



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ & ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΙΩΑΚΕΙΜ Κ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΙΔΗΣ

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ, ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗ
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ UAV ΚΑΙ
ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΑΡΩΤΗ LiDaR ΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ «ΑΠΟΘΗΚΕΣ», ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ,
ΕΛΛΑΔΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θεσσαλονίκη 2019





ΙΩΑΚΕΙΜ Κ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΙΔΗΣ
Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5436

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ, ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗ
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ UAV ΚΑΙ ΕΠΙΓΕΙΟΥ
ΣΑΡΩΤΗ LiDaR ΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ «ΑΠΟΘΗΚΕΣ», ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ, ΕΛΛΑΔΑ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Γεωλογίας,
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας

Επιβλέπων καθηγητής:
Βασίλειος Π. Μαρίνος



© Ιωακείμ Κ. Κωνσταντινίδης, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωλογίας, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ, ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗ
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ UAV ΚΑΙ ΕΠΙΓΕΙΟΥ
ΣΑΡΩΤΗ LiDaR ΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ «ΑΠΟΘΗΚΕΣ», ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ, ΕΛΛΑΔΑ –
Διπλωματική Εργασία

© Ioakeim K. Konstantinidis, School of Geology, Dept. of Geology, 2019

All rights reserved.

ENGINEERING GEOLOGICAL APPRECIATION, MAPPING AND MONITORING OF
ROCKFALL INSTABILITIES BASED ON A MULTI-TEMPORAL UAV AND LiDaR
SURVEYS IN «ΑΡΟΘΗΚΕΣ» AREA, SANTORINI PERFECTURE– *Bachelor Thesis*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT.....	8
1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΕΥΝΑΣ	9
1.1 Εισαγωγή	9
1.2 Μεθοδολογία	10
1.3 Εργαλεία έρευνας	11
1.3.1 Χρήση UAV	12
1.3.2 Χρήση επίγειου LiDaR	14
1.4 Διάρθρωση κεφαλαίων	16
2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ	17
2.1 Ταξινόμηση κατά Varnes	17
3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	20
3.1 Γενικά	20
3.2 Γεωμορφολογία	23
3.3 Λιθολογία	25
3.4 Υδρομετεωρολογικά δεδομένα	31
3.5 Σεισμολογικά δεδομένα	33
4. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	41
4.1 Ποιότητα βραχόμαζας πρανούς	41
4.2 Μηχανισμός αστοχίας	43
4.3 Τεχνικογεωλογικό μοντέλο	44
4.4 Ανάλυση ευστάθειας πρανούς	45



5. ΜΕΘΟΔΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ UAV (Unmanned Aerial Vehicle – Μη Επανδρωμένο Αερόχημα)	48
5.1 Φωτογραμμετρία με την χρήση UAV για την περίπτωση της περιοχής «Αποθήκες».....	49
5.2 Επεξεργασία των φωτογραφιών που λήφθηκαν μέσω της χρήσης UAV για την περίπτωση της περιοχής «Αποθήκες»	51
6. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΓΕΙΟΥ LiDaR (Light Detection and Ranging)	53
6.1 Μεθοδολογία	53
6.2 Δημιουργία μοντέλου για την περιοχή “Αποθήκες”	54
7. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	55
7.1 Μεθοδολογία	55
7.2 Σύγκριση μοντέλων 2014 - 2018	57
7.3 Σύγκριση μοντέλων 2018 - 2019	59
7.4 Αποτελέσματα	61
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	63
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	65

ΠΡΟΛΟΓΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Η παρούσα εργασία αποτελεί την πτυχιακή εργασία που εκπονείται κατά το τελευταίο έτος των σπουδών στο Τμήμα Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του κυρίου Βασίλειου Μαρίνου, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ.

Οφείλω πρώτο απ' όλους λοιπόν να ευχαριστήσω τον κύριο Βασίλειο Μαρίνο, όχι μόνο για την καθοδήγησή του στην μελέτη και τη συγγραφή της παρούσας εργασίας, αλλά κυρίως για τον υποστηρικτικό του ρόλο καθ' όλη την διάρκεια της συνεργασίας μας. Ο κύριος Μαρίνος είναι πρότυπο επιστήμονα και δασκάλου και αποτέλεσε το έναυσμα για την ενασχόλησή μου με την Τεχνική Γεωλογία. Η παρούσα εργασία είναι το αποκύημα της ενεργούς, συνεχούς συνεργασίας μας μέσω της οποίας διδάχθηκα, εκπαιδεύτηκα και κλήθηκα να κάνω τα πρώτα μου ερευνητικά βήματα μετά την προτροπή του για συμμετοχή σε διεθνή και εγχώρια συνέδρια. Μέσω αυτού θεωρώ πως έλαβα την πληρέστερη εμπειρία θα μπορούσα να έχω ως προπτυχιακός φοιτητής σχετικά με το αντικείμενο που μου κέντρισε το ενδιαφέρον από τη πρώτη στιγμή που ξεκίνησα τη φοίτησή μου στο Τμήμα Γεωλογίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον κύριο Ευστράτιο Καραντανέλλη, Υποψήφιο Διδάκτορα του Τμήματος Γεωλογίας για την πολύτιμη βοήθειά και υποστήριξή του καθόλη τη διάρκεια της φετινής ιδιαίτερα απαιτητικής χρονιάς. Ο κύριος Καραντανέλλης υπήρξε πάντα διαθέσιμος και διατεθειμένος να συνεπικουρήσει τη διδακτική και ερευνητική διαδικασία, προσφέροντας με ιδιαίτερη ευχαρίστηση τον χρόνο καθώς και τις γνώσεις του.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τον κύριο Ιωάννη Φαρμάκη, Υποψήφιο Διδάκτορα του Queen's University του Καναδά για την βοήθεια του μέσω των πολύτιμων γνώσεων του πάνω στην κύρια μεθοδολογία της παρούσας εργασίας. Η συνεισφορά του ήταν καθοριστική καθώς βοήθησε ενεργά στην κατανόηση των μεθόδων και στην αποσαφήνιση των δυνατοτήτων και των ορίων αυτών.

Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στην υλικοτεχνική υποδομή του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Παρά τις δυσχερείς οικονομικές συνθήκες και τον μειωμένο προϋπολογισμό του Πανεπιστημίου, το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας υπήρξε άρτια εξοπλισμένο με τεχνολογία αιχμής, όπως οι σύγχρονες μέθοδοι τηλεανίχνευσης που χρησιμοποιήθηκαν και στην παρούσα έρευνα. Μου δόθηκε έτσι η ευκαιρία να χρησιμοποιήσω τα εργαλεία αυτά στο πλαίσιο της διπλωματικής μου εργασίας, μαθαίνοντας έτσι τον σωστό χειρισμό τους και οδηγούμενος ταυτοχρόνως σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα με τη καθοριστική όμως βοήθεια ιδιαίτερα καταρτισμένων ατόμων που ήταν πάντα πρόθυμα να μεταδώσουν τις γνώσεις τους.

Τέλος, θα ήταν παράλειψή μου να μην ευχαριστήσω όλους εκείνους τους ανθρώπους που στάθηκαν δίπλα μου κατά το μακρό ταξίδι των σπουδών μου, με πρώτους τους γονείς μου, Κωνσταντίνο και Σοφία. Αυτοί, μαζί με τους φίλους μου έπαιξαν ενεργό ρόλο, ίσως όχι διδακτικό, αλλά προπάντων υποστηρικτικό καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου. Η έρευνα καθώς και η σύνταξη αυτού του κειμένου πιθανόν θα ήταν αδύνατη χωρίς την ηθική τους συμπαράσταση.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα έρευνα προέκυψε από τη συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη της τεχνικογεωλογικής κοινότητας για την αυτοματοποιημένη παρακολούθηση ευαίσθητων σε κατολισθητικά φαινόμενα περιοχών. Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί η ικανότητα να εμπλουτιστούν οι παραδοσιακές μέθοδοι γεωλογικής και τεχνικογεωλογικής χαρτογράφησης με την χρήση νέων μεθόδων τηλεανίχνευσης ως κοινή πρακτική. Τέτοιες μέθοδοι μπορεί να είναι η τεχνολογία ενεργών σαρωτών όπως είναι οι επίγειοι σαρωτές λέιζερ (TLS) ή παθητικοί όπως είναι η τεχνική της φωτογραμμετρίας μέσω μη-επανδρωμένων αέριων οχημάτων (UAV). Αυτή η αλλαγή έχει οδηγήσει σε πιο ακριβείς, σύντομες χρονικά και ορθές μετρήσεις στη Τεχνική Γεωλογία σε κατολισθητικά φαινόμενα. Συγκεκριμένα, με τη τεχνική Structure from Motion (SfM) έγινε δυνατή η κατασκευή ορθομωσαϊκών πολύ υψηλής ανάλυσης καθώς και εδαφικών μοντέλων (DTM) των επικίνδυνων περιοχών μελέτης, μέσω πολύ λεπτομερών σύννεφων σημείων (point clouds)

Η παρούσα έρευνα παρουσιάζει μια δυναμική προσέγγιση στη ακριβή πρόβλεψη οποιουδήποτε κατολισθητικού φαινομένου στην περιοχή «Αποθήκες», στη νήσο Θήρα με την εφαρμογή πολύ εποχικών συγκρίσεων μορφολογικών αλλαγών με στόχο την αποφυγή οποιουδήποτε καταστροφικού γεγονότος στη περιοχή μελέτης με την εφαρμογή αυτών των καινοτόμων μεθόδων τηλεανίχνευσης και την κατάλληλη ανάλυση των δεδομένων τους.



ABSTRACT

This current study is inspired by the continuously increasing demand in geo-engineering society for automatically monitored areas susceptible to landslide and catastrophic rockfall events. Traditional methods were supplemented, mostly by in-situ observational methods held by experts or by point-based approaches such as inclinometers and GPS measurements. Lately, we were given the opportunity to apply active sensors such as Terrestrial Laser Scanning (TLS) technology or passive ones such as Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry, as a result of the introduction of innovative remote sensing technologies as a common practice. This change has led to more accurate, precise and time-effective local scale modelling of the landslide event. Specifically, Structure from Motion (SfM) methodology enabled the production of ultra high-resolution orthomosaic and Digital Terrain Models (DTMs) of hazardous regions, via detailed point clouds.

The current research demonstrates a powerful approach to precisely foresee potential rockfall hazards, in the area of «Apothikes», Santorini island, Greece, based on a multi-temporal change detection procedure in time intervals in order to prevent any undesired consequence via the integration of innovative remote sensing tools and the suitable analysis of their results.

1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΕΥΝΑΣ

1.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μία συνεχής αύξηση των απαιτήσεων της τεχνικογεωλογικής κοινότητας στην παρακολούθηση ευαίσθητων περιοχών σε φαινόμενα κατολισθήσεων και βραχοκαταπτώσεων. Πλέον όμως οι παραδοσιακές μέθοδοι παρατήρησης και συλλογής δεδομένων συνδυάζονται με την τεχνολογία, προσθέτοντας έτσι ένα ακόμα πολύ ισχυρό εργαλείο στα χέρια του γεωλόγου. Με τη χρήση αυτών των καινοτόμων εργαλείων τηλεανίχνευσης (remote sensing technology), είτε ενεργών (active) όπως είναι η τεχνολογία επίγειας σάρωσης με λέιζερ LiDaR είτε παθητικών (passive) όπως είναι η μέθοδος της φωτογραμμετρία με τη χρήση UAV, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη για πολλαπλές ακριβείς και οικονομικές μετρήσεις με στόχο τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου εδαφικού μοντέλου υψηλής ποιότητας που αντικατοπτρίζει όσο το δυνατόν καλύτερα τη πραγματική περιοχή μίας κατολισθήσης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία συντάσσεται με στόχο τον εντοπισμό και τον χαρακτηρισμό τοπογραφικών διαφοροποιήσεων στην ερευνώμενη περιοχή, «Αποθήκες» (36°21'38.01''N, 25°24'17.18''E) στη Σαντορίνη, μέσα σε μία περίοδο μερικών χρόνων με τη χρήση δύο διαφορετικών μέσων, το UAV και το LiDaR με στόχο την αξιοποίηση των θετικών στοιχείων τόσο των ενεργών όσο και των παθητικών μέσων τηλεανίχνευσης. Με αυτό το τρόπο, είναι δυνατή η δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων μέσω της σύγκρισης των οποίων μας δίνεται η δυνατότητα κατανόησης και ανάλυσης της δυναμικής της κατολίσθησης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία, που παρουσιάζεται εκτενώς στη συγκεκριμένη εργασία, αποτελεί ένα εφικτό μέσο για την εκτίμηση και ποσοτικοποίηση των κατολισθέντων τεμαχών.

Οι αστοχίες που πραγματοποιούνται στη περιοχή έχουν ως χαρακτηριστικό γνώρισμα τα μεγάλα σε όγκο τεμάχια τα οποία αποκολλούνται από το πρανές, αναπηδούν στη βάση σε μαλακότερα υλικά και κυλούν προς το δρόμο χωρίς να κερματίζονται σε μικρότερων διαστάσεων τεμάχια. Τα τεμάχια αυτά αποκολλούνται από σημαντικού ύψους πρανές (μέχρι και 20m) με πολύ απότομες κλίσεις (>80°). Οι διαστάσεις των τεμαχών είναι της κλίμακας των m³.

Η συγκεκριμένη θέση αποτελεί ιδιαίτερης σημασίας τόσο λόγω της αυξανόμενης τουριστικής δραστηριότητας που λαμβάνει χώρα όλο το χρόνο στη συγκεκριμένη τοποθεσία αλλά και λόγω της έντονης επαγγελματικής ενασχόλησης του τοπικού πληθυσμού στη περιοχή καθώς αποτελεί την μόνη παραλία που βρίσκεται εντός του χώρου της καλδέρας. Κατά το παρελθόν έχουν παρατηρηθεί σημαντικές μαζικές βραχοκαταπτώσεις με αποτέλεσμα την καταστροφή ενός μέρους του δρόμου κάτω από το πρανές μελέτης και τη παύση της κυκλοφορίας για ένα σημαντικό διάστημα. Ακόμα και σήμερα υπάρχουν μικρές φθορές σε αυτόν λόγω της ασταθείς κατάστασης του πρανούς με μικρά τεμάχια να πέφτουν σε αυτόν.

Επομένως, καθίσταται σαφές πως για λόγους ασφαλείας είναι επιτακτική η έρευνα στη περιοχή με στόχο την εξάλειψη ή τουλάχιστον τον μετριασμό οποιουδήποτε μελλοντικού κινδύνου κατολίσθησης, καθώς η γνώση του παρελθόντος μπορεί να αποτελέσει οδηγό για το μέλλον.



Σχήμα 1. Η περιοχή μελέτης «Αποθήκες» στο Νοτιοδυτικό άκρο της Σαντορίνης

1.2 Μεθοδολογία

Για την εκτέλεση της έρευνας ακολουθήθηκε η παρακάτω μεθοδολογία:

1. Εκπόνηση Τεχνικογεωλογικής χαρτογράφησης στην περιοχή μελέτης με στόχο τον καθορισμό του Τεχνικογεωλογικού μοντέλου της περιοχής μελέτης
2. Καθορισμός μηχανισμού αστοχίας.
3. Επιτόπου δοκιμές στην βραχώμαζα με στόχο την εύρεση της τραχύτητας και της αντοχής των τοιχωμάτων των ασυνεχειών.
4. Επεξεργασία παραγόμενων πληροφοριών με υπολογιστικές μεθόδους με την κατασκευή τεκτονικών διαγραμμάτων.
5. Υλοποίηση ανάλυσης ευστάθειας πρανούς.
6. Λήψη μετρήσεων και δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου εδάφους μέσω μετρήσεων του LiDaR (2014).
7. Λήψη εικόνων και δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου εδάφους μέσω του UAV (2018) και (2019).
8. Τμηματοποίηση και σύγκριση των δύο μοντέλων.
9. Επισήμανση μετακινήσεων τόσο ποσοτικά όσο και σε σημασία.
10. Κατηγοριοποίηση ζωνών επικινδυνότητας με βάση την προϋπάρχουσα μετακίνηση.
11. Εύρεση τομέων για περαιτέρω έρευνα στην περιοχή.

1.3 Εργαλεία έρευνας

Η έρευνα βασίζεται πάνω σε βιβλιογραφική επισκόπηση, εργασίες υπαίθρου και ιδιαίτερα σε χρήση κατάλληλου λογισμικού για τη δημιουργία καθώς και για την σύγκριση των τρισδιάστατων μοντέλων εδάφους. Πιο αναλυτικά τα άμεσα εργαλεία της παρούσας εργασίας είναι :

- **Τεχνικογεωλογική χαρτογράφηση – εργασίες υπαίθρου**
 - Γεωλογικές επιτόπου μετρήσεις (προσανατολισμός τεκτονικών στοιχείων στον χώρο, αντοχή πετρωμάτων)
 - Σύνδεση βιβλιογραφικών γνώσεων με επιτόπου παρατηρήσεις (λιθολογία, τεκτονική, δομή, αποσάθρωση)
 - Επιτόπου υπαίθριες δοκιμές (τραχύτητα ασυνεχειών με προφίλομετρο, αντοχή τοιχωμάτων ασυνεχειών με τη σφύρα Schmidt)
- **Εργασίες γραφείου**
 - Κατασκευή Τεχνικογεωλογικού μοντέλου
 - Καθορισμός μηχανισμού αστοχίας
 - Υλοποίηση ανάλυσης ευστάθειας πρανούς
- **Εφαρμογή LiDaR (Light Detection and Ranging)**
 - Λεπτομερής αποτύπωση πρανούς (επικινδύνων προς αποκόλληση τεμαχών, ασυνεχειών κλπ)
 - Γεωμετρική παραμετροποίηση αυτών
 - Δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου εδάφους, με βάση τις μετρήσεις του, μέσω του κατάλληλου λογισμικού
- **Εφαρμογή UAV (Unmanned Aerial Vehicle)**
 - Λήψη εικόνων της υπό μελέτης περιοχής
 - Σύνθεση των εικόνων με στόχο τη δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου εδάφους, μέσω του κατάλληλου λογισμικού
- **Σύγκριση των τρισδιάστατων μοντέλων μέσω ημι-αυτοματοποιημένων υπολογιστικών μεθόδων**
 - Τμηματοποίηση της υπό μελέτης περιοχής σε μικρότερες υποπεριοχές και στα δύο μοντέλα
 - Ταύτιση των ίδιων υποπεριοχών στα δύο μοντέλα
 - Σύγκριση αυτών και εξαγωγή συμπερασμάτων για τις μορφολογικές διαφορές που προέκυψαν

Εκτός από την Τεχνικογεωλογική πληροφορία που αντλήθηκε από βιβλιογραφικές πηγές σε συνδυασμό με υπαίθριες παρατηρήσεις, όπως καθίσταται σαφές, στην παρακάτω μελέτη έγινε εκτενής χρήση μίας πληθώρας διαφορετικών λογισμικών με στόχο την όσο των δυνατών ακριβέστερη και πληρέστερη εκμετάλλευση των καινοτόμων εργαλείων τηλεανίχνευσης. Συγκεκριμένα στη παρακάτω μελέτη συνολικά τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: CloudCompare(Telecom ParisTech and the R&D division of EDF), Dips 7.0(RocScience), RocPlane(RocScience), CorelDRAW(Corel Corporation), RocPro3D(RocPro3D), Pix4DMapper(Pix4D), ArcGIS(Esri). Η χρήση έγινε σύμφωνα με άδειες που μας χορηγήθηκαν από το Τμήμα Γεωλογίας και συγκεκριμένα το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας.

Στη συνέχεια κρίνεται σκόπιμο να αναλυθούν περαιτέρω τα μηχανήματα UAV και LiDaR με στόχο την καλύτερη κατανόηση του τρόπου δράσης τους καθώς αποτελούν τις πλέον σύγχρονες μεθόδους αποτελεσματικής γεωλογικής και τεχνικογεωλογικής χαρτογράφησης.

1.3.1 Χρήση UAV

Τα UAV (μη επανδρωμένα αέρια οχήματα) αποτελούν ένα σύγχρονο εργαλείο λήψης αεροφωτογραφιών για τις περιοχές μελέτης, προσιτό οικονομικά και ιδιαίτερα ακριβές. Στη συνέχεια οι εικόνες αυτές αναλύονται με την μέθοδο της φωτογραμμετρίας. Ως φωτογραμμετρία ονομάζεται «*Η μέθοδος κατά την οποία λαμβάνονται τρισδιάστατες (3D) πληροφορίες χαρακτηριστικών μέσω 2 ή περισσότερων φωτογραφιών του ίδιου αντικειμένου, λαμβανόμενες υπό διαφορετικές γωνίες*» (Vasuki et al., 2014).

Τα μη επανδρωμένα αέρια αυτά οχήματα αποτελούνται από: διάφορους αισθητήρες όπως γυροσκόπια και μονάδες αδρανειακής κίνησης, οι οποίοι εντοπίζουν και διατηρούν την ευθυγράμμιση της θέσης του οχήματος καθώς και ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές χαμηλού βάρους και σχετικά ικανοποιητικής ανάλυσης. Η ζωντανή αυτή απεικόνιση των λαμβανόμενων πληροφοριών σε μία απομακρυσμένη βάση σε συνδυασμό με την χρήση GPS από το μηχανήμα, παρέχει την δυνατότητα λήψης γεωαναφερμένων δεδομένων υψηλής ακρίβειας σε πραγματικό χρόνο. Αυτό αποτελεί ίσως και ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα τους στη χρήση τους στη γεωλογία, καθώς δίνουν πρόσβαση στον μελετητή σε μέχρι πρότινος “σκιερές ζώνες” για αυτόν, διευκολύνοντας έτσι κατά πολύ την υπαίθρια εργασία και αυξάνοντας την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα αυτής.

Τελικό αποτέλεσμα μέσω της χρήσης τέτοιων συστημάτων είναι η κατασκευή τρισδιάστατου σύννεφου σημείων (3D point cloud) μέσω του οποίου θα εξαχθεί τελικά το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM).



Εικόνα 1. Μη επανδρωμένο αέριο όχημα.



Σχήμα 2. Διάγραμμα ροής όπου παρουσιάζεται μία τυπική μεθοδολογία φωτογραμμετρίας Bemis et al., (2014), τροποποιημένο.

1.3.2 Χρήση επίγειου LiDaR

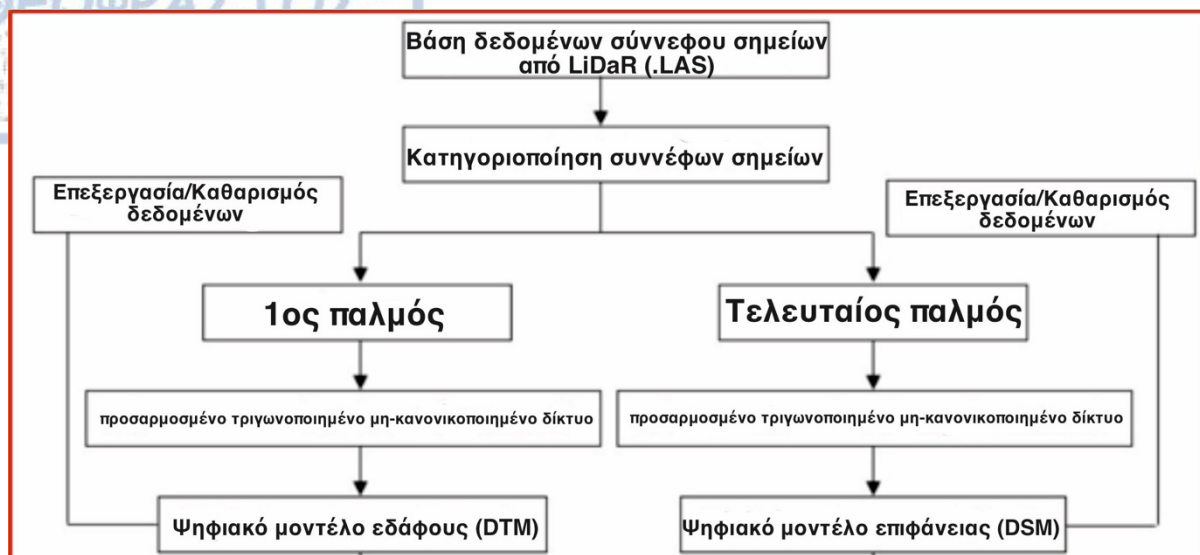
Το επίγειο LiDaR αποτελεί έναν επίγειο σαρωτή η λειτουργία του οποίου βασίζεται στην ακτινοβολία η οποία αντανακλάται από μια επιφάνεια. Συγκεκριμένα, θεωρούνται συστήματα κατά τα οποία ισχυρή δέσμη laser εκπέμπεται προς ένα στόχο, αλληλοεπιδρά με αυτόν και το φως επιστρέφει, συλλέγεται και καταγράφεται από έναν οπτικό ανιχνευτή παρέχοντας πληροφορίες για τη φύση και σύσταση του στόχου, την απόσταση από την πηγή και την κατανομή του στο χώρο.

Η δημιουργία ενός νέφους μετρούμενων σημείων, σε απόσταση σχετική ως προς το σαρωτή, βασίζεται σε δύο σετ μετρήσεων. Το πρώτο αφορά στη θέση και το πεδίο σάρωσης κάθε μέτρησης, ενώ το δεύτερο αφορά την απόσταση και υπολογίζεται έμμεσα, ανάλογα με τον τύπο του μηχανήματος.

Η επεξεργασία των δεδομένων που λαμβάνουμε, περιλαμβάνει γεωμετρική διόρθωση του νέφους σημείων καθώς και την ευθυγράμμιση σαρώσεων για τη δημιουργία νέφους και τη μετατροπή των σύνθετων σημάτων σε χωρικά δεδομένα. Σε επόμενο στάδιο, το νέφος σημείων μετατρέπεται στα χωρικά στοιχεία που αντιπροσωπεύει, με τη χρήση εργαλείου αντιστοίχισης το οποίο αναγνωρίζει κοινά σημεία στα νέφη σημείων.



Εικόνα 2. Επίγειος σαρωτής LiDaR πάνω σε τρίποδα



Σχήμα 3. Διάγραμμα ροής όπου παρουσιάζεται μία τυπική μεθοδολογία κατασκευής τρισδιάστατου μοντέλου εδάφους μέσω της χρήσης επίγειου σαρωτή LiDaR.

Hamdan, (2015), τροποποιημένο

1.4 Διάρθρωση κεφαλαίων

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται το γενικό πλαίσιο της μελέτης, πραγματοποιείται μία πρώτη εισαγωγή στην τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη έρευνα και καθορίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, η σημασία της καθώς και ιστορικό αστοχιών σε αυτή.

Στο Κεφάλαιο 2 αναλύεται ο ορισμός των κατολισθήσεων και δίνονται επεξηγήσεις σχετικά με τις επιμέρους διακρίσεις ανάλογα με το είδος τους.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται με λεπτομέρεια οι γεωλογικές και γεωμορφολογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής μελέτης. Οι γεωλογικές συνθήκες περιλαμβάνουν τα απαραίτητα λιθολογικά, τεκτονικά, υδρογεωλογικά και σεισμολογικά δεδομένα.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται οι τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες στη περιοχή μελέτης. Επίσης αναλύεται ο μηχανισμός αστοχίας και παρουσιάζεται η έρευνα σχετικά με την στατικότητα της περιοχής.

Στα Κεφάλαια 5 και 6 επισημαίνονται τα εργαλεία στα οποία βασίστηκε η έρευνα (UAV και LiDaR) και αναλύεται σε βάθος η μέθοδος λήψης και επεξεργασίας των δεδομένων από αυτά.

Στο Κεφάλαιο 7 αναλύεται η μέθοδος σύγκρισης που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή μελέτης και παρουσιάζονται και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα αυτών των συγκρίσεων. Επιπρόσθετα, προτείνονται κάποιες περαιτέρω έρευνες που μπορούν να ενταχθούν στο γεωερευνητικό πρόγραμμα της περιοχής.

Τέλος στο Κεφάλαιο 8 συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της παρούσας μελέτης, παρουσιάζοντας τα βασικά πλεονεκτήματα των νέων μεθόδων τηλεανίχνευσης στην Τεχνική Γεωλογία και καθορίζονται τα πλαίσια και τα όρια χρήσης τους.

2. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

Για τον όρο κατολισθήσεις έχουν προταθεί αρκετοί ορισμοί από διάφορους μελετητές. Πληρέστερος θεωρείται αυτός του Varnes (1978) σύμφωνα με τον οποίο ως κατολίσθηση (mass movement) καλείται “η μετακίνηση τμήματος πρανούς που οφείλεται σε ολίσθηση, κατάπτωση, ανατροπή, ροή και ερπυσμό”(μετ. Κούκης & Σαμπατακάκης (2007)).

Η ταξινόμηση που παρουσιάζεται στη παρούσα εργασία, για τα φαινόμενα κατολισθήσεων, επομένως βασίζεται στη ταξινόμηση του Varnes (1978) όπως μεταφράστηκε από τους Κούκη & Σαμπατακάκη (2007).

2.1 Ταξινόμηση κατά Varnes

Σύμφωνα με τον Varnes, αρχικά οι κατολισθήσεις διαχωρίζονται ανάλογα με το είδος του υλικού της ολισθαίνουσας μάζας. Το υλικό αυτό μπορεί να είναι είτε βράχος είτε έδαφος. Επιπρόσθετα κατηγοριοποιούνται περαιτέρω ανάλογα με το είδος της κίνησης τους. Συγκεκριμένα, διακρίνονται σε πτώσεις (falls), ανατροπές (topplings), ολίσθησεις (slides), εξαπλώσεις (spreads), ροές (flows) και σύνθετες (complex). Σχηματικά ο διαχωρισμός αυτός παρουσιάζεται στο Σχήμα 4. και αναλύεται εκτενώς στη συνέχεια.

Υλικό	Βράχος	Debris	Έδαφος
Τύπος ολίσθησης			
ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΙΣ	 Κατάπτωση βράχων Scar Rock fall debris	 Κατάπτωση κορμίστων (debris) Κορμίστα Κύμας debris	 Εδαφική κατάπτωση Cracks Κύμας debris
ΑΝΑΤΡΟΠΕΙΣ	 Ανατροπή βράχων	 Ανατροπή κορμίστων (debris) Κύμας debris	 Cracks Ανατροπή έδαφους Debris cone
ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ	Περιστροφικές Μεμονωμένη περιστροφική ολίσθηση Failure surface Fulcrum	 Επικ. κλίση Κορμίστα Πολλαπλή περιστροφική ολίσθηση Ανατροπή μάζας	 Διαδοχικές περιστροφικές ολίσθησεις
	Μεταθετικές (Επίπεδες) Βραχυδής ολίσθηση	 Ολίσθηση κορμίστων (debris)	 Εδαφική ολίσθηση
ΕΞΑΠΛΩΣΕΙΣ	 Χαραδρώσεις Βράχος Ανταρξιακή ολίσθηση Thinning of beds Plane of discontinuities Competent substratum	 Π.χ. Προέκταση κορμίστων λόγω διαρρέουσας και κύρωσης πλάγιάς	 Εδαφική εξάπλωση
ΡΟΕΙΣ	 Περμαγεωδής ροή debris	 Ροή κορμίστων debris	 Εδαφική ροή (λυσσωδής ροή)
ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ	 Π.χ. Κατάπτωση - εδαφική ροή με κατολισθίσεις βράχων και debris	 Π.χ. Σύνθετη, μη-κυκλική, μαζική περιστροφική/μεταθετική ολίσθηση με μετατόπιση σε εδαφική ροή στον πόδα	

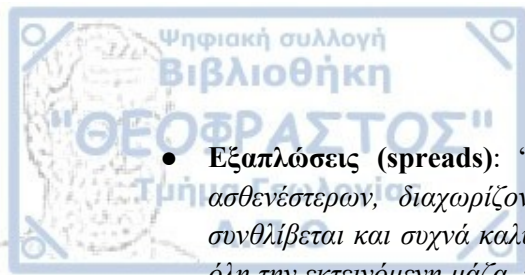
Σχήμα 4. Κατηγοριοποίηση κατολισθήσεων κατά Varnes (1978)

- **Καταπτώσεις βράχων (rock falls):** “Μάζα (κυρίως πετρώματος αλλά και πολύ συνεκτικού εδάφους) οποιουδήποτε μεγέθους, αποσπάται από ένα απότομο εδαφικό ή βραχώδες πρανές, κατά μήκος μιας επιφάνειας, χωρίς καθόλου ή με ελάχιστη διατμητική μετατόπιση και η πτώση γίνεται ελεύθερα, με αναπήδηση ή κύλιση στην επιφάνεια του πρανούς. Η μετακίνηση είναι εξαιρετικά γρήγορη και είναι δυνατόν να έχουν προηγηθεί αυτής μικρότερες μετακινήσεις που οδήγησαν στον προοδευτικό αποχωρισμό της μετακινούμενης μάζας από το μητρικό πέτρωμα”.

Οι καταπτώσεις βράχων πραγματοποιούνται σε πρανή των οποίων η κλίση (ύψος πρανούς: βάση πρανούς) κυμαίνεται από 4:1 έως 1:1. Για κλίση >4:1 πραγματοποιείται ελεύθερη πτώση (free falling) των τεμαχών ενώ με τη μείωση της κλίσης, τα τεμάχια αναπηδούν (bouncing) και τέλος κυλούν (rolling).

Αξίζει να επισημανθεί ακόμη ότι οι καταπτώσεις πραγματοποιούνται κυρίως σε σχηματισμούς με εναλλαγές πετρωμάτων καθώς η διαφορική διάβρωση των σχηματισμών δημιουργεί υποσκαφές και εξάρματα τα οποία λόγω βαρύτητας αποκολλώνται. Δευτερευόντως, για την πραγματοποίηση καταπτώσεων είναι δυνατόν να ευθύνονται διάφορες προϋπάρχουσες ασυνέχειες, με δυσμενή προσανατολισμό για την βραχώμαζα, οι οποίες διευρύνονται λόγω της δράσης του νερού σε αυτές.

- **Ανατροπές (topples):** “Οι ανατροπές πραγματοποιούνται με μία περιστροφική κίνηση προς τα έξω της αποσπώμενης μάζας από ένα πρανές κυρίως βραχώδες, γύρω από ένα σημείο ή έναν άξονα περιστροφής που βρίσκεται χαμηλότερα από το κέντρο βάρους της μετακινούμενης μάζας. Προκαλείται κυρίως από την βαρύτητα και από τις δυνάμεις που ασκούνται από γειτονικά τεμάχια ή από την επίδραση του νερού (υδροστατικές πιέσεις) που γεμίζει τις ασυνέχειες και ρωγμές”
- **Ολισθήσεις (slides):** “Στις ολισθήσεις, η μετακίνηση προϋποθέτει κυρίως διατμητική παραμόρφωση και μετατόπιση, θραύση δηλαδή του υλικού κατά μήκος μίας ή περισσότερων επιφανειών, που μπορεί να είναι ορατές ή όχι και να εκδηλώνονται μέσα σε μία σχετικά στενή ζώνη. Η μετακίνηση μπορεί να είναι προοδευτική, δηλαδή η διατμητική θραύση να μη συμβαίνει ταυτόχρονα σε όλη την επιφάνεια που θα αποτελέσει τελικά την επιφάνεια θραύσης, αλλά να επεκτείνεται διαδοχικά πέρα από την αρχική περιοχή τοπικής θραύσης. Η μάζα που μετατοπίζεται ολισθαίνει προς τα κατάντη απομακρυνόμενη από την αρχική επιφάνεια θραύσης”
 - **Περιστροφικές ολισθήσεις (rotational slides):** “Οι περιστροφικές ολισθήσεις πραγματοποιούνται συνήθως κατά μήκος κοίλων προς τα πάνω επιφανειών με μικρή παραμόρφωση στο εσωτερικό της μετακινούμενης μάζας. Το ανώτερο τμήμα της μετακινούμενης μάζας κινείται σχεδόν κατακόρυφα προς τα κάτω με μία μικρή κάμψη προς τα πίσω, λόγω της περιστροφικής κίνησης, ενώ στη βάση της μετακινούμενης μάζας παρατηρείται ανύψωση”
 - **Μεταθετικές ολισθήσεις (translational slides):** “Στις μεταθετικές ολισθήσεις η μάζα που αποσπάται από το πρανές μετακινείται προς τα έξω, κατά μήκος μιας κατά προσέγγιση επίπεδης ή ομαλής, κυματοειδούς επιφάνειας με πολύ μικρή ή καθόλου περιστροφική κίνηση ή κάμψη. Συνήθως, η μετακινούμενη μάζα ολισθαίνει και μετακινείται παράλληλα πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης”



- **Εξαπλώσεις (spreads):** “Οι βραχώδεις γεωλογικοί σχηματισμοί που υπέρκεινται άλλων ασθενέστερων, διαχωρίζονται με κατακόρυφες ρωγμές σε τεμάχια. Το υποκείμενο υλικό συνθλίβεται και συχνά καλύπτει τις ρωγμές που δημιουργούνται. Η μετατόπιση κατανέμεται σε όλη την εκτεινόμενη μάζα, χωρίς όμως καλά καθορισμένη επιφάνεια διάτμησης ή κάποια ζώνη πλαστικής ροής που να ελέγχει τη μετακίνηση. Η μετακίνηση αυτή τις περισσότερες φορές είναι ένα εξαιρετικά αργό φαινόμενο αλλά η επιφάνειά της κατά κανόνα είναι πολύ μεγάλη (ζώνες αρκετών χιλιομέτρων)”
- **Ροές (flows):** “Οι ροές, υγρές ή ξηρές, γρήγορες ή αργές εκδηλώνονται κυρίως σε χαλαρά υλικά. Αντίθετα, στο βραχώδες υπόβαθρο, οι αντίστοιχες μετακινήσεις περιλαμβάνουν τις πολύ αργές παραμορφώσεις που κατανέμονται ανάμεσα σε πολλές, κοντινές ρωγμές – διακλάσεις,”
- **Σύνθετες μετακινήσεις πρανών (composite slides):** “Σαν σύνθετες ολισθήσεις ταξινομούνται αυτές στις οποίες διαφορετικού τύπου μετακινήσεις γίνονται σε διαφορετικές περιοχές της ολισθαίνουσας μάζας, μερικές φορές ταυτόχρονα”

3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

3.1 Γενικά

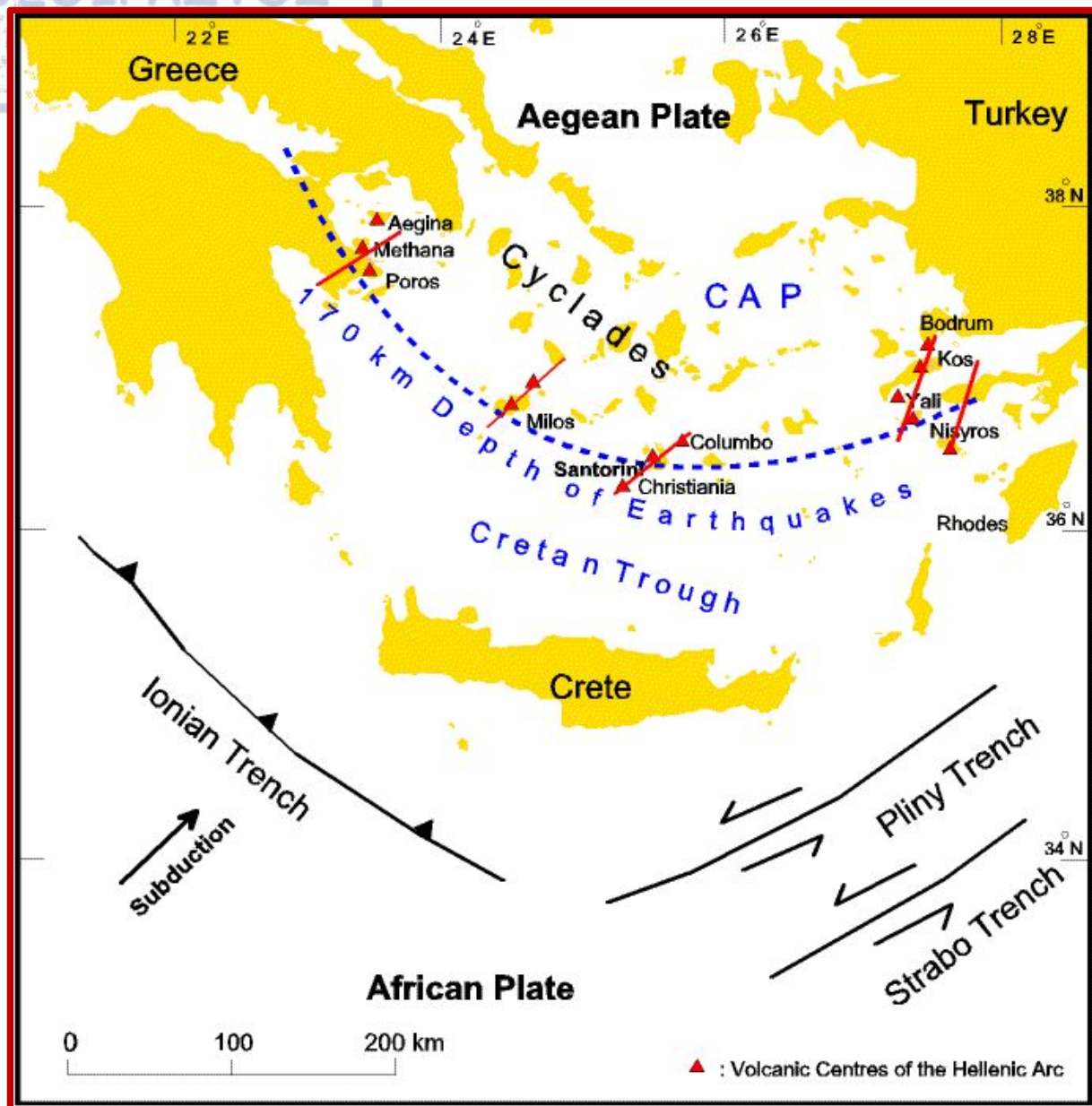
Η Σαντορίνη (ή Θήρα) ανήκει στα νησιά των Κυκλάδων και βρίσκεται 120 km βόρεια της Κρήτης. Αποτελείται από τα νησιά Θήρα, Θηρασία, Ασπρονήσι, Παλαιά Καμένη και Νέα Καμένη. Η Θήρα, η Θηρασία και το Ασπρονήσι αποτελούν υπολείμματα της μεγάλης Μινωικής έκρηξης, ενώ η Παλαιά και Νέα Καμένη σχηματίστηκαν στο κέντρο της καλδέρας από μεταγενέστερες εκχύσεις λάβας κατά τους ιστορικούς χρόνους, με τελευταία έκρηξη το 1950.

Η Σαντορίνη εντάσσεται στο ηφαιστειακό τόξο του Νοτίου Αιγαίου που έχει μήκος 500 km και πλάτος 20-40 km και εκτείνεται από την ηπειρωτική Ελλάδα μέχρι την Τουρκία. Τα κύρια ηφαιστειακά κέντρα του τόξου αυτού στον ελληνικό χώρο είναι τα Μέθανα, η Μήλος, η Σαντορίνη και η Νίσυρος. Ο σχηματισμός του σχετίζεται με την κατάδυση της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική, ή ακριβέστερα την υποπλάκα του Αιγαίου. Η κατάδυση γίνεται με ταχύτητα περίπου 5 cm/έτος προς τα βορειοανατολικά με γωνία 30°- 40°, με το όριο μεταξύ των δύο αυτών πλακών να βρίσκεται στην Ελληνική Τάφρο νότια της Κρήτης.

Το ηφαιστειακό σύμπλεγμα της Σαντορίνης αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα του πλανήτη και σίγουρα το πιο ενεργό του ηφαιστειακού τόξου του Νοτίου Αιγαίου. Χαρακτηριστικό αποτελεί πως τα τελευταία 400.000 χρόνια έχουν διαπιστωθεί πάνω από 100 εκρηκτικές δραστηριότητες στην περιοχή. Αποτέλεσμα αυτής της έντονης δυναμικής του ηφαιστειακού κέντρου της Σαντορίνης είναι η αποτύπωση 12 μεγάλων εκρήξεων με εκχύσεις μεγάλου όγκου μάγματος (αρκετά km³/έκρηξη) που προκάλεσαν την δημιουργία τουλάχιστον 4 καταρρεύσεων τύπου καλδέρας, καθώς επίσης και η ύπαρξη των υπολειμμάτων τουλάχιστον 4 ασπιδόμορφων ηφαιστίων (Druitt et al. 1989, Druitt et Francaviglia 1992).

Το ηφαιστειακό αυτό σύμπλεγμα αποτελείται από την Σαντορίνη, τα μικρά νησιά Χριστιανά 20 km νοτιοδυτικά και το υποθαλάσσιο ηφαίστειο Κολούμπο 7 km βορειοανατολικά. Η λειτουργία αυτών των κέντρων για τα τελευταία 600.000 χρόνια βρίσκεται κατά μήκος 2 ηφαιστειοτεκτονικών γραμμών διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ. Της γραμμής Καμμένης και της γραμμής Κολούμπου, που αποτελούν την κύρια δίοδο του μάγματος έτσι ώστε να ανέλθει αυτό από τα μεγάλα βάθη στην επιφάνεια.

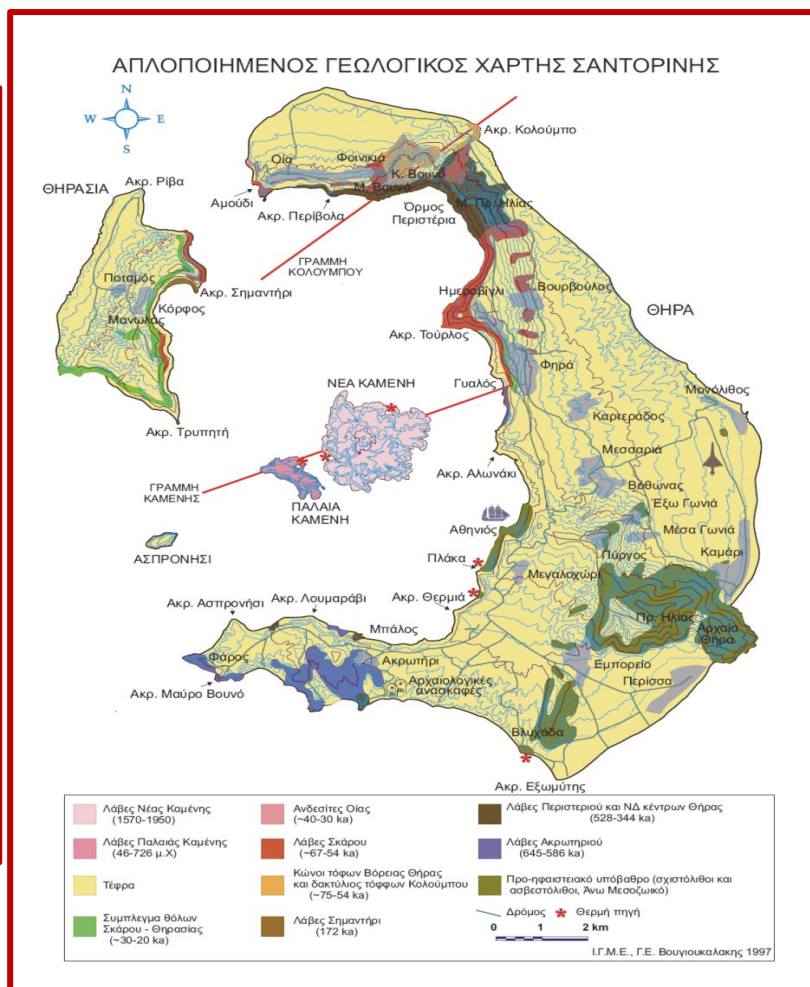
Η ηφαιστειολογική εξέλιξη της Σαντορίνης θα μπορούσε να διαχωριστεί σε 6 κύρια στάδια: **1.** παλαιά ηφαιστειότητα ηφαιστειακού κέντρου Ακρωτηρίου, **2.** κώνοι σκωριών χερσονήσου Ακρωτηρίου, **3.** ηφαίστειο Περιστεριάς, **4.** προϊόντα πρώτου εκρηκτικού κύκλου, **5.** προϊόντα δεύτερου εκρηκτικού κύκλου, **6.** δημιουργία της Καμμένης.



Σχήμα 5. Το Ηφαιστειακό Τόξο του Νοτίου Αιγαίου και η γεωτεκτονική θέση της Σαντορίνης.
Friedrich (1994).



Εικόνα 3. Δορυφορική φωτογραφία της Σαντορίνης.
NASA.

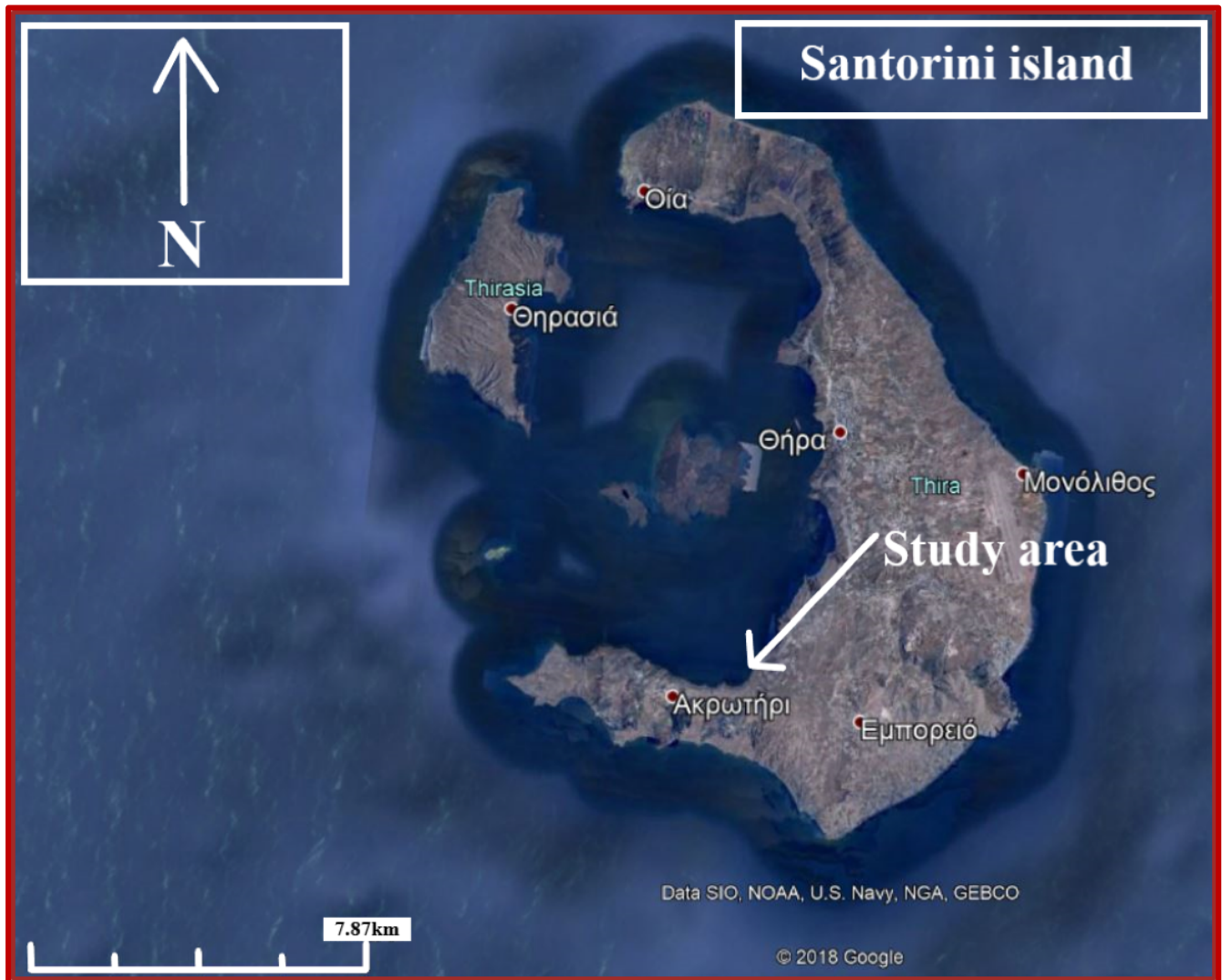


Σχήμα 6. Γεωλογικός χάρτης της Σαντορίνης.
Βουγιουκαλάκης (1997)

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

3.2 Γεωμορφολογία

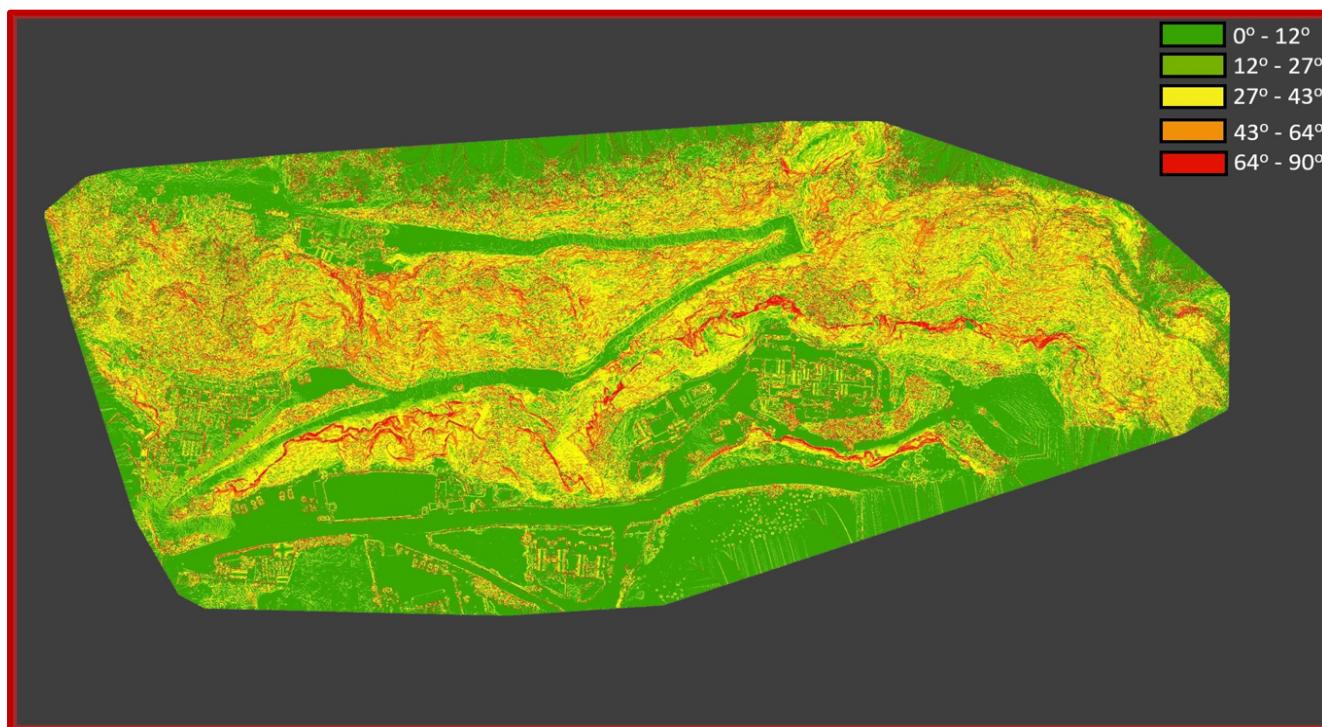
Η περιοχή «Αποθήκες» ($36^{\circ}21'38.01''\text{N}$, $25^{\circ}24'17.18''\text{E}$) βρίσκεται ανατολικά του χωριού Ακρωτήρι και πιο συγκεκριμένα στο δρόμο που οδηγεί στη μοναδική παραλία εντός καλδέρας. Η μορφολογία της περιοχής χαρακτηρίζεται από βραχώδη πρηνή με ιδιαίτερα μεγάλες κλίσεις (πλησιάζοντας τις 90°) και σε κάποιες περιπτώσεις με αρνητική κλίση, ενώ τα ύψη τους φτάνουν έως και τα 15m.



Σχήμα 7. Δορυφορική εικόνα με την ακριβή θέση της υπό μελέτης περιοχή.
Google Earth (τροποποιημένη)



Εικόνα 4. Εικόνα της υπό μελέτης περιοχής με τη βοήθεια του UAV

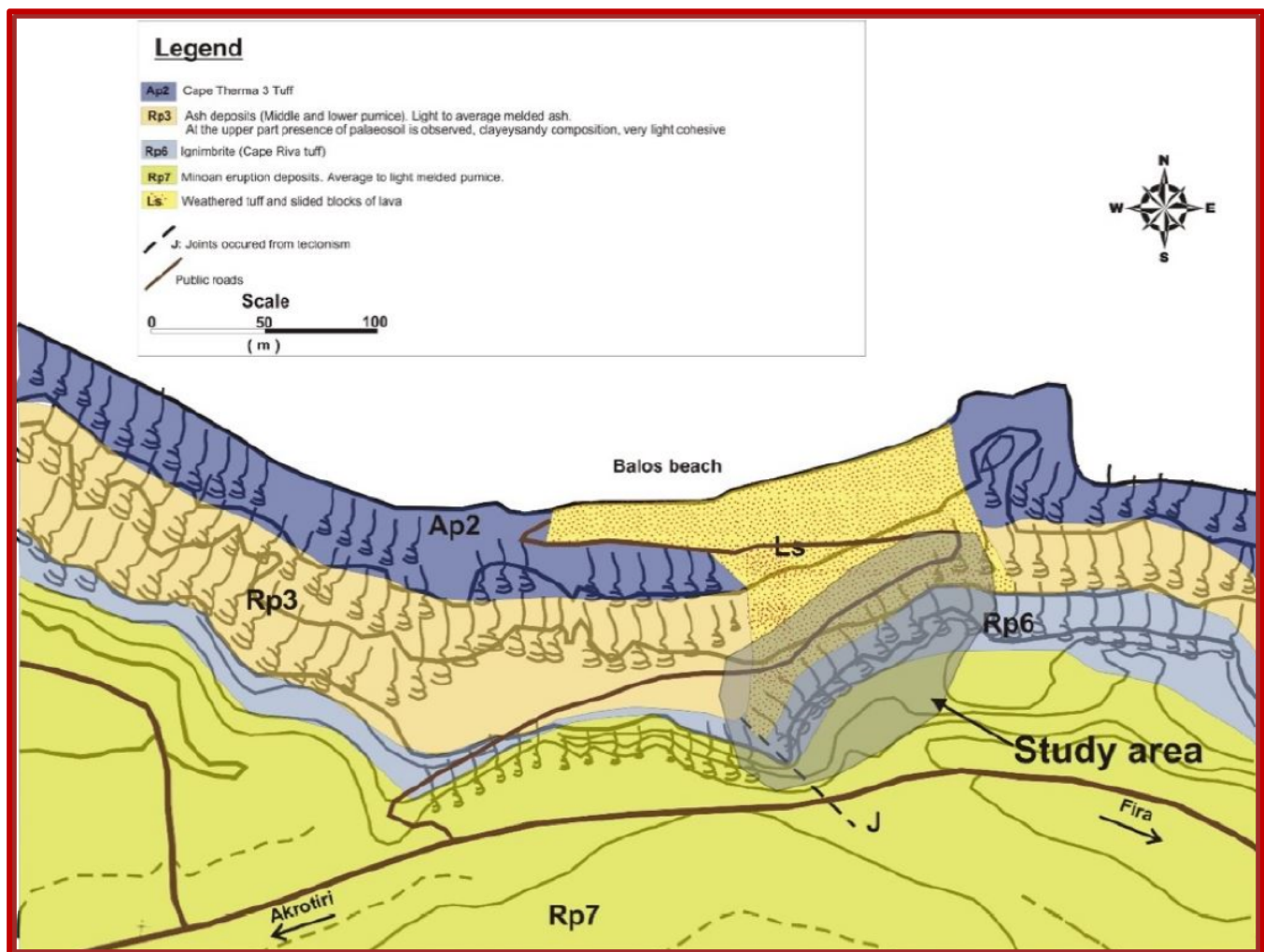


Σχήμα 8. Χάρτης της περιοχής με χρωματική κλίμακα ανάλογα με τις κλίσεις που την χαρακτηρίζουν

3.3 Λιθολογία

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, γενικά η λιθολογία της Σαντορίνης χαρακτηρίζεται από εναλλαγές ηφαιστειακών πετρωμάτων ανάλογα με την διαδοχή των ηφαιστειακών φάσεων σε κάθε περιοχή. Στη συγκεκριμένη θέση μελέτης είναι χαρακτηριστική η εναλλαγή ηφαιστειακών στρωμάτων ενός ανθεκτικού σκληρού πετρώματος, του ιγκνιμβρίτη και ενός μαλακού στρώματος πυροκλαστικών τόφων.

Αξίζει να επισημανθεί η ύπαρξη ενός λεπτού στρώματος, μεταξύ αυτής της εναλλαγής, που αποτελεί το παλαιοέδαφος της περιοχής.



Σχήμα 9. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης.
Druitt & Daves (1995)

Αναλυτικότερα, από κάτω προς τα πάνω συναντώνται:

- Ap2: η τέφρα Θερμιά 3. Πρόκειται κυρίως για ανδεστιτικού τύπου αποθέσεις που συναντώνται εκτενώς σε αυτό το τμήμα του νησιού.
- Rp3: Το στρώμα της κατώτερης κισσήρεως που ουσιαστικά πρόκειται για την κορύφωση του πρώτου εκρηκτικού κύκλου στο νησί (Druitt et al. 1999) με μία σειρά ρυοδακτιτικών τύπου εκρήξεων. (Κατώτερη Κίσσηρης 1 και Κατώτερη Κίσσηρη 2). Στο τέλος αυτού του εκρηκτικού κύκλου έχουμε και την πρώτη κατάρρευση της καλδέρας.
- Ap4: Το στρώμα της μεσαίας τέφρας, προϊόν των ηφαιστείων Μεγάλου Βουνού και Κόκκινου Βουνού, συμπεριλαμβανομένης και της Ανώτερη Σκωρίας 1, υλικά τα οποία δομούσαν την πρώτη καλδέρα και αποκαλύφθηκαν με την δραστηριότητα του ηφαιστείου του Σκάρου (Huijsmans et al. 1988)
- Rp6: Η λάβα του Ρίβα με προϊόντα κυρίως δακτιτικής και ρυοδακτιτικής σύστασης. Χαρακτηριστικός είναι ο ινγκνιμβρίτης αυτής της δραστηριότητας που σε πολλές περιοχές ξεπερνά σε πάχος τα 20 m
- Rp7a: Οι αποθέσεις της Μινωικής έκρηξης (φάσεις 1-3) οι οποίες από κάτω προς τα επάνω δομούνται από μία πληνιικού τύπου έκρηξης κίσσηρη μικρού πάχους, στη συνέχεια επικάθεται στην προηγούμενη μία κυματοειδούς μορφής στρώση από φρεατομαγματικά υλικά (διασταυρούμενες στρώσεις μονής κατεύθυνσης με εμφάνιση βολίδων) και τέλος οι τόφοι της 3ης φάσης (προϊόντα ροής χαμηλής θερμοκρασίας που περιλαμβάνουν μπλοκ δακτιτών και δακτιτικών υαλοκλαστιτών) (Sparks and Wilson, 1990).

Από τη βάση του πρανούς μέχρι και το δρόμο διακρίνονται δύο κύριες υποζώνες πλάτους 5 m η κάθε μια.

Η πρώτη ζώνη είναι σχεδόν παράλληλη με την επιφάνεια του εδάφους και στην οποία χαρτογραφούνται μεγάλα τεμάχια τα οποία αποκολλήθηκαν από το πρανές ενώ η δεύτερη υποζώνη έχει μεγαλύτερη κλίση και μικρότερων διαστάσεων τεμάχια. Κατά μήκος του πρανούς, κλίσης 80-91 και διεύθυνση κλίσης 324, χαρτογραφήθηκαν τεκτονικές ασυνέχειες οι οποίες παρουσιάζουν σημαντική εμμονή. Οι ασυνέχειες αυτές οριοθετούν μεγάλα τεμάχια (block) τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη επικινδυνότητα. Χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης περιοχής είναι η παρουσία μεγάλων τεμαχών τα οποία έχουν ήδη αποκολληθεί από το πρανές. Η θέση τους σήμερα βρίσκεται ανάμεσα στο πόδι του πρανούς και το δρόμο και αποτελούν ζωντανά τεκμήρια των αστοχιών που έχουν συμβεί στο παρελθόν. Οι ασυνέχειες έχουν μεγάλη κλίση που κυμαίνεται από 76 έως 90 και άνοιγμα της τάξης των λίγων cm δημιουργώντας διακριτές ρωγμές. Η βάση του πρανούς έχει διαβρωθεί και υποσκαφεί σε βάθος 70 cm δημιουργώντας μια επιφάνεια σχεδόν παράλληλη με την επιφάνεια του εδάφους με κλίση 17 (Εικόνα 6) .



Εικόνα 5. Ο χαρακτηριστικός ιγκνιμβρίτης της περιοχής μελέτης με της «πύρινες γλώσσες» μέσα του να είναι εμφανείς.



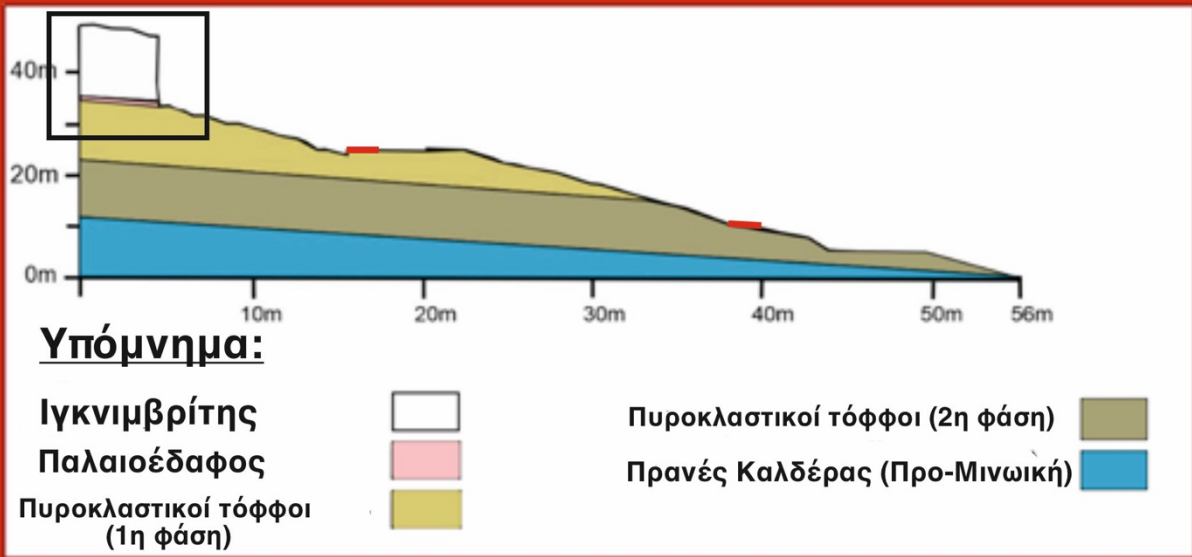
Εικόνα 6. Η υποσκαφή στο παλαιοέδαφος κατά την επαφή του ιγκνιμβρίτη με τους ηφαιστειακούς τόφους.



Εικόνα 7. Η συνολική εικόνα του πρανού, καθώς διαφαίνονται και ο ιγκνιμβρίτης (υπερκείμενος) και οι ηφαιστειακοί τόφφοι (υποκείμενοι)



Εικόνα 8. Η υποσκαφή στη βάση του πρανούς.



Σχήμα 10. Γεωλογική τομή της περιοχής μελέτης μέχρι και το σημείο όπου συναντάται η ακτή(56m). Μέσα στο τετράγωνο βρίσκεται το επισφαλές πρανές, ενώ με κόκκινη γραμμή φαίνεται η θέση του δρόμου στην περιοχή μελέτης.

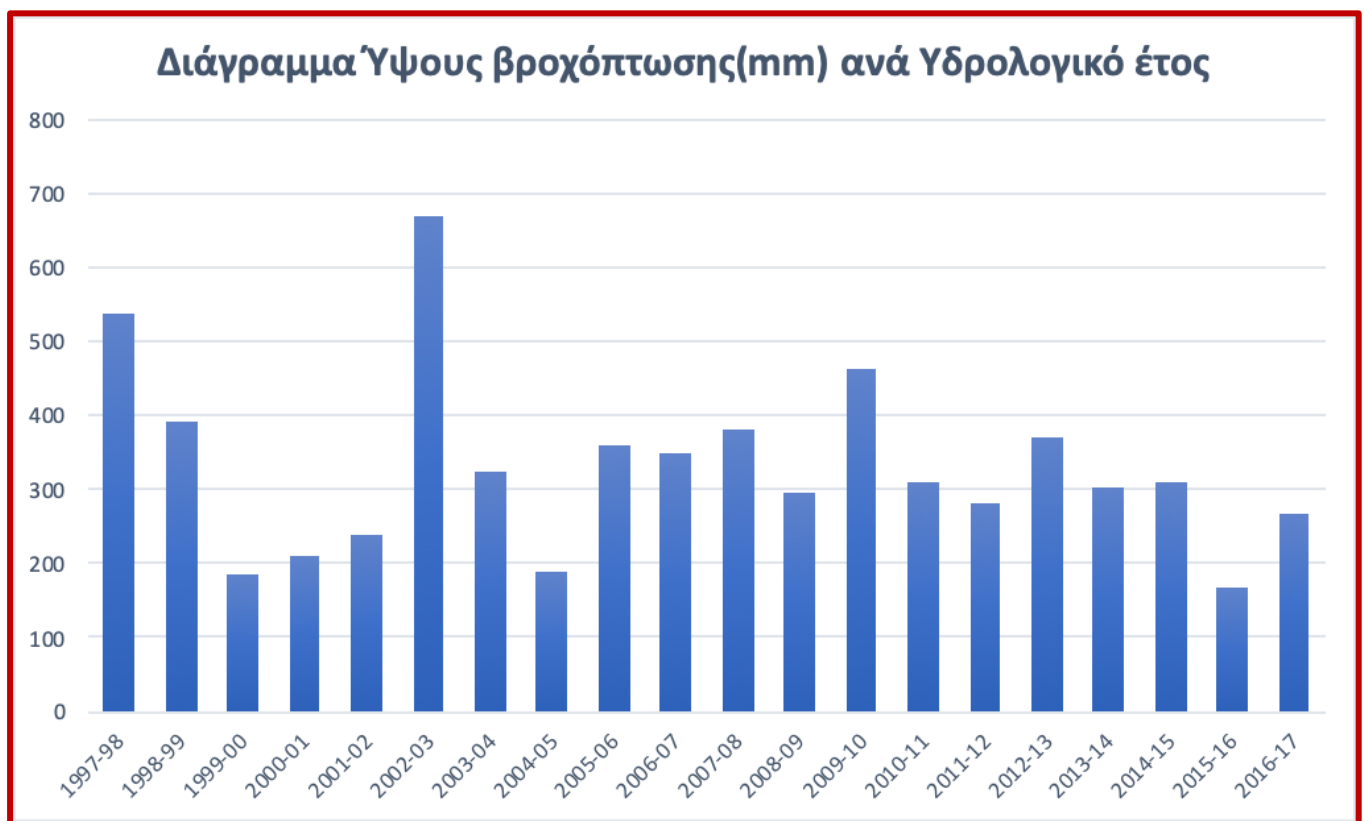


Εικόνα 9. Εναλλαγή του ιγκνιμβρίτη και των πυροκλαστικών τόφων με την εμφάνιση παλαιοεδαφους στην επαφή τους.

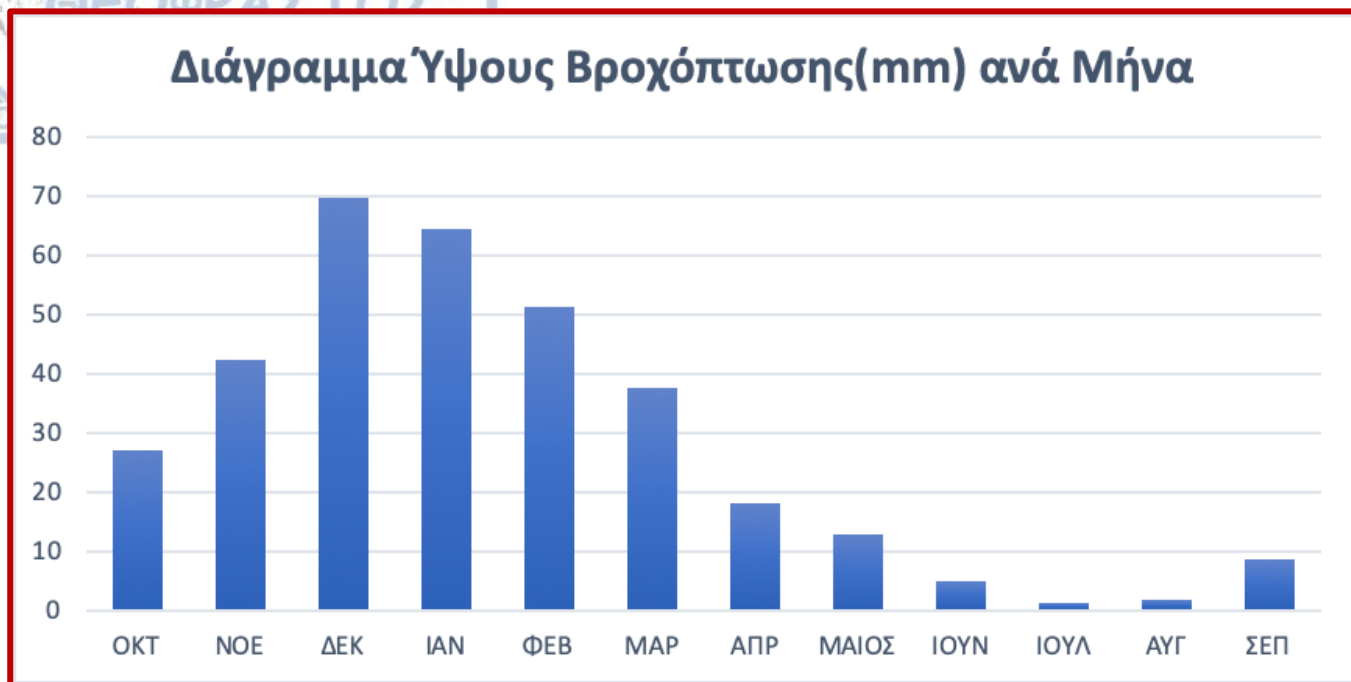
3.4 Υδρομετεωρολογικά δεδομένα

Τα υδρομετεωρολογικά στοιχεία που συλλέχθηκαν αφορούν το μηνιαίο ύψος κατακρημνισμάτων (mm) των υδρολογικών ετών (Οκτώβριος έως Σεπτέμβριο επομένου έτους) 1997-98 έως και 2016-17 του Μετεωρολογικού Σταθμού της Ε.Μ.Υ. στη Σαντορίνη (κωδ. Σταθμού WMO 16744 «Θήρα»). Τα δεδομένα προσφέρθηκαν για την έρευνα μέσω της Ελληνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (Ε.Μ.Υ.) και επεξεργάστηκαν από τον συγγραφέα της παρούσας εργασίας.

Η μέση ετήσια βροχόπτωση για το διάστημα αυτό υπολογίστηκε σε 330,18 mm με ελάχιστη τιμή τα 167,9 mm το υδρολογικό έτος 2015-16 και μέγιστη τα 668,8 mm το υδρολογικό έτος 2002-03. Ο μήνας που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη βροχόπτωση είναι ο Δεκέμβριος, με μέση βροχόπτωση 69,4 mm και ο αντίστοιχος με τη μικρότερη βροχόπτωση είναι ο Ιούλιος με 1,13mm.



Σχήμα 11. Διάγραμμα κατανομής του ύψους της βροχόπτωσης ανά υδρολογικό έτος, από το 1997 μέχρι το 2017

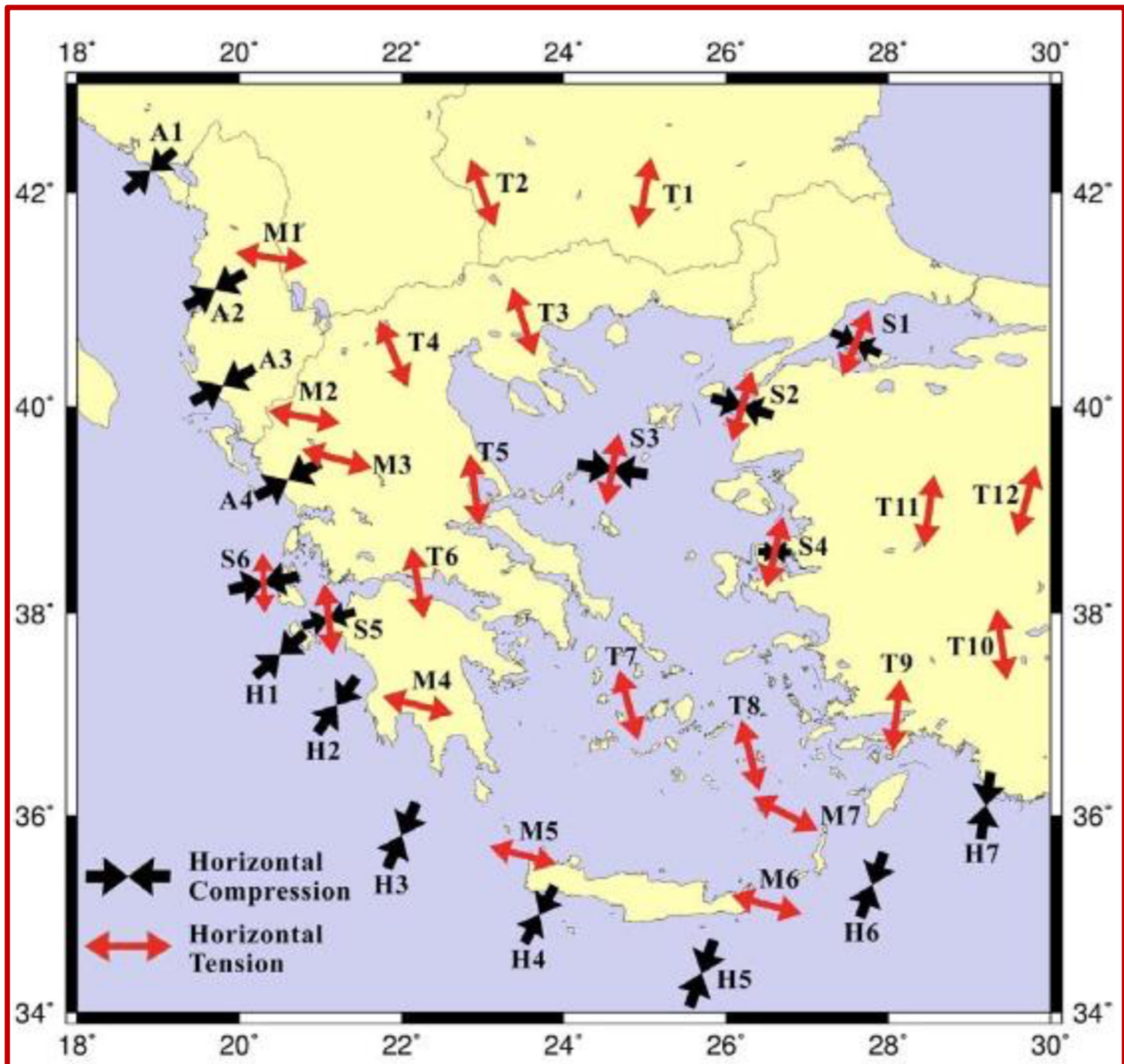


Σχήμα 12. Διάγραμμα των μέσων μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης για το διάστημα των παρατηρήσεων μεταξύ 1997 και 2017

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται η κατανομή της βροχόπτωσης στη διάρκεια του έτους. Παρατηρούμε ότι ο κύριος όγκος των κατακρημνισμάτων εμφανίζεται κατά τους μήνες Δεκέμβριο έως Φεβρουάριο για όλα τα υδρολογικά έτη. Ο όγκος τους μειώνεται αισθητά κατά το διάστημα Μαρτίου-Μαΐου, και κατά τους θερινούς μήνες τα κατακρημνίσματα είναι σχεδόν μηδενικά.

3.5 Σεισμολογικά δεδομένα

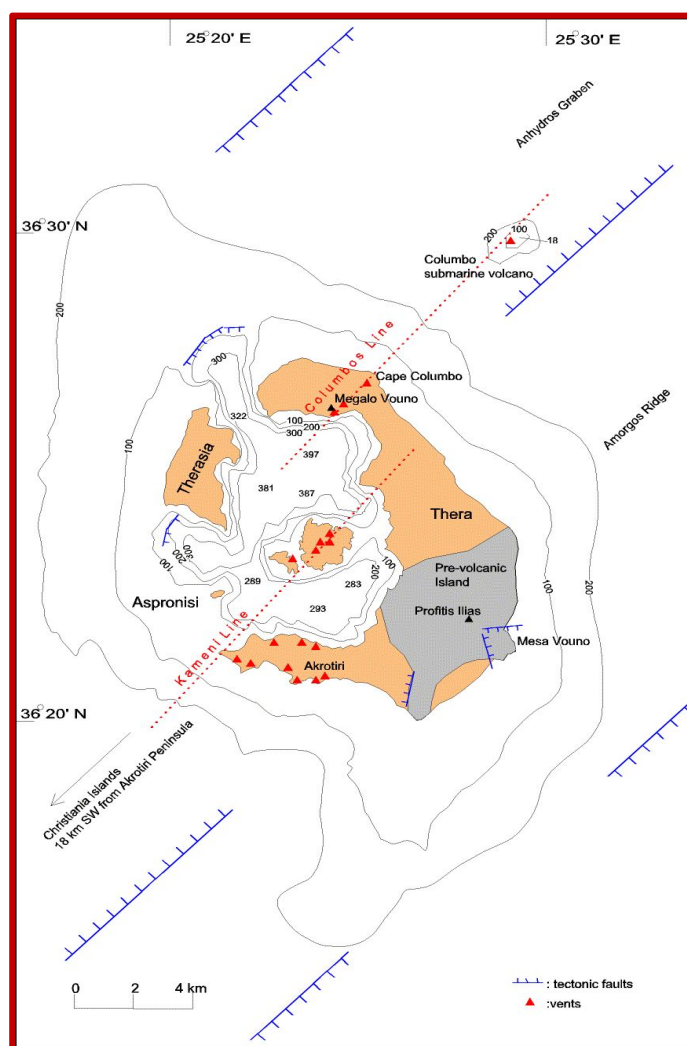
Το κεντρικό τμήμα του Ελληνικού ηφαιστειακού τόξου κυριαρχείται από ένα εφελκυστικό πεδίο τάσεων διεύθυνσης BBD – NNA με BD – NA το οποίο δημιουργεί κανονικά ρήγματα με παρατάξεις διεύθυνσης ABA – ΔΝΔ με BA – ΝΔ (Benetatos et al., 2004) (Σχήμα 13). Η συγκεκριμένη περιοχή θεωρείται ως τεκτονικά ενεργή από τα τέλη του Μειόκαινου έως και σήμερα (Piper and Perissoratis, 2003).



Σχήμα 13. Το πεδίο τάσεων του Ελληνικού χώρου, όπου με τα συγκλίνοντα βέλη απεικονίζονται οι συμπιεστικές δυνάμεις ενώ με τα αποκλίνοντα βέλη παρουσιάζονται οι εφελκυστικές δυνάμεις Papazachos et al. (1999)

Το ηφαιστειακό κέντρο της Σαντορίνης, σύμφωνα με διάφορους ερευνητές (Mountrakis et al., 1996; Piper et al., 2004) που το μελέτησαν, κυριαρχείται από ένα εφελκυστικό πεδίο τάσεων διεύθυνσης ΒΒΔ – ΝΝΑ το οποίο δημιουργεί μία Τεκτονική ζώνη διάρρηξης με διεύθυνση ΑΒΑ – ΔΝΔ (Fytikas et al., 1990; Vougioukalakis et al., 1995; Mountrakis et al., 1996).

Συγκεκριμένα, τα ηφαιστειακά κέντρα της Μετά-Μινωικής δραστηριότητας εντός της καλδέρας, κατανέμονται σε μια ζώνη πλάτους 600 m και μήκους 4500 m με διεύθυνση Β65° Α, η οποία ονομάζεται Τεκτονική Γραμμή Καμένης. Η χαρακτηριστική αυτή μετατόπιση των ηφαιστειακών κέντρων που παρατηρείται στη Νέα Καμένη κατά την διάρκεια της ηφαιστειακής δραστηριότητάς της, πραγματοποιείται στην ίδια διεύθυνση της ζώνης που κατανέμονται τα Μετά-Μινωικών ηφαιστειακά κέντρα. Μια δεύτερη τεκτονική γραμμή, η οποία τοποθετείται παράλληλα σε σχέση με την Τεκτονική Γραμμή Καμένης και διεύθυνσης ΒΑ – ΝΔ, ορίζεται από τους κώνους σκωριών του Μεγάλου Βουνού (Μαύρο και Κόκκινο Βουνό) στην βόρειο-ανατολική μεριά της Σαντορίνης και από το ηφαιστειακό κέντρο του Κολούμπου (Τεκτονική Γραμμή Κολούμπου) (Fytikas et al., 1990).



Σχήμα 14. Απλοποιημένος τεκτονικός χάρτης του συμπλέγματος της Σαντορίνης.
Heiken and McCoy (1984)

Οι τελευταίες νεοτεκτονικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σε διάφορες θέσεις στη Θήρα (Mountrakis et al., 1996) επιβεβαίωσαν την ύπαρξη των δύο προαναφερθέντων τεκτονικών γραμμών.

Αναλυτικότερα, έγινε παρατήρηση θέσεων ρηγμάτων στο βόρειο-ανατολικό τμήμα της Θήρας (Μικρός Προφήτης Ηλίας) τα οποία ανήκουν σε μια τεκτονική ζώνη διάρρηξης διεύθυνσης ΒΑ – ΝΔ. Ένα κύριο δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης διεύθυνσης $30^\circ - 40^\circ$ από τον βορρά είναι αυτό που ορίζει την ζώνη παραμόρφωσης στα νότια του Μικρού Προφήτη Ηλία ενώ μικρότερα κανονικά ρήγματα διεύθυνσης ΒΑ – ΝΔ (περίπου $40^\circ - 70^\circ$) ορίζουν το βόρειο όριο αυτής της ζώνης στην συγκεκριμένη θέση. Στο ακρωτήριο του Κολούμπου, παρατηρείται η συνέχεια αυτής της τεκτονικής ζώνης με την μορφή μικρών κανονικών ρηγμάτων διεύθυνσης ΒΒΑ – ΝΝΔ. Στο νότιο-ανατολικό τμήμα του νησιού και συγκεκριμένα στην περιοχή του Προφήτη Ηλία έγιναν αντίστοιχες παρατηρήσεις, όπου και επιβεβαιώθηκε ότι η παραμόρφωση σε αυτή την περιοχή έγινε από κανονικά ρήγματα με διεύθυνση είτε ΔΒΔ – ΑΝΑ είτε ΒΑ – ΝΔ. Το νότιο-δυτικό κομμάτι της Θήρας και συγκεκριμένα η περιοχή του Ακρωτηρίου κυριαρχείται από κανονικά ρήγματα διεύθυνσης από τον Βορρά $100^\circ - 170^\circ$. Οι μαγματικές φλέβες που βρίσκονται κατά μήκος των βόρειο-ανατολικών τοιχωμάτων της καλδέρας της Σαντορίνης φαίνεται να είναι τεκτονικής προέλευσης και μάλιστα ανήκουν στην ίδια τεκτονική ζώνη με τα ρήγματα στη περιοχή του Μικρού Προφήτη Ηλία. Η εξήγηση για αυτή τη συμπεριφορά μπορεί να ερμηνευτεί με την ύπαρξη ενός κοινού εφελκυστικού πεδίου τάσεων με διεύθυνση κάθετη στη ζώνη κατανομής των ηφαιστειακών κέντρων. Αυτή η εκτατική τάση είναι που επέτρεψε στις φλέβες τροφοδοσίας να αναπτυχθούν σε μια διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ. Αυτός ο άξονας εφελκυσμού επιβεβαιώνεται και από τα ρήγματα που παρατηρήθηκαν στην συγκεκριμένη περιοχή τα οποία είναι τόσο κανονικά όσο και δεξιόστροφα οριζόντιας μετατόπισης (Mountrakis et al., 1996).

Σύμφωνα με τα βιβλιογραφικά δεδομένα, (Β. Παπαζάχος & Κ. Παπαζάχου 1989 και <http://geophysics.geo.auth.gr/>), που αφορούν όλα τα σεισμικά επίκεντρα του Ελληνικού χώρου, οι σεισμοί μεγέθους μεγαλύτερου από $M_w=5$ που έχουν σημειωθεί στην ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος κατά την περίοδο από το 550 π.Χ. έως το 2009 παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 :

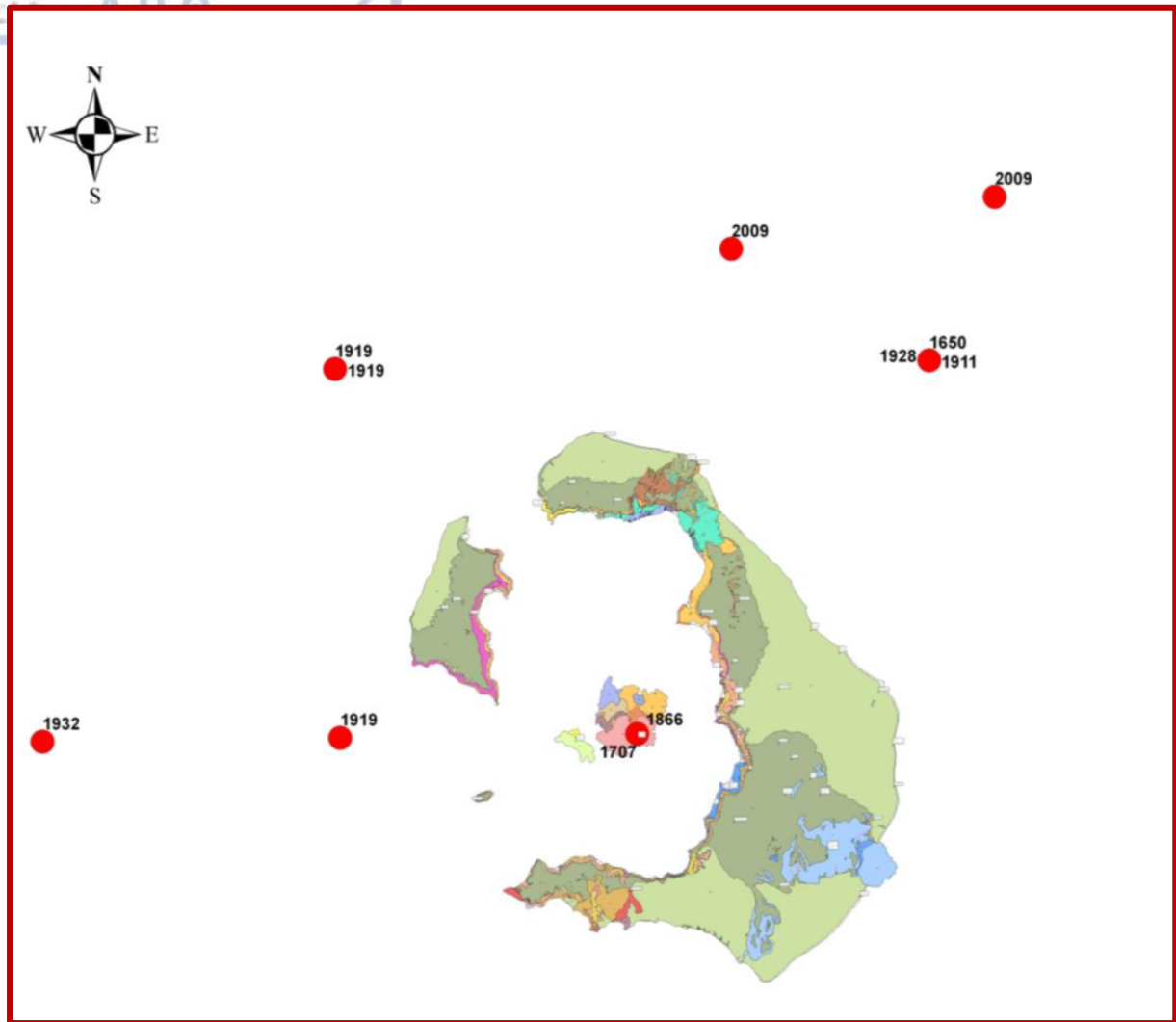
Έτος	Σεισμικό επίκεντρο	Μέγεθος
-198	25.40 36.40	6
46	25.40 36.40	6.5
1650	25.50 36.50	6
1707	25.40 36.40	6
1866	25.40 36.40	6.1
1903	25.00 36.00	5.5
1911	25.50 36.50	7.1
1916	25.70 36.70	5.3
1918	25.80 36.80	6.6
1919	25.00 36.00	5.2
1919	25.30 36.40	6.1
1919	25.30 36.50	5.6
1919	25.30 36.50	5
1920	25.70 36.50	5
1921	26.00 36.00	5.3
1928	25.50 36.50	5.3
1932	25.20 36.40	5.8
1934	25.70 36.70	6.2
1956	25.96 36.40	7.5
1956	25.70 36.60	6.9
1956	26.00 36.70	5
1956	25.80 36.60	5.4
1956	25.90 36.80	5.6
1956	26.00 36.90	5.4
1956	26.00 36.70	5.3
1956	26.00 36.60	5.4
1956	25.90 36.00	5.1
1956	25.70 36.80	5

[illegible]

Στον παρακάτω Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι κυριότεροι σεισμοί στη περιοχή τη Σαντορίνης σύμφωνα με τα βιβλιογραφικά δεδομένα, (Β. Παπαζάχος & Κ. Παπαζάχου 1989 και <http://geophysics.geo.auth.gr/>):

Έτος	Σεισμικό επίκεντρο	Σεισμικό Βάθος (km)	Μέγεθος	Μέγιστη ένταση Mercalli	Περιοχή μέγιστης έντασης
1650	25.40 36.50		6.8	VIII	Σαντορίνη
1707	25.40 36.40		6.0	VI	Σαντορίνη
1866	25.40 36.40		6.2	VIII	Σαντορίνη
1911	25.50 36.50	140	7.1	IV	Σαντορίνη
1919	26.00 37.00		5.2		
1919	25.30 36.50		6.1	VII	Φηρά
1919	25.30 36.50		5.6		
1919	25.30 36.50		5.0		
1928	25.50 36.50		5.3		
1932	25.20 36.40		5.8		
2009	25.434 36.531		5.1		
2009	25.523 36.544		5.0		

Πίνακας 2.



Σχήμα 16. Επίκεντρα σεισμών στην στενή περιοχή μελέτης
Παπαζάχος Β. (2014)

Σύμφωνα με το νέο Χάρτη Σεισμικής Επικινδυνότητας η ευρύτερη περιοχή μελέτης ανήκει στην Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας Ι, με αναμενόμενη εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού 0.16g για πιθανότητα υπέρβασης 10% για τα επόμενα 50 χρόνια. Ο νέος Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας ενσωματώνεται στον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό του 2000, που τροποποιήθηκε με την απόφαση Δ 17α/115/9/ΦΝ 275/7.8.2003 το Υφυπουργού ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε και δημοσιεύτηκε στο ΦΕΚ 1154Β/12.8.2003. Ο σχετικός χάρτης, με τις τρεις κατηγορίες ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας (Ι, ΙΙ και ΙΙΙ) παρατίθεται στο Σχήμα 17.



Σχήμα 17. Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας. Οργανισμός Αντισεισμικής Προστασίας (2004)

4. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Κατά την υπαίθρια μελέτη της περιοχής «Αποθήκες» στη Σαντορίνη, που πραγματοποιήθηκε κατά το διάστημα 7 – 9/05/2019, λήφθηκαν δεδομένα σχετικά με τη γεωλογία, τη τεκτονική καθώς και τις τεχνικογεωλογικές συνθήκες αυτής, τα είδη των αστοχιών καθώς επίσης και την δριμύτητα αυτών. Επίσης, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία των αεροφωτογραφιών που λήφθηκαν για αυτή με στόχο την κατασκευή του τελευταίου ψηφιακού μοντέλου. Παρακάτω παρουσιάζονται αυτά τα δεδομένα που συλλέχθηκαν, αναλύθηκαν και επεξεργάστηκαν για τη περιοχή μελέτης.

4.1 Ποιότητα βραχώμαζας

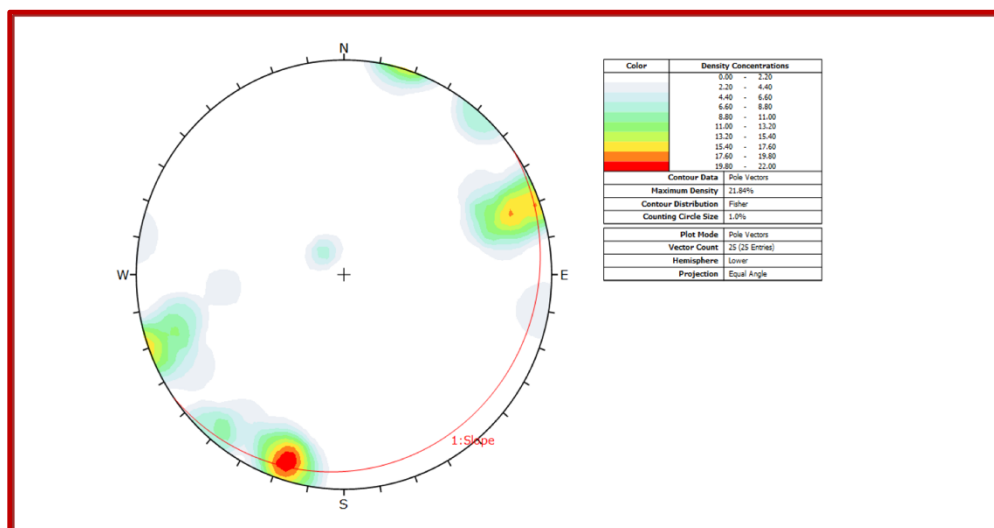
Όπως αναφέρθηκε και αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η περιοχή χαρακτηρίζεται από την παρουσία 2 διαφορετικών σχηματισμών και παλαιοέδαφος στην επαφή τους. Στη βάση του πρσανούς βρίσκονται οι ηφαιστειακοί τόφφοι οι οποίοι αποτελούν έναν μαλακό ηφαιστειακό σχηματισμό με στρώση. Οι μηχανικές ιδιότητες αυτού είναι ιδιαίτερα χαμηλές και επιπλέον αποτελεί έναν ιδιαίτερα ευδιάβρωτο σχηματισμό.

Υπερκείμενος των ηφαιστειακών τόφφων βρίσκεται ο σχηματισμός του ιγκνιμβρίτη. Αυτός αποτελεί έναν σκληρό ηφαιστειακό σχηματισμό με αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες. Σε αυτόν έγινε παρατήρηση τριών (3) κύριων οικογενειών ασυνεχειών με ιδιαίτερη εμμονή στο χώρο. Τα χαρακτηριστικά αυτών των ασυνεχειών βρίσκονται στον Πίνακα 3. Επιπλέον είναι απαραίτητη, για την κατανόηση του μηχανισμού αστοχίας τη θέσης, η επισήμανση της ύπαρξης παρακατακόρυφων εφελκυστικών ρωγμών στον ιγκνιμβρίτη στο πρανές της συγκεκριμένης θέσης.

Ανάμεσα στους δύο παραπάνω σχηματισμούς υπάρχει παλαιοέδαφος το οποίο αποτελεί ένα στρώμα μερικών εκατοστών (10 - 20cm) με ιδιαίτερα απομειωμένες μηχανικές ιδιότητες (σχεδόν μηδενικές αντόχες και ιδιαίτερα εύκολα διαβρώσιμο). Ο προσανατολισμός του στρώματος αυτού, όπως και της στρώσης των τόφφων είναι δυσμενής για το πρανές μας, καθώς “ανατέλλει” σε αυτό.

ID	Όνομα	Κλίση	Διεύθ. κλίσης	ID	Όνομα	Κλίση	Διεύθ. κλίσης	ID	Όνομα	Κλίση	Διεύθ. κλίσης
1	SLOPE	87	320	11	J1	88	246	21	J3	80	016
2	SLOPE	85	325	12	J1	80	260	22	J3	90	015
3	B	17	150	13	J2	60	084	23	J3	85	021
4	B	16	145	14	J2	85	070	24	J3	85	016
5	B	16	155	15	J2	80	075	25	J3	89	025
6	J1	70	250	16	J2	83	060				
7	J1	74	245	17	J2	76	075				
8	J1	75	250	18	J2	82	080				
9	J1	85	250	19	J3	83	019				
10	J1	80	250	20	J3	80	021				

Πίνακας 3. Παρουσίαση των τεκτονικών στοιχείων που καταγράφηκαν κατά την υπαίθρια μελέτη και επιβεβαιώθηκαν μέσω του τρισδιάστατου μοντέλου και των μετρήσεων πάνω σε αυτό.



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

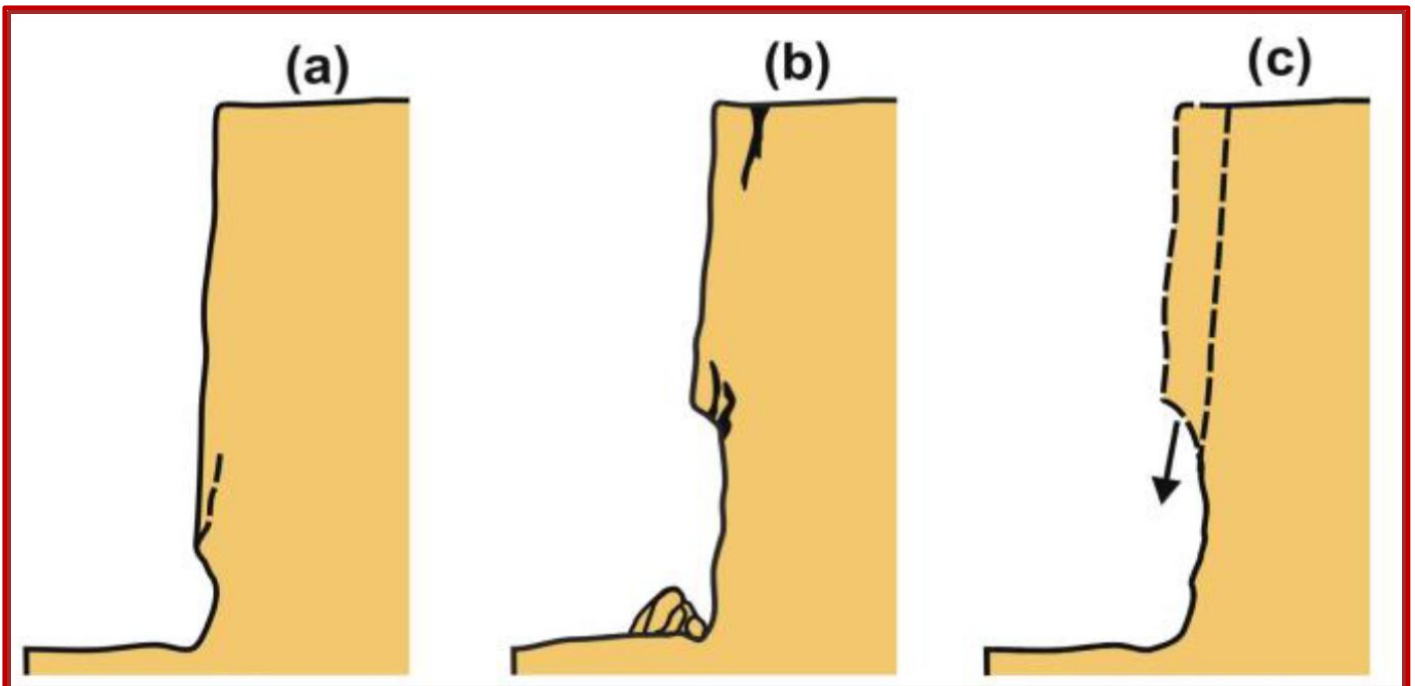
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ & ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

Σχήμα 18. Η προβολή των πόλων των τεκτονικών στοιχείων της περιοχής μελέτης σε στερεοδιάγραμμα.

4.2 Μηχανισμός αστοχίας

Ο μηχανισμός αστοχίας στη συγκεκριμένη θέση ξεκινά με την παρουσία διαφορετικής διάβρωσης στη βάση του πρανούς και συγκεκριμένα στην επαφή των δύο σχηματισμών όπου υπάρχει το παλαιόεδαφος. Αυτή η διαδικασία οδηγεί στη δημιουργία υποσκαφών στη βάση του πρανούς. Με τη σειρά τους οι εφελκυστικές ρωγμές κάνουν την εμφάνισή τους στον ιγκνιμβρίτη και παρωδικά η συνεκτικότητα της βραχώμαζας του ιγκνιμβρίτη εξασθενεί. Τελικά αυτές είναι που συντελούν στην αστοχία των μέχρι πρότινος ασταθών επικρεμάμενων τεμαχών ιγκνιμβρίτη από ένα ιδιαίτερα σημαντικό ύψος (20m).

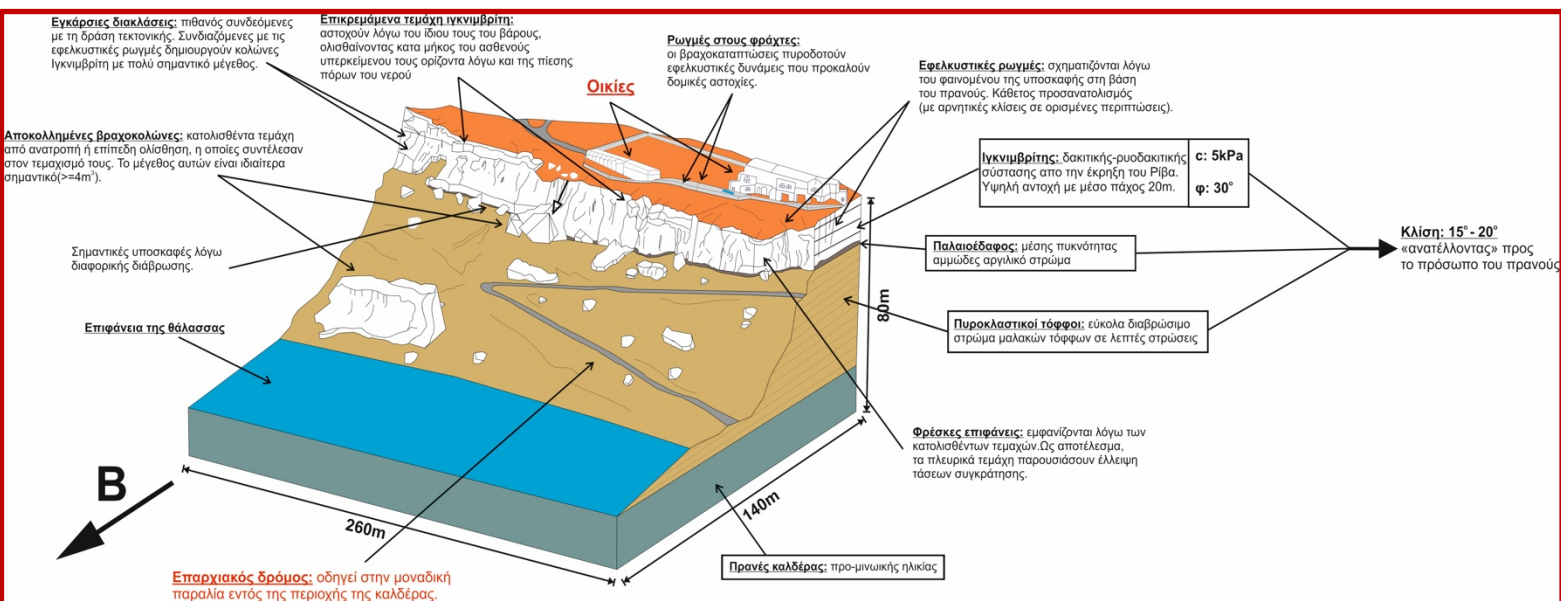
Ο κύριος μηχανισμός αστοχίας αποτελείται από αποκολλήσεις κολώνων βράχου που ακολουθείται είτε από ανατροπή είτε από επίπεδη ολίσθηση αυτών. Αποτέλεσμα αυτής της πτώσης είναι ο κατακερματισμός αυτών των κολώνων σε επιμέρους μικρότερα μπλόκ βράχου. Τα πεσμένα αυτά τεμάχη οδηγούν στην αποκάλυψη φρέσκων επιφανειών στον πρανές. Τα πλευρικά επικρεμάμενα τεμάχη οπότε παρουσιάζουν ιδιαίτερη έλλειψη μίας συνεκτικής τάσης επομένως νέες ρωγμές ξεκινούν να σχηματίζονται και όλη αυτή η διαδικασία που προαναφέρθηκε επιταχύνει.



Σχήμα 19. Σχέδιο του μηχανισμού αστοχίας στη περιοχή μελέτης. Ξεκινώντας από τη δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών λόγω των υποσκαφών οδεύοντας προοδευτικά στην κατάρρευση των επισφαλών επικρεμάμενων τεμαχών.

4.3 Τεχνικογεωλογικό μοντέλο

Μετά την κατανόηση της μορφολογίας, της λιθολογίας και του τρόπου αστοχίας της περιοχής μελέτης ήταν απαραίτητη η δημιουργία του τεχνικογεωλογικού μοντέλου της περιοχής. Αυτό βασίστηκε τόσο στη κατανόηση της περιοχής από τις παρατηρήσεις και την υπαίθρια εικόνα (conceptual model) αλλά και εμφανθύνθηκε περαιτέρω με τη βοήθεια των νέων αυτών καινοτόμων τεχνολογιών (βλ. UAV) με στόχο τη δημιουργία ενός μοντέλου μεγαλύτερης ακρίβειας με βάση τα δεδομένα που λήφθηκαν μέσω του UAV (observational model), αυξάνοντας έτσι την ποιότητα και την ακρίβεια των δεδομένων που μπορούν να εξαχθούν από αυτό και δημιουργώντας γενικά μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα για την περιοχή μελέτης. Το μοντέλο παρουσιάζεται στο Σχήμα 20. και αναλύεται παρακάτω.

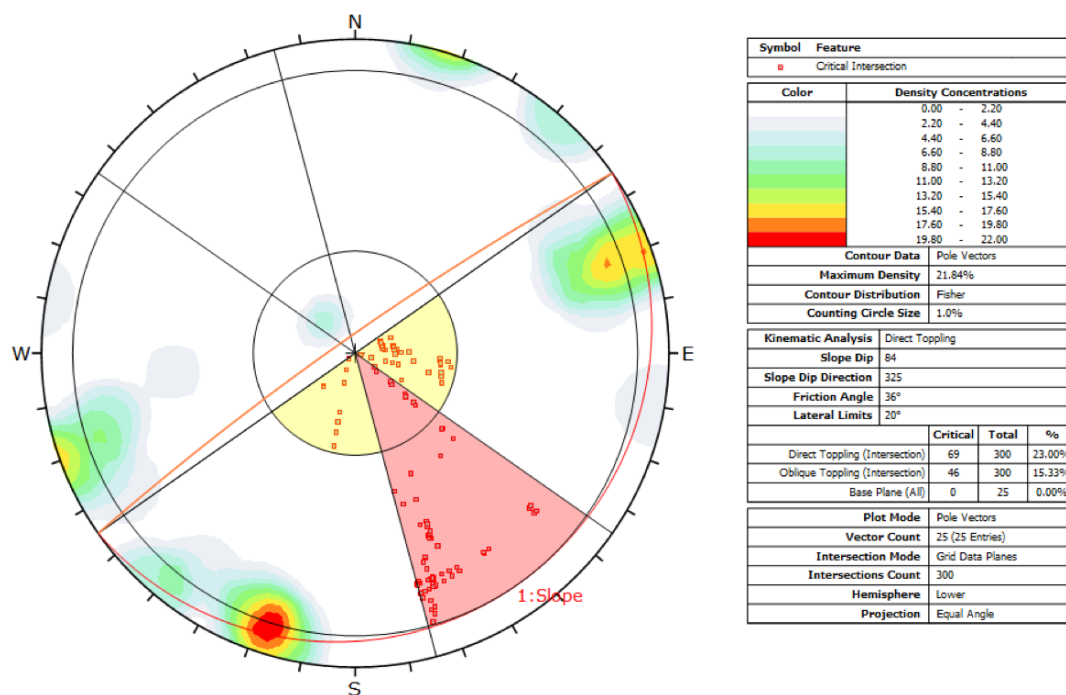


Σχήμα 20. Τεχνικογεωλογικό μοντέλο που δημιουργήθηκε με την βοήθεια του UAV.

4.4 Ανάλυση ευστάθειας πρανούς

Με βάση τις υπαίθριες μετρήσεις των τεκτονικών στοιχείων του πρανούς θεωρήθηκε απαραίτητη η σύνταξη τεκτονικών διαγραμμάτων με στόχο τον προσδιορισμό του τρόπου αστοχίας καθώς και την πιθανότητα εμφάνισης τέτοιων φαινομένων. Οι μετρήσεις αυτές αναλύθηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού Dips 7.0 της εταιρείας RocScience.

Οι πόλοι των παραπάνω στοιχείων προβλήθηκαν σε ένα στερεοδιάγραμμα (βλ. Σχημα 18) και ακολούθησε ανάλυση μέσω του λογισμικού με στόχο την εκτίμηση της πιθανότητας να υπάρξει αστοχία μέσω ανατροπής στο πρανές. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης έδειξαν πως κάτω τέτοιο είναι ιδιαίτερα πιθανό να συμβεί στη συγκεκριμένη περιοχή (βλ. Σχήμα 21)



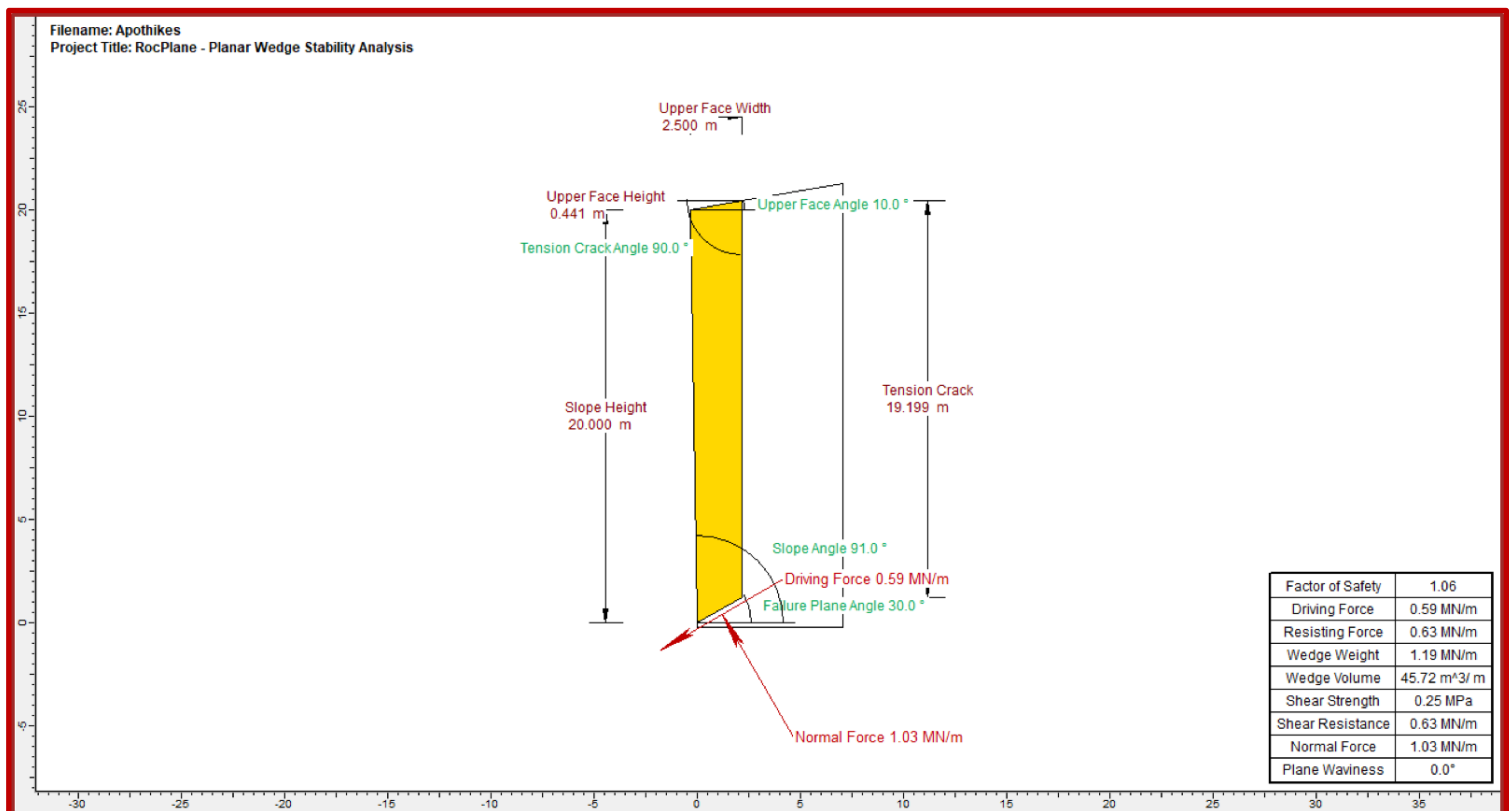
Σχήμα 21. Ανάλυση των μετρήσεων και η παρουσίαση της ισχυρής πιθανότητας ανατροπής στο πρανές.



Εικόνα 10. Επικρεμάμενο τέμαχος ιγκνιμβρίτη με αξιόλογο μέγεθος στη περιοχή μελέτης. Φαίνεται τόσο το φαινόμενο της υποσκαφής όσο και της ανάπτυξης των εφελκυστικών ρωγμών.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής κατέστησαν επιτακτική την εύρεση του συντελεστή ασφάλειας (F) για το πρανές καθώς οι συνθήκες φαίνονται ιδιαίτερα ευνοϊκές για την εκδήλωση αστοχιών. Για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφάλειας μέσω του λογισμικού RocPlane της RocScience για επίπεδη ολίσθηση είναι απαραίτητη η ποσοτικοποίηση κάποιων σημαντικών παραμέτρων για τη βραχύμαζα. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής συνεκτικότητας (c) ισούται με 5kPa, η γωνία τριβής (φ) με 31°, το ύψος του πρανούς λήφθηκε ως 20m με τη κλίση του να είναι ελαφρώς αρνητική στις 91°. Οι εφελκυστικές ρωγμές μετρήθηκε πως βρίσκονται κατα μέσο όρο περίπου 2.5m πίσω από τη στέψη του πρανούς. Επιπρόσθετα το ειδικό βάρος (γ) του ιγκνιμβρίτη προσδιορίστηκε ως 0.026 MN/m³.

Αξίζει να επισημανθεί πως η ποσοτικοποίηση των παραπάνω ποσοτήτων έγινε τόσο βιβλιογραφικά για κάποιους συντελεστές αλλά και μέσω υπαίθριων παρατηρήσεων και παρατηρήσεων από τα τρισδιάστατα μοντέλα που δημιουργήθηκαν για τον πρανές μέσω του UAV που θα αναλυθούν στα επόμενα κεφάλαια.



Σχήμα 22. Γραφικό αποτέλεσμα ανάλυσης ευστάθειας στήλης βράχου με θεώρηση εφελκυστικής ρωγμής χωρίς επίδραση νερού.

Όπως γίνεται αντιληπτό από την ανάλυση, ο συντελεστής ασφάλειας μόλις που ξεπερνά το επιτρεπτό όριο (1.06), το οποίο είναι η μονάδα, για ξηρές συνθήκες. Αντίθετα με μία πολύ μικρή αύξηση του νερού στο χώρο των ασυνεχειών, με μία πληρότητα μικρότερη του 10% του κενού τους, κατευθείαν ο συντελεστής F πέφτει σε τιμές μικρότερες της μονάδας και επομένως δεν ισχύει η συνθήκη οριακής ισορροπίας στο πρανές και είναι πολύ πιθανή η κατάρρευση των επικρεμμένων τεμαχών.

5. ΜΕΘΟΔΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ UAV (Unmanned Aerial Vehicle – Μη Επανδρωμένο Αερόχημα)

Μέσω της δυνατότητας χρήσης εργαλείων όπως το UAV (Unmanned Aerial Vehicle), πραγματοποιήθηκε λήψη αεροφωτογραφιών για τη περιοχή μελέτης οι οποίες έπειτα αναλύθηκαν με την χρήση της θεωρίας της φωτογραμμετρίας. Θεωρείται σημαντικό επομένως παρακάτω να γίνει μία παρουσίαση ορισμένων αρχών σχετικά με τη μέθοδο της φωτογραμμετρίας.

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή της παρούσας εργασίας ως φωτογραμμετρία καλείται «*Η τεχνική κατά την οποία λαμβάνονται τρισδιάστατες (3D) πληροφορίες χαρακτηριστικών μέσω 2 ή περισσότερων φωτογραφιών του ίδιου αντικειμένου, που λαμβάνονται από διαφορετικές γωνίες*» (Vasuki et al., 2014). Η συγκεκριμένη τεχνολογία αποτελεί μία διαδικασία χαμηλού κόστους καθώς τα εργαλεία που πραγματοποιούν την λήψη δεδομένων είναι σχετικά οικονομικά σε σύγκρισή με τη χρησιμοποίηση ειδικών σαρωτών λέιζερ και η διαδικασία λήψης των δεδομένων δεν είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα. Μέσω αυτών επιτυγχάνεται η λήψη τρισδιάστατων πληροφοριών υψηλής ανάλυσης. Ως αποτέλεσμα αυτών, στις γεωεπιστήμες χρησιμοποιούνται λογισμικά που εκμεταλλεύονται τη μέθοδο της φωτογραμμετρίας, μεμονωμένα ή σε συνδυασμό με τα προαναφερόμενα σαφώς ακριβότερα συστήματα με επίγειους σαρωτές λέιζερ.

Οι νέες τεχνολογικές μέθοδοι και η εξέλιξη αυτών σε σχέση με τα μη επανδρωμένα αέρια οχήματα (UAV) παράγουν δεδομένα τα οποία χρησιμοποιούνται στην κατασκευή δισδιάστατων και τρισδιάστατων εικόνων υψηλής ανάλυσης εδάφους και επιφανειών. Τα μη επανδρωμένα αέρια συστήματα (UAS) έχουν λάβει πληθώρα διαφορετικών ονομάτων (π.χ. aerial robots) όμως πλέον η ευρύτερα γνωστή είναι UAV (Unmanned Aerial Vehicle) ή απλούστερα drones (Colomina & Molina, 2014, Siebert & Teizer, 2014). Τέτοια συστήματα δημιουργήθηκαν και αναπτύχθηκαν για την ικανοποίηση στρατιωτικών κυρίως σκοπων όμως στα τέλη της δεκαετίας του 1970, ξεκίνησε η χρήση τους από τους ερευνητές όπου και ανακάλυψαν τις χαρτογραφικές δυνατότητες που τους παρείχαν (Colomina & Molina, 2014). Τα τελευταία χρόνια η χρήση τους έχει γνωρίσει μία ιδιαίτερη αύξηση όπως επίσης των λογισμικών που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των δεδομένων τους.

Το τελικό αποτέλεσμα διαμέσω της χρήσης αυτών των συστημάτων είναι η κατασκευή τρισδιάστατων (3D) εικόνων στις οποίες υπάρχει η τοποθεσία, η λεπτομερής επιφανειακή γεωμετρία καθώς και ο προσανατολισμός. Με αυτόν τον τρόπο δηλαδή είναι δυνατή η κατασκευή ενός τρισδιάστατου σύννεφου σημείων (3D point cloud) μέσω του οποίου θα εξαχθεί και το τελικό ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DSM) με στόχο τη δημιουργία του φωτομωσαϊκού της περιοχής ή της υψής της επιφάνειας (Vasuki et al., 2014). Η λεπτομερής αυτή οπτικοποίηση της γήινης επιφάνειας σε μεγάλη κλίμακα καθιστά δυνατή τη κατασκευή λεπτομερών τοπογραφικών χαρτών αεροφωτογραφιών με αλληλοεπικάλυψη (Bemis et al., 2014). Ο συνδυασμός τέτοιου είδους εικόνων με τους γεωλογικούς χάρτες οδηγεί στην κατασκευή οπτικών μοντέλων τόσο σχετικά με την κλασσική γεωλογία όσο και με την τεχνική γεωλογία. Τονίζεται ότι μέσω της εξέλιξης της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι πλέον δυνατή λήψη μεγάλων ποσοτήτων ψηφιακών δεδομένων ακρίβειας εκατοστού, σε χρονικό διάστημα μερικών μόλις λεπτών.

Σαφώς η ολοκληρωμένη γνώση ενός γεωεπιστήμονα σχετικά με τις δυνατότητες της φωτογραμμετρίας θα πρέπει να συνδυάζεται και με την γνώση του κατάλληλου λογισμικού επεξεργασίας των δεδομένων που παρέχονται από τη συγκεκριμένη τεχνολογία των συστημάτων UAV. Τέτοια λογισμικά βρίσκονται τόσο επί πληρωμή όσο και σε ελεύθερης πρόσβασης προγράμματα. Στη συνέχεια θα αναλυθεί η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε καθώς επίσης και τα όργανα και λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για την συγκεκριμένη περίπτωση της μελέτης της περιοχής «Αποθήκες» στη Σαντορίνη.

5.1 Φωτογραμμετρία με την χρήση UAV για την περίπτωση της περιοχής «Αποθήκες»

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, η παραγωγή δεδομένων φωτογραμμετρίας για τη περιοχή «Αποθήκες» κατά το έτος 2018 και 2019, πραγματοποιήθηκε μέσω ενός συστήματος UAV. Το συγκεκριμένο εργαλείο ανήκει στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ.) με στόχο τη λήψη και ανάλυση εικόνων δύσβατων περιοχών.

Το συγκεκριμένο σύστημα παρέχεται από την εταιρία DJI και ονομάζεται Phantom 4 Pro V2.0 (Εικόνα 11). Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του είναι:

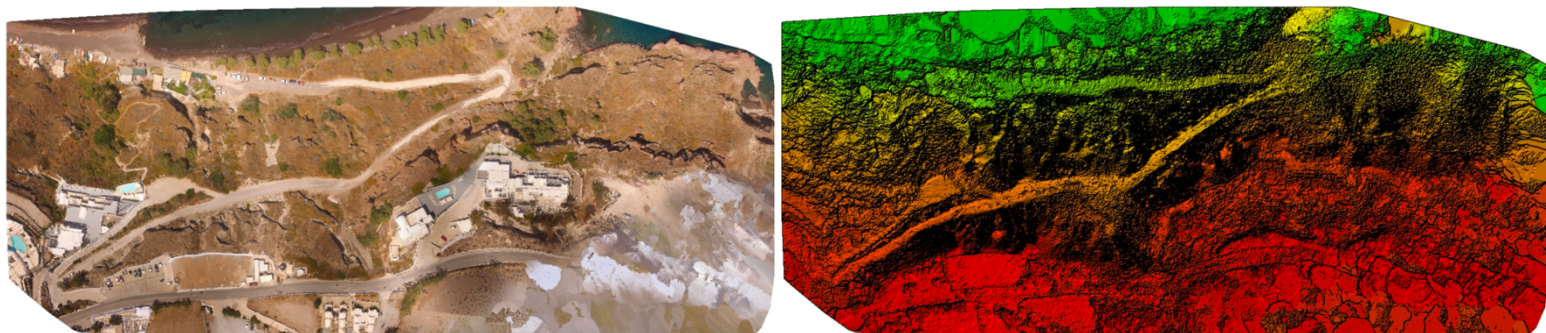
- Καταγραφή βίντεο με ζωντανή μετάδοση στον χειριστή (μέσω κινητού τηλεφώνου ή tablet) με ανάλυση έως και 4K/60 fps.
- Λήψη γεωαναφερμένων φωτογραφιών με ανάλυση έως και 20 MegaPixel.
- Αυτονομία μπαταρίας σε κανονικές συνθήκες (π.χ. ασθενής άνεμος ή/και αραιή λήψη φωτογραφιών) έως 30 λεπτά ενώ αυτή μειώνεται στα 18 λεπτά με πλήρη χρήση των δυνατοτήτων (π.χ. εντονότερος άνεμος ή/και πυκνή λήψη φωτογραφιών).
- Δυνατότητα ελέγχου κίνησης σε μία ακτίνα 7 km.
- Λειτουργία αυτόματου πιλότου μέσω του προκαθορισμού συγκεκριμένων σημείων.



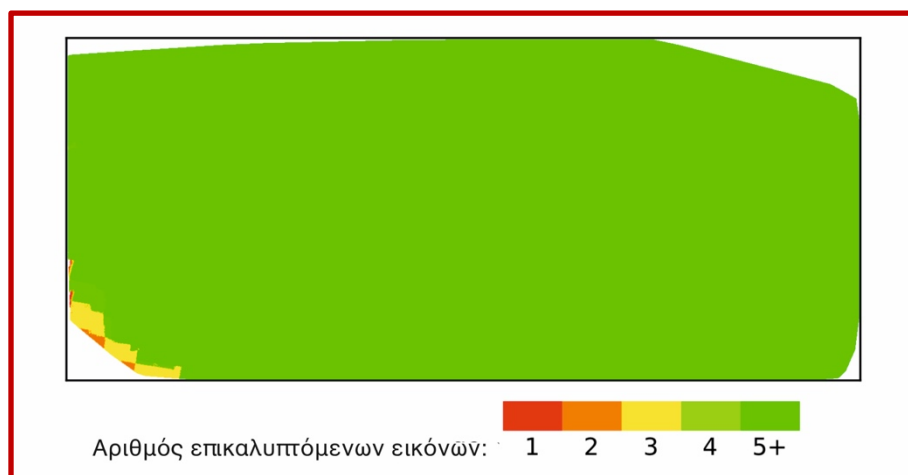
Εικόνα 11. Το UAV που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα μελέτη DJI Phantom 4 pro v 2.0.

Χειριστής του μηχανήματος για την έρευνα στην περιοχή μελέτης ήταν ο Ευστράτιος Καρανταντέλλης (Υποψήφιος Διδάκτορας του Τμήματος Γεωλογίας και συγκεκριμένα του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας). Η διαδικασία χειρισμού και πτήσης του συγκεκριμένου εργαλείου απαιτεί τόσο την γνώση όσο και την εμπειρία από τον χειριστή με στόχο την όσο το δυνατόν καλύτερη και πληρέστερη λήψη δεδομένων. Σύμφωνα και με τις αρχές της φωτογραμμετρίας που αναλύθηκαν παραπάνω, όσο με πιο ορθό τρόπο ληφθούν οι αεροφωτογραφίες τόσο η αλληλοεπικάλυψή αυτών θα είναι πιο ολοκληρωμένη και συνεπώς τα τελικά προϊόντα που θα εξαχθούν θα είναι πιο λεπτομερή και πιο ακριβή σε σχέση με την πραγματική εικόνα της περιοχής.

Τα τελικά αυτά προϊόντα που κατασκευάστηκαν ήταν το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DSM), τα ορθομωσαϊκά καθώς και τα τρισδιάστατα σύννεφα σημείων (3D point clouds). Συγκεκριμένα, για την έρευνα καλύφθηκε από το UAV μία περιοχή που ανέρχεται στα 79m και για τις δύο πτήσεις που έγιναν και λήφθηκαν 390 φωτογραφίες για την πτήση το Μάιο του 2018 ενώ για την αντίστοιχη τον Μάιο του 2019 λήφθηκαν 415 φωτογραφίες. Αξίζει να επισημανθεί και η ανάλυση αυτών ήταν η μέγιστη δυνατή που παρέχεται μέσω του μηχανήματος που χρησιμοποιήθηκε η οποία ήταν 20 MegaPixel. Τέλος, και οι δύο βάσεις δεδομένων που δημιουργήθηκαν είναι γεωαναφερμένες στο γεωδαιτικό σύστημα WGS84.



Σχήμα 23. Δεξιά βρίσκεται το εξαγόμενο ορθομωσαϊκό ενώ αριστερά το εξαγόμενο DSM από την πτήση του UAV τον Μάιο του 2018.



Σχήμα 24. Χρωματική ποσοτικοποίηση της ποιότητας αλληλοεπικάλυψης των παραγόμενων μοντέλων.

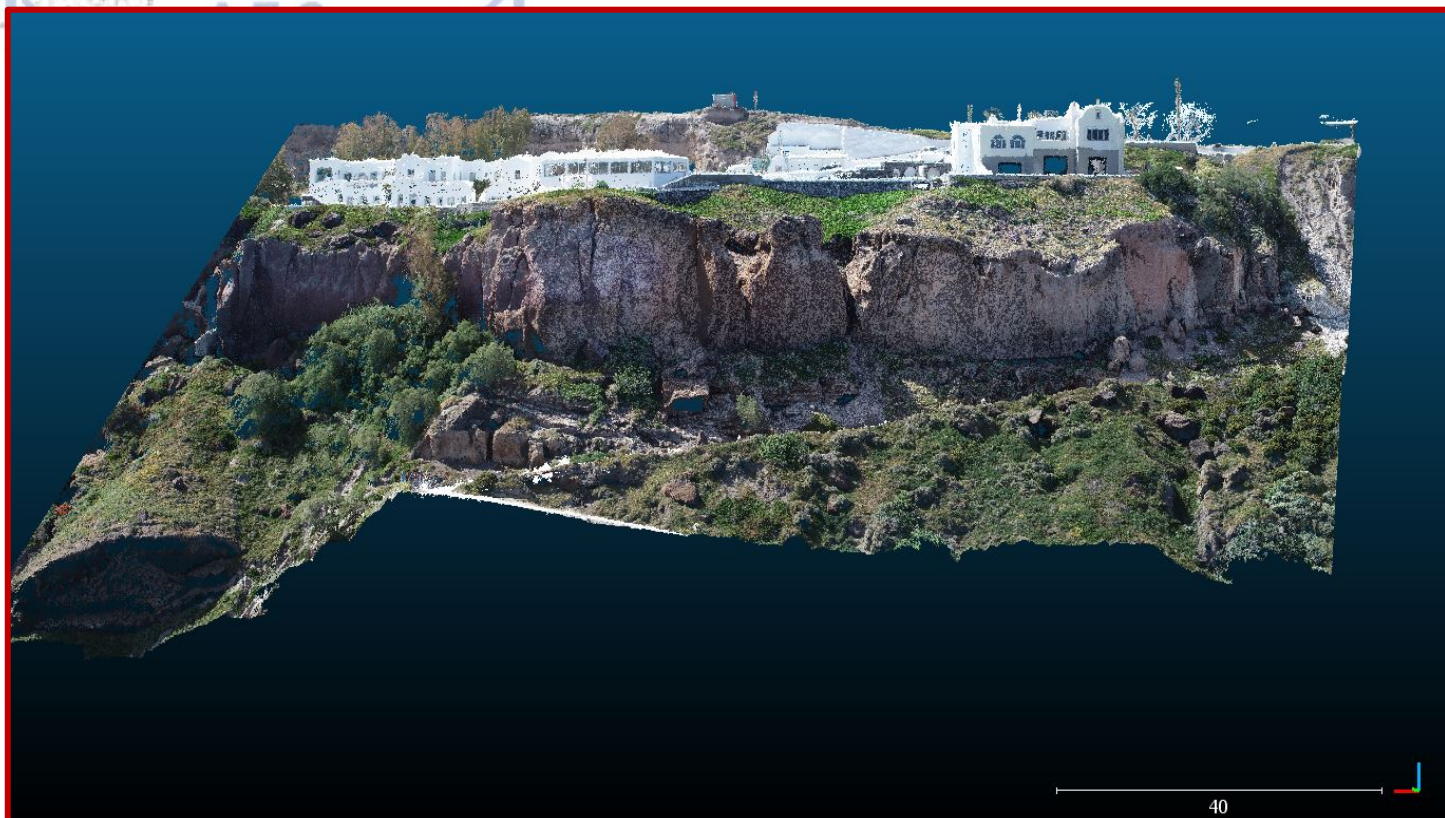
5.2 Επεξεργασία των φωτογραφιών που λήφθηκαν μέσω της χρήσης UAV για την περίπτωση της περιοχής «Αποθήκες»

Η επεξεργασία των δεδομένων-εικόνων που λήφθηκαν μέσω του UAV έγινε μέσω του κατάλληλου λογισμικού της εταιρείας Pix4D με στόχο την εξαγωγή των προϊόντων που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο υπό-κεφάλαιο. Το συγκεκριμένο λογισμικό παρέχει ένα ιδιαίτερα προσιτό και εύκολο στη χρήση περιβάλλον, πλεονεκτήματα τα οποία εναρμονίζονται πλήρως με τα υψηλής ποιότητας αποτελέσματα που παρέχει στον χρήστη. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των εικόνων, μέσω του συγκεκριμένου λογισμικού, αναλύεται παρακάτω:

- Εισαγωγή όλων των γεωαναφερμένων φωτογραφιών για συγκεκριμένη περιοχή.
- Επιλογή των περιοχών των φωτογραφιών που θα επεξεργαστούν και αποκοπή των περιοχών με μη χρήσιμο προς την ανάλυση περιεχόμενο (ουρανός, θάλασσα κ.τ.λ.).
- Εύρεση κοινών σημείων μεταξύ των φωτογραφιών. (Για το μοντέλο του 2018 αυτά ήταν 21.271,6 ανά γεωαναφερμένη φωτογραφία ενώ για το μοντέλο του 2019 ήταν 22.654,3)
- Κατασκευή του πυκνού σύννεφου σημείων. (Για το μοντέλο του 2018 τα τρισδιάστατα κοινά σημεία ήταν 211.286.09 ενώ για το αντίστοιχο του 2019 ήταν 251.343.05)
- Κατασκευή των τελικά εξαγόμενων προϊόντων: το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DSM), το ορθομωσαϊκό και το τρισδιάστατο μοντέλο σύννεφων σημείων.



Σχήμα 25. Το τρισδιάστατο μοντέλο της περιοχής μελέτης που κατασκευάστηκε μέσω UAV το 2018.



Σχήμα 26. Το τρισδιάστατο μοντέλο της περιοχής μελέτης που κατασκευάστηκε μέσω UAV το 2019.

6. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΓΕΙΟΥ LiDaR (Light Detection and Ranging)

6.1 Μεθοδολογία

Για την τρισδιάστατη αποτύπωση των περιοχών μελέτης το 2014 επιλέχθηκε η χρήση του επίγειου σαρωτή LiDaR, OPTECH ILRIS 3D (Εικόνα 2) η λειτουργία του οποίου βασίζεται στην ακτινοβολία η οποία αντανακλάται από μια επιφάνεια όπως αναλύθηκε και στο αντίστοιχο υποκεφάλαιο στην εισαγωγή. Η τεχνική αυτή δίνει τη δυνατότητα στον μελετητή να επεξεργαστεί ψηφιακά δεδομένα μεγάλης ακρίβειας σε σχετικά μικρό χρόνο και χρησιμοποιείται για την δημιουργία ψηφιακών μοντέλων του αναγλύφου.

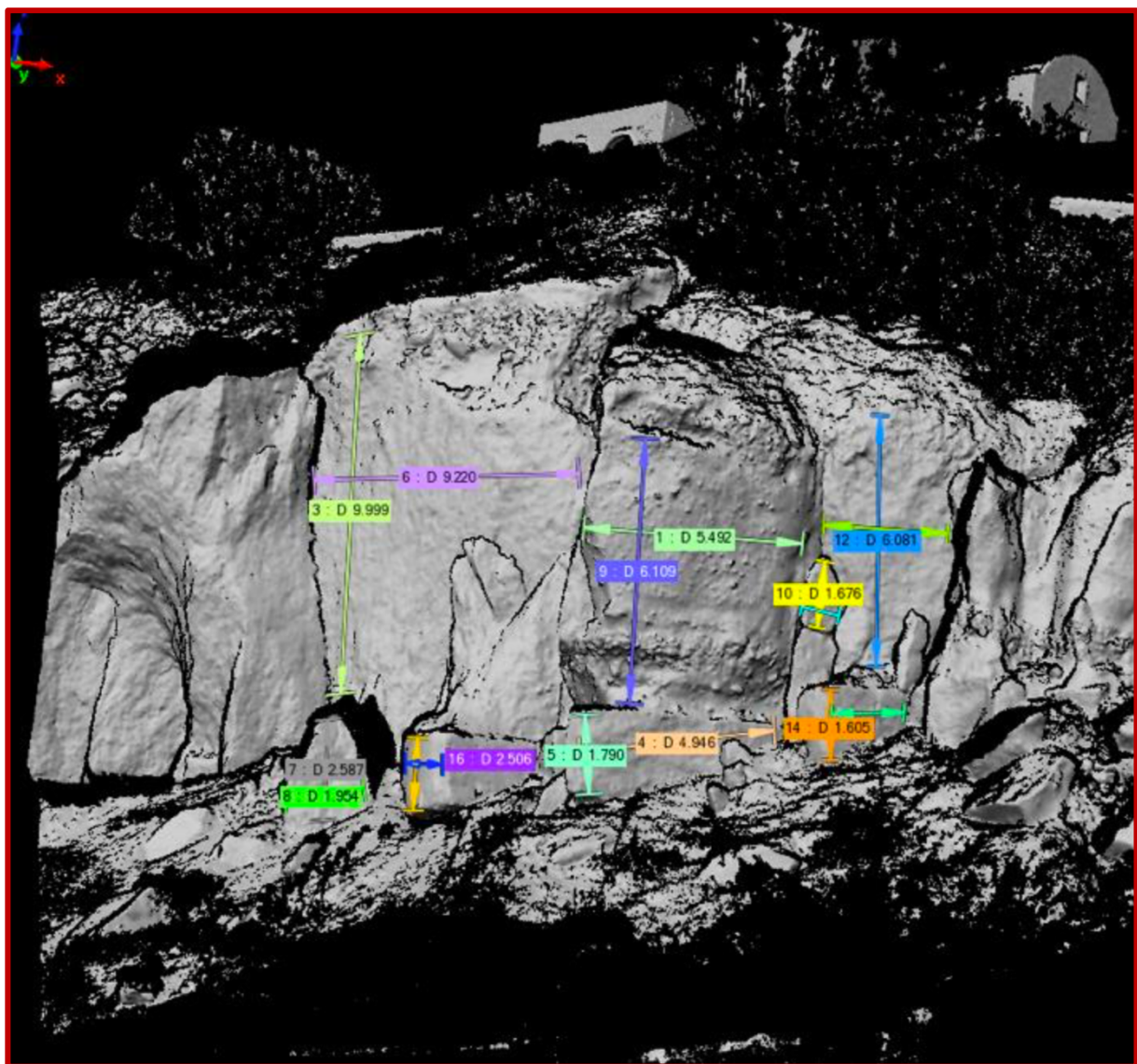
Για τη μελέτη της περιοχής το επίγειο σύστημα LiDaR που χρησιμοποιήθηκε έχει εμβέλεια που κυμαίνεται από 3 έως 1000 μέτρα και η ακρίβεια του από 14mm έως 30mm. Τα τυπικά μέρη του επίγειου LiDaR είναι ο σαρωτής laser, η γεννήτρια για την τροφοδοσία του συστήματος, η μονάδα ελέγχου καθώς και ο τρίποδας για την στερεοποίηση του. Μέσω της οθόνης που διαθέτει γίνονται οι ρυθμίσεις σχετικά με το εύρος της περιοχής που επιθυμεί ο χειριστής να σαρώσει καθώς και υπό ποια γωνία θα γίνει αυτή. Βέβαια η σύνδεση του συγκεκριμένου μηχανήματος μπορεί να γίνει και σε φορητό υπολογιστή έτσι ώστε να γίνεται από εκεί ο έλεγχος των παραπάνω στοιχείων πριν ή και κατά τη διάρκεια της σάρωσης.

Ο συγκεκριμένος σαρωτής υλοποιεί τη σύνθεση του τρισδιάστατου μοντέλου αυτόματα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων του, με δυνατότητα βέβαια στον χειριστή να υλοποιήσει οποιαδήποτε αλλαγή θελήσει χειροκίνητα. Οι σαρώσεις που λαμβάνει ο χειριστής είναι σε κομμάτια, των οποίων οι διαστάσεις έχουν καθοριστεί πριν ξεκινήσει το σκανάρισμα της περιοχής. Μέσω διαφόρων προγραμμάτων που παρέχονται από την εταιρία του μηχανήματος είναι δυνατή η συρραφή αυτών των κομματιών καθώς και η προσθήκη της "εικόνας" (φωτογραφίας) της περιοχής μελέτης πάνω στις μετρήσεις έτσι ώστε να υπάρχει μία πιο αντιπροσωπευτική απεικόνιση της.

Όπως αναλύθηκε και προηγουμένως, η συγκεκριμένη τεχνολογία βασίζεται στην χρήση ακτινών laser οι οποίες εκπέμπονται από τον πομπό, προσκρούουν επάνω σε σημειακό στόχο, ανακλώνται και επιστρέφουν στον πομπό. Μέσω αυτής της διαδικασίας μπορεί να υπολογιστεί ο χρόνος που διένυσαν οι ακτίνες άρα και η απόσταση του σημειακού στόχου από τον πομπό. Έτσι δημιουργείται ένα σύννεφο σημείων στο χώρο το οποίο περιλαμβάνει την επιφάνεια του εδάφους καθώς επίσης και ό,τι βρίσκεται επάνω στο έδαφος (βλάστηση, κτίσματα κ.α.). Το πλεονέκτημα όμως αυτής της τεχνολογίας είναι η δυνατότητα αποκοπής όλων αυτών των στοιχείων που αποτελούν "εμπόδιο" στις μετρήσεις του χρήστη, με στόχο την τελική παραμονή μόνο της καθαρής επιφανειακής μορφολογίας της περιοχής μελέτης. Αξίζει να επισημανθεί σε αυτό το σημείο η πολύ υψηλή ανάλυση που έχει το εξαγόμενο ψηφιακό μοντέλο, αποτελώντας έτσι ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για την Τεχνική Γεωλογία ιδιαίτερα στον τομέα των κατολισθήσεων.

6.2 Δημιουργία μοντέλου για την περιοχή «Αποθήκες»

Συγκεκριμένα στην περιοχή μελέτης η έρευνα βασίστηκε στην σάρωση του πρανούς από δύο διαφορετικές θέσεις (μία Ανατολικά και μία Δυτικά του πρανούς μελέτης) όπου υπήρχε η κατάλληλος χώρος για το μηχάνημα έτσι ώστε να μην είναι πολύ κοντά σε αυτό για να δώσει μια ολοκληρωμένη εικόνα του πρανούς και όχι μόνο τμήματα αυτού. Η σάρωση έγινε από μία απόσταση περίπου 5m από το μέτωπο του πρανούς και υπό γωνία. Όπως είναι φυσικό ο περιορισμός που προέκυψε, λόγω του διαθέσιμου χώρου για τη θέση του μηχανήματος, είχε ως αποτέλεσμα κατά την επεξεργασία του μοντέλου να παρατηρηθούν κάποια κενά που παρουσιάστηκαν μέσω της περιστροφής αυτού. Βέβαια τα κενά αυτά δεν ήταν σε θέση άμεσου ενδιαφέροντος και δεν δημιουργήθηκε κάποιο πρόβλημα στην παρούσα έρευνα. Επιπρόσθετα μέσω του συγκεκριμένου μηχανήματος ήταν δυνατή η ποσοτικοποίηση διαφόρων επιφανιών επικρεμάμενων τεμαχών καθώς και κατολισθέντων υλικών με στόχο την όσο των δυνατόν ακριβέστερη μέτρηση του μεγέθους αυτών.



Σχήμα 27. Ογκομέτρηση τεμαχών στο Δυτικό τμήμα της περιοχή μελέτης με την βοήθεια του τρισδιάστατου μοντέλου μέσω LiDaR το 2014
B. Μαρίνος (2014)

7. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Αποτέλεσμα της τεχνικογεωλογικής αξιολόγησης που υλοποιήθηκε στην περιοχή μελέτης ήταν και η επισημάνση της άμεσης ανάγκης για περαιτέρω έρευνα σε αυτή με στόχο τόσο τον εντοπισμό των πιο επισφαλών, για κατολισθητικά φαινόμενα, υπό περιοχών στο πρηνές μας αλλά και την ικανότητα πρότασης συγκεκριμένων μέτρων αντιστήριξης σε αυτά. Για να επιτευχθεί αυτό θα έπρεπε με κάποιο τρόπο να υπάρξει μία καθολική σύγκριση της περιοχής μελέτης μέσα στο χρόνο έτσι ώστε να σημειωθεί οποιαδήποτε μορφολογική μεταβολή είχε πραγματοποιηθεί.

Με όλα αυτά κατά νου, και όντας προνομιούχοι που μπορούμε να πραγματοποιήσουμε την έρευνα μας με τη χρήση καινοτόμων εργαλείων τηλεανίχνευσης (remote sensing technology) που μας παρέχει το Τμήμα Γεωλογίας και συγκεκριμένα το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί μία μέθοδος σύγκρισης τρισδιάστατων μοντέλων που κατασκευάστηκαν για τις διαφορετικές χρονικές περιόδους μέσω του κατάλληλου λογισμικού..

Μέσω της παρούσας εργασίας εξετάζεται η χρήση των σύγχρονων μεθόδων τηλεανίχνευσης ως συμπληρωματικό εργαλείο στον τομέα των κατολισθήσεων με στόχο την όσο τον δυνατόν πιο ακριβή τεχνικογεωλογική θεώρηση για την εκάστοτε περιοχή μελέτης.

7.1 Μεθοδολογία

Αναλυτικότερα, δημιουργήθηκαν τρεις διαφορετικές βάσεις δεδομένων που έχουν ληφθεί τόσο από παθητικούς (UAV) όσο και από ενεργούς (LiDaR) σένσορες. Μέσω αυτών εξήχθησαν τα τελικά τρισδιάστατα μοντέλα εδάφους τα οποία και συγκρίθηκαν ανά ζεύγη για τις τρεις διαφορετικές βάσεις δεδομένων που διαθέτουμε για την περιοχή μελέτης (2014, 2018 και 2019) με στόχο την εξαγωγή μορφολογικών διαφορών ανάμεσα σε αυτά. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα CloudCompare μέσω του οποίου ήταν δυνατή η εξέταση των μοντέλων, η σύγκριση τους καθώς και η ποσοτικοποίηση διαφορών υλικών στο πρηνές μελέτης. Επιπρόσθετα ήταν δυνατός ο έλεγχος εγκυρότητας των μετρήσεων των τεκτονικών στοιχείων που πραγματοποιήθηκαν κατά την υπαίθρια μελέτη της περιοχής.

Για υλοποιηθεί η σύγκριση των τρισδιάστατων μοντέλων ως βάση αυτής τέθηκε το παλαιότερο μοντέλο σε κάθε περίπτωση, έτσι οι διαφορές (θετικές ή αρνητικές) θα ήταν στο νεότερο μοντέλο σε σχέση με το παλαιότερο, πάντα με χρονικά κριτήρια. Βασικό στοιχείο στη συγκεκριμένη μέθοδο είναι η εύρεση κοινών σημείων ανάμεσα στα δύο μοντέλα έτσι ώστε να είναι όσο το δυνατόν καλύτερη η ταύτιση μεταξύ των δύο μοντέλων μειώνοντας σημαντικά τα περιθώρια σφάλματος. Τα σημεία αυτά αποτελούν στόχους που έχουν τοποθετηθεί στο πρηνές πριν τη διαδικασία της σάρωσης. Οι στόχοι αυτοί ονομάζονται Ground Control Points (GCPs). Στη συγκεκριμένη περίπτωση κάτι τέτοιο ήταν ιδιαίτερα δύσκολο να υλοποιηθεί λόγω τόσο του ύψους (20m) όσο και της μορφολογίας της περιοχής. Έτσι υπήρξε τοποθέτηση τέτοιων στόχων σε κάποια εύκολα προσβάσιμα μέρη του πρηνούς αλλά για να αυξηθεί η ποιότητα της ταύτισης των δύο μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν κάποια χαρακτηριστικά σταθερά σημεία στη περιοχή μέσα στα χρόνια. Αυτά δεν ήταν άλλα από κάποια σημεία πάνω στο ξενοδοχείο και στις κατοικίες που υπέρκεινται του πρηνούς καθώς και στον δρόμο που υπόκειται αυτού.

Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό, αυτή η δυνατότητα δόθηκε λόγω της πολύ υψηλής ανάλυσης των μοντέλων που επιτεύχθηκε μέσω της εξαιρετικής ποιότητας των μηχανημάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία τους αλλά και λόγω της αποτελεσματικής γνώσης του μελετητή.

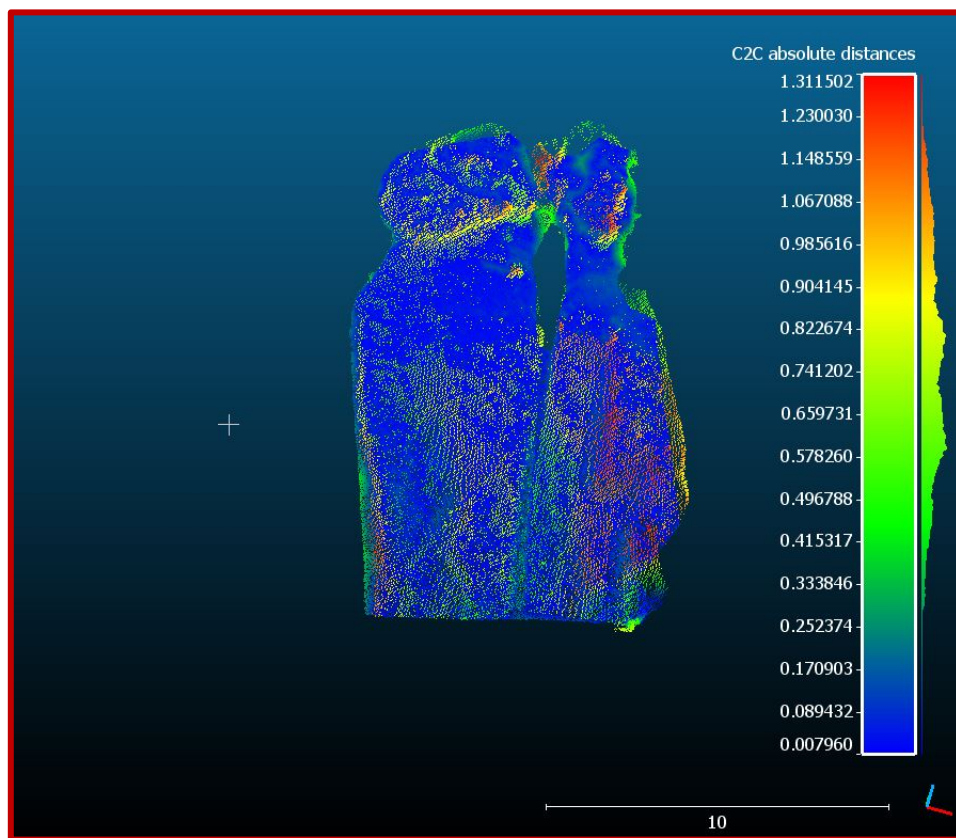
Μετά την ταύτιση των δύο μοντέλων με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια τα αποτελέσματα που λαμβάνονται είναι μία χρωματική κλίμακα με νούμερα που δείχνουν είτε τη σημειακή μετακίνηση είτε το συνολικό μέγεθος των μαζών που μετακινήθηκαν. Οι διαφορές αυτές που προκύπτουν μπορεί να είναι τόσο αρνητικές όσο και θετικές δίνοντας έτσι μία τελείως διαφορετική ερμηνεία για το τι έχει συμβεί μέσα στα χρόνια στην συγκεκριμένη θέση. Στη περιοχή που πραγματοποιήθηκε η ανάλυση οι αρνητικές διαφορές έδειξαν θέσεις όπου υπάρχουν καταπτώσεις βράχων ενώ οι θετικές δείχνουν πως η εικόνα πλέον είναι πιο κοντά στο μέσο μέτρησης στο νεότερο μοντέλο από ότι στο παλαιότερο. Με γνώμονα τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά και συγκεκριμένα τον μηχανισμό αστοχίας της περιοχής μελέτης, για αυτό ευθύνεται η αύξηση του πλάτους των εφελκυστικών ρωγμών του παρατηρούνται στη περιοχή. Σαφώς και θα πρέπει να υπολογιστεί το πιθανό σφάλμα που θα προκύψει από τη σύγκριση και ο "θόρυβος" στα αποτελέσματα καθώς δεν αποτελεί κάθε εικονική διαφορά και πραγματική. Ο υπολογισμός και η επιλογή αυτή βαρύνει τον εκάστοτε μελετητή και αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της δουλειάς του. Επομένως καθίσταται σαφές πως για να είναι ορθή η ανάλυση που θα προκύψει από τα λογισμικά, όσο προηγμένα και αν είναι, πάντα πρέπει να υπάρχει ένα ισχυρό επιστημονικό υπόβαθρο πίσω από τον μελετητή με στόχο την διακριτοποίηση της σημαντικής πληροφορίας από την ασήμαντη και η επισημάνση της πραγματική σημασίας των αποτελεσμάτων έναντι οποιασδήποτε εικονικής. Επιπρόσθετα, για την εξαγωγή σημαντικών ερευνητικών αποτελεσμάτων είναι απαραίτητη η ικανότητα του μελετητή να "μεταφράσει" τα νούμερα που θα ληφθούν από την ανάλυση σε χρήσιμες πληροφορίες με βάση τόσο τις γεωλογικές όσο και τις τεχνικογεωλογικές γνώσεις που διαθέτει.

Αφ' ότου ολοκληρωθεί η σύγκριση των δύο μοντέλων είναι δυνατή η περικοπή της αρχικής περιοχής σε υπό περιοχές ανάλογα με την ευαισθησία σε κατολισθητικά φαινόμενα. Οι πιο πρόσφιλες περιοχές σε τέτοια φαινόμενα καθώς και αυτές που έχουν αυξημένη επικινδυνότητα λόγω της ανθρώπινης διαδικασίας αναλύθηκαν εκ νέου έτσι ώστε να υπάρξει ακόμη πιο ακριβής ποσοτικοποίηση των μετακινήσεων αυτών. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για τις τρεις βάσεις δεδομένων που έχουν σχηματιστεί ανά ζεύγη με στόχο την κατανόηση του μεγέθους, της ταχύτητας και της χωρικής κατανομής του φαινομένου καθώς και τη δημιουργία ενός αρχείου για αυτές τις μετακινήσεις που θα μπορούσε να βρεθεί χρήσιμο κατά τη πιθανή μελλοντική πιο συστηματική παρακολούθησης της περιοχής.

7.2 Σύγκριση μοντέλων 2014 – 2018

Για τη σύγκριση των μοντέλων του 2014 και του 2018 έγινε χρήση και των δύο μεθόδων τηλεανίχνευσης καθώς το πρώτο σχηματίστηκε μέσω των μετρήσεων του επίγειου σαρωτή LiDaR ενώ το δεύτερο με τις αντίστοιχες του UAV.

Τα αποτελέσματα αυτής έδειξαν μία πληθώρα μετακινήσεων με κυριότερες αυτές στις δύο κεντρικές κολώνες ιγκνιμβρίτη που παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες. Συγκεκριμένα στην κορυφή αυτών υπήρξε πτώση σημαντικών τεμαχών τα οποία τεμαχίστηκαν σε μικρότερα κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος και σήμερα βρίσκονται μπροστά από το πρανές.



Σχήμα 28. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης των 2 μοντέλων(2014-18). Οι κύριες μετακινήσεις εντοπίζονται ψηλά στις δύο αυτές βραχοκολώνες.

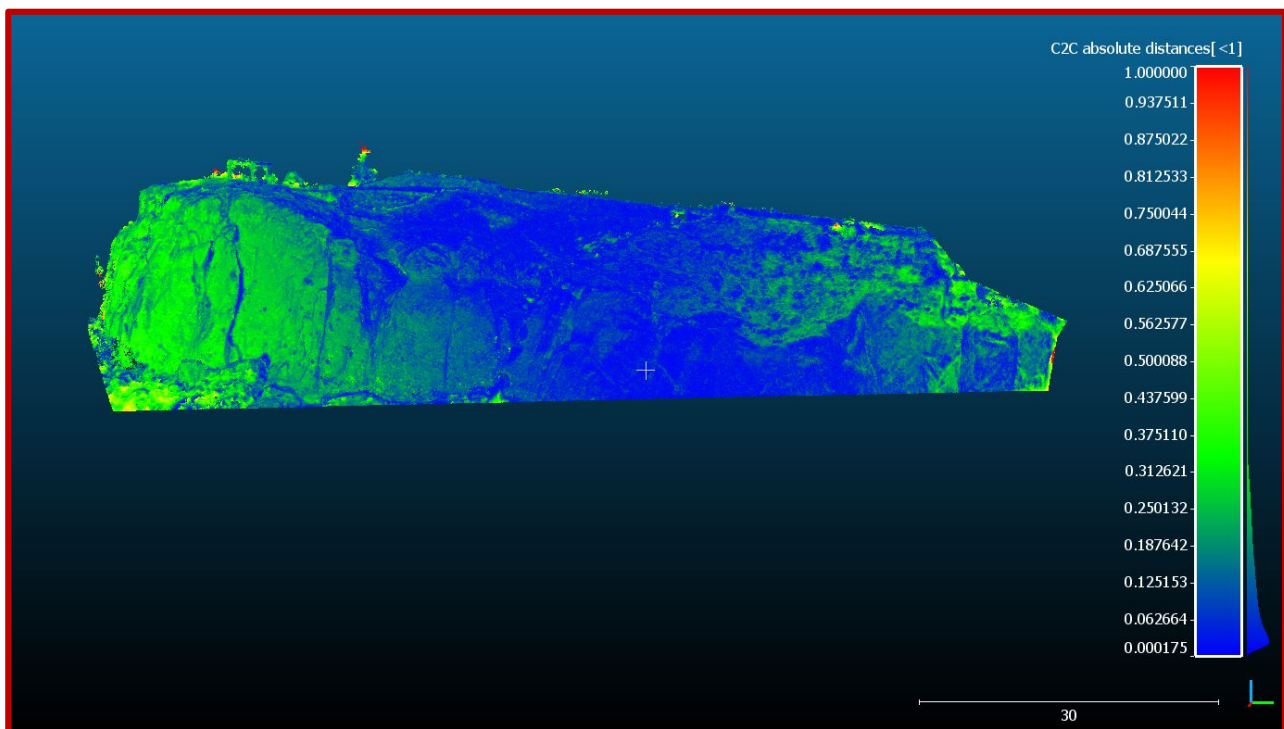


Εικόνα 12. Υπαίθρια εικόνα της θέσης που έγιναν παρατηρήσεις για μετατοπίσεις. Όπως φαίνεται όντως έχει φύγει υλικό από τη συγκεκριμένη(στη κορυφή) και έχει αποκαλυφθεί καινούργια επιφάνεια

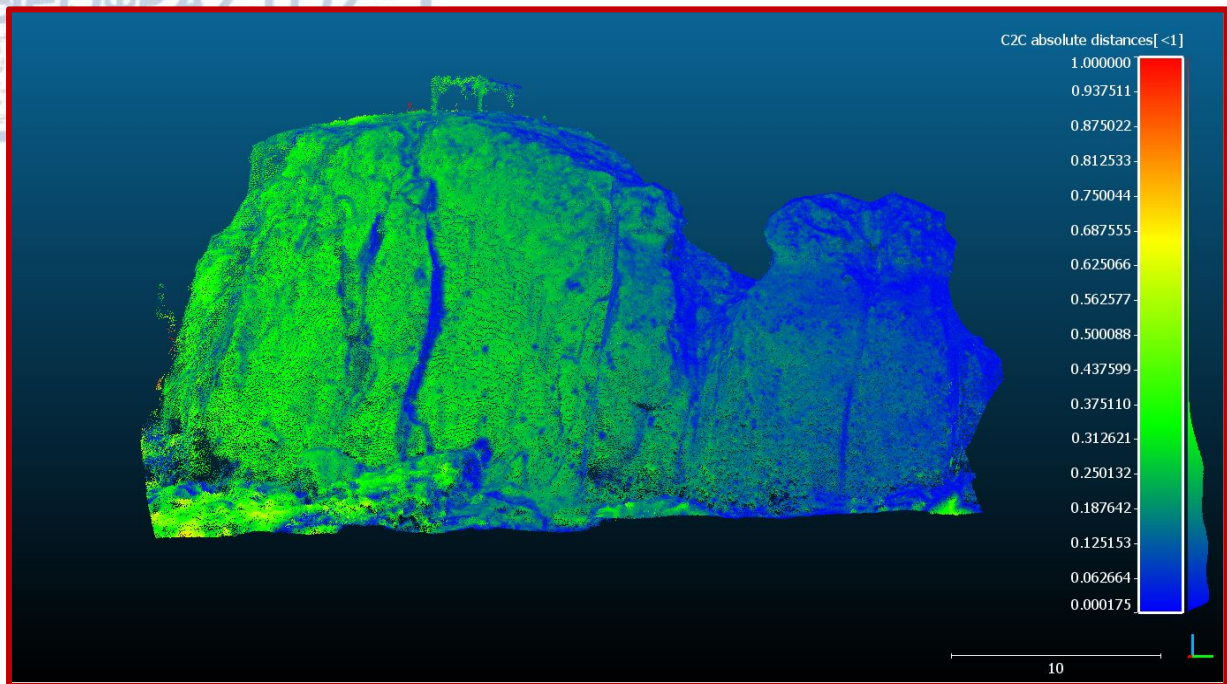
7.3 Σύγκριση μοντέλων 2018 – 2019

Για τη σύγκριση των μοντέλων του 2018 και του 2019 έγινε χρήση μόνο της μεθόδου του UAV.

Τα αποτελέσματα αυτής έδειξαν ένα σύνολο μετακινήσεων που εντοπίζεται ιδιαίτερα στο Ανατολικό άκρο του πρανούς όπως παρουσιάζεται και στις παρακάτω εικόνες. Συγκεκριμένα στην θέση αυτή υπήρξε πτώση τεμαχών μικρών διαστάσεων αλλά το κύριο γνώρισμα είναι η διόγκωση του ανοίγματος των εφελκυστικών ρωγμών. Οι διαφορές που προκύπτουν είναι θετικές καθώς με την αύξηση του ανοίγματος των εφελκυστικών ρωγμών, τα επικρεμάμενα τεμάχια ήρθαν πιο κοντά στον σαρωτή.



Σχήμα 29. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης των δύο μοντέλων(2018-19). Οι κύριες μετατοπίσεις όπως φαίνεται εντοπίζονται στο Ανατολικό μέρος του πρανούς.



Σχήμα 30. Πιο αναλυτική εικόνα των μετατοπίσεων στη πιο σημαντική θέση του πρανούς.



Εικόνα 13. Υπαίθρια εικόνα της περιοχής με τις κύριες μετατοπίσεις. Φαίνονται και αρκετά block ιγκνιμβρίτη που έπεσαν στο παρελθόν καθώς και οι εντόνως ανοιγμένες εφελκυστικές ρωγμές πίσω από τα επικρεμάμενα τεμάχη.

7.4 Αποτελέσματα

Κατά την σύγκριση των τρισδιάστατων μοντέλων εδάφους, με τη μεθοδολογία που αναλύθηκε παραπάνω, προέκυψαν κάποια σημαντικά αποτελέσματα τόσο στη ποσοτικοίηση των κατολισθήσεων που πραγματοποιήθηκαν όσο και σχετικά με τις κύριες υπό περιοχές στο πρηνές όπου παρατηρήθηκαν αυτές.

Συγκεκριμένα κατά τη σύγκριση των μοντέλων του 2014, που δημιουργήθηκε με τη χρήση του LiDaR, και του 2018, που δημιουργήθηκε με τη χρήση του UAV, παρατηρήθηκαν:

- Σημαντικές μετατοπίσεις τεμαχών με ιδιαίτερο μεγάλο μέγεθος ($\leq 4\text{m}$) που μας δείχνουν καταπτώσεις βράχων σε αυτές τις θέσεις καθώς οι διαφορές που λάβαμε ήταν αρνητικές.
- Αρκετές μετατοπίσεις μικρότερου βαθμού ($0.20\text{m} - 0.30\text{m}$) οι οποίες παρουσιάστηκαν ως θετικές διαφορές, συνδεδεμένες άρα με την επιμήκυνση των εφελκυστικών ρωγμών.
- Ως κύρια υπό περιοχή μελέτης για αυτή τα τέσσερα χρόνια θεωρήθηκε το κεντρικό μέρος του πρηνούς καθώς εκεί εντοπίζονται οι περισσότερες μετατοπίσεις αλλά και εκεί παρατηρείται η κύρια ανθρώπινη δράση (θέση ξενοδοχείου) με αποτέλεσμα την επιπλέον επιβάρυνση του πρηνούς (βάρος κατασκευών, λύματα κ.λπ.)

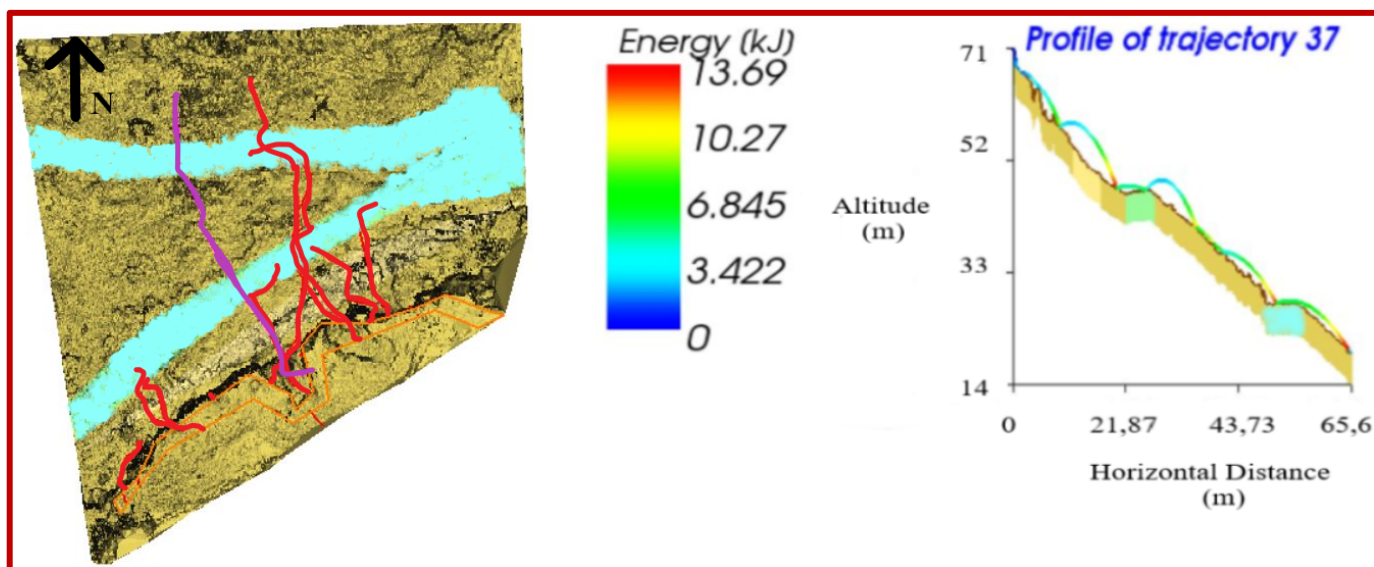
Αντίστοιχα τα αποτελέσματα της σύγκρισης των μοντέλων του 2018 και 2019, όπου και τα δύο δημιουργήθηκαν μέσω UAV ήταν:

- Κυρίως θετικές διαφορές στη σύγκριση των μοντέλων, άρα κυρίως μέσα σε αυτό το έτος υπήρξε σημαντική αύξηση του μεγέθους των εφελκυστικών ρωγμών.
- Η ποσοτικοποίηση αυτής της αύξησης του μεγέθους μετρήθηκε $\leq 0.35\text{m}$ σε ορισμένες θέσεις.
- Οι περισσότερες μετατοπίσεις παρατηρήθηκαν στο Ανατολικό άκρο του πρηνούς

Επομένως μέσω αυτών των συγκρίσεων εξήχθησαν κάποια πολύ σημαντικά αποτελέσματα. Αρχικά μέσω στο διάστημα 2014 - 2018 παρουσιάστηκαν περισσότερες καταπτώσεις βράχων στην περιοχή μελέτης ενώ αντίθετα κατά το διάστημα 2018 - 2019 παρατηρήθηκε περισσότερο αύξηση του μεγέθους των εφελκυστικών. Φυσικό συμπέρασμα αυτής της διαπίστωσης είναι πως μετά την έντονη αύξηση του μεγέθους των εφελκυστικών ρωγμών η εμφάνιση κατολισθητικών φαινομένων στο πολύ άμεσο μέλλον θεωρείται αρκετά βέβαιη λόγω της περιοδική διαδοχής που καθορίζει τα συγκεκριμένα φαινόμενα. Επιπλέον, μεγάλο ενδιαφέρον αποτελεί η μεταβολή των θέσεων της κύριας λειτουργίας του φαινομένου μέσα στο χρόνο. Στη πρώτη σύγκριση αυτή τοποθετήθηκε κυρίως στις κεντρικές θέσεις του πρηνούς ενώ στη δεύτερη στο Ανατολικό άκρο κυρίως. Αυτό δείχνει ότι η εικόνα ηρεμίας που μπορεί να παρατηρηθεί σε κάποια περιοχή του πρηνούς μπορεί να μεταβληθεί μέσα σε ένα σύντομο χρονικό διάστημα. Κάτι τέτοιο είναι ιδιαίτερα πιθανό με βάση τον μηχανισμό αστοχίας που έχει αναλυθεί παραπάνω καθώς αποτελεί μία δυναμική διαδικασία που μεταφέρεται στο πρηνές ανάλογα με την παρουσία, το μέγεθος και τη δράση των εφελκυστικών ρωγμών.

Όπως γίνεται αντιληπτό, τα αποτελέσματα της μελέτης επισήμαναν την άμεση ανάγκη για περαιτέρω εξέταση της συγκεκριμένης περιοχής. Αυτή η μελέτη οφείλει να περιλαμβάνει σίγουρα την συστηματική παρακολούθηση της περιοχής με στόχο την κατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων και τη σύγκριση αυτών. Έτσι θα ήταν δυνατή η δημιουργία μιας βάσης δεδομένων με συνεχής ανανέωση των στοιχείων. Μέσω αυτών θα ήταν δυνατή μία στατιστική ανάλυση με στόχο την εύρεση των πιο επισφαλών θέσεων μέσα στο χρόνο. Επιπρόσθετα, πιθανόν να δινόταν η ευκαιρία στην εύρεση κάποιας συσχέτισης ανάμεσα σε αυτά τα κατολισθητικά γεγονότα και της εναλλαγής των εποχών (βροχοπτώσεις, άνεμος, κ.λ.π.).

Επιπλέον θα ήταν πολύ σημαντική η υλοποίηση μία τροχιακής ανάλυσης για την περιοχή. Για την υλοποίηση αυτής της ανάλυσης γίνεται χρήση του DTM της περιοχής το οποίο δημιουργήθηκε μέσω του UAV. Στη συνέχεια με τη χρήση κάποιου γεωδαιτικού εργαλείου G.I.S. μετατρέπεται αυτό σε ένα μοντέλο hillshade το οποίο μέσω του κατάλληλου λογισμικού και των καθορισμό συγκεκριμένων παραμέτρων σχετικά με τα είδη της βραχώμαζας που παρατηρούνται, δίνει στο χρήστη διάφορα σημαντικά αποτελέσματα για μελλοντικές καταπτώσεις στη περιοχή μελέτης. Έτσι θα ήταν δυνατή η πρόβλεψη διαφόρων παραγόντων όπως η ενέργεια πτώσης, η ταχύτητα, το ύψος αποκόλλησης καθώς και ο χρόνος διαδρομής των μελλοντικά κατολισθέντων τεμαχών στην περιοχή. Αυτή η διαδικασία θα βοηθήσει στη πιο ακριβή παραμετροποίηση των μέτρων υποστήριξης της περιοχής. Έτσι θα ήταν δυνατή η τοποθέτηση των κατάλληλων μέτρων χωρίς όμως να υπάρξει και πλήρης ταπείνωση της ποιότητας της βραχώμαζας, συνδυάζοντας έτσι τους δύο βασικότερους παράγοντες για τον καθορισμό των μέτρων υποστήριξης σε οποιαδήποτε περιοχή μελέτης, την ασφάλεια και την οικονομική καταλληλότητα αυτών.



Σχήμα 31. Παράδειγμα τροχιακής ανάλυσης (μωβ γραμμή) για την περιοχή μελέτης με ενεργειακό αποτέλεσμα κατά την πτώση του συγκεκριμένου τεμάχους.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ένας από τους βασικούς στόχους της παρούσας μελέτης ήταν η χρήση των νέων μεθόδων τηλεανίχνευσης έτσι ώστε να διαπιστωθεί αν αποτελούν όντως ένα τόσο χρήσιμο εργαλείο στη τεχνική γεωλογία. Τα αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερα εντυπωσιακά καθώς μέσω αυτών των εργαλείων η δουλειά του γεωλόγου γίνεται πολύ πιο αποτελεσματική και ακριβής.

Αναλυτικότερα, τα κυριότερα πλεονεκτήματα αυτών των σύγχρονων καινοτόμων μεθόδων σε σχέση με τις παλαιότερες συμβατικές μεθόδους εντοπίζονται κυρίως στην αύξηση των δυνατοτήτων που προσφέρονται στο μελετητή έτσι ώστε να υλοποιήσει πιο ολοκληρωμένα την έρευνα του. Τα δεδομένα τους παρουσιάζουν ιδιαίτερη μεταβιβασιμότητα, είναι εύκολα επεξεργάσιμα από ηλεκτρονικούς υπολογιστές και προσφέρουν ιδιαίτερη ακρίβεια. Μέσω των δυνατοτήτων τους είναι δυνατή η παραγωγή ολιστικών μετρήσεων για την περιοχή με άμεσο στόχο την αύξηση της περιοχής μελέτης χωρίς όμως να μειωθεί η ποιότητα των μετρήσεων. Επιπλέον, είναι πολύ σημαντική η βοήθεια που προσφέρουν στην διατήρηση της ασφάλειας του χρήστη μέσω της φορητότητάς τους. Έτσι ο μελετητής μπορεί να αποκτήσει πρόσβασή σε δύσβατες περιοχές χωρίς να εκθέσει τον εαυτό του σε διαφόρων ειδών κινδύνους.

Συμπερασματικά θα μπορούσε να διατυπωθεί η άποψη πως μπορούν πλέον να θεωρηθούν ως ένα πολύ σημαντικό συμπληρωματικό εργαλείο στην Τεχνική Γεωλογία. Κατά μία άποψη θα μπορούσαν να προσδιοριστούν ως το μέλλον της επιστήμης της Γεωλογίας και σίγουρα αποτελεί μία άνευ προηγουμένου εμπειρία η δυνατότητα ενασχόλησης με τις συγκεκριμένες τεχνολογίες για τον οποιοδήποτε ερευνητή που στοχεύει στην αναβάθμιση του αντικειμένου του.

Βέβαια καταλήγοντας θα πρέπει να υπογραμμιστεί για ακόμη μία φορά η σημασία της επιτόπου μελέτης (in-situ) της περιοχής σε συνδυασμό με ένα πολύ ισχυρό τεχνικογεωολογικό υπόβαθρο από τον μελετητή. Έτσι μόνο θα ήταν δυνατή η αξιοποίηση των δυνατοτήτων αυτών των νέων μεθόδων στον μέγιστο βαθμό. Θεωρείται κομβικής σημασίας η κατανόηση πως αποτελούν ένα εξαιρετικό εργαλείο στη επιστήμη αλλά δεν μπορούν να παράγουν επιστήμη από μόνα τους.

Μέσω της χρήσης της παραπάνω μεθοδολογίας στη συγκεκριμένη μελέτη παράχθηκαν πολύ σημαντικά συμπεράσματα τόσο για τις αρχές που διέπουν τη γενική χρήση των νέων αυτών μεθόδων τηλεανίχνευσης όσο και για τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή μελέτης μέσα στο διάστημα των πέντε τελευταίων ετών. Συγκεκριμένα, μέσω της διαχρονικής σύγκρισης των τρισδιάστατων μοντέλων παρατηρήθηκε πως το μέγεθος των εφελκυστικών ρωγμών, που αποτελεί την κινητήρια δύναμη του φαινομένου, αυξάνεται μέσα στον χρόνο επηρεαζόμενο τόσο από φυσικές διαδικασίες (βροχοπτώσεις) όσο και λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας (λύματα) στην κορυφή του πρανούς. Το μέγεθος αυτών αυξάνεται μέχρι ο συντελεστής ασφαλείας να φτάσει οριακά σε τιμή ίση με το μηδέν και μετά πραγματοποιείται η αστοχία με τους τρόπους που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια αναλυτικά.

Το κύριο πρόβλημα όμως που εντοπίστηκε μέσω της παραπάνω μελέτης και δεν ήταν γνωστό μέχρι πρότινος είναι η μετατόπιση των θέσεων αυτής της αύξησης μεγέθους των εφελκυστικών ρωγμών στο πρηνές μέσα στον χρόνο. Η υλοποίηση του φαινομένου της αστοχίας αποτελούσε ένα γνωστό πρόβλημα για την περιοχή μελέτης καθώς τα τελευταία χρόνια υπάρχει πληθώρα κατολισθόντων τεμαχών στην περιοχή περιφερειακά του δρόμου καθώς και στη πλαγιά που υπόκειται του επισφαλούς πρηνούς. Η δυναμικότητα αυτού του φαινομένου που διαπιστώθηκε όμως αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εύρημα καθώς μέσω αυτής θα καθοριστούν και οποιαδήποτε μελλοντικά μέτρα υποστήριξης εφαρμοστούν στο πρηνές. Τα μέτρα αυτά δεν θα πρέπει να περιοριστούν σε κάποιο συγκεκριμένο τμήμα του επισφαλούς πρηνούς καθώς όπως διαπιστώθηκε η θέση πραγματοποίησης της αστοχίας δεν παραμένει σταθερή μέσα στο χρόνο. Μπορεί έτσι ασφαλώς να υπάρχει αύξηση του κόστους για οποιοδήποτε μέτρο και αν εφαρμοστεί αλλά αποτρέπονται μελλοντικές αστοχίες του ίδιου του εξοπλισμού.

Τέλος, για την καλύτερη παραμετροποίηση του φαινομένου η δημιουργία μίας βάσης δεδομένων για την συγκεκριμένη περιοχή μελέτης φαντάζει μονόδρομος. Τα δεδομένα αυτά θα καθιστούσαν δυνατή την παρατήρηση του φαινομένου μέσα σε μικρά χρονικά διαστήματα με στόχο την συνεχή καταγραφή των μετακινήσεων. Έτσι θα είναι δυνατή η εύρεση κάποιας πιθανής περιοδικότητας στις θέσεις εμφάνισης του φαινομένου και ίσως κάποια συσχέτιση τόσο με μετεωρολογικά φαινόμενα όσο και με την ανθρώπινη δραστηριότητα.

Όπως καθίσταται σαφές από τα παραπάνω μία τέτοια παρατήρηση θα ήταν αδύνατη στο παρελθόν, χωρίς την ζωτικής σημασίας συνεισφορά των μεθόδων τηλεανίχνευσης. Μετατοπίσεις της κλίμακας των λίγων δεκάδων εκατοστών μέσα σε διάστημα ενός χρόνου σε όλη την έκταση του πρηνούς, θα ήταν αδύνατο να αποτυπωθούν από οποιοδήποτε μελετητή όσο έμπειρος και αν ήταν. Αντίθετα μέσω της παραπάνω μεθοδολογίας η παρατήρηση αυτών έγινε πραγματικότητα και μάλιστα ήταν δυνατή και η ποσοτικοποίηση των παραπάνω μετακινήσεων. Γίνεται αντιληπτό λοιπόν πως μέσω της χρήσης αυτών, των σχετικά οικονομικών, εργαλείων σε συνδυασμό με την σωστή αξιολόγηση των προϊόντων τους από τους κατάλληλα καταρτισμένους μελετητές ανοίγονται νέα πεδία στην τεχνική γεωλογία που μέχρι πρότινος ήταν μέσα σε «σκιερές ζώνες» όχι λόγω έλλειψης γνώσεων αλλά λόγω έλλειψης των κατάλληλων-απαραίτητων μέσων για την υλοποίησή τους.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Marinos V., Papathanasiou G., Kaklis T., Prountzopoulos G., Asteriou P., Pantazis G., Lamprou E., Grendas N., Pavlides S., 2016, An Engineering Geological Assessment Using Terrestrial Laser Scanning for the Stabilization of a Volcanic Slope in Santorini Island. Bulletin of the Geological Society of Greece, vol. L, 2016

Giordan D., A. Manconi, A. Facello, M. Baldo, F. dell'Anese, P. Allasia, and F. Dutto, 2014, Brief Communication "The use of UAV in rockfall emergency scenario". Natural Hazards Earth System Sciences Discussions, 2, pp 4011–4029.

Lucieer, A., S. M. de Jong, D. Turner, 2014, Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. Progress in Physical Geography, Vol. 38(1), pp 97–116.

Zieher T., I. Toschi, F. Remodino, M. Rutzinger, Ch. Kofler, A. Mejia-Aguilar, R. Schlögel, 2018, Sensor- and Scene Guided Integration of TLS and Photogrammetric Point Clouds for Landsliding Monitoring. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII.

Druitt, T.H. and Francaviglia, V., 1992. Caldera formation in Santorini and the physiography of the islands in the late Bronze Age. Bull. Volanol., 54, pp 484-493.

Apuani T., Corazzato C., Cancelli A., Tibaldi A. 2005. Physical and mechanical properties of rock masses at Stromboli: a dataset for volcano instability evaluation. Bull Eng Geol Env, 64, pp 419–431.

Μουντράκης Δ, 2010, Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας, pp 132-143.

Μαρίνος Β. Π., Παυλίδης Σ., Πανταζής Γ., Λάμπρου Ε., Προυντζόπουλος Γ., Αστερίου Π., Παπαθανασίου Γ., Κακλής Τ., 2014, Γεωλογική Διερεύνηση και Εκτίμηση Επικινδυνότητας Καταπτώσεων και Υποβολή Μέτρων Στήριξης-Ενίσχυσης των Πρανών της Κόκκινης Παραλίας και των Κατολισθητικών Φαινομένων στην Περιοχή Αποθήκες, Δήμου Θήρας, Ερευνητικό Πρόγραμμα.

Κούκης Γ., Σαμπατακάκης Ν., 2002, Τεχνική Γεωλογία.

Αστερίου Π., 2016, Διερεύνηση των Γεωτεχνικών Παραμέτρων που Ελέγχουν τις Καταπτώσεις Βράχων, Διδακτορική Διατριβή.

Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού, Φύλλα 86114,86116, κλίμακα 1:5.000.

Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, Στοιχεία σταθμού «Θήρα» περιόδου 1992-2013.

Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός, 2002.

Οργανισμός Αντισεισμικής Προστασίας. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών. Γεωλογικός Χάρτης Φύλλο «Θήρα» Κλίμακα 1:50.000, 1999.

Οργανισμός Αντισεισμικής Προστασίας (ΟΑΣΠ): Νέος Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας (2004). Συμπλήρωμα στον ΕΑΚ 2002.

Δημητριάδης Ι., 2008, Συμβολή στη Μελέτη της Ενεργού Τεκτονικής και της Δομής του Ηφαιστειακού Κέντρου της Σαντορίνης με Δεδομένα Τοπικού Δικτύου Ψηφιακών Σεισμογράφων, Διδακτορική Διατριβή.

Παπαζάχου Β., Παπαζάχου Κ., 1989. Οι σεισμοί της Ελλάδας.