



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ & ΚΡΙΣΕΩΝ

POST GRADUATE PROGRAM
ENVIRONMENTAL, DISASTER & CRISES MANAGEMENT STRATEGIES

Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης

Master Thesis

Επικινδυνότητα ηφαιστειακών αερίων, διαχείριση και τρόποι αντιμετώπισής τους

Risk of volcanic gasses, management and ways of dealing with them.

ΘΩΜΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ / THOMAS DIMITRIOU

A.M. / R.N. : 17046

Ειδικές Εκδόσεις / Special Publications:

No. 2019015

Αθήνα, Μάρτιος 2019

Athens, March 2019



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ & ΚΡΙΣΕΩΝ

POST GRADUATE PROGRAM
ENVIRONMENTAL, DISASTER & CRISES MANAGEMENT STRATEGIES

Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης

Master Thesis

Επικινδυνότητα ηφαιστειακών αερίων, διαχείριση και τρόποι αντιμετώπισής τους

Risk of volcanic gasses, management and ways of dealing with them.

ΘΩΜΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ / THOMAS DIMITRIOU

A.M. / R.N. : 17046

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Δρ. Κ. Κυριακόπουλος,
Καθηγ. ΕΚΠΑ

Δρ. Π. Νομικού,
Επικ. Καθηγ. ΕΚΠΑ

Δρ. Β. Αντωνίου,
Δρ. Γεωλόγος, Ε.Δ.Ι.Π. ΕΚΠΑ

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	ii
Περίληψη	iv
Abstract	v
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	1
1.1. Ερευνητικό Αντικείμενο	1
1.2. Σκοπός της Διατριβής	1
1.3. Δομή της Διατριβής	2
Κεφάλαιο 2. Το Ηφαίστειο	3
2.1. Τι είναι Ηφαίστειο	3
2.2. Τύποι Ηφαιστειών	4
2.2.1. Ασπιδόμορφα	4
2.2.2. Κώνοι Σκωριών	6
2.2.3. Στρωματοηφαίστεια	7
2.2.4. Καλδέρες	8
2.2.4.1 Πυροκλαστικές καλδέρες	8
2.2.4.2 Βασαλτικές καλδέρες	9
2.2.5. Βασαλτικά Υψίπεδα	10
2.2.6. Δευτερεύουσες Ηφαιστειακές Δομές	10
2.2.6.1 Ηφαίστεια αερίων	10
2.2.6.2 Διάτρημα (Diatrema)	10
2.2.6.3 Μαάρ (Maar)	11
Κεφάλαιο 3. Ηφαιστειακές Εκρήξεις	12
3.1. Ηφαιστειακές Ζώνες	12
3.2. Μέγεθος και Συχνότητα Ηφαιστειακών Εκρήξεων	14
3.3. Εκρηκτικότητα Ηφαιστειών	15
Δείκτης Εκρηκτικότητας (VEI)	15
3.4. Τύποι εκρήξεων	18
3.4.1. Εκρήξεις από ρωγμές (τύπου Ισλανδίας)	18
3.4.2. Εκρήξεις τύπου Χαβάη	19
3.4.3. Εκρήξεις τύπου Στρόμπολι	21
3.4.4. Εκρήξεις τύπου Βουλκάνο	22
3.4.5. Πλινιακές Εκρήξεις	23
3.4.6. Εκρήξεις τύπου Πελέ	24
3.4.7. Υδροηφαιστειακές Εκρήξεις (τύπου Surtsey)	26
3.5. Ηφαιστειακά Προϊόντα	29
3.5.1. Ροές Λάβας	29
3.5.2. Τέφρα και Πυροκλαστικά Πετρώματα	29
3.5.3. Πυροκλαστικές Αποθέσεις Πτώσης	31
3.5.4. Πυροκλαστικές Ροές	33
Κεφάλαιο 4. Επιπτώσεις των Ηφαιστειακών Αερίων	35
4.1. Ηφαιστειακά προϊόντα	35

4.1.1.	Πυροκλαστικές Ροές	35
4.1.2.	Πυρακτωμένα Νέφη	35
4.1.3.	Ηφαιστειακά Αέρια	37
4.2.	Κλιματική επίδραση	38
4.2.1.	Όζον	38
4.2.2.	Φαινόμενο του Θερμοκηπίου	39
4.2.2.4.1	Ηφαίστειο Laki (Ισλανδία, 1783).....	40
4.2.2.4.2	Ηφαίστειο Tambora (Ινδονησία, 1815)	40
4.2.2.4.3	Ηφαίστειο Krakatau (Ινδονησία, 1883)	40
4.2.2.4.4	Ηφαίστειο Pinatubo (Φιλιππίνες, 1991).....	40
4.3.	Ιστορικές Εκρήξεις Ηφαιστειών	41
4.3.1.	Σαντορίνη (Ελλάδα).....	41
4.3.2.	Krakatau (Ινδονησία 1883)	44
4.3.2.1	Ιστορικό	44
4.3.2.2	Επιπτώσεις.....	45
4.3.2.3	Το ηφαίστειο σήμερα	46
4.3.3.	Αγία Ελένη (ΗΠΑ 1980)	46
4.3.3.1	Ιστορικό	46
4.3.3.2	Επιπτώσεις.....	47
4.3.4.	Eyjafjallajökull (Ισλανδία 2010)	48
4.3.4.1	Ιστορικό	48
4.3.4.2	Επιπτώσεις.....	49
4.3.4.2.1	Στην οικονομία	50
4.3.4.2.2	Στην υγεία	51
4.3.4.3	Διαχείριση της καταστροφής	52
Κεφάλαιο 5. Κύκλος Διαχείρισης της Καταστροφής.....		53
5.1.	Διαχείριση του Ηφαιστειακού Κινδύνου	53
5.2.	Ανάλυση του Κινδύνου	53
5.3.	Μέτρα Πρόληψης.....	55
5.3.1.	Πριν την Έκρηξη	55
5.3.2.	Κατά τη Διάρκεια της Έκρηξης.....	56
5.3.3.	Μετά την Έκρηξη	56
5.4.	Εργαλεία Πρόληψης	57
5.4.1.	Ηφαιστειακές Ζώνες.....	57
5.4.2.	Σχεδιασμός Χρήσης Γής	58
5.4.3.	Παρακολούθηση Αερίων	58
5.4.3.1.1	Άμεσες μετρήσεις.....	59
5.4.3.1.2	Φασματογραφικές μετρήσεις (COSPEC).....	59
5.4.3.1.3	Μετρήσεις όζοντος (TOMS)	59
Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα.....		60
Βιβλιογραφία.....		62

Περίληψη

Τα ηφαίστεια εντάσσονται στην κατηγορία των φυσικών φαινομένων και η δυναμική τους εξαρτάται από τα ιδιαίτερα γεωλογικά και ηφαιστειολογικά χαρακτηριστικά κάθε ηφαιστειογενούς περιοχής. Είναι εκπληκτικό το μέγεθος της ενέργειας που απελευθερώνεται μέσω της ηφαιστειακής δραστηριότητας και ταυτόχρονα μηδαμινή η ικανότητα του ανθρώπου να αμυνθεί ενάντια σε αυτό το φαινόμενο. Έτσι, περιορίζεται σε μέτρα αποφυγής ή ελαχιστοποίησης της καταστροφής με προληπτικά μέτρα όπως εκκενώσεις των περιοχών που πλήττονται ώστε να διαφυλαχτεί τουλάχιστον η ανθρώπινη ζωή και οι υποδομές.

Οι καταστροφικές συνέπειες της ηφαιστειακής δράσης συνήθως αποδίδεται στις τεράστιες ροές λάβας ή στις φονικές πυροκλαστικές εκρήξεις. Εντούτοις, τα ηφαιστειακά αέρια είναι εξ' ίσου επικίνδυνα, διότι είναι θερμά και τοξικά, και η εκπομπή τους σε μεγάλες ποσότητες μπορεί να προκαλέσει τον αιφνίδιο θάνατο ανθρώπων ή ζώων. Για παράδειγμα, το εσωτερικό των στοών λάβας μπορεί να είναι επικίνδυνο, καθώς εκεί μπορούν να εγκλωβιστούν δηλητηριώδη αέρια.

Επιπλέον, τα ηφαιστειακά αέρια δύναται να μεταφερθούν εκατοντάδες χιλιάδες χιλιόμετρα από το σημείο της έκρηξης και η επικινδυνότητά τους αφορά κατοίκους και περιοχές που βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις. Αυτό εξαρτάται από διάφορους παράγοντες αλλά κυρίως από τις καιρικές συνθήκες να διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο σε αυτό.

Θα μελετηθούν οι αρνητικές επιπτώσεις στους τομείς της υγείας του πληθυσμού, της οικονομίας της κοινωνίας και στο δομημένο περιβάλλον. Επίσης, θα αναφερθούν παραδείγματα μεγάλων ηφαιστειακών εκρήξεων, με σκοπό να αναπτύξουμε δομές αντιμετώπισης της καταστροφής. Η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί είναι η βιβλιογραφική ανασκόπηση ελληνικής και ξενόγλωσσης βιβλιογραφίας στο Διαδίκτυο με τη χρήση λέξεων – κλειδιών.

Λέξεις κλειδιά: Ηφαιστειολογία, Ηφαίστειο, Πυροκλαστικά Προϊόντα, Ηφαιστειακά Αέρια

Abstract

Volcanoes belong to the category of natural phenomena and their dynamics depend on the particular geological and volcanic characteristics of each volcanic area. The magnitude of the energy released through volcanic activity is amazing, and at the same time, the inability of man to defend himself against this phenomenon. Thus, it is limited to measures to prevent or minimize destruction by preventative measures such as discharges of affected areas in order to preserve at least human life and infrastructure.

The devastating effects of volcanic action are usually attributed to huge lava flows or deadly pyroclastic explosions. However, volcanic gases are equally dangerous because they are hot and toxic, and their emission in large quantities can cause sudden death on humans and animals. For example, the inside of the lava stones can be dangerous, as poisonous gases can be trapped there.

In addition, volcanic gases can be transported hundreds of thousands of kilometers from the point of explosion, and their hazards involve residents and distant regions. This depends on a number of factors, especially on weather conditions, to play an important role in it.

We will study the negative impact on the health of the population, the economy of society and the structured environment. Also, examples of major volcanic eruptions will be reported to develop those mechanisms of action to address the disaster. The method to be used is the bibliographic review of Greek and foreign language literature on the Internet using keywords.

Keywords: Volcanology, Volcano, Pyroclastics, Volcanic Gasses

*Αφιερώνω τη παρούσα εργασία στη σύζυγο μου Μιρέλλα, για την απέραντη
συμπαράστασή της στην πορεία για την ολοκλήρωση του μεταπτυχιακού
προγράμματος σπουδών, καθώς επίσης και στα παιδιά μου Ραφαήλ και Λυδία, για
την ευχάριστη συμβολή τους στο έργο αυτό.*

Κεφάλαιο 1.

Εισαγωγή

1.1. Ερευνητικό Αντικείμενο

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα η οποία εκδηλώνεται στην επιφάνεια της Γης είναι δυνατό να επηρεάσει τον άνθρωπο και το περιβάλλον τόσο σε τοπικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Υπάρχουν περίπου 500 ενεργά ηφαίστεια παγκοσμίως αν και ο αριθμός αυτός μπορεί να μην είναι καθόλου αντιπροσωπευτικός καθώς είναι δύσκολο να καθοριστεί ο χρόνος κατά τον οποίο ένα ηφαίστειο παύει να αποτελεί απειλή για την ανθρώπινη ζωή και δραστηριότητα. Φρόνιμο είναι να θεωρούμε ως τουλάχιστον πιθανό ενεργό όλα τα ηφαίστεια που έχουν εκδηλώσει δραστηριότητα κατά τα τελευταία 25.000 χρόνια. Κατά μέσο όρο, περίπου πενήντα ηφαίστεια παρουσιάζουν εκρηκτική δραστηριότητα κάθε χρόνο.

Πολλά είδη ηφαιστειακής δραστηριότητας μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο τις ζωές ανθρώπων και τις περιουσίες, τόσο κοντά, όσο και μακριά από ένα ηφαίστειο, το μεγαλύτερο μέρος της δραστηριότητας έχει να κάνει με την έκρηξη ή εκτίναξη πετρών και αερίων σε διάφορους συνδυασμούς ζεστού ή κρύου, υγρού ή ξηρού και αργού ή γρήγορου. Κάποιοι κίνδυνοι είναι πιο σοβαροί από άλλους ανάλογα με το μέγεθος και την έκταση του γεγονότος που γίνεται και αν οι άνθρωποι ή οι περιουσίες βρίσκονται στο δρόμο του.

Οι εκρήξεις ηφαιστειών είναι από τα πιο δραματικά και βίαια γεγονότα αλλαγών στη γη. Όχι μόνο δυνατές εκρήξεις εκτοξεύουν γη και νερό για δεκάδες ή χιλιάδες μέτρα γύρω από ένα ηφαίστειο, αλλά μικρές σταγόνες θειικού οξέος που εκτοξεύονται στη στρατόσφαιρα μπορούν να αλλάξουν το κλίμα του πλανήτη μας προσωρινά. Οι εκρήξεις συχνά αναγκάζουν τους ανθρώπους που ζουν κοντά στα ηφαίστεια να εγκαταλείψουν τη γη τους και τα σπίτια τους, ίσως για πάντα. Αυτοί που ζουν πιο μακριά πιθανών να αποφύγουν την ολοκληρωτική καταστροφή, αλλά οι πόλεις τους, οι καλλιέργειες, οι συγκοινωνίες και οι ηλεκτρικές γραμμές μπορεί να καταστραφούν από την τέφρα, την καθίζηση και τις πλημμύρες (Κυριακόπουλος, 2014).

Ένας μεγάλο μέρος της καταστροφικής ενέργειας των ηφαιστειών οφείλεται στα ηφαιστειακά αέρια τα οποία είναι επικίνδυνα πτητικά αέρια του μάγματος και υδρατμοί που υπό συνθήκες υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών εκτονώνονται και προκαλούν βίαιες ηφαιστειακές εκρήξεις. Γενικά τα αέρια που εκλύονται στην περιοχή ενός ενεργού ακόμη ηφαιστείου περιέχουν θειούχα και ανθρακικά αέρια και γίνονται αντιληπτά μόνο από την δυσάρεστη οσμή τους. Πολλές φορές δίνουν δηλητηριώδη αέρια και αν βρίσκονται σε μεγαλύτερη πυκνότητα, τότε οι συνέπειες τους μπορεί είναι ολέθριες (Friedrich, 2000).

1.2. Σκοπός της Διατριβής

Σκοπός της διατριβής είναι η εκτενής εξέταση των επιπτώσεων των ηφαιστειακών αερίων στην υγεία του τοπικού πληθυσμού, στην οικονομία της κοινωνίας και στο δομημένο περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται οι επιπτώσεις μέσω μεγάλων ηφαιστειακών

εκρήξεων καθώς επίσης οι ενέργειες που απαιτείται να γίνουν και τα εργαλεία που διατίθενται για την αντιμετώπιση των ηφαιστειακών εκρήξεων μέσω του Κύκλου Διαχείρισης Καταστροφών. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις που πρέπει να λάβει υπόψη μια οργανωμένη κοινωνία ώστε να μετριάσει και να αντιμετωπίσει τις καταστροφικές επιπτώσεις των ηφαιστειακών αερίων.

1.3. Δομή της Διατριβής

Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή επί του αντικείμενου της εργασίας και των θεμάτων που θα αναπτυχθούν, αποτυπώνεται ο σκοπός της διατριβής και παρατίθεται η δομή της.

Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το ηφαίστειο σύμφωνα με την επιστήμη της Γεωλογίας. Περιγράφονται οι κυριότεροι τύποι ηφαιστείων ανάλογα της μορφής τους, και δίνονται χαρακτηριστικά παραδείγματα ηφαιστείων.

Στο 3^ο κεφάλαιο αναλύεται η ηφαιστειακή δραστηριότητα ως προς το μέγεθος, τη συχνότητα του φαινομένου και την εκρηκτικότητα της ηφαιστειακής έκρηξης. Περιγράφονται οι σημαντικότεροι τύποι εκρήξεων, και μελετώνται τα παράγωγα προϊόντα αυτών.

Στο 4^ο κεφάλαιο αναλύονται οι επιπτώσεις των ηφαιστειακών εκρήξεων και κυρίως των ηφαιστειακών αερίων, στον άνθρωπο, την οικονομία και το περιβάλλον, μέσω παρουσίασης μεγάλων ιστορικών ηφαιστειακών εκρήξεων. Επίσης, αναλύεται και η κλιματική επίδραση των ηφαιστειακών αερίων και δίνονται χαρακτηριστικά παραδείγματα.

Στο 5^ο κεφάλαιο περιγράφεται ο Κύκλος Διαχείρισης της Καταστροφής στο τομέα του Ηφαιστειακού Κινδύνου και παρουσιάζονται μέτρα και δράσεις για μετριασμό των αρνητικών επιπτώσεων των ηφαιστειακών εκρήξεων. Επίσης αναφέρονται τα μέτρα πρόληψης και περιγράφονται τα σημαντικότερα εργαλεία που έχουν στην διάθεσή τους οι αρμόδιες αρχές.

Τέλος, στο 6^ο κεφάλαιο συνοψίζονται τα σημαντικότερα συμπεράσματα από τους κινδύνους που διατρέχουμε από τις ηφαιστειακές εκρήξεις και οι προτάσεις για τις οργανωμένες δράσεις της πολιτείας και των κοινωνικών δομών που πρέπει να αναπτυχθούν για την αντιμετώπιση του φαινομένου.

Κεφάλαιο 2.

Το Ηφαίστειο

2.1. Τι είναι Ηφαίστειο

Σύμφωνα με την Γεωλογία τα ηφαίστεια είναι ανάγλυφες, αυτοτελείς μορφές της επιφάνειας της Γης, που δημιουργούνται κατά την έξοδο του μάγματος στην επιφάνεια της Γης ή αέριων μειγμάτων, απελευθερώνονται από το μάγμα, εξέρχονται βίαια στην ατμόσφαιρα και συνοδεύονται συνήθως από εκρήξεις. Ο όρος προέρχεται από τον Ήφαιστο, θεό της φωτιάς κατά την αρχαιότητα. Τα περισσότερα ηφαίστεια είναι βουνά. Η ηφαιστειακή δράση βοηθά στο σχηματισμό των βουνών. Η λάβα που εκτοξεύεται από το ηφαίστειο μαζί με το υπόλοιπο ηφαιστειακό υλικό συσσωρεύεται γύρω από τον κρατήρα και σταδιακά στερεοποιείται. Έτσι, σχηματίζεται ένα βουνό γύρω από τον κρατήρα.

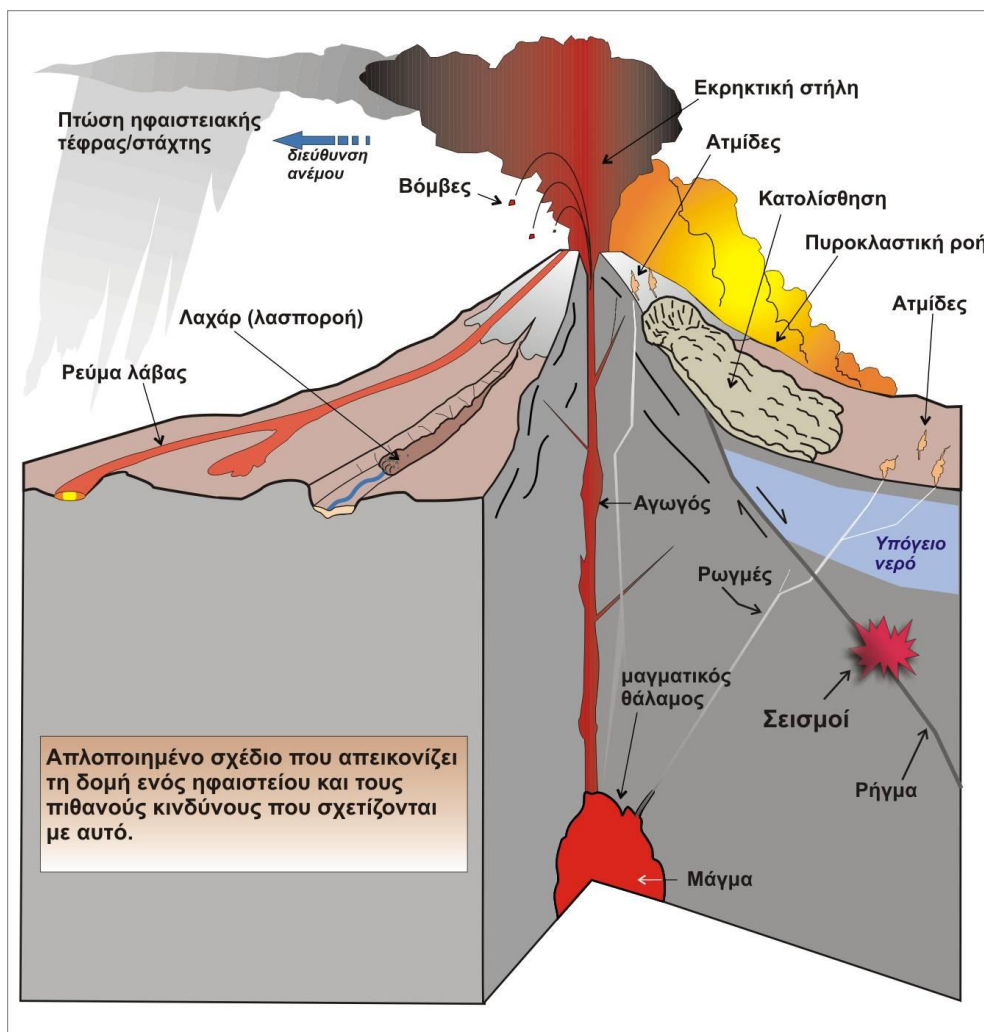
Παρομοίως, σχηματίζονται και νησιά από εκρήξεις υποθαλάσσιων ηφαιστείων. Όταν στον πυθμένα της θάλασσας γίνεται έκρηξη ενός ηφαιστείου, η λάβα που συσσωρεύεται γύρω από τον κρατήρα είναι τόσο πολλή, που σχηματίζει βουνό. Το βουνό αυτό μεγαλώνει διαρκώς από τη λάβα, που ολοένα εξέρχεται από την επιφάνεια της θάλασσας. Έτσι σχηματίζεται ένα ηφαιστειογενές νησί. Τέτοια νησιά υπάρχουν πολλά και μερικά τόσο μεγάλα, που κατοικήθηκαν, όπως τα νησιά της Χαβάης. Η συνηθισμένη εικόνα ενός ηφαιστείου είναι ένα βουνό με κωνικό σχήμα, που στις εκρήξεις του χύνει λάβα, εκτοξεύει πέτρες, στάχτη και δηλητηριώδη ή μη αέρια από τον κρατήρα στην κορυφή του.

Ανάλογα με τη δράση του ένα ηφαίστειο μπορεί να χαρακτηριστεί ως : ενεργό, ανενεργό ή εσβεσμένο.

- Ενεργό χαρακτηρίζεται ένα ηφαίστειο το οποίο έχει δώσει έκρηξη στο παρελθόν και στο παρόν παρουσιάζει κάποια δραστηριότητα (π.χ εκρήξεις, σεισμοί, ανύψωση περιοχής, εκπομπή αερίων).
- Ανενεργό ονομάζεται το ηφαίστειο το οποίο στα τελευταία 10.000 χρόνια έχει παρουσιάσει εκρηκτική δραστηριότητα , που σημαίνει πως το συγκεκριμένο ηφαίστειο είναι ικανό να εκραγεί.
- Εσβεσμένο μπορεί να χαρακτηριστεί ένα ηφαίστειο ανάλογα με την περίοδο που μεσολαβεί μεταξύ των εκρήξεών του. Η διάρκεια ποικίλει, μπορεί να είναι χιλιάδες χρόνια ή λιγότερη από ένα έτος. Αυτό εξαρτάται από τον τύπο του ηφαιστείου καθώς και από την γενικότερη δραστηριότητα της περιοχής (π.χ σεισμοί, ανύψωση περιοχής, εκπομπή αερίων, γεωθερμία).

Η δημιουργία των ηφαιστείων οφείλεται στην κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών. Η λιθόσφαιρα της Γης αποτελείται από επτά μεγάλες πλάκες: την ευρασιατική, την αφρικανική, την ινδοαυστραλιανή, την πλάκα του Ειρηνικού Ωκεανού, τη βορειο-αμερικανική, τη νοτιοαμερικανική και την ανταρκτική πλάκα. Όταν δύο πλάκες απομακρύνονται η μία από την

άλλη, δημιουργείται ένα άνοιγμα στον φλοιό της Γης από όπου βγαίνουν λιωμένα πετρώματα (μάγμα με τη μορφή λάβας) και αέρια από τα βαθύτερα στρώματα. Όταν δύο πλάκες συγκλίνουν ή μία με την άλλη (π.χ. μια ωκεάνια πλάκα βυθίζεται κάτω από μια ηπειρωτική), τότε σχηματίζονται βουνά και ηφαίστεια, που δημιουργούν οροσειρές μορφής τόξου (www.geo.auth.gr).



Εικόνα 2-1: Δομή ενός ηφαιστείου και πιθανοί κίνδυνοι που σχετίζονται με αυτό (Σοφοκλής, Κ. 2014).

2.2. Τύποι Ηφαιστείων

Ανάλογα με την μορφολογία των ηφαιστείων και σύμφωνα με το USGS και το πανεπιστήμιο του Oregon τα τοποθετούμε στις έξι παρακάτω κατηγορίες:

2.2.1. Ασπιδόμορφα

Τα ασπιδόμορφα ηφαίστεια σχηματίζονται από διαδοχικά λεπτά στρώματα βασαλτικής λάβας, η οποία καθώς απλώνεται, δημιουργεί οικοδομήματα με μεγάλες ομαλές πλευρές, όμοια με μία ασπίδα. Τα ασπιδόμορφα είναι τα μεγαλύτερα ηφαίστεια. Τα ασπιδόμορφα ηφαίστεια (shield volcanoes) έχουν χαμηλό ανάγλυφο και πλατιά βάση με διάμετρο που κυμαίνεται από μερικά km έως πάνω από 100 km (π.χ. ηφαίστριο Mauna Loa, Χαβάη). Το ύψος τους είναι περίπου το 1/20 του πλάτους. Οι κατώτερες πλευρές είναι συνήθως ομαλές (2-3 μοίρες), όμως προχωρώντας προς την κορυφή οι μεσαίες πλευρές είναι πιο απότομες (~10 μοίρες) και στην κορυφή το οικοδόμημα γίνεται επίπεδο. Δηλαδή, η μορφή των ασπιδόμορφων ηφαιστείων είναι

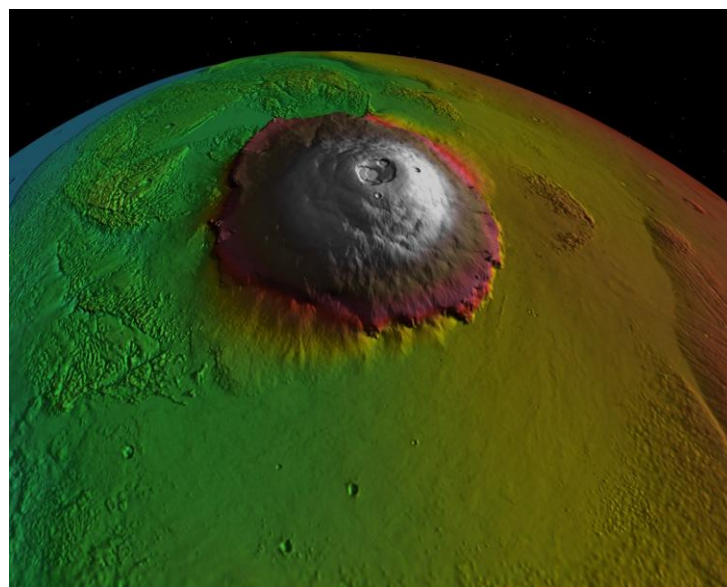
κυρτή προς τα πάνω και μοιάζει με ασπίδα. Αυτό το πλατύ σχήμα οφείλεται στην έκχυση ρευστής (χαμηλού ιξώδους) βασαλτικής λάβας (basaltic lava), η οποία μετά την έξοδό της από τον κρατήρα του ηφαιστείου, απλώνεται πλευρικά. Κατακόρυφες τομές στα ασπιδόμορφα ηφαίστεια αποκαλύπτουν, ότι αποτελούνται από πολυάριθμες λεπτές ροές βασαλτικής λάβας τύπου ραχοηοε, με πάχος συνήθως <math><1\text{ m}</math>.

Τα πυροκλαστικά υλικά είναι πολύ λίγα (<math><1\%</math>) και έχουν πολύ περιορισμένη διασπορά. Προέρχονται κυρίως από πλευρικές εκρήξεις που προέρχονται από παρασιτικούς κώνους ή πιο σπάνια από τοπικές υδροηφαιστειακές εκρήξεις.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα ασπιδόμορφων ηφαιστειών είναι αυτά της Χαβάης (Mauna Loa, Mauna Kea, Kilauea), της Ισλανδίας, των νησιών Galapagos, το Erta Ale (Αιθιοπία), το Piton de la Fournaise (νησί Reunion) κ.ά. Ασπιδόμορφα ηφαίστεια, και μάλιστα τεραστίων διαστάσεων, βρέθηκαν και σε άλλους πλανήτες του Ηλιακού συστήματος, με κλασικότερο παράδειγμα το Olympus Mons στον Άρη, που με διάμετρο 600 km και ύψος 25 km (τριπλάσιο του Έβερεστ) θεωρείται το υψηλότερο όρος στο Ηλιακό σύστημα.



Εικόνα 2-2: Το ασπιδόμορφο ηφαίστριο Mauna Loa στη Χαβάη (Volcano Park Rentals, 2017).



Εικόνα 2-3: Το ασπιδόμορφο ηφαίστριο Olympus Mons στον Άρη του οποίου η διάμετρος στη βάση του είναι 1500 χιλιόμετρα (Sokolowsky, E. 2004).

2.2.2. Κώννοι Σκωριών

Οι κώννοι σκωριών σχηματίζονται καθώς η λάβα που εκτοξεύεται, διασπάται σε μικρά κομμάτια, τα οποία πέφτοντας στο έδαφος σχηματίζουν σκωρίες, και συσσωρεύονται γύρω από τον πόρο του ηφαιστείου. Οι κώννοι σκωριών είναι τα μικρότερα ηφαιστειακά οικοδομήματα. Οι κώννοι σκωριών (scoria cones, cinder cones) είναι ο συνηθέστερος τύπος ηφαιστείου. Επίσης, είναι ο μικρότερος τύπος με ύψος συνήθως κάτω από 300 μέτρα. Βρίσκονται είτε ως ξεχωριστά ηφαίστεια σε πεδία βασαλτικών λαβών είτε ως παρασιτικοί κώννοι στις πλευρές ασπιδόμορφων ηφαιστείων και στρωματόμορφων ηφαιστείων.

Οι κώννοι σκωριών αποτελούνται κυρίως από βασαλτική τέφρα (basaltic tephra) που εκτοξεύθηκε από το ηφαίστειο. Η τέφρα περιέχει κατά κανόνα λιθάρια που συνοδεύονται επίσης από ηφαιστειακές βολίδες και θραύσματα συγκολλημένης λάβας. Τα λιθάρια και οι βολίδες εμφανίζουν συνήθως σκωριώδη υφή λόγω των άφθονων φυσαλίδων. Η τέφρα συσσωρεύεται γύρω από τον ηφαιστειακό πόρο ως υλικό πτώσης και έτσι σχηματίζεται το ηφαιστειακό οικοδόμημα. Οι κώννοι σκωριών εμφανίζουν απότομες πλευρές, με κλίση έως 35 μοίρες, μολονότι στους παλαιότερους και πιο διαβρωμένους κώννους οι πλευρές είναι πιο ομαλές, από 15-20 μοίρες. Οι κώννοι σκωριών, έχουν ευθείες πλευρές και πολύ μεγάλους κρατήρες σε σχέση με το μικρό τους μέγεθος. Είναι συνήθως συμμετρικοί, αν και πολλοί κώννοι σκωριών έχουν ασύμμετρο σχήμα που οφείλεται στο ότι:

- η τέφρα συγκεντρώνεται στη μία πλευρά του κώννου λόγω του πνέοντος ανέμου
- ο πόρος είναι κάποια ηφαιστειακή ρωγμή με αποτέλεσμα ο κώννος να έχει επίμηκες σχήμα
- κάποια από τις πλευρές του κώννου διογκώνεται ή διαρρηγνύεται λόγω της διεύδυσης βασαλτικής λάβας.



Εικόνα 2-4: Το ηφαίστειο Cerro Negro (Κώννος Σκωρίας) (Smithsonian Institution, 2013).

Συχνά το εσωτερικό τους έχει κόκκινο χρώμα λόγω της οξειδωσης. Οι κώννοι σκωριών δημιουργούνται από εκρήξεις τύπου Στρόμπολι, οι οποίες παράγουν εκρηκτικές στήλες από βασαλτική τέφρα ύψους μόνο λίγων εκατοντάδων μέτρων. Πολλοί κώννοι σκωριών

σχηματίζονται από μία και μοναδική έκρηξη, σε αντίθεση με τα ασπιδόμορφα ηφαίστεια και τα στρωματοηφαίστεια που εκρήγνυνται επανειλημμένα.

Εξαίρεση είναι το ηφαίστειο Cerro Negro (Νικαράγουα) που είναι ο πιο ενεργός ιστορικά κώνος σκωριών στη Γη. Αυτός είναι ένας παρασιτικός κώνος στη βορειοδυτική πλευρά του ηφαιστείου Las Pilas. Το Cerro Negro έχει εκραγεί πάνω από είκοσι φορές από το 1850 όταν δημιουργήθηκε. Οι πιο πρόσφατες εκρήξεις είναι αυτές του 1992 και 1995.

2.2.3. Στρωματοηφαίστεια

Τα στρωματομόρφα ηφαίστεια σχηματίζονται από εναλλασσόμενα στρώματα τέφρας και λάβας. Έχουν συμμετρικό κωνικό σχήμα με απότομες πλευρές. Τα στρωματοηφαίστεια (stratovolcanoes) γνωστά και ως σύνθετα ηφαίστεια (composite volcanoes) είναι τα πιο εντυπωσιακά αλλά και τα πιο επικίνδυνα. Το σχήμα τους είναι κωνικό, με τις χαμηλότερες πλευρές να είναι ομαλές και να γίνονται απότομες προς την κορυφή, όπου συνήθως βρίσκεται ένας απροσδόκητα μικρός κρατήρας. Κλασικά παραδείγματα στρωματοηφαιστειών είναι τα πολύ γνωστά ηφαίστεια Fuji (Ιαπωνία), Mayon (Φιλιππίνες), Agua (Γουατεμάλα) κ.ά. Εντούτοις, σε πολλά στρωματοηφαίστεια το σχήμα δεν είναι τόσο συμμετρικό όπως στα κλασικά παραδείγματα, κυρίως λόγω των μεγάλων διαφορών στην ηφαιστειακή δράση και τη σύστασή τους. Έτσι πολλά έχουν πολλαπλά ηφαιστειακά κέντρα ή καλδέρα ή ίσως να λείπει η μία πλευρά τους λόγω μιας πλευρικής έκρηξης (πχ. Αγία Ελένη, ΗΠΑ).

Η κλασική δομή ενός στρωματοηφαιστείου είναι στρωματομόρφη και αποτελείται από εναλλαγές από ροές λάβας (lava flows), αποθέσεις πτώσης τέφρας (airfall tephra), πυροκλαστικές ροές (pyroclastic flows), λασπορεύματα (λαχάρ) (mudflows, lahars) και/ή ροές συντριμμάτων (debris flows). Η σύσταση των ηφαιστειακών προϊόντων μπορεί να ποικίλει από ρυολιθική έως βασαλτική στο ίδιο ηφαίστειο, όμως η μέση σύσταση ενός στρωματοηφαιστείου είναι γενικά ανδεσιτική. Τα στρωματοηφαίστεια των νησιωτικών τόξων τείνουν να είναι βασικότερα από τα αντίστοιχα των ηφαιστειακών τόξων. Η ποικιλομορφία αυτή φαίνεται πχ. στα ηφαίστεια Fuji και Αίτνα που αποτελούνται από βασαλτικές λάβες, ενώ το ηφαίστειο Rainier αποτελείται από ανδεσιτικές λάβες, το ηφαίστειο Αγία Ελένη από ανδεσιτικά έως δακιτικά πυροκλαστικά και το ηφαίστειο Lassen από δακιτικούς θόλους λάβας.

Τα στρωματοηφαίστεια σχηματίζονται κυρίως στα περιθώρια σύγκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών, όπου η μία πλάκα καταδύεται κάτω από μία γειτονική της. Σχετικά παραδείγματα βρίσκουμε σε πολλές περιοχές της Γης με κυριότερη την περιοχή γύρω από τον Ειρηνικό ωκεανό, γνωστή ως δακτύλιος της φωτιάς. Ο δακτύλιος της φωτιάς σχηματίζει στρωματοηφαίστεια στην Ιαπωνία και τις Φιλιππίνες στα ανατολικά, στα Αλεούτια νησιά στα βόρεια, στα όρη Cascade στη Βόρεια Αμερική και στην μεγάλη οροσειρά των Άνδεων στη νότια Αμερική.

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα των περισσότερων στρωματοηφαιστειών χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά ισχυρές Πλινιακές εκρήξεις. Αυτές είναι πολύ επικίνδυνες διότι παράγουν φονικές πυροκλαστικές ροές, οι οποίες αποτελούνται από υπέρθερμα ηφαιστειακά υλικά και τοξικά αέρια και κατεβαίνουν τις πλαγιές του ηφαιστείου με ταχύτητες που υπερβαίνουν τα 100km/hr. Τα στρωματοηφαίστεια όπως και τα ασπιδόμορφα ηφαίστεια χαρακτηρίζονται από αλληπάλληλες εκρήξεις, διαφέρουν όμως μεταξύ τους στο ότι τα στρωματοηφαίστεια εκρήγνυνται σποραδικότερα και έχουν διαστήματα ηρεμίας μεταξύ των εκρήξεων της τάξης εκατοντάδων ετών. Τα περισσότερα στρωματοηφαίστεια του κόσμου έχουν ηλικία <100.000 ετών, αν και κάποια (πχ. Rainier, ΗΠΑ) μπορεί να είναι παλαιότερα από 1.000.000 έτη.



Εικόνα 2-5: Το στρωματομόρφο ηφαίστειο Αγία Ελένη, ΗΠΑ (hfaisteia.weebly.com 2018).

2.2.4. Καλδέρες

Όταν, κατά την έκρηξη ενός ηφαιστείου, αδειάσει ο υποκείμενος μαγματικός θάλαμος, ο οποίος βρίσκεται σε μικρό βάθος, τότε το ηφαιστειακό οικοδόμημα μπορεί να καταρρεύσει μέσα στο κενό που δημιουργήθηκε. Έτσι, σχηματίζεται ένα βύθισμα με απότομα τοιχώματα που ονομάζεται καλδέρα (caldera). Η λέξη προέρχεται από τα ισπανικά και σημαίνει χύτρα. Η διάμετρος της καλδέρας μπορεί να κυμαίνεται από 1-100 km. Οι καλδέρες διαφέρουν από τους κρατήρες, οι οποίοι είναι μικρότεροι και δημιουργούνται από τη διάβρωση του κεντρικού ηφαιστειακού πόρου λόγω της έκρηξης. Οι καλδέρες που προκύπτουν από εκρήξεις όξινου ηφαιστειακού υλικού περιβάλλονται συνήθως από παχιά καλύμματα κίσηρης, που είναι προϊόντα τεράστιων πυροκλαστικών ροών. Οι καλδέρες, ανάλογα με τη μορφή τους και τον τρόπο γένεσής τους, μπορούν να διακριθούν σε:

2.2.4.1 Πυροκλαστικές καλδέρες

Πυροκλαστικές καλδέρες ή τύπου Crater Lake (Crater-Lake type calderas) που προέρχονται από την κατάρρευση στρωματοηφαιστείων. Η καλδέρα Crater Lake, από την οποία πήρε το όνομά του αυτός ο τύπος καλδέρας, βρίσκεται στο Oregon (ΗΠΑ) και αποτελεί τη βαθύτερη λίμνη της Βόρειας Αμερικής με βάθος 600 m. Τα τοιχώματα της καλδέρας υψώνονται πάνω από την επιφάνεια του νερού άλλα 600 m. Το μεγάλο αυτό καλδερικό βύθισμα σχηματίστηκε κατά την βίαιη έκρηξη και κατάρρευση του ηφαιστείου Mazama πριν από 6.850 χρόνια. Χαρακτηριστικά παραδείγματα ανυψωμένων καλδερών είναι η καλδέρα Toba (Σουμάτρα), η καλδέρα Valles (New Mexico, ΗΠΑ), η καλδέρα Cerro Galan (Αργεντινή) και η καλδέρα Yellowstone (Wyoming, ΗΠΑ).

2.2.4.2 Βασαλτικές καλδέρες

Βασαλτικές καλδέρες (basaltic calderas) που προέρχονται από την κατάρρευση ασπιδόμορφων ηφαιστείων. Τυπικά παραδείγματα είναι τα ηφαίστεια της Χαβάης με τις καλδέρες Mokuaweo και Kilauea των ηφαιστείων Mauna Loa και Kilauea αντίστοιχα, η καλδέρα του ηφαιστείου Erta Ale (Αιθιοπία), η καλδέρα του ηφαιστείου Piton de la Fournaise (Reunion Island) και οι εντυπωσιακές καλδέρες στα ασπιδόμορφα ηφαίστεια των νησιών Galapagos. Οι περισσότερες βασαλτικές καλδέρες στη Γη έχουν διάμετρο από 1-5 km. Όμως αυτές που παρατηρήθηκαν στον πλανήτη Αρη είναι πραγματικά τεράστιες, με μεγαλύτερη αυτήν του όρους Olympus Mons διαστάσεων 60x80 km. Ενώ οι πυροκλαστικές καλδέρες σχετίζονται με βίαιες εκρήξεις όξινου μάγματος που παράγουν τεράστιες ποσότητες πυροκλαστικών υλικών, οι βασαλτικές καλδέρες δεν προέρχονται από τέτοια καταστροφικά γεγονότα. Αντίθετα, οι βασαλτικές καλδέρες καταρρέουν και μεγαλώνουν βαθμιαία λόγω των επαναλαμβανόμενων ήπιων εκχύσεων βασαλτικής λάβας από αβαθείς μαγματικούς θαλάμους. Έτσι δημιουργείται ένα δίκτυο από μικρούς κρατήρες κατακρήμνισης (pit craters) και αναβαθμίδες (terraces).



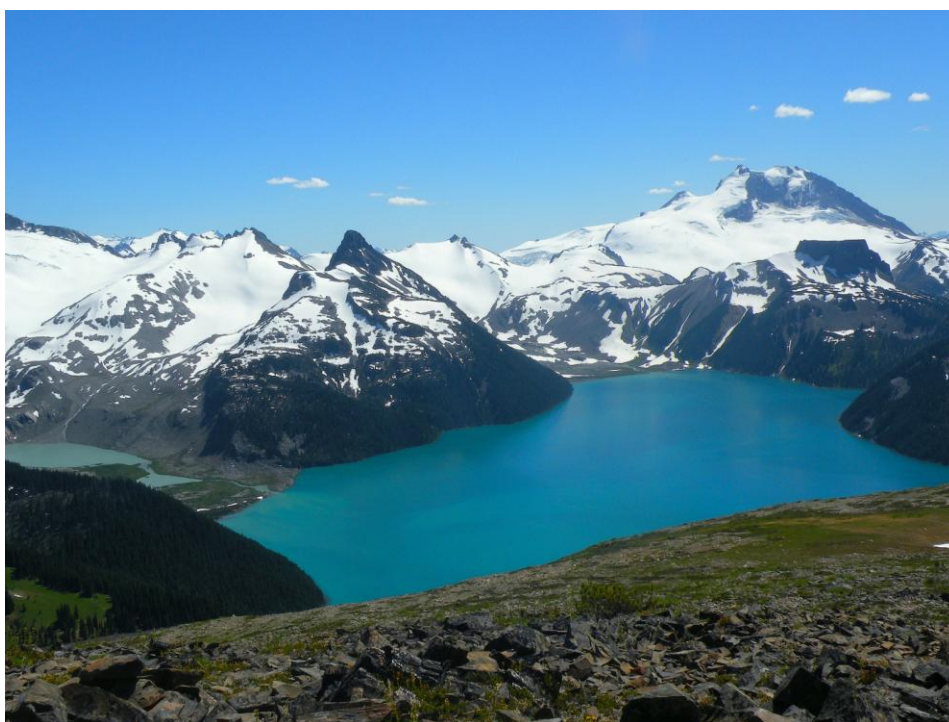
Εικόνα 2-6: Η πυροκλαστική καλδέρα στο Όρεγκον, ΗΠΑ (Adamus, M. 2006).



Εικόνα 2-7: Τα ηφαίστεια στα νησιά Γκαλαπάγκος (βασαλτικές καλδέρες) (Galasam blog 2017).

2.2.5. Βασαλτικά Υψίπεδα

Αποτελούν οροπέδια λάβας που σχηματίζονται από βασαλτική λάβα κατά την διάρκεια πολλών διαδοχικών εκρήξεων μέσω πολλών αεραγωγών, χωρίς να σημειώνονται βίαιες εκρήξεις. Αυτές οι εκρήξεις χαρακτηρίζονται ήσυχες, λόγω του χαμηλού ιξώδους της λάβας και της μικρής ποσότητας παγιδευμένων αερίων. Η ροή λάβας που προκύπτει οδηγείται μέσα από γραμμικές σχισμές ή χάσματα ή τεράστιες εκρήξεις ηφαιστειών διαμέσου πολλαπλών διόδων παραγωγής ροών βασάλτης. Πολλαπλές διαδοχικές και εκτεταμένες ροές λάβας καλύπτουν το αρχικό τοπίο για να σχηματιστεί τελικά ένα οροπέδιο, το οποίο μπορεί να περιέχει πεδία λάβας, κώνους σκωριών, ασπιδόμορφα ηφαίστεια και άλλες ηφαιστειακές γεωμορφές. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ένα οροπέδιο λάβας μπορεί να είναι μέρος ενός ενιαίου ηφαιστείου. Ένα παράδειγμα βασαλτικού υψιπέδου είναι στο βόρειο τμήμα της British Columbia, στον Καναδά που καλύπτει μια έκταση 1.800 km² και όγκο 860 km³. Λόγω της μεγάλης ρευστότητας της λάβας, τα ηφαιστειακά κτίσματα που σχηματίζονται έχουν μικρό ύψος και η λάβα εξαπλώνεται σε εκατοντάδες χιλιόμετρα (USGS).



Εικόνα 2-8: Τα βασαλτικά υψίπεδα British Columbia (Explore Magazine, 2015).

2.2.6. Δευτερεύουσες Ηφαιστειακές Δομές

2.2.6.1 Ηφαίστεια αερίων

Σε αυτά επικρατεί κυρίως ανέξοδος πτητικών συστατικών. Τα αέρια αναβλήματα εκτινάσσονται σε αρκετά μεγάλο ύψος στην ατμόσφαιρα και κατά την βίαιη εκτίναξη τους συμπαρασύρουν και στερεά σωματίδια, όπως είναι η ηφαιστειακή σποδός και η ηφαιστειακή άμμος. Τα πυρακτωμένα αυτά υλικά έχουν θερμοκρασία πάνω από 1000.ο και κατά την διέλευσή τους καταστρέφουν ότι συναντήσουν στην πορεία τους.

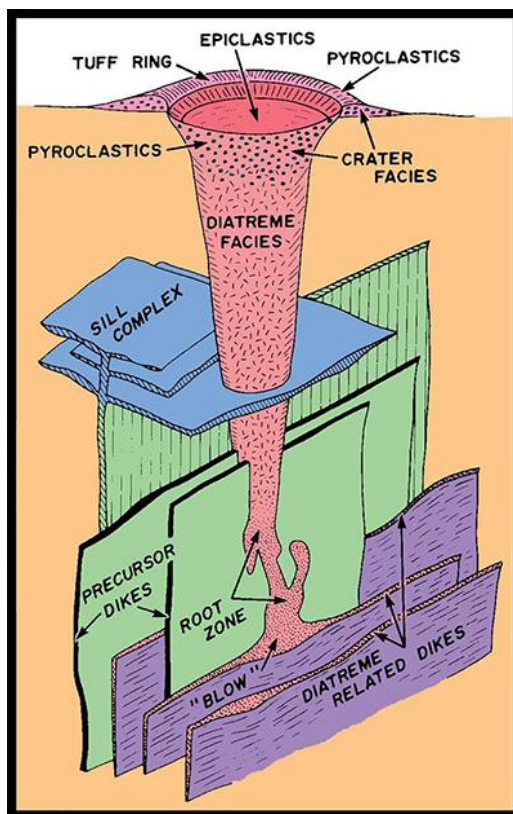
2.2.6.2 Διάτρημα (Diatrema)

Ηφαίστεια στα οποία η δραστηριότητά τους εξαντλείται μετά από μία μόνο έκρηξη και ιδιαιτέρως όταν πρόκειται για βίαιη ανέξοδο αερίων φάσεων. Τότε ο κρατήρας ξαναγεμίζει με

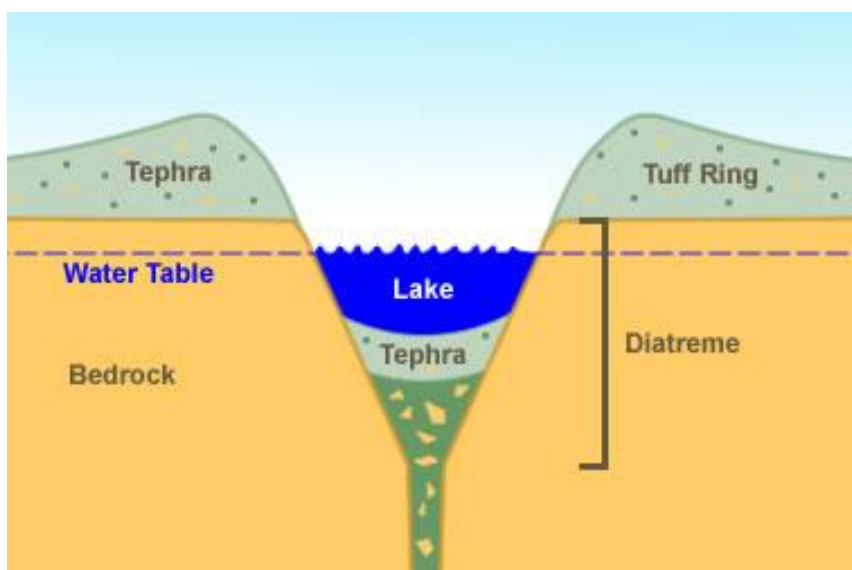
θρυματισμένο ηφαιστειακό υλικό με ακανόνιστα σχήματα καθώς και με υλικά από τα περιβάλλοντα πετρώματα, τα οποία στη συνέχεια στερεοποιούνται και μετατρέπονται σε συμπαγή μάζα. Σχηματίζονται έτσι τα αποκαλούμενα διατρήματατα οποία παραμένουν σ' αυτή τη κατάσταση μέχρις ότου εκδηλωθεί κάποια νέα έντονη ηφαιστειακή δραστηριότητα.

2.2.6.3 Μαάρ (Maar)

Μετά από συνεχείς εκρήξεις ενός ηφαιστείου αδειάζει το γειτονικό πέτρωμα, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται μεγάλα βυθίσματα στο χώρο, γύρω από τον ηφαιστειακό αγωγό, τα οποία γεμίζουν με νερό και σχηματίζονται μικρές αβαθείς λίμνες (Κυριακόπουλος, 2014).



Εικόνα 2-9: Διάτρημα (Strekeisen, A. 2018).



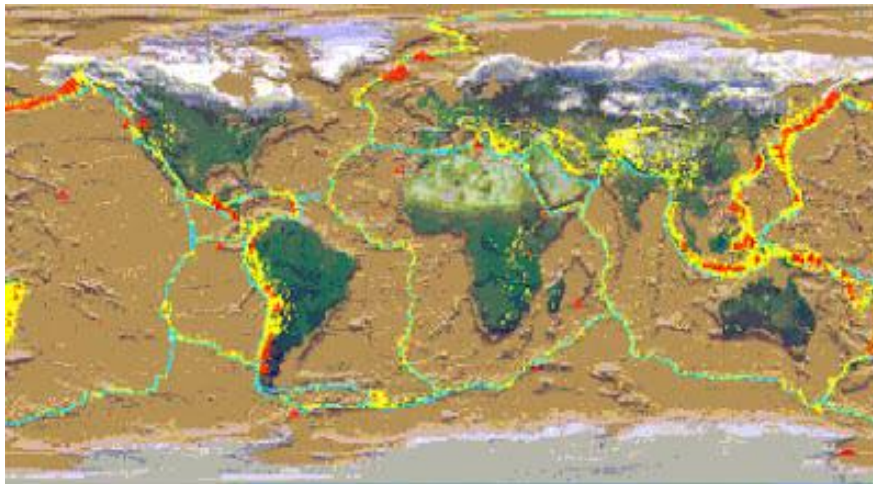
Εικόνα 2-10: Μαάρ (geology.com 2018).

Κεφάλαιο 3.

Ηφαιστειακές Εκρήξεις

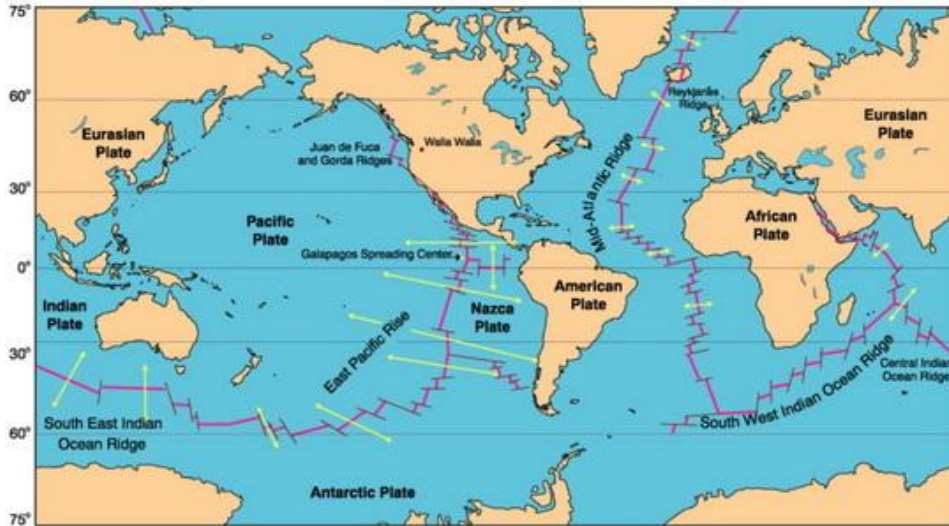
3.1. Ηφαιστειακές Ζώνες

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα εντοπίζεται σε συγκεκριμένες γραμμές που σχεδόν συμπίπτουν με τις σεισμικά ενεργές ζώνες της γης και γενικά ταυτίζονται με όρια απόκλισης, σύγκλισης και σύγκρουσης λιθοσφαιρικών πλακών. Στα εσωτερικά τμήματα των λιθοσφαιρικών πλακών καταγράφεται σχετικά μικρό ποσοστό ηφαιστειακής δραστηριότητας. Με δεδομένο ότι η ηφαιστειότητα συνδέεται με διαδικασίες στα όρια πλακών διακρίνουμε τρεις μεγάλες γραμμές ενεργών ηφαιστείων.

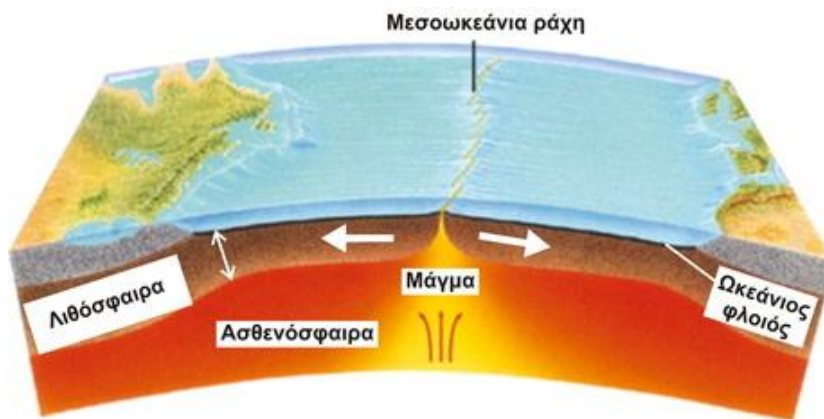


Εικόνα 3-1: Χάρτης της Γης όπου απεικονίζονται τα όρια των τεκτονικών πλακών (γαλάζιες γραμμές), η κατανομή των πρόσφατων σεισμών (κίτρινα σημεία) και των ενεργών ηφαιστείων (κόκκινα σημεία) (Geologikathemata.blogspot.com 2018).

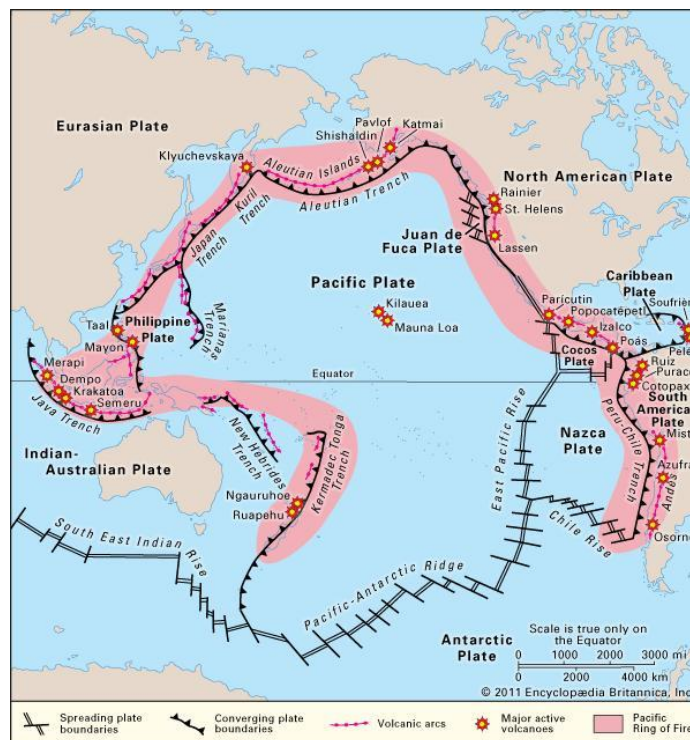
1. Τα ηφαίστεια των μεσοωκεάνιων ράχων αποτελούν τη μεγαλύτερη διαχρονική δομή στην επιφάνεια της γης, με συνολικό μήκος μεγαλύτερο από 84.000km. Οι μεσοωκεάνιες ράχες είναι πάνω σε αποκλίνοντα όρια λιθοσφαιρικών πλακών όπου διεισδύει μάγμα διαρκώς και εκχύνεται λάβα στους ωκεάνιους πυθμένες.
2. Τα ηφαίστεια κατά μήκος της περί-ειρηνικής ζώνης, σχηματίζουν το «δακτύλιο της φωτιάς» (Ring of fire) και συνδέονται με συγκλίνοντα όρια λιθοσφαιρικών πλακών.
3. Τη Μεσογειακή-μεσοασιατική γραμμή, που παραλαμβάνει το ελληνικό ηφαιστειακό τόξο, τα ηφαίστεια της νοτίου Ιταλίας και τα ηφαίστεια της ζώνης Καυκάσου- Αρμενίας-Ιμαλά'ων, ηφαιστειότητα που επίσης συνδέεται με συγκλίνοντα όρια λιθοσφαιρικών πλακών (Κυριακόπουλος, 2014).



Εικόνα 3-2: Το παγκόσμιο σύστημα μεσσοκεάνιων ράχων (hfaisteiologia.weebly.com 2018).



Εικόνα 3-3: Μεσσοκεάνια ράχη (hfaisteiologia.weebly.com 2018).



Εικόνα 3-4: 'Το δαχτυλίδι της φωτιάς' (Encyclopedia Britannica, 2018).

3.2. Μέγεθος και Συχνότητα Ηφαιστειακών Εκρήξεων

Υπάρχουν περίπου 550 ηφαίστεια στη Γη που έχουν εκδηλώσει ηφαιστειακή δραστηριότητα στους ιστορικούς χρόνους. Αυτά τα ηφαίστεια θεωρούνται γεωλογικά ενεργά. Επιπλέον υπάρχουν άλλα τόσα περίπου που δεν έχουν εκραγεί στους ιστορικούς χρόνους, αλλά έχουν εκδηλώσει δραστηριότητα στα τελευταία 10.000 χρόνια. Αυτά τα ηφαίστεια θεωρούνται αδρανή. Ενεργά και αδρανή έχουν τη δυνατότητα να εκραγούν ξανά. Κάθε μέρα υπάρχουν περίπου δέκα ηφαίστεια που εκδηλώνουν ηφαιστειακή δράση. Οι ηφαιστειακές εκρήξεις είναι πολύ μεταβλητές όσον αφορά στο μέγεθος (size) και στην εκρηκτικότητά (explosiveness) τους. Κατά γενικό κανόνα, οι μικρότερες εκρήξεις συμβαίνουν συχνότερα από τις μεγαλύτερες, γιατί χρειάζεται περισσότερος χρόνος για τη συσσώρευση αερίων και το σχηματισμό της απαραίτητης πίεσης ώστε να έχουμε μία μεγαλύτερη έκρηξη, όπως φαίνεται και στο πίνακα που ακολουθεί παρακάτω.

Η συχνότητα (frequency) των μικρών εκρήξεων που παράγουν 0,001-0,01 κυβικά km ηφαιστειακών προϊόντων είναι της τάξης μερικών μηνών, ενώ η συχνότητα πολύ μεγάλων εκρήξεων που παράγουν χιλιάδες κυβικά km τέφρας είναι της τάξης των 100.000 ετών. Η τελευταία πραγματικά γιγαντιαία έκρηξη πάνω στη Γη ήταν αυτή του ηφαιστείου Toba στη Σουμάτρα της Ινδονησίας πριν από 74.000 χρόνια περίπου. Παρήγαγε 2.800 κυβικά km τέφρας, δηλαδή 2000 φορές περισσότερο απ'ότι η έκρηξη του ηφαιστείου της Αγίας Ελένης το 1980 (www.geo.auth.gr).

Πίνακας 3-1: Ιστορικά ηφαίστεια και τα αντίστοιχα μεγέθη και συχνότητα (www.geo.auth.gr 2018).

ΜΕΓΕΘΟΣ (κυβικά km)	ΗΦΑΙΣΤΕΙΟ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ
0,001-0,01	Kilauea (Χαβάη), Unzen (Ιαπωνία)	μερικοί μήνες
0,01-0,1	Etna (Ιταλία)	5 έτη
0,1-1	St. Helens (1980) (ΗΠΑ)	10 έτη
1-10	Pinatubo (Φιλιππίνες), Katmai (Αλάσκα)	100 έτη
10-100	Krakatau (1883) (Ινδονησία)	1000 έτη
100-1000	Tambora (1815) (Ινδονησία)	10.000 έτη
>1000	Yellowstone (ΗΠΑ), Toba (Ινδονησία)	100.000 έτη

3.3. Εκρηκτικότητα Ηφαιστίων

Η εκρηκτικότητα των ηφαιστειακών εκρήξεων έχει μεγάλο εύρος. Πολλές εκρήξεις είναι σχετικά ήρεμες και χαρακτηρίζονται από ήπιες εκχύσεις λάβας πάνω στην επιφάνεια της Γης. Αντίθετα, άλλες εκρήξεις είναι εξαιρετικά βίαιες και χαρακτηρίζονται από σφοδρές εκτοξεύσεις θρυμματισμένου ηφαιστειακού υλικού, που ονομάζεται τέφρα, σχηματίζοντας νέφη που ανέρχονται σε ύψη δεκάδων χιλιομέτρων στην ατμόσφαιρα πάνω από το ηφαίστειο. Η εκρηκτικότητα της ηφαιστειακής δράσης εξαρτάται από μία σειρά παραγόντων, οι οποίοι σχετίζονται τελικά με τη σύσταση του μάγματος κάτω από το ηφαίστειο. Εκτός από τη σύσταση του μάγματος (magma composition) τέτοιοι παράγοντες είναι το ιξώδες (viscosity), η θερμοκρασία (temperature) και η ποσότητα των αερίων (gases) του μάγματος.

Δείκτης Εκρηκτικότητας (VEI)

Είναι εξαιρετικά δύσκολο να υπολογίσουμε το μέγεθος μίας ηφαιστειακής έκρηξης με έναν αντικειμενικά ποσοτικό τρόπο. Εντούτοις μία προσέγγιση της εκρηκτικότητας μπορεί να γίνει με βάση το βαθμό θρυμματοποίησης των εναέριων ηφαιστειακών προϊόντων (τέφρα). Όσο ισχυρότερη είναι η έκρηξη τόσο μεγαλύτερη είναι η θρυμματοποίηση των αποθέσεων τέφρας. Οι περισσότερες εκρήξεις στη Γη δεν έχουν παρατηρηθεί από τον άνθρωπο, γι' αυτό και η θρυμματοποίηση της τέφρας είναι το μόνο κριτήριο για να εκτιμήσουμε την εκρηκτικότητα παλαιών εκρήξεων. Για ιστορικές εκρήξεις όμως που έχουν παρατηρηθεί από τον άνθρωπο μπορούμε να προσθέσουμε επιπρόσθετα κριτήρια. Ο Chris Newhall από το U.S. Geological Survey (ΗΠΑ) και ο Steve Self από το Open University (Μεγάλη Βρετανία) το 1982 επινόησαν μία απλή ημοποσοτική κλίμακα για την εκτίμηση του μεγέθους των ιστορικών εκρήξεων, και όρισαν μία παράμετρο που ονομάζεται Δείκτης Ηφαιστειακής Εκρηκτικότητας (VEI, Volcanic Explosivity Index).

Πίνακας 3-2: Επιλεγμένα κριτήρια για τον δείκτη εκρηκτικότητας (Κυριακόπουλος, 2014).

Αριθμός VEI	Όγκος αποβλημάτων (m ³)	Ύψος εκτόξευσης αποβλημάτων (km)*	Τοιοτική περιγραφή δραστηριότητας	Διείσδυση στη τροπόσφαιρά	Διείσδυση στη στρατόσφαιρα
0	<10 ⁴	<0.1	μη εκρηκτική	ασήμαντη	καθόλου
1	10 ⁴ -10 ⁶	0.1-1.0	μικρή	μικρή	καθόλου
2	10 ⁶ -10 ⁷	1.0-5.0	μέτρια	μέτρια	καθόλου
3	10 ⁷ -10 ⁸	3.0-15.0	κάπως μεγάλη	σημαντική	πιθανή
4	10 ⁸ -10 ⁹	10.0-25.0	μεγάλη	σημαντική	σίγουρη
5	10 ⁹ -10 ¹⁰	>25	πελύ μεγάλη	σημαντική	ουσιώδης
6	10 ¹⁰ -11 ¹¹	>25	πελύ μεγάλη	σημαντική	ουσιώδης
7	10 ¹¹ -10 ¹²	>25	πελύ μεγάλη	σημαντική	ουσιώδης
8	>10 ¹²	>25	πελύ μεγάλη	σημαντική	ουσιώδης

Πίνακας 1. Επιλεγμένα κριτήρια για τον δείκτη ηφαιστειακής εκρηκτικότητας (VEI).
 Πηγή: Αναθεωρημένο απ' τους Newhall και Self (1982).
 Ύψος αποβλημάτων για VEI 0-2 ύψος σε km πάνω απ' το κρατήρα για VEI 3-8 ύψος σε km πάνω απ' την επιφάνεια της θάλασσας.

Έτσι οι ιστορικές εκρήξεις μπορούν να έχουν ένα δείκτη VEI από 0 έως 8 χρησιμοποιώντας ένα ή περισσότερα από τα ακόλουθα κριτήρια.

- Όγκος ηφαιστειακών αναβλημάτων
- Ύψος της ηφαιστειακής στήλης
- Ποιοτική περιγραφή της έκρηξης (πχ. ήπια, εκχυτική, εκρηκτική, κατακλυσμική κλπ.)
- Τύπος έκρηξης (πχ. Χαβάης, Στρόμπολι, Πλίνια κλπ.)
- Διείσδυση στην σταρτόσφαιρα ή τροπόσφαιρα

Ο όγκος των ηφαιστειακών αναβλημάτων και το ύψος της ηφαιστειακής στήλης είναι ίσως τα μόνα αξιόπιστα κριτήρια ώστε να δώσουμε σε μία έκρηξη κάποιο Δείκτη Ηφαιστειακής Εκρηκτικότητας. Στον πίνακα 3-3 δίνονται κάποια παραδείγματα εκρήξεων με τους αντίστοιχους δείκτες VEI.

Η κλίμακα του Δείκτη Ηφαιστειακής Εκρηκτικότητας είναι ανάλογη της κλίμακας Richter για το μέγεθος ενός σεισμού, δηλαδή είναι λογαριθμική, ώστε κάθε δείκτης VEI αντιπροσωπεύει μία αύξηση μεγέθους κατά 10 φορές. Ο δείκτης VEI χρησιμοποιήθηκε από ερευνητές του Smithsonian Institution (ΗΠΑ) για να εκτιμήσουν το μέγεθος των ηφαιστειακών εκρήξεων που συνέβησαν κατά το Ολόκαινο (<10.000 έτη) (Catalog of Active Volcanoes of the World). Κανένα ηφαίστειο δεν έχει δείκτη VEI 8, αν και τέσσερα ηφαίστεια, συμπεριλαμβανομένου του Tambora (1815), χαρακτηρίστηκαν με δείκτη 7 (www.geo.auth.gr).

Πίνακας 3-3: Εκρήξεις ηφαιστείων και αντίστοιχοι VEI (www.geo.auth.gr 2018).

VEI	ΥΨΟΣ ΣΤΗΛΗΣ	ΟΓΚΟΣ (τάξη μεγέθους)	ΤΥΠΟΣ ΕΚΡΗΞΗΣ	ΗΦΑΙΣΤΕΙΟ
0	<100 m	1000 m ³	Χαβάη	Kilauea (Χαβάη)
1	100-1000 m	10.000 m ³	Χαβάη /Στρόμπολι	Stromboli (Ιταλία)
2	1-5 km	1.000.000 m ³	Στρόμπολι/Βουλκάνο	Galeras (1992) (Κολομβία)
3	3-15 km	10.000.000 m ³	Βουλκάνο	Ruiz (1985) (Κολομβία)
4	10-25 km	100.000.000m ³	Βουλκάνο /Πλινιακή	Galunggung (1982) (Ινδονησία)
5	>25 km	1 km ³	Πλινιακή	St. Helens (1980) (ΗΠΑ)
6	>25 km	10 km ³	Πλινιακή /Υπερ-Πλινιακή	Σαντορίνη (1613 π.Χ.) K Krakatau (1883) (Ινδονησία)
7	>25 km	100 km ³	Υπερ-Πλινιακή	Tambora (1815) (Ινδονησία)
8	>25 km	1000 km ³	Υπερ-Πλινιακή	Toba (74 Ka) (Ινδονησία)

3.4. Τύποι εκρήξεων

Σε όλα σχεδόν τα ηφαίστεια η δραστηριότητά τους παρουσιάζει διακυμάνσεις όσον αφορά την ένταση, την ποσότητα και το είδος των προϊόντων που εκτινάσσονται. Αυτό ενισχύει την άποψη κατά την οποία η μορφή του δυναμισμού που χαρακτηρίζει ένα ηφαίστριο εξαρτάται αποκλειστικά από τη φυσική και χημική κατάσταση του μάγματος τη στιγμή της ηφαιστειακής έκρηξης. Συνεπώς μπορούμε να διαχωρίσουμε τα ηφαίστεια σύμφωνα με τον τύπο της έκρηξης στις εξής κατηγορίες όπως περιγράφονται στο (www.geo.auth.gr) :

3.4.1. Εκρήξεις από ρωγμές (τύπου Ισλανδίας)

Οι εκρήξεις από ρωγμές (fissure eruptions) ή σχισμογενείς εκρήξεις σχετίζονται στενά με τις εκρήξεις τύπου Χαβάης και κανονικά δεν θα έπρεπε να αντιμετωπίζονται μεμονωμένα. Όμως, ο μοναδικός τους χαρακτήρας μας υποχρεώνει να τις δούμε ξεχωριστά. Σε αντίθεση με τις περισσότερες ηφαιστειακές εκρήξεις, των οποίων ο ηφαιστειακός πόρος εντοπίζεται σε ένα συγκεκριμένο σημείο, οι σχισμογενείς εκρήξεις δημιουργούνται ταυτόχρονα σε διάφορα σημεία κατά μήκος μίας γραμμικής διάρρηξης (*linear fracture*) ή ενός κλιμακωτού συστήματος διάρρηξης (*en echelon fracture system*). Τα συστήματα διάρρηξης εμφανίζονται σε περιοχές που ο στερεός φλοιός της Γης ανοίγει λόγω εφελκυστικών τάσεων. Εάν κάτω από αυτές τις περιοχές υπάρχουν μαγματικοί θάλαμοι με βασαλτικό μάγμα, το χαμηλού ιξώδους τήγμα θα ανέλθει μέσω των ρωγμών του φλοιού και θα δημιουργήσει σχισμογενείς εκρήξεις. Για παράδειγμα, στις μεσοωκεάνιες ράχες, όπου οι πλάκες αποκλίνουν, εκχύνεται βασαλτικό μάγμα μέσω σχισμογενών εκρήξεων, το οποίο παράγεται από τη μερική τήξη της ανερχόμενης ασθενόσφαιρας.

Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση της Ισλανδίας, η οποία βρίσκεται πάνω στην μεσοωκεάνια ράχη του Ατλαντικού. Η Ισλανδία είναι μία από τις πιο ενεργές περιοχές όπου δημιουργούνται βασαλτικές σχισμογενείς εκρήξεις. Γι' αυτό και οι σχισμογενείς εκρήξεις είναι γνωστές και ως Ισλανδικές εκρήξεις. Η μεγαλύτερη ροή λάβας στους ιστορικούς χρόνους δημιουργήθηκε το 1783 από μία σχισμογενή έκρηξη στη νότια Ισλανδία. Είναι γνωστή ως έκρηξη Laki, όπου από μία ρωγμή 25 km εκχύθηκαν 12 km³ βασαλτικής λάβας καλύπτοντας επιφάνεια 500 km².



Εικόνα 3-5: Η έκρηξη του ηφαιστείου Laki το 1783 (en.classora.com 2018).

Οι σχισμογενείς εκρήξεις δεν περιορίζονται μόνο σε περιοχές, οι οποίες υφίστανται εκτεταμένο εφελκισμό. Συμβαίνουν επίσης συχνά και στις πλευρές πολλών μεγάλων ηφαιστειών, όπως πχ. η Αίτνα (Ιταλία), το Mauna Loa και το Kilauea (Χαβάη). Σχισμές γεμάτες με μάγμα εκτείνονται ακτινωτά από την κορυφή και τον κεντρικό πόρο του ηφαιστείου. Εκχύσεις λάβας από αυτές τις σχισμές δημιουργούν επιμήκεις μορφολογίες στα ηφαιστειακά οικοδομήματα, όπως για παράδειγμα στα ασπιδόμορφα ηφαίστεια της Χαβάης. Χαρακτηριστική είναι η μορφή του ηφαιστείου Mauna Loa, όπου οι εκρήξεις εντοπίζονται κατά μήκος δύο ζωνών διάρρηξης που ενώνονται με τον κεντρικό κρατήρα Mokuaweoweo. Οι σχισμογενείς εκρήξεις έδωσαν στο ηφαίστριο Mauna Loa (Χαβάη) επιμήκη μορφή. Η κεντρική ζώνη διάρρηξης βρίσκεται στη ράχη του ηφαιστείου. Στο μέσο διακρίνεται ο κρατήρας Mokuaweoweo.

3.4.2. Εκρήξεις τύπου Χαβάη

Για τους κατοίκους της Χαβάης η Pele είναι η θεά της φωτιάς. Σύμφωνα με το θρύλο το πνεύμα της κατοικεί στον κρατήρα Halemauau του ηφαιστείου Kilauea. Κάποτε είχε ένα σύντομο και ταραχώδη γάμο με τον Kamapuaa, το θεό του νερού. Η Pele εξεδίωξε τον Kamapuaa από το σπίτι τους στο Halemauau και θυμωμένη τον κυνήγησε με ρεύματα λάβας μέχρι τη θάλασσα. Αυτός ο συμβολισμός δείχνει τη συχνά βίαιη αντίδραση της λάβας καθώς εισέρχεται στο νερό. Γενικά όμως οι εκρήξεις της Χαβάης είναι πολύ πιο ήπιες.

Οι συχνές εκχύσεις βασαλτικής λάβας είναι μία υπόμνηση στους πιστούς της θεάς Pele ότι ζει και είναι καλά. Η ηφαιστειακή δράση τύπου Χαβάης (Hawaiian eruptions) είναι η ηπιότερη από όλες τις υπόλοιπες ηφαιστειακές δραστηριότητες. Χαρακτηρίζεται από ήμερες εκχύσεις ρευστής βασαλτικής λάβας με χαμηλό ποσοστό αερίων. Ο όγκος των πυροκλαστικών υλικών είναι ο μικρότερος από τους άλλους τύπους εκρήξεων. Τυπικό χαρακτηριστικό των εκρήξεων τύπου Χαβάης είναι οι πίδακες λάβας (lava fountain) και οι εκχύσεις λεπτών στρωμάτων λάβας, οι οποίες τελικά σχηματίζουν μεγάλα ασπιδόμορφα ηφαίστεια (shield volcanoes).

Συχνές εκρήξεις συμβαίνουν επίσης και από κεντρικούς πόρους κοντά στην κορυφή του ηφαιστείου καθώς και κατά μήκος σχισμών που εκτείνονται ακτινωτά από την κορυφή. Η λάβα κατέρχεται στις πλαγιές του ηφαιστείου με τη μορφή κοιτών λάβας (lava channels) και στοών λάβας (lava tubes). Οι σχισμογενείς εκρήξεις είναι συχνές στα ηφαίστεια της Χαβάης. Στην αρχή η έκχυση γίνεται από διάφορα σημεία κατά μήκος μίας σχισμής ως παραπέτασμα πυρός (curtain of fire) και επικεντρώνονται σε ένα-δύο κεντρικούς πόρους.

Για παράδειγμα, στο ασπιδόμορφο ηφαίστριο Kilauea, οι εκρήξεις του ηφαιστείου Pu'u O'o εκχύνουν λάβα διαρκώς από το 1983. Ξεκίνησαν τον Ιανουάριο 1983 ως ένα παραπέτασμα πυρός μήκους 6 km στην ανατολική ζώνη διάρρηξης του Kilauea. Με την πάροδο του χρόνου, οι περιοδικές σχισμογενείς εκρήξεις επικεντρώθηκαν σε ένα κεντρικό ηφαιστειακό πόρο ~15 km ανατολικά της καλδέρας στην κορυφή του Kilauea. Οι διαδοχικές εκρήξεις στο σημείο αυτό δημιούργησαν έναν κώνο που ονομάστηκε ηφαίστριο Pu'u O'o. Το 1986 το σχηματίστηκε το ηφαίστριο Kupaianaha ~3 km ανατολικότερα, από το οποίο εκχυνόταν λάβα rahoehoe μέχρι το 1992. Από τότε η κύρια θέση των εκρήξεων είναι το ηφαίστριο Pu'u O'o.

Οι εκρήξεις τύπου Χαβάης χαρακτηρίζονται από θεαματικούς πίδακες λάβας (lava fountain). Αυτοί οι πυρακτωμένοι πίδακες ανέρχονται εκατοντάδες μέτρα στον αέρα. Μπορεί να είναι σύντομοι ή να διαρκούν ώρες. Ένας από τους πιο θεαματικούς πίδακες λάβας δημιουργήθηκε κατά την έκρηξη του Kilauea το 1950 και είχε ύψος 580 m. Ένας άλλος πίδακας στο ηφαίστριο Oshima (Ιαπωνία) έφτασε τα 1600 m. Η κορυφή του πίδακα συχνά επηρεάζεται από τον αέρα σχηματίζοντας πύρινη βροχή από θραύσματα λάβας καθώς αυτά πέφτουν στο έδαφος. Τα κομμάτια λάβας ή κλάστες λάβας γενικά ψύχονται γρήγορα αποβάλλοντας τη θερμότητά τους κατά την πορεία τους στον αέρα. Έτσι, είναι στερεά καθώς προσγειώνονται στο

έδαφος και σχηματίζουν τις λεγόμενες σκωρίες (scoria). Όταν όμως η έκχυση της λάβας έχει μεγάλη ταχύτητα ροής, οι πίδακες αυτοί είναι τόσο πυκνοί που οι κλάστες λάβας δεν προλαβαίνουν να ψυχθούν στον αέρα. Έτσι, καθώς προσγειώνονται συγκολλούνται μεταξύ τους και σχηματίζουν κώνους συγκολλημένων σκωριών (spatter cones) και επιχώματα συγκολλημένων σκωριών (spatter rampart).

Ενίοτε τα συγκολλημένα αυτά κομμάτια σχηματίζουν και κλαστογενή ρεύματα λάβας (clastogenic lavas). Τα μικρότερα θραύσματα λάβας, όταν βρίσκονται στον αέρα, παρασύρονται από τον άνεμο και καθώς ψύχονται μπορούν να πάρουν σφαιρόμορφα ή σταγονόμορφα σχήματα και να σχηματίσουν τα λεγόμενα δάκρυα της Pele (Pele's tears). Στην περίπτωση που επικρατούν ισχυροί άνεμοι, αυτά τα σφαιρόμορφα σωματίδια επιμηκύνονται παράγοντας τριχοειδή σώματα γνωστά ως μαλλιά της Pele (Pele's hair). Εάν η λάβα περιέχει αρκετά αέρια, σχηματίζεται ένας βασαλτικός αφρός που ψύχεται απότομα και δημιουργεί ένα υαλώδες πέτρωμα, τον ρετικουλίτη (reticulite), που έχει τη μικρότερη πυκνότητα από οποιοδήποτε άλλο πέτρωμα.

Στις εκρήξεις τύπου Χαβάης η βασαλτική λάβα, ενίοτε, λιμνάζει στους ηφαιστειακούς πόρους, στους κρατήρες ή σε βυθίσματα και σχηματίζει λίμνες λάβας. Άλλες φορές η λάβα εκχύνεται από κάποιο πόρο μέσα στον κρατήρα ή χύνεται από κάποια εξωτερική πηγή μέσα στον κρατήρα ή το βύθισμα. Εκτός από το ηφαίστειο Kilauea στη Χαβάη, σήμερα λίμνες λάβας υπάρχουν μόνο σε λίγα ηφαίστεια. Χαρακτηριστικά αναφέρονται το Erta Ale (Αιθιοπία), Nyiragongo (Κογκό) και το όρος Έρεβος (Ανταρκτική). Στην ιστορία του Kilauea λίμνες λάβας δημιουργήθηκαν σε διάφορους κρατήρες. Η λίμνη λάβας στον κρατήρα Halemauau είναι ίσως η μακροβιότερη σε ιστορικούς χρόνους. Διατηρήθηκε για περίοδο πάνω από 100 χρόνια από το 1823-1924 οπότε και καταστράφηκε από μία μεγάλη υδροηφαιστειακή έκρηξη. Καθώς η λάβα μέσα στις λίμνες λάβας ψύχεται, σχηματίζει ένα λεπτό φλοιό πάχους μόνο κάποιων εκατοστών. Αυτός καταστρέφεται και δημιουργείται διαρκώς. Ρεύματα μεταφοράς στην υποκείμενη λάβα αναγκάζουν το φλοιό να σπάει και να βυθίζεται, ενώ νέα λάβα εξέρχεται ψύχεται, σχηματίζει νέο φλοιό, ο οποίος με τη σειρά του υφίσταται την ίδια διαδικασία ανακυκλούμενος συνεχώς.



Εικόνα 3-6: Έκρηξη στο Kilauea, Χαβάη (USGS, 2018).

3.4.3. Εκρήξεις τύπου Στρόμπολι

Οι εκρήξεις τύπου Στρόμπολι (Strombolian eruptions) πήραν την ονομασία τους από το μικρό ηφαιστειακό νησί Στρόμπολι (Stromboli), ένα από τα Αιόλια νησιά που βρίσκονται μεταξύ Σικελίας και Ιταλίας. Το ηφαιστείο εκρήγνυται συνεχώς εδώ και εκατό χρόνια. Κάθε είκοσι λεπτά περίπου συμβαίνει και μία μικρή φωτεινή έκρηξη, γεγονός που του έδωσε το προσωνύμιο "ο φάρος της Μεσογείου". Η ηφαιστειακή δράση τύπου Στρόμπολι αναφέρεται σε εκρήξεις από μικρές έως μεγάλες με εκρηκτικές στήλες μερικών χιλιομέτρων. Εντούτοις, η πραγματική στρομπόλια δράση χαρακτηρίζεται από μικρές σύντομες εκρήξεις κολλώδους λάβας που εκτινάσσεται μερικές δεκάδες έως εκατοντάδες μέτρα στον αέρα. Οι εκρήξεις αυτές συνήθως δεν παράγουν εκρηκτική στήλη. Εκτοξεύουν σχετικά ιξώδη βασαλτική λάβα από τον πόρο του ηφαιστείου. Η σχετικά υψηλή πίεση των αερίων έχει ως αποτέλεσμα τον θρυμματισμό της λάβας και τη δημιουργία εκρήξεων με αρκετό κρότο. Μολονότι οι στρομπόλιες εκρήξεις είναι πιο θορυβώδεις από αυτές της Χαβάης, δεν είναι πιο επικίνδυνες. Τα ηφαιστειακά αναβλύσματα των εκρήξεων τύπου Στρόμπολι είναι βολίδες και λιθάρια που εκτοξεύονται με παραβολικές τροχιές και συσσωρεύονται γύρω από τον ηφαιστειακό πόρο σχηματίζοντας έτσι το ηφαιστειακό οικοδόμημα.

Τυπικοί σχηματισμοί αυτών των εκρήξεων είναι οι κώνοι σκωριών από βασαλτικά πυροκλαστικά υλικά. Εντούτοις, βασικής σύστασης στρωματοηφαίστεια μπορούν να εμφανίσουν επίσης στρομπόλια δράση, όπως για παράδειγμα το όρος Έρεβος στην Ανταρκτική. Στις εκρήξεις τύπου Στρόμπολι το βασικό ηφαιστειακό προϊόν είναι οι σκωρίες, οι οποίες είναι πολύ φυσαλιδοποιημένα κλάσματα βασαλτικής λάβας. Τα λιθάρια και οι βολίδες συχνά αποτίθενται σε στρώσεις γύρω από το ηφαιστείο σχηματίζοντας αποθέσεις πτώσης σκωριών. Σε αντίθεση με τις εκρήξεις τύπου Χαβάης οι πραγματικές στρομπόλιες εκρήξεις παράγουν λίγη ή καθόλου λάβα. Εντούτοις, κατά το τελικό στάδιο του σχηματισμού του κώνου σκωριών, η στρομπόλια δράση μπορεί να υποχωρήσει και να δώσει τη θέση της σε ήπια έκχυση ρευμάτων βασαλτικής λάβας.



Εικόνα 3-7: Ηφαιστείο Parícutin, έκρηξη τύπου Στρόμπολι (Warren, V. 2018).

3.4.4. Εκρήξεις τύπου Βουλκάνο

Το μικρό νησί Βουλκάνο (Vulcano) ανήκει όπως και το Στρόμπολι στα Αιόλια νησιά μεταξύ Σικελίας και Ιταλίας. Οι Ρωμαίοι, βλέποντας τις λάμπεις από τις εκρήξεις, πίστευαν ότι στο νησί είχε το εργαστήριό του ο θεός της φωτιάς Vulcan, που είναι ο ομόλογος του θεού Ήφαιστου στην ελληνική μυθολογία. Από αυτόν πήρε το νησί το όνομά του και, με τη σειρά του, το έδωσε στη λέξη volcano που σημαίνει ηφαίστειο στις περισσότερες ξένες γλώσσες. Το νησί έδωσε επίσης το όνομά του σε ένα ξεχωριστό τύπο εκρήξεων, τις Βουλκάνιες εκρήξεις (vulcanian eruptions).

Οι βουλκάνιες εκρήξεις είναι μεμονωμένες σύντομες εκρήξεις που διαρκούν μερικά λεπτά έως μερικές ώρες και στην αρχή μοιάζουν με κανονικές εκτοξεύοντας βολίδες και λιθάρια με μεγάλη ταχύτητα. Στη συνέχεια, αφού το ηφαίστειο "καθαρίσει το λαιμό του", οι εκρήξεις είναι σχετικά ηπιότερες και διαρκούν περισσότερο. Η ηφαιστειακή δράση τύπου Βουλκάνο είναι πιο εκρηκτική από αυτήν του Στρόμπολι δημιουργώντας εκρηκτικές στήλες ύψους μεταξύ 5-10 km. Ο όγκος της τέφρας που παράγεται είναι σχετικά μικρός (<1 km³) και η περιοχή διασποράς όχι πολύ μεγάλη. Σήμερα, περιοδική βουλκάνια δράση έχουν τα ηφαίστεια Sakurajima (Ιαπωνία) και Tanuynur (Παπούα Νέα Γουινέα). Σε αντίθεση με τις στρομπόλιες εκρήξεις που σχετίζονται με βασαλτικό μάγμα, οι βουλκάνιες σχετίζονται συχνότερα με ανδεσιτικό έως δακτικό μάγμα. Το υψηλότερο ιξώδες αυτών των μαγμάτων εμποδίζει τη διαφυγή των αερίων και έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία υψηλής πίεσης στο μάγμα και εκρηκτικότερες συνθήκες. Τα εκτινασσόμενα θραύσματα δεν έχουν το αεροδυναμικό σχήμα που είναι χαρακτηριστικό στις στρομπόλιες εκρήξεις. Ο λόγος είναι το υψηλότερο ιξώδες του μάγματος καθώς και το ότι τα αναβλήματα ενσωματώνουν υλικό από τα πετρώματα που φράσσουν τον πόρο του ηφαιστείου.



Εικόνα 3-8: Έκρηξη στο ηφαίστειο Sakurajima στην Ιαπωνία (Martin, S. 2017).

Οι εκρήξεις τύπου Βουλκάνο συχνά συνδέονται με την ανάπτυξη θόλων λάβας, όπως αυτός στο ηφαίστειο Pelee (Μαρτινίκα, 1902), και με τη δημιουργία πυροκλαστικών ροών από την κατάρρευση των θόλων. Τα προϊόντα των βουλκάνιων εκρήξεων περιέχουν μεγάλες βολίδες και τεμάχια που αποτίθενται κοντά στον πόρο. Αφθονες είναι οι βολίδες που η επιφάνειά τους μοιάζει με ξεροψημένη κόρα ψωμιού (breadcrust bombs). Αυτές έχουν βαθειά σπασίματα στην επιφάνεια, ενώ συχνά είναι πορώδεις στο εσωτερικό. Καθώς η ιξώδης και πλούσια σε αέρια λάβα εκτοξεύεται στον αέρα σχηματίζει βολίδες, οι οποίες εξωτερικά ψύχονται γρήγορα και σχηματίζουν ένα υαλώδη ή μικροκρυσταλλικό φλοιό. Στο εσωτερικό τους όμως είναι ακόμη θερμές και συνεχίζουν να απελευθερώνουν αέρια, τα οποία προκαλούν τη διαστολή τους και το

σπάσιμο της εύθραυστης επιφάνειας. Οι βολίδες αυτές είναι χαρακτηριστικές των βουλκάνιων εκρήξεων.

Μολονότι οι βολίδες και τα τεμάχια είναι άφθονα σε κοντινές αποστάσεις από τον πόρο του ηφαιστείου, ο κύριος όγκος των πυροκλαστικών των βουλκάνιων εκρήξεων αποτελείται από πολύ λεπτόκοκκα υλικά στα οποία επικρατεί κυρίως η στάχτη. Η άφθονη στάχτη είναι αποτέλεσμα του πολύ έντονου θρυμματισμού που οφείλεται στο υψηλό ποσοστό αερίων του μάγματος. Ενίοτε τα αέρια αυτά προέρχονται από την εξάτμιση μετεωρικού νερού. Αυτό κάνει αρκετές από τις βουλκάνιες εκρήξεις να είναι εν μέρει υδροηφαιστειακές. Οι αποθέσεις πτώσης της τέφρας είναι έντονα θρυμματισμένες, εντούτοις η περιοχή διασποράς τους είναι σχετικά μέτρια. Αυτό δείχνει υψηλό βαθμό εκρηκτικότητας (έντονος θρυμματισμός) με δημιουργία μέτριας εκρηκτικής στήλης (μέτρια διασπορά).

3.4.5. Πλινιακές Εκρήξεις

Οι Πλινιακές εκρήξεις (plinian eruptions) είναι βίαια εκρηκτικά επεισόδια που παράγουν τεράστιες μεταγωγικές στήλες τέφρας και αερίων που ανέρχονται σε ύψος μέχρι και 45 km στη στρατόσφαιρα. Αυτός ο τύπος εκρήξεων πήρε το όνομά του από τον Πλίνιο το Νεότερο, Ρωμαίο πολιτικό, ο οποίος περιέγραψε λεπτομερώς την έκρηξη του Βεζουβίου το 79 μ.Χ. Η έκρηξη δημιούργησε μία τεράστια στήλη από τέφρα, καθώς επίσης πυροκλαστικές ροές και εκτεταμένες αποθέσεις στάχτης. Τα προϊόντα της έκρηξης έθασαν τις γειτονικές πόλεις Πομπηία και Ηράκλεια (Herculaneum), και και έγιναν η αιτία για το θάνατο τουλάχιστον 2.000 ανθρώπων μεταξύ αυτών και του Πλίνιου του Πρεσβύτερου.

Αυτές οι βίαιες και εντυπωσιακές πλινιακές εκρήξεις συνδέονται με δακίτικα και ρυολιθικά μάγματα (dacitic to rhyolitic magmas) πλούσια σε αέρια, τα οποία εκρήγνυνται από στρωματοηφαίστεια. Η διάρκεια των εκρήξεων ποικίλει πολύ και κυμαίνεται από ώρες έως μέρες. Οι πιο παρατεταμένες εκρήξεις συνδέονται με τα πιο όξινα μάγματα. Ενίοτε Πλινιακές εκρήξεις έχουμε και σε βασαλτικά ηφαίστεια, στην περίπτωση που η διαφοροποίηση του μάγματος δημιουργεί όξινο μάγμα στο ανώτερο τμήμα του μαγματικού θαλάμου.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η έκρηξη του ηφαιστείου Hekla (Ισλανδία) το 1947-48. Η ηφαιστειακή δράση του ηφαιστείου αυτού, κατά τα προηγούμενα 800 χρόνια, έδινε αρχικά βίαιες εκρήξεις από κίσηρη που διαρκούσαν μερικές ώρες, και ακολούθως μακρές εκχύσεις βασαλτικής λάβας από τα κατώτερα τμήματα του μαγματικού θαλάμου. Σε αντίθεση με τις στρομπόλιες και βουλκάνιες εκρήξεις, οι οποίες είναι μεμονωμένες και ασυνεχείς, οι πλινιακές εκρήξεις σχηματίζουν συνεχείς και παρατεταμένες εκρηκτικές στήλες. Επίσης, η εκρηκτική ηφαιστειακή δράση Πλινιακού τύπου είναι εντελώς διαφορετική από την ήπια εκχυτική ηφαιστειακή δράση τύπου Χαβάης. Εντούτοις, οι δύο τύποι εκρήξεων μοιάζουν στο ότι παράγουν συνεχείς και παρατεταμένες εκρηκτικές στήλες, οι οποίες στην πρώτη περίπτωση μεν είναι βίαιες, τεράστιες και πλούσιες σε όξινα πυροκλαστικά υλικά, ενώ στη δεύτερη περίπτωση αποτελούνται από πύρινους πίδακες (fire fountain) βασαλτικής λάβας. Ο λόγος είναι ότι και στις δύο περιπτώσεις τα αέρια έχουν περίπου τον ίδιο ρυθμό ανόδου μέσα στο μάγμα καθώς αυτό εξέρχεται από τον κεντρικό πόρο του ηφαιστείου.

Οι πλινιακές εκρήξεις σχηματίζουν μεγάλες εκρηκτικές στήλες, οι οποίες προωθούνται κυρίως από την ενέργεια που παράγει η διαστολή των αερίων και μεταγωγικά ρεύματα. Η ταχύτητα εξόδου των υλικών είναι της τάξης των μερικών εκατοντάδων μέτρων το δευτερόλεπτο. Μερικές στήλες φτάνουν το ύψος των 45 km περίπου. Η διασπορά της τέφρας είναι μεγάλη και καλύπτει ευρείες περιοχές, όπου το πάχος των αποθέσεων κίσηρης και στάχτης είναι ομοιόμορφο. Συνήθως, η διασπορά είναι ασύμμετρη γύρω από το ηφαίστειο, καθόσον τα υλικά μεταφέρονται από τους ανέμους που επικρατούν.

Τα προϊόντα των πλινιακών εκρήξεων είναι κυρίως τεράστιοι όγκοι κίσηρης ($0.5-50 \text{ km}^3$). Όμως τα καταστρεπτικότερα φαινόμενα είναι αυτά που συνοδεύουν τις πλινικές εκρήξεις όπως οι πυροκλαστικές ροές (ρεύματα κίσηρης) και τα λαχάρ. Όταν η εκρηκτική στήλη καταρρέυσει σχηματίζονται καυτές πυροκλαστικές ροές που κατέρχονται τις πλευρές του ηφαιστείου με τεράστια ταχύτητα. Επιπλέον, με την προσθήκη νερού, που προέρχεται από την τήξη χιονιού ή πάγου, και την ανάμειξή του με τα πυροκλαστικά υλικά δημιουργούνται λασπορεύματα (λαχάρ), τα οποία έχουν τη συνοχή του τσιμέντου και ρέουν σαν μανιασμένοι χείμαρροι.

Σε μεγάλες πλινιακές εκρήξεις και καθώς ο μαγματικός θάλαμος κάτω από το ηφαίστειο αδειάζει, μπορεί να προκληθεί κατάρρευση του ηφαιστειακού οικοδομήματος και δημιουργία καλδέρας. Εκτός από την κλασική έκρηξη του Βεζουβίου που χάρισε το όνομά της στον τύπο αυτών των εκρήξεων, άλλες ιστορικές πλινιακές εκρήξεις ήταν η Μινωική έκρηξη της Σαντορίνης (1613 π.Χ.), οι εκρήξεις των ηφαιστίων Tambora (Ινδονησία, 1815) και Krakatau (Ινδονησία, 1883) κ.ά. Κατά τον 20^ο αιώνα ονομαστές εκρήξεις είναι των ηφαιστίων Novarupta (Αλάσκα, 1912), Agung (Ινδονησία, 1963), Αγίας Ελένης (ΗΠΑ, 1980), El Chichon (Μεξικό, 1982), Spurr (Αλάσκα, 1992), Pinatubo (Φιλιππίνες, 1991) κ.ά.



Εικόνα 3-9: Η έκρηξη του ηφαιστείου Spurr (Smithsonian Institution, 2013).

3.4.6. Εκρήξεις τύπου Πελέ

Οι εκρήξεις τύπου Πελέ (Peleean eruptions) πήραν το όνομά τους από την κλασική έκρηξη του ηφαιστείου Πελέ (Μαρτινίκα) το 1902. Η πυροκλαστική ροή που δημιουργήθηκε από την κατάρρευση ενός αναπτυσσόμενου θόλου λάβας στην κορυφή του ηφαιστείου κατέστρεψε την πόλη St. Pierre.

Οι εκρήξεις τύπου Πελέ μοιάζουν με τις πλινιακές εκρήξεις διότι συνδέονται με όξινα μάγματα και, συχνά, με τη δημιουργία πυροκλαστικών ροών. Παράλληλα όμως διαφέρουν στο ότι, στις εκρήξεις τύπου Πελέ το μάγμα έχει χάσει τα αέρια του με αποτέλεσμα αφενός να μη θρυμματίζεται και αφετέρου να αυξάνεται ακόμη περισσότερο το ήδη υψηλό, λόγω του διοξειδίου του πυριτίου, ιξώδες του. Κατά συνέπεια, το μάγμα ανέρχεται πάρα πολύ αργά (με

ταχύτητες της τάξης των cm/sec) και συσσωρεύεται στον κρατήρα του ηφαιστείου σχηματίζοντας θόλους λάβας ή, αν συνεχίσει την έξοδό του, σχηματίζει παχύρρευστες ροές λάβας στα πλευρά του ηφαιστείου. Η πολύ αργή ταχύτητα ανόδου και εξόδου του μάγματος είναι και ο λόγος που οι εκρήξεις τύπου Πελέ διαρκούν περισσότερο από τις πλινιακές, από μερικούς μήνες έως μερικά χρόνια. Το γεγονός ότι το μάγμα είναι φτωχό σε αέρια, αποτρέπει το θρυμματισμό του και τη δημιουργία βίαιων εκρήξεων με εκρηκτικές στήλες πλινιακού τύπου. Από την άλλη μεριά όμως οι θόλοι που σχηματίζονται είναι ασταθείς και μπορούν να καταρρεύσουν. Στην περίπτωση αυτή σχηματίζονται πυροκλαστικές ροές με συνέπειες εξίσου καταστροφικές όπως και στις πλινιακές εκρήξεις. Η διαφορά ανάμεσα στα δύο είδη πυροκλαστικών ροών είναι:

1. Οι πυροκλαστικές ροές στις εκρήξεις τύπου Πελέ, που ονομάζονται πυρακτωμένα νέφη (*nuee ardentes*), προκαλούνται από την κατάρρευση του θόλου λάβας και περιέχουν μεγαλύτερο ποσοστό από συμπαγή θραύσματα, τα οποία προήλθαν από την κατάρρευση του θόλου λάβας και έχουν διάφορα μεγέθη, από λιθάρια μέχρι ογκόλιθους.
2. Οι πυροκλαστικές ροές στις πλινιακές εκρήξεις, που ονομάζονται ρεύματα κίσηρης (*pumice flows*), προκαλούνται από την κατάρρευση της εκρηκτικής στήλης και περιέχουν μεγαλύτερο ποσοστό κίσηρης που προήλθε από το θρυμματισμό του μάγματος λόγω των αερίων.



Εικόνα 3-10: Πυρακτωμένα νέφη (flickr.com 2018).



Εικόνα 3-11: Ρεύματα κίσηρης (luirig.altervista.org 2018).

3.4.7. Υδροηφαιστειακές Εκρήξεις (τύπου Surtsey)

Οι υδροηφαιστειακές εκρήξεις (hydrovolcanic eruptions) δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση του μάγματος είτε με υπόγειο είτε με επιφανειακό νερό. Οι βίαιες υδροηφαιστειακές εκρήξεις βασαλτικής λάβας ονομάζονται και τύπου Surtsey ή Βεζούβιου, από το ηφαιστειακό νησί Surtsey νότια της Ισλανδίας το οποίο δημιουργήθηκε και αναδύθηκε μέσα από τη θάλασσα το 1963 από υδροηφαιστειακή δράση. Επίσης ονομάζονται και φρεατικές εκρήξεις (phreatic explosions). Οι υδροηφαιστειακές εκρήξεις μοιάζουν με τις στρομπόλιες, αν και είναι πολύ πιο εκρηκτικές. Η μεγάλη εκρηκτικότητα είναι το χαρακτηριστικό της υδροηφαιστειακής δραστηριότητας. Καθώς το νερό θερμαίνεται, μετατρέπεται σε ατμό απότομα και έτσι θρυμματίζει το μάγμα σε πολύ λεπτόκοκκη στάχτη.

Όταν δημιουργήθηκε το ηφαιστειακό νησί Surtsey στο Βόρειο Ατλαντικό, οι αρχικές υδροηφαιστειακές εκρήξεις ήταν θεαματικά εκρηκτικές. Καθώς όμως προχωρούσε η ανάπτυξη του ηφαιστείου, η λάβα στον κεντρικό πόρο αντιδρούσε όλο και λιγότερο με το νερό, έτσι ώστε τα τελευταία στάδια της δράσης να είναι τύπου Στρόμπολι. Οι υδροηφαιστειακές εκρήξεις δεν περιορίζονται μόνο σε υποθαλάσσια δημιουργία ωκεάνιων νησιών. Πολλές βίαιες υδροηφαιστειακές εκρήξεις δημιουργούνται στην ξηρά από αντίδραση του βασαλτικού μάγματος με τον υδροφόρο ορίζοντα σε μικρά βάθη κάτω από την επιφάνεια.

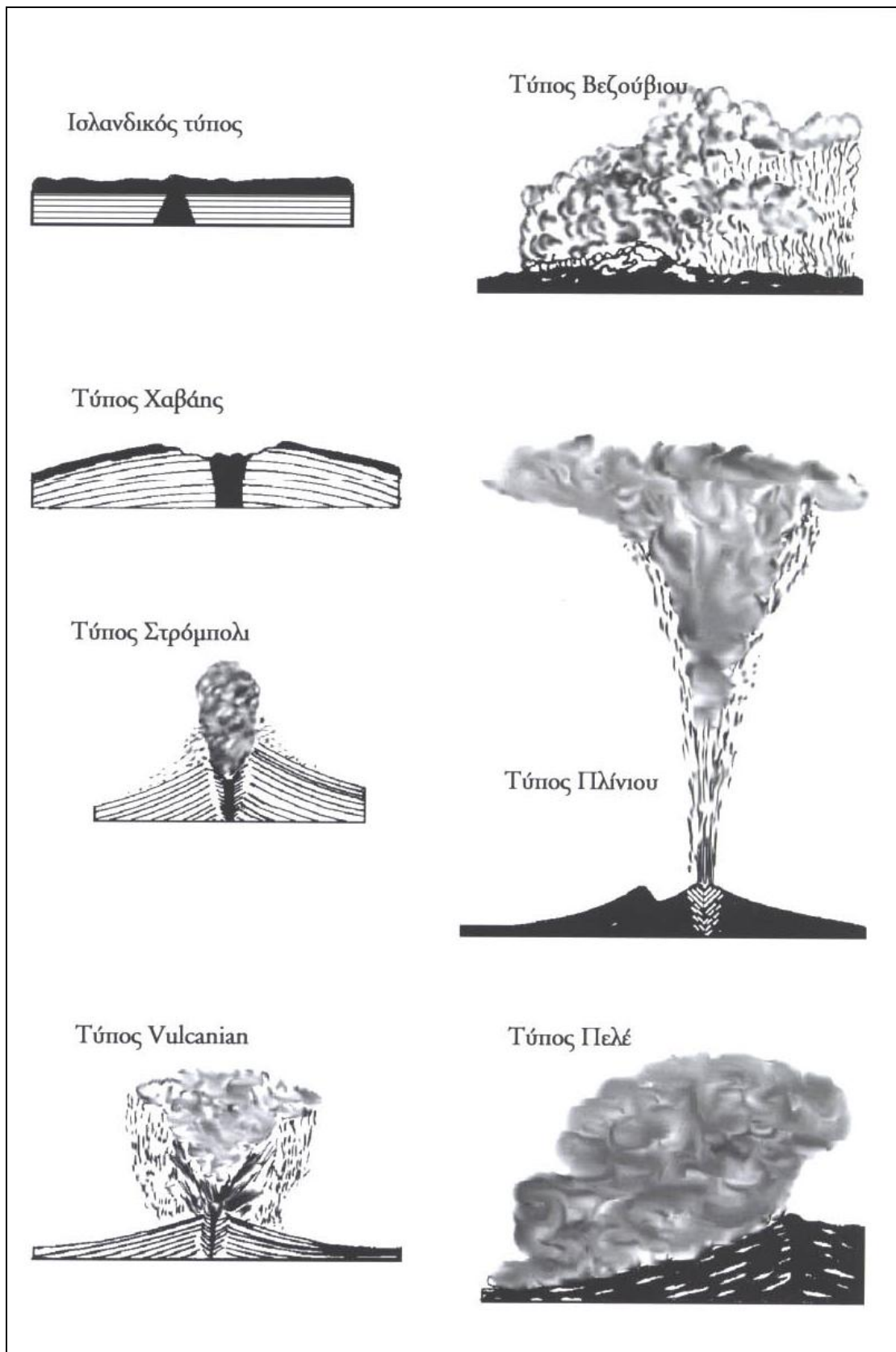
Χαρακτηριστικό είναι το δακτυλιοειδές νέφος στη βάση της εκρηκτικής στήλης που προωθείται ακτινωτά και ονομάζεται μεγακυματισμός βάσης (base surge). Αυτοί οι σχηματισμοί είναι ανάλογοι των νεφών που σχηματίζονται στη βάση των κατακόρυφων στηλών των πυρηνικών εκρήξεων. Οι μεγακυματισμοί βάσης προέρχονται από την κατάρρευση λόγω βαρύτητας της "υγρής" εκρηκτικής στήλης, η οποία είναι πυκνότερη από την αντίστοιχη στις "ξηρές" εκρήξεις. Οι αποθέσεις των μεγακυματισμών βάσης είναι σφηνοειδείς έχοντας το μεγαλύτερο πάχος κοντά στον ηφαιστειακό πόρο.

Συχνές είναι επίσης οι αποθέσεις με μορφή αμμόλοφων κοντά στον πόρο, που δείχνουν πλευρική μεταφορά, ανάλογη με την πλευρική κίνηση της άμμου κατά μήκος του μετώπου του αμμόλοφου. Τα στρώματα των αποθέσεων συχνά διακόπτονται από βαθουλώματα εξαιτίας της πτώσης βολίδων και τεμαχίων που κατά την έκρηξη ακολουθούν βαλλιστικές τροχιές ανεξάρτητες με τους μαγακυματισμούς βάσης. Κοινά σε αυτές τις αποθέσεις μεγακυματισμών

βάσης είναι επίσης τα ονομαζόμενα λιθάρια επαύξεσης (accretionary lapilli), τα οποία είναι συσσωρεύσεις από υγρή στάχτη.



Εικόνα 3-12: Surtsey, ένα νέο ηφαιστειακό νησί (Expedition Earth, 2015).



Εικόνα 3-13: Οι κυριότεροι τυποί ηφαιστειακών εκρηξεων κατανεμημενοι σε σειρα αυξανομενου κινδυνου και καταστοφης (Κυριακόπουλος, 2014).

3.5. Ηφαιστειακά Προϊόντα

3.5.1. Ροές Λάβας

Οι περισσότερες λάβες στην επιφάνεια της Γης είναι βασαλτικής σύστασης. Ως γνωστόν, τα βασαλτικά τήγματα έχουν χαμηλό ιξώδες και χαμηλό ποσοστό αερίων, σε αντίθεση με τα αντίστοιχα ανδεσιτικά έως ρυολιθικά τήγματα που έχουν υψηλότερο ιξώδες και υψηλότερο ποσοστό αερίων. Το χαμηλό ιξώδες των βασαλτικών τηγμάτων οφείλεται στο χαμηλό ποσοστό SiO_2 , ενώ το υψηλότερο ιξώδες των ανδεσιτικών έως ρυολιθικών τηγμάτων οφείλεται στο υψηλότερο ποσοστό SiO_2 . Έτσι, τα αέρια που απομιγνύονται από ένα βασικό μάγμα κινούνται ανοδικά χωρίς αντίσταση μέσα στο ρευστό τήγμα, με αποτέλεσμα να μη συσσωρεύεται σημαντική πίεση ατμών. Αυτό οδηγεί σε ήπια, μη εκρηκτική ηφαιστειακή δράση και σε επικράτηση της λάβας ως προϊόν της έκρηξης.

Αντίθετα, τα αέρια που απομιγνύονται από ένα όξινο μάγμα εμποδίζονται κατά την ανοδική τους κίνηση μέσα στο παχύρρευστο τήγμα, με αποτέλεσμα να συσσωρεύεται σημαντική πίεση ατμών. Αυτό οδηγεί σε βίαια, εκρηκτική ηφαιστειακή δράση και σε επικράτηση των πυροκλαστικών υλικών ως προϊόντα της έκρηξης. Το χαμηλό ιξώδες των βασαλτικών λαβών επιτρέπει σε αυτές να εκχύνονται σε μεγάλες αποστάσεις, παράγοντας μεγάλες βασαλτικές ροές, οι οποίες έχουν μικρό λόγο εμφάνισης. Ο λόγος εμφάνισης (aspect ratio) περιγράφει τη γεωμετρία της λάβας και ορίζεται ως ο λόγος του μέσου πάχους προς την οριζόντια επιφάνεια που καλύπτει η λάβα. Οι όξινες λάβες, όταν έχουν χάσει τα αέρια τους, μπορούν να συμπεριφερθούν και αυτές με ήπιο εκχυτικό τρόπο. Όμως, τα ρεύματα όξινων λαβών, λόγω του μεγάλου ιξώδους, τείνουν να είναι παχύτερα και εκχύνονται σε μικρότερες αποστάσεις, με αποτέλεσμα ο λόγος εμφάνισης να είναι μεγάλος.



Εικόνα 3-14: Λάβα από το Kilauea (Maron, E. 2017).

3.5.2. Τέφρα και Πυροκλαστικά Πετρώματα

Η εκρηκτική δράση των αερίων έχει ως αποτέλεσμα τον κατακερματισμό του μάγματος και των πετρωμάτων. Όσο πιο εκρηκτική η ηφαιστειακή δράση τόσο πιο έντονος ο κατακερματισμός.

1. Πυροκλαστικά (pyroclasts)
Είναι τα μεμονωμένα ηφαιστειακά θραύσματα.

2. Τέφρα (tephra)
Είναι το σύνολο των πυροκλαστικών θραυσμάτων που εκτοξεύονται από τον πόρο κατά τη διάρκεια των εκρηκτικών ηφαιστειακών δράσεων. Η τέφρα αποτελείται από χαλαρά υλικά.

3. Πυροκλαστικό πέτρωμα (pyroclastic rock)

Είναι το συμπαγές πέτρωμα που σχηματίζεται από τη στερεοποίηση των πυροκλαστικών υλικών.

Τα πυροκλαστικά υλικά ταξινομούνται ανάλογα με το μέγεθός τους:

1. Στάχτη

Η στάχτη (ash) έχει μέγεθος < 2 mm. Αποτελείται κυρίως από πολύ λεπτόκοκκα υαλώδη θρύψαλα (shards), αλλά και από θρυμματισμένους κρυστάλλους και λιθικά.

2. Λιθάρια

Τα λιθάρια (lapilli) έχουν μέγεθος 2-64 mm. Αποτελούνται από πυροκλαστικά υλικά μεγέθους μπιζελιού έως κάστανου. Συχνά μοιάζουν με κάρβουνα. Σε εκρήξεις με συμμετοχή νερού η υγρή στάχτη μπορεί να σχηματίσει σφαιρόμορφα λιθάρια που ονομάζονται λιθάρια επαύξεσης (accretionary lapilli).

3. Τεμάχοι και βολίδες



Εικόνα 3-15: Ηφαιστειακή στάχτη (Journal of Geoscience Education 2018).



Εικόνα 3-16: Ηφαιστειακά λιθάρια (volcanosareamazing.weebly.com 2018).



Εικόνα 3-17: Τεμάχοι και βολίδες (legacy.earlham.edu 2018).

3.5.3. Πυροκλαστικές Αποθέσεις Πτώσης

Οι Πυροκλαστικές αποθέσεις πτώσης (pyroclastic airfall deposits) περιέχουν πυροκλαστικά υλικά που είναι πιο αδρόκοκκα (βολίδες έως λιθάρια) κοντά στον ηφαιστειακό πόρο και γίνονται βαθμιαία πιο λεπτόκοκκα (λιθάρια έως στάχτη) όσο απομακρυνόμαστε από αυτόν. Η σύσταση αυτών των υλικών (όξινη ή βασική) σχετίζεται συνήθως και με συγκεκριμένο τύπο ηφαιστειακής δράσης.

Διακρίνονται σε:

Αποθέσεις πτώσης σκωριών (scoria-fall deposits). Αυτές προέρχονται από κώνους σκωριών με ηφαιστειακή δράση τύπου Στρόμπολι. Οι αποθέσεις αποτελούνται από βασαλτικές έως ανδεσιτικές σκωρίες που αποτίθενται κοντά στον ηφαιστειακό πόρο.

Αποθέσεις πτώσης κίσηρης (pumice-fall deposits). Αυτές προέρχονται από στρωματοηφαίστεια με Πλινιακή ηφαιστειακή δράση. Οι αποθέσεις αποτελούνται από δακτικικά

έως ρυολιθικά πυροκλαστικά (κίσσηρη) που αποτίθενται σε απόσταση μερικών έως πολλών χιλιομέτρων από τον ηφαιστειακό πόρο.

Αποθέσεις πτώσης στάχτης (ash-fall deposits). Αυτές προέρχονται συνήθως από ηφαιστειακή δράση τύπου Βουλκάνο και υδροηφαιστειακές εκρήξεις, κατά τις οποίες τα υλικά είναι τόσο θρυμματισμένα ώστε να δημιουργούν λεπτόκοκκες αποθέσεις τέφρας.



Εικόνα 3-18: Αποθέσεις πτώσης σκωριών (geology.sdsu.edu 2018).



Εικόνα 3-19: Αποθέσεις πτώσης κίσσηρης (www.sandatlas.org 2018).



Εικόνα 3-20: Αποθέσεις πτώσης στάχτης (Oregon State University 2018).

3.5.4. Πυροκλαστικές Ροές

Η πυροκλαστική ροή (pyroclastic flow), γνωστή και ως πυροκλαστικό ρεύμα πυκνότητας (pyroclastic density current), είναι ένα ρευστοποιημένο μίγμα από στερεά και σχεδόν στερεά θραύσματα και από υπέρθερμα διαστελλόμενα αέρια που κατέρχεται έρποντας την πλαγιά ενός ηφαιστειακού οικοδομήματος. Αυτά τα τρομακτικά νέφη είναι φοβερά καυτά, με θερμοκρασίες που μπορούν να υπερβούν τους 500 °C. Είναι βαρύτερα από τον αέρα, περιέχουν τοξικά αέρια και κινούνται ως ροοστιβάδες με ταχύτητες που συχνά ξεπερνούν τα 100 km/hr. Είναι τα πιο καταστροφικά από όλα τα ηφαιστειακά φαινόμενα. Οι πυροκλαστικές ροές δημιουργούνται από εκρήξεις στρωματοηφαιστίων και τα προϊόντα τους είναι όξινης έως ενδιάμεσης σύστασης.

Η ταξινόμηση των πυροκλαστικών ροών (pyroclastic flows) και των πυροκλαστικών αποθέσεων (pyroclastic flow deposits) είναι περίπλοκη. Σε γενικές γραμμές υπάρχουν δύο ακραίοι τύποι πυροκλαστικών ροών:

1. Πυρακτωμένα νέφη

Περιέχουν συμπαγή κομμάτια λάβας που προέρχονται από την κατάρρευση είτε ενός αναπτυσσόμενου θόλου λάβας, είτε ενός ρεύματος ιξώδους λάβας που σχηματίστηκε κατά την ανάπτυξη του θόλου.

2. Ρεύματα κίσηρης

Περιέχουν κομμάτια ελαφριάς κίσηρης που προέρχονται από την κατάρρευση μιας εκρηκτικής στήλης.

Οι αποθέσεις που προκύπτουν από τα πυρακτωμένα νέφη ονομάζονται αποθέσεις τεμαχών και στάχτης (block-and-ash deposits), ενώ οι αποθέσεις που προκύπτουν από τα ρεύματα κίσηρης ονομάζονται ιγκνιμβρίτες ή πυρομβρίτες (ignimbrites) (www.geo.auth.gr).



Εικόνα 3-21: Πυρακτωμένα νέφη (explorevolcanoes.com 2018).



Εικόνα 3-22: Ρεύματα κίσηρης (geology.com 2018).

Κεφάλαιο 4.

Επιπτώσεις των Ηφαιστειακών Αερίων

4.1. Ηφαιστειακά προϊόντα

4.1.1. Πυροκλαστικές Ροές

Οι πυροκλαστικές ροές καταστρέφουν σχεδόν τα πάντα στο πέρασμά τους. Μεταφέροντας κομμάτια πετρωμάτων με μέγεθος από στάχτη μέχρι ογκόλιθους και ταξιδεύοντας στο έδαφος με ταχύτητες συνήθως πάνω από 80 km/hr, οι πυροκλαστικές ροές γκρεμίζουν, θρυμματίζουν, θάβουν ή μεταφέρουν μακριά σχεδόν όλα τα αντικείμενα και τις κατασκευές που βρίσκουν στο δρόμο τους. Οι μεγάλες θερμοκρασίες, συνήθως 200-700 °C, κατακαίνε δέντρα, φυτά, σπίτια κλπ. Οι πυροκλαστικές ροές ποικίλουν σε μέγεθος και ταχύτητα, όμως ακόμη και μικρές ροές που εκτείνονται <5 km από το ηφαίστειο μπορούν να καταστρέψουν κτίρια, δάση και καλλιέργειες. Ακόμη και στα περιθώρια της πυροκλαστικής ροής άνθρωποι και ζώα πεθαίνουν από τα εγκαύματα και την εισπνοή των δηλητηριωδών αερίων. Οι πυροκλαστικές ροές γενικά ακολουθούν κοιλάδες ή άλλες χαμηλές περιοχές και, ανάλογα με την ποσότητα των υλικών που μεταφέρουν, σχηματίζουν χαλαρές αποθέσεις με πάχος από 1-200 m.

Αυτά τα χαλαρά υλικά από στάχτη και ηφαιστειακά συντρίμματα σε κοιλάδες και πλαγιές οδηγούν έμμεσα στη δημιουργία λαχάρ:

1. Επακόλουθες βροχές παρασύρουν τα χαλαρά υλικά και δημιουργούν λασπορεύματα που αυξάνουν το ρυθμό απορροής και διάβρωσης.
2. Οι πυροκλαστικές ροές λιώνουν το χιόνι και τον πάγο στην κορυφή και τις πλαγιές του ηφαιστείου δημιουργούν λαχάρ. γ) Τα υλικά των πυροκλαστικών ροών φράσσουν ρέματα και μικρά ποτάμια δημιουργώντας φράγματα και λίμνες που αν σπάσουν ή υπερχειλίσουν δημιουργούν λαχάρ.

4.1.2. Πυρακτωμένα Νέφη

Το όνομα πυρακτωμένο νέφος (*nuée ardente*) αποδίδεται στο Γάλλο γεωλόγο Alfred Lacroix, ο οποίος ονόμασε έτσι την πυροκλαστική ροή του ηφαιστείου Πελέ (Μαρτινίκα) που κατέστρεψε την πόλη St. Pierre το 1902. Η πυροκλαστική ροή δημιουργήθηκε από την εκρηκτική κατάρρευση ενός αναπτυσσόμενου θόλου λάβας στην κορυφή του ηφαιστείου και στη συνέχεια σκέπασε και σάρωσε την πόλη. Έτσι, οι εκρήξεις που δημιουργούν πυρακτωμένα νέφη καλούνται συχνά και εκρήξεις τύπου Πελέ. Εντούτοις αυτή η σύνδεση δεν μπορεί να καθοριστεί αυστηρά, διότι πυρακτωμένα νέφη παράγονται και από Πλινιακή ή Βουλκάνια ηφαιστειακή δράση. Ο όρος πυρακτωμένο νέφος έχει επικρατήσει σήμερα να εφαρμόζεται σε όλες τις περιπτώσεις πυροκλαστικών ροών που δημιουργούνται από κατάρρευση θόλων. Ωστόσο ή λέξη νέφος δεν περιγράφει ακριβώς το πραγματικό φαινόμενο. Ο σωστότερος όρος θα ήταν πυρακτωμένη ροοστιβάδα (*glowing avalanche*). Στην πραγματικότητα αυτού του είδους οι πυροκλαστικές ροές αποτελούνται από τεμάχια και στάχτη, όμως αυτό που φαίνεται είναι

μόνο το νέφος της στάχτης, η οποία διαχωρίζεται (elutriation) κατά την κίνηση της ροής. Επομένως τα πυρακτωμένα νέφη αποτελούνται από δύο μέρη: από ένα νέφος στάχτης (ash cloud) και από μία υποκείμενη πυροκλαστική στιβάδα (pyroclastic avalanche), η οποία όμως κρύβεται από το νέφος στάχτης και δεν φαίνεται.

Ενίοτε, όταν ο κρατήρας του ηφαιστείου έχει μετατραπεί σε λίμνη, οι αναθυμιάσεις από τις ατμίδες, κυρίως το SO₂ και το CO₂, αντιδρούν με το νερό και παράγουν θειικό και ανθρακικό οξύ αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα είναι να προκύψει μία όξινη λίμνη, της οποίας το νερό είναι συχνά σκέτο οξύ (με pH<1!).

Το είδος και η ποσότητα των αερίων εξαρτάται από τη σύσταση του μάγματος, το οποίο έχει άμεση σχέση με το γεωτεκτονικό περιβάλλον στο οποίο δημιουργείται. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η διαφορά στην ποσότητα των αερίων σε τρία χαρακτηριστικά ηφαίστεια από διαφορετικά γεωτεκτονικά περιβάλλοντα.

Πίνακας 4-1: Ποσότητα αερίων στα ηφαίστεια Kilauea, Erta Ale, Momotombo (ww.geo.auth.gr 2018).

Ηφαίστειο Τεκτονικό περιβάλλον Θερμοκρασία	Kilauea Ενδοπλακικό 1170 °C	Erta Ale Απόκλιση πλακών 1130 °C	Momotombo Σύγκλιση πλακών 820 °C
H ₂ O	37.1	77.2	97.1
CO ₂	48.9	11.3	1.44
SO ₂	11.8	8.34	0.50
H ₂	0.49	1.39	0.70
CO	1.51	0.44	0.01
H ₂ S	0.04	0.68	0.23
HCl	0.08	0.42	2.89
HF	---	---	0.26

4.1.3. Ηφαιστειακά Αέρια

Οι καταστροφικές συνέπειες της ηφαιστειακής δράσης συνήθως αποδίδεται στις τεράστιες ροές λάβας ή στις φονικές πυροκλαστικές εκρήξεις. Εντούτοις, τα ηφαιστειακά αέρια είναι εξ ίσου επικίνδυνα, διότι είναι θερμά και τοξικά, και η εκπομπή τους σε μεγάλες ποσότητες μπορεί να προκαλέσει τον αιφνίδιο θάνατο ανθρώπων ή ζώων. Για παράδειγμα, το εσωτερικό των στοών λάβας μπορεί να είναι επικίνδυνο, καθώς εκεί μπορούν να εγκλωβιστούν δηλητηριώδη αέρια. Σπανιότερα, όπως συνέβη στο ηφαίστειο Nyos (Καμερούν), χιλιάδες άνθρωποι πέθαναν από την αποβολή αερίων. Παρακάτω περιγράφονται δύο παραδείγματα τρέχοντος κινδύνου από ηφαιστειακά αέρια.

1. Ηφαίστειο Μαμούθ (Καλιφόρνια)

Το όρος Μαμούθ (Καλιφόρνια, ΗΠΑ) είναι ένα από τα μεγαλύτερα χειμερινά θέρετρα. Γεωλογικά, αποτελεί μεγάλο ηφαιστειακό σύμπλεγμα στο δυτικό άκρο της καλδέρας Long Valley, η οποία το τελευταίο εκατομμύριο χρόνια έδωσε μία από τις μεγαλύτερες ηφαιστειακές εκρήξεις στη βόρεια Αμερική. Στα μέσα της δεκαετίας του 1980 η ηφαιστειακή δράση αναζωπυρώθηκε με τη μορφή σεισμών μικρού βάθους που υποδεικνύουν άνοδο μάγματος σε βάθος 3-4 km. Σε διάφορες περιοχές γύρω από το ηφαίστειο έχουν καταστραφεί δέντρα από CO₂, το οποίο φαίνεται ότι εκπέμπεται δια μέσου των πετρωμάτων που περιβάλλουν το όρος Μαμούθ. Το CO₂ συσσωρεύεται στο έδαφος και καταστρέφει το ριζικό σύστημα των δέντρων. Όμως, επειδή το αέριο αυτό είναι βαρύτερο από τον αέρα, μπορεί να συγκεντρωθεί σε μικρά βυθίσματα ή σε χαμηλές κοιλάδες με άμεσο κίνδυνο να προκαλέσει ασφυξία σε ανθρώπους, οι οποίοι κατασκηνώνουν εκεί. Η τρέχουσα ποσότητα του CO₂ που απελευθερώνεται σήμερα είναι 300 τόνοι την ημέρα.

2. Ηφαίστειο Kilauea (Χαβάη)

Πριν την έκρηξη του ηφαιστείου Kilauea (Χαβάη) το 1983 οι φασματογραφικές μετρήσεις έδειξαν ότι το ηφαίστειο απελευθέρωνε 150 τόνους SO₂ την ημέρα. Όμως κατά τη διάρκεια των μεγάλων εκρήξεων η ποσότητα του SO₂ αυξήθηκε στους 30.000 τόνους την ημέρα. Αυτά τα επεισόδια συνεχίστηκαν κάθε 3-4 εβδομάδες από το 1983-1986 και διαρκούσαν 24 ώρες. Η τρέχουσα ποσότητα του SO₂ που απελευθερώνεται σήμερα είναι 1800 τόνοι την ημέρα. Χημικές αντιδράσεις παράγουν δύο ειδών τοξικά νέφη, τα οποία είναι μεγάλο πρόβλημα για τους κατοίκους και τουρίστες στο νησί της Χαβάης. Τα τοξικά νέφη είναι ένα είδος ηφαιστειακής ομίχλης και λέγονται vog και laze αντίστοιχα.

a) Vog

Το SO₂ που απελευθερώνεται από το ηφαίστειο, αντιδρά χημικά με το οξυγόνο, τα σωματίδια σκόνης, το ηλιακό φως και την υγρασία της ατμόσφαιρας και σχηματίζει ένα μίγμα από αερολύματα (aerosols) πλούσια σε θειικά άλατα, θειικό οξύ και άλλες οξειδωτικές θειικές ενώσεις. Αυτό το είδος ηφαιστειακής ομίχλης είναι γνωστό με το όνομα "vog", σύντμηση των λέξεων volcanic smog. Το τοξικό και επικίνδυνο νέφος μεταφέρεται και εξαπλώνεται με τη βοήθεια των ανέμων στο νησί και συχνά μετατρέπεται σε όξινη βροχή. Ως αέριο νέφος δημιουργεί αναπνευστικά προβλήματα, ενώ η όξινη βροχή καταστρέφει καλλιέργειες και είναι καυστική για ανθρώπους, ρουχισμό και άλλα αντικείμενα.

b) Laze

Όταν η λάβα χύνεται στη θάλασσα, συμβαίνει μία άλλη χημική αντίδραση μεταξύ της λάβας και του θαλάσσιου νερού. Λευκά σύννεφα δημιουργούνται εξ αιτίας της

μεγάλης θερμότητας και των βίαιων χημικών αντιδράσεων. Αυτά τα ομιχλώδη νέφη ονομάζονται "laze", σύντμηση των λέξεων *lava haze*. Αποτελούνται από ένα μίγμα υδροχλωρικού οξέος και υδρατμών. Καθώς η λάβα προκαλεί το βρασμό και την εξάτμιση του θαλάσσιου νερού, τα διαλελυμένα χλωρίδια (NaCl , MgCl_2 , CaCl_2) αντιδρούν με το υδρογόνο του νερού και σχηματίζουν υδροχλωρικό οξύ. Και αυτό το φαινόμενο έχει επικίνδυνες συνέπειες, οι οποίες όμως περιορίζονται κοντά στην ακτή (www.geo.auth.gr).



Εικόνα 4-1: Ηφαιστειακά αέρια (explorevolcanoes.com 2018).

4.2. Κλιματική επίδραση

4.2.1. Όζον

4.2.1.1 Δημιουργία του όζοντος

Το όζον (O_3) παράγεται στην στρατόσφαιρα (>12 km). Ένα μόριο οξυγόνου (O_2) απορροφά ηλιακή υπεριώδη (UV) ακτινοβολία και διασπάται σε δύο άτομα οξυγόνου (O). Ένα άτομο οξυγόνου (O) ενώνεται με ένα μόριο οξυγόνου (O_2) και σχηματίζει ένα μόριο όζοντος (O_3). Ακολούθως, το μόριο όζοντος (O_3) απορροφά υπεριώδη (UV) ακτινοβολία και διασπάται σε ένα μόριο οξυγόνου (O_2) και ένα άτομο οξυγόνου (O). Ο κύκλος αυτός έχει ως όφελος να απορροφάται η βλαβερή υπεριώδης ακτινοβολία από το στρώμα του όζοντος.

4.2.1.2 Καταστροφή του όζοντος

Ο κύκλος αυτός διαταράσσεται από την παρουσία χλωροφθορανθράκων (CFC), οι οποίοι παράγονται από τον άνθρωπο. Ένα μόριο χλωροφθοράνθρακα (CFC) απορροφά υπεριώδη ακτινοβολία και δίνει ένα άτομο χλωρίου (Cl). Το άτομο χλωρίου (Cl) ενώνεται με ένα μόριο όζοντος (O_3) και το διασπά σε ένα μόριο οξυγόνου (O_2) και ένα μόριο μονοξειδίου του χλωρίου (ClO). Το μόριο μονοξειδίου του χλωρίου (ClO) ενώνεται με ένα άτομο οξυγόνου (O) και σχηματίζει ένα μόριο οξυγόνου (O_2) και απελευθερώνεται το άτομο χλωρίου (Cl). Το άτομο χλωρίου (Cl) είναι έτοιμο να επαναλάβει την ίδια διαδικασία πολλές φορές. Η καταστροφή του

όζοντος έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της προστασίας από την ηλιακή υπεριώδη ακτινοβολία. Σήμερα, μία τεράστια τρύπα όζοντος υπάρχει πάνω από την Ανταρκτική.

4.2.1.3 Επιπτώσεις των ηφαιστειακών αερίων στο όζον

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις φαίνεται επιδρούν στη μείωση του όζοντος, αλλά μάλλον έμμεσα. Το υδροχλώριο (HCl) καταστρέφει το όζον. Εντούτοις το μεγαλύτερο ποσοστό HCl ηφαιστειακής προέλευσης περιορίζεται στην τροπόσφαιρα (κάτω από την στρατόσφαιρα), απ' όπου παρασύρεται από τη βροχή. Έτσι δεν έχει την ευκαιρία να αντιδράσει με το όζον. Από την άλλη μεριά όμως, δορυφορικά δεδομένα έδειξαν ότι μετά τις εκρήξεις των ηφαιστειών Pinatubo (Φιλιππίνες) και Hudson (Χιλή) το 1991, υπήρξε μείωση του όζοντος κατά 15-20% σε μεγάλα ύψη και 50% πάνω από την Ανταρκτική. Φαίνεται, λοιπόν, ότι η ηφαιστειακή δραστηριότητα παίζει σημαντικό ρόλο στη μείωση του όζοντος. Αυτός ο ρόλος, όμως, είναι έμμεσος και δεν μπορεί να αποδοθεί κατ'ευθείαν στο ηφαιστειακό HCl. Τα ηφαιστειακά σωματίδια και αερολύματα (aerosols) δεν καταστρέφουν το όζον από μόνα τους, αλλά λειτουργούν ως καταλύτες, παρέχοντας την απαραίτητη επιφάνεια πάνω στην οποία θα γίνουν οι αντιδράσεις των χλωροφθορανθράκων με το όζον. Ευτυχώς όμως, τα σωματίδια αυτά κατακάθονται μετά από δύο-τρία χρόνια, και έτσι οι επιπτώσεις των ηφαιστειακών εκρήξεων είναι σύντομες.

4.2.2. Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

4.2.2.1 Δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου

Μερικά αέρια, κυρίως το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και οι υδρατμοί, αλλά και το μεθάνιο (CH₄), το υποξείδιο του αζώτου (N₂O) και οι χλωροφθοράνθρακες (CFC), τα οποία ονομάζονται αέρια του θερμοκηπίου (greenhouse gases), επιτρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία (υπεριώδη και ορατή) να διέλθει από την ατμόσφαιρα πάνω στη Γη. Τα ίδια αέρια, όμως, απορροφούν την υπέρυθη ακτινοβολία, η οποία εκπέμπεται από τη Γη προς το διάστημα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή αύξηση της θερμοκρασίας της Γης. Τα αέρια του θερμοκηπίου παράγονται κυρίως από την καύση των ορυκτών καυσίμων.

4.2.2.2 Επιπτώσεις των ηφαιστειακών αερίων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις μπορούν να ενισχύσουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου προσθέτοντας διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα. Η ποσότητα, όμως, του CO₂ από την ηφαιστειακή δραστηριότητα είναι κατά πολύ μικρότερη (~150 φορές) από αυτήν που προσθέτουν κάθε χρόνο οι ανθρώπινες δραστηριότητες. Από την άλλη μεριά, η συμβολή της ηφαιστειακής δράσης στην παγκόσμια θέρμανση αντισταθμίζεται από το φαινόμενο των ηφαιστειακών χειμώνων (βλ. παρακάτω). Η διαρκής αύξηση της θερμοκρασίας της Γης λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι έκδηλη από το 1980. Θα ήταν όμως ακόμη μεγαλύτερη αν δεν υπήρχαν ηφαιστειακές εκρήξεις όπως αυτές των El Chichon (Μεξικό, 1982) και Pinatubo (Φιλιππίνες, 1991).

4.2.2.3 Ηφαιστειακοί χειμώνες

Αιωρούμενα σωματίδια όπως η σκόνη και η στάχτη μπορούν να εμποδίσουν την ηλιακή ακτινοβολία να εισέλθει στην ατμόσφαιρα και έτσι προκαλούν πτώση της θερμοκρασίας της Γης. Η διασπορά αυτών των μικροσκοπικών (<2 μm) σωματιδίων στην στρατόσφαιρα και την ανώτερη τροπόσφαιρα συχνά δημιουργεί πανέμορφα ηλιοβασιλέματα λόγω της σκέδασης της ερυθρής ακτινοβολίας. Οι ηφαιστειακές εκρήξεις ενισχύουν αυτό το φαινόμενο, πολύ

περισσότερο απ' ότι το φαινόμενο του θερμοκηπίου, προκαλώντας έτσι σημαντική πτώση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας.

Για πολλά χρόνια επικρατούσε η άποψη ότι η συμβολή της ηφαιστειακής δραστηριότητας ήταν η εκπομπή της στάχτης, η οποία εμπόδιζε την ηλιακή ακτινοβολία. Αυτή η άποψη άλλαξε μετά τις εκρήξεις των ηφαιστειών της Αγίας Ελένης (ΗΠΑ, 1980) και El Chichon (Μεξικό, 1982). Η έκρηξη της Αγίας Ελένης το 1980 προκάλεσε πτώση της παγκόσμιας θερμοκρασίας κατά 0,1 °C. Εντούτοις η πολύ μικρότερη έκρηξη του El Chichon προκάλεσε πτώση της θερμοκρασίας 3-5 φορές μεγαλύτερη. Το ηφαιστειακό νέφος της Αγίας Ελένης αποτελούνταν κυρίως από ηφαιστειακή στάχτη, ενώ αυτό του El Chichon περιείχε πολύ μεγαλύτερη ποσότητα (πάνω από 40 φορές) θειούχων αερίων. Έτσι φαίνεται ότι τα θειούχα αέρια παίζουν πολύ πιο σημαντικό ρόλο. Το θείο ενώνεται με τους υδρατμούς στη στρατόσφαιρα και σχηματίζει πυκνά νέφη από μικροσκοπικά σταγονίδια θειικού οξέος. Τα σταγονίδια αυτά χρειάζονται αρκετά χρόνια για να κατακαθίσουν και είναι ικανά να μειώσουν τη θερμοκρασία της τροπόσφαιρας, διότι απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία και την αντανακλούν στο διάστημα.

4.2.2.4 Παραδείγματα ηφαιστειακών χειμώνων

4.2.2.4.1 Ηφαίστειο Laki (Ισλανδία, 1783)

Το 1783-1784 οι ανατολικές Ηνωμένες Πολιτείες έζησαν τον πιο κρύο χειμώνα στην ιστορία τους (4,8 °C κάτω από το μέσο όρο των 225 χρόνων). Η Ευρώπη είχε επίσης έναν εξαιρετικά κρύο χειμώνα. Ο Βενιαμίν Φρανκλίνος υποστήριξε τότε ότι αυτό οφειλόταν στη στάχτη και τα αέρια της έκρηξης του ηφαιστείου Laki (Ισλανδία) το 1783, κάτι που σήμερα είναι επιστημονικά ορθό. Πράγματι, η έκρηξη αυτή αποτελεί τη μεγαλύτερη έκχυση βασαλτικής λάβας κατά τους ιστορικούς χρόνους.

4.2.2.4.2 Ηφαίστειο Tambora (Ινδονησία, 1815)

Τριάντα χρόνια αργότερα, το 1815, η έκρηξη του ηφαιστείου Tambora (Ινδονησία) είχε ως αποτέλεσμα, ώστε η άνοιξη και το καλοκαίρι του 1816 να είναι εξαιρετικά κρύα και η χρονιά έγινε γνωστή ως η χρονιά χωρίς καλοκαίρι. Η έκρηξη αυτή φαίνεται να είναι η ισχυρότερη τα τελευταία 10.000 χρόνια. Η Ευρώπη και η Νέα Αγγλία επλήγησαν περισσότερο. Χιονοπτώσεις και παγετός συνέβησαν τον Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο. Οι καλλιέργειες καταστράφηκαν και οι αγρότες έσφαζαν τα ζώα τους διότι δεν είχαν τροφή να τους δώσουν. Οι πάγοι της Αρκτικής καθώς και οι παγετώνες των Άλπεων μεγάλωσαν.

4.2.2.4.3 Ηφαίστειο Krakatau (Ινδονησία, 1883)

Η έκρηξη του ηφαιστείου Krakatau (Ινδονησία) τον Αύγουστο του 1883 δημιούργησε είκοσι φορές μεγαλύτερο σύννεφο στάχτης από το ηφαίστειο της Αγίας Ελένης το 1980. Η έκρηξη του Krakatau ήταν η δεύτερη μεγαλύτερη κατά τους ιστορικούς χρόνους μετά από αυτήν του γειτονικού Tambora. Για μήνες μετά την έκρηξη παγκοσμίως ο καιρός παγκοσμίως ήταν ψυχρός, η δύση του ηλίου ήταν κατακόκκινη και παρατεταμένη λόγω της διασποράς της στάχτης και των αερολυμάτων. Τα φαινόμενα αυτά ήταν αφορμή για έντονες επιστημονικές αντιπαραθέσεις για τα αίτιά τους, καθώς επίσης και για καλλιτεχνική έμπνευση των ζωγράφων της εποχής.

4.2.2.4.4 Ηφαίστειο Pinatubo (Φιλιππίνες, 1991)

Το ηφαίστειο Pinatubo (Φιλιππίνες) εξερράγη στις 15 Ιουνίου 1991 και ένα μήνα αργότερα εξερράγη το ηφαίστειο Hudson (Χιλή). Η έκρηξη του Pinatubo δημιούργησε το

μεγαλύτερο νέφος από διοξείδιο του θείου τα τελευταία εκατό χρόνια. Τα νέφη των δύο ηφαιστειών εξαπλώθηκαν γύρω από τη Γη σε χρονικό διάστημα λίγων μηνών και οδήγησαν σε πτώση της θερμοκρασίας κατά 1 °C για τα επόμενα χρόνια (www.geo.auth.gr).

4.3. Ιστορικές Εκρήξεις Ηφαιστειών

4.3.1. Σαντορίνη (Ελλάδα)

Η Σαντορίνη είναι το γνωστότερο ενεργό ηφαίστειο του Ηφαιστειακού Τόξου του Νοτίου Αιγαίου. Είναι ένα πολυσύνθετο στρωματοηφαίστειο με μία μεγάλη καλδέρα που σχηματίστηκε κατά τη διάρκεια διαφόρων μεγάλων και βίαιων εκρήξεων. Το νησί, εκτός από ένα μικρό μη ηφαιστειακό υπόβαθρο, αποτελείται σχεδόν εξ ολοκλήρου από ηφαιστειακά πετρώματα, τα οποία διακρίνονται ως μία πολύχρωμη ακολουθία στα απότομα τοιχώματα της εντυπωσιακής καλδέρας. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα στη Σαντορίνη ξεκίνησε πριν από περίπου 2 Ma, όταν ήταν ένα μικρό στρογγυλό νησί, παρόμοιο με τα υπόλοιπα νησιά των Κυκλάδων.

Η τελευταία μεγάλη έκρηξη της Σαντορίνης ήταν η Μινωική έκρηξη που συνέβη το 1613 π.Χ., κατά την ύστερη περίοδο του Χαλκού, και συγκλόνισε την ανατολική Μεσόγειο. Ήταν μία από τις μεγαλύτερες εκρήξεις των ιστορικών χρόνων. Οι αποθέσεις της σχηματίζουν το παχύ λευκό κάλυμμα από στάχτη και κίσηρη που καλύπτει σχεδόν όλο το νησί.

Η Σαντορίνη πριν τη Μινωική έκρηξη ήταν ένα πλούσιο και οικονομικά και πολιτισμικά ανεπτυγμένο κέντρο στη Μεσόγειο. Η έκρηξη κατέστρεψε τα πάντα στο νησί κρατώντας τα θαμμένα για 3.700 χρόνια περίπου. Από το 1969 ξεκίνησαν ανασκαφές στην περιοχή του Ακρωτηρίου, οι οποίες έφεραν στο φως μία σημαντική Κυκλαδική πόλη. Εκτός από τα πολύ εντυπωσιακά ευρήματα (πχ. τοιχογραφίες, κεραμικά κ.ά.) οι ανασκαφές αποκαλύπτουν ότι οι άνθρωποι εγκατέλειψαν το νησί πριν την έκρηξη.



Εικόνα 4-2: 'Σαντορίνη: Ενεργό και από τα πιο επικίνδυνα το υποθαλάσσιο ηφαίστειο' (penna.gr 2018).

4.3.1.1 Η Μινωική Έκρηξη

Η Μινωική έκρηξη συνέβη το 1613 π.Χ. περίπου κατά την Ύστερη Εποχή του Χαλκού. Ήταν μία από τις μεγαλύτερες πλινιακές εκρήξεις της ιστορικής εποχής με δείκτη ηφαιστειακής εκρηκτικότητας 6. Εκτινάχτηκαν 30-40 km³ μάγματος. Το ύψος της εκρηκτικής στήλης υπολογίζεται σε 36-39 km. Επακόλουθο της έκρηξης ήταν η κατάρρευση του μαγματικού θαλάμου και ο σχηματισμός μίας μεγάλης καλδέρας που διέυρνε μία προϋπάρχουσα.

Η τέφρα από την έκρηξη διασκορπίστηκε σε όλη την Ανατολική Μεσόγειο και πιθανότατα οδήγησε σε παγκόσμιες κλιματικές αλλαγές. Οι αποθέσεις τέφρας στη Σαντορίνη αποτελούνται από στάχτη και κίσηρη με πάχος μέχρι 50 m. Η Μινωική έκρηξη κατέστρεψε ένα πλούσιο και οικονομικά και πολιτισμικά ανεπτυγμένο νησί. Από το 1969 οι ανασκαφές στην περιοχή του Ακρωτηρίου έφεραν στο φως μία σημαντική Κυκλαδική πόλη διάσημη για τις εκπληκτικές και καλοδιατηρημένες τοιχογραφίες.

Η Μινωική έκρηξη μελετήθηκε από πολλούς επιστήμονες και είναι από τις καλύτερα μελετημένες ηφαιστειακές εκρήξεις. Με βάση τα προϊόντα της έκρηξης διακρίνονται 4 φάσεις, οι οποίες αντιστοιχούν σε διακριτές φάσεις της έκρηξης. Οι φάσεις αυτές ονομάζονται Μινωική Α (ή BO1), Μινωική Β (ή BO2), Μινωική Γ (ή BO3) και Μινωική Δ (ή BO4). Το κέντρο της έκρηξης εντοπίζεται ανάμεσα από τα σημερινά Φηρά και τη Νέα Καμένη.

Κάτω από τις 4 φάσεις προϊόντων, μερικοί επιστήμονες αναγνωρίζουν μία λεπτή φάση (BO0) αποτελούμενη από αποθέσεις πτώσης στάχτης, κίσηρης και λιθικών, η οποία αντιστοιχεί σε μία πρόδρομη φρεατική ή υδροηφαιστειακή έκρηξη. Αυτή προηγήθηκε της κυρίας έκρηξης με διάστημα κάποιων μηνών και πιθανότατα, μαζί με κάποιους σεισμούς, ήταν η προειδοποίηση για τους κατοίκους.

1. Μινωική Α

Αυτή είναι η πρώτη φάση της έκρηξης. Αντιστοιχεί σε αποθέσεις πτώσης κίσηρης (pumice fall-out deposits). Οι αποθέσεις αποτελούνται κατά 90% από αδρόκοκκα κλάσματα λευκής έως υπόλευκης κίσηρης με ρυοδακτιική σύσταση (~71% SiO₂) και κατά 10% από στάχτη και λιθικά. Οι αποθέσεις προέρχονται από την κατάρρευση της εκρηκτικής στήλης ύψους 36-39 km. Οι ενδείξεις μαρτυρούν ότι αυτή η φάση της έκρηξης ήταν "ξηρή" προωθούμενη μόνο από τα μαγματικά αέρια. Το πάχος των αποθέσεων στη Σαντορίνη κυμαίνεται από 0.5-5 m και καλύπτει ομοίμορφα την προ-Μινωική επιφάνεια του νησιού. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις βρίσκονται νοτιοανατολικά, γεγονός που δείχνει ότι οι πτώσεις επηρεάστηκαν από ισχυρούς ανέμους. Το μεγαλύτερο πάχος και τα μεγαλύτερα κλάσματα των αποθέσεων βρίσκονται στα ορυχεία νότια των Φηρών. Αυτό το στοιχείο σε συνδυασμό με τις ισοπαχείς των αποθέσεων δείχνουν ότι το κέντρο της έκρηξης ήταν ανάμεσα στα Φηρά και στη Νέα Καμένη. Οι αποθέσεις διασκορπίστηκαν σε όλη την Ανατολική Μεσόγειο μέχρι τα βόρεια της Τουρκίας.

2. Μινωική Β

Αυτή είναι η δεύτερη φάση της έκρηξης. Αντιστοιχεί σε μεγακυματικές αποθέσεις (base surge deposits). Οι αποθέσεις αποτελούνται από πολυάριθμα λευκά στρώματα που συνίστανται κατά 90% από λεπτόκοκκη στάχτη με αποστρωγγυλεμένα λιθάρια κίσηρης και κατά 10-20% από λιθικά τεμάχια και ογκόλιθους (1-2 m) που συχνά συγκεντρώνονται σε διακριτά στρώματα. Οι αποθέσεις προέρχονται από υδροηφαιστειακές (φρεατομαγματικές) εκρήξεις. Οι ρωγμές και η διάβρωση στον ηφαιστειακό πόρο επέτρεψαν το θαλάσσιο νερό να εισχωρήσει και, να προκαλέσει βίαιες εκρήξεις που κονιορτοποίησαν το μάγμα και εκτόξευσαν μεγάλα λιθικά θραύσματα. Οι μεγακυματισμοί κινήθηκαν πλευρικά, οριζόντια και ακτινωτά με τη μορφή

δακτυλιοειδούς νέφους με μεγάλες ταχύτητες (50-180 km/hr). Το πάχος των αποθέσεων κυμαίνεται από 0.1-12 m, και εξαρτάται από το τοπογραφικό ανάγλυφο. Κοντά στο κέντρο της έκρηξης οι μεγακυματισμοί ανέρχονται σε πρηνή με κλίσεις 10-30ο και ύψος 200-400 m. Καθώς όμως απομακρύνονται, λεπταίνουν σημαντικά, ενώ λείπουν από το βουνό του Προφήτη Ηλία. Χαρακτηριστικές είναι διασταυρούμενες δομές των στρώσεων, οι ρυτιδώσεις και οι θίνες, καθώς επίσης και τα βαθουλώματα που σχηματίζουν τα λιθικά στα χαλαρά υλικά, που δείχνουν βαλλιστική μεταφορά.

3. Μινωική Γ

Αυτή είναι η τρίτη φάση της έκρηξης. Αντιστοιχεί σε ροές στάχτης (ash-flows). Οι αποθέσεις αποτελούνται από παχιά στρώματα λεπτόκοκκης στάχτης και κίσηρης που περιέχουν 25-30% λιθικά μεγέθους έως και 10 m. Έχουν χαοτική και μη ταξινομημένη διάταξη. Το πάχος των αποθέσεων είναι μεγαλύτερο σε τοπογραφικά χαμηλές περιοχές. Στα πρηνή της καλδέρας το μέγιστο πάχος είναι 40 m, στη νότια Θήρα 55 m και μειώνεται σημαντικά με την απόσταση. Από το βουνό του Προφήτη Ηλία λείπουν. Τα λιθικά δείχνουν ότι μεταφέρθηκαν με ροή και λίγα είναι αυτά που δείχνουν βαλλιστική μεταφορά. Οι ροές είχαν μεγάλη ενέργεια, αφού σε ορισμένα σημεία στις πλαγιές του Προφήτη Ηλία και του Μεγάλου Βουνού ανέρχονται σε πρηνή με κλίση 30ο. Για την προέλευσή τους υπάρχουν διάφορες απόψεις. Μία από αυτές θεωρεί ότι αυτές οι ροές στάχτης δημιουργήθηκαν στον κρατήρα που είχε ήδη διευρυνθεί πολύ και, σαν "γάλα που βράζει" ξεχείλισαν τα τοιχώματα της καλδέρας. Η πληθώρα των λιθικών οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη φάση αυτή άρχισε η κατάρρευση του μαγματικού θαλάμου και ο σχηματισμός της καλδέρας.

4. Μινωική Δ

Αυτή είναι η τέταρτη φάση της έκρηξης. Οι αποθέσεις της φάσης αυτής διαφέρουν από αυτές της τρίτης φάσης. Αποτελούνται από πιο λεπτόκοκκα υλικά που περιέχουν μικρά λιθικά και κλάσματα κίσηρης. Η συγκέντρωση όμως των λιθικών είναι μεγαλύτερη (34-50%). Οι αποθέσεις στα πρηνή της καλδέρας έχουν μικρό πάχος (0.7-2 m) ή λείπουν, ενώ στην παραλία έχουν πάχος έως και 40 m. Οι αποθέσεις αυτές διαβρώνονται πολύ εύκολα και από κάποια σημεία του νησιού λείπουν εντελώς. Η προέλευσή τους είναι αμφιλεγόμενη. Κάποιοι υποστηρίζουν ότι τα υλικά της τέταρτης φάσης είναι επεξεργασμένα υλικά της τρίτης φάσης με διαδικασίες όπως πλημμύρες κατά τη δημιουργία της καλδέρας, βροχές, τσουνάμι, άνεμοι καλλιέργειες κ.ά. Κάποιοι άλλοι θεωρούν ότι είναι ιγκνιμβρίτες που αποτέθηκαν από πυροκλαστικές ροές.

4.3.1.2 Επιπτώσεις

Μέσα σε λίγες μέρες εκτινάχτηκαν στον αέρα 39 km³ μάγματος με τη μορφή ελαφρόπετρας και στάχτης που κάλυψαν το νησί της Θήρας και της Θηρασίας με αποθέσεις πάχους δεκάδων μέτρων. Η ηφαιστειακή στάχτη ταξιδεύοντας προς τα ανατολικά απλώνεται στην ανατολική Μεσόγειο και Μικρά Ασία αποθέτοντας στρώμα στάχτης πάχους 30 cm στη Ρόδο και Κω και 15 cm σε λίμνες της Μικράς Ασίας. Η λεπτή ηφαιστειακή σκόνη και τα σταγονίδια θειικού οξέος εισέρχονται στη στρατόσφαιρα και καλύπτουν όλη την υδρόγειο προκαλώντας ηφαιστειακό χειμώνα με μείωση της θερμοκρασίας 1-2 οC. Ίχνη της στάχτης έχουν βρεθεί σε παγετώνες της Γροιλανδίας, ενώ τα αποτελέσματα του ηφαιστειακού χειμώνα έχουν καταγραφεί σε κορμούς δέντρων στις ΗΠΑ και Ασία. Η κατακρήμνιση του ηφαιστείου και ο σχηματισμός καλδέρας δημιουργεί τεράστια παλιρροϊκά κύματα (τσουνάμι) που σαρώνουν τα παράλια του Αιγαίου και της ανατολικής Μεσογείου. Τα ηφαιστειακά προϊόντα καλύπτουν τους οικισμούς της ύστερης εποχής του Χαλκού που εν τω μεταξύ έχουν μετατραπεί σε ερείπια λόγω των σεισμών. Οι αρχαιολογικές ανασκαφές στο Ακρωτήρι, που αρχίζουν

συστηματικά το 1969 από τον αρχαιολόγο Σπύρο Μαρινάτο, αποκαλύπτουν ένα πολιτισμό εφάμιλλο της Μινωικής Κρήτης (www.geo.auth.gr).

4.3.2. Krakatau (Ινδονησία 1883)

4.3.2.1 Ιστορικό

Το πρωί της 20^{ης} Μαΐου 1883 ο πλοίαρχος του γερμανικού θωρηκτού Elizabeth ανέφερε ότι είδε ένα σύννεφο από στάχτη και σκόνη να ανέρχεται από το ακατοίκητο νησί Krakatau σε ύψος περίπου 11 km. Αυτή ήταν το πρώτο σημάδι δραστηριότητας του ηφαιστείου της Ινδονησίας μετά από δύο αιώνες. Τους επόμενους δύο μήνες τα πληρώματα και οι επιβάτες επιβατηγών πλοίων έβλεπαν παρόμοιες εκρήξεις που συνοδεύονταν από σύννεφα στάχτης και κίσηρης. Στα γειτονικά νησιά της Ιάβας και Σουμάτρας, όλα αυτά τα θεαματικά επεισόδια δημιουργούσαν μία γιορτινή ατμόσφαιρα ανάμεσα στους εντυπωσιασμένους ιθαγενείς, οι οποίοι ωστόσο ούτε που φαντάζονταν ότι αυτά ήταν μόνο η αρχή μιας από τις μεγαλύτερες εκρήξεις στην ιστορία του ανθρώπου. Μία σειρά τεράστιων καταστροφικών εκρήξεων ξεκίνησε στις 26 Αυγούστου και τελείωσε στις 27 Αυγούστου 1883 με μία πελώρια παροξυσμική έκρηξη. Τη μέρα αυτή τα δύο τρίτα στα βόρεια του νησιού Krakatau κατέρρευσαν μέσα στη θάλασσα, σχηματίζοντας τεράστιες πυροκλαστικές ροές και τσουνάμι που ερήμωσαν τα γειτονικά παράλια. Εκατοντάδες παράκτιες πόλεις και χωριά ισοπεδώθηκαν και 36.000 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους.

Πριν την έκρηξη του 1883 το Krakatau αποτελούνταν από τρία νησιά: τα νησιά Lang και Verlaten, υπολείμματα μίας προηγούμενης μεγάλης καλδερικής έκρηξης, και το Krakatau με μέγεθος 9x5 km. Πάνω στο Krakatau υπήρχαν τρία ηφαίστεια ευθυγραμμισμένα σε μία Β-ΒΔ κατεύθυνση, το Perboewatan, το Danan και το Rakata. Κατά την έκρηξη το το Perboewatan, το Danan και το βόρειο μέρος του Rakata υποχώρησαν στον άδειο μαγματικό θάλαμο, σχηματίζοντας έτσι μία υποθαλάσσια καλδέρα και εξαφανίζοντας τα δύο τρίτα του νησιού. Ακόλουθες εκρήξεις από το 1927 και εντεύθεν δημιούργησαν ένα νέο κώνο στο κέντρο της καλδέρας του 1883, που ονομάζεται Anak Krakatau (=το παιδί του Krakatau).

Μετά το ξύπνημα του Krakatau της 20^{ης} Μαΐου 1883, συνέβησαν κατά το διάστημα Μαΐου-Ιουνίου κάποιες μικρές εκρήξεις από το Perboewatan. Μέχρι τα μέσα Ιουνίου καταστράφηκε σε μεγάλο μέρος ο κεντρικός κρατήρας του Perboewatan, ενώ συγχρόνως άρχισαν εκρήξεις και από το ηφαίστριο Danan. Μέχρι τα μέσα Ιουλίου παρατηρούνταν στρώματα κίσηρης να επιπλέουν στη θάλασσα στα στενά Sunda. Τα αρχικά προϊόντα των εκρήξεων είχαν βασαλτική σύσταση, γεγονός που έδειχνε ότι η είσοδος βασαλτικού μάγματος στο μαγματικό θάλαμο κάτω από το Krakatau πιθανότατα ήταν η αιτία για αυτές τις πρόδρομες εκρήξεις.

Στις 26 Αυγούστου στη 1 μμ. περίπου ξεκίνησε μία σειρά προοδευτικών εκρήξεων που θα κορυφώνονταν το απόγευμα της 27^{ης} Αυγούστου. Αρχικά μία ομοβροντία εκρήξεων που συνοδεύονταν από εκκωφαντικό θόρυβο δημιούργησε μία μαύρη εκρηκτική στήλη από πυροκλαστικά υλικά που ανέβηκε γρήγορα σε ύψος 25 km πάνω από το νησί. Τις επόμενες ώρες το νέφος απλώθηκε βορειοανατολικά φτάνοντας σε ύψος τουλάχιστον 36 km. Η ένταση των εκρήξεων αυξανόταν σταδιακά κατά τη διάρκεια της ημέρας, τρομοκρατώντας τις παράκτιες κοινωνίες στη δυτική Σουμάτρα, στη δυτική Ιάβα και στα γειτονικά νησιά. Αργότερα, τα χωριά αυτά κτυπήθηκαν από τεράστια τσουνάμι που προκάλεσαν οι πυροκλαστικές ροές που βυθίζονταν στη θάλασσα. Το χειρότερο όμως δεν είχε έρθει ακόμη.

Στις 27 Αυγούστου η ηφαιστειακή δραστηριότητα κορυφώθηκε με μία σειρά τεσσάρων τουλάχιστον φοβερών εκρήξεων που ξεκίνησαν στις 5.30 πμ. και κατέληξαν σε μία κατακλυσμική έκρηξη στις 10 πμ. που στην κυριολεξία ανατίναξε το Krakatau. Ο ήχος ταξίδεψε

στον Ινδικό ωκεανό σε απόσταση 4.600 km, και η έκρηξη έγινε αισθητή από τη Σρι Λάνκα στα δυτικά μέχρι την Αυστραλία στα ανατολικά. Τα δύο τρίτα του νησιού βυθίστηκαν στη θάλασσα μέσα στο μαγματικό θάλαμο που άδειαζε. Περίπου 23 km² του νησιού, συμπεριλαμβανομένων και των ηφαιστίων Perboewatan και Danan, κατέρρευσαν σχηματίζοντας μία καλδέρα διαμέτρου περίπου 6 km. Από ένα υψόμετρο 450 m που είχε το Danan βυθίστηκε σε βάθος 250 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Η ισχύς της έκρηξης υπολογίζεται ότι ήταν 13.000 φορές μεγαλύτερη από αυτήν της ατομικής βόμβας που κατέστρεψε τη Χιροσίμα. Η μόνη μεγαλύτερη έκρηξη στη σύγχρονη εποχή ήταν του ηφαιστίου Tambora (Ινδονησία) το 1815. Η συγκλονιστική έκρηξη της 27^{ης} Αυγούστου 1883 προκάλεσε τεράστια τσουνάμι ύψους μέχρι 40 m (όσο ένα 13όροφο κτίριο) που ερήμωσαν τις παράκτιες περιοχές κατά μήκος του πορθμού Sunda. Συγκριτικά αναφέρουμε, ότι τα τσουνάμι που προκάλεσε ο σεισμός μεγέθους 9 της κλίμακας Ρίχτερ το Δεκέμβριο 2004 στην ίδια περιοχή και τα οποία κόστισαν τη ζωή σε 230.000 ανθρώπους είχαν ύψος 30 m.

4.3.2.2 Επιπτώσεις

Τα τσουνάμι ευθύνονται για τις περισσότερες απώλειες από την έκρηξη του Krakatau. Εντούτοις, περίπου 4.500 θάνατοι (πάνω από το 10%) αποδίδονται στις πτώσεις τέφρας και στις πυροκλαστικές ροές. Ο όγκος της τέφρας που εκτινάχθηκε από το ηφαίστειο ανέρχεται σε περίπου 20 km³, είκοσι φορές περισσότερη από αυτήν της καταστροφικής έκρηξης της Αγίας Ελένης (ΗΠΑ) το 1980. Κοντά στη Σουμάτρα η θάλασσα είχε τόση τέφρα που έμοιαζε με ξηρά. Για εβδομάδες ήταν αδύνατο να πλησιάσουν τα σωστικά σκάφη στις παράκτιες περιοχές όπως το Telok Betong. Τους επόμενους μήνες οι άνεμοι και η παλίρροια διασκόρπισε τα στρώματα κίσηρης πέρα από τα στενά Sunda στη θάλασσα της Ιάβας και τον Ινδικό ωκεανό. Υπάρχουν αναφορές από πλοία, που έπλεαν χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά από το Krakatau, για στρώματα κίσηρης που επέπλεαν στο νερό. Ένα τέτοιο έφτασε στη Νότια Αφρική πάνω από 8.000 km μακριά το Σεπτέμβριο του 1884.

Περίπου 2.000 θύματα στη νότια Σουμάτρα είχαν σοβαρά εγκαύματα, πιθανότατα από τις πυροκλαστικές ροές. Μολονότι η συμπεριφορά των πυροκλαστικών ροών και των μεγακυματισμών δεν έχει εξηγηθεί πλήρως με άμεσες παρατηρήσεις, φαίνεται ότι μπορούν να ταξιδεύσουν μεγάλες αποστάσεις πάνω από το νερό. Αυτό δείχνουν τα στοιχεία της έκρηξης του Krakatau, αφού οι πυροκλαστικές ροές διήνυσαν την απίστευτη απόσταση των 40 km πάνω από τη θάλασσα του πορθμού Sunda και διατήρησαν τη θερμότητά τους ώστε να προκαλέσουν τα εγκαύματα στα θύματά τους. Υπάρχουν όμως και μαρτυρίες από τα πλοία που βρίσκονταν εκείνη τη στιγμή σε ακόμη μεγαλύτερες αποστάσεις. Στις 27 Αυγούστου το πλοίο Louden ήταν σε απόσταση 65 km βόρεια του Krakatau όταν κτυπήθηκε από δυνατούς άνεμους και τέφρα, ενώ το πλοίο W.H.Besse ήταν σε απόσταση 80 km βορειοανατολικά όταν κτυπήθηκε από θυελλώδεις ανέμους, τέφρα και την οσμή θείου.

Πως όμως είναι δυνατόν οι πυροκλαστικές ροές να ταξιδεύουν σε τόσο μεγάλες αποστάσεις; Οι πυροκλαστικές ροές είναι καυτά μίγματα από στερεά πυροκλαστικά και διαστελλόμενα ηφαιστειακά αέρια. Καθώς προωθούνται πάνω από το νερό, στη βάση της ροής το νερό μετατρέπεται σε ατμό. Η απότομη εξάτμιση του νερού ενισχύει τη ρευστοποίηση του νέφους και εμποδίζει την απόθεση των στερεών σωματιδίων, ιδίως των βαρύτερων κομματιών κίσηρης. Έτσι επιτρέπει στις πυροκλαστικές ροές να διανύουν αποστάσεις δεκάδων χιλιομέτρων πάνω από τη θάλασσα. Η πρώτη φορά που αναγνωρίστηκε αυτό το φαινόμενο ήταν στην περίπτωση του ηφαιστίου Πελέ το 1902, όπου το πυρακτωμένο νέφος αφού αφάνισε την πόλη St. Pierre συνέχισε πάνω από τη θάλασσα για αρκετά χιλιόμετρα και έκαψε τα αγκυροβολημένα πλοία.

Τις επόμενες μέρες της έκρηξης η τέφρα παρασύρθηκε από τον άνεμο έως και 2.500 km. Το νέφος της λεπτόκοκκης ηφαιστειακής σκόνης, όμως, διασκορπίστηκε στη στρατόσφαιρα και περιέβαλε τη ζώνη του Ισημερινού μέσα σε δύο εβδομάδες. Τα επόμενα χρόνια έμεινε στην ατμόσφαιρα και επεκτάθηκε προς βορρά και νότο πριν τελικά να διαλυθεί.

Αυτό το νέφος περιείχε επίσης μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του θείου που εκπέμφθηκε από το Krakatau. Τα μόρια του αερίου ενώθηκαν με τους υδρατμούς και σχημάτισαν σταγονίδια θειικού οξέος. Αυτά τα όξινα αερολύματα μαζί με την ηφαιστειακή σκόνη σχημάτισε ένα ατμοσφαιρικό κάλυμμα που εμπόδιζε την ηλιακή ακτινοβολία, προκαλώντας έτσι πτώση της θερμοκρασίας παγκοσμίως κατά μερικούς βαθμούς.

Επίσης δημιουργήθηκαν πρωτοφανή οπτικά φαινόμενα που ήταν ορατά στο 70% της Γης. Έτσι, για αρκετά χρόνια μετά το 1883, ο ουρανός έπαιρνε εξωτικά χρώματα, ο ήλιος και η σελήνη περιβάλλονταν από άλω (φωτοστέφανα) και ενώ το λυκαυγές και το λυκόφως ήταν κατακόκκινα. Τα φαινόμενα αυτά εντυπωσίασαν αρκετούς ζωγράφους της εποχής, οι οποίοι τα αποτύπωσαν στους πίνακές τους.

4.3.2.3 Το ηφαίστειο σήμερα

Μετά από 44 χρόνια, στις 26 Δεκεμβρίου 1927, το ηφαίστειο ξύπνησε ξανά ξαφνιάζοντας μια ομάδα Γιαπωνέζων ψαράδων που είδαν ατμούς και τέφρα να βγαίνουν μέσα από τη θάλασσα στην καλδέρα. Η ηφαιστειακή δράση συνεχίστηκε και στις 26 Ιανουαρίου 1928 εμφανίστηκε πάνω από το νερό η κορυφή ενός βασιλικού κώνου σκωριών. Ένα χρόνο αργότερα είχε δημιουργηθεί ένα μικρό νησί που ονομάστηκε Anak Krakatau (=το παιδί του Krakatau).

Το Anak Krakatau έδωσε αρκετές εκρήξεις μέχρι σήμερα. Αυτές έχουν στρομπόλιο και βουλκάνιο χαρακτήρα με λάβες και τέφρα βασαλτικής ανδεσιτικής σύστασης. Μολονότι αυτή τη στιγμή δεν φαίνεται να υπάρχει κίνδυνος για τα γειτονικά νησιά, οι εκρήξεις του Anak Krakatau θυμίζουν πάντα τον τρόπο του 1883 (www.geo.auth.gr).

4.3.3. Αγία Ελένη (ΗΠΑ 1980)

Η έκρηξη του ηφαιστίου της Αγίας Ελένης (Mount St. Helens) το 1980 είναι η καλύτερα μελετημένη ηφαιστειακή έκρηξη στον εικοστό αιώνα. Ο περισσότερος κόσμος δεν μπορούσε να φανταστεί ότι μία τέτοια βίαιη εκδήλωση ηφαιστειότητας θα συνέβαινε στις ΗΠΑ. Εντούτοις οι ηφαιστειολόγοι ήταν ενήμεροι και περίμεναν τον επερχόμενο κίνδυνο. Μήνες πριν την έκρηξη, η Αμερικανική Γεωλογική Υπηρεσία (U.S. Geological Survey, USGS) εγκατέστησε στο Vancouver του Washington το επιχειρησιακό κέντρο παρακολούθησης του ηφαιστίου.

4.3.3.1 Ιστορικό

Το πρωί της 18^{ης} Μαΐου 1980 ο ηφαιστειολόγος David Johnston κατασκήνωσε στο Coldwater Ridge σε μικρή απόσταση από το όρος της Αγίας Ελένης, όταν συνέβη η έκρηξη. Στις 8.32 πμ. ο Johnston αναφώνησε στον ασύρματο προς τη βάση της USGS "Vancouver, Vancouver αυτό είναι!". Αυτά ήταν και τα τελευταία του λόγια. Η επακόλουθη έκρηξη ισοπέδωσε τη βόρεια πλαγιά του ηφαιστίου, σκοτώνοντας τον Johnston και άλλους 56 ανθρώπους.

Την ίδια ώρα οι γεωλόγοι Keith και Dorothy Stoffel πετούσαν με ένα μικρό αεροπλάνο μόλις 400 m από την κορυφή του βουνού της Αγίας Ελένης. Από εκείνο το σημείο έγιναν μάρτυρες μίας από τις μεγαλύτερες κατολισθήσεις στην ιστορία. Δευτερόλεπτα αργότερα, μία τεράστια έκρηξη ανατίναξε τη βόρεια πλευρά του ηφαιστίου προς την κατεύθυνση του Coldwater Ridge και Spirit Lake. Η έκρηξη δημιούργησε ένα στροβιλώδες νέφος συνοδευόμενο

από πολλούς κεραυνούς που ανέβηκε σε ύψος χιλιάδων μέτρων. Το νέφος εξαπλώθηκε γρήγορα προς την πλευρά του αεροπλάνου, το οποίο μόλις και κατάφερε να σωθεί κάνοντας στροφή προς το νότο.



Εικόνα 4-3: Η έκρηξη του ηφαιστείου Αγία Ελένη στις ΗΠΑ το 1980 (www.geo.auth.gr 2018).

4.3.3.2 Επιπτώσεις

Το στρωματοηφαίστειο της Αγίας Ελένης βρίσκεται γεωγραφικά στη δυτική ακτή των Ηνωμένων Πολιτειών και συγκεκριμένα στην πολιτεία Washington. Είναι ένα από τα δεκαπέντε ενεργά ηφαίστεια της οροσειράς Cascade (Cascade Range), τα οποία συνδεόνται με περιβάλλον κατάδυσης. Η έκρηξη της 18^{ης} Μαΐου 1980 έμελλε να αλλάξει δραματικά τη μορφολογία του ηφαιστείου. Ανατίναξε πλευρικά τη βόρεια πλαγιά του και ισοπέδωσε εκατομμύρια έλατα σε μία περιοχή 600 km². Στη συνέχεια η περιοχή αυτή δέχτηκε τεράστιες ροοστιβάδες συντριμμάτων (debris avalanche) ακολουθούμενες από πολυάριθμα λαχάρ και πυροκλαστικές ροές. Αυτές ακολούθησαν τις βασικές κοιλάδες του υδρογραφικού συστήματος όπως North- και South Forks του Toutle River, Spirit Lake, και Coldwater Ridge (Johnston Ridge).

Η απελευθέρωση του τεράστιου όγκου αερίων από το μαγματικό θάλαμο είχε ως αποτέλεσμα να υποχωρήσουν οι πλινιακές εκρήξεις. Το ιξώδες και φτωχό πλέον σε αέρια μάγμα άρχισε να ανεβαίνει αργά στον κεντρικό αγωγό του ηφαιστείου της Αγίας Ελένης και μετά την έκρηξη της 12^{ης} Ιουνίου 1980 άρχισε να σχηματίζεται στον κρατήρα ένας θόλος λάβας.

Πιθανότατα, ο θόλος λάβας ανέβαινε στον κεντρικό πόρο και πριν την έκρηξη της 12^{ης} Ιουνίου, αλλά δεν ήταν ακόμη ορατός. Σε αυτό συνηγορεί η σύσταση των πυροκλαστικών ροών της 12^{ης} Ιουνίου. Οι πυροκλαστικές ροές των προηγούμενων εκρήξεων (18 και 25 Μαΐου) ήταν ρεύματα κίσηρης που προήλθαν από την κατάρρευση της εκρηκτικής στήλης και οι αποθέσεις ήταν ιγκνιμβρίτες πλούσιες σε κίσηρη. Αντίθετα, οι πυροκλαστικές ροές της έκρηξης στις 12 Ιουνίου περιείχαν άφθονα θραύσματα συμπαγούς μη φυσαλιδοποιημένης δακτικικής λάβας και σχημάτισαν αποθέσεις τεμαχών και στάχτης (block and ash deposits). Οι αποθέσεις

αυτές είναι τυπικές των πυρακτωμένων νεφών (*nuée ardentes*) που δημιουργούνται από καταρρεύσεις θόλων.

Ο θόλος που σχηματίστηκε στις 12 Ιουνίου καταστράφηκε με την έκρηξη της 12ης Ιουλίου. Ξανασχηματίστηκε και ξανακαταστράφηκε κατά τη διάρκεια της έκρηξης στις 16-18 Οκτωβρίου. Έτσι, μετά από κάθε έκρηξη, νέο μάγμα ανέβαινε στον κεντρικό αγωγό και δημιουργούσε νέο θόλο. Διαδοχικά σχηματίστηκαν τρεις θόλοι. Ο τρίτος θόλος αυξήθηκε εντυπωσιακά κατά το 1983 (www.geo.auth.gr).

4.3.4. Eyjafjallajökull (Ισλανδία 2010)

Το ηφαίστειο Eyjafjallajökull στην Ισλανδία βρίσκεται 125km ανατολικά του Ρέικιαβικ. Η διάμετρος του κρατήρα του είναι 3-4km και ανήκει στο είδος Stratovolcano. Βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος 63.633°N και γεωγραφικό μήκος 19.633°W. Με το ίδιο όνομα αναφέρεται και ο παγετώνας που καλύπτει τον ηφαιστειακό κρατήρα και έχει έκταση 100km². Εκτείνεται νότια του ηφαιστείου, καταλήγοντας στις ακτές του Ατλαντικού Ωκεανού. Η έκρηξη επηρέασε την οικονομική, πολιτική και κοινωνική δραστηριότητα όχι μόνο της περιοχής αλλά και της Ευρώπης και όλου του κόσμου (Bye B., 2011).

4.3.4.1 Ιστορικό

Η τελευταία ημέρα της συνεχούς δραστηριότητας του Eyjafjallajökull υπήρξε η 22η Μαΐου 2010. Μέχρι τις 23 Ιουνίου 2010, η Μετεωρολογική Υπηρεσία της Ισλανδίας (IMO, Iceland Meteorological Office) και το Πανεπιστημιακό Ινστιτούτο Γεωεπιστημών της Ισλανδίας (IES, Institute of Earth Sciences), έπαψε να εκδίδει τακτικές εκθέσεις για την κατάσταση.

Το ηφαίστειο είναι ενεργό από τον 9ο αιώνα και παρουσιάζει συχνή ηφαιστειακή δραστηριότητα. Εξερράγη διαδοχικά τα έτη 902, 1612, 1821, 1823 και 2010. Η έκρηξη όμως του Απριλίου 2010 ήταν αυτή που δημιούργησε το μεγαλύτερο πρόβλημα λόγω του ηφαιστειακού νέφους που κάλυψε το μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης. Μια σειρά επαναλαμβανόμενων μικροσεισμών αύξουσας έντασης στα τέλη του Δεκεμβρίου του 2009 σηματοδότησαν την ενεργοποίηση του ηφαιστείου. Στις 20 Μαρτίου λοιπόν ακολούθησε μια μικρή πλευρική έκρηξη, στη βορειο-ανατολική πλευρά του ηφαιστείου, σχηματίζοντας ένα πεδίο βασαλτικής λάβας 1.3 km² με όγκο 0.020 km³ έως τις 12 Απριλίου 2010. Η έκρηξη αυτή συνέβη σε αρκετή απόσταση από τον κρατήρα σε μια εκτεθειμένη κορυφογραμμή που καλύπτεται με εκτεταμένους παγετώνες. Κατά τη φάση αυτή υπήρχε πολύ μεγάλη εκτόνωση αερίων η οποία ενεργοποίησε τις υπηρεσίες ασφαλείας της Χώρας. Στις 27 Μαρτίου η έκρηξη ξεκίνησε με εκτίναξη τεραστίων ποσοτήτων ατμού υγροποιημένου πάγου, γεγονός που οδήγησε στην απομάκρυνση των κατοίκων της γύρω περιοχής (Smithsonian Institution, Global Volcanism Program).

Στη συνέχεια, μετά τους ατμούς, ακολούθησε μικρή ύφεση, και στις 14 Απριλίου οι εκρήξεις ξεκίνησαν στην αρχικά καλυμμένη με πάγο κορυφή του κρατήρα προκαλώντας την τήξη μεγάλων ποσοτήτων πάγου, που οδήγησε σε πλημμύρες στη νότια Ισλανδία. Επιπρόσθετα, αποτέλεσμα των εκρήξεων ήταν η εκτίναξη μεγάλων ποσοτήτων ηφαιστειακής τέφρας που έφτασε σε υψος έως και τα 10.000 χλμ. (33,000ft) καλύπτοντας περιοχές της βόρειας Ευρώπης αλλά και μέχρι της Ρωσίας. Μετά την τήξη των τμημάτων που είχαν καλυφθεί με πάγο, ο κρατήρας απελευθέρωνε σύννεφα λεπτόκοκκης τέφρας που παρέμειναν αιωρούμενα στην ατμόσφαιρα για μεγάλες αποστάσεις. Η τέφρα μεταφέρθηκε με τον αέρα πάνω από τον Ατλαντικό αλλά και πάνω από την Ευρώπη, με αποτέλεσμα να διακοπούν οι πτήσεις των εμπορικών αεροσκαφών για σχεδόν μία εβδομάδα με τελικό αντίκτυπο τις οικονομικές επιπτώσεις. Στην παρακάτω εικόνα δίνονται η έκταση που έφτασε η ηφαιστειακή τέφρα.

Η δραστηριότητα του ηφαιστείου συνεχίστηκε με φθίνουσα όμως πορεία για ακόμη 6 ημέρες. Μέχρι τις 20 Απριλίου είχε χάσει περίπου το 80% της αρχικής έντασής της. Την Κυριακή 18 Απριλίου ερευνητές από το Πανεπιστήμιο της Ισλανδίας εκτίμησαν ότι περίπου 750 τόνοι μάγματος εκτινάσσονταν από το ηφαίστειο κάθε δευτερόλεπτο. Μέχρι τις 20 Απριλίου το μεγαλύτερο μέρος του πάγου στον κρατήρα φαινόταν να είχε λιώσει και η ποσότητα του υλικού που εκτινασσόταν να έχει αυξηθεί σημαντικά. Καθώς το διαθέσιμο ποσό του πάγου που αλληλεπιδρούσε με το μάγμα μειωνόταν το ηφαίστειο άλλαξε από παραγωγή τέφρας σε παραγωγή κυρίως πύρινων σιντριβανιών. Μέχρι το τέλος Απριλίου η εκρηκτική δραστηριότητα είχε ουσιαστικά τελειώσει, με ένα αδύναμο «λοφίο» νέφους αποτελούμενο κυρίως από ατμό και τη λάβα που έρεε να έχει προχωρήσει λίγα χιλιόμετρα βόρεια από τον κρατήρα.

Στις αρχές Μαΐου, εκρηκτική δραστηριότητα άρχισε και πάλι να αυξάνεται, με περισσότερη τέφρα να εκτινάσσεται στο σύννεφο καπνού. Το σύννεφο έφθανε γενικά σε ύψος περίπου 4-6 χιλιόμετρα, αλλά μερικές φορές έφθανε μέχρι και τα 8-9 χλμ. Κατά τη διάρκεια των δύο πρώτων εβδομάδων του Μαΐου, η δραστηριότητα έγινε κυκλική, και τη σεισμική δραστηριότητα ακολουθούσε άνοδος μάγματος και αερίων από το βάθος κάτω από το ηφαίστειο. Η εκρηκτική δράση τώρα γινόταν από αέριο διαλυμένο στο αυξανόμενο μάγμα, παρά από την αλληλεπίδραση του μάγματος με το νερό. Η εκρηκτική δραστηριότητα μειώθηκε σταδιακά και μέχρι τις 23 Μαΐου ελάχιστη ή καθόλου τέφρα εκτινασσόταν από το ηφαίστειο.

4.3.4.2 Επιπτώσεις

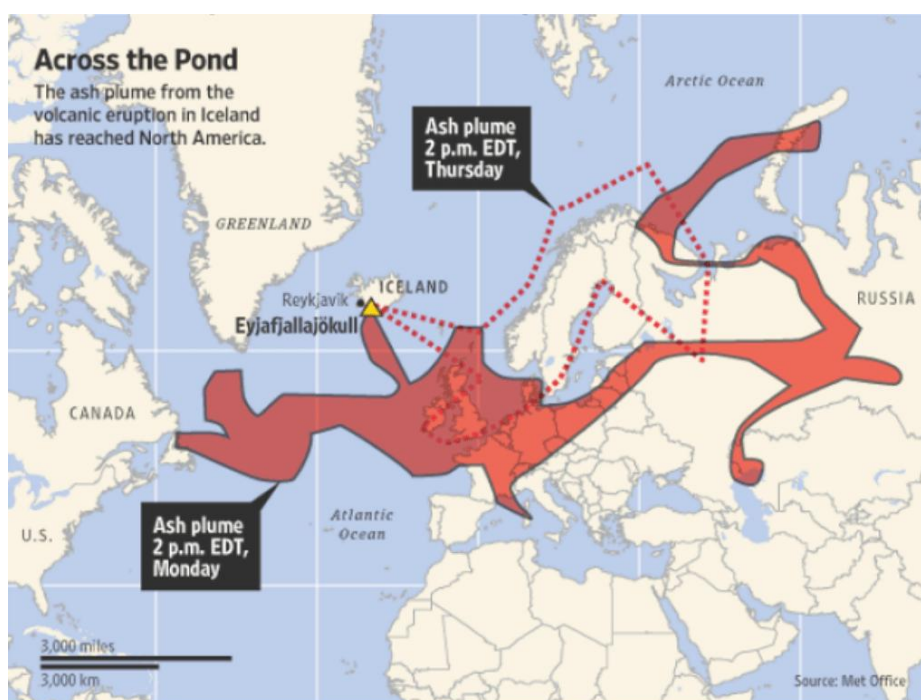
Η έκρηξη του ηφαιστείου Eyjafjallajökull αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα του μεγέθους της καταστροφής που μπορεί να προκληθεί στην οικονομία όχι μόνο μιας χώρας αλλά και άλλων χωρών γειτονικών και μη. Πέραν των οικονομικών επιπτώσεων το ηφαιστειακό νέφος επηρέασε σημαντικά και την υγεία των κατοίκων. Ωστόσο δεν θα πρέπει να παραληφθούν και οι θετικές επιδράσεις. Η περιοχή αργότερα έγινε τουριστικό αξιοθέατο και ενίσχυσε μακροπρόθεσμα σημαντικά την οικονομία της Ισλανδίας. Επιπρόσθετα, η λάβα και η τέφρα λόγω της πλούσιας σύστασής τους σε θρεπτικά συστατικά εμπλούτισαν το έδαφος και το κατέστησαν γόνιμο ώστε να χρησιμοποιηθεί ξανά για γεωργία.



Εικόνα 4-4: Έκρηξη του Eyjafjallajökull το 2010 (patrickmn.com 2018).

4.3.4.2.1 Στην οικονομία

Η μεγαλύτερη επίπτωση ήταν η διακοπή των αερομεταφορών. Τα αεροπορικά ταξίδια και οι μεταφορές ακυρώθηκαν σε όλο τον κόσμο λόγω των περιορισμών του εναερίου χώρου. Η τέφρα του ηφαιστείου οδήγησε σταδιακά στα μέσα του Απριλίου στο κλείσιμο μεγάλου μέρους του εναερίου χώρου της Ευρώπης, σε μια περίοδο επτά ημερών, προκαλώντας πάνω από 100,000 πτήσεις να ακυρωθούν. Η μέγιστη επίδραση ήταν την Κυριακή 18 και τη Δευτέρα 19 Απριλίου όπου ακυρώθηκαν περίπου 19.000 πτήσεις ανά ημέρα. Η εξάπλωση του νέφους τέφρας όπως απεικονίζεται στον παρακάτω χάρτη οδήγησε στο κλείσιμο μεγάλου μέρους εναερίου χώρου του Ηνωμένου Βασιλείου και των Σκανδιναβικών Χωρών.



Εικόνα 4-5: Παγκόσμιες επιπτώσεις στην οικονομία της αεροπλοΐας από την έκρηξη στην Ισλανδία το 2010 (Aviation Sectoral Plan 2018).

Η αρχική εκτίμηση της Διεθνούς Ένωσης Αεροπορικών Μεταφορών (International Air Transport Association IATA) ήταν, ότι 200 εκ US δολάρια εσόδων ανά ημέρα από τη μεταφορά επιβατών, επήλθε ως αντίκτυπο στις εμπορικές αεροπορικές εταιρείες, βασισμένα στο κλείσιμο του συγκεκριμένου εναερίου χώρου όπως απεικονίζεται ανωτέρω. Όμως το κλείσιμο του Ευρωπαϊκού εναερίου χώρου προκάλεσε στις εταιρείες να χάσουν περίπου 400 εκ. US δολάρια ανά ημέρα από τις προγραμματισμένες υπηρεσίες τους όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Αυτή η απώλεια στις εταιρείες καθώς και η προηγούμενη των 200 εκ US δολαρίων βασίστηκε σε bottom up διαδικασία υπολογισμού από δεδομένα επιβατών και των εσόδων όπως προέκυψαν από χιλιάδες ζεύγη χωρών. Τελικά η Ένωση εκτίμησε ότι οι συσσωρευμένες απώλειες κατά την περίοδο αυτή από τακτικές υπηρεσίες μεταφοράς επιβατών και εμπορευμάτων ήταν 1,7 δις US δολάρια. Επίσης πάνω από 1,2 εκ επιβάτες τακτικών αερογραμμών είχαν επηρεαστεί κάθε μέρα. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εκτίμησε το συνολικό αριθμό των επιβατών που δεν μπόρεσαν να ταξιδέψουν για όλη την περίοδο σε 10 εκατομμύρια. Το γεγονός αυτό ανάγκασε τις εταιρείες να επωμιστούν το κόστος διαμονής των επιβατών σε ξενοδοχεία, το οποίο ανήλθε λίγο κάτω από τα 200 εκ ευρώ εκτιμώμενο από την Ένωση Ευρωπαϊκών Αεροπορικών Εταιρειών – Association of European Airlines (AEA) σε όλη τη διάρκεια της περιόδου.

Εκτός από τις αερομεταφορές η έκρηξη επηρέασε την ευρωπαϊκή, αφρικανική και ασιατική οικονομία. Αρκετοί τομείς που εξαρτώνται από τις εισαγωγές και τις εξαγωγές

αερομεταφερόμενων προϊόντων επλήγησαν σοβαρά από τις διαταραχές των πτήσεων. Ελλείψεις εισαγόμενων λουλουδιών, φρούτων και ηλεκτρονικού υλικού αναφέρθηκαν τις επόμενες ημέρες μετά τη διακοπή. Η Ολλανδία δεν ήταν σε θέση να προμηθεύσει ορχιδέες στη Βόρεια Αμερική. Οι εξαγωγές του υλικού πληροφορικής επηρεάστηκαν επίσης, καθώς οι επιχειρήσεις δεν ήταν σε θέση να στείλουν τα προϊόντα τους σε άλλες χώρες (BBC).

Επιπρόσθετα, και η φαρμακευτική βιομηχανία δέχτηκε ισχυρό πλήγμα, ενώ οι επιχειρηματίες και οι αξιωματούχοι εξέφρασαν ανησυχίες σχετικά με τις εισαγωγές νωπών τροφίμων και άλλων βασικών αγαθών στο Ηνωμένο Βασίλειο. Στην Κένυα είχαν καταστραφεί 400 τόνοι λουλουδιών, καθώς το αεροπλάνο δεν ήταν σε θέση να ταξιδέψει στο Ηνωμένο Βασίλειο στις 19 και 20 Απριλίου 2010. Ως αποτέλεσμα, η οικονομία τους εκτιμάται ότι είχε απώλειες ύψους 3,8\$ εκατομμυρίων για κάθε ημέρα ματαίωσης της πτήσης. Χιλιάδες εργάτες που απασχολούνταν στις καλλιέργειες λουλουδιών και λαχανικών, απολύθηκαν προσωρινά. Η βιομηχανία λουλουδιών και λαχανικών της Ζάμπια έχανε περίπου 150.000\$ ανά ημέρα. Άλλες αφρικανικές βιομηχανίες, όπως αυτή των ψαριών, επηρεάστηκαν επίσης (Hanlon, 2010).

Στην Ασία, η αυτοκινητοβιομηχανία Nissan κήρυξε αναστολή στην παραγωγή τριών μοντέλων, αφού η προμήθεια ανταλλακτικών είχε διαταραχθεί. Ως αποτέλεσμα, σταμάτησε η παραγωγή 2.000 οχημάτων σε δύο εργοστάσια. Η Honda ανακοίνωσε επίσης μερική διακοπή της παραγωγής. Εργοστάσια της Κίνας 55 διέκοψαν ή καθυστέρησαν τις διά αέρος αποστολές ρούχων και κοσμημάτων. Στη Νότια Κορέα, η Samsung και η LG δεν ήταν σε θέση να μεταφέρουν εμπορεύματα που αντιστοιχούσαν σε περισσότερο από το 20% των καθημερινών εξαγωγών ηλεκτρονικών τους. Η Ομοσπονδία των βιομηχανιών του Χονγκ Κονγκ δήλωσε ότι τα ξενοδοχεία και τα εστιατόρια αντιμετώπιζαν ελλείψεις σε ευρωπαϊκά προϊόντα (BBC).

Αντίθετα με τις παραπάνω χώρες, η αλιευτική οικονομία της Νέας Ζηλανδίας βοηθήθηκε από τη διακοπή των αεροπορικών μεταφορών στην Ευρώπη. Λόγω της δυσκολίας μεταφοράς φρέσκου σολομού στις διεθνείς αγορές από τη Νορβηγία, πολλά κράτη είχαν αυξήσει σημαντικά τις παραγγελίες για τον σολομό της Νέας Ζηλανδίας.

4.3.4.2.2 Στην υγεία

Γενικά άτομα που έχουν εκτεθεί σε ηφαιστειακή ατμοσφαιρική ρύπανση παρουσιάζουν αυξημένο επιπολασμό και είναι ιδιαίτερα ευπαθή σε λοιμώξεις του ανώτερου και κατώτερου αναπνευστικού συστήματος. Μελέτες περίπτωσης που πραγματοποιήθηκαν στους κατοίκους της περιοχής απέδειξαν ότι έπειτα από έκθεση σε ηφαιστειακή τέφρα επηρεάζεται η λειτουργία των μακροφάγων. Είναι πιθανό η τέφρα να παρεμποδίζει την ικανότητα των μακροφάγων να θανατώνουν τα βακτήρια και ως αποτέλεσμα τα άτομα να έχουν εξασθενημένο ανοσοποιητικό σύστημα και τελικά να μην μπορούν να αντιμετωπίσουν ακόμη και απλές λοιμώξεις (Monick M. et al., 2013). Έξι με εννέα μήνες μετά την έκρηξη του ηφαιστείου Eyjafjallajökull, οι κάτοικοι που ζούσαν στην εκτεθειμένη περιοχή, ιδιαίτερα σε περιοχές πλησίον του ηφαιστείου, είχαν σημαντικά αυξημένο επιπολασμό σε διάφορα φυσικά συμπτώματα. Οι συμμετέχοντες από περιοχές μεσαίας και υψηλής έκθεσης είχαν σημαντικά υψηλότερα ποσοστά συμπτωμάτων του ανώτερου αναπνευστικού συστήματος, του δέρματος και ερεθισμό των ματιών σε σχέση με αυτά που εμφάνισαν άτομα από περιοχή χαμηλής έκθεσης. Αυτό υποδηλώνει μια δόσοεξαρτώμενη σχέση της έκθεσης στην τέφρα και των 56 σωματικών συμπτωμάτων της τέφρας.

Επίσης, ένα τμήμα του εκτιθέμενου πληθυσμού ανέφερε πολλαπλά συμπτώματα και ακόμη βρέθηκε σε κίνδυνο για μακροχρόνια φυσική και ψυχολογική νοσηρότητα. Κύριο μειονέκτημα των μελετών που αφορούσαν στις επιπτώσεις στην υγεία μετά την έκρηξη, ήταν ότι δεν υπήρχε ιατρικό ιστορικό των κατοίκων ώστε να δοθούν συγκριτικά αποτελέσματα.

4.3.4.3 Διαχείριση της καταστροφής

Για τη διαχείριση της κρίσης το Ηνωμένο Βασίλειο πήρε το προβάδισμα λόγω της σχετικής του γεινίασης με την Ισλανδία αλλά και της θέσης του μέσα στη διαδρομή του νέφους της τέφρας. Λόγω της έλλειψης ετοιμότητας, τα μέτρα διαχείρισης ήταν καθαρά αντιδραστικά. Οι Αρχές αντιμετώπισαν δυσκολίες λόγω της απουσίας δεδομένων που αφορούσαν στην ανοχή των αεροσκαφών σε τέφρα με τους Ευρωπαϊούς υπουργούς μεταφορών να υιοθετούν μια βραχυπρόθεσμη λύση. Δήλωσαν ότι η ηφαιστειακή τέφρα συγκέντρωσης έως και $2\text{mg}/\text{m}^3$ είναι «ασφαλής» για τη διεξαγωγή των εναέριων μεταφορών υπό την προϋπόθεση ότι εφαρμόστηκαν τα μέτρα μετριασμού του κινδύνου.

Όσον αφορά στους επτά εκατομμύρια επιβάτες, που αντιμετώπισαν σημαντικές καθυστερήσεις και χρηματικό κόστος, η Ευρωπαϊκή Οδηγία 261/2004 μετρίασε το πρόβλημα καθιερώνοντας την ευθύνη των αεροπορικών εταιρειών για την αποζημίωση των επιβατών σε περίπτωση ακύρωσης της πτήσης. Ωστόσο, οι μεταφορείς χαμηλού κόστους προσέβαλλαν με σφοδρότητα αυτή την απόφαση και δεν δέχτηκαν την εγγυημένη αποζημίωση των επιβατών. Οι αεροπορικές εταιρίες ήταν ανένδοτες στην αποζημίωση δεδομένου ότι η κατάσταση ήταν εκτός του δικού τους ελέγχου και δεν ήταν προετοιμασμένες για φυσική καταστροφή. Παρ' όλα αυτά, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή παρέμεινε πεπεισμένη ότι αυτές είχαν την ευθύνη να μην εγκαταλείψουν τους επιβάτες. Αργότερα τέθηκε σε εφαρμογή και το σχέδιο αποκατάστασης.

Σύμφωνα με τον Υπουργό Μεταφορών της Ισλανδίας το κόστος επισκευής των κατεστραμμένων δρόμων ανήλθε σε περισσότερα από 651.000 Ευρώ (BBC).

Κεφάλαιο 5.

Κύκλος Διαχείρισης της Καταστροφής

Κατά γενικό κανόνα, οι συνέπειες των φυσικών καταστροφών μπορούν να μετριαστούν με τη λήψη κατάλληλων μέτρων και αποφάσεων. Ομοίως και οι συνέπειες μιας ηφαιστειακής έκρηξης είναι εφικτό σε πολλές περιπτώσεις να μετριαστούν λαμβάνοντας τα κατάλληλα μέτρα πρόβλεψης και ετοιμότητας. Σε καμία περίπτωση όμως δεν μπορούν να εξαιρεθούν, γιατί μερικά γεγονότα είναι απρόβλεπτα. Τα μέτρα στοχεύουν πρωτίστως στη μείωση των απωλειών σε ανθρώπινες ζωές και δευτερευόντως στις οικονομικές απώλειες.

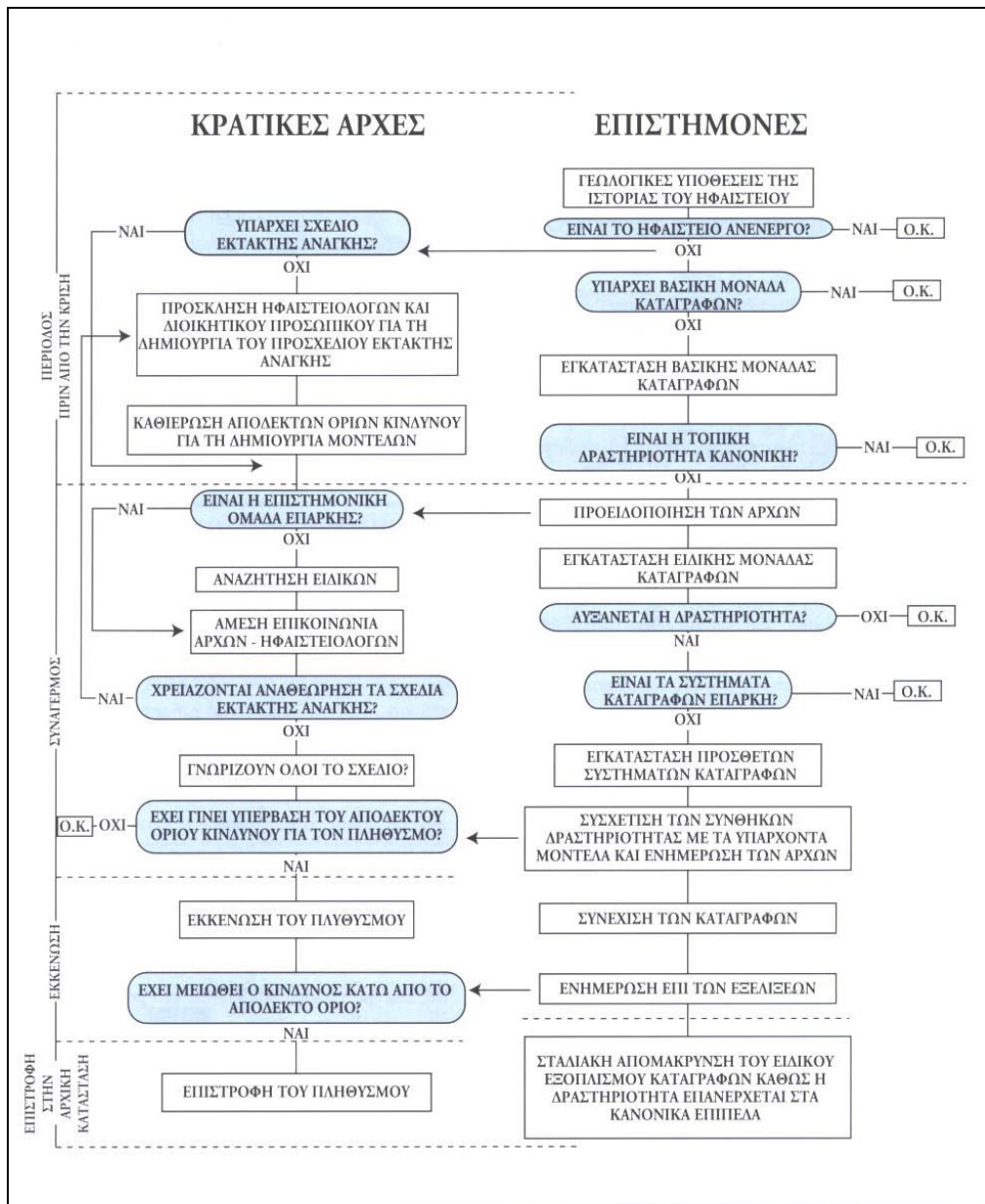
5.1. Διαχείριση του Ηφαιστειακού Κινδύνου

Οι προσπάθειες διαχείρισης κινδύνου είναι δυναμικές και σχεδιασμένες για να ελαχιστοποιήσουν τον κίνδυνο πριν βιωθούν οι επιδράσεις των ηφαιστειακών κινδύνων. Ο επιβεβλημένος τρόπος διαχείρισης του ηφαιστειακού κινδύνου έχει ως στόχο:

1. Να ελαχιστοποιήσει τον κίνδυνο απώλειας ζωής από την κατάρρευση δομών ή ζημιάς σε περίπτωση έκρηξης.
2. Να εγκαταστήσει τα κατάλληλα συστήματα συναγερμού προειδοποίησης και εκκένωσης.
3. Να προστατεύσει τροφοπαραγωγικές περιοχές και άλλες περιοχές σημαντικής οικονομικής δραστηριότητας.
4. Να βελτιώσει την αναμενόμενη απόδοση δομών και ιδρυμάτων περίθαλψης.
5. Να βελτιώσει τη λειτουργική δυνατότητα των δομών και των μηχανισμών βοήθειας που είναι ουσιαστικές στην μετά-εκρηκτική αποκατάσταση, κατά τη διάρκεια και μετά από μία έκρηξη, και για να ελαχιστοποιήσει τον κίνδυνο ζημιάς στις εγκαταστάσεις που βρίσκονται σε κίνδυνο.

5.2. Ανάλυση του Κινδύνου

Η ανάλυση του κινδύνου εστιάζεται στο μέγεθος και την συχνότητα των συνεπειών των ηφαιστειακών κινδύνων, καθώς επίσης και στους ίδιους τους ηφαιστειακούς κινδύνους. Τέτοιες αναλύσεις μπορούν να αρχίσουν με μια λογική ποσοτική κατανόηση του μεγέθους και της συχνότητας έκρηξης. Μελέτες που συνδυάζουν την ανάλυση κινδύνου με μια λεπτομερή εκτίμηση των τρωτών στοιχείων (δηλαδή, ανάλυση κινδύνου) είναι σχετικά σπάνιες. Σε γενικό επίπεδο, οι χάρτες ηφαιστειακού κινδύνου έχουν σχεδιαστεί με τους χάρτες δυνατής χρήσης γης για να παράγουν τους χάρτες καταλληλότητας χρήσης του εδάφους.



Εικόνα 5-1: Διαγράμμα ετοιμότητας για την αντιμετώπιση του ηφαιστειακού κινδύνου (Κυριακόπουλος, 2014).

Στην αλυσίδα διαχείρισης του κινδύνου (προσδιορισμός – ανάλυση – μείωση – μεταφορά του κινδύνου), σε κάποιο σημείο στη διαδικασία μείωσης θα γίνει σαφές ότι υπάρχουν διάφοροι κίνδυνοι που ο χειρισμός τους δεν είναι δυνατός. Αυτοί είναι οι κίνδυνοι που μπορούν να μεταφερθούν σε άλλα άτομα, οργανώσεις, κοινότητες, ιδρύματα, και κυβερνήσεις.

Η διαχείριση του κινδύνου για τους ηφαιστειακούς κινδύνους, περιλαμβάνει τη συνεργασία μεταξύ των ηφαιστειολόγων και μιας ευρείας ποικιλίας κοινοτικών συμμετοχών. Η διαχείριση κινδύνου ακολουθεί τον ανωτέρω κύκλο (προσδιορισμός – ανάλυση – μείωση – μεταφορά του κινδύνου) (Κυριακόπουλος, 2014).

Στα πλαίσια μείωσης του ηφαιστειακού κινδύνου έχει υποδειχθεί από την UNDR0 ένα σύνθετο σχέδιο ετοιμότητας, το οποίο παρουσιάζεται στον ανωτέρω πίνακα. Στο διάγραμμα διακρίνεται η στενή συνεργασία η οποία πρέπει να υπάρχει μεταξύ επιστημόνων και αρχών προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή αντιμετώπιση του κινδύνου.

5.3. Μέτρα Πρόληψης

5.3.1. Πριν την Έκρηξη

Το βασικότερο και σημαντικότερο από όλα κρίνεται η κατασκευή ενός σχεδίου έκτακτης ανάγκης στο οποίο θα απεικονίζονται οι ζώνες επικινδυνότητας. Πιο συγκεκριμένα κατασκευάζεται ένας χάρτης με τις ζώνες κινδύνου γύρω από το ηφαίστειο, οι οποίες ενδέχεται να επηρεαστούν από ένα ή περισσότερα καταστροφικά φαινόμενα κατά τη διάρκεια μιας έκρηξης και δίνονται με διάφορα χρώματα ανάλογα με την επικινδυνότητα. Η περιοχή που εκτίθεται σε κάθε είδος κινδύνου υποδιαιρείται σε δύο ή τρεις υπο-ζώνες που αντιστοιχούν σε εκρήξεις διαφορετικών μεγεθών. Επίσης, στους χάρτες των περιοχών κινδύνου σημαίνονται και οι περιοχές που επλήγησαν κατά τη διάρκεια της προηγούμενης έκρηξης με πλήρες ιστορικό και γεωλογικά στοιχεία. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτοί οι χάρτες επικινδυνότητας βασίζονται σε καθαρά γεωλογικά δεδομένα, σε στοιχεία από προηγούμενα συμβάντα, σε τοπογραφικά στοιχεία και σε πιθανά μοντέλα διασποράς των ηφαιστειακών προϊόντων, στα οποία συμπεριλαμβάνονται και μετεωρολογικές παράμετροι. Για πρακτικούς σκοπούς, π.χ. σχέδια εκκένωσης, οι τοπικές αρχές που είναι αρμόδιες για τη διαχείριση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης μπορεί να επεκτείνουν τα όρια ορισμένων ζωνών, προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι διαθέσιμοι οδοί διαφυγής, τα όρια των οικισμών, κ.λπ. (UNDRO).

Όσον αφορά στα κτίρια σε περιοχές που είναι πιθανό να επηρεαστούν από ηφαιστειακή έκρηξη, η μόνη προφύλαξη που μπορεί να ληφθεί είναι η κατασκευή από ανθεκτικά υλικά ή τουλάχιστον να υπάρξει ενίσχυση των ορόφων ώστε να αποφευχθεί η κατάρρευση. Προληπτικό μέτρο για τη μείωση του κινδύνου πρόκλησης ζημιών στο σύστημα παροχής νερού είναι η κάλυψη του εξοπλισμού και των αντλιών ώστε να μην εισχωρήσει η τέφρα και αργότερα να μπορέσει να απομακρυνθεί πιο εύκολα και γρήγορα. Ανάλογα μπορούν να καλυφθούν και οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Προαιρετικά συνίσταται και η κατασκευή φραγμάτων για την εκτροπή των ροών λάβας σε σημεία όχι τόσο επικίνδυνα και ενός συστήματος ψύξης ώστε μόλις έλθει σε επαφή η λάβα με το νερό να ψύχεται και να μη ρέει πλέον (CDC).

Πριν από την έκρηξη κάθε πολίτης θα πρέπει να είναι προετοιμασμένος για όλα τα ενδεχόμενα φαινόμενα που τη συνοδεύουν. Σύμφωνα με το τοπικό σχέδιο εκκένωσης υπάρχει και ένα οικογενειακό σχέδιο εκκένωσης με οδούς διαφυγής από την οικία. Στην περίπτωση που τα μέλη βρίσκονται εκτός οικίας καλό θα είναι να υπάρχει και σχέδιο συνάντησης, μιας και συχνά δεν είναι δυνατή η επικοινωνία με άλλα μέσα αλλά και ένα σχέδιο μεταφοράς με κάποιο μέσο σε ασφαλές μέρος. Στο οικογενειακό σχέδιο εκκένωσης θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι καθυστερήσεις που θα προκληθούν από την κυκλοφοριακή συμφόρηση. Επίσης καλό είναι να διαθέτουν απαραίτητα εφόδια όπως φακός, μπαταρίες, κουτί πρώτων βοηθειών, τρόφιμα και νερό, ραδιόφωνο, προστατευτικά γυαλιά, μάσκα και απαραίτητα φάρμακα τα οποία θα φυλάσσονται σε μέρος που θα το γνωρίζουν όλα τα μέλη της οικογένειας (CDC).

Σε καταστροφές όπως αυτές η ενημέρωση του κοινού είναι καθοριστική. Είναι σημαντικό να έχουν ενημερωθεί οι κάτοικοι των περιοχών που βρίσκονται κοντά σε ηφαίστεια, και μάλιστα να είναι προετοιμασμένοι για τις δράσεις τους πριν, κατά τη διάρκεια και μετά από μια ηφαιστειακή έκρηξη. Οι πληροφορίες μπορούν να διαδοθούν από τα μέσα μαζικής ενημέρωσης. Επίσης, θα πρέπει να υπάρχει συντονισμός των αρχών και των υπηρεσιών για κοινές οδηγίες. Να έχουν οργανωθεί οι υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης αλλά και ομάδες καθαρισμού (WHO).

Η εκπαίδευση αποτελεί μια θεμελιώδη ενέργεια για τη διαχείριση του κινδύνου μιας έκρηξης και είναι βέβαιο ότι αποτρέπει αρκετές δυσάρεστες συνέπειες που προκαλούνται από την αμάθεια. Αφορά όχι μόνο στους επιστήμονες και τις εθνικές και τοπικές αρχές, αλλά και τον πληθυσμό. Η δημόσια εκπαίδευση συχνά παρεμποδίζεται από επιχειρηματικά συμφέροντα και

από τις τοπικές κυβερνήσεις. Εκπαιδεύοντας τους κατοίκους τους εφιστά σαφές ότι υπάρχει κίνδυνος στην κοινότητα.

5.3.2. Κατά τη Διάρκεια της Έκρηξης

Σύμφωνα με τη Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας κατά τη διάρκεια της έκρηξης είναι απαραίτητη η εκτέλεση των οδηγιών που έχουν δοθεί από τις Αρχές. Στην περίπτωση που ένας πολίτης βρεθεί σε κλειστό χώρο θα πρέπει να κλείσει τις πόρτες και τα παράθυρα και να μεριμνήσει ώστε να μεταφέρει κατοικίδια ζώα και μηχανήματα σε στεγασμένο χώρο. Αν βρεθεί ένας πολίτης σε ανοιχτό χώρο καλό θα είναι να αποφύγει την κίνηση κατά τη διεύθυνση του ανέμου και να βρει όσο το δυνατό συντομότερα στεγασμένο χώρο. Επίσης κρίνεται σκόπιμη η αποφυγή προσέγγισης ποταμών και λιμνών, μιας και ανυψώνεται η στάθμη του νερού μετά από έκρηξη.

Επιπρόσθετα, κρίνεται απαραίτητη η προστατευτική κάλυψη του κεφαλιού από τα πιθανά στερεοποιημένα ηφαιστειακά υλικά. Απαραίτητη είναι και η προστασία του σώματος και των ματιών. Έτσι, τα μακριά ρούχα, προστατευτικά γυαλιά ασφαλείας και η μάσκα μιας χρήσεως μπορούν να προστατεύσουν ικανοποιητικά από την ηφαιστειακή τέφρα. Τέλος, κατά τη διάρκεια της έκρηξης η εκκένωση θα πρέπει να ακολουθεί περιοχές με σχετικά υψηλό υψόμετρο για να προστατευτούν οι πολίτες από τις πιθανές ροές λάβας και λασπορροές (CDC).

Όσον αφορά στη λειτουργία νοσοκομείων και πρώτων βοηθειών, είναι καθοριστική για την προφύλαξη της ζωής. Τα προβλήματα υγείας που πρέπει να αντιμετωπιστούν αμέσως είναι τριών τύπων.

Αναπνευστικά προβλήματα σε ανθρώπους που έχουν εκτεθεί σε πτώση τέφρας που ενδεχομένως περιέχει επικίνδυνα επίπεδα H₂S, SO₂ και άλλων ηφαιστειακών αερίων. Παρόμοια προβλήματα μπορεί να προκληθούν και από την εισπνοή τοξικών αερίων, όπως το μονοξείδιο και το διοξείδιο του άνθρακα, που εκτός από την ατμόσφαιρα συσσωρεύονται και σε κλειστούς χώρους (UNDRO).

Επίσης μπορεί να παρουσιαστούν περιστατικά με σπασμένα άκρα, τραύματα και μώλωπες που προκύπτουν από την επίδραση των θραυσμάτων πετρωμάτων ή κομματιών λάβας από πτώση από μεγάλο ύψος.

Ο τελευταίος τύπος είναι τα εγκαύματα του δέρματος πρώτου έως τρίτου βαθμού και τα εγκαύματα στο αναπνευστικό. Τα τελευταία προκαλούνται από τη διέλευση του ατμού και των ζεστών σύννεφων σκόνης από τους πνεύμονες και γενικότερα από την αναπνευστική οδό. Το ανησυχητικό με τα εγκαύματα της αναπνευστικής οδού είναι ότι μερικά από τα θύματα κατά πάσα πιθανότητα θα είναι σοβαρά καμένα στο μεγαλύτερο μέρος του σώματός τους και σε κρίσιμη κατάσταση. Αργότερα, μπορεί να προκύψουν ιατρικά προβλήματα από την κατανάλωση πόσιμου νερού από δεξαμενές που έχουν μολυνθεί με τοξικές ενώσεις (UNDRO).

5.3.3. Μετά την Έκρηξη

Μετά την έκρηξη καλό είναι να αποφεύγεται η έξοδος από το σπίτι ή το καταφύγιο. Για κάθε ενδεχόμενο καλό είναι να διακοπεί η ηλεκτροδότηση, μιας και μπορεί να προκληθούν προβλήματα με την παροχή ρεύματος. Οι πολίτες θα πρέπει να αποφύγουν την προσέγγιση στο ηφαίστειο από τη στιγμή που απελευθερώνονται δηλητηριώδη αέρια. Όσο το δυνατό γρηγορότερα πρέπει να απομακρυνθεί με προσοχή η τέφρα, αφού λόγω βάρους μπορεί να προκαλέσει κατάρρευση των κτηρίων (Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας). Ειδική μέριμνα θα πρέπει να δοθεί σε ευάλωτες πληθυσμιακές ομάδες όπως οι ηλικιωμένοι, τα παιδιά, οι έγκυες και οι ανάπηροι αλλά και σε άτομα με αναπνευστικές δυσκολίες. Ιδιαίτερα οι τελευταίοι

θα πρέπει να παραμείνουν σε προστατευμένο χώρο κατά την πτώση της ηφαιστειακής τέφρας. Καλό είναι ακόμη και μετά τη έκρηξη οι πολίτες να συνεχίσουν να φορούν τα μακριά ρούχα, τα γυαλιά και τη μάσκα, γιατί κάποια τοξικά αέρια και ουσίες έχουν χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα (CDC).

Από τις πρώτες δράσεις που μπορούν να γίνουν είναι ο καθαρισμός των κτηρίων και των οχημάτων από την τέφρα. Επίσης, είναι απαραίτητη η λήψη προστατευτικών μέτρων, αφού η τέφρα γλιστράει και είναι πιθανό να προκληθούν τραυματισμοί, ενώ επιδρά αρνητικά στο αναπνευστικό σύστημα. Η στεγνή στάχτη μπορεί εύκολα να φύγει από τον αέρα ή με το βούρτσισμα. Η υγρή στάχτη για να αφαιρεθεί χρειάζεται νερό υψηλής πίεσης ή καθάρισμα με το χέρι. Για τον καθαρισμό της στάχτης είναι προτιμότερη η χρήση απιονισμένου νερού το οποίο όμως σε τέτοιες περιπτώσεις σπανίζει (Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας).

Το συντομότερο δυνατό θα πρέπει να τεθεί και σε εφαρμογή το σύστημα παρακολούθησης επιπέδων θολότητας και οξύτητας του νερού, ώστε εάν αυξηθούν πάνω από το επιτρεπτό όριο, να διακοπεί άμεσα η παροχή νερού. Η μείωση των υψηλών επιπέδων θολότητας αντιμετωπίζεται με τον συχνό καθαρισμό και την αντικατάσταση των φίλτρων. Μπορούν επίσης οι κάτοικοι να βράζουν το νερό πριν τη χρήση, ακόμη κι έτσι όμως δεν είναι κατάλληλο, καθώς μπορεί να περιέχει ανόργανες και οργανικές ουσίες που υπάρχουν στην τέφρα. (CDC). Το δίκτυο μπορεί να τεθεί σε επαναλειτουργία μόλις οι τιμές επιστρέψουν σε φυσιολογικά επίπεδα.

Μετά την έκρηξη οι αρχές θα πρέπει να είναι και προετοιμασμένες για ύστερα φαινόμενα, μιας και μπορεί να εκδηλωθούν πλημμύρες, κατολισθήσεις βράχων και λάσπης, διακοπές ρεύματος και πυρκαγιές (UNDRP). Για αυτό θα πρέπει να ληφθούν μέτρα και για αυτές τις περιπτώσεις.

5.4. Εργαλεία Πρόληψης

5.4.1. Ηφαιστειακές Ζώνες

Το 10% περίπου του παγκόσμιου πληθυσμού κατοικεί κοντά ή μέσα σε περιοχές ενεργών ηφαιστείων.

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις ή γενικότερα οι περίοδοι της ηφαιστειακής δραστηριότητας μπορεί να διαρκέσουν για μήνες και επομένως, ανάλογα χρονικά μακρές θα είναι και οι περίοδοι έκτακτης ανάγκης σε αντίθεση με άλλες φυσικές καταστροφές που εκδηλώνονται αστραπιαία και διαρκούν ελάχιστα. Αξίζει να αναφέρουμε πως στην Ινδονησία τη δεκαετία του 1980 πραγματοποιήθηκαν επιτυχή εκκενώσεις περιοχών και μετακινήσεις πάνω από 400.000 κατοίκων με τις ανάλογα βέβαια οικονομικές επιπτώσεις.

Σε αντίθεση με τα προηγούμενα, τα πλεονεκτήματα των ηφαιστειακών περιοχών είναι σημαντικά. Η ηφαιστειακή σποδός προστατεύει την εδαφική υγρασία στα ξηρά κλίματα ενώ παρέχει εύκολα και γρήγορα πολλά θρεπτικά συστατικά στα βλάστηση. Η γεωθερμική ενέργεια που σχετίζεται με την ηφαιστειακή δραστηριότητα αποτελεί μια φθηνή και χρήσιμη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα υδάτινα αποθέματα σε περιοχές με υδροθερατά ηφαιστειακά πετρώματα είναι σημαντικά ενώ τέλος, τα εντυπωσιακά ηφαιστειακά περιβάλλοντα αποτελούν συχνά πόλο έλξης τουριστικών δραστηριοτήτων. Οι απώλειες από τις ηφαιστειακές εκρήξεις είναι δυνατόν να ελαχιστοποιηθούν με τη λήψη των κατάλληλων μέτρων όπως και στις άλλες περιπτώσεις φυσικών καταστροφών. Η χαρτογράφηση των ζωνών υψηλού κινδύνου, η ασφάλιση καθώς και ο σχεδιασμός κοινωνικής ετοιμότητας αποτελούν απαραίτητα μέτρα

αντιμετώπισης της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Όπως και στην περίπτωση των σεισμών, έτσι και με τις ηφαιστειακές εκρήξεις οι λανθασμένες προβλέψεις και οι άκαιροι συναγερμοί δεν μπορούν δυστυχώς να αποφευχθούν. Παρόλα αυτά, η διαχείριση του ηφαιστειακού κινδύνου εξαρτάται άμεσα από την επισήμανση των επικίνδυνων ζωνών. Μακροπρόθεσμα, μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται στις χρήσεις γης και στον εντοπισμό των οικιστικών περιοχών. Επίσης, πρέπει να εκτιμώνται, να καταγράφονται και να χρονολογούνται επακριβώς οι αποθέσεις από παρελθούσες ηφαιστειακές εκρήξεις με σκοπό την αποκρυπτογράφηση του βαθμού ενεργότητας του ηφαιστείου.

Ένα σχέδιο άμεσης απόκρισης για την διαχείριση μιας περιόδου έκτακτης ανάγκης σε περίπτωση ηφαιστειακής δραστηριότητας περιλαμβάνει τις ακόλουθες τρεις φάσεις:

1. Επαγρύπνηση. Οι υπηρεσίες κοινωνικής προστασίας κινητοποιούνται 5 με 15 ημέρες πριν την εκδήλωση της αναμενόμενης δραστηριότητας.

2. Ετοιμότητα. Οι ασθενείς, οι ηλικιωμένοι και τα πολύ νεαρά παιδιά μεταφέρονται 2 με 5 μέρες πριν την αναμενόμενη ηφαιστειακή δραστηριότητα, ενώ οι υπηρεσίες παροχής έκτακτης βοήθειας είναι σε συνεχή ετοιμότητα για την ανάληψη άμεσης δράσης.

3. Εκκένωση. 1 με 2 μέρες πριν την αναμενόμενη ηφαιστειακή δραστηριότητα πραγματοποιείται γενική εκκένωση της περιοχής.

Αξίζει να σημειωθεί πως η ταχύτητα και η αποτελεσματικότητα των δύο πρώτων φάσεων καθορίζει και την αποτελεσματικότητα της τρίτης φάσης, καθώς τα περισσότερα από τα καταστροφικά ηφαιστειακά επεισόδια διαδραματίζονται πολύ γρήγορα για να μπορέσουν να αντιδράσουν οι κάτοικοι που βρίσκονται μέσα στην εμβέλειά τους (UNDRO).

5.4.2. Σχεδιασμός Χρήσης Γης

Ο σχεδιασμός των χρήσεων γης διαδραματίζει ένα σημαντικό ρόλο στην ελαχιστοποίηση των καταστροφικών συνεπειών από τις ηφαιστειακές εκρήξεις τόσο κατά την έννοια της περιορισμένης ανάπτυξης στις επικίνδυνες ζώνες, όσο και με την προετοιμασία σχεδίων επείγουσας εκκένωσης. Η ζωνοποίηση των χρήσεων γης και η επιλογή ασφαλών περιοχών εξαρτάται άμεσα από τη μακροπρόθεσμη πρόβλεψη της πιθανότητας ηφαιστειακής δραστηριότητας και τον καθορισμό των περιοχών δυνητικού κινδύνου. Οι χάρτες ηφαιστειακής επικινδυνότητας στους οποίους απεικονίζεται η πιθανή έκταση των ηφαιστειακών φαινομένων που θα λάβουν χώρα στο μέλλον προκύπτουν από τα γεωλογικά στοιχεία που έχουν συλλεχθεί από γεγονότα του παρελθόντος. Τέλος, οι περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν κατά την περίοδο της δραστηριότητας είναι εξίσου σημαντικές για την επίδραση των ηφαιστειακών αερίων. Η ταχύτητα του ανέμου και η διεύθυνσή του γίνονται καθοριστικοί παράγοντες για τη διάδοση της ηφαιστειακής τέφρας και αερίων (Κυριακόπουλος, 2014).

5.4.3. Παρακολούθηση Αερίων

Η παρακολούθηση των αερίων μπορεί να αποβεί χρήσιμη στην πρόβλεψη των ηφαιστειακών εκρήξεων. Για παράδειγμα, μία αύξηση στα επίπεδα SO₂ και CO₂, που αναδύονται από τις ατμίδες, πιθανόν να σημαίνει αύξηση στη δραστηριότητα του μάγματος στο μαγματικό θάλαμο. Η μέτρηση της σύστασης και του σχετικού όγκου των αερίων γίνεται με τις εξής μεθόδους:

5.4.3.1.1 Άμεσες μετρήσεις

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

5.4.3.1.2 Φασματογραφικές μετρήσεις (COSPEC)

Η μέθοδος αυτή συνίσταται στην εξ αποστάσεως μέτρηση κάποιων αερίων με ένα φασματογράφο συσχέτισης (correlation spectrometer, COSPEC). Αυτό το όργανο κατασκευάστηκε στη δεκαετία του 1970 για την παρακολούθηση των αναθυμιάσεων του SO₂ από τις καμινάδες των εργοστασίων. Στην περίπτωση των ηφαιστειών η παρακολούθηση γίνεται είτε από το έδαφος, είτε από αυτοκίνητο, είτε από ελικόπτερο. Οι πιο σύγχρονοι φασματογράφοι είναι φασματογράφοι υπέρυθρου (infrared spectrometers) που μετρούν το ποσοστό της υπέρυθρης ακτινοβολίας που απορροφάται από το CO₂ και άλλα αέρια.

5.4.3.1.3 Μετρήσεις όζοντος (TOMS)

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται για μετρήσεις ευρείας κλίμακας και καταγράφει την κατανομή και την ποσότητα του SO₂ που απελευθερώνεται στη στρατόσφαιρα από τις ηφαιστειακές εκρήξεις. Η καταγραφή γίνεται μετρώντας το όζον με φασματογραφική χαρτογράφηση του ολικού όζοντος (total ozone mapping spectrometer, TOMS). Το όργανο αυτό αρχικά χρησιμοποιήθηκε στους δορυφόρους Nimbus-7 και Meteor-3. Από το 1997 και μετά βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη Γη πιο σύγχρονα όργανα που δίνουν λεπτομερέστερες πληροφορίες.

Κεφάλαιο 6.

Συμπεράσματα

Οι ηφαιστειακές καταστροφές αποτελούν ένα σημαντικό πρόβλημα σε πολλές αναπτυσσόμενες και αναπτυγμένες χώρες. Τα τελευταία χρόνια, λόγω της ραγδαίας αύξησης του πληθυσμού, της επέκτασης των οικισμών και των βασικών γραμμών τροφοδοσίας (π.χ., νερό, φυσικό αέριο, κ.λπ.) έχουν αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό και οι επιπτώσεις των ηφαιστειακών εκρήξεων. Κατά τη διάρκεια των ετών έχουν υπάρξει πολλά παραδείγματα ηφαιστειακών εκρήξεων που είχαν ολέθριες συνέπειες στην υγεία του πληθυσμού στην οικονομία και το περιβάλλον.

Ειδικότερα στην περίπτωση των ηφαιστειακών αερίων μπορούμε να αναφέρουμε τους παρακάτω παράγοντες:

- Προκαλούν αιφνίδιο θάνατο σε ανθρώπους και ζώα, λόγω της θερμοκρασίας τους και της τοξικότητάς τους.
- Δημιουργούν αναπνευστικά και δερματικά προβλήματα στους ανθρώπους.
- Εξασθενούν το ανοσοποιητικό σύστημα του ανθρώπου.
- Δημιουργούν τοξικό νέφος που μετατρέπεται σε όξινη βροχή και έχει καταστροφικές συνέπειες στις καλλιέργειες.
- Καταστρέφουν υποδομές λόγω της υψηλής θερμοκρασίας τους.
- Συσσωρεύονται στο έδαφος και καταστρέφει το ριζικό σύστημα των δέντρων.
- Συμβάλλουν στην καταστροφή του όζοντος με αποτέλεσμα τη μείωση της προστασίας από την ηλιακή υπεριώδη ακτινοβολία.
- Ενισχύουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου προσθέτοντας διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, και συμβάλλοντας στην αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη.
- Είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία των 'ηφαιστειακών χειμώνων', με καταστροφικά αποτελέσματα στην γεωργία και κτηνοτροφία.
- Επιφέρουν αρνητικές συνέπειες στην οικονομία, από την αεροπλοΐα έως τη φαρμακοβιομηχανία και τη πρωτογενή παραγωγή.

Από τις επιπτώσεις που αναφέρθηκαν γίνεται αντιληπτό ότι κάποιες από αυτές είναι άμεσες, ενώ κάποιες άλλες είναι μεγαλύτερης διάρκειας και φαίνεται ότι επηρεάζουν πολλούς τομείς μιας κοινωνίας, ειδικότερα όταν πρόκειται για μεγάλες εκρήξεις. Όλες οι επιπτώσεις έχουν την ίδια βαρύτητα με εξαίρεση αυτές που αφορούν στην υγεία, μιας και είναι οι πρώτες που

πρέπει να περιοριστούν και να αντιμετωπιστούν. Αυτοί είναι και οι βασικοί λόγοι που τις διαφοροποιούν από τις υπόλοιπες φυσικές καταστροφές. Οι χώρες που απειλούνται από τέτοιου είδους καταστροφές είναι απαραίτητο να αναπτύξουν στρατηγικές για την ελαχιστοποίηση και την αντιμετώπιση των συνεπειών των μελλοντικών μεγάλων εκρήξεων, οι οποίες θα βασίζονται στην προηγούμενη εμπειρία.

Συγκεκριμένα πρέπει να μελετηθούν και εκπονηθούν κατάλληλα σχέδια για:

- Μακροπρόθεσμη διαχείριση της οικονομικής και αστικής ανάπτυξης των περιοχών γύρω από τα ενεργά ηφαίστεια αξιοποιώντας ιστορικά στοιχεία και εκτιμήσεις των πληγέντων περιοχών από την ίδια την έκρηξη και από τα δευτερεύοντα φαινόμενα.
- Αποτελεσματικές πολεοδομικές παρεμβάσεις αξιοποιώντας τον προσδιορισμό των χρήσεων γης και υλοποιώντας απαραίτητα έργα υποδομής όπως επιδιόρθωση / ανακατασκευή του οδικού δικτύου (βέλτιστη υλοποίηση σχεδίου έκτακτης εκκένωσης).
- Ενημέρωση του κοινού μέσω ενός καλά οργανωμένου δικτύου πληροφόρησης αποτελούμενο από ενημερωτικά φυλλάδια, ειδικές γιγαντοαφίσες στα σημεία εισόδου της κοινότητας και των ΜΜΕ και Internet για τις ενέργειες αντιμετώπισης έκτακτης του φαινομένου καθώς επίσης και για την εξέλιξή του.
- Ευαισθητοποίηση του κοινού και εκπαίδευση σχετικά με τους κινδύνους και τα σχέδια έκτακτης ανάγκης με πλήρη ή μερική εκκένωση μέσω του οδικού δικτύου και συγκεντρώσεις του πληθυσμού σε πιθανούς χώρους συγκέντρωσης.
- Μάσκες που διατηρούν μικρά σωματίδια τέφρας για εκείνους που πρέπει να εργάζονται σε περιβάλλον που έχει μολυνθεί με τέφρα ή για ευάλωτες ομάδες (παιδιά, ηλικιωμένοι, άτομα με αναπνευστικά προβλήματα) και απλή μάσκα για προστασία του γενικού πληθυσμού που χρειάζεται να φύγει από το σπίτι για σύντομο χρονικό διάστημα.
- Συνεχή παρακολούθηση των εκπομπών αερίων και καταγραφή των δεδομένων σε τακτά χρονικά διαστήματα για την εκτενέστερη παρακολούθηση του φαινομένου που θα οδηγήσει στην άμεση αντίδραση των εμπλεκόμενων φορέων.
- Εκπαίδευση εμπλεκόμενων φορέων (αστυνομία, τροχαία, πυροσβεστική, δημοτικές αρχές κλπ) για διευκόλυνση και καθοδήγηση πληθυσμού την στιγμή της κρίσης. Οι εμπλεκόμενοι φορείς σε κεντρικό, περιφερειακό και τοπικό επίπεδο είναι πολλοί και πολύ συχνά μη καταρτισμένοι επαρκώς για την λήψη σοβαρών αποφάσεων ή τη διαχείριση μιας κρίσεως. Η Πολιτική Προστασία θα πρέπει να καταστεί υπεύθυνη για την εκπαίδευση των υφιστάμενων υπευθύνων ατόμων των τοπικών αρχών μέσω σεμιναρίων, ημερίδων κλπ. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει δυνατότητα στελέχωσης από καταρτισμένο προσωπικό μπορούν τα άτομα στις τοπικές αρχές που θα είναι υπεύθυνα για τη διαχείριση της κρίσης να παρακολουθούν υποχρεωτικά εκπαιδευτικά σεμινάρια και να πραγματοποιούνται ασκήσεις ετοιμότητας σε συνεργασία με άλλους εμπλεκόμενους φορείς.

Συνοψίζοντας, η αποτελεσματικότητα αυτών των στρατηγικών κρίνεται από τη συντονισμένη συνεργασία, οργάνωση, εκπαίδευση και την ανάπτυξη δικτύων μεταξύ οργανισμών και αρχών, όχι μόνο σε εθνικό, αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο, μιας και πολλές φορές η διεθνής βοήθεια διαδραματίζει καταλυτικό ρόλο. Πάντως το οικονομικό κόστος της ανάκαμψης από οποιεσδήποτε μελλοντικές εκρήξεις είναι ένα σημαντικό βάρος για την κοινωνία.

Βιβλιογραφία

1. Adamus, M. (2006). The Spokesman Review. Fee increases proposed at Oregon's Crater Lake. 'The sun rises over Crater Lake, Oregon's only national park, in this January 2006 photo'. Published Friday, December 28, 2018.

<http://www.spokesman.com/stories/2018/feb/24/fee-increases-proposed-at-oregons-crater-lake/>

2. Aviation Sectoral Plan. (2018). Market Analysis. Recent past. The impact of international and national events on air traffic. 'Eruption of the Eyjafjallajökull volcano in Iceland (2010)'.

<http://www.sectorplan-luchtvaart.nl/en/job-market-analysis/recent-past/impact-international-and-national-events-on-air-traffic/eruption-of-the-eyjafjallajokull-volcano-in-iceland-2010/>

3. British Broadcasting Corporation – BBC

<http://news.bbc.co.uk/2/hi/business/8634147.stm>

4. Bye, B. (2011). Volcanic eruptions: Science and Risk Management. Science 2.

5. Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας. (2019). Ηφαίστεια. 'Οδηγίες Προστασίας'.

<http://civilprotection.gr/el/%CE%B7%CF%86%CE%B1%CE%AF%CF%83%CF%84%CE%B5%CE%B9%CE%B1>

6. Centers for Disease Control and Prevention – CDC. (2019). Natural Disaster And Severe Weather. 'Volcanoes'.

<https://www.cdc.gov/disasters/volcanoes/>

7. Encyclopedia Britannica. (2018). 'Ring of Fire SEISMIC BELT'

<https://www.britannica.com/place/Ring-of-Fire>

8. en.classora.com (2018). '1783 Laki volcano eruption'.

<http://en.classora.com/units/y51572740/1783-laki-volcano-eruption>

9. Expedition Earth (2015). 'Surtsey, a new volcanic island'.

<http://expeditieaarde.blogspot.com/2015/03/surtsey-new-volcanic-island.html>

10. Explore Magazine. (2015). British Columbia's 18 Sleeping Volcanoes. 'Garibaldi'.

https://www.explore-mag.com/British_Columbias_18_Sleeping_Volcanoes

11. explorevolcanoes.com (2018). World Volcanoes. 'Nuee Ardente'.
<http://www.explorevolcanoes.com/Volcano%20Glossary%20Nuee%20Ardente.html>
12. explorevolcanoes.com (2018). World Volcanoes. 'Volcanic gas'.
<http://www.explorevolcanoes.com/volcanic%20hazards%20gas.html>
13. flickr.com (2018). Photos. 'Nuee ardentes'.
<https://www.flickr.com/photos/118969802@N02/14677291272>
14. Friedrich, W. L. (2000). 'Fire in the sea' The Santorini Volcano: Natural History and the Legend of Atlantis.
<https://www.cambridge.org/core/journals/geological-magazine/article/friedrich-w-l-2000-fire-in-the-sea-the-santorini-volcano-natural-history-and-the-legend-of-atlantis-translated-by-a-r-mcBirney-xiv258-pp-cambridge-university-press-price-1995-us-3495-hard-covers-isbn-0-521-65290-1/34D9D3E78E214B4C648D095C3F8EBCA3>
15. Galasam blog. (2017). 'GALAPAGOS VOLCANOES'. 17 julio, 2017.
<https://galasam.com.ec/blog/galapagos-volcanoes/>
16. Geologikathemata.blogspot.com (2018). Η Γεωλογία στη ζωή μας. 'Ηφαίστεια'.
<http://geologikathemata.blogspot.com/2013/02/1.html>
17. geology.com (2018). Rocks. 'Pumice'.
<https://geology.com/rocks/pumice.shtml>
18. geology.com (2018). Volcanoes. 'Maars and Phreatic Eruptions'.
<https://geology.com/stories/13/maar/>
19. geology.sdsu.edu (2018). Tephra And Pyroclastic Rocks. 'Strombolian scoria-fall deposit'.
http://www.geology.sdsu.edu/how_volcanoes_work/Tephra.html
20. Hanlon M. (2010). How we could ALL be victims of the volcano... and why we must hope for rain to get rid of the ash, Daily Mail.
21. helenaviani.blogspot.com (2018). Dunia Kita. 'Krakatau-1883'.
<http://helenaviani.blogspot.com/2016/10/letusan-maut-krakatau-1883-kisah.html>
22. hfaisteia.weebly.com (2018). Τα Ηφαίστεια του Πλανήτη. 'Αγία Ελένη'.
<https://hfaisteia.weebly.com/alphagammaiotaalpha-epsilonpsilonlambdaepsilonpsilonnueta.html>

23. hfaisteiologia.weebly.com (2018). Ηφαιστειολογία. 'Ηφαιστειότητα σε περιβάλλον απόκλισης'.

<http://hfaisteiologia.weebly.com/etaphialphaiotasigmatauepsiloniota972tauetataualpha-sigmaepsilon-piepsilonrhoiotabeta940lambdalambdaomicronnu-alpha972kappalambdaiotasigmaetasigmaf.html>

24. Journal of Geoscience Education. (2018). Geology and Human Health. 'Volcanic Ash: More Than Just A Science Project'.

https://serc.carleton.edu/NAGTWorkshops/health/case_studies/volcanic_ash.html

25. Icelanding Met Office.

<http://en.vedur.is/earthquakes-and-volcanism/articles/nr/1880>

26. Institute of Earth Sciences – IES.

http://earthice.hi.is/eruption_eyjafjallajokull_2010

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

28. legacy.earlham.edu (2018). 'Pyroclastic Debris'.

<http://legacy.earlham.edu/~saynery/Ejected%20materials.htm>

29. luiurig.altervista.org (2018) 'Pumice flows'.

<http://luiurig.altervista.org/pics/index4.php?search=Pumice+flows+from+north+after+May+18+eruption+of+Mount+St.+He...&page=1>

30. Maron, E. (2017). TimesNews. 'Φωτογραφίζοντας τη λάβα από πολύ κοντά!'. Kilauea.

<https://www.timesnews.gr/fotografizontas-ti-lava-apo-poly-konta/>

31. Martin, S. (2017). Sunday express. News. 'Mount Sakurajima volcano in Japan ERUPTS covering nearby cities with ASH RAIN'. Published Tue, May 2, 2017.

<https://www.express.co.uk/news/science/799120/Mount-Sakurajima-volcano-ERUPTS-ASH-RAIN>

32. Monick M., Baltrusaitis J., Powers S., Borcharding J., Caraballo J., Mudunkotuwa I., Peate D., Walters K., Thompson J., Grassian V., Gudmundsson G., Comellas A., (2013). 'Effects of Eyjafjallajökull Volcanic Ash on Innate Immune System Responses and Bacterial Growth in Vitro. Environmental Health Perspectives'. 121:6. pp 691-698.

33. Μπατσούλη, Ν. (2009). Ταξίδι στο κόσμο των Ηφαιστείων. 'Η δομή των Ηφαιστείων'.

http://ifestia.blogspot.com/2009/06/blog-post_9878.html

34. Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator – UNDRRO.

<http://www.unisdr.org>

35. Oregon State University. (2018). Volcanic World. 'Types of Volcanoes'.

<http://volcano.oregonstate.edu/types-volcanoes>

36. Oregon State University. (2018). Volcanic World. 'Virtual Altiplano-Field Guide Stops 31-35'.

<http://volcano.oregonstate.edu/coignembrite>

37. patrickmn.com (2018). 'Pictures of Eyjafjallajökull April 18, 2010'.

<https://patrickmn.com/space/pictures-of-eyjafjallajokull/>

38. penna.gr (2018). 'Σαντορίνη: Ενεργό και από τα πιο επικίνδυνα το υποθαλάσσιο ηφαίστειο'.

<https://www.penna.gr/bizarre/9298-santorini-energo-kai-apo-ta-pio-epikindyna-to-yposalassio-ifaisteio>

39. sandatlas.org (2018). 'Granadilla pumice'.

<https://www.sandatlas.org/granadilla-pumice/>

40. Smithsonian Institution, National Museum of Natural History, Global Volcanism program. (2013).

<http://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=372020>

41. Smithsonian Institution, National Museum of Natural History, Global Volcanism program, (2013). 'Cerro Negro'.

<https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=344070>

42. Smithsonian Institution, National Museum of Natural History, Global Volcanism program, (2013). 'Spurr'.

<https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=313040>

43. Sokolowsky, E. (2004). Scientific Visualization Studio. 'Mars: Olympus Mons/ Visualizations'. Released on January 16, 2004.

<https://svs.gsfc.nasa.gov/2883>

44. Σοφοκλής, Κ. (2014). 'Επιστήμη'. Η Σημερινή της Κυριακής. Δημοσιευμένο στις 9 Φεβρουαρίου 2014.

<http://www.sigmalive.com/simerini/politismos/98516/epistimi>

45. Strekeisen, A. (2018). Volcanoes. 'Le Kimberliti'.

<http://www.alexstrekeisen.it/vulc/kimberlites.php>

46. Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ. (2018). 'Ηφαιστειολογία'.

<http://www.geo.auth.gr/765/index.htm>

47. Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ. (2018). Ηφαιστειολογία. 'Δείκτης Ηφαιστειακής Εκρηκτικότητας (VEI, Volcanic Explosivity Index)'.

<http://www.geo.auth.gr/765/index.htm>

48. Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ. (2018). Ηφαιστειολογία. Ιστορικές Εκρήξεις. 'Αγία Ελένη'.

http://www.geo.auth.gr/765/5_historical/55_helen.htm

49. Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ. (2018). Ηφαιστειολογία. 'Φυσαλιδοποίηση'.

http://www.geo.auth.gr/765/1_dynamics/16_controls.htm

50. U.S. Geological Survey (USGS) (2018). 'Volcanoes'.

<https://www.usgs.gov/>

51. U.S. Geological Survey (USGS) (2018). Kīlauea Volcano. 'Lava Fountain'.

<https://www.usgs.gov/media/images/k-lauea-volcano-lava-fountain-fissure-22>

52. Volcano Park Rentals, Mauna Loa Hawaii Volcano Tour, (2017).

<https://volcanoparkrentals.com/archives/1155>

53. volcanosareamazing.weebly.com (2018). Types of Pyroclastic Materials. 'VOLCANIC BLOCKS'.

<https://volcanosareamazing.weebly.com/types-of-pyroclastic-material.html#>

54. Warren, V. (2018). Volcanoes. Strombolian Eruption. 'Paricutin Volcano'.

<https://vanessa-warren-volcanoes.weebly.com/strombolian-eruption.html#>

55. World Health Organization – WHO. (2019). Humanitarian Health Action. 'VOLCANIC ERUPTIONS - Natural Disaster Profile - Technical Hazard Sheet'.

<http://www.who.int/hac/techguidance/ems/volcanos/en/>