



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ & ΚΡΙΣΕΩΝ

POST GRADUATE PROGRAM
ENVIRONMENTAL, DISASTER & CRISES MANAGEMENT STRATEGIES

Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης
Master Thesis

Οι επιπτώσεις των μέγα ηφαιστειακών εκρήξεων στην υγεία και στο περιβάλλον

Impact of Great Volcanic Eruptions on Health and the Environment

ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΚΑΛΤΣΑΣ / ANTONIOS KALTSAS

A.M. / R.N. : 18073

Ειδικές Εκδόσεις / Special Publications:

No. «2020038»

Αθήνα, Ιανουάριος 2020
Athens, January 2020



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ & ΚΡΙΣΕΩΝ
POST GRADUATE PROGRAM
ENVIRONMENTAL, DISASTER & CRISES MANAGEMENT STRATEGIES

Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης
Master Thesis

Οι επιπτώσεις των μέγα ηφαιστειακών εκρήξεων στην υγεία και στο περιβάλλον

Impact of Great Volcanic Eruptions on Health and the Environment

ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΚΑΛΤΣΑΣ / ANTONIOS KALTSAS

A.M. / R.N. : 18073

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Δρ. «Επιβλέπων_1ο_Μέλος»,
Κωνσταντίνος Κυριακόπουλος, Καθηγητής ΕΚΠΑ

Δρ. «Παρασκευή Νομικού Μ_2ο_Μέλος_Τριμελούς»,
Επίκουρος Καθηγήτρια ΕΚΠΑ

Δρ. «Βαρβάρα Αντωνίου3ο_Μέλος_Τριμελούς»,
Ε.Δ.Π. ΕΚΠΑ

«Ειδική_Επ_Καθοδήγηση»

«Επιβλέπων
Κωνσταντίνος Κυριακόπουλος, Καθηγητής ΕΚΠΑ

Ειδικές Εκδόσεις / Special Publications:

Νο«2020038»

Αθήνα, Ιανουάριος
2020
Athens, January 2020

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	i
Περίληψη	iii
Abstract	iv
Ευχαριστίες.....	v
Κατάλογος Εικόνων	vi

Κεφάλαιο 1.

1.1. Εισαγωγή.....	1
1.1.1. Εισαγωγή στην έννοια του ηφαιστείου ως φυσική καταστροφή	1
1.1.2. Συνθήκες δημιουργίας και έκρηξης ηφαιστείων	4
1.1.3. Τύποι και μορφές του ηφαιστείου	6

Κεφάλαιο 2.

2.1. Εισαγωγή στα συστήματα παρακολούθησης ηφαιστείων	10
2.2. Επίπεδα απειλής ηφαιστείων και μέθοδοι για την παρακολούθησή τους	13
2.3. Συστήματα παρακολούθησης που εφαρμόζονται σε πολυάριθμα σήματα	17
2.3.1. Μέθοδος για τηλεανίχνευση μέσω δορυφόρου	17
2.3.2. Ανάπτυξη τεχνικών παρακολούθησης ηφαιστείων	21

Κεφάλαιο 3.

3.1. Το ηφαίστειο της Σαντορίνης	26
3.1.1. Η μετέπειτα οικονομική ακμή και οι εκρήξεις της Σαντορίνης	27
3.1.2. Το ηφαίστειο της Σαντορίνης σήμερα	30
3.2. Το ηφαίστειο της Νισύρου	31
3.2.1. Η ζωή στη Νίσυρο υπό την παρουσία του ηφαιστείου	32
3.2.2. Προστασία και ανάδειξη της Νισύρου με έμφαση στο ηφαίστειο	34
3.3. Το ηφαίστειο του Βεζούβιου	35
3.3.1. Ιστορική αναδρομή και περιγραφή του Βεζούβιου	36
3.3.2. Το ηφαίστειο του Βεζούβιου σήμερα	39
3.4. Το ηφαίστειο Yellowstone.....	40
3.4.1. Ιστορική περιγραφή του ηφαιστείου Yellowstone.....	41
3.4.2. Το ηφαίστειο Yellowstone σήμερα.....	44
3.5. Το ηφαίστειο Πινατούμπο.....	48
3.5.1. Ιστορική αναδρομή για το ηφαίστειο Πινατούμπο	49
3.5.2. Το ηφαίστειο Πινατούμπο σήμερα	54

Κεφάλαιο 4.

4.1. Εισαγωγή στα συστήματα και στις στρατηγικές Παρακολούθησης	56
4.2. Παρακολούθηση ηφαιστείου και μείωση κινδύνου	57
4.3. Χαρακτηριστικά παραδείγματα παρακολούθησης και αναταραχών ηφαιστείων στο δομημένο περιβάλλον.....	61
4.4. Η ανάγκη για πρόβλεψη ηφαιστειακών εκρήξεων	64
4.5. Τελικές παρατηρήσεις	66

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... 68

ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ72

Περίληψη

Μια φυσική καταστροφή αποτελεί άμεση συνέπεια ενός φυσικού κινδύνου όπως ενδεικτικά είναι μια ηφαιστειακή έκρηξη, ένας σεισμός ή μια κατολίσθηση τα οποία εξελίσσονται από το στάδιο της πιθανότητας σε μία ενεργή φάση και κατά συνέπεια έχουν επιπτώσεις στις ανθρώπινες δραστηριότητες και το γεωπεριβάλλον. Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τη μελέτη των επιπτώσεων στην υγεία και στο περιβάλλον από τις μέγα ηφαιστειακές εκρήξεις. Στον ευρύτερο Ελλαδικό χώρο παρουσιάζεται έντονη δραστηριότητα με αρκετά ηφαιστειακά κέντρα να εντοπίζονται κυρίως στο Ενεργό Ηφαιστειακό Τόξο του νοτίου Αιγαίου. Θα γίνει προσπάθεια να μελετηθούν οι επιπτώσεις ηφαιστειακών εκρήξεων στον ελλαδικό χώρο όπως Σαντορίνη και Νίσυρο και παγκοσμίως (Yellowstone, Βεζούβιο, Πινατούμπο) και αναφορά στα συστήματα έγκαιρης παρακολούθησης.

Θα γίνει αναφορά στην έννοια του ηφαιστείου, τα χαρακτηριστικά του μέρη καθώς και τη διαχρονική δράση των ηφαιστειών. Θα γίνει ανάλυση σχετικά με τις συνθήκες δημιουργίας του αλλά και τους παράγοντες που συντελούν στην τελική έκρηξη του ηφαιστείου. Επίσης, θα αναφερθούμε στους τύπους και τις μορφές των ηφαιστειών που το καθιστούν ως ενεργό, ανενεργό ή εσβεσμένο.

Στη συνέχεια, θα αναλυθούν τα συστήματα παρακολούθησης των ηφαιστειών με αφορμή τη δυνατότητα για ανίχνευση πληροφορίας της παραμόρφωσης του εδάφους, της τηλεσκοπικής, της τηλε-ανίχνευσης αλλά και τεχνολογιών που ενδείκνυνται για την θερμική ακτινοβολία και τη σεισμική παρακολούθηση.

Επιπλέον θα δοθεί, αναλυτική παρουσίαση για την ιστορική εξέλιξη και γενικότερα την ηφαιστειακή δραστηριότητα κάποιων από τα πιο γνωστά ηφαίστεια όπως της Σαντορίνης, της Νισύρου, του Βεζούβιου, του Yellowstone και το ηφαίστειο Πινατούμπο αναλύοντας τις επιπτώσεις που έχουν επιφέρει στην ανθρώπινη ζωή και το περιβάλλον λαμβάνοντας υπόψιν τα δεδομένα της ζωής τότε και σήμερα.

Τέλος, θα παρουσιαστεί το δίκτυο παρακολούθησης των ηφαιστειών μέσα από τη δράση Μελέτης και Παρακολούθησης ενώ θα γίνει και εκτενέστερη αναφορά στη σημασία των ποικίλων συστημάτων που έχουν αναπτυχθεί με σκοπό την αποφυγή καταστροφικών επιπτώσεων στους ανθρώπους και το δομημένο περιβάλλον.

Λέξεις κλειδιά: Ηφαίστειο, Ηφαιστειακή δραστηριότητα, Συστήματα παρακολούθησης, Έκρηξη, Υγεία, Περιβάλλον

Abstract

A natural disaster is a direct consequence of a natural hazard such as a volcanic eruption, an earthquake or a landslide which evolve from the probability stage to an active phase and consequently affect human activities and the environment. The present thesis aims to study the health and environmental impacts of major volcanic eruptions. In Greece, there is an intense activity with several volcanoes mainly located in the Active Volcanic Arc of the southern Aegean. An attempt will be made to study the impacts of volcanic eruptions on Greece such as Santorini, Nisyros and worldwide (Yellowstone, Mount Vesuvius, Pinatubo) and to report on early monitoring systems.

Initially, a reference will be made as for the volcano, its features and parts as well as the action of the volcanoes. An analysis will be made for the conditions of its formation and the factors that contribute to the final eruption of the volcano. We will also refer to the types and forms of volcanoes that make it active, inactive or dormant.

Subsequently, the volcano monitoring systems will be analyzed for the possibility of detecting soil deformation, telescopic, remote sensing information as well as technologies offered for thermal radiation and seismic monitoring.

In addition, a detailed presentation on the historical evolution and volcanic activity of some of the most famous volcanoes such as Santorini, Nisyros, Vesuvius, Yellowstone and Pinatubo volcano will be given, analyzing the impact they have had on human life and the environment keeping in mind the facts of life then and today.

Finally, the integrated Volcanic Monitoring Network will be introduced through the Study and Monitoring action and will further refer to the importance of the various systems developed in order to avoid catastrophic impacts on humans and the built environment.

Keywords: Volcano, Volcanic activity, Monitoring systems, Eruption, Health, Environment

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κύριο, Κωνσταντίνο Κυριακόπουλο Καθηγητή ΕΚΠΑ, για τη συμβολή του στην διεκπεραίωση αυτής της εργασίας. Επίσης ευχαριστώ την κυρία Νομικού Παρασκευή και την κυρία Αντωνίου Βαρβάρα ως μέλη της Τριμελούς επιτροπής για την συμβολή τους στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 : Κρατήρας κορυφής του ηφαιστείου Βεζούβιος	2
Εικόνα 2: Δομή ηφαιστείου σε απλοποιημένη μορφή.....	5
Εικόνα 3: Σχετικό μέγεθος των διαφόρων τύπων ηφαιστείων.....	7
Εικόνα 4: Απεικόνιση για τη παραμόρφωση του St. Helens	12
Εικόνα 5: Παρακολούθηση ηφαιστείων με δορυφόρους ραντάρ.....	20
Εικόνα 6 : Μη επανδρωμένο εναέριο όχημα τοποθετημένο στον εκτοξευτήρα	22
Εικόνα 7: Αυτή η περιοχή είναι ~2 χλμ. Βορειο-βορειοανατολικά του εξαερισμού, αλλά δεν καταγράφηκε έκρηξη που σχετίζεται με υποηχητικά σήματα από τις δύο εκρήξεις που συνέβησαν μετά την εγκατάστασή του.	24
Εικόνα 8: Αεροφωτογραφία του ηφαιστείου της Σαντορίνης.....	28
Εικόνα 9: Χαρακτηριστικός κρατήρας στη Νίσηρο.....	32
Εικόνα 10: Η κατάσταση του Βεζούβιου πριν την τελευταία του φωτιά	37
Εικόνα 11: 1.934 χρόνια μετά την έκρηξη του Βεζούβιου, εικόνα που απεικονίζει το εσωτερικό του κρατήρα.....	38
Εικόνα 12: Σύγκριση όγκου έκρηξης Yellowstone.....	41
Εικόνα 13: Απεικόνιση των σεισμών στο Yellowstone National Park για την περίοδο 1973-2014	45
Εικόνα 14: Η στήλη έκρηξης του Mount Πινατούμπο στις 12 Ιουνίου 1991.....	48
Εικόνα 15: Το ηφαίστειο Πινατούμπο 20 χρόνια μετά την έκρηξη	50
Εικόνα 16: Η εκρηκτική έκρηξη του Mount Pinatubo στις Φιλιππίνες στις 15 Ιουνίου 1991 53	
Εικόνα 17 : Σχήμα που απεικονίζει ότι, ενώ ο αριθμός των ηφαιστείων (50-70 σύμφωνα με τους Simkin και Siebert (1994)), τα οποία είναι ενεργά ανά έτος (διαχωρίζεται με ροζ λωρίδα).....	57
Εικόνα 18: Διάγραμμα των βασικών στοιχείων ενός αποτελεσματικού προγράμματος μείωσης του κινδύνου ηφαιστείου.	59
Εικόνα 19: Αριστερά είναι το "παράθυρο απόφασης" που αντιμετωπίζουν οι δημόσιοι υπάλληλοι μετά την εμφάνιση μιας ηφαιστειακής κρίσης. Σε γενικές γραμμές, το πιο πιθανό αποτέλεσμα της κλιμακούμενης αναταραχής του ηφαιστείου είναι άγνωστη.....	60
Εικόνα 20: Παράδειγμα μακροχρόνιων δεδομένων παρακολούθησης "βασικής γραμμής":.....	62
Εικόνα 21: Ένα παράδειγμα της αυξανόμενης χρήσης της παρακολούθησης του χώρου με τεχνικές γεωδαισίας: παραμόρφωση εδάφους που παρακολουθείται από το InSAR στο Yellowstone Caldera, Wyoming-Montana, για αναβάθμιση κατά την περίοδο 1996-2000..	63
Εικόνα 22: Οι κατακόρυφες μετατοπίσεις που μετρήθηκαν στην Campi Flegrei Caldera σε χρονικές κλίμακες που κυμαίνονται από αιώνες έως χρόνια.	65

Κεφάλαιο 1.

1.1. Εισαγωγή

1.1.1. Εισαγωγή στην έννοια του ηφαιστείου ως φυσική καταστροφή

Μία φυσική καταστροφή είναι η συνέπεια ενός φυσικού κινδύνου όπως μίας ηφαιστειακής έκρηξης, ενός σεισμού, μίας κατολίσθησης, η οποία περνάει από το στάδιο της πιθανότητας σε μία ενεργή φάση και κατά συνέπεια έχει επιπτώσεις στις ανθρώπινες δραστηριότητες. Η ανθρώπινη αδυναμία μπροστά στις φυσικές καταστροφές, που επιδεινώνεται από την έλλειψη προγραμματισμού ή την έλλειψη κατάλληλου συστήματος διαχείρισης έκτακτων αναγκών, οδηγεί σε οικονομικές, δομικές και ανθρώπινες απώλειες. Το μέγεθος της απώλειας εξαρτάται από την ικανότητα του πληθυσμού να υποστηρίξει ή να αντισταθεί στην καταστροφή, την ανθεκτικότητά του, την επάρκειά του σε κατάλληλο εξοπλισμό και είδη πρώτης ανάγκης, γεγονός που συνοψίζεται στην έκφραση «Η καταστροφή προκύπτει όταν οι κίνδυνοι συναντούν την αδυναμία». Έτσι ένας φυσικός κίνδυνος δεν θα καταλήξει ποτέ σε φυσική καταστροφή σε περιοχές όπου δεν υπάρχει αδυναμία (όπως είναι ένας δυνατός σεισμός σε μία ακατοίκητη περιοχή). Ο όρος «φυσικός» έχει δεχτεί έντονη κριτική καθώς τα γεγονότα δεν είναι απλά κίνδυνοι ή καταστροφές χωρίς την παρουσία της ανθρώπινης συμμετοχής. Το ηφαίστειο εξ' ορισμού είναι η ανοιχτή δίοδος από το εσωτερικό της Γης, ή άλλου γεωειδούς ουρανού σώματος, που επιτρέπει την εκροή ή την έκρηξη των ρευστών πετρωμάτων και αερίων από το εσωτερικό (μανδύας) στην επιφάνεια του στερεού φλοιού με τη μορφή της λάβας. Η δραστηριότητα αυτή οδηγεί στη δημιουργία ενός βουνού, το οποίο στην καθημερινή γλώσσα ονομάζουμε ηφαίστειο. Τα ηφαίστεια μελετά ένας ιδιαίτερος κλάδος της επιστήμης της Γεωλογίας, η Ηφαιστειολογία.

Η γένεση και άνοδος του μάγματος προς την επιφάνεια της γης ευνοείται σε περιοχές οι οποίες είναι τεκτονικά διαταραγμένες. Από τον μαγματικό θάλαμο, την περιοχή δηλαδή όπου βρίσκεται αποθηκευμένο το μάγμα, φθάνει στην επιφάνεια μέσω των ηφαιστειακών αγωγών ή των φλεβών τροφοδοσίας, δηλαδή μεγάλων ρωγμών ή διασταύρωσης ρωγμών του φλοιού της γης (ενεργά ρήγματα). Αυτές συνήθως καταλήγουν σε μια οπή, τον ηφαιστειακό πόρο ο οποίος βρίσκεται κατά κανόνα μέσα σε μια κοιλάτητα, τον κρατήρα. 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 συνηθισμένη εικόνα ενός ηφαιστείου είναι ένα βουνό με κωνικό σχήμα, που στις εκρήξεις του εκχύνεται λάβα, εκτοξεύει θραύσματα πετρωμάτων, στάχτη και δηλητηριώδη ή μη αέρια από τον κρατήρα στην κορυφή του. Η πραγματικότητα βέβαια είναι πιο πολύπλοκη, καθώς αυτός είναι ένας μόνο τύπος ηφαιστείου. Κάποια ηφαίστεια π.χ. έχουν ακανόνιστους θόλους λάβας (χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου σβησμένου ηφαιστείου ο λόφος στον οποίο είναι κτισμένη η πόλη του Πόρου) για κορυφές αντί για κεντρικό κρατήρα, ενώ άλλα παρουσιάζουν τη γεωμορφολογία ενός υψιπέδου. Οι δίοδοι από όπου εξέρχεται το υλικό από το εσωτερικό μπορούν να βρίσκονται οπουδήποτε στο υψίπεδο αυτό. Πολλές από αυτές τις διόδους δημιουργούν τους δικούς τους μικρότερους κώνους, έτσι ώστε να έχουμε δευτερεύοντα ηφαίστεια πάνω σε ένα μεγάλο, όπως συμβαίνει στη Χαβάη. Οι δύο βασικοί τύποι ηφαιστειών από γεωλογικής πλευράς είναι τα ασπιδωτά ηφαίστεια και τα στρωματοηφαίστεια ή αλλιώς κωνικά ηφαίστεια.

Στη μεγάλη πλειονότητα των ηφαιστειών συναντάται όλο το φάσμα δράσεων μεταξύ των δύο ακραίων τύπων, της έκχυσης και της έκρηξης. Ορισμένα ηφαίστεια είναι κατ'εξακολούθηση ενεργά για μεγάλα χρονικά διαστήματα, όπως το ηφαίστριο Στρόμπολι, στα νησιά του Αιόλου το οποίο χαρακτηρίζεται από συνεχή δράση τουλάχιστον τα τελευταία 3-4000 χρόνια! Τα περισσότερα όμως ηφαίστεια, παρουσιάζουν μικρής διάρκειας επεισόδια, που διαρκούν από λίγες ημέρες έως λίγα χρόνια και μετά αδρανούν για δεκάδες, εκατοντάδες ή ακόμη για χιλιάδες χρόνια. Κατά τη διάρκεια της περιόδου αδράνειας το εν υπνώσει ηφαίστριο μπορεί να είναι τελείως ήσυχο ή μπορεί να εκπέμπει αέρια και ατμούς που προδίδουν την ενεργή κατάστασή του. Επειδή κάποια ηφαίστεια χαρακτηρίζονται από μεγάλες περιόδους ηρεμίας (ως και πολλών χιλιάδων ετών) και η διάρκεια των ιστορικών καταγραφών είναι πολύ διαφορετική από χώρο σε χώρο (όπως Μεσόγειος – Νέα Ζηλανδία) σήμερα θεωρούνται ως ενεργά τα ηφαίστεια που έδρασαν τα τελευταία 10-20.000 χρόνια και βρίσκονται σε τεκτονικά ενεργές περιοχές που κάνουν πιθανή την επαναδραστηριοποίησή τους.



Εικόνα 1 : Κρατήρας κορυφής του ηφαιστείου Βεζούβιος (πηγή www.cnn.gr)

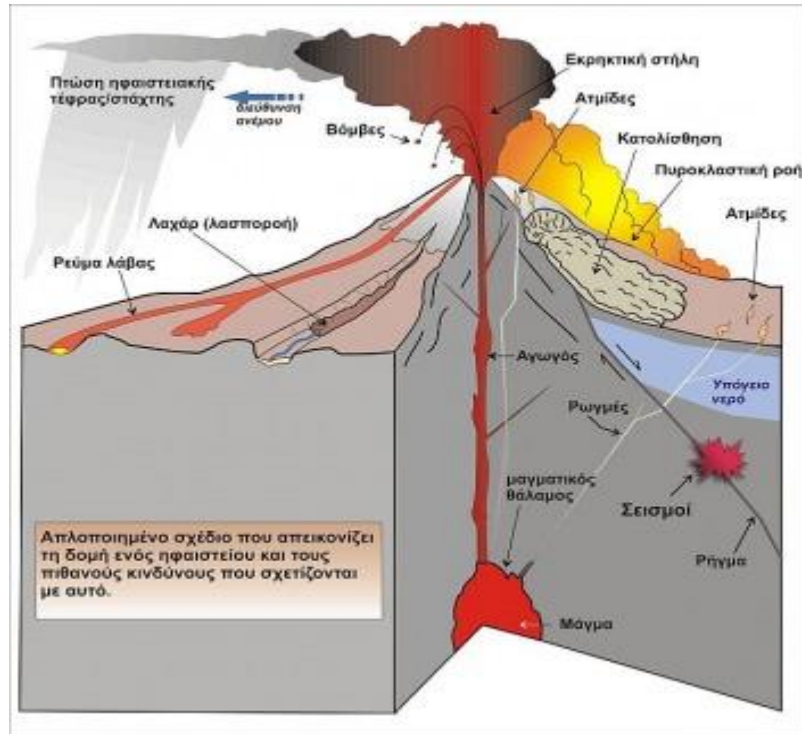
Το συμπαγές, βραχύδες περίβλημα του πλανήτη μας (λιθόσφαιρα), πάχους 50-200 χιλιομέτρων, είναι κατακερματισμένο σε επτά μεγάλες και άλλες τόσες μικρότερες πλάκες, οι οποίες μετακινούνται “επιπλέοντας” και γλιστρώντας πάνω σε ένα ημίρρευστο ορίζοντα, την ασθενόσφαιρα. Ως βασική κινητήρια δύναμη θεωρούνται τα ρεύματα θερμικής μεταγωγής, τα οποία δημιουργούνται καθώς το ημιπλαστικό υλικό της ασθενόσφαιρας, θερμαινόμενο από τη σχάση πυρήνων των ραδιενεργών στοιχείων Ουρανίου, Θορίου και Καλίου, γίνεται ελαφρύ και αναδύεται ως τα όρια της λιθόσφαιρας. Στη συνέχεια μεταδίδει τη θερμότητά του προς την επιφάνεια, ψύχεται, βαραίνει ξανά και καταδύεται βαθιά στο μανδύα. Στις περιοχές ανάδυσης, όπου η μια πλάκα απομακρύνεται από την άλλη, το θερμό υλικό του μανδύα χάνει γρήγορα πίεση ενώ αντίστοιχα παρουσιάζει πτώση της θερμοκρασίας. Αυτό προκαλεί μερική τήξη του πετρώματος του μανδύα και παράγεται άφθονο μάγμα. Το μάγμα ανέρχεται στο κενό μεταξύ των δύο πλακών και οικοδομεί μεγάλες οροσειρές ενεργών υποβρύχιων ηφαιστείων, οι οποίες αποτελούν τις Μέσο-Ωκεάνιες Ράχες. Εδώ τα ηφαίστεια γεννούν τη νέα λιθόσφαιρα του πλανήτη με ωκεάνιο βασαλτικό φλοιό. Τέτοια οροσειρά είναι η Μέσο-Ατλαντική Ράχη που άρχισε να δημιουργείται πριν 200 εκατομμύρια χρόνια, από την απομάκρυνση Αμερικής και Αφρικής-Ευρώπης. Καθώς η γη έχει σταθερή διάμετρο, όση λιθόσφαιρα παράγεται τόση πρέπει να καταστραφεί. Αυτό γίνεται στις περιοχές σύγκλισης των πλακών, όπου η μία βυθίζεται κάτω από την άλλη κατά μήκος πολύ βαθιών ωκεάνιων τάφρων. Εδώ, η ωκεάνια λιθόσφαιρα που υποβυθίζεται μεταφέρει μαζί της ιζήματα και νερό. Η απελευθέρωση του νερού αυτού σε μεγάλα βάθη (100-150 χιλιόμετρα) προκαλεί τήξη των πετρωμάτων, καθώς το ενυδατωμένο πέτρωμα τήκεται σε πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες από ό,τι το άνυδρο. Το νέο μάγμα που γεννάται με αυτό τον τρόπο αναδύεται και τροφοδοτεί έντονα εκρηκτική ηφαιστειακή δράση. Αυτή οικοδομεί ηφαιστειακά νησιά ή τοξοειδείς οροσειρές μεγάλων ηφαιστείων. Έτσι παράγεται νέος ηπειρωτικός φλοιός. Τα δικά μας ενεργά ηφαίστεια του νοτίου Αιγαίου είναι ένα παράδειγμα τέτοιας δράσης.

Τα ηφαίστεια πάνω στη Γη βρίσκονται συνήθως εκεί όπου δύο ή τρεις τεκτονικές πλάκες συγκρούονται ή απομακρύνονται: μία μεσοωκεάνια ράχη ή οροσειρά, όπως στο μέσο του Ατλαντικού Ωκεανού, δίνει παραδείγματα ηφαιστείων από «αποκλίνουσες πλάκες», ενώ ο Ειρηνικός Ωκεανός με το «Δαχτυλίδι της φωτιάς» προσφέρει παραδείγματα ηφαιστείων από «συγκλίνουσες πλάκες». Αντιθέτως, ηφαίστεια δεν δημιουργούνται εκεί όπου δύο τεκτονικές πλάκες κινούνται πλευρικά η μία ως προς την άλλη. Ηφαίστεια μπορούν, επίσης, να σχηματισθούν όπου υπάρχει διάταση του γήινου φλοιού ή όπου ο φλοιός είναι πολύ λεπτός, όπως στην κοιλάδα του Αφρικανικού Ρήγματος (περιοχή Αφάρ, στη βόρειο-ανατολική Αφρική). Τέλος, τα ηφαίστεια προκαλούνται πάνω από σημεία στα οποία ο μανδύας της Γης έχει ανοδικά ρεύματα, τα αποκαλούμενα «θερμά σημεία» (*hot spots*), που μπορεί να βρίσκονται μακριά από τα όρια των τεκτονικών πλακών, όπως είναι τα νησιά της Χαβάης. Ηφαίστεια σαν αυτά βρίσκονται και σε άλλους πλανήτες είτε μεγάλους δορυφόρους στο Ηλιακό μας Σύστημα.

1.1.2. Συνθήκες δημιουργίας και έκρηξης ηφαιστείων

Η ηφαιστειακή δράση κυμαίνεται μεταξύ δύο ακραίων τύπων: στον ένα 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 αρκετά ρευστό 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 το πιο λεπτόκοκκο κλάσμα της ονομάζεται ηφαιστειακή σποδός ή στάχτη. Η μετακίνηση και απόθεση της τέφρας γίνεται με δύο κυρίως τρόπους. Ο ένας είναι η ελεύθερη πτώση από το ύψος στο οποίο έχει εκτιναχθεί, και ο δεύτερος είναι η μετακίνηση της τέφρας ως ένα πυκνό ρευστό μίγμα θραυσμάτων μάγματος και αερίων που ρέει με μεγάλες ταχύτητες και θερμοκρασίες στις πλαγιές του ηφαιστείου. Οι ροές αυτές ονομάζονται πυροκλαστικά ρεύματα πυκνότητας, επειδή η κίνησή τους ελέγχεται κατά κύριο λόγο από την πυκνότητα του νέφους, και αποθέτουν τα πυροκλαστικά ρεύματα τέφρας. Το ηφαίστειο ουσιαστικά γεννιέται στην πρώτη έξοδο του μάγματος στην επιφάνεια. Μετά από αυτό, οι εκρήξεις θα συνεχιστούν έως ότου το ηφαίστειο «τροφοδοτηθεί» από το μάγμα, αν και δεκάδες, εκατοντάδες και ακόμη και χιλιάδες χρόνια μπορούν να περάσουν μεταξύ των εκρήξεων.

Το φυσικό άνοιγμα της Γης, είναι αυτό από το οποίο κατά καιρούς, βγαίνουν από το εσωτερικό της με ορμή καπνός, φλόγες και διάφορα υλικά στερεά ή σε κατάσταση τήξης ή αέρια. Το ηφαίστειο αποτελεί φυσικό σχηματισμό του στερεού φλοιού της Γης, με τον οποίο επικοινωνεί η επιφάνεια της Γης με το εσωτερικό της που βρίσκεται σε διάπυρη κατάσταση. Η επικοινωνία αυτή επιτυγχάνεται με κάποια ρωγμή ή κάποιον οχετό (μεγάλη τρύπα) που λέγεται πόρος, ο οποίος φτάνει και ως την επιφάνεια, απλώς η διακλαδιζόμενος και καταλήγει στο άνοιγμα που λέγεται κρατήρας. Κατά τις διάφορες εκρήξεις των ηφαιστείων βγαίνουν στην επιφάνεια και αποτίθενται γύρω από το στόμιο του ηφαιστείου διάφορα υλικά και κατά αυτόν τον τρόπο το στόμιο μεγαλώνει συνεχώς σε ύψος. Έτσι, σχηματίζεται ένας κώνος, ο οποίος ονομάζεται ηφαιστειακός κώνος. Η άνοδος στην επιφάνεια της Γης, διαμέσω του ηφαιστειακού πόρου, υλικών σε στερεά, ρευστή ή αέρια κατάσταση, που προέρχονται από τα έγκατα της Γης, ονομάζεται ηφαιστειακή έκρηξη.



Εικόνα 2: Δομή ηφαιστείου σε απλοποιημένη μορφή (πηγή www.geodifhs.com)

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες. Συγκεκριμένα μπορεί να είναι πλουτώνειες, ενδογήινες ή επιφανειακές. Οι επιφανειακές πάλι διακρίνονται σε εκρήξεις μεγάλης έκτασης ρηγματικής ή γραμμικής και εκρήξεις πόρων. Τα ηφαίστεια, εξαιτίας των εκτεταμένων αποτελεσμάτων τους και της μικρής, συχνά σχεδόν στιγμιαίας, διάρκειας τους προκαλούν στον άνθρωπο τη μεγαλύτερη εντύπωση από όλα τα γεωλογικά φαινόμενα. Συνήθως η δράση ενός ηφαιστείου δεν αρχίζει απότομα αλλά προηγούνται μερικά προειδοποιητικά σημάδια. Το έδαφος για παράδειγμα γύρω από το ηφαίστριο γίνεται θερμότερο, πολλές πηγές ή πηγάδια στερεύουν, βγαίνουν αναθυμιάσεις από το έδαφος, ακούγονται υποχθόνιοι κρότοι όμοιοι με μακρινές βροντές και κεραυνούς, το έδαφος αρχίζει να τρέμει γύρω από το ηφαίστριο (ηφαιστειογενείς σεισμοί).

Κατά τη διάρκεια της έκρηξης, σύννεφα υδρατμών και στάχτη εκσφενδονίζονται σε μεγάλα ύψη στον αέρα. Συχνά, οι υδρατμοί συμπυκνώνονται σε βροχή που πέφτει καταρρακτώδης γύρω από το ηφαίστριο. Οι ποσότητες της στάχτης που εκσφενδονίζονται ψηλά, είναι συχνά τόσο μεγάλες ώστε σαν μαύρα σύννεφα σκιάζουν και κρύβουν εντελώς τον ήλιο. Κατά την περίφημη έκρηξη του Βεζούβιου, το 79 μ.Χ., η ποσότητα της στάχτης, η οποία εκσφενδονίστηκε, ήταν τόσο μεγάλη ώστε έκανε την ατμόσφαιρα ολοσκότεινη, σα να ήταν μεσάνυχτα, 25 χιλιομέτρων από τον κρατήρα.

Πολλές φορές, η στάχτη αυτή μεταφέρεται από τον αέρα σε μεγάλες αποστάσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η στάχτη από το ηφαίστριο Κρακατόα, που έκανε τον γύρο της Γης. Βέβαια, εκτός από τη στάχτη εκσφενδονίζονται μέσα από τον κρατήρα του ηφαιστείου και μεγάλες ποσότητες από διάπυρα κομμάτια πετρωμάτων, τα οποία ξεκολλούν από τα τοιχώματα του κρατήρα. Αυτά λέγονται μύδροι ή βολίδες. Μερικά έχουν το μέγεθος γροθιάς, άλλα είναι μικρότεροι και λέγονται λιθάρια και άλλα πολύ μεγάλα που προέρχονται από εσωτερική

καταστροφή του κρατήρα. Η εκσφενδονιστική δύναμη των ηφαιστειών είναι τεράστια. Πολλές φορές οι μύδροι που πετάγονται φτάνουν ακόμα και σε ύψος των 2000 ή και 3000 μέτρων.

Το συνηθέστερο όμως υλικό που βγαίνει από τα ηφαίστεια είναι η λάβα, μία μάζα ρευστή και διάπυρη, που προέρχεται από λιωμένα στο βάθος της Γης πετρώματα. Κυλάει σαν κόκκινος χείμαρρος έξω από τα χείλη και καθώς κατεβαίνει προς τα κάτω, καίει ό,τι βρεθεί στο δρόμο της. Η ρευστότητα της έχει άμεση σύνδεση με το είδος των λιωμένων πετρωμάτων, που την αποτελούν καθώς επίσης και η ταχύτητα της από την κλίση του εδάφους, πάνω στο οποίο κυλάει. Μάλιστα σε ορισμένες περιπτώσεις έχει παρατηρηθεί να κυλάει με ταχύτητα 8 μέτρα το δευτερόλεπτο. Οι φλόγες που εξέρχονται από το στόμιο του ηφαιστείου, οφείλονται στην ανάφλεξη ορισμένων αερίων που ξέφυγαν την οξειδωση μέσα στον πόρο του ηφαιστείου, όπως υδρογόνου, υδρόθειου, υδρογονανθράκων και άλλα. Τα πυκνά πάλι σύννεφα, που σχηματίζονται πάνω από το ηφαίστειο, αποτελούνται κυρίως από υδρατμούς, αλλά και από μονοξειδίο του άνθρακα, άζωτο, μεθάνιο και υδρογόνο. Η γεωγραφική εξάπλωση των ηφαιστειών είναι, γενικά, ακανόνιστη. Πάντως, μεγαλύτερα και περισσότερα ηφαίστεια βρίσκονται κατά μήκος των ακτών του Ειρηνικού ωκεανού και σχηματίζουν γύρω του ένα στεφάνι, που είναι γνωστό με την ονομασία Πύρινος Στέφανος του Ειρηνικού.

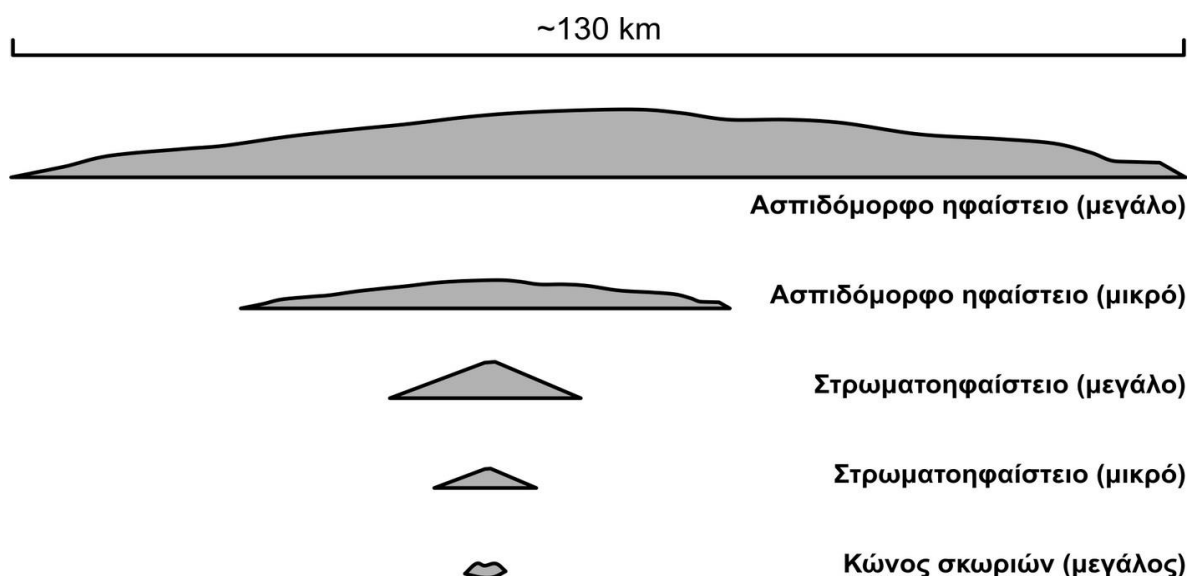
Είναι γεγονός ότι είναι αρκετά δύσκολο να προβλέψουμε την έκρηξη ενός ηφαιστείου, επειδή κάθε φορά εκδηλώνεται με διαφορετικούς τρόπους. Τα παλιότερα χρόνια, αυτό καθοριζόταν εμπειρικά από διάφορα σημάδια όπως ήταν η εμφάνιση νέων εξογκωμάτων στις πλαγιές του ηφαιστείου. Βέβαια, πλέον, χρησιμοποιώντας δορυφόρους οι επιστήμονες μπορούν να καθορίσουν τη θέση των θερμών σημείων βαθιά στα έγκατα της Γης, όπως θα αναλύσουμε εκτενέστερα και σε επόμενο κεφάλαιο.

1.1.3. Τύποι και μορφές του ηφαιστείου

Ανάλογα με την δυσκολία που παρουσιάζεται για κάθε ηφαίστειο στη ροή του μάγματος μπορούμε να διακρίνουμε και διαφορετικούς τύπους ηφαιστειών. Όπως αναφέραμε και παραπάνω αυτή η αντίσταση στη ροή είναι γνωστή με την ονομασία ιξώδες. Ρευστά όπως είναι το θερμό μέλι και το νερό χαρακτηρίζονται από χαμηλότερο ιξώδες σε σχέση με ρευστά όπως είναι το δροσερό ή κατεψυγμένο μέλι. Όσον αφορά το ιξώδες του μάγματος, αυτό καθορίζεται με βάση την περιεκτικότητα του σε πυρίτιο αλλά και την θερμοκρασία του. Συνεπώς, όσο μεγαλύτερο σε περιεκτικότητα το πυρίτιο και αυξημένο σε θερμοκρασία ψύξης το μάγμα, τόσο μεγαλύτερο το ιξώδες. Μάγμα το οποίο είναι ιδιαίτερος ιξώδες, έχει ως αποτέλεσμα να εκρήγνυται κατά τρόπο εκρηκτικό, εν αντιθέσει με λιγότερο ιξώδες μάγμα το οποίο τείνει να ρεύσει.

Ασπιδόμορφα ηφαίστεια ή ηφαίστεια ασπίδων

Αποτελούν τα μεγαλύτερα ηφαίστεια στο κόσμο και είναι μεταξύ των ψηλότερων βουνών στη Γη, μετρούμενα από τις βάσεις τους που εντοπίζονται συχνά κοντά στον ωκεανό. Οι ηφαιστειακές ασπίδες χαρακτηρίζονται με μη εκρηκτικές δραστηριότητες γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα τη σχετικά μικρή περιεκτικότητα σε πυρίτιο από το βασάλτη, ένα μαύρο πύρινο βράχο. Κατά την έκρηξη ενός τέτοιου ηφαιστείου, η λάβα ρέει στις κάτω πλευρές του ηφαιστείου και κατά αυτό τον τρόπο τα ηφαίστεια ενισχύονται ενώ μπορούν να παράγουν και μεγάλη ποσότητα τέφρας. Ας σημειωθεί ότι με τον όρο τέφρα συμπεριλαμβάνουμε όλους τους τύπους ηφαιστειακών υλικών που εκτινάσσονται με τρόπο εκρηκτικό από ένα ηφαίστειο.



Εικόνα 3: Σχετικό μέγεθος των διαφόρων τύπων ηφαιστειών. Τα μεγαλύτερα ηφαίστεια στη Γη είναι ασπιδόμορφα (διάμετρος του μεγαλύτερου είναι 120 χλμ.). Σε αντίθεση ο μεγαλύτερος κώνος σκωριών έχει διάμετρο μικρότερη από 4 χλμ. (πηγή [http://hfaisteiologia .weebly.co m/upload s/7/9/9/5/799 5 675/21_volcano_size_resize.jpg](http://hfaisteiologia.weebly.com/upload/s/7/9/9/5/7995675/21_volcano_size_resize.jpg))

Σύνθετα Ηφαίστεια ή στρωματοηφαίστεια

Τα στρωματοηφαίστεια γνωστά και ως σύνθετα ηφαίστεια είναι τα πιο εντυπωσιακά αλλά και τα πιο επικίνδυνα. Το σχήμα τους είναι κωνικό, με τις χαμηλότερες πλευρές να είναι ομαλές και να γίνονται απότομες προς την κορυφή, όπου συνήθως βρίσκεται ένας απροσδόκητα μικρός κρατήρας. Κλασικά παραδείγματα στρωματοηφαιστειών είναι τα πολύ γνωστά ηφαίστεια Fuji (Ιαπωνία), Mayon (Φιλιππίνες), Agua (Γουατεμάλα).

Ωστόσο, να σημειωθεί ότι σε πολλά στρωματοηφαίστεια το σχήμα δεν είναι τόσο συμμετρικό όπως στα κλασικά παραδείγματα, κυρίως λόγω των μεγάλων διαφορών στην

ηφαιστειακή δράση και τη σύστασή τους. Έτσι πολλά έχουν πολλαπλά ηφαιστειακά κέντρα ή καλδέρα ή ίσως να λείπει η μία πλευρά τους λόγω μιας πλευρικής έκρηξης.

Η κλασική δομή ενός στρωματοηφαιστείου, είναι στρωματομόρφη και αποτελείται από εναλλαγές, από ροές λάβας, αποθέσεις πτώσης τέφρας, πυροκλαστικές ροές, λασπορεύματα και ροές συντριμμάτων. Η σύσταση των ηφαιστειακών προϊόντων μπορεί να ποικίλει από ρυολιθική έως βασαλτική στο ίδιο ηφαίστειο, όμως η μέση σύσταση ενός στρωματοηφαιστείου είναι γενικά ανδεσιτική. Τα στρωματοηφαίστεια των νησιωτικών τόξων τείνουν να είναι βασικότερα από τα αντίστοιχα των ηφαιστειακών τόξων. Τα στρωματοηφαίστεια σχηματίζονται κυρίως στα περιθώρια σύγκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών, όπου η μία πλάκα καταδύεται κάτω από μία γειτονική της. Σχετικά παραδείγματα βρίσκουμε σε πολλές περιοχές της Γης με κυριότερη την περιοχή γύρω από τον Ειρηνικό ωκεανό, γνωστή ως δακτύλιος της φωτιάς.

Ηφαιστειακοί δόμοι

Ο ηφαιστειακός δόμος, ηφαιστειακός θόλος ή θόλος λάβας, έχει ως χαρακτηριστικό γνώρισμα το ρευστό μάγμα με πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο της τάξης του 70%. Πρόκειται για έναν κυκλικό απομονωμένο λόφο επίγειο ή υποθαλάσσιο ηφαιστειακής προέλευσης με απότομες πλαγιές. Δημιουργείται κατά την άνοδο του μάγματος στην επιφάνεια και ψύχεται πρώτου αρχίζει να χύνεται ως λάβα επειδή δεν περιέχει λάβα ή είναι ιδιαίτερα παχύρρευστη. Η λάβα σταδιακά συσσωρεύεται και σχηματίζει ένα θόλο στη θέση έκχυσης, ο οποίος τελικά στερεοποιείται. Να σημειωθεί ότι η δραστηριότητα τους είναι πολύ μεγάλη, γεγονός το οποίο τους καθιστά και πάρα πολύ επικίνδυνους.

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα των πιο πολλών στρωματοηφαιστίων χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά ισχυρές πλινιακές εκρήξεις. Πρόκειται για εκρήξεις, οι οποίες είναι πολύ επικίνδυνες διότι παράγουν φονικές πυροκλαστικές ροές, που αποτελούνται από υπέρθερμα ηφαιστειακά υλικά και τοξικά αέρια, ενώ κατεβαίνουν τις πλαγιές του ηφαιστείου με ταχύτητες που υπερβαίνουν τα 100 χιλιόμετρα ανά ώρα. Τα σύνθετα ηφαίστεια έχουν ως χαρακτηριστικό γνώρισμα τις αλληπάλληλες εκρήξεις, εκρήγνυνται σποραδικότερα σε σχέση με τα ασπιδόμορφα που αναφέραμε παραπάνω και παρουσιάζουν διαστήματα ηρεμίας μεταξύ των εκρήξεων, της τάξης των εκατοντάδων ετών. Τέλος, τα στρωματοηφαίστεια ανά τον κόσμο, στη πλειοψηφία τους έχουν ηλικία μικρότερη από εκατό χιλιάδες χρόνια αν και κάποια είναι παλιότερα και από ένα εκατομμύριο έτη.

Πέραν των βασικών τύπων που αναφέρθηκαν από γεωλογικής πλευράς, γνωστά είναι και άλλα είδη όπως: οι κώνοι στάχτης, τα υποθαλάσσια ηφαίστεια, τα υπερηφαίστεια, τα κρουοηφαίστεια και τα ηφαίστεια λάσπης που αποτελούν μια ξεχωριστή κατηγορία. Τα ηφαίστεια, με κριτήριο την εκδήλωση της ηφαιστειακής τους δραστηριότητας, κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες οι οποίες υπό συνθήκες μπορεί να είναι σχετικά ανακριβείς. Οι κατηγορίες αυτές είναι ενεργά, ανενεργά ή εσβεσμένα.

Ηφαίστεια τα οποία έχουν εκραγεί κατά τους ιστορικούς χρόνους ονομάζονται ενεργά. Ο ορισμός αυτός, βέβαια δεν είναι ιδιαίτερα σαφής, αφού η καταγεγραμμένη ιστορία ξεκινά, για παράδειγμα πριν κάποιες χιλιάδες χρόνια στην Ευρώπη και την Ασία, ενώ στις Ηνωμένες Πολιτείες μόνο πριν από κάποιες εκατοντάδες χρόνια. Γενικά, οι επιστήμονες θεωρούν ένα ηφαίστειο ως ενεργό, εάν εμφανίζει σήμερα εκρηκτική δράση, ή κάποια άλλη δραστηριότητα, όπως σεισμική, ή κάποια τοπογραφική ανύψωση ή εκπομπή αερίων. Μάλιστα το Ινστιτούτο Smithsonian έχει καταγράψει 539 ηφαίστεια με ιστορικές εκρήξεις στους ιστορικούς χρόνους.

Επιπρόσθετα, υπάρχουν 529 ηφαίστεια που δεν εξερράγησαν κατά τους ιστορικούς χρόνους, υπάρχουν όμως σαφή δεδομένα εκρηκτικής δραστηριότητας κατά τα τελευταία 10.000 χρόνια. Αυτά θεωρούνται ανενεργά (inactive, dormant), αφού είναι σε θέση να εκραγούν ξανά.

Το γεγονός ότι ένα ηφαίστειο καταγράφεται ως σβησμένο, δεν σημαίνει ότι στο μέλλον δεν μπορεί να μεταπέσει στην κατηγορία των ενεργών. Είναι, επίσης, δυνατό να δημιουργηθεί ηφαίστειο σε περιοχή που πριν δεν υπήρχε. Ενώ σεισμοί που γίνονται στην περιοχή σβησμένου ηφαιστείου, μπορεί να είναι προμήνυμα ότι το ηφαίστειο θα ξαναγίνει ενεργό.

Το αν ένα ανενεργό ηφαίστειο είναι πράγματι εσβεσμένο (extinct) ή απλώς βρίσκεται σε περίοδο ηρεμίας (dormant), εξαρτάται εν μέρει από τη μέση περίοδο ηρεμίας μεταξύ των εκρήξεων. Όπως αναφέρθηκε οι εκρηκτικές εκρήξεις (πχ. ηφαίστεια Toba και Yellowstone) έχουν περιόδους ηρεμίας της τάξης των εκατοντάδων χιλιάδων ετών, ενώ οι μη εκρηκτικές εκρήξεις (πχ. ηφαίστεια Χαβάης) έχουν περιόδους ηρεμίας με μικρή διάρκεια. Εντούτοις, η περιοχή Yellowstone που δεν έχει δώσει έκρηξη τα τελευταία 70.000 χρόνια και θα μπορούσε να θεωρηθεί ανενεργή, στην πραγματικότητα είναι ενεργή διότι εμφανίζει γρήγορο ρυθμό ανύψωσης, συχνούς σεισμούς και φυσικά ένα πολύ εκτεταμένο και ενεργό γεωθερμικό πεδίο. Από την άλλη μεριά, μικροί κώνοι σκωριών που σχηματίζονται σήμερα μπορεί να θεωρηθούν εσβεσμένοι μετά την έκρηξή τους, διότι συνήθως εκρήγνυνται μόνο μία φορά.

Επομένως, ο διαχωρισμός αυτός που γίνεται ανάλογα με τη δράση των ηφαιστειών δεν έχει γενική ισχύ, είναι άστοχος και αβέβαιος, γιατί ο άνθρωπος με τις περιορισμένες γνώσεις του για το υπέδαφος και τα φτωχά τεχνικά μέσα που έχει στη διάθεση του, δεν είναι σε θέση να προβλέπει μια ηφαιστειακή δράση ή και να καταλήξει στο ασφαλές συμπέρασμα ότι ένα ηφαίστειο δε θα ξαναλειτουργήσει ποτέ ή ακόμα και να στηριχτεί σε ιστορικά δεδομένα για μία τέτοια κατάταξη. Είναι γεγονός, ότι μεταξύ ενεργών και εσβεσμένων, διακρίνουμε μία ενδιάμεση μορφή κατά την οποία το ηφαίστειο δε βρίσκεται ούτε σε κατάσταση ενέργειας αλλά ούτε και σε τέλεια ηρεμία. Στην περίπτωση αυτή, αναδύονται συνεχώς ατμοί και αέρια από τον κρατήρα του ή ακόμα και από ρωγμές του εδάφους σε αρκετές ηφαιστειογενείς περιοχές.

Κεφάλαιο 2.

2.1. Εισαγωγή στα συστήματα παρακολούθησης ηφαιστειών

Είναι εξαιρετικά σημαντικό να μπορούμε να ελέγχουμε και να γνωρίζουμε την μελλοντική συμπεριφορά των ηφαιστειών αφού οι επιπτώσεις τους μπορεί να είναι άμεσες στην καθημερινότητα μας. Υπάρχουν προφανείς κίνδυνοι για τους κατοίκους που βρίσκονται κοντά σε αυτά, όμως πέρα από την ασφάλεια των ανθρώπων, υπάρχουν τεράστιες οικονομικές ανησυχίες. Δεν είναι δυνατόν να σταματήσουν οι εκρήξεις, αλλά, όπως ένας τυφώνας, είναι καλό να γνωρίζουμε πότε έρχεται έτσι θα πρέπει να είμαστε σε θέση να προβλέψουμε και μια μελλοντική ηφαιστειακή έκρηξη.

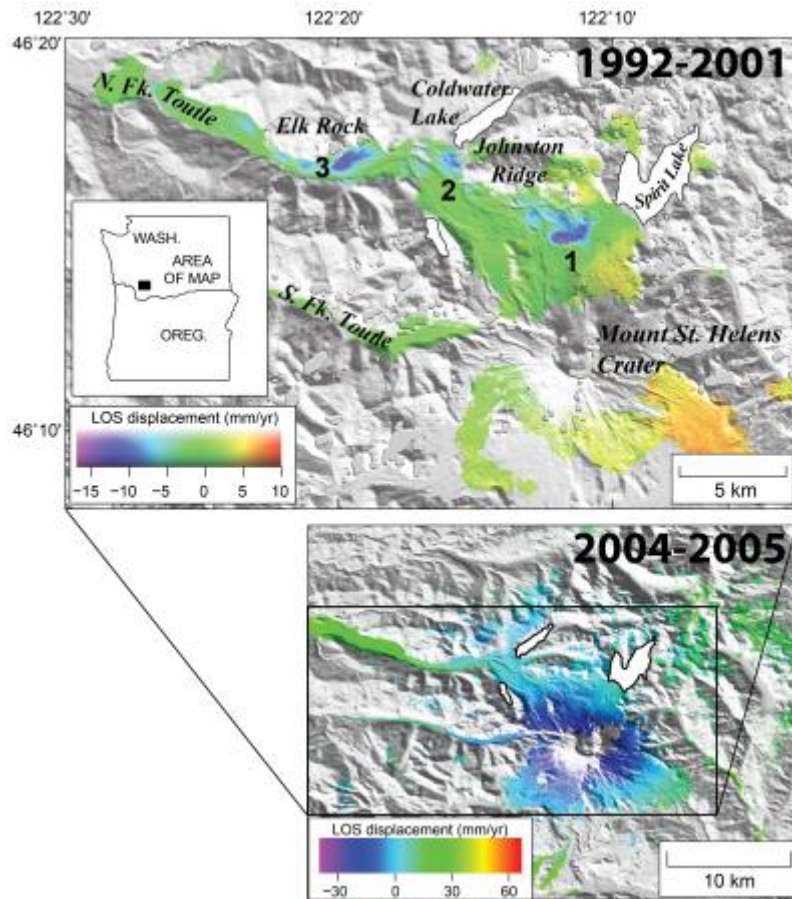
Συνδεδεμένη με την παρακολούθηση, είναι η έρευνα της γύρω περιοχής για να διαπιστωθεί πού έχουν φτάσει οι προηγούμενες ροές λάβας και να αποτυπωθεί πού συνέβη η προηγούμενη πτώση τέφρας. Έτσι αποκτάται κάποια ιδέα για την ιστορία του ηφαιστείου και τους τύπους των εκρήξεων που συνήθως έχει. Ας μην ξεχνάμε ό,τι κάθε ηφαίστειο είναι διαφορετικό, οπότε πρέπει να κάνουμε ξεχωριστή έρευνα και ατομική παρακολούθηση. Υπάρχει ένας τεράστιος κίνδυνος στον αέρα από τις ρωγμές των εκρήξεων, η ηφαιστειακή τέφρα, λοιπόν, δεν είναι σαν τέφρα από το τζάκι, αλλά πρόκειται για βασικά κονιοποιημένους βράχους και σωματίδια γυαλιού. Γνωρίζουμε ότι, η τοποθέτηση γυαλιού σε κινητήρα τζετ δεν είναι καλή. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η παρακολούθηση στην Αλάσκα, αν λάβει κάποιος υπόψιν του ότι και τα περισσότερα ηφαίστεια βρίσκονται στις ΗΠΑ, είναι εξαιρετικά σημαντική για την αεροπορική βιομηχανία.

Είναι γεγονός ότι κάποια ηφαίστεια εξαιτίας της ιστορίας αλλά και της ενεργητικότητας τους πρέπει να παρακολουθούνται στενότερα. Το Yellowstone έχει καταγραφεί στο παρελθόν για τεράστιες εκρήξεις, αλλά είναι εξαιρετικά σπάνια γεγονότα. Σίγουρα όσον αφορά την άμεση ανθρώπινη επίπτωση, η μεγαλύτερη ανησυχία θα ήταν εάν ένα άλλο από τα ηφαίστεια της σειράς Cascade Range στη δυτική ακτή των ΗΠΑ είχε άλλη έκρηξη.

Μια μεθοδολογία για τη συστηματική ταξινόμηση της ηφαιστειακής απειλής αναπτύχθηκε ως βάση για να δοθεί προτεραιότητα στα ηφαίστεια για μακροπρόθεσμες αξιολογήσεις κινδύνου, παρακολούθηση και μετριαστικές δραστηριότητες. Η κατάταξη των 169 ηφαιστειών στις Ηνωμένες Πολιτείες και στην Κοινοπολιτεία των Νήσων Βόρειας Μαριάνων (ηφαίστεια των Η.Π.Α.) παρουσιάζεται με βάση τα αποτελέσματα που αποδίδονται σε διάφορους παράγοντες κινδύνου και έκθεσης. Οι δεκαπέντε παράγοντες καθορίζουν τον κίνδυνο: ο τύπος ηφαιστείου, η μέγιστη γνωστή εκρηκτικότητα, το μέγεθος της πρόσφατης εκρηκτικότητας κατά τα τελευταία 500 και τα 5.000 χρόνια, το μέσο διάστημα έκρηξης και επανάληψης, η παρουσία ή το δυναμικό

μιας σειράς επικίνδυνων φαινομένων (πυροκλαστικές ροές, τσουνάμι, κατάρρευση των πλευρών, υδροθερμική έκρηξη, πρωτογενή λάχαρα) και παραμόρφωση, σεισμική ή αέρια αναταραχή. Εννέα παράγοντες ορίζουν την έκθεση: ένα μέτρο του ανθρώπινου πληθυσμού σε επικίνδυνες ζώνες, παλαιότερους θανάτους και εκκενώσεις, ένα μέτρο έκθεσης στο αεροδρόμιο, ένα μέτρο του ανθρώπινου πληθυσμού σε αεροσκάφη, η παρουσία ισχύος, η μεταφορά και η ανεπτυγμένη υποδομή και εάν και όχι το ηφαίστειο αποτελεί ένα σημαντικό μέρος ενός κατοικημένου νησιού. Ο βαθμός κινδύνου και η βαθμολογία έκθεσης για κάθε ηφαίστειο πολλαπλασιάζονται για να δώσουν τη συνολική βαθμολογία κινδύνου. Μόλις βαθμολογήσει, η λίστα των ηφαιστειών χωρίζεται σε πέντε γενικές κατηγορίες απειλών από πολύ υψηλές σε πολύ χαμηλές.

Η παρακολούθηση ενός ηφαιστείου απαιτεί από τους επιστήμονες να χρησιμοποιούν μια ποικιλία τεχνικών που μπορούν να ακούσουν και να δουν δραστηριότητα μέσα σε ένα ηφαίστειο. Το Πρόγραμμα Κινδύνων Ηφαιστείου USGS παρακολουθεί τα ηφαίστεια για να ανιχνεύσει σημάδια αλλαγής που προειδοποιούν για την ηφαιστειακή αναζωογόνηση. Για να κατανοηθεί πλήρως η συμπεριφορά ενός ηφαιστείου, η παρακολούθηση θα πρέπει να περιλαμβάνει αρκετούς τύπους παρατηρήσεων (σεισμούς, κίνηση εδάφους, ηφαιστειακό αέριο, χημεία ύδατος, απομακρυσμένη δορυφορική ανάλυση) σε συνεχή ή σχεδόν πραγματική βάση.



Εικόνα 4: Απεικόνιση για τη παραμόρφωση του St. Helens (αλλαγή επιφανείας) πριν (1992-2001) και κατά τη διάρκεια (2004-5) έκρηξη. Το τελευταίο σήμα υποδεικνύει αποπληθωρισμό καθώς το μάγμα ξέσπασε. (πηγή: https://volcanoes.usgs.gov/vs/c/image/s/image_mgr/3200-3299/img3266_400w_454h.png)

Οι επιστήμονες συλλέγουν δεδομένα από τα δίκτυα οργάνων και στη συνέχεια τα αναλύουν για να αναζητήσουν εξωτερικά σήματα. Με τη σύγκριση της ανάλυσης δεδομένων με παρόμοια αποτελέσματα από προηγούμενα ηφαιστειακά γεγονότα, οι ηφαιστειολόγοι μπορούν καλύτερα να προβλέψουν αλλαγές στην ηφαιστειακή δραστηριότητα και να προσδιορίσουν εάν και πότε θα εκδηλωθεί η έκρηξη ηφαιστείου στο μέλλον. Τα περισσότερα δεδομένα είναι προσβάσιμα από τα γραφεία μας στα παρατηρητήρια, αλλά οι επισκέψεις στα ηφαίστεια, όταν είναι δυνατόν, προσθέτουν πολύτιμες πληροφορίες. Αρωγός σε αυτό είναι και οι γρήγορες εξελίξεις στην τεχνολογία που βοηθούν τους επιστήμονες να αναπτύξουν αποδοτικό και ακριβή εξοπλισμό παρακολούθησης. Αυτά τα νέα συστήματα είναι σε θέση να συλλέγουν και να μεταδίδουν ακριβή δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από το ηφαίστεια πίσω στα γραφεία του παρατηρητηρίου, γεγονός που βελτιώνει την πρόβλεψη των εκρήξεων. Είναι σημαντικό τα όργανα να εγκαθίστανται κατά τη διάρκεια ήσυχων χρόνων, όταν δηλαδή τα ηφαίστεια δεν είναι ενεργά, ώστε να είναι έτοιμα να ανιχνεύσουν το παραμικρό κομμάτι της ηφαιστειακής ανάδευσης. Η έγκαιρη ανίχνευση δίνει το μέγιστο χρονικό διάστημα για να προετοιμαστούν οι άνθρωποι για μια έκρηξη.

Το ερέθισμα είναι ότι όταν ένα ηφαιστείο αρχίζει να εμφανίζει νέα ή ασυνήθιστα σημάδια δραστηριότητας, τα δεδομένα παρακολούθησης βοηθούν στην απάντηση στις κρίσιμες ερωτήσεις που είναι απαραίτητες για την αξιολόγηση και στη συνέχεια την έγκαιρη ενημέρωση σχετικά με τους ηφαιστειακούς κινδύνους. Για παράδειγμα, πριν από την έκρηξη του 2004 στον εξοπλισμό παρακολούθησης Mount St. Helens σημειώθηκε μεγάλη αύξηση της σεισμικής δραστηριότητας. Οι επιστήμονες εξέτασαν γρήγορα άλλα δεδομένα παρακολούθησης, συμπεριλαμβανομένου του αερίου, της παραμόρφωσης του εδάφους και των δορυφορικών εικόνων, για να αξιολογήσουν εάν το μάγμα ή το υγρό κινείται προς την επιφάνεια. Με βάση την ιστορία του ηφαιστείου και την ανάλυση των δεδομένων παρακολούθησης οι επιστήμονες ήταν σε θέση να προσδιορίσουν τους τύπους του μάγματος που θα μπορούσαν να κινούνται προς την επιφάνεια. Αυτός ο τύπος γνώσης βοηθά τους επιστήμονες να καταλάβουν τις πιθανές μορφές ηφαιστειακής δραστηριότητας και τους σχετικούς κινδύνους για τους ανθρώπους. Η γνώση των κινδύνων βοηθά τους υπαλλήλους να καθορίσουν ποιες προειδοποιήσεις σε πραγματικό χρόνο είναι απαραίτητες για την πρόληψη της απώλειας ζωής και της ιδιοκτησίας.

Ωστόσο, το κύριο εμπόδιο που μπορούμε να τονίσουμε στη μεγάλη αυτή προσπάθεια για έρευνα και πρόληψη είναι αδιαμφισβήτητο η έλλειψη χρηματοδότησης για τη συντήρηση των σταθμών ηφαιστειών που δημιουργούνται. Οι ικανοποιητικοί σταθμοί παρακολούθησης ηφαιστείου συμβάλλουν στην πρόβλεψη και τη μείωση των κινδύνων καθώς και στη βελτίωση της κατανόησης των ηφαιστειακών κινδύνων. Οι αναπτυσσόμενες χώρες τείνουν να επενδύουν υπερβολικά μεγάλο μέρος των κεφαλαίων τους κατά την εκκίνηση, γεγονός που δεν τους επιτρέπει να πληρώσουν για επαρκή προετοιμασία αργότερα. Επίσης, η αποδυνάμωση παρατηρείται μεταξύ των κυβερνητικών εργαζομένων εξαιτίας των εξαιρετικά χαμηλών μισθών και της έλλειψης πόρων. Αυτό αναγκάζει τους καλύτερους μηχανικούς να πάνε στον ιδιωτικό τομέα για να κερδίσουν υψηλότερο εισόδημα.

Μαζί με τη βιωσιμότητα αυτών των σταθμών παρακολούθησης ηφαιστείου, η συντήρηση και η γνώση του τρόπου χρήσης του δαπανηρού εξοπλισμού αποδεικνύεται ότι αποτελεί μείζονα πρόκληση. Επίσης, διάφοροι εθνικοί οργανισμοί σε κάθε χώρα ανταγωνίζονται μεταξύ τους σε κτιριακούς σταθμούς και λαμβάνουν διαφορετικά ποσά υποστήριξης από άλλες χώρες. Αυτός ο συνεχής ανταγωνισμός δεν επιτρέπει στις αναπτυσσόμενες χώρες να καταβάλουν τις προσπάθειές τους σε έναν επιτυχημένο σταθμό παρακολούθησης ηφαιστείου. Οι σταθμοί αυτοί αντιμετωπίζουν επίσης ακραίες καιρικές συνθήκες.

2.2. Επίπεδα απειλής ηφαιστειών και μέθοδοι για την παρακολούθησή τους

Η ηφαιστειακή απειλή είναι ένας συνδυασμός καταστρεπτικών φυσικών φαινομένων που ένα ηφαιστείο είναι ικανό να παράγει, γνωστό και ως κίνδυνος ηφαιστείου, και των ανθρώπων, των περιουσιών και των υποδομών που διατρέχουν κίνδυνο από αυτά τα φαινόμενα. Η αντιστοίχιση του απαιτούμενου επιπέδου παρακολούθησης του ηφαιστείου με το επίπεδο απειλών του παρέχει την μεγαλύτερη ασφάλεια για τους περισσότερους ανθρώπους και τις υποδομές που διατρέχουν κίνδυνο και διανέμει αποτελεσματικότερα τα χρήματα και τον χρόνο των επιστημόνων. Η αντιστοίχιση της απαιτούμενης παρακολούθησης με το επίπεδο απειλής

κατέστη δυνατή το 2005, όταν προσδιορίστηκε ποσοτικά ο κίνδυνος ηφαιστείου USGS, η έκθεση σε κίνδυνο και τα επίπεδα απειλής για όλα τα 169 γεωλογικά ενεργά ηφαιστεία στις Ηνωμένες Πολιτείες και τα εδάφη αυτών.

Με βάση την αριθμητική βαθμολογία απειλών, κάθε ηφαιστειο τοποθετήθηκε σε μία από τις πέντε κατηγορίες απειλών: πολύ υψηλή, υψηλή, μέτρια, χαμηλή και πολύ χαμηλή. Τα πενήντα πέντε από τα ηφαιστεία του έθνους ορίζονται ως πολύ υψηλά ή υψηλά απειλητικά: είναι σχεδόν το ένα τρίτο όλων των δυνητικά ενεργών ηφαιστείων των Η.Π.Α. Επειδή πολλά ηφαιστεία είτε δεν έχουν μελετηθεί είτε έχουν εξεταστεί ανεπαρκώς, τα ποσοστά απειλών πιθανότατα θα αυξηθούν καθώς μελλοντικές μελέτες θα ανακαλύψουν προηγουμένως άγνωστη προηγούμενη εκρηκτική δραστηριότητα ή αναταραχή και καθώς ο πληθυσμός και η υποδομή σε κίνδυνο αυξάνονται.

Προκειμένου να παρέχεται επαρκής προειδοποίηση, τα ηφαιστεία με υψηλά ή πολύ υψηλά επίπεδα απειλής απαιτούν έντονη, σε πραγματικό χρόνο, λεπτομερή παρακολούθηση. Τα σήματα από τα όργανα παρακολούθησής τους πρέπει να μεταδίδονται σε πραγματικό χρόνο σε ένα περιφερειακό ηφαιστειακό παρατηρητήριο, έτσι ώστε οι ηφαιστειολόγοι να μπορούν να διαγνώσουν γρήγορα τις έννοιες των πιο λεπτών αλλαγών. Κατά κανόνα, τα ηφαιστεία σε αυτές τις δύο κατηγορίες απειλών θα απαιτήσουν τουλάχιστον 12-20 μόνιμους σεισμικούς σταθμούς εντός 20 χλμ. Από τον κύριο ηφαιστειακό εξαιρισμό, συμπεριλαμβανομένων αρκετών σταθμών πολύ κοντά στο άνοιγμα, τις έρευνες παραμόρφωσης ρουτίνας και τη συνεχή καταγραφή μόνιμων σταθμών GPS (Global Positioning System). Συχνές μετρήσεις εναέριων και επίγειων σταθμών των ηφαιστειακών αερίων και όργανα κατά μήκος των κοιλάδων των ποταμών, ευαίσθητα στους μοναδικούς ήχους των παλμών που περνούν από τη λάσπη, οι οποίοι ενεργοποιούν συναγερμούς για να προειδοποιούν τους ανθρώπους που βρίσκονται κοντά σε αυτά. Τα ηφαιστεία μέτριας απειλής θα απαιτήσουν παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο για την ανίχνευση ασθενών προ-εκρηκτικών σημάτων όπως συμβαίνουν. Μια τυπική κάλυψη θα απαιτήσει έξι σεισμικούς σταθμούς εντός 20 χλμ. από ένα ηφαιστειο, συμπεριλαμβάνοντας τρεις με τέσσερις ψηλά στο πλευρό του, τουλάχιστον έξι συνεχείς καταγραφές, μόνιμους σταθμούς GPS κοντά, μετρήσεις σπάνιων αερίων ανάλογα με το κάθε ηφαιστειο και ανιχνευτές ροής κατά μήκος του ποταμού.

Φυσικά, αν η αναταραχή αρχίσει ή κλιμακώνεται ή εάν τα δεδομένα παρακολούθησης υποδηλώνουν ότι ένα δεδομένο ηφαιστειο μπορεί να κινείται προς μια έκρηξη, η παρακολούθηση θα πρέπει να αυξηθεί όσο το δυνατόν γρηγορότερα για να ληφθούν ακριβή τρέχοντα δεδομένα. Σε απάντηση στην αυξημένη ανησυχία, θα πρέπει να παρακολουθείται μια ευρύτερη ποικιλία ηφαιστειακών φαινομένων. Θα έπρεπε να εγκατασταθούν νέα είδη μέσων, ενώ τα υφιστάμενα δίκτυα μέσων θα πρέπει να ενισχυθούν με την αναμόρφωση των υφιστάμενων μέσων και την προσθήκη νέων και τα δίκτυα διαβίβασης δεδομένων θα πρέπει να ενισχυθούν όλα ώστε να μπορέσουν οι ηφαιστειολόγοι να ερμηνεύσουν τις ηφαιστειακές αναταραχές και να προβλέψουν πιθανές συνέπειες όλο το εικοσιτετράωρο.

Όσον αφορά τα ηφαιστεία χαμηλής απειλής και πολύ χαμηλής απειλής, από την άλλη πλευρά, απαιτούν χαμηλότερο επίπεδο παρακολούθησης. Για τα ηφαιστεία αυτά, όπως και για όλα τα ηφαιστεία, πρέπει να καθοριστούν βασικά δεδομένα σεισμικής, παραμορφωτικής, αερίου και υδρολογίας, μετά από τα οποία τα ηφαιστεία χαμηλής απειλής απαιτούν μόνο επαρκή παρακολούθηση για να ανιχνεύσουν ανώμαλη δραστηριότητα σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Τα ηφαιστεία πολύ χαμηλής απειλής θα απαιτούσαν ακόμη λιγότερη παρακολούθηση.

Επειδή οι πόροι ήταν ανεπαρκείς για την οργάνωση και την παρακολούθηση όλων των εν δυνάμει ενεργών ηφαιστείων σε επαρκές επίπεδο μέχρι πρόσφατα, η παρακολούθηση ηφαιστείου από το USGS έγινε αντιδραστικά, δηλαδή, η κατάλληλη παρακολούθηση δεν τέθηκε

σε εφαρμογή μέχρι να παρατηρηθεί κάποια μορφή αναταραχής στην επιφάνεια της Γης. Επομένως, τα πρόδρομα σήματα δεν εντοπίστηκαν και το διάστημα μεταξύ των πρώτων παρατηρούμενων σημείων αναταραχής και ηφαιστειακής κρίσης ήταν συχνά βραχύ. Έτσι, οι πολιτικές αρχές, οι πολίτες, οι επιχειρήσεις και οι επιστήμονες αναγκάστηκαν να παίξουν ένα επικίνδυνο παιχνίδι για "να καλύψουν" τα ηφαίστεια. Οι αρχές εργάστηκαν με υπερωρίες για να θέσουν τα μέτρα πολιτικής άμυνας πριν από την αναταραχή και κλιμακώθηκαν σε επικίνδυνα επίπεδα, ενώ οι ηφαιστειολόγοι προσπαθούσαν να αυξήσουν τα όργανα και να εγκαταστήσουν αναβαθμισμένα δίκτυα επικοινωνίας, συχνά με μεγάλη δαπάνη αλλά και κίνδυνο για τον ίδιο τους τον εαυτό.

Ο ποσοτικός προσδιορισμός του ειδικού επιπέδου απειλής για κάθε ηφαίστειο των Η.Π.Α. θα επέτρεπε στο USGS να κατανείμει πόρους έτσι ώστε τα πιο απειλητικά ηφαίστεια να μπορούν να παρακολουθούνται όλο το εικοσιτετράωρο πριν δείξουν οποιεσδήποτε ενδείξεις αναταραχής. Αυτή η προληπτική προσέγγιση της παρακολούθησης, εάν εφαρμοζόταν, θα επέτρεπε στους ηφαιστειολόγους να στέλνουν στις κοινότητες, που βρίσκονται σε κίνδυνο, αξιόπιστες πληροφορίες από την έναρξη της ανησυχίας, παρέχοντάς τους το μέγιστο χρονικό διάστημα για να ενεργοποιήσουν τα σχέδια απόκρισης και μετριασμού. Η προληπτική παρακολούθηση από το USGS δίνει στους ηφαιστειολόγους το μέγιστο χρονικό διάστημα για να αυξήσουν την παρακολούθηση εάν αυτό είναι απαραίτητο. Παρόλο που δεν εκδηλώνεται κάθε ανήσυχο ηφαίστειο, η ενεργός παρακολούθηση εξακολουθεί να είναι απαραίτητη για την ελαχιστοποίηση είτε της υπερβολικής αντίδρασης, η οποία κοστίζει χρήματα, είτε υποβαθμίζει, γεγονός που μπορεί να κοστίσει ζωές. Ωστόσο, το κύριο εμπόδιο για την εφαρμογή προληπτικής παρακολούθησης στις Ηνωμένες Πολιτείες και σε όλο τον κόσμο είναι η εξεύρεση πόρων για την πληρωμή του αναγκαίου εξοπλισμού και των επιστημόνων.

Η προληπτική παρακολούθηση προσφέρει πολλά πρακτικά πλεονεκτήματα έναντι της αντιδραστικής παρακολούθησης. Κάποια τα οποία μπορούμε να επισημάνουμε ως τα πιο στοιχειώδη αναφέρονται παρακάτω:

- Ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο έκρηξης χωρίς προειδοποίηση.
- Αυξάνει τον χρόνο για την εφαρμογή μέτρων πολιτικής άμυνας πριν από την κλιμάκωση των κλιματικών συνθηκών και την επιδείνωση της ηφαιστειακής κρίσης.
- Εξασφαλίζει την ασφαλή εγκατάσταση των οργάνων και των δικτύων επικοινωνίας σε προκαθορισμένες τοποθεσίες κατά τρόπο ομαλό. Τα περισσότερα ηφαίστεια με υψηλά απειλή και υψηλά απειλή στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι πανύψηλες κορυφές που καλύπτονται από χιόνι και παγετώνες και είναι απρόσιτες, εκτός από τη σύντομη θερινή περίοδο, ενώ η έναρξη της ηφαιστειακής ανησυχίας μπορεί να συμβεί σε οποιαδήποτε εποχή. Η εγκατάσταση κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και η συντήρηση του εξοπλισμού μεγιστοποιεί την πιθανότητα ότι οι προτιμώμενοι χώροι δεν είναι χιονισμένοι, εξασφαλίζει μέγιστη ασφάλεια για τους ηφαιστειολόγους και το προσωπικό υποστήριξης και δίνει επαρκή χρόνο για τη δοκιμή των οργάνων και των δικτύων επικοινωνίας.
- Αυξάνει την ασφάλεια στους περισσότερους από 80.000 επιβάτες αεροπορικών εταιρειών ανά ημέρα που ταξιδεύουν με τις πολυσύχναστες αεροπορικές διαδρομές κατά μήκος των ηφαιστειακών τόξων Cascade και Aleutian. Όταν εφαρμοστεί πλήρως, η προληπτική παρακολούθηση αυτών των τόξων θα επιτρέψει στους ηφαιστειολόγους να ενημερώσουν την Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Αεροπορίας (FAA) εντός πέντε λεπτών μετά από μια μεγάλη

εκρηκτική έκρηξη, επιτρέποντας στα αεροπλάνα να αλλάξουν ταχύτητα γρήγορα για να αποφύγουν τα σύννεφα τέφρας.

- Βελτιώνει την ακρίβεια και την επικαιρότητα των μελλοντικών προειδοποιήσεων. Τα τελευταία 25 χρόνια, η κατανόηση των βασικών ηφαιστειακών διεργασιών έχει βελτιωθεί σημαντικά, βασιζόμενη εν μέρει στα δεδομένα που αποκτήθηκαν από τη μακροπρόθεσμη παρακολούθηση του ηφαιστείου. Τα δεδομένα παρακολούθησης βοηθούν τους εθελοντές να διαμορφώνουν και να δοκιμάζουν μοντέλα για το πώς λειτουργούν τα ηφαίστεια. Τα καλύτερα μοντέλα, με τη σειρά τους, βελτιώνουν τον τρόπο παρακολούθησης των ηφαιστειών, εντοπίζουν τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους παρακολούθησης και προτείνουν νέες τεχνικές παρακολούθησης.

- Προσθέτει επιστημονική αξιοπιστία στους χαρακτηρισμούς των διαχειριστών γης από ασφαλές περιοχές που μπορούν να παραμείνουν ανοιχτοί στους επισκέπτες - σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμα και όταν ένα ηφαίστριο εξακολουθεί να εκρήγνυται. Μετά από 18 χρόνια σχετικής ηρεμίας, το Mount St. Helens αναζωπυρώθηκε στα τέλη του 2004, όταν εντοπίστηκαν σμήνη μικρών σεισμών από το USGS, προειδοποιώντας τους ηφαιστειολόγους στην παρουσία μάγματος κάτω από το ηφαίστριο. Η Δασική Υπηρεσία των ΗΠΑ έκλεισε κάθε πρόσβαση στο βουνό. Κατά τη διάρκεια του επόμενου έτους, μια σειρά από θόλους λάβας επώδυνες εξώθηση μέσα στον κρατήρα του ηφαιστείου, συνοδευόμενη από εκρήξεις και βράχια. Εντούτοις, μέχρι τα μέσα του 2006, η παρακολούθηση των USGS υποδεικνύει την επιβράδυνση της αύξησης του θόλου, την μείωση των εκπομπών ηφαιστειακών αερίων και τη διακοπή των εκρηκτικών εκρήξεων που εκτείνονται πέρα από τον κρατήρα. Αν και ο σημερινός θόλος συνέχισε να αναπτύσσεται με ρυθμό περίπου ενός φορτίου φορτηγού ανά λεπτό, ο οποίος καθιστά τον κρατήρα εκτός ορίων για κάποιο χρονικό διάστημα, οι ηφαιστειολόγοι του USGS ήταν σε θέση να παρέχουν καθοδήγηση στους αξιωματούχους της US Forest Service, επιτρέποντάς τους να ξαναοίξουν μονοπάτια κορυφής στα μέσα του 2006. Ένα σύστημα που βασίζεται στο Web για την απόκτηση αδειών αναρρίχησης συμβάλλει στην ασφάλεια των επισκεπτών και επιτρέπει την ταχεία γνωστοποίηση της αλλαγής της ηφαιστειακής δραστηριότητας.

Μια ποικιλία προδρομικών σημάτων δημιουργείται από τις πολλές διαδικασίες που συμβαίνουν όταν ο τετηγμένος βράχος (magma) αναγκάζει τον δρόμο του να περάσει μέσα από τα μίλια του γήινου φλοιού πριν από την έκρηξη στην επιφάνεια. Πολλά από αυτά τα σήματα είναι εξαιρετικά ανεπαίσθητες και περίπλοκες αντιδράσεις και συνεπώς απαιτούν ακριβείς εξοπλισμούς ευαίσθητων οργάνων για ανίχνευση και επιστήμονες με πολυετή πείρα για να ερμηνεύσουν. Στη συνέχεια θα περιγράψουμε τις διάφορες μείζονες τεχνικές που χρησιμοποιεί η USGS για τον εντοπισμό, την ποσοτικοποίηση και την ερμηνεία κάθε τύπου σήματος. Με τον ένα ή τον άλλο τρόπο, κάθε τεχνική παρακολουθεί τους τύπους, τα μεγέθη και τις θέσεις των σεισμών, την ανύψωση και την καθίζηση της επιφάνειας του εδάφους, ή αλλαγές στη θερμότητα, το νερό και τα αέρια που εκπέμπονται από τα ηφαίστεια. Επειδή οι τεχνικές μετρούν διαφορετικές διεργασίες που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της ανόδου του μάγματος, η αποτελεσματική παρακολούθηση απαιτεί την εφαρμογή πολλών τεχνικών ταυτόχρονα για την εκτίμηση των εξελίξεων κοντά σε πραγματικό χρόνο σε ένα ηφαίστριο.

Όπως οι γιατροί παρακολουθούν τους πιθανούς μελλοντικούς κινδύνους για την υγεία των ασθενών, μελετώντας τις ιατρικές τους ιστορίες και ερμηνεύοντας τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών με την πάροδο του χρόνου, έτσι και οι ηφαιστειολόγοι ενημερώνονται για τη δυνατότητα και το μέγεθος της μελλοντικής ηφαιστειακής δραστηριότητας, μελετώντας την ιστορική δραστηριότητα του ηφαιστείου και μετρώντας και αξιολογώντας τα σήματα που παράγει εδώ και πολλά χρόνια. Οι γιατροί και οι ηφαιστειολόγοι γνωρίζουν ότι η συνήθης

παρακολούθηση με την πάροδο του χρόνου είναι ο καλύτερος τρόπος για την έγκαιρη ανίχνευση πιθανών μελλοντικών προβλημάτων, όταν αυτά αντιμετωπίζονται ευκολότερα. Ενώ οι ασθενείς μπορούν να πάνε σε εργαστήρια για δοκιμές, οι ηφαιστειολόγοι μπορούν μόνο να εκτιμήσουν την κατάσταση των ηφαιστειών στον τομέα, τοποθετώντας όργανα παρακολούθησης πάνω και κοντά σε αυτά. Στην ιδανική περίπτωση, δημιουργούνται πλήρη δίκτυα οργάνων παρακολούθησης, ενώ τα δυνητικά ενεργά ηφαίστεια εξακολουθούν να είναι ήσυχα. Χάνοντας τα πρώτα σήματα της ανησυχίας, οι ηφαιστειολόγοι κινδυνεύουν να χάσουν κρίσιμα πρώιμα δεδομένα που είναι απαραίτητα για να καθορίσουν τις "βασικές" τάσεις και να εκτιμήσουν με ακρίβεια το μέγεθος μιας πιθανής έκρηξης

Οι μέθοδοι παρακολούθησης ηφαιστείου έχουν σχεδιαστεί για την ανίχνευση και τη μέτρηση των σημάτων που προκαλούνται από τη μετακίνηση μάγματος κάτω από ένα ηφαίστειο. Το ανερχόμενο μάγμα τυπικά θα (1) πυροδοτήσει σμήνη σεισμών και άλλων τύπων σεισμικών γεγονότων, (2) προκαλέσει παραμόρφωση (ακόμα και καθίζηση) της κορυφής ή των λόφων του ηφαιστείου, και (3) οδηγεί στην απελευθέρωση ηφαιστειακών αερίων από το έδαφος και τις οπές εξαερισμού. Παρακολουθώντας τις αλλαγές στην κατάσταση ενός ηφαιστείου, οι επιστήμονες μερικές φορές είναι σε θέση να προβλέψουν ημέρες έκρηξης έως εβδομάδες εκ των προτέρων και να ανιχνεύσουν εξ αποστάσεως την εμφάνιση ορισμένων σχετικών γεγονότων, όπως εκρήξεις και λαχάρ.

2.3. Συστήματα παρακολούθησης που εφαρμόζονται σε πολυάριθμα σήματα

2.3.1. Μέθοδος για τηλεανίχνευση μέσω δορυφόρου

Η δορυφορική τηλεπισκόπηση είναι χρήσιμη για την παρακολούθηση και τη μέτρηση ποικιλίας ηφαιστειακών φαινομένων, συμπεριλαμβανομένων των θερμικών εκπομπών, των ηφαιστειακών τεφρών, των νεφών αερίων και της παραμόρφωσης της επιφάνειας. Συνήθως, οι δορυφόροι που χρησιμοποιούν υπέρυθρους αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και την παρακολούθηση της ηφαιστειακής δραστηριότητας και οι αισθητήρες υπεριώδους και ραντάρ χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση αερίων και επιφανειών εδάφους. Πολλές ηφαιστειακές διαδικασίες εκπέμπουν θερμότητα. Οι διαδικασίες που εκπέμπουν θερμότητα ως μέρος μιας έκρηξης ονομάζονται ενεργές πηγές. Παραδείγματα περιλαμβάνουν πυροκλαστικές ροές, ροές λάβας, θόλους λάβας και σιντριβάνια λάβας. Οι διαδικασίες που εκπέμπουν θερμότητα για μεγάλες χρονικές περιόδους, αλλά δεν υποδεικνύουν κανονικά μια επικείμενη έκρηξη, ονομάζονται παθητικές πηγές. Παραδείγματα περιλαμβάνουν θερμές πηγές, ατμίδες, φουμαρόλες, κατάγματα και λίμνες κρατήρα.

Για λιγότερο εκρηκτικά ηφαιστειακά φαινόμενα, όπως ρεύματα λάβας και σιντριβάνια λάβας, η δορυφορική τηλεπισκόπηση μπορεί να βοηθήσει στην ερμηνεία των σεισμικών δεδομένων, ειδικά για τα απομακρυσμένα ή δύσκολα προσπελάσιμα ηφαίστεια. Η τηλεπισκόπηση μπορεί να καθορίσει εάν ένας τύπος σεισμικού σήματος που παρατηρείται συνήθως κατά τη διάρκεια μιας έκρηξης (ηφαιστειακός τρόμος) σχετίζεται με μια σχετικά αργή διαδικασία, όπως η αύξηση του μάγματος σε έναν αγωγό ή μια πιο επικίνδυνη εκρηκτική έκρηξη. Σε άλλες περιπτώσεις η τηλεανίχνευση χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση αλλαγών στο χαρακτήρα της ροής της λάβας, από τον τύπο που τροφοδοτήθηκε από ένα σύστημα υπόγειας σωλήνωσης σε μια ροή

επιφάνειας. Παρόλο που αυτή η αλλαγή του χαρακτήρα ροής μπορεί να μην είναι εμφανής στα σεισμικά δεδομένα, μπορεί να σηματοδοτήσει μια μετάβαση στον τύπο και τη θέση του κινδύνου ροής λάβας.

Η θερμική τηλεπισκόπηση των ενεργών διεργασιών έχει σε ορισμένες περιπτώσεις εντοπίσει με επιτυχία πρόδρομα γεγονότα σε επικίνδυνη ηφαιστειακή δραστηριότητα και βοηθά στη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη επικίνδυνης εκρηκτικής ηφαιστειακής δραστηριότητας για ημέρες ή ακόμα και εβδομάδες. Για παράδειγμα, καθώς το μάγμα εισβάλλει σε ένα θόλο λάβας, τα πλευρά του μπορεί να ξεπεράσουν, οδηγώντας σε κατάρρευση. Αυτό δημιουργεί θερμές ροές μπλοκ και στάχτης (πυροκλαστικές ροές) που μπορούν να ανιχνευθούν σε δορυφορικές εικόνες. Μια μεγάλη κατάρρευση θόλου μπορεί να προκαλέσει μια εκρηκτική έκρηξη μεγαλύτερου όγκου και ταυτοχρόνως το πλούσιο σε αέρια μάγμα να αποβάλλεται γρήγορα, οδηγώντας σε στήλες έκρηξης και σύννεφα τέφρας που ταξιδεύουν χιλιάδες χιλιόμετρα.

Εκρηκτικές ηφαιστειακές εκρήξεις μπορούν να εισάγουν μεγάλους όγκους ηφαιστειακής τέφρας και αερίου στην ατμόσφαιρα, όπου διασκορπίζονται από τους ανέμους. Η ηφαιστειακή τέφρα είναι ένα μη συμπυκνωμένο μείγμα θραυσμάτων από πέτρωμα, κρυστάλλους και γυαλί με άμμο και σκόνη, τα οποία αποτελούν σοβαρό κίνδυνο για τα αεροσκάφη και τα μηχανήματα. Από το 1973 έως το 2003 έχουν τεκμηριωθεί σχεδόν 100 συναντήσεις αεροσκαφών με αερομεταφερόμενη ηφαιστειακή τέφρα, μερικές από τις οποίες σχεδόν είχαν ως αποτέλεσμα την απώλεια του αεροσκάφους. Τα τυπικά κόστη ανά σύσχεψη κυμαίνονται από μερικές δεκάδες χιλιάδες δολάρια έως και 80 εκατομμύρια δολάρια. Τα σύννεφα της τέφρας που παρασύρονται, αυτά που έχουν αποκολληθεί από το άνοιγμα, δεν είναι ανιχνεύσιμα από το ραντάρ του αεροσκάφους και είναι δύσκολο να το δουν σε χαμηλό φωτισμό και τη νύχτα. Η ανίχνευση μέσω δορυφόρου και η παρακολούθηση των σύννεφων παραφίνης, η πρόβλεψη μοντέλων διασποράς σε σύννεφο και η άμεση επικοινωνία των αναλύσεων χρησιμοποιούνται για τον μετριασμό του κινδύνου ηφαιστειακής τέφρας. Εκτός από τον εναέριο κίνδυνο, η πτώση της τέφρας μπορεί να συμβεί ως αποτέλεσμα ενός νέφους έκρηξης. Αυτό μπορεί να κυμαίνεται από ένα ελαφρύ ξεσκόνισμα σε πυκνές αποθέσεις τέφρας, ακόμη και σε μεγάλες αποστάσεις από το ηφαίστειο. Η παρακολούθηση μέσω δορυφόρου και η μοντελοποίηση των κολοφωνιών τέφρας συμβάλλει επίσης στην πρόβλεψη πτώσης τέφρας. Οι προβλέψεις και η μοντελοποίηση των τυπικών προτύπων πτώσης τέφρας μπορούν να βοηθήσουν ώστε να μετριάσουμε τις επιπτώσεις του φορτίου τέφρας στην υγεία των ανθρώπων και των ζώων, στις μηχανές και στις δομές.

Τα ηφαιστειακά αέρια εκπέμπονται επίσης κατά τη διάρκεια έντονης έκρηξης, ενώ οι υδρατμοί, το διοξείδιο του άνθρακα και το διοξείδιο του θείου είναι το πιο άφθονο. Παρόλο που τα αέρια αυτά δεν αποτελούν σοβαρό κίνδυνο για τα αεροσκάφη, σε μεγάλες ποσότητες μπορούν να αποτελούν χρόνιο κίνδυνο για την υγεία, την υποδομή και το περιβάλλον. Μόλις το διοξείδιο του θείου εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα, συνδυάζεται με νερό για να παράγει ένα θειικό (θειικό) αεροζόλ. Σε μεγάλες ποσότητες, αυτά τα σταγονίδια οξέος μπορούν να επηρεάσουν το παγκόσμιο κλίμα αντανακλώντας την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία. Τα σταγονίδια θειικού οξέος είναι πολύ μικρά, ώστε να παραμείνουν στον αέρα για μήνες έως χρόνια. Οι κατασκευές ή τα αεροσκάφη σε περιοχές που περιέχουν θειικό αεροζόλ θα μπορούσαν να υποφέρουν από χρόνιες βλάβες, όπως η τριβή των ακρυλικών παραθύρων, η διάβρωση των στηριγμάτων και οι ελαστικές σφραγίδες και η συσσώρευση αποθεμάτων στους αερομεταφορείς ή τους κινητήρες. Αυτές οι επιπτώσεις είναι δύσκολο να τεκμηριωθούν επειδή μπορούν να συμβούν αργά για μια περίοδο ετών. Η δορυφορική τηλεπισκόπηση παρέχει τη δυνατότητα ανίχνευσης και ποσοτικοποίησης των ποσοτήτων διοξειδίου του θείου που απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια μιας έκρηξης, καθώς και του προκύπτοντος θειικού αερολύματος. Αυτό περιλαμβάνει τη μη

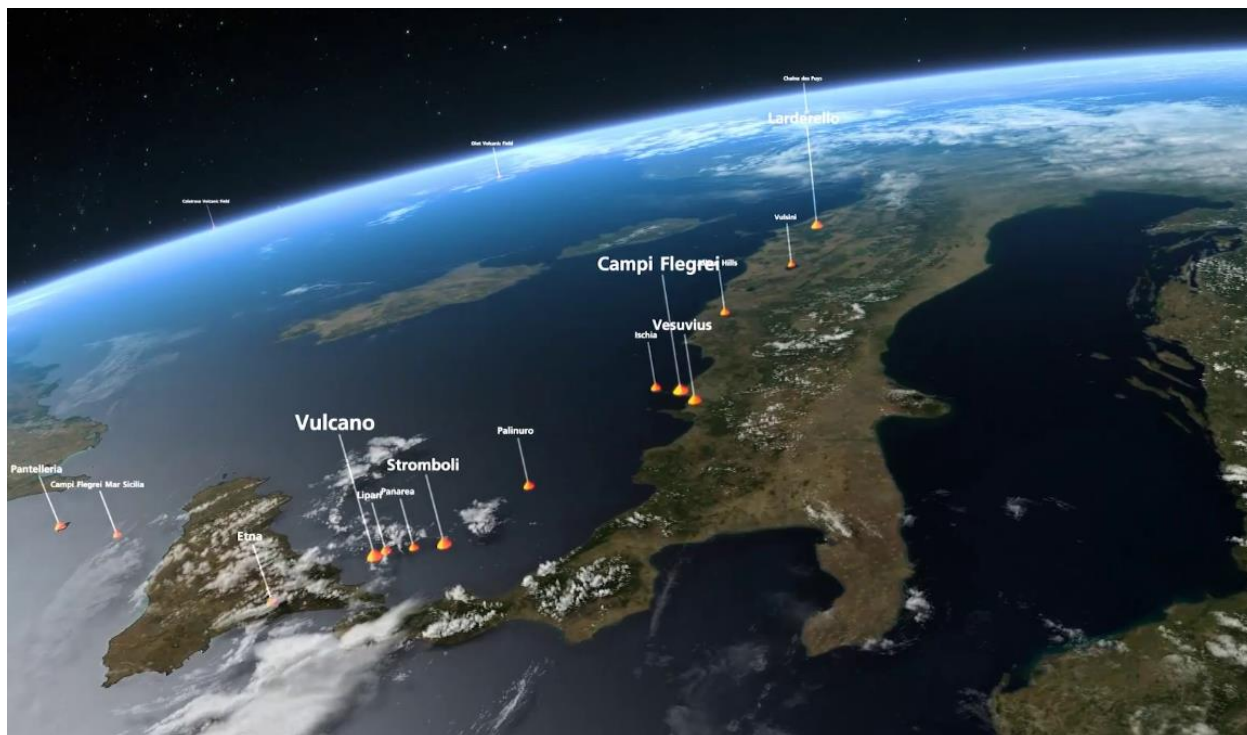
εκρηκτική απαερίωση του διοξειδίου του θείου αν και οι μετρήσεις αερίου με βάση το έδαφος είναι οι πιο χρήσιμες

Η δορυφορική τηλεπισκόπηση μπορεί να παρακολουθεί συχνά την ηφαιστειακή δραστηριότητα και με χαμηλό έως μέτριο κόστος. Μεγάλα από τα δορυφορικά δεδομένα είναι διαθέσιμα σχεδόν σε πραγματικό χρόνο σε απευθείας σύνδεση, έτσι σε πολλές περιπτώσεις τα έξοδα δεν περιλαμβάνουν σταθμούς λήψης δεδομένων. Η δορυφορική τηλεπισκόπηση και η σεισμική παρακολούθηση μπορούν να συνδυαστούν συμβιωτικά για τον προσδιορισμό του τύπου και του δυνητικού κινδύνου μιας εκρηκτικής τέφρας. Η δορυφορική απεικόνιση παρέχει επίσης πληροφορίες σχετικά με φαινόμενα που δεν μπορούν να παρατηρηθούν με άλλο τρόπο, όπως θερμικές ανωμαλίες, μεγάλες εκπομπές αερίων και επικίνδυνα ηφαιστειακά σύννεφα. Μια ποικιλία συμπληρωματικών δορυφορικών δεδομένων είναι διαθέσιμα για να κάνουν αυτές τις παρατηρήσεις. Αυτά τα δεδομένα μπορούν γενικά να ταξινομηθούν ως συχνές, σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, χαμηλής χωρικής ανάλυσης, όπως το προηγμένο ακτινομετρητή πολύ υψηλής ανάλυσης (AVHRR), το μετρητικό φασματόμετρο απεικόνισης μέτριου ψηφίσματος (MODIS) και οι αισθητήρες γεωστατικών επιχειρησιακών περιβαλλοντικών δορυφόρων (GOES) ή σπάνιες εικόνες υψηλής ανάλυσης χωρικής ανάλυσης που δεν είναι σε πραγματικό χρόνο, όπως αισθητήρες δορυφορικής τηλεανίχνευσης εδάφους (Landsat) και αισθητήρες ASTER (Advanced Spaceborne Reflection Radiometer Reflection Radiometer). Η συνδυασμένη χρήση και των δύο τύπων δορυφορικών δεδομένων παρέχει μια ισχυρή μέθοδο για την ανίχνευση της ηφαιστειακής δραστηριότητας και τη χαρτογράφηση των ηφαιστειακών σχηματισμών και των κατακρημνισμάτων.

Μερικοί δορυφορικοί αισθητήρες μετρούν το φως στα μήκη κύματος που δεν είναι ορατά από το ανθρώπινο μάτι. Τα πιο χρήσιμα για την παρακολούθηση των ηφαιστειών είναι τα μήκη κύματος υπέρυθρων ακτίνων, ακριβώς περισσότερο από αυτά που μπορούν να δουν οι άνθρωποι. Τα περισσότερα υπέρυθρα μήκη κύματος απορροφώνται από την ατμόσφαιρα της Γης, εκτός από μερικά «ατμοσφαιρικά παράθυρα» όπου η απορρόφηση των υπέρυθρων ακτίνων είναι ελάχιστη.

Ένα χρήσιμο ατμοσφαιρικό παράθυρο είναι το υπέρυθρο βραχέων κυμάτων (SWIR) με μήκος κύματος μεταξύ 3 και 5 μικρών. Το SWIR χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση θερμικών χαρακτηριστικών υψηλής θερμοκρασίας, όπως οι λάβα ή οι πυροκλαστικές ροές. Το θερμότερο αντικείμενο είναι, τόσο περισσότερη ενέργεια θα εκπέμπει, και σε μικρότερα μήκη κύματος. Για παράδειγμα, ένα αντικείμενο με θερμοκρασία 25 ° C, όπως η επιφάνεια της Γης, έχει μέγιστη εκπομπή σε μήκος κύματος ~ 10 μικρά. Ωστόσο, ένα ηφαιστειακό χαρακτηριστικό με θερμοκρασία 800 ° C έχει μέγιστη εκπομπή στα ~ 3 μικρά. Πολλά ηφαιστειακά χαρακτηριστικά έχουν μέγεθος δευτερεύοντος εικονοστοιχείου, δηλαδή καλύπτουν μια περιοχή μικρότερη από 1 χλμ. Σε μία πλευρά για το AVHRR ή το MODIS. Η θερμοκρασία που καταγράφεται από τον δορυφόρο είναι ένα πολύπλοκο μείγμα του σε θερμοκρασίες ενός θερμού και ψυχρού στοιχείου και των αντίστοιχων περιοχών τους. Εάν υπάρχουν πολλαπλά κανάλια δεδομένων σε διαφορετικά μήκη κύματος, είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν αυτές οι σχέσεις για να υπολογιστεί τόσο η θερμοκρασία όσο και η περιοχή ενός θερμού ηφαιστειακού συστατικού. Ένα άλλο χρήσιμο ατμοσφαιρικό παράθυρο είναι το θερμικό υπέρυθρο (TIR) με μήκη κύματος μεταξύ 8 και 14 μικρά. Τα δεδομένα σε αυτά τα μήκη κύματος χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση σύννεφων ηφαιστειακής τέφρας και διοξειδίου του θείου. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος διάκρισης σύννεφων ηφαιστειακής τέφρας από μετεωρολογικά σύννεφα είναι η μέθοδος "split-window". Εδώ η διαφορά θερμοκρασίας φωτεινότητας (BTD) συγκρίνεται μεταξύ 2 δορυφορικών καναλιών με μήκη κύματος 11 και 12 micron. Τα ημι-διαφανή ηφαιστειακά σύννεφα έχουν γενικά αρνητικά BTD ενώ τα μετεωρολογικά σύννεφα έχουν γενικά θετικά BTDs.

Αν και πολλοί παράγοντες επηρεάζουν το μέγεθος του σήματος BTD, συμπεριλαμβανομένων (αλλά όχι περιοριστικά) της θολρότητας του νέφους, τα ποσά, το μέγεθος και τη διανομή της τέφρας και του νερού στο σύννεφο. και η αντίθεση θερμοκρασίας μεταξύ του νέφους και της επιφάνειας του φόντου. η ποσότητα της ηφαιστειακής τέφρας μπορεί να εκτιμηθεί από δορυφορικά δεδομένα χρησιμοποιώντας ένα πολύπλοκο μοντέλο μεταφοράς ακτινοβολίας. Μια παρόμοια μέθοδος χρησιμοποιείται για την ανίχνευση και τη μέτρηση των σύννεφων διοξειδίου του θείου είτε από παθητική απαέρωση, χρησιμοποιώντας ASTER, είτε από εκρηκτικές εκρήξεις χρησιμοποιώντας μήκη κύματος στα 7.3 ή 8.6 microns, όπου υπάρχει απορρόφηση λόγω διοξειδίου του θείου.



Εικόνα 5: Παρακολούθηση ηφαιστειών με δορυφόρους ραντάρ. (πηγή:http://www.esa.int/var/esa/storage/images/esa_multimedia/videos/2014/07/monitoring_volcanoes_with_radar_satellites/14614254-1-eng-GB/Monitoring_volcanoes_with_radar_satellites_video_production_full.png)

Η ανάλυση και παρακολούθηση δορυφορικών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο απαιτεί γρήγορη και αξιόπιστη πρόσβαση σε μεγάλα ποσά δορυφορικών δεδομένων. Χρήσιμα σύνολα δεδομένων περιλαμβάνουν αισθητήρες AVHRR και GOES σε μετεωρολογικούς δορυφόρους που λειτουργούν από την NOAA και MODIS σε δορυφόρους έρευνας που λειτουργούν από τη NASA. Η άμεση λήψη δορυφορικών σημάτων είναι η πιο αξιόπιστη, αλλά και η πιο ακριβή μέθοδος απόκτησης δεδομένων. Ο δορυφορικός σταθμός λήψης κοστίζει μεταξύ 50.000 και 150.000 δολαρίων. Για κάθε ροή δεδομένων απαιτείται ξεχωριστό πιάτο λήψης και σχετικό υλικό υπολογιστή, το οποίο αυξάνει το κόστος κατά \$ 25.000 έως \$ 50.000 ανά πιάτο. Το κόστος εγκατάστασης ποικίλλει ανάλογα με τις ανάγκες υποδομής και τα στοιχεία ενεργητικού ενός συγκεκριμένου ιστότοπου και μπορεί να κυμανθεί από \$ 5.000 έως \$ 15.000. Ένας ειδικός διευθυντής σταθμών χρησιμοποιεί τα συστήματα και αρχειοθετεί τα δεδομένα. Τα δορυφορικά

δεδομένα μπορούν επίσης να αποκτηθούν στο διαδίκτυο από κυβερνητικές υπηρεσίες και πανεπιστήμια με κόστος περίπου 10.000 έως 20.000 δολαρίων ετησίως.

2.3.2. Ανάπτυξη τεχνικών παρακολούθησης ηφαιστειών

Οι τεχνικές παρακολούθησης ηφαιστειών εξελίσσονται ταχύτατα ως συνέπεια της τεχνολογικής καινοτομίας και της συνεχώς αυξανόμενης κατανόησης των διαδικασιών που προκαλούν εκρήξεις. Σε αυτό το σημείο θα περιγράψουμε τρία παραδείγματα νέων μεθόδων απομακρυσμένης παρακολούθησης που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση ενεργών ηφαιστειών. Το πρώτο χρησιμοποιεί μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAVs) για πρόσβαση σε επικίνδυνες περιοχές, το δεύτερο χρησιμοποιεί επαναλαμβανόμενες μετρήσεις της απόστασης μεταξύ δορυφόρου και εδάφους (InSAR) και η τρίτη αισθάνεται ηχητικά κύματα χαμηλής συχνότητας (infrasound) για την ανίχνευση εκρήξεων.

Όλες οι πιο παραδοσιακές μέθοδοι παρακολούθησης επίσης αλλάζουν. Για παράδειγμα, η ταχεία επέκταση των δορυφορικών επικοινωνιών μικρής αποτύπωσης και της τεχνολογίας Διαδικτύου προκαλεί επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο παρακολουθούνται τα ηφαίστεια. Σήμερα, τα σεισμικά, τα αέρια, οι παραμορφώσεις και ακόμη και οι οπτικές εικόνες παρακολουθούνται σε απομακρυσμένα ηφαίστεια, ορισμένα βρίσκονται χιλιάδες χιλιόμετρα από τους σταθμούς βάσης, χρησιμοποιώντας δορυφορικές και διαδικτυακές επικοινωνίες. Επιπλέον, τα νέα επιταχυνσιόμετρα χαμηλού κόστους σε στερεά κατάσταση, το GPS και τα ασύρματα συστήματα τοπικής εμβέλειας επιτρέπουν την ταχεία ανάπτυξη ελικοπτέρων μικρών αισθητήρων με επικοινωνία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, ακόμη και εντός των κρατήρων ενεργών ηφαιστειών.

Η παρακολούθηση των ηφαιστειακών αερίων μεταβάλλεται επίσης ταχέως και τώρα διατίθενται νέα όργανα, όπως τα φασματόμετρα υπερύθρων μετασχηματισμού Fourier (FTIR), τα οποία μπορούν να μετρήσουν εξ αποστάσεως τα είδη αερίου, όπως το χλώριο, τα οποία κατά το παρελθόν ήταν δυνατό να ανιχνευθούν χρησιμοποιώντας πιο επικίνδυνες απευθείας δειγματοληψίες από τις περιοχές εξαερισμού. αυτά τα όργανα παρέχουν μια καλύτερη κατανόηση των περιεχομένων αερίων και της δυνητικής εκρηκτικότητας των ηφαιστειών.

Μέθοδος 1: Μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV)

Η ανάπτυξη αυτόνομων UAV επέτρεψε στους επιστήμονες να διερευνήσουν ανιχνεύσιμες ανωμαλίες σε χώρους που είναι δύσκολο να φτάσουν ή επικίνδυνες για την πρόσβαση. Η παρακολούθηση ηφαιστειών υπόσχεται να επωφεληθεί από τα UAV ανάπτυξης. Στα τέλη Σεπτεμβρίου του 2004, το Mount St. Helens ξεκίνησε την πρώτη του έκρηξη από το 1986 και για πρώτη φορά οι UAV στέλνονταν στον κρατήρα ενός ηφαιστείου που ξέσπασε. Αυτό το πείραμα κατέδειξε ότι μικρά αεροσκάφη (2,45 m) και μη δαπανηρά μη επανδρωμένα αεροσκάφη μπορούν να κατευθυνθούν με ακρίβεια λιγότερο από ένα χιλιόμετρο πάνω από ένα ενεργό ηφαιστειακό άνοιγμα και να παραμείνουν σε σταθμό για παρατεταμένες περιόδους χρησιμοποιώντας προ-προγραμματισμένες διαδρομές και πτήση σταθεροποιημένη από υπολογιστή. Τα UAV έδωσαν δεδομένα οπτικών και υπέρυθρων εικόνων σε πραγματικό χρόνο σε κινητό σταθμό βάσης 10 km από τον κρατήρα. Αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την παρακολούθηση των ορατών και θερμικών μεταβολών στον ενεργό θόλο και εξαερισμό της λάβας, όπως η ανάπτυξη και η κατάρρευση του νέου θόλου λάβα και η έκταση και η ανάπτυξη

ζεστών περιοχών. Τα UAV παρέχουν επίσης πλεονεκτήματα για χρήση σε ευαίσθητες και επικίνδυνες περιοχές. Τα επίπεδα θορύβου είναι συνήθως χαμηλότερα από τα επανδρωμένα αεροσκάφη σε υψόμετρα άνω των χιλίων ποδών, τα μικρά UAV που χρησιμοποιούνται στο Mount St. Helens συνήθως δεν ακούγονται από τον θόρυβο του ανέμου. Δεδομένου ότι δεν απαιτείται πιλότος και χρησιμοποιούνται λίγα καύσιμα (υπάρχουν πολλές επιλογές καυσίμων - αλκοόλ, βενζίνη ή βαρέα καύσιμα), οι χαμηλότεροι κίνδυνοι, το κόστος και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους παρακολούθησης.

Τα UAV με διαφορετικό ωφέλιμο φορτίο και αεροναυτικές ικανότητες είναι τώρα διαθέσιμα ή βρίσκονται υπό ανάπτυξη για χρήση από τον πολίτη και την κυβέρνηση. Αυτά περιλαμβάνουν τις διαμορφώσεις σταθερών πτερυγίων και ρότορα και μια σειρά τύπων και μεγεθών των σταθμών παραγωγής ενέργειας, τα ωφέλιμα φορτία και τις ικανότητες εύρους / χρόνου πτήσης. Λόγω του χαμηλού κόστους, της τρέχουσας διαθεσιμότητας και της δυνατότητας εκτόξευσης από μικρές και απομακρυσμένες τοποθεσίες, οι μικρότεροι τύποι UAV με σταθερή πτέρυγα και ρότορα προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες για διακριτική παρακολούθηση ηφαιστείου.



Εικόνα 6 : Μη επανδρωμένο εναέριο όχημα τοποθετημένο στον εκτοξευτήρα πεπιεσμένου αέρα στον χώρο στάθμευσης στο παρατηρητήριο Johnson Ridge στο Mount St. Helens, όπου ξεκίνησε και ανακτήθηκε. (πηγή: https://www.nps.gov/articles/images/Figure_11_1_2.jpg?maxwidth=650&autorotate=false)

Η χρήση των UAV για παρακολούθηση ηφαιστείου περιορίζεται σήμερα από τη διαθεσιμότητα μικρών ελαφρών αισθητήρων. Μόνο οπτικές και μη βαθμονομημένες υπέρυθρες κάμερες δοκιμάστηκαν στο Mount St. Helens, αν και αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν αρκετοί νέοι μικροσκοπικοί αισθητήρες για τη χρήση του UAV. Για παράδειγμα, οι τελευταίες γενιές φασματομέτρων ελαφρού βάρους διοξειδίου του θείου (SO₂) είναι εύκολα προσαρμόσιμες στη χρήση UAV και θα παράσχουν μια εναλλακτική μέθοδο για την παρακολούθηση των ηφαιστειακών αερίων. Μια άλλη εφαρμογή εκτός του ραφίου είναι η χρήση ψηφιακής

φωτογραφίας υψηλής ανάλυσης και στερεοφωνικής απεικόνισης για την τεκμηρίωση, την παρακολούθηση και τη μέτρηση αλλαγών, όπως τα χαρακτηριστικά των επικίνδυνων περιοχών εξαερισμού και οι εκτάσεις των ρευμάτων λάβας και άλλων εκρηκτικών προϊόντων. Μία από τις υποσχέσεις που προσφέρει η παρακολούθηση ηφαιστείου βασισμένη σε UAV είναι η παροχή παρατηρήσεων κατά τη διάρκεια κακοκαιρίας. Ωστόσο, αυτή είναι επίσης μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις. Επί του παρόντος, η διαθέσιμη παρακολούθηση GPS και η αυτόνομη πτήση επιτρέπουν τη λειτουργία αεροσκαφών UAV σε θολό καιρό, αν και η λειτουργία σε συνθήκες παγοποίησης μπορεί να είναι προβληματική. Μια μεγαλύτερη τεχνική πρόκληση είναι η ανάπτυξη αισθητήρων που μπορούν να δουν μέσα από σύννεφα. Οι ερευνητές δοκιμάζουν επί του παρόντος ένα ελαφρύ σύστημα ραντάρ βασισμένο σε UAV, το οποίο προσφέρει υπόσχεση για παρατηρήσεις σε κακές καιρικές συνθήκες. Μέχρι σήμερα, οι περισσότερες μελέτες και δοκιμές UAV πραγματοποιήθηκαν στον στρατιωτικό εναέριο χώρο, όπου η πολιτική πτήση απαγορεύεται ή παρακολουθείται στενά. Μια βασική ανησυχία σχετικά με τη λειτουργία UAV στον πολιτικό εναέριο χώρο παρέχει διαχωρισμό μεταξύ του UAV και των εμπορικών και ιδιωτικών αεροσκαφών που λειτουργούν στην ίδια περιοχή.

Μέθοδος 2: Συμβατικό ραδιοεντοπιστικό σύνθετο άνοιγμα (InSAR)

Το ιντερφερόμετρο ραντάρ συνθετικής διάτμησης (InSAR), που αναπτύχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1990, είναι η πιο πρόσφατη πρόοδος στην ανίχνευση της παραμόρφωσης της επιφάνειας της Γης. Το InSAR χρησιμοποιεί δύο δορυφορικές εικόνες ραντάρ της ίδιας περιοχής στο έδαφος που αποκτήθηκαν από το ίδιο σημείο στο διάστημα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Οι μετατοπίσεις επιφανειών είναι τόσο μικρές όσο ένα εκατοστό και μπορούν να ταυτοποιηθούν σε ένα μόνο συμβολισμό. Όταν συνδυαστούν πολλαπλά *interferograms*, μπορούν να αναγνωριστούν μετατοπίσεις τόσο μικρές όσο και λίγα χιλιοστά.

Το InSAR έχει δύο βασικά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων μεθόδων παρακολούθησης. Κατ' αρχάς, το InSAR παρέχει υψηλή χωρική ανάλυση κατά μήκος διαδρόμων πλάτους 100 χιλιομέτρων και χιλιάδων χιλιομέτρων. Δεύτερον, η μέθοδος δεν χρειάζεται εξοπλισμό στο έδαφος. Έτσι, απομακρυσμένα ή απομονωμένα ηφαίστεια μπορούν να παρακολουθούνται χρησιμοποιώντας το InSAR χωρίς να επισκέπτονται την περιοχή του πεδίου. Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά συνδυάζονται για να καταστήσουν το InSAR ιδιαίτερα χρήσιμο για την ανίχνευση των παραμορφώσεων στα ηφαίστεια που δεν παρακολουθούνται καλά. Το InSAR, ωστόσο, έχει κάποια σημαντικά μειονεκτήματα. Στην παρούσα φάση ανάπτυξης, δεν είναι ένα επιχειρησιακό εργαλείο για την παρακολούθηση των περισσότερων ηφαιστείων που παρουσιάζουν σημαντικές αναταραχές, που απειλούν να εκραγούν ή τελικά εκρήγνυνται. Οι σημερινοί περιορισμοί στη δορυφορική διαθεσιμότητα και στις προτεραιότητες των εργασιών δημιουργούν μεγάλα χρονικά διαστήματα μεταξύ των επαναλαμβανόμενων εξαγορών, οι οποίες περιορίζουν τον τρέχοντα ρόλο της InSAR στη στήριξη του μακροπρόθεσμου χαρακτηρισμού της παραμόρφωσης, παρόμοια με τις μετρήσεις της μεθόδου έρευνας όπως η στάθμευση ή το GPS. Μια εικόνα InSAR μπορεί να ληφθεί μόνο όταν ένας δορυφόρος είναι γενικά από πάνω, συνήθως κατά μέσο όρο μερικές φορές το μήνα.

Οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις, συμπεριλαμβανομένων των καταιγίδων ή των κυττάρων με υψηλές συγκεντρώσεις υδρατμών, μπορούν επίσης να εισάγουν σφάλματα στις μετρήσεις InSAR. Τέτοιες συνθήκες δεν οδηγούν σε ασυνέπεια, αλλά μάλλον εισάγουν προκατειλημμένα σήματα στα δεδομένα που μπορεί να ερμηνευθούν εσφαλμένα ως παραμόρφωση. Επομένως, είναι σημαντικό να επιβεβαιώσουμε τα αποτελέσματα οποιοδήποτε μεμονωμένου

συμβολισμού με άλλα δεδομένα, συμπεριλαμβανομένων μετρήσεων επίγειας παραμόρφωσης ή άλλων χρονικά ανεξάρτητων αλληλεπιδράσεων.

Η μετατροπή των μετρήσεων InSAR σε ξεχωριστές οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις, παρόμοιες με εκείνες που παρέχονται από το GPS, απαιτεί τουλάχιστον δύο συμβολισμούς που καλύπτουν την ίδια χρονική περίοδο και απεικονίζουν τη γη από διαφορετικά σημεία του χώρου. Τέτοιες συνθήκες είναι δύσκολο να ικανοποιηθούν. επομένως, είναι καλύτερο να χρησιμοποιήσετε το InSAR σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους που παρακολουθούν απερίφραστα οριζόντια, κατακόρυφα ή και τα δύο συστατικά της παραμόρφωσης επιφάνειας.

Ενώ το InSAR μπορεί να είναι φθηνότερο από άλλες μεθόδους παρακολούθησης για απομακρυσμένα ηφαίστεια, η απόκτηση και ανάλυση δεδομένων μπορεί να είναι αρκετά δαπανηρή. Η επεξεργασία δεδομένων απαιτεί εξειδικευμένο λογισμικό που μπορεί να περιλαμβάνει ελεύθερο λογισμικό, το οποίο δεν συνοδεύεται από τεχνική υποστήριξη και ως εκ τούτου απαιτεί εμπειρογνώμονα ήδη εκπαιδευμένο στη χρήση του ή τεχνικά υποστηριζόμενο λογισμικό. Από το 2008, μόνο οι канаδικές, ευρωπαϊκές και ιαπωνικές διαστημικές υπηρεσίες χρησιμοποιούν δορυφόρους με δυνατότητες InSAR, επομένως όλα τα δεδομένα πρέπει να αγοράζονται από τους οργανισμούς αυτούς.



Εικόνα 7: Αυτή η περιοχή είναι ~2 χλμ. Βορειο-βορειοανατολικά του εξαερισμού, αλλά δεν καταγράφηκε έκρηξη που σχετίζεται με υποηχητικά σήματα από τις δύο εκρήξεις που συνέβησαν μετά την εγκατάστασή του. Το μικρόφωνο βρίσκεται μέσα στο μεταλλικό κιβώτιο. Ο εύκαμπτος σωλήνας που εκτοξεύεται από το κιβώτιο βοηθά στη μείωση (αλλά όχι στην εξάλειψη) του θορύβου. (πηγή: https://www.nps.gov/articles/images/Figure_13_1_8.jpg?maxwidth=650&autorotate=fals)

Οι μεταβολές των επιφανειακών χαρακτηριστικών μεταξύ των δορυφορικών διαδρομών που προκαλούνται από τον πάγο, το χιόνι και τη βλάστηση προκαλούν σπάσιμο του σήματος

ραντάρ σε ορισμένες περιοχές, αποτρέποντας την ανάκτηση μέτρησης παραμόρφωσης. Αυτή η "ασυνέπεια" είναι ένα σημαντικό πρόβλημα για τα ηφαίστεια που καλύπτονται από πάγο και χιόνι ή με βλάστηση, οπότε το InSAR δεν είναι επί του παρόντος αξιόπιστο εργαλείο παρακολούθησης σε τέτοιες περιοχές. Οι μελλοντικές δορυφορικές αποστολές και οι νέες τεχνικές επεξεργασίας σήματος ενδέχεται να μειώσουν αυτό το πρόβλημα κατά την επόμενη δεκαετία.

Μέθοδος 3: Παρακολούθηση ηφαιστειακών εκρήξεων με υπόηχους

Πολλά φυσικά φαινόμενα και ανθρώπινες δραστηριότητες δημιουργούν ηχητικά κύματα στην ατμόσφαιρα σε ακουστικές συχνότητες, γενικά μεταξύ 1-25 Hz. Ονομάζεται υπόηχος, που παράγεται από πηγές όπως ο άνεμος, τα κύματα των ωκεανών, η βαριά βιομηχανία, η θραύση βράχων ή λίθων, τα αεροσκάφη, οι μετεωρίτες και οι εκρήξεις. Τα υπέρυθρα κύματα μπορούν να ταξιδεύουν σε μεγάλες αποστάσεις από την ατμόσφαιρα και επειδή η ατμόσφαιρα έχει σχετικά απλή δομή σε σύγκριση με την ετερογενή Γη, τα υπερενεργικά κύματα είναι πολύ λιγότερο παραμορφωμένα από το ταξίδι τους μέσω της ατμόσφαιρας από ότι τα σεισμικά κύματα από το ταξίδι τους στη Γη. Έτσι, τα φωτοσύνθετα σήματα που δημιουργούνται από μια ηφαιστειακή πηγή, όπως μια έκρηξη, μπορούν να είναι πολύ απλούστερα και επομένως πιο εύκολα ερμηνεύονται, όταν λαμβάνονται από έναν υπερηχητικό αισθητήρα (όπως ένα μικρόφωνο ή μικρόβαρχο) από τα σεισμικά κύματα που παράγονται από την ίδια έκρηξη όταν λαμβάνονται σειсмоγράφος. Συγκεκριμένα, οι εκρήξεις παράγουν πολύ χαρακτηριστικά φωτοσυνθετικά σήματα και οι φωτοσύνθετοι αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι γύρω από τα ενεργά ηφαίστεια έχουν αποδειχθεί χρήσιμοι για τη διάκριση μεταξύ εκρήξεων και άλλων σεισμικών πηγών, όπως οι βράχοι, οι χιονοστιβάδες και οι ανατολικές ριπές.

Εκρήξεις συχνά καταγράφονται σε σειсмоγενείς σταθμούς. Ωστόσο, οι σειсмоγράφοι μπορούν να κατακλυσθούν από σεισμικά κύματα από τους τοπικούς σειμούς, ώστε οποιαδήποτε παραμόρφωση του εδάφους που παράγεται από εκρήξεις μπορεί να είναι εντελώς κρυμμένη. Έτσι, ένα άλλο βασικό όφελος της υπερφυσικής παρακολούθησης στα ηφαίστεια είναι ότι οι εκρήξεις θα εξακολουθούν να εμφανίζονται σε υπερηχητικούς αισθητήρες όταν έντονη σεισμική δραστηριότητα έχει κάνει σειсмоγενείς σταθμούς όλοι αλλά άχρηστοι για ανίχνευση έκρηξης.

Κεφάλαιο 3.

Μπορεί η Γη να είναι μοναδική από πολλές απόψεις αλλά όπως έχουμε τονίσει και παραπάνω ένα από τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της που είναι κοινά σε όλο το ηλιακό μας σύστημα είναι τα ηφαίστεια. Οι πλανήτες και οι δορυφόροι στο ηλιακό μας σύστημα είναι εξαιρετικά ενεργοί ηφαιστειακά από τις απαρχές της δημιουργίας του ως και σήμερα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ότι στην Αφροδίτη έχουν εντοπιστεί περί τα 1.600 ηφαίστεια, ενώ εκτιμάται ότι υπάρχουν ακόμη πολλές χιλιάδες. Στον Ερμή υπάρχουν επίσης πολλά ηφαίστεια, ορισμένα εκ των οποίων μάλιστα είναι γιγαντιαία και ενεργά. Το μεγαλύτερο ηφαίστειο του ηλιακού συστήματος βρίσκεται στον Άρη και ονομάστηκε, φυσικά, Ολυμπος. Το ύψος του ξεπερνά τα 22 χιλιόμετρα και η διάμετρός του τα 1500 χλμ.! Στον Ερμή υπάρχει ένα ηφαίστειο ύψους 8 χλμ. που πιθανώς να είναι και το δεύτερο μεγαλύτερο στο ηλιακό μας σύστημα.

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε σε κάποια από τα πιο γνωστά ηφαίστεια και θα αναλύσουμε την ιστορική τους δραστηριότητα καθώς επίσης και τις επιπτώσεις που επιφέρουν στην ανθρώπινη ζωή και καθημερινότητα.

3.1. Το ηφαίστειο της Σαντορίνης

Η Σαντορίνη, Θήρα ή Στρογγύλη (παλαιότερη ονομασία) είναι νησί που βρίσκεται στο νότιο Αιγαίο πέλαγος, στο νησιωτικό σύμπλεγμα των Κυκλάδων, νότια της Ίου και δυτικά από την Ανάφη. Απέχει από τον Πειραιά 128 ναυτικά μίλια και 63 ναυτικά μίλια από την Κρήτη. Ο Αθηνιός, το μεγαλύτερο λιμάνι του νησιού, έχει δημιουργηθεί στον ομώνυμο όρμο. Η έκταση της είναι 76,19 τετραγωνικά χιλιόμετρα. Σήμερα η Σαντορίνη είναι ένα από τα διασημότερα τουριστικά κέντρα του κόσμου.

Είναι γνωστή για το ηφαιστειό της όπου η τελευταία ηφαιστειακή δραστηριότητα πραγματοποιήθηκε το έτος 1950. Τμήματα του ηφαιστείου της Σαντορίνης είναι τα εξής : Η Νέα Καμένη (1707-1711 μ.Χ.), η Παλαιά Καμένη (46-47 μ.Χ.), το υποθαλάσσιο ηφαίστειο Κολούμπο (ενεργό) (1650 μ.Χ.), τα Χριστιανά νησιά. Η Σαντορίνη ανήκει στο ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου και χαρακτηρίζεται ενεργό ηφαίστειο μαζί με τα Μέθανα, την Μήλο και την Νίσυρο. Η Σαντορίνη καθώς και τα νησιά Θηρασία και Ασπρονήσι είναι απομεινάρια του ηφαιστειογενούς νησιού Στρογγύλη. Η Στρογγύλη ήταν ένας ηφαιστειακός κώνος. Το κεντρικό τμήμα της ανατινάχθηκε μαζί με τον κρατήρα του ηφαιστείου από τη Μινωική έκρηξη που έγινε το 1613 π.Χ. και είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αυτού που σήμερα ονομάζουμε καλδέρα της Σαντορίνης και την καταστροφή του προϊστορικού πολιτισμού του νησιού. Στο θαλάσσιο χάσμα που σχηματίστηκε μεταξύ Θήρας και Θηρασίας, που έχει βάθος 1.500 μέτρων, κατά καιρούς βγήκαν στην επιφάνεια ηφαιστειακοί κώνοι που σχημάτισαν τα εξής νησιά: την Παλαιά, τη Μικρή και τη Νέα Καμένη, την Καμένη Γεωργίου του Α΄, την Καμένη του Φουκέ, την Αφρόσσα και τη Δάφνη. Όλα αυτά τα νησιά μεγάλωναν σιγά-σιγά και ενώθηκαν, εκτός από την Παλαιά Καμένη.

Σύμφωνα με τις αρχαιολογικές ανασκαφές, στο Ακρωτήριο αναπτύσσεται την 3η χιλιετία π.Χ. μια προϊστορική πόλη με πολύ σημαντικό λιμάνι. Μετά από περιόδους μεγάλης ανάπτυξης, ένας σεισμός στα τέλη του 17ου αι. π.Χ. την ισοπεδώνει. Η μεγάλη έκρηξη του ηφαιστείου της Ύστερης Εποχής του Χαλκού θάβει τον πολιτισμό του νησιού και το χωρίζει σε στα τρία: Το μεγάλο τμήμα με την καλντέρα, τη Νέα Καμένη και τη Θηρασιά. Στα τέλη του 13ου αι. π.Χ. το νησί κατοικείται ξανά από Φοίνικες, ενώ στους Περσικούς Πολέμους πήρε το μέρος της Αθηναϊκής Συμμαχίας, αλλά τελικά καταλήφθηκε από τους Σπαρτιάτες (8ος αι. π.Χ.) οι οποίοι και την ονόμασαν Θήρα προς τιμή του ηγεμόνα τους. Η Θήρα τον 7ο αιώνα π.Χ. αιώνα ιδρύει την μοναδική αποικία της στα παράλια της Βόρειας Αφρικής την "Κυρήνη". Τον 6ο αιώνα π.Χ. η Θήρα κόβει το δικό της νόμισμα και καθιερώνεται το έμβλημα των δύο δελφινιών. Κατά της διάρκεια των Πελοποννησιακών πολέμων η Θήρα παίρνει το μέρος των Σπαρτιατών. Ο Μέγας Αλέξανδρος και οι διάδοχοι του, κυρίως ο Πτολεμαίος, την χρησιμοποιούν ως βάση στις πολεμικές επιχειρήσεις. Το 726 μ.Χ. έγινε έκρηξη στη βορειοανατολική πλευρά της Παλαιάς Καμένης και εμφανίστηκε νέο νησί, το οποίο γρήγορα ενώθηκε με αυτήν. Η έκρηξη θεωρήθηκε ως δείγμα θεϊκής οργής κατά του Αυτοκράτορα του Βυζαντίου Λέοντος Γ΄ του Ισαύρου, ο οποίος ήταν εικονομάχος. Κατά την περίοδο της Τουρκοκρατίας, η Σαντορίνη ανέπτυξε τη γεωργία και τη ναυτιλία της και δημιουργήθηκε η κοινωνική τάξη των καραβοκύρηδων. Τον 18ο αιώνα ο πληθυσμός έφτασε τους 9.000 κατοίκους. Τις παραμονές της επανάστασης του 1821 τα Σαντορινιά ιστιοφόρα πλοία αριθμούσαν αρκετές δεκάδες, αφού το νησί είχε τον μεγαλύτερο στόλο στο Αιγαίο, μετά την Υδρα και τα Ψαρά.

3.1.1. Η μετέπειτα οικονομική ακμή και οι εκρήξεις της Σαντορίνης

Η προσάρτηση της Σαντορίνης στο νεοσύστατο ελληνικό κράτος το 1830 είναι για το νησί νέο ξεκίνημα μεγάλης εμπορικής και ναυτιλιακής ακμής, ενώ η τοπική παραγωγή στηριζόμενη στη ντομάτα, το κρασί και τα υφαντά απογειώνεται. Το 1852, η Σαντορίνη, με 7.222 κατοίκους είναι το δεύτερο σημαντικότερο εμπορικό κέντρο μετά της Σύρο στις Κυκλάδες, με συναλλαγές κυρίως με τη Ρωσία, η οποία είναι η κύρια χώρα εισαγωγής σαντορινιού κρασιού.

Κατά τον 19ο αιώνα έως τις αρχές του 20ου, η ιστιοφόρος ναυτιλία ήταν ιδιαίτερα ανεπτυγμένη και σημαντικός αριθμός Σαντορινιών πλοίων έπλεαν στο Αιγαίο μεταφέροντας αγαθά. Η οικονομική ανεξαρτησία που απέκτησαν μέσω αυτών των δραστηριοτήτων είναι σήμερα ορατή στα παλιά μεγάλα σπίτια που σώζονται ακόμη στα χωριά της Σαντορίνης.

Το ηφαιστειο της Σαντορίνης άρχισε να εκρήγνυται τις 26 Ιανουαρίου 1866. Η έκρηξη περιλάμβανε την έκχυση λάβας και τη δημιουργία δόμων, ενώ ένας σεισμός 6,1 ρίχτερ έλαβε χώρα τις 30 Ιανουαρίου και προκάλεσε ζημιές σε 50 σπίτια και δύο εκκλησίες, ενώ η έκρηξη τελείωσε πολλούς μήνες μετά, στις 15 Οκτωβρίου 1870. Η έκρηξη έλαβε χώρα στο κρατήρα του Αγ. Γεωργίου και της Αφρόεσσας, δημιούργησε τις νησίδες του Μαΐου που σήμερα έχουν καταβυθιστεί και τριπλασίασε την έκταση της παλαιάς Καμένης.

Η πιο πρόσφατη έκρηξη του ηφαιστείου έλαβε χώρα από τις 10 Ιανουαρίου 1950 μέχρι 2 Φεβρουαρίου του ίδιου χρόνου και δημιούργησε το δόμο του Λιάστικα. Αυτά τα ηφαιστειακά πετρώματα είναι τα πιο πρόσφατα που δημιουργήθηκαν στην Ελλάδα. Κατά το Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, η Σαντορίνη καταλήφθηκε όπως και όλη η Ελλάδα πρώτα από τις Ιταλικές δυνάμεις το 1941 και έπειτα, το 1943, από τις Γερμανικές δυνάμεις κατοχής.

Αυτό, όμως, που προκάλεσε την μεγαλύτερη καταστροφή στο νησί είναι ο σεισμός του 1956: Στις 9 Ιουλίου 1956 σημειώθηκε κοντά στην Αμοργό σεισμός μεγέθους 7,8 ρίχτερ, ο οποίος ήταν ο ισχυρότερος που έλαβε χώρα στην Ευρώπη κατά τον 20ο αιώνα, ενώ ακολουθεί

μετασεισμός 6,9 ρίχτερ με επακόλουθο εκτεταμένες καταστροφές σε Σαντορίνη, Αστυπάλαια, Ανάφη, Κάλυμνο, Λέρο, Αμοργό και Πάτμο, 53 θανάτους, καθώς και ένα από τα μεγαλύτερα τσουνάμι στο Αιγαίο, με ύψος μέχρι 25 μέτρα. Μετά αυτό το γεγονός μεγάλο μέρος του πληθυσμού έφυγε από το νησί.

Τη δεκαετία του 1960 άρχισε να αναπτύσσεται ο τουρισμός στην Σαντορίνη, φτάνοντας στο αποκορύφωμα του στα μέσα της δεκαετίας του 1980. Μάλιστα, εκείνη την εποχή είχαν γυριστεί και πολλές ξένες ταινίες αναδεικνύοντας τα κάλλη της Καλλίστης. Από τότε ο τουρισμός στο νησί γνωρίζει συνεχή ανάπτυξη, έχοντας καταστήσει πλέον την Σαντορίνη σε ένα από τους δημοφιλέστερους τουριστικούς προορισμούς σε διεθνές επίπεδο.

Είναι χαρακτηριστικό ότι ακόμη και τους χειμερινούς μήνες οι επισκέψεις τουριστών στο νησί δεν σταματούν, ιδιαίτερα από χώρες της Ασίας, οι οποίοι την επιλέγουν κατά μεγάλο ποσοστό για να τελέσουν το γάμο τους στο πιο ρομαντικό, για πολλούς, μέρος του πλανήτη.



Εικόνα 8: Αεροφωτογραφία του ηφαιστείου της Σαντορίνης (πηγή:[https:// www.iefimerida.gr/sites/ default /files/ archive-files/volcano_iss.jpg](https://www.iefimerida.gr/sites/default/files/archive-files/volcano_iss.jpg))

Ο παγκόσμιος χάρτης ίσως να ήταν διαφορετικός σήμερα αν το ηφαίστειο της Σαντορίνης δεν είχε εκραγεί πριν από 3.500 χρόνια, προκαλώντας μία έκρηξη που οι γεωλόγοι θεωρούν ως την ισχυρότερη που συνέβη ποτέ στα χρονικά. Το ηφαίστειο της Θήρας δεν δημιούργησε απλά μία τεράστια τρύπα στο νησί της Σαντορίνης, αλλά άλλαξε ριζικά το ρου της ιστορίας της αρχαίας Μεσογείου, όπως ένα τραίνο αλλάζει ράγιες και κατευθύνεται προς μία εντελώς νέα κατεύθυνση. Ο μινωικός πολιτισμός, ο κυρίαρχος πολιτισμός της Μεσογείου εκείνη την εποχή, κατέρρευσε ως αποτέλεσμα της έκρηξης αυτής, σύμφωνα με τους ιστορικούς, αλλάζοντας οριστικά το πολιτικό τοπίο του αρχαίου

κόσμου. Οι περιβαλλοντικές αλλαγές που συντελέστηκαν έγιναν αισθητές σε ολόκληρη την υφήλιο, φτάνοντας ακόμα και στην Κίνα και ενδεχομένως στη Βόρεια Αμερική και την Ανταρκτική.

Με την επική, όμως, καταστροφή συνδέονται και ο θρύλος της Ατλαντίδας και η ιστορία των Βιβλικών Πληγών με την επακόλουθη έξοδο από την Αίγυπτο. Ιστορικοί και αρχαιολόγοι εμφανίζονται προβληματισμένοι ως προς την ημερομηνία που εξεράγη το ηφαίστειο της Θήρας, με πιθανή χρονολογία κάπου μεταξύ 1645 και 1500 π.Χ. Από διάφορες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στις στάχτες που απέμειναν στο βυθό της θάλασσας, βρέθηκε πως όταν εξεράγη το ηφαίστειο, η έκρηξη που προκλήθηκε ήταν η ισχυρότερη που συνέβη ποτέ στα χρονικά της ανθρωπότητας.

Δεν υπάρχει καμία μαρτυρία για το τι πραγματικά συνέβη εκείνη την ημέρα, αλλά οι επιστήμονες είναι σε θέση να κάνουν σύγκριση από τις αναλυτικές καταγραφές της έκρηξης του διάσημου ηφαιστείου Κρακατόα, στην Ινδονησία, το 1883. Η ισχυρότατη έκρηξη του Κρακατόα σκότωσε πάνω από 40.000 ανθρώπους μέσα σε διάστημα μόλις λίγων ωρών, προκάλεσε γιγάντια τσουνάμι ύψους 12 μέτρων, εκτίναξε λάβα σε διάφορα μέρη της Ασίας, προκάλεσε πτώση της θερμοκρασίας σε ολόκληρη την υφήλιο και δημιούργησε περίεργα χρωματιστά ηλιοβασιλέματα για 3 χρόνια. Μαρτυρίες λένε πως η έκρηξη ακούστηκε σε απόσταση 3.000 μιλίων. Η έκρηξη του ηφαιστείου της Θήρας ήταν τέσσερις με πέντε φορές ισχυρότερη από αυτή του Κρακατόα σύμφωνα με τους γεωλόγους, ενώ η ενέργεια της αντιστοιχεί με την ταυτόχρονη έκρηξη εκατοντάδων ατομικών βομβών σε κλάσματα του δευτερολέπτου.

Το γεγονός ότι δεν βρέθηκε κανένα πολύτιμο στοιχείο που να βοηθάει στη μελέτη του ηφαιστείου, όπως μέταλλα ή ακόμα και ανθρώπινα απομεινάρια, υποδηλώνει πως οι κάτοικοι της Σαντορίνης είχαν προβλέψει την έκρηξη και είχαν εκκενώσει το νησί. Δυστυχώς, όμως, ο μινωικός πολιτισμός δεν είχε την ίδια τύχη. Με βάση του το γειτονικό νησί της Κρήτης, ο ισχυρός τότε μινωικός πολιτισμός παρήκμασε ξαφνικά μετά την έκρηξη του ηφαιστείου της Θήρας. Σύμφωνα με τους ιστορικούς, τα τσουνάμι που προκλήθηκαν καταπόντισαν τον ναυτικό του στόλο και τα παράκτια χωριά. Η πτώση της θερμοκρασίας που προκλήθηκε εξαιτίας των τεράστιων ποσοτήτων διοξειδίου του θείου που απελευθερώθηκαν στην ατμόσφαιρα, οδήγησε σε ψύχος για πολλά χρόνια και βροχές κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, καταστρέφοντας τις καλλιέργειες. Ο θανάσιμος συνδυασμός έπληξε κάθε ισχυρό Μινωικό οχυρό σε διάστημα μικρότερο των 50 χρόνων. Σε ελάχιστο χρονικό διάστημα, η ειρηνική και αποτελεσματική κυριαρχία τους έδωσε τη θέση της στο εμπόλεμο σύστημα πόλης-κράτους της Αρχαίας Ελλάδας, που κυριάρχησε πλέον στη Μεσόγειο, ενώ το Αιγαίο απετέλεσε θεμέλιο λίθο για την ιστορία της Ευρώπης. Το ηφαίστειο της Θήρας δεν άλλαξε απλά την πολιτιστική ιστορία της Ευρώπης αλλά έδωσε το έναυσμα και σε πολλούς τυχοδιώκτες και επίδοξους κυνηγούς θησαυρών να κυνηγήσουν την τύχη τους. Όταν ο Έλληνας φιλόσοφος Πλάτωνας περιέγραφε τη χαμένη πόλη της Ατλαντίδας σχεδόν μία χιλιετία μετά την έκρηξη του ηφαιστείου, ίσως είχε ως αναφορά τις λαογραφικές παραδόσεις της Θήρας που πέρασαν από γενιά σε γενιά και διογκώθηκαν με το πέρασμα των χρόνων, όπως συμβαίνει και με το χαλασμένο τηλέφωνο. Η έκρηξη συνδέθηκε, όμως, και με τη Βιβλική ιστορία του Μωυσή και την έξοδο από την Αίγυπτο. Οι επιπτώσεις από την έκρηξη του ηφαιστείου θα μπορούσαν να δικαιολογήσουν πολλές από τις Πληγές που περιγράφονται στην Παλαιά Διαθήκη, συμπεριλαμβανομένων των ημερών σκότους και της μόλυνσης των ποταμών.

3.1.2. Το ηφαίστειο της Σαντορίνης σήμερα

Σύμφωνα με επιστήμονες των πανεπιστημίων της Οξφόρδης και του Μπρίστολ οι οποίοι συνεργάζονται με το Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος του Πανεπιστημίου Αθηνών αλλά και το Εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαισίας του ΕΜΠ, το μάγμα κάτω από το ενεργό ηφαίστειο της Σαντορίνης φούσκωσε τόσο πολύ ανάμεσα στον Ιανουάριο του 2011 και τον Απρίλιο του 2012 ώστε να έχει πλέον όγκο έως και 15 φορές μεγαλύτερο από τον Ολυμπιακό Στάδιο του Λονδίνου. Μάλιστα, οι επιστήμονες θεωρούν ότι τέτοια αύξηση μάγματος έχει να συμβεί από το 1955, όταν συνέβη η τελευταία έκρηξη του ηφαίστειου της Σαντορίνης. Αξίζει δε να σημειωθεί ότι οι τρεις ερευνητές αναφέρουν πως η αύξηση του μαγματικού θαλάμου από την εισροή νέου υλικού οδήγησε σε ανύψωση της επιφάνειας του νησιού από 8 έως και 14 εκατοστά σε μόλις 15 μήνες. Οι υπολογισμοί αυτοί θεωρούνται αρκετά ακριβείς μιας και έγιναν με εικόνες από δορυφορικά ραντάρ του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA) και της Γερμανικής Υπηρεσίας Διαστήματος (DLR), καθώς και με μετρήσεις GPS από το έδαφος.

Το κεντρικό ερώτημα που απασχολεί τους επιστήμονες είναι πλέον το πότε θα εκραγεί ξανά το ηφαίστειο, του οποίου η έκρηξη το 1600 π.Χ. ήταν μια από τις μεγαλύτερες στην παγκόσμια ιστορία και οδήγησε σύμφωνα με τα στοιχεία στην καταστροφή του Μινωικού Πολιτισμού. Ωστόσο, τα νεότερα στοιχεία δεν είναι ικανά να απαντήσουν σε αυτό το κρίσιμο ερώτημα. Αξίζει πάντως να σημειωθεί ότι το ηφαίστειο της κοσμοπολίτικης Σαντορίνης ζωντάνεψε ξανά στις αρχές του 2011. Τότε, ήταν μικρο-σεισμοί που τράβηξαν την προσοχή των επιστημόνων από την Ελλάδα και το εξωτερικό. Μέχρι τότε, και για 25 χρόνια, στην γεμάτη από πολυτελή ξενοδοχεία και ιδιωτικές κατοικίες καλντέρα επικρατούσε ησυχία. Ωστόσο, οι σεισμοί ανησύχησαν τους επιστήμονες καθώς συνοδεύονταν και από άλλες ανησυχητικές ενδείξεις όπως οι αλλαγές στο χρώμα του νερού και η έκλυση αερίων με δυσάρεστη οσμή.

Τώρα, οι τρεις ερευνητές που δημοσίευσαν την εργασία του στο Nature Geoscience εκτιμούν ότι το νέο μάγμα που συσσωρεύτηκε κάτω από το ηφαίστειο της Σαντορίνης στη διάρκεια του προηγούμενου έτους και μέχρι τον Απρίλιο του 2012 ισοδυναμεί με περίπου 10 έως 20 έτη ανάπτυξης του ηφαιστείου. Επισημαίνουν όμως πως αυτό δεν σημαίνει ότι επίκειται κάποια έκρηξη, αντίθετα, όπως τονίζουν, η σεισμική δραστηριότητα έχει σαφώς υποχωρήσει κατά τους τελευταίους μήνες. Οι ίδιοι ερευνητές σημειώνουν ότι το ηφαίστειο της Σαντορίνης εμφανίζει δύο ειδών εκρήξεις στο πέρασμα του χρόνου. Αφενός συμβαίνουν συχνά μικρές εκρήξεις που εκλύουν λάβα και, αφετέρου έχουν καταγραφεί μεγάλες εκρήξεις που συμβαίνουν πολύ πιο σπάνια, ανά περίπου 10.000 έως 30.000 χρόνια. Και οι δύο τύποι εκρήξεων θεωρείται ότι «εκκολάπτονται» σε ένα ρηχό θάλαμο μάγματος, ο οποίος τροφοδοτείται σε συνεχή βάση από μικρές ποσότητες λιωμένων πετρωμάτων, οι οποίοι ανεβαίνουν από κάτω προς τα πάνω. Όμως, όπως αναφέρει η νέα μελέτη, γεωλογικές μελέτες δείχνουν ότι τουλάχιστον το 15% του υλικού που εκτινάχθηκε κατά την Μινωική έκρηξη του ηφαιστείου, έφθασε στον θάλαμο του μάγματος λιγότερο από 100 χρόνια πριν την έκρηξη, δηλαδή όχι σταδιακά και σε βάθος χρόνου, αλλά σε πολύ πιο σύντομο χρόνο.

Σύμφωνα με τους ερευνητές, είτε το ηφαίστειο της Σαντορίνης βρίσκεται στην πιο συνηθισμένη (αργή) φάση συσσώρευσης λάβας, είτε στην πιο σπάνια (και γρήγορη) εκρηκτική φάση του, ο ρηχός θάλαμος του μάγματος τροφοδοτείται περιστασιακά με ταχείας ροής ποσότητες μάγματος. Η χρονική διάρκεια αυτών των περιόδων τροφοδότησης του μάγματος είναι σύντομη σε σχέση με τις ενδιάμεσες περιόδους ηρεμίας, ενώ το πότε θα συμβούν αυτές οι περιστασιακές ανατροφοδοτήσεις, δηλαδή ο χρονισμός τους, εξαρτάται από την υπόγεια δυναμική που αναπτύσσεται στο ακόμα βαθύτερο τμήμα του μάγματος κάτω από τη Σαντορίνη.

Κατά τις πιο πρόσφατες εκρήξεις του ηφαιστείου της Σαντορίνης, στην επιφάνεια έχουν ανέλθει συνήθως δύο διαφορετικά είδη μάγματος, κατά κύριο λόγο δακίτης (λάβα πλούσια σε πυρίτιο) και δευτερευόντως ανδেসίτης (πιο καυτή λάβα με λιγότερο πυρίτιο). Προηγούμενες έρευνες έχουν δείξει ότι οι εκρήξεις εμφανίζονται να πυροδοτούνται από την άνοδο προς την επιφάνεια του ανδেসίτη, ο οποίος «αναμοχλεύει» τον πιο άφθονο δακίτη, δίνοντας έτσι το έναυσμα για την έκρηξη, πιθανώς μέσα σε διάστημα λίγων εβδομάδων.

3.2. Το ηφαίστειο της Νίσυρου

Η Νίσυρος είναι νησί του νότιου Αιγαίου και ένα από τα Δωδεκάνησα. Ανήκει στην ομάδα των αρχαίων Νοτίων Σποράδων, και βρίσκεται βορειοδυτικά της Ρόδου, ανάμεσα στην Κω, την Τήλο και την Αστυπάλαια. Η Νίσυρος είναι ένα ηφαίστειο που αποτελεί μέρος του ηφαιστειακού τόξου της νότιας Ελλάδας. Βρίσκεται στην άκρη του τόξου του Αιγαίου, μαζί με τη Καλδέρα της Κω και τη νήσο Γυαλί. Οι πρώτες υποθαλάσσιες εκρήξεις έλαβαν χώρα πριν 150.000 χρόνια, ενώ η κύρια δραστηριότητα συνέβη 40 με 10 χιλιάδες χρόνια πριν. Σήμερα λαμβάνουν χώρα υδροθερμικές εκρήξεις. Αποτελείται από ηφαιστειογενή βουνά, ενώ το κέντρο της νήσου καταλαμβάνει μία καλδέρα διαμέτρου 4 χλμ., από τον πυθμένα και μέχρι την επιφάνεια του οποίου απαντάται θείο. Μέσα στη καλδέρα βρίσκεται ο μεγαλύτερος υδροθερμικός κρατήρας στον κόσμο, ο Στέφανος, ο οποίος έχει διάμετρο 300 μέτρα, ενώ συνολικά η Νίσυρος έχει 5 κρατήρες. Η τελευταία έκρηξη του ηφαιστείου έλαβε χώρα το 1888 και σήμερα στο νησί υπάρχουν ενεργές φουμαρόλες. Λόγω της ηφαιστειακής δραστηριότητας στη Νίσυρο υπάρχουν θερμές πηγές με θερμοκρασία από 30 μέχρι 60 °C, εκ των οποίων οι κυριότερες είναι στα Λουτρά και τους Πάλους. Ένας ηφαιστειακός δόμος υψώνεται στα 700 περίπου μέτρα, δίνοντας και το μεγαλύτερο υψόμετρο της νήσου.

Η μορφολογία της έχει επηρεαστεί από το ηφαίστειο και το ηφαιστειογενές της έδαφος που είναι πολύ εύφορο και ευνοεί τη δένδροκομία και την πλούσια βλάστηση. Έχει έκταση 41 τετραγωνικά χιλιόμετρα, υψόμετρο 698 μέτρα και μήκος ακτών 30 χιλιόμετρα. Δυτικά και βόρεια της Νίσυρου βρίσκονται τέσσερις νησίδες, τα λεγόμενα Νισύρια. Η βάση του νησιού έχει σχηματισθεί από υαλοκλαστική ροή λάβας και λατυποπαγές πέτρωμα. Τα βράχια είναι καλυμμένα από πυροκλαστικές εναποθέσεις και ηφαιστειακούς θόλους. Δύο πιθανές εκρήξεις έγιναν αρκετές χιλιετίες, περίπου 25.000 χρόνια πριν.



Εικόνα 9: Χαρακτηριστικός κρατήρας στη Νίσηρο

(πηγή : <https://www.google.com/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Fwww.visitnisyros.gr>)

Είναι πιθανόν ότι το ηφαίστειο εξερράγη το 1422. Το 1872, έγινε μια έκρηξη συνοδευόμενη από σεισμούς, εκπυρσοκροτήσεις και κόκκινες και κίτρινες φλόγες. Τέφρα και άλλα υλικά εξερράγησαν και κάλυψαν το έδαφος του Ράμμου. Κατά την έκρηξη το 1873, δημιουργήθηκε ένας κρατήρας περίπου 6 με 7 μέτρων και τέφρα και λάσπη βγήκε έξω. Το έδαφος των περιοχών Λακκοί και Ράμμος είχε μεταμορφωθεί σε μια λίμνη με ζεστό αλμυρό νερό, αυτό που ξεχείλισε από τον κρατήρα. Η πιο πρόσφατη ισχυρή έκρηξη ήταν το 1888 που σχημάτισε έναν κυλινδρικό αγωγό από ηφαιστειακά στοιχεία με διάμετρο τουλάχιστον 25 μέτρων.

Ο μεγαλύτερος κρατήρας του ηφαιστείου, με το γενικό όνομα «Πολυβώτης», έχει διάμετρο 260μ και βάθος 30μ. Στην περιοχή βρίσκονται άλλοι πέντε νεότεροι κρατήρες, ο μεγαλύτερος των οποίων είναι ο «Στέφανος», με διάμετρο 30μ και βάθος 30μ. Επίσης, το ηφαίστειο περιβάλλει κοιλάδα (καλντέρα), με μήκος 2.400μ και πλάτος 950μ.

3.2.1. Η ζωή στη Νίσυρο υπό την παρουσία του ηφαιστείου

Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της Νισύρου που αποτελεί και πόλο έλξης τουριστών είναι ότι πρόκειται για ένα νησί ηφαίστειο και μάλιστα το νεότερο μεγάλο ενεργό ηφαίστειο του Αιγαίου, προσδίδοντας ένα πολυδιάστατο γεωλογικό ενδιαφέρον του χώρου για τον επισκέπτη. Είναι ένας μοναδικός γεώτοπος και ένα διατηρητέο μνημείο της φύσης. Σε αυτό θα πρέπει να προστεθεί και η μεγάλη βιοποικιλότητα του νησιού προσφέρεται για περιπατητικό τουρισμό. Πάνω από 40 μονοπάτια θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ιδιαίτερου γεωλογικού ή φυσιολατρικού ή πολιτιστικού ενδιαφέροντος εκ των οποίων τα περισσότερα διατηρούνται σε

καλή κατάσταση ή έχουν πρόσφατα αποκατασταθεί και έχουν ικανοποιητική σήμανση. Οι άφθονες θερμές πηγές είναι ένα άλλο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της Νισύρου.

Σε πολλά σημεία κατά μήκος των ακτών του νησιού αναβλύζει ζεστό νερό, σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 30 έως 61 βαθμούς. Στη Νίσυρο απαντώνται 4 θερμές πηγές, 2 στην βόρεια ακτογραμμή και 2 στη νότια ακτογραμμή του νησιού. Χαρακτηρίζονται από θερμοκρασίες περί τους 40-60°C και υψηλή αλατότητα λίγο μικρότερη από εκείνη του θαλασσινού νερού. Η τροφοδοσία τους και η άνοδος του νερού στην επιφάνεια γίνεται μέσω των κύριων ρηγμάτων του νησιού που έχουν διεύθυνση κατά προσέγγιση ΒΔ-ΝΑ και ΒΑ-ΝΔ. Εκτιμάται ότι το νερό τους αποτελεί μίγμα θαλασσινού νερού με το γεωθερμικό ρευστό του ανώτερου ορίζοντα. Η θερμότερη πηγή βρίσκεται στη θέση Αυλάκι εντός των ανδρειπικών λαβών. Αποτελείται από αναβλύσεις παράκτιες και υποθαλάσσιες θερμοκρασίας 58-61°C με συνεχή ροή αναπτυσσόμενες σε μήκος 350 μέτρων κατά μήκος της ακτογραμμής. Η παροχή εκτιμάται ως σημαντική.

Παλαιότερα τα θερμά νερά είχαν χρησιμοποιηθεί για λουτροθεραπείες εντός οικήματος με λουτήρες. Στον όρμο Λευκός στη Νοτιοδυτική ακτή του νησιού εμφανίζεται ανάβλυση θερμού νερού σημακά με θερμοκρασία 47°C. Στη βόρεια ακτή του νησιού και στη θέση Λουτρά Μανδρακίου αναβλύζει μέσα από τους τόφους και την κίσηρη θερμό νερό σημαντικής παροχής και θερμοκρασίας 46-47°C, το οποίο διοχετεύεται στους λουτήρες των Δημοτικών Λουτρών Μανδρακίου, τα οποία λειτουργούν από το 1872. Επίσης υπάρχουν σημαντικές υποθαλάσσιες διαφυγές του νερού. Η θερμή πηγή φημίζεται για τις θεραπευτικές της ιδιότητες στις ρευματοπάθειες, αρθροπάθειες, δερματικές παθήσεις και παθήσεις του κυκλοφοριακού συστήματος. Η τέταρτη θερμή πηγή βρίσκεται κοντά στο χωριό Πάλοι. Αναβλύζει από τις αλουβιακές αποθέσεις με θερμοκρασία 39-40°C και αναπτύσσεται σε 100 περίπου μέτρα κατά μήκος της ακτογραμμής. Εκεί λειτουργούσε θεραπευτικό κέντρο από το 1895 έως τις αρχές της δεκαετίας του 1930, τα γνωστά «Λουτρά Παντελίδη». Σήμερα έχουν αναστηλωθεί τα παλαιά λουτρά, δεν είναι όμως ακόμη έτοιμα να λειτουργήσουν.

Η χλωρίδα και η πανίδα της Νισύρου παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον εξαιτίας της ηφαιστειακής της προέλευσης και της γεωγραφικής της θέσης. Η καταγεγραμμένη παρουσία 451 ειδών χλωρίδας, 85 ειδών ορνιθοπανίδας, 7 ειδών ερπετών καθώς και η παρουσία της φώκιας *Monachus-monachus* στις ακτές του νησιού κάνουν αυτό το νησί έναν τόπο που αξίζει ιδιαίτερης προστασίας και μελέτης. Η πυκνή θαμνώδης βλάστηση, αποτελείται κυρίως από τα φυτά: αστιβή, το κίστο, το θυμάρι καθώς και τα ψηλά σπάρτα, τις δαφνούλες και τους ασπάλαθους. Το μεγάλο πλήθος των δέντρων είναι ένα άλλο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της Νισύρου, που μπορεί να τη χαρακτηρίσει σαν το μοναδικό «πράσινο» ενεργό ηφαιστειο του Αιγαίου. Λίγα από αυτά είναι η εναπομείνασα αυτοφυής βλάστηση. Η αγριελιά είναι το δέντρο για το οποίο γνωρίζουμε πως βρισκόταν στη Νίσυρο πριν 60.000 χρόνια, καθώς απολιθωμένα φύλλα της έχουν εντοπιστεί σε αντίστοιχης ηλικίας στρώματα στάχτης. Τα περισσότερα δέντρα που υπάρχουν σήμερα στη Νίσυρο είναι φυτεμένα από τους κατοίκους (ελιές, συκίες, αμυγδαλιές, βελανιδιές, αγραμυθίες). Αξίζει να σημειώσουμε ότι στη Νίσυρο έχουν εντοπιστεί το υποείδος *amphiphilon* του είδους *Limonium graecum* και ένα νέο είδος, η *Campanula nisyria*.

Αν και η αμπελοργία σε οργανωμένη μορφή τα τελευταία χρόνια είναι σχεδόν ανύπαρκτη, κρύβει υψηλή υπεραξία αν συνυπολογιστούν οι εξής παράγοντες:

- Έχει σημαντική ιστορία στο νησί αφού ένα μεγάλο μέρος των αναβαθμίδων καλλιεργούνταν με αμπέλια

- Η ποικιλία Μαυροθήρικο που πρόσφατα έχει ενταχθεί στο αμπελουργικό δυναμικό του Νομού είναι ποικιλία που βρέθηκε στη Νίσυρο και καλλιεργήθηκε στο Ινστιτούτο Αμπέλου. Το κρασί που παράχθηκε είχε εξαιρετικές ιδιότητες.
- Το ηφαιστιογενές έδαφος του νησιού προσφέρεται για την καλλιέργεια της αμπέλου έχοντας μάλιστα ως λαμπρό παράδειγμα αυτό της Σαντορίνης.

Μύθος που αποκαλύπτει ότι οι πρόγονοι μας γνώριζαν πως η Νίσυρος είναι ένα ηφαίστειο και ότι τα πετρώματά της είναι παρόμοια με αυτά της νοτιοδυτικής Κω. Γνώριζαν ή διαισθάνονταν επίσης ότι οι συχνοί τοπικοί σεισμοί, πού συνοδεύονται από κρότους και θόρυβο και ταλαιπωρούσαν το νησί από εκείνα τα χρόνια, είναι συνυφασμένοι με το μηχανισμό γένεσης τον νησιού. Η εγκλωβισμένη ενέργεια τον λιωμένου πετρώματος και τον υπέρμετρου ατμού κάτω από τη Νίσυρο μετασφραγίζεται στο γίγαντα Πολυβώτη, που στενάζει και τραντάζεται φυλακισμένος στα σπλάχνα της. Αυτό που μπορούμε να υποθέσουμε με σιγουριά είναι πως χρειάστηκαν μερικές εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια υποθαλάσσιας ηφαιστειακής δράσης, ώσπου η πρώτη κορυφή τον νησιού να αναδυθεί από τα νερά τον Αιγαίου.

Η ιδιομορφία της Νισύρου έγκειται στη γεωλογική δομή της που προκαλεί επιβάρυνση των υπόγειων αλλά πολλές φορές και επιφανειακών νερών λόγω της ύπαρξης θειούχων ηφαιστειακών πετρωμάτων και ορυκτών. Οι προσπάθειες των κατοίκων για την ανεύρεση πόσιμου νερού έχουν εγκαταλειφθεί όπως γίνεται εμφανές από την απουσία πηγαδιών στο σύνολο της έκτασης του νησιού. Συγκεκριμένα, καταγράφηκαν 40 παραδοσιακά πηγάδια (λειτουργούν μόνο 4) στην περιοχή του χωριού Μανδράκι. Αυτά τα πηγάδια είναι συγκεντρωμένα στο κέντρο του χωριού και το νερό των πηγαδιών αυτών χρησιμοποιείται για το πότισμα των περιβολιών. Στο υπόλοιπο του νησιού καταγράφηκαν περίπου 7 πηγάδια τα οποία είναι εγκαταλελειμμένα και τα περισσότερα είναι πλέον ξερά. Οι κάτοικοι του νησιού έχουν κατασκευάσει πολυάριθμες δεξαμενές συλλογής βρόχινου νερού σε όλη την έκταση του νησιού οι οποίες χρησιμοποιούνται για την άρδευση μικρής έκτασης καλλιεργειών.

3.2.2. Προστασία και ανάδειξη της Νισύρου με έμφαση στο ηφαίστειο

Μεγάλη προσπάθεια πραγματοποιείται από την τοπική κοινωνία, η οποία περιλαμβάνει τις δράσεις προστασίας, ανάδειξης και αναβάθμισης του αστικού περιβάλλοντος του νησιού μέσω της ανάπλασης και της αναβάθμισης σημαντικών πόλων επισκεψιμότητας ώστε να προστατευθεί και να αναβαθμιστεί το οικιστικό περιβάλλον του νησιού τα τελευταία χρόνια στη Νίσυρο. Το σημαντικότερο μέρος αυτής της πρωτοβουλίας αφορά το ηφαίστειο που θέλοντας και μη έχει επηρεάσει το περιβάλλον, τη ζωή αλλά και την οικονομία της περιοχής. Φυσικά και σήμερα το ηφαίστειο της Νισύρου παραμένει σιωπηλό για περισσότερα από 120 χρόνια, αν και θεωρείται ακόμη ενεργό. Η πιο πρόσφατη δραστηριότητα που παρουσιάστηκε το 1956, όταν σχηματίστηκαν ρωγμές στο έδαφος από όπου έβγαιναν καπνοί και θειάφι. Στο χωριό Νικιά, που απλώνεται γύρω από το ηφαίστειο, στεγάζεται το διαδραστικό Ηφαιστειακό Μουσείο σε ένα αναπαλαιωμένο κτίριο του παλιού δημοτικού σχολείου του χωριού. Το Μουσείο βρίσκεται σε προνομιά στα χείλη της καλντέρας, απ' όπου προσφέρεται πανοραμική άποψη του εσωτερικού της καλντέρας και του ηφαιστείου. Πρόκειται για ένα μοναδικό στο είδος τους μουσείο στην Ελλάδα, το οποίο εμπλουτίζεται συνεχώς με νέα εκθέματα.

Οι κάτοικοι εκμεταλλεύονται την ύπαρξη του ηφαιστείου που αποτελεί τον εμβληματικό τόπο τουριστικής αλλά και επιστημονικής έλξης για τη Νίσυρο καθώς και την ανάδειξη χώρων ιστορικής και πολιτιστικής κληρονομιάς και περιλαμβάνει τις κατηγορίες δράσεων που θα

αναφέρουμε στη συνέχεια. Για την διευκόλυνση της προσβασιμότητας και της εμπειρίας των επισκεπτών έχουν γίνει ενέργειες για την ανάδειξη του μοναδικού τοπίου του ηφαιστείου μέσω της διαμόρφωσης του περιβάλλοντος χώρου και της κατασκευή κέντρου προβολής και αναπαράστασης της ιστορίας του ηφαιστείου, της ιστορίας και του «μύθου της Νισύρου».

Επιπλέον έχει ενισχυθεί σημαντικά η επισκεψιμότητα του ηφαιστείου με τη χρήση της δημοτικής συγκοινωνίας με ηλεκτροκίνητα οχήματα και διαρκή συντήρηση, ανάδειξη των ιστορικών τειχών του νησιού (Παλαιόκαστρο, Πελασγικό τείχος, Ενετικό τείχος) και τη δημιουργία δικτύου επισκέψιμων χώρων που αναδεικνύουν την πολιτιστική και φυσική κληρονομιά της Νισύρου.

3.3. Το ηφαίστειο του Βεζούβιου

Ο Βεζούβιος είναι βουνό-ηφαίστειο που βρίσκεται στις δυτικές ακτές της Ιταλίας και σε απόσταση 12 χιλιομέτρων από τη Νάπολη. Μέχρι το 79 μ.Χ., το θεωρούσαν ένα απλό βουνό. Ο Στράβωνας μάλιστα λέει ότι το βουνό Ουεσουΐον (έτσι αποκαλεί τον Βεζούβιο) ήταν σκεπασμένο με ωραίους αγρούς, εκτός από την κορυφή του, που ήταν επίπεδη, μαύρη και σκεπασμένη εδώ και κει και καταλήγει στο συμπέρασμα ότι το βουνό είχε πάρει φωτιά και είχε καεί, αλλά η φωτιά έσβησε, επειδή έλειπε το καύσιμο υλικό. Η πρώτη έκρηξη του Βεζούβιου σύμφωνα με τους ιστορικούς, που κατάστρεψε ολοκληρωτικά και εξαφάνισε μέσα στη λάβα, τρεις μεγάλες πόλεις: την Πομπηία, το Ηράκλειο (σημερινό Ερκολάνο) και τις Σταβίες, έγινε το 79 μ.Χ. Την έκρηξη την περιέγραψε ο Πλίνιος ο Νεότερος, που ήταν αυτόπτης μάρτυρας της καταστροφής. Άλλες μεγάλες εκρήξεις καταγράφηκαν το 1794, το 1872 και το 1906, που προκάλεσαν μεγάλες καταστροφές και θανάτους πολλών ανθρώπων. Σήμερα, οι περιοχές γύρω από τον Βεζούβιο είναι ιδιαίτερα πυκνοκατοικημένες, παρά τον κίνδυνο που γνωρίζουν ότι διατρέχουν οι κάτοικοι, καθώς το ηφαιστειογενές έδαφος του βουνού είναι ιδιαίτερα εύφορο.

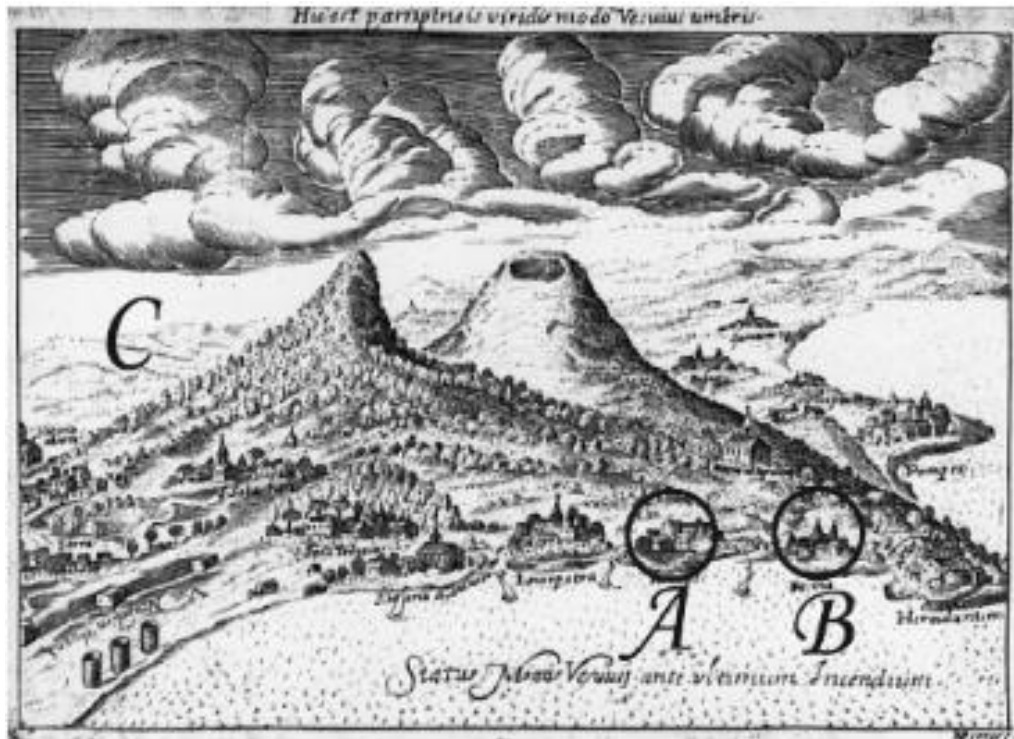
Τη μορφή και την διαμόρφωση που έχει σήμερα ο Βεζούβιος την πήρε μετά από την έκρηξή του 79 μ.Χ. Αν και οι διάφορες εκρήξεις που έγιναν αργότερα προξένησαν μερικές μεταβολές στην όψη του, έχει τρεις κορυφές: την Σόμμα βόρεια, τον καθαυτό Βεζούβιο νότια και το Οπαγιάνο ανάμεσα. Σήμερα, ο καθαυτό Βεζούβιος έχει περιφέρεια βάσης 45 χιλιόμετρα και η διάμετρος του κρατήρα του είναι 570 μέτρα περίπου. Το ύψος του μεταβάλλεται μετά από κάθε ισχυρή έκρηξη και είναι σήμερα 1.180 μέτρα. Οι πλαγιές του βουνού είναι κατάφυτες από κήπους και αγρούς μέχρι ένα ορισμένο ύψος. Ιδιαίτερα ευδοκιμούν τα αμπέλια από αρχαιότατα χρόνια. Τα κρασιά του Βεζούβιου τα εκτιμούσαν ιδιαίτερα από τη Ρωμαϊκή εποχή και είναι περιζήτητο το θαυμάσιο κρασί «*Λάκριμα Κρίστι*» (Δάκρυα του Χριστού).

3.3.1. Ιστορική αναδρομή και περιγραφή του Βεζούβιου

Τα γεωφυσικά και γεωχημικά σήματα του Βεζούβιου που συνοδεύουν το μάγμα που φθάνει στην επιφάνεια παρουσιάζουν συγκεκριμένα πρότυπα χωρίς ηφαιστειακό σύστημα. Η διάρκεια των προ-εκρηκτικών κρίσεων σε διαφορετικά ηφαιστεια είναι μεταβλητή (από μέρες σε χρόνια) και όχι σε όλες τις ηφαιστειακές παραβιάσεις σε μια έκρηξη. Η γνώση του της ιστορίας του παρελθόντος είναι επομένως ζωτικής σημασίας για τα ηφαιστεια υψηλού κινδύνου, όπου η απόφαση για εκκένωση του πληθυσμού απαιτεί σωστή ερμηνεία των δεδομένων παρακολούθησης και της αξιόπιστης προγνωστικής επιλογής. Στην περίπτωση του Βεζούβιου, ενός από τα πιο επικίνδυνα ηφαιστεια παγκοσμίως, υπάρχουν πολύ λίγες πληροφορίες σχετικά με τα σήματα αναταραχής που ακολουθούν την μακρόχρονη ηρεμία.

Αυτή η πιο έντονη και βίαιη έκρηξη των περασμένων 1500 χρόνων συνέβη μετά από μια περίοδο ηρεμίας και ακινησίας που μπορεί να διαρκέσει πέντε αιώνες. Αυτή η έκρηξη θεωρήθηκε ως η αναφορά για το αναμενόμενο σενάριο σε περίπτωση επανενεργοποίησης του Βεζούβιου στο σχέδιο έκτακτης ανάγκης της Εθνικής Πολιτικής Προστασίας. Ωστόσο, οι πληροφορίες σχετικά με τους προάγγελους που δίδονται από τα έγγραφα που είναι γραμμένα στην ιταλική και ισπανική γλώσσα είναι αποσπασματικά και ανακριβή. Τα τρία κείμενα που συζητήθηκαν και επιλέχθηκαν μέσω ιστορικής και φιλολογικής έρευνας των διαθέσιμων κειμένων, δεν εξετάστηκαν λεπτομερώς μέχρι τώρα. Οι τρεις συγγραφείς, όλοι με μεγάλη πολιτιστική αντίληψη, ήταν άμεσοι μάρτυρες της έκρηξης και συγκέντρωσαν πληροφορίες από μάρτυρες που θεωρούσαν αξιόπιστους. Το σημαντικότερο είναι ότι έγραψαν την περιγραφή τους αμέσως μετά την έκρηξη και αφιέρωσαν ολόκληρα κεφάλαια ή ακόμα και βιβλία για να περιγράψουν και να αναλύσουν τα φαινόμενα προ-εκρήξεως, παρέχοντας μια εξαιρετικά αξιόπιστη και συνεκτική εικόνα της πρόδρομης δραστηριότητας. Οι πραγματείες, συνολικού ύψους άνω των 750 σελίδων, μεταφράστηκαν με προσοχή από το λατινικό μορφωτικό στύλ του δέκατου έβδομου αιώνα. Οι προ-εκρήξιμες και εξαντλητικές περιγραφές αναλύθηκαν μέσα στο πολιτισμικό και γλωσσικό πλαίσιο της περιόδου. Η μετάφραση των περασμάτων που περιγράφουν τα φαινόμενα διεξήχθη χωρίς την εμπλοκή των ηφαιστειολόγων για να αποφευχθούν οι προκαταλήψεις λόγω ειδικών γνώσεων.

Ο Βεζούβιος 'γεννήθηκε' πιθανότατα λιγότερο από 200.000 χρόνια πριν. Αν και ένα σχετικά νεανικό ηφαιστειο, ο Βεζούβιος είχε παραμείνει αδρανής εδώ και αιώνες πριν από τη μεγάλη έκρηξη του 79 μ.Χ. που έθαψε τις πόλεις Πομπηία, Οπλώνη και Στάβια υπό τέφρες κάτω από λασπώδες ρεύμα. Ο συγγραφέας Πλίνιος ο Νεώτερος, που διαμένει σε ένα σημείο δυτικά της Νάπολης, έδωσε μια εξαιρετική εικόνα της καταστροφής με δύο γράμματα στον ιστορικό Tacitus. Μεταξύ των ετών 79 και 1037, αναφέρθηκαν αρκετές εκρήξεις, οι οποίες περιλαμβάνουν εκείνες που εμφανίστηκαν στα 203, 472, 512, 685, 787, 968, 991, 999 και 1007. Οι εκρήξεις των 512 ήταν τόσο σοβαρές που ο Theodoric the Goth απελευθέρωσε τους ανθρώπους που ζουν στις πλαγιές του Βεζούβιου από την πληρωμή φόρων.



Εικόνα 10: Η κατάσταση του Βεζούβιου πριν την τελευταία του φωτιά (από το Mascolo). Τα κεφαλαία γράμματα δείχνουν την τοποθεσία των χωριών: A Portici, B Resina, Γ Ottaviano(πηγή:https://www.researchgate.net/publication/259324318_Eruption_early_warning_at_Vesuvius_The_AD_1631_lesson)

Μετά από μερικούς αιώνες ηρεμίας, μια σειρά σεισμών, διάρκειας έξι μηνών και σταδιακά αυξανόμενων στην ένταση, προηγήθηκε μιας μεγάλης έκρηξης που έλαβε χώρα τον Δεκεμβρίου 1631. Πολλά χωριά στις πλαγιές του ηφαιστείου καταστράφηκαν, περίπου 3.000 άνθρωποι σκοτώθηκαν, η ροή της λάβας έφτασε στη θάλασσα και οι ουρανοί σκοτεινιάζουν για μέρες. Μετά το 1631 υπήρξε μια αλλαγή στον εκρηκτικό χαρακτήρα του ηφαιστείου και η δραστηριότητα έγινε συνεχής. Μπορούν να παρατηρηθούν δύο στάδια: ηρεμία και έκρηξη. Κατά τη διάρκεια της φάσης ηρεμίας το στόμα του ηφαιστείου θα εμποδίζεται, ενώ στο στάδιο της έκρηξης θα είναι σχεδόν συνεχώς ανοιχτό. Η έκρηξη ξεκίνησε με το άνοιγμα μιας εκρηκτικής ρωγμής στη δυτική πλευρά του Βεζούβιου, κοντά στη βάση του κώνου. Οι πρώτες πυρκαγιές πιθανόν δημιούργησαν σύννεφα σαν ουρά, και ακολουθήθηκαν από μια αργά αναπτυσσόμενη πεύκη στήλη Plinian, διασκορπισμένη στην ανατολή από τους επικρατούσες ανέμους. Η κατακόρυφη στήλη διατηρήθηκε για περίπου οκτώ ώρες, συνοδευόμενη από συνεχή σεισμικό τρόπο και πτώση του πηλού από το ηφαίστειο. Το ερεθισμένο συντηρητικό μέγεθος της κατάθεσης Plinian και η στήλη έφτασε σε μέγιστο ύψος περίπου 21 km, στην τυπική σειρά των επιπεφυκτικών εκρήξεων. Η συνεχής κολώδης στήλη ακολουθήθηκε από φάση παλμών που χαρακτηρίστηκε από ύγραση τέφρας και έκτακτης ανάγκης συνοδευόμενη από συχνές σεισμικές διαταραχές κατά τη διάρκεια της ολόκληρης νύχτας μεταξύ 16 και 17 Δεκεμβρίου, η οποία προκάλεσε κάποια ζημιά στα κτίρια. Το πρωί της 17^{ης} Δεκεμβρίου, σημειώθηκε βίαιος σεισμός, που διαρκεί λίγα λεπτά. Ο σεισμός ακολουθήθηκε αμέσως από την πιο βίαιη φάση της

εξέλιξης, που χαρακτηρίζεται από πυροκλαστική ροή. Σε αυτή τη χρονική περίοδο τοποθετήθηκαν επτά διαφορετικές πυροκλαστικές ροές προς τους δυτικούς και νότιους τομείς, οι οποίοι ελέγχονται έντονα από την προϋπάρχουσα τοπογραφία και από το χείλος του Somma. Τα περισσότερα από τα θύματα σχετίζονται με αυτή τη φάση της έκρηξης. Ο συνολικός αριθμός των θυμάτων ποικίλλει από 1.000 σύμφωνα με το Varone, σε 3.000 σύμφωνα με τον Carpha και τον Mascolo, μέχρι 4.000 ή 6.000 που υπολογίζονται αντίστοιχα από τους Rosi et al. και Rolandi et al. Τα τελικά στάδια της έκρηξης σηματοδοτήθηκαν από τις διαλείπουσες εκπομπές τέφρας και τη συχνή παραγωγή λαχάρων και πλημμυρών. Αυτά προκλήθηκαν από τις έντονες βροχές που χαρακτήρισαν τις συν-και μετα-εκρήξεις περιόδους, ξεκινώντας από το πρωί της 17^{ης} Δεκεμβρίου. Τα λάχαρα και οι πλημμύρες συνέβησαν για πολλές ημέρες μετά την έκρηξη, καταστρέφοντας την πεδιάδα στο βόρειο πόδι του ηφαιστείου.



Εικόνα 11: 1.934 χρόνια μετά την έκρηξη του Βεζούβιου, εικόνα που απεικονίζει το εσωτερικό του κρατήρα (πηγή:http://1.bp.blogspot.com/_YcrZj7OUudk/S9dpAIA56rl/AAAAAAAAAFv0/C_aoM4hqX84/s640/Vesuvius_799_355.jpg)

Οι κατολισθήσεις μέσα στον κρατήρα ή στις πλαγιές του κώνου γίνονταν επανειλημμένα μερικούς μήνες πριν από την έκρηξη. Με αβέβαιο χρονοδιάγραμμα, αλλά οριστικά πριν από την έκρηξη, συνέβη μια κατολίσθηση στην ανατολική πλευρά του Somma στην περιοχή του Ottaviano. Οι κατολισθήσεις στο εσωτερικό του κώνου ήταν υπεύθυνες για την άνοδο του δαπέδου του κρατήρα και, όπως αναφέρθηκε από τον Mascolo, αυτό το φαινόμενο και η ερμηνεία του (ομαλοποίηση) υποβλήθηκαν σε συζήτηση μεταξύ των σύγχρονων επιστημόνων. Η διάσπαση του εδάφους παρατηρήθηκε επίσης τον Δεκέμβριο σε αρκετές θέσεις, σε συνδυασμό με την εκπομπή καυσαερίων.

Η περιγραφή των παράξενων φαινομένων, όπως αυτές που παρατηρούνται στο ηφαίστειο του Βεζούβιου, κατά τη διάρκεια των γεγονότων που προηγούνται της έκρηξης δεν είναι σαφή για να ερμηνευθούν απόλυτα. Ωστόσο, η πρώτη ξεκάθαρη ένδειξη της εκπομπής διάχυτων αερίων δηλώθηκε από τον Varone, ο οποίος παρατήρησε μια πτώση της τοπικής βλάστησης του Βεζούβιου μέχρι τα τέλη Νοεμβρίου.

3.3.2. Το ηφαίστειο του Βεζούβιου σήμερα

Πριν την έκρηξη ο Βεζούβιος απέφερε πολλά χρήματα στην Πομπηία λόγω του εύφορου εδάφους γύρω του. Όμως, αν και το έδαφός του έμοιαζε με παράδεισο, στην πραγματικότητα ήταν ένας εφιάλτης διότι ήταν ένα ενεργό ηφαίστειο, μόνο που οι κάτοικοι δεν το ήξεραν, αφού βρισκόταν σε "ύπνωση". Ολόκληρη η πανέμορφη ρωμαϊκή πόλη, με τις επαύλεις και τα πολύτιμα έργα τέχνης που τις στόλιζαν, την αγορά, τους πολυάριθμους ναούς, το μικρό και το μεγάλο θέατρο, τις αψίδες, τις κρήνες και τα καταστήματα, θάφτηκε για πάντα από 20-30 μέτρα στάχτης, λάβας και ελαφρόπετρας. Έτσι η Πομπηία ξεχάστηκε από τους ανθρώπους, και τους επόμενους αιώνες κανείς δεν ήξερε για την ύπαρξή της. Το 1592 όμως, τμήμα της αρχαίας πόλης ανακαλύφθηκε τυχαία όταν γίνονταν εργασίες για να κατασκευαστεί το υπόγειο υδραγωγείο της πόλης Τόρε Ανουντσιάτα που βρίσκεται εκεί κοντά. Η αξία των ερειπίων της Πομπηίας είναι ασύγκριτα μεγάλη, γιατί μας έδωσε μια ιδέα ρωμαϊκής πόλης. Οι ανακαλύψεις αυτές τράβηξαν το παγκόσμιο ενδιαφέρον, ποιητές, πεζογράφοι, καλλιτέχνες και γενικά ολόκληρος ο κόσμος στράφηκε προς την Πομπηία.

Σήμερα, ο Βεζούβιος κάθεται σε ένα στρώμα μάγματος μήκους 154 τετραγωνικών χιλιομέτρων και μολονότι έχει σιωπηθεί για 72 χρόνια, οι ειδικοί λένε ότι οφείλεται σε άλλο κατακλυσμικό χτύπημα. Η πόλη της Νάπολης, με πληθυσμό άνω των 3 εκατομμυρίων ανθρώπων, βρίσκεται σε μικρή απόσταση 12 χιλιομέτρων. Και άλλοι 600.000 άνθρωποι ζουν ακόμη πιο κοντά στην κόκκινη ζώνη (απόσταση 10 χιλιομέτρων από τον κρατήρα), όπου βρίσκονται στο άμεσο μονοπάτι των θανάσιμων πυροκλαστικών ροών.

Η έκρηξη που ισοφάρισε την Πομπηία έφτασε 5 (μερικοί ειδικοί λένε 6) στον Ηφαιστειακό Δείκτη Εκρηκτικότητας (VEI). Κάθε αυξημένος αριθμός δείχνει μια έκρηξη που είναι 10 φορές ισχυρότερη (η υψηλότερη βαθμολογία μέχρι σήμερα είναι 8). Προηγήθηκε από ισχυρό σεισμό πριν από 17 χρόνια, αλλά οι περισσότεροι υπολογισμοί και θεωρίες αναφέρουν ότι η πραγματική έκρηξη ήταν αρκετά ξαφνική και διήρκεσε δύο ημέρες. Αυτές οι εκρήξεις είναι σπάνιες, οι επιστήμονες εκτιμούν ότι υπήρχαν μόνο 20 σε όλο τον κόσμο από το 1500. Η τελευταία μεγάλη έκρηξη του Βεζούβιου το 1631 ήταν ένα VEI 4, όπου το ηφαίστειο άρχισε να τρέμει και τελικά εξερράγη περίπου έξι ημέρες αργότερα. Ακόμα, 6000 άνθρωποι πιστεύεται ότι έχουν πεθάνει. Αν ο Βεζούβιος ξεσπούσε σήμερα, η ζημιά θα εξαρτηθεί από την έκταση της έκρηξης. Ως σενάριο χειρότερης περίπτωσης, οι ειδικοί σχεδιάζουν ένα VEI 4.

Ακόμη και σε αυτό το επίπεδο, μια έκρηξη θα δημιουργούσε έντονη εκπομπή λάβας που θα μπορούσε να οδηγήσει ανθρώπους σε θάνατο σε λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο, ακολουθούμενη από πυροκλαστική ροή λάβας και πετρώματος, ενώ ο καπνός και η τέφρα θα ελευθερώνονταν στην ατμόσφαιρα. Σύμφωνα με μερικές εκτιμήσεις εμπειρογνομόνων, μια έκρηξη VEI 4 ή 5 θα μπορούσε να σκοτώσει πάνω από 10.000 άτομα και να κοστίσει την ιταλική οικονομία πάνω από 20 δισεκατομμύρια δολάρια. Εκατομμύρια άνθρωποι θα χάσουν σίγουρα την σύνδεση με ηλεκτρική ενέργεια - ύδρευση και το οδικό δίκτυο θα καταστεί άχρηστο για μερικούς μήνες.

Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο το Παρατηρητήριο Βεζούβιου παρακολουθεί τη σεισμική δραστηριότητα στον Vesuvius 24/7 αναζητώντας σημάδια μιας επικείμενης έκρηξης. Η κυβέρνηση της Ιταλίας έχει ετοιμάσει ένα επείγον σχέδιο καταστροφής για να μετακινήσει τους 600.000 ανθρώπους γύρω από την περιοχή της έκρηξης μέσα σε 72 ώρες. Επίσης, προσπαθεί ενεργά να μειώσει τον πληθυσμό που ζει κοντά, κατεδαφίζοντας παράνομα κατασκευασμένα κτίρια, δημιουργώντας ένα εθνικό πάρκο γύρω από το ηφαίστειο για να αποτρέψει περαιτέρω κατασκευές και προσφέρει οικονομικό κίνητρο για να μετακινηθεί ο πληθυσμός. Αλλά η

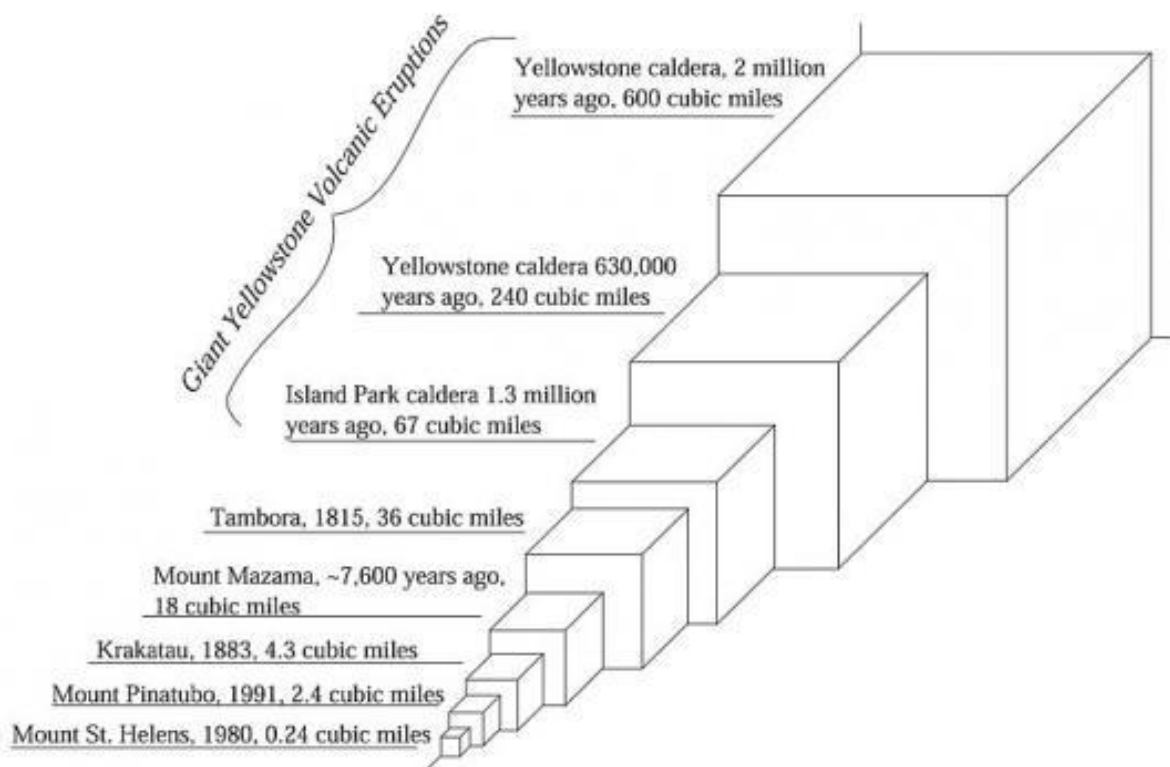
πραγματικότητα είναι ότι ο Βεζούβιος, τα ερείπια της Πομπηίας και η κοντινή Νάπολη είναι πόλος έλξης και ζωτικής σημασίας για την τοπική οικονομία, προσελκύνοντας εκατομμύρια τουρίστες ετησίως, οι οποίοι έλκονται από τη συναρπαστική τοποθεσία μιας αρχαίας πόλης ηλικίας 2.000 ετών η οποία διατηρήθηκε στην πάροδο του χρόνου από την ίδια ηφαιστειακή έκρηξη που προκάλεσε την καταστροφή της.

3.4. Το ηφαίστειο Yellowstone

Ο όρος "supervolcano" έχει χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή ηφαιστειακών γεγονότων που παράγουν εξαιρετικά μεγάλες ηφαιστειακές εκρήξεις. Έτσι ορίζεται, και το Yellowstone ως Supervolcano αφού πρόκειται για το ηφαιστειογενές γεγονός το οποίο παρήγαγε τις τελευταίες τρεις υπερεκρήξεις από το σημείο του ηφαιστίου Yellowstone. Παρήγαγε επίσης μια ακόμη μικρότερη έκρηξη, δημιουργώντας έτσι τη λίμνη West Thumb του Yellowstone πριν από 174.000 χρόνια. Η Καλντέρα του Yellowstone είναι μια ηφαιστειακή καλντέρα και μάλιστα ένα ηφαίστειο που βρίσκεται στο Εθνικό Πάρκο του Yellowstone στις δυτικές Ηνωμένες Πολιτείες, μερικές φορές αναφέρεται και ως το Yellowstone Supervolcano. Η καλντέρα και το μεγαλύτερο μέρος του πάρκου βρίσκονται στη βορειοδυτική γωνία της πολιτείας του Wyoming. Σχηματίστηκε κατά τη διάρκεια των τελευταίων τριών υπερκεκρήξεων σε διάστημα των τελευταίων 2,1 εκατομμυρίων ετών: η έκρηξη του Huckleberry Ridge πριν από 2,1 εκατομμύρια χρόνια (που δημιούργησε το νησιώτικο πάρκο Caldera και το Huckleberry Ridge Tuff), η έκρηξη του Mesa Falls πριν από 1,3 εκατομμύρια χρόνια (που δημιούργησε την Καλντέρα του Henry's Fork Caldera και το Mesa Falls Tuff) και η έκρηξη του Lava Creek περίπου 630.000 χρόνια πριν (η οποία δημιούργησε την Καλντέρα του Yellowstone και το Tuff Creek Lava). Η ηφαιστειακή δραστηριότητα στο Yellowstone είναι σχετικά πρόσφατη, με τις καλντέρες που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια μεγάλων εκρήξεων που έλαβαν χώρα 2,1 εκατομμύρια, 1,3 εκατομμύρια και 630,000 χρόνια πριν. Οι καλντέρες βρίσκονται πάνω από ένα σημείο ορόσημο κάτω από το Οροπέδιο του Yellowstone όπου το καυτό μάγμα από το μανδύα ανεβαίνει προς την επιφάνεια. Το σημείο αυτό φαίνεται να κινείται σε όλο το έδαφος προς την ανατολική-βορειοανατολική κατεύθυνση, αλλά στην πραγματικότητα είναι πολύ πιο βαθύ από το έδαφος και παραμένει ακίνητο ενώ η βορειοαμερικανική πλάκα κινείται προς τα δυτικά-νοτιοδυτικά πάνω από αυτήν.

Τα τελευταία 18 εκατομμύρια χρόνια, έχει προκαλέσει μια σειρά βίαιων εκρήξεων και λιγότερο έντονες πλημμύρες βασαλτικής λάβας. Αυτές οι εκρήξεις συνέβαλαν στη δημιουργία του ανατολικού τμήματος της πεδιάδας ποταμού φιδιών (δυτικά του Yellowstone) από μια ορεινή περιοχή. Τουλάχιστον δώδεκα από αυτές τις εκρήξεις ήταν τόσο τεράστιες ώστε ταξινομούνται ως μέγιστες εκρήξεις. Οι ηφαιστειακές εκρήξεις μερικές φορές αδειάζουν τις αποθήκες του μάγματος τόσο γρήγορα ώστε η υπερκείμενη γη να καταρρέει στην εκκένωση του θαλάμου μάγματος, σχηματίζοντας μια γεωγραφική καθίζηση που ονομάζεται καλντέρα. Οι ηφαιστειακές εκρήξεις, καθώς και η συνεχιζόμενη γεωθερμική δραστηριότητα, είναι αποτέλεσμα ενός μεγάλου ορμίσκου μάγματος που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της καλντέρας. Το μάγμα σε αυτόν τον όρμο περιέχει αέρια που διατηρούνται διαλυμένα από την τεράστια πίεση κάτω από την οποία περιέχεται το μάγμα. Εάν η πίεση απελευθερωθεί σε επαρκή βαθμό από

κάποια γεωλογική μετατόπιση, τότε κάποια από τις φυσαλίδες αερίων απελευθερώνεται και μπορεί να προκαλέσει αλλαγές ώστε το μάγμα να επεκταθεί. Αυτό μπορεί να προκαλέσει αλυσιδωτή αντίδραση. Εάν η επέκταση έχει ως αποτέλεσμα την περαιτέρω εξισορρόπηση της πίεσης, για παράδειγμα, με την εμφύσηση του υλικού από την κορυφή του θαλάμου, το αποτέλεσμα είναι μια πολύ μεγάλη έκρηξη αερίου.



Εικόνα 12: Σύγκριση όγκου έκρηξης Yellowstone. Οι όγκοι των γιγάντιων ηφαιστειακών εκρήξεων του Yellowstone σε σύγκριση με τους όγκους άλλων σημαντικών εκρήξεων (πηγή: https://volcanoes.usgs.gov/vsc/images/image_mgr/0-99/img5_547w_350h.jpg)

3.4.1. Ιστορική περιγραφή του ηφαιστείου Yellowstone

Το μεγαλύτερο μέρος της ιστορίας της Γης, δηλαδή από τη δημιουργία της γης πριν από 4,6 δισεκατομμύρια χρόνια σε περίπου 541 εκατομμύρια χρόνια πριν, είναι γνωστό ως ο χρόνος των Precambrian. Βράχοι αυτής της ηλικίας βρίσκονται στο βόρειο Yellowstone και στις περιοχές των κοντινών οροσειρών Teton, Beartooth, Wind River και Gros Ventre. Κατά τη διάρκεια του Προκαμπριανού και των επομένων Παλαιοζωικών και Μεσοζωικών εποχών (541 έως 66 εκατομμύρια χρόνια πριν), οι δυτικές Ηνωμένες Πολιτείες καλύπτονταν κατά περιόδους από ωκεανούς, αμμόλοφους και τεράστιες πεδιάδες. Από το τέλος της Μεσοζωικής, μέσα από τις πρώιμες Κηνοζωικές, οι ορεινές διαδικασίες σχημάτισαν τα Βραχώδη Όρη. Κατά την εποχή

των Κηνοζωικών χρόνων (περίπου τα 66 εκατομμύρια χρόνια της ιστορίας της Γης), η εκτεταμένη ορεινή ανάπτυξη, ο ηφαιστειακός χώρος, η υπαιτιότητα και ο παγετός αποτελούν την περιοχή του Yellowstone. Η περιοχή Absaroka κατά μήκος της βόρειας και ανατολικής πλευράς του πάρκου σχηματίστηκε από πολυάριθμες ηφαιστειακές εκρήξεις περίπου 50 εκατομμύρια χρόνια πριν. Αυτή η περίοδος ηφαιστειακής δραστηριότητας δεν σχετίζεται με το σημερινό ηφαίστειο του Yellowstone. Πριν από περίπου 30 εκατομμύρια χρόνια, οι τεράστιες εκτάσεις της σημερινής ηφαιστειακής περιοχής άρχισαν να ξετυλίγονται κατά μήκος ενός άξονα Ανατολής-Δύσης. Αυτή η συνεχιζόμενη διαδικασία εδαφικής επέκτασης αυξήθηκε πριν από περίπου 17 εκατομμύρια χρόνια και δημιούργησε τη σύγχρονη λεκάνη και την τοπογραφία της περιοχής (βόρειοι-νότιες οροσειρές με μεγάλες κοιλάδες βορρά-νότου), που χαρακτηρίζουν μεγάλο μέρος της, συμπεριλαμβανομένης της περιοχής Yellowstone. Περίπου 16,5 εκατομμύρια χρόνια πριν, μια έντονη περίοδος ηφαιστειακής δράσης άρχισε κοντά στα σύνορα της σημερινής Νεβάδα, Όρεγκον και Αϊντάχο. Οι επακόλουθες ηφαιστειακές εκρήξεις μπορούν να εντοπιστούν στο νότιο Αϊντάχο προς το Yellowstone. Αυτό το μονοπάτι των 500 μιλίων με περισσότερες από 100 καλδές δημιουργήθηκε καθώς η βορειοαμερικανική πλάκα κινήθηκε προς νοτιοδυτική κατεύθυνση πάνω από ένα ρηχό σώμα του μάγματος. Περίπου 2,1 εκατομμύρια χρόνια πριν, η κίνηση της πλάκας της Βόρειας Αμερικής έφερε την περιοχή Yellowstone πιο κοντά στο ρηχό σώμα του μάγματος. Αυτός ο ηφαιστεισμός παραμένει μια κινητήρια δύναμη στο σημερινό Yellowstone.

Το μάγμα, με τη μορφή ενός τετμηγμένου βράχου από κάτω από το φλοιό της γης, είναι κοντά στην επιφάνεια στην μεγαλύτερη περιοχή Yellowstone. Αυτό το ρηχό σώμα του μάγματος προκαλείται από τη θερμική μεταφορά στο μανδύα. Οι μάζες του μάγματος ανυψώνονται μέσα από το μανδύα, λιώνουν πέτρες στην κρούστα και δημιουργούν μάζα αποθεμάτων μερικώς λειωμένου, μερικώς στερεού βράχου. Τα στρώματα του μανδύα μεταφέρουν τη θερμότητα από το βάθος του μανδύα στην κρούστα και δημιουργούν αυτό που ονομάζουμε ηφαιστειακό "καυτό σημείο". Τα καυτά σημεία αφήνουν ένα ίχνος ηφαιστειακής δραστηριότητας καθώς οι τεκτονικές πλάκες παρασύρονται πάνω τους. Καθώς η βορειοαμερικανική πλάκα έπεσε προς τα δυτικά κατά τα τελευταία 16,5 εκατομμύρια χρόνια, το καυτό σημείο που βρίσκεται τώρα κάτω από την ευρύτερη περιοχή του Yellowstone άφησε ένα στρώμα ηφαιστειακών κοιτασμάτων στην κοιλάδα ποταμών Snake River του Idaho.

Η θερμότητα από το στρώμα του μανδύα έχει λειώσει τους βράχους στο φλοιό και δημιούργησε δύο θαλάμους μάγματος μερικώς λειωμένου, μερικώς στερεού βράχου κοντά στην επιφάνεια του Yellowstone. Η θερμότητα από το ρηχότερο θάλαμο μάγματος προκάλεσε την έκταση και την άνοδο της περιοχής του φλοιού πάνω από αυτό. Η πίεση στην υπερκείμενη κρούστα είχε ως αποτέλεσμα αυξημένη σεισμική δραστηριότητα κατά μήκος των νεοσυσταθέντων ρηγμάτων. Τελικά, αυτά τα ρήγματα έφθασαν στο θάλαμο μάγματος και το μάγμα έπεσε μέσα από τις ρωγμές. Η διαφυγή του μάγματος απελευθέρωσε την πίεση μέσα στο θάλαμο, γεγονός που επέτρεψε επίσης να διαφύγουν τα ηφαιστειακά αέρια και να εκταθούν εκρηκτικά σε μια τεράστια ηφαιστειακή έκρηξη. Η έκρηξη απελευθέρωσε άφθονη ηφαιστειακή τέφρα και αέρια στην ατμόσφαιρα και παρήγαγε γρήγορα, υπερβολικά καυτά ρεύματα συντριμμίων (πυροκλαστικές ροές) πάνω από το υπάρχον τοπίο. Καθώς ο υπόγειος θάλαμος μάγματος εκκενώθηκε, το έδαφος πάνω από αυτό κατέρρευσε και δημιούργησε την πρώτη από τις τρεις καλδές του Yellowstone.

Αυτή η έκρηξη πριν από 2,1 εκατομμύρια χρόνια, συγκαταλέγεται μεταξύ των μεγαλύτερων ηφαιστειακών εκρήξεων που είναι γνωστές ως ανθρωπογενείς απελευθερώνοντας 5,790 τετραγωνικά μίλια με τέφρα, τόσο μακριά όσο το Μιζούρι. Το σύνολο των εκτοξευόμενων

ηφαιστειακών υλικών εκτιμάται ότι ήταν 6.000 φορές μεγαλύτερο από τον όγκο του υλικού που απορρίφθηκε κατά τη διάρκεια της έκρηξης του Mt. St. Helens, στην Ουάσινγκτον.

Μια δεύτερη σημαντική, αν και μικρότερη, ηφαιστειακή έκρηξη σημειώθηκε στο δυτικό άκρο της πρώτης καλντέρας πριν από περίπου 1,3 εκατομμύρια χρόνια. Η τρίτη και πιο πρόσφατη τεράστια ηφαιστειακή έκρηξη πριν από 640.000 χρόνια δημιούργησε την σημερινή Καλντέρα του Yellowstone, 30 με 45 μίλια. Από τότε, 80 μικρότερες εκρήξεις έχουν συμβεί. Περίπου 174.000 χρόνια πριν, ένας από αυτούς δημιούργησε αυτό που είναι τώρα η λίμνη του West Thumb του Yellowstone. Κατά τη διάρκεια και μετά από αυτές τις ισχυρές εκρήξεις οι ρέουσες μάζες λάβας υπό την μορφή ιριδίζουσας λάβας και οι λιγότερο ογκώδεις ροές λάβας βασάλτη εν μέρει γεμίζουν το πάτωμα της καλντέρας και το περιβάλλον έδαφος. Η νεότερη από αυτές τις ροές λάβας είναι αυτή των 70.000 ετών Pitchstone στη νοτιοδυτική γωνία του Εθνικού Πάρκου Yellowstone.

Από την τελευταία από τις τρεις εκρήξεις που σχηματίζουν την καλδέρα, η πίεση από το ρηχό σώμα της μάγματος έχει σχηματίσει δύο αναζωογονητικούς θόλους μέσα στην Καλντέρα του Yellowstone. Το μάγμα μπορεί να είναι μόλις 3-8 μίλια κάτω από το Sour Creek Dome και 8-12 μίλια κάτω από το Mallard Lake Dome και οι δύο θόλοι διογκώνονται και υποχωρούν καθώς ο όγκος των μαγματικών ή υδροθερμικών υγρών αλλάζει κάτω από αυτά. Ολόκληρο το δάπεδο της καλντέρας ανυψώνεται ή υποχωρεί, αλλά όχι τόσο όσο οι δύο θόλοι. Τον περασμένο αιώνα, το δάπεδο της καλντέρας έχει αναπτύξει τάση να γέρνει προς το νότο. Ως αποτέλεσμα, οι νότιες ακτές της λίμνης Yellowstone έχουν υποχωρήσει και τα δέντρα στέκονται τώρα στο νερό, και το βόρειο άκρο της λίμνης έχει ανέβει σε μια αμμώδη παραλία στη γέφυρα αλειίας.

Αξιοσημείωτη παραμόρφωση του εδάφους κατά μήκος του κεντρικού άξονα της καλντέρας παρατηρήθηκε μεταξύ της Παλιάς Πίστης και της Λευκής Λίμνης στην κοιλάδα του Pelican στην ιστορική εποχή. Οι έρευνες για υποτιθέμενες παραμορφώσεις εδάφους ξεκίνησαν το 1975 χρησιμοποιώντας έρευνες κάθετης κίνησης των σημείων αναφοράς στο έδαφος. Μέχρι το 1985 οι έρευνες αποφάνθηκαν άνευ προηγούμενου ανύψωση ολόκληρης της καλντέρας πέρα από ένα μέτρο. Οι μεταγενέστερες μετρήσεις GPS αποκάλυψαν ότι η καλντέρα πήγε σε ένα επίπεδο καθίζησης μέχρι το 2005, όταν η καλντέρα επέστρεψε σε ένα σημείο ακραίας ανύψωσης. Η μεγαλύτερη κατακόρυφη μεταβολή καταγράφηκε στο σταθμό GPS White Lake, στην ανατολική πλευρά της καλντέρας, όπου η συνολική αύξηση από το 2004 έως το 2010 ήταν περίπου 27 εκατοστά. Ο ρυθμός ανόδου επιβραδύνθηκε το 2008 και η καλντέρα άρχισε να υποχωρεί και πάλι κατά το πρώτο εξάμηνο του 2010. Η αύξηση αυτή πιστεύεται ότι προκαλείται από την κίνηση βαθιών υδροθερμικών υγρών ή τη λειωμένη πέτρα στο ρηχό σύστημα μαγματικών καρτών σε βάθος περίπου 10 χλμ. κάτω από την επιφάνεια. Μια καλντέρα μπορεί να υποστεί επεισόδια ανύψωσης και καθίζησης για χιλιάδες χρόνια χωρίς να εκραγεί. Συγκεκριμένα, οι αλλαγές στην άνοδο και καθίζηση έχουν συσχετιστεί με τις αυξήσεις της σεισμικής δραστηριότητας. Η πλευρική εκκένωση αυτών των υγρών μακριά από την καλντέρα και οι συνοδευτικοί σεισμοί, η καθίζηση και η ανύψωση ανακουφίζουν από την πίεση και θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως φυσική βαλβίδα απελευθέρωσης πίεσης που θα εξισοροπήσει την επαναφορά του μάγματος και θα διατηρήσει το Yellowstone ασφαλές από τις ηφαιστειακές εκρήξεις.

Η πιο πιθανή μελλοντική δραστηριότητα θα είναι η παρουσία από ροές λάβας, όπως εκείνες που συνέβησαν μετά την τελευταία μεγάλη έκρηξη και λιγότερη πιθανή είναι μια νέα ηφαιστειακή έκρηξη. Μια ροή λάβας θα διαρρέει αργά για περιόδους ίσες με μήνες και χρόνια, αφήνοντας αρκετό χρόνο στους υπεύθυνους διαχειριστές να αξιολογήσουν την κατάσταση και να προστατεύσουν τους ανθρώπους. Ωστόσο δεν υπάρχουν επιστημονικά στοιχεία που να δείχνουν ότι μια τέτοια ροή λάβας θα συμβεί σύντομα.

Για την παρακολούθηση της ηφαιστειακής και σεισμικής δραστηριότητας στην περιοχή του Yellowstone, το παρατηρητήριο ηφαιστείου Yellowstone (YVO) ιδρύθηκε το 2001. Το YVO είναι σύμπραξη επιστημόνων από την Αμερικανική Γεωλογική Έρευνα, Εθνικό Πάρκο, Πανεπιστήμιο της Γιούτα, Πανεπιστήμιο του Ουαϊόμινγκ, Πανεπιστήμιο NAVSTAR Consortium (UNAVCO) και τις κρατικές γεωλογικές έρευνες του Ουαϊόμινγκ, της Μοντάνα και του Αϊντάχο. Οι επιστήμονες της YVO παρακολουθούν το ηφαίστειο Yellowstone με ένα πραγματικό δίκτυο παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο 26 σεισμικών σταθμών, 16 δέκτες GPS και 11 σταθμούς μέτρησης ροής. Οι επιστήμονες συλλέγουν επίσης πληροφορίες σχετικά με τη θερμοκρασία, τη χημεία και τις συγκεντρώσεις αερίων σε επιλεγμένα υδροθερμικά χαρακτηριστικά και τις συγκεντρώσεις χλωριούχων στα μεγάλα ποτάμια. Πρόκειται ουσιαστικά για μια μηνιαία σύνοψη δραστηριότητας, παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο της σεισμικότητας και της ροής των υδάτων, καθώς και σχεδόν σε πραγματικό χρόνο παρακολούθηση της παραμόρφωσης εδάφους.

3.4.2. Το ηφαίστειο Yellowstone σήμερα

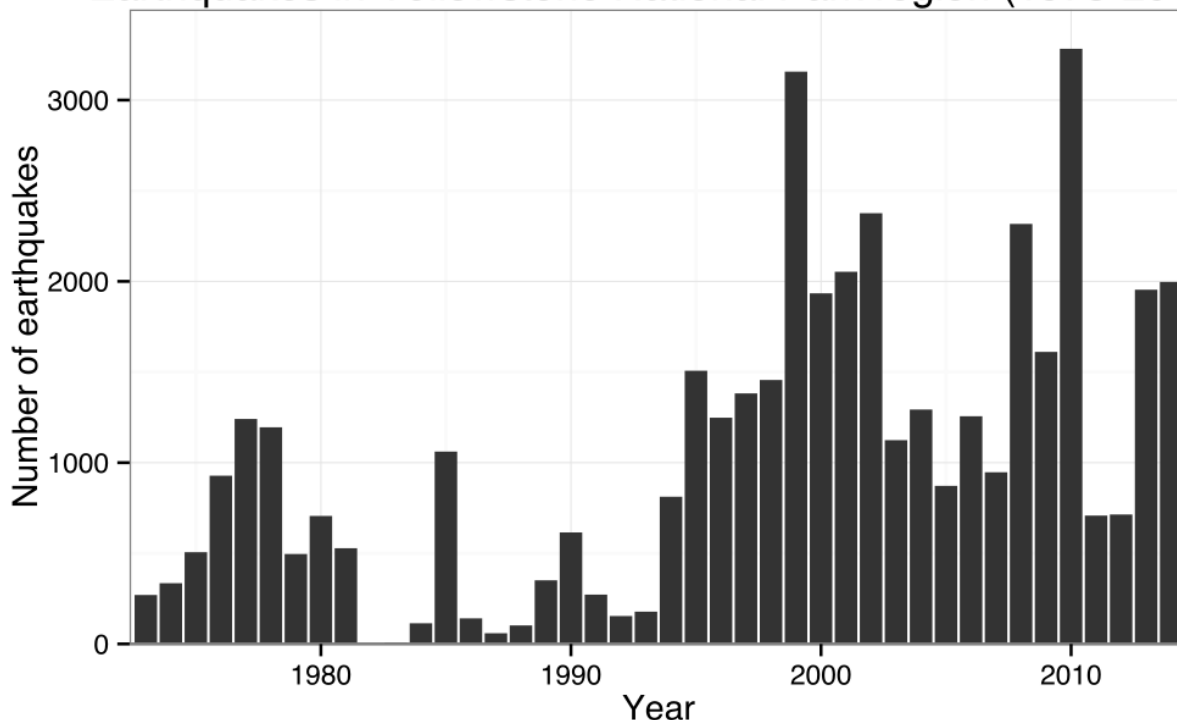
Το ηφαίστειο Yellowstone έχει καταγράψει στην ιστορία του ήδη δύο έντονες και μεγάλες εκρήξεις κατά τα τελευταία 2,1 εκατομμύρια χρόνια. Αυτά τα έντονα φαινόμενα σίγουρα κατέστρεψαν το γύρω τοπίο, αλλά ακόμα κι αν άλλο παρόμοιο γεγονός συνέβαινε σήμερα, θα μπορούσαμε να πούμε ότι πολιτισμός θα παρέμενε χωρίς να αλλοιωθεί ιδιαίτερος. Το πιο σημαντικό όμως είναι ότι, το Yellowstone δεν έχει μόνο μια μεγάλη εμφάνιση. Για το μεγαλύτερο μέρος του ιστορικού του παρελθόντος, έχει εμπλακεί σε εκρήξεις που παράγουν ροή λάβας ή, πιο συχνά, σε υδροθερμικές εκρήξεις, οι οποίες είναι πολύ λιγότερο απειλητικές από την υπερφυσικότητα. Οποιαδήποτε μελλοντική έκρηξη ή αναταραχή, τότε, είναι πολύ πιο πιθανό να είναι αυτού του τύπου από οτιδήποτε άλλο σχετικό.

Σήμερα, το ηφαίστειο Yellowstone δεν έχει ακόμα τουλάχιστον δώσει στοιχεία ότι μπορεί να ξεσπάσει καθόλου. Στην πραγματικότητα, καθώς η βορειοαμερικανική πλάκα συνεχίζει να κινείται διαμέσου του στάσιμου τμήματος του υλικού από το μανδύα που τροφοδοτεί το ηφαιστειακό σύστημα, υπάρχει η πιθανότητα ότι το Yellowstone δεν θα ξεσπάσει ξανά καθώς οι πυρκαγιές που ακολουθούν φτάνουν όλο και πιο μακριά.

Σε κάθε περίπτωση, το Yellowstone είναι ένα από τα πιο έντονα ελεγχόμενα ηφαίστεια στον πλανήτη. Εάν επρόκειτο να εκραγεί, οι επιστήμονες θα γνωρίζουν πολύ νωρίτερα ότι θα το έπρατταν. Θα έβλεπαν μια δραματική αλλαγή στην ηφαιστειακή δραστηριότητα στην περιοχή, θερμικές αιχμές, σημαντική παραμόρφωση εδάφους και πολλές σεισμικές εκρήξεις καθώς το μάγμα μετανάστευσε προς τα πάνω μέσω του φλοιού. Όσον αφορά τους σεισμούς συμβαίνουν πολύ συχνά στο Yellowstone, πολλές χιλιάδες ετησίως, στην πραγματικότητα, για διάφορους λόγους, και πολλοί απλά δεν είναι αντιληπτοί από τον άνθρωπο. Εάν υπερθερμανθεί, υπό υπόγεια πίεση, τότε υγρά βρίσκουν έναν νέο τρόπο μέσα από την κρούστα, ώστε να γίνει πιο εύκολα αντιληπτό κάποια κούνημα. Ομοίως, η περιοχή, που διασχίζεται από ρήγματα, υφίσταται επέκταση καθώς η πλάκα της Βόρειας Αμερικής εκτείνεται λίγο. Αυτό προκαλεί πτώσεις σε αυτά τα ρήγματα, γεγονός που κατά συνέπεια προκαλεί επίσης σεισμικές δονήσεις. Οι ηφαιστειακές και τεκτονικές ενέργειες στην περιοχή προκαλούν μεταξύ 1.000 και 2.000 μετρήσιμων σεισμών ετησίως. Οι περισσότεροι είναι σχετικά μικροί, με μέγεθος 3 ή ασθενέστερο. Περιστασιακά, ανιχνεύονται πολυάριθμοι σεισμοί σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, γεγονός που είναι γνωστό ως σμήνος σεισμού. Το 1985, μετρήθηκαν περισσότεροι

από 3.000 σεισμοί σε διάστημα αρκετών μηνών. Πάνω από 70 μικρότερα σμήνη εντοπίστηκαν μεταξύ του 1983 και του 2008. Το USGS αναφέρει ότι αυτά τα σμήνη προκαλούνται πιθανότατα από γλίστρες πάνω σε προϋπάρχοντα ρήγματα και όχι από κινήσεις μαγματικών ή υδροθερμικών ρευστών. Τον Δεκέμβριο του 2008, συνεχίζοντας τον Ιανουάριο του 2009, ανιχνεύθηκαν πάνω από 500 σεισμοί στο βορειοδυτικό άκρο της λίμνης του Yellowstone για διάστημα επτά ημερών, με το μεγαλύτερο μέγεθος να καταγράφει μέγεθος 3,9. Ένα άλλο σμήνος ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2010, μετά τον σεισμό της Αϊτής και πριν από τον σεισμό της Χιλής. Με 1.620 μικρούς σεισμούς μεταξύ 17 Ιανουαρίου 2010 και 1 Φεβρουαρίου 2010, ο σμήνος αυτός ήταν ο δεύτερος μεγαλύτερος που καταγράφηκε ποτέ στην Καλντέρα του Yellowstone. Ο μεγαλύτερος από αυτούς τους κραδασμούς ήταν μεγέθους 3,8 που συνέβη στις 21 Ιανουαρίου 2010. Αυτό το σμήνος έφτασε στα επίπεδα μιας ισχυρής σεισμικής δραστηριότητας στις 21 Φεβρουαρίου. Στις 30 Μαρτίου 2014, ένας σεισμός μεγέθους 4,8 έπληξε τον Yellowstone, ο μεγαλύτερος που καταγράφηκε εκεί από τον Φεβρουάριο του 1980. Τον Φεβρουάριο του 2018, σημειώθηκαν περισσότεροι από 300 σεισμοί, με το μεγαλύτερο να έχει μέγεθος 2.9.

Earthquakes in Yellowstone National Park region (1973-2014)



Εικόνα 13: Απεικόνιση των σεισμών στο Yellowstone National Park για την περίοδο 1973-2014 (πηγή: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9e/Yellowstone_earthquakes_history.svg/1024px-Yellowstone_earthquakes_history.svg.png)

Υπάρχει περίπτωση, όμως, η NASA να διαθέτει κάποιο έξυπνο σχέδιο, έτσι ώστε το ηφαίστειο να μην εκραγεί ποτέ ξανά, αναφέρει δημοσίευμα της εφημερίδας express. Το tech insider αποκάλυψε σε μία μίνι σειρά ντοκιμαντέρ, πως ο διαστημικός οργανισμός έχει εργαστεί πάνω σε ένα πρότζεκτ αξίας 3,7 δισεκατομμυρίων, για να «ψύξει» το ηφαίστειο. Το πρόγραμμα, που φέρει την ονομασία «Υπεράσπιση του ανθρώπινου πολιτισμού από υπερηφαιστειακές

εκρήξεις» ξεκίνησε το 2015 σε ένα εργαστήριο στην Καλιφόρνια. «Η προοπτική του να επιχειρήσεις να σταματήσεις την έκρηξη ενός υπερηφαιστείου μοιάζει μάταια και ίσως αδύνατη. Ωστόσο, έχει προταθεί ότι η υδροθερμική κυκλοφορία στο Yellowstone μπορεί να ψύξει το μάγμα και μπορεί να μειώσει τους μακροχρόνιους ηφαιστειακούς κινδύνους», σημειώνεται στο ίδιο απόσπασμα του ντοκιμαντέρ.

Ηφαίστεια όπως το Yellowstone εκρήγνυνται όταν το λιωμένο πέτρωμα, γνωστό ως μάγμα, ανεβαίνει στην επιφάνεια ακολουθώντας τον μανδύα της Γης που λιώνει λόγω της μετατόπισης των τεκτονικών πλακών. Επί του παρόντος, περίπου 60 έως 70% αυτής της ενέργειας εκλύεται στην ατμόσφαιρα μέσω του νερού και των πιδάκων του, αλλά το υπόλοιπο συσσωρεύεται στον θάλαμο μάγματος, αυξάνοντας την πίεση στην «εύθραυστη» κορυφή του. Όταν η πίεση θα ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο όριο, ο θάλαμος θα σπάσει και το ηφαίστειο θα εκραγεί. Το σχέδιο της NASA προβλέπει τη διάνοιξη μιας σειράς πηγαδιών βάθους 6,2 μέτρων γύρω από την περίμετρο του υπερηφαιστείου. Στη συνέχεια τα πηγάδια αυτά θα γεμίσουν με παγωμένο νερό, τα οποία με τον καιρό θα πάγωναν τον βράχο γύρω από τον θάλαμο του μάγματος. Η NASA, ωστόσο, δεν θα δοκιμάσει το σχέδιο σύντομα. Σύμφωνα με τους τελευταίους υπολογισμούς, εκτιμάται ότι το σύστημα θα χρησιμοποιούσε 20 gigawatts ενέργειας για να μειώσει το Yellowstone σε ασφαλή θερμοκρασία. Κάτι τέτοιο όχι μόνο θα μπορούσε να διαρκέσει περισσότερο από 16.000 χρόνια αλλά θα κόστιζε και περισσότερο από 3,5 δισεκατομμύρια δολάρια.

Μια μελέτη του 2013, για παράδειγμα, έδειξε ότι η δεξαμενή μάγματος που τροφοδοτεί το supervolcano είναι περίπου δυόμισι φορές μεγαλύτερη από τις προηγούμενες εκτιμήσεις. Οι επιστήμονες πιστεύουν επίσης ότι η δεξαμενή αποστραγγίζεται μετά από κάθε τεράστια έκρηξη, έτσι σκέφτηκαν ότι θα έπρεπε να πάρει πολύ χρόνο για να ξαναγεμίσει. Βάσει της νέας μελέτης, φαίνεται ότι το μάγμα μπορεί να ενεργοποιήσει γρήγορα το ηφαίστειο που είναι δυνητικά εκρηκτικό στη γεωλογική αναλαμπή ενός ματιού. "Είναι συγκλονιστικό πόσο λίγος χρόνος απαιτείται για να μην είναι ήρεμο το ηφαιστειακό σύστημα και να το καταστήσει έτοιμο για μια νέα έκρηξη", ανέφερε η συγγραφέας της μελέτης Hannah Shamloo στους New York Times. Ακόμα, το Yellowstone είναι ένα από τα καλύτερα ηφαιστειακά ελεγχόμενα στον κόσμο, σημειώνει ο Michael Poland, ο σημερινός Επιστημονικός Υπεύθυνος του Παρατηρητηρίου Ηφαιστείου του Yellowstone για την Γεωλογική Έρευνα των Η.Π.Α. Μια ποικιλία αισθητήρων και δορυφόρων ψάχνει πάντα για αλλαγές, και αυτή τη στιγμή το supervolcano δεν φαίνεται να αποτελεί απειλή. "Βλέπουμε ενδιαφέροντα πράγματα όλη την ώρα, αλλά δεν έχουμε δει τίποτα που να μας οδηγήσει στο να πιστέψουμε ότι το είδος του μαγματικού γεγονότος που περιγράφουν οι ερευνητές συμβαίνει", λέει η Πολωνία μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, προσθέτοντας ότι η έρευνα συνολικά είναι " κάπως σε προκαταρκτικό στάδιο, αλλά αρκετά εντυπωσιακή ως προς τα ευρήματα της. "

Σήμερα, το Εθνικό Πάρκο του Yellowstone οφείλει μεγάλο μέρος της πλούσιας γεωλογικής ομορφιάς στο βίαιο παρελθόν του. Τα θαύματα, όπως η γέφυρα του Παλαιού Πιστού και η Μεγάλη Πρισματική Άνοιξη, είναι προϊόντα της γεωθερμικής δραστηριότητας που εξακολουθεί να καταιωνίζει κάτω από το πάρκο, το οποίο οδηγείται με τη σειρά του από τη τεράστια μάζα του μάγματος που τροφοδοτεί το supervolcano. Περίπου 630.000 χρόνια πριν, μια ισχυρή έκρηξη η οποία συγκλόνησε την περιοχή, ανεβάζοντας τμήματα βράχου και τέφρας ύψους 240 κυβικών μιλίων και δημιουργώντας την καλντέρα του Yellowstone, μια ηφαιστειακή καθίζηση πλάτους 40 μίλια, που τώρα περιστοιχίζει το μεγαλύτερο μέρος του εθνικού πάρκου. Αυτή η έκρηξη άφησε πίσω του το Laff Creek Tuff, την κατάθεση τέφρας που χρησιμοποίησε ο Shamloo και ο συνάδελφός της ASU Christy Till για το έργο τους, το οποίο παρουσίασαν τον Αύγουστο σε μια συνάντηση σχετικά με ηφαίστεια στο Όρεγκον. Το ζευγάρι παρουσίασε επίσης

μια παλαιότερη έκδοση της μελέτης τους σε μια συνάντηση το 2016 της Αμερικανικής Γεωφυσικής Ένωσης.

Με βάση τέτοια απολιθώματα όπως αυτά, οι επιστήμονες πιστεύουν ότι το supervolcano έχει δει τουλάχιστον δύο άλλες εκρήξεις σε αυτήν την κλίμακα τα τελευταία δύο εκατομμύρια χρόνια. Ευτυχώς βέβαια για εμάς, το supervolcano ήταν σε μεγάλο βαθμό αδρανές από τότε που οι πρώτοι άνθρωποι έφτασαν στην Αμερική. Ενώ μια ροή λάβας και ακολουθία σεισμών έχουν γεμίσει περιοδικά την καλδέρα απαρτίζοντας την από λάβα και τέφρα, η τελευταία έγινε περίπου 70.000 χρόνια πριν.

Το 2011, οι επιστήμονες αποκάλυψαν ότι το έδαφος πάνω από το θάλαμο μάγματος μετατοπίστηκε μέχρι και 10 ίντσες σε ένα διάστημα περίπου επτά ετών. "Είναι μια εξαιρετική αύξηση, επειδή καλύπτει μια τόσο μεγάλη περιοχή και τα ποσοστά είναι τόσο υψηλά", δήλωσε στο National Geographic εκείνη την εποχή ο Bob Smith του Πανεπιστημίου της Γιούτα, ειδικός στο ηφαιστειακό φαινόμενο του Yellowstone. Η διόγκωση της δεξαμενής μάγματος που είχε σχηματιστεί που ήταν υπεύθυνη για την ανάδυσση του, ήταν πολύ βαθιά για να δημιουργήσει φόβους για επικείμενη καταστροφή, είπε ο Σμιθ και αντ' αυτού η ήπια «αναπνοή» της καλντέρας προσέφερε πολύτιμες ενδείξεις στη συμπεριφορά του ηφαιστείου. Το 2012, μια άλλη ομάδα ανέφερε ότι τουλάχιστον μία από τις προηγούμενες υπερ-εκρήξεις μπορεί να ήταν πραγματικά δύο γεγονότα, υπονοώντας ότι τέτοια γεγονότα μεγάλης κλίμακας μπορεί να είναι πιο κοντά από μια σκέψη. Αλλά σχεδόν όλοι όσοι μελετούν την ιστορία της εποχής του Yellowstone λένε ότι τώρα δεν έχουμε τρόπο να μάθουμε πότε θα συμβεί η επόμενη μεγάλη έκρηξη. Από την πλευρά της, η Γεωλογική Έρευνα των Η.Π.Α. θεωρεί ότι η πιθανότητα μιας άλλης τεράστιας έκρηξης του Yellowstone είναι 1 στις 730.000, δίνοντας περίπου την ίδια ευκαιρία με μια καταστροφική σύγκρουση με αστεροειδή.

Μεταξύ των Ινδιάνων, και έπειτα μεταξύ των εξερευνητών, και αργότερα μεταξύ των τουριστών και των επιστημόνων, το Yellowstone ήταν γνωστό για τις δράσεις του και τα θαύματά του. Σε λίγα σημεία τα δάση του περιέχουν δέντρα τα οποία έχουν μετατραπεί σε πέτρα. Το απολιθωμένο ξύλο δεν βρέθηκε σχεδόν ποτέ να στέκεται όρθιο στα δάση αυτά, αλλά στις ηφαιστειακές εκρήξεις του Yellowstone που έγιναν στο μακρινό παρελθόν θάφτηκε στα εδάφη του στο πέρασμα των χρόνων. Στη συνέχεια, για εκατομμύρια χρόνια, οι κορμοί των δέντρων μεταλλοποιήθηκαν ή "απολιποβολήθηκαν". Η πιο αξιοσημείωτη επίδραση του θαλάμου μάγματος κάτω από το Yellowstone είναι αυτό που συμβαίνει καθώς το νερό βλέπει προς τα κάτω μέσα από ρωγμές στα βράχια. Το Yellowstone περιέχει πάνω από τους μισούς θερμοπίδακες του κόσμου, αποτελούμενοι με φυσαλίδες με λάσπη, σφυρηλατημένες οπές ατμού, σιντριβάνια τραβερτίνης και πισίνες ζεστού νερού σε διάφορες αποχρώσεις του νερού ως κίτρινου, κόκκινου και πορτοκαλί. Από τα δάση και τα λιβάδια ανεβαίνουν σύννεφα ατμού και το χειμώνα το γυμνό έδαφος των θερμικών περιοχών προσφέρει χειμωνιάτικη ατμόσφαιρα σε μεγάλο υψόμετρο για τα βουβάλια και τους τάρανδους που κανονικά θα έπρεπε να κατέβουν σε χαμηλότερες, πιο προστατευμένες περιοχές. Οι εκρήξεις του ατμού εκσφενδονίζουν όγκους μάζας αποτελούμενους από βράχους και χαλίκι.

3.5. Το ηφαίστειο Πινατούμπο

Το Πινατούμπο είναι ένα ενεργό στρωματόμορφο ηφαίστειο στα βουνά Zambales, το οποίο βρίσκεται στο όριο των επαρχιών των Φιλιππίνων Zambales, Tarlac και Pampanga, όλα στην κεντρική Luzon στο βόρειο νησί Luzon. Η εκρηκτική του ιστορία ήταν άγνωστη στους περισσότερους πριν από τις ηφαιστειακές δραστηριότητες προ του ηφαιστείου του 1991, λίγο πριν τον Ιούνιο. Το Πινατούμπο υπέστη βαριά διάβρωση, που το κατέστησε δυσδιάκριτο και σκοτεινό. Καλύφθηκε με πυκνά δάση που υποστήριζαν πληθυσμό αρκετών χιλιάδων αυτόχθονων. Πρόκειται για το πιο γνωστό για την έκρηξη του ηφαιστειακού εκρηκτικού δείκτη (VEI) 6 στις 15 Ιουνίου 1991, τη δεύτερη μεγαλύτερη επίγεια έκρηξη του 20ού αιώνα μετά την έκρηξη του Novarupta στην Αλάσκα το 1912. Συμπληρωματικά η έκρηξη ήταν η άφιξη του Typhoon Yunya, φέρνοντας ένα θανατηφόρο μίγμα τέφρας και βροχής στις πόλεις που περιβάλλουν το ηφαίστειο. Οι προβλέψεις κατά την έναρξη της έκρηξης του κλίματος οδήγησαν στην εκκένωση δεκάδων χιλιάδων στρεμμάτων για την προστασία των ανθρώπων από τις γύρω περιοχές, εξοικονομώντας πολλές ζωές. Οι περιβάλλοντες χώροι υπέστησαν σοβαρές ζημιές από πυροκλαστικές υπερτάσεις, πτώσεις τέφρας και, στη συνέχεια, από τις πλημμύρες που προκλήθηκαν από το νερό των βροχοπτώσεων που κινητοποιούσαν προηγούμενες ηφαιστειακές συγκεντρώσεις. Αυτό προκάλεσε εκτεταμένη καταστροφή στην υποδομή και άλλαξε ποτάμια και οικοδομικά συστήματα για χρόνια μετά την έκρηξη.



Εικόνα 14: Η στήλη έκρηξης του Mount Πινατούμπο στις 12 Ιουνίου 1991, τρεις ημέρες πριν από την έκρηξη του κλίματος (πηγή: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thu mb/3/3f/P inatubo91eruption_clark_air_base.jpg/270pxPinatubo91eruption_clark_air_base.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thu_mb/3/3f/P_inatubo91eruption_clark_air_base.jpg/270pxPinatubo91eruption_clark_air_base.jpg))

Το ηφαίστειο τοποθετείται 87 χλμ. βορειοδυτικά της Μανίλα, της πρωτεύουσας των Φιλιππίνων. Κοντά στο Όρος Πινατούμπο, οι Ηνωμένες Πολιτείες διατήρησαν δύο μεγάλες στρατιωτικές βάσεις στην περιοχή. Ο Ναυτικός Σταθμός Subic Bay των ΗΠΑ ήταν Νότια του Πινατούμπο και η έκταση της Clark Air Base ήταν Ανατολικά της κορυφής του ηφαιστείου. Περίπου 6 εκατομμύρια άτομα κατοικούν σε μικρή απόσταση από το ηφαίστειο.

Τα αποτελέσματα της έκρηξης έγιναν αισθητά σε όλο τον κόσμο. Εκτόξευσε περίπου 10 εκατομμύρια τόνους από το μάγμα και 20 εκατομμύρια τόνους διοξειδίου του άνθρακα, φέρνοντας τεράστιες ποσότητες μεταλλικών και τοξικών μετάλλων στο επιφανειακό περιβάλλον. Έχει εγχύσει τα περισσότερα σωματίδια στη στρατόσφαιρα από οποιαδήποτε έκρηξη από το Krakatoa το 1883. Κατά τους επόμενους μήνες, τα αερολύματα σχημάτιζαν μια σφαιρική στρώση θολαίου οξέος θολώματος. Οι παγκόσμιες θερμοκρασίες μειώθηκαν κατά περίπου 0,5 ° C κατά τα έτη 1991-93 και η μείωση του όζοντος παρατηρήθηκε προσωρινά σε σημαντική αύξηση.

Η κορυφή του Πινατούμπο πριν από την έκρηξη του 1991 ήταν 1.745 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, μόλις περίπου 600 μέτρα πάνω από τις κοντινές πεδιάδες, και μόλις περίπου 200 μέτρα (660 πόδια) υψηλότερη από τις γύρω κορυφές, γεγονός που το κάλυψε σε μεγάλο βαθμό. Είναι μέρος μιας αλυσίδας των ηφαιστείων που βρίσκονται κατά μήκος της δυτικής πλευράς του νησιού Luzon που ονομάζεται Zambales Mountains. Το Πινατούμπο ανήκει στην κατηγορία Cabusilan των βουνών Zambales, η οποία αποτελείται από το όρος Mt. Cuadrado, Mt. Negron, Mt. Mataba και Mt. Pinatubo. Είναι ηφαίστεια υποβύθισης, που σχηματίζονται από την Ευρασιατική πλάκα που ολισθαίνει κάτω από την κινητή ζώνη των Φιλιππίνων κατά μήκος της γέφυρας του Μανίλα στα δυτικά. Το Πινατούμπο και τα άλλα ηφαίστεια σε αυτή την ηφαιστειακή ζώνη προκύπτουν λόγω της μαγματικής απόφραξης από αυτό το όριο της πλάκας υποπίεσης. Το Πινατούμπο περιβάλλεται στα δυτικά από το Ομφιολίτικο Ζαμπαλέ, το οποίο είναι ένα ανατολικό βυθισμένο τμήμα του ωκεάνιου φλοιού του Eocene που ανεβάστηκε κατά τη διάρκεια του αργά Oligocene. Ο σχηματισμός Tarlac βόρεια, ανατολικά και νοτιοανατολικά του Πινατούμπο αποτελείται από ιζήματα θαλάσσιων, μη-θαλάσσιων και ηφαινοκλαστικών που σχηματίστηκαν στα τέλη του Μιοκαιίου και του Πλειόκεν.

Η πιο πρόσφατη μελέτη του όρους Πινατούμπο πριν από τις δραστηριότητες του 1991 ήταν η συνολική γεωλογική μελέτη που πραγματοποιήθηκε το 1983 και το 1984 από την FG Delfin για την Philippine National Oil Company ως μέρος των επιφανειακών ερευνών της περιοχής πριν από διερευνητικές γεωτρήσεις και δοκιμές γεωθερμικών πηγών ενέργειας από το 1988 έως το 1990. Αναγνώρισε δύο ιστορίες ζωής του βουνού, τις οποίες ταξινόμησε ως "πρόγονο" και "μοντέρνο" Πινατούμπο.

3.5.1. Ιστορική αναδρομή για το ηφαίστειο Πινατούμπο

Στις 16 Ιουλίου 1990, ένας σεισμός μεγέθους 7.8, συγκρίσιμος με το μεγάλο σεισμό το 1906 στο Σαν Φρανσίσκο, που χτύπησε την Καλιφόρνια, χτύπησε περίπου 60 μίλια βορειοανατολικά του όρους Πινατούμπο στο νησί Luzon στις Φιλιππίνες, ανακινώντας και πιέζοντας το περίβλημα της γης κάτω από το ηφαίστειο. Στο όρος Πινατούμπο, αυτός ο μεγάλος σεισμός προκάλεσε κατολίσθηση, μερικούς τοπικούς σεισμούς και βραχυχρόνια αύξηση των ατμοσφαιρικών εκπομπών από μια προϋπάρχουσα γεωθερμική περιοχή, αλλά αλλιώς το

ηφαίστειο φαινόταν να συνεχίζει το 500χρονο ύπνο του χωρίς καμία αναταραχή. Τον Μάρτιο και τον Απρίλιο του 1991, όμως, ο τετηγμένος βράχος (magma) που ανέβαινε προς την επιφάνεια από 32 χιλιόμετρα κάτω από τον Πινατούμπο πυροδότησε μικρούς σεισμούς και προκάλεσε ισχυρές εκρήξεις ατμού που έριξαν τρεις κρατήρες στο βόρειο τμήμα του ηφαιστείου. Χιλιάδες μικροί σεισμοί σημειώθηκαν κάτω από τον Πινατούμπο μέχρι τον Απρίλιο, τον Μάιο και τις αρχές Ιουνίου και πολλές χιλιάδες τόνοι επιβλαβούς αερίου διοξειδίου του θείου εκπέμπονται επίσης από το ηφαίστειο.

Από τις 7 έως τις 12 Ιουνίου, τα πρώτα στοιχεία του μάγματος έφθασαν στην επιφάνεια του Όρους Πινατούμπο. Επειδή είχε χάσει το μεγαλύτερο μέρος του φυσικού αερίου που περιέχεται σε αυτό στο δρόμο προς την επιφάνεια, το μάγμα έσπασε για να σχηματίσει ένα θόλο λάβας αλλά δεν προκάλεσε σπουδαία έκρηξη. Ωστόσο, στις 12 Ιουνίου (Ημέρα Ανεξαρτησίας των Φιλιππίνων), εκατομμύρια κυβικά μέτρα από μάζα αερίου που φθάνουν στην επιφάνεια και εξερράγησαν στην πρώτη εκπληκτική έκρηξη του ηφαιστείου. Όταν ένα ακόμα μαγνητικό φορτίο που φθάνει στο φυσικό αέριο έφτασε στην επιφάνεια του Πινατούμπο στις 15 Ιουνίου, το ηφαίστειο εξερράγη σε μια κατακλυσμική έκρηξη που έριξε περισσότερα από 1 κυβικό μίλι υλικού. Το σύννεφο τέφρας από αυτή την κλιμακωτή έκρηξη αυξήθηκε 22 μίλια στον αέρα. Σε χαμηλότερα υψόμετρα, η τέφρα εμφυσήθηκε προς όλες τις κατευθύνσεις από τους έντονους κυκλωνικούς ανέμους ενός συμπωματικού τυφώνα και οι άνεμοι σε υψηλότερα ύψη έσπρωξαν τη στάχτη προς τα νοτιοδυτικά. Μια κουβέρτα ηφαιστειακής τέφρας, αποτελούμενη από κόκκους ηφαιστειακής άμμου και σκωρίας με ηφαιστειακά μέταλλα και γυαλί, και μεγαλύτερες ελαφρόπετρες με μέγεθος συγκρίσιμο με βότσαλα καλύπτουν την ύπαιθρο. Η λεπτή στάχτη έπεσε τόσο μακριά όσο ο Ινδικός Ωκεανός και οι δορυφόροι παρακολούθησαν το σύννεφο τέφρας αρκετές φορές σε όλο τον κόσμο.



Εικόνα 15: Το ηφαίστειο Πινατούμπο 20 χρόνια μετά την έκρηξη (πηγή: <https://www.nytimes.com/2012/11/28/travel/mount-pinatubo-20-years-after-the-blast.html>)

Τεράστιες χιονοστιβάδες καυτής τέφρας, αερίου και ελαφρόπετρας (πυροκλαστικές ροές) βυθίστηκαν κάτω από τις πλαγιές του Όρους Πινατούμπο, γεμίζοντας κοιλάδες μιας βαθιάς κοιλάδας με φρέσκες ηφαιστειακές καταθέσεις πάχους περίπου 200 μέτρων. Η έκρηξη απομάκρυνε τόση ποσότητα μάγματος και βράχου από κάτω από το ηφαίστειο που κατέρρευσε η κορυφή για να σχηματίσουν μια μεγάλη ηφαιστειακή καθίζηση, την γνωστή καλντέρα, σε απόσταση 2,5 χιλιομέτρων. Πολύ αδύναμες αλλά ακόμα θεαματικές εκρήξεις τέφρας σημειώθηκαν κατά καιρούς μέχρι τις αρχές Σεπτεμβρίου 1991. Από τον Ιούλιο έως τον Οκτώβριο του 1992 χτίστηκε ένας νέος θολωτός θόλος στη νέα καλδέρα, καθώς το φρέσκο μάγμα ανέβαινε βαθιά κάτω από το Πινατούμπο.

Την εποχή της έκρηξης, η Τροπική Θύελλα Υνυα περνούσε στα βορειοανατολικά του βουνού Πινατούμπο, προκαλώντας μεγάλη ποσότητα βροχοπτώσεων στην περιοχή. Η τέφρα που εκτοξεύτηκε από το ηφαίστειο, αναμειγμένη με το νερό στον αέρα, προκάλεσε μια βροχόπτωση τεφρών που έπεσε σε όλο σχεδόν το νησί της Λούζον. Υπήρχαν 10 εκατοστά τέφρας που κάλυπτε έκταση 2000 τετραγωνικών χιλιομέτρων και οι περισσότεροι από τους 800 ανθρώπους που πέθαναν κατά τη διάρκεια της έκρηξης έχασαν τη ζωή τους λόγω του βάρους από τη σκόνη που καταρρέουν. Αν η Τροπική Θύελλα Υνυα δεν ήταν κοντά, οι θάνατοι από το ηφαίστειο θα ήταν πολύ χαμηλότεροι.

Ο ανθρώπινος αντίκτυπος της καταστροφής ήταν συγκλονιστικός. Εκτός από τα 800 άτομα που έχασαν τη ζωή τους, υπήρχαν σχεδόν μισό δισεκατομμύριο δολάρια σε περιουσιακές και οικονομικές ζημιές. Η οικονομία του κεντρικού Λουζόν επηρεάστηκε σε τρομακτικά επίπεδα και οι λαοί της Αετα πλήχθηκαν όσο πιο σκληρά θα μπορούσε κάποιος να φανταστεί. Η πλήρης καταστροφή πολλών χωριών σήμαινε ότι πολλοί άνθρωποι δεν μπόρεσαν να επιστρέψουν στον προηγούμενο τρόπο ζωής τους. Η ηφαιστειακή έκρηξη και οι δύο τυφώνες που ακολούθησαν στην περιοχή όταν ξέσπασε το ηφαίστειο, μετέτρεψαν τη περιοχή των Φιλιππίνων σε μια έρημη γη.

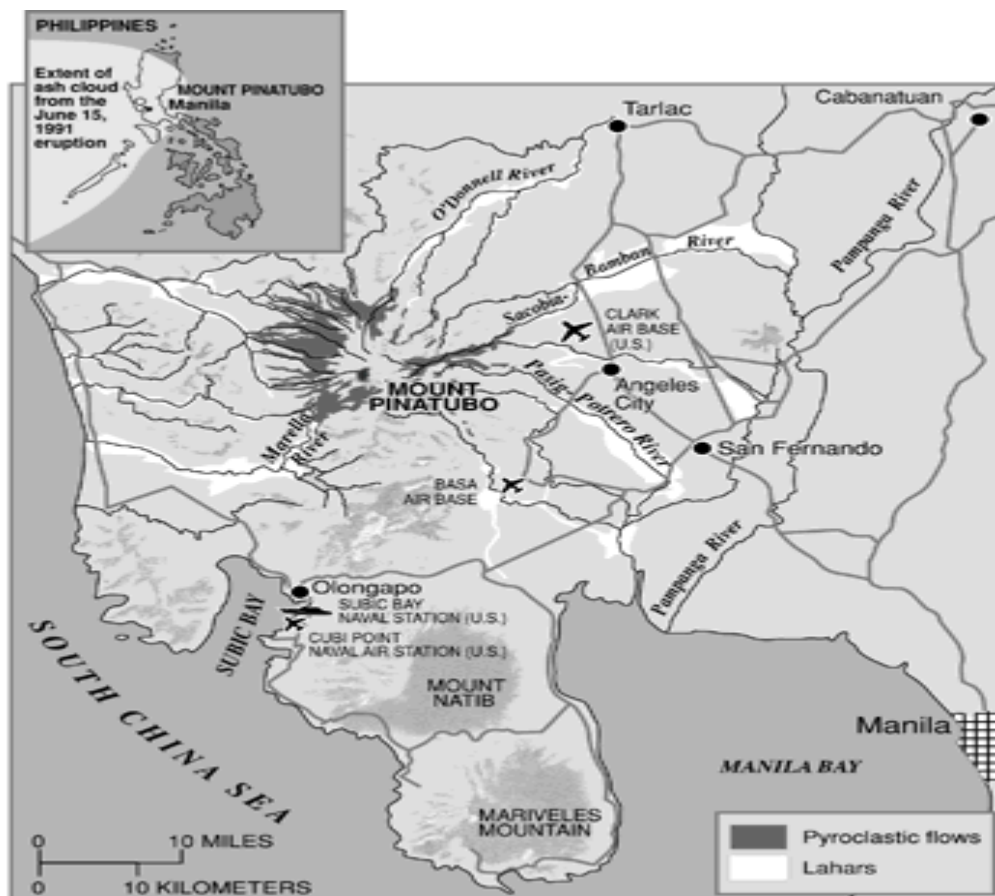
Ακόμη και μετά από περισσότερα από 5 χρόνια, εμφανίζονταν επικίνδυνες επιδράσεις από την έκρηξη του ηφαιστείου Πινατούμπο στις 15 Ιουνίου 1991. Οι πυκνές κοιλότητες πυροκλαστικής ροής που γεμίζουν την κοιλάδα από την έκρηξη μονώθηκαν και διατηρούσαν μεγάλο μέρος της θερμότητάς τους. Αυτές οι αποθέσεις είχαν ακόμα θερμοκρασίες μέχρι 500 °C το 1996 και μπορεί να διατηρούν τη θερμότητα για δεκαετίες. Όταν τα ύδατα από ρέματα ή υπόγεια διήθηση έρχονται σε επαφή με αυτές τις θερμές αποθέσεις, εκρήγνυνται και εξαπλώνονται με λεπτή τέφρα προς τα κάτω. Από την έκρηξη του 1991, οι αποθέσεις τέφρας έχουν επίσης αποκατασταθεί από τις βροχοπτώσεις των μουσώνων και τυφώνων για να σχηματίσουν γιγάντιες λασπώδεις λοφίες ηφαιστειακών υλικών.

Είναι γεγονός ότι η ηφαιστειακή δραστηριότητα μεγάλης κλίμακας μπορεί να διαρκέσει μόνο λίγες μέρες, αλλά η μαζική εκροή αερίων και τέφρας μπορεί να επηρεάσει τα κλιματικά πρότυπα για χρόνια. Τα θειικά αέρια μετατρέπονται σε θειικά αερολύματα, σταγονίδια submicron που περιέχουν στο μεγαλύτερο μέρος θειικό οξύ. Μετά από τις εκρήξεις, αυτά τα σωματίδια αεροζόλ μπορούν να παραμείνουν για τρία έως τέσσερα χρόνια στη στρατόσφαιρα. Σημαντικές εκρήξεις μεταβάλλουν την ισορροπία της ακτινοβολίας της Γης, επειδή τα σύννεφα ηφαιστειακών αερολυμάτων απορροφούν επίγεια ακτινοβολία και διασκορπίζουν μια σημαντική ποσότητα εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, μια επίδραση γνωστή ως "ακτινοβολία" που μπορεί να διαρκέσει από δύο έως τρία χρόνια μετά από μια ηφαιστειακή έκρηξη.

"Οι ηφαιστειακές εκρήξεις προκαλούν βραχυπρόθεσμες κλιματικές αλλαγές και συμβάλλουν στη φυσική μεταβλητότητα του κλίματος", λέει ο Georgiy Stenchikov, καθηγητής της έρευνας στο Τμήμα Περιβαλλοντικών Επιστημών στο Πανεπιστήμιο Rutgers. "Η εξερεύνηση

των επιπτώσεων της ηφαιστειακής έκρηξης μας επιτρέπει να κατανοήσουμε καλύτερα τους σημαντικούς φυσικούς μηχανισμούς στο κλιματικό σύστημα που ξεκινούν από τον ηφαιστειακό εξαναγκασμό". Ο Stenchikov και ο καθηγητής Alan Robock του Πανεπιστημίου Rutgers με τους Hans Graf και Ingo Kirchner του Ινστιτούτου Μετεωρολογίας του Max Planck πραγματοποίησαν μια σειρά κλιματικών προσομοιώσεων που συνδυάζουν παρατηρήσεις με ηφαιστειακά αερολύματα από το Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II (SAGE II) με δορυφορικά δορυφορικά δεδομένα (UARS) από το κέντρο διαστημικών πτήσεων.

Συγκρίνοντας τις προσομοιώσεις του κλίματος από την έκρηξη του Πινατούμπο, με και χωρίς αερολύματα, οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι το κλιματικό μοντέλο υπολόγισε μια γενική ψύξη της παγκόσμιας τροπόσφαιρας, αλλά απέδωσε ένα σαφές μοντέλο θερμοκρασίας του αέρα της επιφάνειας του ηφαιστείου στο βόρειο ημισφαίριο. Η θερμοκρασία της τροπικής χαμηλότερης στρατόσφαιρας αυξήθηκε κατά 4 βαθμούς (4°C) λόγω της απορρόφησης αερολύματος από την επίγεια και την ηλιακή υπέρυθη ακτινοβολία. Το μοντέλο έδειξε ότι η άμεση ακτινοβολία των ηφαιστειακών αερολυμάτων προκαλεί τη γενική στρατοσφαιρική θέρμανση και την ψύξη στην τροπόσφαιρα, με ένα μοτίβο θέρμανσης τροπόσφαιρων το χειμώνα.



Εικόνα 16: Η εκρηκτική έκρηξη του Mount Pinatubo στις Φιλιππίνες στις 15 Ιουνίου 1991 ήταν η δεύτερη μεγαλύτερη ηφαιστειακή έκρηξη αυτού του αιώνα και μακράν η μεγαλύτερη έκρηξη που επηρέασε μια πυκνοκατοικημένη περιοχή. Η έκρηξη παρήγαγε υψηλής ταχύτητας χιονοστιβάδες από καυτή στάχτη και αέριο (πυροκλαστικές ροές), γιγάντιες λασπώδεις ροές (λάχαροι) και ένα σύννεφο ηφαιστειακής τέφρας εκατοντάδων χιλιομέτρων. (Οι βάσεις των Η.Π.Α. έχουν επανέλθει στον έλεγχο των Φιλιππίνων από το 1991.) (πηγή: [https://pubs.usgs.gov/fs/1997/fs113-97/resources/BWPinatu bo.gif](https://pubs.usgs.gov/fs/1997/fs113-97/resources/BWPinatu%20bo.gif))

"Η μεταβολή της θερμοκρασίας έχει διαμορφωθεί σύμφωνα με τις θερμοκρασιακές ανωμαλίες που παρατηρήθηκαν μετά την έκρηξη", λέει ο Stenchikov. «Το μοντέλο της χειμερινής προθέρμανσης μετά την ηφαιστειακή έκρηξη είναι σχεδόν το ίδιο με το μοντέλο της μεταβολής της θερμοκρασίας του χειμώνα που προκαλείται από την υπερθέρμανση του πλανήτη», δείχνει ότι τα ηφαιστειακά αερολύματα εξαναγκάζουν θεμελιώδεις κλιματικούς μηχανισμούς που παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαδικασία της παγκόσμιας αλλαγής.

Αυτό το μοντέλο θερμοκρασίας είναι σύμφωνο με την ύπαρξη μιας ισχυρής φάσης της ταλάντωσης της Αρκτικής, ενός φυσικού μοντέλου κυκλοφορίας στην οποία η ατμοσφαιρική πίεση στα πολικά και μεσαία γεωγραφικά πλάτη κυμαίνεται, φέρνοντας υψηλότερη από την κανονική πίεση πάνω στην πολική περιοχή και χαμηλότερη από την κανονική πίεση σε περίπου 45 μοίρες βόρειου γεωγραφικού πλάτους. Δημιουργείται από την επίδραση ακτινοβολίας του αερολύματος και η κυκλοφορία κατά τη χειμερινή περίοδο είναι ισχυρότερη από την ακτινοβολία ψεκασμού που κυριαρχεί το καλοκαίρι.

Οι τεχνητές ή «ανθρωπογενείς» εκπομπές μπορούν να καταστήσουν πιο σοβαρές τις συνέπειες των ηφαιστειακών εκρήξεων στο παγκόσμιο κλιματικό σύστημα. Για παράδειγμα, οι χλωροφθοράνθρακες (CFC) στην ατμόσφαιρα ξεκινούν μια αλυσίδα χημικών αντιδράσεων σε επιφάνειες αερολύματος που καταστρέφουν μόρια του όζοντος στη στρατόσφαιρα μεσαίου γεωγραφικού πλάτους, εντείνοντας την παρατηρούμενη μείωση στρατοσφαιρικού όζοντος. Η NASA και το Εθνικό Ίδρυμα Επιστημών έχουν χρηματοδοτήσει τους Robock και Stenchikov για να μελετήσουν λεπτομερέστερα την έκρηξη Πινατούμπο και να πραγματοποιήσουν μια άλλη σύγκριση μοντέλων με το σύνολο δεδομένων ηφαιστειακών αερολυμάτων. Σχεδιάζουν να συνδυάσουν τα δεδομένα αυτά με τα διαθέσιμα δεδομένα από δορυφόρο για τη βελτίωση του υπάρχοντος συνόλου δεδομένων.

Με την κατανόηση του αντίκτυπου των μεγάλων ηφαιστειακών εκρήξεων στο κλιματικό σύστημα της Γης με περισσότερες λεπτομέρειες, ίσως οι επιστήμονες θα είναι σε καλύτερη θέση να προτείνουν μέτρα για να μειώσουν τις επιπτώσεις τους στους ανθρώπους και τους φυσικούς πόρους στο μέλλον.

3.5.2. Το ηφαίστειο Πινατούμπο σήμερα

Η ηφαιστειακή έκρηξη του Pinatubo το 1991 έφτασε ως τη στρατόσφαιρα και επηρέασε το παγκόσμιο κλίμα για τα επόμενα δύο χρόνια, το κλίμα του πλανήτη θα ήταν πιο κρύο κατά 1 βαθμό Κελσίου. Ευτυχώς, οι επιστήμονες του Φιλιππινέζικου Ινστιτούτου Ηφαιστείας και Σεισμολογίας και η Γεωλογική Έρευνα των Η.Π.Α. είχαν προβλέψει την κλιματολογική έκρηξη του Pinatubo το 1991, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση τουλάχιστον 5.000 ζώων και τουλάχιστον 250 εκατομμυρίων δολαρίων ιδιοκτησίας. Τα εμπορικά αεροσκάφη προειδοποιήθηκαν για τον κίνδυνο του νέφους της τέφρας από την έκρηξη της 15ης Ιουνίου και τα περισσότερα την απέφυγαν, αλλά αρκετά αεροσκάφη που έφτασαν πολύ δυτικά των Φιλιππίνων βρέθηκαν σε επαφή με την τέφρα και υπέστησαν ζημιές ύψους περίπου 100 εκατομμυρίων δολαρίων συνολικά. Αν και πολλοί εξοπλισμοί και υποδομές προστατεύθηκαν με επιτυχία, οι δομές στις δύο μεγαλύτερες στρατιωτικές βάσεις των Η.Π.Α. στις Φιλιππίνες, Air Base Clark και Subic Bay Naval Station, υπέστησαν σοβαρή ζημιά από την τέφρα από την έκρηξη του ηφαιστίου.

Η έκρηξη έδωσε την ευκαιρία μελέτης των επιπτώσεων μιας μεγάλης ηφαιστειακής έκρηξης. Για πρώτη φορά, υπάρχουν υψηλής ανάλυσης (20 μέτρα ανά ισχνοστοιχείο) δορυφορικά δεδομένα για μια περιοχή, τόσο πριν όσο και μετά το πέρας του φαινομένου. Τα δεδομένα τηλεπισκόπησης που συλλέχθηκαν βρίσκονταν σε μικροκυματικό (3,0 έως 68,0 cm), θερμικό (8,0 - 12 μm), μέσο υπέρυθρο (1,0 έως 2,4 μm) και ορατό μήκος κύματος. Έτσι, είναι δυνατό να προσδιορισθεί η χρονική εξέλιξη του φαινομένου από τη μελέτη των θερμικών ιδιοτήτων, της βλάστησης ή και της διάβρωσης της περιοχής. Μια συνολική εικόνα μπορεί να προκύψει από τα φυσικά χαρακτηριστικά της περιοχής, καθώς επηρεάζουν την γεωμορφολογία του ηφαιστίου και τη θερμική του ενέργεια. Παρατηρούνται αλλαγές στην επιφάνεια της περιοχής μελέτης για πολλά χρόνια ή και για δεκαετίες μετά την έκρηξη, επομένως η μελέτη αποκατάστασης της περιοχής μπορεί να γίνει εύκολα με χρήση τηλεπισκοπικών τεχνικών.

Η συγκεκριμένη εργασία εστιάζει στις παραμέτρους του ηφαιστίου Mount Pinatubo που μπορούν να μελετηθούν μέσω των δορυφόρων. Για πολλά χρόνια μετά την έκρηξη του ηφαιστίου, οι θερμικές ανισορροπίες που σχετίζονται με τις θερμές πηγές νερού που βρίσκονται γύρω από το ηφαίστειο μπορούν να φανούν κατά τη διάρκεια της νύχτας στο θερμικό υπέρυθρο κανάλι. Όταν αυτές οι εικόνες δεν έχουν σύννεφα, μπορούν να

χαρτογραφηθούν τα θερμά ρεύματα. Μια ακόμα παράμετρος που σχετίζεται με τις συνεχιζόμενες αλλαγές στην περιοχή είναι ο ρυθμός ανάπτυξης της βλάστησης. Η παρακολούθηση της κατανομής της βλάστησης είναι ιδιαίτερα πολύτιμη για την αποφυγή εκτεταμένης καταστροφής, καθώς και για την αποκατάσταση της περιοχής. Η βλάστηση μπορεί να προσδιορισθεί εύκολα χρησιμοποιώντας κανάλια υπέρυθρου μήκους κύματος. Για παράδειγμα, ο συνδιασμός τριών καναλιών ορατού και εγγύς υπέρυθρου μήκους κύματος του δορυφόρου SPOT ορίζει με σαφήνεια τους τομείς που καλύπτει η βλάστηση σε μια εικόνα, ενώ σε σύγκριση με εικόνες άλλων ετών για την ίδια περιοχή, προκύπτουν οι αλλαγές στη βλάστηση.

Κεφάλαιο 4.

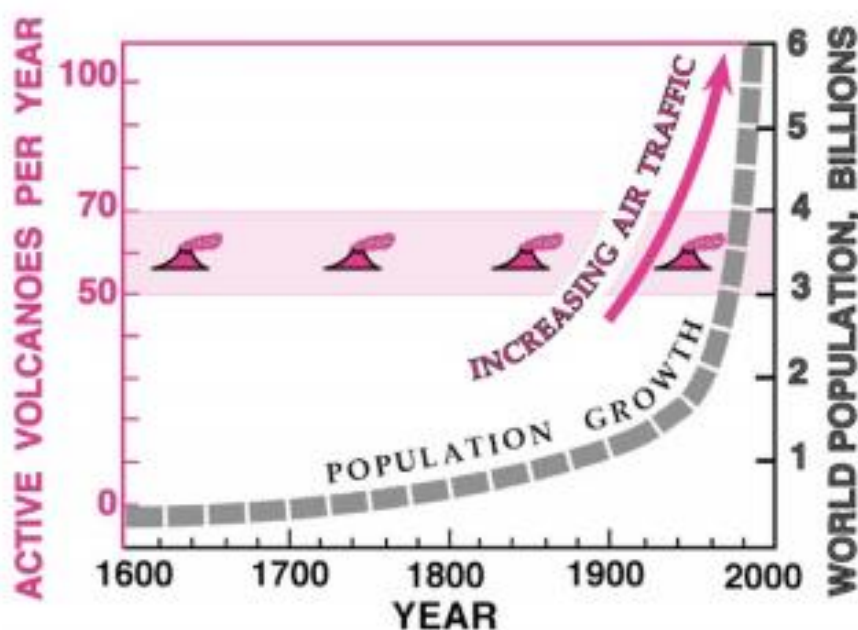
4.1. Εισαγωγή στα συστήματα και στις στρατηγικές Παρακολούθησης

Θα μπορούσαμε να καταλήξουμε ότι στοιχεία από μελέτες παρακολούθησης ενός ηφαιστείου αποτελούν τη μόνη επιστημονικά έγκυρη βάση για τις βραχυπρόθεσμες προβλέψεις σε μια μελλοντική έκρηξη ή πιθανές αλλαγές κατά τη διάρκεια μιας συνεχούς εξέλιξης της έκρηξης. Έτσι, σε οποιοδήποτε αποτελεσματικό πρόγραμμα μετριασμού των κινδύνων, μια βασική στρατηγική για τη μείωση του ηφαιστειακού κινδύνου είναι η έναρξη ή η αύξηση της παρακολούθησης του ηφαιστείου σε ιστορικά ενεργά ηφαίστεια και επίσης σε γεωλογικά νεαρά, αλλά επί του παρόντος και σε αδρανή, ηφαίστεια με δυνατότητα επανενεργοποίησης. Ξεκινώντας από τη δεκαετία του 1980, έχει επιτευχθεί σημαντική πρόοδος στην παρακολούθηση του ηφαιστείου με τεχνικές και δίκτυα, βασισμένες στο έδαφος καθώς και διαστημικές ανακαλύψεις. Αν και μερικές τεχνικές γεωχημικής παρακολούθησης, όπως η απομακρυσμένη μέτρηση εκπομπής του ηφαιστειακού αερίου, που εφαρμόζονται όλο και περισσότερο δείχνουν σημαντικά υποσχόμενες, με σεισμικές και γεωδαιτικές μεθόδους οι οποίες αναδεικνύονται παράλληλα και ως τεχνικές επιλογής που είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες.

Η διαθεσιμότητα ολοκληρωμένων δεδομένων παρακολούθησης ηφαιστείου ήταν καθοριστικός παράγοντας για την επιτυχή επιστημονική και κυβερνητική εξέλιξη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η αφύπνιση του Mount St. Helens (Ουάσιγκτον, ΗΠΑ) το 1980 και πιο πρόσφατα, οι ισχυρές και έντονες εκρήξεις στο όρος Pinatubo (Luzon, Φιλιππίνες) το 1991, που αναφέραμε και προηγουμένως. Ωστόσο, ακόμη και με την συνεχώς βελτιούμενη κατάσταση της τεχνικής στην παρακολούθηση ηφαιστείου και τη δυνατότητα πρόβλεψης, οι ιστορικές περιπτώσεις εκρήξεως του Mount St. Helens και του Pinatubo δυστυχώς εξακολουθούν να αντιπροσωπεύουν τις εξαιρέσεις, παρά τον γενικό κανόνα, για την επιτυχή πρόβλεψη του πιο πιθανού σεναρίου για την αναταραχή του ηφαιστείου.

4.2. Παρακολούθηση ηφαιστείου και μείωση κινδύνου

Από τον 17ο αιώνα, οι ηφαιστειακές καταστροφές έχουν θανατώσει περισσότερο από 300.000 άτομα και προκαλέσει υλικές ζημιές και οικονομικές απώλειες που υπερβαίνουν εκατοντάδες εκατομμύρια δολάρια. Ο φόβος για την ανθρωπότητα που προκαλείται από τους κινδύνους του ηφαιστείου, όπως αυτοί που επηρεάζουν τους ανθρώπους και το έδαφος, καθώς και εκείνοι που συναντώνται μεταξύ των αερομεταφορών, εξαιτίας των παρασυρόμενων ηφαιστειακών σύννεφων από ενεργητικές έντονες εκρήξεις, υπάρχει κίνδυνος να αυξηθούν αναπάντεχα αν αναλογιστεί κάποιος ότι ο αριθμός των ηφαιστειακών εκρήξεων ανά έτος στον κόσμο ποικίλει ελάχιστα, κυμαίνεται μεταξύ 50 και 70 κατά μέσο όρο την ίδια ώρα που ο παγκόσμιος πληθυσμός εξακολουθεί να αυξάνεται εκθετικά στον 21ο αιώνα και η εναέρια κυκλοφορία (επιβατών και φορτίων) παγκοσμίως αυξάνεται. Ευτυχώς όμως, με την εμφάνιση της σύγχρονης ηφαιστειολογίας τον 20ό αιώνα, ο κίνδυνος από τους ηφαιστειακούς κινδύνους μπορεί να προβλεφθεί, να αξιολογηθεί και να παρακολουθείται μέσα από επιστημονικές μελέτες και έγκαιρες κυβερνητικές ενέργειες. Μια εξαντλητική έρευνα της παρακολούθησης του ηφαιστείου είναι σε επίπεδο πέρα από το πεδίο εφαρμογής του, η οποία παρέχει αντ' αυτού μια γενική εικόνα της λογικής και την κρίσιμη ανάγκη παρακολούθησης όλων των δυνητικά επικίνδυνων ηφαιστείων για την ανθρώπινη ζωή και το δομημένο περιβάλλον.

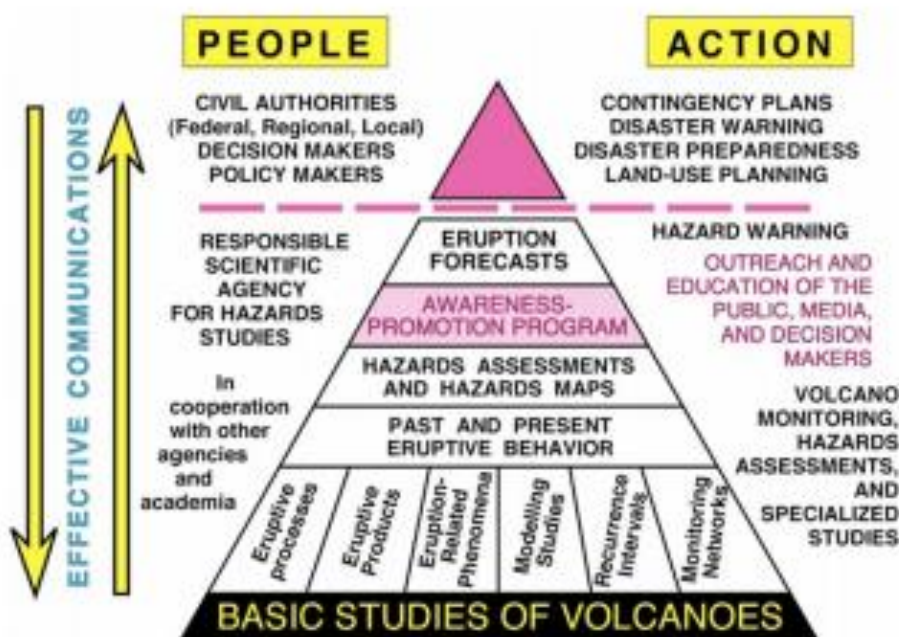


Εικόνα 17: Σχήμα που απεικονίζει ότι, ενώ ο αριθμός των ηφαιστείων (50-70 σύμφωνα με τους Simkin και Siebert (1994)), τα οποία είναι ενεργά ανά έτος (διαχωρίζεται με ροζ λωρίδα) ο κίνδυνος από τις εκρήξεις λόγω ηφαιστείου αυξάνεται αναπόφευκτα λόγω της συνεχιζόμενης αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού και της έντονης αύξησης της εναέριας κυκλοφορίας (πηγή: Tilling, 2003, The critical role of volcano monitoring in risk reduction)

Τα διαθέσιμα δεδομένα για τις ιστορικές εκρήξεις δείχνουν σαφώς ότι σχεδόν πάντα προηγούνται και συνοδεύονται από "ηφαιστειακή αναταραχή", όπως εκδηλώνεται με φυσική ή και χημική αλλαγή στην κατάσταση του ηφαιστείου και το σχετικό υδροθερμικό σύστημα. Τέτοια προδρομικά φαινόμενα (όπως σεισμική, γεωδαιτική, βαρύτητα, μαγνητική, γεωηλεκτρική, εκπομπή αερίων), τα οποία παρέχουν έγκαιρη προειδοποίηση για πιθανές επικείμενες εκρήξεις και συνακόλουθες σχετιζόμενες με τον ηφαίστειο κινδύνους, είναι εύκολο να ανιχνευθούν από την παρακολούθηση του ηφαιστείου, τη συστηματική συλλογή, την ανάλυση και ερμηνεία των οπτικών παρατηρήσεων και των οργάνων μέτρησης στα ηφαίστεια πριν, κατά τη διάρκεια και μετά της ηφαιστειακής δραστηριότητας.

Από καθαρά επιστημονική άποψη, η παρακολούθηση του ηφαιστείου παράγει τα πρωταρχικά δεδομένα που χρειάζονται οι ηφαιστειολόγοι και άλλοι ερευνητές ώστε να διερευνήσουν και να εξαγάγουν τη δυναμική των ενεργά ηφαιστειακά συστημάτων και τις σχετικές εκρηκτικές και γεωθερμικές διεργασίες. Ωστόσο, εκτός από την ικανοποίηση της περιέργειας των επιστημόνων και την προώθηση της ηφαιστειολογίας, στην παρακολούθηση του ηφαιστείου, οι μελέτες διαδραματίζουν επίσης άμεσο και κοινωνικά σημαντικό ρόλο στη μείωση του κινδύνου ενός ηφαιστείου. Γεωλογική χαρτογράφηση και άλλες γεωεπιστήμες με συνεχείς έρευνες είναι απαραίτητες προϋποθέσεις για να διαπιστωθεί η συμπεριφορά του παρελθόντος του ηφαιστείου, ιδιαίτερα του εκρηκτικού του ύφους (εκρηκτικό, μη εκρηκτικό, συνεχές, επεισοδιακό, κ.λπ.) και των ηλικιών, της κατανομής των εδαφών και των όγκων καταθέσεων από προηγούμενες εκρήξεις.

Τέτοιες μελέτες παρέχουν τα δεδομένα για μακροπρόθεσμες προβλέψεις (αιώνες έως δεκαετίες) για πιθανή μελλοντική δραστηριότητα και προετοιμασία των εκτιμήσεων των κινδύνων και των χρονοδιαγραμμάτων χωροταξίας.

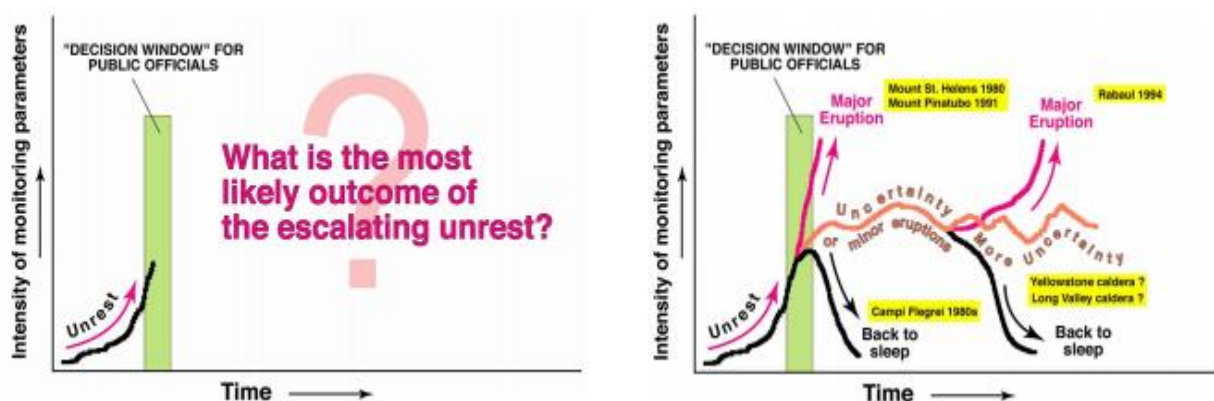


Εικόνα 18: Διάγραμμα των βασικών στοιχείων ενός αποτελεσματικού προγράμματος μείωσης του κινδύνου ηφαιστείου. Εκτίμηση επικινδυνότητας, κίνδυνοι-χάρτες ζώνης, και οι μελέτες παρακολούθησης ηφαιστείου αποτελούν σημαντικά στοιχεία η διαδικασία ξεκινά με τις βασικές μελέτες των ηφαιστείων. Η κορυφή διαχωρίζεται από το υπόλοιπο τρίγωνο για να τονίσει ότι οι επιστήμονες, παράλληλα με την παροχή των καλύτερων δυνατών επιστημονικών πληροφοριών και δεν έχουν γνώση άλλων βασικών παραγόντων (π.χ. κοινωνικοοικονομικών, πολιτιστικών, πολιτικών) και έχουν εξουσία λήψης αποφάσεων σχετικά με τον προγραμματισμό της χρήσης γης, ετοιμότητα και προειδοποίηση για καταστροφές, σχέδια έκτακτης ανάγκης και άλλα μέτρα μετριασμού, (πηγή: Tilling, 2003, The critical role of volcano monitoring in risk reduction)

Αντίθετα, τα στοιχεία παρακολούθησης ηφαιστείου τεκμηριώνουν την σημερινή συμπεριφορά ενός ηφαιστείου, το οποίο, όταν συνδυάζεται με τη γνώση της προηγούμενης παρελθοντικής εκρηκτικής συμπεριφοράς, επιτρέπει την πρόβλεψη του ηφαιστείου ως προς μια πιθανή μελλοντική συμπεριφορά. Ιδιαίτερα σημαντικά για τη μείωση του κινδύνου, αποτελούν τα δεδομένα από την παρακολούθηση του ηφαιστείου, τα οποία είναι η μόνη επιστημονική βάση για βραχυπρόθεσμες προβλέψεις (έτη έως μέρες) για μια μελλοντική έκρηξη ή για πιθανές αλλαγές κατά τη διάρκεια μιας συνεχιζόμενης έκρηξης. Η εκτίμηση κινδύνων, η συστηματική παρακολούθηση ηφαιστείου και η αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ των επιστημόνων, των πολιτικών αρχών και του κοινού αποτελούν τα βασικά στοιχεία κάθε επιτυχούς προγράμματος για τη μείωση του κινδύνου από την εκρηκτικότητα ενός ηφαιστείου.

Όταν ένα ηφαίστειο, ειδικά ένα που μέχρι τώρα ήταν σε κατάσταση ηρεμίας ή συνήθως μόνο ασθενώς ενεργό, αρχίζει να παρουσιάζει αισθητή ή αυξημένη αναταραχή, οι εκάστοτε πολιτικές αρχές και σε τοπικό επίπεδο, οι κάτοικοι, δικαίως, έχουν λόγο να ανησυχούν σχετικά με την αύξηση της ηφαιστειακής δραστηριότητας και των συναφών κινδύνων. Εάν αυτή η αναταραχή επιμένει και κλιμακώνεται, η πρώτη ερώτηση για τους επιστήμονες και τους

δημόσιους υπαλλήλους για την αντιμετώπιση της εξελισσόμενης ηφαιστειακής κρίσης είναι: Ποιο είναι το πιο σημαντικό και πιθανό αποτέλεσμα της κλιμακούμενης αναταραχής; Φυσικά, είναι αδύνατο ακόμη και να προσπαθήσουμε να απαντήσουμε επιστημονικά σε αυτή την ερώτηση χωρίς πληροφορίες από δεδομένα παρακολούθησης ηφαιστείου. Αλλά ακόμη και με τα δεδομένα παρακολούθησης, τα αποτελέσματα της ηφαιστειακής αναταραχής εξακολουθούν να είναι πολύ μεταβλητά εξαιτίας πολλών περίπλοκων παραγόντων όπως είναι : 1.ο χαρακτήρας και η διάρκεια του αφού οι αναταραχές μπορεί να είναι εξαιρετικά ακανόνιστες, χωρίς οριστικό πρότυπο, 2. η συνολική συσσώρευση, αν και παράτυπη, υποδηλώνει ότι ανανεώθηκε μια έκρηξη ή θα ήταν δυνατή ισχυρότερη από την κανονική δραστηριότητα, ίσως ακόμη και επικείμενη και 3. οι επιστήμονες δεν μπορούν να εγγυηθούν ότι η έκρηξη ΔΕΝ θα συμβεί. Εν πάση περιπτώσει, οι δημόσιοι υπάλληλοι αντιμετωπίζουν ένα ταχέως πλησιέστερο και στενό "παράθυρο απόφασης" για το αν πρέπει ή όχι να αναλάβουν δράση για τη διαχείριση της ηφαιστειακής κρίσης.



Εικόνα 19: Αριστερά είναι το "παράθυρο απόφασης" που αντιμετωπίζουν οι δημόσιοι υπάλληλοι μετά την εμφάνιση μιας ηφαιστειακής κρίσης. Σε γενικές γραμμές, το πιο πιθανό αποτέλεσμα της κλιμακούμενης αναταραχής του ηφαιστείου είναι άγνωστη. Δεξιά είναι μερικά παραδείγματα των πραγματικών αποτελεσμάτων της αυξημένης αναταραχής του ηφαιστείου σε επιλεγμένα ηφαίστεια. (πηγή: διάγραμμα του C. Dan Miller, USGS)

Στην ιδανική περίπτωση, η ηφαιστειακή παρακολούθηση των ενεργών και ενδεχομένως ενεργών ηφαιστειών θα πρέπει να διεξάγεται σε πραγματικό χρόνο ή κοντά σε πραγματικό χρόνο. Επίσης, είναι σημαντικό να αποκτηθούν δεδομένα παρακολούθησης πριν από την έκρηξη για ένα δεδομένο ηφαίστεια, για να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά του, το φάσμα εποχιακών ή άλλων μεταβατικών αποκλίσεων από τη φυσιολογική ή τη "βασική" συμπεριφορά τους. Σε γενικές γραμμές, όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος από τα δεδομένα παρακολούθησης της βασικής γραμμής, τόσο πιο διαγνωστικά και χρήσιμα είναι τα δεδομένα για τη δημιουργία ισχυρών και συνάμα αξιόπιστων βραχυπρόθεσμων προβλέψεων. Ένα καλό παράδειγμα μακράς παρακολούθησης βασικής γραμμής είναι τα δεδομένα να αντιπροσωπεύονται από μετρήσεις εδάφους-παραμόρφωσης όπως για τη κορυφή του ηφαιστείου Kilauea, Χαβάη. Οι μελέτες εξοικονόμησης ενέργειας είναι καταλληλότερες και αποτελεσματικότερες ακόμα και από επιστήμονες που βρίσκονται σε μόνιμη ακαδημαϊκή ή κυβερνητική υπηρεσία σε εγκαταστάσεις ή ιδρύματα (π.χ. "παρατηρητήρια ηφαιστείου"). Ωστόσο, αν αποτραπούν οι οικονομικοί και επιστημονικοί πόροι η λειτουργία ενός μόνιμου παρατηρητηρίου ηφαιστείου, η γρήγορη αποστολή ενός "κινητού παρατηρητηρίου ηφαιστείου" και η επιστημονική ομάδα δε θα μπορεί

να ανταποκριθεί σε μια ηφαιστειακή έκρηξη, όπως η έκρηξη του 1991 Mount Pinatubo, Φιλιππίνες.

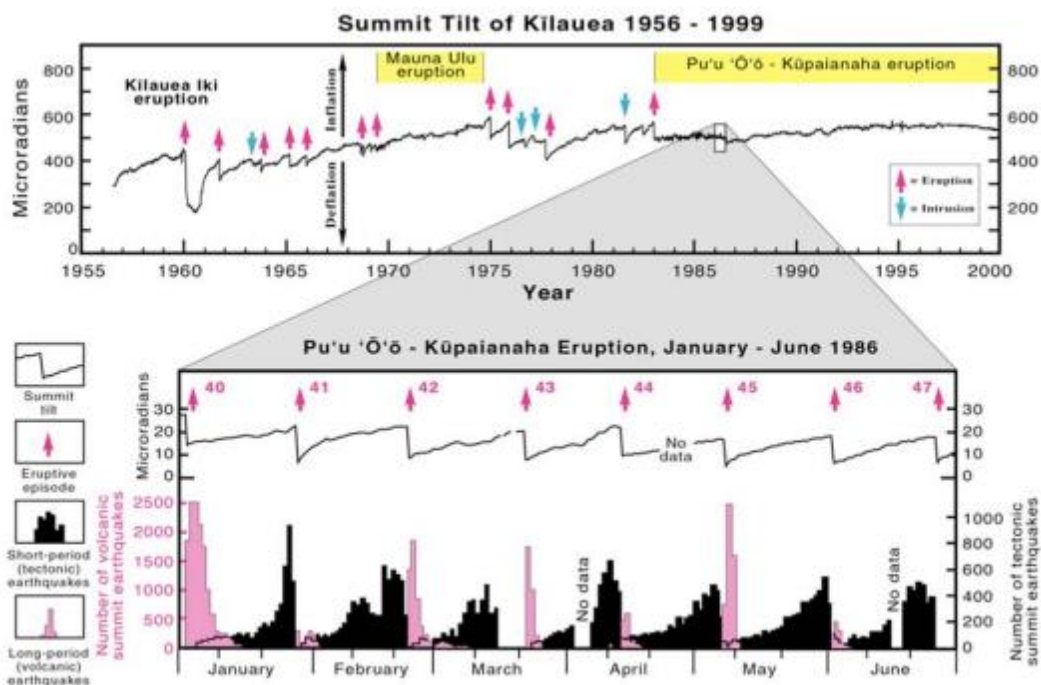
Με περίπου 550 ενεργά ηφαίστεια στον κόσμο, κυρίως μεγάλος αριθμός αυτών παρατηρείται στις αναπτυσσόμενες περιοχές, που κατά την διάρκεια της ιστορίας τους έχουν εκραγεί μία ή περισσότερες φορές, σαφώς δεν υπάρχουν αρκετά παρατηρητήρια ηφαιστείων, επιστήμονες και εξοπλισμός για την επαρκή παρακολούθηση όλων αυτών. Ενώ αυτή η κατάσταση είναι ιδιαίτερα κακή και δεν ευνοεί την οικονομική ανάπτυξη στις χώρες αυτές, δημιουργεί ένα επιπλέον πρόβλημα για τις ανεπτυγμένες χώρες. Έτσι, για να αξιοποιηθούν καλύτερα οι διαθέσιμοι πόροι, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί μια συνολική αξιολόγηση της απειλής που θέτει το κάθε ηφαίστριο ξεχωριστά, το σημερινό επίπεδο επίγειας παρακολούθησης ηφαιστείου (εάν υπάρχει), των πληθυσμών που κινδυνεύουν από πιθανούς κινδύνους και άλλους παράγοντες για τον καθορισμό προτεραιοτήτων όσον αφορά την απόκτηση ή τη βελτίωση των βασικών δεδομένων παρακολούθησης.

Πρόσφατα, η Γεωλογική Έρευνα των Η.Π.Α. έχει πραγματοποιήσει μια τέτοια εκτίμηση του ηφαιστείου εστιάζοντας στην απειλή και στις δυνατότητες παρακολούθησης στις Ηνωμένες Πολιτείες, για να τονιστεί η ανάγκη της ανάπτυξης. Υπογραμμίζεται ότι, μια ενεργητική, πλήρως ολοκληρωμένη, εθνική προσπάθεια παρακολούθησης θα εξασφαλίζει ότι τα πιο απειλητικά ηφαίστεια στις Ηνωμένες Πολιτείες παρακολουθούνται σωστά πριν από την έναρξη της αναταραχής και σε επίπεδα ανάλογα με τις απειλές που τίθενται.

4.3. Χαρακτηριστικά παραδείγματα παρακολούθησης και αναταραχών ηφαιστείων στο δομημένο περιβάλλον

Όπως απεικονίζεται σχηματικά παραπάνω, αρκετά πρόσφατα τα επεισόδια αναταραχής του ηφαιστείου έχουν οδηγήσει σε αρκετά διαφορετικά αποτελέσματα. Για την αφύπνιση και την έκρηξη του ηφαιστείου του Mount St. Helens, Ουάσινγκτον, το 1980, μετά από μια περίοδο 123 χρόνων αδράνειας, συστηματικές προ-εκρήξεις και μελέτες ηφαιστειακής παρακολούθησης συνέβαλαν ουσιαστικά σε επιτυχή μέτρα μείωσης των κινδύνων που λαμβάνονται από κρατικούς και ομοσπονδιακούς κυβερνητικούς αξιωματούχους πριν από την έκρηξη στις 18 Μαΐου 1980, η οποία προκάλεσε τη χειρότερη ηφαιστειακή καταστροφή στην ιστορία των Ηνωμένων Πολιτειών. Σε αυτή τη περίπτωση, η καλά ελεγχόμενη αναταραχή του ηφαιστείου κράτησε μόνο λίγους μήνες πριν από την έναρξη της μεγάλης έκρηξης στις 18 Μαΐου. Ομοίως, η έκρηξη του Mount Pinatubo (Luzon, Φιλιππίνες) αντιπροσωπεύει ένα άλλο παράδειγμα απλής και σχετικά βραχείας εξέλιξης από πρόδρομη δραστηριότητα σε εξέλιξη πλήρους εμφάνισης (Newhall and Punongbayan, 1996). Αναταξινομήθηκε από ένα "ανεργό" σε "ενεργό" ηφαίστριο το 1987 και άρχισε να παρουσιάζει αυξημένη δραστηριότητα στις αρχές Μαρτίου του 1991, ακολουθούμενη από αισθητούς πρόδρομους σεισμούς λίγες εβδομάδες αργότερα και στη συνέχεια έντονες εκρήξεις που ξεκινούν στις 2 Απριλίου. Ωστόσο, η κατάλληλη παρακολούθηση του ηφαιστείου των ταχέως αυξανόμενων αναταραχών στο Pinatubo δεν ξεκίνησε μέχρι τα τέλη Απριλίου, όταν μια ομάδα επιστημόνων από την Αμερικανική Γεωλογική Έρευνα (USGS), υπό την αιγίδα του Προγράμματος Βοήθειας για Καταστροφές στο Ηφαίστριο, ένωσαν συναδέλφους του Φιλιππινέζικου Ινστιτούτου Ηφαιστειολογίας και Σεισμολογίας (PHIVOLCS) για να δημιουργήσουν βιαστικά ένα "κινητό παρατηρητήριο ηφαιστείου" και να προετοιμάσουν μια

ζώνη κινδύνου-χάρτη, για χρήση κάτω από δύσκολες και αγχωτικές συνθήκες κλιμάκωσης της ηφαιστειακής κρίσης.



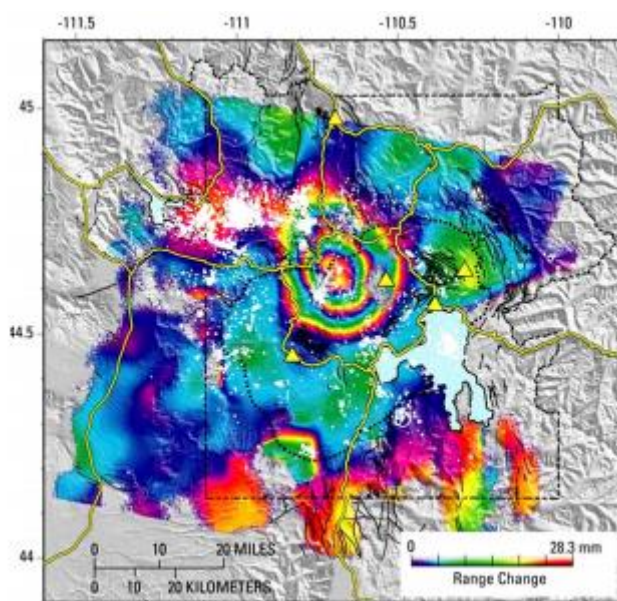
Εικόνα 20: Παράδειγμα μακροχρόνιων δεδομένων παρακολούθησης "βασικής γραμμής": Παραλλαγές της παραμόρφωσης εδάφους στη σύνοδο κορυφής του ηφαιστείου Kilauea, Χαβάη, για την περίοδο 1956-1999, όπως καταγράφηκε από ένα συνεχώς καταγραφικό μετρητή κλίσης που τηρούσε το Παρατηρητήριο Ηφαιστείου της Χαβάης της U.S. Geological Επισηκόπηση. Σημειώστε ότι κάθε εκδήλωση έκρηξης ή διείσδυσης προηγείται από βαθμιαίο πληθωρισμό και τερματίζεται από απότομο αποπληθωρισμό. σε γενικές γραμμές, όσο μεγαλύτερο το γεγονός, τόσο μεγαλύτερη είναι η αλλαγή στην κλίση (πηγή: Tilling et al., 1987)

Η συστηματική παρακολούθηση της σεισμικότητας και των εκπομπών διοξειδίου του θείου τέθηκε σε λειτουργία στις αρχές Μαΐου, όπου αυξήθηκαν οι εκπομπές του κατά το μεγαλύτερο μέρος του Μαΐου, αλλά τότε άρχισε να μειώνεται απότομα μετά τις 28 Μαΐου, γεγονός που ερμηνεύεται από την επιστημονική ομάδα PHILVOLCS-USGS για να δείξει την άνοδο του μάγματος ψηλά στον αγωγό, τελικά με αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός θόλου λάβας που παρατηρήθηκε στις 7 Ιουνίου. Λίγες μέρες πριν την εξώθηση του θόλου, η συνολική απελευθέρωση της σεισμικής ενέργειας παρουσίασε επίσης μια αξιοσημείωτη αύξηση ξεκινώντας από 1 Ιουνίου. Επιπλέον, η σεισμικότητα σε μεγάλες περιόδους και η απελευθέρωση της σεισμικής ενέργειας, αυξήθηκε περαιτέρω πριν από την έναρξη των πλημμυρικών εκρήξεων στις 12 Ιουνίου. Συλλογικά, η σύντομη παρακολούθηση του ηφαιστείου, σε συνδυασμό με οπτικές παρατηρήσεις της έναρξης και την αυξημένη συχνότητα των κολώνων έκρηξης, ήταν ζωτικής σημασίας για να πείσουν τους επιστήμονες να συστήσουν από την πολιτική προστασία των πληθυσμιακών κέντρων των Φιλιππίνων να διατάξουν μεγάλες εκκενώσεις. Η έγκαιρη εκκένωση των κατοικιών, η ενημέρωση των ανθρώπων από

στρατιωτικούς και πολιτικούς αξιωματούχους, που προκάλεσαν οι προβλέψεις και οι συστάσεις των επιστημόνων της PHIVOLCS-USGS με βάση τα δεδομένα παρακολούθησης, έσωσαν πολλές χιλιάδες ζωές και εκατοντάδες εκατομμύρια δολάρια σε οικονομικές απώλειες.

Το Mount St. Helens και η υπόθεση Pinatubo του 1991 ιστορικά αναμφισβήτητα αντιπροσωπεύουν το απλούστερο σενάριο πιθανών αποτελεσμάτων αναταραχής του ηφαιστείου

μικρής διάρκειας (μόνο μερικούς μήνες) με αποκορύφωμα την έκρηξη. Ωστόσο, τα περισσότερα άλλα πρόσφατα επεισόδια αναταραχής περιλαμβάνουν σύνθετα ή αβέβαια αποτελέσματα. Για παράδειγμα, η καλά ελεγχόμενη ηφαιστειακή κρίση του 1983-1985 στο Rabaul Καλντέρα (Παπούα Νέα Γουινέα), με έντονη σεισμικότητα, προκάλεσε κυβερνητικούς αξιωματούχους να εκδώσουν ένα "Στάδιο 2 προειδοποίησης", δηλώνοντας ότι η έκρηξη μπορεί να συμβεί μέσα σε εβδομάδες. Ωστόσο, η προβλεπόμενη έκρηξη δεν συνέβη, και η σεισμικότητα υποχώρησε απότομα και επέστρεψε σε ένα κανονικό επίπεδο για τα επόμενα δέκα χρόνια. Προβλεπόμενα, το ευρύ κοινό αντιμετώπισε αυτήν την απροσδόκητη και απότομη διακοπή της αναταραχής του ηφαιστείου από το 1983-1985 ως «ψευδή συναγερμό» και τόσο οι επιστήμονες όσο και οι υπάλληλοι έχασαν την αξιοπιστία τους. Ωστόσο, το ιστορικό της περιφέρειας Rabaul είχε τελικά θετικό αποτέλεσμα επηρεασμένο από την κρίση του 1983-1985, γεγονός που αύξησε σημαντικά την επίσημη ενημέρωση και ευαισθητοποίηση του κοινού σχετικά με τους πιθανούς κινδύνους από το ηφαίστειο.



Εικόνα 21: Ένα παράδειγμα της αυξανόμενης χρήσης της παρακολούθησης του χώρου με τεχνικές γεωδαισίας: παραμόρφωση εδάφους που παρακολουθείται από το InSAR στο Yellowstone Caldera, Wyoming-Montana, για αναβάθμιση κατά την περίοδο 1996-2000. Κάθε πλήρες φάσμα των περιθωρίων χρώματος (από μοβ έως κόκκινο) αντιπροσωπεύει ~ 28 mm. Οι λευκές κουκίδες και οι κύκλοι δείχνουν σεισμικότητα κατά την ίδια χρονική περίοδο, επιλέγονται κίτρινα τρίγωνα συνεχόμενα μνημεία GPS και η διακεκομμένη μαύρη γραμμή οριοθετεί το όριο καλντέρας (πηγή: Charles Wicks, USGS).

Επίσης κατά την περίοδο 1983-1984, η Campi Flegrei Caldera (κοντά στη Νάπολη της Ιταλίας) υπέστη έντονη αναταραχή στο ηφαίστειο, που εκφράζεται από αυξημένη σεισμικότητα και σημαντική ανοικοδόμηση εδάφους. Όπως και στην περίπτωση της Rabaul Caldera, η κλιμάκωση των αναταραχών κορυφώθηκε το 1985 και στη συνέχεια άρχισε να υποχωρεί σταδιακά κατά τη διάρκεια των επόμενων ετών, υποδηλώνοντας ένα αποτέλεσμα με το οποίο το ανήσυχο ηφαίστειο επιστρέφει σε φάση ύπνωσης. Οι ιστορικές παρατηρήσεις (της Serapeo, Pozzuoli) και τα σύγχρονα στοιχεία παρακολούθησης ακτινοβολίας για την Campi Flegrei δείχνουν μετρήσιμα, κατά καιρούς μεγάλης κλίμακας, παραμόρφωση της καλντέρας σε μια εποχή. Πρόκειται για μια κλίμακα που κυμαίνεται από αιώνες έως χρόνια. Τις τελευταίες δεκαετίες, η ηφαιστειακή αναταραχή σε δύο άλλα συστήματα καλντέρας στις δυτικές Ηνωμένες Πολιτείες - Long Valley Caldera (Καλιφόρνια) και την Καλντέρα του Γέλογουστοου (Ουαϊόμινγκ-Μοντάνα), επίσης παρακολουθούνται στενά και από το έδαφος και από ψηλά με διαστημικές τεχνικές παρακολούθησης ηφαιστείου.

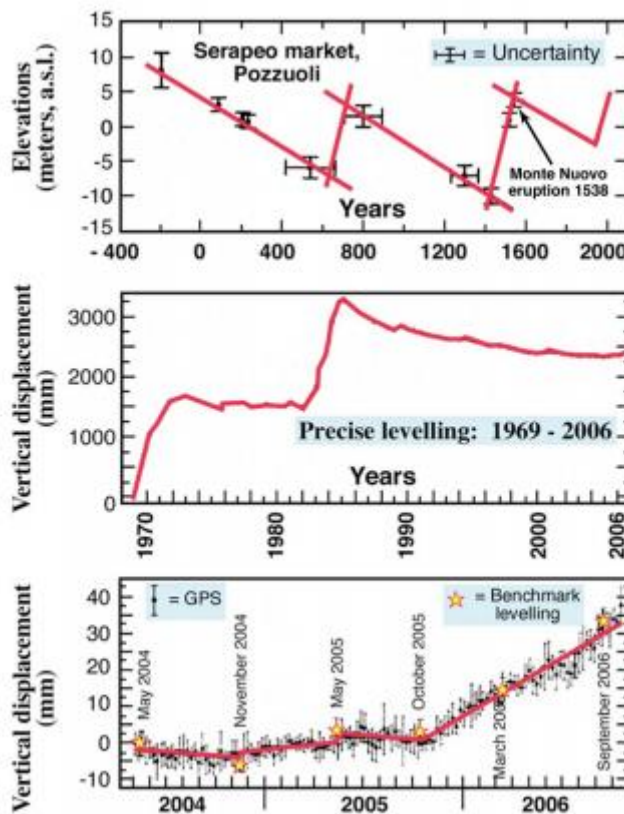
4.4. Η ανάγκη για πρόβλεψης ηφαιστειακών εκρήξεων

Τα ιστορικά γεγονότα για το Rabaul, το Campi Flegrei, το Yellowstone, το Πινατούμπο, καθώς και πολλά άλλα ελεγχόμενα ηφαίστεια στον κόσμο, είναι σοβαρές προκλήσεις για τους ηφαιστειολόγους στην προσπάθεια για ακριβή πρόβλεψη για μια πιθανή έκβαση της εμφάνισης αναταραχών στα ηφαίστεια που έχουν ηρεμήσει ή την ενδεχόμενη εκδήλωση της έκρηξης μακράς διάρκειας, χαμηλής έως μέτριας τρέχουσας αναταραχής. Ωστόσο, οι ακριβείς προβλέψεις της έκρηξης, σε καθορισμένο χρόνο, εξακολουθούν να αποκλίνουν από τις προγνώσεις, ακόμη και με επαρκείς ενέργειες παρακολούθησης ηφαιστείου. Αυτή είναι η αδυναμία των επιστημόνων να μην είναι σε θέση να δώσουν μια οριστική απάντηση στο ερώτημα αν η κλιμακούμενη αναταραχή θα έχει τελικά ατυχείς συνέπειες.

Προφανώς, η πραγματοποίηση μιας ανεκπλήρωτης πρόβλεψης (π.χ. Rabaul στη δεκαετία του '80) έχει ως αποτέλεσμα την κριτική ενός "ψευδούς συναγεμμού" και την απώλεια της αξιοπιστίας των επιστημόνων και των αξιωματούχων. Ωστόσο, εάν πρέπει να σημειωθεί πρόοδος στη μείωση προβλημάτων από την εκρηκτικότητα του ηφαιστείου οι επιστήμονες έχουν την κοινωνική υποχρέωση να κάνουν την καλύτερη δυνατή πρόβλεψη εντός των περιορισμών που προκύπτουν από την υπάρχουσα κοινωνικοοικονομική κατάσταση. Κατά τον ίδιο τρόπο, οι υπάλληλοι διαχείρισης έκτακτης ανάγκης και το ευρύ κοινό πρέπει να είναι έτοιμοι να αποδεχθούν τις συνέπειες και το κοινωνικοοικονομικό κόστος των περιστασιακών, αναπόφευκτων "ψευδών συναγεμμών". Ίσως οι Banks προέβλεπαν την εξέλιξη της δραστηριότητας του Rabaul όταν έγραψαν: "Οι ψεύτικοι συναγεμμοί μπορούν να παρέχουν χρήσιμα διδάγματα, μέσω αντικειμενικών στόχων στην αξιολόγηση της επιστημονικής και δημόσιας απόκρισης σε ένα ηφαιστειακό περιβάλλον κρίσης που τελείωσε χωρίς έκρηξη για την επόμενη κρίση, η οποία θα μπορούσε να οδηγήσει σε έκρηξη." Σε κάθε περίπτωση, είναι κρίσιμο το γεγονός ότι η μακρόχρονη απόκτηση δεδομένων παρακολούθησης θα επεκτείνει τις βάσεις δεδομένων που απαιτούνται για την ανάλυση και την ερμηνεία τυχόν μελλοντικών αλλαγών στην κατάσταση του ηφαιστείου που απομακρύνονται σημαντικά από τη μεταβολή της συμπεριφοράς του παρελθόντος. Εξίσου σημαντικό, όμως, είναι η επιτακτική ανάγκη να

αναπτυχθούν ισχυρότερες τεχνικές για την συλλογή και ανάλυση των δεδομένων παρακολούθησης, ιδανικά σε πραγματικό ή σχεδόν σε μηδενικό χρόνο. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν σημειωθεί σημαντικές πρόοδοι σε συστήματα παρακολούθησης ηφαιστείου, με βάση το έδαφος, σε συνάρτηση με την απόσταση και συνάμα στην απόκτηση, επεξεργασία και ερμηνεία όλων των τύπων δεδομένων παρακολούθησης, γεωχημικών και γεωφυσικών φαινομένων.

Ιδιαίτερα ελπιδοφόρες είναι οι πρόσφατες ποσοτικές μελέτες στη σεισμολογία του ηφαιστείου που χρησιμοποιούν σειρές ευρυζωνικών οργάνων. Για παράδειγμα, η παρακολούθηση και ανάλυση σε πραγματικό χρόνο των σημάτων VeryLong-Period (VLP) των σεισμικών πηγών στο Volcano Stromboli διεξάγεται επί του παρόντος από το Osservatorio Vesuviano. Από την εμπειρία σε όλο τον κόσμο, όλες οι εκρήξεις προηγούνται και συνοδεύονται από σεισμικότητα VLP και μακράς περιόδου (LP). Άλλα συγκεκριμένα παραδείγματα περιλαμβάνουν την ποσοτική ανάλυση και ερμηνεία των σεισμικών υπογραφών VLP και LP για την αποκρυπτογράφηση των μαγματικών-υδροθερμικές αλληλεπιδράσεων που λειτουργούν. Τέτοιες μελέτες, σε συνδυασμό με δεδομένα από άλλες τεχνικές παρακολούθησης (π.χ. γεωχημικές, γεωδαιτικές, τηλεπισκόπηση) αποδίδουν μια πιο διαγνωστική κατανόηση για την αλληλεπίδραση μεταξύ των μαγματικών και των σχετικών υδροθερμικών διεργασιών από την οδήγηση των ηφαιστειακών συστημάτων.



Εικόνα 22: Οι κατακόρυφες μετατοπίσεις που μετρήθηκαν στην Campi Flegrei Caldera σε χρονικές κλίμακες που κυμαίνονται από αιώνες έως χρόνια (βλ. κείμενο προς συζήτηση). Τα δεδομένα παρακολούθησης ακριβείας και παρακολούθησης GPS υποδεικνύουν αντιστροφή της τάσης καθίζησης μετά το 1985 τον Οκτώβριο του 2005 και την αρχή μιας άλλης τάσης σταδιακής αναβάθμισης εδάφους (πηγή: Troise et al., 2007).

Παγκόσμια εμπειρία δείχνει επίσης ότι η βέλτιστη παρακολούθηση ηφαιστείου είναι η προσέγγιση αυτή που χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό τεχνικών αντί να εξαρτάται καθένας χωριστά από αυτούς. Μια βελτιωμένη κατανόηση της δυναμικής του ηφαιστείου καθιστά πιο αξιόπιστες και ακριβείς προβλέψεις για τις εκρήξεις, οι οποίες με τη σειρά τους πρέπει να παρέχουν στους ηφαιστειολόγους πιθανά κριτήρια και εργαλεία για να καθορίσουν ποιες από τις διάφορες διαδρομές είναι οι περισσότερο πιθανές για την εξελισσόμενη αναταραχή. Οι περισσότεροι ηφαιστειολόγοι είναι πεπεισμένοι ότι, εάν ένα ηφαίστειο παρακολουθείται εκτεταμένα σε πραγματικό χρόνο από καλά επιστημονικά όργανα θα πρέπει να είναι δυνατή η πραγματοποίηση πολύ καλύτερων προβλέψεων για τα αποτελέσματα της αναταραχής των ηφαιστείων.

4.5. Τελικές παρατηρήσεις

Έχουμε ήδη τονίσει την κρίσιμη σημασία της παρακολούθησης του ηφαιστείου για τη μείωση όλων των επακόλουθων που ενέχουν οι κίνδυνοι από το ηφαίστειο στην ανθρώπινη ζωή και στο δομημένο περιβάλλον, για τον απλό και βασικό λόγο ότι τα δεδομένα από την τηλεσκόπηση παρέχουν τη μόνη επιστημονικά έγκυρη βάση για την πρόβλεψη βραχυπρόθεσμων εκρήξεων. Οι αξιόπιστες και ακριβείς προβλέψεις επιτρέπουν στις πολιτικές αρχές να προετοιμάσουν έκτακτης ανάγκης σχέδια, έγκαιρης προειδοποίησης και έγκαιρης λήψης αποφάσεων και αντίμετρα μετριασμού, συμπεριλαμβανομένης της εκκένωσης εάν είναι απαραίτητο, για την προστασία των πληθυσμών που διατρέχουν κίνδυνο. Στην πράξη, όταν εκδηλώνεται η ηφαιστειακή κρίση και οι κυβερνητικές αρχές πρέπει να αναλάβουν δράση, η διαθεσιμότητα δεδομένων παρακολούθησης ηφαιστείου, ειδικά εάν είναι μακροπρόθεσμα και ολοκληρωμένη, επεκτείνει αποτελεσματικά το χρονικό πλαίσιο του "παραθύρου απόφασης". Οι δημόσιοι υπάλληλοι και φορείς είναι σε θέση να αντιμετωπίζουν την κατάσταση, έχοντας το ευρύτερο δυνατό "παράθυρο απόφασης", οι υπάλληλοι με τη σειρά τους μπορούν να κάνουν καλύτερα ενημερωμένες προειδοποιήσεις και να λαμβάνουν αποφάσεις για την μεγιστοποίηση της δημόσιας ασφάλειας.

Με περισσότερα επικίνδυνα ηφαίστεια που παρακολουθούνται σε πραγματικό χρόνο, βελτιώσεις στις μεθοδολογίες και στις τεχνολογίες παρακολούθησης του ηφαιστείου και ποσοτική ανάλυση και ερμηνεία των δεδομένων, οι προοπτικές είναι εξαιρετικές για την παρακολούθηση του ηφαιστείου ώστε να είναι όλο και πιο αποτελεσματική στη μείωση των κινδύνων από την ηφαιστειακή δραστηριότητα. Εντούτοις, είναι απαραίτητα ορισμένα σημεία προσοχής για την λήψη συμπερασμάτων, αναφερόμενοι ότι τα δεδομένα παρακολούθησης ηφαιστείων μόνο, ανεξάρτητα από την πλήρη, έγκαιρη και σωστά ερμηνευμένη είδοποίηση, δεν μπορούν να εγγυηθούν αυτόματα επιτυχημένα αποτελέσματα αντιμετώπισης μελλοντικών ηφαιστειακών κρίσεων, επειδή η μείωση του κινδύνου επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από κυβερνητικές ενέργειες και παράγοντες άλλους εκτός από επιστημονικούς (π.χ., πολιτικό, κοινωνικοοικονομικό, πολιτιστικό).

Ωστόσο, είναι αδιαμφισβήτητο το γεγονός ότι, χωρίς επαρκή δεδομένα παρακολούθησης, απλά δεν υπάρχει καν η πιθανότητα να προσπαθήσουμε να αποφύγουμε μια

ηφαιστειακή καταστροφή. Μια τραγική υπενθύμιση αυτής της απογοητευτικής πραγματικότητας είναι η έκρηξη του ηφαιστείου El Chichon το 1982 (Chiapas State, Μεξικό), η οποία σκότωσε περισσότερα από 2000 άτομα και προκάλεσε τη χειρότερη ηφαιστειακή καταστροφή στην ιστορία του Μεξικού. Πριν από το 1982, υπήρχαν ελάχιστες βασικές μελέτες αυτού του ηφαιστείου και δεν υπάρχουν μελέτες παρακολούθησης ηφαιστείου για την πρόδρομη δραστηριότητα του. Έτσι, η έκρηξη ήρθε ως μια θανατηφόρα έκπληξη για τους επιστήμονες. Σε σύγκριση με τις δυνητικά πολύ υψηλές κοινωνικοοικονομικές απώλειες από μια ηφαιστειακή καταστροφή, οι επιστημονικοί και νομισματικοί πόροι για τη διεξαγωγή επαρκούς παρακολούθησης ηφαιστείων υψηλού κινδύνου σε κατοικημένες περιοχές είναι περιορισμένοι. Η πρωταρχική πρόκληση για τους ηφαιστειολόγους καθώς και τους υπαλλήλους διαχείρισης έκτακτης ανάγκης είναι να αποτρέψουμε μια ηφαιστειακή κρίση να μετατραπεί σε ηφαιστειακή καταστροφή.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Auger, E., D'Auria, L., Martini, M., Chouet, B., and Dawson, P.: Real-time monitoring and massive inversion of source parameters of very long period seismic signals: An application to Stromboli Volcano, Italy, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L04301, doi:10.1029/2005GL024703, 2006.
2. Banks, N. G., Tilling, R. I., Harlow, D. H., and Ewert, J. W.: Volcano monitoring and short-term forecasts, in: *Short Courses in Geology*, edited by: Tilling, R. I., Vol. 1, Volcanic hazards, American Geophysical Union, Washington, D.C., Chap. 4, 51– 80, 1989.
3. Battaglia, M., Roberts, C., and Segall, P.: The mechanics of unrest at Long Valley caldera, California: 2. Constraining the nature of the source using geodetic and micro-gravity data, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 127, 219–245, 2003.
4. Berrino, G., Corrado, G., Luongo, G., and Toro, B.: Ground deformation and gravity changes accompanying the 1982 Pozzuoli uplift, *B. Volcanol.*, 47, 187–200, 1984.
5. Blong, R. and McKee, C.: The Rabaul eruption 1994: Destruction of a town, Natural Hazards Research Centre, Macquarie University, Australia, 52 pp., 1995.
6. Blong, R.J., 1984, *Volcanic hazards: a sourcebook on the effects of eruptions*: Sidney, Australia, Academic
7. Braile, L.W., 2009, this volume, *Seismic monitoring*, in Young, R., and Norby, L., *Geological Monitoring: Boulder, Colorado*, Geological Society of America, doi:10.1130/2009.monitoring(10).
8. Brosnan, D.M., 2000, *Ecological impacts of the Montserrat volcano: a pictorial account of its effects on land and sea life: Sustainable Ecosystems Institute, Portland, Oregon* (available only on the Web at <http://www.sei.org/impacts.html>; accessed 4 February 2009).
9. Chouet, B.: Volcano seismology, *Pure Appl. Geophys.*, 160, 3–4, 739–788, 2004.
10. Chouet, B.A., 1996, New methods and future trends in seismological volcano monitoring, in Scarpa, R., and Tilling, R.I., eds., *Monitoring and Mitigation of Volcanic Hazards*: Berlin, Springer-Verlag, p.23–88.
11. Chouet, B.A., 2003, *Volcano seismology: Pure and Applied Geophysics*, v. 160, p. 739–788, doi: 10.1007/PL00012556.
12. Daag, A. S., Tubianosa, B. S., Newhall, C. G., Tungol, N. M., ~ Javier, D., Dolan, M. T., Delos Reyes, P. J., Arboleda, R. A., Martinez, M. L., and Regalado, T. M.: Monitoring sulfur dioxide emission at

Mount Pinatubo, in: *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*, edited by: Newhall, C. G. and Punongbayan, R. S., Philippines Institute of Volcanology and Seismology, Quezon City, and University of Washington Press, Seattle, 409–414, 1996.

13. De Natale, G., Troise, C., and Pingue, F.: A mechanical fluid-dynamical model for ground movements at Campi Flegrei caldera, *J. Geodyn.*, 32, 487–517, 2001.
14. Dehn, J., Dean, K.G., Engle, K., and Izbekov, P., 2002, Thermal precursors in satellite images of the 1999 eruption of Shishaldin Volcano: *Bulletin of Volcanology*, v. 64, p. 525–534, doi: 10.1007/s00445-002-0227-0.
15. Di Vito, M., Lirer, L., Mastrolorenzo, G., and Rolandi, G.: The 1538 Monte Nuovo eruption (Campi Flegrei, Italy), *B. Volcanol.*, 49, 608–615, 1987.
16. Driedger, C.L., and Scott, K.M., 2002, Mount Rainier—Learning to live with volcanic risk: U.S. Geological Survey Fact Sheet 034-02, 4 p. (available only on the Web at <http://www.fs.fed.us/gpnmf/mshnmv/education/teachers-corner/library/documents/fs065-97-mt-rainier.pdf#search=%22%22volcano%20hazards%22%20%22Mount%20Rainier%22%22>; accessed 4 February 2009). File Report 98-428, 11 p., 2 plates, scale 1:100,000, 1:400,000.
17. Dzurisin, D. (Ed.): *Volcano deformation: Geodetic Monitoring Techniques*, Springer-Praxis, Berlin, Germany, and Chichester, U.K., 441 pp., 2006.
18. Ewert, J. W., Guffanti, M., and Murray, T. L.: *An Assessment of Volcanic Threat and Monitoring Capabilities in the United States: Framework for a National Volcano Early Warning Sys*
19. Ewert, J. W., Miller, C. D., Hendley, J. W., and Stauffer, P. H.: *Mobile Response Team saves lives in volcanic crises*, U.S. Geological Survey Fact Sheet 064-97, 2 pp. (revised June 1998), 1997.
20. Houghton, B.F., Wilson, C.J.N., and Pyle, D.M., 2000, Pyroclastic fall deposits, in Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S.R., Rymer, H., and Stix, J., eds., *Encyclopedia of Volcanoes*, New York, Ishii, H., Ooishi, M., Maruyama, Y., and Koike, T., 2003, Acclimation of shoot and needle morphology and photosynthesis of two *Picea* species to differences in soil nutrient availability: *Tree Physiology*, v. 7, p. 453–461.
21. Iverson, R.M., Schilling, S.S., and Vallance, J. W., 1998, Objective delineation of lahar-inundation hazard zones: *Geological Society of America Bulletin*, v. 110, p. 972–984, doi: 10.1130/0016-7606(1998)110<0972:ODOLIH>2.3.CO;2.
22. Johnson, J., Steven, R., Brantley, S.R., Swanson, D.A., Stauffer, P.H., and Hendley, J.W., II, 2000, *Viewing Hawai'i's lava safely—Common sense is not enough*: U.S. Geological Survey Fact Sheet 152-00, version 1.1, 1 p., <http://pubs.usgs.gov/fs/2000/fs152-00/fs152-00.pdf> (accessed 4 February 2009).
23. Johnson, J.B., Aster, R.C., Ruiz, M.C., Malone, S.D., McChesney, P.J., Lees, J.M., and Kyle, P.R., 2003, Interpretation and utility of infrasonic records from erupting volcanoes: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 121, no. 1–2, p. 15–63

24. Murray, T. L., Ewert, J. W., Lockhart, A. B., and LaHusen, R. G.: The Integrated Mobile Volcano-Monitoring System Used by the Volcano Disaster Assistance Program (VDAP), in: *Monitoring and mitigation of volcano hazards*, edited by: Scarpa, R. and Tilling, R. I., Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, 315–362, 1996.
25. Newhall, C. G. and Punongbayan, R. S. (Eds.): *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*, Philippines Institute of Volcanology and Seismology, Quezon City, and University of Washington Press, Seattle, 1126 pp., 2006.
26. R. I. Tilling Scientist Emeritus, Volcano Hazards Team, U.S. Geological Survey, Menlo Park, California 94025-3591, USA Received: 1 September 2007 – Revised: 15 September 2007 – Accepted: 19 September 2007 – Published: 2 January 2008 https://www.adv-geosci.net/14/3/2008/adgeo-14-3-2008.pdf?fbclid=IwAR2qMGHhOcR6-DMoxMBW_RtD4YgjdkYkKDE9DiaJq-qWI3Dka8JKMZ3fO1Y
27. Scott, K.M., Vallance, J.W., and Pringle, P.T., 1995, *Sedimentology, behavior, and hazards of debris flows at Mount Rainier, Washington*: U.S. Geological Survey Professional Paper 1547, 56 p.
28. Simkin, T., and Siebert, L., 1994, *Volcanoes of the World*, second edition: Tucson, Arizona, Geoscience Press, published in association with the Smithsonian Institution, Global Volcanism Program, Washington, D.C., 349 pp.
29. Simkin, T., Tilling, R.I., Vogt, P.R., Kirby, S.H., Kimberley, P., and Stewart, D.B., 2006, *This Dynamic Planet—World Map of Volcanoes, Earthquakes, Impact Craters, and Plate Tectonics*: U.S. Geological Survey Geologic Investigations Series Map I-2800, scale: 1:30,000,000 two sheets.
30. Sisson, T.W., Vallance, J.W., and Pringle, P.T., 2001, *Progress made in understanding Mount Rainier’s hazards*: *Eos (Transactions, American Geophysical Union)*, v. 82, p. 113, 117–120, doi: 10.1029/01EO00057.
31. Sparks, R.S.J., 2003, *Forecasting volcanic eruptions*: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 210, p.1–15, doi:10.1016/S0012-821X(03)00124-9.
32. Sutton, J., Elias, T., Hendley, J.W., II, and Stauffer, P.H., 1997, *Volcanic air pollution— a hazard in Hawai’i*: U.S. Geological Survey Fact Sheet 169-97, 1 sheet, <http://pubs.usgs.gov/fs/fs169-97/> (accessed 4 February 2009).
33. Takahashi, T.J., Heliker, C., and Diggles, M.F., 2003, *Selected images of the Pu’u ‘O’o–Kupaianaha [Hawai’i] Eruption, 1983–1997*: U.S. Geological Survey Digital Data Series DDS-80, available on the Web at <http://pubs.usgs.gov/dds/dds-80/#introduction>. (Accessed February 4, 2009).
34. U.S. Forest Service Mount St. Helens National Volcanic Monument, [2007–], *Climbing Mount St. Helens*: U.S. Forest Service, <http://www.fs.fed.us/gpnf/recreation/mount-st-helens/> (accessed 4 February 2009)

35. White, R.: Precursory deep long-period earthquakes at Mount Pinatubo: Spatio-temporal link to a basalt trigger?, in: Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines, edited by: Newhall, C. G. and Punongbayan, R. S., Philippines Institute of Volcanology and Seismology, Quezon City, and University of Washington Press, Seattle, 307–327, 1996
36. Κυριακόπουλος Κ. (2014). Ηφαιστειολογία πανεπιστήμιο Αθηνών σελ. 315.

ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ

1. <https://el.wikipedia.org/wiki/>
2. <https://www.eleftheria.gr/m/%CE%B1%CF%80%CF%8C%CF%88%CE%B5%CE%B9%CF%82/item/45370-.html>
3. <http://www1.aegean.gr/gympeir/VOLCANO.htm>
4. http://www.geo.auth.gr/765/2_landforms/24_volcano_strato.htm
5. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%291527-6988%282007%298:4%28112%29>
6. <https://www.scientificamerican.com/article/volcano-monitoring-jindal/>
7. <https://earthzine.org/volcano-monitoring-systems-essential-for-developing-countries/>
8. <http://volcanoes.usgs.gov/insar/>
9. <https://www.nps.gov/articles/volcano-monitoring.htm>
10. <https://www.tovima.gr/2014/03/12/science/ta-ifaisteia-toy-iliakoy-systimatos/>
11. <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%BF%CF%81%CE%AF%CE%BD%CE%B7>
12. <https://www.gnoristetinellada.gr/anadromes/nisia-aigaiou-pelagous/231-istoriki-anadromi-santorini-ena-nisi-sosto-ifaisteio>
13. <https://www.meteo-news.gr/2013/06/pos-to-ifaisteio-tis-santorinis-allakse-ton-kosmo.html>
14. <https://www.iefimerida.gr/news/>
15. <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9D%CE%AF%CF%83%CF%85%CF%81%CE%BF%CF%82>
16. http://www.visitgreece.gr/el/nature/volcanoes/volcano_on_nisyros
17. https://www.mou.gr/el/Documents/Nisyros/Plan_Nisyros.pdf
18. <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%92%CE%B5%CE%B6%CE%BF%CF%8D%CE%B2%CE%B9%CE%BF%CF%82>

19. <https://www.britannica.com/place/Vesuvius>
20. https://www.researchgate.net/publication/259324318_Eruption_early_warning_at_Vesuvius_The_AD_1631_lesson
21. <https://m.eirinika.gr/article/16060/1934-hronia-meta-tin-ekruxi-toy-vezoyvioy-episkefthoyme-tin-pompiia-foto-vinteo>
22. <https://www.cbc.ca/natureofthings/features/what-if-mount-vesuvius-erupted-today>
23. https://en.wikipedia.org/wiki/Yellowstone_Caldera
24. <https://www.nps.gov/yell/learn/nature/volcano.htm>
25. <https://www.nationalgeographic.com/news/2017/10/yellowstone-supervolcano-erupt-faster-thought-science/>
26. <https://www.cnn.gr/news/kosmos/story/163119/yellowstone-to-ifaisteio-poy-apeilei-ton-planiti-kai-to-sxedio-tis-nasa>
27. https://en.wikipedia.org/wiki/Mount_Pinatubo
28. <https://pubs.usgs.gov/fs/1997/fs113-97/>
29. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Volcano>
30. <http://147.102.106.44/rs/wiki/index.php/>