



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ & ΚΡΙΣΕΩΝ

POST GRADUATE PROGRAM
ENVIRONMENTAL, DISASTER & CRISES MANAGEMENT STRATEGIES

Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης

Master Thesis

**Θερμογραφία της Επιφάνειας του Ηφαιστειακού
Νησιού Νέας Καμένης με επίγειες μετρήσεις και
δορυφορικές εικόνες.**

**Ground Thermal and Land Surface Temperature of the Volcanic
Island Nea Kameni (Greece).**

ΠΑΥΛΙΝΑ ΜΠΑΡΔΟΥΛΗ / PAVLINA BARDOULI
Α.Μ./R.N. : 16142



Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης

Master Thesis

**Θερμογραφία της Επιφάνειας του Ηφαιστειακού
Νησιού Νέας Καμένης με επίγειες μετρήσεις και
δορυφορικές εικόνες.**

**Ground Thermal and Land Surface Temperature of the Volcanic
Island Nea Kameni (Greece).**

**ΠΑΥΛΙΝΑ ΜΠΑΡΔΟΥΛΗ / PAVLINA BARDOULI
Α.Μ./R.N. : 16142**

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:	Εξειδικευμένη Επιστημονική Καθοδήγηση:
Δρ. Νομικού Π., Επικ. Καθηγ. ΕΚΠΑ	Ανδρεαδάκης Ε. Γεωλόγος MSc, PhDc, ΕΚΠΑ
Δρ. Βασιλάκης Ε., Επικ. Καθηγ. ΕΚΠΑ	
Δρ. Αντωνίου Β., Δρ. Γεωλόγος, Ε.Δ.Ι.Π. ΕΚΠΑ	

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες:	4
Συνομογραφίες:	5
Περίληψη:	6
Εισαγωγή:	8
Κεφάλαιο 1:	9
1.1. Ηφαίστεια:	9
1.1.1 Πρόδρομα φαινόμενα:.....	11
1.2. Ηφαιστειακός κίνδυνος:	13
1.3. Διαχείριση ηφαιστειακού κινδύνου:	18
Κεφάλαιο 2:	24
2.1 Το ηφαίστειο της Σαντορίνης:	24
2.1.1 Γεωθερμία Νέας Καμένης.....	32
2.1.2 Θερμογραφία:	36
2.2 Ηφαιστειακή κρίση 2011-2012:	37
Κεφάλαιο 3: Τηλεπισκόπηση (Remote Sensing)	41
3.1 Ορισμοί και Γενικά στοιχεία:	41
3.2. Το σύστημα Landsat:	46
3.3: Landsat 5, Landsat 7 & Landsat 8:	46
3.3.1: Φασματικά κανάλια Landsat 8:	48
Κεφάλαιο 4:	50
4.1. Εργαλεία:	50
4.2. Λήψη δεδομένων (επίγειες μετρήσεις – δορυφορικές εικόνες):	52
4.2.1. Επίγειες Μετρήσεις:.....	52
4.2.2. Δορυφορικές Εικόνες:.....	57
4.3. Μεθοδολογία – Δημιουργία Χαρτών:	59
4.3.1: Δείκτης NDVI (Normalized Difference Vegetation Index):.....	61
4.3.2: Μετατροπή των Digital Numbers (DN) σε radiances (Conversion to ToA Radiance):	63
4.3.3: Εύρεση του PV (PROPORTION OF VEGETATION) με τη χρήση του NDVI και υπολογισμός του ϵ ή LSE (LAND SURFACE EMISSIVITY):.....	64
4.3.4: Υπολογισμός του LST (LAND SURFACE TEMPERATURE):	64
4.3.5: Επεξεργασία Δορυφορικών Εικόνων Landsat 5:.....	65
4.3.6: Πίνακες Σταθερών Τιμών:.....	66
Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και Ανάλυση δεδομένων:	68
5.1: Landsat 8:	68
5.2: Landsat 5:	70
Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα:	73
Συζήτηση – Συμπεράσματα:	79
Βιβλιογραφία	82
Παράρτημα I:	86
Παράρτημα II:	87
Παράρτημα III:	90

Ευχαριστίες:

Πραγματοποιώντας τις σπουδές μου στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών «Στρατηγικές Διαχείρισης Περιβάλλοντος, Καταστροφών και Κρίσεων», μου δόθηκε η δυνατότητα να εμπνευστώ από διάφορους ανθρώπους και γνωστικά αντικείμενα, και συλλέγοντας εμπειρίες, κυρίως μέσα από τις ασκήσεις πεδίου, αποφάσισα να επιλέξω τον δύσκολο δρόμο και να ασχοληθώ με το θέμα της Θερμογραφίας της Σαντορίνης.

Αρχικά, λοιπόν, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Λιάνα και Αντώνη Μπαρδούλη, καθώς χωρίς τις δικές τους θυσίες και την πάρα πολύ σημαντική τους υποστήριξη, δεν θα είχα καταφέρει να φοιτώ στο συγκεκριμένο μεταπτυχιακό πρόγραμμα και να κάνω τα όνειρά μου πραγματικότητα. Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Αντωνίου Βέρα, η οποία ήταν ορόσημο στην πορεία μου ως μεταπτυχιακή φοιτήτρια, καθώς η εμπιστοσύνη της και οι γνώσεις της με έκαναν καλύτερο άνθρωπο. Το ευχαριστώ είναι λίγο. Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Ανδρεαδάκη Μανώλη, ο οποίος υπήρξε ο καθοδηγητής μου στη συγκεκριμένη διατριβή και βοήθησε πάρα πολύ στην ομαλή πραγματοποίησή της, τόσο ψυχολογικά όσο και πρακτικά. Δεν θα μπορούσα φυσικά να παραλείψω την κυρία Νομικού Παρασκευή, που με την ενέργειά της και την ασταμάτητη διάθεση για δουλειά, υπήρξε πρότυπο ώστε να μη σταματώ ποτέ μέχρι να είμαι περήφανη για το αποτέλεσμα που θα βγάλω.

Ένας πολύ βασικός άνθρωπος, που χωρίς αυτόν οι γνώσεις μου για την τηλεπισκόπηση θα ήταν ελλιπείς και η εργασία δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί, είναι η Μήτση Τέρψη. Μακάρι να μπορούσε να περιγραφεί με λόγια το πόσο σημαντική ήταν η βοήθεια που μου προσέφερε, ακόμη και όταν χρειάστηκε να με διδάξει μέσω απόστασης. Ήταν η καλύτερη δασκάλα, καθώς μου δίδαξε από το μηδέν όλα όσα χρειάστηκαν για να βγάλω εις πέρας το έργο μου. Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην αναφέρω τις πολυαγαπημένες μου φίλες μου Σοφίτικου Ιωάννα, Αντωνοπούλου Κωνσταντίνα και Εγκιαζάροβ Λίλια, οι οποίες άκουγαν κάθε δισταγμό μου, κάθε άγχος και προβληματισμό και ήταν δίπλα μου σε όλα, θυμίζοντάς μου τον αρχικό μου στόχο και πως χωρίς αποτυχία, δεν πρόκειται ποτέ κανείς να πετύχει. Είμαι πραγματικά ευγνώμον για τους ανθρώπους που είχα δίπλα μου στο ταξίδι μου αυτό.

Σας αγαπώ πολύ,

Παυλίνα.

Συντομογραφίες:

DEM: Digital Elevation Model

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

OLI: Operational Land Imager

LST: Land Surface Temperature

LSE: Land Surface Emissivity

SWIR: Short-wavelength Infrared

TIR: Thermal Infrared Sensor

USGS: United States Geological Survey

Περίληψη:

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αποτύπωση και χαρτογράφηση της θερμοκρασίας του εδάφους του ηφαιστειακού νησιού της Νέας Καμένης δορυφορικές εικόνες και με επίγειες ενόργανες μετρήσεις. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα της περιοχής, σε συνδυασμό με τα πρόδρομα ηφαιστειακά φαινόμενα που παρατηρήθηκαν πριν μερικά χρόνια (2011 - 2012), καθιστά ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα την αποτύπωση της θερμογραφίας της επιφάνειας σε κανονικές συνθήκες. Η υλοποίηση της εργασίας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση τηλεπισκόπησης (δεδομένα και δορυφορικές εικόνες από τους δορυφόρους Landsat 5 και Landsat 8) και η επεξεργασία των δεδομένων με τη βοήθεια των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (GIS), στα προγράμματα ArcMap (της ESRI) και Erdas. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκαν και μετρήσεις πεδίου, με οι αισθητήρες μεταλλικού ελάσματος μέτρησης θερμοκρασίας και υγρασίας εδάφους και αέρα και θερμομέτρα υπερύθρων. Οι επίγειες μετρήσεις μπορούν να αποτυπώσουν τις τοπικές διαφοροποιήσεις της θερμοκρασίας στους διαφορετικούς σχηματισμούς και γύρω από τις φουμαρόλες με καλύτερη λεπτομέρεια από τον κάρναβο των δορυφορικών εικόνων (30 ή 100m). Εν συνεχεία, ακολούθησε η συσχέτιση των δεδομένων πεδίου με τα δεδομένα από της δορυφορικές εικόνες, και η εξαγωγή συμπεράσματα για τη συσχέτιση της θερμοκρασίας με τις καιρικές συνθήκες και την ηφαιστειακή δραστηριότητα.

Abstract:

The purpose of this thesis is to present into maps the thermography of the volcanic island Nea Kameni. This had been succeeded by ground thermal and land surface measurements of the temperature, in combination with satellite images (Landsat 5 and Landsat 8 data). The area's volcanic activity, combined with the precursor volcanic phenomena observed a few years ago (2011-2012), makes it particularly interesting to study the surface thermography under normal conditions. The study had been conducted with remote sensing and with GIS for the data processing. Field measurements had also taken place, with metal plate sensors, measuring ground and air humidity, and infrared thermometers. The field measurements can capture local variations in temperatures in different formations and around fumaroles in much better detail than the satellite image grid (30 or 100m). Then, the field data had been correlated with the data from the satellite images, and conclusions had been drawn about the correlation of temperature with weather conditions and volcanic activity.

Λέξεις κλειδιά: ηφαίστειο, Σαντορίνη, Νέα Καμένη, θερμογραφία, γεωθερμία, ηφαιστειακή κρίση, φουμαρόλες, θερμοκρασία εδάφους, δορυφορικές εικόνες, τηλεπισκόπηση, γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών

Key-words: volcano, Santorini, Nea Kameni, thermography, geothermy, volcanic crisis, fumaroles, ground temperature, satellite images, remote sensing, geographic information systems

Εισαγωγή:

Ο σχηματισμός των ηφαιστείων προέρχεται από τα ίδια τους τα υλικά, όταν ζεστά και λιωμένα πετρώματα από τον ανώτερο μανδύα βρίσκουν διαφυγή προς την επιφάνεια της Γης. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που έχουν, καθίστανται τις περισσότερες φορές δυσπρόσιτα και επικίνδυνα προς επιτόπια μελέτη. Ο λόγος για τον οποίο κρίνεται απαραίτητη η μελέτη των ηφαιστειακών δραστηριοτήτων είναι διότι έχει άμεσες συνέπειες τόσο στο αβιοτικό όσο και στο βιοτικό περιβάλλον. Δεν είναι λίγα τα παραδείγματα στα οποία έχουν καταγραφεί απώλειες ανθρωπίνων ζώων, και σε μεγαλύτερη κλίμακα, παροδικές αλλαγές του τοπικού κλίματος. Είναι βασικό οι άνθρωποι που ζουν κοντά σε ενεργά ηφαίστεια να γνωρίζουν τους κινδύνους που πρόκειται να αντιμετωπίσουν, ώστε να είναι κατάλληλα προετοιμασμένοι για κάθε ενδεχόμενο. Τέφρα, σκόνη και καπνός μπορούν να καλύψουν μεγάλες εκτάσεις μέσα σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα ενώ τα φλεγόμενα υλικά που πετάγονται, μπορούν να προκαλέσουν πυρκαγιές. Οι ροές λάβας μαζί με τις λασποροές μπορούν να διανύσουν αποστάσεις χιλιομέτρων και να καταστρέψουν ολόκληρες πόλεις αλλά και σοδιές.

Λύση στο πρόβλημα της παρακολούθησης των ηφαιστείων έρχεται να δώσει η τηλεπισκόπηση και οι εφαρμογές της, καθώς χρησιμοποιώντας τη θερμική και μέση – υπέρυθη ακτινοβολία μπορεί να μελετηθεί μια ηφαιστειακή δραστηριότητα. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990 ξεκίνησαν οι πρώτες προσπάθειες για χρήση θερμικών δορυφορικών δεδομένων με σκοπό στην παρακολούθηση των ηφαιστείων σε πραγματικό χρόνο (Παρχαρίδης, 2015). Μέχρι στιγμής δεν έχει σχεδιαστεί κάποιος δορυφόρος που να αφορά την αποκλειστική μελέτη των ηφαιστείων, όμως διάφοροι θερμικοί αισθητήρες που υπάρχουν στους δορυφόρους, όπως στους Landsat 7 και Landsat 8, είναι κατάλληλοι για τη μελέτη και επεξεργασία ηφαιστειακών δεδομένων.

Με την έναρξη της νέας χιλιετίας η NASA εκτόξευσε ορισμένους δορυφόρους (όπως ο Terra, οι Landsat 7,8, ο Aqua και ο EO-1) οι οποίοι περιέχουν αισθητήρες κατάλληλους για θερμική καταγραφή των ενεργών ηφαιστείων. Η πρωτοποριακή αυτή κίνηση είχε ως αποτέλεσμα την καθιέρωση του πρώτου παγκόσμιου συστήματος καθημερινής δορυφορικής παρακολούθησης όλων των ενεργών ή δυνητικών ενεργών ηφαιστείων της Γης (Παρχαρίδης, 2015).

Ο τομέας της θερμικής τηλεπισκόπησης μπορεί να αποκαλύψει μια «αθόρυβη» συμπεριφορά ενός ηφαιστείου και να φέρει στο φως χρήσιμες πληροφορίες οι οποίες εάν επεξεργαστούν σωστά μπορούν να σώσουν ζωές μαζί με την πρόβλεψη της συμπεριφοράς και η αξιολόγηση της επικινδυνότητας ενός ηφαιστείου.

Κεφάλαιο 1:

1.1. Ηφαίστεια:

Το περιβάλλον, αλλά και η ανθρώπινη ζωή και δραστηριότητα επηρεάζονται από την ηφαιστειακή δραστηριότητα, σε τοπικό έως και σε παγκόσμιο επίπεδο. Τα, έως τώρα, μετρούμενα ενεργά ηφαίστεια της Γης είναι περίπου 500. Όμως, ο αριθμός αυτός δεν μπορεί να είναι απόλυτος, καθώς είναι σχετικά δύσκολο να καθοριστεί επ' ακριβώς ο χρόνος στον οποίο σταματά ένα ηφαίστειο να αποτελεί απειλή για την ανθρώπινη ζωή (Λέκκας Ε. , Φυσικές & Τεχνολογικές Καταστροφές, 2000).

Ως ηφαίστειο, λοιπόν, χαρακτηρίζεται η θέση πάνω στην επιφάνεια της Γης, στην οποία το ρευστό διάπυρο υλικό από το εσωτερικό της Γης (το μάγμα¹), βρίσκει διέξοδο και εκχύνεται στην επιφάνεια υπό τη μορφή λάβας. Μαζί με τη λάβα², συνοδεύονται στερεά αλλά και αέρια αναβλύσματα τα οποία έχουν πολύ υψηλή θερμοκρασία (Λέκκας & Ανδρεαδάκης, Εισαγωγή στη Θεωρία της Διαχείρισης Καταστροφών Και Κρίσεων, 2015). Η εκρηκτική φάση ενός ηφαιστείου έχει πάρα πολύ μικρή χρονική διάρκεια συγκριτικά με το χρόνο κατά το οποίο ένα ηφαίστειο βρίσκεται σε ηρεμία.

Συνοπτικά, τα ηφαίστεια συναντώνται σε τρεις γεωτεκτονικές περιοχές (Λέκκας Ε. , Φυσικές & Τεχνολογικές Καταστροφές, 2000): Στις ζώνες σύγκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών, όπου εκεί υπάρχει περίπου το 80% αυτών. Στις περιοχές αυτές η μια λιθοσφαιρική πλάκα υποβυθίζεται κάτω από μια άλλη, και εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που συναντά, λιώνει. Το λιωμένο αυτό υλικό, σιγά σιγά αρχίζει και ανεβαίνει, διαπερνά τη λιθοσφαιρική πλάκα που βρίσκεται από πάνω του, ψύχεται και κρυσταλλώνεται. Κατά τη στερεοποίηση, ένα μέρος του υλικού καταφέρνει και διαφεύγει και φτάνει στην επιφάνεια, δημιουργώντας μια σειρά ηφαιστείων τα οποία έχουν γραμμική διάταξη. Αυτό είναι το ηφαιστειακό τόξο.

Η δεύτερη περιοχή που συναντώνται ηφαίστεια είναι στις ζώνες απόκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών. Τα σημεία αυτά ονομάζονται και ως μέσο-ωκεάνιες ράχες. Κατά μήκος των ωκεάνιων ραχών, πραγματοποιείται μια συνεχόμενη άνοδος μαγματικού υλικού και δημιουργείται νέος φλοιός (Λέκκας Ε. , Φυσικές & Τεχνολογικές Καταστροφές, 2000). Τα ηφαίστεια που υπάρχουν στα σημεία αυτά είναι κυρίως υποθαλάσσια.

¹ Το μάγμα αποτελεί τηγμένο υλικό στο εσωτερικό της Γης. Περιέχει πολύπλοκο μείγμα πυριτικών υλικών που περιέχουν αέρια σε διάλυση, καθώς επίσης συχνά συναντώνται κρυσταλλικά ορυκτά. Η παραγωγή του μάγματος πραγματοποιείται στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών.

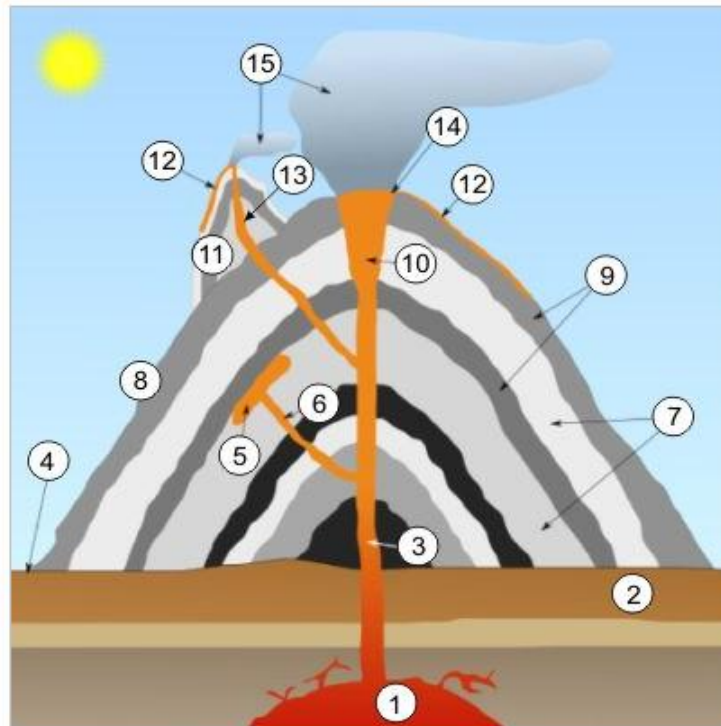
² Η λάβα αποτελεί μορφή μάγματος, που έχει χάσει τα αέρια που περιέχει κατά τη διάρκεια μιας ηφαιστειακής έκρηξης. Η λάβα συναντάται στην επιφάνεια της Γης.

Τέλος, η τρίτη περιοχή στην οποία υπάρχουν ηφαίστεια είναι στις περιοχές των θερμών κηλίδων (hot spots). Στην περίπτωση αυτή, υπάρχει κάποια μικρή ασυνέχεια στο κέντρο των λιθσφαιρικών πλακών, από την οποία πραγματοποιείται έξοδος του τηγμένου υλικού από το κέντρο της Γης.

Ο κύκλος ζωής του κάθε ηφαιστείου είναι διαφορετικός καθώς εξαρτάται από το μηχανισμό που ελέγχει τη λειτουργία του. Ένα ηφαίστειο θεωρείται ότι ξεκίνησε τη «ζωή του» όταν πρωτοεκδηλώνει τη δράση του, ενώ όταν αδρανοποιηθεί και απολιθωθεί το υπόγειο δίκτυο μαγματικής τροφοδοσίας, τότε το ηφαίστειο αυτό έχει ολοκληρώσει τον κύκλο ζωής του. Έτσι λοιπόν, τα ηφαίστεια χωρίζονται σε Ενεργά, Κοιμώμενα και Σβησμένα (Λέκκας & Ανδρεαδάκης, 2015). Ως ενεργά ορίζονται τα ηφαίστεια με καταγεγραμμένη εκρηκτική δραστηριότητα κατά τη διάρκεια των ιστορικών χρόνων με βασική προϋπόθεση ότι είναι ικανά να επαναδραστηριοποιηθούν ανά πάσα στιγμή. Κοιμώμενα χαρακτηρίζονται τα ηφαίστεια τα οποία δεν έχουν ιστορικά καταγεγραμμένη δράση, ωστόσο δεν μπορεί να αποκλειστεί η μελλοντική δραστηριότητά τους. Τέλος, σβησμένα ηφαίστεια χαρακτηρίζονται εκείνα τα οποία έχουν απονεκρωθεί καθώς έχουν ολοκληρώσει τον κύκλο της ζωής τους.

Τα μέρη του ηφαιστείου εμφανίζονται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 1). Ο κεντρικός αγωγός (central vent) (νούμερο 3 στην εικόνα) είναι από τα πιο βασικά τμήματα του ηφαιστείου, καθώς αποτελεί τον κατακόρυφο φυσικό σωλήνα μέσα από τον οποίο πραγματοποιείται η άνοδος του μαγματικού υλικού. Γύρω από τον κεντρικό αγωγό, μέσα από τα αλλεπάλληλα στρώματα λάβας και τέφρας, χτίζεται το ηφαίστειο. Ο κρατήρας (crater) (νούμερο 14 της εικόνας), βρίσκεται στο ανώτερο άκρο του κεντρικού αγωγού και αποτελείται από στερεοποιημένα ηφαιστειακά αναβλύσματα. Στο νούμερο 1 της παρακάτω εικόνας εμφανίζεται ο μαγματικός θάλαμος (magma chamber). Βρίσκεται στο κατώτερο άκρο του κεντρικού αγωγού και τον τροφοδοτεί το ηφαίστειο. Όταν υφίσταται κατάρρευση του μαγματικού θαλάμου τότε δημιουργείται η καλδέρα η οποία είναι μια αρνητική γεωμορφή.

Συνοπτικά, όλα τα μέρη του ηφαιστείου που εμφανίζονται στην εικόνα είναι: (1) ο μαγματικός θάλαμος, (2) το υπόβαθρο του ηφαιστείου, (3) ο κεντρικός αγωγός, (4) η βάση του ηφαιστείου, (5) μια παρείσακτη κοίτη, (6) η φλέβα τροφοδοσίας, (7) κάποια παλαιότερα στρώματα τέφρας, (8) η πλευρά του ηφαιστείου, (9) παλαιότερα ρεύματα λάβας, (10) ο κεντρικός πόρος, (11) ένας παρασιτικός κώνος, (12) ρεύματα λάβας, (13) ένας πλευρικός πόρος, (14) ο κεντρικός κρατήρας, και τέλος, (15) το σύννεφο στάχτης που δημιουργείται από τη δραστηριοποίηση του ηφαιστείου.



Εικόνα 1: Τμήματα του ηφαιστείου

(http://www.geo.auth.gr/765/2_landforms/21_volcano_types.htm)

Το φαινόμενο δραστηριοποίησης ενός ηφαιστείου εμφανίζει επιπτώσεις, τόσο πρωτογενείς, οι οποίες προέρχονται από τα άμεσα αποτελέσματα από τις ροές της λάβας, τις λασποροές, τις πλημμύρες, την απελευθέρωση αερίων, τις φωτιές και τη σεισμική δραστηριότητα, όσο και δευτερογενείς επιπτώσεις, οι οποίες είναι εξίσου σημαντικές να μελετηθούν. Το περιβάλλον και η ανθρώπινη δραστηριότητα, όπως ενδεχόμενες μεταβολές στο τοπικό αλλά και παγκόσμιο κλίμα (εξαρτάται από το μέγεθος της δραστηριότητας και της πιθανής έκρηξης του ηφαιστείου), μαζί με την καταστροφή των βιοτόπων και των οικιστικών ιστών, αποτελούν δευτερογενείς επιπτώσεις ηφαιστειακής δραστηριότητας (Λέκκας Ε. , Φυσικές & Τεχνολογικές Καταστροφές, 2000). Οι πρωτογενείς επιπτώσεις αναφέρονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 1.2 (Ηφαιστειακός Κίνδυνος).

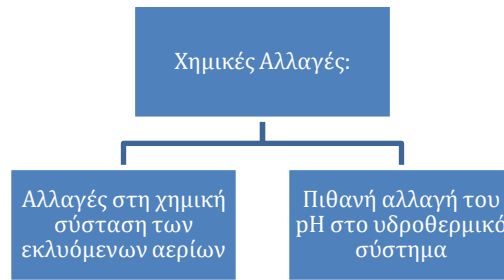
1.1.1 Πρόδρομα φαινόμενα:

Για τους επιστήμονες, υπάρχουν ορισμένες ενδείξεις με τις οποίες μπορεί να γίνει μια πρόβλεψη ηφαιστειακής δραστηριότητας, καθώς μελετώνται ανελλιπώς διάφοροι γεωφυσικοί δείκτες στα ενεργά, ανά τον κόσμο, ηφαιστεια. Είναι πολύ δύσκολο να καθοριστεί με ακρίβεια η περίοδος κατά την οποία εμφανίζεται πρόδρομη δραστηριότητα, διότι το διάστημα αυτό κυμαίνεται από λίγες ημέρες έως και ένα χρόνο (σε ορισμένες περιπτώσεις είναι περισσότερο από ένα χρόνο) μέχρι την κύρια έκρηξη

(Λέκκας Ε. , Φυσικές & Τεχνολογικές Καταστροφές, 2000). Δεν είναι λίγες οι φορές όπου προκαλείται σύγχυση στην πρόβλεψη μιας ηφαιστειακής έκρηξης, καθώς τυγχάνει η έντονη πρόδρομη δραστηριότητα να μην εκφράζεται στην επιφάνεια της γης, καθώς το μάγμα παραμένει στο υπέδαφος. Στην περίπτωση αυτή, το μάγμα διεισδύει ανάμεσα στα πετρώματα και γεμίζει τα κενά τους. Η διεργασία αυτή είναι δυνατόν να προκαλέσει ένα σμήνος σεισμών, σε βάθη από 1 έως και 10 χιλιομέτρων. Η μελέτη και καταγραφή αυτών των σεισμικών δραστηριοτήτων έχει δείξει ότι το μέγεθός τους μπορεί να φθάσει έως και τα 5 R, με συχνότητα έως και 700 την ημέρα. Στο βιβλίο του «Φυσικές και Τεχνολογικές Καταστροφές», ο κύριος Λέκκας αναφέρει πως υπάρχει μια χαρακτηριστική μορφή ηφαιστειογενούς σεισμικότητας που ονομάζεται «αρμονικές δονήσεις». Οι δονήσεις αυτές σχετίζονται με τις ανοδικές κινήσεις του μάγματος προς τα εξωτερικά τμήματα του γήινου φλοιού. Επομένως, για να γίνει σωστή πρόβλεψη κάποιας επερχόμενης έκρηξης, απαιτείται η εγκατάσταση σεισμικών σταθμών και γεωφώνων στα πρανή του ηφαιστείου και παράλληλη μέτρηση των εκλυόμενων αερίων. Όταν το μάγμα είναι τηγμένο, παρατηρείται απελευθέρωση των αερίων του θείου και του φθορίου (Λέκκας Ε. , Φυσικές & Τεχνολογικές Καταστροφές, 2000), άρα εάν καταγραφούν αυξήσεις στις τιμές των αερίων τότε μπορούν να συσχετιστούν με μια ηφαιστειακή δραστηριότητα.

Συνοψίζοντας, ως πρόδρομα φαινόμενα τα οποία ενδεχομένως να παρατηρηθούν πριν από μια ηφαιστειακή έκρηξη είναι:





1.2. Ηφαιστειακός κίνδυνος:

Ο κίνδυνος (hazard) και οι καταστροφές (disasters) είναι φαινόμενα τα οποία καλείται ο άνθρωπος να αντιμετωπίσει αρκετές φορές στη ζωή του καθώς αποτελούν, δυστυχώς, αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας. Ως κίνδυνος, και καταστροφή, λοιπόν, ορίζεται η διαδικασία κατά την οποία η ανθρώπινη ζωή υποβαθμίζεται και θέτεται σε κίνδυνο (Paolo & Shroder, 2005). Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια αύξηση των καταστροφικών φαινομένων και του κινδύνου, τα οποία είναι συνδυασμός τόσο των ανθρωπογενών αλλά φυσικά και των περιβαλλοντικών παραγόντων. Για παράδειγμα, όταν μια κοινωνία αναπτύσσει την πόλη της γύρω από ένα ενεργό ηφαίστειο, αυτομάτως ο κίνδυνος της καταστροφής από μια ηφαιστειακή έκρηξη αυξάνεται.

Είναι πλέον δεδομένο πως, εκτός από παράγοντες που προέρχονται από το διάστημα, μια μεγάλη ηφαιστειακή έκρηξη αποτελεί το μοναδικό φαινόμενο με το υψηλότερο δυναμικό καταστροφής στη Γη (Paolo & Shroder, 2005). Ο ηφαιστειακός κίνδυνος, λοιπόν, ορίζεται ο κίνδυνος ο οποίος περιλαμβάνει όλα τα προϊόντα που υπάρχουν σε μια ηφαιστειακή έκρηξη. Είναι γεγονός πως όταν μια ηφαιστειακή έκρηξη συμβαίνει κοντά σε μια αρκετά πυκνοκατοικημένη περιοχή, οι επιπτώσεις αυτού του φαινομένου είναι καταστροφικές (Ανδρεαδάκης & Λέκκας, 2015). Πιο συγκεκριμένα, μπορούν να προκαλέσουν απώλεια σε ανθρώπινες ζωές (όπως επίσης και σε ζώων), καταστροφές περιουσιών, ακόμη και να επηρεάσουν το παγκόσμιο κλίμα. Οι κίνδυνοι από μια έκρηξη ενός ηφαιστείου, λοιπόν, που απειλούν τόσο τις κοινωνίες όσο και το περιβάλλον, είναι οι εξής:

- Η τέφρα
- Οι ροές λάβας
- Η πυροκλαστική δραστηριότητα
- Οι ηφαιστειακές βόμβες
- Τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα
- Τα δηλητηριώδη αέρια
- Οι λασποροές

- Τα τσουνάμι
- Η σεισμική δραστηριότητα

Ενδεικτικά, οι εκρήξεις που είχαν τον μεγαλύτερο αριθμό θυμάτων έως τώρα ήταν στο Krakatoa της Ινδονησίας και στο Tambora της Ινδονησίας, το 1883 και 1815 αντίστοιχα. Αξίζει να αναφερθεί πως μόνον κατά τη δεκαετία του 1980 είχαν καταγραφεί 28.500 θύματα από ηφαιστειακές εκρήξεις. Τέτοιες μεγάλες εκρήξεις (εκρήξεις μεγάλης έντασης), χαρακτηρίζονται κυρίως από στήλες αερίων αλλά και θραυσμάτων, οι οποίες συναντώνται στην ατμόσφαιρα σε δεκάδες χιλιόμετρα από το έδαφος, και η τέφρα μπορεί να διασκορπιστεί σε ακτίνα εκατοντάδων χιλιομέτρων (Λέκκας & Ανδρεαδάκης, 2015).

Σοβαρό κίνδυνο αποτελεί η τέφρα, καθώς αποτελείται από θρυμματισμένο υλικό, το οποίο κατά τη διάρκεια μιας ηφαιστειακής έκρηξης εκτινάσσεται στον αέρα και έπειτα αποτίθεται στο έδαφος (Εικόνα 2, 3). Η απόσταση στην οποία μπορεί να μεταφερθεί είναι από εκατοντάδες έως και χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά από το ηφαίστειο που εκρήγνυται (Paolo & Shroder, 2005). Η παραγωγή τέφρας συμβαίνει κατά 99% σε όλες τις ηφαιστειακές εκρήξεις. Στην περίπτωση που γίνει απόθεση τέφρας σε στέγες κτιρίων, μετά από μια έντονη βροχόπτωση ενδέχεται να επέλθει κατάρρευση της κατασκευής, καθώς η τέφρα συγκρατεί το νερό και το κτίριο πλέον αδυνατεί να αντέξει το επιπρόσθετο βάρος (Λέκκας & Ανδρεαδάκης, 2015). Επίσης, μπορεί να μολύνει τις καλλιέργειες και στην περίπτωση που είναι λεπτόκοκκη, μπορεί να οδηγήσει ευπαθείς ομάδες σε ασφυξία. Παρόμοιες με την τέφρα είναι και οι ηφαιστειακές βόμβες, οι οποίες είναι αρκετά πιο χονδροκόκκες, με υψηλή θερμοκρασία, και ενδέχεται να προκαλέσουν πυρκαγιές (σύνηθες φυσικός κίνδυνος μετά από κάποια ηφαιστειακή δραστηριότητα).



Εικόνα 2: Κτίρια και βλάστηση στην Clark Air βάση, στις Φιλιππίνες κατεστραμμένα από στρώμα τέφρας μετά την γιγάντια έκρηξη του Pinatubo (15 Ιουνίου 1991), Willie Scott/U.S. Geological Survey, από (Encyclopaedia Britannica)



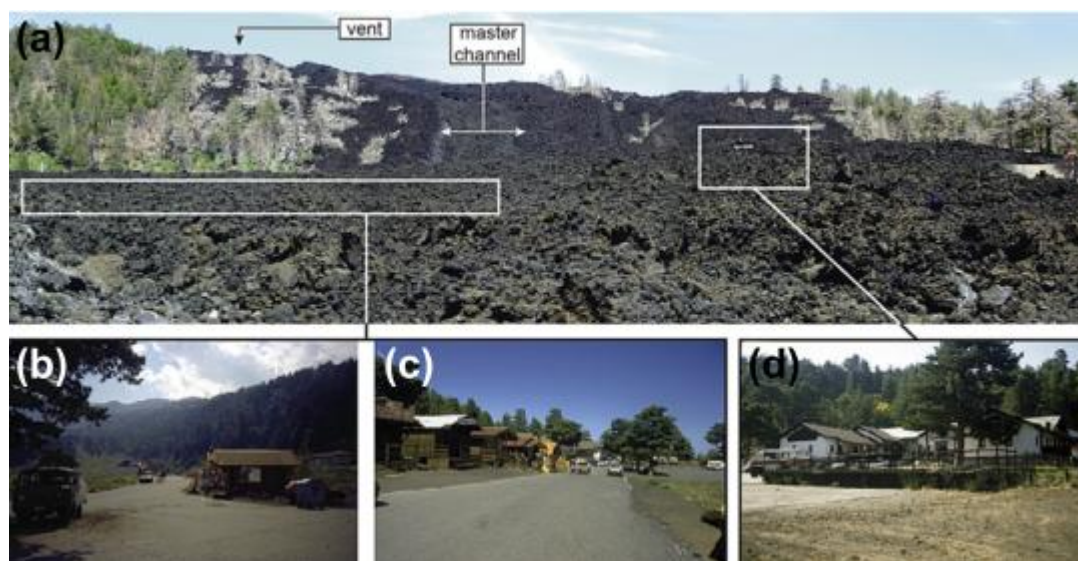
Εικόνα 3: Μορφές ηφαιστειακής τέφρας. Στην (a) εικόνα είναι ρυολιθική τέφρα από το ηφαίστειο Chaiten στη Χιλή (μεσαίο μέγεθος κόκκου: 0,026 mm). Στην εικόνα (b) απεικονίζεται η ανδεσιτική λάβα, από το ηφαίστειο Ruapehu στη Νέα Ζηλανδία (μεσαίο μέγεθος κόκκου) (Paolo & Shroder, 2005), photo credits: G.Wilson

Δυστυχώς, οι αερομεταφερόμενες μορφές ηφαιστειακής τέφρας έχουν σοβαρές επιπτώσεις στα αεροσκάφη που εκτελούν ταξίδια. Ο κίνδυνος από την αερομεταφερόμενη ηφαιστειακή τέφρα είναι βραχυπρόθεσμος, καθώς στην περίπτωση που πραγματοποιείται μια ηφαιστειακή έκρηξη, το ύψος της τέφρας αυξάνεται πάρα πολύ γρήγορα μέσα στα επόμενα λεπτά, και με τη βοήθεια των ανέμων μπορεί να κινηθεί έως και με 150 χιλιόμετρα ανά ώρα (Paolo & Shroder, 2005). Παράδειγμα στον ελληνικό

χώρο αποτελεί το αεροδρόμιο της Σαντορίνης το οποίο την περίοδο 2011-2012 είχε κλείσει ορισμένες φορές λόγω της έντονης δραστηριότητας του ηφαιστείου.

Οι ροές λάβας αποτελούν γνωστό προς τους ανθρώπους προϊόν ηφαιστειακής δραστηριότητας και πραγματοποιούνται όταν το μάγμα υπερχειλίζει και πλέον καλύπτει τις πλευρές του ηφαιστείου. Ανάλογα με την πυκνότητά τους, χωρίζονται σε 2 κατηγορίες: οι ροές λάβας με μικρή πυκνότητα, που έχουν μεγάλες ταχύτητες μετακίνησης, ενώ οι περισσότερες έχουν μεγάλη πυκνότητα και κινούνται αργά, καταστρέφοντας στο πέρασμά τους καλλιέργειες, δρόμους και υποδομές (Εικόνα 4).

Ο λόγος για τον οποίο οι ροές λάβας είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες είναι οι ακραίες υψηλές θερμοκρασίες τους καθώς επίσης και η ικανότητά τους να περικλείουν και να παρασέρνουν τα πάντα κατά το πέρασμά τους. Μπορούν να καταστρέψουν από κατοικίες, δίκτυα επικοινωνίας έως και τις καλλιέργειες. Στην περίπτωση που συμβεί κάτι τέτοιο, οι οικονομικές ζημιές που προκαλούνται σε μια κοινωνία είναι ανυπολόγιστες. Δυστυχώς, οι ροές λάβας δεν μπορούν να σταματήσουν την κίνησή τους, όμως μπορεί να επιτευχθεί η εκτροπή τους με ειδικά φράγματα (Paolo & Shroder, 2005).



Εικόνα 4: Η περιοχή Piano Provenzana της Ιταλίας σε φωτογραφίες «πριν και μετά» την έκρηξη του ηφαιστείου Αίτνα το 2002 – 2003. Οι υποδομές της πόλης ήταν χωροθετημένες περίπου 800 μέτρα βορειοανατολικά και 180 μέτρα πιο χαμηλά από τον κύριο αγωγό. Η φωτογραφία (a) τραβήχτηκε το 2005 και απεικονίζει τον αγωγό, τον κύριο κρατήρα και το διαχωρισμό που έγινε στο δάσος κατά τη διάρκεια της έκρηξης. Οι εικόνες b, c και d απεικονίζουν τα είδη των υποδομών που υπάρχουν κατά τον κύριο δρόμο της πόλης. Παρατηρείται ότι είναι ξύλινες κατασκευές, οι οποίες δεν μπορούν να κριθούν ασφαλείς κατά τη διάρκεια μιας ηφαιστειακής έκρηξης (Behncke, 2005)

Όμως τι είναι αυτό που χαρακτηρίζει τις ροές λάβας τόσο επικίνδυνες τόσο για τον άνθρωπο αλλά και για τη φύση; Είναι πολλοί παράγοντες που παίζουν ρόλο. Ξεκινώντας,

η χωροθέτηση του αγωγού (vent location) σχετικά με την ανάπτυξη μιας πόλης αποτελεί βασικό παράγοντα. Είναι σαφές πως βρίσκονται σε μεγάλο κίνδυνο πόλεις οι οποίες αναπτύσσονται κοντά σε ενεργά ηφαίστεια ή σε κοίτες ποταμών, στις οποίες είναι εύκολο να κυλήσει λάβα. Έπειτα, η ταχύτητα ροής της λάβας (flow velocity) είναι ο καθοριστικός παράγοντας κατά τον οποίο φαίνεται κατά πόσο μια κοινωνία είναι έτοιμη να ανταπεξέλθει σε έναν τέτοιο κίνδυνο. Οι γρήγορες ροές λάβας έχουν μικρότερο χρόνο αντίδρασης από τους ανθρώπους. Η ταχύτητα της λάβας εξαρτάται από την κλίση του εδάφους (Paolo & Shroder, 2005). Ένας ακόμη καθοριστικός παράγοντας αποτελεί ο ρυθμός διάχυσης (effusion rate). Κατά τον παράγοντα αυτό, όσο πιο μεγάλος είναι ο ρυθμός διάχυσης, τόσο πιο μακριά μπορεί να φτάσει η ροή της λάβας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ακόμη και σχετικά απομακρυσμένες από το ηφαίστειο περιοχές, να βρίσκονται σε κίνδυνο. Δεν θα μπορούσε να λείπει και η διάρκεια μιας έκρηξης (duration). Όσο πιο μεγάλη διάρκεια έχει μια ηφαιστειακή έκρηξη, τόσο πιο μεγάλες πιθανότητες υπάρχουν να δημιουργηθούν σύνθετες ροές λάβας με μεγαλύτερο όγκο. Στις περιπτώσεις όπου τέτοια φαινόμενα έχουν συνεχόμενη διάρκεια έως και τα 50 έτη, όπως το παράδειγμα με το ηφαίστειο Kilauea's Aila' au στη Χαβάη, οι ηφαιστειακοί σωλήνες θα μεγαλώνουν, με αποτέλεσμα να μπορούν να φιλοξενήσουν μεγαλύτερες ποσότητες λάβας οι οποίες σιγά σιγά θα κατευθύνονται προς τα χαμηλότερα υψόμετρα και θα «γεμίζουν» την τοπογραφία της περιοχής. Τέλος, έμμεσο αλλά σημαντικό ρόλο στο βαθμό του κινδύνου έχουν οι συνθήκες όρασης. Πιο συγκεκριμένα, εκτός από τα αέρια τα οποία διαχέονται κατά τη διάρκεια μιας ηφαιστειακής έκρηξης, οι ροές λάβας μπορούν να προκαλέσουν δυσφορία στην όραση. Καθώς έχουν υψηλές θερμοκρασίες, σε μια ενδεχόμενη βροχή οι ατμοί που δημιουργούνται εμποδίζουν τη σωστή όραση και δυσκολεύουν τη διαδικασία διαφυγής (είτε στους ανθρώπους είτε στα ζώα).

Η πυροκλαστική δραστηριότητα επηρεάζει άμεσα το φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον καθώς στην περίπτωση που η δραστηριότητα αποτελείται από στοιβάδες τέφρας πολύ υψηλών θερμοκρασιών, οτιδήποτε «αγγίξουν» αποτεφρώνεται.

Τα δηλητηριώδη αέρια μπορούν εν ευρεία έννοια να συνδυαστούν και με τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα. Αυτό συμβαίνει καθώς σε μια ηφαιστειακή έκρηξη τα αέρια που εκλύονται είναι διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), υδρόθειο (H_2S), διοξείδιο του θείου (SO_2) κτλ. (Λέκκας & Ανδρεαδάκης, 2015). Όμως, το διοξείδιο του θείου ευθύνεται και για το φαινόμενο της όξινης βροχής, η οποία καταστρέφει καλλιέργειες, αρχαία μνημεία και μπορεί να προκαλέσει αναπνευστικά προβλήματα.

Οι λασποροές αποτελούν και το πιο επικίνδυνο φαινόμενο, και εντάσσονται στους συνήθεις φυσικούς κινδύνους, όπως επίσης η σεισμική δραστηριότητα και τα τσουνάμι. Αρχικά, οι λασποροές (Lahar) προκαλούνται όταν έχει κορεστεί ένας μεγάλος όγκος

ηφαιστειακής τέφρας και άλλων διαφόρων ηφαιστειακών προϊόντων και κινούνται με μεγάλες ταχύτητες στα κατόντη του ηφαιστείου (Λέκκας & Ανδρεαδάκης, Εισαγωγή στη Θεωρία της Διαχείρισης Καταστροφών Και Κρίσεων, 2015) Μπορούν να προκαλέσουν την απώλεια ζώων αλλά και ζημιές στο ανθρωπογενές και φυσικό περιβάλλον (Εικόνα 5). Η σεισμική δραστηριότητα συνήθως προηγείται μιας ηφαιστειακής έκρηξης και αποτελεί ένδειξη για το τι πρόκειται να συμβεί ή συμβαίνει παράλληλα. Προκαλεί ρευστοποιήσεις εδαφών, κατολισθήσεις αλλά και καταρρεύσεις κτιρίων. Τέλος, τα τσουνάμι είναι συνωδά φαινόμενα ηφαιστειακών εκρήξεων μεγάλης έντασης.



Εικόνα 5: Τοπίο καλυμμένο από λασποροές και ροές λάβας (USGS)

Συνοψίζοντας, τα προϊόντα του ηφαιστειακού κινδύνου, τόσο μεμονωμένα όσο και σε συνδυασμό, έχουν συνέπειες στους ανθρώπους, στα ζώα, στις κοινωνίες (καταστροφή τουρισμού, αγροτικής παραγωγής τηλεπικοινωνιών και κατά συνέπεια της οικονομίας), του κοινωνικού ιστού και του φυσικού περιβάλλοντος.

1.3. Διαχείριση ηφαιστειακού κινδύνου:

Ο κίνδυνος αποτελεί τμήμα της καθημερινότητας όλων των ανθρώπων, χωρίς όμως να δίνεται η ευκαιρία ολικής εξάλειψής του. Η λύση στο πρόβλημα αυτό είναι ο έλεγχος και η διαχείριση του κινδύνου, που ορίζεται η «ελαχιστοποίηση των απειλών για τη ζωή, την περιουσία και το περιβάλλον, με ταυτόχρονη μεγιστοποίηση των όποιων συσχετιζόμενων οφελών» (Λέκκας Ε. Λ., 1996). Μαζί με τη διαχείριση του κινδύνου έρχεται και η έννοια της εκτίμησης κινδύνου, η οποία αποτελεί μια αξιόπιστη ποσοτικοποίηση σε μια μορφή η

οποία θα βοηθάει και στη σωστή διαχείριση και αντιμετώπιση όλων των καταστροφών που υπάρχει η πιθανότητα να συνεπάγονται από τον επερχόμενο κίνδυνο.

Η ανάγκη των επιστημών για τη σωστή εκτίμηση και διαχείριση του κινδύνου έγκειται στο γεγονός ότι για τη ανάλυσή του χρειάζονται μαθηματικές θεωρίες και μοντέλα τα οποία θα είναι σε θέση να αναγνωρίζουν το συνδετικό κρίκο μεταξύ διαφορετικών τύπων δραστηριοτήτων που οδηγούν στην πιθανότητα του κινδύνου, μαζί με τις αντίθετες συνέπειες που θα έχουν ως αποτέλεσμα. Για τη σωστή εκτίμηση του κινδύνου, η μελέτη περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια (Λέκκας Ε. Λ., 1996): Αρχικά στην αναγνώριση των κινδύνων που είναι πιθανό να προκαλέσουν καταστροφές. Έπειτα ακολουθεί η εκτίμηση της πιθανότητας να υπάρξει κάποιο καταστροφικό γεγονός. Τέλος είναι η εκτίμηση των κοινωνικών συνεπειών που θα προκληθούν από τα καταστροφικά φαινόμενα.

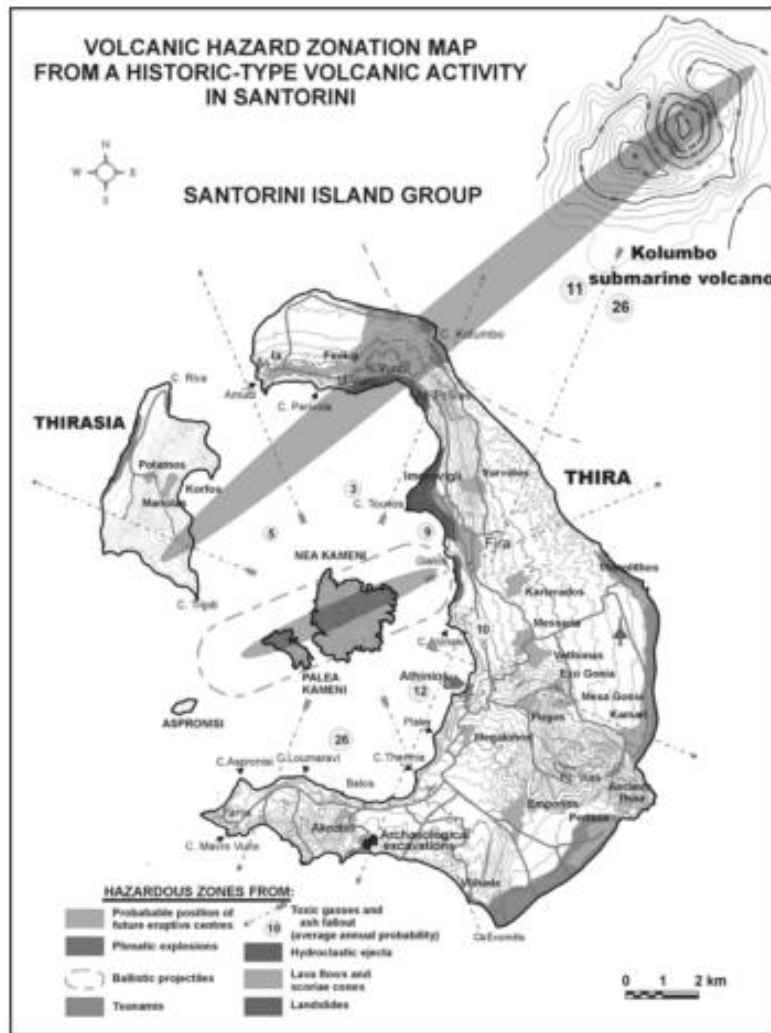
Οι παραπάνω διαδικασίες έχουν την εξής μορφή: Ο κίνδυνος (R) αποτελεί συνάρτηση της πιθανότητας (p) και της ζημιάς (L) που αυτός προκαλεί: $R=(p)(L)$.

Ο ηφαιστειακός κίνδυνος όταν συγκρίνεται με τους άλλους φυσικούς κινδύνους, εμφανίζει ορισμένες διαφορές. Πλέον, θέση των περισσότερων ενεργών (αλλά και μη) ηφαιστείων είναι γνωστή, γεγονός το οποίο επιτρέπει τη συνεχή μελέτη τους. Στην περίπτωση που η μελέτη της συμπεριφοράς ενός ηφαιστείου γίνει σωστά (μέγεθος έκρηξης, ταχύτητα και προσανατολισμός λάβας), μπορούν να προβλεφθούν με περισσότερη σιγουριά οι ηφαιστειακές εκρήξεις και οι συνέπειές τους, πάντα για το συγκεκριμένο ηφαίστειο που μελετάται. Αυτό, για παράδειγμα, έρχεται σε αντίθεση με άλλους φυσικούς κινδύνους, όπως είναι ο κίνδυνος λόγω μιας σεισμικής δόνησης (Paolo & Shroder, 2005). Επίσης, μια ακόμη διαφορά του ηφαιστειακού κινδύνου από τον κίνδυνο που προκαλείται από έναν σεισμό, είναι ότι η περίοδος μιας ηφαιστειακής δραστηριότητας μπορεί να διαρκέσει έως και μερικούς μήνες σε αντίθεση με έναν σεισμό ο οποίος διαρκεί ελάχιστα. Αυτό κατ' αντιστοιχία σημαίνει ότι η περίοδος έκτακτης ανάγκης σε μια ηφαιστειακή δραστηριότητα διαρκεί αρκετό χρονικό διάστημα. Ένα ποσοστό του παγκόσμιου πληθυσμού της τάξεως του 10% κατοικεί σχετικά κοντά ή μέσα σε περιοχές που έχουν ενεργά ηφαίστεια, 91 από αυτές είναι χαρακτηρισμένες ως περιοχές υψηλού ηφαιστειακού κινδύνου (Λέκκας & Ανδρεαδάκης, Εισαγωγή στη Θεωρία της Διαχείρισης Καταστροφών Και Κρίσεων, 2015). Γι' αυτό το λόγο είναι βασικό να μελετηθεί ο τρόπος μείωσης των απωλειών από τις ηφαιστειακές εκρήξεις.

Η πιο ορθή αρχή που μπορεί να γίνει, είναι ο συνδυασμός πρόβλεψης, ετοιμότητας και ελέγχου των χρήσεων γης. Καθώς η σχέση μεταξύ της διαχείρισης του ηφαιστειακού κινδύνου και της επισήμανσης των επικίνδυνων ζωνών είναι άμεση, γίνεται κατανοητό ότι η χαρτογράφηση ζωνών υψηλού κινδύνου κρίνεται απαραίτητη. Επίσης, η ασφάλιση και ο σχεδιασμός κοινωνικής ετοιμότητας και εκκένωσης αποτελούν βασικά μη - δομικά

μέτρα τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε ένα σχέδιο αντιμετώπισης της ηφαιστειακής δραστηριότητας.

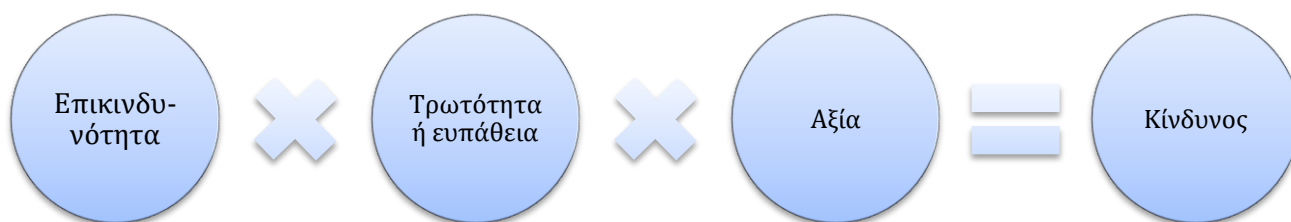
Όσον αφορά τη μελέτη των χρήσεων γης γύρω από ένα ηφαιστειακό κέντρο, κατ' αυτό τον τρόπο μπορεί να επιτευχθεί ελαχιστοποίηση των καταστροφικών συνεπειών περιορίζοντας την ανάπτυξη κοντά στις επικίνδυνες ζώνες και παράλληλα τη δημιουργία σχεδίων έκτακτης εκκένωσης. Για να πραγματοποιηθεί η ζωνοποίηση των χρήσεων γης και μετέπειτα η επιλογή των ασφαλών περιοχών, πρέπει να έχουν καθοριστεί περιοχές δυνητικού κινδύνου και να έχουν μελετηθεί μακροπρόθεσμες πιθανές ηφαιστειακές εκρήξεις. Η απεικόνιση των ζωνών υψηλού κινδύνου, καθώς και η πιθανή έκταση των ηφαιστειακών φαινομένων γίνεται μέσω χαρτών, οι οποίοι δημιουργούνται από συλλογή γεωλογικών στοιχείων και από στοιχεία του παρελθόντος. Κατά τη ζωνοποίηση μιας περιοχής και την απεικόνισή της σε χάρτη, μπορούν να απεικονιστούν και οι περιοχές οι οποίες κατά τη διάρκεια μιας ηφαιστειακής έκρηξης βρίσκονται σε άμεσο κίνδυνο. Οι Vougioukalakis & Fytikas (2005) δημιούργησαν έναν τέτοιο χάρτη (Χάρτης 1) για το νησιωτικό σύμπλεγμα της Σαντορίνης έχοντας υπόψη τους όχι μόνον τις συνέπειες από την ηφαιστειακή έκρηξη αυτή καθ' αυτή (τοξικά αέρια, ροές λάβας κ.οκ.) αλλά και από τα συναφή φαινόμενα όπως είναι ένα τσουνάμι και οι κατολισθήσεις.



Χάρτης 1: Χάρτης που απεικονίζει τη ζωνοποίηση των επικίνδυνων περιοχών στη Σαντορίνη κατά τη διάρκεια μιας ηφαιστειακής έκρηξης (Vougioukalakis & Fytikas, 2005)

Τέλος, σημαντικό ρόλο έχουν και οι επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες μιας περιοχής. Εάν μια ηφαιστειακή έκρηξη λάβει χώρα σε μια περιοχή στην οποία επικρατεί χιονοκάλυψη, τότε ο κίνδυνος και η έκταση των καταστροφών αυξάνονται. Αυτό συμβαίνει διότι ενδέχεται να πραγματοποιηθούν λασποροές και χιονοστιβάδες με μεγάλη ταχύτητα, ενώ η ένταση των ανέμων μπορεί να επηρεάσει την κατανομή της τέφρας.

Κομμάτι της διαχείρισης του ηφαιστειακού κινδύνου αποτελεί η εκτίμηση του κινδύνου μιας ηφαιστειακής δραστηριότητας. Ο Δείκτης Ηφαιστειακής Εκρηκτικότητας ΔΗΕ (ή αλλιώς Volcanic Explosivity Index VEI) δίνει το μέγεθος των ηφαιστειακών εκρήξεων και βασίζεται στο σύνολο των παραμέτρων που θα λάβουν χώρα κατά τη διάρκεια ηφαιστειακών εκρήξεων. Οι τιμές της κλίμακας αυξανόμενου κινδύνου κυμαίνονται από 0 έως 8.



Σχήμα 1: Προσδιορισμός ηφαιστειακού κινδύνου. Όπου επικινδυνότητα είναι η πιθανότητα ότι μια περιοχή μπορεί να επηρεαστεί από κάποιο καταστροφικό γεγονός σε συγκεκριμένο χρόνο και η αξία αποτελεί την οικονομική αξία των αγαθών μιας περιοχής που εκτίθενται σε κίνδυνο και ο αριθμός των επιζώντων (%). (Πηγή: (Κυριακόπουλος, 2015) ίδια επεξεργασία)

Η εκτίμηση, λοιπόν, του ηφαιστειακού κινδύνου αλλά και της επικινδυνότητας βασίζεται στη γνώση της συμπεριφοράς του ηφαιστείου που μελετάται, κατά το παρελθόν. Αυτό συμβαίνει καθότι οι επιστήμονες στηρίζονται στην παραδοχή ότι συμβάντα ίδιου τύπου πρόκειται να εκδηλωθούν και στο μέλλον, στις ίδιες περιοχές, με την ίδια μέση συχνότητα αλλά και με τον ίδιο τρόπο που είχαν εκδηλωθεί και στο παρελθόν .

Στην περίπτωση όπου μια περιοχή βρίσκεται σε έκτακτη ανάγκη λόγω έντονης ηφαιστειακής δραστηριότητας, όπως συνέβη τις χρονιές 2011 – 2012 στη Σαντορίνη, θα πρέπει να υπάρχει σχέδιο άμεσης απόκρισης. Ένα τέτοιο σχέδιο περιλαμβάνει τρεις φάσεις (Λέκκας & Ανδρεαδάκης, 2015):

1. Επαγρύπνηση
2. Ετοιμότητα
3. Εκκένωση

Κατά την επαγρύπνηση, πραγματοποιείται κινητοποίηση των υπηρεσιών κοινωνικής προστασίας, συνήθως 5 με 15 μέρες πριν από την εκδήλωση του συμβάντος. Κατά την ετοιμότητα, οι ευπαθείς ομάδες μεταφέρονται σε ασφαλή μέρη 2 με 5 μέρες πριν από το συμβάν και τέλος, κατά την εκκένωση, 1-2 μέρες πριν από την εκδήλωση του φαινομένου πραγματοποιείται γενική εκκένωση της περιοχής.

Ένα ακόμη πολύ βασικό κομμάτι της διαχείρισης των ηφαιστειακών εκρήξεων αποτελεί η ευαισθητοποίηση του κοινού (είτε κατοικούν σε μια περιοχή η οποία βρίσκεται εκτεθειμένη σε ηφαιστειακό κίνδυνο είτε όχι). Το πιο δυνατό σημείο της ευαισθητοποίησης είναι η επιμόρφωση μέσω σεμιναρίων, τοπικών συνεδρίων κτλ, τα οποία σε συνεργασία με ειδικούς σε θέματα καταστροφών ενημερώνουν το κοινό για τους κινδύνους που μπορούν να προκληθούν μετά από μια ηφαιστειακή έκρηξη.

Καθώς δεν υπάρχει σαφής σύνδεση στην ένταση μιας προηγούμενης ηφαιστειακής έκρηξης με μια έκρηξη που αναμένεται να γίνει, κρίνεται απαραίτητη η σωστή επικοινωνία ανάμεσα στους επιστήμονες και τους υπεύθυνους πολιτικής προστασίας. Στην έκτακτη περίπτωση μιας ηφαιστειακής έκρηξης θα πρέπει να παίρνονται γρήγορες αποφάσεις, καθώς τίθεται σε κίνδυνο η ανθρώπινη ζωή. Γίνεται φανερό λοιπόν ότι η πρόβλεψη, προετοιμασία και μείωση του ηφαιστειακού κινδύνου δεν είναι ένα κομμάτι που αφορά μόνον τους ηφαιστειολόγους. Μια λανθασμένη εκτίμηση κινδύνου (“false alarm”) μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες στην κοινωνία, καθώς μπορεί να δοθεί εντολή να κλείσουν τα σχολεία, τα αεροδρόμια ακόμη και να εκκενωθούν ολόκληρες πόλεις, γεγονός τα οποία έχουν κάποιο κόστος προς την κοινωνία.

Όσον αφορά την πρόβλεψη μιας ηφαιστειακής έκρηξης αλλά και το μέγεθός της, οι επιστήμονες βασίζονται στη στατιστική ανάλυση των προηγούμενων εκρήξεων, ωστόσο και πάλι, τίποτα δεν μπορεί να προβλεφθεί με απόλυτη σιγουριά (Paolo & Shroder, 2005). Επομένως, η αβεβαιότητα βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης ενός τέτοιου φαινομένου είναι και το κομμάτι της ηφαιστειολογίας που χρειάζεται παραπάνω εξέλιξη, καθώς από αυτή εξαρτώνται η πολιτική προστασία και ο σχεδιασμός μιας κοινωνίας.

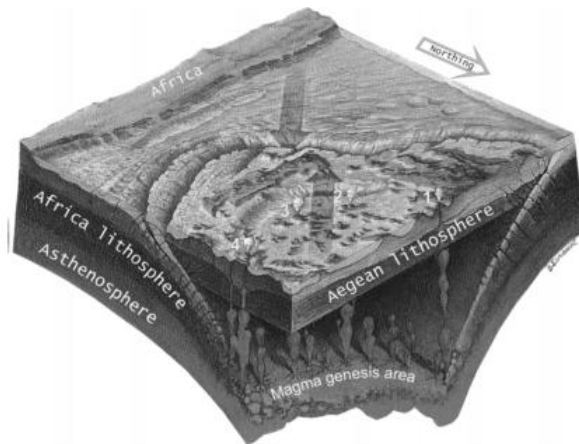
Ο ηφαιστειακός κίνδυνος, λοιπόν, είναι ένα φαινόμενο το οποίο δεν μπορεί να αποκλειστεί αλλά μπορεί να διαχειριστεί. Σαφέστατα, οι πιο υποβαθμισμένες κοινωνίες είναι περισσότερο επιρρεπείς στην καταστροφή, είτε λόγω της έλλειψης γνώσεων, είτε λόγω της έλλειψης σωστών υποδομών. Όμως, αυτό δεν σημαίνει ότι ακόμη και η πιο σύγχρονη και ανεπτυγμένη κοινωνία δεν κινδυνεύει. Πρέπει πάντοτε να γίνεται σωστός σχεδιασμός μέτρων και σωστή συνεργασία μεταξύ των φορέων.

Κεφάλαιο 2:

2.1 Το ηφαίστειο της Σαντορίνης:

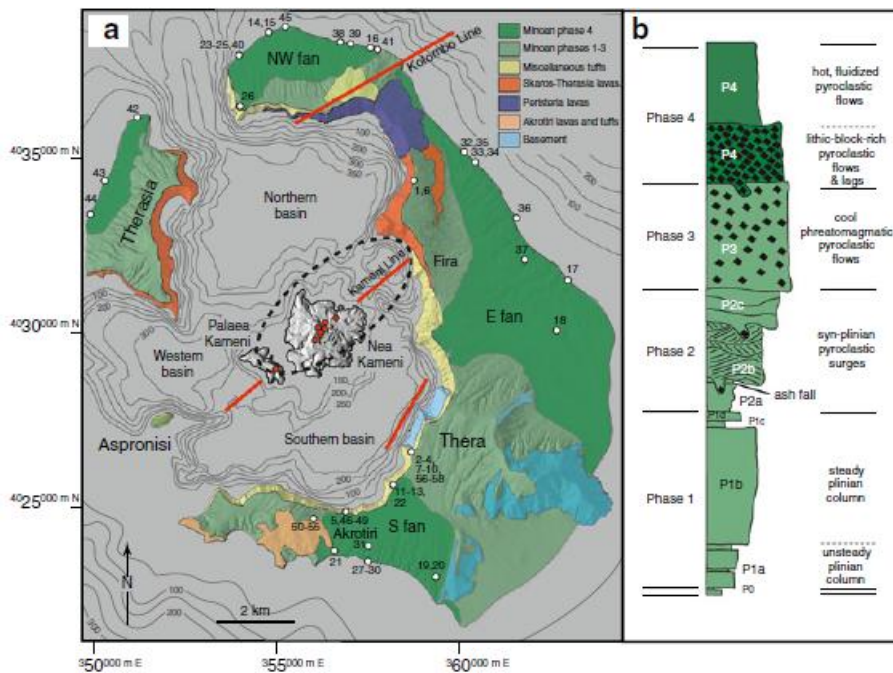
Το ηφαίστειο της Σαντορίνης αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά και γνωστά ηφαίστεια της Μεσογείου, καθώς οι εκρήξεις που προκαλούσε ήταν εκρήξεις μεγάλης κλίμακας. Για τα δεδομένα της Ελλάδας, αποτελεί το πιο ενεργό σημείο ηφαιστειακής δραστηριότητας, ενώ σε παγκόσμια κλίμακα έχει μια από τις πιο βίαιες καλδέρες (Vougioukalakis & Fytikas, 2005). Η ηφαιστειακή του δραστηριότητα οφείλεται στο γεγονός ότι η Αφρικανική πλάκα υποβυθίζεται κάτω από την Ευρωπαϊκή πλάκα του Αιγαίου (Εικόνα 6), ενώ η έντονη δραστηριότητα του νησιού καταγράφεται τα τελευταία 360.000 έτη. Μια από τις πιο σημαντικές εκρήξεις που επηρέασε τον πολιτισμό και άλλαξε την ιστορία της γεωλογίας, ήταν η Μινωική έκρηξη το 1610 π. Χ., περί τα τέλη της Εποχής του Χαλκού.

Η Σαντορίνη βρίσκεται στο νότιο Αιγαίο πέλαγος, 107 χιλιόμετρα βόρεια της Κρήτης και αποτελεί το νοτιότερο ηφαιστειακό κέντρο του Ελληνικού ηφαιστειακού τόξου. Το ηφαιστειακό σύμπλεγμα του νησιού εκτείνεται 20 χιλιόμετρα βορειοανατολικά, δημιουργώντας μια «γραμμή» από 20 ηφαιστειακούς κώνους (Sigurdsson, και συν., 2006), οι οποίοι φθάνουν σε ύψος από 18 έως και 450 μέτρα κάτω από τη θάλασσα. Το νησιωτικό σύμπλεγμα το αποτελούν η Θήρα, η Θηρασιά, το Ασπρονήσι, η Παλαιά Καμένη και η Νέα Καμένη. Τα τρία πρώτα τμήματα βρίσκονται γύρω από τη βυθισμένη καλδέρα, ενώ η Παλαιά και Νέα Καμένη είναι νησάκια τα οποία βρίσκονται στο σημείο που η καλδέρα βυθίστηκε. Οι αρχικές ονομασίες του νησιού ήταν «Στρογγύλη», λόγω του στρογγυλού σχήματος του νησιού, και «Καλλίστη», που σημαίνει η πιο ωραία από όλους. Η ονομασία του νησιού ως «Σαντορίνη» καθιερώθηκε τον 13^ο αιώνα από ένα μικρό παρεκκλήσι που βρισκόταν είτε στην Περίσσα είτε στη Θηρασιά (Druitt, Francalanci, & Fabbro, 2015).



Εικόνα 6: Απεικόνιση της γεωτεκτονικής δομής του Νότιου Αιγαίου (Vougioukalakis & Fytikas, 2005)

Υπολογίζεται ότι η ηφαιστειακή δραστηριότητα του νησιού ξεκίνησε περίπου 3 με 4 εκατομμύρια χρόνια πριν, ενώ κατά τα έτη 197 π. Χ. και 1950 μ. Χ. η συνεχής ηφαιστειακή δραστηριότητα έδωσε ζωή στην Παλαιά και Νέα Καμένη (Vougioukalakis & Fytikas, 2005). Έπειτα, κατά τις χρονολογίες 1649 – 1650 μ. Χ. εκροές δακτυλικής και ανδρειακής λάβας δημιούργησαν το υποθαλάσσιο ηφαίστειο Κολούμπο (Kolumbo), το οποίο φαίνεται να έχει ελλειψοειδές σχήμα (Χάρτης 2). Η θέση του υποθαλάσσιου ηφαιστείου είναι στα 7 χιλιόμετρα βορειοανατολικά της Σαντορίνης με 1,7 χιλιόμετρα διάμετρο κρατήρα, και φθάνει σε ύψος έως και τα 18 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας (Carey, Nomikou, Bell, & Ballard, 2013). Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό του κρατήρα του υποθαλάσσιου ηφαιστείου Κολούμπο, είναι πως έχει ένα ενεργό υδροθερμικό πεδίο με «καμινάδες» από θειικά άλατα και σουλφίδια (Druitt, Francalanci, & Fabbro, Field Guide to Santorini Volcano., 2015). Το 1650 μ. Χ. το ηφαίστειο αυτό εξερράγη, φέροντας καταστροφικές συνέπειες στο νησί της Σαντορίνης, προκαλώντας τσουνάμι και πολλούς θανάτους εξαιτίας των θανατηφόρων αερίων. Η έκρηξη αυτή δημιούργησε ένα εντυπωσιακό υποθαλάσσιο ανάγλυφο με στρωματοποιημένα ιζήματα ελαφρόπετρας, γεωχημική ανάλυση των οποίων φανέρωσε ότι κατά τη διάρκεια του φαινομένου παράχθηκαν αέρια πλούσια σε ρυόλιθο, με θερμοκρασίες που έφταναν έως και τους 750°C (Tassi, και συν., 2013). Πλέον, το κέντρο της σεισμικής δραστηριότητας επικεντρώνεται κυρίως κάτω από την επιφάνεια του Κολούμπο, ενώ εξαίρεση αποτελεί η περίοδος 2011 – 2012, όπου το σεισμικό επίκεντρο ήταν κάτω από τη Σαντορίνη.

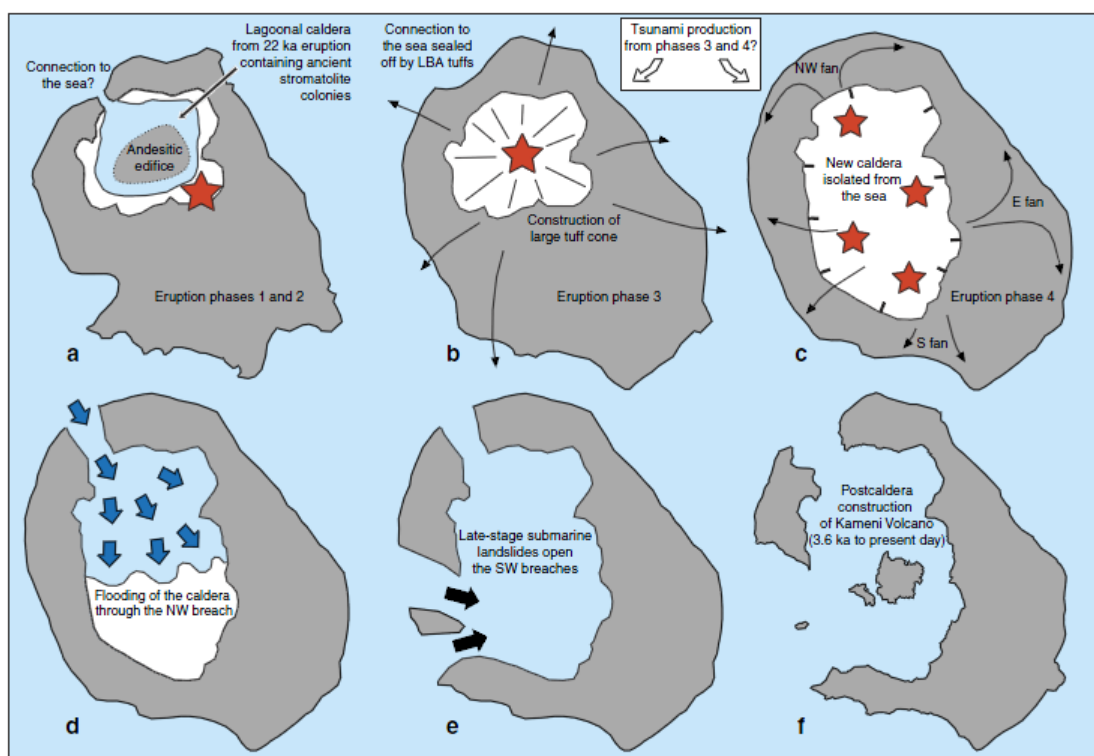


Χάρτης 2: (a) Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της Σαντορίνης. Με κόκκινη γραμμή απεικονίζονται τα ρήγματα. Με κόκκινες τελείες απεικονίζονται οι ιστορικοί αγωγοί των νησιών της Καμένης, ενώ με άσπρες τελείες είναι τα σημεία μέτρησης πυροκλαστικού υλικού. Το ημικύκλιο με τις μαύρες διακεκομμένες γραμμές είναι η ζώνη στην οποία μετρήθηκε η μεγαλύτερη σεισμική δραστηριότητα την περίοδο δραστηριότητας Ιανουάριος 2011 – Μάρτιος 2012. (b) Φάσεις της Μινωικής έκρηξης, με τις ερμηνείες τους (Druitt, *New insights into the initiation and venting of the Bronze-Age eruption of Santorini (Greece), from component analysis.*)

Η εξέλιξη της Σαντορίνης αποτελείται από έξι επιμέρους διεργασίες (Druitt, Francalanci, & Fabbro, *Field Guide to Santorini Volcano.*, 2015). Το πρώτο στάδιο ήταν η δημιουργία των πρώτων ηφαιστειακών κέντρων στην περιοχή Ακρωτήρι, ενώ το δεύτερο στάδιο αποτελεί στην ίδια περιοχή τη δημιουργία κώνου από θραύσματα λάβας. Το επόμενο στάδιο που ακολουθεί είναι η δημιουργία του ηφαιστείου Περιστερία, ενώ ως τέταρτο στάδιο αποτελούν η εμφάνιση προϊόντων της πρώτης ηφαιστειακής δραστηριότητας. Το πέμπτο στάδιο που ακολουθεί, έχει τη δεύτερη εκρηκτική δραστηριότητα και κατά συνέπεια τη δημιουργία του Σκάρου και της Θηρασιάς, ενώ στο τελευταίο στάδιο πραγματοποιείται η δημιουργία της Καμένης. Ο λόγος για τον οποίο η πρώτη και η δεύτερη εκρηκτική δραστηριότητα είναι άξιες σημασίας, είναι γιατί μετά από τις εκρήξεις ακολούθησε κατάρρευση καλδέρας.

Η έκρηξη του ηφαιστείου της Σαντορίνης την Ύστερη Εποχή του Χαλκού αποτελεί τη μεγαλύτερη έκρηξη κατά την περίοδο του Ολόκαινου, διαχέοντας 30-80 km³ πυροκλαστικού υλικού και προκαλώντας την κατάρρευση της καλδέρας. Η Νέα Καμένη δημιουργήθηκε από τις επαναλαμβανόμενες εκρήξεις του ηφαιστείου της Σαντορίνης. Τα, ως τώρα, δεδομένα για το τσουνάμι που θεωρείται ότι προκλήθηκε από τη Μινωική

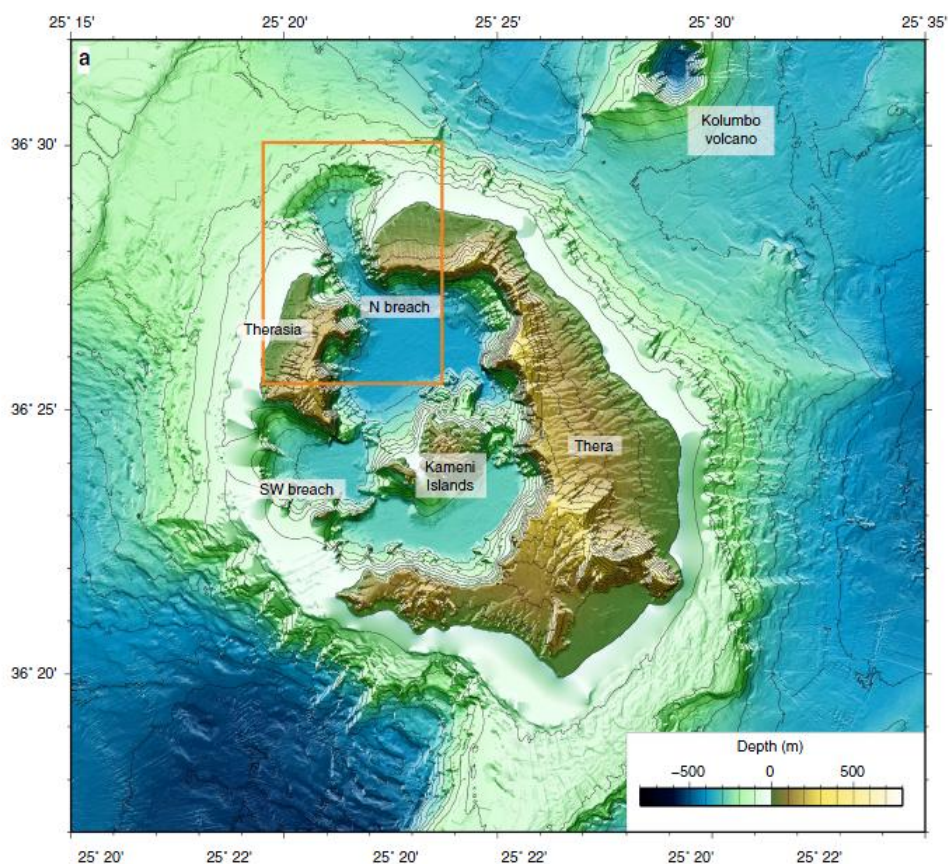
έκρηξη του ηφαιστείου της Σαντορίνης, τα αλλάζει μια νέα μελέτη που δημοσιεύθηκε το 2016 από την κυρία Νομικού Παρασκευή, και την ομάδα συνεργασίας της (Νομικού, και συν., 2016). Γενικά, η δημιουργία της καλδέρας των ηφαιστειών που βρίσκονται σε νησιά προκαλεί τσουνάμι, τα οποία είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα. Η επικρατέστερη άποψη για τη δημιουργία του παλιρροιακού κύματος της Μινωικής περιόδου ήταν η δημιουργία της καλδέρας από την έκρηξη του ηφαιστείου. Ωστόσο, η νέα αυτή μελέτη παραθέτει αποδείξεις από βαθυμετρικές και σεισμικές μελέτες οι οποίες δείχνουν ότι η καλδέρα δεν ήταν ανοιχτή κατά την κύρια φάση της έκρηξης, αλλά πλημμύρισε κατά τη λήξη της ηφαιστειακής δραστηριότητας και η κύρια αιτία της δημιουργίας του παλιρροϊκού κύματος ήταν η ροή των πυροκλαστικών υλικών στη θάλασσα, σε συνδυασμό με την κατάρρευση των υποθαλάσσιων πυροκλαστικών συσσωρεύσεων. (Νομικού, και συν., 2016). Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 7) απεικονίζεται η δημιουργία της καλδέρας της Σαντορίνης. Με την αρίθμηση (a) έως (c) εμφανίζεται η μορφή της Σαντορίνης όπως ήταν πριν την έκρηξη του ηφαιστείου αλλά και οι κύριες φάσεις της έκρηξης (Eruption Phase 1-4). Με την αρίθμηση (d) και (e) εμφανίζονται τα αποτελέσματα της μελέτης που αναφέρεται, όπου παρουσιάζεται το βορειοδυτικό νοτιοδυτικό άνοιγμα που δημιουργήθηκε μετά την έκρηξη του ηφαιστείου. Τέλος, με την αρίθμηση (f) απεικονίζεται η παρούσα μορφή του ηφαιστειακού συμπλέγματος της Σαντορίνης.



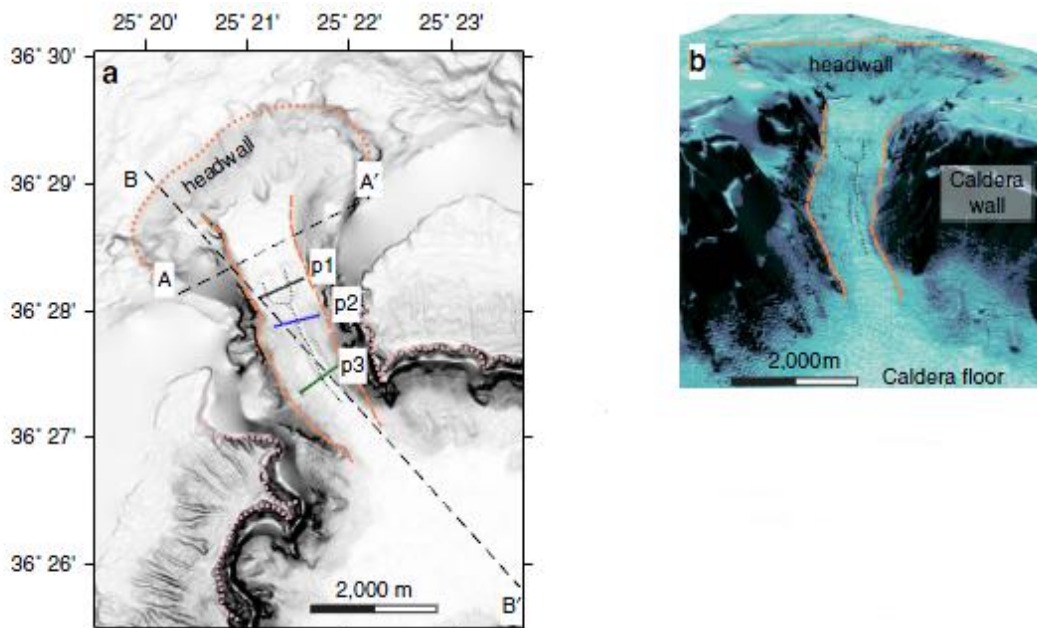
Εικόνα 7: Συνοπτική παρουσίαση της δημιουργίας της καλδέρας (Νομικού, και συν., 2016)

Για να δημιουργήθηκε το τσουνάμι από την κατάρρευση της καλδέρας προϋποθέτει η καλδέρα να είχε ήδη πλημμυρίσει και να είχε ήδη δημιουργηθεί η ένωσή της με την

ανοιχτή θάλασσα. Ωστόσο, τα νέα multi-beam και βαθυμετρικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν από τους Νομίκου et.al. φανερώνουν ότι αν και η περιοχή που είναι η Νέα Καμένη ήταν λιμνοθάλασσα, έπειτα απομονώθηκε από τη θάλασσα και αποξηράθηκε. Εν συνεχεία, η κατάρρευση της καλδέρας κατά την τέταρτη φάση έδωσε ένα νέο σχήμα με μεγαλύτερο βάθος και πλάτος. Σε συνδυασμό με το φαινόμενο αυτό, κατά την 3^η και 4^η φάση της έκρηξης του ηφαιστείου, τεράστιες ποσότητες πυροκλαστικού υλικού έρεαν στη θάλασσα προκαλώντας τα παλιρροϊκά κύματα. Όντως, μοντέλα που αναπαραγάγουν το συγκεκριμένο φαινόμενο του τσουνάμι, αποδεικνύουν ότι το ύψος του κύματος που έφτασε στην Κρήτη είναι αυτό που προκλήθηκε από τις ροές των πυροκλαστικών υλικών από την έκρηξη του ηφαιστείου της Σαντορίνης (Νομίκου, και συν., 2016), (Novikona, Papadopoulos, & McCoy, 2011), (Pareschi, Favalli, & Boshi, 2008). Στον παρακάτω χάρτη (Χάρτης 3) απεικονίζεται ο τοπογραφικός χάρτης που δημιουργήθηκε από δεδομένα ξηράς και θάλασσας και ακολουθεί μια πιο αναλυτική απεικόνιση της τοπογραφίας της περιοχής (Εικόνα 8).



Χάρτης 3: Τοπογραφικός χάρτης βασιζόμενος από δεδομένα ξηράς και θάλασσας (Νομίκου, και συν., 2016)

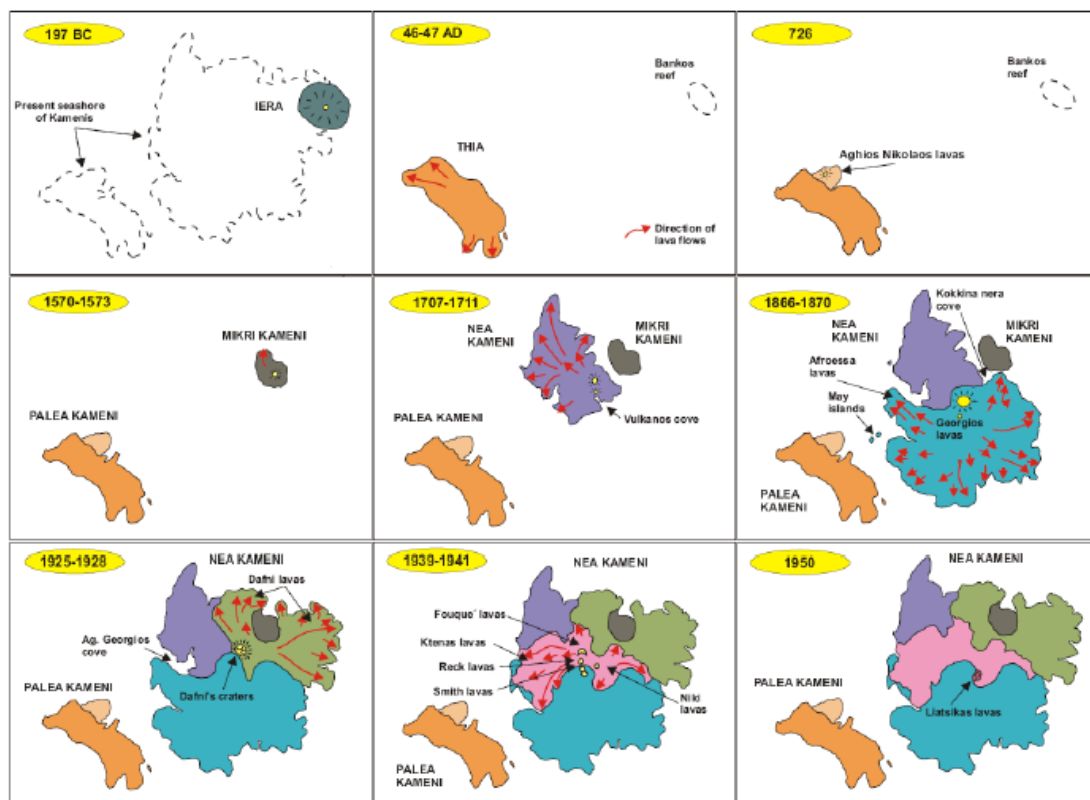


Εικόνα 8: (a) Σκιασμένο ανάγλυφο στην περιοχή της Νέας Καμένης, με την απεικόνιση των φάσεων 1-3 (p1, p2, p3). (b) Απεικόνιση εις βάθος, με τα σημεία του πυθμένα και του πλευρού της καλδέρας (Νομίκου, και συν., 2016)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η Μινωική έκρηξη (περίπου το 1613 π.Χ.) πραγματοποιήθηκε σε φάσεις. Η Φάση 0 αποτέλεσε μια προειδοποίηση για την επικείμενη μεγάλη έκρηξη, δημιουργώντας στρώματα από τα υλικά της έκρηξης σε πάχος περίπου 10 εκατοστών. Στη Φάση 1 τα προϊόντα της έκρηξης είχαν πάχος έως και 5.5 μέτρα, ενώ στη Φάση 3 τα προϊόντα αποτελούνται κυρίως από πυροκλαστικά υλικά. Τέλος, η Φάση 4 αποτελεί την τελική φάση της Μινωικής έκρηξης, με την έκχυση καυτής πυροκλαστικής λάβας στη θάλασσα (Druitt, Francalanci, & Fabbro, Field Guide to Santorini Volcano., 2015)

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα στο εσωτερικό της καλδέρας από την περίοδο της Μινωικής έκρηξης έως και σήμερα δημιούργησε την Παλαιά και τη Νέα Καμένη όπως έχουν τη σημερινή μορφή. Διάφορες εκρήξεις, ελευθέρωναν το ηφαιστειακό υλικό τους στη θάλασσα, με αποτέλεσμα οι ροές λάβας να συντελέσουν στη δημιουργία της Παλαιάς και Νέας Καμένης. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα ξεκινά το 197 π. Χ., με την καταγεγραμμένη, από τον Στράβων, ηφαιστειακή δραστηριότητα. Έπειτα, ακολουθεί η έκρηξη του 46-47 μ. Χ. που λέγεται ότι σχημάτισε την σημερινή Παλαιά Καμένη. Το 726 καταγράφηκε μια έκρηξη από έναν αγωγό δίπλα από τη Νέα Καμένη, τόσο ισχυρή που στάχτη έφτασε μέχρι και τη Μικρά Ασία. Το 1570-1573 η ηφαιστειακή δραστηριότητα της περιοχής σχημάτισε το νησί «Μικρή Καμένη», η οποία το 1707-1711 με τις δραστηριοποιήσεις, ξεκίνησε να διαμορφώνει τη Νέα Καμένη. Το 1650 καταγράφηκε μια εξαιρετικά ισχυρή έκρηξη, 7 χιλιόμετρα βορειοανατολικά του ακρωτηρίου Κολούμπο

της Σαντορίνης. Πιο συγκεκριμένα, Στις 27 Σεπτεμβρίου του 1650 καταγράφηκε έντονη σεισμική και εκρηκτική δραστηριότητα στην περιοχή του υποθαλάσσιου ηφαιστείου Κολούμπο. Αποτέλεσμα της σεισμικής δραστηριότητας ήταν η δημιουργία τσουνάμι στις 29 Σεπτεμβρίου του 1650, το οποίο προκάλεσε ζημιές σε ακτίνα 150 χιλιομέτρων. Έπειτα, ηφαιστειακή δραστηριότητα καταγράφηκε ήταν τις χρονολογίες 1866-1870 όπου την περίοδο αυτή πραγματοποιήθηκε ο τριπλασιασμός της Νέας Καμένης (Λέκκας Ε. , Φυσικές & Τεχνολογικές Καταστροφές, 2000), 1925-1928 όπου στη φάση αυτή πραγματοποιήθηκε η ένωση της Μικράς Καμένης με τη Νέα Καμένη, 1939-1941 όπου καταγράφηκαν 5 εκρήξεις στη Νέα Καμένη, και το 1950 όπου η ηφαιστειακή δραστηριότητα κράτησε από τις 10 Ιανουαρίου έως και τη 2^α Φεβρουαρίου (Druitt, Francalanci, & Fabbro, Field Guid to Santorini Volcano., 2015). Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 9) απεικονίζονται τα στάδια της δημιουργίας της Νέας Καμένης.

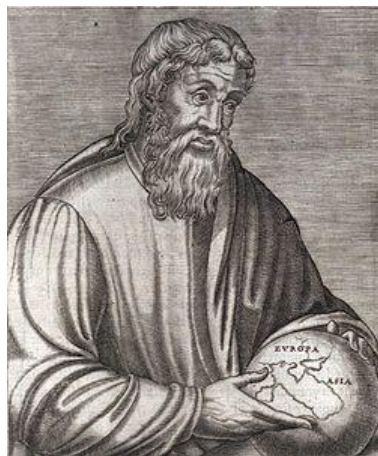


Εικόνα 9: Στάδια δημιουργίας Νέας Καμένης (Fytikas, Kolios, & Vougioukalakis, 1990)

Καθώς οι σεισμοί αποτελούν πρόδρομα φαινόμενα μιας ηφαιστειακής δραστηριότητας, ο σεισμός που έγινε στις 9 Ιουλίου του 1956 στην περιοχή της Σαντορίνης προκάλεσε αρκετές ανησυχίες. Ο σεισμός είχε περίπου 7.8 μέγεθος και γέννησε τσουνάμι το οποίο έφτασε έως την Αμοργό και την Αστυπάλαια.

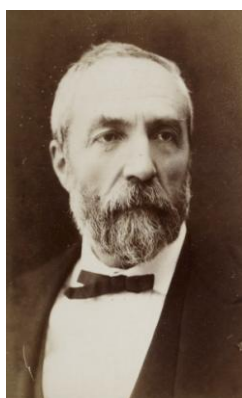
Ανά τα έτη, το νησιωτικό σύμπλεγμα της Σαντορίνης φιλοξένησε μεγάλα ονόματα επιστημόνων. Αρχικά, ο γεωγράφος Στράβων (Εικόνα 10), περιέγραψε μια από τις

ηφαιστειακές εκρήξεις του νησιού (το 197 π. Χ.) ως εξής: “... στα μισά του δρόμου μεταξύ της Θήρας και της Θηρασιάς, ξέσπασε φωτιά από τη θάλασσα και συνέχισε επί τέσσερις ημέρες, ώστε όλη η θάλασσα να βράζει και να φλέγεται, και οι φωτιές έχτισαν ένα νησί το οποίο σταδιακά υψωνόταν και αποτελούνταν από καιγόμενους σωρούς...” (Druitt, Francalanci, & Fabbro, 2015).



Εικόνα 10: Στράβων ο Γεωγράφος (Wikipedia, 2017)

Το 1879, ο Γάλλος Ferdinand Fouque (Εικόνα 11) ήταν ο πρώτος επιστήμονας ο οποίος μελέτησε γεωλογικά λεπτομερώς τη Σαντορίνη. Ξεχώρισε τρία στρώματα από ιζήματα κάτω από τα οποία ήταν θαμμένα κτίρια που υπήρχαν κατά την Εποχή του Χαλκού. Επίσης, ήταν ο πρώτος που υπέθεσε ότι κατά τη διάρκεια της Μινωικής καταστροφικής έκρηξης, το κέντρο του νησιού κατέρρευσε και βυθίστηκε στη θάλασσα.



Εικόνα 11: Ferdinand Fouque (Bibliothèque Nationale de France)

Μόλις το 1967, η θαμμένη από τη Μινωική έκρηξη πόλη, Ακρωτήρι, ανακαλύφθηκε από τον Έλληνα αρχαιολόγο Σπυρίδων Μαρινάτο (Εικόνα 12), ο οποίος στηρίχτηκε στις μελέτες του Ferdinand Fouque, με σκοπό τον ακριβή προσδιορισμό της θαμμένης πόλης.



Εικόνα 12: Καθηγητής Σπυρίδων Μαρινάτος στο Ακρωτήρι (gettyimages)

Όπως είναι γνωστό, η Σαντορίνη είναι ένας από τους πιο δημοφιλείς τουριστικούς προορισμούς της Ελλάδας και κάθε χρόνο φιλοξενεί αμέτρητο αριθμό τουριστών, οι οποίοι ενισχύουν την ελληνική οικονομία. Αυτός, λοιπόν, είναι ένας ακόμη βασικός παράγοντας για τον οποίο κρίνεται απαραίτητη η σωστή και όσο πιο δυνατόν ακριβής εκτίμηση της ηφαιστειακής επικινδυνότητας του νησιού.

2.1.1 Γεωθερμία Νέας Καμένης

Οι περιοχές με ενεργά ηφαιστειακά πεδία, είναι μέρη στα οποία στα πρανή των ηφαιστειών παρουσιάζονται εκλύσεις αερίων τα οποία είναι τοξικά προς την ανθρώπινη υγεία. Αλλαγές στις ποσότητες των αερίων, ενδεχομένως να οφείλονται σε μια επικείμενη επαναδραστηριοποίηση του ηφαιστείου επομένως κρίνεται απαραίτητη η μέτρηση των αερίων του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), υδροχλωρίου (HCl), υδροφθορίου (HF), διοξειδίου του θείου (SO_2), υδρόθειου (H_2S), καθώς επίσης και των τοξικών σουλφιδίων καρβονυλοσουλφίδιο (COS) και άνθρακα δισουλφίδιο (CS_2) καθώς επίσης και η αναλογία θείου με χλώριο (S/Cl).

Γενικά, τα ηφαίστεια εκτός από πεδία μελετών, αποτελούν τουριστικούς πόλους με μεγάλο ενδιαφέρον. Ένα βασικό μειονέκτημα του τουρισμού ο οποίος είναι βασισμένος στις επισκέψεις ενεργών ηφαιστειών είναι πως δεν έχει δοθεί η απαιτούμενη βάση στις επιπτώσεις που έχουν οι εκλύσεις των αερίων προς κάποιες ευπαθείς ομάδες. Αν και είναι ελάχιστες οι φορές που κάποιος άνθρωπος έχει χάσει τη ζωή του από το την εισπνοή των τοξικών αερίων, δεν πάει να αποτελεί μεγάλο κίνδυνο. Στις 21 Αυγούστου του 1986 περίπου 1700 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους και 850 τραυματίστηκαν εξαιτίας μεγάλης ποσότητας εκλύσεων αερίου διοξειδίου του άνθρακα στη Λίμνη Nyos στο Καμερούν (Baxter, Kapila, & Mfonfu, 1989).

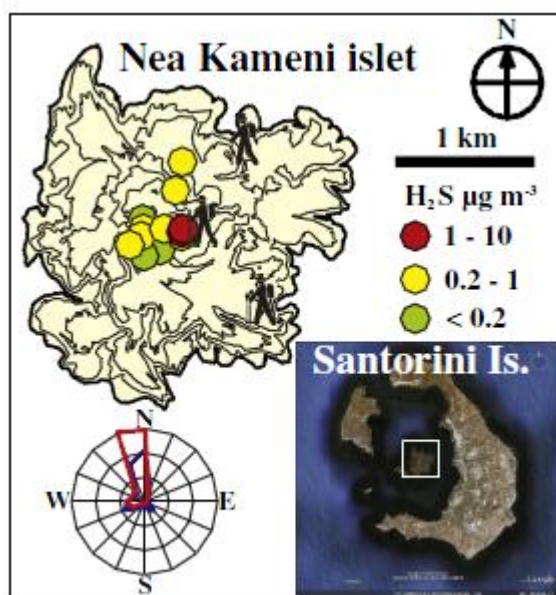
Ο τρόπος με τον οποίο οι ερευνητές μετράνε τη διασπορά των αερίων που εκλύονται από τα ηφαίστεια είναι με η τεχνική του παθητικού δειγματολήπτη (passive – sampler technique), ενώ με τους διάχυτους δειγματολήπτες (diffusive samplers) μετριέται η

συγκέντρωση του αερίου ανά ώρα. (Alessandro, et al., 2012). Τα δείγματα συλλέγονται ανάλογα τη μοριακή διασπορά του κάθε αερίου, μέσα σε έναν σωλήνα ο οποίος έχει παγιδευμένο έναν σταθερό όγκο αέρα.

Η μελέτη της γεωθερμίας της Νέας Καμένης απαιτείται ώστε να πραγματοποιηθεί συσχετισμός μεταξύ των σημείων από τα οποία υπάρχουν οι διαφυγές των αερίων, με τα σημεία όπου εμφανίζονται σταθερά υψηλές τιμές της θερμοκρασίας επιφάνειας. Τα καταγεγραμμένα σημεία εκπομπής αερίων για τη Νέα Καμένη βρέθηκαν μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης από μελέτες των Alessandro et.al. (2012), με δειγματοληψίες που πραγματοποιήθηκαν τον Σεπτέμβριο του 2008, και των Bagnato et.al. (2013) όπου οι δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν τέλη Μαρτίου του 2012. Και οι 2 μελέτες είναι πλέον δημοσιευμένες.

Στη Νέα Καμένη, τα σημεία από τα οποία εκλύονται οι φουμαρόλες είναι γύρω από την περιοχή της κορυφής του κρατήρα και από τις θερμές πηγές που βρίσκονται στις ανατολικές και δυτικές πλευρές της Νέας Καμένης, αλλά και ανατολικά της Παλαιάς Καμένης (Bagnato, και συν., 2013).

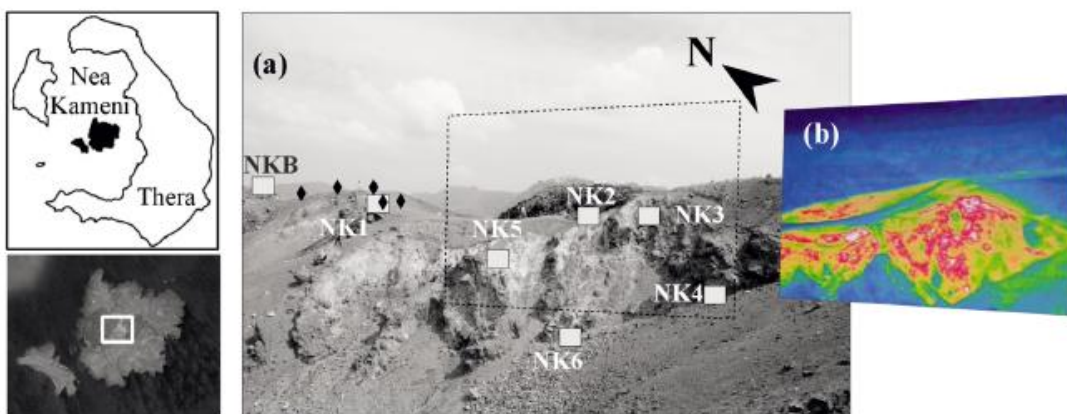
Στη μελέτη τους οι Alessandro et.al. με μετρήσεις που πραγματοποίησαν σε ύψος 2 μέτρων πάνω από την επιφάνεια της γης, (Εικόνα 13) αναφέρουν ότι τα βασικά αέρια που εκλύονται είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) στη μεγαλύτερη ποσότητα, έπειτα ακολουθεί το υδρογόνο (H_2) σε ένα ποσοστό 3% και το υδρόθειο (H_2S) το οποίο δεν ξεπερνά το ποσοστό του 0,01%.



Εικόνα 13: Στην παραπάνω εικόνα εμφανίζονται τα σημεία δειγματοληψίας του αερίου υδρόθειο από τη Νέα Καμένη. Στο διάγραμμα από κάτω, εμφανίζεται ο μέσος όρος από τους ετήσιους ανέμους με μπλε χρώμα, ενώ με κόκκινο είναι για τους μήνες του Ιουλίου και του Αυγούστου. Τα

δεδομένα για τους ανέμους είναι από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (Allesandro, και συν., 2012)

Είναι γνωστό από παλαιότερες μελέτες των Vougioukalaki & Fytika (2005) ότι οι τιμές των αερίων κυμαίνονταν από τους 60 °C έως και τους 97 °C, ωστόσο οι Bagnato et.al. μέτρησαν θερμοκρασίες από 60 °C έως 70 °C. Οι περιοχές στις οποίες πραγματοποιήθηκε η δειγματοληψία εμφανίζονται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα...) με τη μέθοδο MultiGAS. Η μέθοδος αυτή αναφέρεται και στις μελέτες που διεξήχθησαν το 2010 και 2011 από τους Aiurra et.al. Σύμφωνα, λοιπόν, με τα συγκεκριμένα papers, ο τρόπος δειγματοληψίας πραγματοποιείται με την εισαγωγή των αερίων σε ένα δοχείο μέσω αντλία αέρα, το οποίο στα εξαρτήματά του είχε ανιχνευτή αερίων για την αναλογία διοξειδίου του άνθρακα με το νερό (CO₂/H₂O) όπως επίσης και μια σειρά ηλεκτρομαγνητικών ανιχνευτών για το διοξείδιο του θείου (SO₂), του υδρόθειου (H₂S) και του υδρογόνου (H₂). Οι περιοχές από τις οποίες έγιναν οι δειγματοληψίες εμφανίζονται στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 14), η οποία εμφανίζει ένα ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Στην πρώτη εικόνα (Εικόνα a) είναι αριθμημένα τα σημεία από τα οποία έγιναν οι μετρήσεις. Τα NK1 έως και NK6 εμφανίζονται ως και τα ενεργά σημεία από τα οποία υπάρχει έκλυση αερίων, ενώ με τα NKB είναι τα σημεία από τα οποία δεν εμφανίζονται οι φουμαρόλες. Στην δεύτερη εικόνα που βρίσκεται στα δεξιά (Εικόνα b) παρουσιάζεται μια θερμική εικόνα η οποία απεικονίζει τη διαφοράς των θερμοκρασιών ανάλογα με την ύπαρξη έκλυσης αερίων. Η συγκεκριμένη φωτογραφία τραβήχτηκε από τον Dr. Delle Donne του Πανεπιστημίου της Φλωρεντίας.



Εικόνα 14: Σημεία δειγματοληψίας εκλύσεων αερίων και θερμογραφία Νέας Καμένης (Bagnato, και συν., 2013)

Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μελέτης επιβεβαίωσαν τη σαφή ύπαρξη ενεργού πεδίου εκλύσεων αερίων στη Νέα Καμένη, με τα κύρια αέρια να είναι τα H₂O, CO₂ και H₂, ελάχιστη ύπαρξη του H₂S, ενώ το αέριο SO₂ ήταν από ελάχιστο έως καθόλου. Οι θερμοκρασίες που καταγράφηκαν στις περιοχές από τις οποίες υπήρχαν οι φουμαρόλες

ήταν αρκετά υψηλές, όμως δεν ξεπερνούσαν τους 70°C. Η μεγάλη παρουσία του υδρογόνου στην περιοχή, έχει ως αποτέλεσμα τις πολύ υψηλές συγκεντρώσεις της θερμοκρασίας. Τέλος, οι περιοχές δειγματοληψίας NK1 και NK2 είναι οι πιο αντιπροσωπευτικές για τη γεωθερμία της περιοχής, καθώς έχουν πολύ υψηλό δείκτη έκλυσης και τη μεγαλύτερη ποσότητα εκλύσεων. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη μελέτη των Bagnato et.al..

Πίνακας 1: Απεικόνιση των θέσεων και της θερμοκρασίας της μοριακής μάζας των κυριότερων χημικών στοιχείων των αερίων από τις φουμαρόλες της Νέας Καμένης, σύμφωνα με τη μελέτη των Bagnato et.al.

Fumaroles	Temperature (°C)	CO ₂ /H ₂ S molar (mass)	H ₂ O/CO ₂ molar (mass)	H ₂ /H ₂ O molar (mass)
NK1	70	8853 (11457)	2.2 (0.9)	1.85 × 10 ⁻³ (2.06 × 10 ⁻⁴)
NK2	63	194 (251)	2.8 (1.1)	1.61 × 10 ⁻² (1.79 × 10 ⁻³)
NK3	60	5430 (7028)	3.4 (1.4)	2.04 × 10 ⁻³ (2.27 × 10 ⁻⁴)
NK4	61	5927 (7670)	1.8 (0.7)	3.08 × 10 ⁻³ (3.42 × 10 ⁻⁴)
NK5	57	8553 (11068)	1.2 (0.5)	4.11 × 10 ⁻³ (4.57 × 10 ⁻⁴)
NK6	77	9268 (11994)	1 (0.4)	4.11 × 10 ⁻³ (4.57 × 10 ⁻⁴)

Αυτό που παρατηρείται έντονα είναι οι υψηλές θερμοκρασίες κυρίως στις περιοχές NK1 και NK6, με θερμοκρασίες 70°C και 77°C αντίστοιχα όπου στα σημεία αυτά παρατηρούνται και οι μεγαλύτερες μοριακές μάζες των εκλυόμενων αερίων.

2.1.2 Θερμογραφία:

Οποιοδήποτε αντικείμενο, σώμα ή επιφάνεια έχει θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν ($0\text{ }^{\circ}\text{C} - 272.15\text{ K}$), εκπέμπει θερμική υπέρυθη ακτινοβολία, όπου η υπέρυθη ακτινοβολία αποτελεί μέρος της θερμικής. Επομένως, όσο υψηλότερη θερμοκρασία έχει ένα σώμα ή μια επιφάνεια, τόσο περισσότερη είναι και η θερμική ακτινοβολία που αυτό εκπέμπει. Ο άνθρωπος δεν μπορεί να διακρίνει με γυμνό μάτι την ποσότητα της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα σώμα/αντικείμενο/επιφάνεια και για να καταφέρει να δώσει λύση στο πρόβλημα αυτό χρησιμοποιεί τις υπέρυθρες κάμερες. Μέσω των υπέρυθρων καμερών ή υπέρυθρων αισθητήρων, ο χρήστης πλέον είναι σε θέση να αντιληφθεί την έννοια της θερμογραφίας, καθώς ο τρόπος απεικόνισής της είναι με χρωματική απόδοση όπου με μπλε χρώμα εμφανίζονται οι ψυχρές θερμοκρασίες ενώ με κόκκινο οι θερμές.

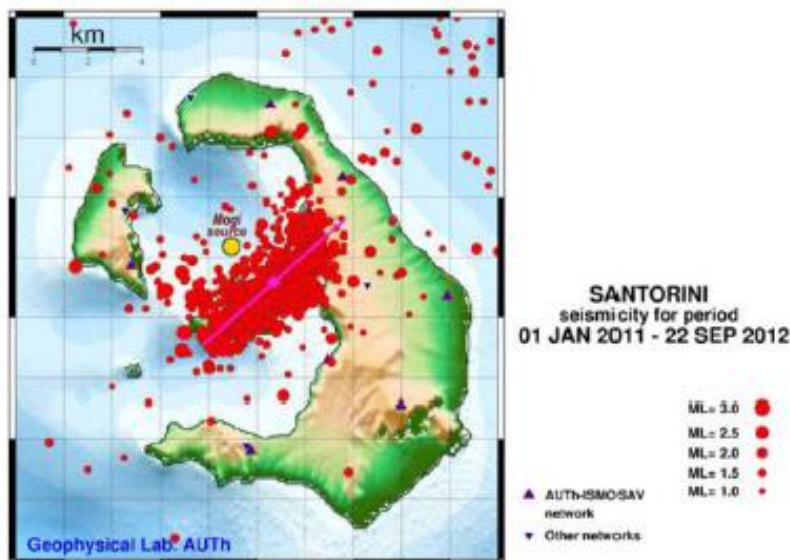
Αν προσπαθήσει κάποιος να δώσει έναν ορισμό στο τι είναι θερμογραφία, θα μπορούσε να πει ότι είναι η επιστήμη που αναλύει θερμικά δεδομένα τα οποία συλλέγονται με ειδικές θερμικές κάμερες οι οποίες μετράνε τη θερμική ακτινοβολία (InfraSpec Engineering, 2011). Λίγο πιο συγκεκριμένα, η υπέρυθη θερμογραφία ειδικεύεται στην ανίχνευση υπέρυθρης ακτινοβολίας η οποία εκπέμπεται από κάποιο αντικείμενο ή επιφάνεια και είναι ανάλογη της θερμοκρασίας που αυτό έχει, και έπειτα στην απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε θερμική εικόνα (ή χάρτη) (Global Minds, 2015).

Γενικά, η θερμογραφία έχει εφαρμογές και στην καθημερινότητα των ανθρώπων πλέον, καθώς χρησιμοποιείται στην ενεργειακή επιθεώρηση κτιρίων και σε διάφορες μηχανολογικές, ηλεκτρολογικές και υδραυλικές εφαρμογές. Οι λόγοι οι οποίοι οδήγησαν στην εξάπλωση της θερμογραφίας είναι αρκετοί, με τον βασικότερο να είναι ότι επιτρέπεται η μελέτη από απόσταση. Είτε με ειδικές θερμικές κάμερες είτε με αισθητήρες από δορυφόρους, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να μελετήσει τη θερμογραφία του επιθυμητού στόχου χωρίς να διατρέχει εκείνος κάποιον κίνδυνο. Επίσης, μέσω της παραγόμενης εικόνας μπορούν να παραχθούν θερμικά πρότυπα με σκοπό την περαιτέρω ανάλυση του στόχου που βρίσκεται υπό μελέτη. Τέλος, μια θερμική εικόνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε κινούμενο αλλά και σε σταθερό στόχο και σε πραγματικό χρόνο.

Στη συγκεκριμένη εργασία, μελετάται η θερμογραφία του νησιωτικού συμπλέγματος της Σαντορίνης μέσω δορυφορικών εικόνων και αποτελεσμάτων που προέρχονται από επίγειες μετρήσεις.

2.2 Ηφαιστειακή κρίση 2011-2012:

Μετά την έντονη δραστηριότητα του νησιού το 1950, το ηφαίστειο της Σαντορίνης πέρασε σε μια περίοδο ηρεμίας. Τα υδροθερμικά αέρια που προέρχονται από τις φουμαρόλες και τα hot springs ήταν οι μικρές ενδείξεις ότι το ηφαίστειο παραμένει ενεργό. Ωστόσο, τις χρονολογίες 2011 και 2012 η Σαντορίνη βίωσε μια περίοδο έντονης σεισμικής δραστηριότητας, τη μεγαλύτερη μετά το 1950, (Newman, και συν., 2012), με σεισμούς που έφταναν έως και 3.3 σε μέγεθος (Χάρτης 4). Τα βάθη στα οποία καταγράφηκε η σεισμική δραστηριότητα ήταν από 1 έως και 6 χιλιόμετρα (Rizzo, και συν., 2015). Πιο συγκεκριμένα, η περίοδος αυτή ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2011 και διήρκεσε μέχρι και τον Μάρτιο του 2012 (Druitt, Francalanci, & Fabbro, Field Guide to Santorini Volcano., 2015).

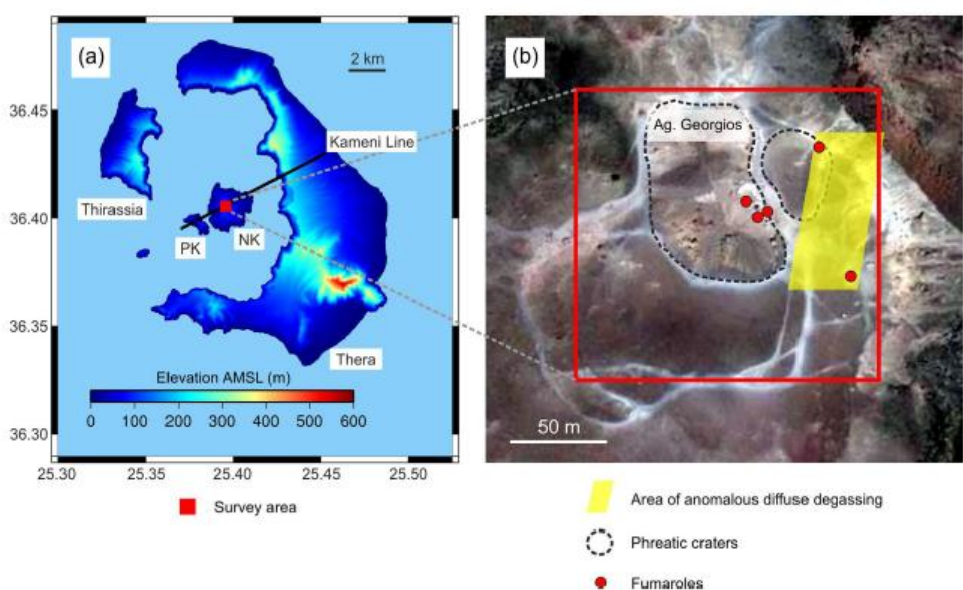


Χάρτης 4: Κατανομή σεισμικής δραστηριότητας κατά τη διάρκεια των αναταραχών (Tassi, και συν., 2013), δεδομένα από το Πανεπιστήμιο της Θεσσαλονίκης

Παράλληλα με τη σεισμική δραστηριότητα, παρατηρήθηκε και ακτινωτή παραμόρφωση του εδάφους, τα οποία φαινόμενα σταμάτησαν τον Φεβρουάριο του 2012 (Rizzo, και συν., 2015). Με βάση τις μελέτες των Parks et.al. (2012), η ποσότητα του μάγματος που βγήκε από το εσωτερικό της γης ήταν περίπου 10 με 20 εκατομμύρια m³.

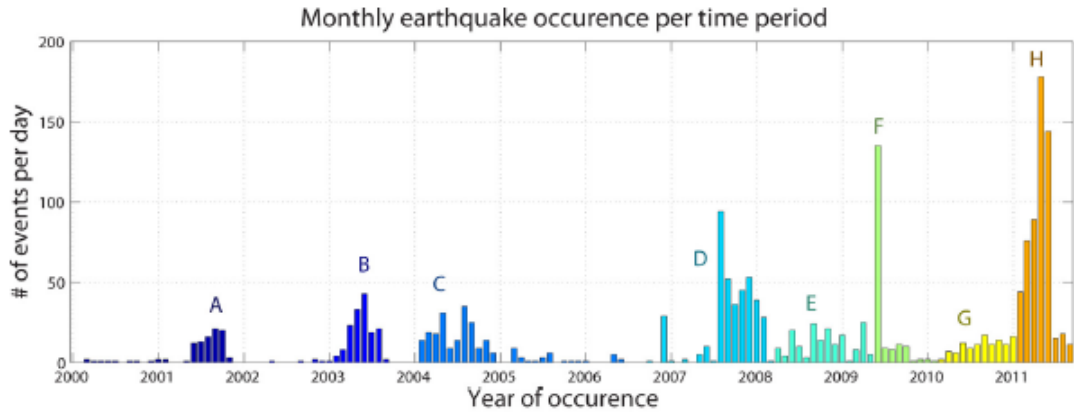
Το φαινόμενο έγινε ιδιαίτερα ενδιαφέρον, όταν μετρήσεις του διοξειδίου του άνθρακα που πραγματοποιήθηκαν εκείνη την περίοδο, έδειξαν μια αύξηση των μαγματικών αερίων όπως το H₂ καθώς επίσης ότι το CO₂ που εκλυόταν αποτελούσε μείγμα μαγματικού CO₂ σε συνδυασμό με το CO₂ το οποίο προερχόταν από το λιώσιμο των θερμο-μεταμορφικών ασβεστόλιθων (Parks, και συν., 2013). Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 15), εμφανίζονται οι περιοχές από τις οποίες παρατηρήθηκαν οι εκλύσεις των αερίων, όπου όπως θα διαπιστωθεί και στο κεφάλαιο των Αποτελεσμάτων, συμπίπτουν

με τις περιοχές στις οποίες την περίοδο αυτή η Νέα Καμένη εμφανίζει υψηλότερες θερμοκρασίες βάση των δορυφορικών εικόνων. Στην εικόνα (b) από το ζεύγος εικόνων, απεικονίζεται μέσω δορυφορικής εικόνας η Νέα Καμένη σε κόκκινο πλαίσιο, με διακεκομμένες μαύρες γραμμές εμφανίζονται τα όρια του κρατήρα, με κίτρινο πλαίσιο είναι οι περιοχές με τις έντονες εκλύσεις αερίων, ενώ με κόκκινες τελείες είναι οι περιοχές στις οποίες υπάρχουν οι φουμαρόλες από τις μελέτες των Tassi et.al. (2013). Μαζί με τις εκλύσεις αερίων, ορισμένες φορές υπήρξε και διαρροή ρευστών στοιχείων, ενώ για την αύξηση της έκλυσης των αερίων ενδεχομένως να οφείλεται η παρουσία του μάγματος.



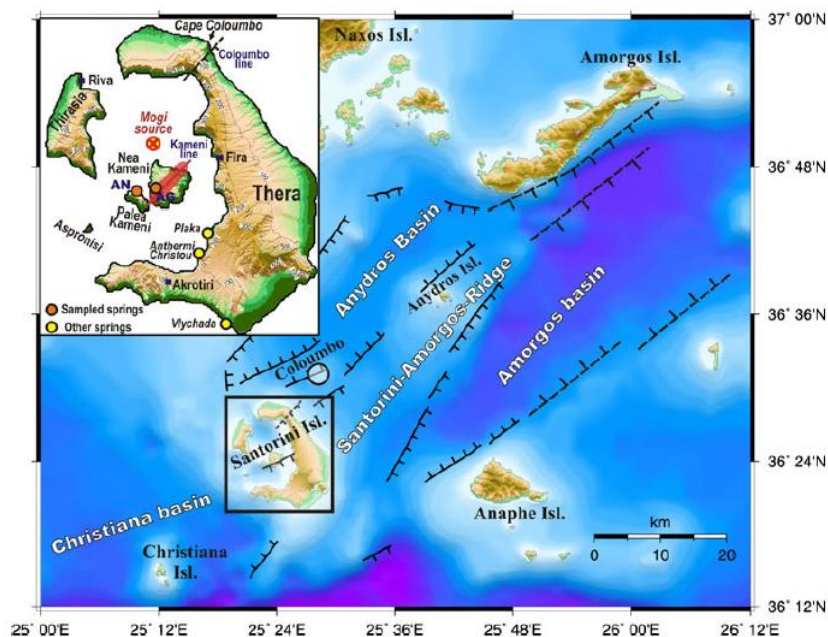
Εικόνα 15.: Στην εικόνα (a) απεικονίζεται η περιοχή μελέτης, ενώ στην εικόνα (b) απεικονίζεται η Νέα Καμένη μέσω δορυφορικής εικόνας (Parks, και συν., 2013)

Μελετώντας τη συγκεκριμένη περίοδο από σεισμολογική οπτική, η μελέτη των Paradimitriou et.al. (2014) είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα καθώς παρουσιάζει τη συνέχεια των σεισμικών δονήσεων έως και τον Μάρτιο του 2013. Το ηφαιστειακό σύμπλεγμα της Σαντορίνης εμφάνισε χαμηλής έντασης σεισμικότητα έως το 2010 στη λεκάνη Άνυδρο κοντά στο Κολούμπο με κορύφωση τους σεισμούς μεγέθους 5.1 και 5.2 στα Χριστιανά τον Ιανουάριο του 2012 (Paradimitriou, και συν., 2014). Στο διάγραμμα που ακολουθεί, απεικονίζονται οι μηνιαίες σεισμικές δονήσεις σε όλο το ηφαιστειακό σύμπλεγμα της Νέας Καμένης για τους μήνες Μάρτιο του 2000 έως και τον Αύγουστο του 2011 (Διάγραμμα 1).



Διάγραμμα 1: Μηνιαίες σεισμικές δονήσεις στο ηφαιστειακό σύμπλεγμα της Σαντορίνης (Paradimitriou, και συν., 2014)

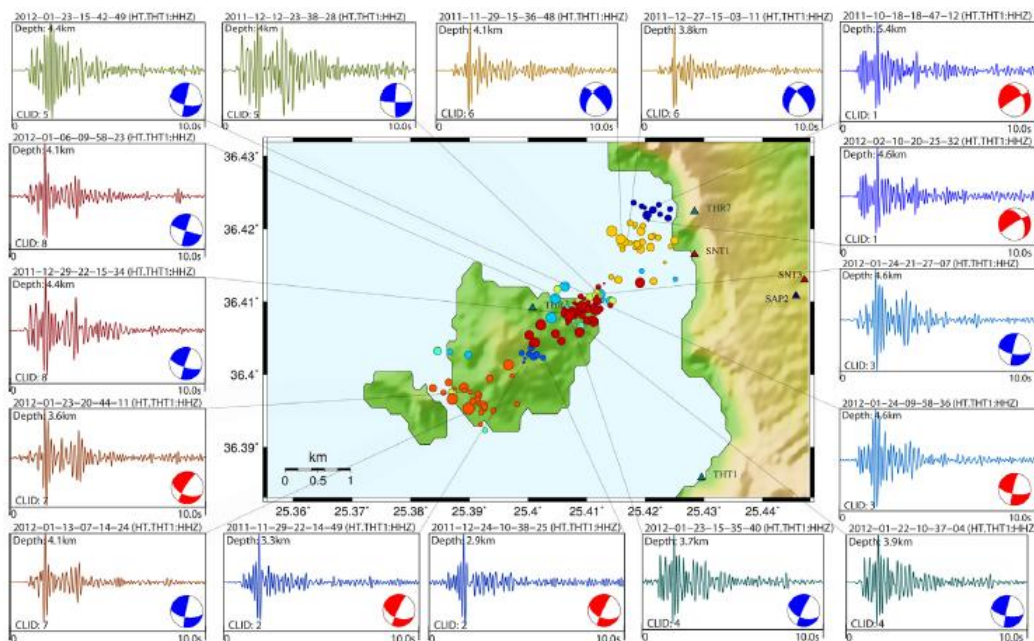
Όσον αφορά τη Καλδέρα της Σαντορίνης, η σεισμική δραστηριότητα ξεκίνησε να καταγράφεται τον Φεβρουάριο του 2011, με μικρά μεγέθη κυρίως (μικρότερα των 3.5) και μικρό εστιακό βάθος (<10 km). Το επίκεντρο χωροθετείται ανάμεσα στην Παλαιά και Νέα Καμένη αλλά και στο κεντρικό - δυτικό τμήμα της Σαντορίνης με τις καταγεγραμμένες, από τον Ιανουάριο του 2011, σεισμικές δονήσεις να ξεπερνάνε τις 1000. Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 16) εμφανίζεται το τεκτονικό καθεστώς που υπάρχει στην περιοχή της Σαντορίνης από το οποίο γίνονται κατανοητές οι θέσεις στις οποίες καταγράφηκαν οι σεισμικές δονήσεις. Συνοψίζοντας, είναι καταγεγραμμένο από μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν, ότι σχεδόν όλες οι εκρηκτικές ενέργειες της Σαντορίνης συνοδεύτηκαν από τεκτονικές δονήσεις οι οποίες ήταν όλες κοντά στην περιοχή του ηφαιστείου (Komlos, Hedervari, & Meszaros, 1978).



Εικόνα 16: Τεκτονικό καθεστώς της Σαντορίνης. Με τις συμπαγείς γραμμές εμφανίζονται τα ρήγματα τις περιοχής, ενώ με τις διακεκομμένες εμφανίζονται τα πιθανά ρήγματα. Στον χάρτη που εμφανίζεται πάνω αριστερά της εικόνας, απεικονίζονται επίσης όλο το νησιωτικό σύμπλεγμα της Σαντορίνης, καθώς και οι θερμές πηγές (Tassi, και συν., 2013)

Παράλληλα με τη σεισμική δραστηριότητα της περιοχής, υπήρξε και εδαφική παραμόρφωση, η οποία μετρήθηκε μέσω GPS το έτος 2011 (Newman, και συν., 2012). Οι μετρήσεις αυτές έρχονται σε απόλυτη ταύτιση με τα InSar δεδομένα, τα οποία σε συνδυασμό με τα σεισμικά δεδομένα, επιβεβαιώνουν ότι η περίοδος αναταραχών διήρκησε έως και τον Φεβρουάριο του 2012 (Tassi, και συν., 2013).

Στον παρακάτω χάρτη (Χάρτης 5) απεικονίζονται ομαδοποιημένοι οι μεγάλες σεισμικές δονήσεις αλλά και οι μικροσεισμοί στη Νέα Καμένη για την περίοδο 2011-2013 των Papadimitriou et.al. Με μπλε χρώμα εμφανίζονται οι κανονικές επιλύσεις ενώ με κόκκινο χρώμα είναι εμφανίζονται οι μέσοι όροι των πολλών μικροσεισμών. Στην εικόνα επίσης απεικονίζεται το εστιακό τους βάθος (Depth), η ημερομηνία και ώρα του συμβάντος και το είδος της τεκτονικής κίνησης που προκάλεσε τις σεισμικές δονήσεις.



Χάρτης 5: Απεικόνιση σεισμικής δραστηριότητας στη Νέα Καμένη την περίοδο αναταραχών 2011 – 2012 (Papadimitriou, και συν., 2014)

Ο λόγος για τον οποίο είναι σημαντικό να μελετάται η σεισμική δραστηριότητα μιας ηφαιστειογενούς περιοχής αλλά και η απομακρυσμένη ηφαιστειοτεκτονική δραστηριότητα είναι διότι αποτελούν πρόδρομα φαινόμενα ηφαιστειακής δραστηριότητας (Papadimitriou, και συν., 2014). Ωστόσο, συγκεκριμένα για την περίπτωση του ηφαιστείου της Σαντορίνης, η ηφαιστειακή έκρηξη δεν πραγματοποιήθηκε.

Κεφάλαιο 3: Τηλεπισκόπηση (Remote Sensing)

3.1 Ορισμοί και Γενικά στοιχεία:

Καθώς η επιστήμη εξελίσσεται και η ανάγκη για παρακολούθηση της Γης και των φυσικών καταστροφών ολοένα και αυξάνεται, η χρήση της τηλεπισκόπησης και των δορυφορικών εικόνων προς απόκτηση περιβαλλοντικών πληροφοριών γίνεται πλέον αναγκαία. Η «γένεση», λοιπόν, της τηλεπισκόπησης ως επιστήμη πραγματοποιήθηκε το 1826 καθώς τότε ξεκίνησε η επεξεργασία και μελέτη αεροφωτογραφιών. Η ανάγκη για εξέλιξη σημειώθηκε τη δεκαετία 1960, κατά τη διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου, καθώς οι τότε υπερδυνάμεις (Ε.Σ.Σ.Δ. και Η.Π.Α.) έψαχναν νέους τρόπους κατασκοπείας (Μήτση, 2017). Πλέον, οι σύγχρονες τεχνικές τηλεπισκόπησης αποτελούν το μοναδικό μέσο για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος σε παγκόσμιο αλλά και σε τοπικό επίπεδο με κύριο τομέα απασχόλησης αυτόν των γεω - επιστημών. Χαρακτηριστικά, κάποιες από τις χρήσεις της τηλεπισκόπησης είναι η μέτρηση της θερμοκρασίας αντικειμένων/οντοτήτων (Rizzo, et al., 2015) στην επιφάνεια της Γης, η παρακολούθηση για την καλλιέργεια της Γης, την παρατήρηση της γήινης και της θαλάσσιας επιφάνειας, της ηφαιστειακής δραστηριότητας αλλά και της κλιματικής αλλαγής (Αντωνίου & Παπασπυρόπουλος, 2017).

Μελετώντας τη βιβλιογραφία παρατηρείται ότι έχουν δοθεί διάφοροι ορισμοί για τη συγκεκριμένη επιστήμη, ανάλογα με τη χρησιμότητα που έβρισκε ο κάθε επιστήμονας. Ξεκινώντας την προσπάθεια ερμηνεύσης, ο Gurta (1991) δίνει έναν απλό ορισμό λέγοντας ότι η τηλεπισκόπηση είναι η επιστήμη για την «απόκτηση πληροφοριών για ένα αντικείμενο χωρίς να υπάρχει άμεση επαφή με αυτό». Προχωρώντας τις μελέτες του, τόνισε πως υπάρχει διπλή διάσταση στην τηλεπισκόπηση καθώς υπάρχουν δύο παράμετροι οι οποίες έχουν άμεση σχέση:

- Την τεχνική απόκτησης δεδομένων για ένα αντικείμενο, μέσω ενός μέσου που βρίσκεται σε απόσταση από το αντικείμενο μελέτης, και
- Την ανάλυση των δεδομένων με στόχο την ερμηνεία του αντικειμένου.

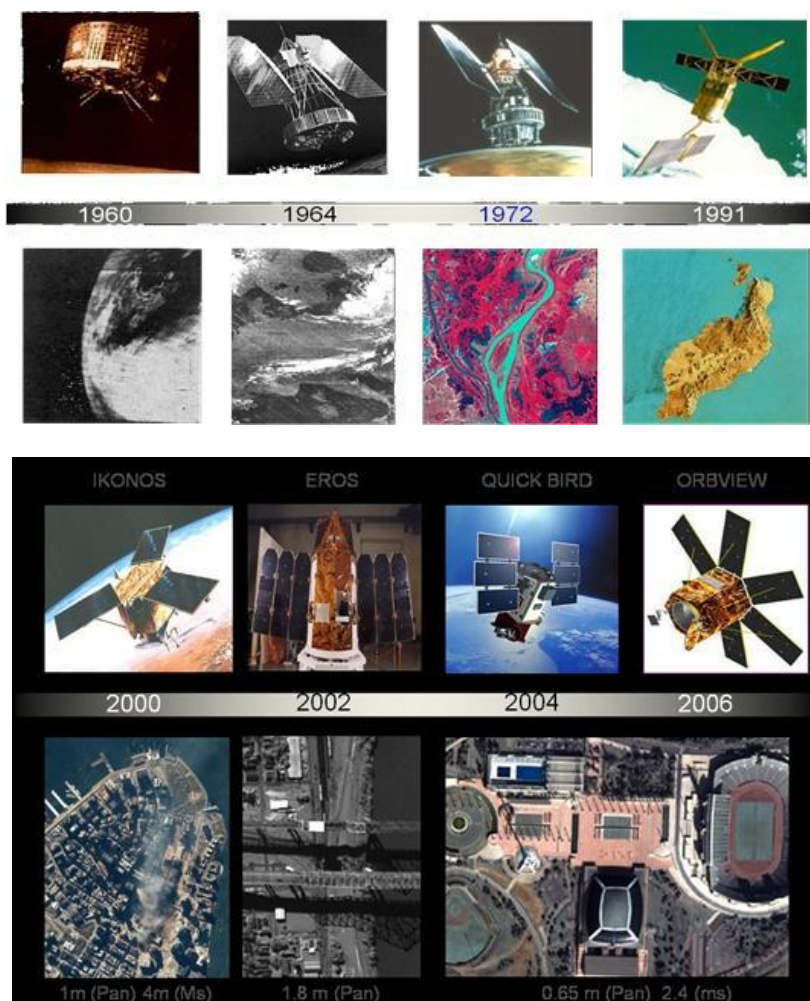
Το 1999 έρχεται ένας νέος ορισμός από τον Mather, ο οποίος λέει πως «η τηλεπισκόπηση του περιβάλλοντος περιλαμβάνει τη μέτρηση και αποτύπωση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που ανακλάται ή εκπέμπεται από την επιφάνεια της Γης και την ατμόσφαιρα. Η μέτρηση και αποτύπωση γίνεται από ένα σημείο πάνω από την επιφάνεια της Γης και ακολουθεί ο συσχετισμός αυτών των μετρήσεων με τη φύση και την κατανομή των υλικών της επιφάνειας της Γης και των συνθηκών της ατμόσφαιρας».

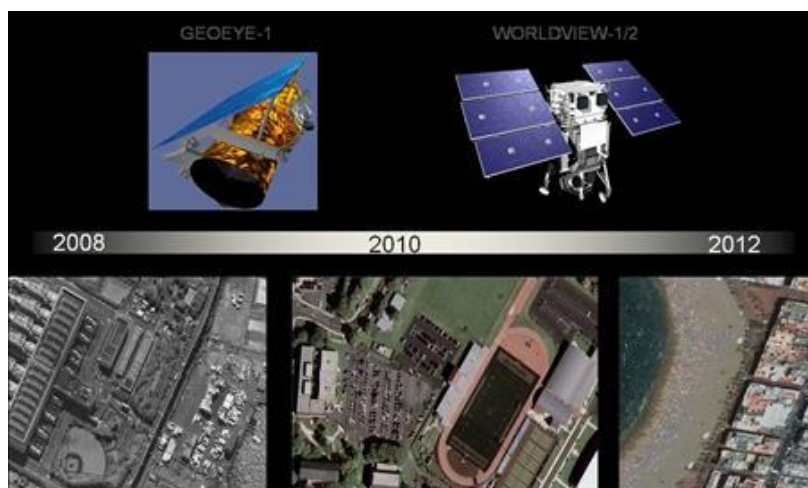
Οι Avery & Berlin (1992) όρισαν την τηλεπισκόπηση ως την αναγνώριση ενός αντικειμένου από απόσταση, καθώς την μελέτησαν ως την τεχνική απόκτησης

πληροφοριών για διάφορα αντικείμενα που βρίσκονται στη γήινη επιφάνεια, μέσα από την ανάλυση δεδομένων που συλλέγονται από ειδικά όργανα τα οποία δεν έχουν φυσική επαφή με τα αντικείμενα.

Μια προσέγγιση των Lillesand, Kiefer & Chirpman (2003) είναι πως η τηλεπισκόπηση είναι μια τέχνη του να επιτυγχάνεται η πληροφόρηση για ένα αντικείμενο, περιοχή ή φαινόμενο από την ανάλυση δεδομένων που αποκτήθηκαν από ένα μέσο το οποίο δεν βρίσκεται σε επαφή με το αντικείμενο, περιοχή ή φαινόμενο που μελετάται.

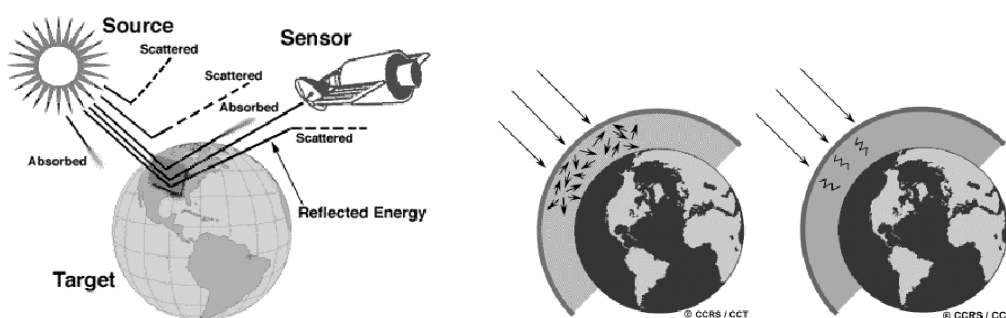
Συνοψίζοντας, η τηλεπισκόπηση αποτελεί βασικό στοιχείο της Γεωπληροφορικής καθώς βοηθάει στη μέτρηση και χαρτογράφηση της επιφάνειας της Γης καθώς μπορεί να προσφέρει ποσοτικές αλλά και ποιοτικές πληροφορίες (Παρχαρίδης, 2015). Τα δεδομένα που λαμβάνει κάποιος από τη χρήση της τηλεπισκόπησης είναι ψηφιακές δορυφορικές εικόνες και αεροφωτογραφίες, τα οποία αποκτώνται μέσω αισθητήρων που βρίσκονται σε αεροσκάφη, δορυφόρους, διαστημικά λεωφορεία κτλ (Εικόνα 17).





Εικόνα 17: Εξέλιξη δορυφορικής απεικόνισης (Παρχαρίδης, 2015)

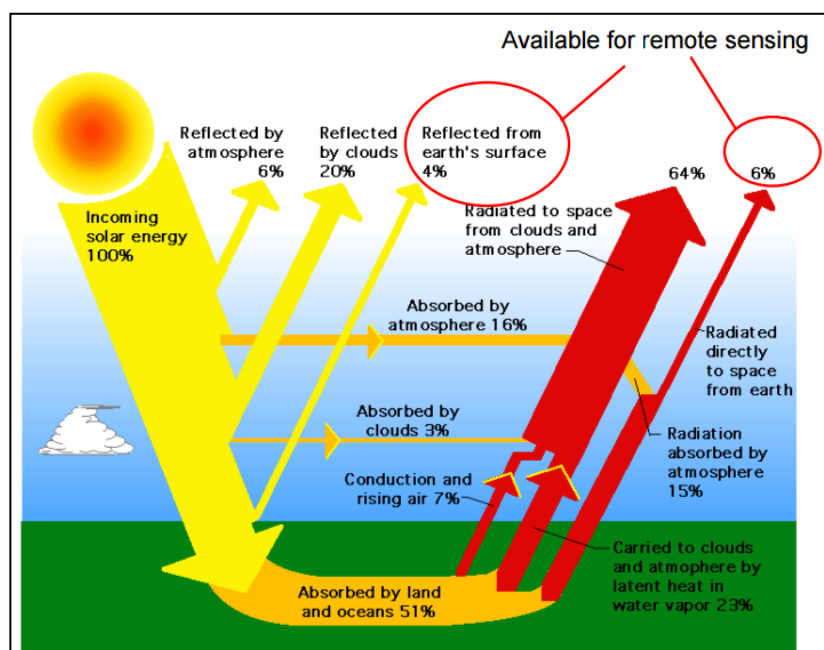
Δίνοντας λοιπόν έναν περιεκτικό ορισμό ο οποίος συνοψίζει όλους τους παραπάνω, θα μπορούσε κανείς να έλεγε ότι η τηλεπισκόπηση είναι η επιστήμη της λήψης, επεξεργασίας και ερμηνείας της εικόνας που καταγράφει την αλληλεπίδραση μεταξύ της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και ύλης. Λέγοντας αλληλεπίδραση εννοείται η μετάδοση, απορρόφηση, εκπομπή, σκέδαση και ανάκλαση της ακτινοβολίας (Εικόνα 18). Οι αισθητήρες ανιχνεύουν δύο ειδών ακτινοβολία, την ανακλώμενη και την εκπεμπόμενη. Η διαφορά τους είναι πως η ανακλώμενη ακτινοβολία πηγάζει από τον ήλιο και ο αισθητήρας θα μετρήσει το μέρος της ακτινοβολίας που έχει ανακλαστεί από τη Γη, ενώ η εκπεμπόμενη ακτινοβολία είναι εκείνη που η πηγή της βρίσκεται στην επιφάνεια της Γης (όπως είναι η θερμική ακτινοβολία ή όταν η πηγή εκπέμπει φως) (Αντωνίου & Παπασπυρόπουλος, 2017).



Εικόνα 18: Μορφές αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας που προέρχεται από την «πηγή» (source), δηλαδή τον ήλιο, η οποία όταν έρχεται σε επαφή με την ατμόσφαιρα απορροφάται (absorbed), ανακλάται (reflected) και διαχέεται (scattered) (Παρχαρίδης, 2015)

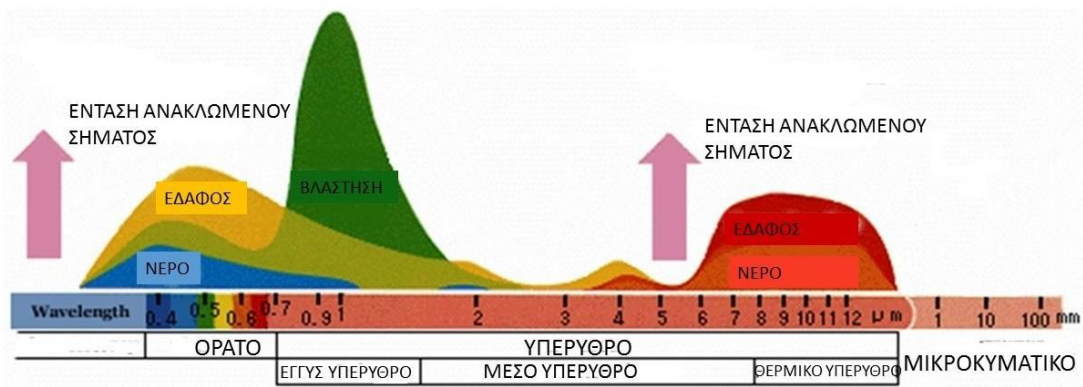
Εφόσον, λοιπόν, υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ ακτινοβολίας και ύλης, είναι κατανοητό πως η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που λαμβάνει πίσω ο δορυφόρος δεν αποτελεί το 100% της εκπεμπόμενης από τον ήλιο ακτινοβολίας. Αυτό συμβαίνει διότι τόσο τα

φυσικά χαρακτηριστικά όσο και η σύσταση του κάθε αντικειμένου επηρεάζουν, το καθένα με διαφορετικό τρόπο, το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται στα διάφορα μήκη κύματος (Παρχαρίδης, 2015) (Εικόνα 19).

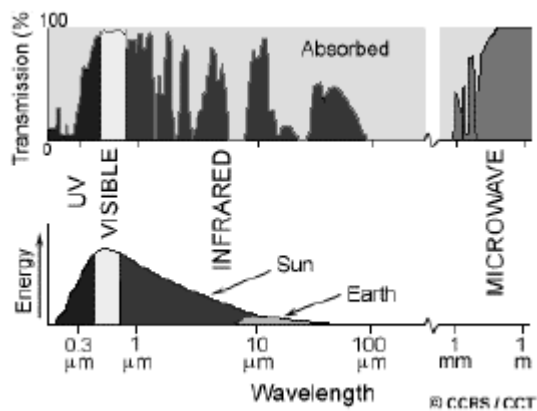


Εικόνα 19: Ισοζύγιο ακτινοβολίας της Γης με την ατμόσφαιρα (Πηγή: www.nasa.gov)

Ένα μέσο αναγνώρισης ενός αντικειμένου που βρίσκεται στη Γη από τους αισθητήρες του δορυφόρου αποτελεί η φασματική ταυτότητα (spectral signature) ή η φασματική απόκριση (spectral response), όπου είναι η ποσότητα αλλά και η φασματική κατανομή της ανακλώμενης και εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από ένα αντικείμενο (Mather, 1999) (Εικόνες 20 & 21). Στα στοιχεία αλληλεπίδρασης, όμως, που αναφέρθηκαν παραπάνω (απορρόφηση, ανάκλαση, διάχυση), προστίθεται ένας ακόμη παράγοντας ο οποίος επιδρά στην ποιότητα του φάσματος. Αυτός ο παράγοντας είναι η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία εξαρτάται από το ύψος του Ήλιου (Παρχαρίδης, 2015). Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι βασικά στοιχεία στη διαδικασία της τηλεπισκόπησης, καθώς υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι συστημάτων τηλεανίχνευσης: τα παθητικά συστήματα τηλεπισκόπησης, τα οποία μετρούν τη φυσική διαθέσιμη ενέργεια, και τα ενεργά συστήματα, τα οποία παρέχουν ενέργεια.



Εικόνα 20: Τυπικές καμπύλες φασματικής απόκρισης για διάφορα υλικά της γήινης επιφάνειας (Πηγή: CCRS)



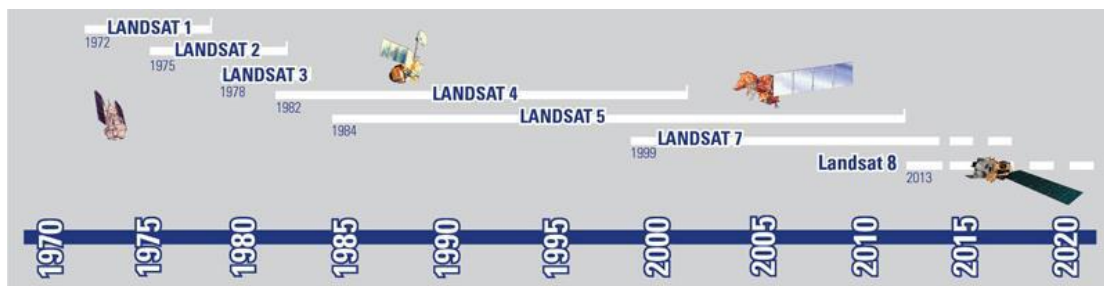
Εικόνα 21: Κύριες φασματικές περιοχές που χρησιμοποιεί η τηλεπισκόπηση (Πηγή: CCRS)

Ο συντελεστής ανάκλασης (ή αλλιώς φασματική ανάκλαση, ή albedo) αποτελεί την ποσοτική έκφραση της ανάκλασης διαφορετικών αντικειμένων στην επιφάνεια της Γης. Εκφράζει, δηλαδή, το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που ανακλάται από τα αντικείμενα, άρα ο τρόπος με τον οποίο εμφανίζονται τα αντικείμενα στο διάστημα επηρεάζεται από το albedo. Πιο συγκεκριμένα, όπου παρουσιάζονται φωτεινά στοιχεία είναι κυρίως τα σύννεφα ενώ σκοτεινά σημεία αποτελούν οι υδάτινες μάζες. Επίσης το albedo συντελεί στην ερμηνεία της θερμοκρασίας ενός αντικειμένου κατά την έκθεσή του στον ήλιο.

Στο τελικό στάδιο της διαδικασίας, το αποτέλεσμα που λαμβάνει ο μελετητής από έναν δορυφόρο είναι, κυρίως, μια δορυφορική εικόνα η οποία αποτελεί την αντικειμενική καταγραφή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Τα χαρακτηριστικά των δορυφορικών εικόνων είναι πως αποτελούνται από δισδιάστατο πίνακα τιμών, έχουν συντεταγμένες, το εύρος των τιμών τους εξαρτάται από τη ραδιομετρική διακριτική ικανότητα, έχουν 2 διαστάσεις, στην περίπτωση που είναι πολυφασματικές (διαθέτουν δηλαδή πολλά κανάλια) αποτελούνται από σύνολο δισδιάστατων πινάκων και τέλος, έχουν n διαστάσεις γνωρισμάτων, όπου n είναι ο αριθμός των καναλιών.

3.2. Το σύστημα Landsat:

Στην οικογένεια των δορυφόρων Landsat ανήκουν ο δορυφόροι Landsat 1, 2, 3, 4, 5, 6 (ο οποίος καταστράφηκε κατά την εκτόξευση), 7 & 8 (δεδομένα έως και το έτος 2018). Ο Landsat 2, όπου είχε την αρχική ονομασία ως ERTS-2, εκτοξεύθηκε τον Ιανουάριο του 1975, ενώ αναδρομικά, ο ERTS-1 ονομάστηκε Landsat 1. Ο Landsat 3 τέθηκε σε τροχιά το 1978 και ο Landsat 4 το 1982. Η λειτουργία των Landsat 2 και 3 διήρκεσε έως το 1986, καθώς μηχανικά προβλήματα ανάγκασαν τους ερευνητές να τους κατεβάσουν πίσω στη Γη. Ο Landsat 5 εκτοξεύθηκε το 1984, ο Landsat 7 το 1999 και ο Landsat 8 το 2013 (Εικόνα 22).



Εικόνα 22: Παρουσίαση δορυφόρων LANDSAT με βάση τη χρονολογία τους και τη διάρκεια λειτουργίας τους (www.landsat.usgs.gov)

3.3: Landsat 5, Landsat 7 & Landsat 8:

- Landsat 5:

Όσον αφορά τον δορυφόρο Landsat 5, έχει ενσωματωμένο έναν πολυφασματικό γραμμικό σαρωτή MSS (Multispectral Scanner), η δουλειά του οποίου είναι να σαρώνει την επιφάνεια που βρίσκεται κάτω από το δορυφόρο και να παράγει μια εικόνα της γήινης επιφάνειας, με χωρική ανάλυση τα 80 μέτρα. Μαζί με τον MSS έχει και έναν θεματικό χαρτογράφο (TM – Thematic Mapper) ο οποίος είναι και αυτός ένας πολυφασματικός γραμμικός σαρωτής, σε πολύ πιο βελτιωμένη έκδοση από τον MSS, ο οποίος θεματικός χαρτογράφος έχει χωρική ανάλυση 30 μέτρα. Το θερμικό κανάλι του (band 6), έχει χωρική ανάλυση τα 120 μέτρα.

Η βασική χρήση του συγκεκριμένου δορυφόρου είναι ο έλεγχος και η παρακολούθηση του περιβάλλοντος, μέσω των 7 φασματικών ζωνών που έχει. Οι φασματικές ζώνες του, λοιπόν, βρίσκονται στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα στην περιοχή του ορατού, του κοντινού – μέσου υπέρυθρου και του θερμικού τμήματος και καλύπτουν την περιοχή του φάσματος από 0,45 που είναι το ορατό έως και το 12,5 που είναι το θερμικό υπέρυθρο (Chander, Markham, & Helder, 2009). Εισαγωγή της ζώνης 1 δίνει τη δυνατότητα στους

ερευνητές να δημιουργούν αληθείς έγχρωμες εικόνες, ενώ με τη φασματική ζώνη 6 δίνεται τη επιλογή απόκτησης θερμικών υπέρυθρων εικόνων (Παρχαρίδης, 2015).

- Landsat 7:

Ο Landsat 7 εκτοξεύτηκε και τέθηκε σε τροχιά στις 15 Απριλίου 1999, με ύψος περίπου 705 χιλιόμετρα και κλίση 98°. Όπως και ο Landsat 8, έτσι και ο Landsat 7 είναι ηλιοσύγχρονος και είναι προγραμματισμένος να τέμνει τον Ισημερινό στις 10 π.μ., μεταφέροντας ένας Βελτιωμένο Θεματικό Χαρτογράφο (ETM+, Enhanced Thematic Mapper Plus) (Παρχαρίδης, 2015). Το θερμικό κανάλι του συγκεκριμένου δορυφόρου είναι το κανάλι 6, το οποίο έχει χωρική διακριτική ικανότητα 60 μέτρων. Στα εξαρτήματά του έχει ηλιακό βαθμονομητή (dual mode) και μια εσωτερική λάμπα βαθμονόμησης. Η γεωδαιτική του ακρίβεια είναι περί τα 400 μέτρα κατά μήκος του κάθετου ίχνους. Η ραδιομετρική του ποιότητα είναι 8 bits με επιλεγμένη τιμή υψηλής/χαμηλής προσθήκης (gain) (Chander, Markham, & Helder, 2009). Η μετάδοση των δεδομένων που σαρώνει μπορεί να γίνει μέσω τριών διαφορετικών τρόπων: (α) απευθείας, (β) μέσω του data relay satellite system και (γ) με αποθήκευση και μετάδοση. Ο δορυφόρος αυτός είναι κατάλληλος για μελέτη του περιβάλλοντος καθώς μπορεί να πραγματοποιήσει απόλυτη βαθμονόμηση καναλιών του Θεματικού Χαρτογράφου (+/- 5%) για διαχρονικές μελέτες και ανίχνευση διαφόρων μεταβολών. Ένα ακόμη βασικό πλεονέκτημα του Landsat 7 είναι η εύκολη επεξεργασία των δεδομένων του, καθώς πραγματοποιεί ταυτόχρονη λήψη του Παγχρωματικού (PAN) και των Πολυφασματικών καναλιών (MS), με κύκλο επαναληψιμότητας για απόκτηση δεδομένων, κάθε 16 ημέρες.

Δυστυχώς, λόγω προβλήματος του σαρωτή του δορυφόρου, το οποίο χρονολογείται περίπου τη χρονιά 2003, τα δεδομένα τα οποία έχουν αποκτηθεί από τη συγκεκριμένη χρονολογία και έπειτα, δεν είναι ολόκληρα. Εμφανίζονται κάποιες γραμμές στις δορυφορικές εικόνες, οι οποίες έχουν την τιμή μηδέν.

- Landsat 8:

Ο δορυφόρος Landsat 8 σχεδιάστηκε από τη NASA, σε συνεργασία με τη γεωλογική υπηρεσία των ΗΠΑ (USGS), και τον Φεβρουάριο του 2013 εκτοξεύτηκε από την Καλιφόρνια. Πλέον, όλες οι διαδικασίες που αφορούν το δορυφόρο αυτό, όπως η βαθμονόμηση, ο δορυφορικός χειρισμός και η παραγωγή και αποθήκευση δεδομένων στο κέντρο Earth Resources Observation and Science (EROS), τις χειρίζεται το USGS (Blackett, 2014).

Ο συγκεκριμένος δορυφόρος έχει 2 όργανα καταγραφής της επιφάνειας της Γης: α) το Operational Land Imager (OLI), το οποίο έχει φασματικά κανάλια που κυμαίνονται από το ορατό έως και το κοντινό υπέρυθρο (shortwave Infrared - SWIR) και είναι κατάλληλα

για την παρατήρηση των ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών που εκπέμπονται από την επιφάνεια της Γης, και β) το Thermal Infrared Sensor (TIRS) το οποίο έχει δύο θερμικά κανάλια στο τμήμα του θερμικού υπέρυθρου (TIRS-1 & TIRS-2) τα οποία είναι κατάλληλα για ανίχνευση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τη Γη.

Η ανάλυση που έχει ο δορυφόρος είναι 30 μέτρα για τα κανάλια που είναι στο ορατό, κοντινό υπέρυθρο και μικροκυματικό υπέρυθρο, 15 μέτρα για το παγχρωματικό κανάλι και 100 μέτρα για τα θερμικά κανάλια (Παρχαρίδης, 2015). Λειτουργεί με ηλिसσύγχρονη τροχιά, δηλαδή διασχίζει κάθε παράλληλο σε ίδιο τοπικό χρόνο και αποστέλλει περίπου 400 εικόνες στο USGS.

3.3.1: Φασματικά κανάλια Landsat 8:

Φασματικό Κανάλι 1: Ονομάζεται επίσης και coastal aerosol. Το κανάλι αυτό ανιχνεύει το βαθύ μπλε. Δυστυχώς, οι μπλε δέσμες ακτινοβολίας είναι αρκετά δύσκολο να συλληθούν από το Διάστημα καθώς διασκορπίζονται εύκολα από τα πολύ μικρά κομμάτια σκόνης και νερού που βρίσκονται στον αέρα. Κάποιες φορές διασκορπίζονται και από τα ίδια τα μόρια του αέρα. Το φασματικό κανάλι ένα είναι το μόνο που μπορεί να συλλέξει δεδομένα σε αυτό το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Φασματικό Κανάλι 2: Αποτελεί το ορατό μπλε.

Φασματικό Κανάλι 3: Αποτελεί το ορατό πράσινο.

Φασματικό Κανάλι 4: Αποτελεί το ορατό κόκκινο.

Φασματικό Κανάλι 5: Το κανάλι 5 μετράει το κοντινό υπέρυθρο (Near Infrared - NIR). Όταν κάποιος μελετητής ενδιαφέρεται να ερευνήσει την οικολογία μιας περιοχής μέσω της τηλεπισκόπησης, ανατρέχει στο κανάλι 5, καθώς το κοντινό υπέρυθρο ανακλάται από τα υγιή φυτά διότι η υγρασία που υπάρχει στα φύλλα τους σκεδάζει πίσω στον ουρανό τα κύματα του συγκεκριμένου τμήματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Συνδυάζοντάς το με το φασματικό κανάλι 4, προκύπτει ο δείκτης βλάστησης NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) ο οποίος υποδεικνύει την παρουσία (ή όχι) βλάστησης σε μία περιοχή.

Φασματικά Κανάλια 6,7: Αφορούν διαφορετικά τμήματα του μικροκυματικού υπέρυθρου (Shortwave Infrared - SWIR ή Middle Infrared - MIR). Είναι χρήσιμα στη γεωλογία καθώς μπορούν να διακριθούν εύκολα τα πετρώματα και είδη εδαφών, όπως επίσης καθίσταται ευκολότερος και ο διαχωρισμός υγρού και ξερού εδάφους.

Φασματικό Κανάλι 8: Είναι το παγχρωματικό κανάλι (Panchromatic - Pan). Το οποίο έχει 15 μέτρα χωρική διακριτική ικανότητα.

Φασματικό Κανάλι 9: Η λειτουργία του είναι για να καταγράφει τα σύννεφα. Παρέχει κάλυψη σε ένα πολύ μικρό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, μόλις στο διάστημα 1370 ± 10 nm (Παρχαρίδης, 2015).

Φασματικά Κανάλια 10, 11: Τα κανάλια αυτά βρίσκονται στο θερμικό υπέρυθρο (Thermal Infrared – TIR) και καταγράφουν τη θερμότητα – θερμοκρασία του εδάφους.

Κεφάλαιο 4:

4.1. Εργαλεία:

Οι μετρήσεις στο πεδίο αποτελούν ένα βασικό και αναπόσπαστο κομμάτι στην εκτέλεση της συγκεκριμένης διατριβής, καθώς κρίθηκε απαραίτητη η επιτόπια έρευνα προς απόκτηση δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, τα δεδομένα που έπρεπε να μετρηθούν ήταν η θερμοκρασία αέρα, η σχετική υγρασία αέρα, η θερμοκρασία εδάφους, η θερμοκρασία επιφανείας, να καταγραφεί το υπόβαθρο, η επικρατούσα φωτεινότητα χρώματος υποβάθρου, η ύπαρξη βλάστησης και μια γενική περιγραφή του επικρατούντος χρώματος με κύρια βάση τις αποχρώσεις γκρι και καφέ. Τα δεδομένα για τη θερμοκρασία αέρα και εδάφους και υγρασίας αέρα λήφθηκαν μέσω του οργάνου Thermohydrometer (Εικόνες 23 & 24), ενώ για τη θερμοκρασία επιφανείας μέσω του InfraRed Thermometer Fluke (Εικόνα 25).



Εικόνες 23 & 24: Εργαλεία για τη λήψη δεδομένων θερμοκρασίας εδάφους (15 εκατ.), υγρασίας και θερμοκρασίας αέρα



Εικόνα 25: Όργανο για τη μέτρηση θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους

Στη λήψη αλλά και στην αποθήκευση χωρικών αλλά και περιγραφικών δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία που μας παρέχουν τα σύγχρονα “smart phones” και tablets, καθώς μέσω του “Cloud Computing” και της εφαρμογής “Collector for ArcGIS” της ESRI πραγματοποιήθηκε η καταγραφή, ανάλυση αλλά και αποθήκευση των μετρήσεων και παρατηρήσεων που λήφθηκαν στα προηγούμενα βήματα της έρευνας. Ο “Collector” (Εικόνες 26 & 27) αποτελεί μια εφαρμογή η οποία είναι συμβατή σε όλα τα “smart phones” και tablets ανεξαρτήτως του εγκατεστημένου λογισμικού της κάθε συσκευής (iOS ή Android).



Εικόνες 26 & 27: (α) Logo εφαρμογής Collector for ArcGIS (β) Interface εφαρμογής σε smartphones και tablet

Η εφαρμογή αυτή επιλέχθηκε καθώς έχει πληθώρα πλεονεκτημάτων τα οποία βοήθησαν στη βέλτιστη καταγραφή όλων των δεδομένων. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει, αποτελεί η καταγραφή αλλά και ανανέωση των δεδομένων του πεδίου, με ταυτόχρονη καταγραφή της θέσης από την οποία πάρθηκε το κάθε δεδομένο ξεχωριστά. Επομένως, ένα ακόμη βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης εφαρμογής αποτελεί η συλλογή και αποθήκευση σημειακών αλλά και γραμμικών οντοτήτων που καταλαμβάνουν έκταση. Στην περίπτωση της συγκεκριμένης μελέτης, η πρόσβαση στο δίκτυο (internet) δεν θεωρήθηκε δεδομένη, όμως αυτό δεν αποτέλεσε πρόβλημα, καθώς το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε παρέχει τη δυνατότητα λειτουργίας του ακόμη και όταν δεν υπάρχει σύνδεση στο δίκτυο. Επίσης, κατά την καταγραφή του σημείου της θέσης της δειγματοληψίας είναι εφικτή η λήψη φωτογραφίας (ή ακόμη και video) καθώς και η εισαγωγή κάποιου σχόλιου για καλύτερη κατανόηση στην επερχόμενη ανάλυση των δεδομένων. Τέλος, μέσω της εφαρμογής αυτής και σε συνδυασμό του WebGIS, έγινε η εξαγωγή των δεδομένων υπό τη μορφή shp, με σκοπό τη μεταγενέστερη δημιουργία θεματικών χαρτών και σε σύνταξη σχετικών αναφορών (reports).

4.2. Λήψη δεδομένων (επίγειες μετρήσεις – δορυφορικές εικόνες):

4.2.1. Επίγειες Μετρήσεις:

Στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Στρατηγικές Διαχείρισης Περιβάλλοντος, Καταστροφών και Κρίσεων» και της εκπόνησης της συγκεκριμένης διατριβής, πραγματοποιήθηκε εκδρομή με ερευνητικό χαρακτήρα στο νησιωτικό σύμπλεγμα της Σαντορίνης (Ιούνιος 2017) με σκοπό την εκπαίδευση στις καταστροφές και στη συλλογή δεδομένων. Το κομμάτι ενδιαφέροντος, το οποίο και αποτέλεσε έμπνευση προς τη συγγραφή της συγκεκριμένης διπλωματικής, ήταν η Νέα Καμένη και η έρευνα που πραγματοποιήθηκε εκεί. Όλα τα άτομα τα οποία συμμετείχαν στη συγκεκριμένη εκδρομή χωρίστηκαν σε ομάδες, 8 σε σύνολο, όπου κάθε μια ομάδα έπρεπε να εκτελέσει ένα συγκεκριμένο έργο. Ένα άτομο από κάθε ομάδα εκτελούσε χρέη οδηγού και συντονιστή, έπειτα υπήρχε ένα άλλο άτομο που ήταν ο συλλέκτης των δεδομένων και τέλος υπήρχαν οι παρατηρητές. Τα δεδομένα που έπρεπε να χαρτογραφηθούν κατά μήκος του μονοπατιού και θα αποτελούσαν βασικά πρωτογενή δεδομένα για τη διατριβή ήταν η θερμοκρασία εδάφους και αέρα και η υγρασία αέρα. Το μονοπάτι που επιλέχθηκε αποτελεί περιπατητικό μονοπάτι προς το ευρύ κοινό, το οποίο φθάνει έως και περιμετρικά του κρατήρα (Χάρτης 6). Οι περιοχές από όπου πραγματοποιήθηκαν οι λήψεις ήταν καθορισμένες και με χρονικό περιορισμό περίπου 2 ωρών. Η μέτρηση θερμοκρασίας εδάφους ήταν σε βάθος έως 15cm, ενώ μαζί με τη θερμοκρασία και υγρασία αέρα καταγράφηκαν, από τις υπόλοιπες ομάδες, και τα χαρακτηριστικά της περιοχής απ' όπου έγιναν οι μετρήσεις (υπόβαθρο, χρώμα, φωτεινότητα, βλάστηση). Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα (T αέρα) και της σχετικής υγρασίας (RH%) έγιναν σε ύψος κατά προσέγγιση 2 μέτρων. Η συλλογή δεδομένων (T αέρα, T εδάφους και RH%) έγινε μέσω του οργάνου Thermohygrometer.



Χάρτης 6: Απεικόνιση του μονοπατιού που περπατήθηκε στη Νέα Καμένη με σκοπό τη συλλογή δεδομένων (ιδία επεξεργασία)

Κατά την άνοδο της Νέας Καμένης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις δεξιά του καθορισμένου μονοπατιού, ανά 2 λεπτά, ενώ κατά την κάθοδο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις εκατέρωθεν. Παράλληλα, μέσω της τεχνολογίας του κινητού τηλεφώνου και του “Cloud Computing” τα δεδομένα συλλέχθηκαν και αποθηκεύτηκαν στο πρόγραμμα Collector της εφαρμογής ArcGIS της ESRI.

Η διαδικασία λήψης της θερμοκρασίας αέρα περιλάμβανε την ύψωση του οργάνου στα 2, περίπου, μέτρα από το έδαφος, και έπειτα ακολούθησε μια μικρή αναμονή έως ότου σταθεροποιηθεί η τιμή της θερμοκρασίας. Ο χρόνος αναμονής δεν είναι συγκεκριμένος, καθώς οι τιμές επηρεάζοντουσαν από τυχόν αέρα και υπήρχε μια μικρή αυξομείωση μέχρι το τελικό αποτέλεσμα. Όσον αφορά για τη λήψη τιμών για την υγρασία αέρα, η διαδικασία ήταν παρόμοια με αυτής για τη θερμοκρασία αέρα.

Η θερμοκρασία εδάφους έγινε μέσω της ράβδου του οργάνου Thermohygrometer, σε βάθος περίπου 15 εκατοστών (Εικόνα 28). Στη συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρήθηκε λιγότερος χρόνος αναμονής για την τελική τιμή της θερμοκρασίας, γεγονός που οφείλεται στην απουσία εξωγενών παραγόντων, όπως είναι ο άνεμος.



Εικόνα 28: Διαδικασία μέτρησης θερμοκρασία εδάφους σε βάθος περίπου 15cm. Νέα Καμένη, Ιούνιος 2017

Στο κομμάτι της θερμοκρασίας επιφανείας, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο InfraRed Thermometer Fluke, από το οποίο έβγαινε μια δέσμη λέιζερ η οποία μετρούσε τη θερμοκρασία του αντικειμένου που ερχόταν σε επαφή. Ο χρόνος αναμονής για το τελικό αποτέλεσμα ήταν μηδενικός, καθώς η τιμή έβγαινε απευθείας.

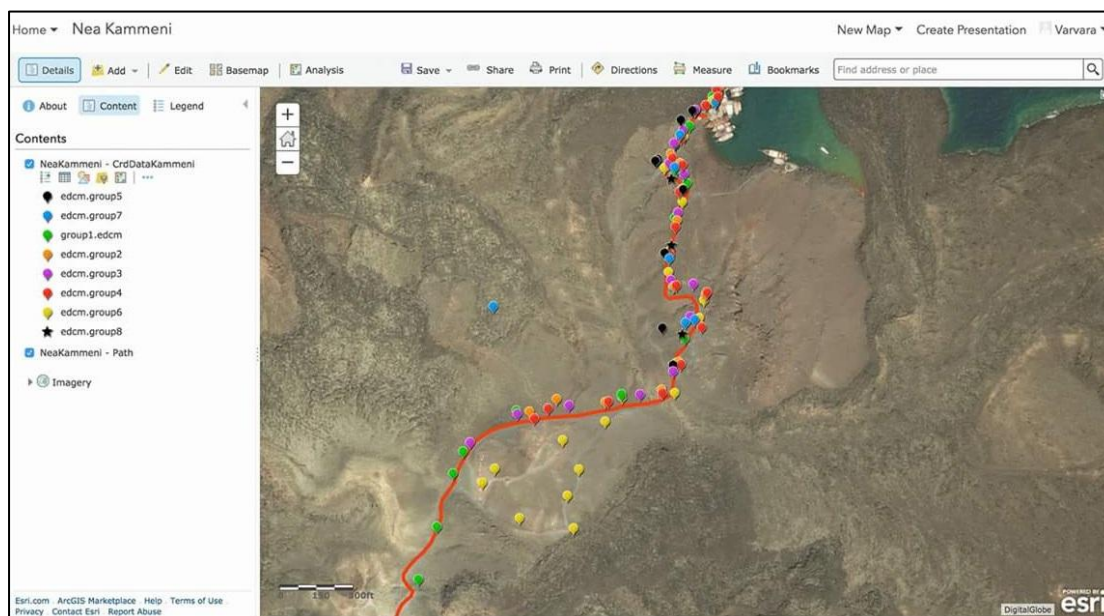
Στο περιγραφικό κομμάτι των μετρήσεων, έγινε η απλή καταγραφή των παρακάτω στοιχείων στο πρόγραμμα Collector:

Για το υπόβαθρο έπρεπε ο παρατηρητής να καταγράψει στο αντίστοιχο πεδίο της εφαρμογής το είδος του υποβάθρου, δηλαδή αν είναι έδαφος ή βράχος, να δώσει και μια γενική περιγραφή του επικρατούντος χρώματος βάση των αποχρώσεων γκρι και καφέ, και να παρουσιάσει την επικρατούσα φωτεινότητα χρώματος του υποβάθρου. Τέλος, έπρεπε να καταγράψει την ύπαρξη της βλάστησης στο σημείο μέτρησης με ΝΑΙ ή ΟΧΙ.

Κατά την άνοδο, και άρα την επιστροφή προς τη σημείο αφετηρίας, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις θερμοκρασίας επιφανείας εδάφους με το όργανο InfraRed Thermometer Fluke. Τα σημεία που επιλέχθηκαν ήταν εκείνα στα οποία είχε γίνει μέτρηση για τη θερμοκρασία εδάφους εις βάθος. Κάποια γρήγορα συμπεράσματα ήταν οι μεγάλες διαφορές μεταξύ των θερμοκρασιών επιφανείας και βάθους, όπου σε κάποιες περιπτώσεις άγγιζαν και τους 20°C.

Η διάρκεια της συγκεκριμένης ερευνητικής διαδρομής ήταν περίπου 2 ώρες, με ώρα έναρξης 10:43 και ώρα λήξης, κατά προσέγγιση, νωρίς το μεσημέρι.

Κατά τη διάρκεια όλης της ερευνητικής διαδικασίας, μια από τους υπεύθυνους της διοργάνωσης της εκδρομής και υπεύθυνη της ενότητας του GIS, η κύρια Β. Αντωνίου, παρακολουθούσε τις μετρήσεις των κάθε ομάδων μέσω του ArcGIS Online που ήταν συνδεδεμένος με το πρόγραμμα του Collector. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 29) φαίνεται με διαφορετικό χρώμα το κάθε σημείο μέτρησης της κάθε ομάδας.

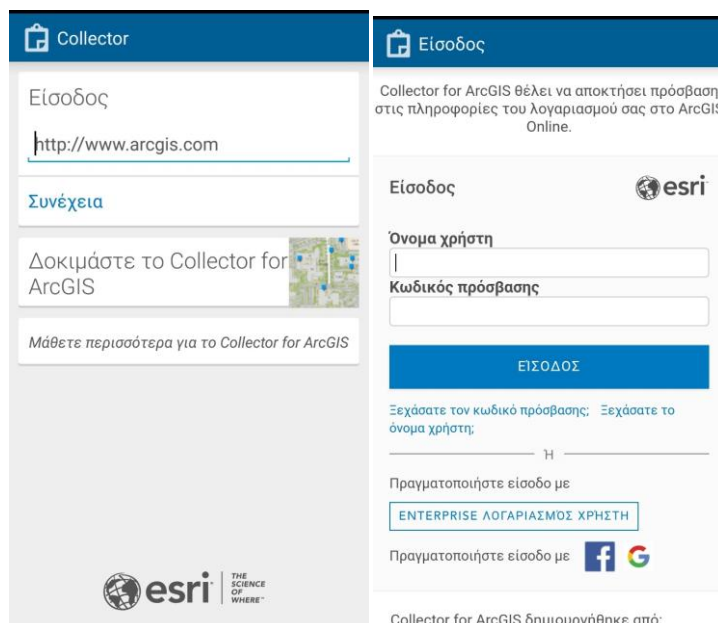


Εικόνα 29: Παρουσίαση όλων των μετρήσεων όλων των ομάδων κατά μήκος του καθορισμένου μονοπατιού. (Πράσινο χρώμα: Ομάδα 1, Πορτοκαλί χρώμα: Ομάδα 2, Μωβ χρώμα: Ομάδα 3, Κόκκινο χρώμα: Ομάδα 4, Μαύρο χρώμα: Ομάδα 5, Κίτρινο χρώμα: Ομάδα 6, Μπλε χρώμα: Ομάδα 7, Μαύρο αστεράκι: Ομάδα 8)

Ωστόσο, για να δημιουργηθεί ο Collector, με τα κατάλληλα πεδία που θα αφορούν τις μετρήσεις, υπάρχει μια προεργασία πριν από το πεδίο, καθώς πρέπει να ορισθεί από πριν ο χάρτης στον οποίο θα γίνει η δουλειά και να δημιουργηθούν τα πεδία στα οποία θα καταχωρηθούν οι πληροφορίες.

Πρώτο βήμα προς τη δημιουργία του Collector είναι η δημιουργία χάρτη, σε τοπικό επίπεδο, στην πλατφόρμα ArcGIS Desktop της ESRI. Γίνεται, λοιπόν, η εισαγωγή των βασικών shapefile στον χάρτη, και έπειτα ακολουθεί η κοινοποίησή τους (share) στο ArcGIS Online. Εφόσον τα αρχεία shapefile έχουν ανέβει στη διαδικτυακή πλατφόρμα, έχουν πάρει τη μορφή feature layer. Στη διαδικασία κατασκευής διαδικτυακού χάρτη, πρέπει να γίνει η εισαγωγή ενός, το λιγότερο, feature layer σε έναν νέο Map ο οποίος να έχει πλήρη έλεγχο επεξεργασίας (My Content → Add layer to new map with full editing control). Επόμενο βήμα αποτελεί η αποθήκευση του χάρτη και έπειτα η κοινοποίησή του σε όλους (Share → Everyone). Αφού εκτελεστεί και η τελευταία εντολή, ο χάρτης είναι έτοιμος προς επεξεργασία.

Απαραίτητη προϋπόθεση για τη χρήση της εφαρμογής, είναι η εγκατάσταση στο κινητό (ή tablet) που θα χρησιμοποιηθεί. Κατά την είσοδο στον Collector, εμφανίζεται ένα μήνυμα το οποίο ζητάει τα στοιχεία του χρήστη (User Name και Password) (Εικόνες 30 & 31).

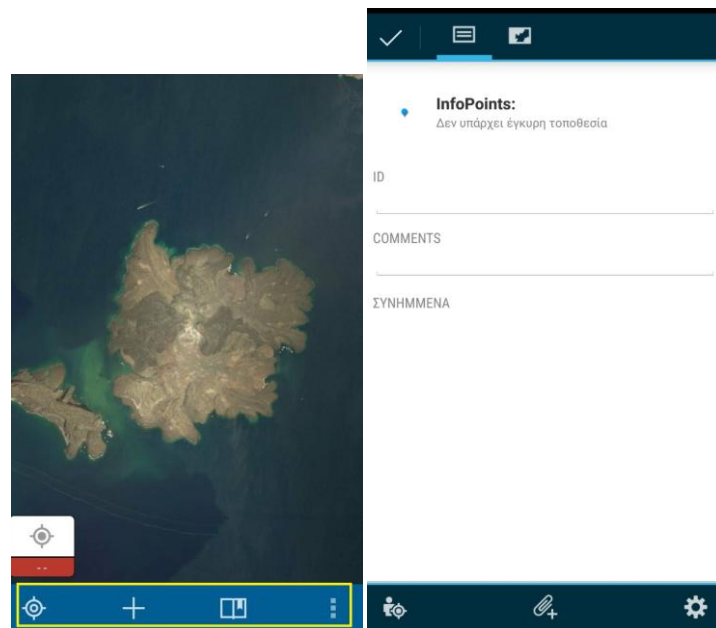


Εικόνα 30 & 31: Στην αριστερή εικόνα παρουσιάζεται η πρώτη εντολή από το πρόγραμμα Collector, ενώ στη δεξιά εικόνα εμφανίζονται τα πεδία στα οποία ο χρήστης πρέπει να καταχωρήσει το όνομα και τον κωδικό πρόσβασης

Αφού ο χρήστης συμπληρώσει τα στοιχεία του, εμφανίζεται ο διαθέσιμος χάρτης που είναι προς επεξεργασία και εισαγωγή δεδομένων. Τα εργαλεία που εμφανίζονται στην κάτω μπάρα, από αριστερά προς τα δεξιά είναι:

- Εντοπισμός της θέσης: Σε περίπτωση που ο χρήστης κάνει κάποιο λάθος μετακινώντας κατά πολύ τον χάρτη στον οποίο δουλεύει και χαθεί η περιοχή μελέτης του, πατώντας το σύμβολο αυτό, έχει τη δυνατότητα επιστροφής στη θέση στην οποία βρίσκεται εκείνη τη στιγμή
- Συλλογή νέου στοιχείου: Με αυτή την επιλογή, ο χρήστης βάζει ένα νέο στοιχείο στο σημείο που έχει επιλέξει. Έπειτα, στα πεδία που είναι διαθέσιμα συμπληρώνει τις αντίστοιχες πληροφορίες που αφορούν το στοιχείο αυτό. Στο συγκεκριμένο βήμα παρέχεται και η δυνατότητα, εάν ο χρήστης το επιθυμεί, εισαγωγής φωτογραφίας ή βίντεο που αφορά το δεδομένο που συλλέχθηκε (Εικόνα 32 & 33)
- Ρυθμίσεις εισαγωγής: Στη συγκεκριμένη εντολή ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την απαιτούμενη ακρίβεια τοποθεσίας και το απαιτούμενο διάστημα για τη συλλογή. Στην απαιτούμενη ακρίβεια ορίζει και τη μονάδα μέτρησης (Πόδια ή Ίντσες), ενώ στο διάστημα συνεχούς καταγραφής, μπορεί να το ορίσει από 1 δευτερόλεπτο έως 1 λεπτό. Τέλος, του δίνεται η δυνατότητα ενεργοποίησης του GPS averaging,

όπου λαμβάνεται υπόψη ο μέσος όρος των σημείων μέσω GPS. Τα σημεία τα ορίζει ο χρήστης, εφόσον ενεργοποιήσει την εντολή.

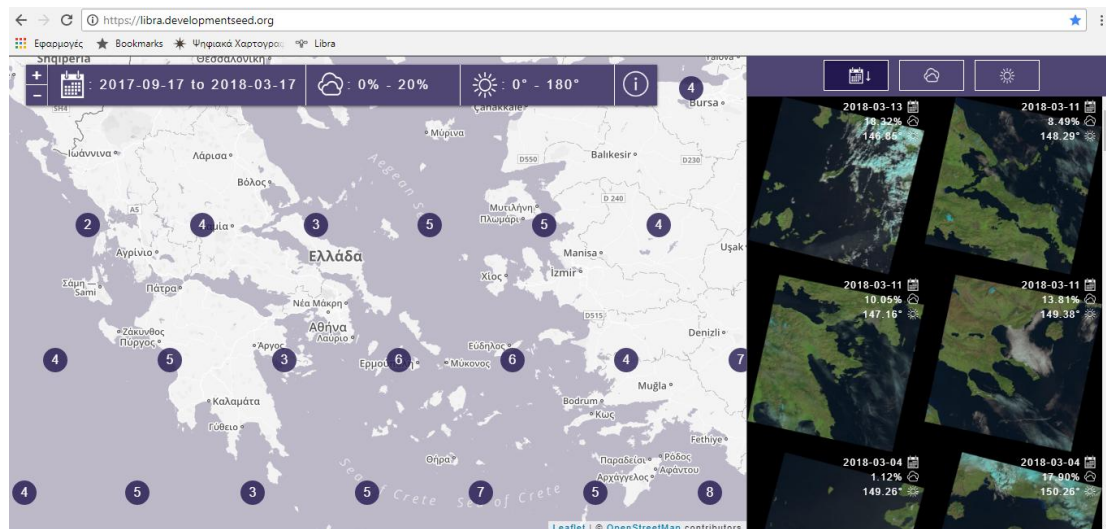


Εικόνες 32 & 33: Στην αριστερή εικόνα παρουσιάζονται τα εργαλεία του Collector. Στη δεξιά εικόνα εμφανίζεται ένα απλοποιημένο πεδίο έπειτα από την εισαγωγή στοιχείου, και η κάτω μπάρα όπου παρέχει περισσότερα εργαλεία επεξεργασίας και ρυθμίσεων για το συγκεκριμένο στοιχείο

4.2.2. Δορυφορικές Εικόνες:

Παράλληλα με τις επίγειες μετρήσεις, υπήρξε λήψη και επεξεργασία δορυφορικών εικόνων, με σκοπό να υπολογισθεί η θερμογραφία του νησιού, να γίνουν συγκρίσεις με τις επίγειες μετρήσεις, και εν δυνάμει συγκρίσεις με δορυφορικές εικόνες κατά τα έτη 2011 και 2012, όπου υπήρξε το φαινόμενο της έντονης ηφαιστειακής δραστηριότητας.

Το λογισμικό που επιλέχθηκε με σκοπό τη λήψη των δορυφορικών εικόνων είναι το *Libra* (<https://libra.developmentseed.org/>), το οποίο περιέχει εικόνες από το δορυφόρο Landsat 8 (Εικόνα 34). Οι δυνατότητες που παρέχει είναι η οριοθέτηση φίλτρων που αφορούν την ημερομηνία λήψης της εικόνας από το δορυφόρο (date average), το ποσοστό κάλυψης που θα έχουν οι εικόνες από τα σύννεφα (cloud cover percentage) και τη γωνία αζιμούθιου του ήλιου (sun azimuth angle). Το site *Libra* προμηθεύεται τις εικόνες από το USGS Earth Explorer. Οι λήψεις των εικόνων παρέχονται από το USGS, το Google Earth Engine και το Amazon Web Services, ενώ το site έχει αναπτυχθεί από τις εταιρείες **Development SEED** και **ASTRO DIGITAL**.



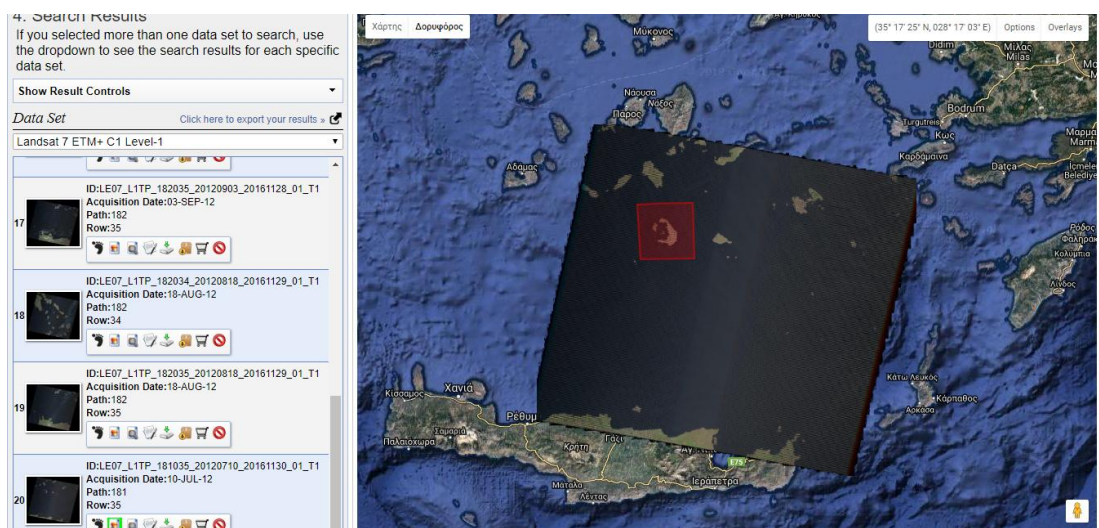
Εικόνα 34: Η διαδικτυακή σελίδα Libra από την οποία έγινε η λήψη των δεδομένων (δορυφορικές εικόνες Landsat 8, <https://libra.developmentseed.org/>)

Τα πλεονεκτήματα που έχει η συγκεκριμένη σελίδα παροχής εικόνων Landsat είναι ότι οι εταιρείες που προμηθεύουν με τις δορυφορικές εικόνες, έχουν ήδη δουλέψει στην επεξεργασία των εικόνων, οι οποίες ανανεώνονται κάθε 15 μέρες ή κάθε μήνα. Αυτό είναι πολύ βασικό πλεονέκτημα, καθώς γλυτώνει το χρήστη από την ατμοσφαιρική και ραδιομετρική διόρθωση. Η ατμοσφαιρική διόρθωση αποτελεί απαραίτητο στάδιο της επεξεργασίας των εικόνων, καθώς η ορατή και κοντινή υπέρυθρη ακτινοβολία επηρεάζεται από την ύπαρξη της ατμόσφαιρας από το έδαφος στον αισθητήρα του δορυφόρου. Επομένως, ως ατμοσφαιρική διόρθωση αποτελεί η εκτίμηση της ποσότητας και της κατανομής των υδρατμών που υπάρχουν σε μία δορυφορική εικόνα. Οι μεθοδολογίες που ακολουθούνται για τη διόρθωση είναι πάρα πολλές καθώς υπάρχουν πάρα πολλές παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας από τον εκάστοτε μελετητή (Μήτση, 2017). Αναφορικά, κάποιες από τις παραμέτρους είναι η επίδραση της ατμόσφαιρας, η γωνία λήψης του δέκτη και η γωνία του ηλιακού ύψους. Ως ραδιομετρική διόρθωση ορίζεται η προ-επεξεργασία και διόρθωση των τιμών της ακτινοβολίας που δέχεται και έπειτα καταχωρεί ο δορυφόρος, δηλαδή η μετατροπή των ψηφιακών τιμών (DN) σε ακτινοβολία (radiance).

Ωστόσο, ένα βασικό μειονέκτημα του Libra, που επηρεάζει τη συγκεκριμένη μελέτη, είναι ότι η παλαιότερη ημερομηνία όπου έχουν εισαχθεί δορυφορικές εικόνες είναι ο Φεβρουάριος 2013, γιατί αν και τέθηκε σε τροχιά το 2011, ξεκίνησε τη λειτουργία του το 2013. Τέλος, ένα ακόμη μειονέκτημα, όμως και χαρακτηριστικό του Libra, είναι ότι παρέχει δορυφορικές εικόνες μόνον του δορυφόρου Landsat 8.

Για την απόκτηση δορυφορικών εικόνων για τα έτη 2011 και 2012, με σκοπό τη συγκριτική μελέτη τους με τα αποτελέσματα από τις δορυφορικές εικόνες που λήφθηκαν

το 2017 και το 2018, χρησιμοποιήθηκε η ιστοσελίδα <https://earthexplorer.usgs.gov/>, όπου παρέχει δορυφορικές εικόνες από όλους τους διαθέσιμους δορυφόρους, και για όποια ημερομηνία επιθυμεί ο χρήστης. Ενδεικτικά, οι δορυφορικές που μελετήθηκαν, και επιλέχθηκαν με κριτήρια το ποσοστό νεφοκάλυψης και η ολική εμφάνιση της περιοχής μελέτης στο χάρτη, ανήκουν στο χρονικό κομμάτι από 1 Ιανουαρίου 2011 έως και 12 Δεκεμβρίου 2012. Οι δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από τους δορυφόρους Landsat 5 & 7 (Εικόνα 36).



Εικόνα 36: Εμφάνιση δορυφορικής εικόνας στο χάρτη μέσω της ιστοσελίδας earthexplorer. Στο κόκκινο πλαίσιο εμφανίζεται η περιοχή μελέτης που έχει επιλεγεί να βρίσκεται στα αποτελέσματα των αναζητήσεων. Στην συγκεκριμένη εικόνα εμφανίζεται η δορυφορική εικόνα του Landsat 7 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>)

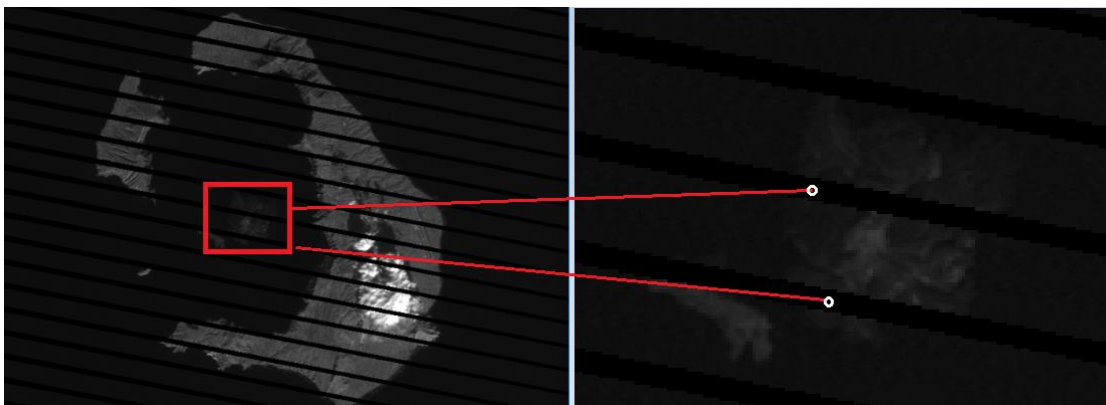
4.3. Μεθοδολογία – Δημιουργία Χαρτών:

Τα ήρεμα, αλλά ωστόσο ενεργά ηφαιστεια, τα οποία βρίσκονται σε περιοχές με υψηλές γεωδυναμικές αναταραχές, αποτελούν μεγάλο κίνδυνο, πράγμα που καθιστά απαραίτητη την παρακολούθησή τους, σε συνδυασμό με δορυφορικές μετρήσεις και μοντελοποίηση (Lagios, και συν., 2007). Η τηλεπισκόπηση, πλέον, αποτελεί ένα πολύ δυνατό εργαλείο, καθώς μέσω της επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων (στα εκάστοτε λογισμικά που χρησιμοποιούνται), παρέχονται αξιόλογα συμπεράσματα όσον αφορά την παρακολούθηση των ηφαιστειακών πεδίων. Πιο συγκεκριμένα, αυτό πραγματοποιείται με τη χρήση της θερμικής υπέρυθρης εικόνας του δορυφόρου (Landsat Thermal Infrared imagery – TIR, Εικόνα 37) (Blackett, 2014). Τα προϊόντα της τηλεπισκόπησης είναι ψηφιακές δορυφορικές εικόνες και σαρωμένες αεροφωτογραφίες.



Εικόνα 37: Απεικόνιση Landsat 8 (Πηγή: <https://landsat.usgs.gov/landsat-8-mission>)

Για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης διατριβής, χρησιμοποιήθηκαν οι δορυφόροι Landsat 5, Landsat 7 και Landsat 8, καθώς είναι ο Landsat 8 είναι ο πιο πρόσφατος που τέθηκε σε τροχιά, και έχει 2 θερμικά κανάλια (Band 10, Band 11), ο Landsat 7, μέσω των δικών του θερμικών καναλιών (Band 6.1 και Band 6.2) μπορεί να μας παρέχει δεδομένα για τις χρονολογίες 2011 και 2012, όπου το ηφαίστειο της Σαντορίνης είχε μια έντονη δραστηριότητα. Ωστόσο, η επιλογή του Landsat 5 για την απόκτηση δεδομένων έγινε καθότι στις δορυφορικές εικόνες του Landsat 7 εμφανίζονται γραμμές οι οποίες, στην περίπτωση της μελέτης της Νέας Καμένης, υπάρχουν στην περιοχή του κρατήρα (Εικόνα 38). Οι τιμές οι οποίες βρίσκονται στις γραμμές έχουν την τιμή μηδέν, καθώς το πρόγραμμα διαβάζει τις γραμμές ως «τρύπα». Η προτεινόμενη λύση του προβλήματος είναι να δημιουργηθούν τιμές χρησιμοποιώντας την εντολή του πλησιέστερου γείτονα (nearest neighbor). Ωστόσο, δεν προτείνεται όταν μελετάται εις βάθος η θερμοκρασία, καθώς οι τιμές της θερμοκρασίας που θα εμφανίσει ως αποτέλεσμα δεν θα είναι αντιπροσωπευτικές της πραγματικότητας.



Εικόνα 38.: Απεικόνιση κενών που εμφανίζονται στον δορυφόρο Landsat 7 έπειτα από πρόβλημα που προκλήθηκε στο σαρωτή

Ο τρόπος με τον οποίο τα τηλεπισκοπηκά δεδομένα είναι δομημένα, είναι σε διάφορα «επίπεδα» (layers) τα οποία έχουν διάφορες τιμές που τα χαρακτηρίζουν. Το γεγονός αυτό επιτρέπει στον μελετητή να πραγματοποιήσει αριθμητικές πράξεις και συνδυασμούς (δημιουργία multiband layer) μεταξύ των επιπέδων αυτών. Η ονομασία που έχουν αυτοί οι συνδυασμοί είναι «δείκτες», οι οποίοι παρέχουν τη δυνατότητα να παρουσιάσουν με μεγάλη λεπτομέρεια ένα ζητούμενο χαρακτηριστικό της εικόνας, όπως για παράδειγμα η βλάστηση, η θερμοκρασία κτλ.

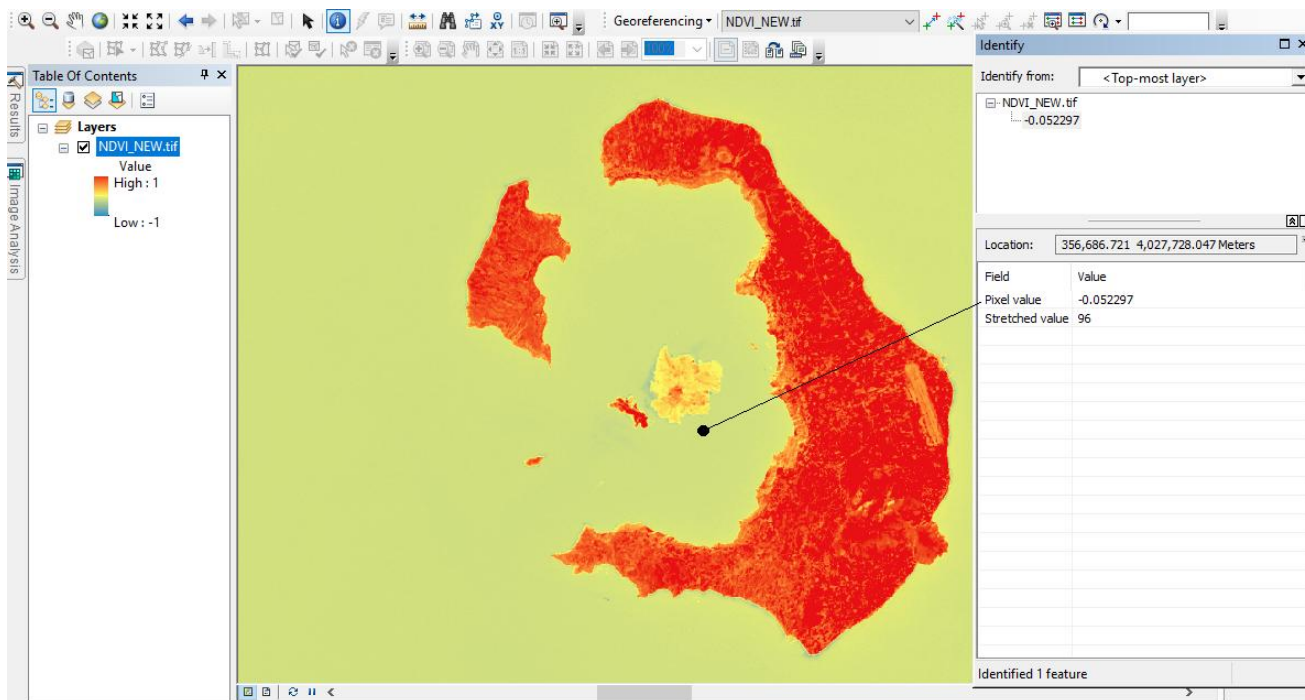
Στη συγκεκριμένη εργασία, τα τηλεπισκοπηκά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για να βγει ο δείκτης LST (Land Surface Temperature), από δορυφορικές εικόνες των Landsat 5 και Landsat 8, οι οποίες επεξεργάστηκαν στα προγράμματα ArcMap 10.2.2 της ESRI και στο Erdas. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν αναλύονται στα επόμενα υποκεφάλαια.

4.3.1: Δείκτης NDVI (Normalized Difference Vegetation Index):

Ο δείκτης NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) υποδεικνύει την παρουσία (ή όχι) της βλάστησης σε μια περιοχή μελέτης. Αποτελεί τον πλέον διαδεδομένο δείκτη βλάστησης και υπολογίζεται με το λόγο της διαφοράς του κοντινού υπέρυθρου (Near InfraRed NIR) και του κόκκινου (RED) προς το άθροισμά τους. Το αποτέλεσμα της πράξης αυτής είναι μια ασπρόμαυρη εικόνα με εύρος τιμών στο διάστημα [-1 , 1], όπου οι αρνητικές τιμές εκφράζουν την παρουσία νερού και η τιμή 0 εκφράζει την απουσία βλάστησης στην ξηρά. Στην εικόνα που ακολουθεί, (Εικόνα 39), επιλέγεται μέσω του εργαλείου Identify ένα τυχαίο σημείο στην περιοχή της θάλασσας, ώστε να εμφανιστεί η τιμή που έχει το συγκεκριμένο pixel. Επειδή το pixel που επιλέχθηκε αφορά περιοχή η οποία έχει νερό, η τιμή του NDVI για το συγκεκριμένο pixel είναι αρνητική.

Ο NDVI εκφράζεται μαθηματικά ως:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$



Εικόνα 39: Παρουσίαση τυχαίας τιμής NDVI στη θάλασσα

Η μεθοδολογία, λοιπόν, που ακολουθήθηκε για την κάθε δορυφορική εικόνα του Landsat 8 με σκοπό να υπολογισθεί ο NDVI, ήταν η εξής:

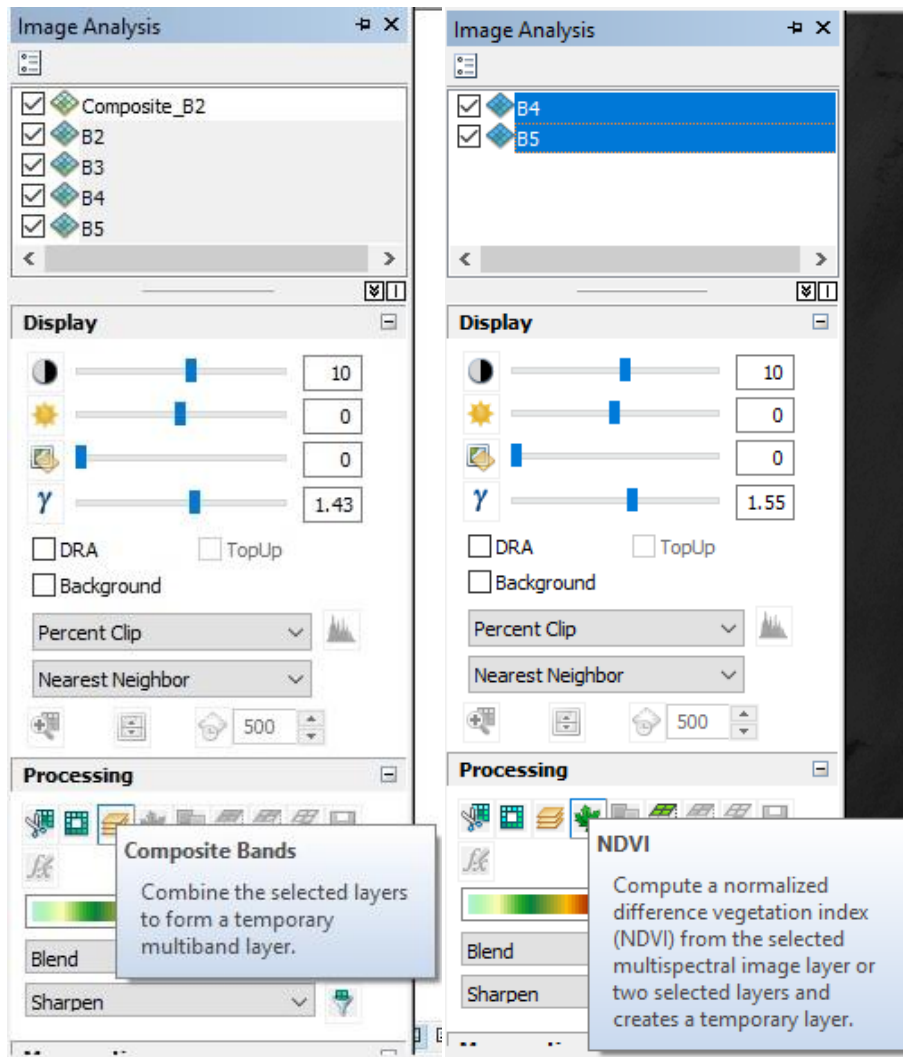
1ος τρόπος:

Αρχικά, έγινε η εισαγωγή των καναλιών band 2, band 3, band 4 και band 5 στον ArcMap, με σκοπό να πραγματοποιηθεί μέσω του Image Analysis και της εντολής Composite Band, ένα multiband layer. Το κανάλι δύο (band 2) αποτελεί το ορατό μπλε, το κανάλι τρία (band 3) το ορατό πράσινο, το κανάλι 4 (band 4) το ορατό κόκκινο, ενώ το κανάλι 5 (band 5) είναι το κοντινό υπέρυθρο (Near InfraRed – NIR). Το κανάλι 5 αποτελεί πολύ βασικό κανάλι για την οικολογία, καθώς τα υγιή φυτά το αντανακλούν καθώς το νερό που βρίσκεται στα φύλλα τους σκορπίζει τα συγκεκριμένα μήκη κύματος πίσω στο διάστημα. Για να υπολογισθεί ο NDVI λοιπόν στο λογισμικό ArcMap χρειάζεται ο συνδυασμός και των τεσσάρων καναλιών, καθώς από το καινούριο layer που δημιουργήθηκε (composite layer), μέσω του Image Analysis και της εντολής NDVI, πραγματοποιείται ο υπολογισμός του δείκτη (Εικόνα 40). Από τα Options του Image Analysis πρέπει να είναι ο σωστός αριθμός του καναλιού δίπλα από τα αντίστοιχα πεδία.

Με τον τρόπο αυτό, έχοντας δημιουργήσει το multiband layer, έχουμε πιο πολλές δυνατότητες σύγκρισης δεδομένων όσον αφορά τα φυτά και την οικολογία.

2ος τρόπος:

Απευθείας εισαγωγή στον ArcMap μόνο των καναλιών 4 και 5, και μέσω του Image Analysis και έχοντας επιλέξει τα κανάλια, να υπολογισθεί ο δείκτης NDVI (Εικόνα 41).



Εικόνες 40 & 41: Στην αριστερή εικόνα απεικονίζεται η εντολή “Composite Bands”, ενώ στη δεξιά ο υπολογισμός του δείκτη NDVI χρησιμοποιώντας μόνο τα κανάλια 4 και 5. Λογισμικό: ArcGIS

10.2.2

4.3.2: Μετατροπή των Digital Numbers (DN) σε radiances (Conversion to ToA Radiance):

Σε αυτή τη μετατροπή, και στις επόμενες που ακολουθούν, όλες οι επεξεργασίες πραγματοποιήθηκαν στα θερμικά κανάλια του δορυφόρου, δηλαδή στα κανάλια Band 10 και Band 11 αντίστοιχα, στο Raster Calculator του ArcMap.

Ο τύπος για την πραγματοποίηση της μετατροπής σε ToA Radiance είναι από την επίσημη ιστοσελίδα USGS (<https://landsat.usgs.gov/landsat-8-l8-data-users-handbook>).

$$L_{\lambda} = M_{\lambda}Q_{cal} + A_L$$

Όπου:

$$L_{\lambda} = \text{Φασματική Ακτινοβολία (Spectral Radiance)} \frac{W}{m^2 * sr * \mu m}$$

M_L = Πολλαπλασιαστικός συντελεστής κλίμακας για την μπάντα
($RADIANCE_MULT_BAND_x$ από τα μεταδεδομένα, όπου x το νούμερο του θερμικού καναλιού)

A_L = Συντελεστής κλιμάκωσης πρόσθετης ακτινοβολίας για την μπάντα
($RADIANCE_ADD_BAND_x$ από τα μεταδεδομένα, όπου x το νούμερο του θερμικού καναλιού)

Q_{cal} = L1 η τιμή του pixel σε DN

4.3.3: Εύρεση του PV (PROPORTION OF VEGETATION) με τη χρήση του NDVI και υπολογισμός του e ή LSE (LAND SURFACE EMISSIVITY):

$$PV = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2$$

Στην παρούσα εργασία, ο NDVI βγαίνει αρνητικός, καθώς μελετάμε νησί και πολλά pixel έχουν παρουσία νερού, άρα ο τύπος μόνον για την περίπτωση που ο NDVI έχει αρνητικό πρόσημο, προσαρμόζεται και γίνεται:

$$PV = \left(\frac{NDVI + NDVI_{min}}{NDVI_{max} + NDVI_{min}} \right)^2$$

Έπειτα:

$$LSE = 0.004 * PV + 0.986$$

4.3.4: Υπολογισμός του LST (LAND SURFACE TEMPERATURE):

Για να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός της Θερμοκρασίας της Επιφάνειας, χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$\frac{BT}{1 + W * \left(\frac{BT}{P} \right) * \ln(e)}$$

Όπου:

$$\text{➤ } BT = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_{\lambda} + 1}\right)} - 272.15$$

Η εξίσωση αυτή πραγματοποιεί μετατροπή της ακτινοβολίας σε θερμοκρασία φωτεινότητας (brightness temperature) την ώρα που ο δορυφόρος έχει λάβει τη συγκεκριμένη δορυφορική εικόνα.

Η αφαίρεση στο τέλος της εξίσωσης είναι για να βγει το αποτέλεσμα σε βαθμούς Κελσίου.

Τα $K1$ και $K2$ αποτελούν τις θερμικές μετατροπές για τα κανάλια, όπου βρίσκονται στα μεταδεδομένα ως $K1_CONSTANT_BAND_x$ και $K2_CONSTANT_BAND_x$ αντίστοιχα (όπου x ο αριθμός του καναλιού).

- W= Το κάθε θερμικό κανάλι
- $P = h * \frac{c}{s} = 14.380,$
Όπου,
h: σταθερά του Planck
c: ταχύτητα του φωτός
s: σταθερά του Boltzmann

Από τον τύπο του Planck, όπου συνέβαλε ο τύπος των Stephan – Boltzmann ($E = \sigma T^4$) είναι βασικό να γίνει κατανοητό πως όσο υψηλότερη θερμοκρασία έχει ένα σώμα, τόσο περισσότερη ακτινοβολία θα εκπέμπει.

Καθώς μελετάται το νησιωτικό σύμπλεγμα της Σαντορίνης, και η θάλασσα κατέχει ένα μεγάλο τμήμα στη δορυφορική εικόνα, στα αποτελέσματα του LST παρουσιάζονται ακραίες αρνητικές τιμές (έως και -130). Για να μην υπάρχει πρόβλημα στην οπτικοποίηση της μελέτης των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας στην ξηρά, πραγματοποιήθηκε αποκλεισμός των αρνητικών τιμών έως το μηδέν, μέσω της εντολής Data Exclusion του Classification.

- Εύρεση μέσου όρου καναλιών: $(BAND10LST + BAND11LST)/2$
Αυτό πραγματοποιείται καθώς το θερμικό κανάλι 10 είναι high resolution, ενώ το θερμικό κανάλι 11 είναι low resolution, άρα καταγράφουν τη θερμοκρασία σε δύο διαφορετικά μήκη κύματος. Επομένως, για να είναι τα συμπεράσματα πιο σωστά, είναι ορθό να υπολογισθεί ο μέσος όρος των καναλιών αυτών.

4.3.5: Επεξεργασία Δορυφορικών Εικόνων Landsat 5:

Αντίστοιχη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων από τον Landsat 8 ακολουθήθηκε και για τις εικόνες του Landsat 5, με τις διαφορές ότι ο Landsat 5 έχει ένα θερμικό κανάλι και διαφορετικές σταθερές από εκείνες του Landsat 8.

Επομένως, στη ραδομετρική διόρθωση ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα (Chander, Markham, & Helder, 2009):

1. Μετατροπή των Digital Numbers (dN) των καναλιών σε ακτινοβολία (Radiance), βάση του τύπου:

$$L\lambda = Gain * Q_{cal} + Bias$$

Όπου,

Gain και Bias είναι σταθερές τιμές (εμφανίζονται στον πίνακα σταθερών για τον Landsat 5) και,

Qcal είναι το αντίστοιχο κανάλι.

2. Μετατροπή τιμών radiances Lλ σε τιμών ανακλαστικότητας (reflectance) για όλα τα κανάλια εξαιρουμένου του θερμικού, βάση του τύπου:

$$P\lambda = \frac{\pi * L\lambda * d^2}{E_{sun} * \cos\theta_s}$$

Όπου,

$\pi = 3,14$

Lλ= Οι τιμές radiances για το κάθε κανάλι

d= Η απόσταση του δορυφόρου από τον ήλιο τη συγκεκριμένη ημέρα

E_{sun}= Το υψόμετρο του ήλιου

cosθ_s= Το ημίτονο της ηλιακής γωνίας ζενίθ

Το E_{sun} εμφανίζεται στον πίνακα με τις σταθερές του Landsat 5, ενώ το cosθ_s υπάρχει στα μεταδεδομένα (metadata) της κάθε δορυφορικής εικόνας, τα οποία είναι κείμενο υπό τη μορφή MTL.

Τέλος, για το θερμικό κανάλι, για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε ο τύπος:

$$BT = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_{\lambda}+1}\right)} - 272.15,$$

Όπου οι τιμές K1 και K2 είναι σταθερές και εμφανίζονται στον πίνακα με τις σταθερές του Landsat 5.

4.3.6: Πίνακες Σταθερών Τιμών:

- Πίνακας 2, Landsat 8:

P	14380
M _L	0.0003342
A _L	0.1
Q _{cal}	Thermal Band
K1 για το κανάλι 10	774.8853
K2 για το κανάλι 10	1321.0789
K1 για το κανάλι 11	480.8883
K2 για το κανάλι 11	1201.1442

- Πίνακας 3, Landsat 5:

Κανάλι	Φασματικό Εύρος (μm)	Gain	Bias	Esun	K1	K2
Green	0.528-0.609	1.322205	-4.16	1796	-	-
Red	0.626-0.693	1.043976	-2.21	1536	-	-
NIR	0.776-0.904	0.87624	-2.39	1031	-	-
SWIR	1.567-1.784	0.120354	-0.49	220.0	-	-
TIRS	10.45-12.42	0.055376	1.18	-	607.76	1260.56

- Πίνακας 4, δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν

Landsat5	Σχόλια	Landsat7	Σχόλια	Landsat8	Σχόλια	Landsat8	Σχόλια
2011	-	2012	-	2017	-	2018	-
5 Ιανουαρίου	-	-	-	X Ιανουαρίου	No Data	8 Ιανουαρίου	Νέφη
6 Φεβρουαρίου	Νέφη	-	-	6 Φεβρουαρίου	-	25 Φεβρουαρίου	Νέφη
26 Μαρτίου	Νέφη	-	-	26 Μαρτίου	Νέφη	20 Μαρτίου	Νέφη, Κομμένη Σαντορίνη
27 Απριλίου	-	-	-	27 Απριλίου	-	14 Απριλίου	-
29 Μαΐου	-	-	-	13 Μαΐου	-	-	-
30 Ιουνίου	-	-	-	30 Ιουνίου	-	-	-
16 Ιουλίου	-	-	-	16 Ιουλίου	-	-	-
1 Αυγούστου	-	-	-	1 Αυγούστου	-	-	-
18 Σεπτεμβρίου	-	-	-	18 Σεπτεμβρίου	-	-	-
20 Οκτωβρίου	-	-	-	20 Οκτωβρίου	-	-	-
X Νοεμβρίου	No Data	-	-	5 Νοεμβρίου	Νέφη	-	-
X Δεκεμβρίου	No Data	-	-	7 Δεκεμβρίου	-	-	-

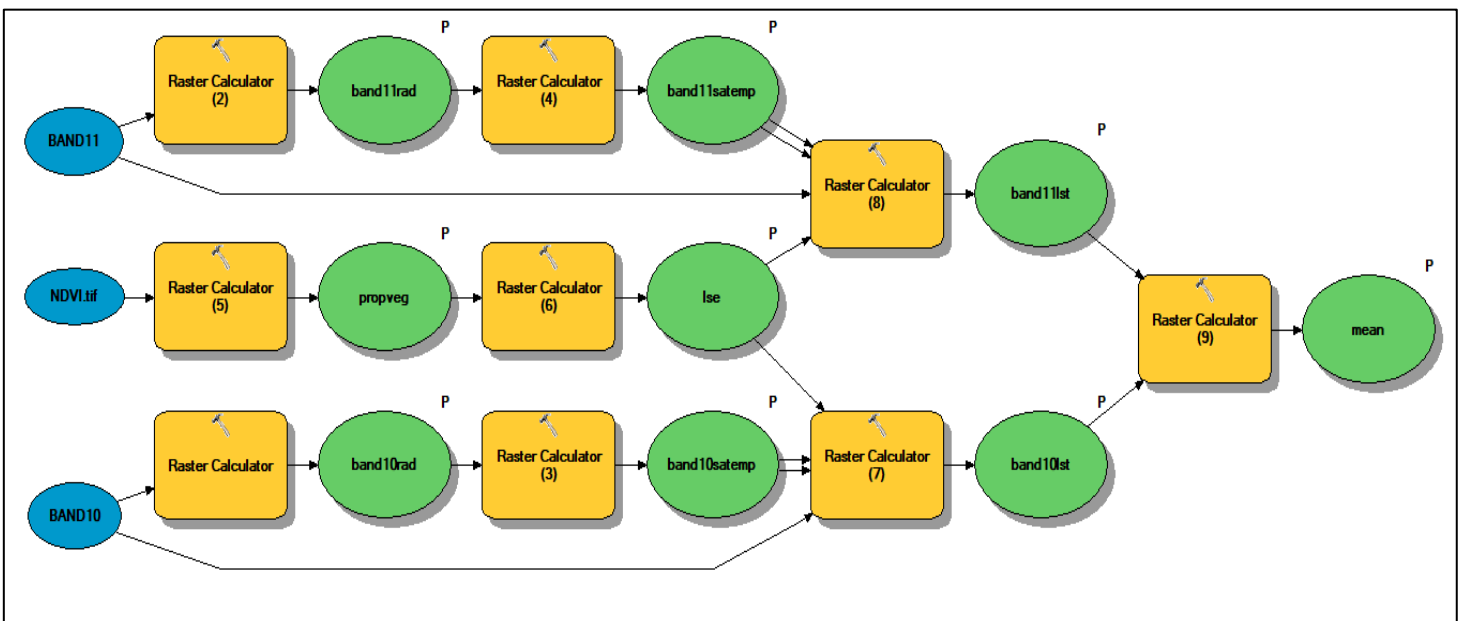
Στον παραπάνω πίνακα, με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται οι ημερομηνίες που δεν χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη, είτε επειδή δεν υπήρχαν δεδομένα είτε επειδή εμφάνιζαν κάποιο πρόβλημα. Για τον Landsat 7 δεν έγινε καμία καταχώρηση λόγω των κενών που εμφανίζουν οι δορυφορικές στον κρατήρα. Τέλος, για το έτος 2018 η συλλογή δεδομένων σταμάτησε τον Απρίλιο, καθώς τότε ολοκληρώθηκε η έρευνα για τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

Κεφάλαιο 5:

Επεξεργασία και Ανάλυση δεδομένων:

5.1: Landsat 8:

Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο της μοντελοποίησης του ArcMap 10.2.2 “Model Builder”. Οι λόγοι που οδήγησαν στην χρήση αυτού του εργαλείου ήταν στο να πραγματοποιούνται πιο γρήγορα οι πράξεις του Raster Calculator, όπως επίσης και προς αποφυγή λαθών από το χρήστη κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των πράξεων. Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 42) απεικονίζεται η πορεία που ακολούθησε το μοντέλο ώστε να αποκτηθεί το τελικό αποτέλεσμα της μέσης θερμοκρασίας από τα δύο θερμικά κανάλια (LST από τα κανάλια 10 και 11).

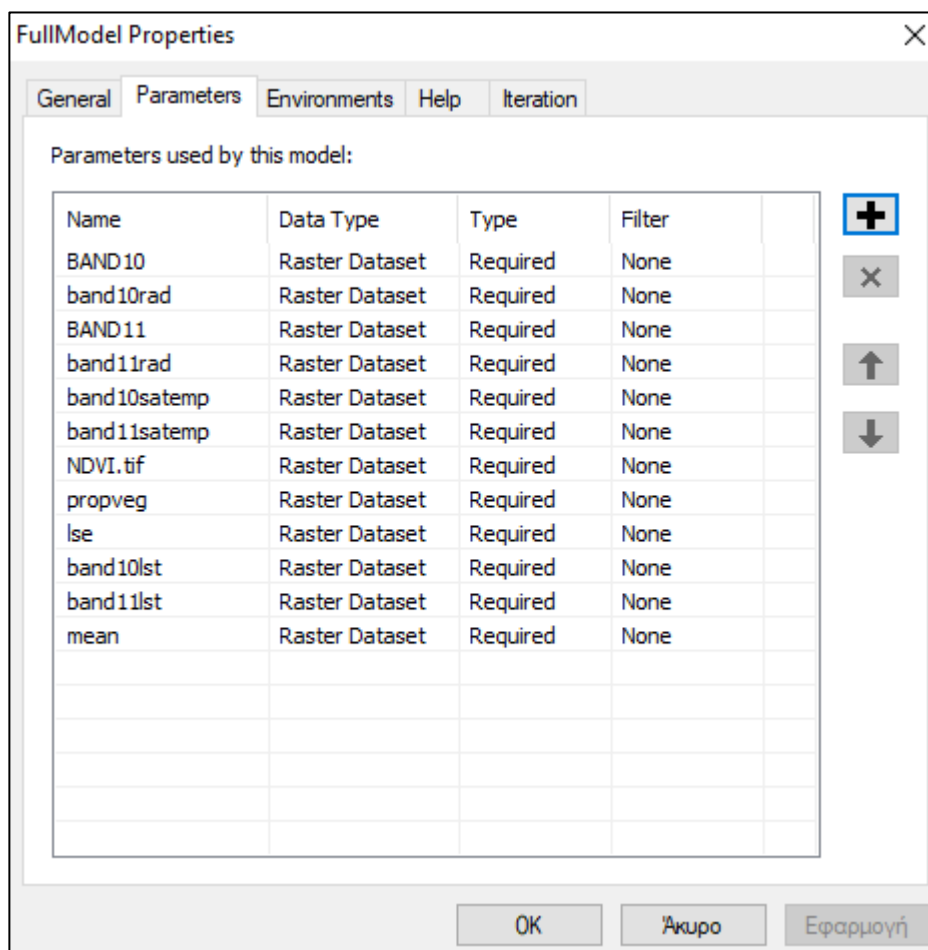


Εικόνα 42: Δομή του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πράξεων με σκοπό το τελικό αποτέλεσμα της θερμοκρασίας επιφάνειας

Στο απεικονιζόμενο μοντέλο με μπλε χρώμα εμφανίζονται τα πρωτογενή δεδομένα, με κίτρινο χρώμα το εργαλείο του ArcToolbox που χρησιμοποιήθηκε (Raster Calculator) και με πράσινο χρώμα εμφανίζονται τα ενδιάμεσα ή τελικά στάδια των πράξεων. Οι σκιάσεις που εμφανίζονται στα στοιχεία με κίτρινο και πράσινο χρώμα, είναι η απόδειξη ότι η εντολή έχει «τρέξει». Τέλος, στα στοιχεία που εμφανίζει πάνω δεξιά το “P”, σημαίνει ότι είναι παράμετρος (parameter) που αλλάζει στο συγκεκριμένο μοντέλο κάθε φορά που εισάγεται νέα δορυφορική εικόνα.

Συνήθως, το εργαλείο Model Builder χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται η επαναλαμβανόμενη εκτέλεση πράξεων, εργαλείων ή διαδικασιών και γι αυτό το λόγο

δημιουργείται το αυτοματοποιημένο μοντέλο. Ωστόσο, στην περίπτωση της συγκεκριμένης μελέτης, υπάρχουν αλλαγές στα δεδομένα, καθώς ενώ η μεθοδολογία και οι πράξεις είναι ίδιες, αλλάζουν κάθε φορά τα κανάλια, εφόσον για κάθε χάρτη χρησιμοποιήθηκε διαφορετική δορυφορική εικόνα. Επομένως, για να λειτουργήσει σωστά το μοντέλο, πρέπει να ορισθούν στις ρυθμίσεις του (Model Properties) οι παράμετροι οι οποίες κάθε φορά θα είναι διαφορετικές (Εικόνα 43).

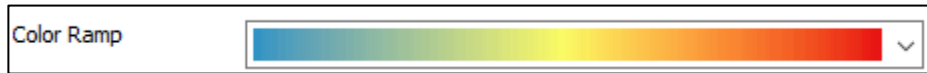


Εικόνα 43: Παρουσίαση παραμέτρων που αλλάζουν στη συγκεκριμένη μελέτη

Εναλλακτικά, σε περίπτωση που ο υπολογιστής δεν μπορεί να υποστηρίξει ένα, σχετικά, μεγάλο μοντέλο, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να φτιάξει επιμέρους μοντέλα τα οποία θα εκτελούν τις κάθε πράξεις ξεχωριστά.

Κατά την ομαδοποίηση των τιμών της θερμοκρασίας που προέκυψε από τον μ.ο. των τιμών των θερμικών καναλιών, θεωρήθηκε πιο ορθό να συγκριθούν οι τιμές έχοντας κατηγοριοποιηθεί σε ομάδες ανά 5 (π.χ. 0-5, 5.01-10 κ.ο.κ.), παρά έχοντας κοινή ομαδοποίηση 5 κατηγοριών. Αυτό συνέβη καθώς σε κάποιες περιπτώσεις υπήρχαν ακραίες θερμοκρασίες που έπρεπε να αποτυπωθούν, και ενσωματώνοντας τις σε ομάδες 5 κατηγοριών, το αποτέλεσμα αλλοιωνόταν. Η τελική τιμή ορίστηκε το 51, καθώς η μεγαλύτερη τιμή που μετρήθηκε κατά το 2017 άγγιζε τους 51 °C. Επομένως, για τη

σωστότερη σύγκριση μεταξύ των χρονολογιών 2011 και 2017, έπρεπε να χρησιμοποιηθεί κοινή χρωματική παλέτα και κοινές κατηγορίες θερμοκρασιών. Η χρωματική παλέτα έχει την ονομασία Prediction (Εικόνα 44). Ως υπόβαθρο χρησιμοποιήθηκε το Σκιασμένο Ανάγλυφο της περιοχής (Hillshade) το οποίο προέκυψε από το DEM, με διαφάνεια (transparency) 20%.



Εικόνα. 44: Χρωματική παλέτα που χρησιμοποιήθηκε

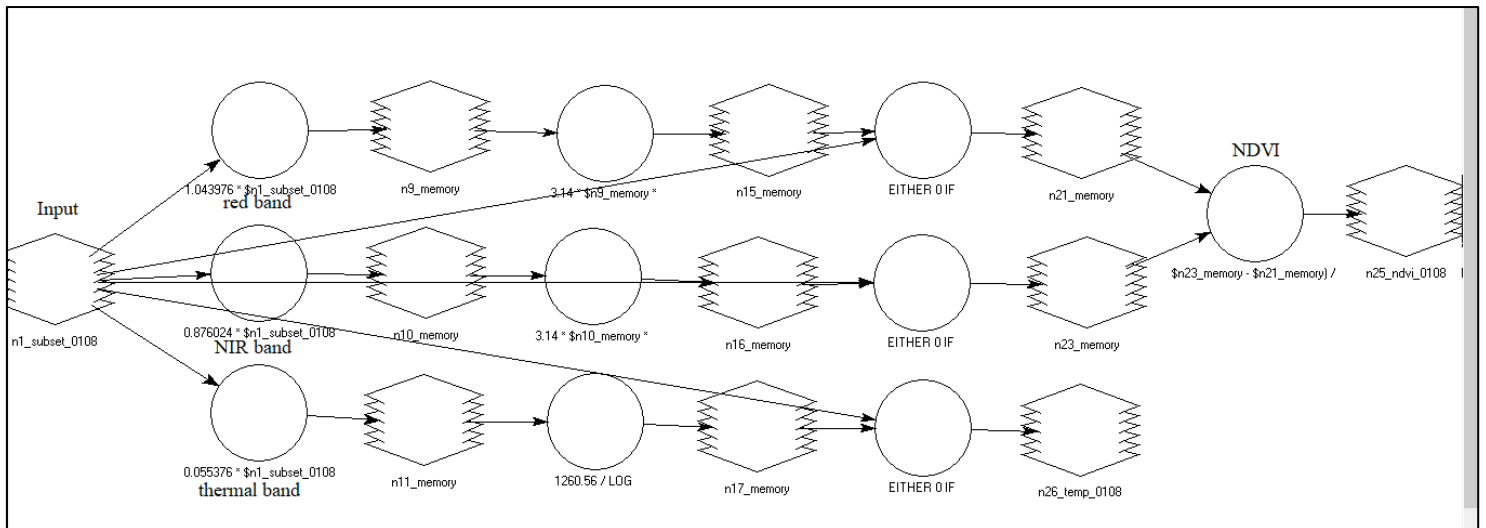
Ο μήνας Ιούνιος ήταν πιο ιδιαίτερος στην επεξεργασία, καθώς πραγματοποιήθηκε μια συγκριτική μελέτη μεταξύ των τιμών της θερμοκρασίας εδάφους από δορυφόρο και από επίγειες μετρήσεις, μέσω του δείκτη LST και των τιμών των θερμοκρασιών που καταγράφηκαν από το πεδίο.

Τα νέφη που επηρεάζουν την εξέλιξη της μελέτης είναι εκείνα τα οποία βρίσκονται πάνω από το νησί της Νέας Καμένης. Ο λόγος για τον οποίο καθίσταται προβληματικό αυτό το φαινόμενο είναι διότι κατά την ατμοσφαιρική διόρθωση, όταν πραγματοποιείται αφαίρεση των νεφών, τα pixels τα οποία βρίσκονται κάτω από τα νέφη παίρνουν την τιμή μηδέν (0), και όλα τα υπόλοιπα pixels την τιμή ένα (1). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, κατά την επεξεργασία της εικόνας να χάνονται δεδομένα καθώς η τιμή μηδέν παραμένει ως υφιστάμενη τιμή της επεξεργαζόμενης δορυφορικής εικόνας.

5.2: Landsat 5:

Η αρχική επεξεργασία των εικόνων που προέρχονται από τον δορυφόρο Landsat 5, πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Erdas, καθώς θεωρήθηκε χρησιμότερο για την βέλτιστη διεκπεραίωση των συγκεκριμένων σταδίων επεξεργασίας. Ως πρώτο βήμα ήταν η δημιουργία ενός κοινού πεδίου, το οποίο θα είχε τα δύο κανάλια που αφορούν τη δημιουργία του NDVI (band 3, band 4), και το μοναδικό θερμικό κανάλι (band 6), ώστε να φτιαχτούν δύο μοντέλα που θα εκτελούν τις επόμενες πράξεις αυτόματα. Έπειτα, ακολούθησε η περικοπή της εικόνας μόνο στην περιοχή της Σαντορίνης, έτσι ώστε όταν τρέχουν τα μοντέλα τα οποία θα έχουν ως αποτέλεσμα την επίγεια θερμοκρασία, να έχουν τιμές μόνο για το νησιωτικό σύμπλεγμα της Σαντορίνης. Το βήμα αυτό έγινε μέσω της εντολής Subset & Chip.

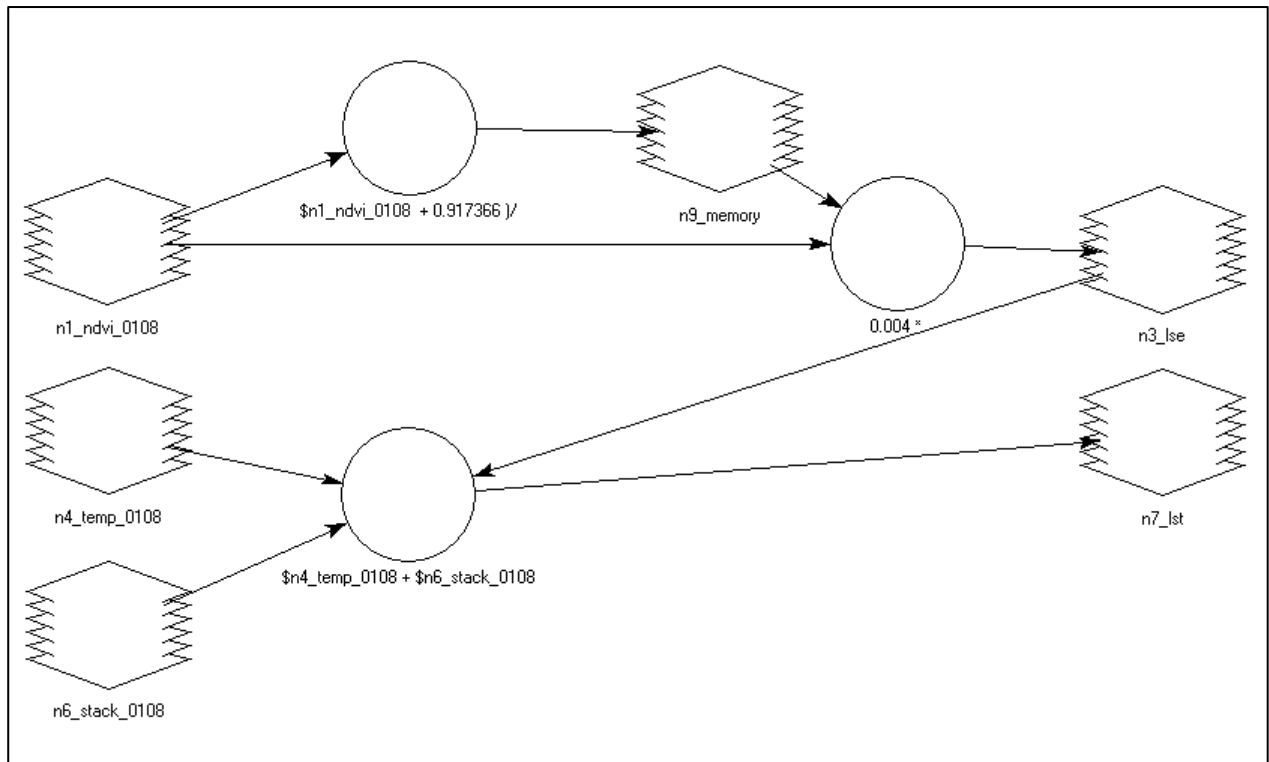
Το πρώτο σημαντικό μοντέλο που δημιουργήθηκε ήταν για τον υπολογισμό του NDVI. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 45) εμφανίζεται η μορφή του μοντέλου.



Εικόνα 45: Μοντέλο προς τον υπολογισμό του NDVI στο πρόγραμμα Erdas

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται εμφανίζεται και η συνθήκη για την περίπτωση που η δορυφορική εικόνα έχει σύννεφα και πρέπει να προχωρήσουμε στην ατμοσφαιρική διόρθωσή της. Ως input, ενδιάμεσα στάδιο και output εμφανίζονται τα στοιχεία που έχουν το περίπου τριγωνικό σχήμα, ενώ με κύκλο εμφανίζονται τα στοιχεία στα οποία πραγματοποιούνται οι πράξεις. Δηλαδή, στα input και στα ενδιάμεσα στάδια εισάγονται τα δεδομένα τα οποία διαφοροποιούνται ανά δορυφορική εικόνα, δηλαδή αλλάζει το κύριο input (η δορυφορική εικόνα) και τα εκάστοτε αποτελέσματα τιμών από τις εξισώσεις, που εμφανίζονται στα ενδιάμεσα στάδια των πράξεων.

Το επόμενο μοντέλο δημιουργήθηκε για τον υπολογισμό του Land Surface Temperature (LST) και εμφανίζεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 46):



Εικόνα 46: Μοντέλο που χρησιμοποιεί τον NDVI προς υπολογισμό της τελικής θερμοκρασίας επιφάνειας

Στην παραπάνω εικόνα, χρησιμοποιείται ο NDVI από το προηγούμενο στάδιο, υπολογίζεται το Land Surface Emissivity (LSE) και ως τελικό αποτέλεσμα εμφανίζεται το LST.

Η περαιτέρω επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων από τον Landsat 5 έγινε στο πρόγραμμα ArcMap 10.2.2 για να υπάρχει ένα ομοιόμορφο οπτικό αποτέλεσμα σε όλες τις δορυφορικές εικόνες από όλους τους δορυφόρους που χρησιμοποιήθηκαν.

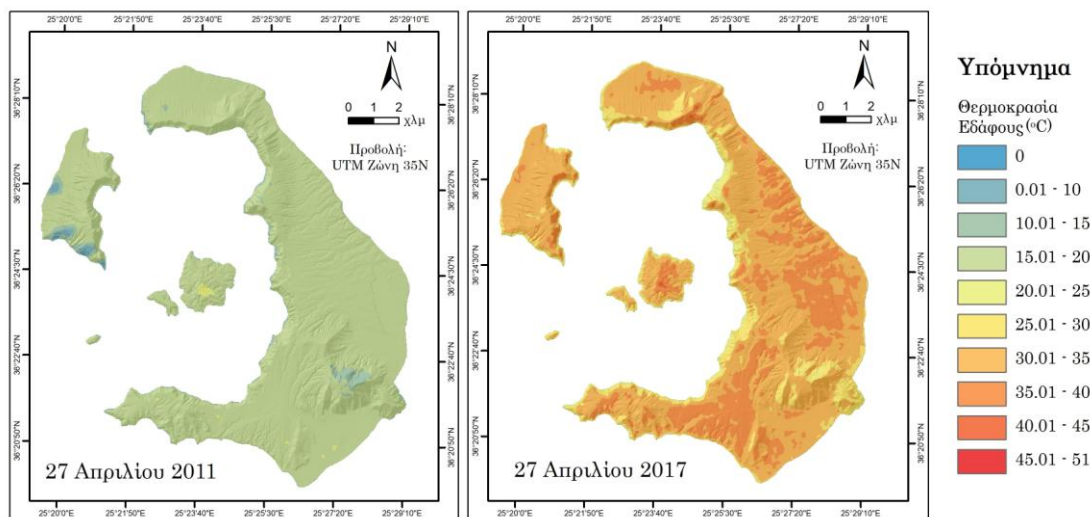
Κεφάλαιο 6:

Αποτελέσματα:

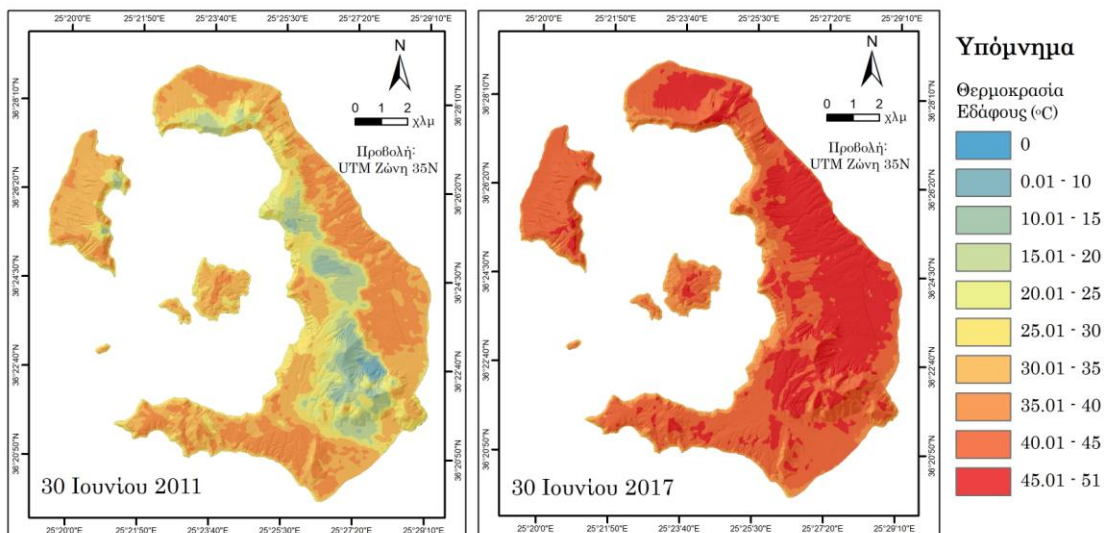
Ο τρόπος που ανακλάται η ηλιακή ακτινοβολία πίσω στη Γη εξαρτάται και από το είδος της επιφάνειας που την ανακλά. Για παράδειγμα, η φασματική συμπεριφορά των πυριγενών πετρωμάτων είναι διαφορετική από εκείνη των μεταμορφωμένων (Salisbury & D'Aría, 1992). Επίσης, μια έκταση Γης η οποία καλύπτεται από φυτοκάλυψη συγκριτικά με μια αστική περιοχή, εκπέμπουν διαφορετικά την ηλιακή ακτινοβολία.

Ένα μειονέκτημα σύγκρισης των ετών 2011 και 2017 έγκειται στη διαφορετική χωρική ανάλυση που έχει ο Landsat 5 και ο Landsat 8 στα θερμικά κανάλια τους, καθώς ο Landsat 5 έχει 120 μέτρα ενώ ο Landsat 8 έχει 100 μέτρα (Jimenez-Munoz, Sobrino, Skokonic, Mattar, & Cristobal, 2014).

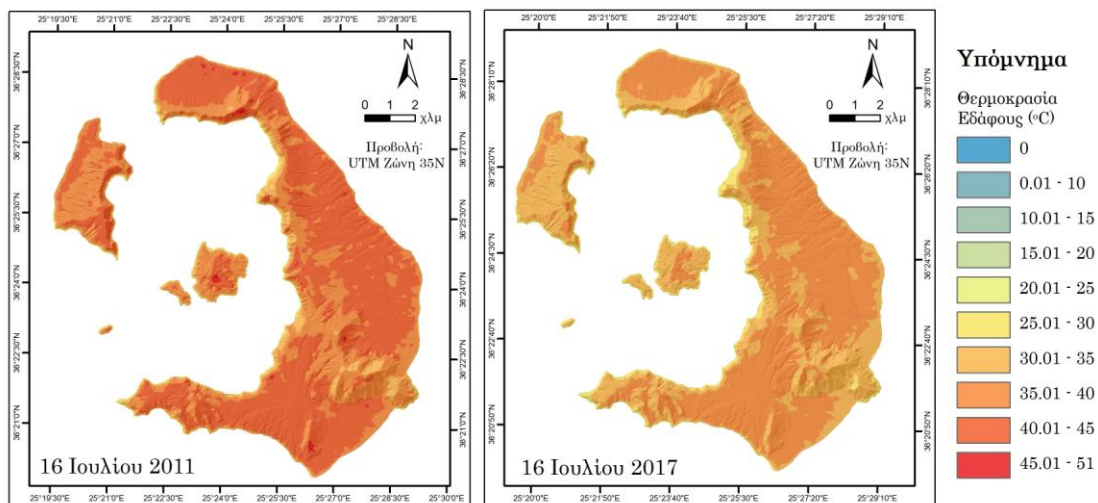
Παρακάτω εμφανίζονται έξι ζευγάρια χαρτών, τα οποία παρουσιάζουν τη θερμοκρασία εδάφους μέσω δορυφορικών εικόνων για τα έτη 2011 (Landsat 5) και 2017 (Landsat 8). Για τον Ιούνιο του 2011 έχει να παρατηρηθεί ότι στο κεντρικό τμήμα της Σαντορίνης υπάρχει η παρουσία νεφών, όμως δεν πραγματοποιήθηκε ατμοσφαιρική διόρθωση καθώς η διαφορά μεταξύ της χρονολογίας 2011 και 2017 είναι εμφανή, με τιμές σχεδόν διπλάσιες.



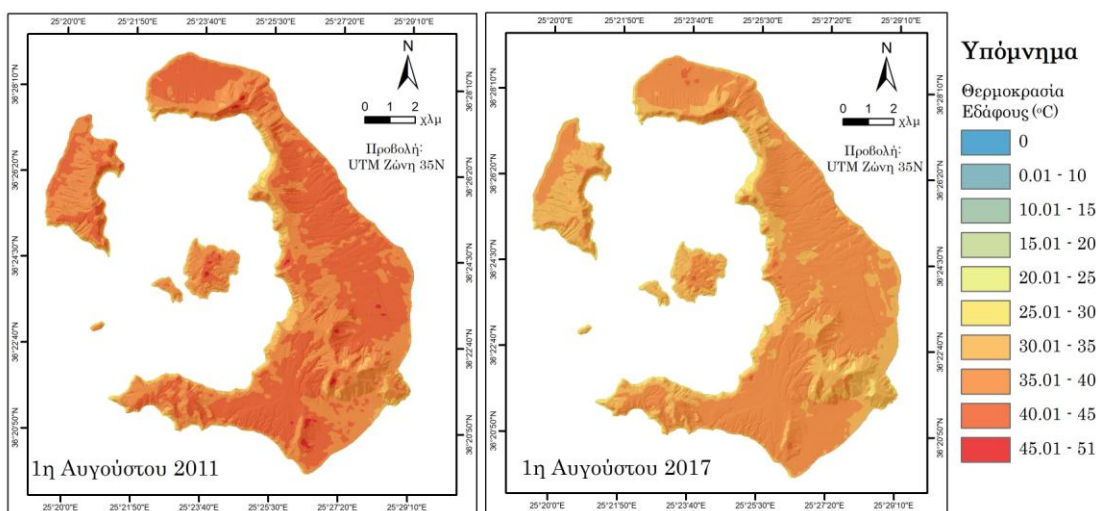
Χάρτης 7: Ζευγάρι χαρτών για τον μήνα Απρίλιο



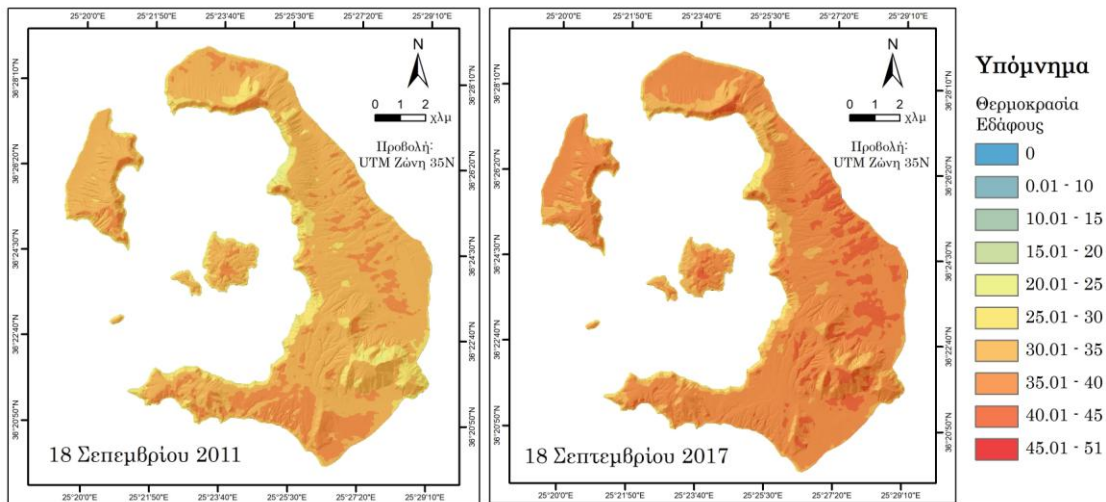
Χάρτης 8: Ζευγάρι χαρτών για το μήνα Ιούνιο



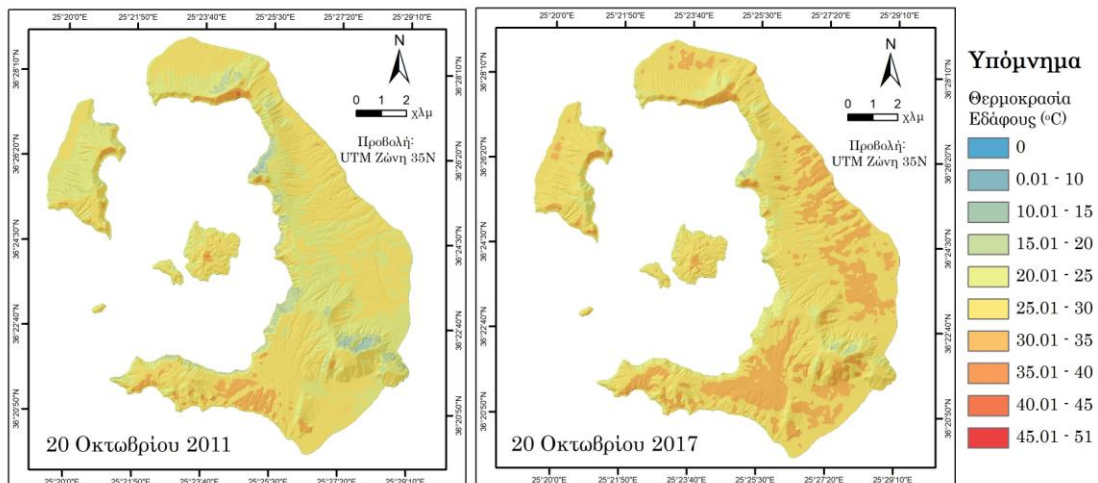
Χάρτης 9: Ζευγάρι χαρτών για το μήνα Ιούλιο



Χάρτης 10: Ζευγάρι χαρτών για το μήνα Απρίλιο



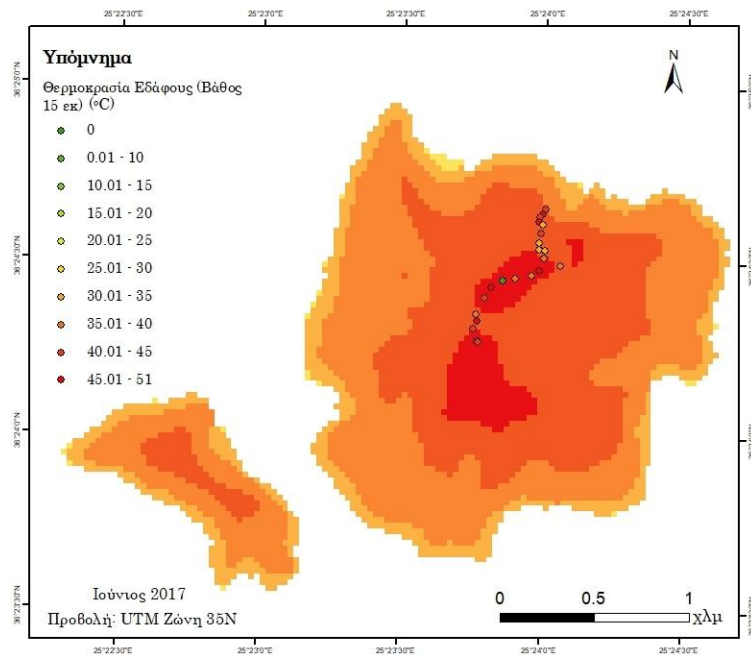
Χάρτης 11: Ζευγάρι χαρτών για το μήνα Σεπτέμβριο



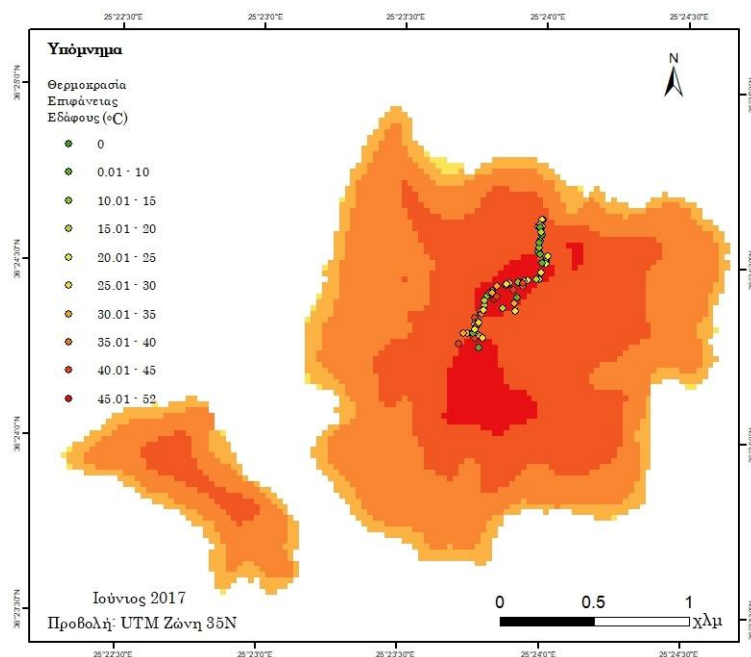
Χάρτης 12: Ζευγάρι χαρτών για το μήνα Οκτώβριο

Στους δύο χάρτες που ακολουθούν, εμφανίζονται οι τιμές θερμοκρασίας εδάφους σε βάθος 15 εκατοστών και οι τιμές επιφάνειας εδάφους που μετρήθηκαν στο πεδίο με τα ειδικά όργανα. Οι τιμές καταγράφηκαν στις 6 Ιουνίου 2017. Οι χάρτες εμφανίζονται σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία εδάφους από το δορυφόρο Landsat 8. Το υπόβαθρο του χάρτη εμφανίζει τα συγκεκριμένα χρώματα, καθώς είναι οι θερμοκρασίες εδάφους από το δορυφόρο, με το ίδιο υπόμνημα που έχουν οι θερμοκρασίες εδάφους (βάθους και επιφανείας), ώστε να είναι συγκρίσιμες.

Όσον αφορά αναλυτικά τις τιμές της θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους, εδάφους σε βάθος 15 εκατοστών, θερμοκρασία και υγρασία αέρα αλλά και τις υπόλοιπες μεταβλητές που μετρήθηκαν στο πεδίο, αναφέρονται αναλυτικά στο Παράρτημα II.



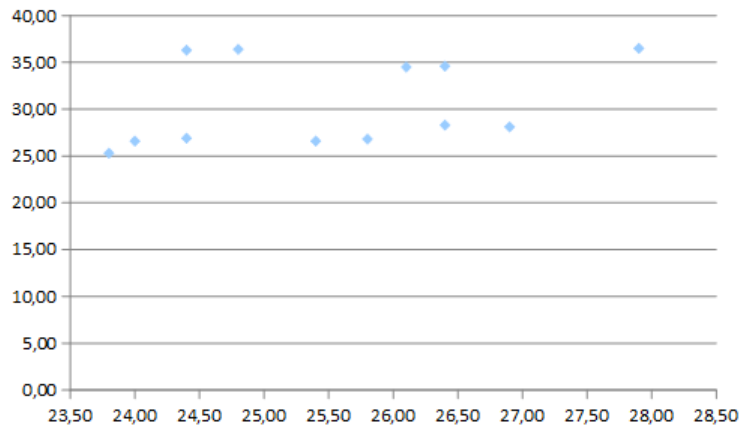
Χάρτης 13: Απεικόνιση θερμοκρασίας εδάφους σε βάθος 15 εκατοστών, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία εδάφους από δορυφόρο για το μήνα Ιούνιο (2017)



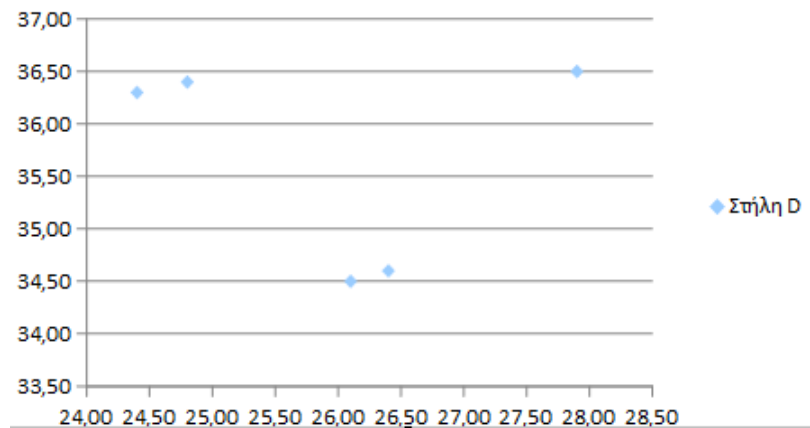
Χάρτης 14: Απεικόνιση θερμοκρασίας εδάφους επιφάνειας, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία εδάφους από δορυφόρο για το μήνα Ιούνιο (2017)

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Διάγραμμα 2), εμφανίζονται οι θερμοκρασίες επιφανείας εδάφους σχετικά με τις τιμές της θερμοκρασίας αέρα. Παρατηρείται ότι οι τιμές έχουν την τάση να δημιουργήσουν ζεύγος τιμών ανάλογα και με τη θέση από την οποία έχει γίνει η μέτρηση.

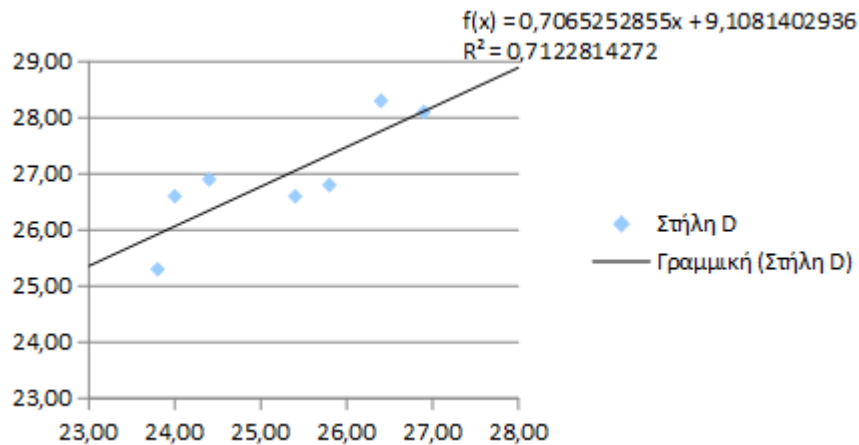
Θερμοκρασία Εδάφους



Διάγραμμα 2: Θερμοκρασία αέρα (άξονας x) σχετικά με τη θερμοκρασία εδάφους (άξονας y)
 Στο παρακάτω διάγραμμα (Διάγραμμα 3) εμφανίζεται η συσχέτιση των τιμών που δεν εμφανίζουν μεγάλη διαφορά μεταξύ των τιμών θερμοκρασίας αέρα και θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους, ενώ στο διάγραμμα 4 εμφανίζονται οι τιμές που παρουσιάζουν απόκλιση στις τιμές της θερμοκρασίας.

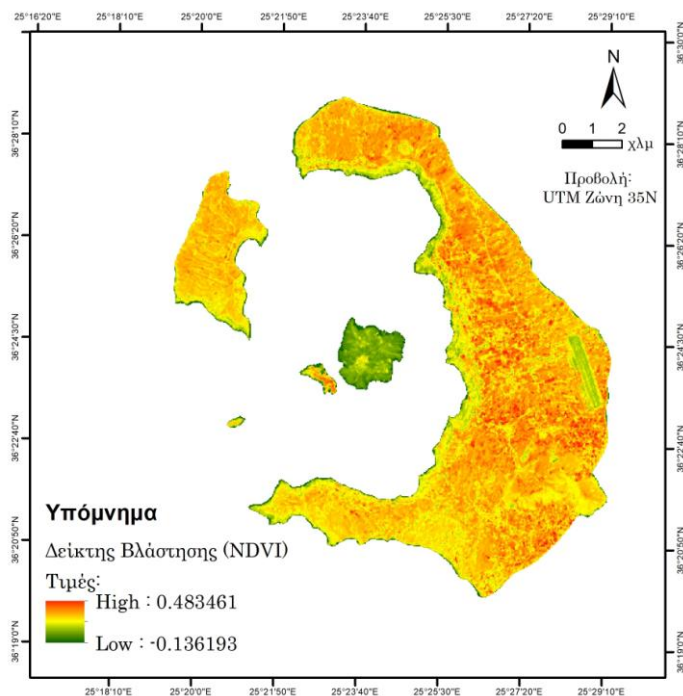


Διάγραμμα 2: Ζεύγη τιμών με μικρή απόκλιση



Διάγραμμα 3: Ζεύγη τιμών με μεγάλη απόκλιση

Στον παρακάτω χάρτη (Χάρτης 15) απεικονίζεται ο δείκτης βλάστησης για την περιοχή της Σαντορίνης. Παρατηρείται πως στο νησί της Νέας Καμένης δεν υπάρχει σχεδόν καθόλου βλάστηση, γεγονός που εξηγεί εν μέρει τη μεγάλη θερμοκρασία εδάφους και την ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας από το έδαφος.



Χάρτης 15: Ενδεικτικός δείκτης βλάστησης για τον μήνα Ιούνιο 2017

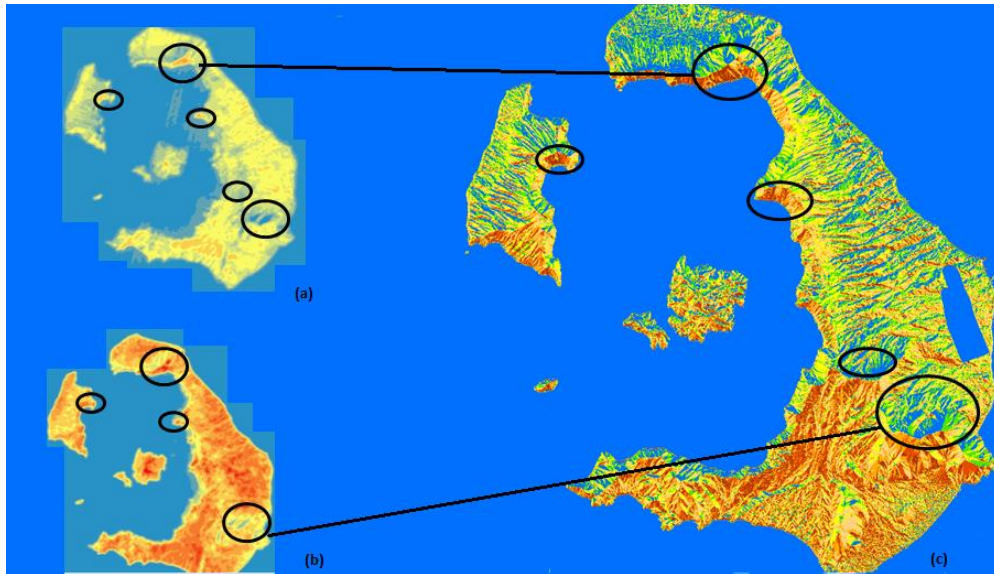
Τα δεδομένα από τους υπόλοιπους μήνες των ετών 2011, 2017 και κάποιων μηνών του 2018 δεν χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή, καθώς δεν υπήρχε μέτρο σύγκρισης μεταξύ τους. Ωστόσο, στο Παράρτημα παρουσιάζονται και οι υπόλοιποι χάρτες με τις συνολικές θερμοκρασίες εδάφους.

Συζήτηση – Συμπεράσματα:

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων που αποκτήθηκαν από δορυφορικές εικόνες των δορυφόρων Landsat 5 και Landsat 8, αλλά και από τις τιμές που καταγράφηκαν στην έρευνα πεδίου τον Ιούνιο 2017. Μέσω της τηλεπισκόπησης και της εφαρμογής των θερμικών καναλιών των δορυφόρων σε ηφαιστειογενείς περιοχές, έγινε κατανοητό το πόσο σημαντική είναι η συνεχής επίβλεψη των περιοχών που έχουν ενεργά ηφαιστεια. Μια περιοχή η οποία έχει καταγεγραμμένη ενεργή ηφαιστειακή δραστηριότητα, στην περίπτωση που εμφανίσει έστω και ένα από τα πρόδρομα φαινόμενα της ηφαιστειακής έκρηξης, σε συνδυασμό με την ανάλυση της θερμοκρασίας του εδάφους την περίοδο που καταγράφονται τα πρόδρομα φαινόμενα, μπορεί να αποτελέσει σωτήρια μελέτη για τις ζωές των ανθρώπων.

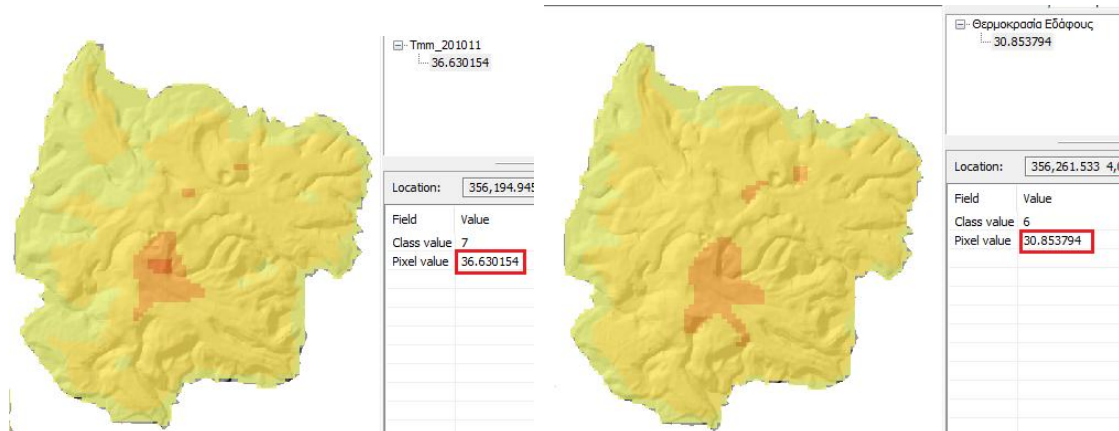
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης των θερμοκρασιών που συγκρίθηκαν μεταξύ τους στα έτη 2011 και 2017, μόνο ο Ιούλιος και ο Αύγουστος εμφανίζουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες κατά το έτος 2011, γεγονός που είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον διότι το 2011 μέχρι τις αρχές του 2012 η Νέα Καμένη εμφάνιζε έντονη ηφαιστειακή δραστηριότητα. Στους υπόλοιπους μήνες, οι τιμές της θερμοκρασίας για το έτος 2017 εμφάνιζαν μεγαλύτερα μεγέθη, με χαρακτηριστικότερο παράδειγμα τον Απρίλιο και τον Ιούνιο του 2017.

Στην περιοχή του κρατήρα του Αγίου Γεωργίου στη Νέα Καμένη, εμφανίζονται σταθερά υψηλότερες θερμοκρασίες, τόσο συγκριτικά με την υπόλοιπη Νέα Καμένη, αλλά και με το νησί της Σαντορίνης. Βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμοκρασία του εδάφους είναι η κλίση και ο προσανατολισμός που έχει το έδαφος, το σημείο του ήλιου τη στιγμή που γίνεται η μέτρηση, η εποχή και οι παρούσες καιρικές συνθήκες και τέλος οι χρήσεις γης και η βλάστηση. Εξίσου, στο νησί της Σαντορίνης κάποια σημεία εμφανίζουν σταθερά υψηλότερη θερμοκρασία, ακόμη και τους χειμερινούς μήνες, ενώ κάποια άλλα σημεία εμφανίζουν χαμηλότερη, γεγονός που οφείλεται στον προσανατολισμό της περιοχής (Εικόνα 47). Στην εικόνα (a) εμφανίζεται η θερμοκρασία εδάφους το μήνα Οκτώβριο, στην εικόνα (b) το μήνα Απρίλιο, ενώ στην εικόνα (c) απεικονίζεται ο προσανατολισμός της Σαντορίνης. Κάποιες περιοχές, λοιπόν, που βρίσκονται σε νότιο προσανατολισμό εμφανίζουν συστηματικά υψηλές θερμοκρασίες επιφάνειας εδάφους, ενώ κάποιες περιοχές με βόρειο προσανατολισμό, εμφανίζουν σταθερά χαμηλότερες θερμοκρασίες, συγκριτικά πάντα με το υπόλοιπο νησιωτικό σύμπλεγμα της Σαντορίνης.



Εικόνα 47: Προσανατολισμός Σαντορίνης

Ένα ακόμη ενδιαφέρον συμπέρασμα αφορά τα ζεύγη χαρτών του μήνα Οκτωβρίου. Οι θερμοκρασίες εδάφους στην Νέα Καμένη, της χρονιάς 2011, είναι υψηλότερες από εκείνες της χρονιάς του 2017, ενώ το υπόλοιπο νησιωτικό σύμπλεγμα εμφανίζει συνολικά υψηλότερες θερμοκρασίες το 2017 (Χάρτες 16 & 17). Το γεγονός αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στη σεισμική δραστηριότητα και στην έκλυση αερίων και μάγματος.



Χάρτες 16 & 17: Στον αριστερά χάρτη (χάρτης 16) εμφανίζεται η θερμοκρασία του κρατήρα το έτος 2011 με θερμοκρασία περίπου 36,7 °C, ενώ στον δεξιά χάρτη (χάρτης 17) απεικονίζεται το έτος 2017, με θερμοκρασία περίπου 31 °C

Μέσα από την απεικόνιση των τιμών της θερμοκρασίας σε διαγράμματα, έγινε αντιληπτό ότι η θερμοκρασία του αέρα και η θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους είναι ανάλογες μεταβλητές, καθώς όσο πιο υψηλή θερμοκρασία αέρα, τόσο πιο υψηλή θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους. Τέλος, από την μελέτη των διαγραμμάτων διαπιστώθηκε ότι ο μέσος όρος θερμοκρασίας αέρα για τις 9 Ιουνίου 2017 όπου πραγματοποιήθηκαν και οι μετρήσεις πεδίου, ήταν 25,53 °C. Έπειτα, ο μέσος όρος

θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους, για την ίδια ημέρα, έφτασε τους 30,58 °C, ενώ ο μέσος όρος θερμοκρασίας εδάφους σε βάθος 15 εκατοστών άγγιξε τους 39,69 °C. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι οι θερμοκρασίες εδάφους σε βάθος 15 εκατοστών είναι παρόμοιες με τα αποτελέσματα των θερμοκρασιών εδάφους που προέκυψαν από την επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων.

Συμπερασματικά, μέσα από τη συγκεκριμένη διατριβή διαπιστώθηκε ότι αν και οι εναλλαγές της θερμοκρασίας εδάφους των ηφαιστείων αποτελούν πρόδρομα φαινόμενα μιας επερχόμενης ηφαιστειακής έκρηξης, πρέπει να συνδυαστούν σωστά τόσο και με άλλες μετρήσεις, όπως είναι η σεισμικότητα και οι εκλύσεις ηφαιστειακών αερίων, αλλά και με παλαιότερες μετρήσεις των συγκεκριμένων παραμέτρων. Για το παράδειγμα της Σαντορίνης, λοιπόν, η αλλαγή στη θερμοκρασία εδάφους, κυρίως το μήνα Οκτώβριο (2011), δεν ήταν προειδοποιητικό φαινόμενο για την έκρηξη του ηφαιστείου.

Βιβλιογραφία

1. (n.d.). Ανάκτηση Οκτώβριος Σάββατο, 2017, από USGS:
<http://volcanoes.usgs.gov/vhp/lahars.html>
2. Allesandro, W. D., Aiuppa, A., Bellomo, S., Brusca, L., Calabrese, S., Kyriakopoulos, K., . . . Longo, M. (2012, August 13). Sulphur-gas concentrations in volcanic and geothermal areas in Italy and Greece: Characterising potential human exposures and risks. *Journal of Geochemical Exploration*(131), σσ. 1-13.
3. Auippa, A., Cannata, A., F., C., Di Graia, G., Ferrari, F., Giudice, G., . . . Puglisi, C. (2010). Patterns in the recent 2007-2008 activity of Mount Etna volcano investigated by integrated geophysical and geochemical observations. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11(Q09008).
4. Auippa, A., Shinohara, H., Tamburello, G., Giudice, G., Liuzzo, M., & Moretti, R. (2011). Hydrogen in the gas plume of an ope-vent volcano, Mount Etna, Italy. *Geophys. Res.*, 116(B10204).
5. Avery, T. E., & Berlin, G. L. (1992). *Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation* (Τόμ. 5th edition). New York: Millan Publishing Company.
6. Bagnato, E., Tamburello, G., Alessandro, A., Sprovieri, M., Vougioukalakis, G. E., & Parks, M. (2013, May 13). Mercury emissions from soils and rumaroles of Nea Kameni volcanic centre, Santorini (Greece). *Geochemical Journal*(47), σσ. 437-450.
7. Baxter, P. J., Kapila, M., & Mfonfu, D. (1989). Lake Nyos disaster, Cameroon, 1986: the medical effects of large emissions of carbon dioxide. *British Medical Journal*, σσ. 1437-1441.
8. Behncke, B. N. (2005). Lava flow hazard at Mount Etna (Italy): new data from a GIS-based study. *Geol. Soc. Am. Spec. Paper* 396, σσ. 189-208.
9. *Bibliothèque Nationale de France*. (n.d.). Ανάκτηση Νοέμβριος 1, 2017, από data.bnf.fr: http://data.bnf.fr/12462610/ferdinand_fouque/
10. Blackett, M. (2014, March 12). Early Analysis of Landsat- 8 Thermal Infrared Sensor Imagery of Volcanic Activity. *Remote Sensing*, σσ. 2282-2295.
11. Carey, S., Nomikou, P., Bell, K., & Ballard, R. (2013). Exploitation of the Santorini Volcanic Group. σσ. 44-49.
12. Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009, Ιανουάριος 17). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113, σσ. 893-903.

13. Druitt, T. (n.d.). New insights into the initiation and venting of the Bronze-Age eruption of Santorini (Greece), from component analysis. *Bulletin on Volcanology*(76(2)), σσ. 1-21.
14. Druitt, T., Francalanci, L., & Fabbro, G. (2015). *Field Guid to Santorini Volcano.*, σσ. 1-48.
15. *Encyclopaedia Britannica*. (n.d.). Ανάκτηση Οκτώβριος Τρίτη, 2017, από <https://www.britannica.com/science/volcanic-ash>
16. Fytikas, M., Kolios, N., & Vougioukalakis, G. (1990). Post-Minoan volcanic activity of the Santorini volcano. Volcanic hazard and risk, forecasting possibilities. *In: Hardy DA (ed.) Thera and the Aegean World III, 2*, σσ. 183-198.
17. *gettyimages*. (n.d.). Ανάκτηση Νοέμβριος 28, 2017, από *gettyimages*: <http://www.gettyimages.com>
18. *Global Minds*. (2015). Ανάκτηση Απρίλιος 18, 2018, από <http://thermography-patras.gr/>
19. Gupta, R. P. (1991). *Remote Sensing Geology*. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong: Springer-Verlag.
20. *InfraSpec Engineering*. (2011). Ανάκτηση Απρίλιος 18, 2018, από <http://www.infraspec.gr/thermografikes-epitheorisis/>
21. Jimenez-Munoz, J., Sobrino, J., Skokovic, D., Mattar, C., & Cristobal, J. (2014, Οκτώβριος). Land Surface Temperature Retrieval Methods From Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(10), σσ. 1840-1843.
22. Komlos, G., Hedervari, P., & Meszaros, S. (1978). A Brief Note on Tectonic Earthquakes Related to the Activity of Santorini from Antiquity to the Present. Στο *Thera and the Aegean World* (Τόμ. I, σσ. 97-107). Greece.
23. Lagios, E., Vassilopoulou, S., Sakkas, V., Dietrich, V., Damiata, B., & Ganas, A. (2007). Testing satellite and ground thermal imaging of low-temperature fumarolic fields: The dormant Nisyros Volcano (Greece). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*(62(6)), σσ. 447-460.
24. Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2003). *Remote Sensing and Image Interpretation* (5th edition εκδ.). USA: J.
25. Mather, P. M. (1999). *Computer Processing of Remotely - Sensed Images* (2nd edition εκδ.). UK: J: Wiley & Sons.

26. Newman, A., Stiros, S., Feng, L., Psimoulis, P., Moschas, F., Saltogianni, V., . . . Vamvakaris, D. (2012). Recent geodetic unrest at Santorini Caldera, Greece. *Geophys Res Lett*, 39.
27. Nomikou, P., Druitt, T., Hubscher, C., Mather, T., Paulatto, M., Kalnins, L., . . . Parks, M. (2016, November 8). Post-eruptive flooding of Santorini caldera and implications for tsunami generation. *Nat. Commun.* 7, 13332, σσ. 1-10.
28. Novikova, T., Papadopoulos, G., & McCoy, F. (2011). Modeling of tsunami generated by the giant Late Bronze Age eruption of Thera, South Aegean Sea, Greece. *Geophys. J. Int.*, σσ. 665-680.
29. Paolo, P., & Shroder, J. (2005). Volcanic Hazards, Risks, and Disasters. *Hazard and Disasters Series*.
30. Papadimitriou, P., Kapetanidis, V., Karakonstantis, A., Kaviris, G., Voulgaris, N., & Makropoulos, K. (2014). The Santorini Volcanic Complex: A detailed multi-parameter seismological approach with emphasis on the 2011-2012 unrest period. *Journal of Geodynamics*, σσ. 32-57.
31. Pareschi, M., Favalli, M., & Boshi, E. (2008). Impact of the Minoan tsunami of Santorini: simulated scenarios in the eastern Mediterranean. *Geoph. Res. Lett.*, σσ. 1-6.
32. Parks, M., Biggs, J., England, P., Mather, T., Nomikou, P., Palamartchouk, K., & others, a. (2012). Evolution of Santorini Volcano dominated by episodic and rapid fluxes of melt from depth. *Nature Geoscience* , σσ. 749-754.
33. Parks, M., Caliro, S., Chiodini, G., Pyle, D., Mather, T., Berlo, K., & Raptakis, C. (2013). Distinguishing contributions to diffuse CO₂ emissions in volcanic areas from magmatic degassing and thermal decarbonation using soil gas ²²²Rn-^δ13C systematics: Application to Santorini volcano, Greece. *Earth and Planetary Science Letters*, σσ. 377-378, 180-190.
34. Rizzo, A., Barber, F., Carapezza, M., Di Piazza, A., Francalanci, L., Sortino, F., & D'Alessandro, W. (2015, March 21). New mafic magma refilling a quiescent volcano: Evidence from He-Ne-Ar isotopes during the 2011-2012 unrest at Santorini, Greece. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, σσ. 789-814.
35. Salisbury, J., & D'Aria, D. (1992). Emissivity of Terrestrial Materials in the 8-14 μm Atmospheric Window. *Remote Sens. Environ.*, σσ. 83-106.

36. Sigurdsson, H., Carey, S., Alexandri, M., Vougioukalakis, G., Croff, K., Roman, C., & Nomikou, P. (2006). Marine Investigations of Greece's Santorini Volcanic Field. *EOS(87)*, σσ. 341-342.
37. Tassi, F., Vaselli, O., Papazachos, C., Giannini, L., Chiodini, G., Vougioukalakis, G., & Panagiotopoulos, D. (2013). Geochemical and isotopic changes in the fumarolic and submerged gas discharges during the 201-2012 unrest at Santorini caldera (Greece). *Bulletin of Volcanology(75(4))*, σσ. 1-15.
38. Vougioukalakis, G., & Fytikas, M. (2005). Volcanic hazards in the Aegean area, relative risk evaluation, monitoring and present state of the active volcanic centers. *Developments in Volcanology(7(C))*, σσ. 161-183.
39. *Wikipedia*. (2017, Απριλίου 8). Ανάκτηση Νοέμβριος 1, 2017, από Wikipedia: <https://el.wikipedia.org/wiki>
40. Αντωνίου, Β., & Παπασπυρόπουλος, Κ. (2017). Διαχείριση Περιβάλλοντος. Στο Π. Κ. Αντωνίου Βαρβάρα, *Διαχείριση Περιβάλλοντος* (σσ. 88-98). Αθήνα: Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών "Διαχείριση Περιβάλλοντος, Καταστροφών και Κρίσεων", Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
41. Κυριακόπουλος, Κ. (2015). *Ηφαίστεια και Γεωπεριβάλλον*. Αθήνα: Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
42. Λέκκας, Ε. (2000). *Φυσικές & Τεχνολογικές Καταστροφές* (Τόμ. II, ISBN: 960-90329-0-7). Αθήνα: Access Pre - Press.
43. Λέκκας, Ε. Λ. (1996). *Φυσικές και Τεχνολογικές Καταστροφές*. ACCESS Pre-Press
44. Λέκκας, Ε., & Ανδρεαδάκης, Ε. (2015). *Γεωδυναμικές Καταστροφές*. Αθήνα, Αττικής, Ελλάδα: Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών "Στρατηγικές Διαχείρισης Περιβάλλοντος, Καταστροφών και Κρίσεων", Πανεπιστήμιο Αθηνών.
45. Λέκκας, Ε., & Ανδρεαδάκης, Ε. (2015). *Εισαγωγή στη Θεωρία της Διαχείρισης Καταστροφών Και Κρίσεων*. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
46. Μήτση, Τ. (2017). Εκτίμηση της Εδαφικής Υγρασίας με τη Χρήση Τηλεπισκόπησης και Εφαρμογή σε Λεκάνη Απορροής στη Γερμανία. *Πανεπιστήμιο Αιγαίου*. Μυτιλήνη.
47. Παρχαρίδης, Ι. (2015). *Αρχές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης, Θεωρία και Εφαρμογές*. Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, www.kallipos.gr.

Παράρτημα Ι:

Χαρακτηριστικά Εργαλείου HD2101.1 HydroThermometer:

Τεχνικά Χαρακτηριστικά:	
Εργαλείο:	
Διαστάσεις (μήκος x πλάτος x ύψος)	185x90x40mm
Βάρος (με μπαταρίες)	470g
Υλικά	Θερμοπλαστικό (ABS), καουτσούκ
Παρουσίαση	2x4½ ψηφία και σύμβολα
Ορατή Περιοχή	52x42mm
Συνθήκες Λειτουργίας:	
Θερμοκρασίες Λειτουργίας	-5...+50oC
Θερμοκρασίες Αποθήκευσης	-25...+65oC
Σχετική Υγρασία Λειτουργίας	0...90% χωρίς συμπύκνωση
Βαθμός Προστασίας	IP66
Ισχύς:	
Μπαταρίες	4 1.5V τύπου AA μπαταρίες
Αυτονομία	200 ώρες με 1800mAh αλκαλικές μπαταρίες
Ισχύεις που καταναλώνεται όταν το όργανο είναι κλειστό	20μΑ
Ηλεκτρικό Δίκτυο	Έξοδος Προσαρμογέα Δικτύου 12Vdc/1000mA
Μονάδες Μέτρησης	oC – oF - %RH – g/kg – g/m ³ - hPa - J/g - Td Tw - DI - NET
Ασφάλεια Αποθηκευμένων Δεδομένων	Απεριόριστη, ανεξάρτητη από τις συνθήκες φόρτισης της μπαταρίας
Χρόνος:	
Ημερομηνία και Ώρα	Πραγματικές συνθήκες
Ακρίβεια	1 λεπτό/μήνα μέγιστης τάσης

Παράρτημα II:

Αποτελέσματα από την εργασία πεδίου. Εμφανίζονται οι τιμές από τις μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα (TempAir), υγρασίας αέρα (Humidity), θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους (TempSoil) και θερμοκρασία εδάφους σε βάθος 15 εκατοστών (TempNat):

FID	Shape *	OBJECTID	TempAir	Humidity	TempSoil	TempNat	Basement	Color	Brightness	Vegetation	GeolBound	Comment
0	Point	1	27	0	0	0						
1	Point	3	0	0	0	0						
2	Point	4	0	0	0	0						
3	Point	5	33	0	0	0						
4	Point	6	0	0	0	0		Καφέ				
5	Point	7	183	0	0	0						
6	Point	8	0	0	0	0						
7	Point	10	44.44	0	0	0						
8	Point	12	0	0	0	0		Γκρι				αρχη μονοπατιου
9	Point	13	0	0	0	0		Γκρι				αρχη μονοπατιου
10	Point	14	44.45	0	0	0						
11	Point	15	0	0	0	41.9	Έδαφος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
12	Point	16	0	0	0	0		Καφέ				αλλαγη χρωματος
13	Point	17	0	0	28	0		Γκρι				Σκιά
14	Point	18	0	0	0	0		Καφέ				αλλαγη κλισης
15	Point	19	0	0	0	48.6	Βράχος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
16	Point	20	0	0	0	0		Καφέ				αλλαγη κλισης
17	Point	21	0	0	38.3	0		Γκρι				Όχι σκιά
18	Point	22	0	0	0	44.4	Βράχος	Καφέ	Ανοιχτό	Ναι		
19	Point	24	0	0	0	0		Γκρι				αλλαγη χρωματος
20	Point	25	0	0	21.1	0		Γκρι				Σκιά
21	Point	26	0	0	0	48.2	Έδαφος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
22	Point	27	0	0	0	0						αλλαγη κλισης
23	Point	28	0	0	0	32.5	Έδαφος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
24	Point	29	0	0	26.4	0		Γκρι				
25	Point	30	0	0	0	0		Καφέ				αλλαγη κλισης
26	Point	31	46.9	0	0	0	Έδαφος	Γκρι	Ανοιχτό	Όχι		
27	Point	32	0	0	0	40.6	Βράχος	Γκρι	Σκούρο	Ναι		
28	Point	33	0	0	20.9	0						Υπό σκιά
29	Point	34	0	0	0	0		Καφέ				αλλαγη κλισης
30	Point	35	0	0	0	30.6	Έδαφος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
31	Point	36	44.3	0	0	0	Βράχος	Γκρι	Σκούρο	Ναι		
32	Point	37	0	0	31.4	0		Γκρι				
33	Point	38	0	0	0	0		Καφέ				αλλαγη κλισης κατηφορα
34	Point	39	0	0	0	0					Όριο 1	
35	Point	40	0	0	36	0						
36	Point	41	0	0	0	0		Καφέ				αλλαγη κλισης ανηφορα
37	Point	42	0	0	0	33	Έδαφος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		

FID	Shape *	OBJECTID	TempAir	Humidity	TempSoil	TempNat	Basement	Color	Brightness	Vegetation	GeolBound	Comment
36	Point	41	0	0	0	0		Καφέ				αλλαγη κλισης ανηφορα
37	Point	42	0	0	0	33	Έδαφος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
38	Point	43	0	0	32.6	0		Καφέ				Θεσία
39	Point	44	43.1	0	0	0	Βράχος	Καφέ	Σκούρο	Ναι		
40	Point	45	0	0	0	0					Όριο 2	
41	Point	46	0	0	0	0						
42	Point	47	0	0	0	34.1	Έδαφος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
43	Point	48	35.5	0	0	0	Βράχος	Γκρι	Ναι			
44	Point	49	0	0	0	0		Καφέ				αλλαγη κλισης κατηφορα
45	Point	50	0	0	38.3	0						
46	Point	51	43.1	0	0	0	Βράχος	Καφέ	Σκούρο	Ναι		
47	Point	52	0	0	35.4	0		Γκρι				
48	Point	53	0	0	0	35.2	Έδαφος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
49	Point	54	0	0	0	0					Όριο 3	
50	Point	55	0	0	0	0		Καφέ				αλλαγη κλισης ανηφορα
51	Point	56	0	0	36.3	0						
52	Point	57	25.8	66.2	28.8	0	Έδαφος	Γκρι	Σκούρο	Ναι		
53	Point	58	0	0	40.8	0		Γκρι	Σκούρο			
54	Point	59	0	0	0	0					Όριο 4	
55	Point	60	0	0	32.4	0						
56	Point	61	0	0	0	47	Έδαφος	Καφέ	Ανοιχτό	Όχι		
57	Point	62	0	0	0	0						
58	Point	63	0	0	0	0					Όριο 5	
59	Point	64	41.2	0	0	0	Βράχος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
60	Point	65	0	0	0	0		Καφέ				αλλαγη κλισης ανηφορα
61	Point	66	0	0	26.5	0						
62	Point	67	0	0	0	39.7	Έδαφος	Γκρι	Σκούρο	Ναι		
63	Point	68	0	0	0	0					Όριο 6	
64	Point	69	0	0	28.4	0						
65	Point	70	0	0	47.5	0	Βράχος	Καφέ	Σκούρο	Όχι		
66	Point	71	0	0	0	0					Όριο 7	
67	Point	72	0	0	26.7	0						
68	Point	73	0	0	0	0		Καφέ				αλλαγη κλισης κατηφορα
69	Point	74	38.8	0	0	0	Βράχος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
70	Point	75	0	0	24.5	0	Έδαφος	Γκρι	Σκούρο	Ναι		
71	Point	76	0	0	0	0					Όριο 8	
72	Point	77	0	0	0	37.6	Έδαφος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
73	Point	78	0	0	35.2	0						

FID	Shape *	OBJECTID	TempAir	Humidity	TempSoil	TempNat	Basement	Color	Brightness	Vegetation	GeolBound	Comment
72	Point	77	0	0	0	37.6	Έδαφος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
73	Point	78	0	0	35.2	0						
74	Point	79	0	0	0	0					Όριο 9	
75	Point	80	0	0	34.6	0						
76	Point	81	0	0	0	29.8	Έδαφος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
77	Point	82	0	0	0	0					Όριο 10	
78	Point	83	23.8	72.5	25.3	0	Έδαφος	Καφέ	Ανοιχτό	Ναι		
79	Point	84	35.6	0	0	0	Έδαφος	Γκρι	Σκούρο	Ναι		
80	Point	85	0	0	33.8	0						
81	Point	86	0	0	0	46.2	Έδαφος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
82	Point	87	37.7	0	0	0	Βράχος	Γκρι	Σκούρο	Όχι		
83	Point	88	0	0	0	0					Όριο 11	
84	Point	89	0	0	37.8	0	Έδαφος	Γκρι	Σκούρο	Όχι		
85	Point	90	0	0	32.2	0						
86	Point	91	0	0	0	0		Καφέ				αλλαγή κλίσης ανηφορα
87	Point	92	0	0	35.2	0	Βράχος	Γκρι	Σκούρο	Όχι		
88	Point	93	27.8	0	0	0	Βράχος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
89	Point	94	0	0	0	0					Όριο 12	
90	Point	95	0	0	0	0		Καφέ				αλλαγή κλίσης ανηφορα
91	Point	96	0	0	37.3	0						
92	Point	97	41.4	0	0	0	Έδαφος	Καφέ	Ανοιχτό	Όχι		pros fati
93	Point	98	0	0	30.4	0	Έδαφος	Γκρι	Σκούρο	Ναι		
94	Point	99	0	0	0	0					Όριο 13	
95	Point	100	0	0	39.1	0						
96	Point	101	0	0	0	0					Όριο 14	
97	Point	102	34.3	0	0	0	Βράχος	Γκρι	Σκούρο	Ναι		
98	Point	103	0	0	51.6	0	Έδαφος	Καφέ	Σκούρο	Όχι		
99	Point	104	0	0	0	0		Γκρι				αλλαγή κλίσης ανηφορα, χρωματος
100	Point	105	24	69.5	26.6	0	Έδαφος	Γκρι	Ανοιχτό	Όχι		
101	Point	106	0	0	36.5	0						
102	Point	107	41.3	0	0	0	Έδαφος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
103	Point	108	0	0	48.2	0	Έδαφος	Γκρι	Σκούρο	Όχι		
104	Point	109	0	0	0	40.6	Έδαφος	Γκρι	Σκούρο	Ναι		
105	Point	110	0	0	0	0					Όριο 15	
106	Point	111	39.3	0	0	0	Έδαφος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
107	Point	112	0	0	38.4	0						
108	Point	113	0	0	32.4	0	Βράχος	Καφέ	Σκούρο	Όχι		
109	Point	114	0	0	0	0					Όριο 16	

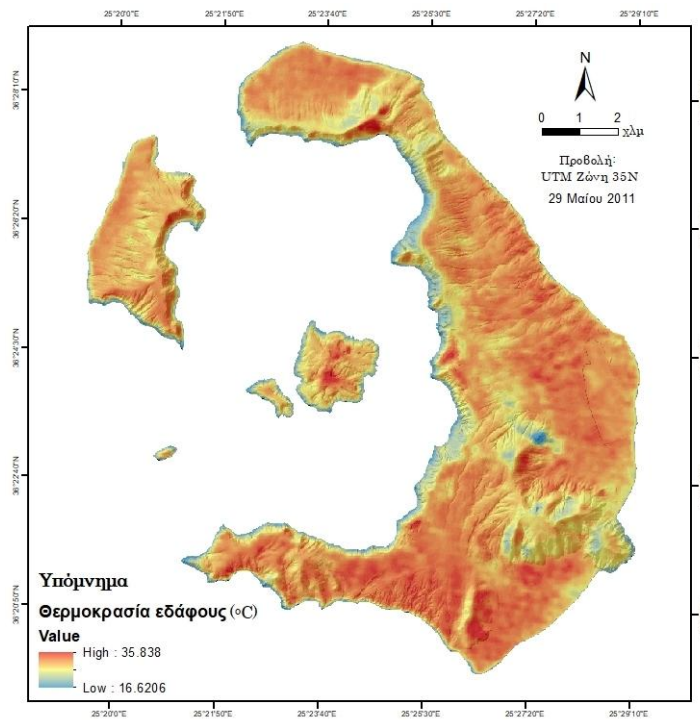
FID	Shape *	OBJECTID	TempAir	Humidity	TempSoil	TempNat	Basement	Color	Brightness	Vegetation	GeolBound	Comment
108	Point	113	0	0	32.4	0	Βράχος	Καφέ	Σκούρο	Όχι		
109	Point	114	0	0	0	0					Όριο 16	
110	Point	115	0	0	0	0		Καφέ				αλλαγή κλίσης κατηφορα
111	Point	116	46.1	0	0	0	Βράχος	Καφέ	Ανοιχτό	Ναι		
112	Point	117	0	0	0	37.8	Βράχος	Καφέ	Ανοιχτό	Ναι		
113	Point	118	0	0	0	0		Καφέ				αλλαγή κλίσης ανηφορα
114	Point	119	0	0	31	0						
115	Point	120	0	0	0	0					όριο 17	
116	Point	121	0	0	47.1	0	Βράχος	Γκρι	Σκούρο	Όχι		
117	Point	122	0	0	48.6	0	Βράχος	Γκρι	Σκούρο	Ναι		
118	Point	123	0	0	0	0		Καφέ				αλλαγή κλίσης ευθεια
119	Point	124	0	0	41.8	0						
120	Point	125	43.2	0	0	0	Βράχος	Γκρι	Σκούρο	Ναι		
121	Point	126	0	0	0	0					Όριο 18	
122	Point	127	0	0	48.2	0	Έδαφος	Καφέ	Ανοιχτό	Όχι		
123	Point	128	0	0	0	41.1	Βράχος	Καφέ	Ανοιχτό	Όχι		
124	Point	129	0	0	33.6	0						
125	Point	130	0	0	0	0					Όριο 19	
126	Point	131	51.9	0	0	0	Βράχος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
127	Point	132	34.6	0	0	0	Έδαφος	Γκρι	Σκούρο	Ναι		
128	Point	133	26.9	58	28.1	0	Βράχος	Γκρι	Σκούρο			
129	Point	134	0	0	32.6	0						
130	Point	135	0	0	0	35.5	Έδαφος	Γκρι	Ανοιχτό	Όχι		
131	Point	136	0	0	0	0					Όριο 20	
132	Point	137	0	0	34.1	0	Έδαφος	Γκρι	Σκούρο	Όχι		
133	Point	138	34.3	0	0	0	Έδαφος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
134	Point	139	0	0	46.6	0						
135	Point	140	0	0	37.5	0	Έδαφος	Καφέ	Ανοιχτό	Όχι		
136	Point	141	49.8	0	0	0	Βράχος	Γκρι	Σκούρο	Ναι		
137	Point	142	0	0	36.6	0	Βράχος	Καφέ	Ανοιχτό	Όχι		
138	Point	143	0	0	0	40.6	Έδαφος	Καφέ	Ανοιχτό	Όχι		
139	Point	144	56	0	0	0	Έδαφος	Καφέ	Ανοιχτό	Ναι		
140	Point	145	0	0	39.8	0	Βράχος	Καφέ	Ανοιχτό	Ναι		
141	Point	146	40	0	0	0	Βράχος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
142	Point	147	32.7	0	0	0	Βράχος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
143	Point	148	26.4	58.3	28.3	0	Βράχος	Καφέ	Ανοιχτό	Ναι		
144	Point	149	47.8	0	0	0	Βράχος	Καφέ	Ανοιχτό	Όχι		
145	Point	150	47.8	0	0	0	Βράχος	Καφέ	Ανοιχτό	Όχι		

FID	Shape *	OBJECTID	TempAir	Humidity	TempSoil	TempNat	Basement	Color	Brightness	Vegetation	GeolBound	Comment
138	Point	143	0	0	0	40.6	Έδαφος	Καφέ	Ανοιχτό	Όχι		
139	Point	144	56	0	0	0	Έδαφος	Καφέ	Ανοιχτό	Ναι		
140	Point	145	0	0	39.8	0	Βράχος	Καφέ	Ανοιχτό	Ναι		
141	Point	146	40	0	0	0	Βράχος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
142	Point	147	32.7	0	0	0	Βράχος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
143	Point	148	26.4	58.3	28.3	0	Βράχος	Καφέ	Ανοιχτό	Ναι		
144	Point	149	47.8	0	0	0	Βράχος	Καφέ	Ανοιχτό	Όχι		
145	Point	150	47.8	0	0	0	Βράχος	Καφέ	Ανοιχτό	Όχι		
146	Point	151	29.8	0	0	0	Βράχος	Γκρι	Σκούρο	Ναι		
147	Point	152	32.5	0	0	0	Βράχος	Γκρι	Σκούρο	Όχι		
148	Point	153	47.6	0	0	0	Βράχος	Γκρι	Ανοιχτό	Ναι		
149	Point	154	45	0	0	0	Βράχος	Καφέ	Σκούρο	Ναι		
150	Point	155	26.4	58.8	34.6	3	Βράχος	Καφέ	Ανοιχτό	Ναι		
151	Point	156	24.4	64.6	28.9	0	Βράχος	Γκρι	Ανοιχτό	Όχι		
152	Point	157	27	0	0	0						
153	Point	158	52.2	0	0	0	Βράχος	Καφέ	Ανοιχτό	Όχι		
154	Point	159	0	0	0	0		Καφέ				αλλαγή κλίσης κατηφορά
155	Point	160	46	0	0	0	Έδαφος	Καφέ	Ανοιχτό	Όχι		
156	Point	161	0	0	0	0		Καφέ				αλλαγή κλίσης ανηφορά
157	Point	162	0	0	0	0		Γκρι				κορυφή τέλος
158	Point	163	0	0	46.7	0	Βράχος	Καφέ	Σκούρο	Όχι		
159	Point	164	0	0	38.5	0	Βράχος	Καφέ	Σκούρο	Όχι		
160	Point	165	0	0	38.6	0	Βράχος	Γκρι	Ανοιχτό	Όχι		
161	Point	166	0	0	46.2	0						
162	Point	167	0	0	31.8	0	Βράχος		Ανοιχτό	Όχι		
163	Point	168	25.4	58.5	26.6	0	Βράχος	Καφέ	Ανοιχτό	Ναι		
164	Point	169	0	0	52	0						
165	Point	170	0	0	48.4	0	Βράχος	Γκρι	Ανοιχτό	Όχι		
166	Point	171	26.1	58	34.5	0						
167	Point	172	0	0	40.2	0						
168	Point	173	0	0	43.6	0	Έδαφος	Γκρι		Ναι		
169	Point	174	27.9	51.4	36.5	0						
170	Point	175	0	0	46.8	0						
171	Point	176	0	0	37.8	0	Βράχος	Γκρι	Ανοιχτό	Όχι		
172	Point	177	24.4	55.9	36.3	0						
173	Point	178	0	0	0	39.5	Έδαφος	Γκρι	Σκούρο	Όχι		
174	Point	179	0	0	45.8	0	Βράχος	Καφέ	Ανοιχτό	Όχι		
175	Point	180	24.8	58.8	36.4	0						

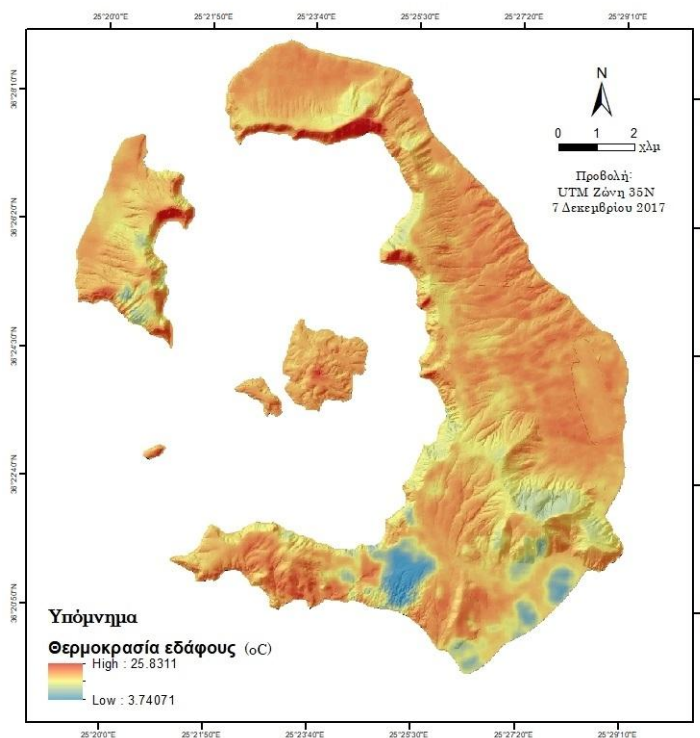
Ζεύγη τιμών Θερμοκρασίας Αέρα και Θερμοκρασίας εδάφους που κατηγοριοποιούνται στην ομάδα με μεγάλη απόκλιση (κόκκινο) και μεγάλη απόκλιση (κίτρινο):

	A	B	C	D
1	OBJECTID	TempAir	Humidity	TempSoil
58	83	23,80	72,50	25,30
84	105	24,00	69,50	26,60
106	156	24,40	64,60	26,90
134	177	24,40	55,90	36,30
149	180	24,80	58,80	36,40
156	168	25,40	58,50	26,60
157	57	25,80	66,20	26,80
169	171	26,10	58,00	34,50
172	148	26,40	58,30	28,30
175	155	26,40	58,80	34,60
178	133	26,90	58,00	28,10
181	174	27,90	51,40	36,50

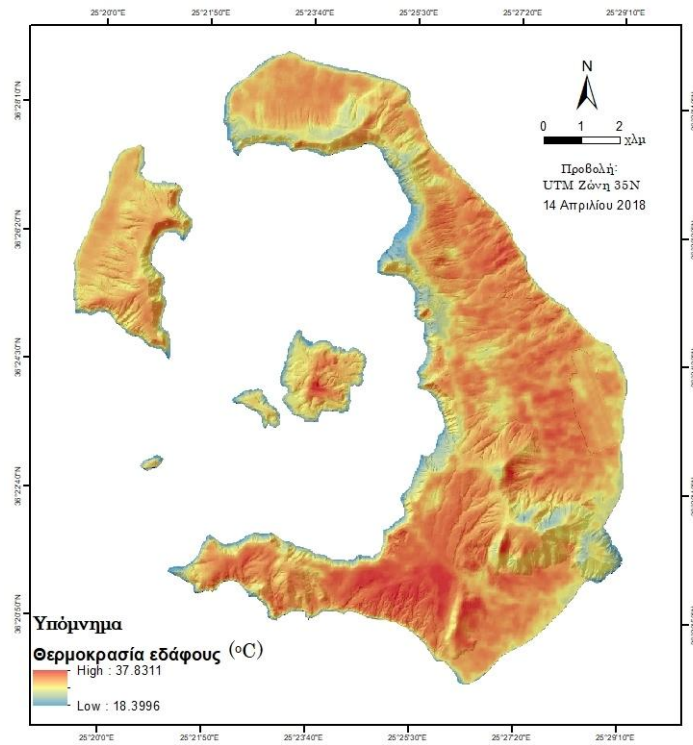
Παράρτημα III:



Χάρτης 18: Θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους από τον δορυφόρο Landsat 5 για το μήνα Μάιο (2011) με μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία



Χάρτης 19: Θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους από τον δορυφόρο Landsat 8 για το μήνα Δεκέμβριο (2017) με μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία



Χάρτης 20: Θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους από τον δορυφόρο Landsat 8 για το μήνα Μάιο (2018) με μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία