



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

### **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Η σεισμική ακολουθία και η αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους σαν δείκτες ηφαιστειακής δραστηριότητας : η περίπτωση του ηφαιστείου Eyjafjallajökull**

**Seismic sequence and ground temperature increase as indicators of volcanic activity:  
the case of Eyjafjallajökull volcano**

**Ανδρέας Πέτρος Παπαδημητρίου**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

- 1 Δάρας Τρύφων (επιβλέπων)**
- 2 Φιλιππάκης Μιχάλης**
- 3 Αποστολάκης Ιωάννης**

**Χανιά 6/2025**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευλκρινείς μου ευχαριστίες σε όλου όσοι στάθηκαν δίπλα μου καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της.

Ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη οφείλω στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Τρύφωνα Δάρα, για την πολύτιμη επιστημονική καθοδήγηση, τις εύστοχες συμβουλές, την άψογη συνεργασία και τη συνεχή υποστήριξη του σε κάθε στάδιο της εργασίας.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω θερμά τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, κ. Φιλιππάκη Μιχάλη και κ. Αποστολάκη Ιωάννη, για την πρόθυμη συμμετοχή τους και την τιμή που μου έκαναν και αξιολογήσουν τη διπλωματική μου εργασία.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ από καρδιάς στην οικογένεια μου και τους φίλους μου, για τη συνεχή πνευματική και υλική υποστήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της απαιτητικής άλλα και δημιουργικής διαδρομής.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μελέτη της ηφαιστειακής δραστηριότητας αποτελεί ένα κρίσιμο πεδίο έρευνας με άμεση εφαρμογή στην πρόβλεψη ηφαιστειακών εκρήξεων και τη μείωση των κινδύνων για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Τα ηφαίστεια είναι δυναμικά γεωλογικά συστήματα, των οποίων η δραστηριότητα συνδέεται με πολύπλοκους γεωφυσικούς και γεωχημικούς μηχανισμούς. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που σχετίζονται με την επικείμενη έκρηξη ενός ηφαιστείου είναι η αυξημένη σεισμική δραστηριότητα, η οποία προκαλείται από τη μετακίνηση μάγματος και την αλλαγή των γεωλογικών συνθηκών στο εσωτερικό της γης. Παράλληλα, η μεταβολή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια ή σε υπόγειες περιοχές μπορεί να αποτελεί ένδειξη αυξημένης ηφαιστειακής δραστηριότητας.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της σεισμικής δραστηριότητας και των θερμοκρασιακών μεταβολών, μέσα από τη χρήση στατιστικών μεθόδων και τεχνικών ανάλυσης δεδομένων. Συγκεκριμένα, θα εξεταστεί αν οι αλλαγές στη θερμοκρασία μπορούν να λειτουργήσουν ως πρόδρομος δείκτης ηφαιστειακής δραστηριότητας σε συνδυασμό με τις μεταβολές στη σεισμική δραστηριότητα, και κατά πόσο η στατιστική επεξεργασία των δεδομένων μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης ηφαιστειακών εκρήξεων. Η ανάλυση θα βασιστεί σε ιστορικά δεδομένα θερμοκρασιών και σεισμικών δονήσεων από ηφαιστειακές περιοχές, με έμφαση στην περίπτωση του ηφαιστείου Eyjafjallajökull στην Ισλανδία, του οποίου η έκρηξη το 2010 αποτέλεσε ένα από τα σημαντικότερα ηφαιστειακά γεγονότα των τελευταίων δεκαετιών.

Η εργασία φιλοδοξεί να συμβάλει στην κατανόηση της δυναμικής των ηφαιστειακών συστημάτων και στην ανάπτυξη βελτιωμένων προγνωστικών εργαλείων, τα οποία μπορούν να βοηθήσουν στη λήψη μέτρων προστασίας των πληθυσμών που βρίσκονται σε ηφαιστειακές περιοχές.

## Abstract

The study of volcanic activity is a critical field of research with direct applications in the prediction of volcanic eruptions and the mitigation of risks to human life and the environment. Volcanoes are dynamic geological systems whose activity is associated with complex geophysical and geochemical mechanisms. One of the most significant indicators of a potential eruption is increased seismic activity, which is caused by magma movement and changes in the geological conditions within the Earth. At the same time, variations in surface or subsurface temperature may serve as an indication of intensified volcanic activity.

The aim of this thesis is to investigate the relationship between seismic activity and temperature variations using statistical methods and data analysis techniques. Specifically, it examines whether changes in temperature can act as a precursor indicator of volcanic activity, in conjunction with seismic fluctuations, and to what extent the statistical processing of data can contribute to the development of volcanic eruption prediction models. The analysis is based on historical temperature and seismic data from volcanic regions, with a focus on the case of the Eyjafjallajökull volcano in Iceland, whose 2010 eruption was one of the most significant volcanic events in recent decades.

This study aspires to contribute to a better understanding of the dynamics of volcanic systems and to the development of improved predictive tools that can assist in implementing protective measures for populations living in volcanic areas.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΗΦΑΙΣΤΕΙΑ .....	10
1.1 Θέση ηφαιστείων .....	12
1.2 Κατηγορίες ηφαιστείων .....	12
1.2.1 Κατηγορίες ηφαιστείων με βάση τη γεωλογική πλευρά και τύπο μάγματος .....	13
1.2.2 Σπάνια είδη ηφαιστείων: .....	16
1.3 Δομή ηφαιστείων .....	18
1.4 Κύρια Ηφαιστειακά Προϊόντα και οι Επιπτώσεις τους .....	20
1.5 Εισαγωγή στους Ηφαιστειακούς Κινδύνους .....	22
2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΗΦΑΙΣΤΕΙΑΚΩΝ ΕΚΡΗΞΕΩΝ .....	31
2.1 Γεωφυσικοί Δείκτες Πρόγνωσης Ηφαιστειακής Δραστηριότητας .....	31
2.1.1 Σεισμική Δραστηριότητα .....	31
2.1.2 Θερμοκρασιακές Μεταβολές .....	31
2.2 Τεχνολογικά Εργαλεία Πρόγνωσης .....	32
3. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΚΡΗΞΗ ΤΟΥ Eyjafjallajökull (2010) .....	34
3.1 Η Έκρηξη του ηφαιστείου Eyjafjallajökull .....	34
3.2 Χρονικό τής έκρηξης .....	38
3.3 Επιπτώσεις της έκρηξης .....	47
3.3.1 Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία .....	47
3.3.2 Επιπτώσεις στο περιβάλλον .....	50
3.3.3 Επιπτώσεις στην οικονομία .....	52
4. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ .....	54
4.1 Ανάγκη για Ανάλυση της Συσχέτισης Σεισμικής Δραστηριότητας και Θερμοκρασίας .....	54
4.2 Εφαρμογή στο Ηφαίστειο Eyjafjallajökull .....	56
5. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ .....	60
5.1 Ένταση σεισμών και Θερμοκρασία Εδάφους .....	61
5.2 Απόσταση Σεισμών και Θερμοκρασία Εδάφους .....	64
5.3 Ένταση Σεισμών/Απόσταση Σεισμών και Θερμοκρασία Εδάφους .....	67
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	72
Παρουσίαση βασικού ευρήματος .....	72

Ερμηνεία του ευρήματος.....	72
Περιορισμοί της μελέτης .....	73
Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	74
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	75
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	77

## Πίνακες

Πίνακας 1: Περιγραφικά χαρακτηριστικά των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και της έντασης των σεισμών.....	61
Πίνακας 2: Συντελεστής συσχέτισης των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και της έντασης των σεισμών.....	62
Πίνακας 3 : Συντελεστής συσχέτισης δύο μεταβλητών .....	62
Πίνακας 4: Ανάλυση διασποράς των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και της έντασης των σεισμών.....	63
Πίνακας 5: Ευθεία παλινδρόμησης των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και της έντασης των σεισμών.....	63
Πίνακας 6: Περιγραφικά χαρακτηριστικά των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και της απόστασης των σεισμών.....	65
Πίνακας 7: Συντελεστής συσχέτισης των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και της απόστασης των σεισμών.....	65
Πίνακας 8: Συντελεστής συσχέτισης δύο μεταβλητών .....	65
Πίνακας 9: Ανάλυση διασποράς των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και της απόστασης των σεισμών.....	66
Πίνακας 10: Ευθεία παλινδρόμηση των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και της απόστασης των σεισμών.....	66
Πίνακας 11: Περιγραφικά χαρακτηριστικά των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και έντασης σεισμών/ απόστασης σεισμών.....	67
Πίνακας 12: Συντελεστής συσχέτισης των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και έντασης σεισμών/ απόστασης σεισμών.....	68
Πίνακας 13: Συντελεστής συσχέτισης δύο μεταβλητών.....	68
Πίνακας 14: Ανάλυση διασποράς των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και έντασης σεισμών/ απόστασης σεισμών.....	69
Πίνακας 15: Ευθεία παλινδρόμησης των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και έντασης σεισμών/ απόστασης σεισμών.....	69



Πίνακας 16: Αποτελέσματα της ανάλυσης.....	71
--	----

## Διαγράμματα

Διάγραμμα 1: Αθροιστικός αριθμός και σεισμική ροπή των σεισμών.....	57
Διάγραμμα 2: Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας (average temperature) από τις 23 Φεβρουαρίου έως τις 20 Μαρτίου 2010.....	58
Διάγραμμα 3: Ιστόγραμμα τυποποιημένων υπολοίπων για τη θερμοκρασία του εδάφους.....	64
Διάγραμμα 4: Διάγραμμα P-P plot τυποποιημένων υπολοίπων της ανάλυση μεταξύ απόστασης σεισμικής εστίας και θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους .....	67
Διάγραμμα 5: Διάγραμμα P-P plot τυποποιημένων υπολοίπων για την ανάλυση μεταξύ έντασης σεισμών/απόσταση σεισμών και θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους.....	70

## Εικόνες

Εικόνα 1: Ηφαίστειο Σαντορίνης.....	11
Εικόνα 2: Έκρηξη του Βεζούβιου.....	12
Εικόνα 3: Ηφαίστειο Etna.....	13
Εικόνα 4: Ασπιδοειδές ηφαίστειο Μαούνα Λόα Χαβάη.....	14
Εικόνα 5: Στρωματοηφαίστειο Fuji Ιαπωνία.....	14
Εικόνα 6: Ηφαιστειακός δόμος όρους Μυόκο.....	15
Εικόνα 7: Υπερηφαίστειο Νάπολης.....	16
Εικόνα 8: Κρυσταλλοηφαίστειο.....	16
Εικόνα 9: Ηφαίστειο λάσπης Αζερμπαϊτζάν.....	17
Εικόνα 10: Δομή ηφαιστείου.....	18

Εικόνα 11: Ηφαιστειακά προϊόντα.....	20
Εικόνα 12: Ηφαίστειο Krakatoa.....	23
Εικόνα 13: Ηφαιστειακή τέφρα σε κατοικημένη περιοχή μετά από ηφαιστειακή έκρηξη.....	24
Εικόνα 14: Στιγμιότυπο από την επέλαση τσουνάμι στην πόλη Miyako, Ιαπωνία (2011).....	25
Εικόνα 15: Ηφαιστειακή έκρηξη του Eyjafjallajökull στην Ισλανδία (2010).....	34
Εικόνα 16: Θέση Eyjafjallajökull ηφαιστίου.....	35
Εικόνα 17: Ηφαιστειακή έκρηξη με κεραυνό (volcanic lightning).....	37
Εικόνα 18: Νέφη ηφαιστειακής τέφρας από έκρηξη Eyjafjallajökull.....	38
Εικόνα 19: Το ηφαίστειο Eyjafjallajökull πριν την έκρηξη.....	39
Εικόνα 20: Ααερφωτογραφίες απο την ηφαιστειακή έκρηξη του Eyjafjallajöku.....	41
Εικόνα 21: Το χαμηλό ύψος ηφαιστειακού νέφους στις 2000UTC στις 17 Απριλίου 2010.....	44
Εικόνα 22: Το ηφαιστειακό νέφος στις 1542 UTC στις 23 Απριλίου κατά τη διάρκεια της λιγότερο ενεργής φάσης.....	45
Εικόνα 23: Οδήγηση σε δρόμο καλυμμένο με ηφαιστειακή τέφρα.....	48
Εικόνα 24: Φυτική βλάστηση καλυμμένη απο ηφαιστειακή τέφρα.....	50
Εικόνα 25: Επιπτώσεις της ηφαιστειακής τέφρας στη γεωργία και την κτηνοτροφία.....	51
Εικόνα 26: Μάγμα.....	55

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΗΦΑΙΣΤΕΙΑ

Τα ηφαίστεια είναι γεωλογικά φαινόμενα που εμφανίστηκαν πριν από περίπου 4,5 δισεκατομμύρια χρόνια, κατά τον σχηματισμό της Γης. Ένα ηφαίστειο αποτελεί μια ανοικτή δίοδο από το εσωτερικό της Γης μέσω της οποίας εκρέουν ή εκρήγνυνται ρευστά πετρώματα και αέρια υπό τη μορφή λάβας. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα οδηγεί στην δημιουργία ηφαιστειακών βουνών, τα οποία διαμορφώνουν το ανάγλυφο του πλανήτη. Ωστόσο οι επιπτώσεις αυτής της δραστηριότητας μπορεί να είναι καταστροφικές τόσο για το περιβάλλον όσο και για τις ανθρώπινες κοινότητες.

Στο κεφάλαιο αυτό, θα εξετάσουμε τη θέση των ηφαιστείων στον πλανήτη, τις διάφορες κατηγορίες τους, τη δομή τους, τα ηφαιστειακά προϊόντα που παράγονται κατά τη διάρκεια μιας έκρηξης, καθώς και τις επιπτώσεις της ηφαιστειακής δραστηριότητας, τόσο για το περιβάλλον όσο και για τις ανθρώπινες κοινωνίες. Επιπλέον, θα αναλύσουμε τους κινδύνους που συνδέονται με τα ηφαίστεια και τη σημασία της κατανόησης αυτών των φαινομένων για την πρόβλεψη και την προστασία από πιθανές ηφαιστειακές καταστροφές.



**Εικόνα 1:** Ηφαίστειο Σαντορίνης.

Πηγή: (<https://www.in.gr/2023/01/16/greece/ifaisteio-santorinis-pithani-ekriksi-sta-epomena-150-xronia-entopistike-o-magmatikos-thalamos-ston-vytho/>)

## 1.1 Θέση ηφαιστείων

Η θέση των ηφαιστείων συνδέεται με τα όρια των τεκτονικών πλακών, όπου οι πλάκες συγκλίνουν ή απομακρύνονται, προκαλώντας ηφαιστειακή δραστηριότητα. Αντίθετα, ηφαίστεια δεν δημιουργούνται εκεί όπου δύο τεκτονικές πλάκες κινούνται πλευρικά η μία ως προς την άλλη. Επιπλέον, ηφαίστεια σχηματίζονται σε περιοχές όπου υπάρχει διάταξη του γήινου φλοιού ή όπου αυτός είναι ιδιαίτερα λεπτός, όπως στην κοιλάδα του Αφρικανικού Ρήγματος. Η ηφαιστειογένεση μπορεί επίσης να συμβεί πάνω από «θερμά σημεία» του μανδύα της Γης τα οποία δεν συνδέονται άμεσα με τα όρια των τεκτονικών πλακών, όπως είναι τα νησιά της Χαβάης. Έχουν εντοπιστεί ηφαίστεια και σε άλλους πλανήτες ή μεγάλους δορυφόρους στο Ηλιακό Σύστημα.

## 1.2 Κατηγορίες ηφαιστείων

Τα ηφαίστεια διακρίνονται σε **ενεργά** και **ανενεργά**, ενώ ταξινομούνται με βάση τον τρόπο έκρηξης τους σε **εκρηκτικά** και **εκχυτικά**. Ωστόσο, υπάρχουν ηφαίστεια με μικτή δραστηριότητα όπως τα στρωματοηφαίστεια τα οποία παρουσιάζουν τόσο εκρηκτικές όσο και εκχυτικές εκρήξεις, καθιστώντας τα ιδιαίτερα επικίνδυνα.

- **Εκρηκτικά ηφαίστεια:** Παράγουν ισχυρές εκρήξεις που μπορούν να προκαλέσουν την κατάρρευση του ηφαιστείου και τον σχηματισμό καλδέρας (εδαφικής κοιλότητας). Οι εκρήξεις αυτές συνδέονται με εκσφενδονισμό βραχωδών υλικών, ροές λάβας και λάσπης καθώς και από τις εκπομπές επιβλαβών αερίων. Συχνά συνδέονται με σεισμική δραστηριότητα.



**Εικόνα 2:** Έκρηξη του Βεζούβιου

Πηγή: («Η Έκρηξη του Βεζούβιου όπως φαίνεται από τη Νάπολη, Οκτώβριος 1822» από V. Day & Son. Στο έργο του G. Julius Poulett Scrope, Masson, 1864. Ιστορικό σχέδιο από τον George Julius Poulett Scrope (1797-1876).)

- **Εκχυτικά ηφαίστεια:** Χαρακτηρίζονται από αργή ροή λάβας λόγω του χαμηλού ιξώδους της βασαλτικής σύνθεσης της. Οι εκρήξεις είναι μικρής έντασης και περιλαμβάνουν πίδακες λάβας, εδαφικές παραμορφώσεις και εκπομπές αερίων και ατμών.



**Εικόνα 3:** Ηφαίστειο Etna ( Italy)

Πηγή:(VolcanoDiscovery (2021). Lava flows on Etna's SE flank.)

#### 1.2.1 Κατηγορίες ηφαιστείων με βάση τη γεωλογική πλευρά και τύπο μάγματος.

Ο διαχωρισμός ηφαιστείων γίνεται τους με βάση τη γεωλογική πλευρά και τύπο μάγματος:

- **Ασπιδοειδή ηφαίστεια:** Δημιουργούνται από βασαλτικές ροές λάβας χαμηλού ιξώδους, έχουν πιο ήπιο προφίλ και μεγάλες διαστάσεις, μοιάζοντας με ασπίδα. Οι εκρήξεις τους είναι γενικά ήπιες. Γνωστά παραδείγματα είναι το Μάουνα Κέα στη Χαβάη και τα νησιά Γκαλαπάγκος.





**Εικόνα 4:** Ασπιδοειδές ηφαίστειο Μαούνα Λόα Χαβάη

Πηγή: (<https://www.athensvoice.gr/epikairotita/diethni/648137/anakalyfthike-megalytero-aspidoeides-ifaisteio-tis-gis-video/>)

- **Στρωματοηφαίστεια (κωνικά ηφαίστεια):** Παρουσιάζουν εναλλασσόμενα στρώματα λάβας και τέφρας, με απότομες πλαγιές και διαφορετικά είδη λάβας. Η εναλλαγή εκρηκτικής και εκχυτικής δραστηριότητας τα καθιστά επικίνδυνα. Παράδειγμα αποτελούν το Βεζούβιος και η Αίτνα.



**Εικόνα 5:** Στρωματοηφαίστειο Fuji Ιαπωνία

Πηγή: (<http://www.volcano.si.edu/world/volcano.cfm?vnum=0803-03=&volpage=photos&photo=02000>)

- **Ηφαιστειακοί δόμοι:** Πρόκειται για κυκλικούς, απομονωμένους λόφους ηφαιστειακής προέλευσης, που σχηματίζονται όταν το μάγμα φτάνει στην επιφάνεια αλλά στερεοποιείται πριν προλάβει να ρέει. Συνήθως είναι πλούσιο σε διοξείδιο του πυριτίου και φτωχό σε αέρια.



**Εικόνα 6:** Ηφαιστειακός δόμος όρους Μυόκο

Πηγή: ([https://el.wikipedia.org/wiki/Ηφαιστειακός\\_δόμος](https://el.wikipedia.org/wiki/Ηφαιστειακός_δόμος))

- **Υπερηφαίστεια:** Πρόκειται για τα πλέον τεράστια ηφαίστεια, ικανά να παράγουν εκρήξεις με όγκο ηφαιστειακού υλικού άνω των 1.000 κυβικών χιλιομέτρων. Δημιουργούνται όταν το μάγμα συσσωρεύεται κάτω από τον φλοιό χωρίς να μπορεί να διαφύγει, έως ότου η πίεση ξεπεράσει τη συνοχή του φλοιού. Γνωστό υπερηφαίστειο είναι το Yellowstone.



**Εικόνα 7:** Υπερηφαίστειο Νάπολης

Πηγή: (<https://www.kathimerini.gr/world/562697665/synechizei-na-vrychatai-to-yperifaisteio-tis-napoli>)

#### 1.2.2 Σπάνια είδη ηφαιστειών:

- **Κρυοηφαίστεια** ή «ηφαίστεια του πάγου», που εντοπίζονται σε παγωμένα ουράνια σώματα, όπως ο Τρίτωνας και ο Εγκέλαδος.



**Εικόνα 8:** Κρυοηφαίστειο

Πηγή: (<https://www.iefimerida.gr/news/184884/kryoifaisteia-otan-anti-gia-lava-ta-ifaisteia-ektoxeuoun-pago-kai-hioni-eikones>)



- **Ηφαίστεια λάσπης**, τα οποία εκλύουν αργιλώδη λάσπη και αέρια αντί για λάβα

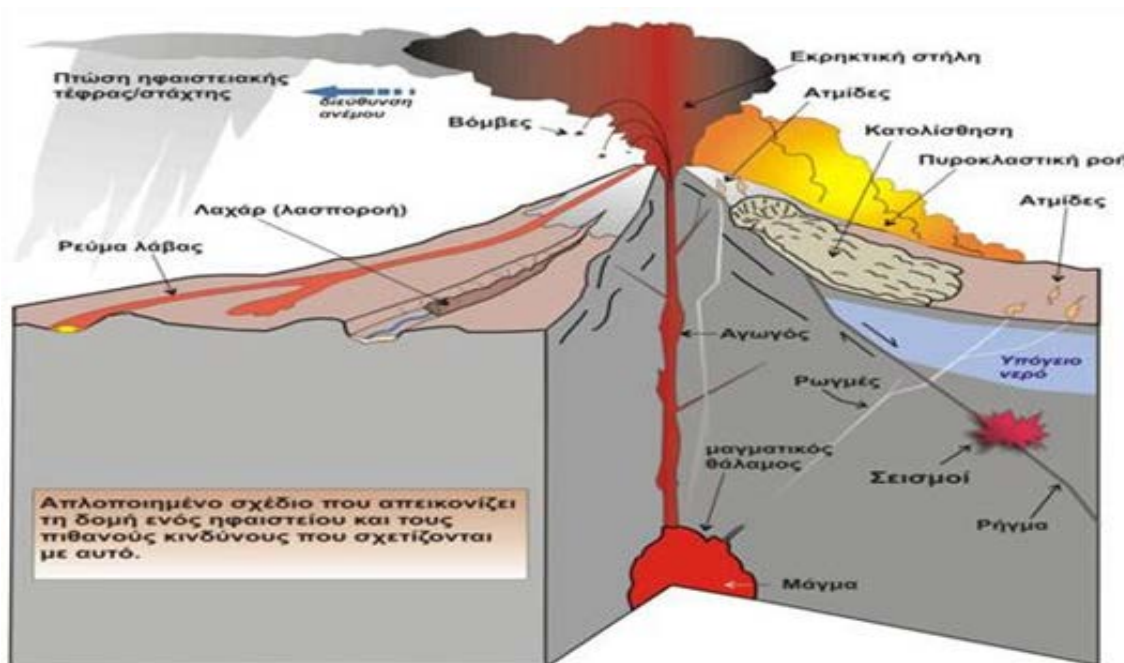


**Εικόνα 9:** ηφαίστειο λάσπης Αζερμπαϊτζάν

Πηγή: (<https://el.geologyscience.com> )

Η μελέτη των ηφαιστειών είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της γεωλογικής δραστηριότητας του πλανήτη και την πρόβλεψη πιθανών ηφαιστειακών εκρήξεων, με σκοπό την προστασία των ανθρώπων και του περιβάλλοντος.

### 1.3 Δομή ηφαιστείων



Εικόνα 10: Δομή ηφαιστείου

Πηγή: Unknown author / image from internet; original source not identified

- 1. Ηφαιστειακή περιοχή.** Η ηφαιστειακή περιοχή είναι η ζώνη γύρω από το ηφαίστειο το οποίο επηρεάζει άμεσα από τις εκρήξεις, τη θερμότητα και τις γεωθερμικές διαδικασίες. Τα ηφαιστειακά πετρώματα, όπως το βασαλτικό και το ανδεσιτικό, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη φύση των εκρήξεων και στη διαμόρφωση του τοπίου. Η χημική σύστασή τους επηρεάζει το ιξώδες του μάγματος, την εκρηκτικότητα και τη δυναμική της λάβας, ενώ η συσσώρευση ηφαιστειακών υλικών συμβάλλει στη δημιουργία ηφαιστειακών κώνων και καλδερών. Οι γεωλογικές και γεωχημικές διεργασίες στην περιοχή καθορίζουν την εξέλιξη του ηφαιστείου και την αλληλεπίδρασή του με το περιβάλλον.
- 2. Θάλαμος μάγματος.** Ο θάλαμος μάγματος είναι μια υπόγεια δεξαμενή λιωμένου πετρώματος που βρίσκεται σε διάφορα βάθη εντός του φλοιού και του ανώτερου μανδύα. Σχηματίζεται από τη συσσώρευση μάγματος που προέρχεται από μεγαλύτερα βάθη μέσω γεωλογικών διεργασιών. Ο ρόλος του είναι να αποθηκεύει το μάγμα και να τροφοδοτεί το ηφαίστειο, ενώ η αυξημένη πίεση μπορεί να οδηγήσει σε ηφαιστειακή δραστηριότητα. Το μέγεθος και η σύστασή του ποικίλλουν,

επηρεάζοντας τον τύπο των εκρήξεων και τα ηφαιστειακά υλικά που εκτοξεύονται. Το μάγμα αποτελείται από λιωμένο πέτρωμα, αέρια και ορυκτά.

**3. Κρατήρας.** Ο κρατήρας είναι το κεντρικό σημείο του ηφαιστειακού σχηματισμού, από όπου εξέρχονται ηφαιστειακά υλικά σε υγρή, στερεή ή αέρια μορφή. Το μέγεθος, το σχήμα και η μορφολογία του εξαρτώνται από τον τύπο του ηφαιστείου και τη φύση των εκρήξεων. Οι κρατήρες διακρίνονται σε:

- **Κωνοειδείς**, όπου ο ηφαιστειακός κώνος ανυψώνεται από τη συσσώρευση λάβας και στην κορυφή του κλείνει απότομα προς το εσωτερικό, συνδεόμενος με τον πόρο.
- **Χοανοειδείς**, όπου ο ηφαιστειακός κώνος σχηματίζει στο εσωτερικό του μια χοάνη, η οποία επικοινωνεί με τον πόρο.
- **Καλδέρες**, οι οποίες έχουν μεγάλες διαστάσεις και απαντώνται σε σύνθετα ηφαίστεια. Σχηματίζονται συνήθως μετά από έντονη διάβρωση ή έκρηξη που καταστρέφει τον προϋπάρχοντα κρατήρα.
- **Maare**, που είναι χοανοειδείς σχηματισμοί με εσωτερική κοιλότητα που συγκεντρώνει τα νερά της βροχής, σχηματίζοντας λίμνη.

**4. Κώνος.** Ο ηφαιστειακός κώνος σχηματίζεται από τη στερεοποίηση της λάβας γύρω από το σημείο εξόδου της. Οι πλαγιές του ηφαιστείου αποτελούνται από στρώματα λάβας, τέφρας και ηφαιστειακών θραυσμάτων, επηρεάζοντας το σχήμα, την κλίση και τη σταθερότητα της ηφαιστειακής δομής. Οι κώνοι είναι συχνά προσωρινοί σχηματισμοί, καθώς μεταβάλλονται ή καταστρέφονται μετά από ηφαιστειακές εκρήξεις.

**5. Πόρος.** Ο πόρος είναι ο αγωγός μέσω του οποίου το μάγμα ανέρχεται από μεγάλα βάθη στην επιφάνεια. Συνδέει τη μαγματική εστία με τον κρατήρα και ενδέχεται να διακλαδίζεται, σχηματίζοντας παρασιτικούς πόρους που δημιουργούν δευτερεύοντες κρατήρες ή κώνους. Οι διαστάσεις του ποικίλλουν και μεταβάλλονται ανάλογα με τις γεωλογικές διεργασίες.

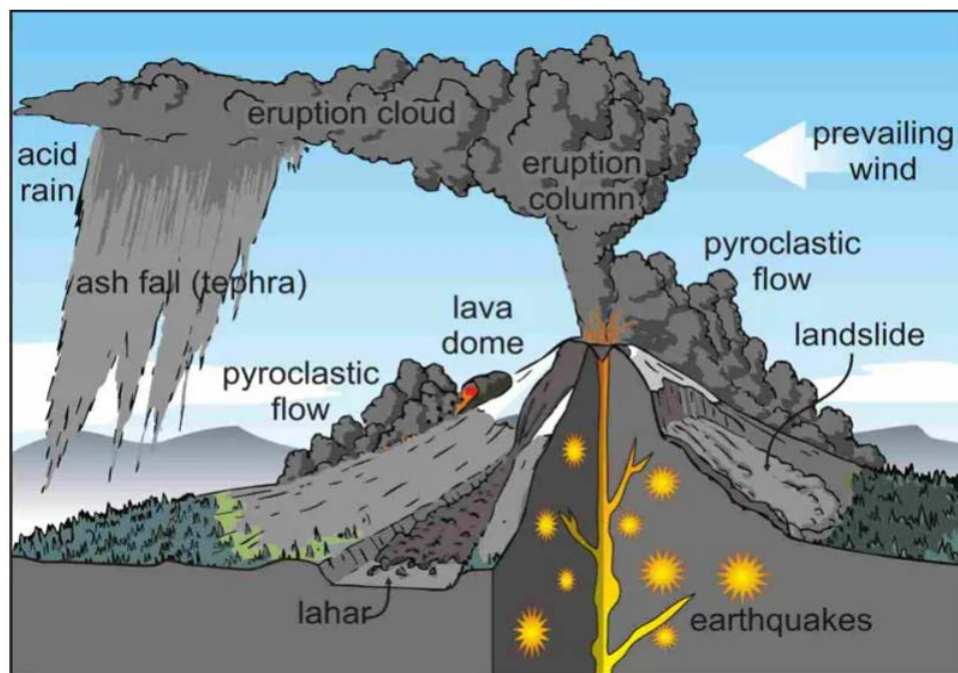
**6. Διέξοδος.** Η διέξοδος ή αεραγωγός είναι το άνοιγμα μέσω του οποίου το ηφαιστειακό υλικό εκτοξεύεται στην επιφάνεια. Συνδέεται άμεσα με τον πόρο, που μεταφέρει το μάγμα από τον θάλαμο μάγματος. Η δυναμική της ηφαιστειακής δραστηριότητας εξαρτάται από το ιξώδες του μάγματος και την περιεκτικότητά του σε αέρια, επηρεάζοντας την ένταση της έκρηξης.

**7. Υποηφαιστειακή περιοχή.** Βρίσκεται κάτω από την ηφαιστειακή περιοχή και περιλαμβάνει δευτερεύουσες μαγματικές εστίες. Σε αυτήν τη ζώνη μπορεί να σχηματίζονται λακκόλιθοι και σωροί, οι οποίοι είναι αποτέλεσμα της μερικής κρυστάλλωσης του μάγματος πριν φτάσει στην επιφάνεια.

**8. Πλουτώνια περιοχή.** Η πλουτώνια περιοχή βρίσκεται σε μεγάλο βάθος, κάτω από την υποηφαιστειακή ζώνη, και αποτελεί την κύρια μαγματική εστία. Αντιστοιχεί στο κατώτερο τμήμα του γήινου φλοιού και το ανώτερο του μανδύα, όπου λαμβάνει χώρα μερική τήξη των πετρωμάτων λόγω υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων. Οι μαγματικές δεξαμενές που σχηματίζονται εδώ μπορούν να παραμείνουν σε ημιτήγμα κατάσταση για μεγάλα γεωλογικά διαστήματα, προτού το μάγμα ανέλθει μέσω ηφαιστειακών αγωγών. Το βάθος αυτών των μαγματικών σωμάτων ποικίλει, κυμαινόμενο από μερικά έως δεκάδες χιλιόμετρα κάτω από την επιφάνεια της Γης.

#### 1.4 Κύρια Ηφαιστειακά Προϊόντα και οι Επιπτώσεις τους

Τα ηφαιστειακά προϊόντα είναι ποικιλία υλικών και αποτέλεσμα ηφαιστειακών εκρήξεων. Συχνά προκαλούν σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, το κλίμα και τους ανθρώπινους οικισμούς. Κύρια ηφαιστειακά προϊόντα είναι:



**Εικόνα 11:** Ηφαιστειακά προϊόντα

Πηγή: (<https://el.geologyscience.com/%CE%BA%CE%BB%CE%AC%CE%B4%CE%BF%CF%85%CF%82-%CE%B3%CE%B5%CF%89%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B1%CF%82/%CE%B7%CF%86%CE%B1%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%B5%CE%B9%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B1/%CE%B1%CE%BD%CE%B1%CF%84%CE%BF%CE%BC%CE%AF%CE%B1-%CE%B7%CF%86%CE%B1%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%B5%CE%AF%CE%BF%CF%85/> )

1. **Λάβα:** Η λάβα είναι λιωμένο πέτρωμα που ρέει στην επιφάνεια της Γης ύστερα από ηφαιστειακές εκρήξεις. Η σύστασή της μπορεί να διαφέρει, με τη βασαλτική λάβα να είναι η πιο συνηθισμένη, ενώ άλλοι τύποι περιλαμβάνουν την ανδεσιτική και τη ρυολιθική. Ο τρόπος ροής της εξαρτάται από το ιξώδες της, με ορισμένες ροές να είναι ομαλές και σχοινοειδείς (rahoehoe), ενώ άλλες είναι πιο τραχείες και ακανόνιστες.
2. **Πυροκλαστικό Υλικό:** Τα πυροκλαστικά υλικά περιλαμβάνουν διάφορους τύπους ηφαιστειακών εκτινάξεων. Η τέφρα αποτελείται από λεπτά σωματίδια ηφαιστειακού γυαλιού και ορυκτών, τα οποία απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα κατά τις εκρήξεις. Τα σύννεφα τέφρας μπορούν να διανύσουν μεγάλες αποστάσεις, επηρεάζοντας τόσο την ποιότητα του αέρα όσο και τις αερομεταφορές. Τα lapilli είναι μεγαλύτερα σωματίδια, με μέγεθος που κυμαίνεται από αυτό ενός μπιζελιού έως μερικά εκατοστά, και είτε πέφτουν κοντά στον κρατήρα είτε μεταφέρονται από τον άνεμο. Οι ηφαιστειακές βόμβες είναι ακόμη μεγαλύτερα τμήματα λάβας, που εκτοξεύονται κατά τη διάρκεια εκρηκτικών εκρήξεων και στερεοποιούνται πριν φτάσουν στο έδαφος, συχνά παίρνοντας στρογγυλεμένο ή επιμήκες σχήμα.
3. **Αέρια:** Τα ηφαίστεια εκπέμπουν διάφορα αέρια κατά τη διάρκεια μιας έκρηξης, με πιο κοινό τους υδρατμούς, που απελευθερώνονται καθώς το μάγμα ψύχεται και αποβάλλει αέρια. Ένα άλλο σημαντικό αέριο είναι το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), το οποίο, όταν εκλύεται σε μεγάλες ποσότητες, μπορεί να επηρεάσει το κλίμα λόγω της συμβολής του στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Επίσης, το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ), όταν φτάνει στην ατμόσφαιρα, μπορεί να προκαλέσει ατμοσφαιρική ρύπανση και να συμβάλει στον σχηματισμό όξινης βροχής.
4. **Tephra:** Ο όρος tephra χρησιμοποιείται για να περιγράψει οποιοδήποτε ηφαιστειακό υλικό που εκτινάσσεται στην ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια μιας ηφαιστειακής έκρηξης. Σε αυτήν την κατηγορία περιλαμβάνονται η ηφαιστειακή τέφρα, τα λαπίλλια και οι ηφαιστειακές βόμβες. Ανάλογα με το μέγεθος και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, το tephra μπορεί είτε να κατακαθίσει κοντά στο ηφαίστειο είτε να παρασυρθεί από τον άνεμο και να ταξιδέψει σε μεγάλες αποστάσεις, επηρεάζοντας εκτεταμένες περιοχές.
5. **Λαχάρ:** Το λαχάρ είναι ένας τύπος ηφαιστειακής ροής λάσπης ή ροής συντριμμίων, που σχηματίζεται συχνά λόγω της απότομης τήξης χιονιού ή πάγου σε ένα ηφαίστειο κατά τη διάρκεια μιας έκρηξης. Αυτές οι ροές περιέχουν νερό, ηφαιστειακή τέφρα και θραύσματα βράχων, δημιουργώντας ένα πυκνό και

ταχύρρυθμο ρεύμα που μπορεί να διανύσει μεγάλες αποστάσεις. Τα λαχάρ αποτελούν σοβαρή απειλή για τις περιοχές που βρίσκονται χαμηλότερα, καθώς έχουν τη δυνατότητα να καταστρέψουν ολόκληρες κοινότητες στο πέρασμά τους.

- 6. Ηφαιστειακά πετρώματα και ορυκτά:** Τα ηφαιστειακά πετρώματα διακρίνονται σε διάφορους τύπους, ανάλογα με τη σύστασή τους. Ο βασάλτης, ο ανδεσίτης και η ρυόλιθος είναι μερικά από τα πιο κοινά είδη, το καθένα με διαφορετικά ορυκτολογικά χαρακτηριστικά. Ο οψιδιανός είναι ένας υαλώδης ηφαιστειακός βράχος που σχηματίζεται όταν η λάβα ψύχεται απότομα, αποκτώντας λεία και γυαλιστερή επιφάνεια. Αντίθετα, η ελαφρόπετρα (pumice) είναι ένας ιδιαίτερα πορώδης και ελαφρύς ηφαιστειακός βράχος, που δημιουργείται από εκρηκτικές εκρήξεις και μπορεί να επιπλέει στο νερό λόγω της χαμηλής πυκνότητάς του.

Η κατανόηση των τύπων και των ιδιοτήτων των ηφαιστειακών προϊόντων είναι απαραίτητη για την εκτίμηση των κινδύνων που σχετίζονται με την ηφαιστειακή δραστηριότητα και για τη μείωση των επιπτώσεών τους στις ανθρώπινες κοινότητες και το περιβάλλον. Η συνεχής παρακολούθηση και μελέτη αυτών των υλικών ενισχύει την ικανότητά μας να προβλέπουμε και να αντιμετωπίζουμε ηφαιστειακές εκρήξεις με μεγαλύτερη ακρίβεια.

### 1.5 Εισαγωγή στους Ηφαιστειακούς Κινδύνους

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις συνοδεύονται από μια σειρά κινδύνων που μπορούν να επηρεάσουν τόσο το φυσικό περιβάλλον όσο και τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Μεταξύ αυτών συγκαταλέγονται οι ροές λάβας, οι εκρηκτικές εκτοξεύσεις, τα τοξικά αέρια, η πτώση ηφαιστειακής στάχτης, οι πυροκλαστικές ροές, οι χιονοστιβάδες, τα τσουνάμια και η αστάθεια των εδαφών. Πέρα από τις άμεσες επιπτώσεις, η ηφαιστειακή δραστηριότητα μπορεί να προκαλέσει δευτερογενείς συνέπειες, όπως καταστροφές υποδομών, απώλειες στη γεωργία και μεταβολές στο κλίμα.



## ΕΚΡΗΞΕΙΣ



**Εικόνα 12 :** Ηφαίστειο Krakatoa

Krakatoa (Krakatau) Colour lithograph of the eruption of Krakatoa (Krakatau) volcano, Indonesia, 1883; from the Royal Society, *The Eruption of Krakatoa and Subsequent Phenomena* (1888).

Πηγή: (<https://www.britannica.com/science/volcano/Four-of-the-worst-eruptions-in-history>)

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις προκαλούνται κυρίως από τη ραγδαία απελευθέρωση αερίων, η οποία μπορεί να οφείλεται σε ξαφνική αποσυμπίεση ενός υδροθερμικού συστήματος ή ενός μάγματος πλούσιου σε αέρια. Επιπλέον, η ταχεία ανάμιξη μάγματος με υπόγειο νερό μπορεί να ενισχύσει εκρηκτικά το φαινόμενο. Κατά τη διάρκεια αυτών των εκρήξεων, εκτοξεύονται στάχτη, καυτά θραύσματα και ηφαιστειακές βόμβες, τα οποία αποτελούν τα βασικά προϊόντα των ηφαιστειακών εκρήξεων παγκοσμίως.

Τα εκρηκτικά υλικά κατατάσσονται με βάση το μέγεθός των σωματιδίων τους. Η πιο λεπτόκοκκη μορφή είναι η ηφαιστειακή σκόνη, η οποία έχει υφή παρόμοια με αλεύρι. Η ηφαιστειακή στάχτη είναι επίσης λεπτόκοκκη αλλά πιο τραχιά, με σωματίδια που φτάνουν το μέγεθος ενός κόκκου ρυζιού. Τα μεγαλύτερα θραύσματα, γνωστά και ως σκώληκες ή lapilli, κυμαίνονται σε μέγεθος από 2 mm έως 64 mm. Όσα είναι μεγαλύτερα από 64 mm ταξινομούνται ως ηφαιστειακά μπλοκ ή βόμβες.

Οι ηφαιστειακοί βράχοι συχνά προέρχονται από παλαιότερα στρώματα πετρωμάτων που διασπώνται κατά την εκρηκτική δημιουργία ενός νέου ηφαιστειακού αεραγωγού. Κατά τη διάρκεια ισχυρών εκρήξεων, μεγάλα πετρώματα μπορούν να εκτοξευθούν σε απόσταση έως και 20 χιλιομέτρων από τον κρατήρα. Αντίθετα, οι ηφαιστειακές βόμβες είναι ακόμα ημίρρευστες και πυρακτωμένες όταν εκτοξεύονται, παίρνοντας συχνά περίεργα, στριμμένα σχήματα καθώς περιστρέφονται στον αέρα. Ορισμένες από αυτές αναπτύσσουν μια εξωτερική κρούστα που ραγίζει και διαχωρίζεται καθώς ψύχεται, δημιουργώντας τις λεγόμενες "βόμβες με κρούστα ψωμιού".

Ιδιαίτερα καταστροφικές είναι οι κατευθυνόμενες εκρήξεις, στις οποίες ένα τμήμα του ηφαιστειακού κώνου καταρρέει, απελευθερώνοντας μαζικές ποσότητες υλικών προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η έκρηξη του όρους Σεντ Χέλενς το 1980 στις Ηνωμένες Πολιτείες, η οποία ισοπέδωσε εκατοντάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα στην πληγείσα πλευρά του ηφαιστείου. Όταν το εκρηκτικό υλικό είναι εξαιρετικά πυκνό και φορτωμένο με θραύσματα, μπορεί να μετατραπεί σε μια ταχύρρυθμη, θανατηφόρα πυροκλαστική ροή, με καταστροφικές συνέπειες για την ευρύτερη περιοχή

## ΠΥΡΟΚΛΑΣΤΙΚΕΣ ΡΟΕΣ

Οι πυροκλαστικές ροές αποτελούν μία από τις πιο επικίνδυνες και καταστροφικές εκδηλώσεις της εκρηκτικής ηφαιστειακής δραστηριότητας. Συχνά αποκαλούνται με διάφορες ονομασίες, όπως *nuées ardentes* («πύρινα νέφη»), φωτεινές χιονοστιβάδες ή ροές στάχτης. Παρουσιάζουν ποικιλία ως προς την ένταση και τη μορφή τους, όμως το κοινό τους χαρακτηριστικό είναι η ταχύτατη ροή ενός μίγματος ηφαιστειακών σωματιδίων, καυτών αερίων και παγιδευμένου αέρα. Η σύνθεσή τους τις καθιστά εξαιρετικά ρευστές και ταυτόχρονα αρκετά πυκνές ώστε να κινούνται παράλληλα με την επιφάνεια της γης.

Μια πυροκλαστική ροή μπορεί να εκτοξευθεί από το χείλος ενός εκρηκτικού ηφαιστειακού αεραγωγού ή να σχηματιστεί όταν η στήλη στάχτης που εκλύεται κατά την έκρηξη γίνεται τόσο πυκνή, ώστε να μην μπορεί να διατηρηθεί στον αέρα και καταρρέει πίσω στο έδαφος. Επιπλέον, σε μεγάλης κλίμακας εκρήξεις που συνοδεύονται από καταρρεύσεις καλντέρας, τεράστιες ποσότητες πυροκλαστικού υλικού μπορούν να εκλυθούν από ρωγμές που σχηματίζονται περιμετρικά της ηφαιστειακής δομής.

Η ταχύτητα των πυροκλαστικών ροών μπορεί να φτάσει έως και τα 160 χιλιόμετρα την ώρα (100 μίλια/ώρα), ενώ οι θερμοκρασίες τους κυμαίνονται από 100 έως 700°C. Οτιδήποτε βρεθεί στην πορεία τους καταστρέφεται, καθώς η θερμότητα και η ορμή τους είναι ικανές να ισοπεδώσουν και να αποτεφρώσουν μεγάλες εκτάσεις. Οι μικρότερες πυροκλαστικές ροές τείνουν να ακολουθούν την τοπογραφία, κινούμενες κυρίως μέσα σε κοιλάδες, ενώ οι μεγαλύτερες μπορούν να απλωθούν σε τεράστιες περιοχές, καλύπτοντας εκατοντάδες ή και χιλιάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα.



Χαρακτηριστικό παράδειγμα εκτεταμένων πυροκλαστικών ροών αποτελούν οι τρεις μεγάλες εκρήξεις που σημειώθηκαν στην περιοχή του Yellowstone τα τελευταία δύο εκατομμύρια χρόνια. Οι εκρήξεις αυτές οδήγησαν σε καταρρεύσεις καλντέρας, εκλύοντας από 280 έως 2.500 κυβικά χιλιόμετρα ηφαιστειακής στάχτης και πυροκλαστικού υλικού, μεταμορφώνοντας το τοπίο της περιοχής.

## **ΣΥΝΝΕΦΑ ΑΕΡΙΩΝ**

Ακόμη και πέρα από τη ζώνη της εκρηκτικής καταστροφής, τα καυτά σύννεφα αερίων που συνοδεύουν ηφαιστειακές εκρήξεις μπορεί να προκαλέσουν σοβαρές συνέπειες για το περιβάλλον και τη ζωή. Τα αέρια αυτά, συχνά εμπλουτισμένα με ηφαιστειακή στάχτη, μπορούν να καταστρέψουν τη βλάστηση και να προκαλέσουν ασφυξία σε ζώα και ανθρώπους. Σε ορισμένες περιπτώσεις, σύννεφα αερίων εκλύονται όχι μόνο από τις εκρήξεις αλλά και από ηφαιστειακούς αεραγωγούς (φουμαρόλες) ή από ξαφνικές ανατροπές λιμνών κρατήρων. Τέτοιες εκπομπές μπορεί να περιέχουν τοξικά ή ασφυκτικά αέρια, όπως διοξείδιο του άνθρακα, μονοξείδιο του άνθρακα, υδρόθειο και διοξείδιο του θείου.

Ένα από τα πιο τραγικά περιστατικά καταστροφής από ηφαιστειακά αέρια συνέβη στη λίμνη Νυός του Καμερούν το 1986, όταν μια ξαφνική εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα σκότωσε πάνω από 1.700 ανθρώπους. Οι επιστήμονες πιστεύουν ότι η λίμνη είχε συσσωρεύσει ηφαιστειακό CO<sub>2</sub> για αιώνες στα βαθιά της στρώματα και κάποια αναστάτωση, πιθανώς μια κατολίσθηση, προκάλεσε την απότομη απελευθέρωσή του. Το αέριο σχημάτισε ένα παχύ νέφος που κατρακύλησε προς τις γειτονικές περιοχές, εκτοπίζοντας το οξυγόνο και προκαλώντας ασφυξία στους κατοίκους.

Τα κυριότερα αέρια που εκπέμπουν τα ηφαίστεια είναι ο υδρατμός, το διοξείδιο του άνθρακα, το διοξείδιο του θείου και το υδρόθειο. Παρότι σε μικρότερες ποσότητες, εκλύονται επίσης αέρια όπως υδρογόνο, ήλιο, άζωτο, υδροχλωρικό οξύ, υδροφθορικό οξύ και υδράργυρος. Η σύσταση αυτών των αερίων εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την πίεση και τη χημική σύσταση του μάγματος, καθώς και από την ποσότητα διαθέσιμου οξυγόνου. Για παράδειγμα, σε συνθήκες χαμηλού οξυγόνου, αέρια όπως το μεθάνιο, το υδρογόνο και το υδρόθειο είναι σταθερά, ενώ όταν τα καυτά ηφαιστειακά αέρια έρχονται σε επαφή με την ατμόσφαιρα, επικρατούν ο υδρατμός, το διοξείδιο του άνθρακα και το διοξείδιο του θείου.

Η διαλυτότητα των ηφαιστειακών αερίων στο μάγμα ποικίλλει, με αποτέλεσμα κάποια να διαφεύγουν σε μεγάλα βάθη, ενώ άλλα να εκλύονται όταν το μάγμα φτάνει κοντά στην επιφάνεια. Μελέτες στο ηφαίστειο Κιλαουέα της Χαβάης δείχνουν ότι το διοξείδιο του άνθρακα αρχίζει να διαφεύγει από το μάγμα σε βάθη περίπου 40 χιλιομέτρων, ενώ τα περισσότερα αέρια θείου και υδρατμού απελευθερώνονται όταν το μάγμα πλησιάζει την επιφάνεια. Για παράδειγμα, οι φουμαρόλες κοντά στον κρατήρα Χαλεμαουμάου στην κορυφή του Κιλαουέα είναι ιδιαίτερα πλούσιες σε διοξείδιο του άνθρακα που

προέρχεται από μάγμα σε βάθος 3-4 χιλιομέτρων. Αντίθετα, οι φουμαρόλες που βρίσκονται σε ρωγμές του ηφαιστείου εκπέμπουν κυρίως υδρατμό και θείο, καθώς το διοξείδιο του άνθρακα έχει ήδη διαφύγει στα ανώτερα στρώματα.

## ΠΤΩΣΗ ΣΤΑΧΤΗΣ



**Εικόνα 13:** Ηφαιστειακή τέφρα σε κατοικημένη περιοχή μετά από ηφαιστειακή έκρηξη

Πηγή: (<https://www.britannica.com/science/volcano/Lava-gas-and-other-hazards> )

Η πτώση ηφαιστειακής στάχτης αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες συνέπειες μιας εκρηκτικής ηφαιστειακής έκρηξης. Παρόλο που συνήθως δεν προκαλεί άμεσα θύματα, οι επιπτώσεις της μπορούν να είναι σοβαρές, ιδιαίτερα όταν η στάχτη συσσωρεύεται σε μεγάλο πάχος.

Όταν η ηφαιστειακή στάχτη κατακαθίσει σε στρώματα πάχους μερικών εκατοστών ή περισσότερο, μπορεί να οδηγήσει σε καταρρεύσεις οροφών, κυρίως σε κατασκευές με ασθενή υποδομή. Επιπλέον, η στάχτη μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα στις καλλιέργειες, καλύπτοντας τη βλάστηση και εμποδίζοντας τη φωτοσύνθεση. Σε μεγάλες ηφαιστειακές εκρήξεις, οι επιπτώσεις στην αγροτική παραγωγή μπορεί να εκτείνονται σε μεγάλες αποστάσεις, καθώς η στάχτη μεταφέρεται με τον άνεμο, οδηγώντας σε εκτεταμένη καταστροφή των καλλιεργειών. Αυτό μπορεί να έχει ως συνέπεια την εμφάνιση επισιτιστικών κρίσεων, ιδιαίτερα σε περιοχές με χαμηλή οικονομική ανάπτυξη, όπου οι κάτοικοι εξαρτώνται άμεσα από τη γεωργία.

Εκτός από τις άμεσες αρνητικές επιπτώσεις, η ηφαιστειακή στάχτη έχει και μια θετική μακροπρόθεσμη επίδραση. Τα ηφαιστειακά υπολείμματα, καθώς αποσυντίθενται, εμπλουτίζουν το έδαφος με θρεπτικά συστατικά, συμβάλλοντας στη δημιουργία

εξαιρετικά γόνιμων γεωργικών εκτάσεων. Πολλές από τις πιο παραγωγικές γεωργικές περιοχές στον κόσμο βρίσκονται σε εδάφη που έχουν σχηματιστεί από αρχαίες ηφαιστειακές εκρήξεις.

#### ΧΙΟΝΟΣΤΙΒΑΔΕΣ, ΤΣΟΥΝΑΜΙ ΚΑΙ ΡΟΕΣ ΛΑΣΠΗΣ



**Εικόνα 14:** Στιγμιότυπο από την επέλαση τσουνάμι στην πόλη Miyako, Ιαπωνία (2011)

Πηγή: (<https://www.nbcnews.com/mach/science/what-tsunami-ncna943571> )

Τα ενεργά ηφαιστεια αποτελούν συχνά πηγή χιονοστιβάδων από βράχο και πάγο, οι οποίες μπορούν να προκληθούν είτε από ηφαιστειακές εκρήξεις είτε ανεξάρτητα από αυτές. Όταν δεν σχετίζονται με έκρηξη, οι χιονοστιβάδες αυτές προκαλούνται συνήθως από σεισμικές δονήσεις, τη σταδιακή αποδυνάμωση των βράχων λόγω υδροθερμικής δραστηριότητας ή από έντονες βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις. Σε περιπτώσεις που σχετίζονται με ηφαιστειακές εκρήξεις, η αιτία μπορεί να είναι η απότομη μετατόπιση του ηφαιστειακού κώνου λόγω της εισβολής μάγματος, όπως παρατηρήθηκε στην έκρηξη του Όρους Σεντ Χέλενς το 1980.

Οι καταρρεύσεις καλντέρας που συμβαίνουν υποθαλάσσια ή μερικώς μέσα σε υδάτινα σώματα μπορούν να προκαλέσουν τσουνάμι. Το μέγεθος και η ταχύτητα της κατάρρευσης καθορίζουν την ένταση των κυμάτων που δημιουργούνται. Παράλληλα, τσουνάμι μπορούν να προκληθούν και από μεγάλες χιονοστιβάδες ή πυροκλαστικές ροές που καταλήγουν στη θάλασσα, μεταφέροντας τεράστιες ποσότητες υλικών σε μεγάλο βάθος.

Οι ροές λάσπης, γνωστές ως λάχαρ, είναι επίσης ένας σημαντικός κίνδυνος που σχετίζεται με τα στρατοηφαιστεια. Αυτές μπορεί να προκληθούν ακόμα και χωρίς έκρηξη,

όταν το νερό από βροχές, λιωμένο χιόνι ή παγετώνες αναμιγνύεται με ηφαιστειακή στάχτη, χαλαρό έδαφος ή υδροθερμικό πηλό, σχηματίζοντας ταχύρρευστα ρεύματα λάσπης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η καταστροφή στην Αρμέρο της Κολομβίας το 1985, όταν μια τεράστια ροή λάσπης προκλήθηκε από το λιώσιμο παγετώνων στο Όρος Ρουίζ. Επιπλέον, έντονες βροχοπτώσεις ή χιονοστιβάδες πάγου και πηλού μπορούν να ενεργοποιήσουν ροές λάσπης ακόμα και κατά τη διάρκεια περιόδων ηφαιστειακής ηρεμίας.

## **ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΖΗΜΙΕΣ**

Η εκτίμηση των οικονομικών ζημιών από ηφαιστειακές εκρήξεις είναι περίπλοκη, καθώς εξαρτάται από διαφορετικά συστήματα αξιών και από τις αλλαγές στη χρήση γης. Σύμφωνα με μελέτες, οι ηφαιστειακές εκρήξεις προκαλούν κατά μέσο όρο ζημιές ύψους 1 δισεκατομμυρίου δολαρίων ετησίως παγκοσμίως. Ωστόσο, όπως και στις ανθρώπινες απώλειες, λίγες εκρήξεις προκαλούν τεράστιες καταστροφές, ενώ οι περισσότερες έχουν μικρότερες επιπτώσεις. Για παράδειγμα, η έκρηξη του Όρους St. Helens το 1980 προκάλεσε ζημιές άνω του 1 δισεκατομμυρίου δολαρίων, επηρεάζοντας κυρίως τη βιομηχανία ξυλείας. Αντίστοιχα, το οικονομικό κόστος της έκρηξης του Όρους Pinatubo στις Φιλιππίνες το 1991 εκτιμήθηκε στα 7 δισεκατομμύρια δολάρια, με τις επιπτώσεις να συνεχίζονται για χρόνια λόγω της κάλυψης μεγάλων εκτάσεων καλλιεργήσιμης γης από ροές λάσπης.

Ένας σύγχρονος κίνδυνος που σχετίζεται με τις ηφαιστειακές εκρήξεις αφορά την αεροπλοΐα. Τα υψηλά νέφη ηφαιστειακής τέφρας και αερολυμάτων αποτελούν σοβαρή απειλή για τα αεροσκάφη, καθώς είναι αόρατα στα μετεωρολογικά ραντάρ και δύσκολα αναγνωρίσιμα από τους πιλότους. Για την αντιμετώπιση αυτού του κινδύνου, δημιουργήθηκε ένα παγκόσμιο σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης, το οποίο ενημερώνει τους πιλότους μέσω ραδιοφώνου για την παρουσία και την έκταση των νεφών ηφαιστειακής τέφρας. Το σύστημα αυτό βασίζεται σε ένα δίκτυο εννέα Κέντρων Συμβουλευτικής για την Ηφαιστειακή Τέφρα (VAACs), που λειτουργούν υπό τον Διεθνή Οργανισμό Πολιτικής Αεροπορίας.

Η έκρηξη του ηφαιστείου Eyjafjallajökull στην Ισλανδία το 2010 ανέδειξε τη σοβαρότητα αυτού του προβλήματος. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από το VAAC του Λονδίνου οδήγησαν τις εθνικές αρχές αεροπλοΐας να καθηλώσουν χιλιάδες πτήσεις για αρκετές ημέρες σε όλη τη βόρεια και κεντρική Ευρώπη. Το γεγονός αυτό είχε τεράστιο οικονομικό αντίκτυπο, με την ακύρωση περίπου 100.000 πτήσεων, επηρεάζοντας 150 αεροπορικές εταιρείες και προκαλώντας οικονομικές απώλειες ύψους δισεκατομμυρίων δολαρίων.

## ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

Δεν έχουν όλα τα ηφαιστειακά φαινόμενα αρνητικές επιπτώσεις. Ορισμένα μάλιστα, μπορούν να έχουν θετικές περιβαλλοντικές συνέπειες. Οι ωκεανοί, η ατμόσφαιρα και οι ήπειροι οφείλουν σε μεγάλο βαθμό την προέλευσή τους και την εξέλιξή τους στις ηφαιστειακές διεργασίες καθ' όλη τη γεωλογική ιστορία. Μία ροή λάβας μπορεί να καλύψει το έδαφος και να το θάψει, αλλά με την πάροδο του χρόνου, νέα εδάφη και βλάστηση αναπτύσσονται. Σε θερμά, υγρά κλίματα η ανάκαμψη είναι ταχεία· λίγες δεκαετίες αρκούν για να καλυφθεί η πετρώδης επιφάνεια των στερεοποιημένων ρωών λάβας. Αντίθετα, σε ερημικά ή αρκτικά κλίματα, όπου οι συνθήκες είναι πιο αυστηρές και οι θερμοκρασίες χαμηλότερες, η ανάκαμψη είναι πιο αργή· ροές λάβας παλαιότερες των 1.000 ετών μπορεί να διατηρούν την άγονη εμφάνισή τους λόγω της χαμηλής βιολογικής δραστηριότητας και του ψυχρού κλίματος. Η ηφαιστειακή τέφρα αποσυντίθεται αργά και σχηματίζει πλούσια, αργιλώδη εδάφη. Στο ηφαιστειογενές νησί της Ιάβας, οι αναβαθμίδες ορυζώνων υποστηρίζουν έναν πυκνό πληθυσμό. Στον αντίποδα, απέναντι στη Θάλασσα της Ιάβας, το νησί Βόρνεο, που έχει παρόμοιο κλίμα αλλά στερείται ηφαιστειών, διαθέτει ζούγκλες που επιτρέπουν μόνο προσωρινή γεωργία με εκχερσώσεις και υποστηρίζουν πολύ μικρότερο πληθυσμό.

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα μπορεί επίσης να επηρεάσει το κλίμα της Γης, κυρίως μέσω της εκπομπής αερίων και σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Υψηλά νέφη τέφρας, ειδικά όταν είναι πλούσια σε διοξείδιο του θείου, μπορούν να εγχύσουν λεπτή σκόνη και αερολύματα θειικού οξέος στη στρατόσφαιρα, πάνω από τα τροποσφαιρικά βροχοφόρα σύννεφα. Το μεγάλο ύψος παρατείνει σημαντικά τον χρόνο παραμονής αυτών των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα—δεν επιστρέφουν γρήγορα στη Γη μέσω των βροχοπτώσεων, αλλά εξαπλώνονται αργά, σχηματίζοντας στρώματα ομίχλης που μπορούν να καλύψουν ένα ημισφαίριο ή ακόμα και ολόκληρο τον πλανήτη.

Φαίνεται πως το παγκόσμιο κλίμα επηρεάστηκε από τις εκρήξεις του Κρακατόα (1883), του όρους Αγκούνγκ στο Μπαλί (1963) και του Πινατούμπο (1991). Τα υψηλά νέφη τέφρας που εκτοξεύθηκαν από αυτά τα ηφαίστεια φαίνεται να μείωσαν τη μέση παγκόσμια θερμοκρασία κατά περίπου 0,5 °C για μία έως τρεις χρονιές μετά τις εκρήξεις τους. Αν και τα δεδομένα θερμοκρασίας του 19ου αιώνα είναι ελλιπή, η έκρηξη του όρους Ταμπόρα το 1815 ακολουθήθηκε το 1816 στη Βόρεια Αμερική και την Ευρώπη από το αποκαλούμενο «έτος χωρίς καλοκαίρι». Από την άλλη, άλλες μεγάλες εκρήξεις, όπως αυτή του Νοβαρούπτα κοντά στο όρος Κατμάι στην Αλάσκα (1912), δεν φαίνεται να προκάλεσαν ψύξη. Τα δεδομένα της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας των τελευταίων δεκαετιών καταγράφουν διακυμάνσεις της τάξης των 0,1–0,3 °C από έτος σε έτος, ανεξάρτητα από γνωστές ηφαιστειακές εκρήξεις, καθιστώντας δύσκολη την επιβεβαίωση του ακριβούς ρόλου των ηφαιστειών στο κλίμα.

Η άμεση δειγματοληψία της στρατόσφαιρας έχει δείξει ότι ο βασικός παράγοντας σχηματισμού της ηφαιστειακής ομίχλης δεν είναι η λεπτή σκόνη, αλλά ένα αερόλυμα μικροσκοπικών σταγονιδίων θειικού οξέος. Αυτό υποδηλώνει ότι η χημική σύσταση των

υψηλών ηφαιστειακών νεφών μπορεί να είναι εξίσου σημαντική με τον όγκο τους όσον αφορά την κλιματική επίδραση. Οι ατμοσφαιρικοί χημικοί ενδιαφέρονται για τις διαταραχές της ατμόσφαιρας που μπορεί να προκληθούν όχι μόνο από ηφαιστειακές εκρήξεις, αλλά και από ανθρωπογενή αερολύματα, όπως τα χλωροφθοράνθρακες, τα καυσάερια αεροσκαφών μεγάλου υψομέτρου, καθώς και από την αυξημένη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων του θερμοκηπίου λόγω της καύσης ορυκτών καυσίμων. Η Γη διαθέτει πολλούς φυσικούς μηχανισμούς εξισορρόπησης του περιβάλλοντός της, αλλά οι αλληλεπιδράσεις τους δεν είναι πλήρως κατανοητές. Πολλά ερωτήματα σχετικά με τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ ηφαιστειακής και ανθρώπινης δραστηριότητας και το πώς αυτές επηρεάζουν το κλίμα παραμένουν αναπάντητα και αποτελούν αντικείμενο συνεχούς επιστημονικής έρευνας, ειδικά στον τομέα των ατμοσφαιρικών επιστημών και της κλιματικής αλλαγής.

(Η μελέτη της ηφαιστειακής δραστηριότητας είναι κρίσιμη για την πρόβλεψη των εκρήξεων και την ελαχιστοποίηση των κινδύνων. Η παρακολούθηση των σεισμικών δονήσεων και των μεταβολών στη θερμοκρασία της περιοχής γύρω από το ηφαίστειο μπορεί να παρέχει χρήσιμες ενδείξεις για πιθανές εκρήξεις. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να μελετήσει τη σχέση μεταξύ σεισμικής δραστηριότητας και θερμοκρασιακών μεταβολών, χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους για την ανάλυση και πρόβλεψη της ηφαιστειακής δραστηριότητας.)

## 2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΗΦΑΙΣΤΕΙΑΚΩΝ ΕΚΡΗΞΕΩΝ

Η πρόβλεψη των ηφαιστειακών εκρήξεων αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις της γεωεπιστημονικής έρευνας. Κάθε ηφαίστειο έχει την δική του, μοναδική συμπεριφορά, ενώ οι μηχανισμοί που οδηγούν σε μια έκρηξη διαφέρουν σημαντικά. Για την αποτελεσματική πρόγνωση ηφαιστειακών εκρήξεων, απαιτείται η συνεχής παρακολούθηση πολλαπλών γεωφυσικών και γεωχημικών παραμέτρων, οι οποίες παρέχουν κρίσιμες πληροφορίες για τη δυναμική του ηφαιστειακού συστήματος και τις πιθανές εξελίξεις του.

### 2.1 Γεωφυσικοί Δείκτες Πρόγνωσης Ηφαιστειακής Δραστηριότητας

#### 2.1.1 Σεισμική Δραστηριότητα

Η ανάλυση της σεισμικής δραστηριότητας είναι μία από τις πιο βασικές μεθόδους πρόγνωσης ηφαιστειακών εκρήξεων. Οι σεισμοί που σχετίζονται με την ηφαιστειακή δραστηριότητα συνήθως οφείλονται στην κίνηση μάγματος στο υπέδαφος. Οι επιστήμονες αναλύουν αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιώντας στατιστικά μοντέλα, προκειμένου να εντοπιστούν πιθανές ενδείξεις αυξημένης δραστηριότητας.

Η θεωρία των κατανομών νόμου δύναμης και των αυτοοργανωμένων συστημάτων υποδηλώνει ότι οι σεισμοί σε ενεργά ηφαίστεια ακολουθούν συγκεκριμένα πρότυπα, τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν ως προειδοποιητικά σημάδια επικείμενης έκρηξης. Για παράδειγμα, παρατηρείται συχνά αύξηση της συχνότητας και της έντασης των σεισμών καθώς πλησιάζει η έκρηξη, ενώ η κατανομή τους ακολουθεί μαθηματικά πρότυπα που υποδηλώνουν μηχανισμούς προοδευτικής αποσταθεροποίησης του μάγματος. Παράλληλα, τα μοντέλα πρόβλεψης θραύσης πετρωμάτων (μέθοδος Failure Forecast Method - FFM) δείχνουν ότι η αυξημένη πίεση στο εσωτερικό του ηφαιστίου μπορεί να οδηγήσει σε επιταχυνόμενη παραμόρφωση των πετρωμάτων, προμηνύοντας ηφαιστειακή δραστηριότητα.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής αυτών των μεθόδων είναι η έκρηξη του Eyjafjallajökull το 2010. Τα σεισμικά δεδομένα μεταξύ Ιανουαρίου και Μαρτίου 2010 έδειξαν μια σταδιακή κλιμάκωση που οδήγησε στην εκτίμηση επικείμενης έκρηξης. Από τον Ιανουάριο έως τον Μάρτιο εκείνης της χρονιάς, καταγράφηκαν σεισμοί σε βάθη 7-10 χιλιομέτρων, οι οποίοι αποτέλεσαν σαφή ένδειξη της μετακίνησης του μάγματος προς την επιφάνεια. Η ανάλυση αυτών των σεισμικών σημάτων βοήθησε τους επιστήμονες να αξιολογήσουν την πιθανότητα επικείμενης έκρηξης, ενισχύοντας την αξιοπιστία των προγνωστικών μεθόδων.

#### 2.1.2 Θερμοκρασιακές Μεταβολές

Εκτός από τη σεισμικότητα, οι μεταβολές στη θερμοκρασία αποτελούν έναν εξίσου σημαντικό δείκτη ηφαιστειακής δραστηριότητας. Η αύξηση της θερμοκρασίας του



εδάφους, των υδροθερμικών πεδίων και των αερίων εκπομπών μπορεί να υποδηλώνει την άνοδο του μάγματος και την ενίσχυση της δραστηριότητας του ηφαιστείου. Οι επιστήμονες χρησιμοποιούν θερμικές κάμερες, δορυφορικές εικόνες και επιτόπιες μετρήσεις για την παρακολούθηση αυτών των μεταβολών σε πραγματικό χρόνο.

Στην περίπτωση του Eyjafjallajökull, πριν από την έκρηξη, καταγράφηκε σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας στις γύρω γεωθερμικές περιοχές, γεγονός που ενίσχυσε τις υποψίες για επικείμενη ηφαιστειακή δραστηριότητα. Παρόμοια θερμικά φαινόμενα έχουν παρατηρηθεί και σε άλλα ηφαίστεια, όπως η Αίτνα και το Όρος St. Helens, επιβεβαιώνοντας τη σημασία αυτής της μεθόδου στην πρόγνωση εκρήξεων.

## 2.2 Τεχνολογικά Εργαλεία Πρόγνωσης

Πέρα από τους γεωφυσικούς δείκτες, η ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογικών εργαλείων έχει βελτιώσει σημαντικά την ικανότητά μας να προβλέπουμε ηφαιστειακές εκρήξεις. Η πρόγνωση ηφαιστειακών εκρήξεων απαιτεί μια πολυπαραμετρική προσέγγιση, η οποία συνδυάζει δεδομένα σεισμικότητας, θερμοκρασίας, γεωχημικών αναλύσεων και γεωδαιτικών μετρήσεων. Οι σύγχρονες τεχνολογίες έχουν καταστήσει δυνατή τη βελτίωση της πρόγνωσης μέσω αυτοματοποιημένων συστημάτων παρακολούθησης και τεχνητής νοημοσύνης.

Προηγμένα συστήματα παρακολούθησης, όπως το "Watchdog", επιτρέπουν την ανάλυση δεδομένων από σειсмоγράφους, γεωδαιτικά όργανα και αισθητήρες αερίων, βοηθώντας στην ανίχνευση αλλαγών στη δραστηριότητα των ηφαιστειών. Η δυνατότητα διάκρισης πραγματικών μεταβολών από ψευδείς συναγερμούς μειώνει την πιθανότητα λανθασμένων ειδοποιήσεων και επιτρέπει την πιο αξιόπιστη αξιολόγηση της κατάστασης. Επιπλέον, το Volcanic Alert System (VAS) λειτουργεί ως ενδιάμεσος κρίκος μεταξύ των επιστημονικών δεδομένων και των αποφάσεων πολιτικής προστασίας. Λαμβάνοντας πολύπλοκες γεωφυσικές μετρήσεις – όπως σεισμική δραστηριότητα, παραμορφώσεις εδάφους και εκπομπές αερίων – τις μετατρέπει σε απλουστευμένα επίπεδα συναγερμού που μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα από τις αρχές και τους υπεύθυνους διαχείρισης κρίσεων.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει επίσης επιτρέψει τη χρήση χαμηλού κόστους και ευέλικτων λύσεων, όπως οι μικροελεγκτές Raspberry Pi και Arduino. Αυτές οι συσκευές, σε συνδυασμό με φορητούς αισθητήρες, καθιστούν δυνατή τη συνεχή συλλογή και αποστολή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, ακόμα και από απομακρυσμένες ηφαιστειακές περιοχές. Με αυτόν τον τρόπο, η χρήση αυτοματοποιημένων και προσιτών τεχνολογικών λύσεων ενισχύει τη δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης των ηφαιστειών και βελτιώνει τις προσπάθειες πρόγνωσης επικείμενων εκρήξεων.

Η τεχνητή νοημοσύνη (AI) διαδραματίζει όλο και πιο σημαντικό ρόλο στην πρόβλεψη των ηφαιστειακών εκρήξεων. Μέσω αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, μεγάλα δεδομένα από σειсмоγράφους, αισθητήρες θερμότητας και γεωχημικές αναλύσεις επεξεργάζονται για



τον εντοπισμό προτύπων που θα μπορούσαν να υποδηλώνουν επικείμενη ηφαιστειακή δραστηριότητα. Οι AI μοντέλα μπορούν να βελτιώσουν την ακρίβεια των προβλέψεων, ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των ψευδών συναγερμών και επιτρέποντας την καλύτερη κατανόηση των πολύπλοκων διεργασιών που προηγούνται μιας ηφαιστειακής έκρηξης.

Η συνεχής εξέλιξη των μεθόδων παρακολούθησης και πρόγνωσης των ηφαιστειακών εκρήξεων είναι ζωτικής σημασίας για την ασφάλεια των πληθυσμών που ζουν κοντά σε ηφαίστεια. Η ανάλυση της σεισμικής δραστηριότητας και των θερμοκρασιακών μεταβολών παρέχει σημαντικές ενδείξεις για επικείμενες εκρήξεις, αλλά καμία μεμονωμένη μέθοδος δεν είναι απολύτως αξιόπιστη. Ο συνδυασμός πολλαπλών τεχνικών και η χρήση προηγμένων τεχνολογικών εργαλείων αυξάνει την ακρίβεια των προβλέψεων και επιτρέπει την έγκαιρη λήψη μέτρων για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων μιας ηφαιστειακής έκρηξης.

Η περίπτωση του Eyjafjallajökull ανέδειξε τη σημασία της πολυπαραμετρικής παρακολούθησης στην πρόβλεψη ηφαιστειακών εκρήξεων. Ο συνδυασμός σεισμολογικών, γεωδαιτικών και γεωχημικών δεδομένων επέτρεψε στους επιστήμονες να αξιολογήσουν την επικείμενη έκρηξη και να ειδοποιήσουν τις αρχές, συμβάλλοντας στη λήψη προληπτικών μέτρων. Η συνεχής βελτίωση των προγνωστικών μεθόδων, σε συνδυασμό με την τεχνολογική πρόοδο, μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στη μείωση των κινδύνων από ηφαιστειακές εκρήξεις και στην προστασία των κοινωνιών που ζουν κοντά σε ηφαίστεια.

### 3.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΚΡΗΞΗ ΤΟΥ Eyjafjallajökull (2010)



**Εικόνα 15 :** Ηφαιστειακή έκρηξη του Eyjafjallajökull στην Ισλανδία (2010).

Πηγή: (<https://bustravel.is/south-iceland/eyjafjallajokull-volcano> )

#### 3.1 Η Έκρηξη του ηφαιστείου Eyjafjallajökull

Η Ισλανδία βρίσκεται στη ζώνη απόκλισης των τεκτονικών πλακών Βόρειας Αμερικής και Ευρασίας, επάνω στη Μεσοωκεάνια Ράχη του Ατλαντικού, γεγονός που εξηγεί τη σεισμική και ηφαιστειακή της δραστηριότητα και δικαιολογεί την επιλογή του Eyjafjallajökull ως αντικείμενο μελέτης.

Το ηφαίστειο Eyjafjallajökull, που στα Ισλανδικά σημαίνει 'Ισλανδικός ορεινός παγετώνας', βρίσκεται βόρεια του Skogar και δυτικά του Myrdalsjökull, με συντεταγμένες (63,63° N, 19,62° W). Αποτελεί έναν από τους μικρότερους παγετώνες της Ισλανδίας και καλύπτει την καλδέρα ενός ηφαιστείου. Το ανάγλυφο του κεντρικού ηφαιστείου φτάνει περίπου τα 1,5 χιλιόμετρα και εκτείνεται κατά μήκος 27 χιλιομέτρων (Α-Δ) και 14 χιλιομέτρων (Β-Ν), καταλαμβάνοντας συνολική έκταση 300 τ.χλμ.



**Εικόνα 16:** Θέση Eyjafjallajökull ηφαιστείου

Πηγή: (<https://www.volcanodiscovery.com/el/iceland/eyjafjallajoeukull.html> )

Πάνω από τα 800-900 μέτρα, το ηφαίστειο καλύπτεται από έναν μικρό παγετώνα έκτασης 80 τ.χλμ., ο οποίος πριν από την έκρηξη του 2010 είχε πάχος 200-250 μέτρα (Strachan, 2001). Στην κορυφή του βρίσκεται μια μικρή, καλυμμένη με πάγο καλδέρα διαμέτρου 2,5 χιλιομέτρων, με άνοιγμα 1,4 χιλιομέτρων προς τα βόρεια. Η υψηλότερη κορυφή, το Hámundur nunatak, βρίσκεται στο νότιο χείλος της καλδέρας σε υψόμετρο 1.651 μέτρων. Ο μεγαλύτερος παγετώνας εξόδου, ο Gígjökull, ρέει προς τα βόρεια μέσα από το άνοιγμα της καλδέρας, σχηματίζοντας ένα απότομο φαράγγι.

Το Eyjafjallajökull αποτελείται κυρίως από προϊόντα υποπαγετωνικών εκρήξεων, με τους αρχαιότερους σχηματισμούς του να εκτιμάται ότι έχουν ηλικία πάνω από 800.000 χρόνια. Αν και η μελέτη των ηφαιστειακών εκρήξεων του Eyjafjallajökull κατά το Ολόκαινο (τα τελευταία 12.000 χρόνια) είναι ακόμη ελλιπής, οι εκρήξεις του φαίνεται να έχουν σημειωθεί κυρίως σε δύο χρονικές περιόδους:

1. Τέλος της τελευταίας παγετώδους περιόδου – αρχές Ολοκαίνου.
2. Τα τελευταία 2.000 χρόνια.

Το ηφαίστειο συνδέεται γεωλογικά με το γειτονικό ηφαιστειακό σύστημα του Katla μέσω ρηγμάτων που ακολουθούν ανατολικοδυτική διεύθυνση. Έχουν παρατηρηθεί τρεις βασικοί τύποι εκρήξεων στην περιοχή:

- Ροές λάβας από ηφαιστειακές ρωγμές εκτός του παγετώνα, με εκροή βασάλτοανδεσιτικών και περιστασιακά βασαλτικών λάβων.

- Εκρήξεις στην κορυφή του ηφαιστείου με εκπομπή πυριτικής τεφρολογίας (>55% SiO<sub>2</sub>) ή μικτές εκρήξεις που παρήγαγαν και λάβα και τεφρά.
- Εκρήξεις σε παγετωνικές ή μερικώς παγετωνικές ρωγμές εκτός της καλδέρας, οι οποίες παρήγαγαν υαλωκλαστικούς σχηματισμούς και μερικές φορές είχαν εκρηκτικές φάσεις πάνω από την επιφάνεια του πάγου.

Σύμφωνα με παλαιότερες μελέτες, στο Ολόκαινο έχουν καταγραφεί **πάνω από 20 επιμέρους ροές λάβας**. Ωστόσο, η πραγματική συχνότητα των εκρήξεων μπορεί να είναι μικρότερη, με τις περισσότερες ροές να προέρχονται από την πρώιμη Ολοκαινική περίοδο. Υποστηρίζεται ότι ορισμένες ροές μπορεί να είναι ακόμα παλαιότερες.

Από τον 9<sup>ο</sup> αιώνα παρουσιάζει δραστηριότητα όπου είναι και η περίοδος εγκατάστασης των πρώτων κατοίκων της Ισλανδίας με εκρήξεις το 920, δεύτερη φορά το 1612-1613, 1821-1823 ενώ τελευταία φορά 2010.

Η λάβα που εκλύθηκε από το πλευρικό άνοιγμα στο Fimhnögruháls το 2010 είχε ήπια αλκαλική βασαλτική σύνθεση, με περιορισμένη παραγωγή τεφρολογίας, η οποία καταγράφηκε σε απόσταση έως 20 χλμ από το σημείο της έκρηξης. Η κύρια ηφαιστειακή δραστηριότητα του ίδιου έτους παρήγαγε τεφρολογία και λάβα με βενμοριτική σύνθεση, ενώ σε μεταγενέστερα στάδια η τεφρολογία απέκτησε τραχυτική σύσταση.

Οι εκρήξεις εκτός της καλδέρας εκδηλώνονται κυρίως κατά μήκος ηφαιστειακών ρωγμών που ακολουθούν ακτινική κατανομή. Οι ρωγμές αυτές σχηματίζουν υποπαγετωνικές υαλωκλαστικές ράχες και σειρές κρατήρων. Η μεγαλύτερη από αυτές έχει μήκος περίπου 4,5 χλμ, ενώ ο συνολικός όγκος της λάβας που παρήγαγε εκτιμάται στα 0,26 km<sup>3</sup>.

Ο όγκος των ηφαιστειακών υλικών που εκλύθηκαν από τις εκρήξεις της περιόδου 1821-1823, καθώς και από την παλαιότερη έκρηξη περίπου το 500 μ.Χ., φαίνεται να είναι μικρότερος σε σύγκριση με την έκρηξη του 2010. Η τελευταία παρήγαγε περίπου 0,27 km<sup>3</sup> τεφρολογίας, γεγονός που την καθιστά μία από τις μεγαλύτερες εκρηκτικές εκδηλώσεις του ηφαιστείου.

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα του 2010 εξελίχθηκε σε δυο φάσεις: η πρώτη έκρηξη σημειώθηκε στις 20 Μαρτίου, ενώ η δεύτερη - πολύ πιο ισχυρή - στις 14 Απριλίου. Ήδη από τις 10 Φεβρουαρίου, το Μετεωρολογικό Ινστιτούτο της Ισλανδίας είχε καταγράψει έντονη σεισμική δραστηριότητα, υποδηλώνοντας ότι το μάγμα κινείται κάτω από τον φλοιό προς τον θάλαμο μάγματος του ηφαιστείου.

Τις πρώτες μέρες του Μαρτίου, σεισμική δραστηριότητα εντάθηκε κοντά στο επίκεντρο του ηφαιστείου. Η ηφαιστειακή έκρηξη ξεκινάει τελικά στις 20 Μαρτίου, 8 km ανατολικά στο Fimhnorouhals. Επίσης έντονη σεισμική δραστηριότητα καταγράφεται ξανά τον

Απρίλιο σε βάθος 7-10 km από το ηφαίστειο προμηνύοντας την δεύτερη και μεγαλύτερη έκρηξη.

Στις 14 Απριλίου, λόγω της έκρηξης, ο πάγος άρχισε να λιώνει και το νερό των παγετώνων κατευθύνθηκε προς τον κρατήρα του ηφαιστείου, όπου ήρθε σε επαφή με το λιωμένο μάγμα, ενισχύοντας τις εκρήξεις. Αυτή η απότομη ψύξη προκάλεσε τον διαμελισμό του μάγματος σε λεπτά, κοφτερά σωματίδια τέφρας. Ο κεντρικός κρατήρας που βρίσκεται στην μέση του παγετώνα προκαλεί πλημμύρες από παγετώνα ή αλλιώς “jökulhlaup” με αποτέλεσμα να απομακρυνθούν από την κατοικία τους 800 άνθρωποι. Ενώ νέφος ηφαιστειακής τέφρας εκτοξεύτηκε σε ύψος άνω των εννέα χιλιομέτρων. Η Ευρώπη βίωσε τεράστια αναστάτωση στις αερομεταφορές, με μεγάλο μέρος της ηπείρου να παραλύει σχεδόν για έναν μήνα.

Παράλληλα, μέσα στον κρατήρα σχηματίστηκε ένα σπάνιο και εντυπωσιακό φαινόμενο: οι ηφαιστειακοί κεραυνοί, που δημιουργούνται από την ηλεκτρική φόρτιση των σωματιδίων μεταξύ τέφρας και πάγου.



**Εικόνα 17 :** Ηφαιστειακή έκρηξη με κεραυνό (volcanic lightning).

Πηγή: (<https://meteo24news.gr/meteo/ti-einai-o-ifaisteiakos-keraynos/19117/> )

Η έκρηξη του Eyjafjallajökull παραμένει ένα από τα πιο αξέχαστα γεγονότα του 21ου αιώνα, καθώς και μια καθοριστική στιγμή για την ερευνητική ομάδα αερομεταφορών, η οποία έπαιξε βασικό ρόλο στην επαναλειτουργία του ευρωπαϊκού εναέριου χώρου. Οι πρώτες εκρήξεις σημειώθηκαν στη βορειοανατολική πλαγιά, αλλά τα προβλήματα ξεκίνησαν τον Απρίλιο, όταν οι εκρήξεις επεκτάθηκαν στο κέντρο του ηφαιστείου, μέσα σε έναν κρατήρα τριών χιλιομέτρων, περιβαλλόμενο από πάγο. Μεγάλα νέφη

ηφαιστειακής τέφρας εξαπλώθηκαν γρήγορα πάνω από το ηφαίστειο, κινούμενα ανατολικά με το ρεύμα αέρα, προς τα νησιά Φερόες, τη Νορβηγία και τη βόρεια Σκωτία. Η Ισλανδία κήρυξε κατάσταση έκτακτης ανάγκης και ο ευρωπαϊκός εναέριος χώρος έκλεισε για λόγους ασφαλείας. Στις 23 Μαΐου η έκρηξη είχε σταματήσει σύμφωνα με την London Volcanic Ash Advisory Commission όμως η παρακολούθηση συνεχίζεται, έχοντας καθημερινά σεισμούς παρόλο που το ηφαίστειο θεωρείται ανενεργό αυτή την στιγμή.



**Εικόνα 18:** νέφη ηφαιστειακής τέφρας από έκρηξη Eyjafjallajökull

Πηγή: (<https://www.newsit.gr/kosmos/to-xithroou-thymizei-to-ifaisteio-Eyjafjallajokull-thaginei-i-vretania-i-xora-pou-stamatise-ton-kosmo-opos-i-islandia-to-2010/4337914/> )

### 3.2 Χρονικό τής έκρηξης

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα στο Eyjafjallajökull ξεκίνησε στις **20 Μαρτίου 2010**, με έκρηξη στη Fimmvörðuháls, ανάμεσα στους παγετώνες Eyjafjallajökull και Mýrdalsjökull. Προηγήθηκαν εβδομάδες σεισμικών δονήσεων και παραμορφώσεων του φλοιού, ενδείξεις ανόδου μάγματος.

Στις 22:30 UTC, τα σεισμόμετρα κατέγραψαν ήπια αύξηση σεισμικής δραστηριότητας, χωρίς να ενεργοποιηθεί συναγερμός, καθώς το σήμα ήταν συγκρίσιμο με καιρικές διαταραχές. Ωστόσο, στις 23:34 UTC, φωτογραφίες από κάμερα στο Búrfell έδειξαν κοκκινωπή λάμψη στον ουρανό.





**Εικόνα 19:** το ηφαίστειο Eyjafjallajökull πριν την έκρηξη

Πηγή: (<https://www.in.gr/2023/11/14/world/islandia-etoimo-na-ekragei-ifaisteio/> )

Στις 04:00 UTC, ελικόπτερο της Ακτοφυλακής εντόπισε ενεργή ρωγμή 500 μέτρων με προσανατολισμό ΒΒΑ, παράγοντας σιντριβάνια λάβας ύψους 100-200 μέτρων, ενώ η λάβα κατευθύνθηκε προς τα φαράγγια Hrunagil και Hvannárgil. Επιθεώρηση από αεροπλάνο στις 06:00-07:00 UTC κατέγραψε 14 ενεργά σιντριβάνια, με τη λάβα να ρέει προς Þórsmörk.

Στις 22 Μαρτίου, στήλες ατμού ύψους 4.000 μέτρων εμφανίστηκαν λόγω λιώσιματος του πάγου, ενώ οι πρώτες επιτόπιες παρατηρήσεις στις 24 Μαρτίου επιβεβαίωσαν έντονη δραστηριότητα στη χαράδρα Hrunagil, με σιντριβάνια λάβας έως 180 μέτρων και περιορισμένη εκπομπή τέφρας.

**31 Μαρτίου:** Σχηματίστηκε μια δεύτερη ηφαιστειακή σχισμή, εκατοντάδες μέτρα μακριά από την αρχική, επιτρέποντας πλέον τη ροή λάβας από δύο διαφορετικά σημεία. Μέχρι εκείνη τη στιγμή, περισσότεροι από 25.000 επισκέπτες είχαν βρεθεί στην περιοχή για να παρακολουθήσουν από κοντά την έκρηξη.

**11 Απριλίου:** Η παραμόρφωση του εδάφους και η σεισμική δραστηριότητα είχαν φτάσει σε επίπεδα που υποδείκνυαν επικείμενη έκρηξη. Την προηγούμενη ημέρα, η σεισμική



δραστηριότητα είχε μειωθεί αισθητά, οδηγώντας σε εκτιμήσεις ότι το φαινόμενο ενδεχομένως να μην εξελισσόταν σε ηφαιστειακή έκρηξη.

**14 Απριλίου:** Κάτω από το κεντρικό τμήμα του Eyjafjallajökull, περίπου 10 km δυτικά του Fimhnörðuháls, εντοπίστηκε μια νέα σεισμική ακολουθία, που υποδήλωνε μεταβολές στη δραστηριότητα του ηφαιστείου. Λίγο αργότερα, μια νέα ηφαιστειακή οπή σχηματίστηκε κάτω από τον παγετώνα, στο νότιο άκρο της κεντρικής καλντέρας του Eyjafjallajökull.

Η αύξηση της χαμηλής συχνότητας (0,5-1,0 Hz) συνεχούς ηφαιστειακής δόνησης στις 01:15 UTC θεωρείται ότι σηματοδοτεί την έναρξη της έκρηξης κατά μήκος μιας μικρής ρωγμής με κατεύθυνση βορρά-νότου κάτω από πάγο πάχους 150–200 m. Ωστόσο, αυτό επιβεβαιώθηκε μόνο μετά την επεξεργασία των δεδομένων. Τη δεδομένη στιγμή, η έναρξη της έκρηξης ανακοινώθηκε στις 03:50 UTC.

Η ρωγμή είχε μήκος αρκετές εκατοντάδες μέτρα και ο πάγος έλιωνε με ρυθμό 300–500 m<sup>3</sup>/s κατά τις πρώτες ώρες, καθώς η εκρηκτική δραστηριότητα κατακερμάτιζε το μάγμα σε τέφρα. Σε μεγάλο βαθμό, η τέφρα μεταφέρθηκε με το λιωμένο νερό προς τα βόρεια, μέσω του παγετώνα Gígjökull. Αρχικά, το πλημμυρικό νερό κινήθηκε υποπαγετωδώς, αλλά στη συνέχεια ρέει στην επιφάνεια στα κατώτερα τμήματα του παγετώνα.

Η απότομη επαφή του λιωμένου μάγματος με τον τεράστιο όγκο πάγου προκάλεσε ραγδαίο λιώσιμο, το οποίο οδήγησε στη δημιουργία μιας πλημμύρας τύπου "jökulhlaup". Τα ορμητικά νερά που προκλήθηκαν παρέσυραν μεγάλο μέρος του παραλιακού δρόμου της νότιας Ισλανδίας, προκαλώντας σημαντικές καταστροφές στο οδικό δίκτυο.

Σε σύγκριση με πρόσφατες εκρήξεις στην Ισλανδία, ο ρυθμός τήξης ήταν αργός. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι αυτή η αρχική φάση της ηφαιστειακής έκρηξης ήταν σχετικά αδύναμη, με εκροή μάγματος της τάξης των  $2 \times 10^5$  kg/s. Υπολογίζεται ότι η υποπαγετώδης φάση έληξε πριν τις 05:55 UTC, όταν παρατηρήθηκε από αεροσκάφος ένα μικρό λευκό νέφος να ανυψώνεται πάνω από το σύννεφο που κάλυπτε την κορυφή.



**Εικόνα 20:** Αεροφωτογραφίες από την ηφαιστειακή έκρηξη του Eyjafjallajökull (Απρίλιος 2010).

Φωτογραφίες που λήφθηκαν από αεροσκάφος κατά τη διάρκεια του Απριλίου.

a-d: όταν η αλληλεπίδραση μάγματος-νερού επηρέαζε έντονα την έκρηξη.

e: **Ασθενής έκρηξη** με ισχυρούς βόρειους ανέμους. Σημαντική εκ νέου μεταφορά τέφρας που είχε πέσει μεταξύ 14–18 Απριλίου.

f: **Ασθενής έκρηξη** με λευκούς ατμούς που σηματοδοτούν την έναρξη της αλληλεπίδρασης λάβας-πάγου.

g-h: **Ασθενής εκρηκτική δραστηριότητα**, με εμφανή τη στρωμάτωση του νέφους στις 24 Απριλίου.

Πηγή: ([https://www.almannavarnir.is/wp-content/uploads/2016/05/ICAOfreport\\_web\\_lr.pdf](https://www.almannavarnir.is/wp-content/uploads/2016/05/ICAOfreport_web_lr.pdf))

Από την πρώτη κιόλας μέρα, φάνηκε ότι επρόκειτο για μια ιδιαίτερα ισχυρή ηφαιστειακή έκρηξη. Καθώς περνούσαν οι μέρες, μεγάλες ποσότητες πυριτικής τέφρας εκτοξεύονταν στην ατμόσφαιρα, μεταφερόμενες από τους ισχυρούς νοτιοδυτικούς ανέμους προς τα νοτιοανατολικά. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η ηφαιστειακή στάχτη να διαχυθεί στον πυκνοκατοικημένο εναέριο χώρο του Ηνωμένου Βασιλείου και της ηπειρωτικής Ευρώπης, προκαλώντας σοβαρές διαταραχές στις αερομεταφορές κατά τις πρώτες εβδομάδες της έκρηξης. Στη συνέχεια, ακόμη και αεροδρόμια στη νότια Ευρώπη, όπως αυτά της Ισπανίας, αναγκάστηκαν να αναστείλουν προσωρινά τη λειτουργία τους, καθώς ανιχνεύθηκαν συγκεντρώσεις τέφρας στον εναέριο χώρο τους. Συνολικά, αυτή η ηφαιστειακή δραστηριότητα προκάλεσε τη μεγαλύτερη διακοπή αεροπορικών μετακινήσεων στην ευρωπαϊκή ιστορία, επηρεάζοντας περισσότερους από 10 εκατομμύρια επιβάτες.

**14–18 Απριλίου:** Η ηφαιστειακή δραστηριότητα έφτασε στην κορύφωσή της, ιδιαίτερα τις πρώτες ημέρες. Σύμφωνα με μετρήσεις ραντάρ, το νέφος τέφρας έφτασε σε ύψος 9,5 km την πρώτη ημέρα, ενώ στη συνέχεια μειώθηκε στα 5-7 km. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, παρατηρήθηκαν συχνοί ηφαιστειακοί κεραυνοί.

Η ένταση της υποαερίου έκρηξης στην κορυφή αυξανόταν σταδιακά στις 14 Απριλίου, κορυφώνοντας με την εμφάνιση ενός σκοτεινού, πλούσιου σε τέφρα νέφους στις 18:30 UTC. Το νέφος παρέμεινε σκοτεινό με έντονη πτώση τέφρας για περίπου 12 ώρες στις περιοχές ανατολικά του παγετώνα Mýrdalsjökull, 50–70 χλμ. μακριά. Οι κεραυνοί ήταν συχνοί μέσα στο νέφος. Το νέφος δεν έφτασε πολύ πέρα από τη νοτιοανατολική ακτή της Ισλανδίας πριν τις 18:30 UTC, αλλά μεταφέρθηκε από τον αεροχείμαρρο προς τη βόρεια Ευρώπη, με αναφορές για πτώση σκόνης στα Νησιά Φερόες, στα νησιά Σέτλαντ, σε διάφορες περιοχές του Ηνωμένου Βασιλείου και στη Νορβηγία. Αραιά νέφη ανιχνεύτηκαν πάνω από τη βόρεια Ευρώπη στις 16 Απριλίου.

Το μάγμα, καθώς ήρθε σε επαφή με τον πάγο, προκάλεσε ταχεία τήξη του παγετώνα, με αποτέλεσμα η απότομη ανάμειξή του με το νερό να δημιουργήσει εκρηκτικά φαινόμενα. Αυτές οι εκρήξεις εκτόξευσαν μεγάλες ποσότητες ηφαιστειακής τέφρας και αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Η παραγωγή τέφρας κατά την αρχική και πιο εκρηκτική φάση εκτιμήθηκε σε  $75 \times 10^4$  kg/s.

Ένας νέος αεραγωγός ανακαλύφθηκε το απόγευμα της 15ης Απριλίου, εμφανιζόμενος ως ένας νέος παγετωνικός κρατήρας (δυτικός κρατήρας) σε αερομεταφερόμενες ρανταρικές εικόνες, 400 μέτρα βορειοδυτικά του κύριου ενεργού αεραγωγού (νότιος κρατήρας). Κατά τη δημιουργία του, η πτώση τέφρας ήταν ελάχιστη και το ύψος του νέφους μειώθηκε κάτω από τα 5.000 μ. πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Ο νέος

(δυτικός) κρατήρας έγινε ο κύριος αεραγωγός της έκρηξης και παρέμεινε ενεργός μέχρι το τέλος της έκρηξης. Στις 16 Απριλίου σημειώθηκε εκρηκτική δραστηριότητα με αύξηση του ύψους του νέφους και διασπορά τέφρας προς τα ανατολικά. Στις 17 Απριλίου, οι κρατήρες έγιναν ορατοί για πρώτη φορά, με ένα βαρύ, σκοτεινό νέφος να φαίνεται για αρκετές εκατοντάδες χιλιόμετρα νότια της Ισλανδίας. Η ένταση της έκρηξης μειώθηκε σημαντικά τις πρώτες πρωινές ώρες της 18ης Απριλίου, σηματοδοτώντας το τέλος της ισχυρής, πρώτης εκρηκτικής φάσης της έκρηξης.

Δείγματα τέφρας που συλλέχθηκαν 50 km ανατολικά του ηφαιστείου αναλύθηκαν από το Ινστιτούτο Γεωεπιστημών του Πανεπιστημίου της Ισλανδίας, το οποίο διαπίστωσε ότι το νέφος είχε εξαιρετικά λεπτόκοκκη σύσταση. Συγκεκριμένα, 24% των σωματιδίων είχαν διάμετρο κάτω από 10  $\mu\text{m}$ , ενώ 33% κυμαίνονταν μεταξύ 10-50  $\mu\text{m}$ . Η τέφρα που εκτοξεύθηκε μεταξύ 14–18 Απριλίου είχε ενδιάμεση σύσταση, ταξινομούμενη ως βενμορίτης (εναλλακτικά τραχυανδεσίτης) με περιεκτικότητα σε  $\text{SiO}_2$  περίπου 58–60%. Η ανάλυση κοκκομετρίας των δειγμάτων έδειξε ότι η τέφρα ήταν πολύ λεπτόκοκκη, με περίπου το 95% του υλικού που εκτοξεύθηκε στις 14–16 Απριλίου να είναι λεπτόκοκκη τέφρα (<1000  $\mu\text{m}$  σε διάμετρο) και σχεδόν το ένα τρίτο αυτής να είναι <30  $\mu\text{m}$ .

Η ηφαιστειακή στάχτη εξαπλώθηκε γρήγορα από το ηφαίστειο, αρχικά κατευθυνόμενη προς τη Νορβηγία, όπου στις 14 Απριλίου ο εναέριος χώρος της χώρας έκλεισε για λόγους ασφαλείας. Στις 15 Απριλίου, η τέφρα διασκορπίστηκε σε ακόμη μεγαλύτερη έκταση, οδηγώντας στο κλείσιμο του εναέριου χώρου πάνω από τη Νορβηγία, τη Σουηδία, το Ηνωμένο Βασίλειο και τη Βόρεια Ιρλανδία.

Για τον τοπικό πληθυσμό, η 17η Απριλίου ήταν η ημέρα με τη μεγαλύτερη εναπόθεση ηφαιστειακής τέφρας. Τότε, οι αγροτικές περιοχές νότια του ηφαιστείου καλύφθηκαν από ένα νέφος στάχτης ύψους περίπου 1 km, το οποίο συνέχιζε να ρέει από τον κρατήρα. Το νέφος ήταν ιδιαίτερα ενεργό, με πολλαπλές εκρήξεις και κεραυνούς. Επιπλέον, μεγάλη ποσότητα βαριάς ηφαιστειακής σκόνης συσσωρεύτηκε στην επιφάνεια του παγετώνα, χωρίς να διαφύγει στην ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα να κινηθεί προς τη νότια ακτή μέσω των παγετωνικών ρευμάτων.



**Εικόνα 21 :** Το χαμηλό ύψος ηφαιστειακού νέφους στις 2000UTC στις 17 Απριλίου 2010.

Πηγή:(<https://ikee.lib.auth.gr/record/133533/files/%CE%A0%CF%84%CF%85%CF%87%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AE%20%CE%95%CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1.pdf> )

**18-30 Απριλίου:** Η ηφαιστειακή δραστηριότητα παρουσίασε σημαντικές μεταβολές. Στις 18-19 Απριλίου, η παραγωγή ηφαιστειακής τέφρας μειώθηκε αισθητά, ενώ δεν καταγράφηκαν ηφαιστειακοί κεραυνοί. Το ύψος του νέφους τέφρας έπεσε στα 3-5 km, με αποτέλεσμα να μην είναι πάντα ορατό από το ραντάρ του Keflavik.

Αυτό οφειλόταν στο γεγονός ότι το ραντάρ είναι τοποθετημένο στο διεθνές αεροδρόμιο του Keflavik, περίπου 150 km μακριά από το ηφαίστειο. Η μεγάλη αυτή απόσταση, σε συνδυασμό με την παρουσία ορεινών όγκων μεταξύ του ηφαιστείου και του ραντάρ, καθιστούσε αδύνατη την ανίχνευση χαμηλών νεφών τέφρας.

**Στις 21 Απριλίου,** ροές λάβας ξεκίνησαν να κινούνται προς τα βόρεια, κάτω από το παγοκάλυμμα του Gígjökull.

Με την τέφρα να έχει πλέον λιγότερο εκρηκτικό χαρακτήρα και τους ανέμους να παραμένουν ασθενείς, τα στρώματα της τέφρας στην ατμόσφαιρα έγιναν εμφανή, ακόμη και ακριβώς πάνω από το ηφαίστειο.



**Εικόνα 22** : Το ηφαιστειακό νέφος στις 1542 UTC στις 23 Απριλίου κατά τη διάρκεια της λιγότερο ενεργής φάσης.

Πηγή: (<https://ikee.lib.auth.gr/record/133533/files/%CE%A0%CF%84%CF%85%CF%87%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AE%20%CE%95%CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1.pdf> )

Το ύψος του ηφαιστειακού νέφους εκτιμάται στα 3-5 km, όπου διακρίνονται ορισμένα επίπεδα τέφρας. Πάνω από την κορυφή του ηφαιστείου, είναι ορατά τουλάχιστον δύο στρώματα τέφρας, ένα στα 2,3 km και ένα δεύτερο στα 2,6 km. Οι ασθενείς άνεμοι που επικρατούσαν στην περιοχή επέτρεψαν στην τέφρα να εξαπλωθεί σε πολλές κατευθύνσεις. Στην περιοχή της έκρηξης, στα δεξιά της φωτογραφίας, διακρίνονται βαρύτερα σωματίδια που κατακάθονται στο έδαφος. Η πυκνή ομίχλη που φαίνεται να καλύπτει τις πλαγιές του βουνού είναι στην πραγματικότητα ηφαιστειακή τέφρα. Παρότι κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου η παραγωγή τέφρας είχε περιοριστεί κάτω από τα 6 km, η εναέρια κυκλοφορία δεν είχε αποκατασταθεί πλήρως.

**1-4 Μαΐου:** Το νέφος απέκτησε πιο σκούρο χρώμα, ενώ η συγκέντρωση προϊόντων στάχτης και τέφρας παρουσίασε ήπια αύξηση. Στις 4 Μαΐου, η παραγωγή λάβας φάνηκε να σταματά, με τη δραστηριότητα να αποκτά ξανά ελαφρώς εκρηκτικό χαρακτήρα.

Στο διάστημα **5-23 Μαΐου**, η παραγωγή λάβας ήταν ελάχιστη ή μηδενική, ενώ η ηφαιστειακή δραστηριότητα έγινε και πάλι εκρηκτική, με περιόδους αυξημένης έντασης. Στις 5 Μαΐου, οι δορυφόροι κατέγραψαν ένα ισχυρό σήμα διοξειδίου του θείου, ενώ την

επόμενη ημέρα, το ύψος του ηφαιστειακού νέφους ξεπέρασε τα 8 km, οδηγώντας σε προσωρινή αύξηση των συγκεντρώσεων στάχτης και αιωρούμενων ηφαιστειακών σωματιδίων.

Οι άνεμοι στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας είχαν βόρεια κατεύθυνση, διασκορπίζοντας την τέφρα κυρίως προς τα νότια, πάνω από τον Βόρειο Ατλαντικό, και στη συνέχεια προς τις δυτικότερες περιοχές της Ευρώπης.

Σαν αποτέλεσμα τα αεροδρόμια στα Κανάρια Νησιά, την Ισπανία και το Μαρόκο αναγκάστηκαν να κλείσουν προσωρινά λόγω της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Παράλληλα, καθώς το νέφος τέφρας συνέχιζε να ανυψώνεται, εκτιμήθηκε ότι θα έφτανε σε υψόμετρα όπου πραγματοποιούνται υπερατλαντικές πτήσεις. Αυτό οδήγησε στο μερικό κλείσιμο του εναέριου χώρου πάνω από τον Βόρειο Ατλαντικό, προκαλώντας αλλαγές στις διαδρομές των πτήσεων, οι οποίες πλέον περνούσαν μέσω του νότιου εναέριου χώρου της Ισλανδίας.

Στις 8 Μαΐου, 758 αεροσκάφη διέσχισαν την περιοχή, αριθμός σημαντικά υψηλότερος από τον ημερήσιο μέσο όρο των 260 πτήσεων. Το ρεκόρ αυτό ξεπερνιόταν καθημερινά τις επόμενες τέσσερις ημέρες, με τη 11η Μαΐου να καταγράφει νέο υψηλό των 1.012 πτήσεων σε μία ημέρα.

Μετά από αυτήν την αρχική αύξηση, το νέφος τέφρας άρχισε να μειώνεται και σταθεροποιήθηκε σε ύψος 6-7 km, ενώ παρατηρήθηκε και μικρή πτώση στην παραγωγή στάχτης. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα διατηρούσε έναν σταθερό ρυθμό, με κάποιες περιόδους εντονότερων εκρήξεων που οδήγησαν σε αυξημένη παραγωγή τέφρας.

Από τις 19 Απριλίου έως τις 10 Μαΐου, δεν καταγράφηκαν ηφαιστειακοί κεραυνοί. Ωστόσο, το φαινόμενο επανεμφανίστηκε από τις 11 έως τις 20 Μαΐου, με την 16η Μαΐου να σημειώνει 20 κεραυνούς σε μία μόνο ημέρα.

Στις 18 Μαΐου, οι ασθενείς ανατολικοί άνεμοι παρέσυραν την τέφρα δυτικά, με αποτέλεσμα να καταγραφούν αυξημένες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων στην πόλη του Reykjavík. Αν και οι μετρήσεις έδειξαν υψηλότερα επίπεδα τέφρας, οι τιμές παρέμειναν κάτω από τα όρια επικινδυνότητας για την ανθρώπινη υγεία.

Από την 18η Μαΐου και έπειτα, τόσο η ροή μάγματος όσο και η εκρηκτική δραστηριότητα παρουσίασαν σταδιακή μείωση, με συνέπεια και τη μείωση του ύψους του ηφαιστειακού νέφους.



### 3.3 Επιπτώσεις της έκρηξης

Η έκρηξη του ηφαιστείου Eyjafjallajökull το 2010 είχε πολλαπλές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον και την οικονομία.

- Όσον αφορά την ανθρώπινη υγεία, η παρατεταμένη έκθεση στην ηφαιστειακή τέφρα συνδέθηκε με αναπνευστικά προβλήματα, όπως ερεθισμό των αεραγωγών και επιδείνωση του άσθματος, καθώς και με αυξημένα επίπεδα στρες και ψυχολογικής καταπόνησης λόγω των συνεπειών της έκρηξης.
- Σε περιβαλλοντικό επίπεδο, η εκτεταμένη εκπομπή ηφαιστειακής τέφρας και αερίων προκάλεσε ρύπανση της ατμόσφαιρας, επηρεάζοντας το κλίμα και τις συνθήκες ποιότητας του αέρα. Επιπλέον, η εναπόθεση τέφρας στις γεωργικές εκτάσεις υποβάθμισε το έδαφος, επηρεάζοντας την τοπική παραγωγή και επιβαρύνοντας τη χλωρίδα και την πανίδα. Τα ζώα της περιοχής εκτέθηκαν σε ηφαιστειακή τέφρα τόσο μέσω της αναπνοής όσο και μέσω της κατανάλωσης μολυσμένων ζωοτροφών και νερού, γεγονός που προκάλεσε αναπνευστικά προβλήματα, γαστρεντερικές διαταραχές και σε ορισμένες περιπτώσεις δηλητηριάσεις.
- Στην οικονομία, οι επιπτώσεις ήταν ιδιαίτερα αισθητές στις αερομεταφορές, καθώς η διακοπή των πτήσεων στην Ευρώπη για αρκετές ημέρες προκάλεσε ζημιές δισεκατομμυρίων ευρώ στις αεροπορικές εταιρείες και τον τουριστικό τομέα. Παράλληλα, η τοπική οικονομία της Ισλανδίας επηρεάστηκε από την καταστροφή υποδομών και τις ζημιές στις γεωργικές εκμεταλλεύσεις, ενώ απαιτήθηκαν σημαντικοί πόροι για την αποκατάσταση της περιοχής.

#### 3.3.1 Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία

Οι περιοχές που επηρεάστηκαν άμεσα από την έκρηξη του Eyjafjallajökull φιλοξενούσαν περίπου 2.700 κατοίκους, οι οποίοι ασχολούνταν κυρίως με κτηνοτροφία, εκτροφή προβάτων, βοοειδών και αλόγων, αλλά και με τουριστικές δραστηριότητες. Οι μεγαλύτερες προκλήσεις που αντιμετώπισαν ήταν οι πλημμύρες και η ηφαιστειακή τέφρα.

Ο κίνδυνος πλημμυρών προέκυψε λόγω της αλληλεπίδρασης του λιωμένου μάγματος με τον παγετώνα που καλύπτει το ηφαίστειο. Στις 14 Απριλίου, ένα μεγάλο τμήμα πάγου έλιωσε εξαιτίας μιας ισχυρής έκρηξης, προκαλώντας αιφνίδια πλημμύρα, γνωστή ως jökulhlaup. Οι αρχές εξέδωσαν εντολή εκκένωσης, ωστόσο πολλοί κάτοικοι δίστασαν να εγκαταλείψουν τα σπίτια τους, ανησυχώντας κυρίως για την τύχη των ζώων τους.

Μελέτες έδειξαν ότι σχεδόν οι μισοί, ποσοστό 47%, παρέμειναν στην περιοχή. Κάποιοι προτίμησαν να φροντίσουν ηλικιωμένους συγγενείς ή το ζωικό τους κεφάλαιο, ενώ άλλοι θεώρησαν ότι ήταν ασφαλέστερο να μείνουν στα σπίτια τους. Υπήρξαν επίσης κάτοικοι που δεν θεώρησαν ότι η εκκένωση τους αφορούσε άμεσα. Παρόλο που η κατάσταση ήταν κρίσιμη, δεν καταγράφηκαν θάνατοι ή σοβαροί τραυματισμοί λόγω των πλημμυρών.

Ωστόσο, το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετώπισε η τοπική κοινωνία ήταν η ηφαιστειακή τέφρα, η οποία επηρέασε σημαντικά τόσο το περιβάλλον όσο και την καθημερινή ζωή των κατοίκων.



**Εικόνα 23 :** Οδήγηση σε δρόμο καλυμμένο με ηφαιστειακή τέφρα.

Πηγή: (Mar Skarsson/AP)

Η πτώση της τέφρας διήρκεσε σχεδόν έξι εβδομάδες, ενώ ακόμα και μετά την ολοκλήρωση της έκρηξης, συνεχίστηκε η ανύψωσή της στην ατμόσφαιρα λόγω των καιρικών συνθηκών. Τα σωματίδια τέφρας περιείχαν δραστικά άλατα, ενώ περίπου το 20% της μάζας τους είχε διάμετρο μικρότερη από 10 μικρόμετρα, γεγονός που διευκόλυνε την εισχώρησή τους στο κατώτερο αναπνευστικό σύστημα.

Μετά την ηφαιστειακή έκρηξη, πραγματοποιήθηκε έρευνα σε 207 κατοίκους, προκειμένου να εκτιμηθεί η κατάσταση της υγείας τους. Οι συμμετέχοντες υποβλήθηκαν σε ιατρικές εξετάσεις, ενώ η λειτουργία των πνευμόνων τους μετρήθηκε μέσω τυποποιημένης σπιρομέτρησης, τόσο πριν όσο και μετά τη χρήση βρογχοδιασταλτικών

φαρμάκων. Παράλληλα, συμπλήρωσαν ερωτηματολόγια που αφορούσαν τόσο τη σωματική όσο και την ψυχική τους υγεία.

Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι η έκθεση στην ηφαιστειακή τέφρα είχε σοβαρές βραχυπρόθεσμες συνέπειες. Συγκεκριμένα, το 25% των συμμετεχόντων παρουσίασε ερεθισμό στα μάτια, ενώ το 50% ανέφερε αναπνευστικά προβλήματα, όπως ερεθισμό των αεραγωγών και επιδείνωση προϋπάρχοντος άσθματος. Παρόλα αυτά, δεν διαπιστώθηκαν σοβαρές επιπτώσεις στη λειτουργία του αναπνευστικού σε σύγκριση με άτομα που δεν είχαν εκτεθεί στην τέφρα.

Επιπλέον, το 39% των κατοίκων εμφάνισε συμπτώματα ψυχολογικής επιβάρυνσης, σύμφωνα με την Κλίμακα Γενικής Υγείας. Μια άλλη μελέτη κατέγραψε ότι οι κάτοικοι είχαν έντονη ανάγκη για περισσότερη ενημέρωση σχετικά με τις πιθανές επιπτώσεις της ηφαιστειακής τέφρας στην υγεία. Παρόλα αυτά, οι μακροπρόθεσμες συνέπειες της έκρηξης παραμένουν υπό διερεύνηση.

Προηγούμενες έρευνες έχουν δείξει ότι η έκθεση σε ηφαιστειακή τέφρα μπορεί να οδηγήσει σε αναπνευστικά προβλήματα, επιδείνωση του άσθματος, καθώς και αυξημένες επισκέψεις σε νοσοκομεία λόγω λοιμώξεων του αναπνευστικού συστήματος. Ωστόσο, αυτά τα φαινόμενα δεν εμφανίζονται σε όλες τις ηφαιστειακές εκρήξεις με την ίδια ένταση. Παράλληλα, έχει παρατηρηθεί ότι η βραχυχρόνια έκθεση σε ηφαιστειακά αέρια και αιωρούμενα σωματίδια προκαλεί συχνά έντονο ερεθισμό των αεραγωγών.

Όσον αφορά τη μακροπρόθεσμη έκθεση σε ηφαιστειακά αέρια, όπως το διοξείδιο του θείου, ορισμένες μελέτες έχουν συνδέσει αυτή τη συνθήκη με αυξημένα περιστατικά χρόνιας βρογχίτιδας και καρδιοαναπνευστικών προβλημάτων.

Πέρα από τις άμεσες επιπτώσεις στην υγεία, η παρατεταμένη έκθεση σε ηφαιστειακή τέφρα, οι πλημμύρες και οι ροές λάσπης έχουν αποδειχθεί επιβαρυντικοί παράγοντες και για την ψυχική υγεία των κατοίκων. Έρευνες έχουν δείξει ότι οι αυξημένες συνθήκες πίεσης και αβεβαιότητας που προκύπτουν από τέτοια γεγονότα μπορούν να οδηγήσουν σε άγχος, μετατραυματικό στρες και συμπτώματα κατάθλιψης.

Η εξέταση των μακροχρόνιων συνεπειών μιας ηφαιστειακής έκρηξης είναι ιδιαίτερα σημαντική, τόσο από επιστημονική όσο και από ιατρική σκοπιά. Η Ισλανδία, χάρη στα αναλυτικά πληθυσμιακά αρχεία και την προηγμένη ερευνητική της υποδομή, προσφέρει μία μοναδική ευκαιρία για τη μελέτη αυτών των επιπτώσεων, μέσω μακροχρόνιων ερευνών.

### 3.3.2 Επιπτώσεις στο περιβάλλον

Η ηφαιστειακή έκρηξη του Eyjafjallajökull το 2010 προκάλεσε σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, επηρεάζοντας τόσο την ατμόσφαιρα όσο και τα υδάτινα και χερσαία οικοσυστήματα. Κατά τη διάρκεια της έκρηξης εκλύθηκαν δύο τύποι ηφαιστειακής τέφρας, με διαφορετικές φυσικοχημικές ιδιότητες. Η υδρομαγματική τέφρα, που σχηματίστηκε όταν το μάγμα ήρθε σε επαφή με το λιωμένο παγετώδες νερό, παρήγαγε πολύ λεπτόκοκκα σωματίδια, τα οποία μεταφέρθηκαν γρήγορα στην ατμόσφαιρα και στη συνέχεια αποτέθηκαν σε μεγάλες αποστάσεις. Αντίθετα, η μαγματική τέφρα, η οποία εκτοξεύθηκε όταν το μάγμα δεν είχε πλέον επαφή με το νερό, είχε μεγαλύτερη κοκκομετρία, διαφοροποιώντας έτσι τις επιπτώσεις της στα φυσικά συστήματα.



**Εικόνα 24 :** Φυτική βλάστηση καλυμμένη από ηφαιστειακή τέφρα.

Πηγή:(Ingolfur Juliusson/Reuters )

Η απόθεση της τέφρας στο έδαφος και στα υδάτινα οικοσυστήματα μετέβαλε τη χημεία του νερού και προκάλεσε σοβαρές επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα. Η υδρομαγματική τέφρα απελευθέρωσε αλκαλικό νερό, ενώ η μαγματική τέφρα χαμήλωσε το pH, καθιστώντας τα υδάτινα οικοσυστήματα πιο όξινα. Αυτό είχε άμεσες επιπτώσεις στους οργανισμούς του γλυκού νερού, καθώς πολλά είδη ψαριών και μικροοργανισμών είναι ευαίσθητα στις μεταβολές της οξύτητας.

Στον ποταμό Jökulsá á Sólheimasandi, που δέχθηκε τη μεγαλύτερη απόθεση μαγματικής τέφρας, καταγράφηκαν υψηλές συγκεντρώσεις τοξικών μετάλλων όπως αλουμίνιο, φθόριο και θείο, γεγονός που επηρέασε τόσο την ποιότητα του νερού όσο και την υδρόβια ζωή. Ερευνητές παρατήρησαν ότι τα επίπεδα των θρεπτικών ουσιών αυξήθηκαν σημαντικά, προκαλώντας πιθανές ανισορροπίες στο οικοσύστημα.

Η τέφρα που έφτασε στη θάλασσα είχε διπλή επίδραση: από τη μία πλευρά, η απελευθέρωση σιδήρου από τη μαγματική τέφρα λειτούργησε ως λίπασμα για το φυτοπλαγκτόν, ενισχύοντας την πρωτογενή παραγωγικότητα των ωκεανών. Από την άλλη, η παρουσία τοξικών στοιχείων, όπως το αρσενικό και ο μόλυβδος, δημιούργησε δυνητικούς κινδύνους για τη θαλάσσια πανίδα.

Περιοχές πλημμύρισαν εξαιτίας του λιωμένου νερού του παγετώνα που βρισκόταν πάνω από το ηφαίστειο, η γεωργική γη υπέστη ζημιές και τα αγροκτήματα επλήγησαν από μεγάλη πτώση τέφρας. Η πτώση της τέφρας δηλητηρίασε τα ζώα σε κοντινές φάρμες, καθώς η υψηλή συγκέντρωση τοξικών στοιχείων όπως το φθόριο και το θείο μόλυνε την τροφή και το νερό τους. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα σοβαρά αναπνευστικά και γαστρεντερικά προβλήματα σε εκτρεφόμενα ζώα, όπως πρόβατα, βοοειδή και άλογα, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις οδήγησε σε θανάτους λόγω δηλητηρίασης.



**Εικόνα 25 :** Επιπτώσεις της ηφαιστειακής τέφρας στη γεωργία και την κτηνοτροφία.

Πηγή: (Associated Press, Washington Post (2010))

Ένα ενδιαφέρον στοιχείο που αναδείχθηκε από την έκρηξη ήταν ο ρόλος της υδρομαγματικής τέφρας ως φυσικού ρυθμιστή. Δεδομένου ότι αποτέθηκε πρώτη, δημιούργησε ένα προστατευτικό στρώμα στο έδαφος, περιορίζοντας την όξινη επίδραση της μαγματικής τέφρας και μειώνοντας την πιθανότητα ρύπανσης των υπόγειων υδάτων.

Η επίδραση στην τοπική οικολογία, η καταστροφή γεωργικών εκτάσεων και η αύξηση της οξύτητας των υδάτων καθιστούν απαραίτητη τη συνεχή παρακολούθηση των ηφαιστειακών εκρήξεων και των μακροπρόθεσμων επιπτώσεών τους στο φυσικό περιβάλλον.

### 3.3.3 Επιπτώσεις στην οικονομία

Η έκρηξη του ηφαιστείου Eyjafjallajökull το 2010 είχε σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις, επηρεάζοντας άμεσα την αεροπορική βιομηχανία, τον τουρισμό και το διεθνές εμπόριο. Η αεροπορική βιομηχανία υπέστη τεράστιες οικονομικές απώλειες, καθώς η αναστολή των πτήσεων οδήγησε σε μείωση της ζήτησης καυσίμων κατά 1,2 εκατομμύρια βαρέλια, εξοικονομώντας περίπου 110 εκατομμύρια δολάρια. Ωστόσο, η συνολική οικονομική ζημία εκτιμάται ότι ανήλθε σε 1,4 δισεκατομμύρια δολάρια. Μεγάλες αεροπορικές εταιρείες, όπως η British Airways και η Air France-KLM, κατέγραψαν απώλειες 20 εκατομμυρίων λιρών την ημέρα κατά τη διάρκεια των πέντε πιο διαταραγμένων ημερών. Η οικονομική ζημία που σημειώθηκε σε τόσο σύντομο χρονικό διάστημα κατέδειξε ότι μια παρατεταμένη διακοπή των πτήσεων θα μπορούσε να οδηγήσει πολλές αεροπορικές εταιρείες σε πτώχευση.

Ο τουριστικός τομέας επηρεάστηκε σημαντικά, με την οικονομική ζημία στους ευρωπαϊκούς προορισμούς να εκτιμάται σε 2,8 δισεκατομμύρια δολάρια. Ωστόσο, αντισταθμιστικοί παράγοντες, όπως οι δαπάνες των επιβατών που παρέμειναν αποκλεισμένοι και τα έξοδα σε εναλλακτικά μέσα μεταφοράς, συνέβαλαν στον περιορισμό των απωλειών. Αν και ορισμένα ξενοδοχεία κατέγραψαν απώλειες ύψους 10 εκατομμυρίων δολαρίων ημερησίως, άλλα επωφελήθηκαν από την κατάσταση, καθώς οι ταξιδιώτες ήταν διατεθειμένοι να πληρώσουν υψηλότερες τιμές. Τελικά, η συνολική οικονομική ζημία για τον τουριστικό τομέα ανήλθε σε 867 εκατομμύρια δολάρια, ενώ οι συνολικές απώλειες από την κρίση της έκρηξης υπολογίζονται σε 2,2 δισεκατομμύρια δολάρια.

Το διεθνές εμπόριο υπέστη επίσης σοβαρές συνέπειες, καθώς πολλές εμπορικές συναλλαγές αναβλήθηκαν. Ορισμένα προϊόντα, όπως τα ευπαθή αγαθά και τα εξαρτήματα υψηλής τεχνολογίας, απαιτούν άμεση μεταφορά, και η καθυστέρησή τους οδήγησε σε απώλειες εσόδων για παραγωγούς και πελάτες. Οι αφρικανικές χώρες, που εξαγουν μεγάλες ποσότητες λουλουδιών, φρούτων και λαχανικών στην Ευρωπαϊκή Ένωση, επηρεάστηκαν ιδιαίτερα. Η Παγκόσμια Τράπεζα εκτίμησε ότι η διακοπή των πτήσεων κόστισε στις αφρικανικές οικονομίες 65 εκατομμύρια δολάρια. Συγκεκριμένα, η βιομηχανία λουλουδιών έχασε περίπου 11 εκατομμύρια δολάρια σε μία εβδομάδα, ενώ η απώλεια για τον τομέα των φρούτων και λαχανικών έφτασε τα 3,9 εκατομμύρια δολάρια.

Η σύγχρονη βιομηχανία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από ταχείς αερομεταφορές, καθώς πολλές εταιρείες εφαρμόζουν συστήματα άμεσου ανεφοδιασμού. Σύμφωνα με στοιχεία της Eurostat, τον Απρίλιο του 2009, το 75% των εισαγόμενων εξαρτημάτων στην ΕΕ προερχόταν από την περιοχή Ασίας-Ειρηνικού. Η Ένωση Διεθνούς Εμπορίου της Κορέας εκτίμησε ότι οι τοπικές επιχειρήσεις υπέστησαν απώλειες 112 εκατομμυρίων δολαρίων εξαιτίας της κρίσης που προκάλεσε η ηφαιστειακή τέφρα.

Η κρίση που προκλήθηκε από την έκρηξη του Eyjafjallajökull ανέδειξε τη μεγάλη εξάρτηση της παγκόσμιας οικονομίας από τις αεροπορικές μεταφορές. Οι επιπτώσεις της δεν περιορίστηκαν μόνο στον τουρισμό και τις αεροπορικές εταιρείες, αλλά επεκτάθηκαν και στο διεθνές εμπόριο. Η αδυναμία διαχείρισης της κατάστασης κατέδειξε την ανάγκη για τη δημιουργία ευέλικτων στρατηγικών αντιμετώπισης παρόμοιων κρίσεων στο μέλλον. Είναι απαραίτητος ο καλύτερος συντονισμός μεταξύ εθνικών και διεθνών αρχών, καθώς και η ανάπτυξη εναλλακτικών λύσεων μεταφοράς σε περίπτωση διακοπής των αερομεταφορών λόγω φυσικών καταστροφών.

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα στην Ισλανδία είναι συνεχής και η πιθανότητα νέων εκρήξεων, όπως αυτή του Katla, αποτελεί σοβαρή απειλή για το μέλλον. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη ενός αποτελεσματικού πλαισίου διαχείρισης κρίσεων είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της οικονομικής σταθερότητας και της αδιάλειπτης λειτουργίας των παγκόσμιων μεταφορών.



## 4. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

### 4.1 Ανάγκη για Ανάλυση της Συσχέτισης Σεισμικής Δραστηριότητας και Θερμοκρασίας

Η πρόβλεψη των ηφαιστειακών εκρήξεων αποτελεί κρίσιμη πρόκληση για τη γεωφυσική έρευνα, καθώς οι εκρήξεις μπορούν να έχουν σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον, την ανθρώπινη ζωή και τις υποδομές. Για την έγκαιρη προειδοποίηση και τη μείωση των κινδύνων που σχετίζονται με τις ηφαιστειακές εκρήξεις, απαιτείται βαθύτερη κατανόηση των παραμέτρων που συμβάλλουν στην εκδήλωσή τους. Ανάμεσα σε αυτούς,

- η **σεισμική δραστηριότητα** και οι
- **θερμοκρασιακές μεταβολές** αποτελούν δύο από τους σημαντικότερους δείκτες επικείμενης ηφαιστειακής δραστηριότητας.

#### **Σεισμική Δραστηριότητα και Ηφαιστειακή Δραστηριότητα**

Οι σεισμοί αποτελούν μία από τις πιο αξιόπιστες ενδείξεις επικείμενων ηφαιστειακών εκρήξεων, καθώς συχνά προηγούνται της εκδήλωσης έντονης δραστηριότητας. Οι σεισμοί που σχετίζονται με τα ηφαίστεια ταξινομούνται στις εξής κατηγορίες:

1. **Σεισμοί Βαθιάς Γεωμετρίας** (Deep Long-Period Earthquakes): Προκαλούνται από την άνοδο του μάγματος στα βαθύτερα στρώματα του φλοιού και συχνά λειτουργούν ως προειδοποιητικός μηχανισμός για την πιθανή ενεργοποίηση του ηφαιστείου.
2. **Σεισμοί Χαμηλής Συχνότητας** (Low-Frequency Earthquakes): Σχετίζονται με τη διάρρηξη πετρωμάτων λόγω της πίεσης που ασκεί το ανερχόμενο μάγμα.
3. **Σεισμοί Υψηλής Συχνότητας** (High-Frequency Earthquakes): Συμβαίνουν κοντά στην επιφάνεια και συνδέονται με την κίνηση ρευστών ή αερίων εντός του ηφαιστειακού συστήματος.
4. **Σεισμικοί Σμήννοι** (Seismic Swarms): Σειρές μικρότερων σεισμών που συμβαίνουν σε μικρό χρονικό διάστημα και σε μικρή περιοχή, συχνά υποδηλώνοντας μαγματική δραστηριότητα.

Η καταγραφή και ανάλυση αυτών των σεισμών μέσω δικτύων σειсмоγράφων συμβάλλει στην παρακολούθηση της δυναμικής του μάγματος και στην εκτίμηση του κινδύνου έκρηξης.

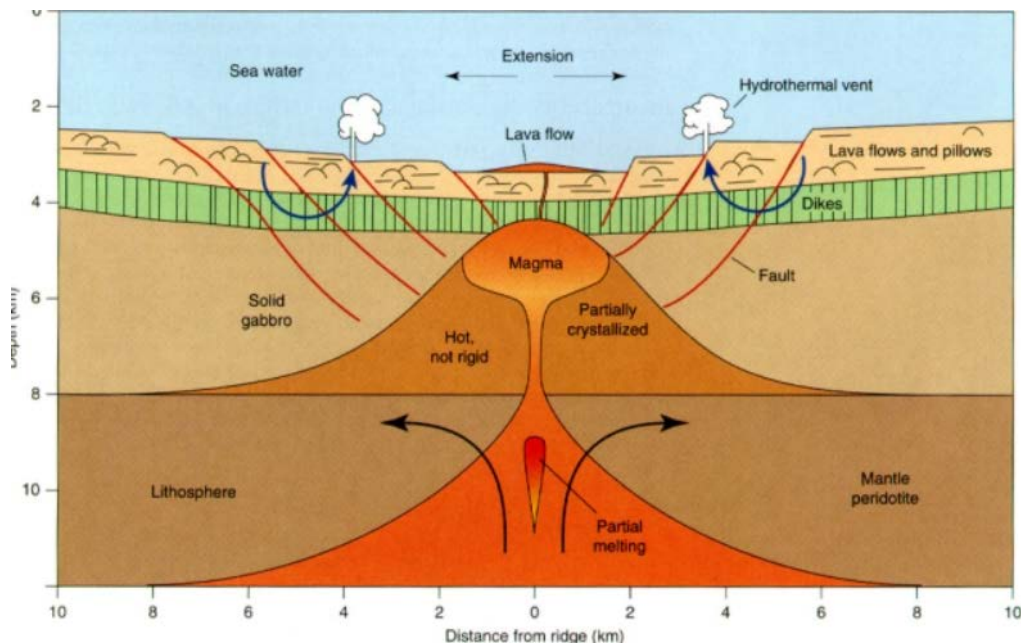
## Θερμοκρασιακές Μεταβολές και Ηφαιστειακή Δραστηριότητα

Η θερμοκρασία επηρεάζεται από τη συμπεριφορά του μάγματος και των αερίων που εκπέμπει το ηφαίστειο. Οι θερμοκρασιακές μεταβολές μπορούν να καταγραφούν μέσω διαφόρων μεθόδων:

1. **Μετρήσεις Θερμοκρασίας Εδαφικών Ρωγμών και Ατμίδων:** Η άνοδος της θερμοκρασίας σε επιφανειακές ρωγμές και εκλύσεις αερίων συχνά προμηνύει αυξημένη μαγματική δραστηριότητα.
2. **Θερμικές Δορυφορικές Παρατηρήσεις:** Οι θερμικοί δορυφόροι ανιχνεύουν αυξήσεις της θερμοκρασίας σε ηφαιστειακές περιοχές, επιτρέποντας τη χαρτογράφηση υπόγειων μαγματικών κινήσεων.
3. **Μεταβολές στη Θερμοκρασία των Υδάτων:** Οι θερμές πηγές και τα υδροθερμικά πεδία γύρω από τα ηφαίστεια εμφανίζουν μεταβολές στη θερμοκρασία, που μπορεί να υποδηλώνουν εισροή θερμότητας από ανερχόμενο μάγμα.
4. **Ακτινοβολία Υπέρυθρης Θερμογραφίας:** Επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση των επιφανειακών θερμοκρασιακών αλλαγών σε ενεργά ηφαίστεια.

Η αύξηση της θερμοκρασίας συχνά συνοδεύεται από εκπομπές αερίων όπως το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ) και το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), τα οποία λειτουργούν ως πρόσθετοι δείκτες ηφαιστειακής δραστηριότητας.

## Η Συσχέτιση Σεισμικής Δραστηριότητας και Θερμοκρασιακών Μεταβολών



Εικόνα 26 : Μάγμα

Πηγή: ([https://earthsci.org/mineral/rockmin/petrology/igneous\\_petrology/igneous\\_petrology.html](https://earthsci.org/mineral/rockmin/petrology/igneous_petrology/igneous_petrology.html))

Η άνοδος του μάγματος προς την επιφάνεια προκαλεί σημαντικές γεωφυσικές αλλαγές στην περιοχή του ηφαιστείου, επηρεάζοντας τόσο τη σεισμική δραστηριότητα όσο και τη θερμοκρασία. Οι δύο αυτοί παράγοντες συνδέονται στενά μέσα από διάφορους μηχανισμούς:

- Η κίνηση του μάγματος δημιουργεί πίεση στον φλοιό, προκαλώντας σεισμούς χαμηλής συχνότητας και σεισμικά σμήνη.
- Η άνοδος του μάγματος μεταφέρει θερμότητα προς την επιφάνεια, γεγονός που καταγράφεται σε αυξημένες θερμοκρασίες σε ατμίδες και θερμές πηγές.
- Η διείσδυση θερμού μάγματος σε υπόγειους υδροφόρους σχηματισμούς μπορεί να οδηγήσει σε εκπομπές αερίων και αλλαγές στις θερμικές ανωμαλίες.

Η στατιστική ανάλυση ιστορικών δεδομένων συμβάλλει στην εξαγωγή προτύπων που μπορεί να επαναληφθούν στο μέλλον, βελτιώνοντας έτσι τις προβλέψεις για ηφαιστειακές εκρήξεις.

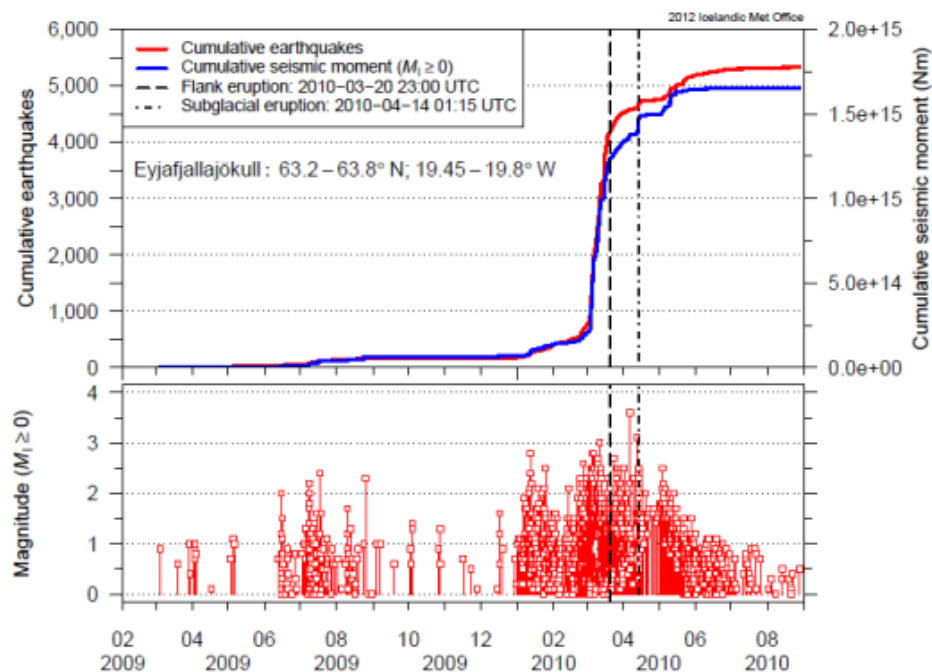
## 4.2 Εφαρμογή στο Ηφαίστειο Eyjafjallajökull

### **Συσχέτιση Σεισμικής Δραστηριότητας και Θερμοκρασιακών Μεταβολών στο Eyjafjallajökull**

Η πρόβλεψη ηφαιστειακών εκρήξεων βασίζεται στη μελέτη πολλαπλών γεωφυσικών δεικτών, με δύο από τους πιο σημαντικούς να είναι η σεισμική δραστηριότητα και οι θερμοκρασιακές μεταβολές. Η έκρηξη του ηφαιστείου **Eyjafjallajökull** το 2010 παρέχει ένα χαρακτηριστικό της σχέσης μεταξύ αυτών των παραγόντων, αποκαλύπτοντας πώς οι σεισμοί αντικατοπτρίζουν την άνοδο του μάγματος.

### **Η Σεισμική Δραστηριότητα ως Δείκτης Μαγματικής Ανόδου**

Κατά την περίοδο Ιανουαρίου - Μαρτίου 2010, η σεισμική δραστηριότητα στην περιοχή του Eyjafjallajökull παρουσίασε σημαντική αύξηση. Σύμφωνα με καταγραφές, οι σεισμοί αυξήθηκαν σταδιακά, με κορύφωση στις 4 Μαρτίου 2010. Το γεγονός αυτό συνέπεσε με την εισχώρηση μάγματος σε έναν υποεπιφανειακό θάλαμο, σε βάθος 4-5,9 χλμ. Οι περισσότεροι σεισμοί σημειώθηκαν σε βάθη 2-6 χλμ, γεγονός που υποδηλώνει ότι το μάγμα κινούνταν προς την επιφάνεια, προκαλώντας διαταραχές στον φλοιό.



**Διάγραμμα 1.** Αθροιστικός αριθμός και σεισμική ροπή των σεισμών που καταγράφηκαν από το δίκτυο SIL κατά την περίοδο 2009–2010.

[https://www.almannavarnir.is/wp-content/uploads/2016/05/ICAOreport\\_web\\_lr.pdf](https://www.almannavarnir.is/wp-content/uploads/2016/05/ICAOreport_web_lr.pdf)

Τα τοπικά μεγέθη (magnitudes) για την ίδια χρονική περίοδο παρουσιάζονται στο κάτω μέρος του σχήματος.

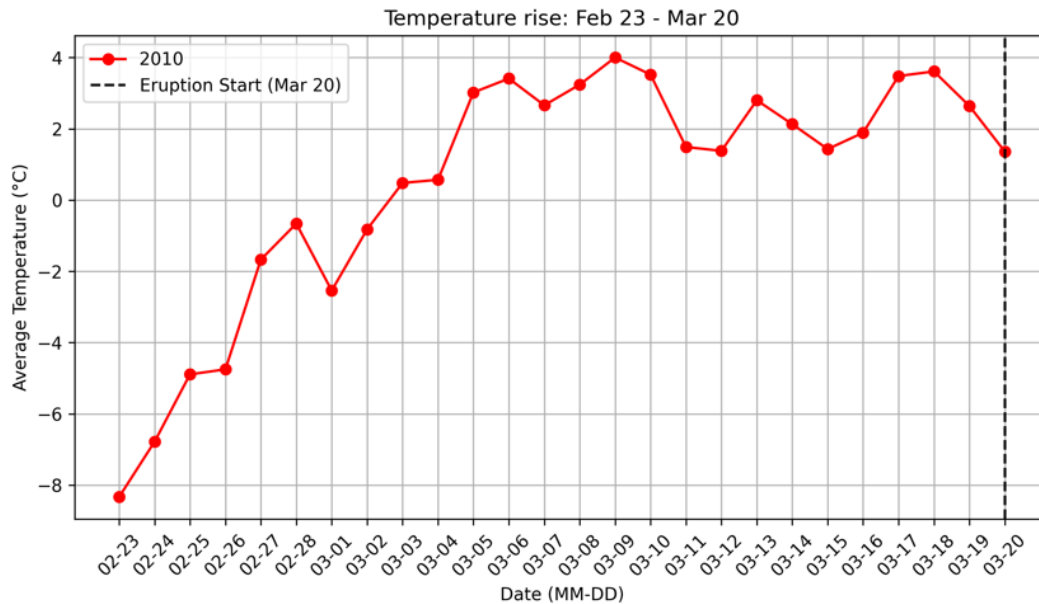
Το διάγραμμα της εικόνας το οποίο χρησιμοποιήθηκε παραπάνω είναι από την τεχνική έκθεση της Ισλανδικής Πολιτικής Προστασίας και του ICAO (2016) σχετικά με την έκρηξη του **Eyjafjallajökull** το 2010 και καταγράφει τη σωρευτική σεισμική δραστηριότητα και τη ροπή των σεισμών κατά την περίοδο 2009-2010, δείχνοντας μια σαφή αύξηση στη σεισμικότητα πριν την έκρηξη. Παρατηρείται ότι από τον Ιανουάριο έως τον Μάρτιο του 2010, ο αριθμός των σεισμών αυξήθηκε ραγδαία, ακολουθούμενος από μια περίοδο σταθεροποίησης πριν από την κύρια έκρηξη του Απριλίου. Η σταδιακή αυτή αύξηση αντανάκλα τη διαδικασία μαγματικής ανόδου, η οποία δημιούργησε πιέσεις στο εσωτερικό του ηφαιστειακού συστήματος, οδηγώντας τελικά στην έκρηξη.

Σωρευτικός αριθμός και ροπή των σεισμών που εντοπίστηκαν από το δίκτυο SIL, 2009-2010.

### Η Θερμοκρασία και η Αλληλεπίδραση με το Μάγμα

Αν και δεν καταγράφηκαν σημαντικές θερμικές ανωμαλίες πριν από την έκρηξη, η ίδια η άνοδος του μάγματος αποτελεί ένδειξη θερμοκρασιακών μεταβολών σε βάθος. Το μάγμα, καθώς κινείται προς την επιφάνεια, μεταφέρει θερμότητα και μπορεί να

προκαλέσει αύξηση της εκπομπής αερίων όπως το CO<sub>2</sub> και το SO<sub>2</sub>, τα οποία αποτελούν έμμεσους θερμικούς δείκτες.



**Διάγραμμα 2:** Εξέλιξη της μέσης θερμοκρασίας (average temperature) από τις 23 Φεβρουαρίου έως τις 20 Μαρτίου 2010.

[https://www.almannavarnir.is/wp-content/uploads/2016/05/ICAReport\\_web\\_lr.pdf](https://www.almannavarnir.is/wp-content/uploads/2016/05/ICAReport_web_lr.pdf)

Χρησιμοποιώντας κώδικα σε Python, καταφέραμε να αντλήσουμε και να επεξεργαστούμε δεδομένα θερμοκρασίας εδάφους από τη βάση δεδομένων του Copernicus, με στόχο τη διερεύνηση πιθανών μεταβολών πριν από την ηφαιστειακή έκρηξη. Εστίασαμε στην περίοδο από τις 23 Φεβρουαρίου έως τις 20 Μαρτίου 2010, ημερομηνία της έκρηξης, και καταγράψαμε τη θερμοκρασιακή εξέλιξη της περιοχής.

Από το διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου που παρατίθεται, γίνεται εμφανές ότι κατά τις τελευταίες ημέρες πριν από την έκρηξη, η θερμοκρασία παρουσίασε αξιοσημείωτη αύξηση. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μια αξιοσημείωτη αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους κατά την περίοδο από τις 23 Φεβρουαρίου έως τις 3 Μαρτίου, δηλαδή σε **διάστημα έντεκα ημερών**. Το φαινόμενο αυτό προσέλκυσε το ενδιαφέρον μας και αποτέλεσε αφορμή για περαιτέρω διερεύνηση μέσω στατιστικής ανάλυσης, με στόχο να εξεταστεί κατά πόσο παρατηρούνται παρόμοιες μεταβολές στη θερμοκρασία του εδάφους μετά από ηφαιστειακές εκρήξεις ή σεισμική δραστηριότητα, στο ίδιο χρονικό εύρος έντεκα ημερών. Αυτή η μεταβολή υποδηλώνει ότι η θερμοκρασία μπορεί να αποτελεί έναν κρίσιμο παράγοντα στην πρόβλεψη ηφαιστειακής δραστηριότητας.

Τα αποτελέσματα αυτά ενισχύουν τη θεωρία ότι οι θερμοκρασιακές μεταβολές συνδέονται άμεσα με τις διεργασίες του μάγματος, προσφέροντας έτσι επιπλέον

ενδείξεις για την αλληλεπίδραση μεταξύ της θερμικής ροής και της δυναμικής του ηφαιστείου.

### **Συμπέρασμα**

Η μελέτη του ηφαιστείου **Eyjafjallajökull** το 2010 αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της στενής σχέσης μεταξύ σεισμικής δραστηριότητας και μαγματικής κίνησης, η οποία με τη σειρά της συνδέεται με μεταβολές στη θερμοκρασία και γεωχημικές αλλαγές στο ηφαιστειακό σύστημα. Οι σεισμοί που καταγράφηκαν πριν από την έκρηξη λειτούργησαν ως προειδοποιητικά σήματα της ανόδου μάγματος προς την επιφάνεια, ενώ παράλληλα παρατηρήθηκαν αλλαγές στη θερμοκρασία της περιοχής, πιθανώς λόγω της αυξημένης θερμικής ροής από τα υπόγεια μαγματικά σώματα.

Η συνεχής παρακολούθηση αυτών των παραμέτρων είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτίωση των μοντέλων πρόγνωσης ηφαιστειακών εκρήξεων. Η συνδυαστική ανάλυση της σεισμικής δραστηριότητας και των θερμοκρασιακών μεταβολών μπορεί να προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες για τις διεργασίες που εξελίσσονται στο εσωτερικό του ηφαιστείου, επιτρέποντας την ανίχνευση προδρόμων σημάτων που προηγούνται μιας έκρηξης. Επιπλέον, η συστηματική συλλογή και επεξεργασία δεδομένων συμβάλλει στην ανάπτυξη πιο αξιόπιστων μοντέλων πρόγνωσης, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη λήψη έγκαιρων μέτρων προστασίας του πληθυσμού και την αποτελεσματικότερη διαχείριση ηφαιστειακών κρίσεων.

Η κατανόηση της σχέσης μεταξύ των φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα πριν από μια ηφαιστειακή έκρηξη αποτελεί βασικό στόχο της επιστημονικής κοινότητας, καθώς μπορεί να ενισχύσει σημαντικά τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης. Η βελτίωση αυτών των συστημάτων είναι καίριας σημασίας για τη μείωση των κοινωνικών και οικονομικών επιπτώσεων των ηφαιστειακών εκρήξεων, προστατεύοντας τόσο τις ανθρωπίνες ζωές όσο και τις υποδομές που βρίσκονται σε περιοχές υψηλού κινδύνου.

## 5. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Στο παρόν κεφάλαιο τής μελέτης, αξιοποιήθηκαν δεδομένα σεισμικών γεγονότων που εκδηλώθηκαν την περίοδο 1981-2015. Τα δεδομένα αντλήθηκαν από δυο διεθνώς αναγνωρισμένες βάσεις σεισμικών καταγραφών: τον κατάλογό σεισμικών γεγονότων της U.S. Geological Survey (USGS, n.d) και τη πλατφόρμα Wilber 3 του Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS, n.d). Οι βάσεις αυτές παρείχαν πλήθος παραμέτρων για κάθε σεισμό. Όπως την ημερομηνία και ώρα εκδήλωσης, το γεωγραφικό πλάτος και μήκος, το εστιακό βάθος και το μέγεθος (magnitude).

Με βάση τα δεδομένα και τις γνώστες συντεταγμένες τής επιφάνειας του ηφαιστείου, υπολογίστηκε για κάθε σεισμό η τρισδιάστατη διανυσματική απόσταση (ευκλείδεια απόσταση) μεταξύ της σεισμικής εστίας και ηφαιστείου. Ο υπολογισμός αυτός ενσωματώνει τόσο τη γεωγραφική θέση (ορίζοντα συνιστώσα) όσο και το βάθος (κατακόρυφη συνιστώσα), εξασφαλίζοντας έτσι ακρίβεια ως προς την πραγματική απόσταση. Οι αποστάσεις που προέκυψαν καλύπτουν μεγάλο εύρος, ξεκινώντας από περιοχές πλησίον του ηφαίστειου και φτάνοντας έως τα 6365 χιλιόμετρα, παρέχοντας δυνατότητά για ευρεία γεωγραφική ανάλυσή.

Η θερμοκρασία του εδάφους ως παράμετρος της παρούσας μελέτης αντλήθηκε από τη βάση δεδομένων Copernicus Climate Data Store (CDS), η οποία προσφέρει κλιματικά και περιβαλλοντικά δεδομένα παγκόσμιας εμβέλειας. Συγκεκριμένα, αξιοποιήθηκε το σύνολο επανάλυσης ERA5 (ECMWF Reanalysis v5), το οποίο περιέχει υψηλής ανάλυσης ημερήσια δεδομένα επιφανειακής θερμοκρασίας. Για τις ανάγκες της ανάλυσης, χρησιμοποιήθηκαν ημερήσιες μετρήσεις θερμοκρασίας επιφανείας, οι οποίες αντιστοιχήθηκαν χωρικά και χρονικά με τις ημερομηνίες εκδήλωσης των σεισμικών γεγονότων. Οι τιμές αυτές οργανώθηκαν σε εβδομαδιαία και μηνιαία διαστήματα, προκειμένου να εντοπιστούν ενδείξεις τάσεων ή τοπικών μεταβολών, και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για τη στατιστική διερεύνηση πιθανής συσχέτισης με τα σεισμικά χαρακτηριστικά.

Η μεταβλητή της θερμοκρασίας του εδάφους εξετάστηκε με αναφορά σε ένα παράθυρο 11 ημερών που ακολουθούν την ημερομηνία κάθε σεισμικού γεγονότος. Η επιλογή αυτής της συγκεκριμένης διάρκειας στηρίχθηκε σε παρατήρηση που προέκυψε από διάγραμμα της τεχνικής έκθεσης της Ισλανδικής πολιτικής προστασίας και του ICAO (2016), το οποίο καταγράφει αισθητή άνοδο της θερμοκρασίας επιφάνειας στην περιοχή του ηφαιστείου μεταξύ 23 Φεβρουαρίου και 3 Μαρτίου, δηλαδή σε διάστημα 11 ημερών. Το μοτίβο αυτό αποτέλεσε την βάση για την υιοθέτηση ενιαίου παραθύρου ανάλυσης των θερμικών μεταβολών μετά από κάθε σεισμό, προκειμένου να εντοπισθούν πιθανά επαναλαμβανόμενα πρότυπα.

Η στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό IBM SPSS Statistics, με χρήση του συντελεστή συσχέτισης Pearson, ώστε να εξεταστούν οι σχέσεις μεταξύ των



επιμέρους παραμέτρων και της μεταβολής της θερμοκρασίας. Πραγματοποιήθηκε επίσης έλεγχος ακραίων τιμών για την εξασφάλιση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων.

Αρχικά, διερευνήθηκε κατά πόσο το μέγεθος των σεισμικών γεγονότων επηρεάζει τη μεταβολή της θερμοκρασίας του εδάφους. Η στατιστική ανάλυση, ωστόσο δεν ανέδειξε κάποια συνεπή ή στατιστικά σημαντική σχέση μεταξύ των δυο μεταβλητών, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι θερμικές διακυμάνσεις δεν εξαρτώνται απευθείας από την ένταση των σεισμών.

Στην συνέχεια, εξετάστηκε η ενδεχόμενη σχέση μεταξύ της απόστασης των σεισμών από το ηφαίστειο και της θερμικής μεταβολής του εδάφους. Παρά την ακρίβεια στους υπολογισμούς και την ευρεία διακύμανση των αποστάσεων, ούτε η συγκεκριμένη μεταβλητή παρουσίασε στατιστικά σημαντική συσχέτιση με τις θερμοκρασίες.

Καθώς ούτε το μέγεθος των σεισμών ούτε η απόσταση από το ηφαίστειο φάνηκαν να έχουν μεμονωμένα επίδραση στην θερμοκρασία του εδάφους, η μελέτη προχωρά στην εξερεύνηση της αλληλεπίδρασης των δυο αυτών μεταβλητών. Η συνδυαστική ανάλυση αποσκοπεί στην διερεύνηση εάν η ταυτόχρονη επίδραση ισχυρού σεισμού και μικρής απόσταση από το ηφαίστειο μπορεί να σχετίζεται με μεταβολές της θερμικής κατάστασης της επιφάνειας, ενδεχομένως αποκαλύπτοντας πολυπαραγοντικούς μηχανισμούς γεωδυναμικής αλληλεπίδρασης.

### 5.1 Ένταση σεισμών και Θερμοκρασία Εδάφους

Παρατηρώντας τους παρακάτω πίνακες, βλέπουμε ότι υπάρχει μία πολύ ασθενής, αρνητική σχέση ανάμεσα στις μεταβλητές της **θερμοκρασίας εδάφους** και **έντασης σεισμών** (συντελεστής συσχέτισης  $R = -0,057$ ). Ο έλεγχος του σ.σ. δείχνει ότι δεν είναι στατιστικά σημαντικός ( $\text{sig} = 0,081 > 0,05$ ), γεγονός που σημαίνει ότι στην ουσία αυτές οι δύο μεταβλητές είναι ανεξάρτητες.

**Πίνακας 1:** Περιγραφικά χαρακτηριστικά των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και της έντασης των σεισμών

Descriptive Statistics			
	Mean	Std. Deviation	N
temp_t_plus_11d	<b>2,0894</b>	4,63734	610
Norma magn	<b>,6538</b>	,09318	610

**Πίνακας 2:** Συντελεστής συσχέτισης των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και της έντασης των σεισμών

**Correlations**

		temp_t_plus_11d	Norma magn
Pearson Correlation	temp_t_plus_11d	1,000	<b>-,057</b>
	Norma magn	-,057	1,000
Sig. (1-tailed)	temp_t_plus_11d	.	<b>,081</b>
	Norma magn	,081	.
N	temp_t_plus_11d	610	610
	Norma magn	610	610

**Πίνακας 3:** συντελεστής συσχέτισης δύο μεταβλητών

**Model Summary<sup>b</sup>**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	<b>,057<sup>a</sup></b>	,003	,002	4,63366

a. Predictors: (Constant), Norma magn

b. Dependent Variable: temp\_t\_plus\_11d

Στατιστικά μη σημαντική είναι και η Απλή Γραμμική Παλινδρόμηση μεταξύ των δύο μεταβλητών, οπότε δεν μπορεί να προσδιοριστεί γραμμικό μοντέλο που να τις συνδέει (sig=0,161).

**Πίνακας 4:** Ανάλυσης διασποράς των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και της έντασης των σεισμών

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	42,261	1	42,261	1,968	<b>,161<sup>b</sup></b>
	Residual	13054,236	608	21,471		
	Total	13096,497	609			

a. Dependent Variable: temp\_t\_plus\_11d

b. Predictors: (Constant), Norma magn

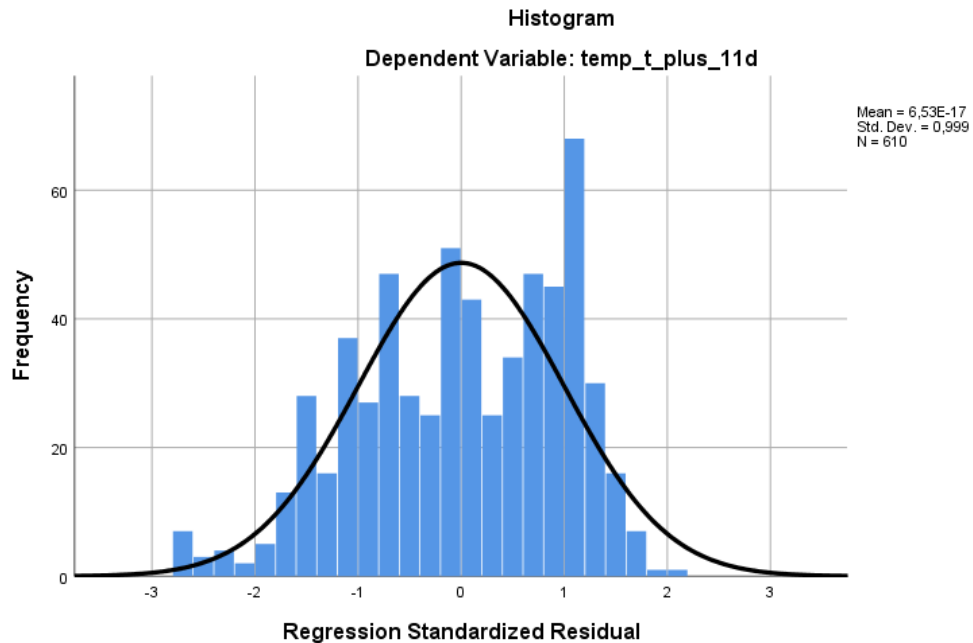
**Πίνακας 5:** Ευθεία παλινδρόμηση των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και της έντασης των σεισμών

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	<b>3,938</b>	1,331		2,959	,003
	Norma magn	<b>-2,827</b>	2,015	-,057	-1,403	,161

a. Dependent Variable: temp\_t\_plus\_11d

Το παρακάτω ιστόγραμμα των υπολοίπων δείχνει ότι η βασική υπόθεση της κανονικότητας, για την εφαρμογή της απλής γραμμικής παλινδρόμησης στα δεδομένα μας ικανοποιείται.



**Διάγραμμα 3 :** Ιστόγραμμα τυποποιημένων υπολοίπων για τη θερμοκρασία του εδάφους

Στη συνέχεια, δεδομένου ότι η συσχέτιση μεταξύ έντασης σεισμών και θερμοκρασίας δεν αποδείχθηκε στατιστικά σημαντική, η ανάλυση επεκτείνεται στη διερεύνηση της πιθανής σχέσης μεταξύ της απόστασης των σεισμικών γεγονότων από το ηφαίστειο και των θερμοκρασιακών μεταβολών του εδάφους.

## 5.2 Απόσταση Σεισμών και Θερμοκρασία Εδάφους

Παρατηρώντας τους παρακάτω πίνακες, βλέπουμε ότι υπάρχει μία πολύ ασθενής, αρνητική σχέση ανάμεσά στις μεταβλητές της **απόστασης των σεισμών** και **θερμοκρασίας εδάφους** (συντελεστής συσχέτισης  $R = -0,043$ ). Ο έλεγχος του σ.σ δείχνει ότι δεν είναι στατιστικά σημαντικός ( $\text{sig} = 0,147 > 0,05$ ), γεγονός που σημαίνει ότι στην ουσία αυτές οι δύο μεταβλητές είναι ανεξάρτητες.

**Πίνακας 6:** Περιγραφικά χαρακτηριστικά των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και της απόστασης των σεισμών

**Descriptive Statistics**

	Mean	Std. Deviation	N
temp_t_plus_11d	2,0894	4,63734	610
Norma dist	,0262	,06627	610

**Πίνακας 7:** Συντελεστής συσχέτισης των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και της απόστασης των σεισμών

**Correlations**

		temp_t_plus_11d	Norma dist
Pearson Correlation	temp_t_plus_11d	1,000	<b>-,043</b>
	Norma dist	-,043	1,000
Sig. (1-tailed)	temp_t_plus_11d	.	,147
	Norma dist	,147	.
N	temp_t_plus_11d	610	610
	Norma dist	610	610

**Πίνακας 8:** συντελεστής συσχέτισης δύο μεταβλητών

**Model Summary<sup>b</sup>**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,043 <sup>a</sup>	,002	,000	4,63695

a. Predictors: (Constant), Norma dist

b. Dependent Variable: temp\_t\_plus\_11d

Στατιστικά μη σημαντική είναι και η Απλή Γραμμική Παλινδρόμηση μεταξύ των δύο μεταβλητών, οπότε δεν μπορεί να προσδιοριστεί γραμμικό μοντέλο που να τις συνδέει (sig=0,294).

**Πίνακας 9:** Ανάλυση διασποράς των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και της απόστασης των σεισμών

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	23,684	1	23,684	1,101	,294 <sup>b</sup>
	Residual	13072,813	608	21,501		
	Total	13096,497	609			

a. Dependent Variable: temp\_t\_plus\_11d

b. Predictors: (Constant), Norma dist

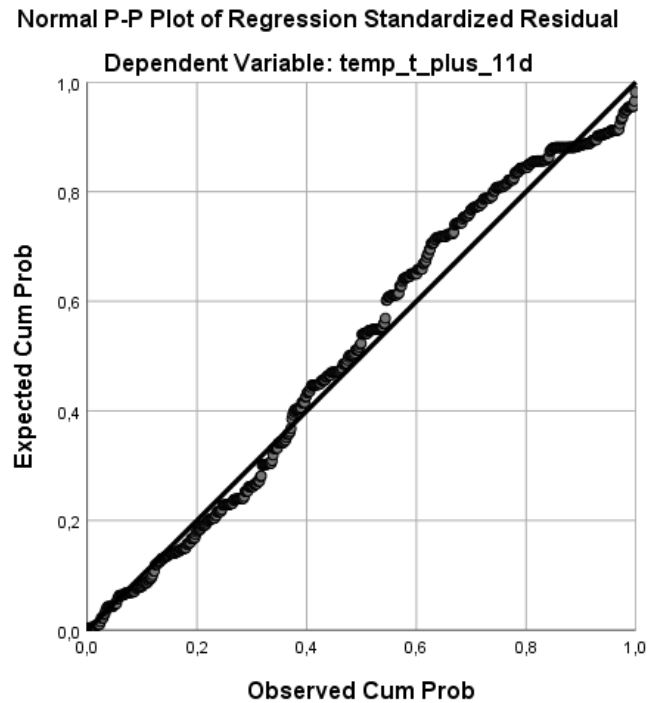
**Πίνακας 10:** Ευθεία παλινδρόμηση των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και της απόστασης των σεισμών

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	<b>2,167</b>	,202		10,734	,000
	Norma dist	<b>-2,976</b>	2,835	-,043	-1,050	,294

a. Dependent Variable: temp\_t\_plus\_11d

Το παρακάτω Διάγραμμα P-P των υπολοίπων δείχνει ότι η βασική υπόθεση της κανονικότητας, για την εφαρμογή της απλής γραμμικής παλινδρόμησης στα δεδομένα μας ικανοποιείται (δεδομένα κοντά στην διαγώνιο).



**Διάγραμμα 4:** Διάγραμμα P-P plot τυποποιημένων υπολοίπων της ανάλυση μεταξύ απόστασης σεισμικής εστίας και θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους

### 5.3 Ένταση Σεισμών/Απόσταση Σεισμών και Θερμοκρασία Εδάφους

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται παρακάτω σε μία σειρά από πίνακες.

**Πίνακας 11:** Περιγραφικά χαρακτηριστικά των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και έντασης σεισμών/ απόστασης σεισμών

Descriptive Statistics			
	Mean	Std. Deviation	N
temp_t_plus_11d	<b>2,0894</b>	4,63734	610
Magn / Distance	<b>37,5180</b>	37,37981	610

Ο πίνακας δίνει την μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και τής έντασης σεισμών/απόσταση σεισμών.



Η μέση τιμή της θερμοκρασίας του εδάφους =2,0894 και η τυπική της απόκλιση είναι 4,63734 ενώ η μέση τιμή της έντασης σεισμών/απόσταση σεισμών=37,5180 και η τυπική της απόκλιση είναι 37,37981

**Πίνακας 12:** Συντελεστής συσχέτισης των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και έντασης σεισμών/ απόστασης σεισμών

Correlations			
		temp_t_plus_11d	Magnitude / Distance
Pearson Correlation	temp_t_plus_11d	1,000	<b>,098</b>
	Magn / Distance	,098	1,000
Sig. (1-tailed)	temp_t_plus_11d	.	<b>,008</b>
	Magn / Distance	,008	.
N	temp_t_plus_11d	610	610
	Magn / Distance	610	610

Από την ανάλυση (συσχέτιση) προέκυψε μια ασθενής, θετική συσχέτιση των δύο αυτών μεταβλητών (συντελεστής συσχέτισης  $R=0,098$ ). Η συσχέτιση, αν και ασθενής είναι στατιστικά σημαντική ( $\text{sig}=0,008<0,05$ ).

**Πίνακας 13:** συντελεστής συσχέτισης δύο μεταβλητών

Model Summary <sup>b</sup>				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	<b>,098<sup>a</sup></b>	,010	,008	4,61869

a. Predictors: (Constant), Magnitude / Distance

b. Dependent Variable: temp\_t\_plus\_11d

**Πίνακας 14:** Ανάλυση διασποράς των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και έντασης σεισμών/ απόστασης σεισμών

ANOVA<sup>a</sup>

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	<b>126,449</b>	1	126,449	5,928	<b>,015<sup>b</sup></b>
	Residual	<b>12970,048</b>	608	21,332		
	Total	<b>13096,497</b>	609			

a. Dependent Variable: temp\_t\_plus\_11d

b. Predictors: (Constant), Magnitude / Distance

Η (γραμμική) σχέση που συνδέει τις δύο μεταβλητές έχει τη μορφή:

$$\text{Θερμοκρασία εδάφους} = 1,632 + 0,012 * \text{ένταση σεισμών} / \text{απόσταση σεισμών}$$

σχέση/μοντέλο που είναι στατιστικά σημαντικό (sig=0,015)

**Πίνακας 15:** Ευθεία παλινδρόμηση των μεταβλητών της θερμοκρασίας του εδάφους και έντασης σεισμών/ απόστασης σεισμών

Coefficients<sup>a</sup>

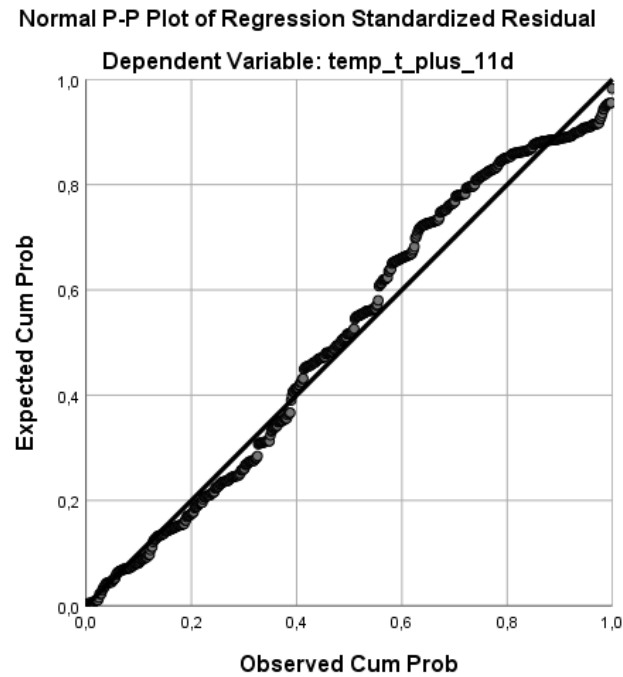
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	<b>1,632</b>	,265		6,157	,000
	Magma / Distance	<b>,012</b>	,005	,098	2,435	,015

a. Dependent Variable: temp\_t\_plus\_11d

Για την εφαρμογή της απλής γραμμικής παλινδρόμησης (εκτίμηση του μοντέλου δηλαδή που συνδέει τις δύο μεταβλητές) θα πρέπει η εξαρτημένη μεταβλητή ή τα υπόλοιπα/σφάλματα του μοντέλου να ακολουθούν την κανονική κατανομή.

Από το παραπάνω διάγραμμα **P-P plot** παρατηρούμε ότι, τα υπόλοιπα είναι κοντά στην ευθεία γραμμή άρα ακολουθούν την κανονική κατανομή (η διαδικασία είναι ανθεκτική

σε μικρές παραβιάσεις που φαίνονται στο παραπάνω διάγραμμα/ σημεία όχι πολύ κοντά στην ευθεία στο επάνω μέρος του διαγράμματος).



**Διάγραμμα 5:** Διάγραμμα P-P plot τυποποιημένων υπολοίπων για την ανάλυση μεταξύ έντασης σεισμών/απόσταση σεισμών και θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους

Συμπερασματικά με στόχο την ενίσχυση της κατανόησης των σταδίων της ανάλυσης, παρατίθεται συνοπτικός πίνακας με τις επιμέρους συσχετίσεις που εξετάστηκαν. Η ανάλυση ξεκίνησε με τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της έντασης των σεισμών και της θερμοκρασίας του εδάφους, χωρίς να αναδειχθεί στατιστικά σημαντική συσχέτιση. Στη συνέχεια, εξετάστηκε η πιθανή επίδραση της απόστασης των σεισμικών γεγονότων από το ηφαίστειο στη θερμοκρασία, με παρόμοια μη σημαντικά αποτελέσματα. Τέλος, μελετήθηκε ο συνδυασμός της έντασης και της απόστασης σε σχέση με τις θερμοκρασιακές μεταβολές, από όπου προέκυψε μια ασθενής αλλά στατιστικά σημαντική θετική συσχέτιση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 16:** Αποτελέσματα της ανάλυσης

Στάδιο Ανάλυσης	Μεταβλητές	Συντελεστής συσχέτισης (R)	Στατιστική σημαντικότητά	Σχόλιο
1.Αρχική Ανάλυση	Ένταση σεισμών-Θερμοκρασία εδάφους	$R = -0,057$	$\text{Sig}=0,081>0,05$	Μη στατιστικά σημαντική συσχέτιση
2.Δεύτερη Ανάλυση	Απόσταση σεισμών-Θερμοκρασία εδάφους	$R = -0,043$	$\text{Sig}=0,147>0,05$	Μη στατιστικά σημαντική συσχέτιση
3. Συνδυαστική Ανάλυση	Ένταση σεισμών/Απόσταση σεισμών-Θερμοκρασία εδάφους	$R = 0,098$	$\text{Sig}=0,008<0,05$	Ασθενής αλλά στατιστικά σημαντική σχέση

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### Παρουσίαση βασικού ευρήματος

Από την ανάλυση των στατιστικών δεδομένων που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσα μελέτης δεν αναδείχθηκε ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της σεισμικής δραστηριότητας και της μεταβολής της θερμοκρασίας του εδάφους. Ωστόσο, κατά τη συνδυαστική ανάλυση που έλαβε υπόψη τόσο την ένταση όσο και την απόσταση των σεισμικών γεγονότων, προέκυψε μια ασθενής αλλά στατιστικά σημαντική θετική συσχέτιση.

Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι, βάσει των δεδομένων και της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκαν, ενδέχεται να υπάρχει ένας περιορισμένος βαθμός σχέσης μεταξύ των δύο μεταβλητών, ο οποίος δεν είναι αρκετά ισχυρός ώστε να τεκμηριώσει ως αξιόπιστο προγνωστικό δείκτη την σχέση σεισμικής δραστηριότητας και αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους στο συγκεκριμένο χωροχρονικό πλαίσιο. Παρά την ύπαρξη στατιστικής σημασίας, η χαμηλή ένταση της συσχέτισης δεν επιτρέπει την εξαγωγή γενικευμένων συμπερασμάτων χωρίς περαιτέρω έρευνα.

### Ερμηνεία του ευρήματος

Η ασθενής αλλά στατιστικά σημαντική συσχέτιση που παρατηρήθηκε μεταξύ της σεισμικής δραστηριότητας (όπως αυτή εκφράστηκε συνδυαστικά με ένταση και απόσταση) και της θερμοκρασιακής μεταβολής του εδάφους ενδέχεται να ερμηνευθεί μέσα από τη φυσική πολυπλοκότητα των γεωδυναμικών διεργασιών. Παρά το γεγονός ότι η συσχέτιση είναι ασθενής, η θετική της κατεύθυνση συνάδει με τη λογική υπόθεση ότι όσο πλησιάζουμε προς το ηφαίστειο και αυξάνεται η ένταση της σεισμικής δραστηριότητας, είναι πιθανό να παρατηρείτε και αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους. Η παρατήρηση αυτή ενισχύει την ιδέα της ύπαρξης ενός φυσικού μηχανισμού που συνδέει τα δύο φαινόμενα, έστω και αν αυτός δεν αποτυπώνεται έντονα στα δεδομένα. Αν και ορισμένες μελέτες έχουν υποδείξει την ύπαρξη θερμικών μεταβολών πριν ή μετά από σεισμικά γεγονότα, τα φαινόμενα αυτά φαίνεται να εμφανίζονται μεμονωμένα ή υπό πολύ συγκεκριμένες συνθήκες, περιορίζοντας τη δυνατότητα γενίκευσης σε ευρύτερη κλίμακα.

Είναι πιθανό οι θερμικές διακυμάνσεις του εδάφους να επηρεάζονται περισσότερο από μικροκλιματικούς, υδρολογικούς ή επιφανειακούς παράγοντες, οι οποίοι δεν σχετίζονται απαραίτητα με τις τεκτονικές διεργασίες. Επιπλέον, η σεισμική δραστηριότητα, παρότι συνδέεται με μεταβολές ενέργειας στο υπέδαφος, δεν προκαλεί απαραίτητα θερμικές επιπτώσεις που να αποτυπώνονται με σαφήνεια στις μετρήσεις θερμοκρασίας του επιφανειακού εδάφους.

Συνεπώς, παρότι προέκυψε στατιστική σημαντικότητα, η χαμηλή ένταση της συσχέτισης υποδηλώνει ότι η θερμοκρασία του εδάφους δύσκολα μπορεί να αποτελέσει αυτόνομο ή αξιόπιστο δείκτη πρόγνωσης σεισμικής δραστηριότητας, τουλάχιστον βάσει των δεδομένων και της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

### Περιορισμοί της μελέτης

Παρότι τα ευρήματα της παρούσας μελέτης βασίζονται σε αξιόπιστα και επαρκώς επεξεργασμένα δεδομένα, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ερμηνεία τους. Ένας βασικός περιορισμός αφορά την περιορισμένη διαθεσιμότητα σεισμικών δεδομένων σε κρίσιμες χρονικές περιόδους, όπως για παράδειγμα στη φάση έντονης σεισμικής δραστηριότητας ή κατά την περίοδο της ηφαιστειακής έκρηξης. Κατά τις περιόδους αυτές, το διαθέσιμο δείγμα ήταν περιορισμένο τόσο ποσοτικά όσο και χρονικά, με αποτέλεσμα να μην καταγράφονται με ακρίβεια οι βραχυπρόθεσμες μεταβολές που πιθανόν να συνέβησαν.

Ειδικά η απουσία δεδομένων υψηλής χρονικής ανάλυσης, δηλαδή με συχνές καταγραφές ανά μικρό χρονικό διάστημα, δεν επέτρεψε τη λεπτομερή αποτύπωση των μεταβολών πριν, κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά από τα σεισμικά γεγονότα. Αυτό ενδέχεται να έχει επηρεάσει την ικανότητα της μελέτης να εντοπίσει πιο έντονες ή παροδικές συσχετίσεις, πέραν αυτών που τελικά καταγράφηκαν.

Επιπλέον, η χωρική ανάλυση περιορίζεται σε συγκεκριμένες γεωγραφικές θέσεις και βάθη μέτρησης, γεγονός που ενδέχεται να αποκλείει τοπικές ανωμαλίες ή φαινόμενα που δεν αποτυπώνονται επαρκώς σε ευρύτερη κλίμακα. Παράλληλα, παράγοντες όπως η υγρασία του εδάφους, η σύσταση του υπεδάφους, οι μετεωρολογικές συνθήκες και η ανθρωπογενής δραστηριότητα ενδέχεται να λειτουργούν ως συγχυτικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμοκρασιακή μεταβολή, χωρίς να σχετίζονται απαραίτητα με τη σεισμικότητα.

Ένας ακόμη παράγοντας που περιορίζει τη γενίκευση των αποτελεσμάτων είναι το γεγονός ότι η ανάλυση επικεντρώνεται αποκλειστικά στη θερμοκρασιακή μεταβολή του εδάφους ενός μόνο ηφαιστείου. Αν και η προσέγγιση αυτή επέτρεψε τη σε βάθος μελέτη της συγκεκριμένης γεωγραφικής περιοχής, δεν μπορεί να αποκλειστεί το ενδεχόμενο η σεισμική δραστηριότητα να επηρεάζει και άλλα γειτονικά ή ακόμη και πιο απομακρυσμένα ηφαιστειακά συστήματα. Η χωρική αυτή εστίαση περιορίζει τη δυνατότητα εξαγωγής γενικότερων συμπερασμάτων για ευρύτερα ηφαιστειακά πεδία ή για την αλληλεπίδραση σεισμικών γεγονότων με πολλαπλά ηφαίστεια.

Η χρήση μονοπαραγοντικής συσχέτισης στην παρούσα μελέτη περιορίζει την ανάλυση στην εξέταση μεμονωμένων ζευγών μεταβλητών, χωρίς να λαμβάνει υπόψη πιθανές πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών ή την επίδραση τρίτων παραμέτρων.

Επιπλέον, η ανάλυση βασίστηκε σε γραμμικά πρότυπα, τα οποία δεν είναι σε θέση να εντοπίσουν μη γραμμικές σχέσεις που συχνά χαρακτηρίζουν γεωφυσικά φαινόμενα, όπως οι ηφαιστειακές εκρήξεις. Μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν να αξιοποιήσουν πολυπαραγοντικά στατιστικά μοντέλα ή τεχνικές μηχανικής μάθησης, ώστε να διερευνήσουν πιο σύνθετα μοτίβα αλληλεπίδρασης μεταξύ μεταβλητών και να ενισχύσουν τη δυνατότητα πρόβλεψης ηφαιστειακής δραστηριότητας μέσω συνδυαστικών δεικτών.

### Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Με βάση τα ευρήματα και τους περιορισμούς που αναδείχθηκαν στην παρούσα εργασία, προκύπτουν ορισμένες κατευθύνσεις για περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου. Πρωτίστως, θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη η επέκταση του δείγματος σε μεγαλύτερο χρονικό εύρος, καθώς και η συλλογή δεδομένων υψηλής χρονικής ανάλυσης, ιδίως κατά τη φάση έντονης σεισμικής δραστηριότητας. Μια τέτοια προσέγγιση θα επέτρεπε την πληρέστερη καταγραφή βραχυπρόθεσμων θερμικών μεταβολών και την ενδεχόμενη σύνδεσή τους με σεισμικά φαινόμενα.

Επιπλέον, η αξιοποίηση πολυπαραγοντικών ή μη γραμμικών μοντέλων, τα οποία θα ενσωματώνουν γεωδυναμικά, θερμοκρασιακά, μετεωρολογικά και υδρολογικά δεδομένα, θα μπορούσε να επιτρέψει τη διερεύνηση πιο σύνθετων σχέσεων που δεν αποτυπώνονται επαρκώς μέσω απλής συσχέτισης. Εξίσου ενδιαφέρουσα θα ήταν η σύγκριση αποτελεσμάτων από διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές, καθώς και η στοχευμένη ανάλυση της θερμοκρασίας του εδάφους σε σχέση με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των σεισμών, όπως το βάθος, το μέγεθος ή η διάρκειά τους.

Τέλος, ένα ακόμη καινοτόμο πεδίο έρευνας αφορά τη χρήση βιοδεικτών, όπως τα φυτά και τα δέντρα, ως ενδεχόμενων προγνωστικών παραγόντων ηφαιστειακής ή σεισμικής δραστηριότητας. Σύμφωνα με πρόσφατη μελέτη (Arellano et al., 2024), παρατηρήθηκαν μεταβολές στη φθορίζουσα ακτινοβολία και στην υγρασία φυλλώματος φυτών σε περιοχή με ηφαιστειακή δραστηριότητα, λίγες ημέρες πριν από έκρηξη. Οι αλλαγές αυτές ερμηνεύθηκαν ως φυσιολογική απόκριση της χλωρίδας σε υπόγειες γεωθερμικές μεταβολές. Αν και η παρούσα εργασία δεν εξετάζει τέτοιες παραμέτρους, μελλοντικές μελέτες θα μπορούσαν να ενσωματώσουν δεδομένα τηλεπισκόπησης της βλάστησης (π.χ. μέσω δορυφορικών αισθητήρων ή μη επανδρωμένων αεροσκαφών), ώστε να αξιολογήσουν αν η συμπεριφορά της χλωρίδας μπορεί να λειτουργήσει ως έμμεσος δείκτης γεωδυναμικών διεργασιών, σε συνδυασμό με άλλες φυσικές παραμέτρους όπως η θερμοκρασία του εδάφους και η σεισμική δραστηριότητα.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. BeSafeNet. (n.d.). BeSafeNet – Εκπαίδευση για φυσικές καταστροφές. [online] Διαθέσιμο στο: <https://besafenet.net/el/> [Προσπελάστηκε 26 Ιουνίου 2025].
2. Πανεπιστήμιο Αριστοτέλης Θεσσαλονίκης. (n.d.). Πτυχιακή Εργασία. [pdf] Διαθέσιμο στο: <https://ikee.lib.auth.gr/record/133533/files/Πτυχιακή%20Εργασία.pdf> [Προσπελάστηκε 26 Ιουνίου 2025].
3. MySchLab. (2021). Ηφαίστειο: Το γήινο βασίλειο της λάβας. [online] Διαθέσιμο στο: <https://myschlab.com/2021/10/28/ifaisteio-to-giino-vasileio-tis-lavas/> [Προσπελάστηκε 26 Ιουνίου 2025].
4. Τσαουσίδου, Μ. (2023). Τα ηφαίστεια στη μυθολογία. [blog] Διαθέσιμο στο: <https://blogs.sch.gr/mtsaousid/2023/10/16/ta-ifaisteia-sti-mythologia/> [Προσπελάστηκε 26 Ιουνίου 2025].
5. Britannica. (n.d.). Volcano: Four of the worst eruptions in history. [online] Διαθέσιμο στο: <https://www.britannica.com/science/volcano/Four-of-the-worst-eruptions-in-history> [Προσπελάστηκε 26 Ιουνίου 2025].
6. NBC News. (n.d.). What is a tsunami? [online] Διαθέσιμο στο: <https://www.nbcnews.com/mach/science/what-tsunami-ncna94357> [Προσπελάστηκε 26 Ιουνίου 2025].
7. Romano, F., Piacentino, F. and Fabbri, A. (2015). Volcanoes and volcanic hazards: A risk assessment approach. [pdf] AIR Università di Udine. Διαθέσιμο στο: <https://air.uniud.it/retrieve/e27ce0c6-7a2d-055e-e053-6605fe0a7873/7655-22027-1-PB.pdf> [Προσπελάστηκε 26 Ιουνίου 2025].
8. Icelandic Civil Protection. (2016). ICAO report. [pdf] Διαθέσιμο στο: [https://www.almannavarnir.is/wp-content/uploads/2016/05/ICAOfreport\\_web\\_lr.pdf](https://www.almannavarnir.is/wp-content/uploads/2016/05/ICAOfreport_web_lr.pdf) [Προσπελάστηκε 26 Ιουνίου 2025].
9. Kim, H. and Lee, C. (2023). Monitoring volcanic activity using satellite-based infrared data. [online] IEEE Xplore. Διαθέσιμο στο: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10032629> [Προσπελάστηκε 26 Ιουνίου 2025].

10. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών. (n.d.). Ηφαίστεια – Ψηφιακό βιβλίο. [online] Διαθέσιμο στο: [https://oeclass.aua.gr/eclass/modules/ebook/show.php/5132/29/78,128/#\\_ftnref7](https://oeclass.aua.gr/eclass/modules/ebook/show.php/5132/29/78,128/#_ftnref7) [Προσπελάστηκε 26 Ιουνίου 2025].
11. Thora, E. (2014). The economics of natural disasters. [pdf] Trinity College Dublin. Διαθέσιμο στο: [https://www.tcd.ie/Economics/assets/pdf/SER/2014/elin\\_thora.pdf](https://www.tcd.ie/Economics/assets/pdf/SER/2014/elin_thora.pdf) [Προσπελάστηκε 26 Ιουνίου 2025].
12. Alfredsson, H. (2015). PhD Thesis: Volcanic Systems and Geothermal Energy in Iceland. [pdf] University of Iceland. Διαθέσιμο στο: <https://skemman.is/bitstream/1946/23054/1/Alfredsson-PhD-thesis-2015.pdf> [Προσπελάστηκε 26 Ιουνίου 2025].
13. Smith, D., Jones, M. and Patel, R. (2012). Long-term health effects of volcanic ash exposure. BMJ Open, 2(6), e001851. [online] Διαθέσιμο στο: <https://bmjopen.bmj.com/content/2/6/e001851> [Προσπελάστηκε 26 Ιουνίου 2025].
14. National Centre for Atmospheric Science (NCAS). (n.d.). Eyjafjallajökull 2010: How an Icelandic volcano eruption closed European skies. [online] Διαθέσιμο στο: <https://ncas.ac.uk/eyjafjallajokull-2010-how-an-icelandic-volcano-eruption-closed-european-skies/> [Προσπελάστηκε 26 Ιουνίου 2025].
15. Zong, Y., et al. (2024). Remote sensing of volcanic thermal anomalies using Landsat-8 imagery. Remote Sensing of Environment. [online] Διαθέσιμο στο: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425724004346?via%3Dihub> [Προσπελάστηκε 26 Ιουνίου 2025].
16. Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017) ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate.[online] Διαθέσιμο στο : <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5> (Accessed: 26 June 2025).
17. U.S. Geological Survey (USGS). (n.d.). Earthquake Catalog. Retrieved June 26, 2025, [online] Διαθέσιμο στο <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
18. Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS). (n.d.). Wilber 3: Event Data Search. Retrieved June 26, 2025, [online] Διαθέσιμο στο [https://ds.iris.edu/wilber3/find\\_event](https://ds.iris.edu/wilber3/find_event)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Time	Magnitude	Latitude	Longitude	Depthkm	latEyjafjallajökull	longEyjafjallajökull	Distance3Dkm	temp_t	temp_t_plus_11d	tempDt	Normamagn	Normadist	MagmaDistance
2015-05-29T13:10:23	3,6	63,93	-21,95	10,0	63,63	-19,62	119,68	2,84	5,08	,20	,55	,02	29,46
2015-02-19T01:26:12	4,3	64,67	-17,47	10,0	63,63	-19,62	155,93	,98	-1,89	-,26	,66	,02	27,00
2015-02-13T21:22:56	4,6	64,64	-17,25	10,0	63,63	-19,62	160,97	-2,98	-3,29	-,03	,71	,03	27,98
2015-02-10T03:18:56	4,6	64,67	-17,55	6,7	63,63	-19,62	153,47	-1,31	-6,04	-,43	,71	,02	29,35
2015-02-07T07:20:28	3,5	64,65	-17,35	10,0	63,63	-19,62	158,64	1,48	1,76	,03	,54	,02	21,60
2015-02-06T03:48:12	4,8	64,55	-17,82	10,0	63,63	-19,62	134,90	2,16	-3,94	-,55	,74	,02	34,84
2015-02-05T03:13:13	4,6	64,68	-17,49	10,0	63,63	-19,62	155,99	2,90	-4,01	-,63	,71	,02	28,88
2015-02-02T21:34:32	4,3	64,61	-17,48	10,0	63,63	-19,62	150,96	-4,40	-2,98	,13	,66	,02	27,89
2015-02-01T08:18:54	4,4	64,67	-17,52	10,0	63,63	-19,62	154,45	-1,66	-6,77	-,46	,68	,02	27,90
2015-01-30T18:16:02	4,1	64,65	-17,45	10,0	63,63	-19,62	155,43	-3,86	-1,31	,23	,63	,02	25,83
2015-01-29T21:45:20	4,4	64,48	-17,56	7,5	63,63	-19,62	138,08	-1,78	2,66	,40	,68	,02	31,20
2015-01-29T21:22:17	4,3	64,67	-17,40	10,0	63,63	-19,62	158,11	-1,78	2,66	,40	,66	,02	26,63
2015-01-29T21:18:45	4,5	64,39	-17,75	10,0	63,63	-19,62	124,42	-1,78	2,66	,40	,69	,02	35,42
2015-01-28T09:38:06	3,5	64,60	-17,72	9,0	63,63	-19,62	141,94	-2,39	4,35	,61	,54	,02	24,15
2015-01-26T19:24:39	4,4	64,67	-17,47	10,0	63,63	-19,62	156,31	,20	2,16	,18	,68	,02	27,56
2015-01-25T18:27:19	4,4	64,67	-17,44	3,3	63,63	-19,62	156,88	1,31	2,90	,14	,68	,02	27,47
2015-01-24T07:25:49	4,8	64,68	-17,60	10,0	63,63	-19,62	152,55	-1,75	1,42	,29	,74	,02	30,81
2015-01-23T03:07:02	4,6	64,67	-17,43	1,9	63,63	-19,62	156,95	-,98	-5,27	-,39	,71	,02	28,70
2015-01-22T04:33:19	3,5	64,61	-17,40	10,0	63,63	-19,62	153,66	1,83	-4,40	-,57	,54	,02	22,30
2015-01-21T19:21:16	4,5	64,62	-17,44	10,0	63,63	-19,62	153,28	,20	-1,66	-,17	,69	,02	28,75
2015-01-20T15:44:46	4,3	64,45	-17,71	10,0	63,63	-19,62	130,50	,41	-5,87	-,57	,66	,02	32,27
2015-01-20T11:57:55	4,3	64,60	-17,37	10,0	63,63	-19,62	154,15	,41	-5,87	-,57	,66	,02	27,32
2015-01-20T11:22:58	4,3	64,52	-17,67	10,0	63,63	-19,62	137,44	,41	-5,87	-,57	,66	,02	30,64
2015-01-20T10:32:25	4,8	64,58	-17,49	5,2	63,63	-19,62	148,00	,41	-5,87	-,57	,74	,02	31,76
2015-01-20T09:45:57	4,3	64,66	-17,45	10,0	63,63	-19,62	155,92	,41	-5,87	-,57	,66	,02	27,01
2015-01-18T22:27:52	4,7	64,62	-17,48	10,0	63,63	-19,62	151,77	-4,68	-1,78	,26	,72	,02	30,33

Δεδομένα (μέρος), καταγεγραμμένα στο λογισμικό SPSS

	Name	Type	Width	Decimals	Label	Values	Missing	Columns	Align	Measure	Role
1	Time	String	19	0	Time	None	None	19	Left	Nominal	Input
2	Magnitude	Numeric	3	1	Magnitude	None	None	12	Right	Scale	Input
3	Latitude	Numeric	18	2		None	None	16	Right	Scale	Input
4	Longitude	Numeric	30	2	Longitude	None	None	12	Right	Scale	Input
5	Depthkm	Numeric	31	1	Depth/km	None	None	12	Right	Scale	Input
6	latEyjafjallajökull	Numeric	5	2	lat Eyjafjallajökull	None	None	12	Right	Scale	Input
7	longEyjafjallajökull	Numeric	6	2	long Eyjafjallajökull	None	None	12	Right	Scale	Input
8	Distance3Dkm	Numeric	18	2	Distance 3D (km)	None	None	16	Right	Scale	Input
9	temp_t	Numeric	6	2		None	None	12	Right	Scale	Input
10	temp_t_plus_11d	Numeric	6	2		None	None	12	Right	Scale	Input
11	tempDt	Numeric	18	2	temp Dt	None	None	16	Right	Scale	Input
12	Normamagn	Numeric	17	2	Norma magn	None	None	16	Right	Scale	Input
13	Normadist	Numeric	17	2	Norma dist	None	None	16	Right	Scale	Input
14	MagmaDistance	Numeric	18	2	Magma / Distance	None	None	16	Right	Scale	Input

Μεταβλητές δεδομένων καταγεγραμμένων στο SPSS

Time	Magnitude	Latitude	Longitude	Depth/km	Distance 3D (km)	temp_t	temp_t_plus_11d	temp Dt
2015-05-29T13:10:23	3,6	63,93	-21,95	10,0	119,6773898	2,84	5,08	0,203636364
2015-02-19T01:26:12	4,3	64,67	-17,47	10,0	155,9308362	0,98	-1,89	-0,260909091
2015-02-13T21:22:56	4,6	64,64	-17,25	10,0	160,9716599	-2,98	-3,29	-0,028181818
2015-02-10T03:18:56	4,6	64,67	-17,55	6,7	153,4720671	-1,31	-6,04	-0,43
2015-02-07T07:20:28	3,5	64,65	-17,35	10,0	158,6421536	1,48	1,76	0,025454545
2015-02-06T03:48:12	4,8	64,55	-17,82	10,0	134,8975608	2,16	-3,94	-0,554545455
2015-02-05T03:13:13	4,6	64,68	-17,49	10,0	155,9935179	2,9	-4,01	-0,628181818
2015-02-02T21:34:32	4,3	64,61	-17,48	10,0	150,9601528	-4,4	-2,98	0,129090909
2015-02-01T08:18:54	4,4	64,67	-17,52	10,0	154,4488675	-1,66	-6,77	-0,464545455
2015-01-30T18:16:02	4,1	64,65	-17,45	10,0	155,433415	-3,86	-1,31	0,231818182
2015-01-29T21:45:20	4,4	64,48	-17,56	7,5	138,0845862	-1,78	2,66	0,403636364
2015-01-29T21:22:17	4,3	64,67	-17,40	10,0	158,1062732	-1,78	2,66	0,403636364
2015-01-29T21:18:45	4,5	64,39	-17,75	10,0	124,4212459	-1,78	2,66	0,403636364
2015-01-28T09:38:06	3,5	64,60	-17,72	9,0	141,9445695	-2,39	4,35	0,612727273
2015-01-26T19:24:39	4,4	64,67	-17,47	10,0	156,3131712	0,2	2,16	0,178181818
2015-01-25T18:27:19	4,4	64,67	-17,44	3,3	156,8752336	1,31	2,9	0,144545455
2015-01-24T07:25:49	4,8	64,68	-17,60	10,0	152,5515509	-1,75	1,42	0,288181818
2015-01-23T03:07:02	4,6	64,67	-17,43	1,9	156,9501532	-0,98	-5,27	-0,39
2015-01-22T04:33:19	3,5	64,61	-17,40	10,0	153,6577529	1,83	-4,4	-0,566363636
2015-01-21T19:21:16	4,5	64,62	-17,44	10,0	153,2767557	0,2	-1,66	-0,169090909
2015-01-20T15:44:46	4,3	64,45	-17,71	10,0	130,5031414	0,41	-5,87	-0,570909091
2015-01-20T11:57:55	4,3	64,60	-17,37	10,0	154,1452597	0,41	-5,87	-0,570909091
2015-01-20T11:22:58	4,3	64,52	-17,67	10,0	137,4354843	0,41	-5,87	-0,570909091
2015-01-20T10:32:25	4,8	64,58	-17,49	5,2	148,0015684	0,41	-5,87	-0,570909091
2015-01-20T09:45:57	4,3	64,66	-17,45	10,0	155,9226406	0,41	-5,87	-0,570909091
2015-01-18T22:27:52	4,7	64,62	-17,48	10,0	151,7690691	-4,68	-1,78	0,263636364

Δεδομένα έρευνας καταγεγραμμένα στο excel (μέρος)