



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ & ΚΡΙΣΕΩΝ

POST GRADUATE PROGRAM
ENVIRONMENTAL, DISASTER & CRISES MANAGEMENT STRATEGIES

Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης

Master Thesis

«Η έκρηξη του ηφαιστείου Cumbre Vieja στη νήσο La Palma (ΚΑΝΑΡΙΑ ΝΗΣΙΑ) και οι επιπτώσεις στην αεροπλοΐα»

«The eruption of Cumbre Vieja at La Palma (Canary Islands) and its consequences to aviation»

«Χαρίλαος» «Μαχειμάρης» / «Charilaos» «Macheimaris»

A.M. / R.N. : «20183»

Ειδικές Εκδόσεις / Special Publications:

No. «2022006»

Αθήνα,
Athens,

Απρίλιος 2022
April 2022



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

Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης Master Thesis

«Η έκρηξη του ηφαιστείου Cumbre Vieja στη νήσο La Palma
(ΚΑΝΑΡΙΑ ΝΗΣΙΑ) και οι επιπτώσεις στην αεροπλοΐα»

«The eruption of Cumbre Vieja at La Palma (Canary Islands) and its consequences to
aviation»

«Χαρίλαος» «Μαχειμάρης» / «Charilaos» «Macheimaris»

A.M/ R.N. : «20183»

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Δρ. «Επιβλέπων_1ο_Μέλος»,
«Δρ. Κ. ΚΥΡΙΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΟΜ. ΚΑΘΗΓ. ΕΚΠΑ»

Δρ. «Μ_2ο_Μέλος_Τριμελούς»,
«Δρ. Ε. ΛΕΚΚΑΣ ΚΑΘΗΓ. ΕΚΠΑ»

Δρ. «Μ_3ο_Μέλος_Τριμελούς»,
«Δρ Σ. ΛΟΖΙΟΣ ΑΝΑΠΛ.ΚΑΘΗΓ. ΕΚΠΑ»

«Ειδική_Επ_Καθοδήγηση»

«Κυριακόπουλος Κωνσταντίνος»
«Ομ.Καθηγητής ΕΚΠΑ»

Ειδικές Εκδόσεις / Special Publications:

No. «2022006»

Αθήνα, Απρίλιος 2022
Athens, April 2022

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	iii
Περίληψη	v
Abstract.....	vi
Ευχαριστίες	vii
Κατάλογος Εικόνων	viii
Κεφάλαιο 1. Ηφαίστεια	1
1.1. Γενικά	1
1.2. Περιγραφή ηφαιστειακής δομής	2
1.2.1. Κρατήρας	2
1.2.2. Ηφαιστειακός κώνος	2
1.3. Τύποι ηφαιστείων	3
1.3.1. Στρωματοηφαίστεια (Composite/Stratovolcano)	4
1.3.2. Ασπιδόμορφα (Shield)	5
1.3.3. Κώνος σκωριών (Cinder cone)	6
1.3.4. Θόλοι λάβας	7
1.3.5. Άλλοι τύποι ηφαιστείων	8
Κεφάλαιο 2. Δραστηριότητα Ηφαιστείου	10
2.1. Συχνότητα.....	10
2.1.1. Ενεργά ηφαίστεια (Active).	10
2.1.2. Κοιμώμενα ηφαίστεια (Dormant).	10
2.1.3. Εσβεσμένο ηφαίστειο (Extinct).	10
2.2. Τύποι εκρήξεων	11
2.2.1. Τύπου Χαβάης	11
2.2.2. Τύπου Στρόμπολι	12
2.2.3. Τύπου Ισλανδίας	13
2.2.4. Τύπου Βουλκάνο.....	13
2.2.5. Πλινιακού και Υποπλινιακού τύπου.....	14
2.2.6. Τύπου Pelée.....	14
2.2.7. Φρεατομαγματική.....	15
2.3. Δείκτης εκρηκτικότητας ηφαιστειών VEI	15
Κεφάλαιο 3. Ηφαιστειακοί Κίνδυνοι.....	18
3.1. Ηφαιστειογενή παράγωγα.....	18
3.1.1. Ηφαιστειακά αναβλήματα	18
3.1.2. Πυροκλαστικές αποθέσεις	19
3.1.3. Λασπορεύματα ή Λαχάρ	19
3.1.4. Χιονοσιβάδες συντριμμιών κατολισθήσεις και τσουνάμι.....	20
3.1.5. Ηφαιστειακά αέρια	20
3.1.6. Σεισμοί ηφαιστειακής προέλευσης	21
3.1.7. Κεραυνοί.....	21
3.1.8. Τέφρα.....	22
Κεφάλαιο 4. Επιπτώσεις στην αεροπλοΐα.....	24
4.1. Ιστορικά στοιχεία	24
4.2. Επίδραση τέφρας στην αεροπλοΐα	27
4.2.1. Γενικά.....	27
4.2.2. Επίδραση στους κινητήρες αεροσκαφών	28
4.2.3. Επίδραση τέφρας στα υπόλοιπα συστήματα.....	29
Κεφάλαιο 5. Διαχείριση Κρίσεων	30
5.1. Από φυσικό φαινόμενο σε απειλή.....	30

5.2. Η διαδικασία της διαχείρισης κρίσης	31
5.2.1. Πριν την έκρηξη του 2010.....	32
5.2.2. Μετά το 2010	33
5.3. Η επιστήμη και οι ρυθμιστικές αρχές.....	35
5.4. Η εξέλιξη της έρευνας η τέφρα και οι σύγχρονοι κινητήρες	35
5.5. Αναπτύσσοντας σενάρια για την εξερεύνηση επιπτώσεων και αδυναμιών.....	37
Κεφάλαιο 6. Το ηφαίστειο Cumbre Vieja και η πρόσφατη δραστηριότητα το 2021	39
6.1. Γενικά	39
6.2. Η γεωλογία του νησιού.....	39
6.3. Cumbre Vieja	40
6.4. Το χρονικό της έκρηξης.....	42
6.4.1. 15 - 21 Σεπτεμβρίου	42
6.4.2. 22 - 28 Σεπτεμβρίου	44
6.4.3. 29 Σεπτεμβρίου - 5 Οκτωβρίου.....	48
6.4.4. 6-12 Οκτωβρίου	50
6.4.5. 13-26 Οκτωβρίου	51
6.4.6. 27 Οκτωβρίου-9 Νοεμβρίου	52
6.4.7. 10-30 Νοεμβρίου.....	53
6.4.8. 1-14 Δεκεμβρίου.....	54
6.4.9. 15 - 20 Δεκεμβρίου	56
6.5. Η Ισπανία ανακοινώνει τη λήξη του φαινομένου	57
Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα (οδηγίες διαχείρισης κινδύνου).....	58
Βιβλιογραφία	60

Περίληψη

Η έκρηξη ενός ηφαιστείου εντάσσεται στην κατηγορία των φυσικών φαινομένων και αποτελεί ένα από τα πιο εντυπωσιακά φυσικά φαινόμενα, ελλοχεύει όμως πολλαπλούς κίνδυνους για την περιοχή που το φιλοξενεί. Το μέγεθος και η ένταση των εκρήξεων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που σχετίζονται με την σύσταση του μάγματος αλλά και το γεωτεκτονικό καθεστώς που συνοδεύει την συγκεκριμένη περιοχή του πλανήτη. Από τις ηφαιστειακές εκρήξεις κινδυνεύουν τόσο οι άνθρωποι όσο και οι υποδομές, ενώ βίαιες είναι και οι αλλαγές στο φυσικό περιβάλλον επηρεάζοντας ακόμα και το κλίμα του πλανήτη εξαιτίας των αλλαγών που επιφέρουν στην ατμόσφαιρα.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση των κινδύνων που εντοπίζονται στην ευρύτερη περιοχή του ηφαιστείου σε άμεση σχέση με την αεροπλοΐα. Θα δοθεί έμφαση στην ανάπτυξη τρόπων διαχείρισης τέτοιων καταστάσεων από τους αρμόδιους φορείς, σε περίπτωση εκδήλωσης μιας βίαιης ηφαιστειακής έκρηξης.

Η αεροπλοΐα αποδεικνύεται ιδιαίτερα ευαίσθητη από τις ηφαιστειακές εκρήξεις εξαιτίας των νεφών τέφρας που απελευθερώνει ένα ηφαίστειο και αιωρούνται στην ατμόσφαιρα προκαλώντας ακόμα και παύση των αεροπορικών επιχειρήσεων σε ευαίσθητα αεροδρόμια. Θα αναλύσουμε την ηφαιστειακή έκρηξη του ηφαιστείου Cumbre Vieja που έλαβε χώρα στις 19 Σεπτεμβρίου του 2021 στο νησί Λα Πάλμα και τις επιπτώσεις που είχε η συγκεκριμένη έκρηξη τόσο στο νησί όσο και στις ευπαθείς αερομεταφορές.

Abstract

The eruption of a volcano belongs to the category of natural phenomenon, it is one of the most impressive natural phenomena, but there are multiple dangers for the areas that host them. The size and intensity of the explosions depends on many factors that have to do with the composition of the magma and the geotectonic background that accompanies this specific part of the planet. Volcanic eruptions threaten both humans and structures, and in many cases changes in the natural environment are violent, affecting even the planet's climate due to the changes they create in the atmosphere.

The purpose of this dissertation is the analysis of the risks identified in the wider area of the volcano in direct relation to the aircraft and the development of ways to manage such situations by the competent bodies, in case of a volcanic eruption.

Aviation is proving particularly sensitive to a volcanic eruption due to the ash clouds being ejected by a volcano leading to even the cessation of operations at sensitive airports. We will analyze the volcanic eruption from the volcano Cumbre Vieja that took place on September 19, 2021 on the island of La Palma and the effects that this eruption had on both the island and the vulnerable air transportations.

Λέξεις κλειδιά: Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Στρατηγικές Διαχείρισης Κρίσεων, Φυσικές Καταστροφές, Ηφαιστειακές εκρήξεις, Επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον, Δομημένο περιβάλλον, Επιπτώσεις στον άνθρωπο, Συμβολή στην διαχείριση ηφαιστειακών εκρήξεων, Αεροπλοΐα.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής μου εργασίας και κλείνοντας τον όμορφο κύκλο των μεταπτυχιακών σπουδών θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κυριακόπουλο για την πολύτιμη συμβολή του στη διαμόρφωση της εργασίας αλλά και για την αμεσότητα και την καθοδήγηση καθ' όλη την διάρκεια της συγγραφής. Ακόμη αισθάνομαι ότι θα ήταν παράλειψη να μην εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον υπεύθυνο του μεταπτυχιακού προγράμματος καθηγητή κ. Ε Λέκκα καθώς αποτέλεσε πηγή έμπνευσης όντας σε κάθε κρίση στην πρώτη γραμμή διαχείρισης.

Αφιερώνω αυτήν την εργασία στην κόρη μου δικαιωματικά καθώς η επιθυμία της να επισκεφτεί ένα ηφαίστειο άναψε και τη δική μου φλόγα.

Μαχειμάρης Χαρίλαος
Απρίλιος 2022

Κατάλογος Εικόνων

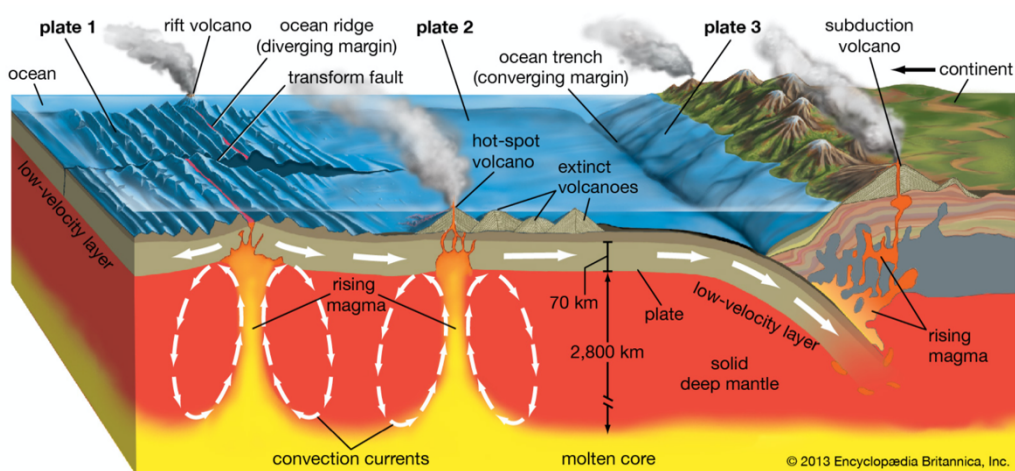
Εικόνα 1 Σχηματισμός διαφορετικών τύπων ηφαιστείων (Πηγή Εγκυκλ. Britannica).....	1
Εικόνα 2 Σχηματισμός ηφαιστειακού τόξου και νησιωτικού τόξου από ζώνη διήθησης (Πηγή sci.sdsu.edu).....	2
Εικόνα 3 Σύγκριση μεγεθών και σχημάτων ηφαιστείων (Πηγή Karla Panchuk 2017).....	3
Εικόνα 4 Σύνθετο ηφαίστειο. Πάνω: Το Cotopaxi στον Ισημερινό εμφανίζει τον κώνο που κυμαίνεται προς τα πάνω, χαρακτηριστικό των σύνθετων ηφαιστείων. Κάτω: Διάγραμμα σύνθετου ηφαιστείου που δείχνει εναλλασσόμενα στρώματα λάβας και τέφρας (Πηγή Karla Panchuk 2017).	4
Εικόνα 5 Ασπιδόμορφο ηφαίστειο. Πάνω: Ηφαίστειο Sierra Negra Galapagos islands με τυπικό ασπιδόμορφο σχήμα. Κάτω: σχηματικό διάγραμμα ενός ασπιδόμορφου ηφαιστείου που δείχνει το σχηματισμό του από τις βασαλτικές ροές. (Πηγή BRJ Inc.2012).....	5
Εικόνα 6 Ηφαίστειο Cinder Cone στο Lassen Volcanic National Park Καλιφόρνια (Πηγή NPS)	6
Εικόνα 7 Θόλος λάβας (Πηγή Volcanodiscovery)	7
Εικόνα 8 Οι ηφαιστειακές διεργασίες, η βράχυνση του φλοιού και η θερμική διαστολή μπορούν να οδηγήσουν στο σχηματισμό οροπεδίων.(Πηγή Encyclopædia Britannica, Inc.)	8
Εικόνα 9 Δημιουργία καλδέρας (Πηγή researchgate.net)	9
Εικόνα 10 Έκρηξη τύπου Χαβάης ηφαίστειο Kilauea.(Πηγή USGS).....	11
Εικόνα 11 Έκρηξη τύπου Στρόμπολι.(Πηγή Vanessa Warren).....	12
Εικόνα 12 Έκρηξη μέσω ρωγμών ηφαίστειο Bardarbunga Ισλανδία (Πηγή Destination Specialist)	13
Εικόνα 13 Έκρηξη τύπου Βουλκάνο (Πηγή Heather Bleick, USGS)	13
Εικόνα 14 Πλινιακού τυπου έκρηξη χαρακτηριστική μεγάλη εκκένωση τέφρας στην ατμόσφαιρα (Πηγή sciencephoto.com)	14
Εικόνα 15 Νήσος Surtsey Ισλανδία.....	15
Εικόνα 16 Διάγραμμα συσχέτισης VEI, εκτινασσόμενου όγκου και ιστορικών και προϊστορικών εκρήξεων.....	16
Εικόνα 17 Δείκτης εκρηκτικότητας βάση της συχνότητας (Πηγή USGS).....	17
Εικόνα 18 Ηφαιστειακοί κίνδυνοι (Πηγή USGS).....	18
Εικόνα 19 Πυροκλαστικές ροές έκρηξη Mount St. Helens (Πηγή Encyclopedia Britannica)	19
Εικόνα 20 Διασπορά ηφαιστειακών αερίων (Πηγή USGS)	21
Εικόνα 21 Εναπόθεση τέφρας από την έκρηξη ηφαιστείου στην Ν.Χιλη (Πηγή CNN).....	22
Εικόνα 22 Το όρια των κέντρων παρακολούθησης ηφαιστειακής δραστηριότητας και εξάπλωσης τέφρας(Πηγή UK Met Office,2017).....	25
Εικόνα 23 χάρτης Volcanic Ash advisory (Πηγή UK met office,2010).....	26
Εικόνα 24 Τέφρα σε αεροσκάφος (Πηγή USGS)	27
Εικόνα 25 Ζημιές στο εξωτερικό του αεροσκάφους ενός 747-400 μετά από συνάντηση με σύννεφο τέφρας από το ηφαίστειο Pinatubo(Πηγή Casadevall)	28
Εικόνα 26 Δορυφορική εικόνα του Λα Πάλμα με το κεντρικό τμήμα του νησιού την κατάρρευση του Cumbre Nueva, βόρεια του ηφαιστείου Taburiente. Νότια το Cumbre Vieja και δυτικά το ρήγμα Cumbre Nueva (Πηγή Γεωλογικό Ινστιτούτο Ισπανίας)	40

Εικόνα 27 Σχηματικό μοντέλο της δημιουργίας 3 ζωνών η καθεμιά στις 120° συνήθης δομή στα Κανάρια νησιά	41
Εικόνα 28 Χάρτης της ροής λάβας από 7 εκρήξεις του Cumbre Vieja τα τελευταία 1000 χρόνια (Πηγή Klugel et al.2000).....	42
Εικόνα 29 Οι πληγείσες περιοχές 25 Σεπτεμβρίου 2021 (Πηγή Copernicus EMS,2021)	44
Εικόνα 30 Ροή λάβας 22 Σεπτεμβρίου (Πηγή Copernicus EMS,,2021)	46
Εικόνα 31 Η εκρηξη όπως φαίνεται από το αεροδρόμιο του νησιού.(Πηγή Μανουσάκη, 2021)	46
Εικόνα 32 Φωτογραφία από την ανακοίνωση της αεροπορικής εταιρίας Binter για αναστολή πτήσεων εξαιτίας της τέφρας στο Λα Παλμα (Πηγή twitter Binter,2021).....	47
Εικόνα 33 Βαρυτικά κύματα σχηματιζόμενα στα νέφη στην ατμόσφαιρα (Πηγή Daniel Lopez,2021)	48
Εικόνα 34 Ροή λάβας 30 Σεπτεμβρίου (Πηγή Κοπέρνικος,2021)	49
Εικόνα 35 Φωτογραφία από τον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό 4 Οκτωβρίου (πηγή NASA,2021)	50
Εικόνα 36 Διαδικασίες απομάκρυνσης τέφρας από το αεροδρόμιο Λα Πάλμα (Πηγή AENA,2021).....	51
Εικόνα 37 Δημιουργία Fajanas στην παραλία Playa Nueva πριν και μετά.(Πηγή ABC news,2021)	53
Εικόνα 38 Εκπομπή τέφρας 2 Δεκεμβρίου (Πηγή Λέκκας Ε., 2021).....	55
Εικόνα 39 Ηφαιστειακή ρωγμή δίπλα σε σπίτι καλυμμένο από τέφρα 1η Δεκεμβρίου.(Πηγή Aimilio Morenatti,2021)	56

Κεφάλαιο 1. Ηφαίστεια

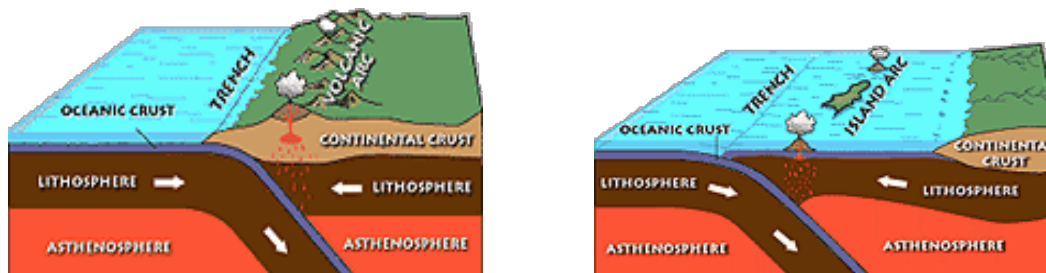
1.1. Γενικά

Ηφαίστειο είναι μια γεωλογική δομή που μπορεί να οριστεί ως ένα άνοιγμα στον φλοιό της γης μέσω του οποίου καυτό μάγμα (πλούσιο σε αέρια, λιωμένο πέτρωμα) προερχόμενο κάτω από τον φλοιό φτάνει στην επιφάνεια (Tazieff & Sabroux, 1983). Συχνά, τα αέρια διαταράσσουν το μάγμα και εκτοξεύουν ηφαιστειακά υλικά διαφόρων μεγεθών στην ατμόσφαιρα (ή, στην περίπτωση των υποθαλάσσιων ηφαιστείων, στο νερό). Αυτά τα θραύσματα πέφτουν γύρω από την οπή και συσσωρεύονται για να σχηματίσουν έναν λόφο γύρω από τον κρατήρα που εκρήγνυται. Ταυτόχρονα, λιωμένο μάγμα ξεχύνεται καθώς ρέει η λάβα. Αυτές οι ροές μπορούν, ανάλογα με το ιξώδες τους, την κλίση του εδάφους και τον όγκο της εξόδου, να φτάσουν σε διάφορες αποστάσεις από τον κρατήρα (από λίγα μέτρα έως πάνω από 100 km) πριν στερεοποιηθούν σε συμπαγή πετρώματα. Η θέση των ηφαιστείων συνδέεται άμεσα με τα όρια των τεκτονικών πλακών. Τα περισσότερα από τα ηφαίστεια του κόσμου εμφανίζονται κατά μήκος των ορίων των συγκλινουσών πλακών (οι ζώνες υποβύθισης), των ζωνών ρήξης πλακών ή των ορίων των αποκλινουσών πλακών (οι ζώνες εφελκυσμού). Στην πραγματικότητα, τα δύο τρίτα των ηφαιστείων του κόσμου βρίσκονται κατά μήκος του ορίου της πλάκας του Ειρηνικού, το λεγόμενο «Περιειρηνική ζώνη ή Δαχτυλίδι της Φωτιάς» (Blong R.J., 1984). Καθώς η πλάκα του Ειρηνικού ωθείται προς τα κάτω στον μανδύα της γης, αφυδατώνεται και λιωμένοι βράχοι υψώνονται μέσω του υπερκείμενου ηπειρωτικού φλοιού για να σχηματίσουν ηφαίστεια ζώνης διήθησης.



Εικόνα 1 Σχηματισμός διαφορετικών τύπων ηφαιστείων (Πηγή Εγκυκλ. Britannica)

Τα ηφαίστεια της ζώνης υποβύθισης παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον γιατί, ενώ δεν εκρήγνυνται τόσο συχνά και όσο τα ηφαίστεια ζώνης ρήξης ή εξάπλωσης, παράγουν τις πιο εκρηκτικές εκρήξεις και γενικά βρίσκονται σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπως στο ινδονησιακό αρχιπέλαγος. Άλλα γνωστά ηφαίστεια, όπως η αλυσίδα των νησιών της Χαβάης, εμφανίζονται λόγω της θέσης ενός hotspot (θερμές κηλίδες) βαθιά στον μανδύα της γης, που τροφοδοτεί το μαγματικό τήγμα στην επιφάνεια μέσω της υπερκείμενης πλάκας.



Εικόνα 2 Σχηματισμός ηφαιστειακού τόξου και νησιωτικού τόξου από ζώνη διήθησης (Πηγή sci.sdsu.edu)

1.2. Περιγραφή ηφαιστειακής δομής

Τα ηφαίστεια όπως αναφέρεται ανωτέρω αναλόγως με τον τρόπο που δημιουργούνται αποκτούν και διαφορετικά χαρακτηριστικά, εμφανίζονται σε διαφορετικά σχήματα και μεγέθη και κατηγοριοποιούνται ως ενεργά, αδρανοποιημένα ή εξαφανισμένα. Γνωρίζουμε ότι ένα ηφαίστειο έχει πολλά περισσότερα μέρη από αυτά που βλέπουμε με γυμνό μάτι. Εκείνα που φαίνονται στην επιφάνεια είναι ο ηφαιστειακός κώνος ή ηφαιστειακό οικοδόμημα και μπορούμε ακόμη να δούμε τη λάβα που ρέει κατά την έκρηξη. Ωστόσο, υπάρχουν διαφορετικά μέρη ενός ηφαιστείου που δεν μπορούμε να δούμε και είναι θεμελιώδη μέρη αυτού του γεωλογικού χαρακτηριστικού. Τέτοια στοιχεία είναι ο κρατήρας ή πόρος τροφοδοσίας, οι ακτινωτές φλέβες που τέμνουν κάθετα ένα ηφαίστειο και οι αερογωγοί από όπου διαφεύγουν οι αέριες φάσεις.

1.2.1. Κρατήρας

Είναι το άνοιγμα που βρίσκεται στην κορυφή του ηφαιστείου και διασχίζει η λάβα δια μέσω αυτού, την τέφρα και όλα τα πυροκλαστικά υλικά που εκτινάσσονται στην ατμόσφαιρα. Υπάρχουν πολλοί κρατήρες που ποικίλλουν σε μέγεθος και σχήμα, αν και το πιο συνηθισμένο είναι ότι είναι στρογγυλοί και πλατιοί. Μερικά ηφαίστεια έχουν περισσότερους από έναν κρατήρες και ονομάζονται παρασιπικοί αγωγοί τροφοδοσίας.

1.2.2. Ηφαιστειακός κώνος

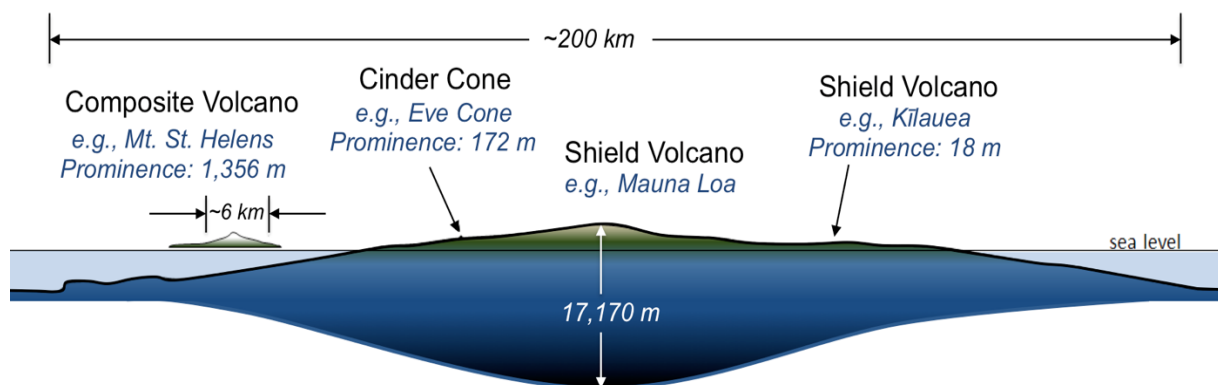
Είναι η συσσώρευση λάβας που στερεοποιείται καθώς προοδευτικά ψύχεται. Επίσης μέρος του ηφαιστειακού κώνου είναι όλοι οι πυροκλάστες (θραύσματα) έξω από το ηφαίστειο που παράγονται από εκρήξεις με την πάροδο του χρόνου. Ανάλογα με τον αριθμό των εκρήξεων που πραγματοποιήθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του ηφαιστείου, ο κώνος μπορεί να ποικίλει τόσο σε πάχος όσο και σε ύψος. Όλα τα ηφαίστεια διαθέτουν τον κεντρικό πόρο (central vent), συνέχεια αυτού του πόρου προς τα πάνω είναι ο κεντρικός κρατήρας

ή κρατήρας κορυφής (summit crater). Το ηφαιστειακό οικοδόμημα (edifice) που δημιουργείται έτσι καταλήγει σε κωνικό σχήμα και η συσσωρευμένη λάβα καθώς και/ή το πυροκλαστικό υλικό δομεί την κατασκευή που δημιουργείται γύρω από τον κεντρικό αγωγό.

Στο βάθος του κεντρικού αγωγού υπάρχει ο μαγματικός θάλαμος (magma chamber) που τροφοδοτεί τον αγωγό με ηφαιστειακό υλικό. Αποτελείται ακόμα από τις πλευρές (flanks) που είναι συνήθως ασταθείς και περιέχουν κατακόρυφες ρηγματώσεις που επικοινωνούν με τον κύριο ή με κάποιο δευτερεύοντα μαγματικό θάλαμο σε μικρότερο βάθος. Συχνά αυτές οι ρηγματώσεις αποτελούν την τροφοδοσία των πλευρικών εκρήξεων (flank eruptions) καθώς μάγμα εκχύνεται περιοδικά στις πλευρές του ηφαιστειακού οικοδομήματος. Οι εκρήξεις αυτές δημιουργούν νέους κώνους ηφαιστειακού υλικού που ονομάζονται παρασιτικοί κώνοι (parasitic cones). Οι ατμίδες ή φουμαρόλες προκαλούνται από τις ρηγματώσεις που αποτελούν διεξόδους διαφυγής ηφαιστειακών αερίων (Geo.auth.1997).

1.3. Τύποι ηφαιστειών

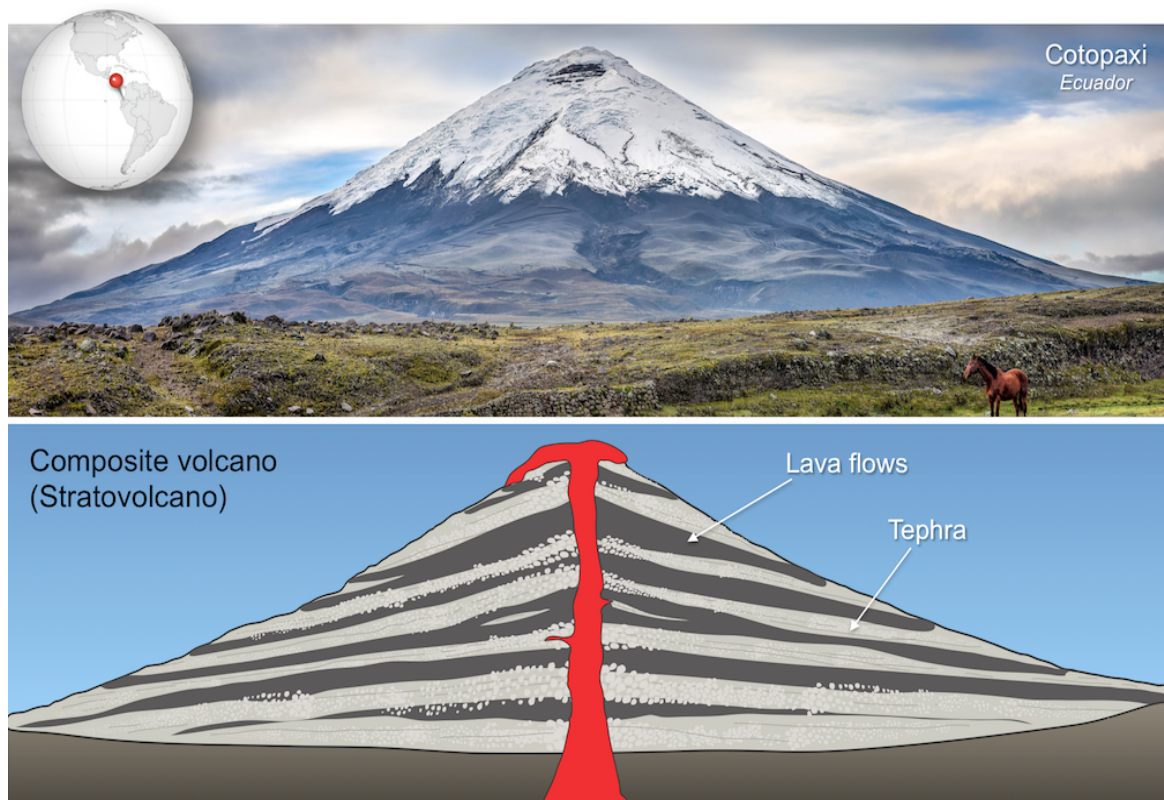
Ένα ηφαίστειο είναι ένας αεραγωγός μέσω του οποίου διαφεύγουν λιωμένοι βράχοι και αέρια από έναν θάλαμο μάγματος. Τα ηφαίστεια παρουσιάζουν πολλά χαρακτηριστικά και διαφέρουν μεταξύ τους όπως το ύψος, το σχήμα και η κλίση. Μερικά ηφαίστεια είναι ψηλοί κώνοι και άλλα είναι απλώς ρωγμές στο έδαφος έτσι το σχήμα ενός ηφαιστείου σχετίζεται με τη σύσταση του μάγματος. Το ιξώδες διαδραματίζει μεγάλο ρόλο στην εξέλιξη ενός ηφαιστείου. Μια έκρηξη πολύ παχύρρευστου μάγματος τείνει να παράγει ηφαίστεια με απότομες πλευρές με κλίσεις που είναι περίπου 30–35° (USGS, 2011). Αυτό συμβαίνει επειδή το παχύρρευστο ηφαιστειακό υλικό (υψηλό ιξώδες) δεν ρέει τόσο μακριά από το σημείο όπου εκρήγνυται, έτσι συσσωρεύεται σε εναλασσόμενα στρώματα. Όμως υπάρχουν και ηφαίστεια με μικρότερες κλίσεις από περίπου 10° καθώς δημιουργούνται όταν το βασαλτικής σύστασης υλικό (χαμηλό ιξώδες) ρέει σε μεγαλύτερες αποστάσεις από τον κρατήρα για να δημιουργήσει ευρείες, ήπιες πλαγιές. Η εκρηκτική συμπεριφορά ενός ηφαιστείου εξαρτάται από το περιεχόμενο και τον τρόπο διάχυσης των αερίων φάσεων κατά τη διάρκεια της ανόδου του μάγματος και έτσι έχουμε τους διάφορους τύπους ηφαιστειών (Κυριακόπουλος, 2003).



Εικόνα 3 Σύγκριση μεγεθών και σχημάτων ηφαιστειών (Πηγή Karla Panchuk 2017)

1.3.1. Στρωματοηφαίστεια (Composite/Stratovolcano)

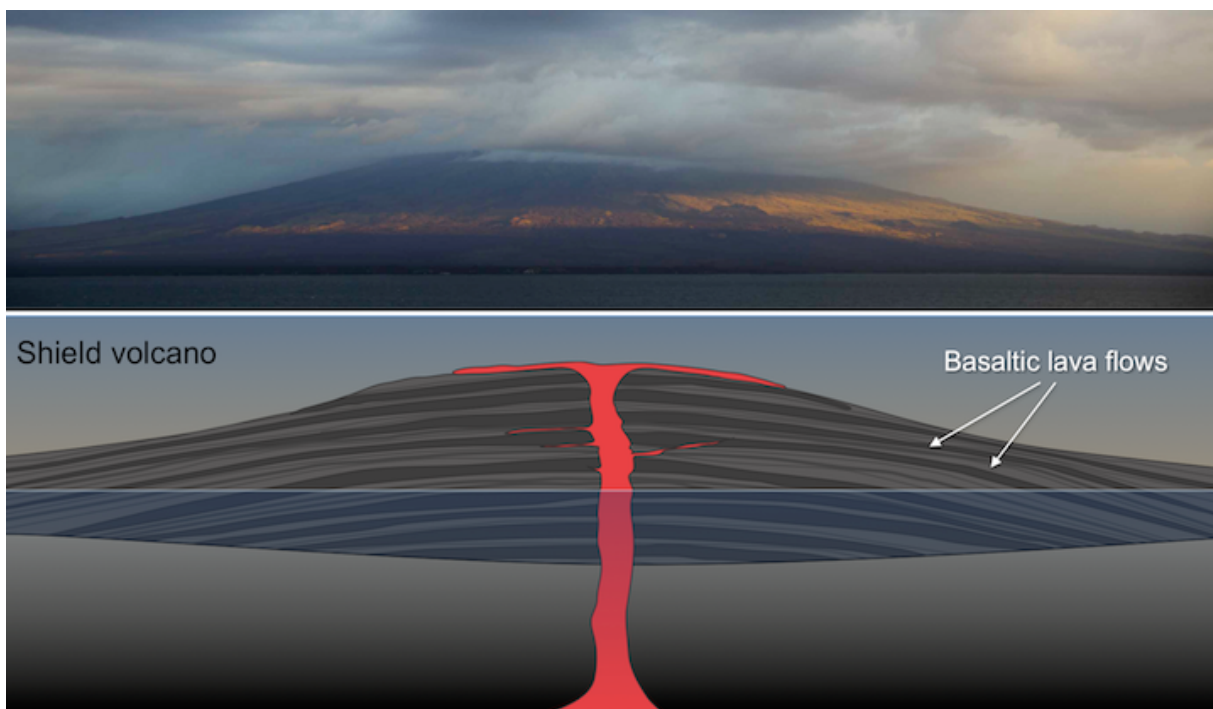
Τα στρωματοηφαίστεια ή μικτά ηφαίστεια έχουν απότομες πλευρές και κωνικό σχήμα. Ονομάζονται μικτά γιατί σε αυτά εναλλάσσονται εκχύσεις συμπαγούς λάβας και εκτίναξη ασύνδετων πυροκλαστικών προϊόντων (Κυριακόπουλος, 2003). Σχηματίζονται από παχύρρευστη, κολλώδη λάβα με δυσκολία στη ροή. Έτσι η λάβα καθώς δεν μπορεί να διαφύγει γρήγορα, συσσωρεύεται γύρω από τον αεραγωγό σχηματίζοντας ένα ηφαίστειο με χαρακτηριστικό του τις απότομες πλευρές και έναν εκπληκτικά στενό κρατήρα (Rubin K, 2017). Τα στρωματοηφαίστεια είναι πιο πιθανό να παράγουν βίαιες εκρήξεις λόγω της συσσώρευσης αερίων στο παχύρρευστο μάγμα και είναι τα πιο επικίνδυνα προκαλώντας σημαντικές καταστροφές. Ο Άνδεσίτης (που πήρε το όνομά του από τα βουνά των Άνδεων) και ο βασάλτης, είναι οι πιο διαδεδομένοι τύποι ηφαιστειακών πετρωμάτων (Κυριακόπουλος, 2003) από ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών πετρωμάτων που διοχετεύονται.



Εικόνα 4 Σύνθετο ηφαίστειο. Πάνω: Το Cotopaxi στον Ισημερινό εμφανίζει τον κώνο που κυμαίνεται προς τα πάνω, χαρακτηριστικό των σύνθετων ηφαιστειών. Κάτω: Διάγραμμα σύνθετου ηφαιστείου που δείχνει εναλλασσόμενα στρώματα λάβας και τέφρας (Πηγή Karla Panchuk 2017)

1.3.2. Ασπίδομορφα (Shield)

Τα ηφαίστεια τύπου ασπίδας, όπως το ηφαίστειο Sierra Negra στα νησιά Γκαλαπάγκος και το Mauna Loa στη Χαβάη έχουν σχήμα που μοιάζει με ήπιο λόφο επειδή έχουν δημιουργηθεί από διαδοχικές ροές βασαλτικής λάβας χαμηλού ιξώδους. Το χαμηλό ιξώδες της λάβας σημαίνει ότι μπορεί να ρέει σε μεγάλη απόσταση, με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέγεθος των ασπίδομορφων ηφαιστείων σε σύγκριση με τα σύνθετα ηφαίστεια ή τους κώνους σκωρίας. Γιαυτό υπερτερεί το πλάτος σε σχέση με το ύψος αυτών των ηφαιστείων. Σε περίπτωση που το νερό εισέλθει με κάποιο τρόπο στον αεραγωγό και έλθει σε επαφή με το μάγμα όπως η κορυφή των ηφαιστείων που συνήθως είναι καλυμμένη από χιόνι ή παγετώνα, δημιουργείται μια εκρηκτική εκτόνωση ενώ στις άλλες περιπτώσεις χαρακτηρίζονται από ένα σιντριβάνι χαμηλής εκρηκτικότητας. Το 90% του ηφαιστείου αποτελείται από συμπαγή λάβα και ελάχιστα από πυροκλαστικά υλικά. Τα ασπίδομορφα ηφαίστεια είναι αποτέλεσμα υψηλών ρυθμών παροχής μάγματος. Τα ηφαίστεια ασπίδας μπορεί να είναι το προϊόν ενός hotspot, αλλά μπορεί και να δημιουργηθούν κατά μήκος ηφαιστειακών τόξων που σχετίζονται με την βύθιση τεκτονικών πλακών (OregonUniversity,2003).



Εικόνα 5 Ασπίδομορφο ηφαίστειο. Πάνω: Ηφαίστειο Sierra Negra Galapagos islands με τυπικό ασπίδομορφο σχήμα. Κάτω: σχηματικό διάγραμμα ενός ασπίδομορφου ηφαιστείου που δείχνει το σχηματισμό του από τις βασαλτικές ροές. (Πηγή BRJ Inc.2012)

1.3.3. Κώνος σκωριών (Cinder cone)

Είναι ο συνηθέστερος και μικρότερος τύπος ηφαιστείου που συναντάμε με τυπικό ύψος κάτω από 300μ αλλά απότομες πλαγιές (NPS, 2021a). Τέτοιου είδους ηφαίστεια δημιουργούνται γρήγορα συνήθως από ένα μόνο κύκλο εκρήξεων, μπορούμε να τα συναντήσουμε κοντά σε άλλους τύπους ηφαιστειών ως παρασιτικούς κώνους αλλά και μόνα τους. Οι κώνοι σκωριών αποτελούνται κυρίως από βασαλτικής σύστασης τέφρα που εκτοξεύεται από το ηφαίστειο.



Εικόνα 6 Ηφαίστειο Cinder Cone στο Lassen Volcanic National Park Καλιφόρνια (Πηγή NPS)

1.3.4. Θόλοι λάβας

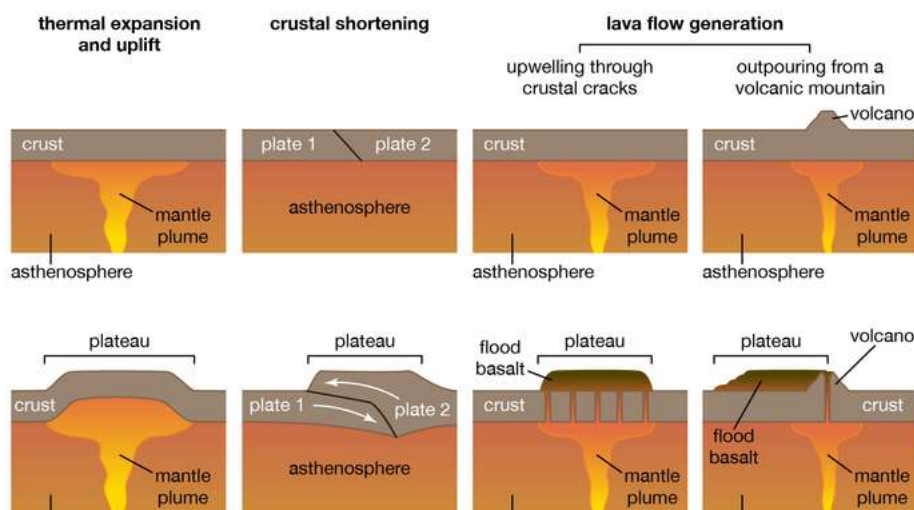
Οι θόλοι λάβας δημιουργούνται όταν η λάβα είναι πολύ παχύρρευστη για να ρέει, σύμφωνα με το Γεωλογικό Ινστιτούτο των ΗΠΑ. Μια φυσαλίδα ή βύσμα στερεοποιημένου πετρώματος σχηματίζεται πάνω από μια σχισμή. Αυτή η ψυχρότερη, παχιά λάβα αναδύεται συνήθως κοντά στο τέλος μιας έκρηξης και συνήθως δεν έχουν αρκετή πίεση ώστε να προκαλέσουν εντυπωσιακές εκρήξεις αλλά σχηματίζουν θόλους λάβας μέσα στους κρατήρες. Το Όρος της Αγίας Ελένης είναι ένα τέτοιο παράδειγμα με αρκετούς θόλους λάβας μέσα στον κρατήρα, σύμφωνα με τη NASA.



Εικόνα 7 Θόλος λάβας (Πηγή Volcanodiscovery)

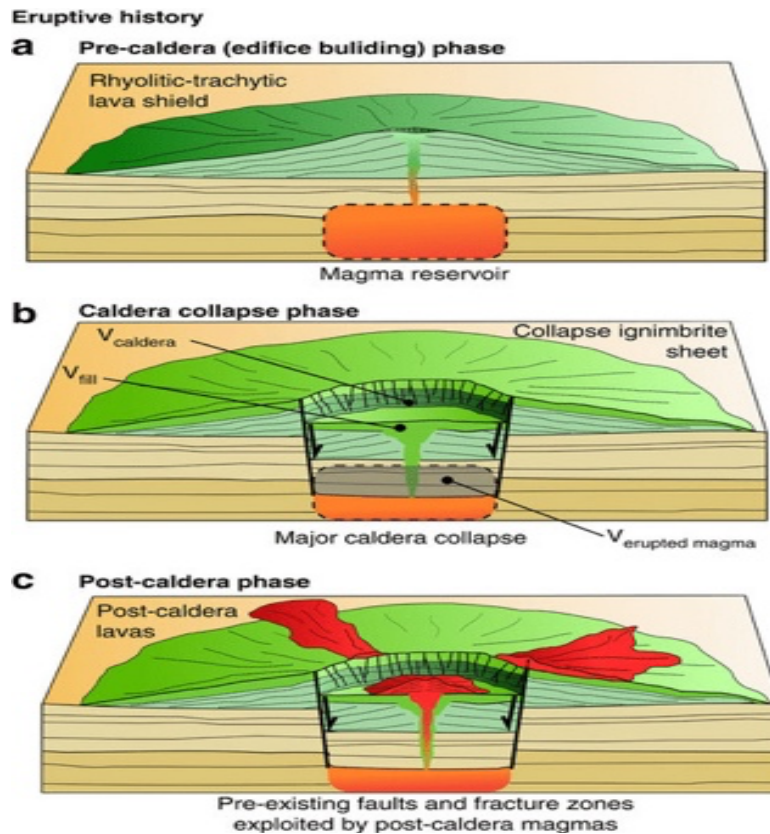
1.3.5. Άλλοι τύποι ηφαιστείων

Μια μορφή ηφαιστείων που δημιουργούνται από την εναπόθεση στρωμάτων λάβας και εκπέμπονται από συστήματα ρωγμών είναι τα **Βασαλτικά υψίπεδα (Plateaux)**. Αν η δημιουργία τέτοιων στρωμάτων γίνεται σε περιοχές με ανώμαλο έδαφος τότε παρατηρούνται ζώνες με μεγάλο πάχος ενώ το ελάχιστο πάχος παρατηρείται σε περιοχές επίπεδες ή υπερυψωμένες.



Εικόνα 8 Οι ηφαιστειακές διεργασίες, η βράχυνση του φλοιού και η θερμική διαστολή μπορούν να οδηγήσουν στο σχηματισμό οροπεδίων. (Πηγή Encyclopædia Britannica, Inc.)

Μετά από την κύρια φάση μιας Πλινιακής έκρηξης ενός στρωματοηφαιστείου, αδειάζει ο υποκείμενος μαγματικός θάλαμος που βρίσκεται σε μικρό εστιακό βάθος και καταρρέει το ηφαιστειακό οικοδόμημα και στο κενό του δημιουργείται μια **καλδέρα**. Η τελευταία φάση της Πλινιακής έκρηξης χαρακτηρίζεται από τη γένεση πυροκλαστικών ροών. Όμως, η κατάρρευση του ηφαιστειακού οικοδομήματος, ενεργώντας ως έμβολο, προκαλεί επιπλέον εκρήξεις από ογκώδεις πυροκλαστικές ροές κίσηρης κατά μήκος των περιφερειακών ρηγμάτων που περιβάλλουν την καταρρέουσα μάζα. Αυτές οι ροές δημιουργούν παχιές αποθέσεις πυρομβρίτη ή ιγκνιμβρίτη (*ignimbrite*) που είναι το σήμα κατατεθέν του ηφαιστείου τύπου **καλδέρας** (Geo.auth.1997). Ανάλογα με τον τρόπο γέννησης τους χωρίζονται σε **πυροκλαστικές η τύπου Crater Lake** από την κατάρρευση στρωματοηφαιστείων και τις **βασαλτικές καλδέρες** που προέρχονται από την κατάρρευση ασπιδομόρφων ηφαιστείων.



Εικόνα 9 Δημιουργία καλδέρας (Πηγή researchgate.net)

Επιπλέον δευτερεύουσες δομές ηφαιστείων είναι τα ηφαίστεια αερίων όπου συναντάμε έξοδος πτητικών συστατικών μαζί με άλλα στέρεα όπως ηφαιστειακή σποδός και ηφαιστειακή άμμος σε μεγάλο ύψος σχηματίζοντας πυρακτωμένα νέφη με θερμοκρασίες άνω των 1000°C που μπορούν να εξαφανίσουν οτιδήποτε βρεθεί στην πορεία τους όπως συνέβη στη Ν. Μαρτινίκα το 1902 όπου βρήκαν το θάνατο 30000 άτομα. Τα ηφαίστεια **Maar-diatreme** παράγονται από εκρήξεις που κόβουν σε μεγάλο βάθος το πέτρωμα. Το maar είναι ο κρατήρας που δημιουργείται στο έδαφος και περιβάλλεται από έναν δακτύλιο, ενώ η δομή του συνεχίζει προς τα κάτω και περικλείει διάφορες εναποθέσεις (White & P.-S. Ross, 2011). Ουσιαστικά μετά από μια έκρηξη όταν η δραστηριότητα ενός ηφαιστείου εξαντλείται και ο κρατήρας γεμίζει με ηφαιστειακό υλικό με ακανόνιστα σχήματα καθώς και υλικά από το περιβάλλοντα χώρο αυτά στερεοποιούνται και γίνονται μια ενιαία μάζα εως ότου υπάρξει μια νέα έντονη ηφαιστειακή δραστηριότητα. Όταν το τμήμα του κρατήρα γεμίσει με νερό μετεωρικό υπόγειο η θαλασσινό και σχηματιστούν αβαθείς λίμνες αυτές ονομάζονται **Maar** και οι διαστάσεις τους εξαρτώνται από τη βιαιότητα της έκρηξης (Κυριακόπουλος, 2003).

Κεφάλαιο 2. Δραστηριότητα Ηφαιστείου

2.1. Συχνότητα

Αυτή η ταξινόμηση βασίζεται σε αρχεία που ελήφθησαν σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα με γεωλογικούς όρους οπότε μπορεί να φανεί παραπλανητική επειδή τα επίσημα εξαφανισμένα ηφαίστεια μπορεί ξαφνικά να ενεργοποιηθούν μετά από αρκετές εκατοντάδες ή και χιλιάδες χρόνια ανάπαυσης. Παρόλα αυτά τα ηφαίστεια διαχωρίζονται σε:

2.1.1. Ενεργά ηφαίστεια (Active).

Εκείνα τα ηφαίστεια που είναι μεν ανενεργά αλλά μπορούν να εκραγούν ανά πάσα στιγμή. Αυτό συμβαίνει στα περισσότερα ηφαίστεια αλλά ως παράδειγμα μπορούμε να αναφέρουμε το Cumbre Vieja Λα Παλμα Ισπανίας(ενεργό τώρα), Αίτνα στη Σικελία Ιταλίας, Fuego Γουατεμάλα και Irazu στην Κόστα Ρίκα. Θεωρητικά ως ενεργά ηφαίστεια ονομάζουμε εκείνα που έχουν δραστηριοποιηθεί κατά τους ιστορικούς χρόνους.

2.1.2. Κοιμώμενα ηφαίστεια (Dormant).

Κοιμώμενα ή εν υπνώσει ονομάζονται τα ηφαίστεια που διατηρούν ελάχιστη δραστηριότητα. Παρά τη χαμηλή δραστηριότητά του, περιστασιακά εκρήγνυται. Όταν δεν υπάρχουν ηφαιστειακές εκρήξεις για αιώνες, το ηφαίστεια θεωρείται αδρανές. Το ηφαίστεια Teide στα Κανάρια Νησιά της Ισπανίας και το υπερηφαίστεια Yellowstone στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι παραδείγματα αδρανών ηφαιστειών. Ωστόσο και τα δύο παραδείγματα έδειξαν κίνηση τα τελευταία χρόνια, έγινε ένας ήπιος σεισμός στην περιοχή τους, δείχνοντας ότι είναι ακόμα «ζωντανά» και μπορεί κάποια στιγμή να δραστηριοποιηθούν, δεν έχουν εξαφανιστεί ή εκτοπιστεί. Οι εκρήξεις του όρους Lamington στην Παπούα Νέα Γουινέα (1951), του όρους Arenal στην Κόστα Ρίκα (1968) και του Helgafell στην Ισλανδία (1973) είναι παραδείγματα τέτοιας συμπεριφοράς (Tazieff & Sabroux, 1983). Καθώς τα ιστορικά αρχεία υποδηλώνουν ότι πάνω από 1300 ξεχωριστά ηφαίστεια έχουν εκραγεί κάπου στη γη τα τελευταία 10.000 χρόνια, όλα εκείνα τα ηφαίστεια που παρουσιάζουν κάποια δραστηριότητα κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου προσδιορίζονται ως ιστορικά ενεργά ή ηφαίστεια της εποχής του Ολόκαινου (Siebert & Simkin, 2000.)

2.1.3. Εσβεσμένο ηφαίστεια (Extinct).

Η μέση περίοδος ηρεμίας μεταξύ των εκρήξεων καθορίζει εάν ένα ανενεργό ηφαίστεια είναι και εσβεσμένο. Οι περιόδοι ηρεμίας μερικών ηφαιστειών μπορεί να φτάνει και εκατοντάδες χιλιάδες έτη. Σε κάθε περίπτωση, οι ερευνητές δεν αποκλείουν κάποια στιγμή να εμφανιστούν ξανά. Το ηφαίστεια Diamond Head στη Χαβάη είναι ένα παράδειγμα εσβεσμένου ηφαιστείου. Η περιοχή Yellowstone που δεν έχει δώσει σημάδια έκρηξης τα τελευταία 70.000 χρόνια θα μπορούσε να θεωρηθεί ανενεργή, όμως στην πραγματικότητα εξαιτίας του ρυθμού ανύψωσης τους συχνούς σεισμούς και φυσικά ένα πολύ εκτεταμένο και ενεργό γεωθερμικό πεδίο θεωρείται ενεργή (Wei-Haas, 2019). Από την άλλη, μικροί κώνοι σκωριών που μπορεί

να σχηματιστούν από μια έκρηξη, μπορεί να θεωρηθούν εσβεσμένοι μετά την έκρηξή τους, διότι συνήθως εκρήγνυνται μόνο μία φορά.

2.2. Τύποι εκρήξεων

2.2.1. Τύπου Χαβάης

Οι εκρήξεις τύπου Χαβάης δεν είναι μεγάλες αλλά εκρέουν χαμηλά όπως ένας πίδακας μιας πετρελαιοπηγής. Το ηφαίστειο εκπέμπει βασαλτική λάβα, η οποία είναι αρκετά ρευστή επειδή χαρακτηρίζεται από χαμηλό ιξώδες και περιέχει μικρό ποσοστό διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2). Χνγ;iw πυροκλαστικά υλικά (ένα καυτό μείγμα αερίου, τέφρας και θραυσμάτων βράχου και είναι τυπική έκρηξη ασπιδόμορφου ηφαιστείου. Η διαφορά μεταξύ τύπου Χαβάης και στρόμπολι έγκειται στα διαστήματα των εκρήξεων τους με τις εκρήξεις τύπου Χαβάης να ξεπερνούν τον τύπου στρόμπολι από 300-10000s. Αυτή η διαφορά αντικατοπτρίζει τις διαφορετικές διεργασίες που γίνονται και το αν υπάρχουν παγιδευμένα αέρια στο μάγμα που εκρήγνυται ή αν έχουν αποδεσμευτεί από αυτό (Houghton et al, 2016)



Εικόνα 10 Έκρηξη τύπου Χαβάης ηφαίστειο Kilauea.(Πηγή USGS)

2.2.2. Τύπου Στρόμπολι

Το ηφαιστείο απελευθερώνει πυροκλαστικό υλικό και αέριες φάσεις. Οι εκρήξεις είναι σποραδικές και το ηφαιστείο δεν συνεχίζει να εκπέμπει λάβα. Οι εκρήξεις τύπου Strombolian χαρακτηρίζονται από εντονότερη εκρηκτικότητα σε σύγκριση με τις Hawaian μικρότερης όμως διάρκειας με σημείο διαφοροποίησης τα 300s όπως αναφέρεται από τον Houghton (2016). Άλλη μια διαφοροποίηση είναι ότι χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη αναλογία πυροκλαστικών προϊόντων και βασαλτικής λάβας η οποία τις περισσότερες φορές εξέρχεται κατακερματισμένη ενώ οι κλίσεις του ηφαιστειακού κτίσματος είναι αρκετά έντονες (30°- 45°) (Κυριακόπουλος, 2003)



Εικόνα 11 Έκρηξη τύπου Στρόμπολι. (Πηγή Vanessa Warren)

2.2.3. Τύπου Ισλανδίας

Σε αυτού του είδους που μοιάζουν με την έκρηξη τύπου Χαβάης παρατηρούμε εκρήξεις μέσω ρωγμών όπου κατακλυσμάσιος βασάλτης με μικρή ροή καλύπτει μεγάλες εκτάσεις σε οριζόντια ανάπτυξη. Στο τέλος κάθε δράσης σχηματίζονται μικρά οικοδομήματα κωνικού σχήματος κατά μήκος αυτών των ρωγμών (Κυριακόπουλος, 2003).



Εικόνα 12 Έκρηξη μέσω ρωγμών ηφαιστειο Bardarbunga Ισλανδία (Πηγή Destination Specialist)

2.2.4. Τύπου Βουλκάνο

Το ηφαιστειο εκπέμπει πολύ παχύρρευστη λάβα με πολύ λίγο υγρό που στερεοποιείται πολύ γρήγορα. Σχηματίζεται ένα μεγάλο σύννεφο πυροκλαστικού υλικού και εκπέμπεται μεγάλη ποσότητα τέφρας. Χαρακτηρίζονται από εκρήξεις με τη μορφή νεφών παρόμοια με μανιτάρια ή μύκητες. Οι πυροκλαστικές ροές παράγονται από αυτού του είδους τις εκρήξεις και μπορούν να προκύψουν από την κατάρρευση ηφαιστειακών θόλων . Το κύριο σενάριο συνήθως περιλαμβάνει την έκρηξη παχύρρευστου μάγματος, το οποίο είναι πλούσιο σε ηφαιστειακό αέριο και σχηματίζει σκοτεινά σύννεφα. Η δράση τύπου Βουλκάνο είναι πιο εκρηκτική από την Στρομπόλι και δημιουργεί κατακόρυφες στήλες ύψους 5-10κμ.



Εικόνα 13 Έκρηξη τύπου Βουλκάνο (Πηγή Heather Bleick, USGS)

2.2.5. Πλινιακού και Υποπλινιακού τύπου

Η πλινιακού και υποπλινιακού τύπου εκρήξεις διαφέρουν ως προς την ένταση τους. Οι πλινιακού τύπου εμπεριέχουν περισσότερα πυριτικά στοιχεία. Οι διαφορές μεταξύ των δύο είναι στην VEI (Volcanic Explosive Index) όπου οι πλινιακού τύπου έχουν δείκτη 4 - 6 ενώ οι υποπλινιακού 3 – 4. Το ηφαίστειο εκτοξεύει λάβα πολύ παχύρρευστη και πολύ βίαια. Χαρακτηρίζεται από μεγάλη ένταση, τη συνεχή εκτόξευση αερίων και τη μεγάλη εκκένωση τέφρας στην ατμόσφαιρα. Μπορεί επίσης να δημιουργήσει Lahar συμπαγής λάβα και ιλύς αν προέρχεται από μικτά ηφαίστεια (NPS, 2021). Αυτό συμβαίνει συνήθως μετά από μεγάλες περιόδους ηρεμίας που μπορεί να υπερβαίνει και τα 100 χρόνια (Κυριακόπουλος, 2020). Μερικές φορές η έκρηξη μάγματος προκαλεί την κατάρρευση της κορυφής του ηφαιστείου και έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κρατήρα. Η έκρηξη του Βεζούβιου ήταν πλινιακού τύπου και πήρε το όνομά της από τον Ρωμαίο φυσιοδίφη Πλίνιο τον νεότερο καθώς ήταν ο πρώτος που την περιέγραψε μετά το θάνατο του θείου του Πλίνιου του Πρεσβύτερου, ο οποίος πέθανε σε αυτήν την έκρηξη του Βεζούβιου το 79 μ.Χ (Sigurdsson,2003).



Εικόνα 14 Πλινιακού τυπου έκρηξη χαρακτηριστική μεγάλη εκκένωση τέφρας στην ατμόσφαιρα (Πηγή sciencephoto.com)

2.2.6. Τύπου Pelée

Πήρε το όνομά του από την έκρηξη του ηφαιστείου Pelee στη Μαρτινίκα το 1902, που σκότωσε πάνω από 30 χιλιάδες ανθρώπους. Με την έκρηξη αναπτύχθηκε ένας θόλος λάβας στην κορυφή ο οποίος κατέρρευσε και δεδομένου ότι δεν υπήρχε έξοδος για τα αέρια, και δημιουργήθηκε μεγάλη πίεση στο εσωτερικό του ηφαιστείου. Με τον τρόπο αυτό το τοίχωμα του ηφαιστείου αρχίζει να παραμορφώνεται και η λάβα εκκενώνεται και από τις δύο πλευρές του τοιχώματος. Κατά τα πρώιμα στάδια παρατηρείται έντονη εκρηκτικότητα (Κυριακόπουλος, 2003).Οι εκρήξεις αυτού του τύπου έχουν κοινά χαρακτηριστικά με τις πλινιακού τύπου γιατί συνδέονται με τα όξινα μάγματα και με τη δημιουργία πυροκλαστικών ροών (Scarath, 2002).

Με κύρια διαφορά ότι στις Peleean το μάγμα έχει χάσει τα αέρια του με αποτέλεσμα να μην θρυμματίζεται και να αυξάνει το ήδη υψηλό ιξώδες του λόγω της παρουσίας του διοξειδίου του πυριτίου (Geo.auth. 1997).

2.2.7. Φρεατομαγματική

Είναι εκρήξεις που παράγονται από την αλληλεπίδραση του μάγματος με τα υπόγεια ή επιφανειακά νερά. Το μάγμα που αναδύεται μέσω του φλοιού της γης μεταφέρει μαζί του μεγάλη ποσότητα θερμικής ενέργειας. Όταν αυτό το μάγμα έρθει σε επαφή με νερό μετατρέπεται σε αέρια κατάσταση και αυτή η αύξηση του όγκου των μορίων του νερού σε συνδυασμό με τα παρακείμενα πετρώματα και το ταχέως διαστελλόμενο νερό μπορεί να προκαλέσει το διάρρηξη του μάγματος και του πετρώματος με μεγάλη βιαιότητα. Μιλώντας για υδροηφαίστεια είναι απαραίτητο να αναφέρουμε τις φρεατομαγματικές εκρήξεις ως τις εκρήξεις από την αλληλεπίδραση του νερού με το μάγμα, ενώ οι φρεατικές εκρήξεις ή οι εκρήξεις ατμού που περιλαμβάνουν απλώς θερμούς βράχους και νερό, και παρόλο που η μαγματική θερμότητα είναι πιθανή η πηγή της θερμικής ενέργειας στην αντίδραση, οι αποθέσεις δεν περιέχουν μαγματικό υλικό (Burns, 2010). Αυτές λοιπόν πολλές φορές ευθύνονται για τη δημιουργία ηφαιστειακών νησίδων όπως η νήσος Surtsey νότια της Ισλανδίας το οποίο δημιουργήθηκε το 1963 ξεπηδώντας μέσα από τη θάλασσα από υδροηφαίστειακή δράση. Όταν το ηφαιστειακό νησί Surtsey γεννήθηκε στον Ατλαντικό, οι αρχικές υδροηφαιστικές εκρήξεις ήταν εξαιρετικά θεαματικές. Καθώς το ηφαίστειο μεγάλωνε, η λάβα που ανερχόταν στον κεντρικό αεραγωγό αλληλεπιδρούσε με το νερό σε μικρότερο βαθμό, έτσι ώστε τα στάδια ύφεσης της έκρηξης έγιναν τύπου Στρόμπολι (Camp, 2006).



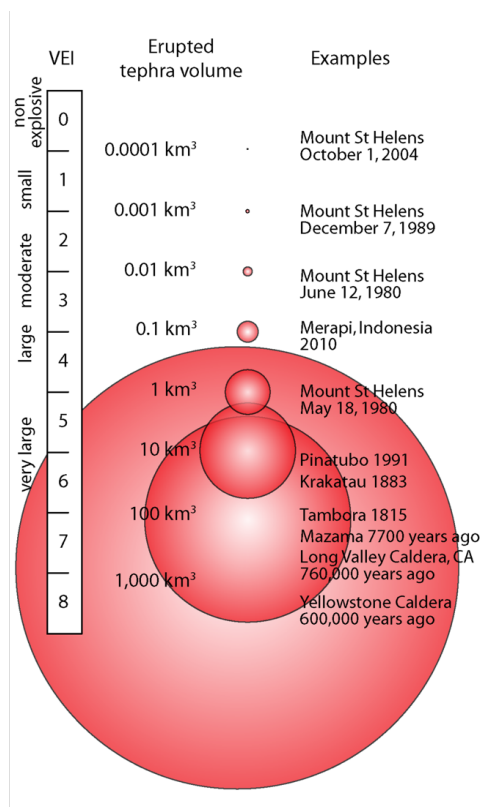
Εικόνα 15 Νήσος Surtsey Ισλανδία

2.3. Δείκτης εκρηκτικότητας ηφαιστειών VEI

Ως προς την κατανομή της έντασης και του μεγέθους αλλά και τη συχνότητα των φαινομένων που απαρτίζουν μια ηφαιστειακή έκρηξη το 1982 οι επιστήμονες Chris Newhall

Η έκρηξη του Cumbre Vieja και επιπτώσεις στην αεροπλοΐα

και Stephen Self του Ινστιτούτου γεωλογικών ερευνών της Αμερικής δημιούργησαν μια βαθμονομημένη κλίμακα (Volcanic Explosivity Index, VEI).. Το κύριο χαρακτηριστικό μέτρησης της έκρηξης που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του δείκτη ηφαιστειακής εκρηκτικότητας είναι ο όγκος του πυροκλαστικού υλικού που εκτοξεύεται από το ηφαίστειο και το ύψος της εκρηκτικής στήλης.. Το πυροκλαστικό υλικό περιλαμβάνει ηφαιστειακή τέφρα, μύδρους, πυροκλαστικές ροές και άλλους τύπους εκτινασσομένων υλικών. Το ύψος που φτάνει μια έκρηξη καθώς και η διάρκεια της έκρηξης λαμβάνονται επίσης υπόψη για την αποτίμηση ενός επιπέδου VEI σε μια έκρηξη.



Εικόνα 16 Διάγραμμα συσχέτισης VEI, εκτινασσομένου όγκου και ιστορικών και προϊστορικών εκρήξεων

Κάθε διάστημα στο VEI (από 0 έως 8) αντιπροσωπεύει μια δεκαπλάσια αύξηση στο μέγεθος μιας έκρηξης (εκτός από τα συμβάντα στο κάτω μέρος της κλίμακας). Οι εκρήξεις τύπου Χαβάης βαθμολογούνται με 0 στον δείκτη, με τις εκρήξεις υπερηφαιστειών όπως στο Yellowstone στο 8. Η κλίμακα βασίζεται στον όγκο του μάγματος που εξερράγη (μέγεθος) και στο ύψος της στήλης κατά την εκρήξη. Ο δείκτης παρέχει επίσης μια μοναδική μονολεκτική ποιοτική περιγραφή για κάθε τιμή και περιλαμβάνει την παραδοσιακή ταξινόμηση των εκρήξεων με βάση τα χαρακτηριστικά των κλασικών εκρήξεων (NPS, 2017).

VEI	Όγκος υλικών	Εκρηκτικότητα	Ύψος στήλης υλικών	Συχνότητα
0	< 10.000 m ³	Μη εκρηκτική	< 100 m	Διαρκής
1	> 10.000 m ³	Ελάχιστα εκρηκτική	100–1.000 m	Ημερήσια
2	> 1.000.000 m ³	Μικρή	1–5 km	1 κάθε εβδομάδα
3	> 10.000.000 m ³	Μέτρια	3–15 km	1 κάθε λίγους μήνες
4	> 0,1 km ³	Μεγάλη	10–25 km	≥ 1 κάθε 1 έτος
5	> 1 km ³	Εξαιρετικά μεγάλη	20–35 km	≥ 1 κάθε 10 έτη
6	> 10 km ³	Κολοσσιαία	> 30 km	≥ 1 κάθε 100 έτη
7	> 100 km ³	Υπερ-κολοσσιαία	> 40 km	≥ 1 κάθε 1.000 έτη
8	> 1.000 km ³	Συντελειιακή (υπερηφαίστειο)	> 50 km	≥ 1 κάθε 10.000 έτη

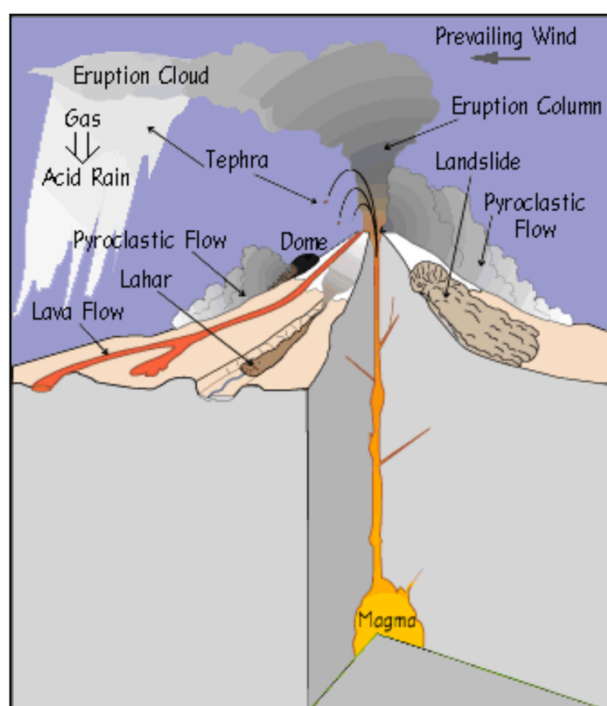
Εικόνα 17 Δείκτης εκρηκτικότητας βάση της συχνότητας (Πηγή USGS)

Ο ανωτέρω πίνακας μας δείχνει την σύνδεση μεταξύ του δείκτη και τη συχνότητα εκρήξεων ενός ηφαιστείου και παρατηρούμε ότι η υψηλής βαθμολογίας εκρήξεις είναι σπάνια γεγονότα αλλά παρόλα αυτά πιθανά. Μόνο 4 εκρήξεις πάνω από 7 VEI έχουν καταγραφεί ενώ πάνω από 3000 επιπέδου 2 VEI (Hobart M, 2007).

Κεφάλαιο 3. Ηφαιστειακοί Κίνδυνοι

3.1. Ηφαιστειογενή παράγωγα

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις είναι τα πιο συναρπαστικά φαινόμενα από όλες τις δυναμικές διεργασίες της Γης, και πάντα προκαλούσαν την ανθρώπινη περιέργεια και όχι σπάνια τον φόβο. Τα ηφαίστεια και οι ηφαιστειακές τους εκρήξεις όμως όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα ποικίλουν, για να αρχίσει κανείς να τα καταλαβαίνει πρέπει να κατανοήσει μεγάλο όγκο πληροφοριών (Lockwood & Hazlett, 2010). Τα ηφαίστεια παράγουν πρωτογενείς αλλά και δευτερογενείς κινδύνους οι οποίοι πρέπει να αναλυθούν ξεχωριστά για να κατανοήσουμε τις επιπτώσεις.



Εικόνα 18 Ηφαιστειακοί κίνδυνοι (Πηγή USGS)

3.1.1. Ηφαιστειακά αναβλήμματα

Τα θραύσματα αυτά συχνά αναφέρονται και ως ηφαιστειακές βόμβες ή μύδροι είναι ο κύριος κίνδυνος για την ανθρώπινη ζωή και τις υποδομές από εκρήξεις τύπου Στρόμπολι (Fitzgerald et al., 2020). Το μέγεθός τους ποικίλει από μερικά εκατοστά έως αρκετά μέτρα ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις η απόσταση εκτόξευσης τους είναι από μερικές εκατοντάδες μέτρα έως 2 με 5 χιλιόμετρα. Οι περισσότερες έρευνες μέχρι σήμερα αφορούσαν την κατανόηση αυτού του τύπου έκρηξης και του τρόπου με τον οποίο σχηματίζονται και μεταφέρονται αυτού του είδους τα θραύσματα. Ωστόσο, ελάχιστη προσοχή έχει δοθεί στον τρόπο κατανομής των βαλλιστικών στην ενσωμάτωση αυτών των δεδομένων στη διαχείριση κινδύνου. Ο κύριος κίνδυνος συναντάται σε περιοχές κοντά στο ηφαίστριο αποτελώντας σημαντική απειλή για επιστήμονες και τουρίστες όπως αποδείχτηκε στην έκρηξη του ηφαιστείου Mount Ontake στην Ιαπωνία στις 27 Σεπτεμβρίου 2014 όπου έχασαν τη ζωή τους

30 πεζοπόροι (The Guardian, 2014) αλλά και για εγκαταστάσεις που βρίσκονται πλησίον του ηφαιστείου (Laughlin et al., 2015).

3.1.2. Πυροκλαστικές αποθέσεις

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις μπορεί να δημιουργήσουν μεγάλης ταχύτητας μείγματα από πετρώματα, τέφρα, και αέρια τα οποία αν προωθούνται με μεγάλη ταχύτητα στην επιφάνεια του δάφους ή της θάλασσας ονομάζονται πυροκλαστικές αποθέσεις ροής η μεγακυματισμού και αποθέσεις πτώσης. Οι πυροκλαστικές αυτές αποθέσεις ροής είναι συγκεντρωμένες στιβάδες καυτής τέφρας, αερίων και βράχων ενώ οι πυροκλαστικές αποθέσεις πτώσης είναι πιο αραιές και μπορούν να εξαπλωθούν ευρέως σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Καθώς η δέσμη επεκτείνεται, τα πυροκλαστικά προϊόντα πέφτουν πίσω στην επιφάνεια της γης κάτω από την επίδραση της βαρύτητας σε διάφορες αποστάσεις κατά τον πνέοντα άνεμο (Κυριακόπουλος, 2003). Οι πυροκλαστικές αποθέσεις μπορούν να σχηματιστούν με οποιονδήποτε εκ των μηχανισμών πυροκλαστικής εκρηκτικής δραστηριότητας μαγματικός, φρεατομαγματικός και φρεατικός (Fischer, 1979). Η αρχαία πόλη της Πομπηίας καταστράφηκε από τέτοιες πυροκλαστικές αποθέσεις όπως και στην Καραϊβική το λιμάνι του St Pierre το 1902 από το όρος Πελέ όπου το ρεύμα αυτό χρειάστηκε μόνο 3 λεπτά για να διασχίσει μια απόσταση 6 χιλιομέτρων. Αυτό που επηρεάζει κυρίως το αποτύπωμα του κινδύνου σε τέτοιες περιπτώσεις είναι κυρίως η τοπογραφία της περιοχής. Η απόσταση στην οποία η πυροκλαστική ροή μπορεί να ταξιδέψει κυμαίνεται από μερικά χιλιόμετρα σε μικρές εκρήξεις έως και 100 χιλιόμετρα σε πιο μεγάλες και έντονες περιπτώσεις.



Εικόνα 19 Πυροκλαστικές ροές έκρηξη Mount St. Helens (Πηγή Encyclopedia Britannica)

3.1.3. Λασπορεύματα ή Λαχάρ

Οι λασποροές και οι πλημμύρες αποτελούν μια από τις κυριότερες αιτίες για την απώλεια ζωής κατά τις ηφαιστειακές εκρήξεις. Τα Λαχαρ είναι μια ινδική λέξη και με αυτήν ορίζουμε τα πυροκλαστικά αποθέματα σε μια μίξη με υγρό υλικό συνήθως νερό, αλλά μπορεί

σε διάφορες περιπτώσεις και λάσπη όπου και κινούνται αυτά σε συνδυασμό στις πλαγιές κατερχόμενα αναπτύσσοντας μεγάλη ταχύτητα. Υπάρχουν αρκετές αιτίες για τη δημιουργία τους αλλά η κυριότερη είναι όταν έντονες βροχοπτώσεις παρασέρνουν χαλαρά τοποθετημένα αποθέματα και υλικά περιμετρικά ενός ηφαιστείου (Riley, 1997). Το ηφαίστειο Nevado del Ruiz στη Κολομβία το 1985 επιπέδου VEI 3 δημιούργησε πυροκλαστική ροή λιώνοντας τον παγετό και δημιούργησε λαχάρ σκοτώνοντας πάνω από 23000 άτομα (Voight, 1990). Οι λασποροές αυτές μπορούν να συνεχίσουν να αποτελούν απειλή για πολλά χρόνια ακόμα και δεκαετίες μετά την έκρηξη εάν υπάρχει σημαντική ποσότητα μη ενοποιημένης τέφρας όπως έγινε μετά την έκρηξη του ηφαιστείου Pinnatubo το 1991.

3.1.4. Χιονοστιβάδες συντριμμιών κατολισθήσεις και τσουνάμι

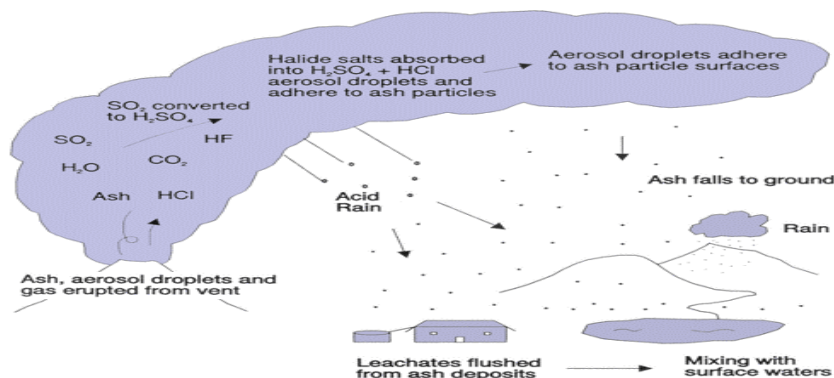
Πολλά ηφαίστεια έχουν απότομες πλαγιές από ηφαιστειογενείς μη ομοιογενείς αποθέσεις και πετρώματα που έχουν αλλοιωθεί και εξασθενήσει κάνοντας έτσι αυτά τα αποθέματα επιρρεπή στην αστάθεια. Έτσι οι κατολισθήσεις αποτελούν συχνό φαινόμενο στα ηφαίστεια ενεργά η μη. Οι χιονοστιβάδες συντριμμιών δημιουργούνται συνήθως από την κατάρρευση του ηφαιστειακού θόλου (Geonimo, 1994) και και συχνά σχετίζονται με ηφαιστειακές εκρήξεις η εισβολή μάγματος. Υπάρχουν και οι περιπτώσεις κατάρρευσης ηφαιστείων που προκαλούν κατολισθήσεις που όμως δεν προκαλούνται μόνο από την ηφαιστειακές εκρήξεις αλλά και από σεισμούς η τεκτονικές μετακινήσεις η και τυφώνες. Μια τέτοια ηφαιστειακή κατάρρευση προκάλεσε ο τυφώνας Mitch στο ηφαίστειο Casita στη Νικαράγουα το 1998 προκαλώντας τεράστια κατολίσθηση η οποία προκάλεσε το θάνατο 3800 ατόμων (Scott et al., 2005)

Οι στιβάδες συντριμμιών και οι κατολισθήσεις αυτές όταν συμβούν σε παράκτιες περιοχές μπορούν να προκαλέσουν τσουνάμι καθώς εισέρχονται στην θάλασσα. Τα τσουνάμι είναι μια άλλη μεγάλη απειλή με διάφορες αιτίες πρόκλησης που όμως ανήκουν στις πιο ύπουλες και θανατηφόρες απειλές. Ένα τέτοιο τσουνάμι προκλήθηκε το 1792 λόγω κατολίσθησης από το ηφαίστειο Unzen στην Ιαπωνία θανατώνοντας 14500 ανθρώπους (Wang et al., 2019).

3.1.5. Ηφαιστειακά αέρια

Ένα ακόμη παράγωγο των ηφαιστείων είναι τα αέρια που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα κατά την κύρια έκρηξη ή μετέπειτα. Η σύνθεση της ατμόσφαιρας περιλαμβάνει οξυγόνο αλλά και άλλα αέρια τα οποία προέρχονται από το εσωτερικό πυρήνα της γης και απελευθερώνονται λόγω της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Το μάγμα περιέχει και αέρια εκτός από στερεά σε ποσοστό 1-5%. Τα ηφαιστειακά αέρια αποτελούνται από ένα μίγμα στο οποίο υπάρχουν οι υδρατμοί από 60% V/V το οποίο μπορεί να φτάσει και σε υψηλότερα ποσοστά έως και 99% του συνολικού όγκου των αερίων, ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία αυτού του μίγματος είναι μη οργανικές ενώσεις του άνθρακα όπως το διοξείδιο (CO₂) και το μονοξείδιο (CO) σε ποσοστά έως 10%, τα οξείδια του θείου με κυρίαρχο το διοξείδιο (SO₂) έως 15% σε μεγάλες ποσότητες είναι τοξικά και μετατρέπονται την ατμόσφαιρα σε θειικά σωματίδια και

μπορούν να προκαλέσουν μεγάλη ατμοσφαιρική μόλυνση, τα οξείδια του αζώτου ($(NO)_x$), το υδροχλώριο (HCl) και το υδροφθόριο (HF) έως 5% το τετραφθοριούχο πυρίτιο ((SiF_4)), το αέριο υδρογόνο (H_2), το υδρόθειο (H_2S), το μεθάνιο (CH_4) καρβονυλοσουλφίδιο (COS) ραδόνιο (Rn) και άλλα ευγενή αέρια (Stefánsson et al., 2017). Τα υδροφθόριο και το υδροχλώριο μπορούν να επικολληθούν στην επιφάνεια της ηφαιστειακής στάχτης και απειλούν ζώντες οργανισμούς με δηλητηρίαση αλλά και με μόλυνση των υδάτων και του χώματος και της βλάστησης (Hansell & Orpenheimer, 2010).



Εικόνα 20 Διασπορά ηφαιστειακών αερίων (Πηγή USGS)

3.1.6. Σεισμοί ηφαιστειακής προέλευσης

Οι σεισμοί που προκαλούνται από ηφαίστεια είναι συνήθως μικροί σε μέγεθος. Αλλά η συσσωρευόμενη κίνηση μικρών επαναλαμβανόμενων σεισμικών δονήσεων μπορεί να προκαλέσει ζημιές στις κατασκευές αλλά και ρωγμές στο έδαφος. Οι μεγαλύτεροι σεισμοί μπορούν να συσχετιστούν στενά με τις ηφαιστειακές εκρήξεις. Παρόλα αυτά επειδή τα ηφαίστεια υπάρχουν από μόνα τους σε κύριες σεισμικές ζώνες πολλές από αυτές τις δονήσεις και τους σεισμούς μπορούν να θεωρηθούν και σύμπτωση. Όμως υπάρχουν και αρκετά στοιχεία πως μεγάλοι σεισμοί μπορούν να πυροδοτήσουν ένα ηφαίστεια αλλά και ένα ηφαίστεια μπορεί να πυροδοτήσει μεγάλους σεισμούς, αλλά καθώς τα ηφαίστεια βρίσκονται συνήθως σε ενεργές τεκτονικές περιοχές πολλοί σεισμοί προκαλούνται από κίνηση των πλακών η υδροθερμικά υγρά παρά από κίνηση του μάγματος (Seropian et al., 2021).

3.1.7. Κεραυνοί

Η αστραπή που δημιουργείται μπορεί να προκληθεί από τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος (φορτίων) μεταξύ δύο σωμάτων με αντίθετα φορτία τέφρας. Η Ηφαιστειακή αστραπή όμως είναι ένα ασυνήθιστο φαινόμενο διότι αρχίζει και τελειώνει εντός της εκρηκτικής στήλης και δεν συνδέεται με ένα στέρεο σώμα. Μέσα σε μια τέτοια στήλη συνήθως υπάρχει μια συλλογή από σωματίδια καυτής υαλώδους τέφρας, ατμού και αερίου. Όλα αυτά μαζί μεταφέρονται στην ατμόσφαιρα, ενώ υπάρχουν πολλά διαφορετικά μεγέθη σωματιδίων τέφρας τα οποία κατά την έκρηξη ξεκινάν ως ουδέτερα σωματίδια αλλά στην συνέχεια αποκτούν ένα φορτίο είτε θετικό είτε αρνητικό και δημιουργούν κατά αυτό τον τρόπο ένα κανάλι όπου ρέει η ηλεκτρική ενέργεια (Crozier, 2020).

3.1.8. Τέφρα

Η τέφρα είναι ο όρος που χρησιμοποιούμε για τα θραύσματα ηφαιστειακών πετρωμάτων και λάβας ανεξάρτητα μεγέθους που εκτοξεύονται στον αέρα από εκρήξεις ηφαιστειών. Η κύρια ορυκτολογική της σύνθεση είναι κυρίως πυριτικής φύσης με μικρότερες ποσότητες οξειδίων του σιδήρου αλουμινίου ασβεστίου και νατρίου και αναλόγως την προέλευση της μπορεί να αποτελείται από νεαρά μικροσωματίδια και ελεύθερους κρυστάλλους προερχόμενη από μάγμα είτε από παλαιότερα πετρώματα του ίδιου ηφαιστείου είτε από τυχαία σωματίδια από βράχους της περιοχής του ηφαιστείου. Το πυρίτιο αυτό είναι σε μορφή υαλώδης και σκληρό και η σκληρότητα του είναι επιπέδου 5 η 6 στην κλίμακα Mohs (ICAO , 2001) Αυτά τα σωματίδια ανερχόμενα εξαιτίας των θερμών αέριων κατά τη διάρκεια μιας έκρηξης είναι και ο πιο συχνός και συχνά διαδεδομένος ηφαιστειακός κίνδυνος, που εμφανίζεται σε περισσότερο από το 90% όλων των εκρήξεων (Loughlin et al., 2015). Τέτοια θραύσματα κυμαίνονται σε μέγεθος μικρότερο από 2 mm έως αρκετά μέτρα σε διάμετρο (ηφαιστειακές βόμβες όπου αυτές πέφτουν στο έδαφος κοντά στο ηφαίστειο, ενώ τα μικρότερα σωματίδια κάτω από 2mm έως νανοσωματίδια είναι γνωστά ως ηφαιστειακή στάχτη

Πού θα διασκορπιστεί η στάχτη εξαρτάται κυρίως από τις μετεωρολογικές συνθήκες συμπεριλαμβανομένου ανέμου υγρασίας, το μέγεθος της στάχτης και το ύψος που θα φτάσει κατά την έκρηξη το ηφαιστειακό σύννεφο το οποίο εξαρτάται κυρίως από την ένταση της έκρηξης (Brown et al., 2015). Η πολύ λεπτή στάχτη μπορεί να ταξιδέψει εκατοντάδες χιλιόμετρα μακριά απομακρυνόμενη από την πηγή της έκρηξης εξαιτίας των ανέμων (Prata & Rose, 2015).



Εικόνα 21 Έναπτόθεση τέφρας από την έκρηξη ηφαιστείου στην Ν.Χίλη (Πηγή CNN)

Η πρόβλεψη της διασποράς της τέφρας στην ατμόσφαιρα και πόση ποσότητα θα πέσει, πού, πότε και με ποια χαρακτηριστικά αποτελούν σημαντικές προκλήσεις για τη διαχείριση και αντιμετώπιση αυτού του κινδύνου κατά τις εκρήξεις. Το αποτύπωμα του κινδύνου τόσο της στάχτης στο έδαφος όσο και της διασποράς των επικίνδυνων συγκεντρώσεων τέφρας στην ατμόσφαιρα μπορεί να φτάσει να απειλεί έως και εκατομμύρια τετραγωνικά χιλιόμετρα γης (Brown et al., 2015) και είναι ένα φαινόμενο που προκαλεί παγκόσμια ανησυχία.

Στο έδαφος και κοντά στο ηφαίστειο η τέφρα αποτελεί απειλή για τις δομές και μπορεί ακόμα και να προκαλέσει κατάρρευση των στεγών των κτηρίων και να προκαλέσει σοβαρούς τραυματισμούς ακόμα και θανάτους όπως συνέβη στο Pinatubo το 1991 όπου πάνω από 300 άνθρωποι σκοτώθηκαν από αυτή την αιτία (NOAA, n.d.). Ενώ πτώση τέφρας μερικών εκατοστών μπορεί να προκαλέσει βλάβη σε ηλεκτρικό δίκτυο ή δομικές βλάβες σε κτήρια και μεγάλες απαιτήσεις σε καθαρισμούς. Ακόμα και πτώση λεπτής τέφρας κάτω από 1mm δύναται να προσβάλει την δημόσια υγεία να καταστρέψει την βλάστηση και να παρεμποδίσει τη λειτουργία κρίσιμων δομών την αεροπορία προκαλώντας μεγάλες κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις. Η εισπνοή στάχτης μπορεί να προκαλέσει ένταση του άσθματος και επιβάρυνση του αναπνευστικού (Shimizu et al., 2007) αν και αυτές οι επιπτώσεις δεν είναι συνεπείς μεταξύ των διαφόρων ηφαιστειακών εκρήξεων. Η τέφρα μπορεί επίσης να φέρει ένα φορτίο διαλυτού άλατος που μπορεί να απελευθερωθεί εύκολα σε επαφή με το νερό ή τα σωματικά υγρά. Αυτό μπορεί να οδηγήσει τόσο σε ευεργετικά αποτελέσματα όπως χρήσιμα θρεπτικά στοιχεία για την ανάπτυξη των φυτών αλλά και σε επιβλαβείς επιπτώσεις όπως τοξικότητα φθορίου για τους ζώντες οργανισμούς. Παρόλα αυτά από κάποιες εκρήξεις έχουν παρατηρηθεί λιμοί που οφείλονται στην καταστροφή των αποθεμάτων τροφίμων (Kondo, 1988).

Κεφάλαιο 4. Επιπτώσεις στην αεροπλοΐα

Συνεχίζοντας την καταγραφή των κινδύνων λόγω των ηφαιστειακών εκρήξεων σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε εξειδικευμένα την επίδρασή τους στην αεροπλοΐα για να γίνει κατανοητό τις σύνθετες επιπτώσεις τους καθώς το ρίσκο της αεροπλοΐας από την έκρηξη ενός ηφαιστείου μπορεί να αποβεί ιδιαίτερα είναι πολύ σημαντικό.

4.1. Ιστορικά στοιχεία

Το 1952 η πρώτη εμπορική πτήση με αεριωθούμενο αεροσκάφος πέταξε από Λονδίνο για Γιοχάνεσμπουργκ σηματοδοτώντας την έναρξη της εμπορικής αεροπλοΐας (Boyne & Lopez, 1979). Η μετάβαση από τους ελικοφόρους κινητήρες με πιστόνια σε αεριωθούμενους κινητήρες μείωσε τη διάρκεια των πτήσεων δραστικά αλλά όχι χωρίς τα μειονεκτήματα καθώς λειτουργούσαν σε υψηλότερες θερμοκρασίες είχαν πιο ακριβά εξαρτήματα αλλά χρειαζόταν και περισσότερο καύσιμο.

Τριάντα χρόνια μετά το καλοκαίρι του 1982 ο κυβερνήτης της πτήσης BA009 από το Λονδίνο με προορισμό το Ωκλαντ εξέδωσε την εξής σημαντική ανακοίνωση:

Σας ομιλεί ο κυβερνήτης : «Θα ήθελα να σας ενημερώσω πως αντιμετωπίζουμε ένα μικρό πρόβλημα και οι τέσσερις κινητήρες μας έχουν σταματήσει».

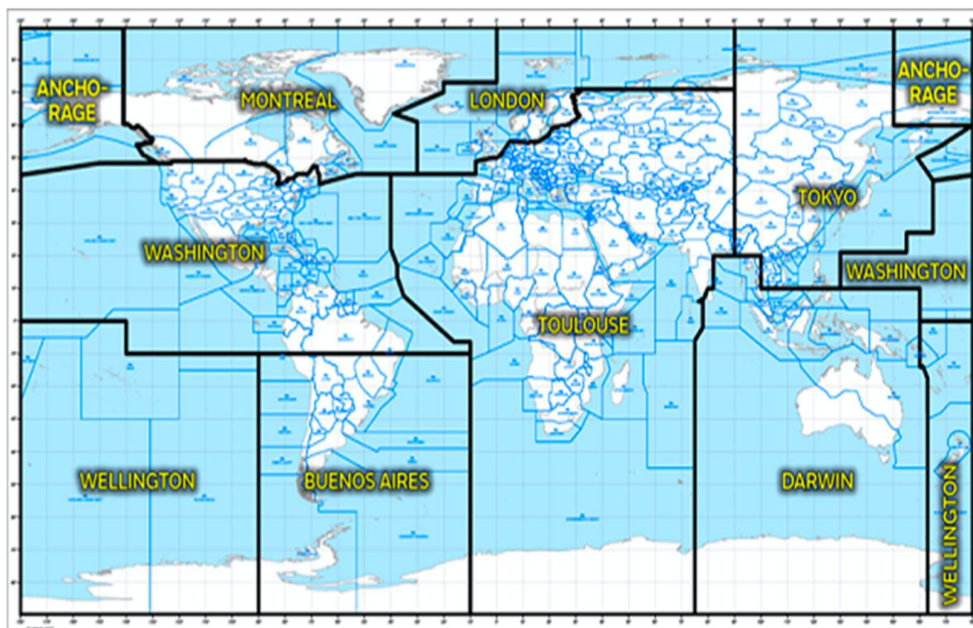
Σε αυτό το σημείο κανένας δεν μπορούσε να εξηγήσει γιατί σταμάτησαν ταυτόχρονα και οι τέσσερις κινητήρες ούτε γιατί επανεκκίνησαν μετά από 12 λεπτά (Stewart, 1999)

Το πλήρωμα της πτήσης επιπλέον είδε την φωτιά του St Elmos στο αλεξήνεμο του αεροσκάφους ένα φαινόμενο με φλόγες μωβ και μπλε καθώς και επίσης πλήρωμα και επιβάτες μπορούσαν να μυρίσουν θειάφι. Η ορατότητα είχε μειωθεί ξαφνικά σαν να εισήλθαν σε αμμοθύελλα χωρίς το ραντάρ να δείχνει ότι υπάρχει κάτι. Οι διερευνητές κατέληξαν μετά την ασφαλή προσγείωση του αεροσκάφους στην Τζακάρτα ότι είχαν πετάξει μέσα από την τέφρα που είχε εκτοξευθεί στην ατμόσφαιρα από το ηφαίστειο στο όρος Galunggung της Ινδονησίας. Η ξηρότητα του νέφους το έκανε αόρατο στο ραντάρ ανίχνευσης καιρού του αεροσκάφους που εντοπίζει νέφη λόγω συμπύκνωσης της υγρασίας.

Το περιστατικό αυτό τράβηξε την προσοχή τόσο του κοινού όσο και της αεροπορικής κοινότητας ως προς την απειλή της τέφρας στη αεροπορία (Smith, 1983)(Tootell, 1985)(Miller, 1994)

Από την έναρξη της πολιτικής αεροπορίας και των αερομεταφορών το 1952 247 ηφαίστεια έχουν καταγραφεί ως ενεργά ενώ κάποια από αυτά έχουν δώσει και πολλαπλές εκρήξεις. Έχουν καταγραφεί τουλάχιστον 129 συναντήσεις αεροσκαφών με τέφρα την περίοδο 1953-2009 συμπεριλαμβανομένου μεγάλου αριθμού σχεδόν καταστροφικών συναντήσεων. Από το 1980 έως το 2005, περισσότερα από 100 αεροσκάφη turbojet υπέστησαν ζημιές από ηφαιστειακή τέφρα, με κόστος επισκευής που ξεπερνά τα 250 εκατομμύρια δολάρια. Επτά από αυτές τις συναντήσεις προκάλεσαν προσωρινή βλάβη του κινητήρα και 3 από τα αεροσκάφη που εμπλέκονταν έχασαν προσωρινά όλη την ισχύ των κινητήρων τους. Αυτές οι

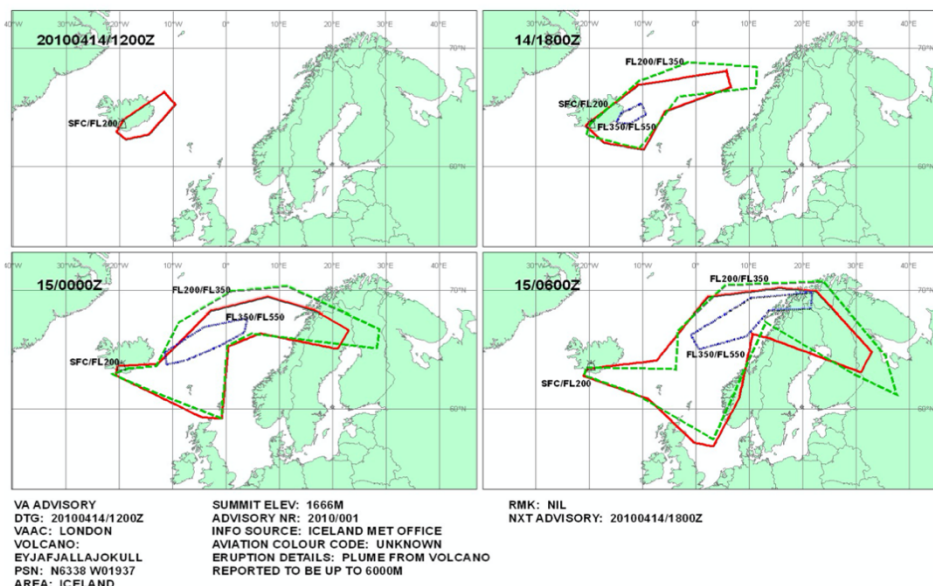
βλάβες στους κινητήρες σημειώθηκαν σε απόσταση έως και 600 μιλίων από το ηφαίστειο και περισσότεροι από 1.500 επιβάτες κινδύνευσαν. Μεταξύ αυτών το 1989 ένα αεροσκάφος από το Τέξας έχασε την ισχύ ενός κινητήρα του μετά από συνάντηση με ένα σύννεφο τέφρας 5400 χιλιόμετρα μακριά από την πηγή της έκρηξης μετά από 35-55 ώρες από την έναρξη της έκρηξης (Casadeval,1994). Αυτά τα γεγονότα οδήγησαν τον ICAO και την αεροπορική κοινότητα να θεσπίσει 9 κέντρα παρακολούθησης τέφρας Volcanic Ash Advisory centers (VAAC's) που παρέχουν πληροφορίες για την τέφρα εντός του γεωγραφικού τμήματος που ελέγχουν (Brown et al., 2015).



Εικόνα 22 Το όριο των κέντρων παρακολούθησης ηφαιστειακής δραστηριότητας και εξάπλωσης τέφρας (Πηγή UK Met Office, 2017)

Σε περίπτωση ηφαιστειακής έκρηξης το αντίστοιχο κέντρο δημιουργεί συμβουλευτικές ενημερώσεις για την τέφρα VAA Volcanic Ash Advisories που τα προωθεί ως κείμενα και Volcanic Ash Graphics που τα προωθεί ως εικόνες. Αυτά είναι χάρτες πρόβλεψης που δείχνουν τη διασπορά τέφρας απεικονίζοντας συγκεντρώσεις πάνω από $200\text{mg}/\text{m}^3$ για τρία διαφορετικά επίπεδα πτήσεως Sea Level-FL200, FL200-350, FL350-550. (FL200=20000'). Τα συμβουλευτικά κείμενα και χάρτες εκδίδονται κάθε 6 ώρες (UK Met Office, 2014)

Στις παρακάτω εικόνες βλέπουμε την έκδοση αυτών των χαρτών ανά 6 ώρες και το πως εξαπλώθηκε η τέφρα από την έκρηξη ηφαιστίου στην Ισλανδία



Εικόνα 23 χάρτης Volcanic Ash advisory (Πηγή UK met office, 2010)

Συμφωνά με τον διεθνή οργανισμό αεροπλοΐας ICAO στο εγχειρίδιο για την αντιμετώπιση τέφρας και άλλων ραδιενεργών υλικών DOC 9691 του 2007 η οδηγία σχετικά με τον εναέριο χώρο όσων αφορά στην τέφρα είναι η εξής:

«Δυστυχώς μέχρι του παρόντος δεν υπάρχουν συμφωνημένες τιμές συγκέντρωσης τέφρας που να αποτελούν κίνδυνο για τους κινητήρες των αεροσκαφών.[...] αξίζει να σημειωθεί σε αυτή τη φάση ότι ο χρόνος έκθεσης των κινητήρων στην τέφρα καθώς και τα επίπεδα ισχύος στους κινητήρες κατά την χρονική στιγμή της συνάντησης και τα δύο αυτά επηρεάζουν άμεσα το κατώφλι τιμών που μπορούν να αποτελέσουν κίνδυνο για τα αεροσκάφη .Σχετικά με το συγκεκριμένο γεγονός μπορούμε μόνο να ακολουθήσουμε την ίδια οδηγία όπως και με την αντιμετώπιση διατμητικών ανέμων σε χαμηλά ύψη (windshear) ασχέτως των τιμών συγκέντρωσής στην ατμόσφαιρα. Αποφυγή Αποφυγή Αποφυγή.(ICAO, 2007)

Στις ΗΠΑ τα αεροσκάφη μεταφέρουν πάνω από 300,000 άτομα και υλικό αξίας εκατομμυρίων δολαρίων πετώντας κοντά σε περιοχές με ενεργά ηφαιστεια καθμερινά. Το σύγχρονο παράδειγμα της έκρηξης του ηφαιστείου στην Ισλανδία και η κοστοβόρα αναστάτωση που προκάλεσε δείχνει ξεκάθαρα πως μια έκρηξη μπορεί να προκαλέσει προβλήματα σε παγκόσμιο επίπεδο. με ιδιαίτερα σημαντικές επιπτώσεις. Ο παγκόσμιος οργανισμών αερομεταφορών (IATA) υπολόγισε ότι η η συγκεκριμένη έκρηξη κόστισε σχεδόν 2 δις επηρεάζοντας την παγκόσμια αεροπλοΐα κατά 29% και 1,2 εκατ. επιβάτες ανά ημέρα (Chen & Zhao, 2015).

Μια ηφαιστειακή έκρηξη μπορεί να επηρεάσει τόσο σε μεγάλες αποστάσεις λόγω της μεταφοράς αλλά και κοντινές περιοχές και δομές κοντά στο ηφαιστειο όπως αεροπορικές εγκαταστάσεις πλησίον της έκρηξης που απειλούνται από τη λάβα τα πυροκλαστικά υλικά αλλά και την ηφαιστειακή τέφρα. Έτσι σύμφωνα με τον (Gourgaud et al., 1989) ο κίνδυνος από την ηφαιστειακή τέφρα όσων αφορά στην αεροπλοΐα είναι διττός αφενός για τις δομές

που χρησιμοποιεί η αεροπορία για να επιχειρήσει όπως αεροδρόμια που βρίσκονται κοντά στο ηφαίστειο αφετέρου στην ασφάλεια πτήσεων που μπορεί να επηρεάσει αρκετά χιλιάδες μίλια μακριά από την πηγή.

4.2. Επίδραση τέφρας στην αεροπλοΐα

4.2.1. Γενικά

Η αερομεταφερόμενη τέφρα αποτελεί σημαντικό κίνδυνο για την αεροπορία και άλλες μορφές μεταφοράς θέτοντας σε κίνδυνο τις αλυσίδες εφοδιασμού την παροχή υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης και άλλες βασικές υπηρεσίες (Lechner et al., 2017).

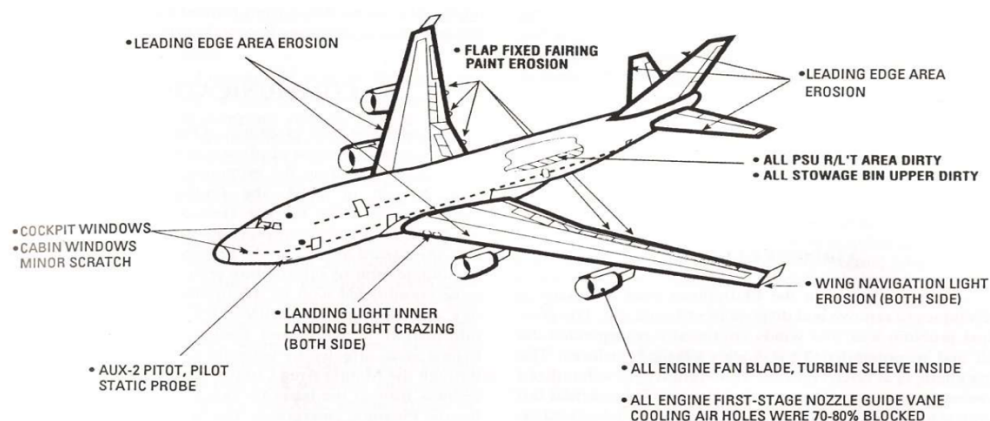


Εικόνα 24 Τέφρα σε αεροσκάφος (Πηγή USGS)

Ο αντίκτυπος που μπορεί να έχει η ηφαιστειακή τέφρα στην ασφάλεια των πτήσεων είναι μακροσκελής. Τα συστήματα πλοήγησης και επικοινωνίας των αεροσκαφών μπορεί να επηρεαστούν με διαφορετικούς τρόπους κατά τη διάρκεια μιας συνάντησης με ηφαιστειακή τέφρα: εξαιτίας της τριβής των κεραιών αεροσκαφών, εξασθένιση ή διάθλαση κυμάτων σε νέφη ηφαιστειακής τέφρας, ηλεκτροστατικές εκκενώσεις μετά από εξωγενή φόρτιση ή τριβοηλεκτρική φόρτιση, εσφαλμένες ενδείξεις εξαιτίας απόφραξης στα pitot-στατικά συστήματα του αεροσκάφους, εναπόθεση τέφρας στα ηλεκτρονικά συστήματα με αποτέλεσμα ηλεκτρικές βλάβες στους υπολογιστές, προβλήματα με την ένδειξη ταχύτητας, είναι μερικά από τα πιο συνηθισμένα περιστατικά που αφορούν ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα αεροσκαφών (Prata & Rose, 2015). Αυτοί οι μηχανισμοί εναπόθεσης τέφρας εξαρτώνται από την σύνθεση της και το μέγεθος της. Αν και η πτώση της τέφρας σπάνια θέτει σε άμεσο κίνδυνο την ανθρώπινη ζωή, οι απειλές για τη δημόσια υγεία και η διακοπή των υπηρεσιών υποδομής ζωτικής σημασίας, της αεροπορίας και της πρωτογενούς παραγωγής μπορούν να οδηγήσουν σε δυνητικά σημαντικές κοινωνικές επιπτώσεις και κόστος, ακόμη και σε πάχος μόνο μερικών χιλιοστών πολλές από αυτές τις συναντήσεις μπορεί να οδηγήσουν σε καταστροφικές συνέπειες για τα αεριωθούμενα αεροσκάφη, όπως απώλεια ισχύος κινητήρων και πιθανή απώλεια αεροσκαφών (Prata & Rose, 2015). Τα περιστατικά με τη μεγαλύτερη σοβαρότητα είναι, ωστόσο, όταν η ηφαιστειακή τέφρα εισέρχεται σε κινητήρες αεριωθουμένων.

4.2.2. Επίδραση στους κινητήρες αεροσκαφών

Πλέον σήμερα έχουν σημειωθεί αρκετά περιστατικά συνάντησης αεροσκαφών με τέφρα, οπότε το άγνωστο μέχρι πρότινος πεδίο έχει αποσαφηνιστεί σε μεγάλο βαθμό σε σχέση με τις επιδράσεις της τέφρας στο αεριωθούμενους κινητήρες (Prata & Rose, 2015). Η βλάβη του κινητήρα μπορεί να προκληθεί εξαιτίας τριών κυρίως λόγων, ο πιο σημαντικός εξ αυτών είναι το σημείο τήξης της τέφρας το οποίο είναι πού χαμηλότερο από τις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας των κινητήρων, γνωρίζουμε τη σύσταση της τέφρας που κατά κύριο λόγο είναι πυριτικά άλατα με σημείο τήξης τους 900-1000°C όμως ο πολύ θερμός κινητήρας ενός σύγχρονου αεροσκάφους λειτουργεί σε θερμοκρασίες άνω των 1400°C, το πρόβλημα λοιπόν είναι ότι το πυρίτιο μπορεί να αλλάξει κατάσταση όταν συναντήσει θερμοκρασίες άνω των 800 °C περίπου. Τα υαλώδη-πυριτικά συστατικά της ηφαιστειακής τέφρας γίνονται «κολλώδη» καθώς περνούν από τις θερμοκρασίες μετάπτωσης του πυριτίου όπου οι ιδιότητες τους αλλάζουν, σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 700 έως 1100 °C, ανάλογα με διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των ακαθαρσιών και της αναλογίας σε ορυκτά που απαιτούν υψηλότερες θερμοκρασίες για την τήξη του πυριτικού άλατος (Prata & Rose, 2015).



Εικόνα 25 Ζημιές στο εξωτερικό του αεροσκαφους ενός 747-400 μετα απο συνάντηση με σύννεφο τέφρας απο το ηφαίστειο Pinatubo(Πηγή Casadevall)

Ο θάλαμος καύσης των σύγχρονων κινητήρων των αεριωθούμενων αεροσκαφών διατηρείται σε θερμοκρασίες 1200/1500 °C και έτσι εάν η ηφαιστειακή τέφρα βρει το δρόμο της στα πιο θερμά μέρη των κινητήρων, το πυρίτιο και ένα μικρό κλάσμα των ορυκτών μπορεί επίσης να λιώσει μειώνοντας την απόδοση του στροβίλου. Ακόμη όταν οι θερμοκρασίες του κινητήρα είναι χαμηλότερες, όπως όταν ο κινητήρας σβήσει, το πυρίτιο που αποτελεί την τέφρα θα ξανά αλλάξει κατάσταση σπάζοντας τις χημικές ενώσεις που το συγκρατούν, επιστρέφοντας στην στερεή κατάσταση της αποφράσσοντας έτσι τα πτερύγια του στροβίλου. Γι' αυτό το λόγο μετά από επανεκκίνηση του κινητήρα που έχει ψυχθεί αποκολλάται μεγάλο μέρος της τέφρας και ενδέχεται να έχουμε κανονική λειτουργία του στροβιλοκινητήρα. Όμως η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για μεγαλύτερες αποδόσεις και μειωμένη κατανάλωση οδηγεί σε κινητήρες που θα συνεχίσουν να λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες για να επιτύχουν όλα αυτά.

Ακόμη η πρόσκρουση της ηφαιστειακής τέφρας στα πτερύγια του στροφείου του συμπιεστή και τα πτερύγια του ρότορα προκαλεί τη δική της φθορά επηρεάζοντας το αεροδυναμικό σχήμα των πτερυγίων και την μειώνοντας την απόδοση της τουρμπίνας και κατά συνέπεια τα παραγόμενης ώσης. Άλλο ένα χαρακτηριστικό της επικάθησης τέφρας στα πτερύγια είναι η απώλεια στήριξης των πτερυγίων που οδηγεί σε απώλεια στήριξης του συμπιεστή (compressor stall). Μείωση των στοιχείων του κινητήρα δείχνει να βοηθάει στην πρόσκαιρη αντιμετώπιση ύστερα από συνάντηση με σύννεφο τέφρας καθώς μειώνει την ταχύτητα εισροής παρόλα αυτά δεν εξαφανίζει εντελώς το φαινόμενο καθώς η εισροή μολυσμένου αέρα στον κινητήρα συνεχίζεται.

4.2.3. Επίδραση τέφρας στα υπόλοιπα συστήματα

Πολλές ζημιές προκαλούνται από την τέφρα και σε άλλα συστήματα του αεροσκάφους πέραν των κινητήρων όπως το χείλος προσβολής των πτερυγίων οι επιφάνειες ελέγχου η άτρακτος του αεροσκάφους τα οποία μπορεί να μην παραμορφώνονται δραματικά αλλά αλλάζουν τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του αεροσκάφους. Ένας ακόμη σοβαρός κίνδυνος απόφραξης είναι αυτός των pitot-στατικών συστημάτων του αεροσκάφους που είναι υπεύθυνα να μεταφέρουν τις ευαίσθητες πληροφορίες πτήσης στο θάλαμο διακυβέρνησης όπως η ταχύτητα και το ύψος όπου με την λανθασμένη ερμηνεία αυτών των πληροφοριών υπολειτουργούν και μεγαλύτερα συστήματα όπως ο υπολογιστής που διαχειρίζεται τον αυτόματο πιλότο με αποτέλεσμα να μεταβιβάζονται λάθος η διφορούμενα μηνύματα στους πιλότους το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά ατυχήματα.

Ακόμη, βλάβες μπορούν να προκληθούν εξαιτίας της πρόσκρουσης με τέφρα σε κεραίες επικοινωνίας και ραδιοβοηθημάτων τα οποία αποτελούν τη γέφυρα επικοινωνίας μεταξύ αεροσκάφους και σταθμών ελέγχου καθώς λειτουργούν ως φάροι που καθοδηγούν το αεροσκάφος (Prata & Rose, 2015).

Μια ακόμη σημαντική ζημιά είναι η παραμόρφωση του αλεξηνέμου του πιλοτηρίου το οποίο μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στην ορατότητα κατά την προσγείωση του αεροσκάφους.

Κεφάλαιο 5. Διαχείριση Κρίσεων

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις είναι ακραία φυσικά φαινόμενα των οποίων η διασπορά μπορεί να έχει ισχυρές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις (Blaikie et al. 1994). Οι Blaikie et al (1994) αναφέρονται επίσης στην αυξημένη γονιμότητα της γης εξαιτίας της ηφαιστειακής τέφρας σε γεωργικές εκτάσεις και στην έλξη των ανθρώπων από τις εύφορες αυτές εκτάσεις κοντά στα ηφαίστεια. Ενώ αυτό είναι γνωστό ότι ισχύει για την περιοχή του Βεζούβιου τέτοια οφέλη δεν τα συναντάμε μόνο σε θερμότερα κλίματα καθώς και οι Ισλανδοί αγρότες σύμφωνα με πληροφορίες σημείωσαν καλύτερη αγροτική ανάπτυξη μετά τις εκρήξεις των ηφαιστειών Katla και Hekla.

Η έκρηξη Eyjafjallajökull το 2010 ξεκίνησε ως φαινομενικά ένα μικρό ηφαιστειακό γεγονός που προσέλκυσε ντόπιους και επισκέπτες (Donovan & Orpenheimer, 2010) ,ενώ στη συνέχεια πήρε μία απροσδόκητη τροπή εκπέμποντας ένα σύννεφο τέφρας που αποτέλεσε κίνδυνο πολύ εκτός των συνόρων της Ισλανδίας για την διεθνή αεροπλοΐα.

Σε αυτή την ενότητα θα δούμε μία σύντομη ανακεφαλαίωση που τοποθετεί την έρευνα στο πλαίσιο της διαχείρισης κινδύνου. Εισάγονται ορισμοί που σχετίζονται με την διαχείριση κινδύνου και ακολουθεί η διαδικασία αξιολόγησης αυτού και εφαρμογή στην ρύθμιση των κινδύνων που προκύπτουν για την αεροπλοΐα.

5.1. Από φυσικό φαινόμενο σε απειλή

Τα φυσικά φαινόμενα που έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν βλάβη σε ανθρώπους ή στα συμφέροντα των ανθρώπων αναφέρονται ως φυσικοί κίνδυνοι. Ο κίνδυνος και το ρίσκο ως λέξεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά ωστόσο συνήθως αποτελούν δύο διαφορετικά θέματα που αξίζουν μεμονωμένους ορισμούς. Η έννοια του ρίσκου έχει οριστεί σε διαφορετικά πλαίσια και οι ορισμοί του ποικίλουν ανάλογα με τους τομείς στο οποίο αντιμετωπίζεται (Renn & Schweizer, 2009). Όσον αφορά μια συγκεκριμένη τεχνολογία το ρίσκο μπορεί για παράδειγμα να οριστεί ως εισαγωγικά οι πιθανότητες σωματικής βλάβης λόγω δεδομένων τεχνολογικών διεργασιών (Beck, 1986). Το ρίσκο θεωρείται κοινωνικά κατασκευασμένο, ως αποτέλεσμα της αντίληψης ενός αβέβαιου φαινομένου (Luhmann, 1994)(OECD, 2003).Ενημερώνεται δε από την εμπειρία και τη γνώση για γεγονότα του παρελθόντος και επιλέγεται από ανθρώπινους παράγοντες (Renn, O. et al., 2011). Στο πλαίσιο των φυσικών κινδύνων, οι Blaikie et al.,(1994) αναφέρονται στο Ρίσκο ως ο «σύνθετος συνδυασμός ευπάθειας και κινδύνου». Ο όρος «τρωτότητα» αναφέρεται στην έκταση της επιρρεπούς σε ζημιά ή τραυματισμό από έναν κίνδυνο. Οι ίδιοι συγγραφείς περιγράφουν την ευπάθεια όσον αφορά στους φυσικούς κινδύνους ως την ικανότητα ενός πληγέντος μέρους να «προβλέπει, να αντιμετωπίζει, να αντιστέκεται και να ανακάμπτει από τον φυσικό κίνδυνο». Το ρίσκο και ο κίνδυνος μιας απειλής για κάποια μέρη μπορεί να παρουσιάζει μη απειλή ή ακόμη και ευκαιρία για άλλα μέρη. Το ίδιο ισχύει για την τέφρα που εκπέμπεται από την έκρηξη του 2010, η οποία αφενός παρουσίαζε κίνδυνο για τις

αεροπορικές εταιρείες ενώ αφετέρου οδήγησε σε βελτιωμένες καλλιέργειες για τους αγρότες στη νότια Ισλανδία (MBL, 2010)

5.2. Η διαδικασία της διαχείρισης κρίσης

Η διαδικασία προσδιορισμού ενός κινδύνου στον οποίο εκτίθεται ένας στόχος εξαιτίας μιας συγκεκριμένης απειλής και η αναγνώριση των απαιτούμενων μέτρων για την διαχείριση του είναι η διαδικασία διαχείρισης κρίσης. Η διαχείριση κρίσεων περιλαμβάνει την αξιολόγηση του κινδύνου την διαχείριση αυτού καθώς και την επικοινωνία προς τα έξω. Η αξιολόγηση του κινδύνου αφορά στην εκτίμηση του ρίσκου σε σχέση με μία καταστροφή ενώ η διαχείριση επεξεργάζεται την αναγνωρισμένη απειλή και καθορίζει μέτρα για τον μετριασμό αυτής. Η επικοινωνία αναφέρεται ως η ανταλλαγή πληροφοριών των δύο πρώτων βημάτων της αξιολόγησης και της διαχείρισης κινδύνου. Η αξιολόγηση του κινδύνου παραδοσιακά θεωρείται ο σκληρός ποσοτικός και αντικειμενικός πυρήνας (Ruckelshaus, 1985)(Jasanoff, 1993). Ο παραδοσιακός ρόλος της επιστήμης συμβάλει στον προσδιορισμό αυτό του κινδύνου για τον προσδιορισμό ενός παράγοντα δυνητικά επιβλαβούς για έναν εκτεθειμένο πληθυσμό (Lave, 1987). Οι επιστήμονες χρησιμοποιούν εργαστηριακή έρευνα ή και παρατηρήσεις στο πεδίο για να μελετήσουν έναν κίνδυνο και να συλλέξουν γνώση κατά την αξιολόγηση του κινδύνου σχετικά με την διαχείριση του λαμβάνοντας υπόψη την έκθεση και την τρωτότητα (NRC, 1983). Η διαχείριση κρίσεων καθώς και η επικοινωνία αυτής έχουν θεωρηθεί ως ποιοτικά πεδία που επηρεάζονται από τις θεωρίες των κοινωνικών επιστημών.

Όμως αρκετές φορές τα όρια είναι δύσκολο να διαχωριστούν μεταξύ αξιολόγησης και διαχείρισης ανάλογα με την προσέγγιση που ακολουθείται. Οι Hood et al 1992 ανέφεραν ότι η αξιολόγηση και η διαχείριση κρίσεων δεν πρέπει να εξετάζονται χωριστά καθώς ο κίνδυνος είναι κοινωνικά κατασκευασμένος από μόνος του. Λόγω της φύσης του κινδύνου δεν είναι δυνατός ο αυστηρός διαχωρισμός των κοινωνικών αξιών και κοσμοθεωριών από την διαδικασία εντοπισμού εκτίμησης και αξιολόγησης των κινδύνων. Οι πρότερες προσεγγίσεις πάνω σε αυτό το αντικείμενο επιζητούσαν πιο αυστηρό διαχωρισμό για να αποφευχθεί μια πολιτική ατζέντα που πιθανώς να επηρεάσει την δημιουργία γνώσης (NRC, 1983).

Ένα παράδειγμα της ενσωμάτωσης αυτού του μοντέλου είναι το Διεθνές Συμβούλιο Διαχείρισης Κινδύνων (IRGC) το οποίο εκτελεί την εκτίμηση ρίσκου την κατηγοριοποίηση αυτού καθώς και την αξιολόγηση του κινδύνου. Η εκτίμηση του ρίσκου περιγράφεται ως μία συστηματική αξιολόγηση κινδύνου και ανησυχίας λαμβάνοντας υπόψη τόσο την επιστημονική ανάλυση αλλά και τις κοινωνικο-οικονομικές επιπλοκές που μπορεί να επιφέρει.

Στη φάση αξιολόγησης ενός κινδύνου γίνεται επανεξέταση της ανοχής σε αυτόν τον κίνδυνο και κατά πόσο είναι αναγκαία η λήψη μέτρων για την αντιμετώπιση αυτού. Δεδομένου του γεγονότος ότι η ανάλυση συνήθως δεν περιορίζεται σε έναν μόνο κίνδυνο αυτή η φάση συμπεριλαμβάνει ανάλυση ρίσκου οφέλους καθώς και συμβιβασμούς στο ρίσκο.

Αρκετοί κίνδυνοι δεν μπορούν να υπολογιστούν μόνο από το πιθανό και αιτιατό αλλά θεωρούνται συστημικοί (OECD, 2003).

Η προσέγγιση που προτείνουν οι Klinke και Renn (2002) για μια προληπτική διαχείριση κρίσης λειτουργεί αν υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα και δεν υπάρχει τρόπος να μειωθεί αυτή στο μέλλον. Η λειτουργία των προληπτικών στρατηγικών προβλέπουν έναν κίνδυνο πριν αυτός να συμβεί και μπορούν να λειτουργήσουν ως ένα προσωρινό προπύργιο μέχρι να μειωθεί η περίοδος της αβεβαιότητας (Von Moltke, 1983). Όμως η εφαρμογή αυτής της στρατηγικής μπορεί να δημιουργήσει ένα νέο κόστος και νέους διαφορετικούς κινδύνους με τεράστιες επιπτώσεις σε παγκόσμια κλίμακα (Klinke & Renn, 2002). Αυτή η προληπτική τακτική ακολουθήθηκε από τον ICAO για την αντιμετώπιση της κρίσης για τη θέσπιση νέων οδηγιών για την αντιμετώπιση της τέφρας από την αεροπλοΐα. Κατευθυνόμενη σε αυτό το πλαίσιο η προληπτική τακτική βασίστηκε σε ιστορικά αρχεία καταγεγραμμένων συναντήσεων (Alexander, 2013) όμως χωρίς μια διαδικασία ανάλυσης ρίσκου σε βάθος που καθορίζει την πιθανότητα μιας έκρηξης η οποία θα επηρεάσει για αρκετές ημέρες τον εναέριο χώρο αλλά ούτε και σε βάθος ανάλυση της επίδρασης της τέφρας σε κινητήρες jet. Παρότι υπήρχαν αρκετά επιστημονικά ευρήματα που καταδείκνυαν τους κινδύνους του Ευρωπαϊκού Εναέριου χώρου αυτά δεν χρησιμοποιήθηκαν επαρκώς για την κατηγοριοποίηση του ρίσκου στην Ευρώπη. Η ευρωπαϊκή επιτροπή διαχείρισης ρίσκου για την αεροπλοΐα σχετικά με τις συναντήσεις τέφρας δεν ανανεώθηκε γεγονός που μετέτρεψε την έκρηξη της Ισλανδίας το 2010 σε συστημικό ρίσκο (Castellano, 2011)

5.2.1. Πριν την έκρηξη του 2010

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η επίδραση της αιωρούμενης τέφρας στους κινητήρες αεριωθουμένων μπορούσε να αντιμετωπιστεί μόνο με μία προληπτική προσέγγιση όπου τα αεροπλάνα θα αποφεύγουν εντελώς τα σύννεφα ηφαιστειακή τέφρας. Έτσι δημιουργήθηκε ένα δίκτυο παρατηρήσεως και μετάδοσης πληροφοριών ώστε τα αεροσκάφη να αποφεύγουν τα νέφη ηφαιστειακής τέφρας αυξάνοντας έτσι την ασφάλεια πτήσεων στις αερομεταφορές. Τη δεκαετία του 1990 υπό τον ICAO δημιουργήθηκαν και ορίστηκαν εννέα παγκόσμια καταναμεμημένα συμβουλευτικά κέντρα για την ηφαιστειακή τέφρα ,το συντονισμό και την έκδοση πληροφοριών σχετικά με την ατμοσφαιρική ηφαιστειακή τέφρα, τις αντίστοιχες περιοχές προκειμένου να διευκολυνθεί η αποφυγή στον εναέριο χώρο όπου συναντάται τέφρα άνω των 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Έτσι το θέμα τέθηκε στην επιστημονική κοινότητα, με την επιλογή τρόπου αντιμετώπισης την αλλαγή του δρομολογίου πτήσης. Ο κλάδος των αερομεταφορών δεν είχε ιδιαίτερα κίνητρα για να επενδύσει σε δοκιμές για τον καθορισμό ορίων ασφαλών πτήσεων (Sammonds et al., 2010).

Το 2008 το Eurocontrol πραγματοποίησε για πρώτη φορά μια πρωτοπόρο άσκηση αντιμετώπισης ηφαιστειακής τέφρα στην ευρωπαϊκή ήπειρο την VOLCEX. Το σενάριο αυτό περιελάμβανε ένα νέφος τέφρας που κινείται από το Ηνωμένο Βασίλειο στην Ιρλανδία και την Γαλλία πριν μεταβεί στις Σκανδιναβικές χώρες και συμφωνήθηκε ότι η αντιμετώπιση του θα

χρησιμοποιούσε το σχέδιο έκτακτης ανάγκης του Ηνωμένου Βασιλείου και της Ισλανδίας επεκτείνοντας το στην Ευρώπη. Ακολουθώντας τις συστάσεις του ICAO η κυρία αντιμετώπιση ήταν ότι δεν θα έπρεπε να χρησιμοποιείται ο εναέριος χώρος που έχει μολυνθεί οπότε τα αποτελέσματα της άσκησης δεν οδήγησαν σε περαιτέρω προληπτικά μέτρα έτσι οι προειδοποιήσεις των επιστημόνων για πιθανό αντίκτυπο μιας έκρηξης σε ευρωπαϊκή περιοχή τόσο προς τον Ατλαντικό όσο και προς τον ευρωπαϊκό εναέριο χώρο δεν ελήφθησαν υπόψη από τους φορείς για την ανάπτυξη περαιτέρω σχεδίου έκτακτης ανάγκης (Sveinbjörnsson et al., 2002)

5.2.2. Μετά το 2010

Όταν το ισλανδικό ηφαίστειο Eyjafjallajökull εξερράγη 14 Απριλίου 2010 εξέπεμψε ένα σύννεφο τέφρας έως τα 30.000 πόδια στην ατμόσφαιρα το οποίο αρχικά μεταφέρθηκε από την Ισλανδία προς το Ηνωμένο Βασίλειο αλλά και την βόρεια Ευρώπη επηρεάζοντας έτσι έναν από τους πιο συνωστισμένους εναέριους χώρους στον κόσμο, τον ευρωπαϊκό εναέριο χώρο όπου λαμβάνουν χώρα πάνω από 30000 πτήσεις ανά ημέρα. Ακολουθώντας έτσι τις οδηγίες του ICAO αρχικά το Ηνωμένο Βασίλειο και στη συνέχεια η υπόλοιπη Ευρώπη άρχισαν να μειώνουν την εναέρια κυκλοφορία και τα αεροδρόμια έκλειναν το ένα πίσω από το άλλο την ίδια τακτική ακολούθησαν και οι υπόλοιπες χώρες. Τρεις ημέρες μετά το από αυτό το απροσδόκητο κλείσιμο των αεροδρομίων οι οικονομικές επιπτώσεις από την απώλεια εσόδων πίεσαν τις ρυθμιστικές αρχές να αλλάξουν αντιμετώπιση από αυτήν που πρότεινε μέχρι τώρα ICAO (Mazzocchi et al., 2010) δηλαδή την απόλυτη αποφυγή του εναέριου χώρου που είχε επιμολυνθεί από τέφρα και να ψάξουν να βρουν για κάποια άλλη ασφαλή λύση όπου θα επέτρεπε την λειτουργία των αεροδρομίων.

Έτσι καθώς δεν υπήρχε κάποιος ρυθμιστικός φορέας με προηγούμενη τεχνογνωσία για την διαχείριση αυτής της κρίσης σχηματίστηκε για πρώτη φορά κατά τη διάρκεια της κρίσης μια επιτροπή αποτελούμενη από επιστήμονες, ελεγκτές εναέριας κυκλοφορίας αεροπορικές εταιρείες και κατασκευαστές κινητήρων. Προσπάθεια όλων αυτών ήταν να καθορίσουν τα όρια συγκέντρωσης κατά τα οποία θα μπορούσαν να επιχειρήσουν με ασφάλεια τα αεροσκάφη με σκοπό να ξανά ανοίξει το μεγαλύτερο αεροδρόμιο της Ευρώπης το Heathrow. Ενώ ζητήθηκε από την VAAC του Λονδίνου να δημιουργήσει χάρτες συγκεντρώσεων που θα απεικόνιζαν την αναμενόμενη έκταση με διάφορες τιμές συγκέντρωσης τέφρας. Οι κατασκευαστές κινητήρων κλήθηκαν να απαντήσουν σχετικά με τα επίπεδα συγκέντρωσης τα οποία θα ήταν ασφαλή για την λειτουργία κινητήρων λαμβάνοντας υπόψη ιστορικά στοιχεία από κινητήρες που είχαν σταματήσει να λειτουργούν ύστερα από επαφή με νέφη τέφρας. Έτσι οι κατασκευάστριες εταιρίες συμφώνησαν ότι οι κινητήρες μπορούσαν να αντέξουν μέχρι $2000\mu\text{g}/\text{m}^3$ χωρίς σοβαρά προβλήματα δεδομένης της κατάλληλης συντήρησης και ότι η ορατή τέφρα θα είχε αποφευχθεί (CAA UK, 2010).

Η ευρωπαϊκή επιτροπή συμβουλευόμενη και το Eurocontrol ως διαχειριστή δικτύου για την ασφάλεια των αερομεταφορών κατέληξε σε τρεις επιλογές ως προ τον τρόπο διαχείρισης

- Status quo με κλειστό εναέριο χώρο όταν υπάρχει η υποψία τέφρας
- Κλειστός εναέριος χώρος κοντά στο ηφαίστειο αφήνοντας όμως ελεύθερη την απόφαση στους αερομεταφορείς για τον υπόλοιπο εναέριο χώρο.
- Δήλωση της περιοχής συγκέντρωσης τέφρας ως ζώνη πτήσεων αφήνοντας την τελική απόφαση για την εκτέλεση των πτήσεων στους εκάστοτε αερομεταφορείς.

Με βάση τις απόψεις των εμπειρογνομόνων ο πρόεδρος του Eurocontrol ως αρμόδια αρχή αποδέχτηκε την τρίτη επιλογή και η ζώνη απαγόρευσης χωρίστηκε σε δύο μέρη, μία κόκκινη ζώνη και μία μαύρη ζώνη. Ορίζοντας ως κόκκινη ζώνη περιοχές με συγκέντρωση κάτω από $2000\mu\text{g}/\text{m}^3$ όπου τα αεροσκάφη θα μπορούν να πετάξουν δεδομένο ότι θα επακολουθήσουν επιθεωρήσεις ασφαλείας και διαδικασίες συντήρησης. Με την μαύρη ζώνη να είναι αρχικά για συγκεντρώσεις πάνω από $2000\mu\text{g}/\text{m}^3$ ωστόσο στη συνέχεια η ρυθμιστική αρχή αποφάσισε και μία γκριζα ζώνη για συγκεντρώσεις από $2000\mu\text{g}/\text{m}^3$ έως $4000\mu\text{g}/\text{m}^3$ την οποία τα αεροσκάφη θα μπορούσαν να πετάξουν δεδομένου ότι ακολουθούν επιπλέον περιορισμούς (EASA, 2010) αφήνοντας ως απόλυτη nofly zone περιοχές με συγκεντρώσεις πάνω από $4000\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Η διαφοροποίηση του εναέριου χώρου αναλόγως την συγκέντρωση της τέφρας ήταν η πρώτη από μια σειρά αλλαγών που εισήχθησαν στην ευρωπαϊκή αεροπορική κοινότητα μετά την έκρηξη του ηφαιστείου το 2010. Σημαντικό είναι ότι η απόφαση μεταφέρθηκε από τις ρυθμιστικές αρχές στους εκάστοτε αερομεταφορείς. Μέχρι σήμερα ο ευρωπαϊκός εναέριος χώρος θα παραμείνει ανοικτός σε περίπτωση ηφαιστειακής εκρήξεις και θα αποφασίζουν οι αερομεταφορείς αν επιλέγουν να πετάξουν. Για να ληφθεί αυτή απόφαση θα πρέπει να γίνεται μία αξιολόγηση κινδύνου Safety Risk Assessment (SRA) η οποία περιγράφει τις διαδικασίες για την ασφάλεια της πτήσης και την αντιμετώπιση περιστατικών συνάντησης με τέφρα κατά διάρκεια της πτήσης. Ακολουθούμενη μία ηφαιστειακή έκρηξη η αξιολόγηση κινδύνου αυτή θα πρέπει να εγκριθεί από την χώρα του αερομεταφορέα ενώ από το 2016 οι περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες έχουν αναγνωρίσει την συγκεκριμένη διαδικασία αξιολόγησης κινδύνου και την έχουν ενσωματώσει στη λειτουργία τους.

Επιπλέον για μια πιο συντονισμένη αντιμετώπιση σε ευρωπαϊκό επίπεδο σε περίπτωση μιας αντίστοιχης κρίσης δημιουργήθηκε το ευρωπαϊκό κέντρο συντονισμού αεροπορικών κρίσεων με πρόεδρο το Eurocontrol (EACCC) (Bolic & Sivčev, 2012). Λειτουργία αυτού του φορέα είναι να συλλέγει πληροφορίες να διανέμει στο δίκτυο και να προτείνει λύσεις έτσι ώστε να υποστηρίζει στους διαχειριστές και αυτούς που παίρνουν την απόφαση καθώς και να εφαρμόζει αποφάσεις οι οποίες λαμβάνονται. Ο συντονιστικός αυτός φορέας αποτελείται από αντιπροσώπους μέλη της ευρωπαϊκής ένωσης την EASA (ευρωπαϊκός ρυθμιστικός φορέας ασφαλείας πτήσεων) τον στρατό των χωρών διαχειριστές να δεις κυκλοφορίας αεροδρόμια και χρήστες του εναέριου χώρου. Ακόμη για να γίνεται

πρακτική εξάσκηση και προσαρμογή απέναντι σ' αυτό τον κίνδυνο διεξάγεται κάθε χρόνο μία άσκηση αντιμετώπισης τέφρας σε εναέριο χώρο το συντονισμό της οποίας ελέγχει ο ICAO.

5.3. Η επιστήμη και οι ρυθμιστικές αρχές

Η αλλαγή της προσέγγισης που επέτρεπε πλέον τις πτήσεις σε περιοχές με συγκέντρωση τέφρας μετά το 2010 απαιτούσε μία νέα διαδικασία διαχείρισης ρίσκου σε συνεργασία με επιστήμονες για να υποστηρίξει το έργο της VAAC αλλά και να παρέχει κατευθυντήριες οδηγίες προς τις κυβερνήσεις. Η επιστημονική έρευνα που έχει έναυσμα πολιτικούς προβληματισμούς ούτως ώστε να θεσπίσει κανονισμούς καλείται ως ρυθμιστική επιστήμη. Αντί να μας δίνουν έναν γενικό ορισμό οι Irwin et al 1997 χαρακτηρίζουν την ρυθμιστική επιστήμη ως δράση καθώς περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα τεχνικών νομικών και καινοτόμων χαρακτηριστικών.

Ο σκοπός της ρυθμιστικής επιστήμης είναι να πετύχει τεχνικές διαδικασίες για να επεκτείνει την ανάπτυξη της πολιτικής δίνοντας έμφαση στα 30 ακόλουθα στοιχεία το πρώτο είναι η παραγωγή γνώσης με την ρητή έμφαση να καλυφθούν τα κενά, δεύτερο η σύνθεση γνώσης και η ανάλυση δεδομένων όπου αυτή η ανάλυση έχει εκτεταμένο ρόλο σε αντίθεση με την ακαδημαϊκή φύση της καινοτομίας και τρίτο η πρόβλεψη σχετικά με την σοβαρότητα ενός κινδύνου.

Οι επιστημονική συμβολή στο θέμα μας βοήθησε, σε σύντομο διάστημα, να αλλάξουν τα όρια που ίσχυαν παγκόσμια για πάνω από δέκα χρόνια. Παρόλα αυτά υπάρχει ο εξής κίνδυνος: να οδηγηθούμε σε απώλεια της αξιοπιστίας της καθώς δημιουργείται ο φόβος ύπαρξης βραχυπρόθεσμης πολιτικής ατζέντας ο οποίος μπορεί να μειώσει την αξιοπιστία ως προς την ποιότητα των συμβουλών εξαιτίας της συμμετοχής στις πολιτικές αποφάσεις.

Για την αλλαγή ρότας μετά το 2010 χρειάστηκαν επιστημονικές συμβουλές από δύο μέτωπα. Από τη μία πλευρά ζητήθηκε η γνώμη ειδικών στην διαστημική καθώς και επιστημόνων από τους κλάδους της ηφαιστειολογίας μετεωρολογίας και της ατμοσφαιρικής διασποράς για να σχολιάσουν την ακρίβεια των μετρήσεων για τα μοντέλα διασποράς της τέφρας. Και από την άλλη οι συμβουλές των μηχανικών των αεροκινητήρων ώστε να καθοριστεί ποια ποσότητα τέφρας είναι απολύτως απαγορευτική για αυτούς.

5.4. Η εξέλιξη της έρευνας η τέφρα και οι σύγχρονοι κινητήρες

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την καλύτερη κατανόηση της δυναμικής της τέφρας το κυρίαρχο ερώτημα που απασχολεί την λήψη επιχειρησιακών αποφάσεων παραμένει. Πως επηρεάζει η τέφρα τους αεριωθούμενους κινητήρες. Οι κινητήρες αεριωθούμενων λειτουργούν σε θερμοκρασίες άνω των 1400 ενώ η τέφρα τήκεται σε μικρότερες θερμοκρασίες ενώ βλάβες σε κινητήρες έχουν γίνει σε αποστάσεις από 150-600 μίλια από την πηγή της έκρηξης (Guffanti et al., 2010). Επιπλέον της κράτησης κινητήρα η χαμηλής πυκνότητας τέφρα μπορεί να προκαλέσει διάβρωση και συσσώρευση υλικών στον κινητήρα μειώνοντας την διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων απαιτώντας ειδικές ενέργειες συντήρησης προκειμένου να εντοπιστεί

έγκαιρα η βλάβη ενός κινητήρα. Μακροπρόθεσμα οι συνέπειες στους κινητήρες δεν έχουν μελετηθεί πλήρως. Όποτε απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την καλύτερη κατανόηση της επιπτώσεις της τέφρας στους αεροκινητήρες.

Για τον προσδιορισμό των ασφαλών ζωνών πτήσης η ερώτηση που πρέπει να απαντήσουμε είναι ποιο επίπεδο συγκέντρωσης τέφρας είναι ασφαλές. Ερώτημα που έθεσε επανειλημμένα ο εκπρόσωπος του Eurocontrol. Αν και ενθαρρύνεται η έρευνα (ICAO, 2012b.) για την εκτίμηση αυτού του αντίκτυπου στους κινητήρες τα ερωτήματα που τέθηκαν το 2010 σχετικά με την ανοχή παραμένουν αναπάντητα σήμερα επηρεάζοντας την σημασία των μετρήσεων (Sanderson, 2010) καθώς και τις προβλέψεις σχετικά με την ποσότητα τέφρας.

Παρόλο που οι κατασκευαστές κινητήρων έδειξαν καλή θέληση συμμετέχοντας στις διεπιστημονικές συναντήσεις μετά το 2010 οι παρουσιάσεις τους δείχνουν ότι είναι μάλλον πολύ προσεκτικοί όσον αφορά τις ακριβείς δηλώσεις σχετικά με τις αντοχές των κινητήρων. Ταυτόχρονα τονίζεται πως η σύνδεση της τέφρας από κάθε ηφαιστειακή έκρηξη είναι διαφορετική συνεπώς τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ως οριακά αφήνοντας μεγάλο περιθώριο αβεβαιότητας στις προβλέψεις (BOEING, 2010.) Μια άλλη άποψη είναι ότι η αλλαγή στους κινητήρες ώστε να παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα και αντοχή σε πιθανές συναντήσεις με τέφρα θα οδηγούσε σε κινητήρες που απαιτούν περισσότερα καύσιμα και είναι λιγότερο φιλικό προς το περιβάλλον (Rolls-Royce, 2010).

Η διεθνής ομάδα δράσης για την ηφαιστειακή τέφρα εξέδωσε συστάσεις σχετικά με το ηφαιστειακό υλικό το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις δοκιμές σε κινητήρες (ICAO, 2012). Αυτά ελήφθησαν υπόψη σε ένα πολυετές ερευνητικό έργο της NASA η οποία διεξήγαγε προσομοιώσεις αλλά και εκτεταμένες δοκιμές κινητήρων μέχρι την καταστροφή τους (NASA, 2012) για να ρίξει φως και να βελτιώσει το επίπεδο κατανόησης της επίδρασης της τέφρας στους κινητήρες. Ωστόσο αντί να δοκιμαστεί η διαδοχική αύξηση της συγκέντρωσης μόνο δύο μόνο συγκέντρωσης δοκιμάστηκαν αυτές των $1000\mu\text{g}/\text{m}^3$ και $10000\mu\text{g}/\text{m}^3$ (NASA, 2013). Το πως αυτό σχετίζεται με τον ευρωπαϊκό κανονισμό για συγκεντρώσεις από 2000 έως $4000\mu\text{g}/\text{m}^3$ μένει να φανεί στο μέλλον (Rolls-Royce, 2013).

Το διάγραμμα της Rolls-Royce σχετικά με τα ασφαλή επίπεδα πτήσης δείχνει μία επαναξιολόγηση της βάσης δεδομένων τόσο για τιμές συγκέντρωσης τέφρας όσο και για τις αβεβαιότητες του συγκεκριμένου μοντέλου (Rolls-Royce, 2013). Δείχνει ότι η ζωή τέφρας που οδήγησε σε απώλεια του κινητήρα το 1982 είχε υπερεκτιμηθεί δεδομένο το οποίο ίσως να αξίζει να το κρατήσουμε για μελλοντικές ρυθμιστικές αποφάσεις. Επιπλέον συνδέει τα επίπεδα συγκέντρωσης καθώς και την διάρκεια της έκθεσης και δείχνει μία ποικιλία υποθέσεων η οποία πρέπει να ληφθεί υπόψη όταν επιχειρούμε ανάλυση και διαχείριση τέτοιου ρίσκου. Το διάγραμμα τονίζει την ανάγκη για περαιτέρω μελέτη συμπεριλαμβανομένων σε κινητήρες συμπίεστρες τουρμπίνες και θάλαμος καύσης. Τέτοιες μελέτες θα μειώσουν την αβεβαιότητα των θεωρητικών μοντέλων. Παρόλα αυτά από το 2016 αυτή η έρευνα δεν έχει εγκριθεί από την εταιρία (από συνέντευξη εκπροσώπου της εταιρίας Rolls Royce, Μάιος 2015).

Θα επηρεάσει η αβεβαιότητα σχετικά με την ποσότητα τέφρας μπορεί να αντέξει ένας κινητήρας την επόμενη φορά που ένα σύννεφο τέφρας θα επηρεάσει τον ευρωπαϊκό εναέριο χώρο. Σύμφωνα με τον εκπρόσωπο της Rolls Royce πολλές εταιρίες θα αποφασίσουν να μην πετούν καθώς δεν είναι όλοι οι αερομεταφορείς εξοπλισμένοι για να εκτελέσουν την απαραίτητη αξιολόγηση κινδύνου για την ασφάλεια πτήσεων. Και καθώς οι επιπτώσεις παραμένουν άγνωστες η πτήση διαμέσου τέφρας μπορεί να καθλώσει ένα αεροσκάφος και να το οδηγήσει σε αρκετούς μήνες συντήρησης. Ακόμη, παρόλο που ένας κινητήρας μπορεί να αντικατασταθεί εντός εικοσιτετράωρου, δεν μπορούν να διατεθούν αρκετοί κινητήρες ταυτόχρονα για τόσα πολλά αεροσκάφη του ίδιου τύπου και η διαδικασία συναρμολόγησης μπορεί να διαρκέσει 50 με 60 ημέρες οδηγώντας σε μία κρίση ευρύτερου αντίκτυπου (Rolls-Royce, 2017).

5.5. Αναπτύσσοντας σενάρια για την εξερεύνηση επιπτώσεων και αδυναμιών

Μετά την έκρηξη του ηφαιστείου στην Ισλανδία στην Ευρώπη θεσπίστηκαν δύο ασκήσεις για τις διαδικασίες διαχείρισης και αντιμετώπιση της ηφαιστειακής τέφρας. Η διεθνής άσκηση VOLCEX διοργανώνεται από τον ICAO και επαναλαμβάνεται ανά 1-2 χρόνια με συμμετέχοντες από όλο τον αεροπορικό κλάδο και περιλαμβάνει μία εξομοίωση έκρηξης ενός ηφαιστείου στον ευρωπαϊκό χώρο. Σε μία προπαρασκευαστική συνάντηση τα ενδιαφερόμενα μέρη συμφωνούν σε ένα σενάριο που θα δοκιμαστεί. Το VAAC στο Λονδίνο εκτελεί το μοντέλο NAME για τη διασπορά τέφρας στο σενάριο της έκρηξης σε συμφωνημένες μετεωρολογικές συνθήκες ενώ περιλαμβάνει κέντρα ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας διοικήσεις πολιτικής αεροπορίας μετεωρολογικά γραφεία την VAAC Λονδίνου και Τουλούζης και αερομεταφορείς από όλο τον κόσμο. Το περιεχόμενο της άσκησης είναι η αρχική αντιμετώπιση διασποράς τέφρας από την έκρηξη ενός ηφαιστείου από τα εμπλεκόμενα μέρη.

Η διεθνική άσκηση VOLCICE είναι μια άσκηση διάρκειας μιας ημέρας που επαναλαμβάνεται ανά μήνα για εξάσκηση των πρακτικών και μεθόδων που χρησιμοποιούνται μεταξύ των ισλανδικών αερομεταφορέων ISAVIA και IMO και του VAAC του Λονδίνου με μια εξομοίωση έκρηξης ηφαιστείου στην Ισλανδία ή στο Jan Mayen (Witham et al., 2015)

Οι ασκήσεις αυτές βρίσκονται υπό την επίβλεψη του διεθνούς οργανισμού πολιτικής αεροπορίας ICAO και εφαρμόζουν τις υπάρχουσες διαδικασίες έκτακτης ανάγκης κατά τη διάρκεια της άσκησης. Το αντικείμενο και των δύο ασκήσεων είναι η άμεση απάντηση σε έκρηξη χωρίς να λαμβάνονται υπόψη μεγαλύτερες διάρκειες. Κάθε σενάριο έχει τα δικά του χαρακτηριστικά και απαιτεί μία προσαρμοσμένη απάντηση. Ωστόσο ο χρόνος για την αναδιοργάνωση είναι δαπανηρός.

Μετά την έκρηξη της Ισλανδίας η καθυστέρηση της δράσης που προκλήθηκε από την ανυπαρξία πλαισίου ήταν περίπου 800 εκατ. ευρώ όπως δήλωσε εμπειρογνώμονας της διαχείρισης αεροπορικής κυκλοφορίας που συμμετείχε στη δημιουργία του πλαισίου European Aviation Crisis Coordination Cell (EACCC) στις 19 Μαΐου 2010 υπό την αιγίδα του

Eurocontrol και της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (EC). Η σύνθεση του EACCC περιλάμβανε την Πρωεδρία της ΕΕ και όρισε εκπροσώπους των χρηστών του εναέριου χώρου των παρόχων υπηρεσιών αεροναυτιλίας του στρατού και των αεροδρομίων. Μαζί με τις υπόλοιπες ρυθμιστικές αρχές συμμετέχει ενεργά στη διασφάλιση ενός καλύτερου συστήματος ετοιμότητας στην Ευρώπη για τις ηφαιστειακές εκρήξεις και άλλες καταστάσεις που επηρεάζουν την αεροπλοΐα με κύριο ρόλο την υποστήριξη και το συντονισμό της απόκρισης στις κρίσεις του αεροπορικού δικτύου. Ο ρόλος του περιλαμβάνει την πρόταση μέτρων και την ανάληψη πρωτοβουλίας για τον συντονισμό της αντίδρασης σε καταστάσεις κρίσης και κυρίως την έγκαιρη απόκτηση και ανταλλαγή πληροφοριών με τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων της αεροπορικής κοινότητας (Manuhutu & Gerhard, 2015).

Η δημιουργία εκ των προτέρων ενός πλαισίου αρκετά ευέλικτου ώστε να προσαρμόζεται στην εκάστοτε κατάσταση θα εξοικονομούσε χρόνο και οικονομικούς πόρους σε μια κατάσταση κρίσης.

Κεφάλαιο 6. Το ηφαίστειο Cumbre Vieja και η πρόσφατη δραστηριότητα το 2021

6.1. Γενικά

Οι Κανάριοι νήσοι βρίσκονται στον Ατλαντικό ωκεανό στην Αφρικανική πλάκα σε μια απόσταση 100 χιλιομέτρων από την βορειοδυτική ακτή της Αφρικής. Η νήσος Λα Πάλμα είναι το πέμπτο μεγαλύτερο νησί των Καναρίων Νήσων με μια έκταση περί τα 708,3 τ.χλμ. πληθυσμό 83.690 κατοίκους και πρωτεύουσα την Santa Cruz de La Palma. Γεωλογικά είναι ένα ηφαιστειογενές νησί όπως και το υπόλοιπο αρχιπέλαγος με το νησί να φιλοξενεί τον κρατήρα «Καλδέρα De Taburiente» ο οποίος είναι ο μεγαλύτερος εκρηξιγενής κρατήρας στον κόσμο με εύρος 9χλμ και βάθος 1500μ και είναι προϊόν ενός περιβάλλοντος αργά κινούμενων τεκτονικών πλακών και χαμηλούς ρυθμούς παροχής μάγματος (Carracedo et al., 1998) περιβάλλεται από υψηλές βουνοκορφές πάνω από 1600μ με την υψηλότερη κορυφή την «Roke De Los Moutsatsos» να φτάνει τα 2423μ υψόμετρο. Η νήσος Λα Πάλμα όπως και τα υπόλοιπα Κανάρια νησιά έχει ήπιο κλίμα χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου και θερμοκρασίες από 15-25°C.

6.2. Η γεωλογία του νησιού

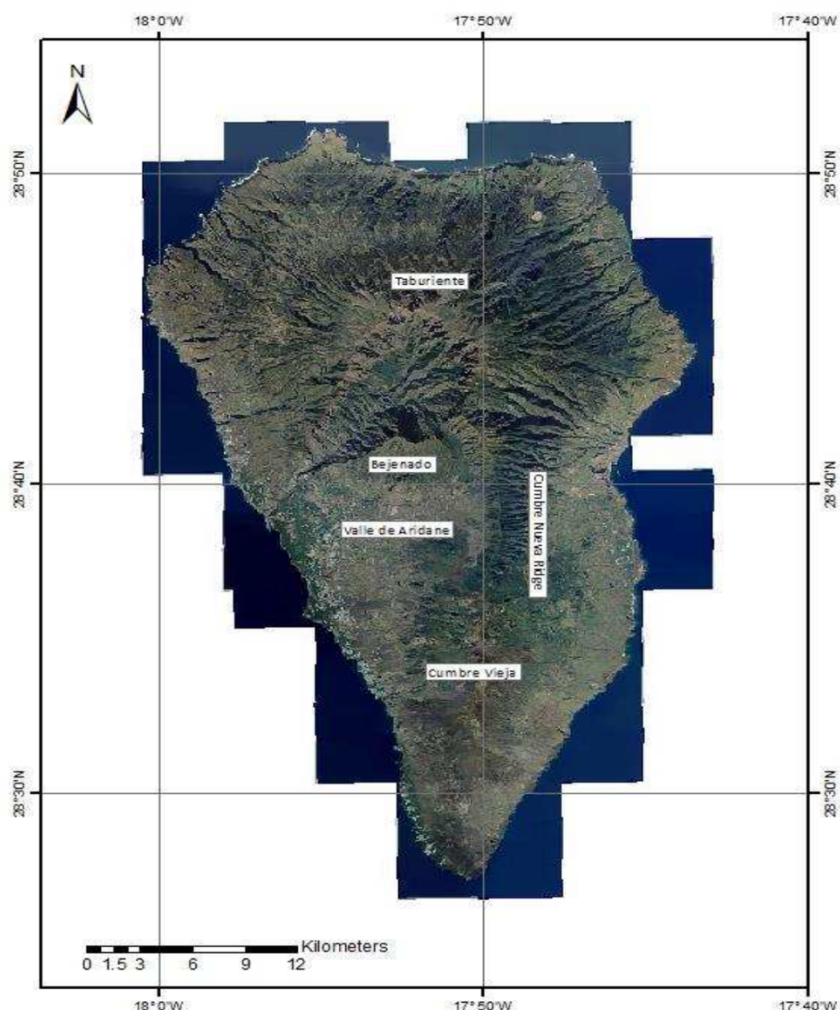
Κατά την πρώιμη φάση δημιουργίας οι Κανάριοι νήσοι σχηματίστηκαν από πρώιμες ροές λάβας οι οποίες αποτελούν εξαιρετικά σημαντικές πληροφορίες όπως την καταγραφή των συνθηκών κατά τη δημιουργία τους, την πετρογραφική και την χημική σύνθεση καθώς και τις συνθήκες κρυστάλλωσης αλλά και τις διεργασίες που έγιναν για τη δημιουργία αυτήν. Ακόμη μαρτυρούν τα ιχνοστοιχεία των πετρωμάτων και την γεωχημεία των ισοτόπων της λάβας και παρέχουν πολλές ακόμα πληροφορίες για τις διεργασίες που συμβαίνουν στο βαθύτερο τμήμα του συστήματος παροχής μάγματος.

Συγκεκριμένα το Λα Πάλμα το νεότερο από τα 7 νησιά έχει υποστεί από τις λιγότερες διαβρώσεις εξαιτίας της ηλικίας του και έχει ένα από τα πληρέστερα γεωλογικά αρχεία (Carracedo, 1994), ενώ βρίσκεται ακόμα στη φάση της δημιουργίας του με την πιο πρόσφατη έκρηξη, πριν την έκρηξη του 2021, να λαμβάνει χώρα το 1971 με πιο κοινά προϊόντα τις υπέργειες ροές λάβας σε αντίθεση με τους πυριτικούς ιγνιβρίτες που είναι τα πιο συνήθη στα Γκραν Κανάρια ή στην Τενερίφη.

Η τοπογραφία του νησιού είναι εξαιρετικά απότομη με εξαίρεση την κοιλάδα της Αριάδνης η οποία όμως περιβάλλεται από έναν μεγάλο γκρεμό και κλιμακωτούς βράχους. Στη βόρεια πλευρά του νησιού βρίσκεται το παλιό ηφαίστειο Taburiente ,ενώ στα νότια του ενεργό ρήγμα του Cumbre Vieja (Carracedo, 1994). Προηγούμενες μελέτες δείχνουν ότι περίπου 560 χιλιάδες χρόνια πριν το νότιο μέρος του Taburiente όπου βρίσκεται το σημερινό ρήγμα του Cumbre Nueva υπέστη μια τεράστια κατολίσθηση που αποτράβηξε την δυτική του πτέρυγα

τερματίζοντας την δραστηριότητα στο Taburiente (Carracedo et al., 1999b.). Το αμφιθεατρικό κενό που δημιουργήθηκε αποτέλεσε το σημείο δημιουργίας του ηφαιστείου Bejenado.

Η κατάρρευση του ρήγματος Cumbre Nueva παρέχει πολλές πληροφορίες λόγω του ότι η εκρηκτική δραστηριότητα ολοκληρώθηκε πολύ σύντομα αφήνοντας πίσω της την λάβα από τις δύο ακολουθίες προ και μετά κατάρρευσης και ένα πλούσιο δείγμα εκτεθειμένου μάγματος ιδανικό για μελέτη και δειγματοληψία, ενώ στα άλλα Κανάρια τέτοιες ροές θα είχαν εξαφανιστεί από επακόλουθες εκρήξεις η την διάβρωση (Carracedo et al, 2007).

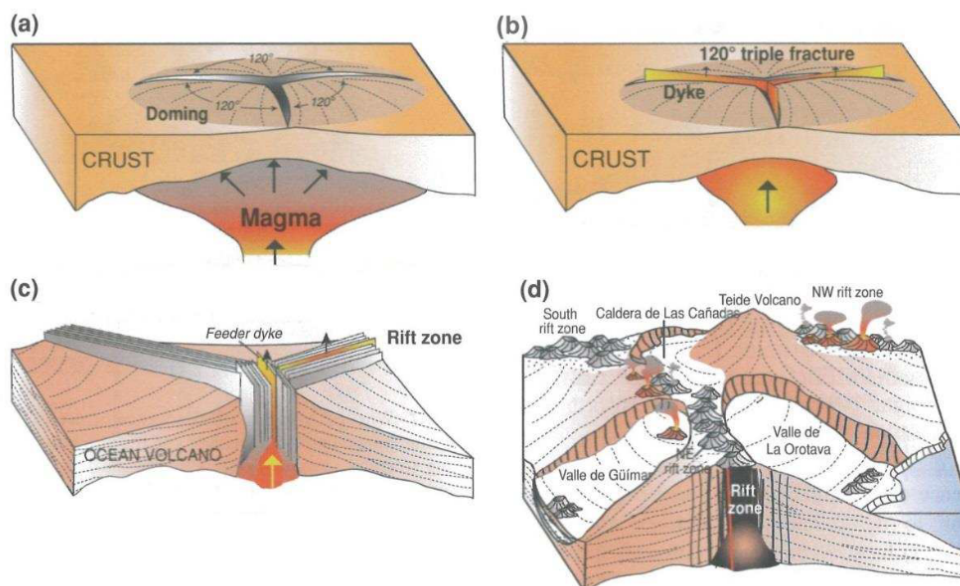


Εικόνα 26 Δορυφορική εικόνα του Λα Πάλμα με το κεντρικό τμήμα του νησιού την κατάρρευση του Cumbre Nueva, βόρεια του ηφαιστείου Taburiente. Νότια το Cumbre Vieja και δυτικά το ρήγμα Cumbre Nueva (Πηγή Γεωλογικό Ινστιτούτο Ισπανίας)

6.3. Cumbre Vieja

Το ηφαίστειο Cumbre Vieja είναι το νεότερο απόκτημα του νησιού. Χαρακτηρίζεται από πολύ απότομες πλαγιές και μπορεί να υποστεί μεγάλης κλίμακας κατάρρευση χωρίς προειδοποίηση. Την αστάθεια αυτή μπορούμε να υπολογίσουμε από την αναδιαμόρφωση των ζωνών ηφαιστειακής ρήξης καθώς και των υποκειμένων αναχωμάτων του ηφαιστείου. Για το μεγαλύτερο κομμάτι της ιστορίας του από 125 χιλιάδες έως 20 χιλιάδες χρόνια πριν το νησί Λα Πάλμα χαρακτηριζόταν από μία τριπλή ζώνη ηφαιστειακής ρήξης 120°, οι τρεις ζώνες ήταν

άνισα ανεπτυγμένες με ένα παραγωγικό νότιο ρήγμα και τα άλλα δύο πιο ασθενή το βορειοανατολικό και το βορειοδυτικό.



Εικόνα 27 Σχηματικό μοντέλο της δημιουργίας 3 ζωνών η καθεμιά στις 120° συνήθους δομή στα Κανάρια νησιά

a) η πρόσκρουση του θερμού σημείου στην επιφάνεια δημιουργεί ανύψωση και τη δημιουργία θόλου και 3 αδύναμα σημεία.

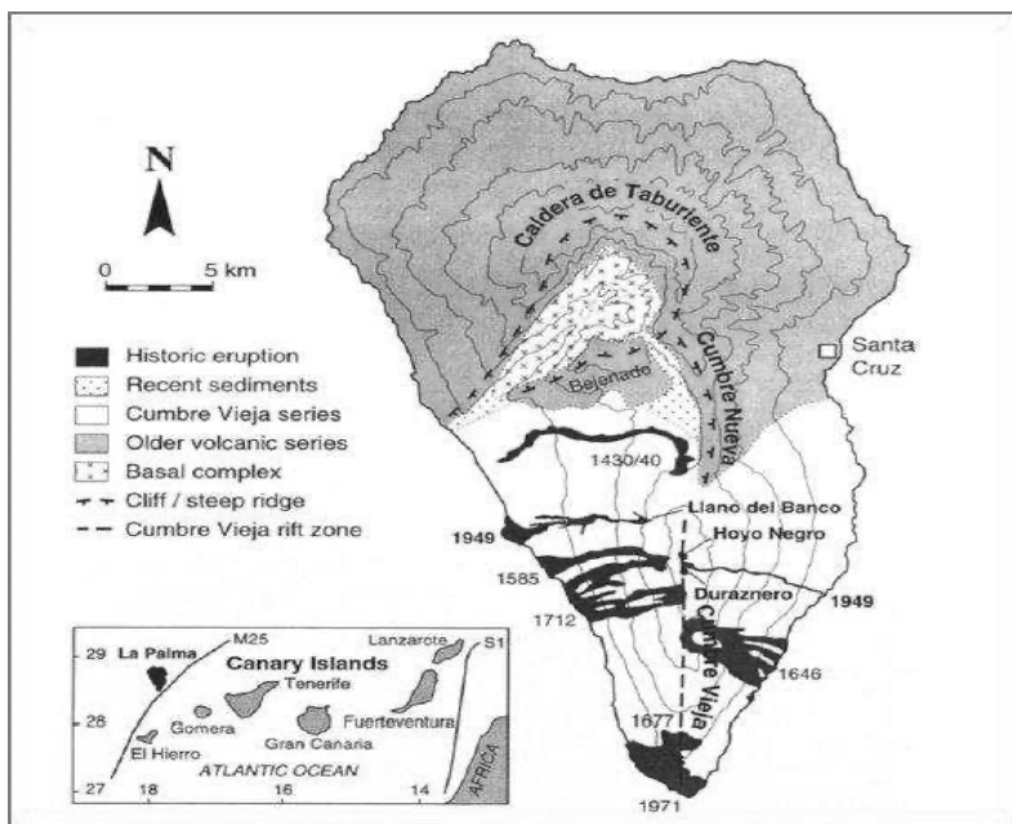
b) η δημιουργία αναχωμάτων στα αδύναμα σημεία.

c) οι συνεχιζόμενες διεργασίες δημιουργούν ανάπτυξη πλήθους αναχωμάτων που περιορίζουν την μετακίνηση μάγματος και οδηγούν την δημιουργία ηφαιστειακών ρηγμάτων

d) το ωκεάνιο νησί που δημιουργήθηκε διαθέτει πλέον μια τριπλή δομή ανεπτυγμένων αναχωμάτων που οδηγεί σε πλευρικές καταρρεύσεις καθετα των ρηγμάτων (Πηγή Caraccedo 1994)

Αυτή η διαφορά στη δραστηριότητα τους πιθανώς ευθύνεται σε τοπογραφικές βαρυτικές τάσεις σχετιζόμενες με τη δυτική πλευρά που κατέρρευσε την Cumbre Nueva κάτω από την δυτική πλευρά του Cumbre Vieja. Από τα 20 χιλιάδες έως τα 7 χιλιάδες χρόνια πριν η δραστηριότητα στην βορειοδυτική ηφαιστειακή ζώνη μειώθηκε και η ηφαιστειακή δραστηριότητα μετακινήθηκε ελαφρώς πιο βόρεια. Πιο πρόσφατα η γεωμετρία του τριπλού ρήγματος έχει αντικατασταθεί στην επιφάνεια από μία ζώνη ρήξης που τέμνει το ηφαίστειο από βορρά προς νότο το και από συστοιχίες σχισμάτων από ανατολικά προς δυτικά στην δυτική πλευρά του ηφαιστείου. Το βόρειο ανατολικό ρήγμα έχει μείνει εντελώς ανενεργό. Αυτή η δομική αναδιάρθρωση μας φανερώνει την εξασθένηση της δυτικής πλευράς του ηφαιστείου (Moss J.L. et al., 1999). Η πρόσφατη έκρηξη κοντά στην κορυφή του Cumbre Vieja το 1949 δημιούργησε ένα σύστημα ρηγμάτων προς τα δυτικά κατά μήκος της κορυφής του ηφαιστείου. Η γεωμετρία αυτού του συστήματος καθώς και ο χρόνος σχηματισμού του σε σχέση με τις εξαερώσεις κατά τη διάρκεια της έκρηξης καταδεικνύουν ότι αυτό δεν είναι απλά η επιφανειακή έκφραση ενός αναχώματος. Αντιθέτως ερμηνεύεται σαν η πρώτη επιφανειακή ρήξη κατά μήκος μιας αναπτυσσόμενης ζώνης παραμόρφωσης προς τη θάλασσα στην δυτική

πλευρά του Cumbre Vieja. Συνεπώς το ηφαίστειο θεωρείται ότι είναι στην αρχική φάση αστάθειας των πλευρών του. Για την πρόσφατη εκδήλωση αυτής της αστάθειας μπορεί να ευθύνονται κλιματικοί παράγοντες ή η εξασθένηση κατά μήκος της δομής του Cumbre Nueva (Day SJ et al., 1999). Οι εκρήξεις του τα τελευταία 7000 χρόνια έχουν δημιουργήσει πληθώρα κώνων σκωρίας και κρατήρων κατά μήκος του άξονα βορρά νότο του ηφαιστείου Cumbre Vieja. Οι εκρήξεις που έχουν καταγραφεί από το 15^ο αιώνα έδιναν ήπια ηφαιστειακή δραστηριότητα και ροές λάβας που κατέστρεφαν κατοικημένες περιοχές του νησιού. Το νότιο άκρο του νησιού έχει καλυφθεί από ένα μανδύα λάβας από την έκρηξη του 1677-78. Επίσης όμως ροές λάβας έφθασαν στην θάλασσα και από τις εκρήξεις του 1585, 1646, 1712, 1949 και 1971 (Smithsonian Institution, 2021).



Εικόνα 28 Χάρτης της ροής λάβας από 7 εκρήξεις του Cumbre Vieja τα τελευταία 1000 χρόνια (Πηγή Klugel et al.2000)

6.4. Το χρονικό της έκρηξης

6.4.1. 15 - 21 Σεπτεμβρίου

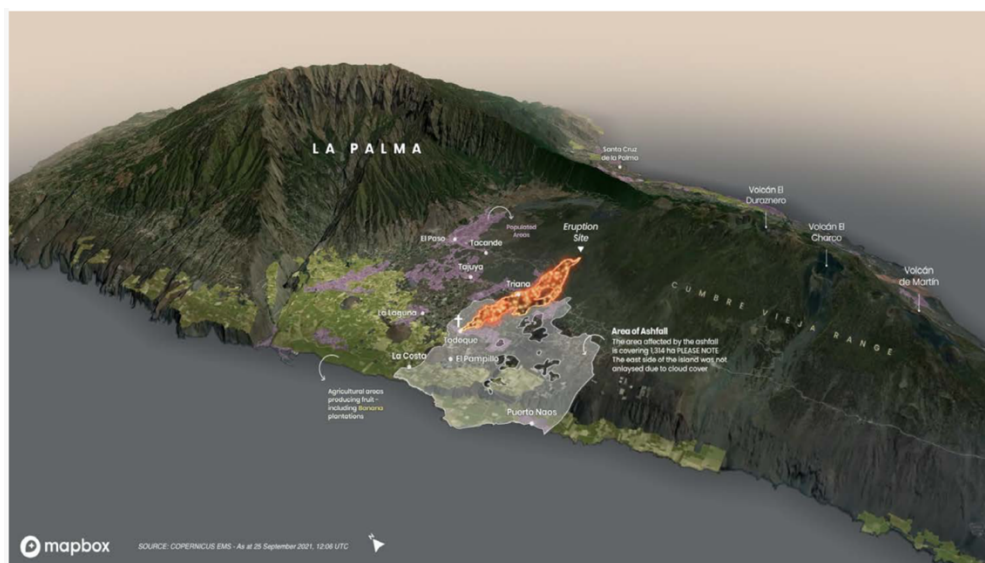
Η έκρηξη εκδηλώθηκε στο νησί μετά από μία εβδομάδα αυξημένης σεισμικότητας η οποία έδειξε τα επίκεντρα να γίνονται ολοένα και ρηχότερα και να κινούνται βορειοδυτικά. Στις 17-18 Σεπτεμβρίου του 2021 το Κέντρο Διαχείρισης Εκτάκτων Καταστάσεων PEVOLCA των Καναρίων εξέτασε τα σχέδια διαχείρισης εκκένωσης και έκτακτης ανάγκης ενώ πτήσεις ελικοπτέρων καθώς και drone λαμβάναν χώρα στις περιοχές που υπήρχε αυξημένο ρίσκο για μια πιθανή έκρηξη. Στις 17-18 Σεπτεμβρίου το γεωλογικό ινστιτούτο ανέφερε ότι σεισμικότητα

ελαττώθηκε παρόλο που ένας σεισμός $M=2$ έγινε αισθητός στον τοπικό πληθυσμό με εστιακό βάθος 100 m και δημιούργησε μία κάθετη παραμόρφωση κοντά στο επίκεντρο του. Το γεωλογικό ινστιτούτο παρατήρησε ότι η σεισμική δραστηριότητα αυξήθηκε το πρωινό της 19 Σεπτεμβρίου με τους σεισμούς να βρίσκονται σε εστιακό βάθος από μηδέν έως 6 km ενώ ένας σεισμός 4,2 καταγράφηκε στις 11:16. Οι αρχές μετέφεραν περίπου 50 κατοίκους με μειωμένη κινητικότητα από τα χωριά Las Manchas de Abajo, San Nicolas, El Paraiso, El Cargo, La Bombilla, El Remo και Puerto Naos. Επίσης μετακινήθηκαν κάτοικοι που ζούσαν σε περιοχές που ήταν επικίνδυνες για κατολισθήσεις και έγιναν ετοιμασίες σε νοσοκομεία γειτονίες και κέντρα εκκενώσεως (INVOLCAN & IGN, 2021).

Στις 15:10 την 19^η Σεπτεμβρίου ξεκίνησε μια έκρηξη στην περιοχή του Cabeza de Vaca του δήμου El Paso. Παρατηρητές που βρισκόταν κοντά σε αυτήν παρατήρησαν μία μεγάλη έκρηξη η οποία εκτόξευε υλικά καθώς και ένα σύννεφο αερίων και τέφρας, ενώ από το δίκτυο σεισμικής παρακολούθησης παρατηρήθηκε ηφαιστειακό τρέμουλο. Δυο ρωγμές με κατεύθυνση βορρά νότου άνοιξαν σε απόσταση 200μ μεταξύ τους. Οι επιστήμονες του INVOLCAN παρατήρησαν επτά ανοίγματα κατά μήκος των ρωγμών στο αρχικό στάδιο της έκρηξης ενώ ακόμη παρατήρησαν πολλαπλούς πίδακες λάβας που εξαιτίας της κατηφορικής τοπογραφίας διοχετευόταν δυτικά πυροδοτώντας δασικές πυρκαγιές. Φωτογραφικό υλικό από την περιοχή δείχνει ταυτόχρονα αρκετούς πίδακες κατά μήκος της σχισμής. Τα νέφη τέφρας έφθασαν το 1,5 χλμ ύψος ενώ τα νέφη αερίων έφθασαν τα 3 χλμ ύψος κατευθυνόμενα από τους ανέμους ανατολικά-νοτιοανατολικά (INVOLCAN & IGN, 2021).

Εως τις 17:00 η διοίκηση του κέντρου διαχείρισης έκτακτων καταστάσεων είχε αυξήσει το επίπεδο συναγερμού σε πορτοκαλί και στη συνέχεια σε κόκκινο που είναι και η υψηλότερη κλίμακα για τους δήμους σε περιοχές υψηλού κινδύνου (PEVOLCA, 2021). Πεντέμισι χιλιάδες άτομα απομακρύνθηκαν χωρίς τραυματισμούς και αρχές συνέστησαν στους κατοίκους να μείνουν τουλάχιστον 2 km μακριά από τις ατμίδες. Ενώ το αεροδρόμιο του Λα Πάλμα έκλεισε προσωρινά. Τα ζώα απομακρύνθηκαν και τα εκπαιδευτικά κέντρα έκλεισαν μαζί με τμήματα των αυτοκινητοδρόμων ενώ αργότερα την ίδια μέρα οι επιστήμονες μετρώντας μία περιοχή ροών λάβας προσδιόρισαν την ταχύτητα της σε 700μ/ώρα με θερμοκρασίες 1075°C. Την επόμενη ημέρα ο κύριος κώνος είχε σχηματιστεί. **Ο ρυθμός εκπομπής αερίων διοξειδίου του θείου ήταν 6 με 15.000 τόνοι για τις ημέρες 19-20 Σεπτέμβρη, ενώ δορυφορικά δεδομένα έδειξαν μία στήλη διοξειδίου του θείου να παρασύρεται 475 km νοτιοανατολικά φτάνοντας έτσι τις ακτές της Αφρικής.** Οι χάρτες που δημιουργήθηκαν από το ινστιτούτο γεωλογίας της Ισπανίας σε συνεργασία με δορυφορικό σύστημα Κοπέρνικος έδειξαν ότι το κύριο μέρος της ροής είχε διανύσει περισσότερο από 3 km δυτικά ενώ ένα άλλο τμήμα του εκτεινόταν ενάμιση χιλιόμετρο προς δυτικά νοτιοδυτικά (INVOLCAN & IGN, 2021). Η ροή αυτή είχε καλύψει περίπου 1 km² καταστρέφοντας 166 κτίρια. Αναφέρθηκε ότι κυρία δραστηριότητα προερχόταν από τέσσερις θύλακες με την τελευταία και 9^η άνοιξε στις 20 Σεπτεμβρίου σχεδόν 900μ από τον κύριο αγωγό. Την σειρά σιντριβάνια λάβας συνεχίστηκαν στις 2021 Σεπτεμβρίου με τη στάχτη να πέφτει κοντά στους στις κύριες

οπές. Τα νέφη τέφρας ανήλθαν στα 2,4 4,6 km (8-15.000') και εξετράπησαν περί τα 55 km νοτιοδυτικά σύμφωνα με το VAAC της Τουλούζης το οποίο εξέδωσε ASHTAM περίπου 90 λεπτά μετά την αρχική έκρηξη, τα νέφη αερίου διοξειδίου του θείου την ίδια ώρα έφτασαν τα 3 km ύψος παρασυρόμενα δυτικά και ανατολικά. Στις 19 Σεπτεμβρίου 2 πτήσεις της Binter Canarias με αεροσκάφη τύπου ATR72-600 εξετράπησαν στην Τενερίφη εξαιτίας της διαχείρισης εναέριας κυκλοφορίας της Ισπανίας που είχε εκδώσει ως προληπτικό μέτρο να μην γίνονται απογειώσεις από το αεροδρόμιο στο La Palma. Η επόμενη προγραμματισμένη πτήση για το νησί ήταν αυτή της βέλγικης TUIfly τύπου Boeing 737-400 προερχόμενη από το Amsterdam που ενώ είχε λάβει αρχικά διφορούμενες οδηγίες ως προ την προσγείωση τους στο νησί το πλήρωμα πήρε την απόφαση να προσγειωθεί στο A/Δ Santa Cruz παρά την προειδοποίηση της εναέριας διαχείρισης κυκλοφορίας αποτελώντας και την πρώτη πτήση μετά την έκρηξη που προσγειώθηκε στο νησί. Υστέρα από μια ώρα στο έδαφος του Santa Cruz απογειώθηκαν για το A/Δ της Τενερίφης όπου και συνέχισαν με προορισμό το Άμστερνταμ (Orban, 2021). Στις 21 Σεπτεμβρίου η νέα εικόνα από το ευρωπαϊκό δορυφορικό σύστημα Copernicus EMS έδειχνε 350 σπίτια να έχουν καλυφθεί από τη λάβα και την ροή αυτής να έχει επεκταθεί στο 1,54 km². Η εκτίμηση για τις εκρήξεις ήταν ότι 50 εκατομμύρια κυβικά μέτρα υλικού είχαν εκτοξευθεί από τις 21-27 Σεπτεμβρίου.



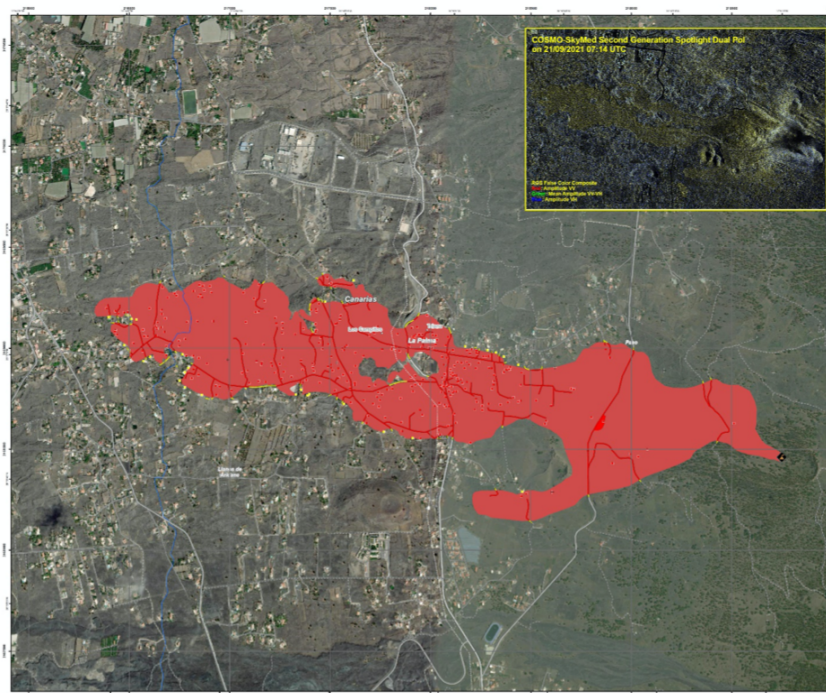
Εικόνα 29 Οι πληγείσες περιοχές 25 Σεπτεμβρίου 2021 (Πηγή Copernicus EMS, 2021)

6.4.2. 22 - 28 Σεπτεμβρίου

Η έκρηξη του ηφαιστείου στην νήσο Λα Πάλμα συνεχίστηκε από τις 21-28 Σεπτεμβρίου έως τις 5 Οκτωβρίου με χαρακτηριστικό τις στρομπολιανού τύπου εκρήξεις τα σιντριβάνια λάβας από πολλούς αγωγούς τις ροές λάβας και καθημερινές εκπομπές τέφρας προς την ατμόσφαιρα. Η σεισμικότητα μικρού εστιακού βάθους στα 10 ως 15 km συνεχίστηκε στην ίδια περιοχή όπου είχε ξεκινήσει την 11^η Σεπτεμβρίου ενώ γινόταν ιδιαίτερα αντιληπτή από τους κατοίκους της περιοχής. Μια αύξηση εύρους του τρέμουλου στην περιοχή την έπεσε με την εντατικοποίηση της στρομπολιανής δραστηριότητας (IGN, 2021). Στις 22 Σεπτεμβρίου

η έντονη εκρηκτική δραστηριότητα συνεχίστηκε και τα σύννεφα τέφρας έφτασαν από 3,4 ως 6 km. (10000-15000') στην ατμόσφαιρα. Η εναπόθεση τέφρας στις προσήνεμες περιοχές έφταναν τα τρία εκατοστά πάχος σε μία περιοχή 1 km από τους κύριους αεραγωγούς του ηφαιστείου. Η κύρια ροή της λάβας κινούταν δυτικά προς την ακτή. Με τις εκπομπές τέφρας να αυξάνονται στις 23 Σεπτεμβρίου έως και τα 5 km (16400') προκαλώντας μερικές καθυστερήσεις στην εναέρια σύνδεση μεταξύ Λα Πάλμα Γκραν Κανάρια και Τενερίφης, ενώ η μέχρι τώρα η δραστηριότητα του ηφαιστείου δεν έχει κλείσει τον εναέριο χώρο, αλλά το πρωτόκολλο παρακολούθησης έχει ενεργοποιηθεί εξαιτίας του ρίσκου για τις πτήσεις. Η αεροπορική εταιρία Binter παρόλα αυτά συνέχισε τις επιχειρήσεις κανονικά και απορρόφησε τις αρχικές καθυστερήσεις κατά τη διάρκεια (Orban, 2021). Μια σειρά από ισχυρές εκρήξεις ξεκίνησε στις 17:20 με τα ωστικά κύματα να διαδίδονται στην ατμόσφαιρα και να παρατηρούνται μέσα από τις εκπομπές αερίων του ηφαιστείου (Stavros Meletlidis et al., 2021).

Το τρέμουλο του ηφαιστείου κορυφώθηκε στις 15:00 στις 24 Σεπτεμβρίου καταγράφοντας τις υψηλότερες έως τώρα τιμές από την έναρξη της έκρηξης. Η κορύφωση συνέβη ακριβώς πριν δημιουργηθούν δυο νέοι αεραγωγοί στο πλάι του κυρίως κώνου και η δραστηριότητα αυτή μειώθηκε αμέσως μετά. Σύμφωνα με τοπικά ρεπορτάζ ειδήσεων οι εκρήξεις τέφρας εκτοξεύτηκαν και έξω από τη ζώνη αποκλεισμού. Δόθηκε εντολή εκκένωσης για τα χωριά Tajuya, Tacande de Abajo, και ένα μέρος του Tacande de Arriba επηρεάζοντας 300 με 400 άτομα. Τρεις αεροπορικές εταιρείες καθώς και η εταιρία Iberia ανέστειλαν τις πτήσεις προς Λα Πάλμα. Ενώ η αεροπορική εταιρία Binter Canarias με ανακοίνωση που εξέδωσε το απόγευμα της 24^{ης} Σεπτεμβρίου αποφάσισε να ακυρώσει όλες τις πτήσεις προς τη νήσο Λα Παλμα καθώς επίσης και προς το γειτονικό νησί La Gomera εξηγώντας στην ανακοίνωση αυτή πως η απόφαση αυτή λήφθηκε λόγω ανωτέρας βίας και θα οδηγήσει σε προσαρμογή των επιχειρήσεων αναλόγως των αλλαγών μετεωρολογικής κατάστασης ώστε να εξασφαλισθεί ότι οι πτήσεις θα διεξαχθούν με ασφάλεια (Canaria7, 2021). Η ροή της λάβας είχε εξαπλωθεί στα 1,9 km² καταστρέφοντας 420 κτίρια και καλύπτοντας 15,2 km δρόμων.



Εικόνα 30 Ροή λάβας 22 Σεπτεμβρίου (Πηγή Copernicus EMS,,2021)

Στις 25 Σεπτεμβρίου το εύρος του ηφαιστειακού τρέμουλου μειώθηκε μαζί με την ένταση των στρομπολιάνων εκρήξεων. Στις 25 και 26 Σεπτεμβρίου έπεσε τέφρα στους κοντινούς δήμους μέχρι την ανατολική ακτή του νησιού ενώ στις 26 Σεπτεμβρίου η διευθύνουσα επιτροπή συνέστησε να επιστρέψουν οι κάτοικοι που είχαν απομακρυνθεί δυο μέρες νωρίτερα.

Το αεροδρόμιο βρίσκεται στην ανατολική πλευρά του νησιού περί τα 10 km από το ηφαίστειο και η εκπομπή τέφρας οδήγησε στο κλείσιμο του αεροδρομίου στις 25 Σεπτεμβρίου εξαιτίας της εκπομπής τέφρας και της εναπόθεσης σε αυτό.



Εικόνα 31 Η έκρηξη όπως φαίνεται από το αεροδρόμιο του νησιού.(Πηγή Μανουσάκη, 2021)

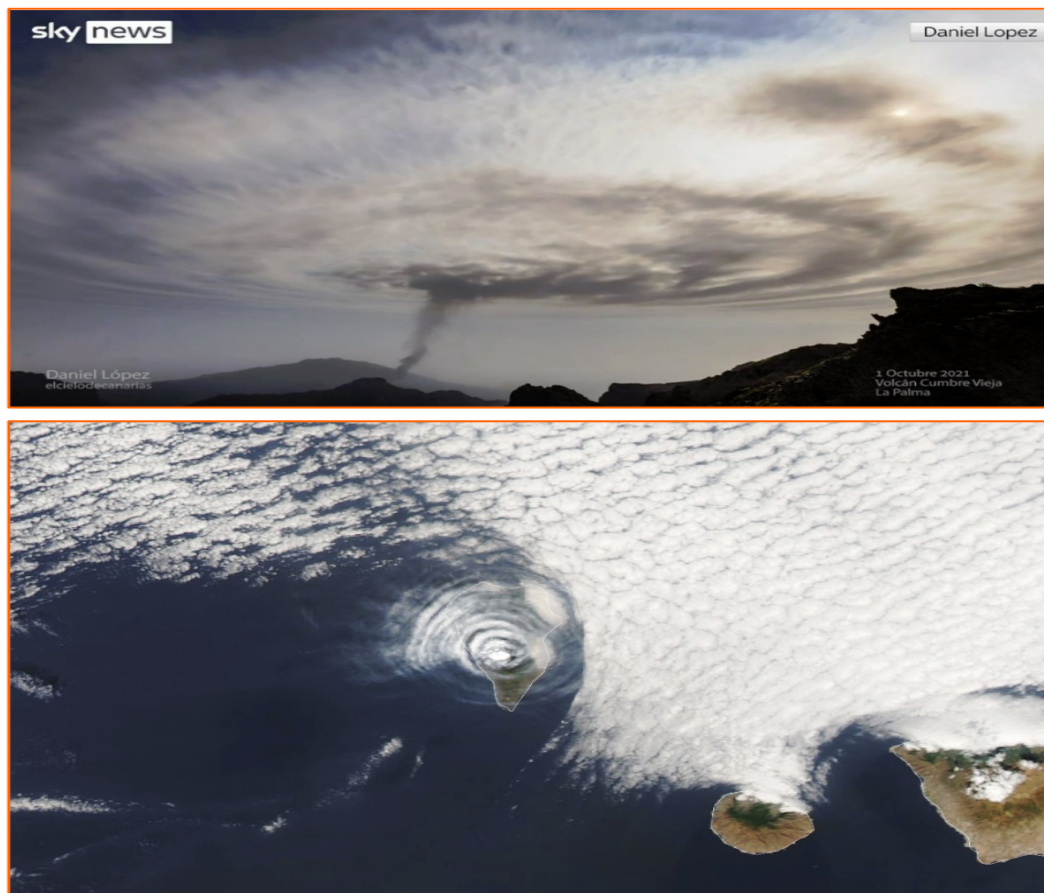
Οι διαδικασίες καθαρισμού ξεκίνησαν αμέσως από τις υπηρεσίες του αεροδρομίου μετά την εναπόθεση τέφρας σε αυτό (INVOLCAN, 2021). Το Α/Δ επαναλειτουργεί μετά από 24 ώρες κλεισίματος στις 26 Σεπτεμβρίου με την εταιρία Binter να συνεχίζει την αναστολή των πτήσεων της εξαιτίας του νέφους της τέφρας, ανακοινώνοντας στα μέσα κοινωνικής δικτύωσης ότι βρίσκεται σε διαρκή επικοινωνία με τις αεροναυτιλιακές αρχές ώστε να εξασφαλίσει ότι πληρούνται όλες οι προϋποθέσεις ασφαλείας για την συνέχιση της φυσιολογική ροή των επιχειρήσεων.



Εικόνα 32 Φωτογραφία από την ανακοίνωση της αεροπορικής εταιρίας Binter για αναστολή πτήσεων εξαιτίας της τέφρας στο Λα Παλμα (Πηγή twitter Binter, 2021)

Στην έκθεση αναφέρονται δύο κύριες εξαιρετικά ρευστές ροές λάβας βόρεια και νότια μήκους 2,5km. Οι εκπομπές διοξειδίου του θείου παρέμειναν αρκετά υψηλές με μέσο ρυθμό 25.000 τόνους ανά ημέρα ενώ τα νέφη της τέφρας έφτασαν έως και τα 3 km. Στις 1900 η λάβα συνέχισε να ρέει μέσα από το από το Tодоque ακριβώς στα δυτικά τμήματα της πόλης η ροή της ήταν 600 m σε πλάτος στο ευρύτερο τμήμα ενώ η πρόσθια άκρη της είχε ύψος 4 με 6 m. Η εκτίμηση από το Κοπέρνικος ήταν ότι η λάβα κάλυψε 2,37km² έχοντας καταστρέψει 513 σπίτια ενώ κάλυψε 18,9km δρόμων. Στις 27 Σεπτεμβρίου πολλαπλά σιντριβάνια λάβας ήταν ορατά και για μια περίοδο 8 ωρών η δραστηριότητα είχε μειωθεί ενώ το βράδυ η δραστηριότητα είχε ξαναρχίσει με ορατές εκρήξεις στρομπολιανού τύπου. Στις 02:45 στις 28 Σεπτεμβρίου αυτά τα σιντριβάνια λάβας τροφοδοτούσαν μια νέα ροή υψηλής θερμοκρασίας η οποία κατέβαινε γοργά πάνω από τις υπάρχουσες ροές καλύπτοντας τα θερμοκήπια μπανάνας και καίγοντας το πλαστικό και προκαλώντας εκρήξεις εξαιτίας της μίξης με μια αποθήκη λιπασμάτων δημιουργώντας ένα καφέ δύσοσμο σύννεφο. Ακόμη 140 κατασκευές καλύφθηκαν από την ροή αυτή. Στην προετοιμασία τους για την συνάντηση αυτής της ροής με τη θάλασσα οι αρχές προειδοποίησαν τους κατοίκους σε ακτίνα 5km να παραμείνουν μέσα στα σπίτια τους με κλειστά παράθυρα μακριά από αυτά και να καλύψουν τα πρόσωπα και το δέρμα τους σε περίπτωση πτώσης τέφρας. **Πυκνά νέφη τέφρας συνέχισαν να ανέρχονται έως και τα 5km ενώ σε αυτά τα ανερχόμενα νέφη τέφρας δημιουργήθηκαν κυματισμοί λόγω βαρύτητας.** Αργότερα την ίδια ημέρα η λάβα έφτασε στην παράκτια περιοχή κατέβηκε

από έναν βράχο ύψους 100μ και μέχρι τις 23:02 είχε εισέλθει στον ωκεανό ,ενώ με την είσοδο της δημιουργήθηκε ένα νέφος αερίων και ατμού και μέσα σε 45 λεπτά η λάβα δημιούργησε ένα δέλτα ύψους 50 μέτρων.



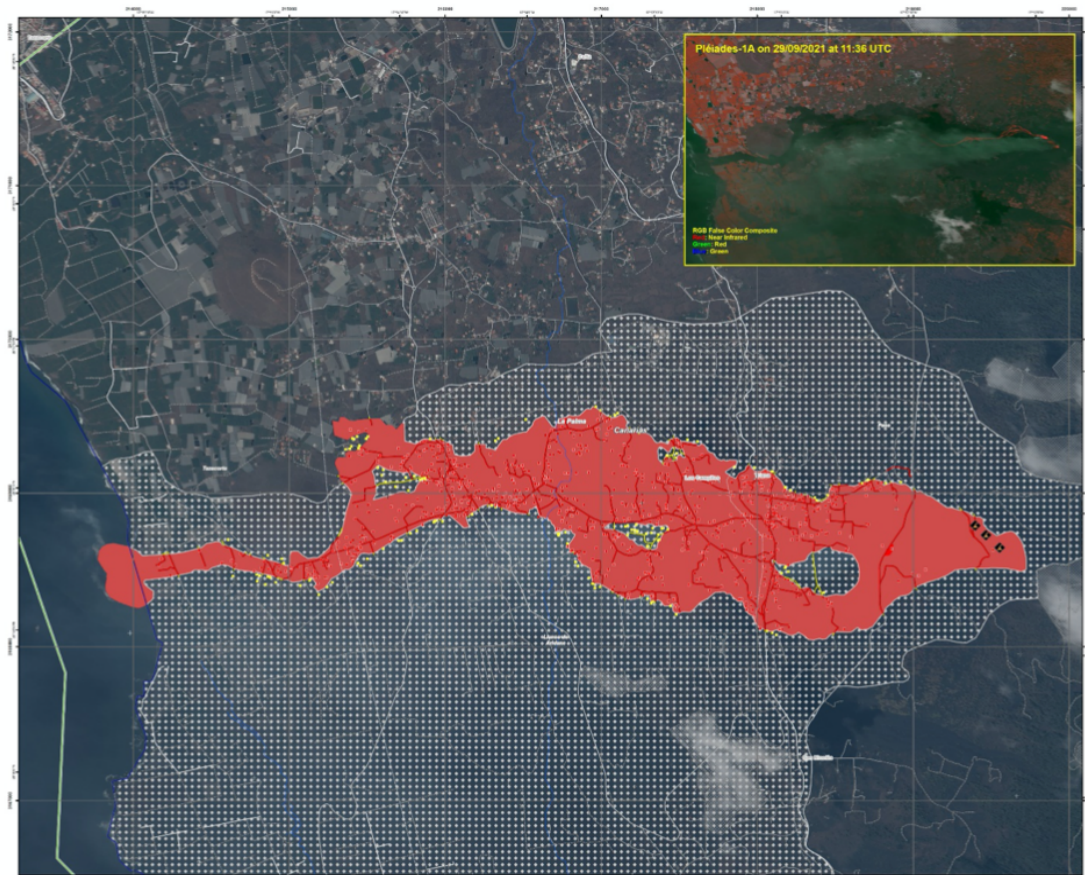
Εικόνα 33 Βαρυτικά κύματα σχηματιζόμενα στα νέφη στην ατμόσφαιρα (Πηγή Daniel Lopez, 2021)

6.4.3. 29 Σεπτεμβρίου - 5 Οκτωβρίου

Οι εκρήξεις στο Λα Πάλμα συνεχίστηκαν και στο διάστημα 29 Σεπτεμβρίου έως 5 Οκτωβρίου με τις χαρακτηριστικές εκρήξεις στρομπολιανού τύπου. Οι εκπομπές διοξειδίου του θείου έφθασαν τους 16760 τόνους την ημέρα. Ενώ η διοίκηση της επιτροπής παρότι η ζώνη αποκλεισμού των 2,5km από τους πίδακες παρέμενε σε ισχύ επέτρεψε στους κάτοικους περιοδικά να πλησιάσουν για να συλλέξουν αντικείμενα και να φροντίσουν ζώα και καλλιέργειες.

Η λάβα κάλυψε σχεδόν 4,8km² καταστρέφοντας 744 κτίρια. Ενώ 185 άτομα που είχαν απομακρυνθεί από τις κατοικίες τους φιλοξενήθηκαν σε τοπικό ξενοδοχείο. Τα νέφη της τέφρας συνέχισαν να ανέρχονται από τους ενεργούς αεραγωγούς ενώ το γεωλογικό ινστιτούτο παρατήρησε μία μείωση στο μέγιστο ύψος του νέφους στις 29 Σεπτεμβρίου στα 3,5km (11500') που όμως ακολουθήθηκε από μία αύξηση στα 5km (16400') την επόμενη μέρα. Ενώ οι ροές λάβας συνέχισαν από την ίδια διαδρομή να φθάνουν στο ωκεανό, το δέλτα της λάβας είχε τριπλασιαστεί σε μέγεθος έως τις 30 Σεπτεμβρίου ενώ έφθανε τώρα τα 0,17 km² ενώ το πιο απομακρυσμένο άκρο ήταν 450μ από την ακτή με πάχος 24μ.

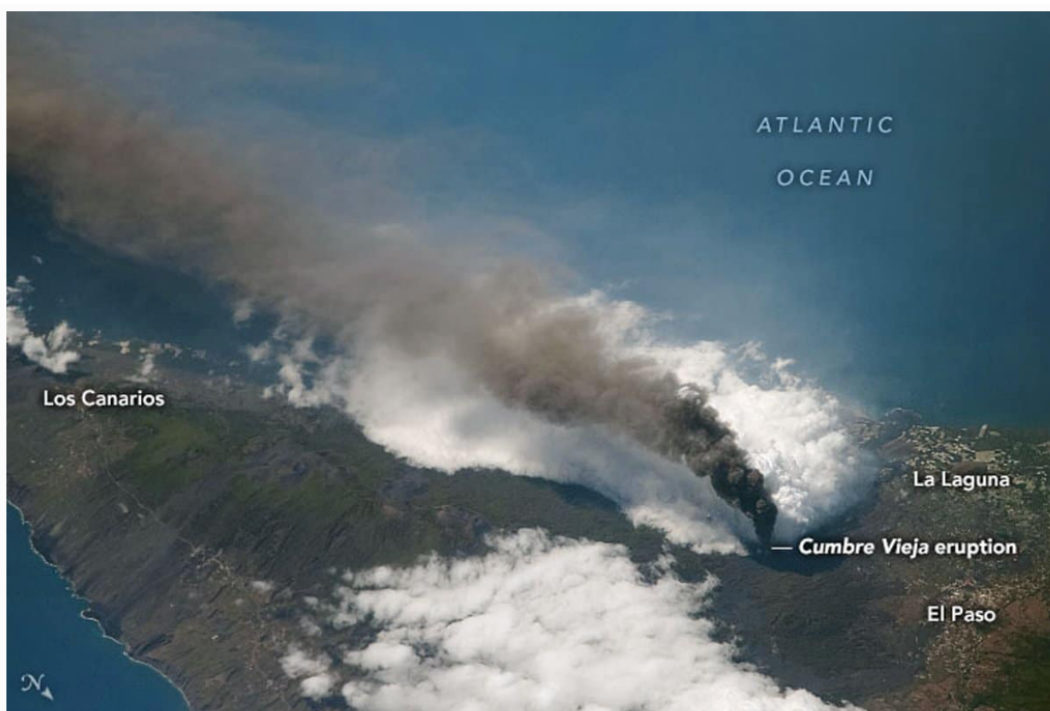
Η επιτροπή ήρε τον περιορισμό σε σχεδόν 4000 κατοίκους των περιοχών Tazacorte, San Borondón, Marina Alta, Marina Baja, and La Condesa που είχαν προηγουμένως προειδοποιηθεί να μείνουν μέσα για να αποφύγουν τυχών επαφή με δηλητηριώδη αέρια. Καθώς επίσης αναιρέθηκαν και οι περιορισμοί που είχαν εκδοθεί σε υπόλοιπους κάτοικοι που έμεναν κοντά στα όρια των ρών λάβας.



Εικόνα 34 Ροή λάβας 30 Σεπτεμβρίου (Πηγή Κοπέρνικος, 2021)

Την 1η Οκτωβρίου δημιουργήθηκαν δυο νέοι θύλακες περίπου 600 m βορειοδυτικά του κυρίου κώνου και μέσα σε δύο μέρες είχαν σχηματίσει μικρούς κώνους. Η λάβα από αυτούς τους νέους κώνους κατευθύνθηκε δυτικά συναντώντας την κυρία ροή που προϋπήρχε στην πλαγιά. Το δέλτα της λάβας είχε επεκταθεί στα 540 m από την ακτογραμμή και τα νέφη της τέφρας έφτασαν τα 3 με 5km ύψος όπου συνέχισαν να παρασύρονται με κατεύθυνση νότια. Στις 2 Οκτωβρίου εκπομπές διοξειδίου του θείου ήταν 3401 τόνοι την ημέρα. Μέχρι τις 3 Οκτωβρίου, υπολογίζεται ότι 946 σπύτια είχαν κατεδαφιστεί ολοσχερώς ενώ 128 είχαν υποστεί μερικοί ζημιά. Το μέγιστο πλάτος της ζώης ήταν 1250m και μπορούσε να φανεί από δορυφόρο. Το δέλτα της λάβας είχε αναπτύξει τέσσερις λόγους όπου τροφοδοτούνταν από πολλαπλές ροές και η έκταση του έφτασε τα 0,32km². Το απόγευμα της ίδιας ημέρας η συχνότητα και η ένταση των εκρήξεων αυξήθηκε και ηφαιστειακές βόμβες εκτοξεύονταν σε ύψος 800m. Το σιντριβάνι της λάβας έφτανε εκατοντάδες μέτρα σε ύψος ενώ η τέφρα έφτανε τα 4,5km (14800') και οι εκπομπές διοξειδίου του θείου είχαν ανέρθει σε 16.000 τόνους την

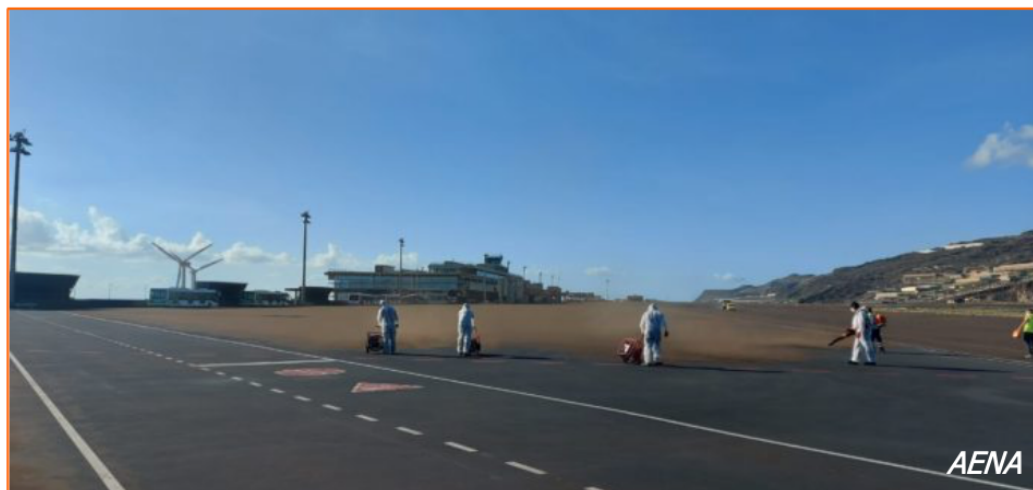
ημέρα. Στις 5 Οκτωβρίου το επίπεδο συναγερμού παρέμενε στο κόκκινο για τις πληγείσες περιοχές (PEVOLCA, 2021).



Εικόνα 35 Φωτογραφία από τον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό 4 Οκτωβρίου (πηγή NASA, 2021)

6.4.4. 6-12 Οκτωβρίου

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα συνεχίζεται με στρομπολιανού τύπου εκρήξεις σιντριβάνια λάβας και καθημερινές εκπομπές τέφρας. Η σεισμικότητα συνεχίζεται σε μικρό εστιακό βάθος σεισμούς και τους σεισμούς να γίνονται αισθητοί από τους κατοίκους άλλοτε συγκεκριμένων περιοχών και άλλοτε ολόκληρου του νησιού. Ο μεγαλύτερος σεισμός στις 8:15 στις 12 Οκτωβρίου ήταν $M=4,1$ σε βάθος 37km. **Εκπομπές διοξειδίου του θείου κυμαίνονταν σε υψηλά επίπεδα μεταξύ 4522 και 21868 τόνων ανά ημέρα. Το διοξείδιο του θείου παρασύρεται σε διάφορες κατευθύνσεις στις 8 Οκτωβρίου φτάνει στην Καραϊβική και στις 12 Οκτωβρίου παρατηρήθηκαν νέφη στην βόρειο Αφρική Ισπανία και Πορτογαλία.** Ο κύριος κώνος είχε τουλάχιστον τρεις ενεργές οπές κι άλλη μία στα βόρεια. Ενώ αρκετές καταρρεύσεις οδήγησαν σε αυξημένη ροή λάβας στις πλαγιές. Στις 6 Οκτωβρίου ένα ξέσπασμα λάβας από τα δυτικά ταξίδεψε νότια μεταξύ Los Guirres και El Charco τα οποία είχαν ήδη εκκενωθεί καταστρέφοντας καλλιέργειες και κτίρια. Την κάλυψε περίπου 0,4 km² και έφτασε τρακόσια 350m από την ακτή. Ενώ σύννεφα τέφρας έφτασαν 3 με 3,2 km(10000-15000'). **Η συγκέντρωση τέφρας τόσο στο αεροδρόμιο Λα Πάλμα όσο και της Τενερίφης προκάλεσε προσωρινή παύση επιχειρήσεων στις 7 Οκτωβρίου έως ότου απομακρυνθεί.** Επιπλέον οι εθνικές και οι διεθνής αερομεταφορείς ανακοίνωσαν την παύση των επιχειρήσεων από το νησί εξαιτίας της συγκέντρωσης τέφρας σε αυτό οδηγώντας τους τουρίστες σε ταλαιπωρία καθώς η μόνη διέξοδος ήταν μέσω ακτοπλοϊκής σύνδεσης (Stavros Meletlidis et al., 2021).



Εικόνα 36 Διαδικασίες απομάκρυνσης τέφρας από το αεροδρόμιο Λα Πάλμα (Πηγή ΑΕΝΑ, 2021)

Στις 9 Οκτωβρίου Η κατάρρευση του βόρειου τμήματος του κώνου δημιούργησε μία νέα ροή αρκετό λόγων μεταφέροντας μεγάλες πέτρες από βορειοδυτικά στα τμήματα που είχε δημιουργηθεί ήδη τρώει καλύπτοντας καλλιέργειες και καταστρέφοντας κτίρια στην Todoque και στην βιομηχανική περιοχή. **Ενώ σύννεφα τέφρας συνέχιζαν να βγαίνουν από το ηφαίστειο ήταν ορατές και αστραπές καθ'όλη τη διάρκεια του φαινομένου.**

Έως τις 10 Οκτωβρίου η ροή της λάβας είχε πλέον 1520m πλάτος και κάλυπτε έκταση 4,9 έως 5,7 km². Μεταξύ 726 και 1323 κτίρια είχαν καλυφθεί από λάβα περίπου 6000 άνθρωποι είχαν εκκενώσει τις περιοχές. Πυκνά μαύρα σύννεφα τέφρας έβγαιναν συνεχώς από τους κυρίως αγωγούς. Στις 12 Οκτωβρίου η προώθηση της Βόρειας ζωής ανάγκασε σε προληπτική εκκένωση την περιοχή La Lagune εκτοπίζοντας άλλα 700-800 άτομα. Το lockdown των περιοχών El Paso και Los Lanos σταμάτησε να ισχύει μετά από μετρήσεις για την ποιότητα του αέρα. **Τα σύννεφα τέφρας από τον κύριο αγωγό έφταναν τα 3,5km και ο συναγερμός παρέμενε κόκκινος (PEVOLCA, 2021).**

6.4.5. 13-26 Οκτωβρίου

Ο κύριος αρωγός συνέχιζε να βάλει λάβα και να παραγίνεται φράση που έφταναν έως τα 5 km, ενώ ξανά ενεργοποιήθηκε μία σπή που βρισκόταν τρακόσια μέτρα νοτιοανατολικά του κυρίου κώνου στις 15 Οκτωβρίου. Αυτή η επανενεργοποίηση έγινε ταυτόχρονα με μία αύξηση της φρεατομαγματικής δραστηριότητας στον κύριο αγωγό. Οι εκπομπές διοξειδίου του θείου πάρε με να σε υψηλά επίπεδα μεταξύ 2882 και 2000 τόνοι ημερησίως. **Τα νέφη αυτά εξαπλώθηκαν σε πολλές κατευθύνσεις παρασυρόμενα βορειοδυτικά μέσω της Ισπανίας επηρεάζοντας Γαλλία και Γερμανία στις 19 Οκτωβρίου.**

Η ροή της λάβας χαρακτηριζόταν από τρεις κύριες περιοχές την αρχική ροή που ταξίδευε δυτικά γύρω από το νότιο τμήμα της Montaña de Todoque προς τη θάλασσα και δημιούργησε ένα δέλτα λάβας, μια δεύτερη ροή που είχε διακλαδωθεί από την κυρία ροή προς τα νότια καθώς και τις ροές που ταξίδευαν δυτικά κατά μήκος των βορείων ορίων της κυρίας ροής. Η ροή της λάβας έφτασε στην Montaña de La Laguna ταξίδευε γύρω από το νότιο τμήμα και συνέχισε δυτικά προς τη θάλασσα. Ως τις 19 Οκτωβρίου είχε φτάσει στα 100

με 110 m από την ακτογραμμή. Η κύρια και η νότια ροή λάβας τροφοδοτούνταν ελάχιστα. Ακόμη συνέβησαν μερικές κατακρημνίσεις σε μέρη με πυκνή απόθεση τέφρας κοντά στη χαράδρα Tamanca δημιουργώντας μικρά σύννεφα τέφρας. Μια μικρή ηρεμία κατά τις 22 με 23 Οκτωβρίου επέτρεψε σε μερικούς ιδιοκτήτες να ανακτήσουν αντικείμενα από τις κατοικίες τους. Η λάβα προχώρησε σε μερικές περιοχές που μέχρι τώρα δεν είχαν επηρεαστεί συγκεκριμένα στην Alcala καλύπτοντας μία έκταση 8,79 km² έως τις 26 Οκτωβρίου. Η λάβα στο Δ είχε φτάσει τα 120 m βάθος ενώ κομμάτια βράχων παρατηρήθηκαν σε βάθος και 360 m. Το πάχος της λάβας το Δ ήταν 10 με 30 m και κάλυπτε μία έκταση 0,11 km² οι επιστήμονες παρατήρησαν μία έλλειψη υδρόβια ζωής γύρω από τις ροές της λάβας.

6.4.6. 27 Οκτωβρίου-9 Νοεμβρίου

Για μεγάλο χρονικό διάστημα στις 31 Οκτωβρίου οι εκρήξεις συνοδεύονταν από κρουστικά κύματα ενώ ταυτόχρονα αυξήθηκε ο αριθμός διάχυσης από την βορειοδυτική οπή ακολουθώντας σε πολλές περιπτώσεις νέα διαδρομή. Οι εκπομπές διοξειδίου του θείου κυμάνθηκαν σε υψηλά επίπεδα ενώ για πρώτη φορά την τελευταία βδομάδα του Οκτωβρίου παρουσίασαν πτωτική τάση. Η ροή της λάβας είχε προωθεί δυτικά κατά μήκος της νότιας πλευράς φτάνοντας στα 86 m από την ακτή του Tazacorte κοντά στην παραλία El Perdido. Η νότια ροή είχε προχωρήσει με πιο χαμηλό ρυθμό προς τη θάλασσα φτάνοντας σε απόσταση 400m από αυτήν. Ενώ η λάβα που ταξίδευε νοτιοδυτικά πάνω από παλαιότερες ροές υπερχείλισε το κανάλι διασπάστηκε και προχώρησε ενάμιση χιλιόμετρο δυτικά και νοτιοδυτικά σε νέο έδαφος κατά την διάρκεια 28 έως 30 Οκτωβρίου. Συνολικά η ροή διευρύνθηκε στα 3,1km με το μεγαλύτερο μέρος της να σημειώνεται στα νότια όρια καλύπτοντας 9,77 km² έως τις 2 Νοεμβρίου. **Ταυτόχρονα στις 2 Νοεμβρίου η αεροπορική εταιρία Binter ανακοίνωσε εκ νέου την διατήρηση της αναστολής πτήσεων εξαιτίας του νέφους τέφρας για την ίδια ημέρα επεκτείνοντας τον περιορισμό και στα νησιά La Gomera και Τενερίφη εξαιτίας της ανακοίνωσης του REVOLCA ότι το νέφος τέφρας ενδέχεται να επηρεάσει τον εναέριο χώρο των δυτικών νησιών εξαιτίας των ανέμων που επικρατούν για τις επόμενες 36 ώρες** (Canaria7, 2021). Οι καιρικές συνθήκες και μεγάλες ποσότητες τέφρας οδήγησαν σε προειδοποιήσεις για την ποιότητα του αέρα από τις αρχές στις περιοχές Los Llanos de Aridane, Tazacorte, El Paso, Puntagorda, and Tijarafe προτρέποντας τους κατοίκους τους να παραμείνουν σε εσωτερικούς χώρους. Ο χαρακτηρισμός της ποιότητας του αέρα είχε χαρακτηριστεί εξαιρετικά δυσμενής και αναβαθμίστηκε σε δυσμενής στις 9 Νοεμβρίου. Οι εκπομπές διοξειδίου του θείου συνέχισαν την πτωτική τους τάση το πρώτο δεκαήμερο του Νοεμβρίου αλλά διατηρούταν ακόμη σε υψηλά επίπεδα μεταξύ 9000 και 30.000 τόνων ημερησίως. Στις 5 Νοεμβρίου φωτογραφίες έδειξαν εναπόθεση θείου στην ανατολική πλευρά του κυρίου κώνου αλλά και σε άλλες περιοχές κοντά. Οι ροές αριθμήθηκαν από 1-11 με την ροή 11 να ξεκινάει στα τέλη Οκτωβρίου κατά μήκος του κεντρικού τμήματος του νότιου άκρου βόρεια της περιοχής Montana Cogote. Στις 3 Νοεμβρίου είχε φτάσει τα 100 m από τον δρόμο LP211 και στις 6 Νοεμβρίου ο ρυθμός της αυξήθηκε. Η ροή 2 που

βρισκόταν μεταξύ της κυρίας ροής 1 και της ροής 9 που προηγουμένως είχε διακλαδωθεί από την κυρία ροή προς τα νότια προχώρησε περαιτέρω στις 8 - 9 Νοεμβρίου φτάνοντας στο βράχο της παραλίας Los Guirres και εισήλθε στον ωκεανό. Έως τώρα οι ροές έχουν φτάσει τα 984 km² έως τις 8 Νοεμβρίου.

6.4.7. 10-30 Νοεμβρίου

Η δραστηριότητα αν και διέφερε σε ένταση μειώθηκε κατά τη διάρκεια της δεύτερης βδομάδας. Έως τις 10 Νοεμβρίου το υψηλότερο σημείο του κώνου ήταν στα 1130 m από το επίπεδο της θάλασσας. Η λάβα συνέχιζε να λείει δυτικά μέσα από τα προϋπάρχοντα κανάλια πάνω από παλιότερες βρες δημιουργώντας σε μερικές περιπτώσεις καινούργια κανάλια. Η πρώτη ροή 1 έφτασε ως τη θάλασσα ενώ η ροή νούμερο 9 είχε σταματήσει πριν φτάσει στην ακτή. Ηρώ ίδιο συνέχισε να προωθείται κατά τη διάρκεια της βδομάδας συμπληρώνοντας κενά μεταξύ των ροών 1 και 9 ενισχύοντας το Δ πλευρικά. Εξαιτίας της εμπύθυνας της λάβας στο νερό παρατηρήθηκε έως και 1km μέσα στη θάλασσα υψηλή θολότητα.



Εικόνα 37 Δημιουργία Fajanas στην παραλία Playa Nueva πριν και μετά. (Πηγή ABC news, 2021)

Το βράδυ της 18 Νοεμβρίου η λάβα υπερχείλισε έναν από τους κύριους κρατήρες αυξάνοντας το ρυθμό ροής της και γεμίζοντας αρκετά κενά μεταξύ των νοτίων ροών 4 και 7. Στις 21 Νοεμβρίου η ροή τέσσερα είχε συγχωνευθεί με την ροή επτά προχωρώντας δυτικά όπου στις 22 Νοεμβρίου 13:03 έφθασε στη θάλασσα δημιουργώντας λευκό έως σκούρο γκρι καπνό που ανησύχησε τις αρχές για την ποιότητα του αέρα και οδήγησε σε προειδοποιήσεις για 3000 άτομα των κοντινών περιοχών. Από τις 23 έως τις 25 Νοεμβρίου οι ροές 4,5,7 στο

βόρειο άκρο συνέχισαν να διευρύνονται και να τροφοδοτούν το βόρειο δέλτα. Στις 25 Νοεμβρίου ο ρυθμός εκροής λάβας αυξήθηκε στις κυρίες οπες του κρατήρα και δυο μικρές ρωγμές ανατολικά και δυτικά άνοιξαν σε απόσταση λιγότερο από 1km νότια του κυρίου κώνου. Ενώ η ανατολικότερη οπή παρήγαγε μια ταχέως κινούμενη ροή λάβας που ταξίδευε κατά μήκος του νοτίου άκρου της Montana Cogote προχωρώντας μέσω του νεκροταφείου Las Manchas και καλύπτοντας τα τμήματα ενός ηλιακού σταθμού παραγωγής ενέργειας.

Οι εκπομπές διοξειδίου του θείου μεταξύ 13-15 Νοεμβρίου κυμαίνονταν από πολύ χαμηλά επίπεδα 2000-4000 τόνους έως υψηλά 7000-13000 τόνους και οι εκπομπές τέφρας εντάθηκαν στις 14 Νοεμβρίου. **Στις 16 Νοεμβρίου η τέφρα παρασύρθηκε δυτικά νοτιοδυτικά και προκάλεσε ορισμένες διακοπές πτήσεων στο αεροδρόμιο Λα Πάλμα.** Στις 16-17 Νοεμβρίου οι υψηλές τιμές ηφαιστειακών αερίων οδήγησαν στην εκκένωση του προσωπικού εργοστασίων. Τα σύννεφα τέφρας έφθαναν από 2-3,7km (6600-12000') με το REVOLCA να δηλώνει στις 20 Νοεμβρίου ότι ο συνολικός όγκος της τέφρας είχε ξεπεράσει τα 10 εκατομμύρια m³. **Με την εναπόθεση τέφρας στους διάδρομους προσγείωσης και τις δυσμενείς συνθήκες πτήσεων που επικρατούσαν στο νησί εξαιτίας των εκπομπών τέφρας οι αρχές αποφάσισαν να διακόψουν οποιαδήποτε επιχείρηση στο αεροδρόμιο Λα Πάλμα για το διάστημα 20 έως τις 23 Νοεμβρίου .** Το διάστημα 25-26 Νοεμβρίου παρατηρήθηκαν έντονες βροχοπτώσεις προκαλώντας τις προειδοποιήσεις των αρχών στον πληθυσμό ώστε να μείνει μακριά από απότομες πλαγιές καθώς υπήρχε μεγάλος κίνδυνος για κατολισθήσεις όπως και η πιθανότητα για λαχάρ. **Από τις 24 έως τις 26 Νοεμβρίου τα νέφη της τέφρας συνέχισαν να εναποθέτουν τέφρα στο αεροδρόμιο Λα Πάλμα. Στις 27 Νοεμβρίου οι άνεμοι είχαν πλέον μετατοπιστεί και η τέφρα στο αεροδρόμιο έχει αφαιρεθεί επιτρέποντας να ανοίξει για πρώτη φορά από τις 20 Νοεμβρίου.**

6.4.8. 1-14 Δεκεμβρίου

Οι εκρήξεις συνεχίζονται κατά τη διάρκεια 1 έως 14 Δεκεμβρίου με ροές λάβας και καθημερινές εκπομπές τέφρας. Η σεισμικότητα παραμένει σε μεταβλητά αλλά υψηλά επίπεδα με τους σεισμούς σε εστιακό βάθος 10 ως 15 km και 30 με 45 km με την ένταση στα πιο μεγάλα μάθει να ξεκινά να μειώνεται από τις 3 Δεκεμβρίου και μετά ενώ από τις 8 Δεκεμβρίου υπάρχει περαιτέρω μείωση στα βάθη αυτά.

Η στρομπολιανού τύπου δραστηριότητα παρέμεινε έντονη από τις 1-3 Δεκεμβρίου και η λάβα συνέχισε να τροφοδοτεί την ροή οχτώ και το βόρειο δέλτα. Τα σιντριβάνια λάβας συνέχισαν να υψώνονται 400 με 500 m πάνω από την εξαγωγή του ηφαιστείου και ένας νέος πυροκλαστικός κώνος σχηματίστηκε γύρω από τον αγωγό τροφοδοσίας καθώς όμως ήταν ασταθής μερικές πλευρές του κατέρρευσαν συνεχίζοντας να τροφοδοτεί την ροή της λάβας. Η βόρεια ροή 12 ταξίδεψε σε νέα περιοχή του Fronton και στη συνέχεια ενώθηκε με την ροή οχτώ στην κατηφορική πλάγια. Οι ροές αυτές έφτασαν στον αυτοκινητόδρομο Tacande στις 3 Δεκεμβρίου μια νέα ρωγμή με προσανατολισμό βορρά νότο δημιουργήθηκε 100 m νοτιοανατολικά του κύριου αεραγωγού πιθανότατα εξαιτίας καθίζησης. Η ροή συνέχισε να

κινείται δυτικά αν και με μειωμένο ρυθμό καθώς κινούνταν σε νέο έδαφος μεταξύ των ροών 3 και 11. Αρκετές νέες οπές σχηματίστηκαν κατά μήκος μιας σχισμής με ανατολικό δυτικό προσανατολισμό που βρίσκεται δυτικά της Montaña del Cogote στις 4 Δεκεμβρίου παράγοντας ταχέως κινούμενες ροές λάβας ενώ η βορειανατολική οπή σταμάτησε να εκρήγνυται στις 4 Δεκεμβρίου. Η πορεία αυτών των νέων ροών ήταν νοτιοδυτική πέρασαν τους δήμους Tzacorte και Los Lanos de Aridane καταστρέφοντας 60 σπίτια. Η ροή αυτή ενώθηκε με την ροή 9 και έφθασε τον θαλάσσιο βράχο στην περιοχή Las Hoyas μέχρι τις 5 Δεκεμβρίου. **Ο ΒΑ αγωγός που είχε μειωμένη δραστηριότητα συνέχισε με σποραδικές εκπομπές τέφρας** και στρομπολιανού τύπου δραστηριότητα ενώ και οι οπές ΝΑ του κύριου κώνου είχαν επίσης σποραδική δραστηριότητα.



Εικόνα 38 Εκπομπή τέφρας 2 Δεκεμβρίου (Πηγή Λέκκας Ε., 2021)

Από τις 8-12 Δεκεμβρίου η ηφαιστειακή δραστηριότητα αρκετών οπών στο κεντρικό και ΝΑ τμήμα του κυρίου κώνου ήταν χαμηλή ενώ σημειώθηκαν μικρές κατολισθήσεις στην ανώτερη πλευρά του δευτερεύοντος κώνου εισερχόμενες εντός του κρατήρα. Η λάβα κινούταν δυτικά πάνω από τις παλαιότερες ροές με την πιο ενεργή ροή 9 όπου συνενώθηκε με την ροή 11 και συνέχισε την πορεία της προς την θάλασσα και διευρυνόταν στην περιοχή Las Hoyas. Κατά τη διάρκεια της 11^{ης} και 12^{ης} Δεκεμβρίου οι λοβοί από τα νότια όρια ταξίδεψαν σε μια νέα περιοχή αυτή της Las Norias. Ακόμη στις 12 Δεκεμβρίου αρκετοί ισχυροί παλμοί συνοδεύτηκαν από έντονη δραστηριότητα τύπου στρόμπουλι με τα πιο έντονα γεγονότα λαμβάνουν χώρα μεταξύ 12:00-17:30. Καθώς επίσης και μία υπερχείλιση λάβας από έναν από τους αεραγωγούς ταξίδεψε βόρεια πάνω από τις παλαιότερες ροές. Ενώ σημειώθηκε και έντονη πυροκλαστική δραστηριότητα με ηφαιστειακές βόμβες που έφθαναν έως και 500m μακριά από τον αεραγωγό. Ακόμη σημειώθηκε νέα κατάρρευση στον κύριο

κώνο αυξάνοντας το μέγεθος του κρατήρα και στον δευτερεύοντα κώνο. Στα νότια όρια η λάβα γέμισε ακάλυπτες περιοχές μεταξύ των ρωών 9 και 11 στις 13 Δεκεμβρίου τα επίπεδα των δονήσεων διακυμάνθηκαν και έγιναν κατά τόπους έντονα με μια περίοδο μεγάλης εκρηκτικής δραστηριότητας να σημειώνεται μεταξύ 17:45-19:00 όπου εκτοξεύτηκαν ηφαιστειακές βρώμες προς την βόρεια πλευρά ενώ υπήρξε και μεγάλη εξαγωγή τέφρας. Η δραστηριότητα στη συνέχεια μειώθηκε με τις εκπομπές αερίου να παραμένουν σε υψηλά επίπεδα στις 14 Δεκεμβρίου. Η λάβα συνέχισε την δυτική της κίνηση εξερχόμενη από τον κύριο κώνο αν και με μειωμένο ρυθμό.

Οι εκπομπές αερίων και τέφρας συνεχίζουν να επηρεάζουν τους κατοίκους με την αιωρούμενη τέφρα και τις υψηλές συγκεντρώσεις ηφαιστειακών να συνεχίζουν να απαιτούν την παρακολούθηση των ειδικών και να οδηγούν σε προειδοποιήσεις προς τους κατοίκους του δυτικού τμήματος του νησιού να παραμείνουν σε εσωτερικούς χώρους εξαιτίας της ποιότητας του αέρα.

Οι εκπομπές τέφρας από 1-7 Δεκεμβρίου έφθασαν τα 3,5km και παρασύρθηκαν Δ,ΝΔ και ΝΝΔ μακριά από το αεροδρόμιο. Οι καθημερινές μετρήσεις διοξειδίου του θείου παρέμειναν σε υψηλά επίπεδα με τιμές από 1000-30000 τόνους. Κατά τη διάρκεια 12-13 Δεκεμβρίου οι διάχυτες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ήταν γύρω στις 7 φορές μεγαλύτερες από το μέσο όρο τιμών επηρεάζοντας συγκεκριμένα την περιοχή La Bombilla όπου και παρατηρήθηκαν νεκρά πτηνά.



Εικόνα 39 Ηφαιστειακή ρωγμή δίπλα σε σπίτι καλυμμένο από τέφρα 1η Δεκεμβρίου. (Πηγή Aimilio Morenatti, 2021)

6.4.9. 15 - 20 Δεκεμβρίου

Οι παρατηρήσεις 15 Δεκεμβρίου δεν έδειξαν ύπαρξη ρωών λάβας στην δυτική μεριά του κυρίου κώνου ούτε και στο Δ της λάβας στην περιοχή Las Hoyas. Την περίοδο 15 ως 20 Δεκεμβρίου τα επίπεδα δονήσεων καθώς και τα επίπεδα σεισμικότητας ήταν πολύ χαμηλά σε όλα τα βάθη. Υπήρχαν σποραδικές εκπομπές αερίων τόσο από τους αεραγωγούς όσο και από την ψύξη της λάβας. Επίσης παρατηρήθηκαν μικρές κατολισθήσεις τοιχωμάτων των

κύριων και των δευτερευόντων κρατήρων που διήρκησαν ολόκληρη την εβδομάδα. Τα επίπεδα διοξειδίου του θείου κυμαίνονταν μεταξύ εξαιρετικά χαμηλών και μεσαίων τιμών και παρόλο που τα επίπεδα ποιότητας του αέρα είχαν βελτιωθεί αρκετά στο σύνολό τους υπήρχαν μετρήσεις που έδειχναν επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα έως και εννιά φορές πάνω από το μέσο όρο τις αρχές να προειδοποιούν το κοινό να είναι πολύ προσωπικό σε περιοχές κοντά στα παιδιά ροής λόγω των ηφαιστειακών αερίων και σημείωσαν ότι παρότι οι ροές λάβας ψύχονται παραμένουν ακόμη σε υψηλές θερμοκρασίες.

6.5. Η Ισπανία ανακοινώνει τη λήξη του φαινομένου

Μετά από 85 ημέρες και 8 ώρες δραστηριότητας του ηφαιστείου ο Ισπανός Πρωθυπουργός Pedro Sanchez ανακήρυξε τη λήξη του φαινομένου με τον απολογισμό της καταστροφής να φθάνει το 1 δις ,πάνω από 2900 δομές, σπίτια σχολεία εκκλησίες και κέντρα υγείας καταστράφηκαν μαζί με αρκετές φάρμες και θερμοκήπια χωρίς ευτυχώς ανθρώπινες απώλειες. Με τους επιστήμονες να συμπληρώνουν ότι θα χρειαστούν αρκετά χρόνια ώστε να καθαριστεί η γη από τη λάβα και να αφαιρεθεί ο μεγάλος όγκος τέφρας από τα κτίρια και τους δρόμους καθώς και πολλά κτίρια πρέπει να αξιολογηθούν για τυχόν δομικά προβλήματα λόγω σεισμικότητας και συσσώρευσης της τέφρας και της έκθεσης σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλο διάστημα (Meletlidis, 2021).

Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα (οδηγίες διαχείρισης κινδύνου)

Η μείωση της τρωτότητας των υποδομών και των αερομεταφορών απέναντι σε φυσικούς κινδύνους είναι μια σύνθετη διαδικασία που απαιτεί πολύπλοκη προσπάθεια και συνεργασία πολλών φορέων ιδρυμάτων και ειδικών ταυτόχρονα. Αυτή η μεταπτυχιακή εργασία ασχολήθηκε με την διαχείριση του κινδύνου απέναντι στην ηφαιστειακή απειλή καθώς και τα βήματα που έχουν γίνει μετά τις τελευταίες σύγχρονες εκρήξεις για την αντιμετώπιση αυτού του κινδύνου.

Η ανάλυση του κινδύνου που έχει λάβει χώρα μετά την έκρηξη του ηφαιστείου στην Ισλανδία σε σχέση με την διαχείριση της κατάστασης από τους αερομεταφορείς αποκαλύπτει ότι ο αναδυόμενος συστημικός κίνδυνος ανάγκασε τις ευρωπαϊκές αρχές να διαφοροποιήσουν την ρυθμιστική προσέγγιση από τις παγκόσμιες κατευθυντήριες γραμμές προς μια πολιτική ρυθμιζόμενης λειτουργίας σε εναέριο χώρο που έχει επιβαρυνθεί από την τέφρα με αποτέλεσμα τις εξής αλλαγές γεγονός το οποίο στην έκρηξη του Cumbre Vieja οδήγησε σε μειωμένες επιπτώσεις σε σχέση με την προηγούμενη μεγάλη ηφαιστειακή έκρηξη αυτήν της Ισλανδίας για την αεροπλοΐα. Οι αλλαγές που βοήθησαν προς αυτή την κατεύθυνση είναι οι εξής:

- **Αλλαγή των τιμών συγκέντρωσης τέφρας.** Ενώ άλλαξε και η τιμή που θεωρούμε πως μπορεί να λειτουργήσει ένας κινητήρας χωρίς κίνδυνο από 200 σε 2000μg/m³. Ως περιοχή μέτριου κινδύνου θεωρούνται οι τιμές 2000-4000μg/m³ και τα επίπεδα πάνω από 4000μg/m³ θεωρούνται ως υψηλή συγκέντρωση τέφρας.
- **Οπτικοποίηση προβλέψεων νέφους τέφρας.** Η VAAC του Λονδίνου πρόσθεσε τους χάρτες συγκέντρωσης ηφαιστειακής τέφρας στις δημοσιευμένες της εκδόσεις για να απεικονίσει περιοχές με προβλεπόμενη χαμηλή μέση και υψηλή συγκέντρωση τέφρας.
- **Λήψη αποφάσεων.** Η κύρια ρυθμιστική αλλαγή είναι η μετατόπιση της λήψης αποφάσεων από τις αρχές στους φορείς εκμετάλλευσης αεροσκαφών. Σύμφωνα με την νέα προσέγγιση SRA ο εναέριος χώρος παραμένει ανοιχτός για λειτουργία κατά τη διάρκεια ενός ηφαιστειακού γεγονότος. Οι φορείς πρέπει να υποβάλλουν SRA με στρατηγικές για την αντιμετώπιση διαφορετικών συγκεντρώσεων τέφρας και το SRA αυτό να εγκριθεί από την εθνική ρυθμιστική αρχή του φορέα επιτρέποντας έτσι να εκτελεστούν πτήσεις σε εναέριο χώρο μολυσμένων περιοχών ανάλογα με τα εγκεκριμένα κατώτατα όρια στο SRA. Τα περισσότερα ευρωπαϊκά κράτη έχουν αποδεχθεί πλήρως αυτή την προσέγγιση.
- **Σχεδιασμός έκτακτης ανάγκης.** Το 2011 ο ICAO θέσπισε τη VOLCEX μια μεγάλη άσκηση διαχείρισης κρίσης όπου τα ενδιαφερόμενα μέρη προβαίνουν σε σχέδια και διαδικασίες έκτακτης ανάγκης για την αντιμετώπιση της

διασποράς τέφρας. Ενώ πραγματοποιείται μια φορά το χρόνο με σενάρια εκρήξεων από την Ισλανδία τις Αζόρες και την Ιταλία. Ενώ η άσκηση VOLCICE γίνεται μηνιαίως μεταξύ των ισλανδικών ενδιαφερόμενων αερομεταφορέων και του VAAC του Λονδίνου για την αντιμετώπιση μια αρχικής έκρηξης.

- **Έρευνα για την ηφαιστειακή τέφρα.** Με βάση τις συστάσεις του IVATF η επιστημονική κοινότητα σημείωσε σημαντική πρόοδο στον εντοπισμό και την πρόβλεψη των νεφών τέφρας συμβάλλοντας έτσι στην βελτιωμένη ακρίβεια των VAAC.
- **Έρευνα για τους Jet κινητήρες.** Μετά το 2010 έγιναν περισσότερες έρευνες σε μεγαλύτερο βάθος σχετικά με την αντοχή των κινητήρων στην τέφρα με την NASA να δοκιμάζει έως το όριο ζωής τους κινητήρες (NASA, 2012) και την Rolls&Royce να καταλήγει ότι μια έκθεση σε τέφρα ενός κινητήρα κάτω από 14.4g s/m^3 ισοδυναμεί με 1 ώρα στα $4000\ \mu\text{g/m}^3$ αριθμοί που επιτρέπουν αρκετές πτήσεις ενώ παραμένουν οι κινητήρες εντός των ορίων χωρίς να απαιτούνται επιθεωρήσεις (Clarkson & Simpson, 2017)

Βιβλιογραφία

- Alexander. (2013). Volcanic Ash in the Atmosphere and Risks for Civil Aviation: A Study in European Crisis Management. *International Journal of Disaster Risk Science*, Vol. 4, No. 1, pp. 9–19.
- Beck, U. (1986). *Risk Society: Towards a New Modernity*. Sage, London.
- Blong R.J. (1984). *Volcanic Hazards A Sourcebook on the Effects of Eruptions*.
- BOEING. (2010). A Jet Aircraft Manufacturer's Perspective of Volcanic Ash. Keilir Conference on Eyjafjallajökull and Aviation, Reykjanesbaer, Iceland, September 15– 16.
<http://www.keilir.net/static/files/conferences/eyjaaviation/session5/douglas-j.-kihmslides-boeing.pdf>.
- Bolic, T., & Sivčev, Z. (2012). Air Traffic Management in Volcanic Ash Events in Europe: A Year After Eyjafjallajökull Eruption. Presented at The 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Boyne, W. J., & Lopez, D. S. (1979). *The Jet Age: Forty Years of Jet Aviation*. Smithsonian Institution Press, Washington, D.C.
- Brown, S. K., Loughlin, S. C., Sparks, R. S. J., & Vye-Brown, C. (2015). Global volcanic hazards and risk: Technical background paper for the Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2015. Global Volcano Model and IAVCEI.
- Burns, D. (2010). *Hydrovolcanism*.
- CAA UK. (2010). Volcanic Ash International Teleconferences, UK Civil Aviation Authority, 17–23 April.
- Camp, D. V. (2006). *How volcanoes work*.
- Canaria7. (2021). Siete vuelos cancelados y cuatro desviados por el viento.
<https://www.canarias7.es/canarias/siete-vuelos-cancelados-20220314201847-nt.html>
- Carracedo, J.C., Badiola, E.R., Guillou, H., Paterne, M., Scaillet, S., Torrado, F.J.P., Paris, R., Fra-Paleo, U., Hansen, A. (2007). Eruptive and structural history of Teide Volcano and rift zones of Tenerife, Canary Islands. *Geological Society of America Bulletin* 119,.
<https://doi.org/10.1130/B26087.1>
- Carracedo, J. C. (1994). The Canary Islands: An example of structural control on the growth of large oceanic-island volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.
[https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)90053-1](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)90053-1)
- Carracedo, J. C., Day, S. J., Guillou, H., & Perez Torrado, F. J. (n.d.). Giant Quaternary landslides in the evolution of La Palma and El Hierro, Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 94, 169–190. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(99\)00102-X](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(99)00102-X)
- Castellano, G. . (2011). Rising from the Ashes: A Governance Perspective on Emerging Systemic Risks. In *Governing Disasters. The Challenges of Emergency Risk Regulation*. Edward Elgar Publishing, Cheltenham.
- Chen, W. R., & Zhao, L. R. (2015). Review - Volcanic Ash and its Influence on Aircraft Engine Components. *Procedia Engineering*, 99, 795–803. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.604>
- Clarkson, R., & Simpson, H. (2017). Maximising Airspace Use During Volcanic Eruptions: Matching Engine Durability against Ash Cloud Occurrence. *Specialists' Meeting on Impact of Volcanic Ash Clouds on Military Operations*, Conference: NATO STO-MP-AVT-272-20, May.
- Crozier, A. (2020). Automated detection and measurement of volcanic cloud growth: towards a robust estimate of mass flux, mass loading and eruption duration.
<https://doi.org/https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-019-03847-2>
- Day, S. ., Carracebo, Guillou, H., & P, G. (1999). Recent structural evolution of the Cumbre Vieja

- volcano, La Palma, Canary Islands: volcanic rift zone reconfiguration as a precursor to volcano flank instability. 94(1–4), 135–167.
- EASA. (2010). Flight in Airspace with a Low Contamination of Volcanic Ash. European Aviation Safety Agency (EASA), Airworthiness Directive 2010-17R2. ad.easa.europa.eu/ad/2010-17R2. Accessed Feb, 2022.
- Fischer, R. (1979). Models for pyroclastic surges and pyroclastic flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 6(3–4), 305–318. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-0273\(79\)90008-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-0273(79)90008-8)
- Fitzgerald, R. H., Kennedy, B. M., Gomez, C., Wilson, T. M., Simons, B., Leonard, G. S., Matoza, R. S., Jolly, A. D., & Garaebiti, E. (2020). Volcanic ballistic projectile deposition from a continuously erupting volcano: Yasur Volcano, Vanuatu. 3(2), 183–283. <https://doi.org/https://doi.org/10.30909/vol.03.02.183204>
- Geo.auth. (1997.). Έκρηξη τύπου Πελέ.
- Geo.auth. (1997). Καλδέρρες.
- Geo.auth. (1997). 2.1. Τύποι ηφαιστείων. http://www.geo.auth.gr/765/2_landforms/21_volcano_types.htm#2
- Geronimo, K. (1994). Mode of Emplacement of Two Debris-avalanche Deposits at Banahao Volcano, Southern Luzon, Philippines. 39(3), 113–127. https://doi.org/https://doi.org/10.18940/kazan.39.3_113
- Gourgaud, A., Fichaut, M., & Joron, J. (1989). Magmatology of Mt. Pelée (Martinique, F.W.I.). I: Magma mixing and triggering of the 1902 and 1929 Pelean nuées ardentes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 38(1–2), 143–169.
- Guardian. (2014). Hikers killed by Japanese volcano left poignant pictures of final moments This article is more than 7 year.
- Guffanti, M., Casadevall, T. J., & Budding, K. E. (2010). Encounters of Aircraft with Volcanic Ash Clouds: A Compilation of Known Incidents, 1953-2009. US Department of Interior, US Geological Survey.
- Hansell, A., & Oppenheimer, C. (2010). Health Hazards from Volcanic Gases: A Systematic Literature Review. *Environmental Health*, 628–639. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/00039890409602947>
- Hobart M, K. (2007). Volcanic Explosivity Index (VEI). <https://geology.com/stories/13/volcanic-explosivity-index/>
- ICAO. (2007). Doc 9691 ICAO Volcanic Ash Radioactive Material.
- ICAO. (2012). Summary of the Accomplishments of the International Volcanic Ash Task Force. International Volcanic Ash Task Force (IVATF), International Civil Aviation Organization (ICAO).
- IGN. (2021). The IGN detects 18 earthquakes in the south of La Palma, four of them felt by the population of Fuencaliente.
- Institution, S. (2021). Report on La Palma (Spain) — 15 September-21 September 2021.
- INVOLCAN. (2021). Guayota La Palma.
- INVOLCAN, & IGN. (2021). Weekly Reports La Palma Eruption. <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=383010&vtab=Weekly>
- J.L., M., W.J, M., & D., P. (1999). Ground deformation monitoring of a potential landslide at La Palma, Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 94(1–4). [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(99\)00106-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0377-0273(99)00106-7)

- Jasanoff, S. (1993). Bridging the Two Cultures of Risk Analysis. *Risk Analysis*, Vol. 13, No. 2, pp. 123–129.
- Klinke, A., & Renn, O. (2002). A New Approach to Risk Evaluation and Management: Risk-Based, Precaution-Based and Discourse-Based Management. *Risk Analysis*, Vol. 22, No. 6, pp. 1071–1094.
- Kondo, J. (1988). Volcanic Eruptions, Cool Summers, and Famines in the Northeastern Part of Japan. *Journal of Climate*, 1(8).
- Lave, L. (1987). Health and Safety Risk Analysis: Information for Better Decisions, *Science*, Vol. 236, pp. 291–295.
- Lechner, P., Tupper, A., Guffanti, Loughlin, S., & Casadevall, T. (2017). Volcanic Ash and Aviation – The Challenges of Real-Time, Global Communication of a Natural Hazard. *Ob- Serving the Volcano World. Advances in Volcanology (An Official Book Series of the International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth’s Interior – IAVCEI, Barcelona, Spain).*
- Lockwood, J., & Hazlett, R. (2010). *Volcanoes: Global Perspectives*. In *Volcanoes: Global Perspectives*. Blackwell, Wiley.
- Loughlin, S., S, S., S, B., & S., J. (2015). Global volcanic hazards and risk. *Choice Reviews Online*, 53(08), 53-3521-53–3521. <https://doi.org/10.5860/choice.195298>
- Luhmann, N. (1994). *Risk: A Social Theory*. De Gruyter, New York.
- Manuhutu, F., & Gerhard, M. (2015). The European Aviation Safety Agency. The European Parliament. [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2015/565885/EPRS_ATA\(2015\)565885_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2015/565885/EPRS_ATA(2015)565885_EN.pdf)
- Mazzocchi, M., Hansstein, F., & Ragona, M. (2010). The 2010 Volcanic Ash Cloud and Its Financial Impact on the European Airline Industry. *CESifo Forum*, Vol. 11, No. 2, pp. 92–100.
- MBL. (2010). *Askan bætir uppskeruna*
https://www.mbl.is/frettir/innlent/2010/09/16/askan_baetir_uppskeruna
- Meletlidis, S. (2021). Stavros Meletlidis, volcanologist on La Palma: “We must try to recover the territory.” <https://then24.com/2022/01/04/stavros-meletlidis-volcanologist-on-la-palma-we-must-try-to-recover-the-territory/>
- Meletlidis, Stavros, Manousaki, M., Michailidis, A., Mavrouli, M., & Castro-melgar, I. (2021). The 2021 Cumbre Vieja volcano eruption in La Palma Cite as Contributors. 26.
- Miller, E. (1994). Volcanic Ash and Aircraft Operations. In T. J. Casadevall (Ed.), *Volcanic Ash and Aviation Safety: Proceedings of the First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety*, U.S. Geological Survey Bulletin, Vol. 2047, pp. 203–206.
- NASA. (2012). Vehicle Integrated Propulsion Research (VIPR). The 3rd Propulsion Control and Diagnostics Research Workshop, Cleveland, Ohio, February 28–March 1, 2012. http://www.grc.nasa.gov/WWW/cdtb/aboutus/workshop2012/Presentations/Session_2_Model-Based_Control_&_Diagnostics/MBCD_4_Simon.pdf.
- NASA. (2013). Vehicle Integrated Propulsion Research Tests. Propulsion Controls and Diagnostics Workshop, Cleveland, Ohio, December 11. <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20140012565.pdf>.
- NPS. (2017). Volcanic Explosivity Index (VEI). <https://www.nps.gov/subjects/volcanoes/volcanic-explosivity-index.htm>
- NPS. (2021a). Cinder Cones. <https://www.nps.gov/articles/000/cinder-cones.htm>
- NPS. (2021b). Plinian Eruptions.

- NRC. (1983). Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process. National Academy Press, Washington, D.C.
- OECD. (2003). Emerging Systemic Risk. Final Report to the OECD Futures Project. OECD, Paris.
- Orban, A. (2021). Some delays at La Palma Airport, but Binter Canarias returns to normal flights. Oregon/University. (2003.). Shield Volcanoes. <https://volcano.oregonstate.edu/shield-volcanoes-0>
- PEVOLCA. (2021). Most Recent Bulletin Report: October 2021 (BGVN 46:10).
- Prata, A., & Rose, W. (2015). Volcanic ash hazards to aviation. Cambridge University Press.
- Renn, O., Klinke, A., & Asselt, M. van. (2011). Coping with Complexity, Uncertainty and Ambiguity in Risk Governance: A Synthesis. *Ambio*, 40, 231–246.
- Renn, O., & Schweizer, P. J. (2009). Inclusive Risk Governance: Concepts and Application to Environmental Policy Making. *Environmental Policy and Governance*, 19,no3, 174–185.
- Riley, C. M. (1997). Lahars. Michigan University. <http://www.geo.mtu.edu/volcanoes/hazards/primer/lahar.html>
- Rolls-Royce. (2010). Eyjafjallajökull – The Impact Volcanic Ash Has on Jet Engines – Latest Understandings. Keilir Conference on Eyjafjallajökull and Aviation, Reykjanesbaer, Iceland, September 15–16, 2010.
- Rolls-Royce. (2013). The Impact Volcanic Ash Has on Jet Engines – Latest Understandings. 2nd IUGG-WMO Workshop on Ash Dispersal Forecast and Civil Aviation, November 18–20, 2013. http://www.unige.ch/sciences/terre/mineral/CERG/Workshop2/Program/05_Rory_CI_arkson_public.pdf.
- Rolls-Royce. (2017). Volcanic Ash and Aviation, Rolls-Royce Position, May 2017. https://www.wmo.int/aemp/sites/default/files/VA_Brief_Summary_Rolls_Royce.pdf
- Rubin, K. (2017). Types of Volcanoes. <https://openpress.usask.ca/physicalgeology/chapter/11-3-types-of-volcanoes/>
- Ruckelshaus, W. D. (1985). Risk, Science, and Democracy. 1(Issues in Science and Technology), 19–38.
- Sammonds, P., McSammonds, P., McGuire, W., & Edwards, S. (Eds. . (2010). Volcanic Hazard from Iceland: Analysis and Implications of the Eyjafjallajökull Eruption. UCL Institute for Risk and Disaster Reduction, London.
- Sanderson, K. (2010). Questions Fly over Ash-Cloud Models. *Nature*, Vol. 464, No. 1253. doi:10.1038/4641253a.
- Scarth, A. (2002). Magmatology of Mt. Pelée (Martinique, F.W.I.). I: Magma mixing and triggering of the 1902 and 1929 Pelean nuées ardentes.
- Scott, K. M., Vallance, J. W., Kerle, N., Macias, J. L., Strauch, W., & Devoli, G. (2005). Catastrophic precipitation-triggered lahar at Casita volcano, Nicaragua: Occurrence, bulking and transformation. 30(1), 59–79. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/esp.1127>
- Seropian, G., Kennedy, B. M., Walter, T. R., Ichihara, M., & Jolly, A. D. (2021). A review framework of how earthquakes trigger volcanic eruptions. *Nature Communications*, 12(1), 1004. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21166-8>
- Shimizu, Y., Dobashi, K., Hisada, T., Ono, A., M, T., Iijima, H., Utsugi, M., & Kakegawa, S. (2007). Acute impact of volcanic ash on asthma symptoms and treatment. 9–14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/03946320070200s203>
- Siebert, L., & Simkin. (2000). Volcanoes of the World.

- Smith, W. C. (1983). High-Altitude Conk Out. *Natural History*, 92(11), 26–34.
- Stefánsson, A., Stefánsdóttir, G., Keller, N. S., Barsotti, S., Sigurdsson, Á., Thorlákssdóttir, S. B., Pfeffer, M. A., Eiríksdóttir, E. S., Jónasdóttir, E. B., von Löwis, S., & Gíslason, S. R. (2017). Major impact of volcanic gases on the chemical composition of precipitation in Iceland during the 2014-2015 holuhraun eruption. *Journal of Geophysical Research*, 122(3), 1971–1982. <https://doi.org/10.1002/2015jd024093>
- Stewart, S. (1999). *Emergency: Crisis on the Flight Deck*. Crowood Press, UK.
- Sveinbjörnsson, M., Pálsson, A., Arnarson, B., & Hauksdóttir, A. S. (2002). Short Term Effects of a Volcanic Eruption in Iceland on Air Traffic and Air Traffic Control. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, August 5–8, Monterey, CA.
- Tazieff, & Sabroux. (1983). *Forecasting Volcanic Events*.
- Tootell, B. (1985). *All 4 Engines Have Failed: The True and Triumphant Story of Flight BA009 and the Jakarta Incident*. Hutchinson Group, Ltd., Auckland.
- UK Met Office, 2014a. (2014). *The London VAAC Process*. <https://www.metoffice.gov.uk/aviation/vaac/process>.
- USGS. (2011). *Principal Types of Volcanoes*. <https://pubs.usgs.gov/gip/volc/types.html>
- Voight, B. (1990). The 1985 Nevado del Ruiz volcano catastrophe: anatomy and retrospection. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 42(1–2), 151–188. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90075-Q](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90075-Q)
- Von Moltke, K. (1983). The Vorsorgeprinzip in West German Environmental Policy. In *Royal Commission on Environmental Pollution, Twelfth Report: Best Practicable Environmental Option*. HMSO, London.
- Wang, J., Ward, S., & Xiao, L. (2019). Tsunami Squares modeling of landslide generated impulsive waves and its application to the 1792 Unzen-Mayuyama mega-slide in Japan. *Engineering Geology*, 265, 121–137. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.04.020>
- Wei-Haas, M. (2019). Magma found simmering under an “extinct” volcano. Here’s what that means. *National Geographic*.
- White, J. D. L., & P.-S. Ross. (2011). Maar-diatreme volcanoes: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201(1–4).
- Κυριακόπουλος, Κ (2003). Βιβλίο Ηφαιστειολογίας εκδόσεις Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών σελ 314
- NOAA. (2001.). *Mt. Pinatubo, Philippines*. <https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/stratoguide/pinfeat.html>