας που ανέβηκε σε υψόμετρο περίπου 10 km πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, σύμφωνα με αναφορές του Volcano Discovery . Το λοφίο μετακινήθηκε γρήγορα προς τα νότια οδηγούμενο από πολύ ισχυρούς βόρειους ανέμους ανώτερου επιπέδου. 32 ώρες αργότερα πραγματοποιήθηκε η δεύτερη έκρηξη όπου αυτή τη φορά οι άνεμοι μετέφεραν το νέφος SO<sub>2</sub> σε νοτιοανατολική κατεύθυνση προς τη Λιβύη ενώ το νέφος της τρίτης οδηγήθηκε ανατολικά προς την Κρήτη. Όλες οι επόμενες εκρήξεις ήταν παρόμοια γεγονότα με τις προηγούμενες. Οι εκρήξεις συνεχίστηκαν τον Μάρτιο του 2021, με πολύ τακτικά διαστήματα, φτάνοντας τον αριθμό των 12 συνολικά εκρήξεων από τις 16 Φεβρουαρίου. Αξίζει να σημειωθεί πως η Ιαπωνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (JMA), ανέφερε ότι το νέφος SO<sub>2</sub> της Αίτνας ταξίδεψε από την Ασία μέχρι την Ιαπωνία.

Στον ακόλουθο πίνακα της Εικόνας 79 αναφέρεται ενδεικτικά το χρονικό σχήμα των μεγάλων εκρήξεων που σημειώθηκαν από το 1980 μέχρι το 2018.

| Eruption (year starting) | Period                             | Type of eruption                              | Volume emitted (References)                                                                                                                          |
|--------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1981                     | March 17–23, 1981                  | Flank effusive                                | $30 \times 10^6 \text{ m}^3$ (a)                                                                                                                     |
| 1983                     | March 28–August 6, 1983            | Flank effusive                                | $80\text{--}100 \times 10^6 \text{ m}^3$ (a)                                                                                                         |
| 1985                     | March 12, 1985–July 13, 1986       | Flank effusive                                | $30 \times 10^6 \text{ m}^3$ (a)                                                                                                                     |
| 1986                     | October 30, 1986–March 1, 1987     | Flank effusive                                | $57 \times 10^6 \text{ m}^3$ (a)                                                                                                                     |
| 1989                     | September 27, 1989–October 9, 1989 | Flank effusive                                | $26 \times 10^6 \text{ m}^3$ (a)                                                                                                                     |
| 1991                     | December 14, 1991–March 31, 1993   | Flank effusive                                | $231 \times 10^6 \text{ m}^3$ (a)                                                                                                                    |
| 2000–2001                | 2000–2001                          | Strong and frequent summit explosive activity | January–August 2000: 66 lava fountains, $47 \times 10^6 \text{ m}^3$ (b)<br>January–July 2001: 16 lava fountains, $58.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ (b) |
| 2001                     | July 17,–August 10, 2001           | Flank effusive + explosive                    | $30 \times 10^6 \text{ m}^3$ (b)                                                                                                                     |
| 2002                     | October 26, 2002–January 29, 2003  | Flank effusive + explosive                    | $57.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ (b)                                                                                                                   |
| 2004                     | September 7, 2004–March 8, 2005    | Flank effusive                                | $64 \times 10^6 \text{ m}^3$ (b)                                                                                                                     |
| 2006                     | July 14, 2006–December 15, 2006    | Flank effusive                                | $39 \times 10^6 \text{ m}^3$ (b)                                                                                                                     |
| 2008                     | May 13, 2008–July 7, 2009          | Flank effusive                                | $68 \times 10^6 \text{ m}^3$ (b)                                                                                                                     |
| 2011–2014                | 2011–2014                          | Strong and frequent summit explosive activity | January–December 2013: 44 lava fountains plus July–August 2014 summit lava flows, $147 \times 10^6 \text{ m}^3$ (c)                                  |
| 2018                     | December 24–27, 2018               | Flank effusive                                | $\sim 3 \times 10^6 \text{ m}^3$ (d)                                                                                                                 |

Εικόνα 79: Πίνακας κύριων και πλευρικών εκρήξεων που εξέπεψαν μεγάλους όγκους λάβας το χρονικό διάστημα 1981 – 2018 [Πηγή: Bonaccorso et. al., 2021].

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συστήματα παρακολούθησης του ηφαιστείου της Αίτνας**

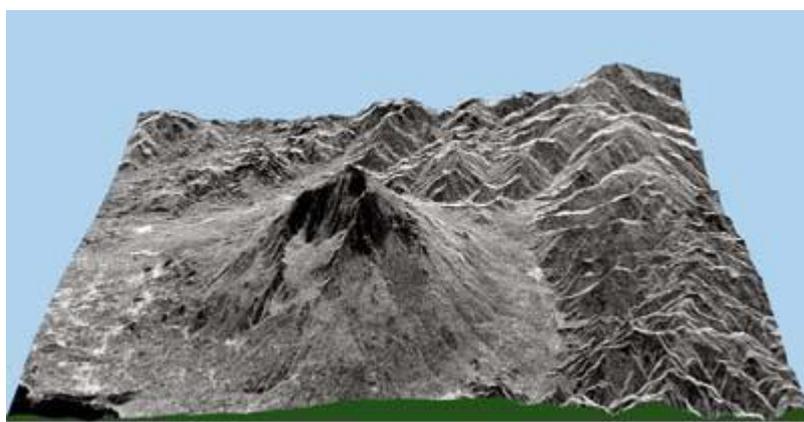
Περίπου ένα εκατομμύριο άνθρωποι ζουν στις πλευρές του ηφαιστείου και χιλιάδες τουρίστες, ειδικά το καλοκαίρι, επισκέπτονται την περιοχή της κορυφής του. Ίσως καλύτερα από άλλους, αυτοί οι δύο παράγοντες από μόνοι τους δείχνουν πόσο σημαντική είναι η παρακολούθηση της ροής της λάβας για σκοπούς μετριασμού του κινδύνου και Πολιτικής Προστασίας.

### **6.1. Παρακολούθηση ροής λάβας**

Ο στόχος του Χαρτογραφικού Εργαστηρίου (MAP-LAB) του Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Etneo – Sezione di Catania (INGV-OE) είναι να παρακολουθεί τις ενεργές ροές λάβας και να παρέχει προειδοποιήσεις για τους ανθρώπους που ζουν στη κατωφέρεια από εκρήξεις αεραγωγών. Οι βασικές μέθοδοι για την παρακολούθηση των ενεργών ροών λάβας περιλαμβάνουν (i) επίγεια παρατήρηση, (ii) αναλύσεις επίγειων, εναέριων και δορυφορικών εικόνων, (iii) συλλογή δειγμάτων λάβας για πετροχημικές αναλύσεις και (iv) μετρήσεις θερμοκρασίας (Andronico et al., 2005; Corsaro et al., 2017).

Αρχικά η δραστηριότητα χαρτογράφησης MAP-LAB εκτελούνταν χρησιμοποιώντας δεδομένα που συλλέχθηκαν από το πεδίο. Συγκεκριμένα τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια, πραγματοποιήθηκαν επίγειες έρευνες GPS. Το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS) πλέον χρησιμοποιείται ευρέως τοποθετώντας δύο ή περισσότερους δέκτες GPS είτε μόνιμα ή για τη διάρκεια μιας έρευνας στις τοποθεσίες ενδιαφέροντος και ο χρήστης μπορεί να αποκτήσει x, y και z συντεταγμένες για κάθε θέση με ακρίβεια εκατοστού ή ακόμη και υπο εκατοστών οριζόντια και κάθετα. Οι παραδοσιακές γεωδαιτικές τεχνικές δεν είναι κατάλληλες για συνεχείς παρατηρήσεις, αλλά τα GPS παρέχουν αυτή τη δυνατότητα. Μελέτες σκοπιμότητας για την δυνατότητα χρήσης μόνιμα σταθερών δεκτών κατάλληλων για την αυτόματη παρακολούθηση δορυφόρων, καταγραφή και μετάδοση δεδομένων για αυτόματη επεξεργασία και αποθήκευση ξεκίνησε στην Αίτνα το 1988 (Rymer et al. 1998). Η τεχνολογία GPS βελτιώθηκε δραματικά από το 1993 κι έπειτα με αποτέλεσμα να εγκατασταθούν μόνιμοι σταθμοί σε πολλές βασικές τοποθεσίες πάνω και γύρω από το ηφαιστειακό οικοδόμημα. Τα GPS που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση του ηφαιστείου της Αίτνας διαθέτουν δέκτη ακριβείας υπόμετρου (αισθητήρας Leica Zeno 10 GNSS) και δημιουργούν ένα ίχνος κατά μήκος του ορίου λάβας και μετρούν ορισμένα σημεία σε κινηματική λειτουργία.

Μια από τις πιο σύγχρονες μεθόδους χαρτογράφησης είναι η συμβολομετρία, που γίνεται από απεικονιστικά ραντάρ σύνθεσης ανοιγμάτων και μπορεί να παράγει ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα (Digital Elevation Models, DEM). Το κυριότερο πλεονέκτημα αυτής της νέας τεχνολογίας προκύπτει από το γεγονός ότι υπάρχει ένα τεράστιο απόθεμα από ζεύγη εικόνων που έχουν συλλεχθεί από τους ευρωπαϊκούς δορυφόρους ERS. Στο κέντρο σχεδόν της Εικόνας 81 που έχει συντεθεί από τις δορυφορικές εικόνες με ραντάρ διακρίνεται η κορυφή του όρους Αίτνα στη νήσο Σικελία της Ιταλίας, ενώ τα διάφορα χρώματα (μωβ, πράσινο, κίτρινο και ροζ) γύρω από τους τέσσερις μικρούς κρατήρες στην κορυφή παρουσιάζουν τη ροή της λάβας στις διάφορες εκρήξεις, καθώς και την τραχύτητα του εδάφους.



Εικόνα 80: Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο (DEM) της κορυφής του όρους Αίτνα [Πηγή: ESA]



Εικόνα 81: Λήψη από το διαστημικό απεικονιστικό ραντάρ SIR-C/X-SAR του διαστημικού λεωφορείου Endeavour στις 11 Οκτωβρίου του 1994 [Πηγή: ESA]

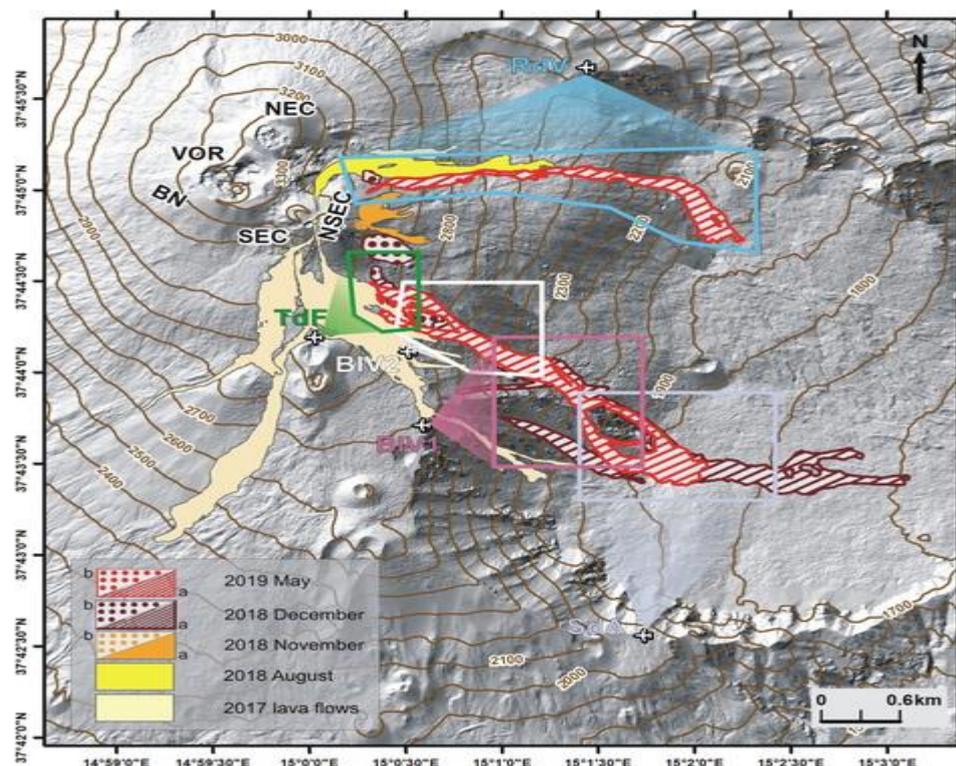
Η ηφαιστειακή παρακολούθηση εκμεταλλευόταν δεδομένα που συλλέγονταν και από έρευνες με ελικόπτερα, τα οποία λάμβαναν ορατές και θερμικές εικόνες και είχαν αξιοποιηθεί για την παραγωγή του πλήρους χάρτη ροής λάβας (De Beni & Proietti, 2010; Behncke et al., 2014).

Αυτή η τεχνική έχει δώσει καλά αποτελέσματα με τα χρόνια, αλλά υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί. Ο προγραμματισμός μιας έρευνας με ελικόπτερο συνήθως διαρκεί πολύ, εισάγοντας μια μη αμελητέα καθυστέρηση στις επιχειρησιακές δραστηριότητες. Επιπλέον, τα

ελικόπτερα δεν είναι πάντα διαθέσιμα: αρκεί να αναλογιστεί κανείς ότι μόνο μερικές έρευνες με ελικόπτερα πραγματοποιήθηκαν μεταξύ 2011 και 2015, όταν σημειώθηκε μεγάλος αριθμός παροξυσμών. Όσον αφορά τις έρευνες GPS, δεν είναι πάντα εύκολο και/ή δυνατό να περπατήσετε κατά μήκος ολόκληρου του πεδίου ροής λάβας, δεδομένου τόσο του εύρους ορισμένων ροών λάβας όσο και του σχετικού κινδύνου και της απρόσιτης πρόσβασης σε ορισμένες περιοχές. Επιπλέον, η θέα από το έδαφος είναι συχνά περιορισμένη και ένα υψηλότερο σημείο παρατήρησης μπορεί να είναι απρόσιτο ή πολύ επικίνδυνο. Για να ξεπεράσει όλα αυτά τα προβλήματα και να βελτιστοποιήσει τη δραστηριότητά του, από τον Μάρτιο του 2017, κατά τη διάρκεια δηλαδή της έκρηξης του όρους Αίτνα από τις 27 Φεβρουαρίου έως τις 2 Μαρτίου 2017, το προσωπικό του MAP-LAB άρχισε να συνεργάζεται με την ομάδα UAVs (Unmanned Aerial Vehicle) της INGV-OE (FlyEye Team). Αυτή η συνεργασία επέτρεψε την επιτυχή ενσωμάτωση της τεχνολογίας του UAV στην ηφαιστειακή παρακολούθηση. Τα UAVs έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί σε ηφαιστειακά περιβάλλοντα, δηλαδή για ανίχνευση αερίων (Pieri et al., 2013; Kern et al., 2015; Di Stefano et al., 2018), τοπογραφικοί στόχοι (Rokhmana & Andaru, 2016) και για τον εντοπισμό της αστάθειας των ηφαιστειών (De Benni et al., 2018). Μια ενδιαφέρουσα μελέτη των Turner et al. (2017) δείχνει πόσο καλά απέδωσαν τα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα (DEM) που προέρχονται από UAV όσον αφορά τον χαρακτηρισμό του τοπίου και την υποστήριξη προβλέψεων κινδύνου λάβας. Αυτό το νέο εργαλείο επέτρεψε να ερευνηθεί η ροή της λάβας με τρόπο που ήταν αδιανόητος μέχρι πριν από μερικά χρόνια, βελτιώνοντας την ποιότητα της παρακολούθησης, όσον αφορά την επικαιρότητα και τη λεπτομέρεια καθώς είναι αναγκαία για σκοπούς Πολιτικής Προστασίας. Το DEM αντιπροσωπεύει το τρισδιάστατο μοντέλο της τροποποιημένης τοπογραφίας της περιοχής και αποτελεί τη βάση για περαιτέρω υπολογισμούς, όπως ο όγκος και ο ρυθμός παραγωγής μάζας. Όλα αυτά τα αποτελέσματα χρειάζονται προσεκτική επικύρωση και αυτός είναι ο λόγος που απαιτούν πολύ περισσότερο χρόνο για να εκδοθούν. Ο όγκος ροής της λάβας μπορεί να εκτιμηθεί με επιπεδομετρικές και τοπογραφικές προσεγγίσεις (Stevens et al., 1999). Η πρώτη τεχνική συνίσταται στον πολλαπλασιασμό της χαρτογραφημένης περιοχής με το πάχος, που συνήθως μετράται από το πεδίο. Σε αυτή την περίπτωση, η ακρίβεια εξαρτάται από τις αβεβαιότητες που είναι εγγενείς τόσο στη χαρτογράφηση ροής όσο και στις μετρήσεις πάχους (De Benni et al., 2018). Με την τοπογραφική μέθοδο, τα πάχη υπολογίζονται διαφοροποιώντας τις επιφάνειες πριν και μετά την έκρηξη που προέρχονται από τα DEM.

Η πρώτη έρευνα UAV σχετικά με μια ενεργή ροή λάβας παρήγαγε πολλές βέλτιστες πρακτικές που πρέπει να εφαρμόζονται όταν απαιτείται ένας γρήγορος και εξαντλητικός χάρτης για τον μετριάσμο του κινδύνου ενώ η ενημέρωση τοπογραφίας πρέπει να γίνει σε μεταγενέστερο στάδιο. Επιπλέον στις ηφαιστειακές περιοχές, τα UAVs επιτρέπουν ευρύτερες παρατηρήσεις της εκρηκτικής συμπεριφοράς, χωρίς κίνδυνο για τον χειριστή. Οι ορθογραφικές εικόνες που λαμβάνονται σε διαφορετικές ημέρες επιτρέπουν την παρακολούθηση της μορφοδομικής εξέλιξης των ρωγμών, συλλαμβάνοντας τη διάδοση των ρών λάβας και τη συσσώρευση πυροκλαστικών αποθέσεων.

Τα UAVs βέβαια είναι προτιμότερο να πετάνε σε αυτόματη λειτουργία όταν είναι δυνατόν, αλλά αυτό απαιτεί τον ακριβή προγραμματισμό της αποστολής που πρέπει να εκτελείται σε εσωτερικούς χώρους, πριν από τη δραστηριότητα πεδίου. Η αυτόματη λειτουργία πτήσης έχει αποδειχθεί βασικό στοιχείο για τη βελτιστοποίηση του χρόνου πτήσης του UAV καθώς και για την απόκτηση δεδομένων.



Εικόνα 82: Χάρτης ροής λάβας των ετών 2017, 2018 και 2019 σε σκιασμένο ανάγλυφο, οι συντεταγμένες αναφέρονται στο ελλειψοειδές WGS84, η προβολή του χάρτη είναι UTM (Ζώνη 33N). Οι λευκές πεδιάδες υποδεικνύουν τα 5 διαφορετικά σημεία απογείωσης, το χρωματιστό ορθογώνιο περικλείει την περιοχή υπερχειλίσσης από κάθε σημείο απογείωσης. Πλήρες έγχρωμο πολύγωνο = κορυφή ροής λάβας, γραμμοσκιασμένο πολύγωνο = πλευρική ροή λάβας, διακεκομμένο πολύγωνο = πυροκλαστικές αποθέσεις. SdA = Schiena dell’Asino, BIV = Belvedere, TdF = Torre del Filosofo, RdV = Rocca della Valle, SEC = Κρατήρας Νοτιοανατολικής, NSEC = Νέος Νοτιοανατολικός κρατήρας, BN = Bocca Nuova, VOR = Voragine NEC = Βορειοανατολικός κρατήρας [Πηγή: De Beni et al., 2020].



Εικόνα 83: Ορθοεικόνες του εξαερισμού. Ο ατμός καθιστά δύσκολο τον ξεκάθαρο προσδιορισμό ορισμένων περιοχών του πεδίου λάβας, αλλά οι αεραγωγοί είναι πιο ορατοί χάρη στην καυτή λάβα [Πηγή: De Beni et al., 2020]

## 6.2. Παρακολούθηση σεισμικής δραστηριότητας

Η σεισμολογία και η γεωδαισία θεωρούνται γενικά ως τα πιο αξιόπιστα διαγνωστικά εργαλεία για την παρακολούθηση υψηλής ενεργότητας ή εκρήξεων ηφαιστειών, όπως η Αίτνα, καθώς αποτελούν ένα αξιόπιστο βραχυπρόθεσμο έως μεσοπρόθεσμο (ημέρες έως εβδομάδες) προγνωστικό, του επιπέδου, του τύπου και της εξέλιξης της ηφαιστειακής δραστηριότητας.

Τα πρώτα όργανα που δημιουργήθηκαν για να καταγράφουν τους σεισμούς στην Αίτνα αναπτύχθηκαν στις αρχές του 1900, ωστόσο συστηματικές παρατηρήσεις σεισμικής δραστηριότητας στην Αίτνα το 1967, όταν ένα μηχανικό σεισμόμετρο ήταν μόνιμα στη νότια πλευρά του ηφαιστείου, περίπου 7 km από τους κρατήρες κορυφής (D' Alessandro, 2013). Οι προηγούμενες έρευνες περιορίζονταν σε μακροσεισμικές παρατηρήσεις και αναλύσεις σειсмоγραφημάτων που έχουν καταγραφεί από ένα όργανο και στη συνέχεια συλλέγονται από το αστρονομικό αστεροσκοπείο που λειτουργεί στο Πανεπιστήμιο της Κατάνια. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1980, η σεισμική δραστηριότητα παρακολουθήθηκε στην Αίτνα από μόνιμο σεισμικό δίκτυο, το οποίο σταδιακά βελτιώθηκε στα ακόλουθα χρόνια.

Το δίκτυο αυτό, που περιλάμβανε δύο έως έξι σταθμούς που κατέγραφαν τη σύντομη περίοδο της κατακόρυφης συνιστώσας των σεισμικών κυμάτων, χρησιμοποιήθηκε για τη διερεύνηση σεισμών που σχετίζονταν με εκρήξεις και ηφαιστειακή δόνηση (Rymer et al. 1998). Οι μελέτες έδειξαν ότι μικρού βάθους (1-5 km) σεισμική δραστηριότητα συνήθως προηγείται λίγες ημέρες πριν των πλευρικών εκρήξεων. Αντίθετα, η πρόδρομη σεισμική δραστηριότητα δεν συνδέεται συνήθως με εκρήξεις κορυφής, αν και συχνά συνοδεύονται από σεισμό. Η ανάλυση της σεισμικότητας σε μεγάλο αριθμό ενεργών ηφαιστειών, ωστόσο, έχει δείξει ότι γενικά μια

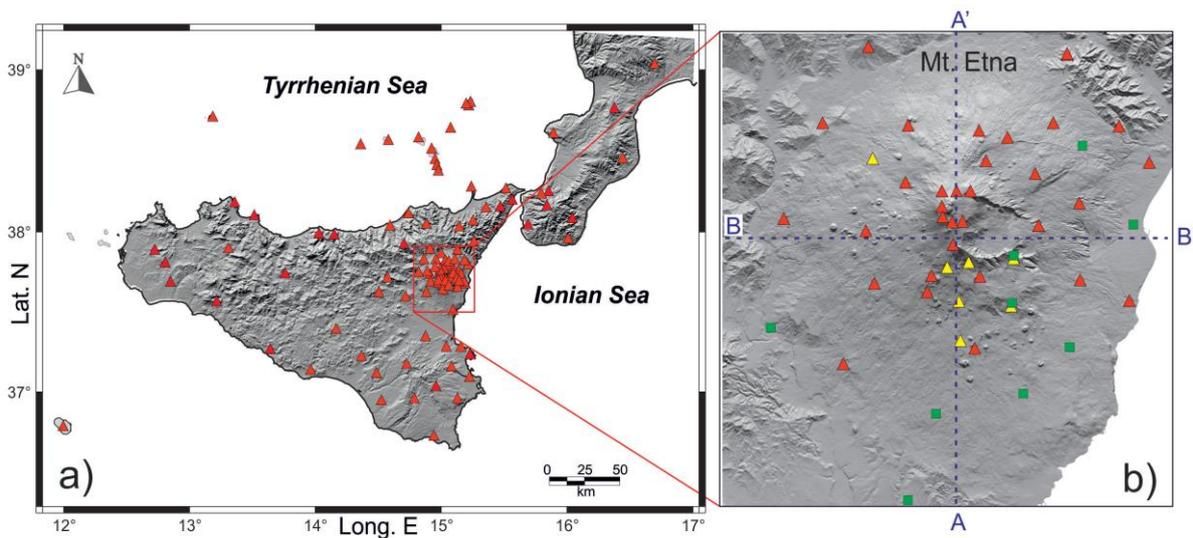
αύξηση του ρυθμού χαμηλής συχνότητας των σεισμών δίνουν αυξημένη πιθανότητα να ακολουθήσουν επεισόδια δόνησης. Τα αυξημένα επίπεδα της ενέργειας του σεισμού είναι σύμφωνα με αυξημένη πιθανότητα να συμβεί έκρηξη μέσα σε εβδομάδες, ημέρες ή και ώρες (Rymer et al. 1998). Τα σύγχρονα σεισμόμετρα ανιχνεύουν τους κραδασμούς του εδάφους σε 3 διαστάσεις σε ένα εύρος συνήθως 0,1-10 Hz. Τα συμβάντα υψηλής συχνότητας συνδέονται συνήθως με βαθιά (έως μερικά χιλιόμετρα) συμβάντα θραύσης, ενώ συμβάντα χαμηλής συχνότητας και σεισμού πιστεύεται ότι προκαλούνται από εξαναγκασμένο συντονισμό υγρών σε μικρού βάθους (λίγα χιλιόμετρα) ηφαιστειακούς αγωγούς. Μια νέα σεισμική συστοιχία αναπτύχθηκε και επεκτάθηκε στην Αίτνα από το Istituto Internazionale di Vulcanologia, Catania πριν από τη δραστηριότητα του 1989 και δεδομένα από 22 σεισμόμετρα ήταν διαθέσιμα για ανάλυση και σύγκριση.

Το δίκτυο έχει βελτιωθεί σημαντικά από το 2002 και ύστερα μέσω της εγκατάστασης άλλων σεισμικών σταθμών. Η επιλογή των βέλτιστων τοποθεσιών για την εγκατάστασή τους πραγματοποιήθηκε μέσω μιας προσεκτικής ανάλυση της γεωμετρίας του υφιστάμενου σεισμικού δικτύου. Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου που υιοθετήθηκε είναι ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί αξιολόγηση της βελτίωσης του δικτύου πριν από την πραγματική εγκατάσταση των σταθμών. Κατά τη μελέτη εντοπίστηκαν ορισμένα κρίσιμα ζητήματα του προϋπάρχοντος μόνιμου σεισμικού δικτύου που σχετίζεται με την έλλειψη των σταθμών στον νότιο τομέα του ηφαιστείου, που είναι επηρεασμένο ωστόσο από μια σειρά σεισμογόνων δομών.

Σπουδαία αποτελέσματα επιτεύχθηκαν τις τελευταίες δεκαετίες, κυρίως λόγω της ταχείας βελτίωσης των δικτύων παρακολούθησης της σεισμικότητας και της παραμόρφωσης, καθώς έχουν εντοπίσει τις κύριες τεκτονικές δομές και τις διαδρομές κατά μήκος των οποίων το μάγμα υψώνεται κάτω από το όρος Αίτνα (Alparone et al., 2012).

Από το 2002, οι κύριοι στόχοι της σεισμολογικής τεχνικής ομάδας στο INGV – Osservatorio Etno ήταν μία πλήρης τεχνολογική ανακαίνιση, ομογενοποίηση και πύκνωση του Μόνιμου Σεισμικού Δικτύου που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση των ενεργών τεκτονικών και ηφαιστειακών περιοχών της Σικελίας. Αρχικά τοποθετήθηκαν ψηφιακοί σταθμοί 24-bit εξοπλισμένοι με ευρυζωνική σύνδεση (40s) αισθητήρων. Χάρη σε μια διαμόρφωση 33 ευρυζωνικών συνδέσεων και 12 σταθμών μικρής περιόδου, υπήρχε μία ικανοποιητική κάλυψη της ηφαιστειακής περιοχής καθώς και υψηλή ποιότητα των συλλεγόμενων δεδομένων, η

οποία με την πάροδο του χρόνου υπέστη βελτιώσεις. Το σεισμικό δίκτυο μέχρι το 2013 κάλυπτε πιο πυκνά την ανατολική Σικελία, από το αρχιπέλαγος του Αιόλου στην περιοχή Hyblean, συμπεριλαμβανομένων της περιοχής του Στενού της Μεσσήνης και των περιοχών με ενεργά ηφαιστειακά φαινόμενα, όπως η Αίτνα, το Στρόμπολι και το Βουλκάνο, και αποτελούταν από περίπου εκατό σεισμικούς σταθμούς, όπως απεικονίζεται και στον χάρτη της Εικόνας 84.



Εικόνα 84: Σεισμικοί σταθμοί που βρίσκονται το 2013 στη Σικελία και τη Νότια Καλαβρία (Ιταλία) και λεπτομέρειες του ηφαιστείου της Αίτνας. Τα κόκκινα τρίγωνα αποτελούν τους ψηφιακούς σταθμούς, τα κίτρινα τρίγωνα τους αναλογικούς ενώ τα πράσινα τετράγωνα είναι υποψήφιας τοποθεσίες [Πηγή: D'Alessandro et al. 2013]

Η τεχνολογική αναβάθμιση, μαζί με την εισαγωγή αισθητήρων infrasonic, επιταχυνσιόμετρων και στο διάστημα των επόμενων ετών αισθητήρων που βασίζονται στην τεχνολογία Micro Electro-Mechanical Systems (D'Alessandro & D'Anna, 2013), είχε ως στόχο να πραγματοποιήσει ένα ολοκληρωμένο σεισμικό δίκτυο της Αίτνας (ESN). Το ESN περιλάμβανε κάποιους αναλογικούς σταθμούς με αισθητήρες μικρής περιόδου, οι οποίοι διατηρούνταν σε λειτουργία μέχρι τη σταδιακή αντικατάστασή τους με ψηφιακούς. Με την πάροδο του χρόνου πραγματοποιήθηκε εγκατάσταση επιπλέον σταθμών μέτρησης για περαιτέρω ενίσχυση των επιχειρησιακών δυνατοτήτων στην έρευνα και την παρακολούθηση ηφαιστειών στη Νότια Ιταλία, λαμβάνοντας φυσικά υπόψη τη χωρική κατανομή των σεισμών στην περιοχή, τη παρουσία σεισμογενών δομών και μέσω εκτενής επαλήθευσης τη τοποθεσία με γεωλογικές-γεωφυσικές έρευνες.

Η αναβάθμιση του λειτουργικού συστήματος σεισμικής παρακολούθησης στην ανατολική Σικελία επέτρεψε και τη βελτίωση των δυνατοτήτων ανίχνευσης και την εφαρμογή των πιο

σύγχρονων αναλυτικών τεχνικών για τη μελέτη σεισμικών πηγών. Αυτός ο στόχος επετεύχθη μέσω της σταδιακής αντικατάστασης υφιστάμενων αναλογικών εξοπλισμών με ψηφιακούς σταθμούς, εξοπλισμένους με ευρυζωνική σύνδεση αισθητήρων και ψηφιακή μετάδοση μέσω δορυφόρου, ραδιοφώνου UHF και WLAN.

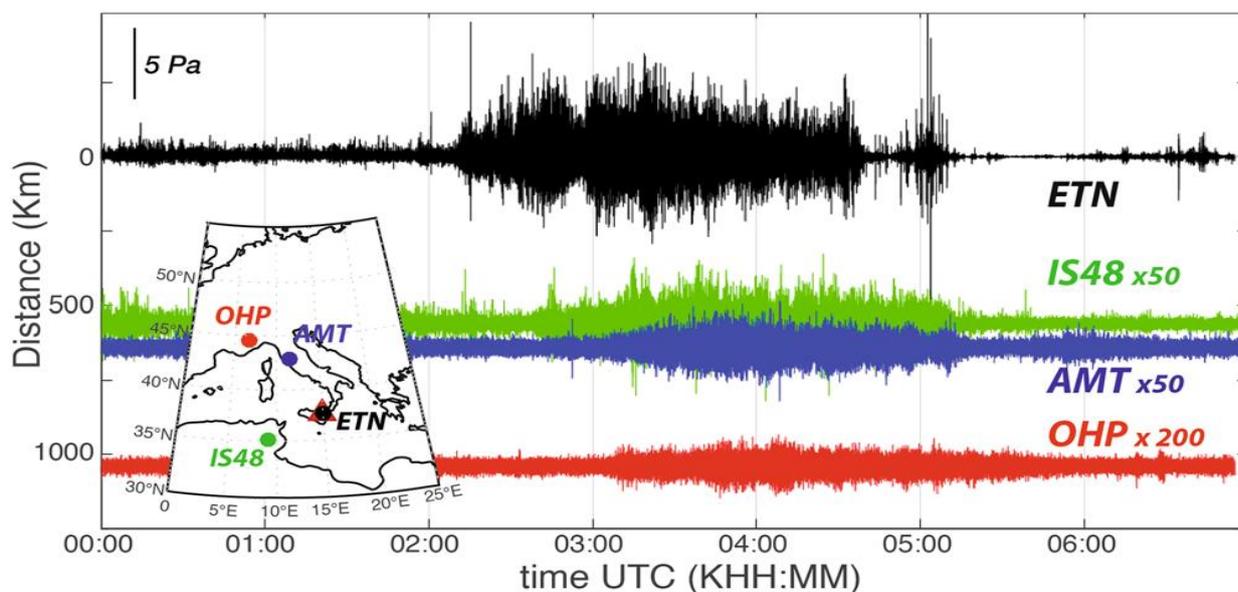
### **6.3. Παρακολούθηση μέσω υπόηχων**

Το 1990, ο Διεθνής Πολιτικός Οργανισμός Αεροπορίας (International Civil Aviation Organization, ICAO) στην Ιταλία ίδρυσε τα Συμβουλευτικά Κέντρα Ηφαιστειακής Τέφρας (Volcanic Ash Advisory Centers, VAAC), για να μετριάσει τον κίνδυνο των ηφαιστειακών εκρήξεων στις εμπορικές πτήσεις. Τα VAAC έρχονται σε επαφή μεταξύ μετεωρολόγων, ηφαιστειολόγων και την κοινότητα της αεροπορίας. Κάθε φορά που συμβαίνει μια ηφαιστειακή έκρηξη, συλλέγουν όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες από παρατηρητήρια ηφαιστειών, δορυφορικές εικόνες και πιλοτικές αναφορές και εκτελούν μοντέλα διασποράς ηφαιστειακού νέφους. Τελικά εκδίδουν μια προειδοποίηση για ηφαιστειακή τέφρα (Volcanic Ash Advisory, VAA), η οποία παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ποσότητα της τέφρας και τις προβλέψεις διασποράς. Βέβαια, η ποιότητα και η ακρίβεια της μοντελοποίησης της επέκτασης του νέφους και οι προβλέψεις διασποράς της τέφρας εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις παραμέτρους της πηγής έκρηξης, όπως ο χρόνος έναρξης της έκρηξης, η τοποθεσία και η μάζα του υλικού που εξερράγη.

Μεταξύ των επίγειων τεχνικών παρακολούθησης ηφαιστειών, ο υπόηχος είναι ο μόνος που μπορεί να ανιχνεύσει εκρήξεις ηφαιστειών από αποστάσεις χιλιάδων χιλιομέτρων. Με τον όρο «υπόηχος» καλείται ένα ηχητικό κύμα με συχνότητα χαμηλότερη από το κατώτατο όριο συχνοτήτων που μπορεί να γίνει αντιληπτό από τον άνθρωπο (20 Hz). Με τη συγκεκριμένη μέθοδο πραγματοποιείται ανάλυση συστοιχίων υπόηχων, χρησιμοποιώντας ακουστικό πλάτος και επιμονή ανίχνευσης, ώστε να πραγματοποιηθεί αυτόματη ταυτοποίηση σχεδόν σε πραγματικό χρόνο των εκρήξεων του ηφαιστείου της Αίτνας, για σταθμούς σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 500 km. Η παρακολούθηση υποήχων σε παγκόσμια κλίμακα μπορεί να παρέχει έγκαιρα στοιχεία για τα Συμβουλευτικά Κέντρα Ηφαιστειακής Τέφρας (VAAC) ακόμη και όταν υπάρχει καθυστέρηση περίπου 1 ώρας, λόγω του χρόνου διάδοσης.

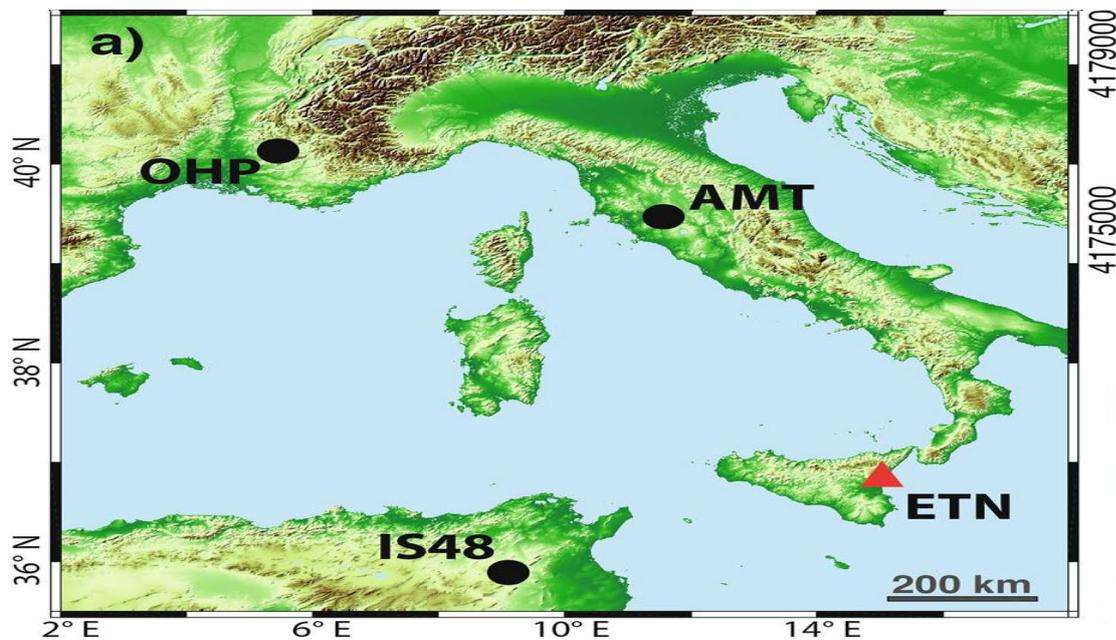
Κατά την τελευταία δεκαετία, πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε αυτόματες ανιχνεύσεις και ειδοποίηση ηφαιστειακών εκρήξεων με συστοιχίες υποήχων στη Νότια Αμερική και στην

Ιταλία. Ένα πλήρως αυτοματοποιημένο και λειτουργικό σύστημα προειδοποίησης που βασίζεται σε τοπική συστοιχία υποήχων (ETN), μικρότερης των 6 km, ανέπτυξε δεδομένα για το ηφαίστειο της Αίτνας στην Ιταλία. Το 2019, μία περίοδο δηλαδή 10 ετών, το σύστημα εξέδωσε ειδοποιήσεις προειδοποίησης, που προηγούνταν κατά μέσο όρο κατά 74 λεπτά της εμφάνισης της έκρηξης με ποσοστό αξιοπιστίας 96,5% και χωρίς ψευδείς ειδοποιήσεις.



Εικόνα 85: Υποηχητικά σήματα από το ηφαίστειο της Αίτνας που σχετίζονται με το συντριβάνι λάβας που καταγράφηκαν στις 21 Μαΐου 2016 στις συστοιχίες ETN (μαύρο, στα 5 km), IS48 (πράσινο, στα 560 km), AMT (μπλε, στα 640 km) και OHP (κόκκινο, στα 1040 km). Οι τοπικές παρατηρήσεις φιλτράρονται με διέλευση ζώνης μεταξύ 1 και 10 Hz, ενώ οι παρατηρήσεις μεγάλης εμβέλειας μεταξύ 1 και 3 Hz. Τα πλάτη του σήματος κλιμακώνονται για να παρέχουν επαρκείς λεπτομέρειες για τις κυματομορφές. Οι θέσεις της διάταξης (κουκκίδες) σε σχέση με το ηφαίστειο της Αίτνας (κόκκινο τρίγωνο) φαίνονται στο σχήμα εισόδου [Πηγή: Marchetti et. al., 2019].

Για την παρακολούθηση του ηφαιστείου της Αίτνας υπάρχουν ορισμένες συστοιχίες. Η συστοιχία AMT είναι μια συστοιχία 4 στοιχείων με διάφραγμα 1,6 km, που αναπτύσσεται στην κεντρική Ιταλία σε απόσταση 640 km και αζιμούθιο 336°B από την Αίτνα. Η συστοιχία IS48, στην Τυνησία, είναι μια συστοιχία 8 στοιχείων με διάφραγμα περίπου 2 km, βρίσκεται σε απόσταση 560 km και με αζιμούθιο 246°B από την Αίτνα. Ο πίνακας, OHP, σε Νότια Γαλλία, είναι μια συστοιχία 4 στοιχείων με διάφραγμα 2 km που βρίσκεται στα 1.040 km και με αζιμούθιο 310°B από την Αίτνα. Όλες οι συστοιχίες είναι εξοπλισμένες με μικροβαρόμετρα MB2005. Το IS48 είναι μέρος του δικτύου IMS, ενώ η AMT και ο OHP αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Έργου ARISE ([www.arise.eu](http://www.arise.eu)).



Εικόνα 86: Χάρτης της Ανατολικής Μεσογείου που δείχνει τη θέση του ηφαιστείου της Αίτνας (κόκκινο τρίγωνο) και τις απομακρυσμένες συστοιχίες υπόηχων (μαύρες κουκκίδες) [Πηγή: Marchetti et. al., 2019].

Χάρη στην περιορισμένη εξασθένηση των υποηχητικών κυμάτων ταξιδεύοντας μέσα σε ατμοσφαιρικούς κυματοδηγούς, ο υπόηχος μπορεί να διαδοθεί σε μεγάλες αποστάσεις όταν υπάρχουν ευνοϊκές προϋποθέσεις. Το ιστορικό του χρόνου των εκρήξεων μπορεί να παρακολουθηθεί με μεγαλύτερη χρονική ανάλυση σε σύγκριση με τις πληροφορίες που ανακτώνται από δορυφορικά δεδομένα.

Ωστόσο, η διάδοση στην ατμόσφαιρα μπορεί επίσης να επηρεάσει αρνητικά την ανιχνευσιμότητα του σήματος σε αντίθετη κατάσταση. Οι ανιχνεύσεις υπόηχων μεγάλης εμβέλειας δεν αντικατοπτρίζουν απαραίτητα το ιστορικό χρόνου πίεσης στην πηγή. Η μέγιστη απόσταση του ανιχνευόμενου υπόηχου φαίνεται να αυξάνεται με το ύψος του νέφους, κάτι που φαίνεται να δείχνει ότι γενικά, εκρήξεις υψηλότερης ενέργειας μπορούν να καταγραφούν σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Ωστόσο, υπάρχουν πολλά παραδείγματα σημάτων που δεν ανιχνεύονται, ακόμη και για συμβάντα υψηλής ενέργειας, καθώς και παραδείγματα που δείχνουν μια πολύπλοκη χρονική εξάρτηση μεταξύ του ύψους του λοφίου και του υποηχητικού πλάτους. Επιπλέον, η ανιχνευσιμότητα του σήματος επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό και από τις εποχιακές και ημερήσιες παραλλαγές των στρατοσφαιρικών ανέμων.

Η διάδοση του υπόηχου μεγάλης εμβέλειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα κατακόρυφα προφίλ του ανέμου και της θερμοκρασίας. Η μεταβολή της ταχύτητας του ήχου με το ύψος παράγει μια επιστροφή της ενέργειας του υπόηχου από διάφορα στρώματα, με αποτέλεσμα μια πολύπλοκη κυματομορφή υπερήχων σε απομακρυσμένους σταθμούς.

Επιπλέον η διαφορά μεταξύ προσήνεμης και υπήνεμης κατάστασης οδηγεί σε συμβάντα που μπορούν να ανιχνευθούν μόνο σε συνθήκες υπήνεμου ανέμου και με δεδομένη απόσταση πηγής-δέκτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια έντονη εποχικότητα της ικανότητας ανίχνευσης, με υπόηχους από πηγές που βρίσκονται ανατολικά της συστοιχίας που ανιχνεύεται, κατά προτίμηση κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού στο βόρειο ημισφαίριο και κατά τη διάρκεια του χειμώνα στο νότιο ημισφαίριο. Λαμβάνοντας υπόψη τη θέση των συστοιχιών υπερήχων που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της Αίτνας, αναμένεται αποτελεσματική διάδοση με υπήνεμο άνεμο κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (μεταξύ Απριλίου και Σεπτεμβρίου) ενώ δυσμενής διάδοση με προσήνεμο άνεμο κατά τους χειμερινούς μήνες (μεταξύ Οκτωβρίου και Μαρτίου).

Σύμφωνα με έρευνα των Marchetti et. al., 2019 οι ειδοποιήσεις υπέρηχων που παραδίδονται από τη συστοιχία OHP αντιπροσωπεύουν το 47% της επιτυχίας, με 7 συμβάντα να ανιχνεύονται από τις 15 εκρήξεις, ενώ η συστοιχία IS48 έχει ελαφρώς μεγαλύτερη επιτυχία 53%, με 8 από τα 15 επεισόδια έκρηξης να ανιχνεύονται (Εικόνα 87).

| $T_{VAA}$         | $LEW_{OHP}$       | $LEW_{IS48}$      | Ash |
|-------------------|-------------------|-------------------|-----|
| 09-Aug-2014 08:40 | 06-Aug-2014 00:30 | 08-Aug-2014 02:05 | yes |
| 11-Aug-2014 09:30 | 12-Aug-2014 02:40 | 08-Aug-2014 02:05 | No  |
| 12-Aug-2014 17:35 | 12-Aug-2014 02:40 | 08-Aug-2014 02:05 | Yes |
| 28-Dec-2014 18:37 | -                 | -                 | No  |
| 02-Jan-2015 11:55 | 02-Jan-2015 06:20 | 02-Jan-2015 05:45 | Yes |
| 13-Jan-2015 08:18 | -                 | -                 | Yes |
| 31-Jan-2015 19:43 | -                 | -                 | No  |
| 02-feb-2015 06:24 | -                 | -                 | Yes |
| 13-May-2015 18:57 | -                 | 13-May-2015 01:15 | Yes |
| 03-Dec-2015 03:23 | -                 | -                 | Yes |
| 04-Dec-2015 09:47 | -                 | -                 | Yes |
| 09-Dec-2015 09:41 | -                 | -                 | Yes |
| 18-May-2016 14:56 | 17-May-2016 10:10 | 17-May-2016 18:05 | Yes |
| 21-May-2016 03:24 | 21-May-2016 03:15 | 21-May-2016 03:20 | Yes |
| 24-May-2016 23:00 | 24-May-2016 20:50 | 24-May-2016 21:45 | Yes |

Εικόνα 87: Χρόνος έκδοσης VAA από την Toulouse VAAC (στήλη 1, TVAA). Η έγκαιρη προειδοποίηση (EW) που εκδόθηκε από εγγραφές υπερήχων στη συστοιχία OHP (στήλη 2, LEWOHP) και IS48 (στήλη 3, LEWIS48). Στη στήλη 4 παρατηρήθηκε έγχυση τέφρας στην ατμόσφαιρα. Οι σειρές που επισημαίνονται με γκρι υποδεικνύουν περιόδους προσήνεμης διάδοσης προς στις συστοιχίες [Πηγή: Marchetti et. al., 2019].

Αυτό το χαμηλό ποσοστό επιτυχίας, στην πραγματικότητα, αντανακλά τον έλεγχο των μεταβλητών στρατοσφαιρικών ανέμων στην ακουστική διάδοση. Γι' αυτό κατά τη διάρκεια ευνοϊκών υπήνεμων συνθηκών διάδοσης, η IP που υπολογίστηκε στις συστοιχίες OHP και IS48, έχει οδηγήσει σε ποσοστό επιτυχίας άνω του 87% στην ανίχνευση εκρηκτικών εκρήξεων στην Αίτνα (100% για το IS48 στα 560 km), χωρίς ψευδείς συναγερμούς.

Οι υπόηχος παρατηρήσεις της εκρηκτικής δραστηριότητας στο ηφαίστειο της Αίτνας, που καταγράφηκαν σε παγκόσμιες αποστάσεις (μεταξύ 560 και 1040 km), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή ενός συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης για εκρηκτικές εκρήξεις.

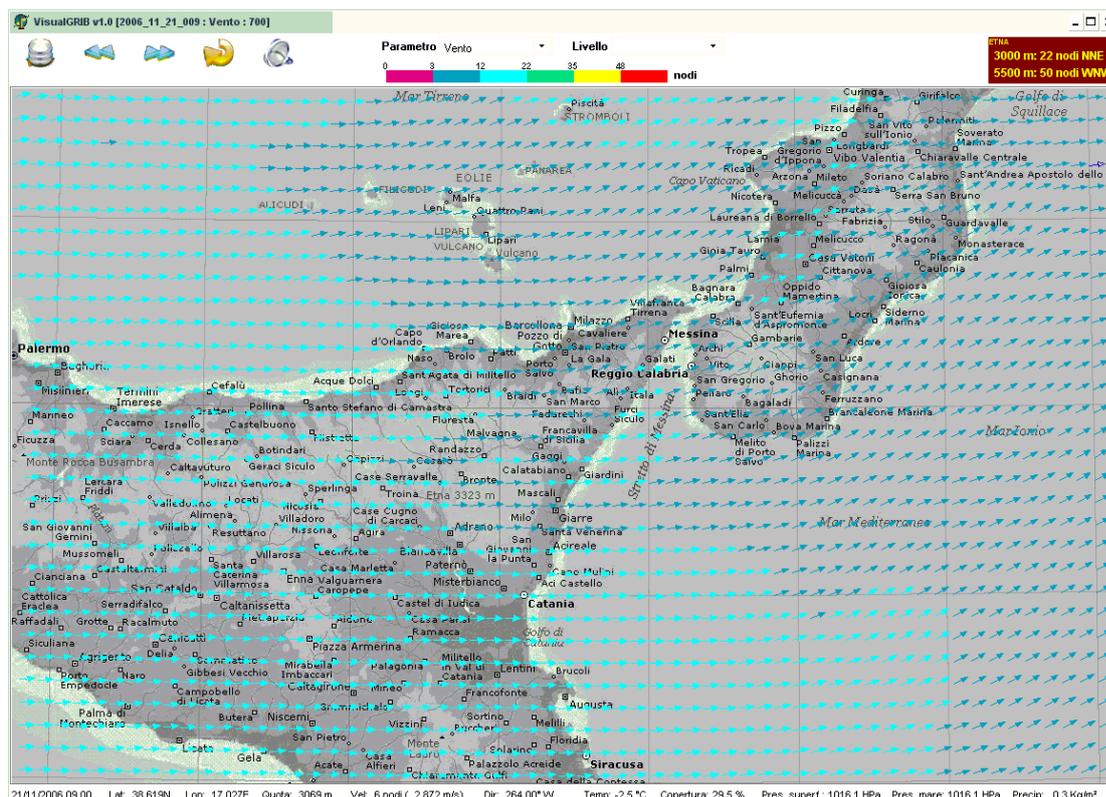
Καθώς η απόσταση εγγραφής αυξάνεται γενικά με την ενέργεια της έκρηξης, ο υπόηχος από εκρηκτικά ηφαίστεια μπορεί πράγματι να καταγραφεί σε αποστάσεις πηγής-δέκτη που υπερβαίνουν τα 10.000 km.

#### **6.4. Παρακολούθηση ηφαιστειακής τέφρας**

Το 1987, ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO) ίδρυσε την επιτροπή International Airways Volcano Watch (IAVW) η οποία ορίζει διεθνή πρωτόκολλα για την παρακολούθηση και την παροχή προειδοποιήσεων σε αεροσκάφη για την παρουσία της ηφαιστειακής τέφρας στην ατμόσφαιρα κατά τις εκρήξεις του ηφαιστείου της Αίτνας (Romero, 2004). Αναπτύχθηκαν οι ενέργειες για τη μείωση του κινδύνου από πτώση τέφρας κατά τη διάρκεια του ιταλικού έργου FIRB «Sviluppo Nuove Tecnologie per la Protezione e Difesa del Territorio dai Rischi Naturali». Επικεφαλής στο έργο ήταν το Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, sezione di Catania (INGV-CT), που αποτελεί το ίδρυμα που διαχειρίζεται την παρακολούθηση του ηφαιστείου και έχει ως στόχο να παρέχει ακριβείς και γρήγορες πληροφορίες για την εξέλιξη του ηφαιστειακού νέφους κατά τη διάρκεια των εκρηκτικών εκρήξεων που πραγματοποιούνται.

Η αυτόματη διαδικασία που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της διασποράς και της απόθεσης της τέφρας στο INGV-CT αποτελείται από τη συλλογή μετεωρολογικών δεδομένων υψηλής ευκρίνειας, τη χρήση επικυρωμένων μοντέλων διασποράς τέφρας και εκρηκτικά σενάρια ανάλογα με τη δραστηριότητα του ηφαιστείου και από τη δημιουργία χαρτών επικινδυνότητας, οι οποίοι παρέχονται καθημερινά στην Ιταλική Πολιτική Προστασία. Τα μετεωρολογικά μοντέλα λαμβάνονται από το Ιταλό Μετεωρολογικό Γραφείο Πολεμικής

Αεροπορίας (CNMCA) στη Ρώμη και από την υδρομετεωρολογική υπηρεσία της ARPA στην Emilia Romagna (ARPASIM). Η πρόγνωση της κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου, η συννεφιά, η θερμοκρασία και η κατακρήμνιση, απεικονίζονται σε μια επιφάνεια εργασίας από το λογισμικό VISUALGRIB που αναπτύχθηκε στο INGV-CT. Τα μοντέλα διασποράς της τέφρας που εκτελούνται στο INGV-CT καθημερινά είναι τέσσερα, το HAZMAP, το TEPHRA, το PUFF και το FALL3D και απαιτούν τις ακόλουθες παραμέτρους εισόδου: μάζα έκρηξης, ύψος στήλης, συνολική κατανομή μεγέθους κόκκου και το σχήμα των σωματιδίων. (Scollo et al., 2009).



Εικόνα 88: Το λογισμικό VISUALGRIB μπορεί να σχεδιάσει την πρόβλεψη της διεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου, της νεφοκάλυψης, της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης για δύο ημέρες. [Πηγή: Scollo et. al., 2009]

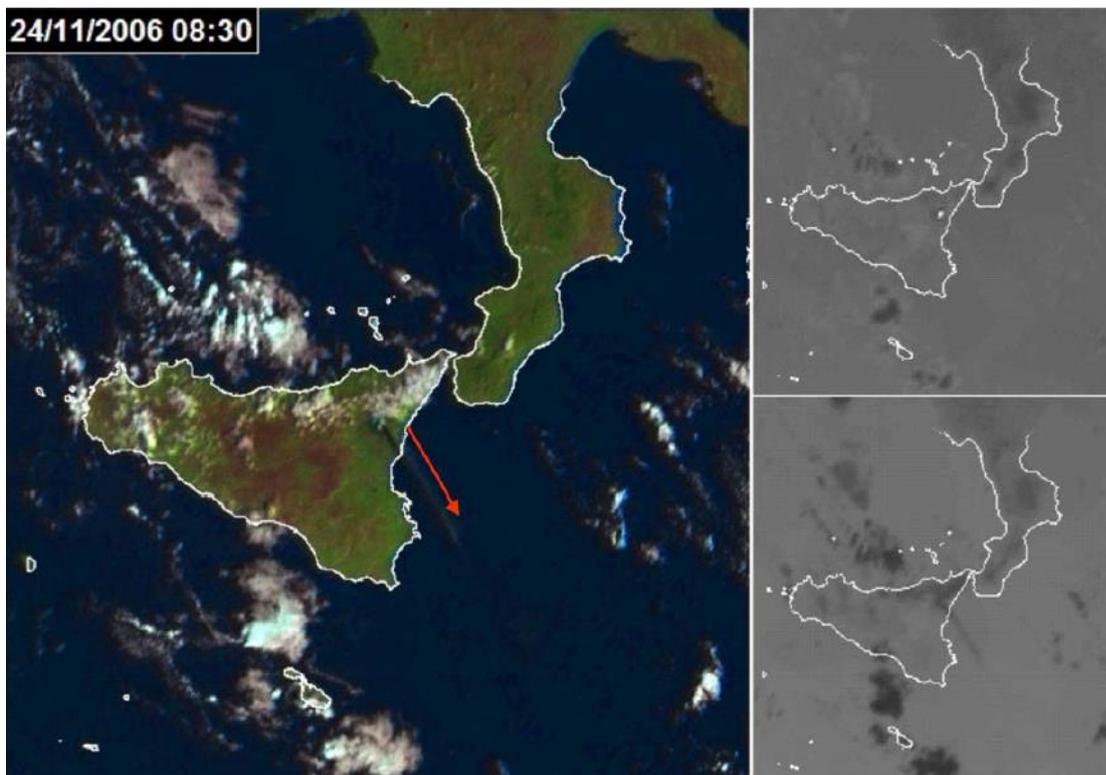
Η παρακολούθηση πραγματοποιείται με τη χρήση συστημάτων τηλεπισκόπησης για την ανίχνευση της διασποράς του νέφους και τη πτώση των σωματιδίων. Πιο συγκεκριμένα, σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιούνται επίγειες παρατηρήσεις, που βρίσκονται μακριά ή κοντά στον ηφαιστειακό αεραγωγό, αλλά και δορυφορικές εικόνες. Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στο INGV-CT αποτελούνται από τέσσερις κάμερες, μία θερμική κάμερα, πολυφασματικές υπέρυθρες μετρήσεις από τους γεωσύγχρονους δορυφόρους Spin Enhanced Visible Visible and Infrared Imager (SEVIRI) και Meteosat Second Generation και τρία Pludix.



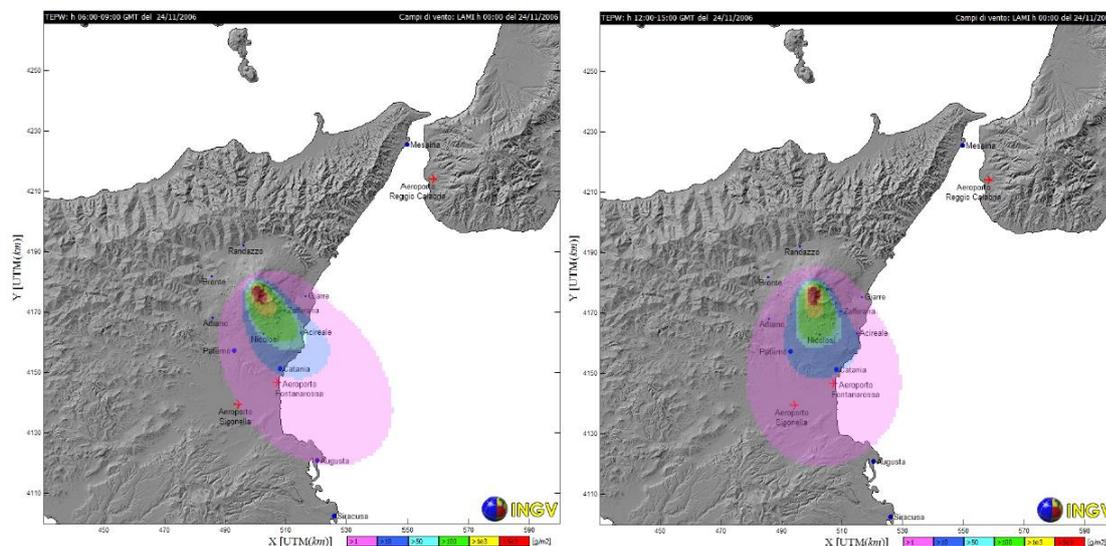
Εικόνα 89: Δορυφόρος SEVIRI [Πηγή: EUMETSAT]

Οι τέσσερις κάμερες που είναι διαθέσιμες στο INGV-CT για σκοπούς παρακολούθησης βρίσκονται στην Κατάνια, το Nicolosi, τη Milo και Schiena dell'Asino (περίπου 27, 15, 11 και 5 km μακριά από τον αεραγωγό) ενώ η θερμική κάμερα που βρίσκεται στο Nicolosi είναι σε θέση να ανιχνεύσει την παρουσία ηφαιστειακής τέφρας κατά τη διάρκεια της νύχτας. Οι κάμερες παρακολούθησης είναι πολύ χρήσιμες για την ανίχνευση του ύψους των στηλών έκρηξης και για την ανάλυση του συλ της εκρηκτικής δραστηριότητας (Scollo et al., 2009).

Από τον Αύγουστο του 2006, το INGV-CT λαμβάνει πολυφασματικές υπέρυθρες μετρήσεις από τον EUMETSAT (Ευρωπαϊκό Οργανισμό για την Εκμετάλλευση Μετεωρολογικών Δορυφόρων), έναν διακυβερνητικό οργανισμό που ιδρύθηκε το 1986 και υποστηρίχθηκε από 20 διαφορετικά ευρωπαϊκά κράτη. Επί του παρόντος, ο EUMETSAT έχει πέντε δορυφόρους, που ανήκουν στη δεύτερη γενιά μετεωρολογικών δορυφόρων, με τον πιο πρόσφατο τον METEOSAT 8 και τον εφεδρικό του METEOSAT 9. Κάθε δορυφόρος έχει 12 φασματικά κανάλια και παραδίδει δεδομένα με χρονική ανάλυση των 15 λεπτών. Η χωρική ανάλυση του δορυφόρου SEVIRI είναι 3 km για όλα τα κανάλια εκτός από το κανάλι HRV (High Resolution Visible, Ορατό Υψηλής Ανάλυσης) που είναι 1 km. Αν και έχουν χαμηλότερη ανάλυση σε σχέση με τους πολικούς δορυφόρους (π.χ. AVHRR), η υψηλή χρονική ανάλυση των γεωστατικών δορυφόρων είναι καταλληλότερη για το σκοπό παρακολούθησης του λοφίου και μερικές φορές χρησιμοποιείται για την παροχή ποσοτικών πληροφοριών (π.χ. ύψος στήλης έκρηξης). Επιπλέον, εικόνες AVHRR εκπονούνται από την INGV, CNT-LABTEL της Ρώμης για παρακολούθηση του ηφαιστειακού νέφους της Αίτνας (Spinetti & Buongiorno, 2007) και παραδίδεται στην INGV-CT καθημερινά.



Εικόνα 90: Εικόνες από το δορυφόρο SEVIRI που δείχνουν τη διασπορά του λοφίου με κατεύθυνση προς τα ΝΑ στις 24 Νοεμβρίου 2006 στις 08:30 GMT από τα μοντέλα FALL3D και HAZMAP [Πηγή: Scollo et. al., 2009]



Εικόνα 91: Μετατόπιση του ηφαιστειακού νέφους που διαμορφώθηκε από το μοντέλο διασποράς TERHRA που αντανακλά την αλλαγή της κατεύθυνσης του ανέμου από ΝΑ σε ΝΝΑ στις 24 Νοεμβρίου 2006 [Πηγή: Scollo et. al., 2009].

Τέλος, τα PLUDIX χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση του ρυθμού πτώσης της τέφρας. Το PLUDIX είναι ένα βροχόμετρο/δυσδρομόμετρο που βασίζεται στην ανάλυση ραντάρ συνεχών κυμάτων X-band (9,5 GHz) καθώς ανιχνεύει το σήμα οπισθοσκεδασμένο από υδρομετεωρίτες και αποτελείται από έναν αισθητήρα, έναν επεξεργαστή σήματος και μία μονάδα επικοινωνίας δεδομένων. Ο αισθητήρας είναι ραντάρ συνεχών κυμάτων X-band που λειτουργεί στη

συχνότητα των 9,5 GHz (Prodi et al., 2000). Το PLUDIX δοκιμάστηκε για πρώτη φορά κατά την έκρηξη της Αίτνας 2002–2003 και ήταν σε θέση να μετρήσει την τελική ταχύτητα καθίζησης των ηφαιστειακών σωματιδίων που πέφτουν πάνω από το ραντάρ (Scollo et al., 2005). Δύο όργανα είναι εγκατεστημένα στην Κατάνια και στο Nicolosi, σε περίπου 25 και 15 km αντίστοιχα από τις ηφαιστειακές οπές της Αίτνας και το τρίτο χρησιμοποιείται για την εκτέλεση μετρήσεων κατά τη διάρκεια εκρηκτικών γεγονότων.

Επιπλέον η ανίχνευση του ηφαιστειακού νέφους στην Αίτνα είναι διαθέσιμη on-line στον ιστότοπο <http://www.ct.ingv.it> ενώ υπάρχει και η δυνατότητα παρακολούθησης του σε πραγματικό χρόνο μέσω του δορυφόρου Sentinel-3 του EUMETSAT που παρέχεται από τον ακόλουθο ιστότοπο <https://view.eumetsat.int/productviewer?v=default>.

## 6.5. Παρακολούθηση εδαφικής παραμόρφωσης

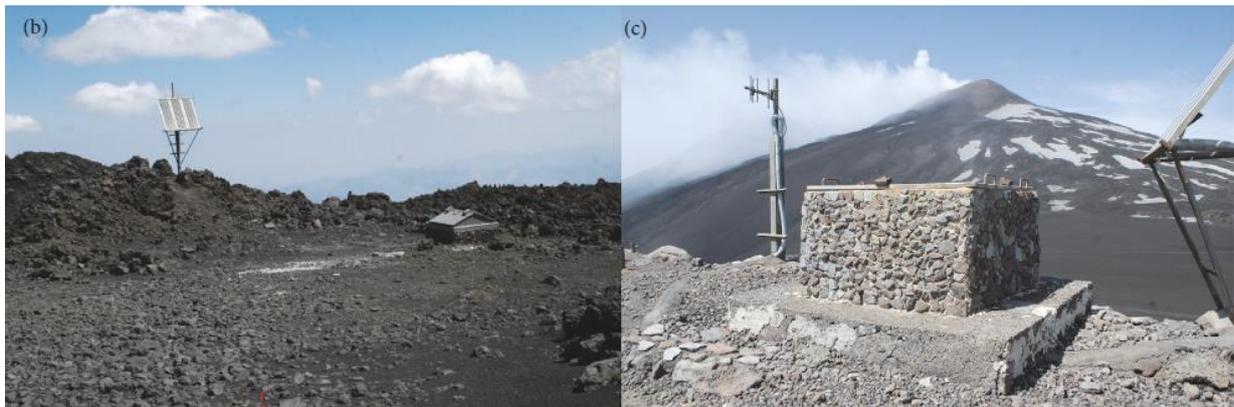
Η παραμόρφωση του εδάφους είναι ένας σημαντικός δείκτης που παρατηρεί πώς και γιατί τα ηφαίστεια αλλάζουν το σχήμα τους έτσι ώστε να προβλεφθούν πρόδρομες εκρήξεις. Οι γεωδαιτικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό μπορούν να ταξινομηθούν ως συνεχείς και ασυνεχές. Συνεχείς μετρήσεις (π.χ. strainmeter, tiltmeters, GPS) περιλαμβάνουν δεδομένα δειγματοληψίας σε σύντομα διακριτά διαστήματα (από χιλιοστά του δευτερολέπτου έως λεπτά), ενώ οι διακριτές μετρήσεις πραγματοποιούνται κατά διαστήματα κάθε λίγες μέρες, μήνες ή χρόνια (π.χ. leveling, έρευνες GPS και radar interferograms).

Ένα tiltmeter είναι κάθε συσκευή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μέτρηση αλλαγών στην τοπική κλίση της επιφάνειας της Γης και αρκετοί τύποι οργάνων που επιτρέπουν τη λήψη μετρήσεων υψηλής ακρίβειας, μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες: short and long base. Το πρώτο χρησιμοποιεί έναν αισθητήρα φουσαλίδων ή ένα εκκρεμές για να ορίσει την κατακόρυφη και το δεύτερο την ελεύθερη επιφάνεια ενός υγρού ως οριζόντια αναφορά. Τα short base tiltmeters είναι γενικά φορητά και λιγότερο ακριβά, καθιστώντας τα πιο κατάλληλα για τις περισσότερες αντιδράσεις σε κρίσεις ηφαιστειών, αν και τα long base θεωρούνται πιο σταθερά.

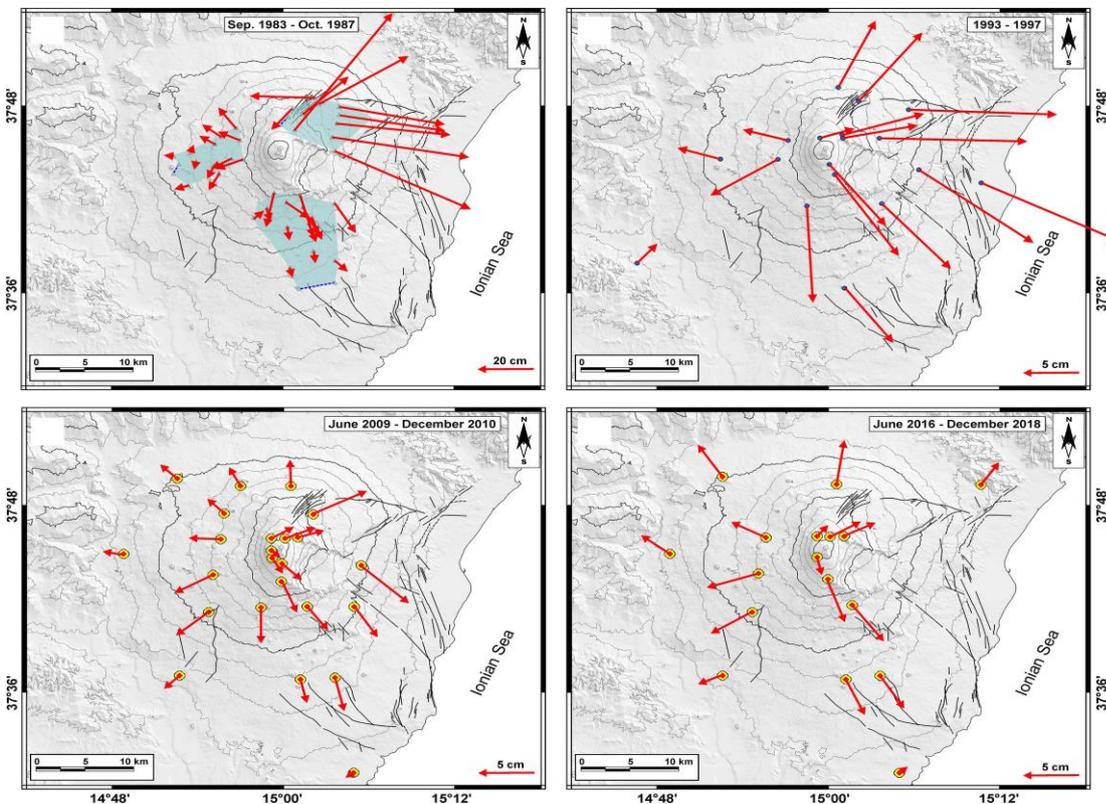
Για την παραμόρφωση του εδάφους χρησιμοποιούνται συνεχείς μετρήσεις κλίσης και χρησιμοποιούνται για την καταγραφή μεσαίας-βραχυπρόθεσμης έκρηξης πρόδρομων ουσιών και για την πρόβλεψη του εκρηκτικού συλ μιας επικείμενης έκρηξης. Οι αργές διακυμάνσεις της κλίσης θα μπορούσαν να υποδηλώνουν πληθωρισμό που προκαλείται από αυξανόμενο

μάγμα πριν από την έκρηξη ή τον αποπληθωρισμό που συνδέεται με απελευθέρωση ενέργειας μετά από εκρήξεις ενώ οι γρήγορες διακυμάνσεις κλίσεων (από ώρες σε ημέρες) σχετίζονται με την ταχεία αύξηση του μάγματος και διάδοση αναχωμάτων και εκρηκτικών ρωγμών.

Τα κύρια στοιχεία για την επίτευξη αποτελεσματικής παρακολούθησης της κλίσης του ηφαιστείου είναι όργανα υψηλής ευαισθησίας και βάθους 10–15 m ή περισσότερα και ένα γεωμετρικό δίκτυο που περιλαμβάνει σταθμούς κοντά στην περιοχή της κορυφής (Dzurisin, 2007).

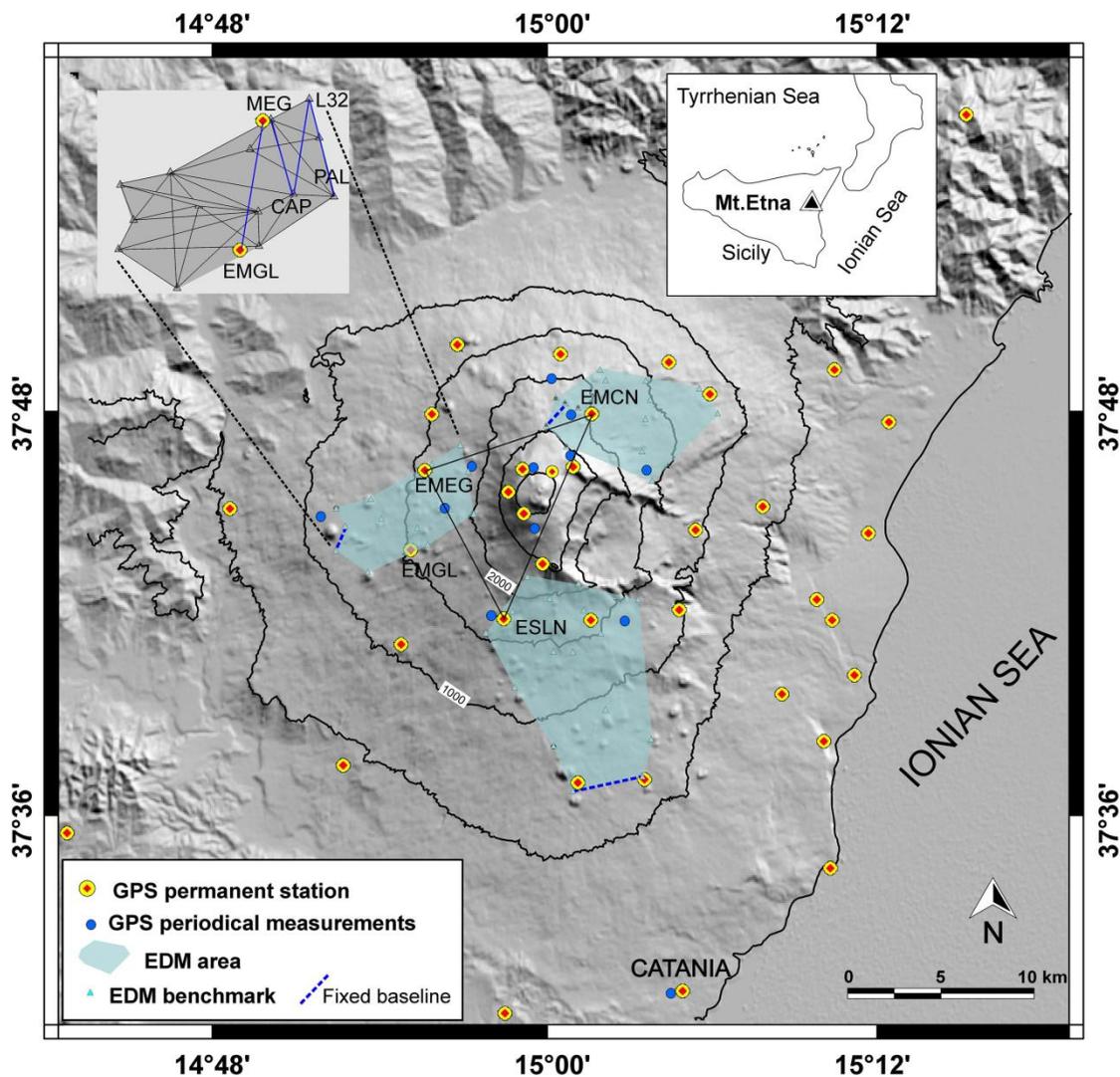


Εικόνα 92: Εγκαταστάσεις σταθμών παρακολούθησης της κλίσης του ηφαιστείου [Πηγή: Gambino, et al., 2019]



Εικόνα 93: Μοτίβα διανυσμάτων μετατόπισης φάσεων πληθωρισμού σε διαφορετικές περιόδους που λαμβάνονται από δίκτυα γεωδαιτικής παρακολούθησης παραμόρφωσης στην Αίτνα. (Α) πληθωρισμός 1983–1987 και κυρίαρχη ανατολική πλευρά ολίσθησης από τις μετρήσεις EDM. (Β) Πληθωρισμός 1993–1997 από περιοδικές μετρήσεις GPS. (Γ) 2008–2009 και (Δ) πληθωρισμός 2016–2018 από συνεχές μόνιμο δίκτυο GPS (CGPS) [Πηγή: Bonaccorso et al., 2021].

Στο ηφαίστειο της Αίτνας έχει πραγματοποιηθεί συστηματική παρακολούθηση της κλίσης από το Istituto Nazionale Geofisica e Vulcanologia– Osservatorio Etneo (INGV-OE) από τα τέλη της δεκαετίας του 1970. Εγκαταστάθηκαν τρία δίκτυα trilateration που βρίσκονται στις τρεις κύριες ζώνες ρήξης του ηφαιστείου και χρησιμοποιούσαν μετρήσεις με ηλεκτροοπτικές αποστάσεις (Electrooptical Distance Measurements, EDM) σε ετήσια βάση, γεγονός που επαναλαμβανόταν μέχρι το 2007 (Bonaccorso et al., 1995). Με τη χρήση αυτής της τεχνικής, οι μετρήσεις των αποστάσεων μεταξύ των σημείων αναφοράς έχουν ακρίβεια μήκους 5 mm, χρησιμοποιώντας λέιζερ ή υπέρυθρο φως που αντανακλάται σε πρίσματα ή ακόμα και σε επιφάνειες βράχων παρέχοντας ακριβείς οριζόντιες, κατακόρυφες και line of sight μετρήσεις. Στην αρχή της δεκαετίας του 1990, οι πρώτες μετρήσεις GPS (Global Positioning System) ξεκίνησαν, σε ετήσια σχεδόν βάση (Palano et al., 2008), μία τεχνική που παρείχε μεγάλη βελτίωση στην παρακολούθηση. Επέτρεπε τη μέτρηση των τρισδιάστατων μετατοπίσεων σε ένα μοναδικό δίκτυο που καλύπτει ολόκληρο το ηφαίστειο, καθώς τα αρχικά 9 σημεία αναφοράς που υπήρχαν το 1988, άρχισαν να αυξάνονται σταδιακά. Οι βελτιώσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν και τεχνολογικές πτυχές καθώς από τα μέσα της δεκαετίας του 1990 ξεκίνησαν οι εγκαταστάσεις των πρώτων μόνιμων σταθμών GPS με συνεχή απόκτηση δεδομένων (CGPS) σε 36 επιλεγμένες τοποθεσίες, σε πολύ υψηλό ρυθμό (έως 10 Hz) (Bruno et al., 2012) για την επίτευξη υψηλότερης κάλυψης και ακρίβειας. Χρησιμοποιώντας όμως μόνο μετρήσεις EDM, οι απόλυτες μετατοπίσεις δεν μπορούν να προσδιοριστούν αφού το δίκτυο δεν είναι συνδεδεμένο σε μια εξωτερική σταθερή αναφορά. Ωστόσο, οι περιττές γραμμές βάσης των δικτύων επιτρέπουν τον υπολογισμό της σχετικής κίνησης των σημείων αναφοράς σε σχέση με μια αυθαίρετα καθορισμένη γραμμή βάσης (δηλ. καθορισμός δύο σημείων αναφοράς του δικτύου) (Prescott, 1981).

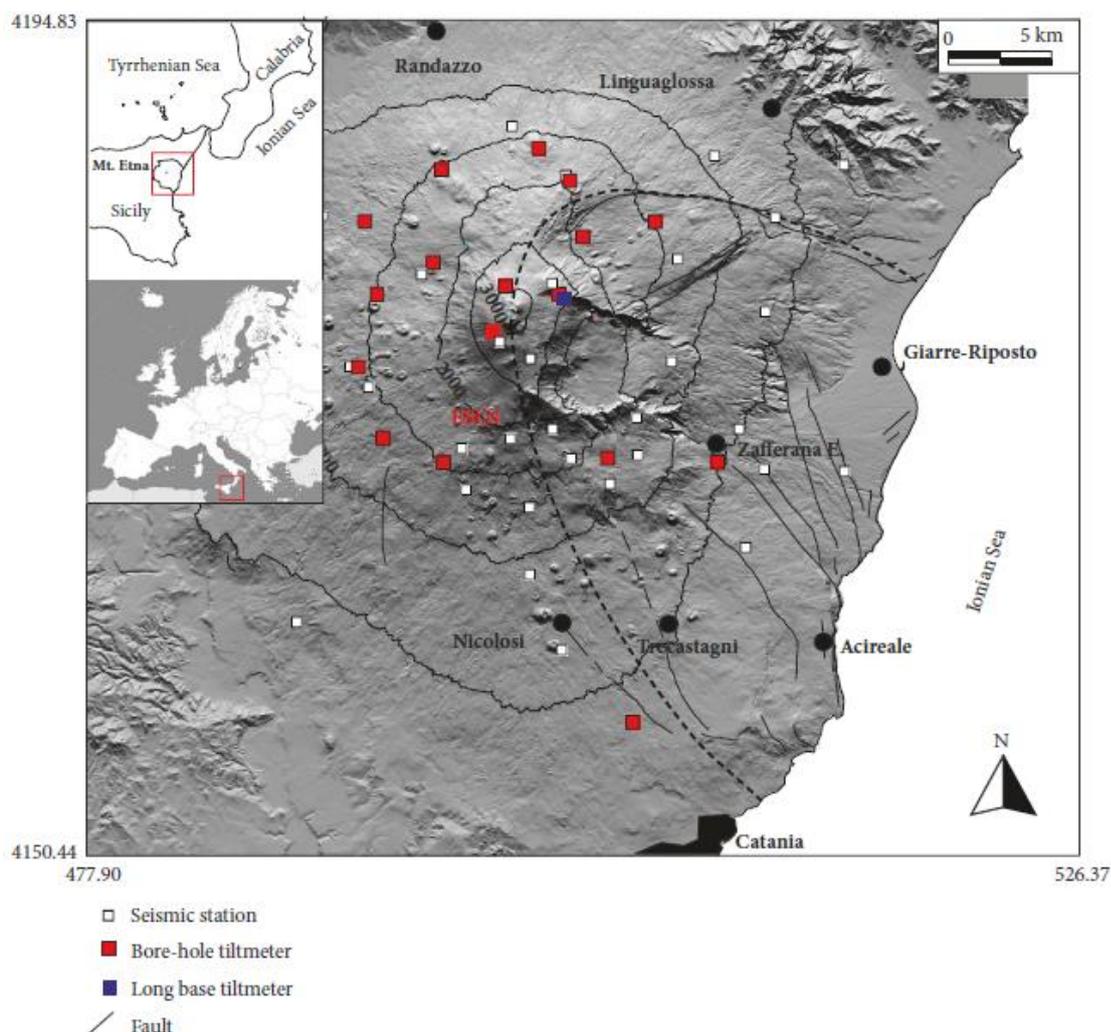


Εικόνα 94: Χάρτης Αίτας με τα διαφορετικά δίκτυα γεωδαιτικής παρακολούθησης: τα τρία δίκτυα που καλύπτονται από τις Μετρήσεις Ηλεκτροοπτικών Αποστάσεων (EDM), τα GPS σημεία αναφοράς που μετρώνται περιοδικά (μπλε κύκλοι) και οι μόνιμοι σταθμοί του συνεχούς GPS (CGPS) (κίτρινοι-κόκκινοι κύκλοι) [Πηγή: Bonaccorso et. al., 2021].

Η ανάλυση των δεδομένων GPS στο ηφαίστειο της Αίτας επέτρεψε να συναχθεί η θέση των δεξαμενών μάγματος που δρουν τις τελευταίες δεκαετίες, προσδιορίζοντας μια ζώνη πίεσης κάτω από τη δυτική πλευρά στο βάθος που κυμαίνεται από 2 έως 9 km, μελετώντας αρκετές ρηχές εισβολές που σχετίζονται με τις πρόσφατες εκρήξεις, ποσοτικοποιώντας τη δυναμική των πλευρών της και μοντελοποιώντας τις επιφάνειες αποκόλλησης κάτω από τις ανατολικές και νότιες πλευρές. Σε μία τοπική κλίμακα (π.χ. στις περιοχές κορυφής και κατά μήκος του ρήγματος Pernicana), έχουν επίσης εντοπιστεί μετατοπίσεις και μοντελοποιήσεις.

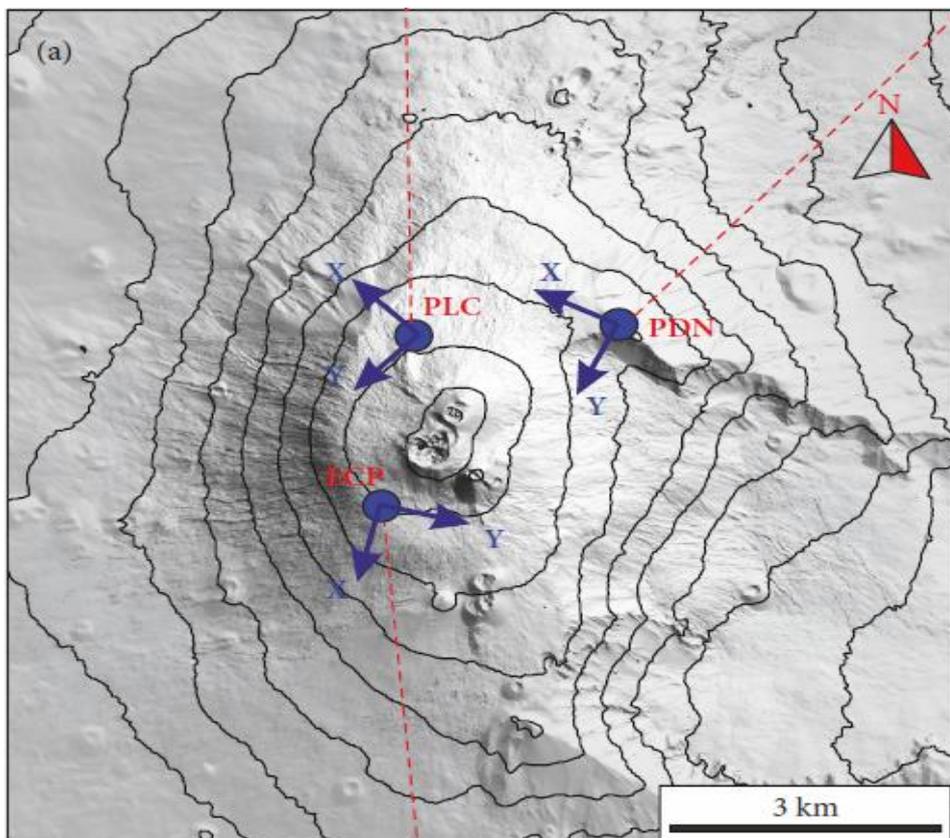
Επιπλέον, από τα τέλη της δεκαετίας του 1970 χρησιμοποιήθηκαν tiltmeters γεώτρησης φυσαλίδων. Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 2000, σήματα από tiltmeters σε σπές βάθους μεταξύ 2 και 4 m είχαν επηρεαστεί από τον περιβάλλοντα θόρυβο. Τα τελευταία 10 χρόνια, πολύ ακριβή όργανα, εξοπλισμένα με self-leveling συστήματα και η μαγνητική πυξίδα,

επέτρεψαν την εγκατάσταση σε μεγαλύτερα βάθη με σχετική απλότητα. Η πρώτη εγκατάσταση πραγματοποιήθηκε το 2007 σε βάθος 30 m και τα αποτελέσματα που προέκυψαν οδήγησαν στην ανακαίνιση του δικτύου.



Εικόνα 95: Χάρτης των μόνιμων δικτύων κλίσης και σεισμού που λειτουργούν στην Αίτνα [Πηγή: Gambino, et, al., 2019].

Ειδικότερα, χάρη στα Ευρωπαϊκά Διαρθρωτικά Ταμεία (PON Vulcamed Project), έχουν τοποθετηθεί τρεις αισθητήρες βάθους 27-30 m εγκατεστημένοι στην περιοχή κορυφής του ηφαιστείου (PDN, PLC και ECP) και οι ήδη υπάρχοντες αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε μεγαλύτερα βάθη.



Εικόνα 96: Χάρτης των τριών αισθητήρων (PLC, PBN και ECP) που έχουν τοποθετηθεί στην περιοχή της κορυφής του ηφαιστείου της Αίτνας [Πηγή: Gambino, et al., 2019].

Το μόνιμο δίκτυο κλίσης της Αίτνας περιλαμβάνει 17 διαξονικά όργανα εγκατεστημένα σε ρηχές γεωτρήσεις και ένα ρευστό (υδράργυρο) long base όργανο μέσα σε δύο σήραγγες μήκους 80 m στο Ηφαιστειολογικό Παρατηρητήριο Pizzi Deneri. Σταθερή θερμοκρασία χαρακτηρίζει τους αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι σε αυτούς τους σταθμούς και τα σήματα έχουν χαμηλό θόρυβο ώστε να μην παρεμποδίζονται οι μετρήσεις. Οι περισσότεροι σταθμοί είναι προγραμματισμένοι για λήψεις ανά ένα λεπτό, συμπεριλαμβανομένης της απόκτησης θερμοκρασιών κλίσης, αέρα και εδάφους, πίεση αέρα και παραμέτρους οργάνου ελέγχου. Ορισμένοι σταθμοί βέβαια είναι επίσης προγραμματισμένοι για ταχύτερη λήψη (ανά δευτερόλεπτο). Οι δύο άξονες είναι προσανατολισμένοι να ανιχνεύουν δύο στοιχεία (X και Y) ορθογώνια ο ένας προς τον άλλον, με τις θετικές τιμές των αξόνων X και Y να υποδηλώνουν αποπληθωρισμό και τις αρνητικές να δείχνουν πληθωρισμό ενώ όλα τα δεδομένα αποθηκεύονται στη γενική βάση δεδομένων INGV που ονομάζεται TSDSystem, το οποίο εμφανίζει γραφικά όλα τα αποκτηθέντα σήματα.

## 6.6. Γεωχημική παρακολούθηση

Η γεωχημική παρακολούθηση των αερίων του εδάφους έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως ως ένα ισχυρό εργαλείο για την επιτήρηση ηφαιστειών. Οι ηφαιστειακές εκρήξεις μπορούν να απελευθερώσουν τεράστιες ποσότητες σωματιδίων και αερίων στην ατμόσφαιρα, που μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο σε περιφερειακή και παγκόσμια κλίμακα. Η συχνή δραστηριότητα των τελευταίων δεκαετιών προκάλεσε την επιστημονική κοινότητα και την Πολιτική Άμυνα να δώσει περισσότερη προσοχή στην επιτήρηση του ηφαιστείου, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ποικιλίας ηφαιστειακών συστημάτων παρακολούθησης που έχουν αναπτυχθεί με τα χρόνια, κάνοντας την Αίτνα ως ένα από τα πιο εντατικά παρακολουθούμενα ηφαίστεια στον κόσμο [Bonaccorso et al., 2011a]. Ηφαιστειακές εκπομπές περιλαμβάνουν ηφαιστειακά σωματίδια που δημιουργούνται από αέρια και τον κατακερματισμό μάγματος, με μεγάλες ποσότητες CO<sub>2</sub> να απελευθερώνονται νωρίς, κατά την άνοδο του μάγματος, πριν ή κατά τη διάρκεια των εκρήξεων.

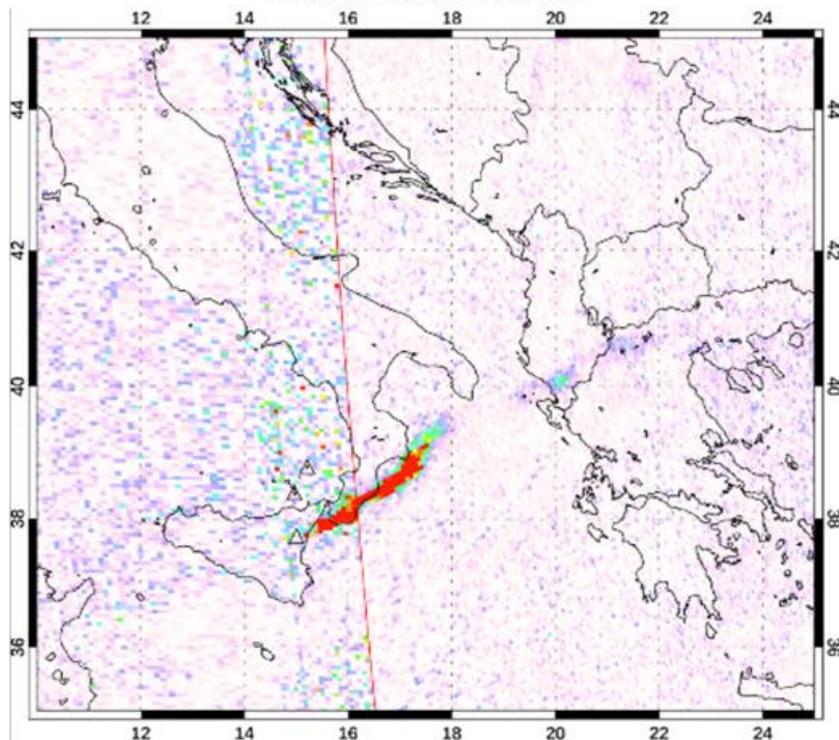
Ο αντίκτυπος των ηφαιστειακών εκπομπών στον πλανητικό προϋπολογισμό ακτινοβολίας εντείνεται περαιτέρω όταν οι ηφαιστειακές εκρήξεις μεταφέρουν σωματίδια στη στρατόσφαιρα. Ο μεγάλος χρόνος παραμονής στη στρατόσφαιρα συνοδεύεται από τις έντονες αλληλεπιδράσεις τόσο της τέφρας όσο και των θειικών αλάτων με την ηλιακή ακτινοβολία να αυξάνει τη λευκαύγεια της Γης, το μέτρο δηλαδή της ανακλαστικότητας, και προκαλώντας καταστροφή του όζοντος σε παγκόσμιο επίπεδο κλίμακας.

Παρατηρήσεις επίγειας και δορυφορικής τηλεπισκόπησης παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη δυναμική απελευθέρωσης αερίων του ηφαιστειακού συστήματος. Πιο συγκεκριμένα έχει χρησιμοποιηθεί μια ποικιλία δορυφορικών αισθητήρων για την ανίχνευση ηφαιστειακού νέφους. Ο δορυφόρος Sentinel-5 που φέρει το όργανο TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί από το διάστημα τη σταδιακή αλλαγή των αερίων παρέχοντας χάρτες ηφαιστειακής πυκνότητας που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της οριζόντιας μεταφοράς ηφαιστειακών σύννεφων SO<sub>2</sub> αλλά και του υψομέτρου και των ιδιοτήτων των ηφαιστειακών αερολυμάτων. Επιπλέον στοιχεία για την παρακολούθηση εκπομπής SO<sub>2</sub> αφομοιώνονται στα συστήματα του Μετεωρολογικού Οργανισμού της Πολεμικής Αεροπορίας (AFWA) αλλά και από δορυφόρους, όπως είναι οι AVHRR, MISR, MODIS, TOMS και AERONET, οι μετρήσεις μερικών εκ των οποίων

απεικονίζονται σε παγκόσμια κλίμακα στον ακόλουθο ιστότοπο <https://so2.gsfc.nasa.gov/> (Τελευταία ανάκτηση 9/2/2022).

## TROPOMI/S5P – 30/05/2019 11:17-13:01 UTC

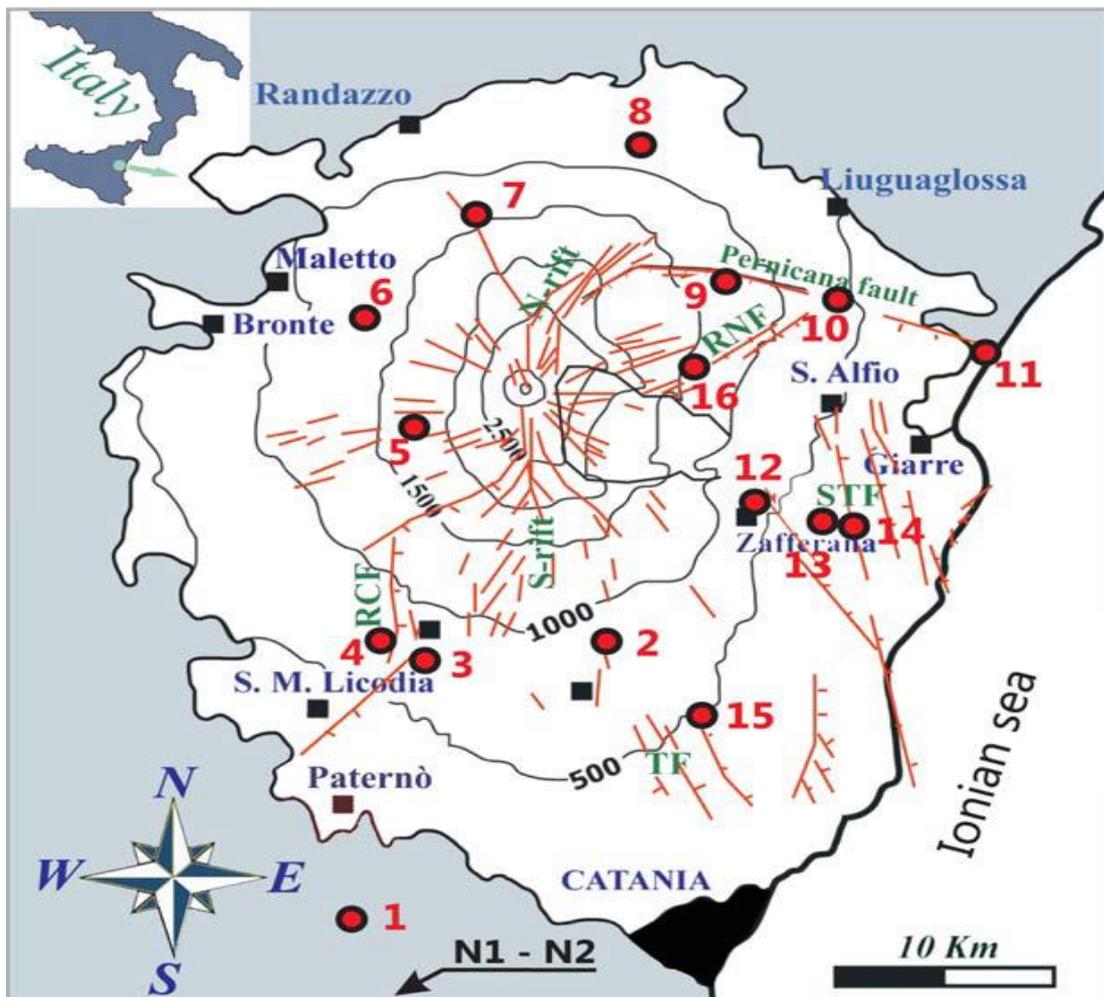
SO<sub>2</sub> mass: 0.8 kt



Εικόνα 97: Επιβάρυνση μάζας SO<sub>2</sub> που συλλέχθηκε από τον TROPOMI/S5P στις 30 Μαΐου 2019, 11:17–13:01 UTC [Πηγή: Kamprouri et. al., 2021]

Επιπλέον αναπτύχθηκαν οι κατάλληλες τεχνολογίες που επιτρέπουν τη συνεχή και αυτοματοποιημένη παρακολούθηση οποιωνδήποτε σημαντικών γεωχημικών παραμέτρων στο Όρος Αίτνα. Το πρώτο δίκτυο συνεχούς παρακολούθησης των γεωχημικών παραμέτρων στην περιοχή αυτή αναπτύχθηκε από το Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) του Παλέρμο [Gurrieri et al., 2008] για την παρακολούθηση της ροής CO<sub>2</sub> του εδάφους (δίκτυο EtnaGAS). Το CO<sub>2</sub> επιλέχθηκε καθώς αναγνωρίζεται ως ένα από τα πιο σημαντικά είδη αερίων για παρακολούθηση ηφαιστειακή δραστηριότητα (Symonds et al., 2001). Ο πρώτος από τους σταθμούς του δικτύου EtnaGAS που εγκαταστάθηκε ήταν τον Δεκέμβριο του 2002, με περαιτέρω προσθήκες που έλαβαν χώρα τα επόμενα χρόνια. Σήμερα, η EtnaGAS περιλαμβάνει 18 αυτόματους σταθμούς που βρίσκονται κοντά στις κύριες ηφαιστειακές δομές της Αίτνας σε περιοχές του ηφαιστείου που χαρακτηρίζονται από ισχυρές εκπομπές CO<sub>2</sub> του εδάφους. Οι τοποθεσίες επιλέχθηκαν σύμφωνα με τις υπάρχουσες τεκτονικές δομές του ηφαιστείου, οι οποίες είναι γνωστό ότι διευκολύνουν την κίνηση των ηφαιστειακών αερίων κατά μήκος του

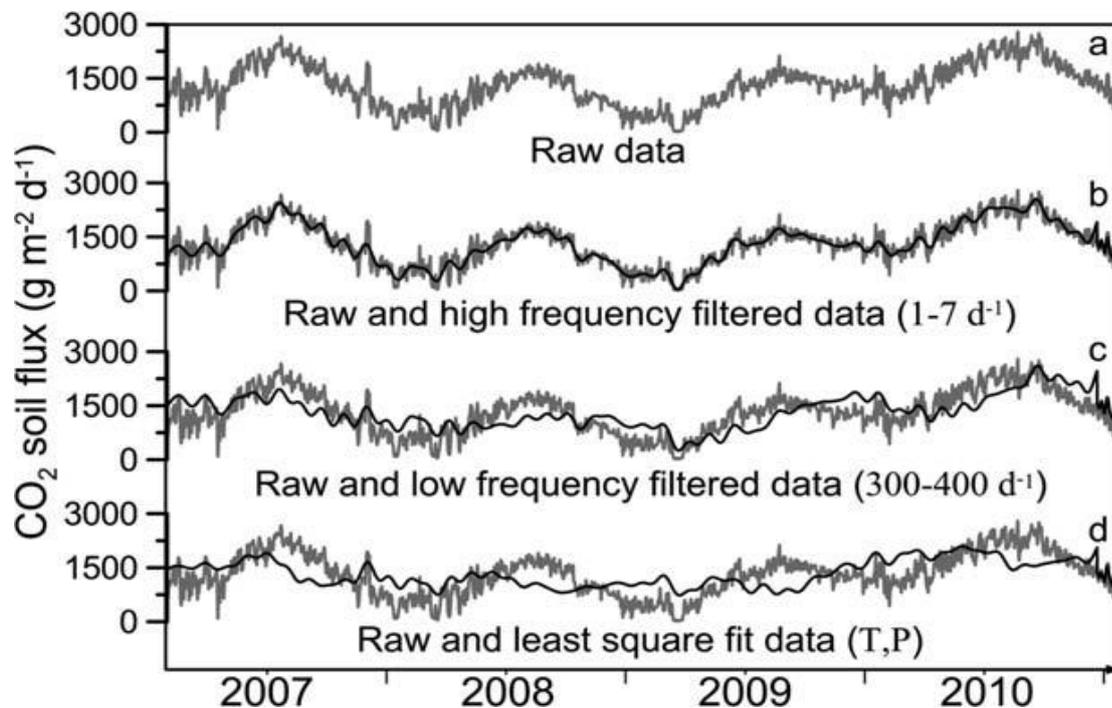
φλοιού προς την επιφάνεια της γης (De Gregorio et al., 2002; Gurrieri et al., 2008). Ο πρώτος σταθμός του δικτύου που εγκαταστάθηκε ήταν το 2002, και η τελική διαμόρφωση πραγματοποιήθηκε το 2008.



Εικόνα 98: Χάρτης του όρους Αίτνα που δείχνει τη θέση του δικτύου αερίου (Οι σταθμοί N1 και N2 είναι εκτός χάρτη, βρίσκονται περίπου 50 km νοτιοανατολικά του κρατήρα κορυφής της Αίτνας). (1) Agro, (2) Parcoetna, (3) Sml1, (4) Sml2, (5) Albano1, (6) Maletto, (7) Msm1, (8) Passop, (9) Brunek, (10) Rocca2, (11) Fondachello, (12) Primoti, (13) Sv1, (14) P78, (15) 3c, και (16) Ripenaca. RCF: Σφάλματα Ragalna-Calcerana, TF: Trecastagni βλάβες, STF: Σφάλματα Santa Venerina, RNF: Όριμο Σφάλματα della Naca, S-Rift: South Rift, και N-Rift: North Rift [Πηγή: Liuzzo et. al., 2013].

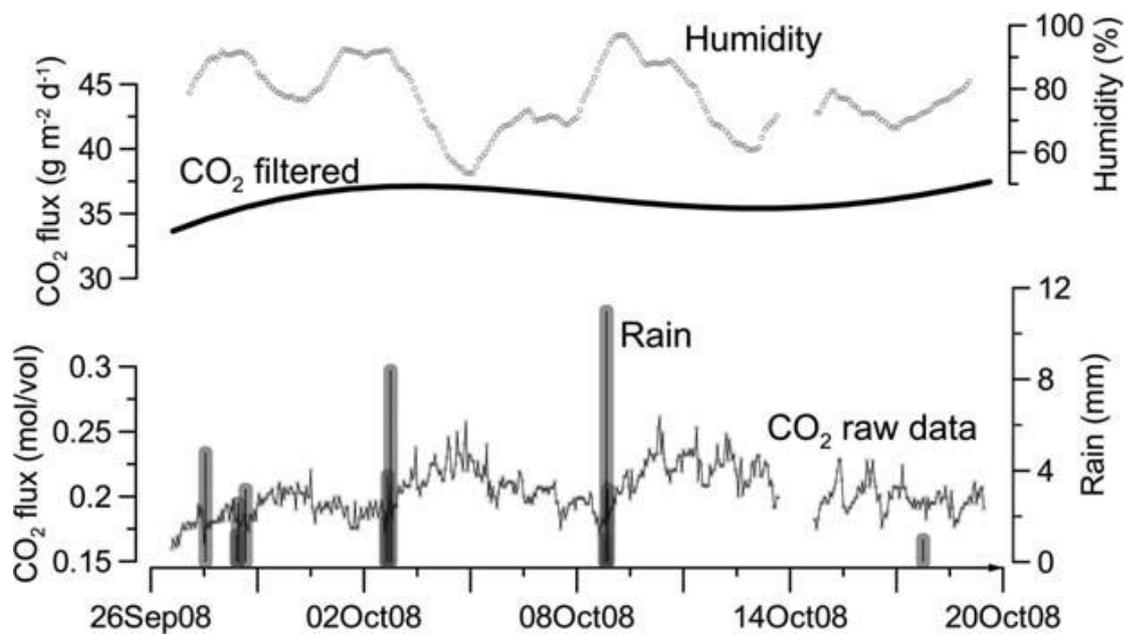
Οι σταθμοί παρακολουθούν παραμέτρους όπως τη ροή εδάφους CO<sub>2</sub> και CH<sub>4</sub>, ατμοσφαιρική θερμοκρασία (T), πίεση (P) και RH, βροχή, ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου. Τα δεδομένα αποκτώνται σε ωριαίες περιόδους δειγματοληψίας, που είναι ένας καλός συμβιβασμός μεταξύ των λεπτομερειών των πληροφοριών (ως ισχυρή διακύμανση της ροής CO<sub>2</sub> σε υψηλότερη συχνότητα είναι απίθανο) και κατανάλωση ενέργειας. Οι μετρήσεις ροής CO<sub>2</sub> πραγματοποιούνται από τη δυναμική μέθοδο (Gurrieri & Valenza, 1988), η οποία βασίζεται στην περιεκτικότητα σε CO<sub>2</sub> σε ένα μείγμα αέρα και αερίου εδάφους που λαμβάνεται χρησιμοποιώντας έναν καθετήρα που εισάγεται στο έδαφος σε βάθος 50 cm και στον οποίο

εισέρχονται αέρια εδάφους μέσω της βάσης του καθετήρα και αραιώνονται με αέρα. Βέβαια όταν οι περιβαλλοντικοί παράγοντες επηρεάζουν την απαέρωση του εδάφους, είναι απαραίτητο να φιλτράρονται τα αρχικά δεδομένα ώστε να ελαχιστοποιεί την επίδραση στην έκλυση ενδογενούς CO<sub>2</sub> (Liuzzo et. al., 2013).



Εικόνα 99: Παράδειγμα μεθόδων που χρησιμοποιούνται για το φιλτράρισμα των δεδομένων ροής CO<sub>2</sub> που εξάγεται από το σταθμό που επηρεάζεται περισσότερο από μετεωρολογικές παραμέτρους. Το σήμα (a) αποτελεί τα υψηλής ανάλυσης ακατέργαστα δεδομένα (γκρίζα γραμμή) ενώ τα (b, c, d) το επικαλυπτόμενο φιλτραρισμένο σήμα (μαύρη γραμμή). Το σχήμα b είναι το φιλτραρισμένο σήμα, το οποίο υποβάλλεται σε επεξεργασία για τη μείωση του θορύβου υψηλής συχνότητας. Τα σχήματα c και d είναι οι δύο τρόποι που χρησιμοποιούνται για το φιλτράρισμα του εποχιακού στοιχείου [Πηγή: Liuzzo et. al., 2013].

Εκτός από τους προαναφερθέντες ένας επιπλέον παράγοντα που επηρεάζει την απαέρωση του εδάφους είναι η ατμοσφαιρική υγρασία και βροχή, η επίδραση των οποίων είναι σύντομη από άποψη χρόνου καθώς μειώνεται εμφανώς λίγες ημέρες μετά από ένα επεισόδιο βροχόπτωσης.



Εικόνα 100: Επιρροή της βροχόπτωσης στον σταθμό 3c του δικτύου. Ακόμα κι αν λίγοι σταθμοί παρακολούθησης επηρεάζονται από τις βροχοπτώσεις, αυτή η επίδραση είναι μόνο προσωρινή και μπορεί να παραμεληθεί στη διαδικασία φιλτραρίσματος [Πηγή: Liuzzo et. al., 2013].

Οι σταθμοί παρακολούθησης είναι κατανομημένοι σε ευρεία περιοχή του ηφαιστείου καλύπτοντας περισσότερα από 1,4103 km<sup>2</sup> και ποικίλλουν σημαντικά ως προς το πάχος και τον τύπο του εδάφους, την κάλυψη βλάστησης και την παρουσία των τεκτονικών δομών, με διαφορές στη μαγματική μετανάστευση CO<sub>2</sub> προς την επιφάνεια, ώστε ο έλεγχος των δεδομένων που λαμβάνονται από κάθε σταθμό και η σύγκριση μεταξύ τους να προσδιορίζει τις διακυμάνσεις της ροής CO<sub>2</sub>, η οποία μπορεί να σχετίζεται με μία μαγματική δραστηριότητα σε βαθιά εξέλιξη που θα μπορούσε να εξελιχθεί σε ένα ηφαιστειακό γεγονός που θα παρατηρηθεί στην επιφάνεια. Οι σταθμοί έχουν τοποθετηθεί σε υψόμετρο μικρότερο των 1900 m γιατί η περίοδος που διαρκεί ο χειμώνας στην Αίτνα είναι μεγάλη και χαρακτηρίζεται από έντονα καιρικά φαινόμενα με χιόνι και πάγο να καλύπτει ένα μεγάλο μέρος της κορυφής του οικοδομήματος (Liuzzo et. al., 2013).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Συμπεράσματα

Τις τελευταίες δεκαετίες επικρατεί μία παγκόσμια αφύπνιση για την πρόβλεψη και τον περιορισμό των φυσικών καταστροφών. Οι ηφαιστειακές εκρήξεις αποτελούν ένα φαινόμενο ιδιαίτερα καταστρεπτικό, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την Ιταλία, μία χώρα με μεγάλη ιστορία όσον αφορά τις ηφαιστειακές εκρήξεις καθώς πολιτισμοί ολόκληροι έχουν θαφτεί κάτω από τις στάχτες των ηφαιστειών της. Μία άλλη περιοχή έντονης ηφαιστειακής δραστηριότητας είναι το ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου. Η μελέτη των ιστορικών εκρήξεων του ηφαιστείου της Σαντορίνης, δείχνει τις έντονες αλλαγές της μορφολογίας του νησιού από την Μινωική έκρηξη μέχρι και την τελευταία έκρηξη που πραγματοποιήθηκε το 1950.

Ο άνθρωπος στέκεται ανήμπορος να αντιδράσει μπροστά σε αυτές τις καταστροφές γι' αυτό η σημασία των συστημάτων παρακολούθησης των ηφαιστειών είναι πολύτιμη. Τα αποτελέσματα τα οποία διεξάγονται είναι πολύ χρήσιμα για την καταγραφή και την κατανόηση της κατάστασης των ηφαιστειών σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να γίνει και πρόβλεψη ενδεχόμενης ηφαιστειακής έκρηξης.

Πριν την εκδήλωση μιας ηφαιστειακής έκρηξης, συχνά υπάρχουν έντονα πρόδρομα σημάδια. Αυτό είναι και το πλεονέκτημα τόσο για τους επιστήμονες που μελετούν το φαινόμενο, όσο και για τους ίδιους τους κατοίκους. Τόσο η Σαντορίνη, όσο και η Αίτνα διαθέτουν ένα ολοκληρωμένο δίκτυο συστημάτων παρακολούθησης των ηφαιστειών. Και στις δύο περιπτώσεις υπάρχουν τα βασικά συστήματα παρακολούθησης τα οποία σχετίζονται με τα πρόδρομα φαινόμενα εμφάνισης των ηφαιστειών, όπως είναι η σεισμική, η γεωδαιτική και η χημική παρακολούθησή τους. Βέβαια τα συστήματα παρακολούθησης που έχουν εγκατασταθεί στο ηφαίστειο της Αίτνας βρίσκονται σε μεγαλύτερη αφθονία σε σύγκριση με του ηφαιστείου της Σαντορίνης, καθώς σε κάθε μορφή παρακολούθησής τους, οι σταθμοί στην Αίτνα αποτελούν τουλάχιστον τους διπλάσιους σε αριθμό. Είναι απαραίτητο όμως να τονισθεί πως, η γεωγραφική θέση του ηφαιστείου της Σαντορίνης δεν ευνοεί την τοποθέτηση περισσότερων σταθμών παρακολούθησης σε σύγκριση με την Αίτνα, λόγω της περιορισμένης έκτασής του. Η ύπαρξή του βέβαια σε νησιωτικό σύμπλεγμα αποτέλεσε την ανάγκη για τη δημιουργία σταθμών μέτρησης της διακύμανσης της στάθμης και της θερμοκρασίας της θάλασσας, γεγονός που δεν επηρεάζει αντίστοιχα το ηφαίστειο της Αίτνας. Επιπλέον στα συστήματα παρακολούθησης της Αίτνας εντάσσεται και η μέθοδος παρακολούθησης μέσω

υπόηχων, ένα σύστημα που απουσιάζει από τον τρόπο παρακολούθησης του ηφαιστείου της Σαντορίνης.

Τα προς μελέτη ηφαίστεια αποτελούν δύο από τους σημαντικότερους τουριστικούς προορισμούς στον κόσμο. Το γεγονός αυτό και ιδιαίτερα τις περιόδους με αυξημένο τουρισμό αυξάνεται και η επικινδυνότητα στις περιοχές αυτές, καθώς μία ενδεχόμενη έκρηξη θα προκαλέσει πολύ μεγαλύτερες επιπτώσεις σε σύγκριση με τις περιόδους όπου στις περιοχές βρίσκονται μόνο οι μόνιμοι κάτοικοι. Επιπλέον, πολύ σημαντική παράμετρο, ιδιαίτερα στις περιόδους με αυξημένο τουρισμό, αποτελεί η οργάνωση του τρόπου διαφυγής του πληθυσμού και κυρίως στην περιοχή της Σαντορίνης, όπου αυτοί περιορίζονται μόνο στις εναέριες και πλωτές διεξόδους. Η οργάνωση λοιπόν της πολιτείας για μία πιθανή έκρηξη και πρωτίστως τους καλοκαιρινούς μήνες κρίνεται απαραίτητη. Τα δεδομένα που συλλέγονται, σε συνδυασμό με το χάρτη κάλυψης και χρήσης γης των περιοχών πέριξ των ηφαιστειών, μπορούν να συνεισφέρουν σε θέματα πολιτικής προστασίας, όπως είναι ο μετριασμός των αρνητικών επιπτώσεων μιας ενδεχόμενης ηφαιστειακής έκρηξης.

Κλείνοντας, θα πρέπει να τονιστεί πως η συμβολή του Ι.Μ.Π.Η.Σ της UNAVCO (GPS) και του INGV είναι πολύ σημαντική. Χωρίς την βοήθεια τους δεν θα υπήρχε τόσο μεγάλη εξέλιξη στον τομέα της παρακολούθησης των ηφαιστειών. Το προσωπικό των ομάδων συνεχίζει τις μετρήσεις στα ηφαίστεια της Σαντορίνης και της Αίτνας για την καλύτερη κατανόηση της ηφαιστειακής δραστηριότητας και την έγκαιρη ενημέρωση των πολιτών σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.

# Βιβλιογραφία

## I. Ελληνική

Αποστολάκη, Μ. (2007). Σαντορίνη (Θήρα). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα. Ανακτήθηκε από: <https://docplayer.gr/1548960-Santorini-thira-ereynitria-apostolaki-maria.html>

Βουλαδάκη, Σ. και Παπαδημητρίου, Α. (2007). ΗΦΑΙΣΤΕΙΑΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ – ΗΦΑΙΣΤΕΙΟ ΤΗΣ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ (πτυχιακή εργασία). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη. Ανακτήθηκε από: <https://blogs.sch.gr/mprasanak/files/2012/12/To-hfaisteio-ths-Santorinis.pdf>

Βουβαλίδης, Κ. (2011). Φυσική Γεωγραφία. Θεσσαλονίκη, Δίσιγμα.

Βουγιουκαλάκης, Γ. (1997). Η Μινωική έκρηξη του ηφαιστείου της Σαντορίνης και ο κόσμος του Αιγαίου.

Βουτυράκης Μ. (2005). Η δράση της όξινης βροχής. Ανακτήθηκε από [http://www.ecocrete.gr/index.php?option=com\\_content&task=view&id=1858&Itemid=85](http://www.ecocrete.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=1858&Itemid=85)

Δερμιτζάκης, Μ. και Λέκκας Σ., (2010). Διερευνώντας Τη Γη Εισαγωγή στη Γενική Γεωλογία. Αθήνα, Κοράλι - Γκέλμπεσης, Γ.

Ι.Μ.Π.Η.Σ: Σαντορίνη, οδηγός για το ηφαίστειο, έκδοση του Ινστιτούτου Μελέτης και παρακολούθησης του ηφαιστείου της Σαντορίνης.

Καρύμπαλης, Ε. (2008). Σημειώσεις, Φυσικές Διεργασίες Κίνδυνοι και Καταστροφές. Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα.

Καρύμπαλης, Ε., Παπαδόπουλος, Α. και Χαλκιάς, Χ. (2014). Η Γεωγραφία του Παράκτιου και Νησιωτικού Χώρου. Αθήνα, Σταμούλη Α.Ε.

Κιμωλιάτης, Ν. (2020). Οι επιπτώσεις των ηφαιστειακών εκρήξεων στις πτήσεις των αεροσκαφών: Η Περίπτωση του ηφαιστείου Eyjafjallajökull (Εϊγιαφιαλαγιόκουλ) (διπλωματική εργασία). Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα. Ανακτήθηκε από: <https://estia.hua.gr/file/lib/default/data/23151/theFile>

Κυριακόπουλος, Κ. (2014). Ηφαιστειολογία. ΕΚΠΑ, Αθήνα.

Λέκκας, Ε. (2000). Φυσικές και Τεχνολογικές Καταστροφές. Αθήνα, Access Pre-Press.

Λέκκας, Ε. και Ανδρεαδάκης, Ε. (2015). Σημειώσεις, Εισαγωγή στην θεωρία της διαχείρισης καταστροφών και κρίσεων. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.

Μιτουλάκη, Σ. (2015). ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ SAR ΤΟΥ ΗΦΑΙΣΤΕΙΟΥ ΑΙΤΝΑ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΟ ΡΗΓΜΑ TRECSTAGNI (πτυχιακή εργασία). Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα. Ανακτήθηκε από: <https://estia.hua.gr/file/lib/default/data/15737/theFile>

Μιχαήλ, Μ. Σ. (2017). Ηφαιστειακή δραστηριότητα και συστήματα παρακολούθησης του ηφαιστείου της Σαντορίνης (πτυχιακή εργασία). Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα. Ανακτήθηκε από: <https://estia.hua.gr/file/lib/default/data/19592/theFile>

Μελάς, Δ., Αλεξανδροπούλου, Α., Αμοιρίδης, Β., Κακαρίδου, Μ. και Σουλακέλης, Ν. (2000). Ατμοσφαιρική Ρύπανση. Οδηγός Εκπαιδευτικών, Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων, Αθήνα. Ανακτήθηκε από: <http://www.env-edu.gr/Documents/%CE%91%CF%84%CE%BC%CE%BF%CF%83%CF%86%CE%B1%CE%B9%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AE%20%CE%A1%CF%8D%CF%80%CE%B1%CE%BD%CF%83%CE%B7%20-%20%CE%9F%CE%B4%CE%B7%CE%B3%CF%8C%CF%82%20%CE%95%CE%BA%CF%80%CE%B1%CE%B9%CE%B4%CE%B5%CF%85%CF%84%CE%B9%CE%BA%CF%8E%CE%BD.pdf>

Παρχαρίδης, Ι., (2015). Περιπτώσεις Εφαρμογών Τηλεπισκόπησης, Αρχές δορυφορικής τηλεπισκόπησης. Αθήνα, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Ανακτήθηκε από: <http://hdl.handle.net/11419/3960>

Ρόζη, Α. (2016). ΕΞΕΛΙΞΗ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΗΦΑΙΣΤΕΙΟΥ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ (2013-2015) ΒΑΣΕΙ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ GPS (διπλωματική εργασία). Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα. Ανακτήθηκε από: <https://pergamos.lib.uoa.gr/uoa/dl/frontend/file/lib/default/data/1326033/theFile>

Τσιμπιρή, Σ. Χ. (2017). Γεωλογική και γεωμορφολογική μελέτη της Σαντορίνης με τη χρήση Τηλεπισκόπησης και GIS (διπλωματική διατριβή). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη. Ανακτήθηκε από: <http://geolib.geo.auth.gr/digeo/index.php/grelit/article/view/11464>

## II. Ξενόγλωσση

Acocella, V., Neri, M., & Sulpizio, R. (2009). Dike propagation within active central volcanic edifices: constraints from Somma-Vesuvius, Etna and analogue models. *Bulletin of Volcanology*, 71, 219–223. doi: [10.1007/s00445-008-0258-2](https://doi.org/10.1007/s00445-008-0258-2)

Acocella, V., & Neri, M. (2005). Structural features of an active strike-slip fault on the sliding flank of Mt. Etna. *Journal of Structural Geology*, 27, 343–355. doi: [10.1016/j.jsg.2004.07.006](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2004.07.006)

Aloisi, M., Bonaccorso, A., Cannavò, F., Gambino, S., Mattia, M., Puglisi, G., & Boschi, E. (2009). A new dyke intrusion style for the Mount Etna May 2008 eruption modelled through continuous tilt and GPS data. *Terra Nova*, 21, 316–321. doi: [10.1111/j.1365-3121.2009.00889.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2009.00889.x)

Alparone, S., Barberi, G., Cocina, O., Giampiccolo, E., Musumeci, C., & Patanè, D. (2012). Intrusive mechanism of the 2008–2009 Mt. Etna eruption: Constraints by tomographic images and stress tensor analys. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 229–230, 50–63. doi: [10.1016/j.jvolgeores.2012.04.001](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.04.001)

Alparone, S., Cocina, O., Gambino, S., Mostaccio, A., Spampinato, S., Tuvè, T. & Ursino, A. (2012b). Seismological features of the Pernicana–Provenzana fault system (Mt. Etna, Italy) and implications for the dynamics of northeastern flank of the volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. doi: [10.1016/j.jvolgeores.2012.03.010](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.03.010)

Andronico, D., Branca, S., Calvari, S., Burton, M., Caltabiano, T., Corsaro, R. A., Del Carlo, P., Garfi, G., Lodato, L., Miraglia, L., Murè, F., Neri, M., Pecora, E., Pompilio, M., Salerno, G., & Spampinato, L. (2005). A multi-disciplinary study of the 2002–03 Etna eruption: Insights into a complex plumbing system. *Bulletin of Volcanology*, 67(4), 314–330. doi: <https://doi.org/10.1007/s00445-004-0372-8>

Armstrong O. (2016). *Armstrongckam.gr*. Retrieved February 21, 2022 from: <https://armstrongckam.wordpress.com/2016/02/28/155/>

Azzaro, R. (1999). Earthquake surface faulting at Mount Etna volcano (Sicily) and implications for active tectonics. *Journal of Geodynamics*, 28, 193–213. doi: [10.1016/S0264-3707\(98\)00037-4](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(98)00037-4)

Azzaro, R., Barbano, M.S., Antichi, B. & Rigano, R. (2000). Macroseismic catalogue of Mt. Etna earthquakes from 1832 to 1998. *Acta Vulcanology*, 12, 3–36.

- Azzaro, R. (2004). Seismicity and active tectonics in the Etna region: constraints for a seismotectonic model. *Geophysical Monograph Series*, 143, 205–220. doi: [10.1029/143GM13](https://doi.org/10.1029/143GM13)
- Barberi, G., Cocina, O., Maiolino, V., Musumeci, C. & Privitera, E. (2004). Insight into Mt. Etna (Italy) kinematics during the 2002–2003 eruption as inferred by seismic stress and strain tensors. *Geophysical Research Letters* 31. doi: [10.1029/2004GL020918](https://doi.org/10.1029/2004GL020918)
- Behncke, B., Branca, S., Corsaro, R. A., De Beni, E., Miraglia, L., & Proietti, C. (2014). The 2011–2012 summit activity of Mount Etna: Birth, growth and products of the new SE crater. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 270, 10–21. doi: [10.1029/2004GL020918](https://doi.org/10.1029/2004GL020918)
- Blackett, M. (2014). Thermal remote sensing of active volcanoes: a user's manual, by A. Harris. *International Journal of Remote Sensing*, 35(10), 3915-3916. doi: [10.1080/01431161.2014.896499](https://doi.org/10.1080/01431161.2014.896499)
- Blodgett, R. & Keller, E. (2005). *Natural hazards: Earth's processes as Hazards, Disasters and Catastrophes*. Prentice Hall.
- Bonaccorso, A., Campisi, O., Falzone, G., Gambino, S., Laudani, G., Puglisi, B., et al. (1995). Ground deformation on active volcanoes in Sicily (Italy). *Cahiers Centre Eur. Geodyn. Seismol.* 8, 349–358.
- Bonaccorso, A., Bonforte, A., Calvari, S., Del Negro, C., Di Grazia, G., Ganci, G., Neri, M., Vicari, A. & Boschi, E. (2011a). The initial phases of the 2008–2009 Mount Etna eruption: A multidisciplinary approach for hazard assessment. *Journal of Geophysical Research*, 116, B03203, doi: [10.1029/2010JB007906](https://doi.org/10.1029/2010JB007906)
- Bonaccorso, A. & Aloisi, M. (2021). Tracking Magma Storage: New Perspectives From 40 Years (1980–2020) of Ground Deformation Source Modeling on Etna Volcano. *Frontiers in Earth Science*, 9, 171. doi: [10.3389/feart.2021.638742](https://doi.org/10.3389/feart.2021.638742)
- Bonforte, A., Gambino, S., Guglielmino, F., Obrizzo, F., Palano, M. & Puglisi, G. (2007b). Ground deformation modeling of flank dynamics prior to the 2002 eruption of Mt. Etna. *Bulletin of Volcanology*, 69, 757–768. doi: [10.1007/s00445-006-0106-1](https://doi.org/10.1007/s00445-006-0106-1)

- Bonforte, A., Federico, C., Giammanco, S., Guglielmino, F., Liuzzo, M. & Neri, M. (2012b). Soil gases and SAR data reveal hidden faults on the sliding flank of Mt. Etna (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. doi: [10.1016/j.jvolgeores.2012.08.010](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.08.010)
- Branca, S., & Del Carlo, P. (2004). Eruptions of Mt. Etna during the past 3,200 Years: A revised compilation integrating the historical and stratigraphic records. *American Geophysical Union*, 143, 6-7. Doi: [10.1029/143GM02](https://doi.org/10.1029/143GM02)
- Branca, S., Coltelli, M., De Beni, E., & Wijbrans, J. (2007). Geological evolution of Mount Etna volcano (Italy) from earliest products until the first central volcanism (between 500 and 100 ka ago) inferred from geochronological and stratigraphic data. *International Journal of Earth Sciences*, 97, 135-152. doi: [10.1007/s00531-006-0152-0](https://doi.org/10.1007/s00531-006-0152-0)
- Bruno, V., Mattia, M., Aloisi, M., Palano, M., Cannavò, F., & Holt, W. E. (2012). Ground deformations and volcanic processes as imaged by CGPS data at Mt. Etna (Italy) between 2003 and 2008. *Journal of Geophysical Research*, 117:B07208. doi: [10.1029/2011JB009114](https://doi.org/10.1029/2011JB009114)
- Corsaro, R. A., Andronico, D., Behncke, B., Branca, S., Caltabiano, T., Ciancitto, F. & Miraglia, L. (2017). Monitoring the December 2015 summit eruptions of Mt. Etna (Italy): Implications on eruptive dynamics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 341, 53–69. doi: [10.1016/j.jvolgeores.2017.04.018](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.04.018)
- D'Alessandro, A. & D'Anna, G. (2013). Suitability of low-cost three-axis MEMS accelerometers in strong-motion seismology: Tests on the LIS331DLH (iPhone) accelerometer. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103, 2906–2913. doi: [10.1785/0120120287](https://doi.org/10.1785/0120120287)
- D' Alessandro, W. & Kyriakopoulos, K. (2013). Preliminary gas hazard evaluation in Greece, 1987–2004. Doi: [10.1007/s11069-013-0789-5](https://doi.org/10.1007/s11069-013-0789-5)
- D' Alessandro, A., Scarfi, L., Scaltrito, A., Di Prima, S. & Rapisarda, S. (2013). Planning the improvement of a seismic network for monitoring active volcanic areas: the experience on Mt. Etna. *Advances in Geosciences*, 36, 39-47. doi: [10.5194/adgeo-36-39-2013](https://doi.org/10.5194/adgeo-36-39-2013)
- Davis, U. (2008). Volcanic Eruption Of 1600 Caused Global Disruption. *ScienceDaily*. Retrieved February 18, 2022 from [www.sciencedaily.com/releases/2008/04/080423135236.htm](http://www.sciencedaily.com/releases/2008/04/080423135236.htm)

De Beni, E., & Proietti, C. (2010). Un geodatabase a supporto della mappatura sineruttiva di colate laviche al monte Etna. *INGV Rapporti Tecnici*, 165, 1–11. (<http://istituto.ingv.it/lingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ngv/archivio/rapporti-tecnici-2010/2010-10-25.5202754525>)

De Beni, E., Cantarero, M. & Messina, A. (2018). UAVs for volcano monitoring: A new approach applied on an active lava flow on Mt. Etna (Italy), during the 27 February–02 March 2017 eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 369, 250-262. doi: [10.1016/j.jvolgeores.2018.12.001](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.12.001)

De Beni, E., Cantarero, M., Neri, M. & Messina, A. (2020). Lava flows of Mt Etna, Italy: the 2019 eruption within the context of the last two decades (1999–2019). *Journal of Maps*, 17:3, 65-76. doi: [10.1080/17445647.2020.1854131](https://doi.org/10.1080/17445647.2020.1854131)

De Gregorio, S., Diliberto, I. S., Giammanco, S., Gurrieri, S. & Valenza, M. (2002). Tectonic control over large-scale diffuse degassing in eastern Sicily (Italy). *Geofluids*, 2, 273– 284. doi: [10.1046/j.1468-8123.2002.00043.x](https://doi.org/10.1046/j.1468-8123.2002.00043.x)

Dehn, J., Dean, K. & Engle, K. (2000). Thermal monitoring of North Pacific volcanoes from space. *Geology*, 28(8), 755-758. doi: [10.1130/0091-7613\(2000\)28<755:TMONPV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28<755:TMONPV>2.0.CO;2)

Di Stefano, G., Romeo, G., Mazzini, A., Iarocci, A., Hadi, S. & Pelphrey, S. (2018). The Lusi drone: A multidisciplinary tool to access extreme environments. *Marine and Petroleum Geology*, 90. doi: [10.1016/j.marpetgeo.2017.07.006](https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.07.006)

Dzurisin, D. (2007). *Volcano Deformation, New Geodetic Monitoring Techniques*, Springer Praxis, London, UK (<https://link.springer.com/content/pdf/bfm%3A978-3-540-49302-0%2F1.pdf>)

Gambino, S., Aloisi, M., Di Grazia, G., Falzone, G., Ferro, A. & Laudani, G. (2019). Ground Deformation Detected by Permanent Tiltmeters on Mt. Etna Summit: The August 23-26, 2018, Strombolian and Effusive Activity Case. *International Journal of Geophysics*. Doi: [10.1155/2019/1909087](https://doi.org/10.1155/2019/1909087)

Gudmundsson, A. (2006). How local stresses control magma-chamber ruptures, dyke injections, and eruptions in composite volcanoes. *Earth-Science Reviews*, 79, 1-31. doi: [10.1016/j.earscirev.2006.06.006](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.006)

Gurrieri, S., & Valenza, M. (1988). Gas transport in natural porous mediums: A method for measuring CO<sub>2</sub> flows from the ground in volcanic and geothermal areas. *Rendiconti della Societa Italiana di Mineralogia e Petrologia*, 43, 1151–1158. doi: [10.1029/2005JB003898](https://doi.org/10.1029/2005JB003898)

Gurrieri, S., Liuzzo, M., & Giudice, G. (2008). Continuous monitoring of soil CO<sub>2</sub> flux on Mt. Etna: The 2004–2005 eruption and the role of regional tectonics and volcano tectonics. *Journal of Geophysical Research*, 113, B09206, doi: [10.1029/2007JB005003](https://doi.org/10.1029/2007JB005003).

Harris, A. (2013). *Thermal Remote Sensing of Active Volcanoes: A User's Manual*. Cambridge University Press. doi: [10.1017/CBO9781139029346](https://doi.org/10.1017/CBO9781139029346)

Higgins, J., & Harris, A. (1997). VAST: a program to locate and analyse volcanic thermal anomalies automatically from remotely sensed data. *Computers & Geosciences*, 23(6), 627-645.

Kampouri, A., Amiridis, V., Solomos, V., Gialitaki, A., Marinou, E., Spyrou, C., Georgoulas, A. K., Akritidis, D., Papagiannopoulos, N., Mona, L., Scollo, S., Tschla, M., Tsikoudi, I., Pytharoulis, I., Karacostas, T. & Zanis, P. (2021). Investigation of Volcanic Emissions in the Mediterranean: “The Etna-Antikythera Connection”. *Atmosphere*. 2021; 12(1):40. doi: [10.3390/atmos12010040](https://doi.org/10.3390/atmos12010040)

Lekkas, E. (2007). The preceding seismic-volcanic activity of Santorini volcano (1600 B.C.), as a warning factor for the Akrotiri residents. *Geophysical Research Abstracts*, 9, 07665.

Liuzzo, M., Gurrieri, S., Giudice, G. & Giuffrida, G. (2013). Ten years of soil CO<sub>2</sub> continuous monitoring on Mt. Etna: Exploring the relationship between processes of soil degassing and volcanic activity. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 14, 1525-2027. doi: [10.1002/ggge.20196](https://doi.org/10.1002/ggge.20196)

Lopez, T., Kern, C., Diaz, J. A., Vanderwaal, S. & Levy, A. (2015). Integration and Testing of Miniaturized Volcanic Gas-sensing Instruments on UAS Platforms. American Geophysical Union Fall Meeting.

Marchetti, E., Ripepe, M., Campus, P., Le Pichon, A., Vergoz, J., Lacanna, G., Mialle, P., Hereil, P. & Husson, P. (2019). Long range infrasound monitoring of Etna volcano. *Scientific Reports*, 9, 1815. doi: [10.1038/s41598-019-54468-5](https://doi.org/10.1038/s41598-019-54468-5)

Marsh, B. D. (2000). Magma Chambers. In Encyclopedia of Volcanoes, Sigurdsson, H., 191-206, Academic Press.

Nomikou, P., Druitt, T. H., Hübscher, C. Mather, T. A., Paulatto, M., Kalnins, L. M., Kelfoun, K., Papanikolaou, D., Bejelou, K., Lampridou, D., Pyle, D. M., Carey, S., Watts, A. B., Weiß, B. & Parks, M. M. (2016). Post-eruptive flooding of Santorini caldera and implications for tsunami generation. Nature Communications 7, 13332 (2016). doi: [10.1038/ncomms13332](https://doi.org/10.1038/ncomms13332)

Palano, M., Puglisi, G. & Gresta, S. (2008). Ground deformation patterns at Mt. Etna from 1993 to 2000 from joint use of InSAR and GPS techniques. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 169, 99-120. doi: [10.1016/j.jvolgeores.2007.08.014](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.08.014)

Papazachos B. C. & Kiratzi A. (1996). A detailed study of the active crustal deformation in the Aegean and surrounding area. Tectonophysics, 253,129-153.

Patanè, D., De Gori, P., Chiarabba, C., & Bonaccorso, A. (2003). Magma ascent and the pressurization of Mount Etna's volcanic system. Science, 299, 2061-2063. doi: [10.1126/science.1080653](https://doi.org/10.1126/science.1080653)

Petford, N., Cruden, A. R., McCaffrey, K. J. W., & Vigneresse, J. L. (2000). Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust. Nature, 408, 669-673. doi: [10.1038/35047000](https://doi.org/10.1038/35047000)

Pieri, D., Diaz, J. A., Bland, G. & Fladeland, M. (2013). In situ observations and sampling of volcanic emissions with NASA and UCR unmanned aircraft, including a case study at Turrialba Volcano, Costa Rica. Geological Society London Special Publications, 380, 321-352. doi: [10.1144/SP380.13](https://doi.org/10.1144/SP380.13)

Prescott, W. (1981). The determination of displacement fields from geodetic data along a strike slip fault. Journal of Geophysical Research, 86, 6067–6072. doi: [10.1029/JB086iB07p06067](https://doi.org/10.1029/JB086iB07p06067)

Prodi, F., Tagliavini, A., & Medini, R. (2000). Time variability in rainfall events observed by Pludix, Physics and Chemistry of the Earth Part B Hydrology Oceans and Atmosphere, 25, 959–963. doi: [10.1016/S1464-1909\(00\)00133-7](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(00)00133-7)

Puglisi, G., Bonaccorso, A., Bonforte, A. & Aloisi, M. (2013). 25 years of GPS measurements at Mt. Etna Forecasting Volcanic Activity -Reading and translating the messages of nature for society. IAVCEI Scientific Assembly. doi: [10.13140/2.1.1936.5120](https://doi.org/10.13140/2.1.1936.5120)

Robock, A. (2000). Volcanic eruptions and climate. *Reviews of Geophysics*, 38:2, 191-219. doi: [10.1029/1998RG000054](https://doi.org/10.1029/1998RG000054)

Rokhmana, C. A., & Andaru, R. (2016). Utilizing UAV-based mapping in post disaster volcano eruption. 2016 6th International Annual Engineering Seminar (InAES), 202-205. doi: [10.1109/INAES.2016.7821934](https://doi.org/10.1109/INAES.2016.7821934)

Romero, R. (2004). The International Airways Volcano Watch (IAVW), Proceedings of 2nd International Conference on Volcanic Ash and Aviation Safety, Virginia, USA.

Rust, D., and Neri, M. (1996). The boundaries of large-scale collapse on the flanks of Mount Etna, Sicily. *Geological Society, London, Special Publications*, 110, 193–208. doi: [10.1144/GSL.SP.1996.110.01.15](https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1996.110.01.15)

Rust, D., Behncke, B., Neri, M., & Ciocanel, A. (2005). Nested zones of instability in the Mount Etna volcanic edifice, Italy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 144 , 137–153. doi: [10.1016/j.jvolgeores.2004.11.021](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.11.021)

Rymer, H., Ferrucci, F. & Corinne, A. L. (1998). Mount Etna: Monitoring in the past, present, future. *Geological Society, London, Special Publications*, 143, 335-347. doi: [10.1144/GSL.SP.1998.143.01.22](https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1998.143.01.22)

Scollo, S., Coltelli, M., Prodi, F., Folegani, M., & Natali, S. (2005). Terminal settling velocity measurements of volcanic ash during the 2002–2003 Etna eruption by an X-band microwave rain gauge disdrometer. *Geophysical Research Letters*, 32. doi: [10.1029/2004GL022100](https://doi.org/10.1029/2004GL022100)

Scollo, S., Prestifilippo, M., Spata, G., D'Agostino, M., & Coltelli., M. (2009). Monitoring and forecasting Etna volcanic plumes. *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, sezione di Catania, Catania, Italy*, 9, 1573–1585. Doi: [10.5194/nhess-9-1573-2009](https://doi.org/10.5194/nhess-9-1573-2009)

Solaro, G., Acocella, V., Pepe, S., Ruch, J., Neri, M., & Sansosti, E. (2010). Anatomy of an unstable volcano through InSAR observations from 1994 to 2008: multiple processes affecting flank instability at Mt. Etna. *Journal of Geophysical Research*, 115, B10. doi: [10.1029/2009JB000820](https://doi.org/10.1029/2009JB000820)

Spinetti, C. & Buongiorno, M. F. (2007). Volcanic aerosol optical characteristics of Mt. Etna tropospheric plume retrieved by means of airborne multispectral images. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69, 981–994. doi: [10.1016/j.jastp.2007.03.014](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.03.014).

Stevens, N.F., Wadge, G. & Murray, J. B. (1999) Lava flow volume and morphology from digitised contour maps: a case study at Mount Etna, Sicily. *Geomorphology*, 28, 251-261. doi: [10.1016/S0169-555X\(98\)00115-9](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(98)00115-9)

Strahler A. (2006). *Introducing Physical Geography*, Wiley, Danvers.

Symonds, R. B., Gerlach, T. M. & Reed, M. H. (2001). Magmatic gas scrubbing: Implications for volcano monitoring, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 108, 303–341. doi: [10.1016/S0377-0273\(00\)00292-4](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00292-4)

Tibaldi, A., & G. Groppelli (2002). Volcano-tectonic activity along structures of the unstable NE flank of Mt. Etna (Italy) and their possible origin. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 115, 277–302. doi: [10.1016/S0377-0273\(01\)00305-5](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00305-5)

Torelli, L., Grasso, M., Mazzoldi, G., & Peis, D. (1998). Plio-Quaternary tectonic evolution and structure of the Catania foredeep, the northern Hyblean Plateau and the Ionian shelf (SE Sicily). *Tectonophysics*, 298, 209-221. doi: [10.1016/S0040-1951\(98\)00185-1](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00185-1)

Turner, N. R., Perroy, R. L. & Hon, K. (2017). Lava flow hazard prediction and monitoring with UAS: a case study from the 2014–2015 Pāhoā lava flow crisis, Hawai'i. *Journal of Applied Volcanology*, 6, 17. doi: [10.1186/s13617-017-0068-3](https://doi.org/10.1186/s13617-017-0068-3)

Wooster, M. J., & Rothery, D. A. (1997). Time-series analysis of effusive volcanic activity using the ERS along track scanning radiometer: The 1995 eruption of Fernandina Volcano, Galapagos Islands. *Remote sensing of environment*, 62(1), 109-117. doi: [10.1016/s0034-4257\(97\)00087-4](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(97)00087-4)

### **III. Διαδικτυακές πηγές**

Ιστοσελίδα του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών: [www.gein.noa.gr/gps.html](http://www.gein.noa.gr/gps.html)

Ιστοσελίδα του ΕΛΚΕΘΕ: <https://www.hcmr.gr/el/>

Ιστοσελίδα του Ι.Μ.Π.Η.Σ.: <https://www.ismosav.gr/gr/Pages>

Ιστοσελίδα της EUMETSAT: <https://www.eumetsat.int/>

Ιστοσελίδα της ESA: <https://www.esa.int/>

Ιστοσελίδα του INGV-CT: <https://www.ct.ingv.it/>

Ιστοσελίδα της NASA: <https://www.nasa.gov/>

Ιστοσελίδα της UNAVCO: <http://www.unavco.org/>

Ιστοσελίδα της USGS: <https://www.usgs.gov/>

Σύνδεσμοι της ιστοσελίδας του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης:

i) [http://www.geo.auth.gr/765/2\\_landforms/21\\_volcano\\_types.htm](http://www.geo.auth.gr/765/2_landforms/21_volcano_types.htm)

ii) [http://www.geo.auth.gr/765/4\\_eruptions/46\\_plinian.htm](http://www.geo.auth.gr/765/4_eruptions/46_plinian.htm)

iii) [http://www.geo.auth.gr/765/2\\_landforms/26\\_lava\\_domes.htm](http://www.geo.auth.gr/765/2_landforms/26_lava_domes.htm)

iv) [http://geophysics.geo.auth.gr/ss/station\\_index.html](http://geophysics.geo.auth.gr/ss/station_index.html)

<https://cdn.britannica.com/s:700x450/48/4948-004-9AC9A872.jpg>

<http://www.economy365.gr/article/115070/epistimonas-gia-ifaisteio-santorinis-endehomeni-nea-ekrivi-tha-ginei-sto-idio-simeio>

<https://sites.google.com/site/geologikoergastirio/ephaisteia-aitia>

<https://sites.google.com/site/amesidemocratiaellenon/geothermike-energeia>

[https://3otiko.blogspot.com/2017/10/blog-post\\_58.html](https://3otiko.blogspot.com/2017/10/blog-post_58.html)

<https://www.mixanitouxronou.gr/o-fotografos-poy-kategrapse-tin-ekrivi-toy-ifaisteioy-kai-to-thanato-toy-niotho-oti-vriskomai-sta-prothyra-prin-ginei-kati-egrafe-kai-ezise-gia-ligo-ti-megalyteri-katolisthisi-tis-istorias/>

<https://www.skylinewebcams.com/el/webcam/italia/sicilia/catania/vulcano-etna-sud.html>

<https://www.geoerga.gr/el/service/s02-lidar-scanning>

<https://www.greeka.com/cyclades/santorini/map/>

<https://m.naftemporiki.gr/story/1347288>

<https://www.santorini.net/>

<https://www.meteorologiaenred.com/el/volcan-etna.html>

<https://www.dw.com/en/etna-europes-highest-active-volcano/a-57675986>