



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ & ΚΡΙΣΕΩΝ



POST GRADUATE PROGRAM
ENVIRONMENTAL, DISASTER & CRISES MANAGEMENT STRATEGIES

Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης
Master Thesis

Επιπτώσεις των ηφαιστειακών αερίων στην υγεία και το περιβάλλον

Effects of Volcanic Gases on the Environment and Human Health

ANNA ΣΑΜΑΡΑ / ANNA SAMARA
A.M. / R.N. : 14072

Ειδικές Εκδόσεις / Special Publications:

No. 2016024

Αθήνα, Οκτώβριος 2016
Athens, October 2016



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ & ΚΡΙΣΕΩΝ

POST GRADUATE PROGRAM
ENVIRONMENTAL, DISASTER & CRISES MANAGEMENT STRATEGIES

Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης Master Thesis

Επιπτώσεις των ηφαιστειακών αερίων στην υγεία και το περιβάλλον

Effects of Volcanic Gases on the Environment and Human Health

ANNA ΣΑΜΑΡΑ / ANNA SAMARA
A.M. / R.N. : 14072

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Δρ. Κ. Κυριακόπουλος,
Καθηγ. ΕΚΠΑ

Δρ. Ε. Λέκκας,
Καθηγ. ΕΚΠΑ

Δρ. Π. Νομικού,
Επικ. Καθηγ. ΕΚΠΑ

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	ii
Περίληψη	iv
Abstract.....	vi
Ευχαριστίες.....	viii
Κατάλογος Πινάκων.....	ix
Κατάλογος Εικόνων.....	x
Επεξήγηση Συνομογραφιών	xii

Κεφάλαιο 1. Γενικά για τα ηφαιστεια.....	1
1.1. Εισαγωγή.....	1
1.2. Η φύση και η προέλευση των ηφαιστείων.....	2
1.3. Προϊόντα που εκλύονται κατά τις ηφαιστειακές εκρήξεις	3
1.3.1. Ροές λάβας	4
1.3.2. Πυροκλαστικά υλικά.....	4
1.3.3. Ηφαιστειακή τέφρα	4
1.3.4. Πυροκλαστικά πετρώματα	4
1.3.5. Πυροκλαστικές αποθέσεις πτώσης.....	4
1.3.6. Λασπορεύματα	5
1.3.7. Ατμίδες.....	5

Κεφάλαιο 2. Επιπτώσεις στην υγεία από την τέφρα και τα ηφαιστειακά αέρια	8
2.1. Ατμοσφαιρική ρύπανση λόγω ηφαιστειακής δραστηριότητας.....	8
2.2. Επιπτώσεις της τέφρας και των ηφαιστειακών αερίων στην υγεία.....	11
2.2.1. Επιπτώσεις της ηφαιστειακής τέφρας και των αιωρούμενων σωματιδίων στην υγεία	12
2.2.2. Επιπτώσεις των Οξειδίων του άνθρακα στην υγεία.....	20
2.2.2.1. Διοξείδιο του Άνθρακα (CO ₂)	20
2.2.2.2. Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO)	25
2.2.3. Επιπτώσεις των ενώσεων του θείου στην υγεία.....	27
2.2.3.1. Διοξείδιο του Θείου (SO ₂)	27
2.2.3.2. Υδρόθειο (H ₂ S)	34
2.2.4. Επιπτώσεις των Υδραλογόνων στην υγεία.....	38
2.2.4.1. Υδροχλώριο (HCl).....	38
2.2.4.2. Υδροφθόριο (HF)	40
2.2.5. Επιπτώσεις του Μεθανίου (CH ₄) στην υγεία.....	44

Κεφάλαιο 3. Επιπτώσεις της Τέφρας και των Ηφαιστειακών Αερίων στο Περιβάλλον.....	46
3.1. Επιπτώσεις της τέφρας και των ηφαιστειακών αερίων στο κλίμα	46
3.2. Επιπτώσεις της τέφρας και των ηφαιστειακών αερίων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου	48
3.3. Επιπτώσεις της τέφρας και των ηφαιστειακών αερίων στη στοιβάδα του όζοντος	48
3.4. Επιπτώσεις της τέφρας και των ηφαιστειακών αερίων στη βλάστηση	49

Κεφάλαιο 4. Εκλύσεις Ηφαιστειακών Αερίων στην Ελλάδα	51
4.1. Γεωτεκτονική και Γεωλογική εξέλιξη του Ελλαδικού χώρου	51

4.2. Περιοχές του Ελλαδικού Χώρου όπου έχουν καταγραφεί εκλύσεις ηφαιστειακών αερίων.....	52
4.2.1. Δελφοί.....	52
4.2.2. Μήλος.....	53
4.2.3. Κατάκολο.....	54
4.2.4. Νίσυρος.....	54
4.2.5. Σουσάκι.....	54
4.2.6. Νέος Καύκασος, Φλώρινα.....	55
4.2.7. Μέθανα.....	55
4.3. Προκαταρκτική αξιολόγηση κινδύνων.....	56

Κεφάλαιο 5. Μέτρα Μετριασμού των Επιπτώσεων-Συμπεράσματα.....	57
--	-----------

Βιβλιογραφία.....	60
--------------------------	-----------

Διαδικτυακές πηγές.....	67
--------------------------------	-----------

Περίληψη

Η Γη είναι ένας δυναμικός πλανήτης ο οποίος χαρακτηρίζεται από συνεχείς μεταβολές. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα αποτελεί ένα από τα κυριότερα φυσικά φαινόμενα που επηρέασαν τη ζωή του ανθρώπου. Περισσότερα από 1500 ηφαίστεια βρίσκονται κοντά σε κατοικημένες περιοχές και αποτελούν πηγή μεγάλων κινδύνων (περίπου το 10% του παγκόσμιου πληθυσμού είναι άμεσα εκτεθειμένο στον ηφαιστειακό κίνδυνο). Η ασφυξία που επέρχεται από την εισπνοή επικίνδυνων αερίων αποτελεί την πιο κοινή αιτία θανάτου εξαιτίας της ηφαιστειακής δραστηριότητας.

Οι ρύποι, οι οποίοι μπορεί να ανιχνευθούν στην ατμόσφαιρα και οφείλονται σε ηφαιστειακή δραστηριότητα μπορεί να είναι πρωτογενείς, δηλαδή προϊόντα που έχουν παραχθεί από την ίδια την ηφαιστειακή δραστηριότητα ή δευτερογενείς, δηλαδή ρύποι που έχουν προκύψει ως προϊόντα διαφόρων ορυκτολογικών – πετρολογικών εξαλλοιώσεων ή χημικών αντιδράσεων και μεταβολών στην ευρύτερη ηφαιστειογενή περιοχή.

Εκτός όμως από τα αέρια και η ηφαιστειακή τέφρα και στάχτη μπορεί να προκαλέσει βλάβες στην υγεία όχι μόνο από την έκθεση στις αρχικές εκπομπές αλλά και από την επαναιώρηση του υλικού. Οι επιπτώσεις στην υγεία από την ηφαιστειακή τέφρα και στάχτη εξαρτώνται από τη χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων, την οξύτητά τους, τη συγκέντρωση, τη διάρκεια της έκθεσης και το μέγεθός τους. Τα μικρού μεγέθους αιωρούμενα σωματίδια έχουν την τάση να παραμένουν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στην τροπόσφαιρα και την ικανότητα να μπορούν να διασπείρονται σε μεγάλες αποστάσεις από την ηφαιστειακή πηγή. Θεωρούνται πιο επικίνδυνα αφού μπορούν να διεισδύσουν βαθύτερα μέσα στον πνεύμονα σε αντίθεση με τα μεγαλύτερης διαμέτρου σωματίδια τα οποία πλήττουν τις περιοχές που βρίσκονται πιο κοντά το ηφαίστειο και έχουν την τάση να επηρεάζουν την ανώτερη αναπνευστική οδό.

Από τα ηφαιστειακά αέρια το διοξείδιο του άνθρακα, είναι ένα από τα βασικά συστατικά του μίγματος των ηφαιστειακών αερίων και σε υψηλές συγκεντρώσεις είναι ένα τοξικό και ασφυξιογόνο αέριο, εξαιτίας της μείωσης του οξυγόνου που μπορεί να προκαλέσει στο αίμα. Πολυάριθμες περιπτώσεις ηφαιστειακής δραστηριότητας έχουν καταγραφεί κατά τις οποίες χάθηκαν ανθρώπινες ζωές από την έκθεση σε μεγάλες συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα όπως το 1794 στο Βεζούβιο της Ιταλίας, το 1979 στο οροπέδιο Ντιεγκ στην Ινδονησία, το 1986 στη λίμνη Nyos όπου σημειώθηκαν 1700 θάνατοι κλπ. Από τα οξείδια του άνθρακα και το μονοξείδιο του άνθρακα, ανήκει στα ασφυξιογόνα αέρια, όμως η συγκέντρωσή του στο μίγμα των εκλυόμενων ηφαιστειακών αερίων, είναι πολύ μικρή.

Το διοξείδιο του θείου, είναι ένα από τα πιο κοινά αέρια που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα εξαιτίας της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Έκθεση σε αυξημένα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα, μπορεί να προκαλέσει αναπνευστικά προβλήματα, τοξικότητα ακόμα και θάνατο ανάλογα με τη συγκέντρωση. Επικίνδυνες για την υγεία συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου έχουν καταγραφεί σε περιπτώσεις πολλών ηφαιστίων σε συνθήκες χαμηλής έντασης ανέμων.

Το υδρόθειο επίσης είναι αέριο που εκλύεται κατά την ηφαιστειακή δραστηριότητα και θεωρείται τοξικό αφού επηρεάζει το αναπνευστικό σύστημα και μπορεί να προκαλέσει βρογχίτιδα, ερεθισμό στα μάτια, κεφαλαλγία, απώλεια συνείδησης ακόμα και θάνατο σε

υψηλές συγκεντρώσεις. Επικίνδυνες συγκεντρώσεις έχουν καταγραφεί σε περιοχές κοντά σε φουμαρόλες, σε κρατήρες ηφαιστειών κι σε γεωθερμικές περιοχές.

Απειλή για την υγεία μπορεί να αποτελέσουν και τα αλογόνα, τα οποία εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα με τη μορφή αλογονιδίων του υδρογόνου όπως υδροχλώριο και υδροφθόριο. Αποθέσεις στο έδαφος τέτοιων σωματιδίων, μπορεί να προκαλέσει δηλητηρίαση στα αποθέματα νερού, στις γεωργικές καλλιέργειες καθώς και στα βοσκοτόπια.

Το μεθάνιο είναι και αυτό, αέριο το οποίο εκλύεται λόγω της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Το μεθάνιο σε κλειστούς χώρους μπορεί να προκαλέσει ασφυξία και ανήκει στα αέρια του θερμοκηπίου.

Εκτός από τις επιπτώσεις στην υγεία, τα ηφαιστειακά αέρια μπορεί να έχουν επιπτώσεις και στο περιβάλλον. Τα ηφαιστειακά αέρια έχουν επηρεάσει και επηρεάζουν όχι μόνο τη σύνθεση της ατμόσφαιρας και της υδρόσφαιρας αλλά μπορεί να επηρεάσουν ακόμα και την αλλαγή του κλίματος της Γης, κυρίως λόγω της μετατροπής του διοξειδίου του θείου σε θειικό οξύ. Το θειικό αεροζόλ που απελευθερώθηκε από την ισχυρή έκρηξη του ηφαιστείου Tambora της Ινδονησίας, το 1883, ευθύνεται για το «έτος χωρίς καλοκαίρι».

Το διοξείδιο του άνθρακα το οποίο εκλύεται στην ατμόσφαιρα εξαιτίας των ηφαιστειακών εκρήξεων μπορεί να ενισχύσει το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα μπορεί επίσης να παίξει σημαντικό ρόλο στη μείωση του όζοντος.

Στην περιοχή του Ελλαδικού χώρου, σε πολλά σημεία, έχουν καταγραφεί εκλύσεις ηφαιστειακών αερίων από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα. Οι Δελφοί, η Μήλος, το Κατάκολο, η Νίσυρος, το Σουσάκι, τα Μέθανα, η περιοχή του Νέου Καυκάσου στη Φλώρινα είναι κάποιες από αυτές τις περιοχές. Περιοχές αυξημένης επικινδυνότητας λόγω υψηλών εκλύσεων διοξειδίου του άνθρακα είναι ευρέως διαδεδομένες στην Ελλάδα.

Αν και γενικά στην Ελλάδα, οι ηφαιστειακοί κίνδυνοι μπορούν να θεωρηθούν μικροί, εκτός από τις περιοχές που βρίσκονται κατά μήκος του ηφαιστειακού τόξου της Ελλάδας, οι κάτοικοι πρέπει να ενημερωθούν για τα ηφαιστειακά αέρια και τους κινδύνους που προκύπτουν από την έκλυσή τους και να εκπαιδευτούν για κάθε περίπτωση ηφαιστειακής δραστηριότητας.

Abstract

The earth is a powerful planet which is characterized by incessant changes. Volcanic activity constitutes one of the main natural phenomena which have affected human life. More than 1500 volcanoes lie close to residential areas and form sources of great dangers (about 10 percent of the global population is directly exposed to the volcanic hazard). The asphyxiation which befalls from inhaling hazardous gases constitutes the most common cause of death due to volcanic activity.

Pollutants, which can be traced in the atmosphere and are due to volcanic activity, can be primary, that is to say products which have been generated by the volcanic activity itself or secondary, namely pollutants which have resulted as products of various mineralogical- petrological distortions or chemical reactions and alterations in the wider volcanic area.

However, apart from the gases, the volcanic tephra and ash can provoke health damages not only by exposure to the initial emissions, but also by the resuspension of the material. The consequences on health from the volcanic tephra and ash depend on the chemical formation of the suspended particles, their acidity, the concentration, the duration of the exposure and their size. The small- sized suspended particles have the tendency to remain in the troposphere longer and the ability to be dispersed into large distances from the volcanic source. They are regarded as much more hazardous since they can penetrate into the lung deeper, contrary to the larger in diameter particles, which afflict areas closer to the volcano and tend to affect the upper airway.

From volcanic gases, carbon dioxide is one of the basic components of the mixture of volcanic gases and in high concentrations is a toxic and asphyxiating gas, owing to the reduce of oxygen caused in the blood. Numerous cases of volcanic activity have been recorded in which human lives have been lost by exposure to high concentrations of carbon dioxide, such as in 1794 in Vesuvius in Italy, in 1979 in Dieng plateau in Indonesia, in 1986 at lake Nyos, where 1700 deaths were noted etc. From all of carbon oxides, carbon dioxide belongs to the asphyxiating gases, as well; however its concentration in the mixture of the attracted volcanic gases is quite small.

Sulfur dioxide is one of the most common gases released into the atmosphere because of volcanic activity. Exposure to increased levels of carbon dioxide can cause respiratory problems, toxicity and even death, depending on the concentration. Dangerous to health sulfur dioxide concentrations have been recorded in many cases of volcanoes in low intensity wind conditions.

Hydrogen sulfide is also a gas which is attracted during the volcanic activity and it is regarded as toxic since it affects the respiratory system and can provoke bronchoconstriction, sore eyes, headache, loss of consciousness even death in high concentrations. Dangerous concentrations have been recorded near fumaroles, in volcanic craters and geothermal precincts.

Halogens, which are emitted into the atmosphere in the form of hydrogen halides such as hydrogen chloride and hydrogen fluoride, can also constitute a threat to health.

Ground depositions of such particles can provoke poisoning in the water supplies, in Agricultural cultivation and in the grazing grounds.

Methane is also a gas which is attracted due to volcanic activity. In closed spaces, methane can cause asphyxiation and it belongs to greenhouse gases.

Apart from health ramifications, volcanic gases can have consequences on the environment, as well. Volcanic gases have affected and have been still affecting not only the composition of the atmosphere and the hydrosphere, but they can also affect the climate change of the earth mainly because of the conversion of sulfur dioxide into sulfuric acid. Sulfate aerosol which was released from the powerful volcanic eruption of Tambora in Indonesia in 1883, is responsible for the “year without a summer”.

Carbon dioxide, which is attracted to the atmosphere due to volcanic eruptions, can boost the greenhouse effect.

Volcanic activity can also play a significant role in reducing ozone.

In the region of Greece, emissions of volcanic gases have been recorded in many areas from ancestry to the present. Delphi, Milos, Katakolo, Nisyros, Sousaki, Methana, the region of Neos Kafkasos in Florina are some of these areas. Regions of high risk due to high emissions of carbon dioxide are widespread in Greece.

Although the volcanic dangers are considered to be small in Greece, except for areas which lie along the volcanic arc of Greece, residents must become aware of the volcanic gases and the hazards that emerge from their emission and be trained for any such situation of volcanic activity.

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία αποτελεί Διπλωματική Εργασία στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών στην Διαχείριση Περιβάλλοντος του τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Πριν την παρουσίαση της εργασίας μου, αισθάνομαι την ανάγκη και υποχρέωση να ευχαριστήσω από καρδιάς τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Κυριακόπουλο για την προτροπή του να ασχοληθώ και να μελετήσω ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, για την πολύτιμη καθοδήγησή του, τη συμπαράστασή του και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον καθηγητή, κ. Ευθύμιο Λέκκα για όλες τις ενδιαφέρουσες, χρήσιμες και συναρπαστικές γνώσεις και εμπειρίες που με βοήθησε να αποκομίσω σχετικά με τη διαχείριση κρίσεων και καταστροφών κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Στη συνέχεια θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην κ.Παρασκευή Νομικού, η οποία δέχθηκε να είναι στην τριμελή επιτροπή αξιολόγησης της Διπλωματικής μου μαζί με τον κ. Κυριακόπουλο και τον κ. Λέκκα.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους κ. Μανώλη Ανδρεαδάκη, Χαράλαμπο Κράνη, Μανώλη Σκούρτσο και Κωνσταντίνο Σούκη για όλα όσα διδάχθηκα από εκείνους στα μαθήματα «Πλανήτης Γη», «Αλληλεπιδράσεις των Γήινων Συστημάτων» και «Επιπτώσεις Φυσικών και Τεχνολογικών Καταστροφών στο περιβάλλον» που αποτέλεσαν το γνωστικό υπόβαθρο της εργασίας μου καθώς και την Αλεξία Γραμπά, την «ψυχή» του μεταπτυχιακού!

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, το σύζυγο, τη μητέρα και κυρίως στα τέσσερα παιδιά μου για την υπομονή τους και τη συμπαράστασή τους σε όλο το διάστημα των σπουδών μου στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα της Διαχείρισης Περιβάλλοντος Καταστροφών και Κρίσεων.

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1.	Σύνοψη κύριων κατευθυντήριων γραμμών για κάθε μέγεθος σωματιδίων	17
Πίνακας 2-2.	Συμπτώματα έκθεσης σε αυξανόμενες συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα	21
Πίνακας 2-3.	Επιτρεπτά όρια διοξειδίου του θείου για διαφορετικά χρονικά διαστήματα έκθεσης	28
Πίνακας 2-4.	Πίνακας συστάσεων προστασίας από το διοξείδιο του άνθρακα	29
Πίνακας 2-5.	Επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση σε διοξείδιο του θείου.....	30
Πίνακας 2-6.	Επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση σε υδρόθειο.....	35
Πίνακας 2-7.	Επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση σε υδροχλώριο.....	39
Πίνακας 2-8.	Κατευθυντήριες γραμμές για τις συγκεντρώσεις υδροφθορίου στο πόσιμο νερό	41

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1.	Ηφαιστειακή ζημιά από το 1900 έως το 2006	2
Εικόνα 1.2.	Χάρτης της Γης, όπου απεικονίζονται τα όρια των Λιθοσφαιρικών Πλακών	3
Εικόνα 1.3.	Τα προϊόντα της ηφαιστειακής δράσης	5
Εικόνα 1.4.	Σύσταση ηφαιστειακών αερίων	6
Εικόνα 1.5.	Συγκέντρωση ηφαιστειακών αερίων σε διαφορετικά ηφαιστειακά γεγονότα.....	6
Εικόνα 1.6.	Εκλύσεις ηφαιστειακών αερίων, ηφαίστειο Stromboli Ιταλία	7
Εικόνα 1.7.	Εκλύσεις ηφαιστειακών αερίων στη Νίσυρο.....	7
Εικόνα 2.1.	Τα συστατικά του ξηρού αέρα	8
Εικόνα 2.2.	Πρωτογενής και Δευτερογενής σχηματισμός Σωματιδίων	9
Εικόνα 2.3.	Πρωτογενείς και δευτερογενείς ατμοσφαιρικοί ρύποι.....	10
Εικόνα 2.4.	Μέσοι χρόνοι παραμονής στην ατμόσφαιρα διαφόρων ουσιών.....	11
Εικόνα 2.5.	Ηφαιστειακή στάχτη από την έκρηξη του Ηφαιστίου της Αγίας Ελένης το 1980.....	13
Εικόνα 2.6.	Ηφαιστειακή στάχτη στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.....	14
Εικόνα 2.7.	Ηφαιστειακή τέφρα στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο	14
Εικόνα 2.8.	Διεισδυτικότητα των αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα, ανάλογα με το μέγεθός τους.....	15
Εικόνα 2.9.	Επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια	16
Εικόνα 2.10.	Πνεύμονες με πυριτίαση.....	16
Εικόνα 2.11.	Ηφαιστειακή τέφρα στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.....	19
Εικόνα 2.12.	Η γεωγραφική θέση της ηφαιστειακής ζώνης του Καμερούν και του Ηφαιστειακού Πεδίου Οκί της λίμνης Nyos	23
Εικόνα 2.13.	Η περιοχή του ηφαιστίου Ντιεγκ, στην Ινδονησία, είναι γνωστή για τις επικίνδυνες εκλύσεις αερίων	23
Εικόνα 2.14.	Διαδικασία μεταφοράς οξυγόνου μέσω της αιμοσφαιρίνης.	26
Εικόνα 2.15.	Συμπτώματα έκθεσης σε μονοξείδιο του άνθρακα σε σχέση με το ποσοστό της ανθρακυλαιμοσφαιρίνης στο αίμα.....	27
Εικόνα 2.16.	Κρατήρας ηφαιστίου Masaya στη Νικαράγουα.....	32
Εικόνα 3.1.	Τα ηφαιστειακά αέρια αντιδρούν με την ατμόσφαιρα με πολλούς τρόπους. Η μετατροπή του διοξειδίου του θείου σε θειικό οξύ έχει τις πιο σημαντικές επιπτώσεις στο κλίμα της Γης.	47
Εικόνα 3.2.	Νεκρό πτηνό από εκλύσεις ηφαιστειακών αερίων στο Σουσάκι.....	49
Εικόνα 3.3.	Αποθέσεις πτώσης κίσηρης από τη Θήρα, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.	50
Εικόνα 4.1.	Χάρτης της Ελλάδας στον οποίο φαίνεται η Μήλος και το ηφαιστειακό τόξο του νοτίου Αιγαίου.....	51
Εικόνα 4.2.	Συλλογή ηφαιστειακών αερίων στη Νίσυρο	54

Εικόνα 4.3.	Συλλογή ηφαιστειακών αερίων στη Νέα Καμένη	56
-------------	--	----

Επεξήγηση Συντομογραφιών

IVHHN: International Volcanic Health Hazard Network

USGS: United States Geological Survey

PAHO: Pan American Health Organization

WHO: World Health Organization

NIOSH: National Institute for Occupational Safety and Health

OSHA: Occupational Safety and Health Administration

CCOHS: Canadian Centre for Occupational Health and Safety

BGVN: Bulletin of the Global Volcanism Network

SEAN: Scientific Event Alert Network

HVO: Hawaiian Volcano Observatory

ACGIH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists

ATDSR: Agency for Toxic Substances and Disease Registry

IPCC: Intergovernmental Panel of Climate Change

ppm: parts per million-μέρη ανά εκατομμύριο

ppb: parts per billion-μέρη ανά δισεκατομμύριο

pH: potentia Hydrogenii – μέτρο οξύτητας

Κεφάλαιο 1.

Γενικά για τα ηφαίστεια

1.1. Εισαγωγή

Η Γη είναι ένας δυναμικός πλανήτης, ο οποίος χαρακτηρίζεται από συνεχείς μεταβολές αλλά και από ευαίσθητες ισορροπίες. Τα γήινα συστήματα, η λιθόσφαιρα, η υδρόσφαιρα, η ατμόσφαιρα και η βιόσφαιρα βρίσκονται σε μια αέναη κίνηση και συνεχώς αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Κατά την αλληλεπίδραση αυτή, συχνά εκδηλώνονται φαινόμενα απόλυτα φυσικά και αναμενόμενα, τα οποία ευθύνονται για τη διαμόρφωση του αναγλύφου του πλανήτη, επηρεάζοντας ταυτόχρονα, άμεσα ή έμμεσα, το περιβάλλον, κάθε μορφή ζωής και φυσικά και τον άνθρωπο και τις δραστηριότητές του.

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα είναι ένα από τα κυριότερα φυσικά φαινόμενα που επηρέασαν τη ζωή του ανθρώπου. Κατατάσσεται στα γεωτεκτονικά φυσικά φαινόμενα, τα οποία θεωρούνται εν δυνάμει καταστροφικά για τον άνθρωπο. Οποιοδήποτε είδος ηφαιστείου, είναι δυνατόν να δημιουργήσει επιβλαβή ή και θανατηφόρα φαινόμενα όχι μόνο κατά τη διάρκεια μίας έκρηξης αλλά και σε περίοδο ηρεμίας. Εκατόν ενενήντα χιλιάδες θάνατοι ανθρώπων προκλήθηκαν από ηφαιστειακές εκρήξεις σε παγκόσμια κλίμακα από το 1500 έως το 1914. Τα ηφαιστειακά φαινόμενα, περισσότερο από όλα τα υπόλοιπα φυσικά φαινόμενα, προσομοιάζουν με τις τεχνολογικές καταστροφές, εξαιτίας των συνοδών τους φαινομένων που είναι οι εκρήξεις, οι πυρκαγιές, οι εξώθερμες αντιδράσεις καθώς και η απελευθέρωση επικίνδυνων τοξικών ουσιών στο περιβάλλον. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των ηφαιστειακών εκρήξεων σε σχέση με τα υπόλοιπα φυσικά φαινόμενα που ενέχουν κινδύνους για την υγεία και το περιβάλλον, είναι το γεγονός ότι μπορεί να επηρεάσουν περιοχές εκατοντάδες ή και χιλιάδες χιλιόμετρα από το ίδιο το ηφαίστειο ή ακόμα να έχουν επιπτώσεις σε παγκόσμια κλίμακα.

Περισσότερα από 1500 ηφαίστεια βρίσκονται κοντά σε κατοικημένες περιοχές και αποτελούν πηγή μεγάλων κινδύνων. Συνεπώς εκατομμύρια άνθρωποι σε ολόκληρο τον κόσμο ενδέχεται να εκτεθούν σε ηφαιστειακά αέρια (περίπου το 10% του παγκόσμιου πληθυσμού είναι άμεσα εκτεθειμένο στον ηφαιστειακό κίνδυνο) καθώς και σε αέρια τα οποία προέρχονται από τεχνολογικά ατυχήματα και NaTech καταστροφές και είναι παρόμοιας σύστασης με τα ηφαιστειακά. Έχει υπολογιστεί ότι πάνω από 500 εκατομμύρια άνθρωποι σε όλο τον κόσμο, ζουν σε ακτίνα μικρότερη των 100 χιλιομέτρων από ένα ηφαίστειο το οποίο έχει ιστορικά καταγεγραμμένη δραστηριότητα. Επίσης πολλές ηφαιστειακές περιοχές είναι πυκνοκατοικημένες και αρκετές βρίσκονται κοντά σε μεγάλες πόλεις (ΡΑΗΟ).

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις μπορεί να απειλήσουν την υγεία, εφόσον είναι δυνατόν να προκαλέσουν εγκαύματα, τραυματισμούς από πτώσεις, κατολισθήσεις, πυρκαγιές, μόλυνση του πόσιμου νερού, ασθένειες του αναπνευστικού κλπ.

Η πιο κοινή αιτία θανάτου εξαιτίας της ηφαιστειακής δραστηριότητας είναι η ασφυξία που προέρχεται από την εισπνοή επικινδύνων αερίων.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι:

- Η μελέτη των κινδύνων από την ηφαιστειακή τέφρα και τα ηφαιστειακά αέρια για την υγεία (αναπνευστικό σύστημα, οφθαλμολογικά συμπτώματα, δέρμα) τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα.

Ηφαιστειακή ζημιά από το 1900 έως το 2006

	Αριθμός συμβάντων	Άτομα που σκοτώθηκαν	Άτομα που έμειναν άστεγα	Σύνολο επηρεασμένων ατόμων	Ζημιά (εκατομμύρια δολάρια Η.Π.Α.)
Αφρική	15	2.213	180.710	500.353	9
Βόρεια και Νότια Αμερική	69	67.841	35.680	1.123.587	2.808
Ασία	80	21.456	97.900	2.668.287	697
Ευρώπη	11	783	14.000	26.224	44
Ωκεανία	20	3.665	46.000	248.422	400

Εικόνα 1.1. Ηφαιστειακή ζημιά από το 1900 έως το 2006

(πηγή: http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Disasters_GR/SEM8HHFTFQG_0.html)

- Η αναλυτική περιγραφή των επιπτώσεων των ηφαιστειακών αερίων από τις κύριες φάσεις των ηφαιστειακών εκρήξεων καθώς και κατά την μεταηφαιστειακή δραστηριότητα, οι οποίες επηρεάζουν το περιβάλλον και κατά συνέπεια και την υγεία.
- Η επισημάνση τρόπων πρόληψης ή μετριασμού των επιπτώσεων στην υγεία έπεται από μία ηφαιστειακή έκρηξη.

Η κατανόηση του τι μπορεί να προκαλέσει ένα ηφαίστειο, είναι το πρώτο βήμα για τον περιορισμό του ηφαιστειακού κινδύνου φυσικά πάντα πρέπει κανείς να έχει κατά νου του, ότι τα ηφαίστεια είναι φυσικά συστήματα που πάντα μπορεί να κρύβουν απρόβλεπτους παράγοντες.

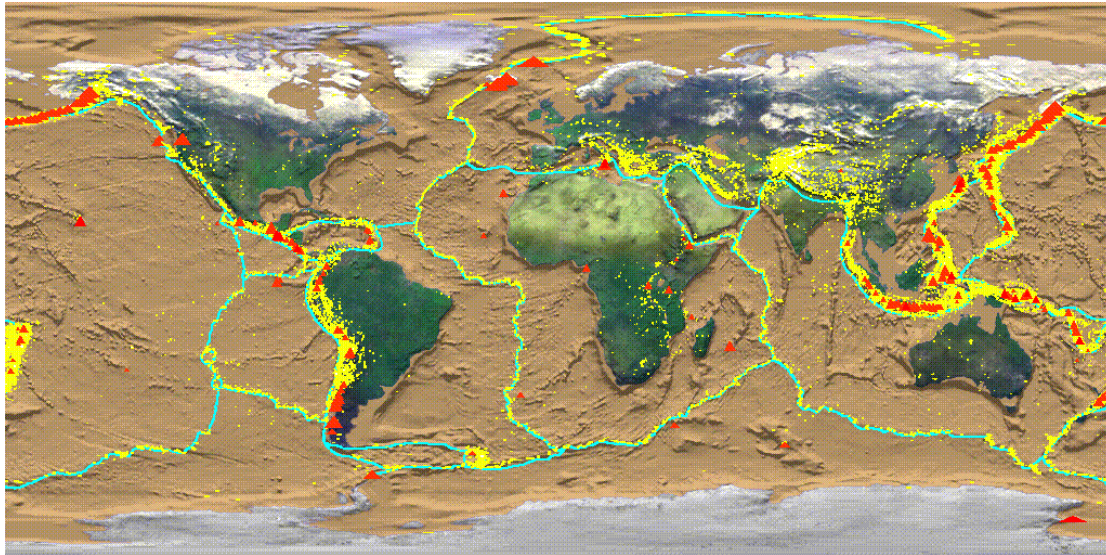
1.2. Η φύση και η προέλευση των ηφαιστείων

Ηφαίστεια (volcanoes), ονομάζονται οι κωνικές γεωμορφές, οι οποίες σχηματίζονται όταν από την κορυφή τους ή διαμέσου ανοιγμάτων και στομιών, διάπυρο, ρευστό υλικό το μάγμα (magma), το οποίο προέρχεται από το εσωτερικό της Γης, διαφεύγει στην επιφάνεια της, όπου και ρέει με μορφή λάβας (lava). Πολλές φορές, εκτός από τη λάβα, μέσω του κρατήρα, ανέρχονται και διαφεύγουν στην επιφάνεια διάφορα αέρια.

Από τα 60.000 ηφαίστεια που υπάρχουν στη Γη, τα 50.000 περίπου βρίσκονται στα βάθη του Ειρηνικού ωκεανού ως θαλάσσιες βουνοκορφές. 1586 ηφαίστεια έχουν καταγραφεί στην παγκόσμια βάση δεδομένων για τα ηφαίστεια. Σύμφωνα με το ινστιτούτο Smithsonian, έχουν καταγραφεί 539 ηφαίστεια τα οποία έχουν εκραγεί στους ιστορικούς χρόνους και τα οποία θεωρούνται ως ενεργά με πολλά από αυτά να έχουν δράσει περισσότερες από μία φορές. Επίσης, έχουν καταγραφεί άλλα 529 ηφαίστεια, τα οποία ενώ δεν εξερράγησαν κατά τους

ιστορικούς χρόνους, παρουσιάζουν σαφή δεδομένα εκρηκτικής δραστηριότητας κατά τα τελευταία 10.000 χρόνια. Τα ηφαίστεια αυτά θεωρούνται ανενεργά αλλά είναι σε θέση να εκραγούν ξανά. Αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε χρόνο, εκρήγνυνται παγκοσμίως, περίπου πενήντα ηφαίστεια κατά μέσο όρο.

Τα περισσότερα από τα ενεργά ηφαίστεια της Γης, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.2, βρίσκονται κατά μήκος των ορίων των 13 τεκτονικών πλακών, οι οποίες συνθέτουν την επιφάνεια του πλανήτη μας. Οι ηφαιστειακές εκρήξεις πάνω από τις λιθοσφαιρικές πλάκες, προκαλούνται καθώς το μάγμα, δηλαδή το λιωμένο πέτρωμα, ανεβαίνει από τα βαθύτερα σημεία προς την επιφάνεια της Γης.



Εικόνα 1.2. Χάρτης της Γης, όπου απεικονίζονται τα όρια των Λιθοσφαιρικών Πλακών

(γαλάζιες γραμμές), η κατανομή των πρόσφατων σεισμών (κίτρινα σημεία) και των ενεργών ηφαιστειών (κόκκινα σημεία)

(πηγή: <http://www.geo.auth.gr/765>)

Στο εσωτερικό των τεκτονικών πλακών αν και η ηφαιστειότητα δεν είναι συχνή, μπορεί να συναντήσουμε μεγάλες εκτάσεις με προϊόντα παράγωγα των ηφαιστειακών εκρήξεων. Ηφαιστειακά υλικά, δομούν επίσης τους ωκεάνιους πυθμένες.

1.3. Προϊόντα που εκλύονται κατά τις ηφαιστειακές εκρήξεις

Όπως προαναφέρθηκε, το ηφαίστειο αποτελεί τη δίοδο από το εσωτερικό της Γης προς την επιφάνεια, ρευστών πετρωμάτων και αερίων, είτε ως εκροή είτε ως έκρηξη. Για το λόγο αυτό, τα ηφαίστεια ενέχουν πολλούς κινδύνους, αφού μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στην υγεία, να προκαλέσουν θανάτους, να καταστρέψουν περιουσίες ακόμα και σε μεγάλες από αυτά αποστάσεις αλλά και να επηρεάσουν το παγκόσμιο κλίμα.

Συνοπτικά οι ηφαιστειακές εκρήξεις, περιλαμβάνουν κινδύνους που μπορεί να οφείλονται σε μεγάλης έντασης εκρήξεις, στη λάβα και τις πυροκλαστικές δομές, σε σεισμούς, κατολισθήσεις αλλά και τοξικά αέρια. Πλούσια σε τοξικά αέρια μπορεί να είναι τα πυρακτωμένα νέφη των μεγάλων σε ένταση ηφαιστειακών εκρήξεων, κατά τις οποίες υπέρθερμα ρεύματα τέφρας μπορεί να εκτιναχθούν με ταχύτητες που φτάνουν ακόμα και τα 250 χιλιόμετρα την ώρα και θερμοκρασίες που να ξεπερνούν τους 450 βαθμούς. Συχνά οι ηφαιστειακές εκρήξεις

συνοδεύονται και από άλλους φυσικούς κινδύνους όπως οι δασικές πυρκαγιές, οι λασπορροές, οι πλημμύρες και ακόμα και τα τσουνάμι (κάτω από ειδικές συνθήκες).

Τα προϊόντα και τα φαινόμενα που δημιουργούν οι ηφαιστειακές εκρήξεις είναι ποικίλα και εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως η σύσταση του μάγματος και το ιξώδες του, καθώς και η περιεκτικότητά του σε αέρια.

Τα ηφαιστειακά προϊόντα θα μπορούσαν να διαχωριστούν στις εξής κατηγορίες:

1.3.1. Ροές λάβας

Ροές λάβας, οι οποίες δεν είναι τίποτα άλλο από ποτάμια τηγμένου πετρώματος το οποίο έχει προέλθει ή από την «ήσυχη» έκρηξη ενός κρατήρα ή από μια μεγάλης έντασης έκρηξη και έχει τη μορφή συντριβανιών λάβας. Οι λάβες, ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) διακρίνονται σε βασαλτικές με μικρή περιεκτικότητα σε SiO_2 και σε ανδεσιτικές-ρυολιτικές στην αντίθετη περίπτωση, οι οποίες και παρουσιάζουν υψηλότερο ιξώδες.

1.3.2. Πυροκλαστικά υλικά

Πυροκλαστικά υλικά (pyroclasts), δηλαδή τα μεμονωμένα ηφαιστειακά θραύσματα που εκτοξεύονται από ένα ηφαίστειο και συνδέονται με την άνοδο και τη βίαιη απελευθέρωση αερίων.

Τα πυροκλαστικά υλικά μπορεί να αποτελούνται από στάχτη (ash) με μέγεθος μικρότερο των 2 mm, λιθάρια (lapilli) με μέγεθος 2 έως 64 mm, τεμάχια και βολίδες με μέγεθος μεγαλύτερο των 64 mm.

1.3.3. Ηφαιστειακή τέφρα

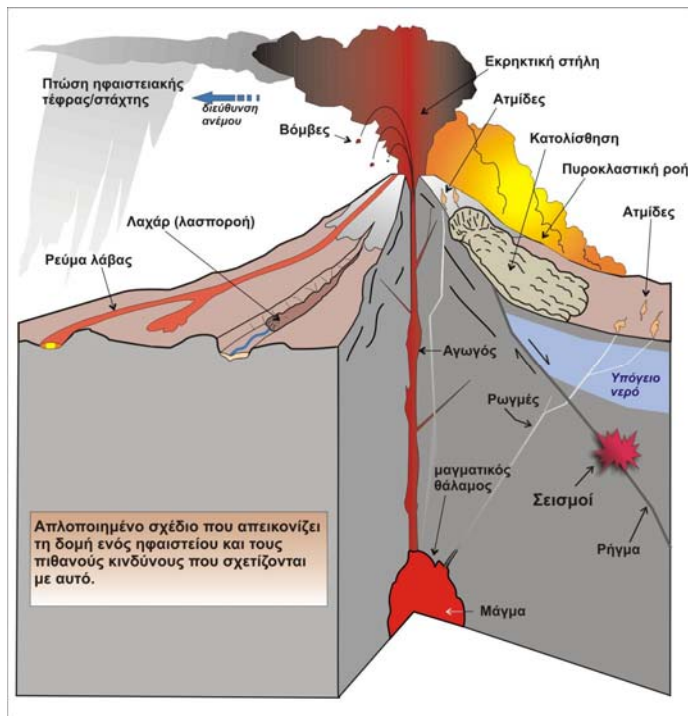
Ηφαιστειακή τέφρα (tephra), η οποία αποτελείται από πολύ μικρά υαλώδη θραύσματα ηφαιστειακού πετρώματος, χαλαρά υλικά, τα οποία μπορούν να ταξιδίσουν σε ακτίνα πολλών μιλίων από το ηφαίστειο.

1.3.4. Πυροκλαστικά πετρώματα

Πυροκλαστικά πετρώματα, τα οποία δημιουργούνται από τη συγκόλληση των χαλαρών πυροκλαστικών υλικών.

1.3.5. Πυροκλαστικές αποθέσεις πτώσης

Πυροκλαστικές αποθέσεις πτώσης (pyroclastic airfall deposits), με αδρόκοκκα ηφαιστειακά υλικά κοντά στον ηφαιστειακό πόρο (το τμήμα από το οποίο γίνεται η έξοδος του μάγματος) και βαθμιαία πιο λεπτόκοκκα όσο απομακρυνόμαστε από αυτόν.



Εικόνα 1.3. Τα προϊόντα της ηφαιστειακής δράσης

(πηγή: <http://www.geo.auth.gr>)

1.3.6. Λασπορεύματα

Λασπορεύματα ή λαχάρ (mudflows), το μίγμα νερού και πυροκλαστικών υλικών που ρέει στα πρανή του ηφαιστείου. Τα λασπορεύματα μπορεί να δημιουργηθούν όχι μόνο κατά την έκρηξη του ηφαιστείου, αλλά και κατά την περίοδο που το ηφαίστειο μένει ανενεργό. Είναι εξαιρετικά επικίνδυνα για τους ανθρώπους και το περιβάλλον αφού μπορεί να καλύψουν μεγάλες εκτάσεις και να επηρεάσουν τη βιοποικιλότητα της περιοχής.

1.3.7. Ατμίδες

Αέρια-Ατμίδες. Ένα ηφαίστειο μπορεί επίσης να απελευθερώσει στην ατμόσφαιρα αέρια και θερμότητα. Έτσι, εκτός από το οξυγόνο, όλα τα άλλα αέρια που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα, προέρχονται από το εσωτερικό της Γης και έχουν απελευθερωθεί μέσω της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Το μάγμα, εκτός από τα στερεά συστατικά, περιέχει και αέρια σε ποσοστό 1-5% του συνολικού του βάρους. Το μεγαλύτερο μέρος των ηφαιστειακών αερίων που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα αποτελείται από υδρατμούς. Τα ηφαιστειακά αέρια είναι ένα ετερογενές μίγμα αερίων στο οποίο κυριαρχούν οι υδρατμοί σε ποσοστό 70% V/V το οποίο σε κάποιες περιπτώσεις, μπορεί και να αγγίξει ακόμα και το 99% V/V περίπου του συνολικού όγκου των αερίων. Στο υπόλοιπο μίγμα διασπείρεται ένας μεγάλος αριθμός αερίων ενώσεων που μπορεί να είναι μη οργανικές ενώσεις που περιέχουν άνθρακα (C) όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), οξείδια του θείου (SO)_x με κυρίαρχο το διοξείδιο του θείου (SO₂), οξείδια του αζώτου (NO)_x, υδροχλώριο (HCl), υδροφθόριο (HF), τετραφθοριούχο πυρίτιο (SiF₄), αέριο υδρογόνο (H₂), υδρόθειο (H₂S), μεθάνιο (CH₄) και άλλοι υδρογονάνθρακες, ευγενή αέρια, καρβονυλοσουλφύδια (COS), ραδόνιο (Rn) κλπ. (εικόνα 1.4.). Στα ηφαιστειακά αέρια λοιπόν, μπορεί να περιέχονται και τοξικά αέρια.

Τα αέρια και αερολύματα που συνθέτουν τα ηφαιστειακά αέρια, είναι δυνατόν να απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα πριν, κατά τη διάρκεια ή μετά από μια ηφαιστειακή έκρηξη.

ΒΑΣΙΚΑ ΑΕΡΙΑ	ΑΕΡΙΑ ΣΕ ΙΧΝΗ	ΤΟΞΙΚΑ ΑΕΡΙΑ
H ₂ O (70-90%)	N, H, S,	HCl, HF,
CO ₂	Cl, F,	H ₂ SO ₄
SO ₂	CO, Ar	H ₂ S

Εικόνα 1.4. Σύσταση ηφαιστειακών αερίων

(http://www.geo.auth.gr/765/3_products/37_gases.htm)

Το μίγμα των ηφαιστειακών αερίων που απελευθερώνεται κάθε φορά έπεται από μία ηφαιστειακή έκρηξη έχει διαφορετική σύσταση, η οποία εξαρτάται από τη σύνθεση του μάγματος και τις γεωτεκτονικές συνθήκες της περιοχής, από το βάθος απαέρωσης, τις αλληλεπιδράσεις με τα συστήματα των υπόγειων υδάτων, τη σύνθεση του φλοιού κλπ. Η σύσταση μπορεί να είναι διαφορετική όχι μόνο μεταξύ διαφορετικών ηφαιστειών αλλά και ανάμεσα σε εκρήξεις του ίδιου του ηφαιστείου.

Η ηφαιστειακή τέφρα μπορεί να έχει διαφορετική σύσταση και θερμοκρασία, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:

Volcano Tectonic Style Temperature	Kilauea Summit Hot Spot 1170°C	Erta' Ale Divergent Plate 1130°C	Momotombo Convergent Plate 820°C
H ₂ O	37.1	77.2	97.1
CO ₂	48.9	11.3	1.44
SO ₂	11.8	8.34	0.50
H ₂	0.49	1.39	0.70
CO	1.51	0.44	0.01
H ₂ S	0.04	0.68	0.23
HCl	0.08	0.42	2.89

Εικόνα 1.5. Συγκέντρωση ηφαιστειακών αερίων σε διαφορετικά ηφαιστειακά γεγονότα

(πηγή: United States Geological Survey 2010)

Μερικά από αυτά τα αέρια μεταφέρονται μακριά από το σημείο της έκρηξης μέσω των σωματιδίων της τέφρας ενώ κάποια από αυτά σχηματίζουν άλατα και κάποια σχηματίζουν αερολύματα. Ηφαιστειακά αέρια μπορεί επίσης να παραχθούν, όταν το νερό θερμαίνεται από το μάγμα. Αέρια επίσης, μπορεί να διαφύγουν στην ατμόσφαιρα από τις πυροκλαστικές ροές, τα λαχάρ και τις ροές λάβας. Δευτερογενώς, αέρια μπορεί να παραχθούν από την καύση της βλάστησης που οφείλεται σε πυρκαγιές που προκλήθηκαν από ηφαιστειακά φαινόμενα.

Από τις ατμίδες εκλύονται αέρια τα οποία ανάλογα με τη σύστασή τους αλλά και τη θερμοκρασία, διακρίνονται σε φουμαρόλες (μείγμα πολλών και διαφόρων αερίων με κύριο χαρακτηριστικό τους υδρατμούς), σουλφατάρες (μείγμα αερίων με κύριο χαρακτηριστικό το θειάφι) και μοφέτες (μείγμα αερίων με κύριο χαρακτηριστικό το διοξείδιο του άνθρακα).



Εικόνα 1.6. Εκλύσεις ηφαιστειακών αερίων, ηφαίστειο Stromboli Ιταλία

(πηγή: αρχείο Κωνσταντίνου Κυριακόπουλου)



Εικόνα 1.7. Εκλύσεις ηφαιστειακών αερίων στη Νίσυρο

(πηγή: αρχείο Κωνσταντίνου Κυριακόπουλου)

Κεφάλαιο 2.

Επιπτώσεις στην υγεία από την τέφρα και τα ηφαιστειακά αέρια

2.1. Ατμοσφαιρική ρύπανση λόγω ηφαιστειακής δραστηριότητας

Ατμόσφαιρα είναι η αεριώδης μάζα η οποία περιβάλλει τη Γη, αποτελεί ένα σώμα με αυτή και μετέχει σε όλες τις κινήσεις της Γης.

Η ατμόσφαιρα της Γης στα κατώτερα στρώματα δηλαδή μέχρι ύψος 25χιλ. περίπου αποτελείται:

α) από ξηρό αέρα,

β) από υδρατμούς και

γ) από αιωρήματα διαφόρου προελεύσεως (aerosols).

Τα βασικά αέρια που αποτελούν τον ατμοσφαιρικό αέρα είναι το άζωτο (78,08%) και το οξυγόνο (20,95%) που καταλαμβάνουν το 99% περίπου του όγκου ενώ τα υπόλοιπα παρουσιάζουν αναλογίες μικρότερες του 1% (Λυκούδη 2005).

Αέριο	Περιεκτικότητα
Άζωτο	78,08%
Οξυγόνο	20,95%
Αργό	0,93%
Διοξείδιο του άνθρακα	0,035%
Νέο	0,0018%
Ηλιο	0,00052%
Μεθάνιο	0,00014%
Κρυστό	0,0001%
Οξείδια του αζώτου	0,00005%
Υδρογόνο	0,00005%
Όζον	0,000007%
Ξένο	0,000009%

Εικόνα 2.1. Τα συστατικά του ξηρού αέρα

(πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών)

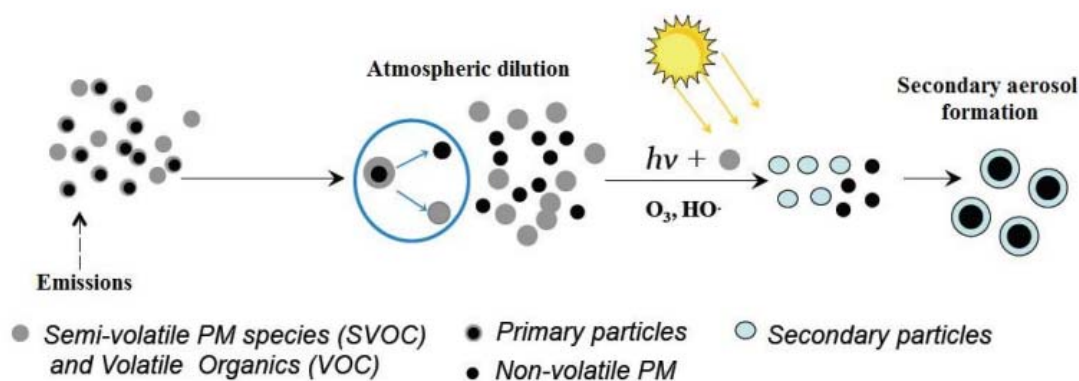
Ως ατμοσφαιρική ρύπανση, θα μπορούσε να οριστεί η προσθήκη στην ατμόσφαιρα που μας περιβάλλει, κάθε υλικού, μοριακής ή σωματιδιακής φύσης, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα τη δηλητηρίαση της ζωής πάνω στον πλανήτη, βραχυπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα.

Ο άνθρωπος αναπνέει φυσιολογικά, περίπου 8 λίτρα ατμοσφαιρικού αέρα το λεπτό, κάτι το οποίο σημαίνει ότι εισπνέει καθημερινά περισσότερο από 10m^3 αέρα. Όπως είναι φυσικό, η ποσότητα αυτή του αέρα που εισέρχεται καθημερινά στους πνεύμονες, δεν είναι αποστειρωμένη, αλλά μπορεί να περιέχει σκόνη, ατμοσφαιρικούς ρύπους, καπνό, βλαβερές ουσίες, σωματίδια κλπ. Η εισπνοή τέτοιων ουσιών, είναι δυνατόν να προκαλέσει δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία.

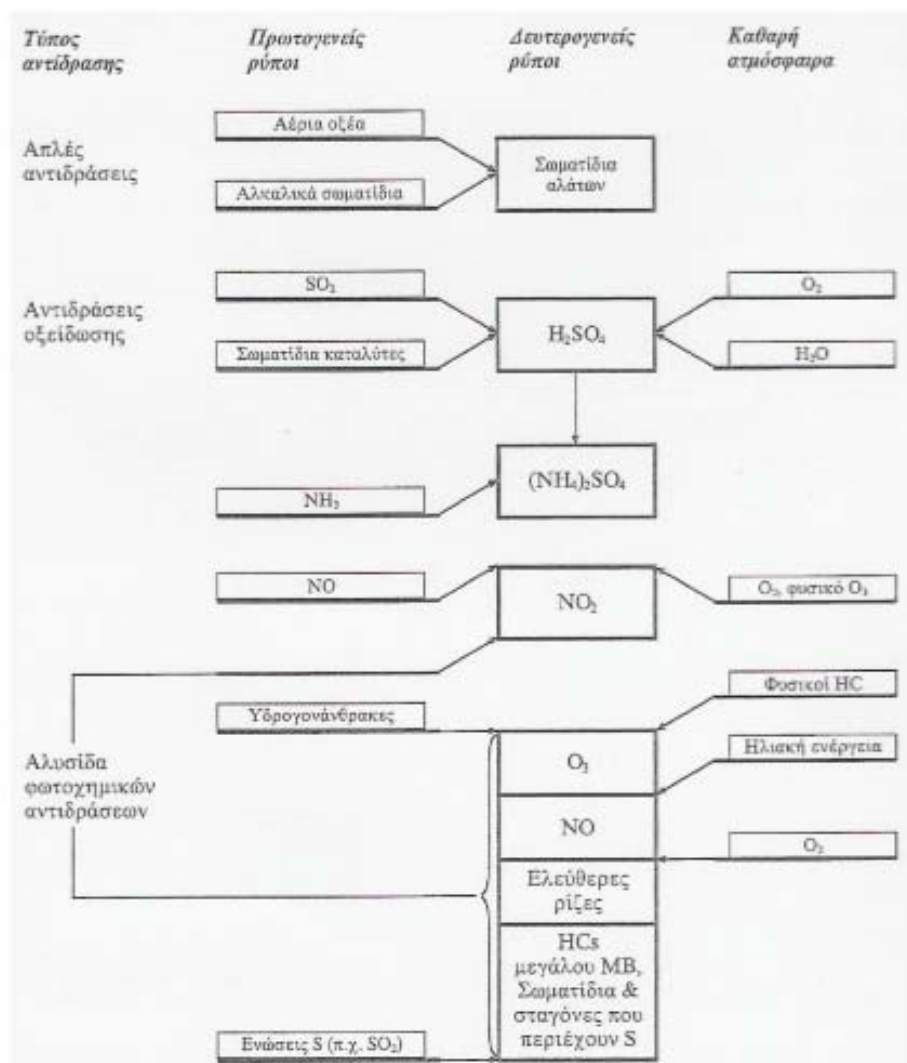
Η εκπομπή των ρύπων στην ατμόσφαιρα, μπορεί να οφείλεται σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες ή σε φυσικές διεργασίες. Οι ηφαιστειακές εκρήξεις απελευθερώνουν μεγάλες ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου και άλλων αερολυμάτων, δημιουργώντας τεράστια νέφη που συσσωρεύονται στην ατμόσφαιρα. Μία ηφαιστειακή έκρηξη, μπορεί να αποτελέσει μία παγκόσμια πηγή ατμοσφαιρικών ρύπων και έναν παγκόσμιο κίνδυνο.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι ρύποι οι οποίοι βρίσκονται στην ατμόσφαιρα και οφείλονται σε ηφαιστειακή δραστηριότητα μπορεί να βρίσκονται σε μορφή αιωρούμενων σωματιδίων (διακριτά σωματίδια σε υγρή ή στερεή μορφή) ή σε αέρια φυσική κατάσταση με μορφή αερίων ή ατμών.

Οι ρύποι, οι οποίοι μπορεί να ανιχνευθούν στην ατμόσφαιρα και να οφείλονται σε ηφαιστειακή δραστηριότητα, μπορεί να είναι πρωτογενείς, δηλαδή προϊόντα που έχουν παραχθεί από την ίδια την ηφαιστειακή δραστηριότητα ή δευτερογενείς, δηλαδή ρύποι οι οποίοι σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα ως αποτέλεσμα χημικού μετασχηματισμού των πρωτογενών ρύπων ή μπορεί να προκύψουν ως προϊόντα διαφόρων αντιδράσεων. Οι δευτερογενείς ρύποι, μπορούν να προκύψουν σε διαφορετικό τόπο και χρόνο από τον τόπο και το χρόνο της εκπομπής των πρωτογενών ηφαιστειακών ρύπων, από τους οποίους προέρχονται (π.χ. NO_2 , όξινη βροχή κλπ.).



Εικόνα 2.2. Πρωτογενής και Δευτερογενής σχηματισμός Σωματιδίων



Εικόνα 2.3. Πρωτογενείς και δευτερογενείς ατμοσφαιρικοί ρύποι

(<https://eclass.upatras.gr/modules/units/?course=ENV113&id=4589>)

Σημαντική παράμετρο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, αποτελεί και ο χρόνος ο οποίος, οι διάφορες χημικές ουσίες, παραμένουν στην ατμόσφαιρα και εξαρτάται κυρίως από τις φυσικές ιδιότητες του ρύπου και τη χημική του δραστηριότητα. Στοιχεία με μεγάλη χημική δραστηριότητα ή/και διαλυτότητα στο νερό, έχουν συνήθως χρόνο παραμονής από λίγες ώρες μέχρι μία εβδομάδα, ενώ σωματίδια με μέγεθος μικρότερο από 1 μm έχουν χρόνους παραμονής σημαντικά μεγαλύτερους.

Μέσοι χρόνοι παραμονής στην ατμόσφαιρα διαφόρων ουσιών

Ουσία	Χρόνος παραμονής
O ₃	0.4-90 ημέρες
NO	4-5 ημέρες
NO ₂	2-8 ημέρες
NO ₃	4-20 ημέρες
NH ₄	7-19 ημέρες
H ₂ S	0.08-2 ημέρες
SO ₂	0.01-7 ημέρες
SO ₄	3-5 ημέρες
Hg	11-2080 ημέρες
CO	0.9-2.7 έτη
CCl ₄	1 έτος
CH ₄	1.5-2 έτη
Freon	16 έτη
CO ₂	2-10 έτη

Εικόνα 2.4. Μέσοι χρόνοι παραμονής στην ατμόσφαιρα διαφόρων ουσιών

(πηγή: Γ.Ζιώμας ΕΜΠ 2007)

2.2. Επιπτώσεις της τέφρας και των ηφαιστειακών αερίων στην υγεία

Ηφαιστειακές εκρήξεις, συμβαίνουν σε όλο τον κόσμο επηρεάζοντας την υγεία με πολλούς τρόπους σε τοπικό αλλά και παγκόσμιο επίπεδο, είτε άμεσα, ως αποτέλεσμα της αερομεταφοράς της ηφαιστειακής τέφρας και των αερίων είτε έμμεσα, ως αποτέλεσμα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλούν, καθιστώντας τα ηφαιστειακά αέρια πιο επικίνδυνα ακόμα και από την καυτή ηφαιστειακή λάβα. Αν σκεφτεί κανείς ότι οι πυροκλαστικές ροές μπορεί να φτάσουν σε ταχύτητα ακόμα και τα 700 km/h ενώ τα σύννεφα τέφρας μπορεί να αγγίξουν θερμοκρασίες γύρω στους (1000 °C), μπορεί κανείς να κατατάξει τον ηφαιστειακό κίνδυνο σε έναν από τους μεγαλύτερους φυσικούς κινδύνους του πλανήτη μας (Bryant 2005).

Το 1873 για παράδειγμα, η έκρηξη του ηφαιστείου Λακαγκιγκάρ (Λάκι) στην Ισλανδία είχε σημαντικές επιπτώσεις στις ζωές των ανθρώπων αλλά και στο κλίμα της Ευρώπης, καθώς και άλλων περιοχών του κόσμου. Τα δηλητηριώδη νέφη που παρήχθησαν, με υψηλή περιεκτικότητα σε υδροφθορικό οξύ και διοξείδιο του θείου, σκότωσαν ένα μεγάλο μέρος του ζωικού βασιλείου της Ισλανδίας (λόγω της κατανάλωσης χορταριού μολυσμένου από φθόριο), οδηγώντας στη συνέχεια το νησί σε περίοδο λιμού, εξαιτίας και της καταστροφής των καλλιεργειών από όξινη βροχή. Περισσότερο από το ένα τέταρτο του πληθυσμού της Ισλανδίας, έχασε τη ζωή του από την πείνα. Οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, ήταν επίσης σοβαρές και εκτεταμένες. Καταγράφηκαν εκτεταμένα συμπτώματα άσθματος και ερεθισμού των ματιών. Στην Αγγλία η θνησιμότητα αυξήθηκε κατά 10% από τη μέση τιμή πεντηκονταετίας και υπήρξαν 10.000 περισσότεροι θάνατοι από τους αναμενόμενους, κατά μέσο όρο, για έναν χρόνο. Το καλοκαίρι του 1873, σε ορισμένες περιοχές της Γαλλίας, το ποσοστό των θανάτων, ήταν 38% πιο αυξημένο από το μέσο όρο (Durand, Grattan 1999).

Μία παρόμοιας κλίμακας ηφαιστειακή έκρηξη σήμερα, υπολογίζεται ότι θα ήταν ικανή να προκαλέσει το θάνατο χιλιάδων ανθρώπων στο Ηνωμένο Βασίλειο και τη Βόρεια Ευρώπη.

Το 79 μ.Χ. τα δηλητηριώδη αέρια που διέφυγαν από την έκρηξη του Βεζούβιου στη Νότια Ιταλία, οδήγησαν σε θάνατο από ασφυξία όσους κατοίκους της Πομπηίας βρήκαν καταφύγιο στα χαμηλότερα δωμάτια των σπιτιών τους αλλά και όσους βρέθηκαν στους δρόμους κατά την προσπάθεια τους να διαφύγουν.

2.2.1. Επιπτώσεις της ηφαιστειακής τέφρας και των αιωρούμενων σωματιδίων στην υγεία

A) Φυσικές Ιδιότητες Τέφρας και Αιωρούμενων Σωματιδίων και επιπτώσεις στην υγεία

Ο όρος τέφρα (tephra), είναι ένας γενικός όρος που χρησιμοποιείται για οποιαδήποτε υλικό το οποίο εκπέμπεται από τα ηφαίστεια στην ατμόσφαιρα, ενώ ο όρος ηφαιστειακή στάχτη (ash) αναφέρεται σε σωματίδια τα οποία έχουν διάμετρο μικρότερη από 2 mm (Hansell 2006).

Η μετακίνηση και η απόθεση της τέφρας γίνεται με δυο κυρίως τρόπους. Ο ένας είναι η ελεύθερη πτώση από το ύψος στο οποίο έχει εκτιναχθεί, και έτσι αποτίθενται τα στρώματα τέφρας πτώσης. Ο δεύτερος είναι η μετακίνηση της τέφρας ως ένα πυκνό ρευστό μείγμα θραυσμάτων μάγματος και αερίων που ρέει με μεγάλες ταχύτητες και θερμοκρασίες στις πλαγιές του ηφαιστείου. Οι ροές αυτές ονομάζονται πυροκλαστικά ρεύματα τέφρας. Στη μεγάλη πλειονότητα των ηφαιστειών συναντάται όλο το φάσμα δράσεων μεταξύ των δυο ακραίων τύπων, της έκχυσης και της έκρηξης.

Η κατανομή και διασπορά της ηφαιστειακής τέφρας στην ατμόσφαιρα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως ο τύπος, το μέγεθος, η ένταση και η διάρκεια της έκρηξης, το ύψος της ηφαιστειακής στήλης τέφρας, η ένταση και η κατεύθυνση του ανέμου καθώς και οι αλλαγές κατεύθυνσης που μπορεί να συμβούν (Sigurdsson 1999). Οι πιθανοί κίνδυνοι για την υγεία του πληθυσμού εξαρτώνται από τη θέση του ηφαιστείου σε σχέση με τις κατοικημένες περιοχές. Συνήθως οι κάτοικοι περιοχών που βρίσκονται κοντά στο ηφαίστειο, αναμένεται να πληγούν περισσότερο από μία ενδεχόμενη ηφαιστειακή δραστηριότητα άμεσα, λόγω μεγαλύτερης έκθεσης τους στην ηφαιστειακή τέφρα ή έμμεσα, εξαιτίας, για παράδειγμα, της ρύπανσης του πόσιμου νερού από το φθόριο (Hansell 2006) .

Βλάβες στην υγεία μπορεί να προκληθούν όχι μόνο από την έκθεση στις αρχικές ηφαιστειακές εκπομπές αλλά και από την επαναιώρηση του υλικού που έχει εναποτεθεί στο περιβάλλον, ημέρες, μήνες ή και χρόνια μετά την ηφαιστειακή έκρηξη (Monick et al. 2013).

Η ηφαιστειακή τέφρα που εκπέμπεται από μία ηφαιστειακή έκρηξη μπορεί να περιέχει σωματίδια αρκετά μεγάλα ή σκουρόχρωμα τα οποία να είναι ορατά σαν καπνός αλλά και σωματίδια τόσο μικρά, τα οποία να είναι δυνατόν να ανιχνευθούν μόνο με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Τα σωματίδια που συνθέτουν την ηφαιστειακή τέφρα δεν μπορεί να θεωρηθούν ως ένας ενιαίος ρύπος αλλά ως μίγμα πολλών ρύπων.

Με την πρώτη ματιά, η ηφαιστειακή τέφρα μοιάζει με μαλακή και ακίνδυνη σκόνη όμως, παρατηρώντας τη στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, διακρίνει κανείς ότι αποτελείται από ακανόνιστου σχήματος σωματίδια με αιχμηρές ακμές και υψηλή σκληρότητα, καθιστώντας τη ερεθιστική για τα μάτια. Επίσης λόγω της κυστικής δομής και των πολλαπλών κοιλοτήτων που περιέχουν τα σωματίδια σε συνδυασμό με την χαμηλή πυκνότητα και το πολύ μικρό της μέγεθος, αποκτά τη δυνατότητα να μεταφερθεί από τον άνεμο σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, προκαλώντας έτσι προβλήματα πολύ μακριά από το ηφαίστειο (USGS).



Εικόνα 2.5. Ηφαιστειακή στάχτη από την έκρηξη του Ηφαιστείου της Αγίας Ελένης το 1980

(πηγή: USGS image)

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι περισσότερες μελέτες των συνεπειών της έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια, βασίζονται στην αστική ρύπανση και έτσι δεν είναι αντιπροσωπευτικές της ηφαιστειακής ρύπανσης. Πρόσφατες μελέτες πάντως έδειξαν ότι, ακόμα και σε χαμηλά επίπεδα ($<100 \mu\text{g m}^{-3}$), μικρής διάρκειας έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια οποιουδήποτε εύρους μεγέθους μπορεί να σχετίζεται με επιπτώσεις στην υγεία (WHO, 1999). Επιδημιολογικές μελέτες έδειξαν επίσης αύξηση της θνησιμότητας και της διακομιδής ασθενών στα νοσοκομεία σε συνδυασμό με την αύξηση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Όταν η έκθεση στην ατμοσφαιρική ρύπανση τελειώσει δεν υπάρχουν μακροπρόθεσμες συνέπειες στην υγεία, εκτός εάν η αρχική δόση ήταν πολύ υψηλή κάτι το οποίο υπάρχουν περισσότερες πιθανότητες να συμβεί σε ένα βιομηχανικό ατύχημα, παρά σε μια ηφαιστειακή έκρηξη (Braga et al, 2001).

Οι επιπτώσεις οι οποίες θα επέλθουν στην υγεία από την απελευθέρωση της ηφαιστειακής τέφρας, εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως η χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων, η συγκέντρωση και το μέγεθος τους, η διάρκεια της έκθεσης σε αυτά, καθώς και οι αλληλεπιδράσεις που τα σωματίδια μπορούν να αναπτύξουν με άλλα συστατικά της ατμόσφαιρας.

Μπορεί να αποτελούνται από μέταλλα, ανόργανα ιόντα, οργανικές ενώσεις ή βιολογικά υλικά. Τα αιωρούμενα σωματίδια, μπορούν να δράσουν ως προσροφητικές και καταλυτικές επιφάνειες. Για το λόγο αυτό το μέγεθός τους είναι ιδιαίτερα καθοριστικό όσον αφορά τις επιπτώσεις τους στην υγεία.

Σημαντικός παράγοντας επίσης όσον αφορά τις επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στην υγεία είναι το pH τους. Πιστεύεται ότι τα όξινα αιωρούμενα σωματίδια μπορεί να αποτελέσουν μεγαλύτερο κίνδυνο για την υγεία από τα βασικά ή ουδέτερα. Μέταλλα τα οποία περιέχονται στα ηφαιστειακά νέφη όπως ο υδράργυρος, το ιρίδιο, το αρσενικό και άλλα, μπορούν να καταλύσουν αντιδράσεις και σε συνδυασμό με όξινα αέρια και αερολύματα να αυξήσουν τις αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία. Η πολύ μικρής διαμέτρου τέφρα (fine ash), είναι ένα αερόλυμα το οποίο, εάν έχει προσροφήσει όξινα αέρια στο ηφαιστειακό νέφος, μπορεί να είναι επίσης όξινο (Baxter et al 1999).

Τα μικρού μεγέθους αιωρούμενα σωματίδια έχουν την τάση να παραμένουν στην τροπόσφαιρα για διάστημα που διαρκεί από λίγες μέρες έως και εβδομάδες και να μπορούν να

ταξιδεύουν αποστάσεις ακόμα και χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά από την πηγή εκπομπής τους, με αποτέλεσμα να διασπείρονται ευρέως.

Τα σωματίδια με μεγαλύτερη διάμετρο, πλήττουν τις περιοχές που βρίσκονται πιο κοντά στο ηφαίστειο και έχουν την τάση να επηρεάζουν την ανώτερη αναπνευστική οδό.

Η ηφαιστειακή τέφρα λοιπόν, μπορεί να περιέχει σωματίδια με μέγεθος μεγαλύτερο από 64mm, μπορεί να περιέχει λιθάρια (lapilli) με μέγεθος από 2 έως 64 mm καθώς και στάχτη (ash) με μέγεθος σωματιδίων μικρότερο από 2 mm. Η ηφαιστειακή τέφρα, μπορεί επίσης να αποτελέσει σημαντική πηγή για την ατμόσφαιρα, αιωρούμενων σωματιδίων (Suspended Particulate Matter) PM_{10} (χονδρόκοκκα σωματίδια, με διάμετρο 2,5-10 μm), $PM_{2,5}$ (λεπτόκοκκα σωματίδια, με διάμετρο μικρότερη από 2,5 μm) και αιωρούμενων σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη από 0,1 μm (πολύ λεπτόκοκκα σωματίδια, ultra fine).

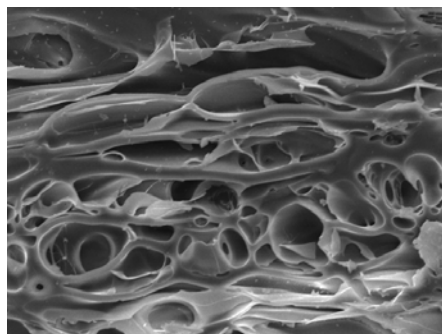


Εικόνα 2.6. Ηφαιστειακή στάχτη στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο

(πηγή: USGS image)

Τα λεπτότερα σωματίδια (μικρότερα από PM_{10}) θεωρούνται και τα πιο επικίνδυνα, αφού είναι εκείνα που καταφέρνουν να φτάσουν σε πιο απομακρυσμένα από το ηφαίστειο μέρη και έχουν την ιδιότητα να μπορούν να διεισδύσουν σε σημεία βαθύτερα μέσα στους πνεύμονες (Allen et al, 2002).

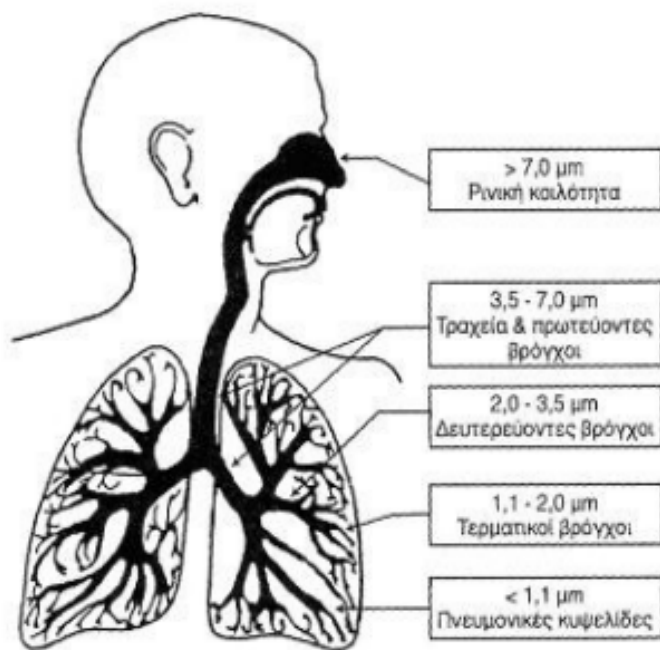
Τα λεπτότερα σωματίδια (μικρότερα από PM_{10}) θεωρούνται και τα πιο επικίνδυνα, αφού είναι εκείνα που καταφέρνουν να φτάσουν σε πιο απομακρυσμένα από το ηφαίστειο μέρη και έχουν την ιδιότητα να μπορούν να διεισδύσουν σε σημεία βαθύτερα μέσα στους πνεύμονες (Allen et al, 2002).



Εικόνα 2.7. Ηφαιστειακή τέφρα στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο

(πηγή: αρχείο Κωνσταντίνου Κυριακόπουλου)

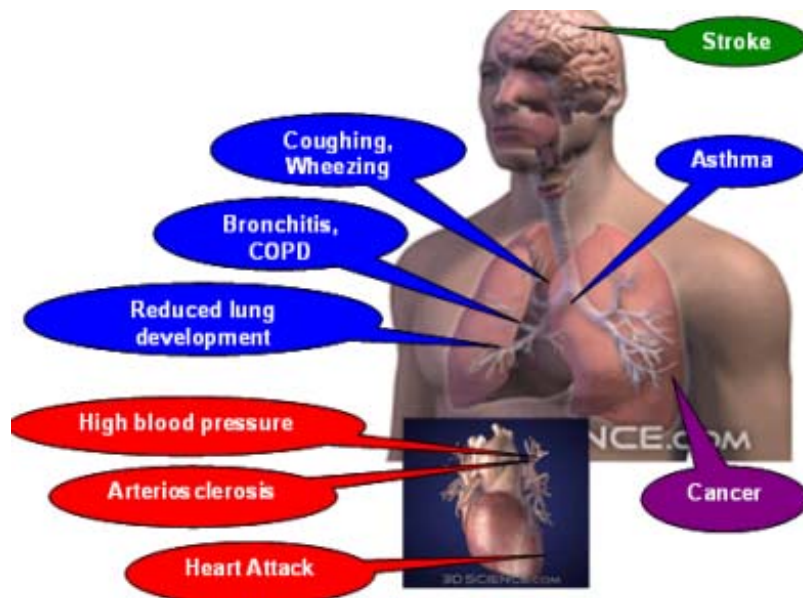
Τα $PM_{2,5}$ σωματίδια, έχουν ακόμα μεγαλύτερη πιθανότητα εναπόθεσης στις κυψελίδες των πνευμόνων και η μέση ετήσια οριακή συγκέντρωση γι αυτά είναι τα 10 mg/m^3 ενώ για τα PM_{10} σωματίδια η μέση ετήσια οριακή συγκέντρωση είναι τα 20 mg/m^3 με τη σύσταση η μέση ημερήσια συγκέντρωση να μην ξεπερνάει την τιμή των 50 mg/m^3 για περισσότερες από 35 ημέρες το χρόνο (WHO air quality guideline). Τα λεπτόκκοκα σωματίδια ξεπερνούν τα ανατακλαστικά του φτερνίσματος και του βήχα, κατεβαίνουν στις κυψελίδες και καταφέρνουν και διεισδύουν μέσα στο κυκλοφοριακό σύστημα του ανθρώπου με αποτέλεσμα το αίμα να τα πηγαίνει παντού. Έτσι μπορεί να δημιουργηθεί τοξικότητα σε όλα τα όργανα του οργανισμού και όχι μόνο στο αναπνευστικό. Το γεγονός ότι δεν υπάρχουν πάντα ορατά συμπτώματα σε όσους εκτίθενται στα αιωρούμενα σωματίδια, δεν σημαίνει ότι δεν έχουν υποστεί βλάβες. (Νικολοπούλου-Σταμάτη 2008) .



Εικόνα 2.8. Διεισδυτικότητα των αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα, ανάλογα με το μέγεθός τους

(πηγή: Ελευθεριάδης 2015 – ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος)

Γενικά, η είσοδος αιωρούμενων σωματιδίων μέσα στον πνεύμονα, ενεργοποιεί τα μακροφάγα κύτταρα, τα οποία στη συνέχεια θα εκκρίνουν ουσίες, οι οποίες όχι μόνο ευνοούν την ανάπτυξη φλεγμονών, προάγουν το οξειδωτικό stress και επιβαρύνουν και την υγεία γενικότερα. Επίσης από τη δράση των μακροφάγων κυττάρων μπορεί να παραχθούν ουσίες που ενεργοποιούν την ανάπτυξη του συνδετικού ιστού σε μεγαλύτερες ποσότητες από το φυσιολογικό, οδηγώντας τους πνεύμονες σε σταδιακή μείωση της ελαστικότητάς και της κινητικότητάς τους καθώς και αδυναμία σωστής ανταλλαγής αερίων και οξυγόνωσής τους. Η έκθεση σε ηφαιστειακή σκόνη μπορεί να προκαλέσει ερεθισμό στο στήθος, στη μύτη και δυσφορία στο λαιμό με οξείες εξάρσεις του άσθματος και της βρογχίτιδας. Είναι δυνατόν να προκαλέσει αυξημένο βήχα και συριγμό, δύσπνοια και σφίξιμο στο στήθος.

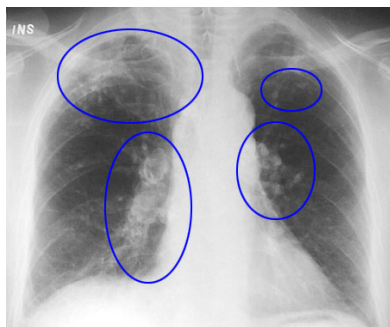


Εικόνα 2.9. Επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια

(πηγή: Ελευθεριάδης ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος)

Επίσης χωρίς να έχουν αναφερθεί περιπτώσεις στη διεθνή βιβλιογραφία, υπάρχουν ανησυχίες, ότι σε περίπτωση εισπνοής υψηλού ποσοστού λεπτών σωματιδίων τέφρας, με υψηλή συγκέντρωση σε κρυσταλλικό πυρίτιο για μεγάλο χρονικό διάστημα υπάρχει το ενδεχόμενο ο ασθενής να νοσήσει από μία ασθένεια του αναπνευστικού που ονομάζεται πυριτίαση (silicosis) (Horwell, Baxter 2006).

Στην πυριτίαση, παρατηρούνται βλάβες στους πνεύμονες και ουλές που οφείλονται στην έκθεση στο κρυσταλλικό πυρίτιο. Τα ορκετά που σχετίζονται με την πυριτίαση, μπορεί δυνητικά να βρίσκονται στην ηφαιστειακή τέφρα.



Εικόνα 2.10. Πνεύμονες με πυριτίαση

(πηγή: <http://serc.carleton.edu>)

Εκτός από το αναπνευστικό σύστημα, επιπτώσεις μπορεί να υπάρξουν και στο καρδιαγγειακό σύστημα. Τα μικροσωματίδια «επιτίθενται» μέσα στα αγγεία της καρδιάς με αποτέλεσμα, την πρόκληση στενώσεων σε αυτά τα αγγεία καθώς και την αύξηση και πάχυνση του λείου μυϊκού συστήματος του τοιχώματος του αγγείου και κατά συνέπεια την αύξηση της πιθανότητας για έμφραγμα (Νικολοπούλου-Σταμάτη 2008).

Η εισπνοή μικρής διαμέτρου σωματιδίων ηφαιστειακής σκόνης, μπορεί να επιδεινώσει ήδη υπάρχοντα νοσήματα όπως η χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια ή η ισχαιμική καρδιοπάθεια ακόμα και σε περιοχές που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από το ηφαίστειο. Σύμφωνα με μελέτη που πραγματοποιήθηκε στη Νέα Ζηλανδία, η αύξηση της θνησιμότητας στην πόλη Χάμιλτον, πιθανότατα συσχετίζεται με την ηφαιστειακή τέφρα που απελευθερώθηκε από το ηφαίστειο Ρουαπεχού το 1996, το οποίο βρισκόταν σε απόσταση 166 Km από την πόλη (Newnham, Dirks, Samaranayake 2010).

Άτομα με προϋπάρχοντα προβλήματα του αναπνευστικού συστήματος καθώς και ασθενείς που πάσχουν από άσθμα, παρουσιάζουν συμπτώματα σε μικρότερες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα σε σχέση με άτομα που δεν έχουν επιβαρυνμένο ιατρικό ιστορικό. Επίσης ηλικιωμένοι και μικρά παιδιά παρουσιάζουν αυξημένη ευαισθησία.

Η έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια, ιδιαίτερα μεγαλύτερης διαμέτρου ενδέχεται να προκαλέσει και οφθαλμολογικά συμπτώματα όπως ερεθισμό του κερατοειδή χιτώνα και επιπεφυκίτιδα καθώς επίσης και δερματικές ενοχλήσεις.

B) Επιτρεπτά όρια αιωρούμενων σωματιδίων

Κατευθυντήριες γραμμές για τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων, έχουν προταθεί τόσο για τον αέρα του περιβάλλοντος, όσο και για τους επαγγελματικούς χώρους εργασίας. Υπάρχουν οδηγίες όσον αφορά τη συνολική σωματιδιακή ύλη (TPM Total Particular Matter) όσο και για συγκεκριμένα κλάσματα αιωρούμενων σωματιδίων όπως τα PM_{2,5} και PM₁₀. Το 1971, η υπηρεσία προστασίας περιβάλλοντος των ΗΠΑ (USA Environmental Protection Agency (EPA)), καθόρισε το επίπεδο των σωματιδίων που θα μπορούσαν να προκαλέσουν σημαντικές βλάβες στην υγεία σε 1000 μg m⁻³ (μέσο όρο 24ώρου). Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι το επίπεδο αυτό μειώνεται όταν υπάρχει αυξημένη συγκέντρωση οξειδίων του θείου. Επίσης η τιμή αυτή είναι σημαντικά χαμηλότερη από τις κατευθυντήριες γραμμές που έχουν δοθεί για τα πρότυπα του αέρα περιβάλλοντος στους χώρους εργασίας.

Μεταξύ των κατευθυντήριων γραμμών που έχει θεσπίσει η κάθε χώρα ή οργανισμός, σχετικά με τις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων, υπάρχουν μεγάλες διαφορές. Αυτό οφείλεται στην ηλικία της κατευθυντήριας γραμμής, στην πρακτική υλοποίηση ενός προτύπου με βάση τα τρέχοντα και προβλεπόμενα επίπεδα ρύπανσης ή στα διαφορετικά δεδομένα πάνω στα οποία βασίσθηκε ο σχεδιασμός του προτύπου (π.χ. επιδημιολογική μελέτη σε σχέση με πραγματικά επίπεδα ρύπανσης).

Πίνακας 2-1. Σύνοψη κύριων κατευθυντήριων γραμμών για κάθε μέγεθος σωματιδίων

Μέσο όρος περιόδου	TPM		PM ₁₀		PM _{2,5}	
	Min (μg m ⁻³)	Max (μg m ⁻³)	Min (μg m ⁻³)	Max (μg m ⁻³)	Min (μg m ⁻³)	Max (μg m ⁻³)
24ωρο	120	500	50	250	65	65
έτος	40	150	20	150	15	15

Γ) Εκλύσεις Αιωρούμενων Σωματιδίων και Τέφρας λόγω ηφαιστειακής δραστηριότητας

Οι ηφαιστειακές εκπομπές σωματιδίων, μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα ακόμα και σε αρκετά μεγάλη απόσταση από την πηγή. Τα υψηλότερα επίπεδα σωματιδίων μπορεί να βρεθούν σε απόσταση δεκάδων χιλιομέτρων μακριά από το ηφαίστειο (Yano et al., 1990). Επιπλέον τα ηφαιστειακά αέρια κοντά στα σημεία έκλυσης των αερίων μπορεί να γίνουν πολύ επικίνδυνα σε περίπτωση που περιέχουν θειικά ιόντα (SO_4^{-2}).

Στο χείλος του κρατήρα Masaya, στη Νικαράγουα, το Δεκέμβριο του 2001, καταγράφηκαν οι μέγιστες συγκεντρώσεις θειικών ιόντων που έφταναν την τιμή των $165 \mu\text{g m}^{-3}$ κατά μέσο όρο για έκθεση 6 ωρών (Mather et al. 2003). Η μέση τιμή των συγκεντρώσεων ήταν περίπου $125 \mu\text{g m}^{-3}$, τιμή σχεδόν διπλάσια από τις κατευθυντήριες γραμμές για την ποιότητα του αέρα περιβάλλοντος που έχουν δοθεί από τις ΗΠΑ, όσον αφορά τα αιωρούμενα σωματίδια $\text{PM}_{2.5}$. Οι συγκεντρώσεις αυτές εγκυμονούν πιθανούς κινδύνους για την υγεία τόσο για τους τουρίστες, όσο και για τους ηφαιστειολόγους που εργάζονται στην περιοχή (Delmelle et al., 2002).

Σε ορισμένες περιπτώσεις, στο ηφαιστειακό νέφος αερίων, οι συγκεντρώσεις μπορεί να είναι αρκετά χαμηλές. Για παράδειγμα, οι συγκεντρώσεις στο ηφαιστειακό νέφος κατάντη του ηφαιστείου της Αίτνας το Σεπτέμβριο του 1993 είχαν τιμές ανάμεσα σε $0.1 \mu\text{g m}^{-3}$ και $10 \mu\text{g m}^{-3}$ (Bergametti et al. 1984, Martin et al., 1986).

Σε μετρήσεις που έγιναν τα έτη 1989 και 1990 για τα επίπεδα των σωματιδίων PM_{10} , δεκάδες χιλιόμετρα μακριά από τον κρατήρα του ενεργού ηφαιστείου Kilauea της Χαβάης, οι μέσες συγκεντρώσεις, είχαν τιμή $11.1 \mu\text{g m}^{-3}$. Και στα δύο προαναφερόμενα παραδείγματα, οι μετρούμενες τιμές συγκεντρώσεων, ήταν μέσα στα όρια των κατευθυντηρίων γραμμών για την ποιότητα του αέρα περιβάλλοντος. Ωστόσο, σύμφωνα με αδημοσίευστα στοιχεία (National Park Service, 2003 unpublished data) οι μέσες συγκεντρώσεις μίας ώρας των $\text{PM}_{2.5}$ στο πάρκο επισκεπτών του Kilauea, ξεπερνούσε τα 80 mg m^{-3} , κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων συνθηκών αέρα. Από το 1987-1991, κατά τη διάρκεια της συνεχούς φάσης της έκρηξης του ηφαιστείου Kilauea, οι επισκέψεις στα επείγοντα περιστατικά καθώς και οι εισαγωγές στα νοσοκομεία εξαιτίας της χρόνιας αποφρακτικής πνευμονοπάθειας και του άσθματος αυξήθηκαν στο νησί της Χαβάης σε σύγκριση με τα ποσοστά από το 1981 έως το 1986 (Mannino et al., 1996). Ωστόσο δεν μπορεί να υπάρξει άμεση συσχέτιση μεταξύ αυτής της αύξησης και της ηφαιστειακής εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων ή ηφαιστειακών αερίων. Η παρουσία επίσης μετάλλων και όξινων σωματιδίων στο ηφαιστειακό νέφος του Kilauea εγείρει ανησυχίες σχετικά με τις πιθανές αρνητικές επιπτώσεις του νέφους στην υγεία του πληθυσμού.

Τα αιωρούμενα σωματίδια, μπορεί να αυξηθούν τοπικά και κατά διαστήματα ανάλογα με την ηφαιστειακή δραστηριότητα και τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν. Στην περιοχή του ηφαιστείου Popocatepetl στο Μεξικό, τα αιωρούμενα σωματίδια που περιείχαν θείο, πιθανότατα διπλασιάστηκαν εξαιτίας των ηφαιστειακών εκπομπών (Moya et al., 2003; Raga et al., 1999) ενώ οι τιμές τους ήταν ήδη πάνω από τα πρότυπα 24ωρου για την ποιότητα του αέρα περιβάλλοντος, τις περισσότερες ημέρες του έτους. Έτσι οι ηφαιστειακές εκπομπές αερολυμάτων αύξησαν σημαντικά τον κίνδυνο για την υγεία του πληθυσμού. Από το Δεκέμβριο του 1994 μέχρι τον Απρίλιο του 1995, η μέγιστη συγκέντρωση του συνόλου των αιωρούμενων σωματιδίων που οφείλονταν σε εκπομπές του ηφαιστείου Popocatepetl, σε απόσταση 15 km από το ηφαίστειο, έφτασε τα $1440 \mu\text{g m}^{-3}$ (Rojas-Ramos et al., 2001), τιμή πέντε φορές μεγαλύτερη από τα πρότυπα για την ποιότητα του αέρα που έχει θεσπίσει το Μεξικό για τη συνολική συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων (TPM standard).

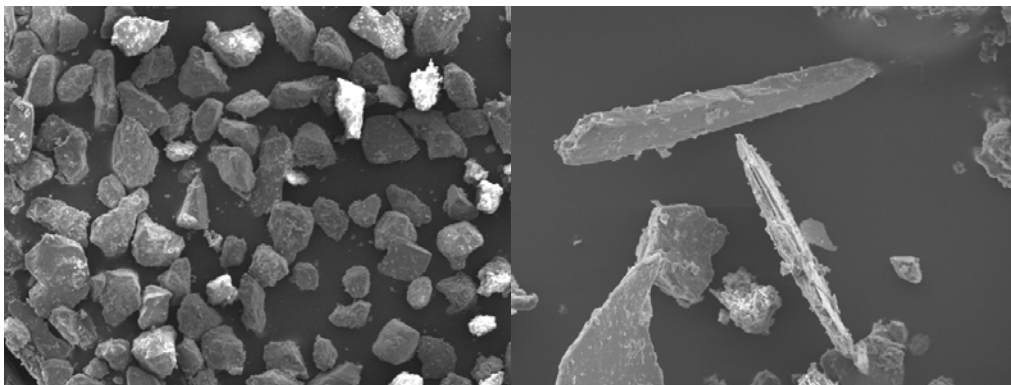
Στην περιοχή του ηφαιστείου Colima, στην ηφαιστειακή ζώνη του Μεξικό, υπάρχουν στοιχεία ότι η πολύ λεπτή ηφαιστειακή σκόνη (fine ash) με σωματίδια $PM_{1,5}$ έως και $PM_{2,5}$ που περιείχαν χαλκό (Cu), θείο (S), χλώριο (Cl) και ψευδάργυρο (Zn), εξαιτίας των ηφαιστειακών εκπομπών και ευνοϊκών συνθηκών ανέμου (Miranda et al., 2004).

Στην περιοχή του ενεργού ηφαιστείου Soufrière Hills, στο Μοντσεράτ, στην Καραϊβική, οι συγκεντρώσεις περιβάλλοντος των PM_{10} σωματιδίων και της εισπνεόμενης σκόνης στην περιοχή κοντά στο ηφαίστειο, είχε εύρος από 100 έως 500 $\mu g\ m^{-3}$ κατά τη διάρκεια των εκρήξεων του 1997 και 1998 (Searl et al., 2002). Οι τιμές αυτές υπερέβαιναν τα πρότυπα για την ποιότητα του αέρα περιβάλλοντος του Ηνωμένου Βασιλείου. Πολλές φορές επίσης παρατηρήθηκε επαναιώρηση της λεπτής ηφαιστειακής σκόνης γεγονός που όπως είναι φυσικό επηρεάζει περισσότερο άτομα που ασχολούνται με συγκεκριμένες δραστηριότητες (π.χ. σκούπισμα εξωτερικών χώρων).

Εξαιτίας της έκρηξης του ηφαιστείου της Αγίας Ελένης στις ΗΠΑ, στις 18 Μαΐου του 1980, τα συνολικά επίπεδα αιωρούμενων σωματιδίων (TSP Total Suspended Particulate), σε συνθήκες χαμηλής έντασης ανέμου, έφτασαν κατά μέσο όρο τα 33.402 $\mu g\ m^{-3}$ και παρέμεινε πάνω από τα 1000 $\mu g\ m^{-3}$ για μια εβδομάδα. Σε σύγκριση με το μέσο επίπεδο των 80 $\mu g\ m^{-3}$, υπερέβαιναν κατά πολύ τα πρότυπα για την ποιότητα του αέρα του περιβάλλοντος (Baxter et al., 1983). Το μεγαλύτερο ποσοστό της τέφρας που είχε αποτεθεί, περιείχε σωματίδια PM_{10} τα οποία και ενοχοποιήθηκαν για τις αυξήσεις στην αναπνευστική νοσηρότητα (Bernstein et al., 1986). Οι ομάδες οι οποίες εκτέθηκαν περισσότερο στην επαναιωρούμενη σκόνη, ήταν οι εργαζόμενοι έκτακτης ανάγκης και οι αστυνομικοί (Baxter et al., 1981).

Στην περιοχή του ηφαιστείου Πινατούμπο στις Φιλιππίνες, ενδέχεται η ηφαιστειακή σκόνη, να ήταν η αιτία της αυξημένης θνησιμότητας εξαιτίας των αναπνευστικών λοιμώξεων που εκδηλώθηκαν τους επόμενους μήνες μετά την έκρηξη του 1991 (Mason, 2002).

Αν και σε πολλές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα φαίνεται να υπάρχει μια θετική συσχέτιση ανάμεσα στην αυξημένη συγκέντρωση ηφαιστειακών σωματιδίων και σε αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία ατόμων τα οποία μπορεί να εκτίθενται βραχυπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα στην ηφαιστειακή σκόνη, είναι πολύ δύσκολο να διαχωρισθούν οι επιπτώσεις στην υγεία που προκαλεί η τέφρα, από τις επιπτώσεις των αερίων και γενικά των αερολυμάτων με διαφορετική χημική σύσταση.



Εικόνα 2.11. Ηφαιστειακή τέφρα στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο

(πηγή: αρχείο Κωνσταντίνου Κυριακόπουλου)

2.2.2. Επιπτώσεις των Οξειδίων του άνθρακα στην υγεία

2.2.2.1. Διοξείδιο του Άνθρακα (CO₂)

A) Φυσικές Ιδιότητες Διοξειδίου του Άνθρακα

Το διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί περίπου το 0.04 % του αέρα της γήινης ατμόσφαιρας και αποτελεί επίσης σημαντικό συστατικό του κύκλου του άνθρακα. Είναι από τα βασικά συστατικά του μίγματος των ηφαιστειακών αερίων σε ποσοστά που κυμαίνονται από 10 έως 40% των εκλυόμενων αερίων. Η μέση περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε διοξείδιο του άνθρακα είναι 385 ppm. Δηλαδή σε ένα εκατομμύριο μέρη ατμοσφαιρικού αέρα τα 385 μέρη θα είναι CO₂.

Είναι αέριο άχρωμο, άοσμο και άγευστο σε κανονικές συνθήκες πίεσης (1 atm) και θερμοκρασίας (25° C). Είναι επίσης μη εύφλεκτο και χημικά μη ενεργό (Sax and Lewis, 1989). Το διοξείδιο του άνθρακα είναι επίσης ένα από τα σημαντικότερα αέρια του θερμοκηπίου. Η πυκνότητά του είναι 1.8 g/l στους 25° C και σε πίεση 1 atm (Lide 2003), γεγονός που το καθιστά μιάμιση φορά πιο βαρύ από τον αέρα. Λόγω της ιδιότητάς του αυτής, όταν εκλύεται αργά, μπορεί να συσσωρευτεί σε χαμηλά υψόμετρα. Ο χρόνος παραμονής του στην κατώτερη ατμόσφαιρα είναι περίπου τέσσερα χρόνια (Brimblecombe, 1996).

Η προέλευση του διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να είναι διαφορετική. Έτσι η πηγή του διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να είναι βιογενής (αναπνοή) ή να προέρχεται από οξείδωση υδρογονανθράκων. Επίσης διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να προκύψει από τη θερμική ή χημική διάσπαση του ασβεστολιθικών πετρωμάτων ή από την απαέρωση του μανδύα. Οι βιογενείς διαδικασίες καθώς και η οξείδωση των υδρογονανθράκων σπάνια δημιουργούν επικίνδυνες συσσωρεύσεις διοξειδίου του άνθρακα. Αντίθετα τα ανθρακικά ορυκτά του φλοιού της Γης, μπορεί να απελευθερώσουν τεράστιες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα. Το διοξείδιο του άνθρακα που εκλύεται στην Ελλάδα από τις εκδηλώσεις του φυσικού αερίου, έπειτα από προσδιορισμό με ισότοπα, φαίνεται να παρουσιάζει μικτή καταγωγή, με ανάλογες εισφορές τόσο από το μανδύα όσο και από τα θαλάσσια ανθρακικά άλατα (D'Alessandro et al. 2010).

B) Επιτρεπτά όρια σε Διοξείδιο του Άνθρακα

Ως επιτρεπτό όριο έκθεσης για το διοξείδιο του άνθρακα, θεωρείται το όριο των 500 ppm κατά τη διάρκεια μίας οκτάωρης έκθεσης την ημέρα (NIOSH 1976). Έκθεση σε τιμές συγκέντρωσης μεγαλύτερες από 40.000 ppm, θεωρείται άμεσα επικίνδυνη για τη ζωή και την υγεία με βάση το γεγονός ότι έκθεση για 30 λεπτά σε συγκέντρωση 50.000 ppm, μπορεί να προκαλέσει τοξική δηλητηρίαση και συγκεντρώσεις της τάξης του 7-10% προκαλούν απώλεια συνειδήσεως. Έκθεση για διάστημα πέντε λεπτών σε συγκέντρωση 9.000 ppm (9%), μπορεί να αποβεί θανατηφόρα (NIOSH 1996).

Γ) Επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση σε Διοξείδιο του Άνθρακα

Σε υψηλές συγκεντρώσεις το διοξείδιο του άνθρακα είναι ένα τοξικό, ασφυξιογόνο αέριο, λόγω της μείωσης του οξυγόνου που μπορεί να προκαλέσει στο αίμα.

Εισέρχεται στο σώμα από την ατμόσφαιρα μέσω των πνευμόνων, διαχέεται στο αίμα και μπορεί να είναι υπεύθυνο για τη διαταραχή της οξεοβασικής ισορροπίας στον οργανισμό,

προκαλώντας οξέωση και τελικά καταστολή του Κεντρικού Νευρικού Συστήματος (Nelson 2000).

Φυσιολογικά, στο αίμα υπάρχει υψηλότερη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα απ' ότι στους πνεύμονες, ώστε να επιτυγχάνεται η διάχυσή του διοξειδίου στους πνεύμονες και στη συνέχεια η αποβολή του μέσω της εκπνοής. Αύξηση του εισπνεόμενου διοξειδίου του άνθρακα, συνεπάγεται, αντίδρασή του με το νερό του αίματος και εν συνεχεία δημιουργία ανθρακικού οξέος, το οποίο θα δώσει ιόντα υδρογόνου σύμφωνα με την αντίδραση:



Η παραγωγή περίσσειας ιόντων υδρογόνου, θα δημιουργήσει όξινο περιβάλλον με αποτέλεσμα το pH του αίματος να πέσει κάτω από το 7.35 με αποτέλεσμα τη διαταραχή της ισορροπίας των ηλεκτρολυτών (Priestly 2003). Επιπλέον, η μειωμένη ποσότητα του οξυγόνου στο αίμα, δεν επαρκεί για να καλύψει τις απαιτούμενες ποσότητες, που χρειάζονται τα κύτταρα για την επιβίωσή τους. Ταυτόχρονα, οι πνεύμονες προσπαθούν να αντισταθμίσουν την περίσσεια του διοξειδίου, κατάσταση η οποία γίνεται εμφανής με την ταχεία αναπνοή.

Υψηλές συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα λοιπόν, είναι δυνατόν να επηρεάσουν την αναπνευστική λειτουργία και να οδηγήσουν σε καταστολή του Κεντρικού Νευρικού Συστήματος με αποτέλεσμα το θάνατο (IVHHN 2005). Μεγάλη συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα συνεπάγεται μείωση της συγκέντρωσης του οξυγόνου. Η περιορισμένη διαθεσιμότητα του ατμοσφαιρικού οξυγόνου, εκτός από γρήγορη αναπνοή, οδηγεί και σε άλλα συμπτώματα, όπως ταχυκαρδία, κόπωση, αδυναμία συντονισμού των κινήσεων, ιλίγγους, αδυναμία συγκέντρωσης, συναισθηματικές διαταραχές, αποπροσανατολισμό, ναυτία, εμετό, σπασμούς, κώμα και θάνατο. Τα συμπτώματα εμφανίζονται ακόμα πιο γρήγορα στην περίπτωση που το άτομο έχει ταυτόχρονη φυσική δραστηριότητα. Η έλλειψη οξυγόνου, μπορεί να προκαλέσει μόνιμη βλάβη σε ζωτικά όργανα όπως ο εγκέφαλος και η καρδιά. Η έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα μπορεί επίσης να είναι υπεύθυνη για ερεθισμό των ματιών, της μύτης και του λαιμού.

Τα συμπτώματα έκθεσης σε αυξανόμενες συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (NIOSH 1981, Baxter 2000, IVHHN 2005):

Πίνακας 2-2. Συμπτώματα έκθεσης σε αυξανόμενες συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα

%CO ₂	Συμπτώματα
2-3	δύσπνοια κατά τη δραστηριότητα
3	δύσπνοια, βαθιά αναπνοή
3-5	αύξηση του αναπνευστικού ρυθμού, πονοκέφαλος έπεται από παρατεταμένη έκθεση
5	βαριά και δύσκολη αναπνοή, εφίδρωση, πονοκέφαλος, καρδιακή

	αρρυθμία
7.5	γρήγορη αναπνοή και δύσπνοια, κεφαλαλγία, ζαλάδα, ανησυχία, ταχυκαρδία, αύξηση αρτηριακής πίεσης, θολή όραση, υπνηλία
7.5-15	κεφαλαλγία, διαταραχή ακοής, ναυτία, εμετός, απώλεια συνείδησης, πιθανός θάνατος αν ο ασθενής δεν λάβει αμέσως οξυγόνο
25+	κώμα, σπασμοί, θάνατος

Συμπτώματα ασφυξίας δεν έχουν παρατηρηθεί έπειτα από μακροχρόνια έκθεση σε χαμηλές συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα ενώ έχουν αναφερθεί προσαρμοστικοί φυσιολογικοί μηχανισμοί για την αντιμετώπιση της χρόνιας έκθεσης (CCOHS 2005).

Δ) Εκλύσεις Διοξειδίου του Άνθρακα λόγω ηφαιστειακής δραστηριότητας

Κατά μέσο όρο η ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα που απελευθερώνεται σε ένα χρόνο, λόγω της ηφαιστειακής δραστηριότητας, κυμαίνεται από 180 έως 440 εκατομμύρια τόνους (πηγή:USGS) και είναι ένα από τα βασικά ηφαιστειακά αέρια (εικόνα 5). Μετά την εκπομπή του από τα ηφαίστεια, αραιώνεται και φτάνει σε συγκεντρώσεις, οι οποίες δεν είναι απειλητικές για τη ζωή.

Παρόλα αυτά, υπάρχουν πολυάριθμες περιπτώσεις ηφαιστειακής δραστηριότητας οι οποίες έχουν καταγραφεί εδώ και αιώνες και κατά τις οποίες χάθηκαν ανθρώπινες ζωές από την έκθεση σε μεγάλες συγκεντρώσεις εκλυόμενου διοξειδίου του άνθρακα. Λόγω της μεγαλύτερης του πυκνότητας από αυτήν του ατμοσφαιρικού αέρα, όπως ήδη έχει αναφερθεί, η περίσσεια του εκλυόμενου διοξειδίου του άνθρακα, ρέει κάτω από τις πλαγιές του βουνού και παγιδεύεται κοντά στο έδαφος (IVHHN 2005).

Το 1794 έπειτα από έκρηξη στο Βεζούβιο της Ιταλίας, περίπου 400 άτομα έχασαν τη ζωή τους από εισπνοή διοξειδίου του άνθρακα. Το 1872, στην ίδια περιοχή, άγνωστος αριθμός θανάτων προκλήθηκαν από το διοξείδιο του άνθρακα και άλλοι 7 το 1873 (Simkin, Siebert, 1994). Οι συγκεντρώσεις σε διοξείδιο του άνθρακα των εκλυόμενων από το Βεζούβιο αερίων, πολλές φορές έφτασαν και το 100% οδηγώντας στο θάνατο, μεγάλο αριθμό ατόμων (IVHHN 2005). Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, θεωρήθηκαν υπεύθυνες για περιστασιακούς θανάτους ζώων (κουνέλια και κατσίκες) και για το θάνατο δύο παιδιών (Baubron et al., 1990). Το 1988, έπειτα από μετρήσεις που έγιναν σε μια πυκνοκατοικημένη, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, περιοχή, βρέθηκαν πολύ υψηλές συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα στο έδαφος και σε πηγάδια νερού στην περιοχή γύρω από το ηφαίστειο. Οι συγκεντρώσεις που μπορεί σε κάποια σημεία να έφταναν και το 100%, οδήγησαν τα αρχές στην απόφαση να απαγορεύσουν την κατασκήνωση στην περιοχή αυτή.

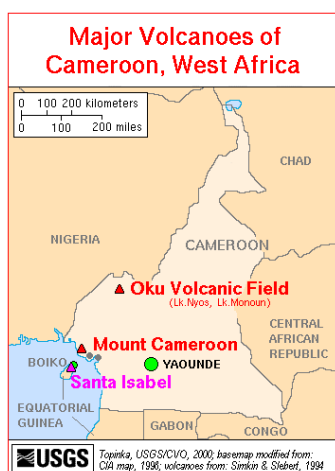
Στις 20 Φεβρουαρίου 1979, 149 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους εξαιτίας φρεατικής έκρηξης που συνέβη στη νοτιοδυτική πλευρά του οροπεδίου Ντιεγκ, στην Ινδονησία και είχε σαν αποτέλεσμα να απελευθερωθούν αέρια με περιεκτικότητα 98-99% σε διοξείδιο του άνθρακα (Le Guern et al., 1982). Περίπου 17000 άτομα απομακρύνθηκαν από έξι χωριά που βρισκόταν στην περιοχή κοντά στον κρατήρα Σινίλα.



Εικόνα 2.13. Η περιοχή του ηφαιστείου Ντιεγκ, στην Ινδονησία, είναι γνωστή για τις επικίνδυνες εκλύσεις αερίων

(πηγή: www.volcanolive.com/dieng.html)

Στις 15 Αυγούστου 1984, στη λίμνη Μονουν, στο δυτικό Καμερούν κοντά στη Νιγηρία, στο ηφαιστειακό πεδίο Οκυ, το διοξείδιο του άνθρακα που απελευθερώθηκε από μία λιμναία έκρηξη, στάθηκε ικανό να σκοτώσει 34 ανθρώπους. Δύο χρόνια αργότερα, στις 12 Αυγούστου του 1986, στη λίμνη Νγος, 30 Km πιο μακριά, 1700 θάνατοι ανθρώπων αποδόθηκαν στην υψηλού επιπέδου έκθεση σε διοξείδιο του άνθρακα.



Εικόνα 2.12. Η γεωγραφική θέση της ηφαιστειακής ζώνης του Καμερούν και του Ηφαιστειακού Πεδίου Οκυ της λίμνης Νγος

(πηγή: USGS Volcanoworld)

Οι περίπου 5000 επιζώντες, παρουσίασαν συμπτώματα έκθεσης σε αυξημένη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα. Οι επιζώντες, σχεδόν στο σύνολό τους, περιέγραψαν μια ταχεία απώλεια συνειδήσεως. Οι επιζώντες που είχαν βρεθεί σε απόσταση 3 Km ανέφεραν ότι ένιωσαν κούραση, ζαλάδα και σύγχυση πριν απολέσουν τελείως τις αισθήσεις τους για διάστημα μέχρι 36 ώρες. Σε απόσταση από 3-10 Km από τη λίμνη, οι επιζώντες ανέφεραν ότι ένιωσαν δύσπνοια, ζάλη και σύγχυση πριν να χάσουν τις αισθήσεις τους. Τα διαφορετικά συμπτώματα που περιέγραψαν οι διαφορετικές ομάδες των επιζώντων, αποδίδονται στις διακυμάνσεις της συγκέντρωσης του ατμοσφαιρικού αέρα σε οξυγόνο και διοξείδιο του άνθρακα. (Rice et al., 2004). Τριάντισι χρόνια μετά το γεγονός αυτό, σύμφωνα με μελέτη που διερεύνησε τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στην έκθεση σε διοξείδιο του άνθρακα, δεν βρέθηκαν αναπνευστικά συμπτώματα ή μειωμένη αναπνευστική λειτουργία στο περίπου 1/4 του πληθυσμού που επέζησε. Ωστόσο οι πιο ευάλωτες ομάδες όπως παιδιά, ηλικιωμένοι και άτομα με προϋπάρχουσα αναπνευστική νόσο, αποκλείστηκαν από τη μελέτη (Baxter 1989).

Στο όρος Μαμούθ (Mammoth) στην Καλιφόρνια, το οποίο αποτελεί μεγάλο ηφαιστειακό σύμπλεγμα στο δυτικό άκρο της καλδέρας Long Valley, διοξείδιο του άνθρακα εκπέμπεται μέσω των πετρωμάτων που περιβάλλουν το όρος. Μετά το θάνατο ενός σκιέρ, η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα που μετρήθηκε στην περιοχή του φρεατίου, έφτανε το 70% (Farrar et al. 1999).

Στην περιοχή του ηφαιστείου Νιραγκόνγκο στη Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό, κατά τη διάρκεια των εκρήξεων του 2002, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα που μετρήθηκαν σε κάποιες περιοχές, κυμάνθηκαν από 20% μέχρι και 90%, δηλαδή πολύ πιο πάνω από τις επικίνδυνες για τη ζωή συγκεντρώσεις. Αυτές οι εκλύσεις, οι οποίες ονομάστηκαν «κακός άνεμος» από τον ντόπιο πληθυσμό, έφτασαν σε ύψος μέχρι 40 μέτρα. Το χρονικό διάστημα, πριν από την έκρηξη, στην περιοχή της λίμνης Κίνυ και στην περιοχή Goma, είχαν σημειωθεί μία σειρά από θανάτους, για τους οποίους πιθανότατα ευθύνεται η έκλυση διοξειδίου του άνθρακα (Baxter and Ancia, 2002).

Στην περιοχή της καλδέρας Furnas, στις Αζόρες, έπειτα από μετρήσεις που διεξήχθησαν σχετικά με την έκλυση διοξειδίου του άνθρακα από το έδαφος το 1993, βρέθηκαν αυξημένες συγκεντρώσεις. Οι ειδικοί επισήμαναν το κίνδυνο ασφυξίας σε κατοικίες της περιοχής, σε περίπτωση ξαφνικής απελευθέρωσης διοξειδίου του άνθρακα (Baxter et al. 1999).

Στη ενεργά γεωθερμική περιοχή Rotorua της Νέας Ζηλανδίας, μετρήθηκαν υψηλά επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα μέσα σε κτίρια με τιμές από 2% μέχρι ακόμα και 15% (Durand and Scott, 2003).

Στην περιοχή Alban Hills, στην Ιταλία, υψηλές συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα, συνδέθηκαν με το θάνατο τουλάχιστον 10 ανθρώπων στην κεντρική ιταλική περιφέρεια του Λάτσιο, από το 1983 έως το 2003 (Beaubien et al, 2003). Σε πυκνοκατοικημένη περιοχή κοντά στη Ρώμη, το Σεπτέμβριο του 1999, 29 αγελάδες πέθαναν από ασφυξία λόγω εισπνοής διοξειδίου του άνθρακα. Έπειτα από μετρήσεις στην περιοχή, βρέθηκε ότι η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα, συχνά ξεπερνούσε το 0.5%, γεγονός επικίνδυνο για την υγεία των παιδιών (Carapezza et al. 2003).

Συμπερασματικά λοιπόν σε ανεπαρκώς αεριζόμενους χώρους, κάτω και αμέσως πάνω από το έδαφος, όπως σπηλιές, στοές, κελάρια, πηγάδια, κλπ. το διοξείδιο του άνθρακα σε περιοχές έκλυσης φυσικών αερίων μπορεί να δημιουργήσει επικίνδυνες για την υγεία συσσωρεύσεις.

2.2.2.2. Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO)

A) Φυσικές Ιδιότητες Μονοξειδίου του Άνθρακα

Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι αέριο το οποίο φυσιολογικά βρίσκεται σε ίχνη στον αέρα της γήινης ατμόσφαιρας. Η μέση συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα είναι περίπου 0.1 ppm (1ppm CO: 1.145 mg CO/m³ στους 25°C). Κύρια πηγή του αποτελεί η φωτοχημική οξείδωση του μεθανίου και δευτερευόντως οι ηφαιστειακές εκρήξεις και οι δασικές πυρκαγιές. Τα ηφαιστεια λοιπόν αποτελούν φυσική πηγή μονοξειδίου του άνθρακα όμως το μονοξείδιο του άνθρακα βρίσκεται σε πολύ μικρή ποσότητα στο μίγμα των εκλυόμενων ηφαιστειακών αερίων.

Στην ατμόσφαιρα, είναι πολύ ευμετάβλητο και βραχύβιο και παίζει σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό του όζοντος της τροπόσφαιρας.

Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι μη ερεθιστικό και σε κανονικές συνθήκες πίεσης (1atm) και θερμοκρασίας (25°C) είναι επίσης άχρωμο, άγευστο και άοσμο. Για το λόγο αυτό, είναι και δύσκολα αντιληπτό από τον άνθρωπο. Είναι επίσης ελάχιστα διαλυτό στο νερό, ελαφρύτερο του αέρα και αναφλέξιμο.

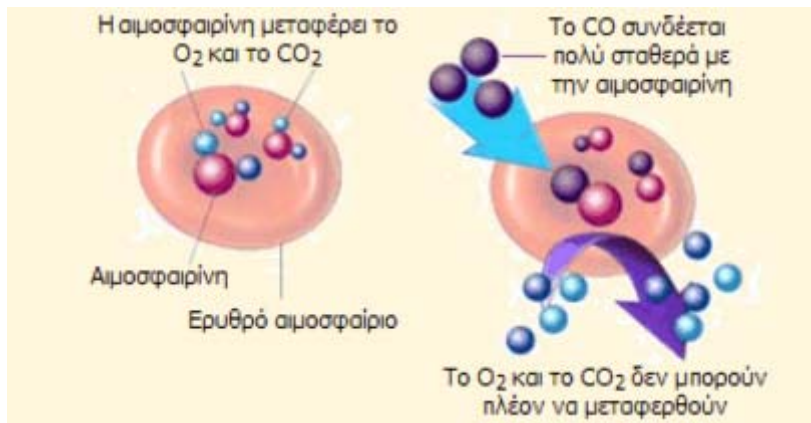
Το μονοξείδιο του άνθρακα παρουσιάζει συνάφεια 200 με 300 φορές μεγαλύτερη προς την αιμοσφαιρίνη από του οξυγόνου ενώ στη σύνδεση του με την μυοσφαιρίνη 60 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του οξυγόνου.

B) Επιτρεπτά όρια σε Μονοξείδιο του Άνθρακα

Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι τοξικό για τον άνθρωπο καθώς και για όλα τα ζώα με αιμογλοβίνη στο αίμα τους, ακόμα και σε μικρές συγκεντρώσεις (από 35 ppm), αφού ανταγωνίζεται έντονα τη δέσμευση οξυγόνου από την αιμοσφαιρίνη του αίματος, η οποία είναι υπεύθυνη για τη μεταφορά του οξυγόνου στα κύτταρα του οργανισμού. Σε συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα μεγαλύτερες από 667 ppm, είναι δυνατόν να εξουδετερωθεί περισσότερο από το 50% της αιμοσφαιρίνης του ανθρώπινου σώματος και να μετατραπεί σε καρβόξυαιμοσφαιρίνη ή ανθρακυλαιμοσφαιρίνη (Tikuiss P., Kane D.M., McLellan T.M., Buick F., Fairburn S.M., 1992).

Γ) Επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση σε Μονοξείδιο του Άνθρακα

Το Μονοξείδιο του άνθρακα, έχει λοιπόν την τάση να προκαλεί βλάβες, λόγω της ιδιότητάς του, να στερεί το οξυγόνο από το αίμα των αιμογλοβικών οργανισμών, αφού όταν εισπνέεται, δεσμεύει την αιμοσφαιρίνη, υποκαθιστώντας το οξυγόνο. Από την ένωση του μονοξειδίου του άνθρακα με την αιμοσφαιρίνη δημιουργείται ένα σύμπλοκο το οποίο ονομάζεται ανθράκυλαιμοσφαιρίνη (COHgb). Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της ανθρακυλαιμοσφαιρίνης στο αίμα, σημαίνει ότι τόσο μεγαλύτερη είναι η έκθεση του οργανισμού στο μονοξείδιο του άνθρακα.



Εικόνα 2.14. Διαδικασία μεταφοράς οξυγόνου μέσω της αιμοσφαιρίνης.

Η αιμοσφαιρίνη που βρίσκεται στα ερυθρά αιμοσφαίρια, μεταφέρει το οξυγόνο από τους πνεύμονες στους ιστούς και από εκεί παραλαμβάνει το διοξείδιο του άνθρακα, ως προϊόν βιοχημικών καύσεων και το μεταφέρει προς τους πνεύμονες από όπου και αποβάλλεται με την εκπνοή. Οι συνδέσεις του οξυγόνου και του διοξειδίου του άνθρακα είναι χαλαρές ενώ το μονοξείδιο συνδέεται σταθερά με την αιμοσφαιρίνη στερώντας της την ικανότητα να μεταφέρει το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα

(πηγή: τμήμα Χημείας Πανεπιστημίου Αθηνών)

Το μονοξείδιο του άνθρακα, έχει επίσης την τάση να συνδέεται με τα κυτοχρώματα παρεμποδίζοντας την παραγωγή ενέργειας στα μιτοχόνδρια μέσω μηχανισμών παραγωγής ελευθέρων ριζών. Η μυοσφαιρίνη που συνδέεται με το μονοξείδιο του άνθρακα αναστέλλει τη μεταφορά του οξυγόνου προς τα μιτοχόνδρια προκαλώντας υποξία του μυοκαρδίου και των σκελετικών μυών καθώς και απευθείας κυτταρική νέκρωση και ραβδομυόλυση με αποτέλεσμα την προσβολή του Κεντρικού Νευρικού Συστήματος (Χαβούζης, Πνευματικός 2014).

Τα όργανα του σώματος τα οποία εξαρτώνται από τη σταθερή παροχή μονοξειδίου του άνθρακα, ο εγκέφαλος και η καρδιά, είναι εκείνα τα οποία πλήττονται περισσότερο από την έκθεση του οργανισμού σε μονοξείδιο του άνθρακα. Επίσης η εισπνοή μονοξειδίου του άνθρακα από μία έγκυο γυναίκα επηρεάζει την υγεία του εμβρύου που κυοφορεί. Τα άτομα τα οποία πάσχουν από χρόνια νοσήματα του καρδιαγγειακού ή αναπνευστικού συστήματος, είναι πιο ευάλωτα στην έκθεση στο μονοξείδιο του άνθρακα. Επίσης άτομα που πάσχουν από βρογχίτιδα, εμφύσημα, καθώς και τα παιδιά, ανήκουν στις ευπαθείς και ευάλωτες ομάδες πληθυσμού. Οι ευάλωτες στις επιδράσεις του μονοξειδίου του άνθρακα ομάδες, μπορεί να εμφανίσουν συμπτώματα υποξίας ή ακόμα και θάνατο σε χαμηλότερα, από τα αναμενόμενα, επίπεδα ανθρακυλαιμοσφαιρίνης στο αίμα.

Τα συμπτώματα της δηλητηρίασης από μονοξείδιο του άνθρακα, αρχίζουν συνήθως, με πονοκέφαλο (>80%) και κλιμακώνονται, παράλληλα με την αύξηση της συγκέντρωσης της ανθρακυλαιμοσφαιρίνης στο αίμα, με δύσπνοια, προκάρδιο άλγος, ναυτία, εμετό, διαταραχές της κριτικής ικανότητας και της όρασης, κόπωση, σύγχυση, σπασμούς, κώμα, κυκλοφορική και αναπνευστική ανεπάρκεια και θάνατο. Τα κυριότερα συμπτώματα προέρχονται από το ΚΝΣ, πιθανώς εξαιτίας της υποξίας, η οποία προκαλεί εγκεφαλικό οίδημα και αύξηση της ενδοκρανιακής πίεσης (Χαβούζης, Πνευματικός 2014).

%Hb-CO	Συμπτώματα	
0 έως 10	Κανένα	
10 έως 20	Κεφαλαλγία (στο μέτωπο), διαστολή αγγείων	
20 έως 30	Κεφαλαλγία, σφύξεις στους κροτάφους	
30 έως 40	Σοβαρή κεφαλαλγία, ανησυχία, ίλιγγος, εξασθένιση όρασης, ναυτία, εμετός, εξάντληση	
50 έως 60	Τα ίδια ως άνω με κώμα και σπασμούς. Έντονη αναπνοή με διακοπές	
60 έως 70	Κώμα, σπασμοί, ασθενής αναπνοή, ασθενείς σφυγμοί. Πιθανός θάνατος	
70 έως 80	Η αναπνοή γίνεται πολύ αργή, ο θάνατος επέρχεται σε λίγες ώρες	
80 έως 90	Θάνατος σε λιγότερο από μία ώρα	
90 έως 100	Θάνατος σε λίγα λεπτά	

Εικόνα 2.15. Συμπτώματα έκθεσης σε μονοξείδιο του άνθρακα σε σχέση με το ποσοστό της ανθρακυλαιμοσφαιρίνης στο αίμα

(πηγή: eclass.teipir.gr)

Στοιχεία δείχνουν ότι μια έκθεση 8 ή περισσότερων ωρών σε μια συγκέντρωση 30ppm μονοξειδίου του άνθρακα, θα προξενήσει την εμφάνιση της ουσίας καρβοξυαιμοσφαιρίνης στο αίμα στα επίπεδα του 5% περίπου.

2.2.3. Επιπτώσεις των ενώσεων του θείου στην υγεία

2.2.3.1. Διοξείδιο του Θείου (SO₂)

Α) Φυσικές Ιδιότητες Διοξειδίου του Θείου

Το διοξείδιο του θείου είναι ένα άχρωμο αέριο, το οποίο σε υψηλές συγκεντρώσεις έχει έντονη ερεθιστική οσμή «καιόμενου θείου». Η μυρωδιά αυτή, γίνεται αντιληπτή σε διαφορετικές συγκεντρώσεις στην ατμόσφαιρα και εξαρτάται από την ευαισθησία του κάθε ατόμου αν και γενικά μπορεί να γίνει αντιληπτή σε συγκεντρώσεις από 0.3-1.4 ppm και περισσότερο αισθητή σε συγκεντρώσεις 3ppm (Baxter 2000, Wellburn 1994). Δεν είναι εύφλεκτο ούτε εκρηκτικό αέριο και γενικά μπορεί να χαρακτηριστεί σχετικά σταθερό. Έχει πυκνότητα περίπου δυόμιση φορές μεγαλύτερη από αυτή του ατμοσφαιρικού αέρα (2.62g/L στους 25°C και σε πίεση 1 atm (Lide 2003) και μεγάλη διαλυτότητα στο νερό (Gangolli 1999). Παρουσία υγρασίας, το διοξείδιο του θείου, μετατρέπεται σε θειικό οξύ (H₂SO₄). Στην ατμόσφαιρα, το διοξείδιο του θείου, αντιδρά εύκολα με οξειδωτικά ή με σωματίδια ή με άλλα προϋπάρχοντα αερολύματα, σχηματίζοντας σουλφίδια και όξινα σωματίδια του θείου, τα οποία είναι πιο επικίνδυνα από το αρχικό διοξείδιο του θείου (με εξαίρεση τους ασθματικούς). Το διοξείδιο του θείου μπορεί επίσης να αντιδράσει με το υπεροξείδιο του υδρογόνου (H₂O₂) ή και με το όζον (O₃) (Stevenson et al. 2003). Τα όξινα σωματίδια του θείου είναι τα κύρια συστατικά της όξινης βροχής, που προκαλεί εκτενή περιβαλλοντολογική καταστροφή.

Σε αραιά ηφαιστειακά λοφία, η συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου, είναι μικρότερη των 10 ppm σε απόσταση μικρότερη των 10 km από την πηγή. (Brimblecombe 1996, Orpenheimer et al. 1998). Επίσης, αν λάβουμε υπόψη ότι το αέριο, έχει χρόνο ημίσειας ζωής μεταξύ 6 και 24 ωρών, μετά από μία έως τέσσερις ημέρες στην κατώτερη ατμόσφαιρα βρίσκεται

μόνο το 5% του εκλυόμενου αερίου (Brimblecombe 1996, Finlayson-Pitts και Pitts, 1986, Porter et al., 2002). Γενικά ο χρόνος παραμονής του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα εξαρτάται από το ύψος της ηφαιστειακής στήλης των εκλυόμενων αερίων, τις καιρικές συνθήκες και τη συνολική μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων που απελευθερώνονται (Krotkov et al. 2010).

Το διοξείδιο του θείου είναι ένα από τα πιο κοινά αέρια που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα εξαιτίας της ηφαιστειακής δραστηριότητας καθώς και από τη χημική βιομηχανία. Η καύση επίσης των γαιανθράκων και του πετρελαίου, οδηγεί σε έκλυση διοξειδίου του θείου.

B) Επιτρεπτά όρια σε διοξείδιο του θείου

Γενικά οι κατευθυντήριες γραμμές για την περιβαλλοντική και εργασιακή έκθεση σε διοξείδιο του θείου, ποικίλλουν σημαντικά στις διάφορες χώρες. Το 1971 ορίστηκε στα 2620 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1ppm) (μέσος όρος 24 ωρών) το όριο ασφαλείας για την υγεία των ανθρώπων (US Environmental Protection Agency).

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται συνοπτικά το εύρος των επιτρεπτών ορίων του διοξειδίου του θείου για διαφορετικά χρονικά διαστήματα έκθεσης.

Πίνακας 2-3. Επιτρεπτά όρια διοξειδίου του θείου για διαφορετικά χρονικά διαστήματα έκθεσης

Περίοδος έκθεσης στο SO_2	Minimum (ppm)	Maximum (ppm)
10-15 λεπτά	0.102	0.175
60 λεπτά	0.057	1
24 ώρες	0.019	0.153
Ετήσια έκθεση	0.008	0.038

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε διαφορετικά ηφαιστειακά παρατηρητήρια ανά τον κόσμο, εφαρμόζονται διαφορετικές κατευθυντήριες γραμμές, όσον αφορά την έκθεση στο διοξείδιο του θείου. Για παράδειγμα στον κρατήρα Aso στην Ιαπωνία, οι επισκέπτες απομακρύνονται όταν τα επίπεδα του διοξειδίου του θείου, υπερβούν τα 0.2 ppm για ένα λεπτό ή αν στιγμιαία το διοξείδιο του θείου υπερβεί τα 5 ppm. Τα όρια μειώθηκαν κάτω από τα 5 ppm για 5 λεπτά, έπειτα από τη συσχέτιση θανάτων που προκλήθηκαν με το διοξείδιο του θείου κατά τη δεκαετία του 1990 (Ng'Walali et al., 1999).

Το 2000 στο Εθνικό Πάρκο Ηφαιστείων της Χαβάης σε συνεργασία με τον οργανισμό United States Geological Survey δόθηκαν μια σειρά από συστάσεις για την προστασία του

προσωπικού και των επισκεπτών από το διοξείδιο του άνθρακα, οι οποίες συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2-4. Πίνακας συστάσεων προστασίας από το διοξείδιο του άνθρακα

Κατάσταση	Αντίδραση
ΠΡΑΣΙΝΗ (καλή) SO₂<300 ppb μέσο όρο για 15 min	Κανονική δραστηριότητα
ΚΙΤΡΙΝΗ (μέτρια) SO₂>300 ppb μέσο όρο για 30 min	Βασικές ενέργειες προστασίας • Ειδοποίηση του προσωπικού • Ενημέρωση των επισκεπτών
ΠΟΡΤΟΚΑΛΙ (ανθυγιεινή για ευαίσθητες ομάδες) SO₂>500 ppb μέσο όρο για 15 min	Περισσότερες ενέργειες προστασίας • Ακύρωση υπαίθριων εργασιών και πεζοπορίας
ΚΟΚΚΙΝΗ (ανθυγιεινή) SO₂>1000 ppb μέσο όρο για 15 min	Αυξημένες ενέργειες προστασίας • Εκτίμηση για κλείσιμο της εισόδου στο σταθμό και το κέντρο των επισκεπτών

Γ) Επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση σε Διοξείδιο του Θείου

Το διοξείδιο του θείου είναι ερεθιστικό στα μάτια, το λαιμό και την αναπνευστική οδό. Βραχυπρόθεσμη έκθεση σε μεγάλη συγκέντρωση διοξειδίου του θείου, μπορεί να προκαλέσει φλεγμονή, ερεθισμό και αίσθημα καψίματος στα μάτια. Μπορεί επίσης να προκαλέσει βήχα, δυσκολία στην αναπνοή και ένα αίσθημα σφιξίματος στο στήθος. Τα άτομα που πάσχουν από άσθμα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στο διοξείδιο του θείου και ακόμα και πολύ μικρές συγκεντρώσεις 0.2 – 0.5 ppm μπορεί να παρουσιάσουν συμπτώματα (Baxter, 2000). Ηφαιστειολόγοι που πάσχουν από άσθμα έχουν παρατηρήσει ανεπιθύμητες επιδράσεις σε συγκεντρώσεις αισθητά χαμηλότερες από εκείνες που επηρεάζουν τους συναδέλφους τους. Παρατεταμένη ή επαναλαμβανόμενη έκθεση σε χαμηλές συγκεντρώσεις (1-5 ppm) μπορεί να αποβεί επικίνδυνη για άτομα με προϋπάρχουσες νόσους του καρδιοαναπνευστικού συστήματος.

Γενικά, τα αποτελέσματα του διοξειδίου του θείου στους ανθρώπους και στο περιβάλλον διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με (1) την ποσότητα του αερίου που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα από το ηφαίστειο (2) το εάν η έκλυση του αερίου γίνεται στην τροπόσφαιρα ή στην στρατόσφαιρα και (3) την περιφερειακή ή παγκόσμια κυκλοφορία του ανέμου και τις καιρικές συνθήκες που διασκορπίζουν το αέριο (Κυριακόπουλος 2010).

Οι επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση σε διοξείδιο του θείου ανάλογα με τη συγκέντρωσή του στην ατμόσφαιρα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Baxter 2000, Nemery 2001, NIOSH 1981, Wellburn 1994).

Πίνακας 2-5. Επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση σε διοξείδιο του θείου

Όρια έκθεσης σε SO ₂ (ppm)	Επιπτώσεις στην υγεία
1-5	Το κατώτατο όριο στο οποίο επηρεάζεται η αναπνευστική λειτουργία υγιών ατόμων που βρίσκονται σε κατάσταση άσκησης.
3-5	Μείωση της πνευμονικής λειτουργίας σε ηρεμία και αυξημένη αντίσταση των αεραγωγών
5	Αυξημένη αντίσταση των αεραγωγών σε υγιή άτομα
6	Συμπτώματα ερεθισμού στα μάτια, τη μύτη και το λαιμό
10	Επιδείνωση του ερεθισμού σε μάτια, μύτη και λαιμό
10-15	Όρια τοξικότητας σε παρατεταμένη έκθεση
20+	Παράλυση ή θάνατος έπειτα από παρατεταμένη έκθεση
150	Μέγιστη συγκέντρωση στην οποία τα υγιή άτομα μπορεί να αντέξουν για λίγα λεπτά.

Υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικού διοξειδίου του θείου έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα υγείας σε παιδιά (Ware et al, 1986) ωστόσο άλλες μελέτες δείχνουν ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ επιπολασμού του άσθματος σε παιδιά με την παρατεταμένη έκθεση σε ηφαιστειακά αέρια (Uda et al. 1999).

Δ) Εκλύσεις Διοξειδίου του Θείου λόγω ηφαιστειακής δραστηριότητας

Επικίνδυνες για την υγεία του ανθρώπου συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου, έχουν καταγραφεί σε περιπτώσεις πολλών ηφαιστειών σε συνθήκες χαμηλής έντασης ανέμου. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις, παρατηρούνται περισσότερο κοντά στις περιοχές των ηφαιστειών όπου συμβαίνει η έκλυση των αερίων.

Στη Χαβάη, στο ηφαίστειο Κιλαουέα, ένα από τα πέντε ασπιδωτά ηφαίστεια που αποτελούν το νησί, έχουν κατά καιρούς μετρηθεί υψηλά επίπεδα διοξειδίου του θείου. Το 1996, κατά τη διάρκεια αυξημένης δραστηριότητας, σε χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του τουριστικού πάρκου της Χαβάης, η συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου που μετρήθηκε, έφτανε τα 4 ppm. Από το 2008, οι αυξανόμενες εκπομπές διοξειδίου του θείου από τον κρατήρα Χαλεμάουμαου (Halemauau) στην κορυφή του Κιλαουέα, έχουν οδηγήσει σε αυξημένα επίπεδα ηφαιστειακού νέφους, εγείροντας ανησυχίες για την ποιότητα του αέρα. Από το 1987 έως το 2001, η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα, υπερέβη στο εθνικό πάρκο ηφαιστειών της Χαβάης, πάνω από 85 φορές το 24ωρο πρότυπο της πρωτοβάθμιας υγείας των ΗΠΑ (Helias 2002). Δεδομένου ότι εκατομμύρια τουρίστες κάθε χρόνο επισκέπτονται την περιοχή δόθηκαν κατευθυντήριες γραμμές για τα επίπεδα του διοξειδίου του θείου, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Στη Νικαράγουα, 20 Km νότια της πρωτεύουσας Μανάγκουα, βρίσκεται το ηφαίστειο Masaya. Από τον ενεργό κρατήρα Santiago του ηφαιστείου, εκπέμπονται συνεχώς μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του θείου. Κατά το διάστημα Μαρτίου Απριλίου 1998 και Φεβρουαρίου Μαρτίου 1999 με χαμηλή ένταση ανέμου και σε περιοχή μέχρι 44 Km μακριά από το ηφαίστειο, οι συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου που μετρήθηκαν είχαν τιμές από 0.002 έως 0.23 ppm (δηλαδή περίπου από 5 έως 600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Demelle et al. 2002). Σχεδόν το 30% αυτών των μετρήσεων ξεπερνούσαν τις κατευθυντήριες γραμμές του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (WHO) για 24ωρη έκθεση. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις μετρήθηκαν στην περιοχή Liano Payaca, σε απόσταση 14 Km και ήταν περίπου 0.6 ppm (Horrocks 2001). Το Μάιο του 2001, η μεγαλύτερη ποσότητα διοξειδίου του θείου καταγράφηκε στη φουμαρόλη του Masaya, στο χείλος του κρατήρα Santiago, και ήταν 3.1 ppm (δηλαδή περίπου 7950 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Allen et al 2002). Τα επίπεδα αυτά του διοξειδίου του θείου, ενέχουν πιθανούς κινδύνους για την υγεία του τοπικού πληθυσμού. Οι κάτοικοι της περιοχής, εξέφρασαν παράπονα σχετικά με ερεθισμό και ευαισθησία των ματιών, πονόλαιμο και πονοκεφάλους. Εκτιμάται ότι περίπου 50000 άνθρωποι στην περιοχή, είναι εκτεθειμένοι σε κίνδυνο λόγω της έκλυσης διοξειδίου του θείου από το ηφαίστειο καθώς και από τη ρύπανση των υδάτων στην περιοχή της Masaya.



Εικόνα 2.16. Κρατήρας ηφαιστείου Masaya στη Νικαράγουα

Στην περιοχή του ηφαιστείου Poas στην Κόστα Ρίκα, οι κάτοικοι και οι επιστήμονες, παραπονέθηκαν για ερεθισμό στα μάτια και το λαιμό. Μακροπρόθεσμες μετρήσεις για διοξείδιο του θείου στις κατοικημένες κατάντη περιοχές, έδειξαν μέσες συγκεντρώσεις περίπου 0.28 ppm (δηλαδή περίπου 730 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) καθώς και βραχυπρόθεσμες μετρήσεις από 0.3 έως 0.5 ppm (Nicholson et al. 1996). Τα αυξημένα αυτά επίπεδα του διοξειδίου του θείου, παρατηρήθηκαν το 1991 και το 1992 και υπερβαίνοντας όχι μόνο τις 24ωρες οριακές τιμές που έχουν δοθεί από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO) αλλά σε κάποιες περιοχές και τα επίπεδα των 15 λεπτών. Τα υψηλότερα επίπεδα διοξειδίου του θείου μετρήθηκαν στο χείλος του κρατήρα Poas, όπου έφτασαν ακόμα και τα 35 ppm, τιμή πολύ υψηλότερη από την επιτρεπτή για την ασφάλεια της υγείας.

Στο ηφαίστειο Βιγιαρίκα (Villarrica) στη Χιλή, στο χείλος του κρατήρα, μετρήθηκαν συγκεντρώσεις της τάξης των 13 ppm (Witter and Delmelle 2004) εκθέτοντας σε κίνδυνο μεγάλο αριθμό τουριστών, αν σκεφτεί κανείς ότι στο αποκορύφωμα της τουριστικής κίνησης, τουλάχιστον 100 άτομα την ημέρα ανεβαίνουν στην κορυφή του ηφαιστείου.

Στο Λευκό Νησί στη Νέα Ζηλανδία, μία πιλοτική μελέτη υγείας σχετικά με την ατομική έκθεση σε διοξείδιο του θείου στην περιοχή κατάντη των ατμιδών, έδωσε μετρήσεις συγκέντρωσης που κυμάνθηκαν από 6 έως 75 ppm σε ένα διάστημα 20 λεπτών (Durant et al, 2004). Οι τιμές αυτές ξεπερνούν τα όρια επαγγελματικής έκθεσης κατά 15 φορές.

Υπάρχουν καταγεγραμμένα πολλά περιστατικά κατά τα οποία πόλεις και πληθυσμοί επηρεάστηκαν από την έκλυση διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια ηφαιστειακής δραστηριότητας.

Στην περιοχή Soufrière, στη Γουαδελούπη, κατά η διάρκεια της έκρηξης του 1976, ο πληθυσμός παραπονιόταν για πονοκεφάλους που σχετίστηκαν με την έντονη οσμή του διοξειδίου του θείου που εκλύθηκε από το ηφαίστειο (Le Guern et al., 1980).

Στο Μεξικό, στο ενεργό ηφαίστειο Popocatepetl, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου βρέθηκε να έχουν υπερβεί τα 0.08 ppm (Raga et al 1999) τιμή που ξεπερνά 4 φορές τον τυπικό μηνιαίο μέσο όρο. Επίσης το Φεβρουάριο του 1997 οι συγκεντρώσεις κοντά στα σημεία εξαερισμού του ηφαιστείου, έφτασαν τα 3.8 ppm (Goff et al., 1998).

Στην Ιαπωνία, στο εξαιρετικά ενεργό κατά την πρόσφατη ιστορία ηφαίστειο Sakurajima, τα ηφαιστειακά αέρια επηρέασαν με τη βοήθεια του ανέμου, μία μεγάλη περιοχή. Τα μέγιστα ωριαία επίπεδα της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου στην πόλη Sakurajima, που βρίσκεται σε απόσταση περίπου 5 km από το ηφαίστειο, το 1980, έφτασαν τα 0.84 ppm, τιμή που ξεπερνά κατά πολύ τα ιαπωνικά πρότυπα ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος. (Yano et al 1986). Από το Σεπτέμβριο του 1985 μέχρι το Φεβρουάριο του 1986 οι τιμές των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του θείου που μετρήθηκαν στη βάση της Sakurajima, κυμαίνονταν από 0.015 ppm μέχρι 0.138 ppm, με μέσο όρο τα 0.079 ppm (Kawaratani and Fujita, 1990). Επιδημιολογικές έρευνες σχετικά με την υγεία των κατοίκων στην περιοχή γύρω από το ηφαίστειο, έχουν δείξει θετική συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του θείου και τη θνησιμότητα των ενηλίκων από βρογχίτιδα καθώς με τη νεογνική θνησιμότητα (Shinkuro et al., 1999, Wakisaka et al., 1988).

Στην περιοχή του ηφαιστείου Miyakejima στην Ιαπωνία, το φθινόπωρο του 2000, με τη βοήθεια νότιων και νοτιοδυτικών ανέμων, τα ηφαιστειακά αέρια, μεταφέρθηκαν, δίνοντας μετρήσεις υψηλών συγκεντρώσεων διοξειδίου του θείου σε πολλούς επιφανειακούς σταθμούς σε αποστάσεις από 100Km έως 400 Km κατάντη (Naoe et al., 2003). Σε απόσταση 88 Km, οι μέγιστες συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου, έφτασαν τα 0.114 ppm, τιμή κατά πολύ αυξημένη σε σύγκριση με τα 0.0028 ppm που είχαν καταγραφεί κατά το προηγούμενο έτος (An et al., 2003). Σε απόσταση 4.5 Km από το ηφαίστειο, η μέγιστη καταγεγραμμένη ωριαία συγκέντρωση έφτασε τα 0.945 ppm, τιμή που ξεπερνάει κατά 9 φορές τα ιαπωνικά πρότυπα του αέρα περιβάλλοντος. Η έκρηξη, επηρέασε και την ποιότητα του αέρα ακόμα και στην μητροπολιτική περιοχή του Τόκιο, περιοχή με περισσότερους από 30 εκατομμύρια κατοίκους, κάποιοι από τους οποίους ανέφεραν κάποια δυσάρεστη μυρωδιά αερίου μέσα στην πόλη (Fujita et al., 2003). Από τον Αύγουστο μέχρι το Νοέμβριο του 2000, τα επίπεδα της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου, ξεπέρασαν τις συστηνόμενες για την ποιότητα του αέρα τιμές ανά ώρα, σε 623 σταθμούς.

Στη Χιλή, στο ηφαίστειο Cerro Hudson, στις 11 Οκτωβρίου 1991, υπήρξαν έντονες θειώδεις αναθυμιάσεις στην κοιλάδα Huemules, στη δυτική πλευρά του ηφαιστείου. Πολλοί κάτοικοι αρρώστησαν, παρουσίασαν συμπτώματα ναυτίας, εμετού και απώλεια συνείδησης. Η σύνθεση του αερίου μίγματος δεν είναι ακριβώς γνωστή αλλά πιθανολογείται ότι υπήρχαν θειικά αερολύματα και υδρόθειο (BGVN 16:09).

Στο ηφαίστειο του Αγίου Αυγουστίνου στην Αλάσκα, το νέφος από την ηφαιστειακή έκρηξη της 1^{ης} Φεβρουαρίου του 1976, περιείχε συγκεντρώσεις θειικών αερίων και κυρίως διοξειδίου του θείου, που έφταναν τα 10ppm κοντά στο ηφαίστειο και το 1ppm σε απόσταση 10 km όπου αναφέρθηκαν συμπτώματα ερεθισμού στο λαιμό (Stith et al. 1978).

Στο ηφαίστειο Βανουάτου, στον Ειρηνικό ωκεανό, επικίνδυνες συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου έχουν μετρηθεί στο ηφαιστειακό νέφος αερίων, στο χείλος του κρατήρα. Το Σεπτέμβριο του 1988, μετρήθηκαν συγκεντρώσεις που κυμαίνονταν από 3 έως 9 ppm, τιμές που υπερβαίνουν κατά πολύ τις επαγγελματικές προδιαγραφές ποιότητας του αέρα.

Στο ηφαίστειο Τελίκα στη Νικαράγουα, στο διάστημα από το Μάρτιο μέχρι τον Ιούνιο του 1994, ατμός, πλούσιος σε θείο, μετακινήθηκε από τον κρατήρα, προς τα κάτω, στις πλαγιές του ηφαιστείου, γεμίζοντας μια κοιλάδα με υψηλές συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου. Οσμή θείου αναφέρθηκε επίσης στη βορειοανατολική πλαγιά του ηφαιστείου (BGVN 19:07).

Στο ηφαίστειο Taal στις Φιλιππίνες, έντονη μυρωδιά διοξειδίου του θείου, παρατηρήθηκε κατά την έκρηξη του 1911 και πιθανολογείται ότι η υψηλή συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου, συνέβαλε στην αύξηση της θνησιμότητας που ακολούθησε την έκρηξη (Baxter 1990).

Γενικά, υπάρχουν πολλές περιοχές στον πλανήτη, στις οποίες οι άνθρωποι χωρίς να το γνωρίζουν, είναι εκτεθειμένοι σε συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου που εκλύεται εξαιτίας της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Για παράδειγμα στις Αζόρες στη λίμνη Furnas, που βρίσκεται στην καλντέρα του ενεργού ηφαιστείου Furnas, τα μέσα επίπεδα του διοξειδίου του θείου που έχουν μετρηθεί, φθάνουν τα 0,115 ppm τιμή αρκετά μεγαλύτερη από τα όρια των κατευθυντήριων γραμμών για την έκθεση σε διοξείδιο του θείου, σε μια περιοχή στην οποία ντόπιοι κάτοικοι και τουρίστες χρησιμοποιούν καθημερινά τις ατμίδες για μαγείρεμα. Επίσης στο κέντρο του χωριού Furnas, μετρήσεις, έδειξαν επίπεδα διοξειδίου του θείου σε συγκεντρώσεις μεταξύ 0.07 και 0.085 ppm (Baxter et al, 1999).

Τα πιο γνωστά περιστατικά που σχετίζονται με δηλητηρίαση από διοξείδιο του θείου, έχουν καταγραφεί στο ηφαίστειο Aso στην Ιαπωνία, όπου 7 άνθρωποι έχασαν τη ζωή από το 1989 έως το 1997 από εισπνοή διοξειδίου του θείου και άλλα 59 άτομα εισήχθησαν στο νοσοκομείο από τον Ιανουάριο του 1980 έως το Φεβρουάριο του 1995. Οι περισσότεροι από τους ανθρώπους που έχασαν τη ζωή τους είχαν ιστορικό άσθματος. Μετά από αυτά τα περιστατικά τα επίπεδα διοξειδίου του θείου στα οποία θα γίνεται εκκένωση, μειώθηκαν και δίνονται αυστηρές προειδοποιήσεις στους επισκέπτες σχετικά με τους κινδύνους της έκθεσης, ώστε να προστατευτούν τα άτομα με άσθμα και αναπνευστικές παθήσεις (Ng'Walali et al., 1999).

2.2.3.2. Υδρόθειο (H₂S)

A) Φυσικές Ιδιότητες Υδρόθειου

Το υδρόθειο είναι ένα άχρωμο εύφλεκτο αέριο με έντονη, δυσάρεστη μυρωδιά χαλασμένου αυγού. Είναι ενδιαφέρον ότι η ανθρώπινη μύτη είναι πιο ευαίσθητη στο υδρόθειο από οποιοδήποτε όργανο παρακολούθησης του φυσικού αερίου που έχουμε σήμερα. Γενικά η δυνατότητα αντίληψης της οσμής του υδρόθειου, είναι εξαιρετικά μεταβλητή στον ανθρώπινο πληθυσμό, δηλαδή διαφέρει από άτομο σε άτομο και μπορεί να κυμαίνεται από 0.008 έως 0.2 ppm (Amoore 1983, Beauchamp 1984). Δυστυχώς, όμως, η αίσθηση της όσφρησης δεν είναι αξιόπιστος συναγερμός αφού σε αναλογίες ανάμιξης πάνω από περίπου 0,01% το υδρόθειο γίνεται άοσμο και πολύ τοξικό, συνεπώς η όσφρηση δεν μπορεί να αποτελέσει προειδοποίηση για την παρουσία του αερίου σε επικίνδυνες συγκεντρώσεις, αφού το προειδοποιητικό σήμα χάνεται σε συγκεντρώσεις υδροθείου πάνω από 150 ppm εξαιτίας της παράλυσης του οσφρητικού νεύρου από το υδρόθειο.

Το υδρόθειο είναι εύφλεκτο στον αέρα όταν βρίσκεται σε συγκεντρώσεις από 4 έως 46% κατ' όγκο (Sax and Lewis 1989) και καίγεται με μπλε φλόγα. Είναι μέτρια διαλυτό στο νερό (4.1 g/L στους 20°C) (Gangolli, 1999) και έχει πυκνότητα 1.39 g/L σε κανονικές συνθήκες (θερμοκρασία 25°C και πίεση 1 atm) (Lide 2003), δηλαδή 1,2 φορές μεγαλύτερη πυκνότητα από την πυκνότητα του αέρα. Έτσι το υδρόθειο όπως και το διοξείδιο του άνθρακα είναι επίσης βαρύτερο από τον αέρα και τείνει να συσσωρεύεται σε κλειστούς χώρους και περιοχές με χαμηλό υψόμετρο.

Το υδρόθειο είναι αέριο που εκλύεται κατά την ηφαιστειακή δραστηριότητα και σε αραιά ηφαιστειακά νέφη έχει συγκέντρωση που κυμαίνεται από 0.1 έως 0.5 ppm, ενώ γενικά στην τροπόσφαιρα, απαντάται σε συγκεντρώσεις της τάξης του 0.00005 ppm έως 0.24 ppm. Ο χρόνος παραμονής του στην κατώτατη ατμόσφαιρα είναι περίπου 24 ώρες (Brimblecombe, 1996; Orpenheimer et al., 1998).

Β) Επιτρεπτά όρια σε υδρόθειο

Οι περισσότερες χώρες δεν έχουν κατευθυντήριες γραμμές σχετικά με τη συγκέντρωση του υδρόθειου και τα επίπεδα ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος, καθώς η συγκέντρωση υδρόθειου στον αέρα, δεν γίνεται αντιληπτή ως πρόβλημα στις περισσότερες περιοχές.

Σύμφωνα πάντως με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO 1997) οι κατευθυντήριες γραμμές για τον αέρα περιβάλλοντος σχετικά με τα επίπεδα υδρόθειου είναι κάτω από 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ μέσο όρο για 24 ώρες, επίπεδο ικανό να προκαλέσει ερεθισμό των ματιών.

Γ) Επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση σε Υδρόθειο

Το υδρόθειο (H_2S) είναι ένα τοξικό αέριο και ο κίνδυνος για την υγεία εξαρτάται τόσο κατά τη διάρκεια της έκθεσης όσο και από τη συγκέντρωση του υδρόθειου στον αέρα. Γενικά είναι ερεθιστικό των πνευμόνων και σε χαμηλές συγκεντρώσεις ερεθίζει τα μάτια και το αναπνευστικό σύστημα. Έκθεση σε υδρόθειο μπορεί να προκαλέσει πονοκέφαλο, κόπωση, ζάλη, αστάθεια στη βάρδιση καθώς και διάρροια, που ακολουθείται μερικές φορές από βρογχίτιδα και βρογχοπνευμονία (Sax and Lewis, 1989).

Υπάρχουν μελέτες οι οποίες συσχετίζουν την αυξημένη παρουσία αρνητικών συμπτωμάτων στην υγεία πληθυσμών με την παρουσία υδρόθειου στην ατμόσφαιρα. Οι πληθυσμοί αυτοί, μπορεί να βρίσκονται μακροχρόνια εκτεθειμένοι σε περιβάλλον στο οποίο υπάρχει υδρόθειο στην ατμόσφαιρα σε χαμηλά επίπεδα, όπως κοντά σε γεωθερμικές πηγές όπου και η μυρωδιά του υδρόθειου αποτελεί ενόχληση (Bates et al., 2002; Legator, 2001).

Πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε παράλυση του αναπνευστικού συστήματος, προκαλώντας διακοπή της αναπνοής με επακόλουθο το θάνατο. Αν δεν επέλθει ο θάνατος κατά την έκθεση σε υδρόθειο και ο ασθενής συνέλθει, συνήθως δεν υπάρχουν αργότερα επιπλοκές στην υγεία αν και μπορεί για τους επόμενους από την έκθεση μήνες, να εμφανίζονται συμπτώματα (Snyder et al, 1995).

Τα όρια συγκέντρωσης υδρόθειου και οι επιπτώσεις που προκαλούνται στην υγεία, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (NIOSH 1981, Sax and Lewis 1989, Amooore 1983, Faivre-Pierret and Le Guern 1983, Snyder et al 1995, Baxter 2000, Beauchamp et al. 1984, WHO 2003).

Πίνακας 2-6. Επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση σε υδρόθειο

Συγκέντρωση Υδροθείου (ppm)	Επιπτώσεις στην Υγεία
0.008-0.2	Ικανότητα αντίληψης της

	μυρωδιάς του «χαλασμένου αυγού»
2	Βρογχιοσυστολή σε ασθματικά άτομα
3,5	Αυξημένη ενόχληση των ματιών
5-10	Αυξημένη συγκέντρωση γαλακτικού οξέος, μερική ανικανότητα του μυός για συστολή, μειωμένη πρόσληψη οξυγόνου
20	Απώλεια της ικανότητας αντίληψης των εκλυόμενων αερίων. Κόπωση, απώλεια της όρεξης, κεφαλαλγία, ευερεθιστότητα, κακή μνήμη
3,5-20	Ερεθισμός των ματιών
50	Συμπτώματα φαρυγγίτιδας και βρογχίτιδας
60	Αίσθημα «καψίματος» και πόνος στα μάτια και τα βλέφαρα
150+	Ερεθισμός στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα και απώλεια της όσφρησης
250	Πνευμονικό οίδημα και κίνδυνος θανάτου
500	Πολύ επικίνδυνη συγκέντρωση κάτω από την οποία θα πρέπει να πραγματοποιηθεί ταχύτατη απομάκρυνση
1000	Απώλεια συνείδησης - θάνατος
1000-2000	Οξεία δηλητηρίαση με συμπτώματα τα οποία περιλαμβάνουν γρήγορη αναπνοή, δυσφορία, ναυτία και εμετό. Μπορεί να ακολουθήσει ταχεία απώλεια συνείδησης, κώμα και διακοπή

	της αναπνοής.
2000+	Άμεση απώλεια συνείδησης και μεγάλη πιθανότητα θανάτου

Δ) Εκλύσεις Υδροθείου λόγω ηφαιστειακής δραστηριότητας

Επικίνδυνες συγκεντρώσεις υδρόθειου, έχουν καταγραφεί σε περιοχές κοντά σε φουμαρόλες, σε κρατήρες ηφαιστειών καθώς και σε γεωθερμικές περιοχές (Baxter 2000). Στα ηφαίστεια, οι εργαζόμενοι, μπορεί να αγνοούν εντελώς την ύπαρξη υδρόθειου, επειδή η μυρωδιά του μπορεί να μην είναι ανιχνεύσιμη, ακόμα και σε χαμηλά επίπεδα στο μίγμα των αερίων.

Στην περιοχή Soufrière, στη Γουαδελούπη, κατά η διάρκεια των εκρήξεων του 1976 και 1977, ηφαιστειολόγοι και κάτοικοι της πόλης St. Claude, σε απόσταση 3-4 χιλιομέτρων πιο μακριά, υπέφεραν από πονοκεφάλους. Διαδοχικές μετρήσεις των συγκεντρώσεων του υδρόθειου, έδειξαν ότι οι συγκεντρώσεις στην κορυφή έφταναν τα 74 ppm περίπου ενώ στην πόλη St. Claude, κυμαίνονταν από 0.2 έως 0.37 ppm, τιμές πολύ πιο αυξημένες από τις κατευθυντήριες γραμμές για τον αέρα του περιβάλλοντος (Le Guern et al., 1980).

Στη Χαβάη, στο ηφαίστειο Κιλαουέα, στο εθνικό πάρκο ηφαιστειών, μετρήσεις κοντά στα σημεία έκλυσης αερίων το 1994, έδειξαν συγκεντρώσεις της τάξης του 0.4 μέχρι 4.2 ppm (Sutton et al., 1994). Στις 23 Ιουλίου του 2003, δειγματοληψίες αέρα στην ίδια περιοχή έδειξαν συγκεντρώσεις υδροθείου μεταξύ 0.2 ppm και 0.7 ppm (C. Witham). Και στις δύο περιπτώσεις, υπήρξε υπέρβαση των προτύπων για την ποιότητα του αέρα του περιβάλλοντος. Στην περιοχή υπάρχουν προειδοποιητικές πινακίδες και μπάρες για την πληροφόρηση των τουριστών σχετικά με τους κινδύνους από την έκλυση αερίων στην περιοχή.

Στην ηφαιστειογενή περιοχή Alban Hills, στην Ιταλία, μετρήσεις σε κατοικημένη περιοχή, έδειξαν ότι οι συγκεντρώσεις του υδρόθειου συχνά ξεπερνούσαν τα 10 ppm. Παρατηρήθηκε ότι οι συγκεντρώσεις μπορεί να έφταναν ακόμα και την ιδιαίτερα επιβλαβή συγκέντρωση των 40 ppm (Carapezza et al., 2003).

Στην περιοχή Rotorua, στη Νέα Ζηλανδία, βρίσκεται ένα γεωθερμικό πεδίο το οποίο εκλύει υδρόθειο. Περίπου το ένα τέταρτο του πληθυσμού της περιοχής είναι εκτεθειμένο σε συγκεντρώσεις υδρόθειου που ενδέχεται να υπερβαίνουν τα 0.143 ppm (περίπου 200μg/m³), τιμή πολύ υψηλότερη από τις κατευθυντήριες γραμμές για την ποιότητα του αέρα. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν βρέθηκε να υπερβαίνουν το 1 ppm. Η χρόνια έκθεση στο αέριο, έχει συσχετισθεί με δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία, συμπεριλαμβανομένων των νευρολογικών, καρδιαγγειακών και αναπνευστικών επιδράσεων. Επίσης αρκετοί θάνατοι έχουν συσχετιστεί με έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις υδρόθειου που είχε συσσωρευτεί σε κλειστούς χώρους (Bates et al., 2002). Σε ορισμένα κτίρια της Rotorua, οι συγκεντρώσεις του υδρόθειου που μετρήθηκαν, ξεπέρασαν τα 200 ppm σε κλειστούς αλλά αεριζόμενους χώρους (Durand and Scott, 2003).

Θάνατοι από δηλητηρίαση εξαιτίας της ηφαιστειακής και γεωθερμικής έκλυσης υδρόθειου, έχουν καταγραφεί στην περιοχή Rotorua στη Νέα Ζηλανδία καθώς και σε ηφαίστεια

της Ιαπωνίας. Από το 1919 έως το 2000, το υδρόθειο έχει θεωρηθεί υπεύθυνο για τουλάχιστον 46 θανάτους απόμων, εκ των οποίων οι 16 στη Rotorua και οι υπόλοιποι στην Ιαπωνία.

2.2.4. Επιπτώσεις των Υδραλογόνων στην υγεία

Όταν το μάγμα εξέρχεται από το ηφαίστειο, μπορεί να εκπέμπονται στην επιφάνεια αλογόνα όπως το χλώριο, το φθόριο και το βρώμιο με τη μορφή αλογονιδίων του υδρογόνου (υδροχλώριο (HCl), υδροφθόριο (HF) και υδροβρώμιο (HBr)). Όλες αυτές οι ενώσεις, είναι ισχυρά οξέα με υψηλή διαλυτότητα στο νερό. Ως εκ τούτου, μπορούν γρήγορα να διαλυθούν στα σταγονίδια της υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα ή του εκλυόμενου ηφαιστειακού και δυνητικά να προκαλέσουν όξινη βροχή. Τα σωματίδια τέφρας συχνά είναι επικαλυμμένα με υδραλογόνα. Η απόθεση στο έδαφος τέτοιων σωματιδίων, μπορεί να προκαλέσει δηλητηρίαση στα αποθέματα νερού, στις γεωργικές καλλιέργειες καθώς και στα βοσκοτόπια.

2.2.4.1. Υδροχλώριο (HCl)

A) Φυσικές Ιδιότητες Υδροχλωρίου

Το υδροχλώριο, είναι αέριο άχρωμο που ανήκει στα υδραλογόνα, με ενοχλητική έντονη οσμή η οποία γίνεται αντιληπτή σε συγκέντρωση περίπου 0.8 ppm. Είναι ιδιαίτερα διαλυτό στο νερό (673 g/L στους 30°C) (Cangolli, 1999) και έχει την ικανότητα να αντιδρά με την υγρασία του ατμοσφαιρικού αέρα, σχηματίζοντας νέφη ομίχλης (λευκούς ατμούς).

Δεν είναι εύφλεκτο αέριο και η πυκνότητά του είναι 1.49 g/L σε θερμοκρασία 25° C και πίεση 1 atm (Lide, 2003), δηλαδή είναι 1,2 φορές βαρύτερο από τον αέρα του περιβάλλοντος. Σε αραιά ηφαιστειακά νέφη, οι τυπικές συγκεντρώσεις του υδροχλωρίου κυμαίνονται από 0.1 ppm έως 3 ppm, ενώ φυσιολογικά στην τροπόσφαιρα, βρίσκεται σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις της τάξης του 0.000001 ppm έως 0.001 ppm. Ο χρόνος παραμονής του αερίου στην κατώτερη ατμόσφαιρα είναι περίπου 4 ημέρες (Brimblecombe, 1996, Oppenheimer et al., 1998)

B) Επιτρεπτά όρια σε Υδροχλώριο

Για τα επιτρεπτά όρια έκθεσης σε υδροχλώριο, υπάρχουν κατευθυντήριες γραμμές μόνο όσον αφορά την επαγγελματική έκθεση. Σύμφωνα με τον οδηγό για τους κινδύνους από χημικές ουσίες, η μέγιστη συγκέντρωση για το υδροχλώριο είναι τα 5 ppm (NIOSH 2003).

Γ) Επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση σε Υδροχλώριο

Η υψηλή διαλυτότητα του υδροχλωρίου στο νερό, έχει σαν αποτέλεσμα, η έκθεση στο υδροχλώριο να σημαίνει έκθεση σε ένα μίγμα αερίου και αερολύματος.

Σε περίπτωση επαφής με την επιδερμίδα, ενδέχεται να προκληθεί φλεγμονή στο δέρμα ή ακόμα και έγκαυμα (NIOSH, 1981). Παρατεταμένη έκθεση σε αυξημένα επίπεδα υδροχλωρίου, μπορεί να προκαλέσει διάβρωση στα δόντια αλλά και δημιουργία ελκών στο εσωτερικό της μύτης. Η εισπνοή υδροχλωρίου, μπορεί να προκαλέσει πνιγμό, βήχα ή πρήξιμο στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα, ανάλογα με τη σοβαρότητα της έκθεσης.

Τα όρια της συγκέντρωσης και οι προκαλούμενες επιπτώσεις στην υγεία, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2-7. Επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση σε υδροχλωρίο

Όρια έκθεσης ppm	Επιπτώσεις στην υγεία
5<	Βήχας
35	Ερεθισμός στο λαιμό μετά από σύντομο χρονικό διάστημα
35<	Σοβαρή δυσκολία στην αναπνοή, ερεθισμός του δέρματος ή και έγκαυμα
10-50	Το μέγιστο επίπεδο στο οποίο μπορεί κανείς να παραμείνει για αρκετές ώρες
100<	Οίδημα στους πνεύμονες και συχνά σπασμοί στο λαιμό
50-1000	Μέγιστη πιθανή έκθεση για μία ώρα
1000-2000	Πάρα πολύ επικίνδυνο επίπεδο ακόμα και για σύντομη έκθεση

Δ) Εκλύσεις Υδροχλωρίου λόγω ηφαιστειακής δραστηριότητας

Οι μετρήσεις των ροών του υδροχλωρίου είναι πολύ πιο συνηθισμένες από τη μέτρηση των συγκεντρώσεών του και δεν έχουν καταγραφεί περιστατικά που να αφορούν υψηλές συγκεντρώσεις. Ωστόσο οι συγκεντρώσεις του υδροχλωρίου κοντά σε περιοχές έκλυσης ηφαιστειακών αερίων, μπορεί να υπερβούν τα επαγγελματικά πρότυπα.

Στο ηφαίστειο Yasur, στο νησί Τάννα, ένα από τα νοτιότερα του Βανουάτου, δείγματα αερίου που συλλέχτηκαν στο χείλος του κρατήρα το Σεπτέμβριο του 1988, περιείχαν συγκεντρώσεις υδροχλωρίου μεταξύ 3 ppm και 9 ppm (SEAN 13:12).

Στο ηφαίστειο Κιλάουα (Kilauea), στη Χαβάη οι συγκεντρώσεις του αερίου υδροχλωρίου στην περιοχή έκλυσης αερίων στο Pu'u O'o, τον Ιούλιο του 2003, κυμαίνονταν από 0.1 ppm έως 19.15 ppm, σύμφωνα με δημοσίευτες μετρήσεις του C. Witham. Όταν η λάβα του ηφαιστίου χυνόταν στη θάλασσα, εξαιτίας της χημικής αντίδρασης που λάμβανε χώρα μεταξύ της λάβας και του θαλάσσιου νερού, δημιουργούνταν λευκά σύννεφα από τη μεγάλη θερμότητα και τις

βίαιες αντιδράσεις. Στα ομιχλώδη αυτά σύννεφα τα “laze”, που δεν είναι τίποτα άλλο παρά μίγμα υδροχλωρικού οξέος και υδρατμών, το Μάρτιο του 1990, οι συγκεντρώσεις του υδροχλωρίου έφταναν κατά μέσο όρο τα 7.1 ppm, τιμή που υπερβαίνει κατά πολύ τα επαγγελματικά πρότυπα για την ποιότητα του αέρα (Kullman et al., 1994). Οι συγκεντρώσεις αυτές μειώνονταν ταχύτατα καθώς μεγάλωνε η απόσταση από την πηγή. Να σημειωθεί ότι η κύρια πηγή αέριου υδροχλωρίου στην περίπτωση των laze, δεν είναι τα ηφαιστειακά αέρια αλλά το θαλασσινό νερό, γι αυτό και οι επικίνδυνες συνέπειες του φαινομένου περιορίζονται στην ακτή. Η λάβα όταν έρχεται σε επαφή με το θαλασσινό νερό, προκαλεί το βρασμό και την εξάτμισή του με αποτέλεσμα τα διαλυμένα χλωρίδια (χλωρίδιο του Νατρίου (NaCl), χλωρίδιο του Μαγνησίου (MgCl₂), χλωρίδιο του Ασβεστίου (CaCl₂)) να αντιδρούν με το υδρογόνο του νερού και να σχηματίζουν υδροχλωρικό οξύ. Μετρήσεις υδροχλωρίου ακριβώς στην ανατολική περιοχή του κρατήρα του Pu'u O'o, έδειξαν συγκεντρώσεις με εύρος από 3 ppm έως 20 ppm και από 1.5 ppm έως 4.5 ppm στα σημεία όπου το νέφος των αερίων, συναντούσε τη θάλασσα σύμφωνα με αδημοσίευστα στοιχεία του HVO.

Στο Μεξικό, στο ενεργό ηφαιστειο Popocatepetl, κοντά στα σημεία έκλυσης αερίων, οι συγκεντρώσεις του υδροχλωρίου που μετρήθηκαν το Φεβρουάριο του 1997, ήταν περίπου 1 ppm (δηλαδή 200 µg/m³) τιμή η οποία είναι ίση με την οριακή μέση τιμή για οκτάωρη έκθεση σύμφωνα με τα επαγγελματικά πρότυπα για την ποιότητα του αέρα του Ηνωμένου Βασιλείου.

Στη λίμνη Βιγιαρίκα κοντά στο ενεργό στρωματοηφαίστειο Βιγιαρίκα (Villarrica) στη Χιλή, οι συγκεντρώσεις υδροχλωρίου, περιστασιακά υπερβαίνουν τα 5 ppm, τιμή η οποία αποτελεί όριο σύμφωνα με τα επαγγελματικά πρότυπα για την ποιότητα του αέρα (NIOSH).

Στη Νικαράγουα στο ηφαίστειο Masaya, 20 Km νότια της πρωτεύουσας Μανάγκουα, το Μάρτιο του 1999, οι μέγιστες συγκεντρώσεις υδροχλωρίου, που μετρήθηκαν στο νέφος αερίων πάνω από τον κρατήρα, ήταν κατά μέσο όρο μεγαλύτερες από 23 ppm (Horrocks et al., 1999), τιμή που υπερβαίνει κατά πολύ τις κατευθυντήριες γραμμές σχετικά με τα επαγγελματικά όρια για την ποιότητα του αέρα. Το Μάρτιο του 1988, αντίστοιχες μετρήσεις σε απόσταση 14 Km από τον κρατήρα, έδωσαν τιμές της τάξης των 0.3 ppm (Horrocks, 2001). Το Μάρτιο του 2003, οι μέγιστες τιμές των συγκεντρώσεων του υδροχλωρίου που μετρήθηκαν στο χείλος του κρατήρα, ήταν 0.902 ppm (Allen et al., 2002).

2.2.4.2. Υδροφθόριο (HF)

A) Φυσικές Ιδιότητες Υδροφθορίου

Το υδροφθόριο, είναι ένα άχρωμο αέριο που ανήκει στα υδραλογόνα, με ιδιαίτερα έντονη, ερεθιστική οσμή. Είναι διαλυτό στο νερό σε οποιαδήποτε αναλογία, (Gangolli 1999) και δεν είναι εύφλεκτο.

Το αέριο υδροφθόριο έχει πικρή γεύση και μπορεί να αντιδράσει με την υγρασία του αέρα και να σχηματίσει ομίχλη. Έχει πυκνότητα 0.82 g/L σε κανονικές συνθήκες (θερμοκρασία 25 °C και πίεση 1 atm), η οποία είναι κατά 30% μικρότερη από αυτήν του αέρα (Lide, 2003).

Οι τυπικές συγκεντρώσεις του υδροφθορίου σε αραιά ηφαιστειακά νέφη αερίων είναι μικρότερες από 1 ppm και η συγκέντρωσή του στην τροπόσφαιρα κυμαίνεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα (Bribblecombe, 1996, Oppenheimer et al., 1998).

Κατά τη διάρκεια ισχυρών ηφαιστειακών εκρήξεων, το υδροφθόριο, μπορεί να συμπυκνωθεί με τα σωματίδια σκόνης και τέφρας του ηφαιστειακού νέφους, και να σχηματίσει ένα εξωτερικό στρώμα από προσροφημένο φθόριο στα σωματίδια. Όσο μικρότερα είναι τα σωματίδια, τόσο αυξάνεται η συνολική προσροφητική επιφάνεια και συνεπώς, τα μικρότερα σωματίδια μπορούν να προσροφήσουν περισσότερο φθόριο ανά μονάδα μάζας απ' ό,τι τα μεγαλύτερα σωματίδια (Okarsson, 1980). Τα μικρότερα σωματίδια, έχουν την ικανότητα, με τη βοήθεια του ανέμου, να μεταφερθούν σε μεγάλη απόσταση από την πηγή, αυξάνοντας την πιθανότητα πρόκλησης δηλητηριάσεων από φθόριο σε μεγαλύτερη περιοχή. Η πολύ μεγάλη διαλυτότητα του υδροφθορίου στο νερό οδηγεί σε ταχεία εισαγωγή του στον υδροφόρο ορίζοντα του εδάφους, σε περίπτωση που η ηφαιστειακή τέφρα συναντήσει βροχή ή υγρό έδαφος (Gregory, 1996). Για το λόγο αυτό δίνονται όχι μόνο κατευθυντήριες γραμμές για τα επίπεδα του αερίου υδροφθορίου στον αέρα αλλά και για τα επίπεδα του φθορίου στο πόσιμο νερό.

B) Επιτρεπτά όρια Υδροφθορίου

Μόνο για τα επαγγελματικά πρότυπα ποιότητας αέρα υπάρχουν οδηγίες σχετικά με το αέριο υδροφθόριο. Τα ανώτατα όρια έκθεσης σε χώρους εργασίας για το υδροφθόριο έχουν οριστεί στα 3 ppm για οκτάωρη έκθεση την ημέρα ή για έκθεση 40 ωρών την εβδομάδα (ACGIH). Ενώ το όριο των 30 ppm θεωρείται άμεσα επικίνδυνο για την υγεία και τη ζωή (NIOSH).

Μεγαλύτερος κίνδυνος όμως υφίσταται από την εισαγωγή του φθορίου στον υδροφόρο ορίζοντα και κατ' επέκταση στην παροχή νερού και για το λόγο αυτό, έχουν δοθεί κατευθυντήριες γραμμές όσον αφορά τις συγκεντρώσεις του φθορίου στο πόσιμο νερό, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2-8. Κατευθυντήριες γραμμές για τις συγκεντρώσεις υδροφθορίου στο πόσιμο νερό

Χώρα-Οργανισμός	Επίπεδο ανοχής του φθορίου στο πόσιμο νερό (mg/L)	Χρονολογία εφαρμογής	Παρατηρήσεις
United Kingdom	1.5	2000	
WHO	1.5	1984	Με κατανάλωση νερού 2lt την ημέρα
USA	4	2004	Το μέγιστο επίπεδο ρύπανσης του πόσιμου νερού το οποίο τέθηκε υπό αναθεώρηση

Γ) Επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση σε Υδροφθόριο

Ακόμα και σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις η εισπνοή αέριου υδροφθορίου, μπορεί να προκαλέσει ερεθισμό στα μάτια, τη μύτη και το λαιμό (ATSDR). Οι κίνδυνοι για την υγεία, δεν οφείλονται μόνο στην εισπνοή αέριου υδροφθορίου αλλά και στην εισπνοή των αναθυμιάσεων που προκύπτουν από συμπυκνωμένο υγρό υδροφθόριο. Η ισχυρή, ερεθιστική οσμή του υδροφθορίου μπορεί να γίνει αισθητή σε συγκεντρώσεις των 0.04 ppm, τιμή αρκετά χαμηλότερη από την οριακή ανώτερη τιμή των 3 ppm που ορίζεται για τα επαγγελματικά πρότυπα της ποιότητας του αέρα. Συνεπώς η οσμή, παρέχει γενικά επαρκή προειδοποίηση των επικίνδυνων συγκεντρώσεων. Τα παιδιά είναι πιο ευάλωτα στην έκθεση σε υδροφθόριο, λόγω της σχετικά μικρότερης διαμέτρου των αεραγωγών τους. (ATSDR).

Η δερματική επαφή με υδατικό διάλυμα υδροφθορίου, έχει σαν αποτέλεσμα το ιόν του φθορίου να διαπεράσει τους ιστούς σε βάθος και να προκαλέσει εκτός από τοπική καταστροφή των κυττάρων και τοξικότητα ενώ η κατάποση έστω και μικρής ποσότητας υδροφθορικού οξέος, μπορεί να αποβεί μοιραία.

Το υδροφθόριο είναι επίσης ερεθιστικό για τους βλεννογόνους και ενδέχεται να προκαλέσει ερεθισμό του αναπνευστικού συστήματος, βήχα, στένωση των βρόγχων, απόφραξη των άνω αεραγωγών, συσώρευση υγρού στους πνεύμονες και αιμορραγία. Είναι δυνατόν να παρουσιασθούν συμπτώματα ναυτίας, εμετού, γαστρικού άλγους ή και καρδιακή αρρυθμία.

Σε περίπτωση έκθεσης σε αραιά διαλύματα υδροφθορίου (λιγότερα από 20%), τα συμπτώματα μπορεί να καθυστερήσουν για αρκετές ημέρες. Η απορρόφηση σημαντικών ποσοτήτων υδροφθορίου από οποιαδήποτε οδό, μπορεί να αποβεί θανατηφόρα.

Οι τοξικές επιδράσεις του υδροφθορίου οφείλονται κατά κύριο λόγο στο ιόν του φθορίου, το οποίο διεισδύοντας στους ιστούς δεσμεύει ενδοκυττάριο ασβέστιο και μαγνήσιο. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις φθορίου στο σώμα, μπορεί να επηρεάσουν τα επίπεδα ασβεστίου, μαγνησίου και καλίου στο αίμα. Η υποασβεστιαίμια μπορεί να προκαλέσει τετανία, μειωμένη συσταλτικότητα του μυοκαρδίου και πιθανή κατάρρευση του καρδιαγγειακού συστήματος. Η υπερκαλιαιμία μπορεί να προκαλέσει κοιλιακή μαρμαρυγή και να οδηγήσει ακόμα και στο θάνατο.

Ανάλογα με τη συγκέντρωση και τη διάρκεια της έκθεσης, η επαφή με το δέρμα μπορεί να προκαλέσει πόνο, ερυθρότητα του δέρματος και βαθιά, αργή επούλωση των εγκαυμάτων.

Επίσης επιπτώσεις από το υδροφθόριο μπορεί να υπάρξουν για τα ζώα που βόσκουν. Έτσι, υπάρχει η πιθανότητα δηλητηρίασης των προβάτων σε περίπτωση που η περιεκτικότητα σε φθόριο στα ξερά χόρτα, υπερβαίνει τα 250 ppm. Οι πιο επικίνδυνες καταστάσεις για τη βόσκηση των ζώων, συνήθως παρουσιάζονται σε τέτοια απόσταση από το ηφαίστειο, όπου το στρώμα τέφρας είναι τόσο λεπτό που δεν μπορεί να αποτρέψει τα ζώα από τη βόσκηση. Δηλητηρίαση μπορεί να συμβεί σε περιοχές όπου έχει αποτεθεί στρώμα ηφαιστειακής τέφρας ή σκόνης με πάχος μόλις 0.5 mm. Η οξεία δηλητηρίαση μπορεί να συνοδεύεται από κατάθλιψη, σιελόρροια, απώλεια της όρεξης και του συντονισμού των κινήσεων, δυσκολία στην αναπνοή, ρινικές εκκρίσεις, επιληπτικές κρίσεις με σπασμούς, πνευμονικό οίδημα, νεφρική και ηπατική βλάβη, κώμα και θάνατο (O'Hara et al., 1982).

Δ) Εκλύσεις Υδροφθορίου λόγω ηφαιστειακής δραστηριότητας

Η καταγραφή των συγκεντρώσεων των ροών υδροφθορίου είναι πολύ πιο συνηθισμένη από την καταγραφή των μετρήσεων του αερίου υδροφθορίου και δεν υπάρχουν τεκμηριωμένες εκθέσεις που να επιβεβαιώνουν άμεσες επιπτώσεις των υψηλών συγκεντρώσεων του ηφαιστειακού υδροφθορίου στον άνθρωπο. Σε γενικές γραμμές φαίνεται ότι οι πρωτογενείς εκπομπές υδροφθορίου εξαιτίας τη ηφαιστειακής δραστηριότητας είναι σπάνια επικίνδυνες ενώ αντίθετα οι κίνδυνοι που οφείλονται στη ρύπανση του πόσιμου νερού και των εδαφών από το φθόριο έχουν τεκμηριωθεί επαρκώς.

Στο Μεξικό, στο ενεργό ηφαίστειο Popocatepetl, κοντά στα σημεία έκλυσης αερίων, οι συγκεντρώσεις του υδροφθορίου που μετρήθηκαν το Φεβρουάριο του 1997 ήταν περίπου 0.3 ppm (δηλαδή 250μg/m³), αρκετά κάτω από τα επαγγελματικά πρότυπα για την ποιότητα του αέρα (Goff et al., 1998).

Στη Νικαράγουα, 20 Km νότια της πρωτεύουσας Μανάγκουα, στο ηφαίστειο Masaya, οι μέγιστες συγκεντρώσεις στο νέφος αερίων που μετρήθηκαν στο χείλος του κρατήρα Santiago, το Μάιο του 2001, ήταν 0.567 ppm και πάλι αρκετά κάτω από τις κατευθυντήριες γραμμές για τα επαγγελματικά πρότυπα ποιότητας του αέρα (Allen et al. 2002). Ωστόσο το Μάρτιο του 1999, οι μέγιστες μέσες συγκεντρώσεις του υδροφθορίου πάνω από τον κρατήρα Masaya, ήταν μεγαλύτερες από 4 ppm, τιμή που υπερβαίνει πολλές κατευθυντήριες γραμμές οι οποίες αφορούν τόσο βραχυπρόθεσμη όσο και μακροπρόθεσμη έκθεση σε υδροφθόριο.

Στο ηφαίστειο Κιλάουα (Kilauea), στη Χαβάη, το Μάρτιο του 1990, μετρήσεις των συγκεντρώσεων υδροφθορίου στα νέφη τα οποία σχηματίστηκαν από την αλληλεπίδραση της λάβας με το θαλασσινό νερό έδωσαν τιμές μικρότερες από 1 ppm (Kullman et al., 1994). Ωστόσο μετρήσεις στην περιοχή έκλυσης αερίων στο Pu'u O'o, το 2004, έδειξαν συγκεντρώσεις υδροφθορίου που κυμαίνονταν από 3 έως 15 ppm (USGS, αδημοσίευτα στοιχεία).

Επιπτώσεις έχουν αναφερθεί σε ζώα που βόσκουν, λόγω της κατανάλωσης βλάστησης η οποία έχει επηρεασθεί από τις ηφαιστειακές αποθέσεις και έχει αναμειχθεί με την ηφαιστειακή σκόνη του εδάφους.

Επίσης όπως έχει ήδη αναφερθεί, επιπτώσεις μπορεί να υπάρξουν στην υγεία του ανθρώπου από την κατανάλωση πόσιμου νερού με υψηλές συγκεντρώσεις σε φθόριο.

Στη μεγάλη ρηξιγενή κοιλάδα της Αφρικής, στη Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκο, στο ηφαίστειο Nyiragongo, το 2003, έγιναν μετρήσεις σε δεξαμενές συλλογής πόσιμου νερού οι οποίες έδειξαν συγκεντρώσεις φθορίου που έφταναν τα 23mg/L, τιμή 15 φορές περίπου μεγαλύτερη από τα όρια που έχουν θεσπιστεί σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO).

Στην ηφαιστειακή ζώνη των Άνδεων, στο ηφαίστειο Lonquimay στη Χιλή, κατά τη διάρκεια της ηφαιστειακής δραστηριότητας του 1988, 100.000 αγροκτήματα ζώων επλήγησαν από τη φθοριούχο ηφαιστειακή στάχτη και χιλιάδες άνθρωποι είχαν δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία τους που σχετίζονταν με υψηλές συγκεντρώσεις λεπτής ηφαιστειακής σκόνης, αποτελούμενης από σωματίδια επικαλυμμένα με φθόριο (SEAN 14:6-7). Το μεγαλύτερο ποσοστό του πληγέντος πληθυσμού εκκένωσε την περιοχή.

Στην περιοχή του ηφαιστίου της Αίτνας στην Ιταλία, του ηφαιστίου Kilauea στη Χαβάη και La Soufriere στη Γουαδελούπη, ανιχνεύθηκαν υψηλά επίπεδα φθορίου στη βλάστηση κοντά στα ηφαίστεια (Garrec et al., 1977, Notcutt and Davies, 1989, Notcutt and Davies, 1993).

Στην καλντέρα Furnas στις Αζόρες, ανιχνεύθηκαν υψηλά επίπεδα φθορίου στις λειχήνες, γεγονός που καταδεικνύει τις ηφαιστειακές εκπομπές φθορίου ως υπεύθυνες για τα υψηλά επίπεδα φθορίου στα υπόγεια ύδατα, τα οποία προκάλεσαν οδοντική φθορίωση στον τοπικό πληθυσμό (Notcutt and Davies, 1999).

Στο ηφαίστειο Έκλα (Hekla) στην Ισλανδία, κατά τη διάρκεια της έκρηξης του 1970, ένας συνδυασμός μιας φτωχής συγκομιδής σανό και φθορίωσης από το φθόριο που είχε προσροφηθεί από τα σωματίδια της ηφαιστειακής στάχτης, προκάλεσε το θάνατο του 3% των ενήλικων προβάτων καθώς και το θάνατο του 8-9% των αμνών σε περιοχές στις οποίες το στρώμα στάχτης που είχε αποθεθεί, είχε πάχος μικρότερο από 1 χιλιοστό (Thorarinsson and Sigvaldason 1972, O'Hara et al., 1982).

Στο ηφαίστειο Ruapehu στη Νέα Ζηλανδία, οι θάνατοι αρκετών χιλιάδων προβάτων μετά την ηφαιστειακή έκρηξη του 1995, πιστεύεται ότι οφείλονταν σε φθορίωση. Επίσης μετά από τις εκρήξεις του 1995 και 1996, έχουν αναφερθεί μεμονωμένες περιπτώσεις φθορίωσης σε βοοειδή (Cronin et al., 2003).

Μετά τις ηφαιστειακές εκρήξεις του 1783 και 1784 που έλαβαν χώρα στο ηφαίστειο Laki στην Ισλανδία, ένα πολύ μεγάλο ποσοστό των ζώων του νησιού κατέληξε σε θάνατο (11.500 χιλιάδες βοοειδή, 28.000 άλογα και 190.000 πρόβατα). Οι θάνατοι αυτοί των ζώων, αποδίδονται σε φθορίωση (Gregory, 1996).

2.2.5. Επιπτώσεις του Μεθανίου (CH_4) στην υγεία

A) Φυσικές Ιδιότητες του Μεθανίου

Το μεθάνιο είναι οργανική χημική ένωση που περιέχει άνθρακα και υδρογόνο καθώς και το μικρότερο σταθερό μόριο υδρογονάνθρακα με ένα άτομο άνθρακα. Αποτελεί το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου και ίσως την πιο άφθονη οργανική ένωση στη Γη. Είναι αέριο του θερμοκηπίου που παραμένει στην ατμόσφαιρα για περίπου 9-15 χρόνια και είναι πάνω από 20 φορές πιο αποτελεσματικό στη δέσμευση θερμότητας στην ατμόσφαιρα σε σχέση με το διοξείδιο του άνθρακα, σε μια περίοδο 100 ετών. Σε θερμοκρασία δωματίου και κανονική πίεση, το μεθάνιο είναι αέριο άχρωμο και άοσμο. Δεν είναι τοξικό αέριο αλλά είναι εξαιρετικά εύφλεκτο και έχει την ιδιότητα να μπορεί να σχηματίσει εκρηκτικά μίγματα με τον αέρα. Το μεθάνιο επίσης αντιδρά βίαια με οξειδωτικά, αλογόνα καθώς και με κάποιες ενώσεις που περιέχουν αλογόνα. Το μεθάνιο μπορεί να προκαλέσει ασφυξία αφού σε κλειστούς χώρους, μπορεί να εκτοπίσει το οξυγόνο που είναι απαραίτητο για την αναπνοή.

Εξαιτίας της σημερινής αύξησης των συγκεντρώσεων του μεθανίου σε παγκόσμιο επίπεδο, καταβάλλονται προσπάθειες από την επιστημονική κοινότητα να εντοπιστούν και να οριοθετηθούν οι πηγές εκπομπής μεθανίου, μια και το μεθάνιο, όπως αναφέρθηκε, ανήκει στα αέρια του θερμοκηπίου. Η ατμοσφαιρική συγκέντρωση του μεθανίου έχει υπερδιπλασιαστεί από τις αρχές του 1800, φθάνοντας σε συγκεντρώσεις περίπου το $1.8 \mu\text{mol mol}^{-1}$ (IPCC 2001).

B) Επιτρεπτά όρια Μεθανίου

Ο κίνδυνος ασφυξίας, είναι γενικά δευτερεύουσας σημασίας, επειδή, η συγκέντρωση στην οποία μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην υγεία, είναι πολύ υψηλότερη από τη συγκέντρωση του 5-15% στις οποίες δημιουργείται εκρηκτικό και εύφλεκτο μίγμα. Ασφυξία πάντως μπορεί να προκληθεί όταν η συγκέντρωση του οξυγόνου μειωθεί σε ποσοστό κάτω από

16%. Οι περισσότεροι άνθρωποι, παρουσιάζουν ανθεκτικότητα σε μείωση της συγκέντρωσης του οξυγόνου από 21 σε 16%, χωρίς να παρουσιάσουν προβλήματα στην υγεία (D'Alessandro, Kyriakopoulos 2013).

Γ) Επιπτώσεις στην Υγεία από την έκθεση σε Μεθάνιο

Όπως αναφέρθηκε το μεθάνιο μπορεί να προκαλέσει ασφυξία αφού σε κλειστούς χώρους, μπορεί να εκτοπίσει το οξυγόνο που είναι απαραίτητο για την αναπνοή. Η μειωμένη παροχή οξυγόνου μπορεί να προκαλέσει ασφυξία, και απώλεια συνείδησης, κεφαλαλγία, ζάλη, αδυναμία και κόπωση, ναυτία, εμετό, απώλεια συντονισμού κινήσεων. Η επαφή του δέρματος με το υγρό μεθάνιο μπορεί να προκαλέσει κρυοπαγήματα. Εκλύσεις μεθανίου από το έδαφος, φυσικής ή ανθρωπογενούς προέλευσης, μπορεί να διαπεράσουν στο εσωτερικό κτιρίων και να αποτελέσουν δυνητικό κίνδυνο για τους κατοίκους (Thielemann et al. 2001).

Δ) Εκλύσεις Μεθανίου λόγω ηφαιστειακής δραστηριότητας

Μελέτες (Etiope et al. 2006b), αποδεικνύουν ότι στην Ελλάδα και συγκεκριμένα στο Κατάκολο στη Δυτική Πελοπόννησο, στην περιοχή του λιμανιού όπου συχνάζει πλήθος τουριστών οι οποίοι αποβιβάζονται και επιβιβάζονται καθημερινά σε κρουαζιερόπλοια, επικίνδυνα για ανάφλεξη επίπεδα μεθανίου.

Επίσης επικίνδυνες συγκεντρώσεις μεθανίου μετρήθηκαν και στα αέρια που απελευθερώνονται από τα ιαματικά λουτρά Άμπλας και Πλατυστόμου Φθιώτιδας, στο Σμόκοβο στην Καρδίτσα καθώς και στα ιαματικά λουτρά Λουτροχωρίου Πέλλας (D'Alessandro, Kyriakopoulos 2013).

Κεφάλαιο 3.

Επιπτώσεις της Τέφρας και των Ηφαιστειακών Αερίων στο Περιβάλλον

3.1. Επιπτώσεις της τέφρας και των ηφαιστειακών αερίων στο κλίμα

Τα ηφαιστειακά αέρια έχουν επηρεάσει και επηρεάζουν όχι μόνο τη σύνθεση της ατμόσφαιρας και της υδρόσφαιρας αλλά μπορεί να επηρεάσουν ακόμα και την αλλαγή του κλίματος της Γης.

Κατά τη διάρκεια ισχυρών ηφαιστειακών βασαλτικών εκρήξεων, μεγάλες ποσότητες ηφαιστειακών αερίων και αερολυμάτων, εισέρχονται στην ατμόσφαιρα. Το μεγαλύτερο μέρος αυτών, παραμένει στη στρατόσφαιρα μόνο για μερικές ημέρες ή εβδομάδες έχοντας έτσι μικρή συμβολή στην αλλαγή του κλίματος. Άλλα ηφαιστειακά αέρια, όπως το διοξείδιο του θείου μπορεί να προκαλέσει παγκόσμια ψύξη, ενώ το ηφαιστειακό διοξείδιο του άνθρακα, ένα από τα κυριότερα αέρια του θερμοκηπίου, μπορεί να συμβάλλει στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Οι βασαλτικές εκρήξεις, περιέχουν μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του θείου, το οποίο μπορεί να προκαλέσει μακροχρόνιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

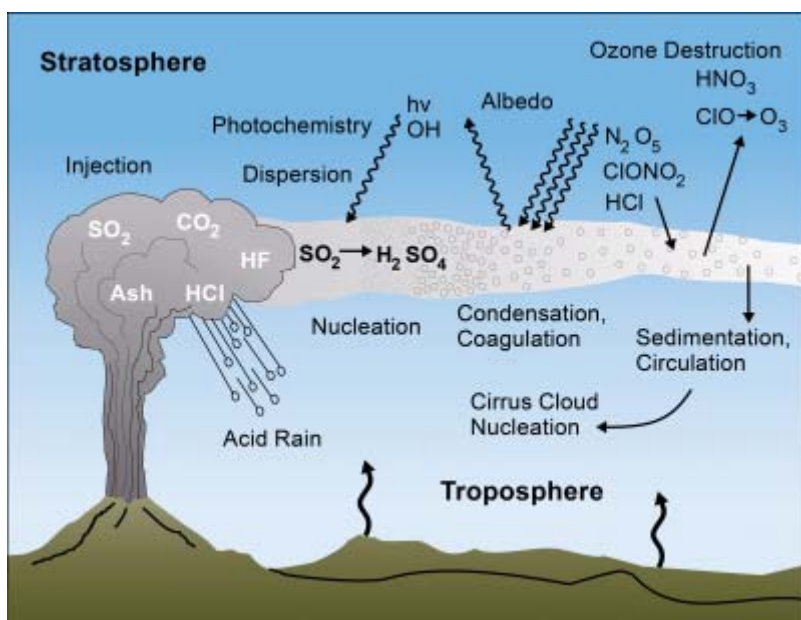
Οι πιο σημαντικές λοιπόν επιπτώσεις στο κλίμα από τις ηφαιστειακές εκπομπές, προέρχονται από τη μετατροπή του διοξειδίου του θείου σε θειικό οξύ (H_2SO_4), το οποίο, στην ατμόσφαιρα, συμπυκνώνεται ταχύτατα, σχηματίζοντας θειικά αερολύματα με πολύ μικρής διαμέτρου αιωρούμενα σωματίδια. Τα αερολύματα αυτά αυξάνουν την αντανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας πίσω στο διάστημα, οδηγώντας έτσι στην μείωση της θερμοκρασίας στην κατώτερη ατμόσφαιρα, την τροπόσφαιρα. Αρκετές εκρήξεις κατά τη διάρκεια του περασμένου αιώνα έχουν προκαλέσει μια μείωση της μέσης θερμοκρασίας στην επιφάνεια της Γης μέχρι και μισό βαθμό (κλίμακα Φαρενάιτ) για περίοδο ενός έως τριών ετών (Bluth et al. 1997).

Η κλιμακούμενη έκρηξη του Όρους Πινατούμπο (Pinatubo) στις Φιλιππίνες, στις 15 Ιουνίου 1991, ήταν μία από τις μεγαλύτερες εκρήξεις του εικοστού αιώνα. 20 Εκατομμύρια τόνοι (μετρική κλίμακα) ενός νέφους από διοξείδιο του θείου εκλύθηκαν στη στρατόσφαιρα, σε υψόμετρο πάνω από 20 μίλια. Το νέφος διοξειδίου του θείου του Pinatubo ήταν το μεγαλύτερο νέφος διοξειδίου του θείου που παρατηρήθηκε ποτέ στη στρατόσφαιρα από την αρχή των δορυφορικών παρατηρήσεων του 1978. Η έκρηξη του Pinatubo, θεωρείται ότι προκάλεσε τη μεγαλύτερη διατάραξη των στρατοσφαιρικών αερολυμάτων στον 20^ο αιώνα, αν και πιθανώς μικρότερη από εκείνες που προκάλεσαν οι εκρήξεις στο Krakatau το 1883 και στο Tambora το 1815. Για σχεδόν τα επόμενα τρία χρόνια μετά από την έκρηξη, παρατηρήθηκε μείωση της μέσης θερμοκρασίας της επιφάνειας της Γης. Το θειικό αεροζόλ που απελευθερώθηκε από την ισχυρή έκρηξη του ηφαιστείου Tambora της Ινδονησίας, κατηγορήθηκε για το «έτος χωρίς καλοκαίρι» και προκάλεσε σε όλο τον κόσμο ακραίες καιρικές συνθήκες και μείωση των παγκόσμιων θερμοκρασιών κατά μέσο όρο περίπου 0,5 ° C (~ 1,0 ° F). Πιθανότατα συνέβαλε και η έκλυση των πυροκλαστικών υλικών στην ατμόσφαιρα η οποία μπορεί να έχει παγκόσμιες

καθώς και τοπικές συνέπειες. Όταν ο όγκος ενός ηφαιστειακού νέφους είναι αρκετά μεγάλος, και το σύννεφο των πυροκλαστικών υλικών έχει εξαπλωθεί αρκετά μακριά από τον άνεμο, τότε μπορεί να μπλοκάρει το φως του ήλιου και να προκαλέσει προσωρινή ψύξη της επιφάνειας της Γης.

"Καθημερινά οι θερμοκρασίες ήταν σε πολλές περιπτώσεις ασυνήθιστα χαμηλές από τα τέλη της άνοιξης έως αρχές του φθινοπώρου. Συχνοί βορειοδυτικοί άνεμοι έφερναν το χιόνι και τον παγετό στη βόρεια Νέα Αγγλία και τον Καναδά και καταρρακτώδεις βροχές έπεφταν στη Δυτική Ευρώπη με αποτέλεσμα πολλές καλλιέργειες να μην καταφέρουν να ωριμάσουν ούτως ώστε οι κακές σοδειές να οδηγήσουν στην πείνα και οι ασθένειες και κοινωνική αγωνία ... " (Stothers 1984).

Οι εκρήξεις στο ηφαίστειο Laki της Ισλανδίας, το 1783 και 1784, απελευθέρωσαν στην ατμόσφαιρα, ένα εντυπωσιακά μεγαλύτερο νέφος διοξειδίου του θείου (περίπου 120 εκατομμύρια τόνους, έναντι 20 εκατομμύρια τόνους που εκλύθηκαν από το Pinatubo). Σε όλες τις περιπτώσεις, το διοξείδιο του θείου που προστέθηκε στην ατμόσφαιρα από τις ηφαιστειακές εκπομπές, προκάλεσε περιφερειακή μείωση της θερμοκρασίας τόσο στην Ευρώπη, όσο και στη Βόρεια Αμερική για παρόμοιες χρονικές περιόδους.



Εικόνα 3.1. Τα ηφαιστειακά αέρια αντιδρούν με την ατμόσφαιρα με πολλούς τρόπους. Η μετατροπή του διοξειδίου του θείου σε θειικό οξύ έχει τις πιο σημαντικές επιπτώσεις στο κλίμα της Γης.

(πηγή: USGS)

Ωστόσο, η συντριπτική πλειοψηφία των ηφαιστειακών εκρήξεων έχουν πολύ περιορισμένη και τοπική δράση για το κλίμα και το περιβάλλον. Αυτό συμβαίνει επειδή (1) το ποσό των αερίων που απελευθερώνεται είναι μικρό, (2) η έκρηξη δεν διαρκεί αρκετό καιρό, (3) το σύννεφο της ηφαιστειακής έκρηξης δεν φθάνει αρκετά ψηλά ώστε τα συστατικά του να εισχωρήσουν στη στρατόσφαιρα.

3.2. Επιπτώσεις της τέφρας και των ηφαιστειακών αερίων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι αέριο του θερμοκηπίου και μάλιστα το κυριότερο αέριο το οποίο κατηγορείται για την αλλαγή του κλίματος της Γης. Οι εκλύσεις του διοξειδίου του άνθρακα που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα εξαιτίας των ηφαιστειακών εκρήξεων είναι δυνατόν να ενισχύσουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η ποσότητα, όμως του ηφαιστειακού διοξειδίου του άνθρακα είναι κατά πολύ μικρότερη (~150 φορές) από αυτήν που προσθέτουν κάθε χρόνο οι ανθρώπινες δραστηριότητες (το 2010 οι ανθρώπινες δραστηριότητες ευθύνονται για 35 εκατομμύρια μετρικούς τόνους διοξειδίου του άνθρακα που εκλύθηκαν στην ατμόσφαιρα(USGS)). Το 1980 η έκρηξη του ηφαιστείου St. Helens απελευθέρωσε περίπου 10 εκατομμύρια τόνους διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα σε μόλις 9 ώρες. Ωστόσο σήμερα η ανθρωπότητα σε μόλις 2,5 ώρες μπορεί να απελευθερώσει στην ατμόσφαιρα της Γης, την ίδια ποσότητα. Επίσης ενώ οι ηφαιστειακές εκρήξεις που απελευθερώνουν μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα συμβαίνουν σε παγκόσμιο επίπεδο κάθε 10 χρόνια οι ανθρώπινες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, είναι αδιάκοπες και συνεχώς αυξανόμενες (USGS).

Ενώ το διοξείδιο του θείου που απελευθερώνεται στη σύγχρονη εποχή από ηφαιστειακές εκρήξεις έχει κατά καιρούς προκαλέσει ανιχνεύσιμη παγκόσμια μείωση της θερμοκρασίας στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας, το διοξείδιο του άνθρακα που απελευθερώνεται, δεν έχει ποτέ προκαλέσει ανιχνεύσιμη παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας (USGS). Από την άλλη μεριά, η συμβολή της ηφαιστειακής δράσης στην παγκόσμια θέρμανση αντισταθμίζεται από το φαινόμενο των ηφαιστειακών χειμώνων. Η διαρκής αύξηση της θερμοκρασίας της Γης λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι έκδηλη από το 1980. Θα ήταν όμως ακόμη μεγαλύτερη αν δεν υπήρχαν ηφαιστειακές εκρήξεις όπως αυτές των ηφαιστίων El Chichon (Μεξικό, 1982) και Pinatubo (Φιλιππίνες, 1991).

3.3. Επιπτώσεις της τέφρας και των ηφαιστειακών αερίων στη στοιβάδα του όζοντος

Η επίδραση των ηφαιστειακών εκρήξεων στη μείωση της στοιβάδας του όζοντος είναι μάλλον έμμεση. Το ηφαιστειακό υδροχλώριο είναι το αέριο εκείνο το οποίο ευθύνεται για την καταστροφή του όζοντος αν και το μεγαλύτερο ποσοστό του περιορίζεται στην τροπόσφαιρα, κάτω από τη στρατόσφαιρα, όπου και παρασύρεται από τη βροχή, χάνοντας την ευκαιρία να αντιδράσει με το όζον.

Ωστόσο, σύμφωνα με δεδομένα που πάρθηκαν από δορυφόρους έπειτα από τις εκρήξεις των ηφαιστίων Pinatubo στις Φιλιππίνες και Hudson στη Χιλή το 1991, το όζον στα μεγάλα ύψη μειώθηκε σε ποσοστό 15-20% ενώ η μείωση πάνω από την Ανταρκτική, έφτασε το 50%. Από το γεγονός αυτό μπορεί να εξαγάγουμε το συμπέρασμα ότι ναι μεν η ηφαιστειακή δραστηριότητα παίζει σημαντικό ρόλο στη μείωση του όζοντος όμως το υδροχλώριο δεν είναι ο κύριος υπεύθυνος για τη μείωση αυτή.

Τα ηφαιστειακά σωματίδια και τα αερολύματα λειτουργούν ως καταλύτες, παρέχοντας την απαραίτητη επιφάνεια πάνω στην οποία το όζον θα αντιδράσει με τους χλωροφθοράνθρακες. Ο χρόνος, ο οποίος τα σωματίδια παραμένουν στην ατμόσφαιρα είναι

περίπου δύο με τρία χρόνια με αποτέλεσμα ο χρόνος των ηφαιστειακών επιπτώσεων να γίνεται πιο σύντομος.

3.4. Επιπτώσεις της τέφρας και των ηφαιστειακών αερίων στη βλάστηση

Τα φυτά χρησιμοποιούν το διοξείδιο του άνθρακα ως πρωταρχικό συστατικό για τη φωτοσύνθεση και εξαρτώνται από το αέριο αυτό για την επιβίωσή τους. Ωστόσο, το εκλυόμενο από ηφαιστειακή δραστηριότητα διοξείδιο του άνθρακα, μπορεί να συμπυκνωθεί στο έδαφος με αποτέλεσμα οι ρίζες των φυτών να καταστραφούν από ασφυξία, οδηγώντας σε αναστολή της απορρόφησης των θρεπτικών ουσιών από το έδαφος και στη συνέχεια τα φυτά στην καταστροφή (Farrar et al 1999, NIOSH 1976). Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε στο ηφαίστειο Mammoth στη Καλιφόρνια όπου το αέριο εκπέμπεται διαμέσου των πετρωμάτων που περιβάλλουν το όρος και γενικά θεωρείται σπάνιο (Farrar et al. 1999).

Το διοξείδιο του θείου που απελευθερώνεται λόγω της ηφαιστειακής δραστηριότητας αντιδρά χημικά με το οξυγόνο, τα σωματίδια σκόνης, το ηλιακό φως και την υγρασία της ατμόσφαιρας και σχηματίζει ένα μίγμα από αερολύματα (aerosols) πλούσια σε θειικά άλατα, θειικό οξύ και άλλες οξειδωτικές θειικές ενώσεις. Αυτό το είδος ηφαιστειακής ομίχλης είναι γνωστό με το όνομα "vog", σύντμηση των λέξεων volcanic smog. Το τοξικό και επικίνδυνο νέφος, μπορεί να μεταφερθεί με τη βοήθεια του ανέμου και συχνά να μετατραπεί σε όξινη βροχή, η οποία μπορεί να καταστρέψει τη βλάστηση κι τις καλλιέργειες.

Επιπλέον, διάφορες μελέτες (Lorpi 1996, Tretiach και Γκανή 1999) επισημαίνουν τις αρνητικές επιπτώσεις της ηφαιστειακής και γεωθερμικής έκλυσης υδροθείου στη βλάστηση σε



Εικόνα 3.2. Νεκρό πτηνό από εκλύσεις ηφαιστειακών αερίων στο Σουσάκι.

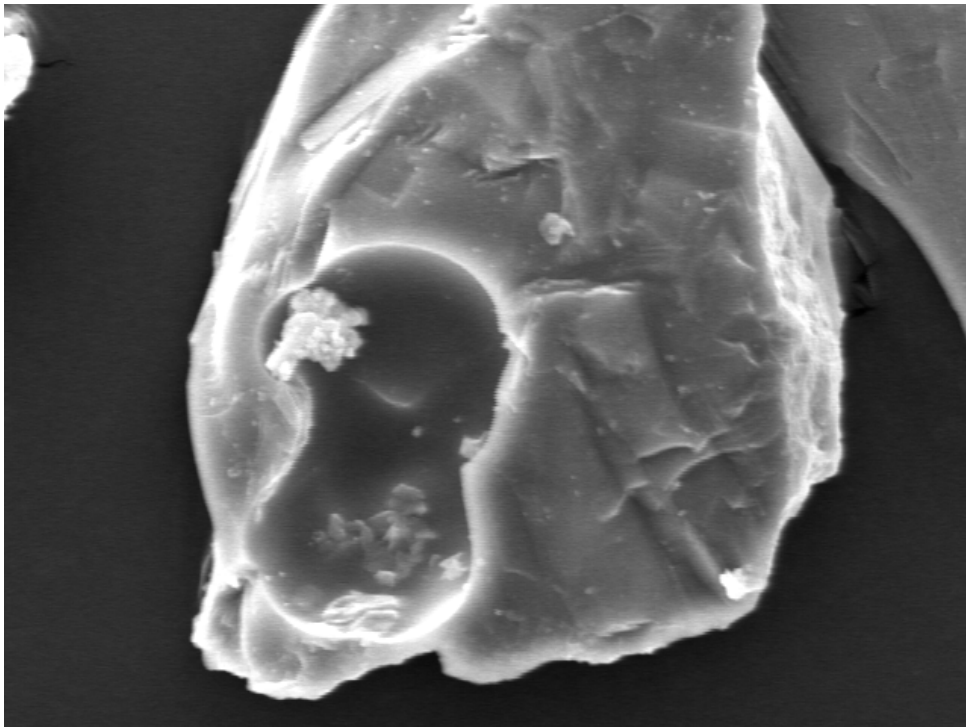
Στην προσπάθειά τους να ζεσταθούν τα πουλιά μπαίνουν σε περιοχές που υπάρχουν ατμίδες. Εκεί πέφτουν νεκρά από ασφυξία λόγω των εκλύσεων διοξειδίου του άνθρακα και υδροθείου. Επίσης πεθαίνουν δέντρα σε κοντινή απόσταση

(πηγή: αρχείο Κωνσταντίνου Κυριακόπουλου)

ΚΟΝΤΙΝΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ.

Γενικά σε περιοχές στις οποίες οι εκλύσεις φυσικού αερίου είναι πολύ υψηλές, τα εδάφη μεταβάλλονται καθώς καλύπτονται από λεπτές στρώσεις δευτερογενών ορυκτών όπως ο αλουνίτης, ο μαγνησίτης και το θείο. Σε αυτές τις περιοχές, η ακραία οξύτητα από τα φουμαρολικά συμπυκνώματα, ευθύνεται για την υψηλή κινητικότητα των βλαβερών στοιχείων κατά τη διάρκεια των διαδικασιών τροποποίησης, η οποία θα μπορούσε να επηρεάσει αρνητικά τους ζωντανούς οργανισμούς στα γύρω θαλάσσια και χερσαία περιβάλλοντα. Για παράδειγμα πολύ φτωχή βλάστηση παρατηρείται γύρω από τις υδροθερμικές περιοχές της Μήλου αν και δεν έχουν γίνει ακόμα συγκεκριμένες μελέτες (Κυριακόπουλος 2010).

Τα ηφαίστεια και τα ηφαιστειακά αέρια, ειδικότερα, έχουν ένα σημαντικό και πολύπλοκο ρόλο στην τροποποίηση του κλίματος και της ατμόσφαιρας της Γης. Γνωρίζουμε ότι το σημερινό επίπεδο υποβάθρου της ηφαιστειακής δραστηριότητας δεν συμβάλλει σημαντικά στην υπερθέρμανση του πλανήτη ή την αλλαγή του περιβάλλοντος της Γης. Ωστόσο η ιστορία της Γης κατέδειξε σαφώς ότι τα ηφαίστεια έχουν τη δύναμη να το πράξουν.



Εικόνα 3.3. Αποθέσεις πτώσης κίσσηρης από τη Θήρα, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

Η κίσσηρης έχει τη δυνατότητα να διατηρεί την υγρασία του εδάφους βελτιώνοντας την καλλιέργεια.

(πηγή: αρχείο Κωνσταντίνου Κυριακόπουλου)

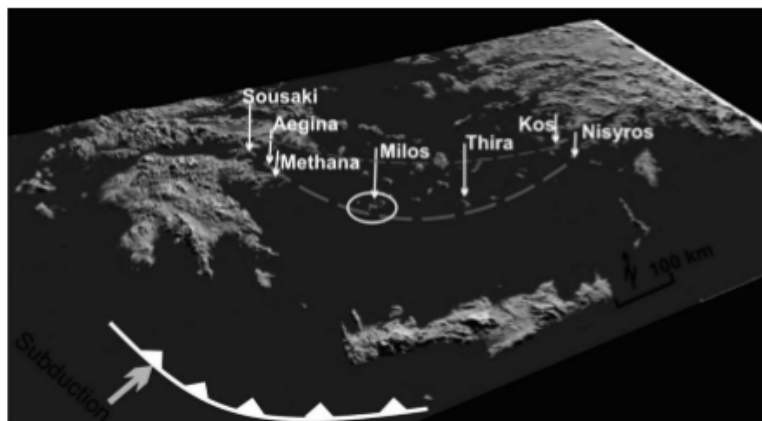
Κεφάλαιο 4.

Εκλύσεις Ηφαιστειακών Αερίων στην Ελλάδα

4.1. Γεωτεκτονική και Γεωλογική εξέλιξη του Ελλαδικού χώρου

250 Εκατομμύρια χρόνια πριν, με το σχηματισμό του ωκεανού της Τηθύος, αρχίζει η σύνθετη γεωλογική και τεκτονική δομή και εξέλιξη του Ελλαδικού χώρου. Ο ωκεανός αυτός δημιουργήθηκε με το διαχωρισμό μιας μεγάλης και παλιάς ηπείρου.

Τεράστιες αλλαγές στην επιφάνεια της Γης έλαβαν χώρα στο τεράστιο αυτό διάστημα οι οποίες συνδέονται ως επί το πλείστον με τις μετατοπίσεις των λιθοσφαιρικών πλακών. Οι αλλαγές αυτές οδήγησαν στη σημερινή δυναμική κατάσταση και γεωμορφολογική εικόνα του Ελλαδικού χώρου με αποτέλεσμα η περιοχή του Αιγαίου σήμερα να αποτελεί ένα χαρακτηριστικό καθεστώς σύγκλισης, όπου η Αφρικανική πλάκα συγκρούεται με την Ευρασιατική. Στην περιοχή του Αιγαίου, εμφανίζονται τα μεγαλύτερα ποσοστά παραμόρφωσης από ότι σε όλη τη ζώνη σύγκρουσης Ευρώπης – Αφρικής (Parazachos and Comninakis, 1971). Η παραμόρφωση συνδέεται με την καταβύθιση της λιθοσφαιρικής πλάκας της ανατολικής Μεσογείου κάτω από την πλάκα του Αιγαίου κατά μήκος του Ελληνικού τόξου καθώς και με την κίνηση, στα δυτικά, κατά μήκος του ρήγματος της Ανατολίας (Baba et al, 2009). Εκτεταμένη ηφαιστειακή δραστηριότητα ασβεσταλκαλικής σύστασης, εκδηλώνεται σε διάφορα ηφαιστειακά κέντρα του νοτίου Αιγαίου που είναι το Σουσάκι, η Αίγινα, ο Πόρος, η Μήλος, η Σαντορίνη, η Κως και η Νίσυρος (Κυριακόπουλος 2010).



Εικόνα 4.1. Χάρτης της Ελλάδας στον οποίο φαίνεται η Μήλος και το ηφαιστειακό τόξο του νοτίου Αιγαίου

Βασικό λοιπόν, τεκτονικό γνώρισμα του Ελληνικού χώρου, είναι το ελληνικό τόξο, το οποίο αποτελεί το όριο της επαφής της Ευρασιατικής λιθοσφαιρικής πλάκας –τμήμα της οποίας

είναι το Αιγαίο- και της Αφρικανικής πλάκας, τμήμα της οποίας είναι η λιθόσφαιρα της Ανατολικής Μεσογείου. Λόγω μεγαλύτερης πυκνότητας η ωκεάνια πλάκα της Ανατολικής Μεσογείου, βυθίζεται κάτω από την ηπειρωτική πλάκα του Αιγαίου, σχηματίζοντας:

- την τάφρο (μια σειρά από βαθιές θαλάσσιες λεκάνες από τη Ρόδο έως και την Κεφαλλονιά),
- το νησιωτικό τόξο (μια σειρά διαδοχικών νησιών, παράλληλα προς την τάφρο και σε μικρή απόσταση από αυτήν),
- την οπισθόταφρο (θαλάσσια λεκάνη μικρότερου βάθους από την τάφρο) και τέλος,
- το ηφαιστειακό τόξο που αποτελείται από διαδοχικά ενεργά και ανενεργά ηφαίστεια, η δημιουργία των οποίων οφείλεται σε ανάτληξη υλικού της υποβυθιζόμενης πλάκας, το οποίο κατά την άνοδό του, διαπερνά την Ευρασιατική πλάκα και σχηματίζει τα ηφαίστεια.

Η δραστηριότητα του ενεργού ηφαιστειακού τόξου του Νοτίου Αιγαίου άρχισε πριν 5 εκατομμύρια χρόνια, και αποτελείται από 5 ηφαιστειακές ομάδες, οι οποίες από ανατολικά προς τα δυτικά είναι οι εξής:

Α) Σουσάκι, Β) η ομάδα του Σαρωνικού κόλπου, Γ) το νησιωτικό σύμπλεγμα της Μήλου, Δ) το νησιωτικό σύμπλεγμα της Σαντορίνης και Ε) η ομάδα νησιών στην Κω και τη Νίσυρο. Σε όλες τις ομάδες εκτός από το Σουσάκι, υπάρχει ένα ενεργό ηφαιστειακό κέντρο (Fytikas and Voukoukalakis 2005).

Όπως λοιπόν και άλλες γεωδυναμικά ενεργές περιοχές, έτσι κι ο Ελλαδικός χώρος χαρακτηρίζεται από ενεργό γεωδυναμικό καθεστώς με εκτεταμένη ηφαιστειακή και σεισμική δραστηριότητα και επηρεάζεται από ένα μεγάλο αριθμό γεωγονικών εκδηλώσεων αερίου, οι οποίες γίνονται αντιληπτές με τη μορφή σημειακών πηγών (φουμαρόλες, μοφέτες, φουσαλίδες αερίων) ή από διάχυτες εκλύσεις αερίων στο έδαφος. Η μεγάλη ποικιλία της ισοτοπικής και χημικής σύστασης των αερίων φάσεων που εκδηλώνονται, αντανακλά τη πολυσύνθετη γεωλογική δομή (D'Alessandro et al. 2010).

Με βάση τη χημική τους σύσταση, οι αέριες φάσεις που εκδηλώνονται εξαιτίας της ηφαιστειακής και γεωθερμικής δραστηριότητας στον Ελλαδικό χώρο, μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κύριες ομάδες διοξειδίου του άνθρακα, μεθανίου και πλούσιες σε άζωτο. Αν δεν ληφθεί υπόψη το οξυγόνο, τα αέρια αυτά, αποτελούν το 95% της συνολικής σύστασης με εξαίρεση αέριες φάσεις από το ηφαίστειο της Νισύρου και από τη Μήλο, οι οποίες περιέχουν σημαντικές ποσότητες υδροθείου.

4.2. Περιοχές του Ελλαδικού Χώρου όπου έχουν καταγραφεί εκλύσεις ηφαιστειακών αερίων

4.2.1. Δελφοί

Οι εκλύσεις φυσικού αερίου στον Ελλαδικό χώρο είχαν καταγραφεί από την αρχαιότητα. Ακόμα και στη νεολιθική εποχή, ιερά χτίζονταν κοντά σε πηγές φυσικού αερίου για να εξασφαλίσουν οι άνθρωποι, την προστασία από τις Θεότητες. Σε αυτά τα ιερά πολλές φορές δίνονταν χρησμοί κάτω από τη ναρκωτική επίδραση των αυξημένων συγκεντρώσεων του εκλυόμενου διοξειδίου του άνθρακα (D'Alessandro, Kyriakopoulos 2013).

Πρόσφατες μελέτες απέδειξαν την ισχυρή σύνδεση μεταξύ της γεωλογικής εξαέρωσης και των μαντικών δραστηριοτήτων που ελάμβαναν χώρα στο περίφημο μαντείο του Απόλλωνα στους Δελφούς στην κλασσική Ελλάδα. Παρά το γεγονός ότι ορισμένοι συγγραφείς απέδωσαν την προφητική δύναμη σε χαμηλού επιπέδου δηλητηρίαση από αιθυλένιο (C_2H_4) (de Boer et al. 2001), πιθανότατα να οφείλεται στις αναισθητικές ιδιότητες του διοξειδίου του άνθρακα (Etiope et al. 2006) του οποίου η έκλυση να ευνοούνταν από τη συσσώρευση στο μικρό κλειστό θάλαμο (άδυτο) κάτω από το επίπεδο του Ναού του Απόλλωνα, όπου βρισκόταν το μαντείο της Πυθίας και χρησιμοποιείτο για να δώσει τις προφητείες της. Επίσης άλλα αρχαία μαντεία αφιερωμένα στον Απόλλωνα βρίσκονταν σε περιοχές της Ελλάδας όπου το γεωλογικό περιβάλλον υποστήριζε το φυσική απαέρωση (Μαριολάκος κ.α. 2010).

4.2.2. Μήλος

Αν και η περιοχή της Μήλου δεν είναι επί του παρόντος ηφαιστειακά ενεργή, είναι μία περιοχή η οποία παρουσιάζει υδροθερμικές διαδικασίες, τόσο στο παρελθόν όσο και σήμερα. Η ηφαιστειότητα της περιοχής, συνεχίζεται σήμερα με ατμιδική δραστηριότητα με τα ενεργά ηφαίστεια να απελευθερώνουν σημαντικές ποσότητες αερίων –κυρίως διοξείδιο του άνθρακα και υδρόθειο- από φουμαρόλες, σολφατάρες, μοφέτες καθώς και από το έδαφος γύρω από το ηφαίστειο. (Κυριακόπουλος 2010).

Σε όλη την έκταση των ακτών της Νότιας Μήλου απελευθερώνονται ηφαιστειακά αέρια. Ωστόσο από μετρήσεις που έγιναν στις περιοχές Καλάμου και Αδάμαντα, βρέθηκε ότι η κύρια αέρια φάση είναι το διοξείδιο του άνθρακα ενώ σε κάποιες περιπτώσεις το υδρόθειο (H_2S), το μεθάνιο (CH_4), και το υδρογόνο (H_2) μπορεί να συμμετέχουν σε μεγάλες ποσότητες, ενώ το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και το ήλιο (He) βρίσκονται πάντα σε ίχνη (Κυριακόπουλος 2010). Οι αυξημένες τιμές αερίων που μετρήθηκαν στην περιοχή της Μήλου μπορεί να θεωρηθούν δυνητικά επιβλαβείς για την ανθρώπινη υγεία σε περιοχές που βρίσκονται κοντά στα σημεία εκπομπής των ρύπων. Μετρήσεις στην Νότια Μήλο, στην περιοχή της Φυριπλάκας, το Ιούνιο του 2007, έδειξαν αυξημένες τιμές υδροθείου που έφτασαν τα 2000 ppm (>15%) καθώς και επικίνδυνες συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα οι οποίες την ίδια περίοδο, στην περιοχή Παλαιοχώρι της Μήλου, ξεπέρασαν το 90% (Κυριακόπουλος 2010). Οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα, οι οποίες μετρήθηκαν σε βάθος 50 εκατοστά σε γεωθερμικά πεδία της Μήλου παρουσίασαν ένα ευρύ φάσμα συγκεντρώσεων που κυμαίνονταν από 0.01% μέχρι και 99.8% στις περιοχές Αδάμαντα και Καλάμου. Οι υψηλές συγκεντρώσεις, σαφώς οφείλονται σε εκτόνωση γεωθερμικών ρευστών.

Εντός κάποιων ορίων, οι αυξημένες συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα και του υδροθείου, μπορεί να είναι ωφέλιμες για την ανάπτυξη των φυτών όμως σε μεγαλύτερες αναλογίες, μπορεί να γίνουν επιβλαβείς. Γενικά οι άνθρωποι που ζουν σε περιοχές εκτόνωσης ηφαιστειακών αερίων, έχουν επίγνωση των κινδύνων τους οποίους εγκυμονεί για την υγεία τους η συσσώρευση και έκλυση φυσικού αερίου. Ωστόσο τα ηφαιστειακά αέρια κάθε χρόνο, γίνονται αιτία πολλών θανάτων σε ολόκληρο τον κόσμο (Witham, 2005). Στην περίπτωση της Μήλου, αν και φαίνεται ότι ο κίνδυνος από την έκλυση αερίων φαίνεται να περιορίζεται σε ορισμένες περιοχές, δεν θα πρέπει να αγνοηθεί, ιδιαίτερα για τις ομάδες οι οποίες είναι περισσότερο εκτεθειμένες, όπως τα παιδιά, οι εργαζόμενοι σε δραστηριότητες ανασκαφής καθώς και οι τουρίστες που χρησιμοποιούν τα δημόσια λουτρά (Κυριακόπουλος 2010). Όσον αφορά το υδρόθειο το οποίο εκλύεται στην ατμόσφαιρα, παρουσιάζεται σε συγκεντρώσεις οι οποίες κάνουν αισθητή τη χαρακτηριστική ενοχλητική μυρωδιά του και πιθανότατα θα μπορούσε να έχει μία δυνητική επίδραση στα άτομα που βρίσκονται κοντά στις περιοχές έκλυσης.

Οξειδωτικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα –ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και της ισχυρής ηλιακής ακτινοβολίας- μπορεί να οδηγήσουν στο μετασχηματισμό του υδροθείου σε διοξείδιο του θείου, αυξάνοντας την επιβάρυνση από οξέα τόσο σε υγρή όσο και σε ξηρή εναπόθεση. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται και ο σχηματισμός ισχυρών οξειδωτικών όπως το υδροξύλιο (OH^-) και το όζον (O_3) (Κυριακόπουλος 2010).

4.2.3. Κατάκολο

Επικίνδυνες ή ακόμα και θανατηφόρες συγκεντρώσεις υδροθείου έχουν αναφερθεί στο παρελθόν στις ελληνικές εκδηλώσεις φυσικού αερίου, τουλάχιστον στο Κατάκολο στη Δυτική Πελοπόννησο (Etiope et al. 2006b). Επίσης στην περιοχή του λιμανιού έχουν καταγραφεί συγκεντρώσεις μεθανίου επικίνδυνες για ανάφλεξη (D'Alessandro, Kyriakopoulos 2013).

4.2.4. Νίσυρος

Στη Νίσυρο, οι εκλύσεις αερίων είναι πλούσιες σε υδρατμούς (91-99%). Επικίνδυνες συγκεντρώσεις υδροθείου (>20%) έχουν καταγραφεί στην περιοχή του κρατήρα (D'Alessandro et al. 2013).



Εικόνα 4.2. Συλλογή ηφαιστειακών αερίων στη Νίσυρο

(πηγή: αρχείο Κωνσταντίνου Κυριακόπουλου)

4.2.5. Σουσάκι

Επικίνδυνες συγκεντρώσεις υδροθείου, έχουν καταγραφεί στο Σουσάκι (D'Alessandro et al. 2009).

Στο γεωθερμικό σύστημα στο Σουσάκι, έγιναν επίσης μετρήσεις των ροών του μεθανίου από το έδαφος, οι οποίες επιβεβαιώνουν ότι οι ηφαιστειακές και γεωθερμικές περιοχές, μπορεί να είναι σημαντικές πηγές μεθανίου, οι οποίες να ευθύνονται για την αύξηση της παγκόσμιας συγκέντρωσής του. Σύμφωνα όμως με πρόσφατη μελέτη φαίνεται επίσης ότι οι προηγούμενες εκτιμήσεις της πηγής αυτής του μεθανίου ήταν υπερβολικά μεγάλες, επειδή δεν είχαν ληφθεί υπόψη οι μεθανοτροπικές δραστηριότητες των βακτηρίων στα εδάφη της περιοχής. Από τη

μελέτη αυτή προκύπτει και θετική συσχέτιση μεταξύ των ροών εκπομπής του μεθανίου με του διοξειδίου του άνθρακα στην ίδια περιοχή (D'Alessandro, Brusca, Kyriakopoulos et al. 2011).

4.2.6. Νέος Καύκασος, Φλώρινα

Στην περιοχή του χωριού Νέος Καύκασος στη Φλώρινα, στη Δυτική Μακεδονία, υπάρχει τεράστια συσσώρευση φυσικού διοξειδίου του άνθρακα στο υπέδαφος, η οποία αξιοποιήθηκε για 30 χρόνια από την εταιρεία Air Liquide και υπήρξε αντικείμενο μελέτης μέσω ερευνητικού προγράμματος χρηματοδοτούμενου από την Ευρωπαϊκή Ένωση σχετικά με τη μελέτη των φυσικών αποθεμάτων διοξειδίου του άνθρακα (Pearce 2004). Η συσσώρευση του διοξειδίου του άνθρακα στην περιοχή, αποδόθηκε στην ηφαιστειακή δραστηριότητα που συνέβαινε στο όρος Βόρας κατά την Τεταρτογενή περίοδο (D'Alessandro et al. (2011a)). Το καλοκαίρι του 1993, οι έρευνες συνεχίστηκαν από το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών της Ελλάδας, όπου κατά τη διάρκεια γεώτρησης, διοξείδιο του άνθρακα βρέθηκε σε διάφορα βάθη ξεκινώντας από τα 97 m και καταλήγοντας στα 559 m με πίεση αερίου στον πυθμένα που έφθανε τις 50 atm. Μετά την ολοκλήρωση της γεώτρησης και σε απόσταση 100 m από αυτήν, παρατηρήθηκε από το έδαφος διαρροή διοξειδίου του άνθρακα και νερού, με μορφή φουσαλίδων. Η διαρροή αυξήθηκε τις επόμενες ημέρες, σχηματίζοντας τελικά μία λίμνη 25 m² στην οποία ήταν έντονη η έκλυση διοξειδίου του άνθρακα με τη μορφή φουσαλίδων. Αργότερα, η έκταση της λίμνης μειώθηκε στα 10 m² με βάθος 1 m, όπου οι τοπικές αρχές δημιούργησαν μια κυκλική λίμνη με επένδυση τσιμέντου γύρω από την οπή εξερισμού αερίου, την οποία ο τοπικός πληθυσμός χρησιμοποίησε για μερικά χρόνια ως θεραπευτική για την υγεία με εμβάθυνση των ποδιών. Το συμπυκνωμένο στρώμα CO₂ πάνω από την επιφάνεια του νερού οδήγησε σε θάνατο από ασφυξία έναν άνδρα που προσπάθησε να κολυμπήσει στην πισίνα (Pearce 2004). Τα έτη 2003, 2008 και 2011 η πισίνα βρέθηκε να είναι στεγνή και οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα στο έδαφος, βρέθηκαν να είναι σε φυσιολογικά επίπεδα, γεγονός που σημαίνει ότι το αέριο δεν φθάνει πια στην επιφάνεια.

4.2.7. Μέθανα

Το ηφαιστειακό σύστημα των Μεθάνων είναι περιοχή στην οποία συμβαίνουν πολλές εκδηλώσεις υδροθερμικής απαέρωσης (D'Alessandro et al. 2008). Τα ιαματικά λουτρά του Παισανία, συνδέονται με αυτές τις εκδηλώσεις. Η επιφάνεια του νερού στη μικρή πισίνα μέσα στο οικοδόμημα των λουτρών του Παισανία, βρίσκεται 90 εκατοστά κάτω από το επίπεδο του εδάφους. Μετρήσεις σε δείγματα αέρα που συλλέχτηκαν, βρέθηκε ότι το αέριο πάνω από το νερό αποτελείται από σχεδόν καθαρό διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο όντας βαρύτερο από τον αέρα, συσσωρεύεται πάνω από το νερό (Walter, Kyriakopoulos 2013). Τα άτομα που κάνουν μπάνιο σε αυτή την πισίνα, έχουν το κεφάλι τους σε σημείο όπου μπορεί σιγά σιγά να συσσωρευτεί διοξείδιο του άνθρακα σε επικίνδυνα ή και θανατηφόρα επίπεδα. Πιθανότατα λοιπόν, το ηλικιωμένο ζευγάρι από την Πάτρα, που βρέθηκε νεκρό στις 2 Αυγούστου του 2009, να έχασε τη ζωή του από ασφυξία, λόγω της θανατηφόρας συγκεντρώσεως του διοξειδίου του άνθρακα. Να σημειωθεί ότι ένα άτομο που εκτίθεται ξαφνικά σε υψηλές συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα μπορεί εύκολα να ανιχνεύσει τα επικίνδυνα επίπεδα και να προσπαθήσει να ξεφύγει από την πηγή φυσικού αερίου, αλλά αν το ίδιο άτομο έχει εκτεθεί σε συγκεντρώσεις σιγά-σιγά αυξανόμενες, ξεκινώντας από πολύ χαμηλές (ατμοσφαιρικές) τιμές, λόγω των αναισθητικών ιδιοτήτων του διοξειδίου του άνθρακα (Seevers 1944) το άτομο, θα μπορούσε να χάσει τη συνείδηση του και τις αισθήσεις του χωρίς να αισθανθεί κανένα κίνδυνο.

4.3. Προκαταρκτική αξιολόγηση κινδύνων

Οι παράγοντες εκείνοι, οι οποίοι επηρεάζουν την κατανομή του κινδύνου που μπορεί να προκληθεί από ένα αέριο και που κάνουν πιο περίπλοκη την αξιολόγηση του σχετικού κινδύνου, μπορεί να είναι πολλοί.

Μεταξύ αυτών των παραγόντων, μπορούμε να θεωρήσουμε:

Α) τη ροή του αερίου Β) τη θερμοκρασία των εκπομπών του αερίου Γ) την τοπική τοπογραφία της κάθε περιοχής Δ) την πληθυσμιακή πυκνότητα (Roberts et al 2011).

Σύμφωνα με τα στοιχεία μελέτης του 2013, των Walter D'Alessandro και Κωνσταντίνου Κυριακόπουλου οι προκαταρκτικές εκτιμήσεις κινδύνων για τα αέρια που εκλύονται στον ελλαδικό χώρο, θα πρέπει να περιορισθούν στο διοξείδιο του άνθρακα. Περιοχές αυξημένης επικινδυνότητας λόγω υψηλών εκλύσεων διοξειδίου του άνθρακα είναι ευρέως διαδεδομένες στην Ελλάδα. Όλα τα ηφαιστειακά συστήματα κατά μήκος του ηφαιστειακού τόξου του Νοτίου Αιγαίου, το ανατολικό τμήμα της λεκάνης του Σπερχειού, οι περιοχές των ρηγμάτων στο βόρειο Ευβοϊκό Κόλπο, πολλές περιοχές κατά μήκος της βόρειας Ελλάδας (λεκάνη Αριδαίας, δυτική Χαλκιδική, λεκάνη Στρυμόνα, λεκάνη του Δέλτα του Νέστου) και το νησί της Λέσβου μπορεί επίσης να θεωρηθεί ότι έχουν αυξημένο κίνδυνο λόγω της εκτεταμένης εκπομπής αερίων.



Εικόνα 4.3. Συλλογή ηφαιστειακών αερίων στη Νέα Καμένη

(πηγή:αρχείο Κωνσταντίνου Κυριακόπουλου)

Κεφάλαιο 5.

Μέτρα Μετριασμού των Επιπτώσεων-Συμπεράσματα

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις είναι λοιπόν από τα πιο δραματικά και βίαια μέσα αλλαγής της Γης. Μπορεί να αποτελέσουν όχι μόνο ισχυρές εκρήξεις αλλά και να αλλάξουν δραστικά την επιφάνεια της Γης για δεκάδες χιλιόμετρα γύρω από ένα ηφαίστειο ενώ όπως είδαμε τα μικροσκοπικά σταγονίδια του θειικού οξέος μπορεί να αλλάξουν προσωρινά, ακόμα και το κλίμα του πλανήτη. Οι ηφαιστειακές εκρήξεις, συχνά αναγκάζουν τους ανθρώπους που ζουν κοντά στα ηφαίστεια να εγκαταλείψουν την γη και τα σπίτια τους, μερικές φορές, ακόμα και για πάντα. Σε περιοχές που βρίσκονται πιο μακριά από τα ηφαίστεια, η μεγάλη καταστροφή μπορεί να αποφευχθεί αλλά οι πόλεις, οι καλλιέργειες, οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις, τα συστήματα μεταφοράς, τα ηλεκτρικά δίκτυα, μπορεί να επηρεαστούν ή ακόμα και να καταστραφούν από την τέφρα, τα λαχάρ κλπ.

Ευτυχώς, οι ηφαιστειακές εκρήξεις συνοδεύονται σχεδόν πάντα από πρόδρομα φαινόμενα, τα οποία όταν εντοπίζονται, αναλύονται και δίνεται η δυνατότητα της προειδοποίησης στις κοινότητες που κινδυνεύουν. Ο χρόνος προειδοποίησης είναι συνήθως επαρκής ώστε οι πληγείσες κοινότητες να εφαρμόσουν σχέδια και μέτρα μετριασμού των επιπτώσεων της εκάστοτε ηφαιστειακής έκρηξης.

Η έκλυση ηφαιστειακών αερίων κατά τη διάρκεια τόσο της ηφαιστειακής όσο και κατά την μεταηφαιστειακή δραστηριότητα μπορεί να παρακολουθείται και να μελετάται με τη χρήση μιας ποικιλίας τεχνικών. Οι υπεύθυνοι για την προστασία και την υγεία του πληθυσμού αντιμετωπίζουν άμεσα ζητήματα που πρέπει να διευθετήσουν καθώς και ερωτήματα που πρέπει να απαντήσουν όπως ποια είναι η σύνθεση της τέφρας και των ηφαιστειακών αερίων, αν η ηφαιστειακή σκόνη περιέχει κρυσταλλικό διοξείδιο του πυριτίου ή άλλα επικίνδυνα ορυκτά, ποια είναι η κλίμακα μεγέθους των σωματιδίων που υπάρχουν κλπ. Ακολουθώντας το παράδειγμα των επιστημόνων, οι οποίοι μελετούν τις βιομηχανικές εκπομπές αερίων, οι ηφαιστειολόγοι έχουν αρχίσει να αναπτύσσουν και να εφαρμόζουν μοντέλα διασποράς των ηφαιστειακών αερίων. Οι πληροφορίες που προκύπτουν βάσει αυτών των μοντέλων, μπορεί στη συνέχεια να αναπτυχθούν και να χρησιμοποιηθούν για τη διαχείριση του κινδύνου, τη θέσπιση επιπέδων συναγερμού καθώς και τη σχεδίαση χαρτών επικινδυνότητας για τις εκάστοτε περιοχές. Ωστόσο συχνά συμβαίνει, περιοχές οι οποίες διατρέχουν κίνδυνο, να στερούνται την απαραίτητη χρηματοδότηση και υποδομή που θα μπορούσε να υποστηρίξει τέτοιου είδους μελέτες με τη βοήθεια των οποίων θα ήταν δυνατόν να μειωθεί ο κίνδυνος για την υγεία των κατοίκων των περιοχών αυτών. Σε πολλές περιπτώσεις, ο περιορισμός της πρόσβασης του κοινού στις πληγείσες περιοχές, είναι το μόνο μέσο για τη μείωση του κινδύνου.

Οι επιπτώσεις των ηφαιστειακών αερίων στην υγεία είναι δυνατόν να μειωθούν με τον περιορισμό του χρόνου έκθεσης. Η χρήση κατάλληλης μάσκας μπορεί επίσης να προστατεύσει αποτελεσματικά το άτομο από τις δυσμενείς επιπτώσεις των ηφαιστειακών αερίων στην υγεία, ενώ στην περίπτωση που οι αντιασφυγιόγones μάσκες δεν είναι διαθέσιμες ένα υγρό πανί πάνω

από το πρόσωπο, μπορεί –εν μέρει- να μειώσει την ποσότητα των υδατοδιαλυτών αερίων που εισέρχονται στους πνεύμονες. Η εκκένωση της περιοχής δεν είναι αποτελεσματική ούτε εφικτή σε περιπτώσεις που η έκλυση αερίων μπορεί να είναι μακροπρόθεσμη και εκτεταμένη, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του ηφαιστείου Masaya. Ζωτικής σημασίας πάντως, πρέπει να θεωρηθεί η εκπαίδευση του πληθυσμού των περιοχών που διατρέχουν κίνδυνο. Το Διεθνές Δίκτυο που μελετά τους ηφαιστειακούς κινδύνους για την υγεία (<http://www.ivhhn.org>) έχει ετοιμάσει ένα περιεκτικό σύνολο κατευθυντήριων γραμμών και φυλλαδίων για το κοινό καθώς και για τους υπεύθυνους της πολιτικής προστασίας που συνοψίζονται στις παρακάτω βασικές οδηγίες:

- Αποφυγή οδήγησης και παραμονή σε εσωτερικούς χώρους μετά από κάθε πτώση ηφαιστειακής τέφρας.
- Παράθυρα και πόρτες να παραμείνουν κλειστά όσο είναι δυνατόν.
- Παραμονή σε κλειστούς χώρους και αποφυγή της άσκοπης έκθεσης σε ηφαιστειακή τέφρα για όσους πάσχουν από βρογχίτιδα, εμφύσημα ή άσθμα.
- Οι αναλαμβάνοντες εργασίες καθαρισμού σκόνης, πρέπει να φορούν ειδική μάσκα σκόνης και σε περίπτωση που αυτό δεν είναι διαθέσιμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτοσχέδια μάσκα από ύφασμα, που θα φιλτράρει τα μεγαλύτερα σωματίδια τέφρας.
- Σε περιπτώσεις έκλυσης λεπτής ηφαιστειακής σκόνης να αποφεύγεται η χρήση φακών επαφής. Η χρήση γυαλιών μπορεί να προστατεύσει τα μάτια από ερεθισμούς.
- Προσοχή στο πόσιμο νερό, το οποίο αν έχει υποστεί ρύπανση από την ηφαιστειακή στάχτη, μπορεί να αποτελέσει κίνδυνο για την υγεία. Ο ασφαλέστερος τρόπος είναι να υπάρχει απόθεμα νερού πριν την εκδήλωση κάποιου γεγονότος, γα τουλάχιστον μία εβδομάδα.
- Καλό πλύσιμο πριν την κατανάλωση, των λαχανικών που έχουν καλυφθεί από ηφαιστειακή τέφρα.
- Τα παιδιά πρέπει να παραμείνουν σε κλειστούς χώρους και να αποφεύγουν το παιχνίδι και την έντονη κίνηση όσο υπάρχει αυξημένη συγκέντρωση τέφρας στον αέρα, αφού με την άσκηση η αναπνοή γίνεται πιο βαριά, αντλώντας τα αιωρούμενα σωματίδια πιο βαθιά στους πνεύμονες.
- Αν τα παιδιά πρέπει να είναι σε εξωτερικούς χώρους όσο αιωρείται τέφρα, θα πρέπει να φορούν μάσκα. Πολλές μάσκες, ωστόσο, έχουν σχεδιαστεί για να ταιριάζουν σε ενήλικες και όχι σε παιδιά.

Για τη μείωση των επιπτώσεων σε κάθε περίπτωση ηφαιστειακής δραστηριότητας, ενεργοποιούνται ειδικά μέτρα προστασίας από εξειδικευμένες κυβερνητικές ομάδες και την πολιτική προστασία κάθε περιοχής.

Όσον αφορά την περιοχή της Ελλάδας, οι ηφαιστειακοί κίνδυνοι γενικά μπορούν να θεωρηθούν μικροί εκτός από τις περιοχές που βρίσκονται κατά μήκος του ηφαιστειακού τόξου της Ελλάδας και κυρίως κοντά στις περιοχές των ενεργών ηφαιστειακών κέντρων όπως είναι η τα Μέθανα, η Μήλος, η Νίσυρος και η Σαντορίνη. Σε σχέση βέβαια με άλλες ηφαιστειακές περιοχές του πλανήτη, οι περιοχές αυτές έχουν πολύ χαμηλότερο όμως υπολογίσιμο κίνδυνο, αν σκεφτεί κανείς ότι το 1650 μ.Χ., 70 περίπου άνθρωποι και πάνω

από 1000 ζώα έχασαν τη ζωή τους από έκλυση αερίων με μεγάλη περιεκτικότητα σε υδροθείο, που προκλήθηκε από την έκρηξη του υποθαλάσσιου ηφαιστείου Κολούμπο, που βρίσκεται 8 χιλιόμετρα βορειοανατολικά της Σαντορίνης. Οι κάτοικοι του ελληνικού ηφαιστειακού τόξου πρέπει να ενημερωθούν για τα ηφαιστειακά αέρια και τους κινδύνους που προκύπτουν από την έκλυσή τους και να εκπαιδευτούν για κάθε περίπτωση ηφαιστειακής δραστηριότητας. Η εκπαίδευση και ενημέρωση θεωρείται ακόμα πιο επιβεβλημένη αν λάβει κανείς υπόψη του το γεγονός ότι οι περιοχές αυτές κάθε χρόνο δέχονται χιλιάδες τουρίστες.

Γενικά πάντως, η άμβλυνση των επιπτώσεων των ηφαιστειακών κινδύνων στο μέλλον μπορεί να επιτευχθεί με τη βελτίωση των γεωφυσικών και γεωχημικών μεθόδων παρακολούθησης των ηφαιστειών, την εκπόνηση σχεδίων έκτακτης ανάγκης, την αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ επιστημόνων και αρχών, την επαρκή μελέτη και παρακολούθηση ειδικά των ηφαιστειών εκείνων που βρίσκονται κοντά σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.

Βιβλιογραφία

Αλεξούδη-Λειβαδίτη Αλίκη ΕΜΠ, Στοιχεία δυναμικής και τεκτονικής Γεωλογίας

Allen, A.G., Oppenheimer, C., Ferm, M., Baxter, P.J., Horrocks, L.A., Galle, B., McGonigle, A.J.S. and Duffell, H.J., 2002. Primary sulfate aerosol and associated emissions from Masaya Volcano, Nicaragua. *Journal of Geophysical Research* 107(D23).

American Industrial Hygiene Association, 1962. Hydrogen Sulfide. Hygienic Guide Series. Detroit, Michigan.

Amoore, J.E. and Hautala, E., 1983. Odor as an aid to chemical safety: odor thresholds compared with threshold limit values and volatilities for 214 industrial chemicals in air and water dilution. *Journal of Applied Toxicology* 3, 272-29

An, J., Ueda, H., Matsuda, K., Hasome, H. and Iwata, M., 2003. Simulated impacts of SO₂ emissions from the Miyake volcano on concentration and deposition of sulfur oxides in September and October of 2000. *Atmospheric Environment*, 37(22): 3039-3046

Aramaki, S., Barberi, F., Casadevall, T. and McNutt, S., 1994. Safety for Volcanologists. *Bulletin of Volcanology*, 56(2): 151-154

Baba, A., Yuce, G., Deniz, O. & Ugurluoglu, D.Y. : Hydrochemical and isotopic composition of Tuzla geothermal field and its environmental impacts. *Environ. Forensics* 10 (2009), pp. 144–161

Baubron, J.C., Allard, P. and Toutain, J.P., 1990. Diffuse volcanic emissions of carbon dioxide from Vulcano Island, Italy. *Nature*, 344: 51-53.

Bates, M.N., Garrett, N. and Shoemack, P., 2002. Investigation of health effects of hydrogen sulfide from a geothermal source. *Archives of Environmental Health*, 57(5): 405-411

Baxter, P.J., 1990. Medical effects of volcanic eruptions. *Bulletin of Volcanology*, 52(7): 532-544.

Baxter, P.J., 2000. Gases. In: P.J. Baxter, P.H. Adams, T.-C. Aw, A. Cockcroft and J.M.

Baxter, P.J., 2000. Gases. In: P.J. Baxter, P.H. Adams, T.-C. Aw, A. Cockcroft and J.M. Harrington (Editors), *Hunter's Diseases of Occupations*. Arnold, London, pp. 123-178.

Baxter, P.J. and Ancia, A., 2002. Human health and vulnerability in the Nyiragongo volcano crisis Democratic Republic of Congo 2002: Final Report to the World Health Organisation, World Health Organisation.

Baxter, P.J., Baubron, J.-C. and Coutinho, R., 1999. Health hazards and disaster potential of ground gas emissions at Furnas volcano, Sao Miguel, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92(1-2): 95-106

Baxter, P.J., Ing, R., Falk, H. and Plikaytis, B., 1983. Mount St. Helens eruptions: the acute respiratory effects of volcanic ash in a North American community. *Archives of Environmental Health*, 38(3): 138-143.

Baxter, P.J., Ing, R., Falk, H., French, J., Stein, G.F., Bernstein, R.S., Merchant, J.A. and Allard, A., 1981. Mount St Helens eruptions, May 18 to June 12, 1980. *Journal of the American Medical Association*, 246(22): 2585-2589.

Baxter, P.J., Bonadonna, C., Dupree, R., Hards, V.L., Kohn, S.C., Murphy, M.D., Nichols, A., Nicholson, R.A., Norton, G., Searl, A., Sparks, R.S.J. and Vickers, B.P., 1999. Cristobalite in volcanic ash of the Soufrière Hills volcano, Montserrat, British West Indies. *Science*, 283: 1142-145.

Baubron, J.C., Allard, P. and Toutain, J.P., 1990. Diffuse volcanic emissions of carbon dioxide from Vulcano Island, Italy. *Nature*, 344: 51-53

Beaubien, S.E., Ciotoli, G. and Lombardi, S., 2003. Carbon dioxide and radon gas hazard in the Alban Hills area (central Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 123(1-2): 63-80.

Beauchamp, R.O.J., Bus, J.S., Popp, J.A., Boreiko, C.J. and Andjelkovich, D.A., 1984. A critical review of the literature on hydrogen sulfide toxicity. *Critical Reviews in Toxicology* 13: 25-9

Brimblecombe, P., 1996. *Air Composition and Chemistry*. Cambridge University Press, Cambridge

- Bergametti, G., Martin, D., Carbone, J., Faivre-Pierret, R. and Vie Le Sage, R., 1984. A mesoscale study of the elemental composition of aerosols emitted from Mt. Etna Volcano. *Bulletin of Volcanology*, 47(4(2)): 1107-1114.
- Bernstein, R.S., Baxter, P.J., Falk, H., Ing, R., Foster, L. and Frost, F., 1986. Immediate public health concerns and actions in volcanic eruptions: lessons from the Mount St. Helens eruptions, May 18 - October 18, 1980. *American Journal of Public Health*, 76(Supplement): 25-37.
- Bluth, G.J.S.; Rose, W.J.; Sprod, I.E.; Krueger, A.J. Stratospheric Loading of Sulfur from Explosive Volcanic Eruptions. *J. Geol.* 1997, 105, 671-683
- Braga, A.L.F., Zanobetti, A. and Schwartz, J., 2001. The lag structure between particulate air pollution and respiratory and cardiovascular deaths in 10 US cities. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 43(11): 927-933.
- Carapezza, M.L., Badalamenti, B., Cavarra, L. and Scalzo, A., 2003. Gas hazard assessment in a densely inhabited area of Colli Albani Volcano (Cava dei Selci, Roma). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 123(1-2): 81-94.
- Choudhury, A.H., Gordian, M.E. and Morris, S.S., 1997. Associations between respiratory illness and PM10 air pollution. *Archives of Environmental Health*, 52(2): 113-117.
- Cronin, S.J., Neall, V.E., Lecointre, J.A., Hedley, M.J. and Loganathan, P., 2003. Environmental hazards of fluoride in volcanic ash: a case study from Ruapehu volcano, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121(3-4): 271-29
- Cronin, S.J. and Sharp, D.S., 2002. Environmental impacts on health from continuous volcanic activity at Yasur (Tanna) and Ambrym, Vanuatu. *International Journal of Environmental Health Research*, 12: 109-123
- Collins, S., 2003, Sulphur City goes under scrutiny, *The New Zealand Herald*, 9 July 2003
- Γεωτρόπιο τεύχος 500, 14 Νοεμβρίου 2009
- Γεωτρόπιο τεύχος 527, 22 Μαΐου 2010
- Delmelle, P., Stix, J., Baxter, P.J., Garcia-Alvarez, J. and Barquero, J., 2002. Atmospheric dispersion, environmental effects and potential health hazard associated with the low-altitude gas plume of Masaya volcano, Nicaragua. *Bulletin of Volcanology* 64(6), 423-434.
- D'Alessandro W, Brusca L, Kyriakopoulos K, Rotolo S, Michas G, Minio M, Papadakis G (2006) Diffuse and focussed carbon dioxide and methane emissions from the Sousaki geothermal system, Greece. *Geophys Res Lett* 33:L05307. doi:10.1029/2006GL025777
- D'Alessandro W, Brusca L, Kyriakopoulos K, Michas G, Papadakis G (2008) Methana, the westernmost active volcanic system of the south Aegean arc (Greece): insight from fluids geochemistry. *J Volcanol Geotherm Res* 178:818–828. doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.09.014
- D'Alessandro W, Brusca L, Kyriakopoulos K, Michas G, Papadakis G (2009) Hydrogen sulphide as a natural air contaminant in volcanic/geothermal areas: the case of Sousaki, Corinthia (Greece). *Environ Geol* 57(8):1723–1728. doi:10.1007/s00254-008-1453-3
- D'Alessandro W, Brusca L, Kyriakopoulos K, Martelli M., Michas G, Papadakis G, Salerno F. Diffuse hydrothermal methane output and evidence of methanotrophic activity within the soils at Sousaki (Greece) *Geofluids* (2011) 11, 97–107, doi: 10.1111/j.1468-8123.2010.00322.x
- D'Alessandro W., Brusca L., Martelli M., Rizzo A. and Kyriakopoulos K. Geochemical Characterization Of Natural Gas Manifestations in Greece (Bulletin of the Geological Society of Greece, 2010 Proceedings of the 12th International Congress, Patras, May, 2010)
- D'Alessandro W. ,Kyriakopoulos K, Preliminary gas hazard evaluation in Greece (*Nat Hazards* (2013) 69:1987–2004).
- De Boer JZ, Hale JR, Chanton J (2001) New evidence for the geological origins of the ancient Delphic oracle (Greece). *Geology* 29:707–710. doi:10.1130/0091-7613
- Delmelle, P., Stix, J., Baxter, P.J., Garcia-Alvarez, J. and Barquero, J., 2002. Atmospheric dispersion, environmental effects and potential health hazard associated with the low-altitude gas plume of Masaya volcano, Nicaragua. *Bulletin of Volcanology* 64(6), 423-434
- Durand, M. and Scott, B.J., 2003. An investigation of geothermal soil gas emissions and indoor air pollution in selected Rotorua buildings, Institute of Geological & Nuclear Sciences Science Report 2003/28

- Durand, M., Florkowski, C., George, P. and Walmsley, T., 2004. Elevated trace element output in urine following acute volcanic gas exposure. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 134: 139-148
- Elias, T., Sutton, A.J., 2002, Volcanic air pollution in our backyard: gas advisory system helps alert people of Hawai'i, *Geological Society of America Abstracts with Program*, 34 (5): A-11.
- Etiopie G., Fridricksson T., Italiano F., Winiwarter W., Theloke J., Natural emissions of methane from geothermal and volcanic sources in Europe, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (Volume 165, 15/8/2007, pages 78-86)
- Etiopie G, Papatheodorou G, Christodoulou D, Geraga M, Favali P (2006a) The geological links of the ancient Delphic Oracle (Greece): a reappraisal of natural gas occurrence and origin. *Geology* 34:821–824. doi:10.1130/G22824.1
- Etiopie G, Papatheodorou G, Christodoulou D, Ferentinos G, Sokos E, Favali P (2006b) Methane and hydrogen sulfide seepage in the northwest Peloponnese petroliferous basin (Greece): Origin and geohazard. *AAPG Bull* 90:701–713. doi:10.1306/11170505089
- Faive-Pierret, R. and Le Guern, F., 1983. Health risks linked with inhalation of volcanic gases and aerosols. In: H. Tazieff and J.C. Sabroux (Editors), *Forecasting Volcanic Events*. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, pp. 69-81.
- Farrar, C.D., Sorey, M.L., Evans, W.C., Howle, J.F., Kerr, B.D., Kennedy, B.M., King, C.-Y. and Southon, J.R., 1995. Forest-killing diffuse CO₂ emission at Mammoth Mountain as a sign of magmatic unrest. *Nature*, 376: 675-678.
- Finlayson-Pitts, B.J. and Pitts, J.N., 1986. *Atmospheric Chemistry: Fundamentals and Experimental Techniques*. Wiley-Interscience Publication. New York.
- Forbes, L., Jarvis, D., Potts, J. and Baxter, P.J., 2003. Volcanic ash and respiratory symptoms in children on the island of Montserrat, British West Indies. *Occupational and Environmental Medicine*, 60(3): 207-211.
- Fujita, S.-I., Sakurai, T. and Matsuda, K., 2003. Wet and dry deposition of sulfur associated with the eruption of Miyakejima volcano, Japan. *Journal of Geophysical Research*, 108(D15): DOI: 10.1029/2002JD003064.
- Fytikas M, Vougioukalakis GE (eds) (2005) The South Aegean active volcanic arc. *Developments in Volcanology*, vol 7, p 38
- Gangolli, S. (Ed.), 1999. *The Dictionary of Substances and their Effects*, 2nd edn. The Royal Society of Chemistry. Cambridge.
- Garrec, J.P., Lounowski, A. and Plebin, R., 1977. The influence of volcanic fluoride emissions on the surrounding vegetation. *Fluoride*, 10(4): 152-156
- Goff, F., Janik, C.J., Delgado, H., Werner, C., Counce, D., Stimac, J.A., Siebe, C., Love, S.P., Williams, S.N., Fischer, T. and Johnson, L., 1998. Geochemical surveillance of magmatic volatiles at Popocatepetl Volcano, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 110(6): 695-710
- Gordian, M.E., Özkaynak, H., Xue, J., Morris, S.S. and Spengler, J.D., 1996. Particulate air pollution and respiratory disease in Anchorage, Alaska. *Environmental Health Perspectives*, 104(3): 290-297.
- Gregory, N., 1996. Toxicity hazards arising from volcanic activity. *Surveillance*, 23(2): 14-15
- Hansell, A. and Oppenheimer, C., in preparation. Health hazards from volcanic gases - a systematic literature review
- Hayakawa, Y., 1999. Catalog of volcanic eruptions during the past 2000 years in Japan. *Journal of Geography*, 108(4): 472-488.
- Hickling, J., Clements, M., Weinstein, P. and Woodward, A., 1999. Acute health effects of the Mount Ruapehu (New Zealand) volcanic eruption of June 1996. *International Journal of Environmental Health Research*, 9(2): 97-107.
- Hill, P.M., 2000. Possible asphyxiation from carbon dioxide of a cross-country skier in eastern California: a deadly volcanic hazard. *Wilderness and Environmental Medicine*, 11: 192-195.
- Horrocks, L., M. Burton, P. Francis, and C. Oppenheimer, Stable gas plume composition measured by OP-FTIR spectroscopy at Masaya Volcano, Nicaragua, 1998–1999, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 3497–3500, 1999
- Horwell, C.J. and Baxter, P.J., 2006. A critical review of the studies on the respiratory health hazards of volcanic ash. *Bulletin of Volcanology*.

- Jacobson, M.Z., 2002. Atmospheric pollution: history, science and regulation. Cambridge University Press, Cambridge, 399 pp.
- Ζερεφός Σ. Χρήστος, 1984: Μαθήματα Φυσικής της Ατμόσφαιρας και Φυσικής του Περιβάλλοντος. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. 381 σ.
- Itikarai, I. and Stewart, R., 1993, Rabual: in Annual report of the world volcanic eruptions, in 1990, Bulletin of Volcanic Eruptions (BVE). 30: 103-104.
- Kaminsky, L.S., Mahoney, M.C., Leach, J.F., Melius, J.M. and Miller, M.J., 1990. Fluoride: benefits and risks of exposure. Critical Reviews in Oral Biology and Medicine, 1: 261-281
- Κατσούλης Χρήστος, 1989: Στοιχεία Φυσικής του Περιβάλλοντος. Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων. 235 σ.
- Kawaratani, R.K. and Fujita, S.-I., 1990. Wet deposition of volcanic gases and ash in the vicinity of Mount Sakurajima. Atmospheric Environment, 24A(6): 1487-1492.
- Komarnisky, L.A., Christopherson, R.J. and Basu, T.K., 2003. Sulfur: its clinical and toxilogical aspects. Nutrition, 19(1): 54-61.
- Krotkov, N. A., Schoeberl, M. R., Morris, G. A., Carn, S., and Yang, K. "Dispersion and lifetime of the SO₂ cloud from the August 2008 Kasatochi eruption". (2010). *Journal of Geophysical Research*. 115(1-13)
- Kullman, G.J., Jones, W.G., Cornwell, R.J. and Parker, J.E., 1994. Characterization of air contaminants formed by the interaction of lava and sea water. Environmental Health Perspectives, 102(5):478-482
- Kyriakopoulos G.K. Natural Degassing of Carbon Dioxide and Hydrogen Sulfide and its Environmental Impact at Milos Island Greece, Bulletin of Geological Society of Greece 2010
- Le Guern, F., Bernard, A. and Chevrier, R.M., 1980. Soufriere of Guadeloupe 1976-1977 eruption - mass and energy transfer and volcanic health hazards. Bulletin of Volcanology, 43(3): 577-593
- Legator, M.S., 2001. Health effects from chronic low-level exposure to hydrogen sulfide. Archives of Environmental Health, 56: 123-131.
- Le Guern, F., Bernard, A. and Chevrier, R.M., 1980. Soufriere of Guadeloupe 1976-1977 eruption - mass and energy transfer and volcanic health hazards. Bulletin of Volcanology, 43(3): 577-593
- Le Guern, F., Tazieff, H. and Faivre-Pierret, R., 1982. An example of health hazard: people killed by gas during a phreatic eruption: Dieng Plateau (Java, Indonesia), February 20th 1979. Bulletin Volcanologique, 45(2): 153-156.
- Lide, D.R. (Ed.), 2003. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 84th edn. CRC Press. Boca Raton, Florida
- Leus, X., Kintanar, C. and Bowman, V., 1981. Asthmatic bronchitis associated with a volcanic eruption in St. Vincent, West Indies. Disasters, 5: 67-69.
- Loppi S (1996) Lichens as bioindicators of geothermal air pollution in Central Italy. Bryologist 99:41-48
- Lykoudi 2005 www.metal.ntua.gr/uploads/3108/2a_ATMOSFAIRA.pdf
- Mannino, D.M., Ruben, S., Holschuh, F.C., Holschuh, T.C., Wilson, M.D. and Holschuh, T., 1996. Emergency department visits and hospitalizations for respiratory disease on the island of Hawaii, 1981 to 1991. Hawaii Medical Journal, 55: 48-54.
- Mariolakos E, Nicolopoulos E, Bantekas I, Palyvos N (2010) Oracles on faults: a probable location of a "lost" oracle of Apollo near Oroviai (Northern Evia Island, Greece) viewed in its geological and geomorphological context. Bull Geol Soc Greece XLIII(2):829-844
- Martin, D., Ardouin, B., Bergametti, G., Carbonnelle, J., Faivre-Pierret, R., Lambert, G., Le Cloarec, M.F. and Sennequier, G., 1986. Geochemistry of sulfur in Mount Etna plume. Journal of Geophysical Research, 91(B12): 12,249-12,254.
- Mason, B., 2002. Pinatubo dust is still a killer. New Scientist, 175(2351): 7.
- Mather, T.M., Allen, A.G., Oppenheimer, C., Pyle, D.M. and McGonigle, A.J.S., 2003. Size-resolved characterisation of soluble ions in the particles in the tropospheric plume of Masaya volcano, Nicaragua: origins and plume processing. Journal of Atmospheric Chemistry 46(3), 207-237.
- Μελάς Δημήτριος, 1997: Διασπορά Αερίων Ρύπων. Τμήμα Φυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 52 σ.
- Miranda, J., Zepeda, F. and Galindo, I., 2004. The possible influence of volcanic emissions on atmospheric aerosols in the city of Colima, Mexico. Environmental Pollution, 127: 271-279.

- Monick M, et al. Effects of Eyjafjallajökull volcanic ash on innate immune system responses and bacterial growth *in vitro*. *Environ Health Perspect* 121(6):691–698 (2013)
- Moya, M., Castro, T., Zepeda, M. and Baez, A., 2003. Characterization of size-differentiated inorganic composition of aerosols in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 37(25): 3581-3591.
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 1981. Occupational Health Guidelines for Chemical Hazards, DHHS (NIOSH) Publication No. 81-123
- Naoe, H., Heintzenberg, J., Okada, K., Zaizen, Y., Hayashi, K., Tateishi, T., Igarashi, Y., Dokiya, Y. and Kinoshita, K., 2003. Composition and size distribution of submicrometer aerosol particles observed on Mt. Fuji in the volcanic plumes from Miyakejima. *Atmospheric Environment*, 37(22): 3047-3055
- Nelson, L. 2000. Carbon Dioxide Poisoning. *Emerg. Medicine* 32(5):36-38. Summary of physiological effects and toxicology of CO₂ on humans
- Nemery, B., Hoet, P.H.M. and Nemmar, A., 2001. The Meuse Valley fog of 1930: an air pollution disaster. *The Lancet* 357(9257), 704-708.
- Newham R., Dirks K., Samaranayake D. 2010. An investigation into long distance health impacts of the 1996 eruption of Mt Ruapehu, New Zealand, *Atmospheric Environment*, Vol. 44
- Ng'Walali, P.M., Koreeda, A., Kibayashi, K. and Tsunenari, S., 1999. Fatalities by inhalation of volcanic gas at Mt. Aso crater in Kumamoto, Japan. *Legal Medicine*, 1: 180-184.
- Nicholson, R.A., Roberts, P.D. and Baxter, P.J., 1996. Preliminary studies of acid and gas contamination at Poas volcano, Costa Rica. In: J.D. Appleton, R. Fuge and G.J.H. McCall (Editors), *Environmental Geochemistry and Health*. The Geological Society, London, pp. 239-244
- Νικολοπούλου Στραύτη 2008 www.physics.ntua.gr/~papayannis/Articles%20for%20tamex/PMs-TSI.pdf
- Notcutt, G. and Davies, F., 1989. Accumulation of volcanogenic fluoride by vegetation: Mt. Etna, Sicily. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 39(4): 329-333.
- Notcutt, G. and Davies, F., 1993. Dispersion of gaseous volcanogenic fluoride, island of Hawaii. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 56: 125-131.
- Notcutt, G. and Davies, F., 1999. Biomonitoring of volcanogenic fluoride, Furnas Caldera, Sao Miguel, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92(1-2): 209-214
- O'Hara, P.J., Fraser A.J., James M.P., 1982. Superphosphate poisoning in sheep: the role of fluoride. *New Zealand Veterinary Journal*, 30: 191-201
- Oppenheimer, C., Francis, P., Burton, M., Maciejewski, A.J.H. and Boardman, L., 1998. Remote measurement of volcanic gases by Fourier transform infrared spectroscopy. *Applied Physics B*, 67: 505-515.
- Oskarsson, N., 1980. The interaction between volcanic gases and tephra: fluorine adhering to tephra of the 1970 Hekla eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 8, 251-266
- Othman-Chande, M., 1987. The Cameroon volcanic gas disaster: An analysis of a makeshift response. *Disasters*, 11(2): 96-101.
- Papazachos, B.C. & Comninakis, P.E.: Geophysical and tectonic features of the Aegean Arc. *J. Geophys. Res.* 76 (1971), pp. 8517–8533.
- Perret, F.A., 1924. The Vesuvius eruption of 1906: study of a volcanic cycle. The Carnegie Institution of Washington, 151 pp
- Pearce JM (ed) (2004) Natural analogues for the geological storage of CO₂. Final report of the Nascent project. British Geological Survey Technical Report, 122pp
- Porter, J.N., Horton, K.A., Mougini-Mark, P.J., Lienert, B., Sharma, S.K., Lau, E., Sutton, A.J., Elias, T. and Oppenheimer, C., 2002. Sun photometer and lidar measurements of the plume from the Hawaii Kilauea volcano Pu'u O'o vent: aerosol flux and SO₂ lifetime. *Geophysical Research Letters* 29(16), DOI 10.1029/2002GL014744
- Priestly, M. A.. 2003. *Medicine :Respiratory Acidosis*. January, 21, 2003
- Raga, G.B., Kok, G.L., Baumgardner, D., Baez, A. and Rosas, I., 1999. Evidence for volcanic influence on Mexico City aerosols. *Geophysical Research Letters*, 26(8): 1149-1152.
- Susan A. Rice Human Health Risk Assessment Of CO₂: Survivors of acute HIGH-LEVHigh-level exposure and populations sensitive to prolonged low-level exposure

- Roberts JJ, Wood RA, Haszeldine RS (2011) Assessing the health risks of natural CO₂ seeps in Italy. *PNAS* 108(40):16545–16548. doi:10.1073/pnas.1018590108
- Rojas-Ramos, M., Catalan-Vazquez, M., Martin - Del Pozzo, A.L., Garcia-Ojeda, E., Villalba-Caloca, J. and Perez-Neria, J., 2001. A seven months prospective study of the respiratory effects of exposure to ash from Popocatepetl volcano, Mexico. *Environmental Geochemistry and Health*, 23: 383-396.
- Sax, N.I. and Lewis, R.J., Sr., 1989. *Dangerous Properties of Industrial Materials*, 7th edn. Van Nostrand Reinhold. New York.
- Searl, A., Nicholl, A. and Baxter, P.J., 2002. Assessment of the exposure of islanders to ash from the Soufrière Hills volcano, Montserrat, British West Indies. *Occupational and Environmental Medicine*, 59(8): 523-531.
- Seever MH (1944) The narcotic properties of carbon dioxide. *NY State J Med* 44:597–602
- Shinkuro, R., Fujiyama, C. and Akiba, S., 1999. Relationships between ambient sulfur dioxide levels and neonatal mortality near the Mt. Sakurajima volcano in Japan. *Journal of Epidemiology*, 9(5): 344-349
- Sigurdsson, H., Devine, J.D., Tchoua, F.M., Presser, T.S., Pringle, M.K.W. and Evans, W.C., 1987. Origin of the lethal gas burst from Lake Monoun, Cameroun. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 31(1-2): 1-16.
- Simkin T. And Siebert L. 1994 *Volcano of the World* 2nd edition. Geoscience press for the Smithsonian Institution
- Smithsonian Institution, 1979. Dieng Volcanic Complex. *Scientific Event Alert Network (SEAN) Bulletin*, vol. 4, no. 2.
- Smithsonian Institution, 1986. Concepcion. *Scientific Event Alert Network (SEAN) Bulletin* v. 11, no. 5.
- Smithsonian Institution, 1988. Yasur. *Scientific Event Alert Network (SEAN) Bulletin*, v. 13, no. 12.
- Smithsonian Institution, 1989. Lonquimay. *Scientific Event Alert Network (SEAN) Bulletin*, v. 14, nos. 6-7
- Smithsonian Institution, 1991. Hudson. *Bulletin of the Global Volcanism Network (BGVN)*, v. 16, no. 9.
- Smithsonian Institution, 1993. Concepcion. *Bulletin of the Global Volcanism Network (BGVN)*, v. 18, no. 3.
- Smithsonian Institution, 1994. Telica. *Bulletin of the Global Volcanism Network (BGVN)*, v. 19, no. 7.
- Smithsonian Institution, 1996. Kilauea. *Bulletin of the Global Volcanism Network (BGVN)*, v. 21, no.1.
- Smithsonian Institution, 2002. Nyiragongo. *Bulletin of the Global Volcanism Network (BGVN)*, v. 27, no. 4.
- Snyder, J.W., Safir, E.F., Summerville, G.P. and Middleberg, R.A., 1995. Occupational fatality and persistent neurological sequelae after mass exposure to hydrogen sulfide. *American Journal of Emergency Medicine*, 13(2): 199-203
- Sorey, M.L., Evans, W.C., Kennedy, B.M., Farrar, C.D., Hainsworth, L.J. and Hausback, B., 1998. Carbon dioxide and helium emissions from a reservoir of magmatic gas beneath Mammoth Mountain, California. *Journal of Geophysical Research*, 103(B7): 15,303-15,323.
- Stith, J.L., Hobbs, P.V. and Radke, L.F., 1978. Airborne particle and gas measurements in the emissions from six volcanoes. *Journal of Geophysical Research*, 83(C8): 4009-4017
- Stothers, R.B. The Great Tambora Eruption in 1815 and Its Aftermath. *Science* 1984, 224, 1191-1198
- Sutton, A.J., Elias, T., Navarrete, R., 1994, Volcanic gas emissions and their impact on ambient air character at Kilauea Volcano, Hawaii, U.S. Geological Survey Open-File Report 94-569, 34 p
- Thorarinsson, S., 1979. On the damage caused by volcanic eruptions with special reference to tephra and gases. In: P.D. Sheets and D.K. Grayson (Editors), *Volcanic Activity and Human Ecology*. Academic Press Inc., New York and London, pp. 125-159.
- Thorarinsson, S. and Sigvaldason, G.E., 1972. The Hekla eruption of 1970. *Bulletin Volcanologique*, 36(2): 269-288
- Tikuisis P., Kane D.M., McLellan T.M., Buick F., Fairburn S.M., 1992. Rate of formation of carboxyhemoglobin in exercising humans exposed to carbon monoxide. *Journal of Applied Physiology* 72 (4): 1311–9

- Thielemann T, Krooss BM, Littke R, Welte DH (2001) Does coal mining induce methane emissions through the lithosphere/atmosphere boundary in the Ruhr Basin, Germany? *J Geochem Explor* 74:219–231
- Uda, H., Akiba, S., Hatano, H. and Shinkuro, R., 1999. Asthma-like disease in the children living in the neighbourhood of Mt. Sakurajima. *Journal of Epidemiology*, 9(1): 27-31
- Wakisaka, I., Yanagihashi, T., Tomari, T. and Ando, T., 1988. Effects of volcanic activity on the mortality figures of respiratory disease. *Japan Journal of Hygiene*, 42(6): 1101-1110.
- Ware, J.H., Ferris, B.G.J.R. and Dockery, D.W., 1986. Effects of ambient sulfur oxides and suspended particles on respiratory health of preadolescent children. *American Review of Respiratory Disease*, 133: 834-842.
- Wellburn, A., 1994. *Air Pollution and Climate Change: the biological impact*. Addison Wesley Longman Limited, Harlow, 268 pp.
- Witham, C., in review. Volcanic disasters and incidents: a new database. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*
- Witter, J.B. and Delmelle, P., 2004. Acid gas hazards in the crater of Villarrica volcano (Chile). *Revista Geologica de Chile*, 31(2): 273-277
- WHO, 1999. *Guidelines for Air Quality*, World Health Organisation, Geneva.
- Yano, E., Yokoyama, Y. and Nishii, S., 1986. Chronic pulmonary effects of volcanic ash: an epidemiological study. *Archives of Environmental Health*, 41(2): 94-99.
- Yano, E., Yokoyama, Y. and Nishii, S., 1986. Chronic pulmonary effects of volcanic ash: an epidemiological study. *Archives of Environmental Health*, 41(2): 94-99
- Yano, E., Yokoyama, Y., Higashi, H., Nishii, S., Maeda, K. and Koizumi, A., 1990. Health effects of volcanic ash: a repeat study. *Archives of Environmental Health*, 45(6): 367-373.
- Χαβούζης Ν. Πνευματικός Ι. Δηλητηρίαση από μονοξείδιο του άνθρακα ΠΝΕΥΜΩΝ Τεύχος 1ο, Τόμος 27ος, Ιανουάριος - Μάρτιος 2014

Διαδικτυακές πηγές

www.acgih.org/
www.atsdr.cdc.gov/
www.cdc.gov/niosh/?
www.ccohs.ca/
www.demokritos.gr
www.geo.auth.gr/courses/gmc/1000/synthesi.html
www.geology.com
www.geo.mtu.edu/volcanoes/hazards/
www.hvo.wr.usgs.gov/
www.ipcc.ch
www.ivhhn.org
www.intlpollution.commonsgc.cuny.edu/volcanic-pollution/
www.metal.ntua.gr
www.osha.gov
www.paho.org
www.usgs.gov
www.vesuvioinrete.it
www.volcanoes.usgs.gov
www.volcano.si.edu/reports_bgvn.cfm
www.who.int/en/

