

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΙΩΑΝΝΗΣ Γ. ΦΑΡΜΑΚΗΣ Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΑΡΩΤΗ LIDAR ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΝΑΝΤΙ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΣΣΑΣ, ΘΗΡΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ» ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: «ΤΕΧΝΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ»



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2018





ΙΩΑΝΝΗΣ Γ. ΦΑΡΜΑΚΗΣ

Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΑΡΩΤΗ LIDAR ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΝΑΝΤΙ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΣΣΑΣ, ΘΗΡΑ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία», Κατεύθυνση «Τεχνική Γεωλογία»

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Αναπληρωτής Καθηγητής ΑΠΘ Βασίλειος Μαρίνος, Επιβλέπων

Καθηγητής ΑΠΘ Βασίλειος Χρηστάρας, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Επίκουρος Καθηγητής ΔΠΘ Γεώργιος Παπαθανασίου, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής ΒΙΒΛΙΟΘήκη
 Ο ΒΙΒΛ

Ψηφιακή συλλογή

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΑΡΩΤΗ LIDAR ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΝΑΝΤΙ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΣΣΑΣ, ΘΗΡΑ – Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

© Ioannis G. Farmakis, Geologist, 2018 All rights reserved. ROCK MASS CHARACTERIZATION USING LIDAR TERRESTRIAL LASER SCANNER FOR ROCKFALL SUSCEPTIBILITY ASSESSMENT IN PERISSA AREA (SANTORINI) – *Master Thesis*

Citation:

Φαρμάκης Ι. Γ., 2018. – Χαρακτηρισμός βραχομάζας με τη χρήση επίγειου σαρωτή LiDAR για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων στην περιοχή της Περίσσας, Θήρα. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., 86 σελ.

Farmakis I. G., 2018. – Rock mass characterization using LiDAR terrestrial laser scanner for rockfall susceptibility assessment in Perissa area (Santorini). Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 86 pp.

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

1 KF	1 КЕФАЛАЮ1		
ΕΙΣΑΓ	ΓΩΓΗ	1	
1.1	1.1 Σκοπός της εργασίας		
1.2	1.2 Μεθοδολογία		
1.3	1.3 Θέση έρευνας – Χαρακτηριστικά		
1.4	1.4 Εργαλεία έρευνας – Πρόγραμμα εργασιών – Λογισμικά επεξεργασίας δεδομένων 4		
1.5	1.5 Προσδωκώμενα αποτελέσματα ²		
2 KH	ΕΦΑΛΑΙΟ	6	
ENNO	ΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ	6	
2.1	Εισαγωγή	6	
2.2	Βραχοκατάπτωση (rockfall)	6	
2.2	2.1 Τα αίτια των βραχοκαταπτώσεων		
2.2	2.2 Γενικά στοιχεία της τροχιάς	11	
2.2	2.3 Μέτρα αντιμετώπισης-αντιστήριξης	13	
2.3	Επιδεκτικότητα (susceptibility)	15	
2.3	3.1 Ζωνοποίηση κατολισθητικής επιδεκτικότητας (landslide susceptibility zonin	ng) 16	
2.3	3.2 Χρησιμότητα στον σχεδιασμό χρήσης γης	16	
2.3	3.3 Κλίμακες ζωνοποίησης της κατολισθητικής επιδεκτικότητας	17	
2.3	3.4 Μέθοδοι ζωνοποίησης της κατολισθητικής επιδεκτικότητας	17	
3 KH	ΕΦΑΛΑΙΟ	20	
Η ΓΕΩ	ΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	20	
3.1	Εισαγωγή	20	
3.2	Ελληνικό ηφαιστειακό τόξο	20	
3.2	2.1 Γεωμορφολογία της περιοχής	24	
3.2	2.2 Η εξέλιξη του ηφαιστειακού τόξου	25	
3.3	Αλπικό υπόβαθρο Σαντορίνης – Αττικοκυκλαδική ζώνη		
3.3	3.1 Ενότητα Νοτίων Κυκλάδων		
3.3	3.2 Τεκτονοστρωματογραφία	27	
3.3	3.3 Τεκτοορογενετική εξέλιξη		
3.4	Ηφαιστειακή δράση και αποθέσεις		

X and	Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη	
W'OF	ΟΦΡΑΣΤΟΣ"	
3.4	4.1 Το χρονικό και τα προϊόντα της ηφαιστειακής δράσης	
3.5	Σεισμικότητα της περιοχής	
3.6	Κλιματικές συνθήκες	
3.7	Η περιοχή μελέτης	33
4 KI	ΕΦΑΛΑΙΟ	
TEXNO	ОЛОГІА LiDAR (Light Detection and Ranging)	
4.1	Εισαγωγή	38
4.2	Η φιλοσοφία της λειτουργίας	38
4.3	Τα είδη των σαρωτών LiDAR	39
4.3	3.1 Στατικοί σαρωτές LiDAR	40
4.3	3.2 Κινητοί σαρωτές LiDAR	40
4.4	Δεδομένα LiDAR	
4.4	4.1 Δεδομένα ΧΥΖ	
4.4	4.2 Δεδομένα XYZI	
4.4	4.3 Δεδομένα XYZRGB	
4.5	Οφέλη και περιορισμοί	
5 KI	ΕΦΑΛΑΙΟ	45
LiDAR	а каі врахΩан прамн	45
5.1	Εισαγωγή	45
5.2	Χαρακτηρισμός βραχωδών πρανών με τη χρήση LiDAR	
5.3	Σφάλμα προσανατολισμού και έμφραξη (orientation bias and occlusion)	
5.4	Οργάνωση του προγράμματος σάρωσης (survey planning)	
5.4	4.1 Τεχνικογεωλογικές θεωρήσεις	
6 KI	ΕΦΑΛΑΙΟ	50
ΣΥΛΛ	ΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	50
6.1	Εισαγωγή	50
6.2	Πρόγραμμα σάρωσης και συμβατικές μετρήσεις	50
6.2	2.1 Θέσεις σάρωσης	51
6.2	2.2 Τα παραχθέντα δεδομένα	
6.2	2.3 Συμβατικές μετρήσεις ασυνεχειών	53
6.3	Μεθοδολογία επεξεργασίας των δεδομένων	54
6.3	3.1 Καθαρισμός (filtering)	55

ME	- B	ιβλιοθήκη			
"G	632	Γ εωαναφορά (registration)	55		
NAS.	622		56		
2	0.5.5)0		
	6.3.4	Υπολογισμός της απόστασης των ασυνεχειών (spacing)	57		
	6.3.5	Κατασκευή χάρτη πυκνότητας των ρωγμώσεων (fracture density)	59		
	6.3.6	Κατασκευή χαρτών της απόστασης των ασυνεχειών (spacing)	59		
	6.3.7	Εκτίμηση των όγκων των τεμαχών και κατασκευή χάρτη χωρικής κατανομής 5	59		
7	KE	ΦΑΛΑΙΟ	51		
АП	ΟΤΕ /	ΑΕΣΜΑΤΑ	51		
7.	.1 I	Ξισαγωγή	51		
7.2 Κύριες οικογένειες ασυνεχειών61			51		
7.	7.3 Απόσταση των ασυνεχειών (spacing)				
7.	7.4 Όγκοι διαμορφωθέντων τεμαχών				
7.	7.5 Χαρακτηρισμός της βραχομάζας70				
7.	7.6 Δυνητικές αστοχίες				
8 КЕФАЛАЮ					
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ					
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ					
Διεθνής βιβλιογραφία			34		
Ελληνική βιβλιογραφία					

0

Ψηφιακή συλλογή



Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ΦΡΑΣΤ

Τμήμα Γεωλογίας

Οι βραχοκαταπτώσεις αποτελούν έναν από τους πιο συνηθισμένους γεωλογικούς κινδύνους σε ορεινές βραχώδεις περιοχές και μπορεί να αποβεί καταστροφικός όταν λάβει χώρα σε ανθρωπογενές περιβάλλον. Για τον λόγο αυτό είναι μείζουσας σημασίας ο εντοπισμός των περιοχών που έχουν τη δυνατότητα να παράζουν το φαινόμενο. Η έννοια που περιγράφει αυτές τις περιοχές είναι η επιδεκτικότητα και η ποιοτική και ποσοτική προσέγγισή της κρίνεται επιβεβλημένη για την έγκαιρη αντιμετώπιση τυχούσας εκδήλωσης του φαινομένου. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση προϋποθέτει τη γνώση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών της βραχομάζας, τα οποία καθοδηγούν το φαινόμενο των βραχοκαταπτώσεων και η όσο το δυνατόν πιο λεπτομερής καταγραφή τους αυξάνει την αξιοπιστία των υπολογισμών. Η απόκτηση των απαραίτητων στοιχείων μπορεί να γίνει με συμβατικές μεθόδους χαρτογράφησης αλλά και με μεθόδους τηλεπισκόπησης όπως είναι οι σαρωτές LiDAR. Η τεχνολογία LiDAR (Light Detection and Ranging) γνωρίζει μεγάλη ανάπτυξη τις τελευταίες δεκαετίες στον χώρο των γεωεπιστημών παρέχοντας μια σειρά από πλεονεκτήματα έναντι των προϋπαρχουσών μεθόδων.

Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε η τεχνολογία LiDAR με στόχο την εξαγωγή όλων των απαραίτητων παραμέτρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας μιας περιοχής έναντι βραχοκαταπτώσεων. Περιοχή μελέτης αποτέλεσαν τα ασβεστολιθικά πρανή της Περίσσας στο νοτιοανατολικό τμήμα της νήσου Θήρα στο σύμπλεγμα της Σαντορίνης. Από την επεξεργασία των δεδομένων εξήχθησαν τα στοιχεία προσανατολισμού όλων των συστημάτων ασυνεχειών, απόστασης των ασυνεχειών μεταξύ των συστημάτων και όγκων των σχηματιζόμενων τεμαχών. Παραμέτρων δηλαδή που συνήθως υπολογίζονται στατιστικά ή σε περιορισμένες εκτάσεις θεωρώντας τη βραχομάζα ομογενή ως προς αυτές. Το επιπρόσθετο στοιχείο που προσφέρει η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε, είναι η κατασκευή χαρτών της χωρικής κατανομής των παραπάνω παραμέτρων χαρακτηρισμού της βραχομάζας λαμβάνοντας υπόψη τις διαφοροποιήσεις που εμφανίζουν στα μεγέθη τους κατά μήκος των πρανών. Έτσι, το αποτέλεσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την χωρικά συγκεκριμένη εκτίμηση της επιδεκτικότητας χωρίς να θεωρείται το κάθε πρανές ή σχηματισμός σαν ενιαία χαρτογραφική μονάδα ως προς την επιδεκτικότητα. Επιπλέον, εκτιμήθηκαν οι δυνητικές αστοχίες και έγινε ταυτοποίηση των αποτελεσμάτων με πρόσφατα αποκολλημένους όγκους που εντοπίστηκαν στην περιοχή.

Στην αρχή της εργασίας αποσαφηνίζεται η έννοια της επιδεκτικότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων και παρουσιάζονται τρόποι προσέγγισης της τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Ακόμη, περιγράφεται λεπτομερώς το φαινόμενο των βραχοκαταπτώσεων με τους μηχανισμούς που το προκαλούν καθώς και των παραμέτρων που το ελέγχουν. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα γεωλογικά στοιχεία τόσο της ευρύτερης όσο και της εγγύτερης περιοχής μελέτης, η σεισμικότητα και οι κλιματικές συνθήκες. Κατόπιν, γίνεται εμπεριστατωμένη εισαγωγή στις αρχές λειτουργίας της τεχνολογίας LiDAR και της φύσης των δεδομένων που παράγει, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της περιγραφής των μεθόδων επεξεργασίας που ακολουθούν. Τα στάδια επεξεργασίας των δεδομένων αναλύονται βήμα προς βήμα παρέχοντας στον αναγνώστη σαφή εικόνα της διαδικασίας. Ακόμη, προτείνονται τρόποι και προσεγγίσεις των βραχωδών πρανών με τη χρήση σαρωτών LiDAR ανάλογα με τις επιτόπου συνθήκες. Τέλος, τα αποτελέσματα που προέκυψαν

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη 88 DADQ

από την συγκεκριμένη μεθοδολογία επαληθεύονται και ερμηνεύονται με βάση επιτόπου παρατηρήσεις και μετρήσεις καθώς και χειροκίνητες μετρήσεις στα ίδια δεδομένα.

ABSTRACT

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ΟΦΡΑΣΤ

Τμήμα Γεωλογίας

Rockfalls consist one of the most dominant geological hazards in mountainous rocky regions with the potential to turn catastrophic if occurs in anthropogenic environment. Due to that fact, the identification of the possible locations to produce the phenomenon is of high importance. Susceptibility is the parameter describes these locations and the qualitative and quantitative assessment of it is necessary for the timely treatment of a possible rockfall occurrence. However, this approach requires some critical rock mass characteristics to be known. These ones that govern the phenomenon and so the more detailed acquisition of them increases the calculations reliability. Such data acquisition can be achieved by implementing conventional mapping methods as well as remote sensing techniques like LiDAR scanners. The LiDAR (Light Detection and Ranging) technology is extremely preferred the last decades in the field of Geosciences, providing many advantages against the pre-existing methods.

In the current study, LiDAR technology was implemented to extract the appropriate parameters can be used for the rockfall susceptibility assessment. The study area was the limestone slopes in Perissa area at the southeastern part of Thera island at Santorini complex. After data processing, joint orientation parameters, joint spacing and block volumes were extracted. Parameters which are usually either statistically or at confined areas estimated considering homogeneous rock mass in them respect. The extra element the here used methodology provides is the creation of spatial distribution maps of the above mentioned parameters, considering the fluctuation of their values along the slopes. Thus, the produced result can be used in the spatial-specific susceptibility assessment without considering every slope or formation as an entire susceptibility mapping unit. Moreover, the possible failures were estimated and validated according to some recently detached volumes that were identified in-situ.

In the beginning, the meaning of rock fall susceptibility is clarified and both qualitative and quantitative approach methods are presented. Additionally, the rockfall phenomenon is detailed described followed by the triggering mechanisms and the governing factors. Moreover, the geological setting, the seismicity and the climatic conditions of the study area is presented. Secondly, in order to the following data processing part be adequately understood, an in-depth introduction to the LiDAR technology operations principles and to the produced data's nature is carried out. The data processing is further analyzed step by step providing the reader with the desirable view of the whole procedure. Furthermore, techniques for LiDAR usage on rocky slopes are being suggested, with respect to the different local conditions. Finally, the results produced by the current methodology are validated and interpreted according to in-situ records and measurements as well as manually extracted measurements on the point clouds.



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής διπλωματικής μου εργασίας, κ. Βασίλειο Μαρίνο, Αν. Καθηγητή του Α.Π.Θ., για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του προς την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και για τις συμβουλές του κατά την διάρκεια των σπουδών μου από το προπτυχιακό επίπεδο. Η στήριξη στις επιθυμίες μου και η εμπιστοσύνη που μου έδειξε με κάθε τρόπο ήταν καθοριστικοί παράγοντες για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας κάτω από τις ιδανικές για εμένα συνθήκες.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την στήριξη και την εμπιστοσύνη τους σε μένα μέχρι σήμερα καθώς χωρίς την δική τους παρουσία τίποτα δεν θα ήταν το ίδιο. Υποστήριξαν όλες τις επιθυμίες μου, σε δύσκολες αποφάσεις, με κάθε δυνατό τρόπο ώστε να φτάσω στο σημείο που βρίσκομαι σήμερα.

Ακόμη, θέλω να πω ένα ευχαριστώ και στον Ευστράτιο Καραντανέλλη, υποψήφιο διδάκτορα του Α.Π.Θ., για την πολύτιμη συνεισφορά του στο πεδίο και για την καθημερινή φιλική συναναστροφή εντός και εκτός πανεπιστημίου τις πολύτιμες ώρες της αποφόρτισης. Τέλος ευχαριστώ τον Γεώργιο Παπαθανασίου, Επ. Καθηγητή του Δ.Π.Θ., για την προθυμία του να συζητήσουμε και να μοιραστεί τις προτάσεις του στα πλαίσια της διπλωματικής μου εργασίας.



1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εξαγωγή όλων των απαραίτητων παραμέτρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας μιας περιοχής έναντι βραχοκαταπτώσεων. Ο επιπλέον στόχος όμως είναι, η απόκτηση αυτών των παραμέτρων να γίνει με τη χρησή μιας μεθοδολογίας που αποτελεί συνδυασμό αυτοματοποιημένων και ημί-αυτοματοποιημένων μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων LiDAR (Light Detection and Ranging) και η ταυτοποίηση των αποτελεσμάτων με βάση επιτόπου μετρήσεις και τεχνικογεωλογικές παρατηρήσεις.

Οι παράμετροι αυτοί είναι κυρίως γεωμετρικά μεγέθη χαρακτηρισμού των ασυνεχειών όπως ο προσανατολισμός, η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών κάθε οικογένειας (spacing) και οι όγκοι που αυτές διαμορφώνουν αλλά και η πυκνότητα των ρωγμώσεων. Σύνηθως, στις εργασίες εκτίμησης της επιδεκτικότητας έναντι κατολισθητικών φαινομένων, οι παράμετροι αυτοί εκτιμώνται στατιστικά και σε περιορισμένες εκτάσεις, θεωρώντας τη βραχομάζα ομογενή ως προς αυτές. Η εργασία αυτή στοχεύει να λαμβάνονται υπόψη οι διαφοροποιήσεις που εμφανίζουν τα μεγέθη τους κατά μήκος των πρανών, το αποτέλεσμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την χωρικά συγκεκριμένη εκτίμηση της επιδεκτικότητας και να μην θεωρείται το κάθε πρανές ή σχηματισμός σαν ενιαία χαρτογραφική μονάδα ως προς την επιδεκτικότητα.

1.2 Μεθοδολογία

Για την εξαγωγή των προαναφερθέντων, χωρικά εξαρτώμενων, παραμέτρων, χρησιμοποιήθηκε μια μεθοδολογία που συνδυάζει ήδη υπάρχουσες αυτοματοποιημένες μεθόδους αλλά και προσαρμογή κάποιων προγραμματιστικών δυνατοτήτων στις συγκεκριμένες συνθήκες και στόχους.

Αρχικά, τα δεδομένα που παρέχει ο σαρωτής LiDAR γεωαναφέρονται με τη χρήση τοπογραφικών στόχων και την αξιοποίηση μετρήσεων συντεταγμένων από γεωδαιτικό σταθμό. Στη συνέχεια, υπολογίζονται τα στοιχεία προσανατολισμού ασυνεχειών και πρανών που είναι τα κύρια στοιχεία στα οποία βασίζεται κάθε επόμενο βήμα επεξεργασίας. Έπειτα, εκτιμώνται οι τιμές της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών κάθε οικογένειας (spacing) και τέλος, υπολογίζονται οι όγκοι που διαμορφώνονται μεταξύ των επιφανειών των ασυνεχειών.

Σε τελευταίο στάδιο, τα αποτελέσματα των παραπάνω παραμέτρων χρησιμοποιούνται για την κατασκευή χαρτών χωρικής κατομής των τιμών τους κατά μήκος των πρανών της περιοχής, μέσα από μια σειρά βημάτων επεξεργασίας που περιγράφονται αναλυτικά στο Υποκεφάλαιο 6.3.

Βιβλιοθήκη ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ'' 1.3 Θέση έρευνας – Χαρακτηριστικά

Περιοχή έρευνας και εφαρμογής της συγκεκριμένης μεθοδολογίας αποτέλεσαν τα ασβεστολιθικά πρανή της Περίσσας, στο νότιο τμήμα της νήσου Θήρα του συμπλέγματος Σάντορίνης. Στην λήψη Google Earth, της Εικόνα 1.1, απεικονίζονται τα πρανή πάνω απο τις υποδομές που υπάρχουν στην παραλία της Περίσσας. Σε κοντινή απόσταση από τα συγκεκριμένα πρανή τοποθετούνται χώροι στάθμευσης, με ιδιαίτερη επισκεψιμότητα τους θερινούς μήνες, ένας μικρός αρχαιολογικός χώρος, εγκαταστάσεις εστίασης και ένας δρόμος διέλευσης αυτοκινήτων που οδηγέι στην προβλήτα.



Εικόνα 1.1 Τα πρανή της Περίσσας από λήψη Google Earth

Τα εξεταζόμενα πρανή έχουν ύψος που φτάνει τα 60 m με απότομες κλίσεις και μήκος 240 m. Πρόκειται δηλαδή για μια εκτενή περιοχή που οποιοδήποτε βραχοταπτωτικό γεγονός μπορεί να ενέχει κίνδυνο για τις κάτωθι υποδομές.

Στις επόμενες σελίδες ακολουθεί φωτογραφικό υλικό που αποκτήθηκε έπειτα από πτήσεις UAV (Unmanned Aerial Vehicle) και απεικονίζεται η περιοχή μελέτης από διαφορετικές λήψεις.



Εικόνα 1.2 Το νοτιότερο τμήμα της περιοχής μελέτης. Λήψη από UAV



Εικόνα 1.3 Ολόκληρη η περιοχή μελέτης. Λήψη από UAV



Εικόνα 1.4 Η περιοχή μελέτης με τις κάτωθι υποδομές σε κάτοψη. Λήψη από UAV

1.4 Εργαλεία έρευνας – Πρόγραμμα εργασιών – Λογισμικά επεξεργασίας δεδομένων

Για την απόκτηση των απαραίτητων πληροφοριών και την υλοποίηση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας χρησιμοποιήθηκε ο εξής εξοπλισμός: Επίγειος σαρωτής LiDAR, UAV, γεωλογική πυξίδα, σφύρα Schmidt, προφιλόμετρο.

Το πρόγραμμα εργασιών περιελάμβανε σαρώσεις LiDAR από πέντε (5) διαφορετικές θέσεις, πτήσεις UAV, μετρήσεις αντοχής ασυνεχειών και κατασκευή τεκτονικών διαγραμμάτων συνολικά και για κάθε επιμέρους πρανές.

Τα δεδομένα που αποκτήθηκαν από την χρήση του επίγειου σαρωτή επεξεργάστηκαν και εμφανίστηκαν με τη χρήση των λογισμικών CloudCompare και ArcMap, χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες εργαλειοθήκες ή συνδυασμούς αυτών. Επίσης, στο κομμάτι των υπολογισμών χρησιμοποιήθηκαν και ειδικά διαμορφωμένοι αλγόριθμοι σε περιβάλλον Matlab.

1.5 Προσδωκώμενα αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα στα οποία αρχικά στοχεύει η εργασία είναι η απόκτηση πληροφορίας σχετικά με τη χωρική μεταβολή των γεωμετρικών παραμέτρων ασυνεχειών και πρανών κατα μήκος όλης της εξεταζόμενης βραχομάζας. Στη συνέχεια, ο εντοπισμός των κρίσιμων μηχανισμών αστοχίας για κάθε επιμέρους πρανές και ο χαρακτηρισμός της βραχομάζας κατά GSI, με βάση το νέο ποσοτικοποιημένο διάγραμμα.

Ο απώτερος σκοπός αξιοποίησης των συγκεκριμένων αποτελεσμάτων είναι να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισαγωγής σε εκτιμήσεις της επιδεκτικότητας αλλά ακόμη και περαιτέρω αναλύσεων ευστάθειας παρέχοντας χωρικά εξαρτώμενη εκτίμηση των συντελεστών ασφαλείας ανάλογα με το κρίσιμο μηχανισμό αστοχίας σε δεδομένη θέση.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

2.1 Εισαγωγή

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

> μα Γεωλογίας Α.Π.Θ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια αναλυτική περιγραφή των εννοιών και των όρων που αποτελούν την κύρια κατεύθυνση αυτής της εργασίας. Η αποσαφήνιση αυτών των εννοιών κρίνεται αναγκαία για την καλύτερη κατανόηση της σημασίας των αποτελεσμάτων, και γίνεται μέσα από την παράθεση λεπτομερών περιγραφών και εικόνων ενώ δίνονται και ορισμοί για συγκεκριμένους όρους.

Συγκεκριμένα, περιγράφεται αναλυτικά και δίνεται ο ορισμός του φαινομένου των βραχοκαταπτώσεων (rockfalls), η κινηματική, οι φάσεις μελέτης του φαινομένου, τα αίτια που ευνοούν την ενεργοποίηση του, οι γεωμετρικοί και μηχανικοί παράγοντες που ελέγχουν το φαινόμενο και τα μέτρα αντιμετώπισής του. Ακόμη, διευκρινίζεται η έννοια της επιδεκτικότητας (susceptibility) μέσω ορισμών από τη διεθνή βιβλιογραφία καθώς πολλές φορές παρατηρείται σύγχυση όταν συνοδεύεται από αυτές της επικινδυνότητας (hazard), της τρωτότητας (vulnerability) και της διακινδύνευσης (risk). Παρουσιάζονται επίσης, τρόποι και μέθοδοι ποιοτικής και ποσοτικής προσέγγισης της επιδεκτικότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων καθώς σε αυτό το κομμάτι συμβάλουν τα αποτελέσματα που εξάγονται από την παρούσα εργασία.

Το φαινόμενο των βραχοκαταπτώσεων είναι ένας από τους κυρίαρχους φυσικούς κινδύνους, κυρίως σε ορεινές περιοχές, για τα οδικά ή σιδηροδρομικά δίκτυα αλλά και για τους οικισμούς. Ο οικονομικός αντίκτυπος των βραχοκαταπτώσεων μπορεί να μην είναι τόσο εντυπωσιακός συγκριτικά με άλλες αστοχίες που μπορούν να αποκλείσουν δίκτυα και οικισμούς για περιόδους πολλών μηνών, ωστόσο σύμφωνα με τον Hoek (2006), οι θάνατοι λόγω βραχοκαταπτώσεων είναι της ιδίας τάξης μεγέθους με αυτούς που οφείλονται σε όλες τις άλλες αστοχίες πρανών συνολικά. Εν τούτοις, κρίνεται επιβεβλημένη η ποσοτικοποίηση της επιδεκτικότητας σε τέτοιου είδους περιοχές. Επιπρόσθετα, η τεχνολογία του LiDAR αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο στα χέρια των ερευνητών με στόχο τη βελτιστοποίηση αυτών των προσεγγίσεων.

2.2 Βραχοκατάπτωση (rockfall)

Ως βραχοκατάπτωση (rockfall) ορίζεται, κατά τον Varnes (1978), η αποκόλληση οποιουδήποτε μεγέθους βραχώδους τεμάχους από ένα απότομο φυσικό ή τεχνητό πρανές, κατά μήκος μίας επιφάνειας στην οποία αναπτύσσεται ελάχιστη ή μηδενική διατμητική αντοχή, και κατέρχεται λόγω βαρύτητας υπό μορφή ελεύθερης πτώσης, αναπήδησης ή κύλισης. Το φαινόμενο εξελίσσεται ραγδαία και σε πολλές περιπτώσεις δεν παρατηρούνται πρόδρομες μετακινήσεις μικρότερης δυναμικής. Κατά τον Hoek (2006), η αιτία πρόκλησης ενός βραχοκαταπτωτικού γεγονότος είναι κάποιος βιολογικός ή κλιματικός παράγοντας ο οποίος επιφέρει μεταβολές στο εντατικό πεδίο που επιδρά στον βράχο. Η αύξηση της πίεσης των πόρων (pore pressure) έπειτα από έντονη βροχόπτωση, η απόπλυση του συγκολλητικού υλικού των ασυνεχειών λόγω βροχής,

η χημική αποσάθρωση (weathering) της βραχομάζας και η ανάπτυξη ριζικού συστήματος αποτελούν τέτοιους παράγοντες. Επιπλέον, σε ένα περιβάλλον όπου συντελείται κατασκευαστική/τεχνική δραστηριότητα είναι κατά πολύ ευνοϊκότερες οι συνθήκες ως προς την εκδήλωση βραχοκατάπτωσης, λόγω της έντονης διατάραξης που επιφέρουν οι εργασίες στο εντατικό πεδίο της περιοχής.



Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Εικόνα 2.1 Σκαριφηματική απεικόνιση τυπικής βραχοκατάπτωσης (Πηγή: <u>www.quora.com</u>) (Από: Rohit Kumar, 2017)



Εικόνα 2.2 Βραχοκατάπτωση σε οδικό δίκτυο του εθνικού δρυμού Yosemite στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α. (Πηγή: The Los Angeles Times)

Οι Hungr, Leroueil and Picarelli (2014) αναφέρουν ακόμη, ότι κατά το παρελθόν έχουν γίνει προσπάθειες από μερικούς ερευνητές ώστε να οριστεί η βραχοκατάπτωση σύμφωνα με κάποια τιμή μέγιστου όγκου την οποία θα έπρεπε να ξεπερνάει (προτάθηκαν από τον Whalley το 1984 τα 10000 m³). Ωστόσο αποδείχθηκε πως ήταν πολύ δύσκολο να καθοριστεί ένα τέτοιο όριο.

Σχετικά με την εξέλιξη του φαινομένου, από την στιγμή που θα δραστηριοποιηθεί η κινητικότητα σε ένα πρανές, ο κύριος παράγοντας που ελέγχει την τροχιά που θα διαγράψει το πίπτον τέμαχος δεν είναι άλλος από την κλίση του ίδιου του πρανούς. Επίσης, ο βαθμός αποσάθρωσης και τα επίπεδα ανάπτυξης βλάστησης στην επιφάνεια του πρανούς συνεισφέρουν κι αυτά στον καθορισμό της τροχιάς του τεμάχους. Οι πλαγιές με ανεπτυγμένη χλωρίδα ή/και εδαφικά υλικά περιορίζουν την ταχύτητα που αναπτύσσει το προϊόν της βραχοκτάπτωσης. Τέλος, μικρότερη επίδραση στον καθορισμό της τροχιάς έχουν το μέγεθος και το σχήμα του τεμάχους καθώς και το αν αυτό θα διαμελιστεί σε επιμέρους τεμάχη κατά την πορεία του (Hoek, 2006).

Για τη μελέτη του φαινομένου των βραχοκαταπτώσεων είναι απαραίτητο πραγματοποιηθούν τρείς (3) φάσεις εργασιών:

- > Ο καθορισμός των αιτιών που το προκαλούν
- Η πρόβλεψη της τροχιάς που θα διαγράψουν τα αποσπώμενα τεμάχη
- Ο σχεδιασμός των κατάλληλων μέτρων αντιστήριξης

Έτσι λοιπόν, περιγράφονται στη συνέχεια τα αίτια και οι προϋποθέσεις που οδηγούν στην εκδήλωση το φαινομένου, γενικά στοιχεία της τροχιάς καθώς και των μέτρων αντιστήριξης που συνηθίζεται να εφαρμόζονται σε περιοχές όπου συμβαίνουν καταπτώσεις βράχων.

2.2.1 Τα αίτια των βραχοκαταπτώσεων

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Βασική προϋπόθεση για να συντελεστεί ένα βραχοκταπτωτικό γεγονός είναι να διασπαστεί ένα τέμαχος βράχου από την υπόλοιπη βραχομάζα και να υπάρχει η δυνατότητα να μετακινηθεί προς χαμηλότερες υψομετρικά θέσεις. Το αν κάποιο τέμαχος θα αποσπαστεί, ελέγχεται πρωτίστως από το καθεστώς των επιφανειών των ασυνεχειών που διέπουν τη βραχομάζα και δευτερευόντως από τα ποιοτικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του άρρηκτου πετρώματος. Επιπρόσθετα, η δυνατότητα μετακίνησης του εκάστοτε τεμάχους, ελέγχεται μόνο από το ανάγλυφο της περιοχής.

Η ορυκτολογική σύσταση ενός πετρώματος είναι αυτή που ελέγχει τόσο την αντοχή της αρρήκτου φάσης, όσο και την επιδεκτικότητά του στην αποσάθρωση σύμφωνα με την σειρά Bowen. Όπως προαναφέρθηκε όμως, τα χαρακτηριστικά του άρρηκτου πετρώματος δεν είναι αυτά που ελέγχουν το φαινόμενο της βραχοκατάπτωσης. Το φαινόμενο ελέγχεται σχεδόν εξ' ολοκλήρου από την γεωμετρία του πρανούς σε συνάρτηση με τη γεωμετρία των ασυνεχειών και την κατάστασή τους, ως αμιγώς ανισότροπη αστοχία. Οι παράμετροι που καθορίζουν την κατάσταση των ασυνεχειών είναι: ο προσανατολισμός τους σε σχέση με το πρανές, η απόσταση μεταξύ των επιφανειών της εκάστοτε οικογένειας (spacing), η εμμονή (persistence), η τραχύτητα (roughness), η διατμητική αντοχή (shear strength) της επιφάνειας, το άνοιγμα (aperture) και το υλικό πλήρωσης (filling material) (N. Barton & Choubey, 1977).



Εικόνα 2.3 Οι παράμετροι/χαρακτηριστικά που ορίζουν την κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών (Πηγή: Hudson, 1989)

Συνεπώς, για να δύναται να συμβεί βραχοκατάπτωση πρέπει να ικανοποιείται ένας εκ των τριών ακόλουθων συνδυασμών προϋποθέσεων που περιγράφει έναν συγκεκριμένο μηχανισμό κινηματικής αστοχίας.



Plane Failure Wedge Failure Toppling Failure

Εικόνα 2.4 Οι κύριοι μηχανισμοί κινηματικής αστοχίας που οδηγούν σε βραχοκαταπτώσεις (Πηγή: <u>http://dipanalyst.com</u>)

<u>Επίπεδη ολίσθηση (Plane Failure)</u>: Αυτή η μορφή κινηματικής περιγράφει αστοχία που συντελείται κατά μήκος μίας επιφάνειας ασυνέχειας που έχει την ίδια διεύθυνση κλίσης (dip direction), $\pm 20^{\circ}$, με την διεύθυνση κλίσης του πρανούς. Πλην όμως, θα πρέπει και η γωνία κλίσης (dip) του πρανούς να υπερβαίνει τη γωνία κλίσης της επιφάνειας της ασυνέχειας, η οποία θα πρέπει και αυτή να υπερβαίνει τη γωνία τριβής (φ) που αναπτύσσεται στην επιφάνεια ολίσθησης (Εικόνα 2.5).

<u>Σφηνοειδής ολίσθηση (Wedge Failure)</u>: Περιγράφει την ολίσθηση κατά μήκος της τομής δύο επιφανειών ασυνεχειών, εφόσον αυτή έχει την ίδια διεύθυνση κλίσης (dip direction), $\pm 20^{\circ}$, με το πρανές. Επίσης, η όπως και για την επίπεδη ολίσθηση, η γωνία κλίσης (dip) του πρανούς πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την γωνία κλίσης της ακμής τομής των δύο ασυνεχειών και να υπερβαίνουν και οι δύο την γωνία τριβή αυτής της επιφάνειας. Ωστόσο, η ολίσθηση μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο κατά μήκος της ακμής τομής των δύο ασυνεχειών, όσο και κατά μήκος της επιφάνειας μίας εκ των δύο συμμετεχόντων ασυνεχειών (Εικόνα 2.6).

<u>Ανατροπή τεμάχους (Toppling Failure)</u>: Η ανατροπή τεμάχους δύναται να προκύψει όταν η επιφάνεια μιας σχεδόν κατακόρυφης ασυνέχειας (με γωνία κλίσης <70°) διαφέρει κατά 180°, με απόκλιση 20°, από το πρανές ως προς τη διεύθυνση κλίσης (dip direction). Η αποκόλληση του τεμάχους σε αυτόν τον μηχανισμό μπορεί να είναι είτε άμεση (direct topping) είτε εφελκυστική (flexural toppling) (Εικόνα 2.7).



Εικόνα 2.5 Στερεογραφική προβολή δυνητικής επίπεδης ολίσθησης. Προβολή πόλων (pole display)



Εικόνα 2.6 Στερεογραφική προβολή δυνητικής σφηνοειδούς ολίσθησης. Προβολή επιπέδων (dip display)



Εικόνα 2.7 Στερεογραφική προβολή δυνητικής ανατροπής τεμάχους. Προβολή πόλων (pole display)

Το αν τελικώς θα εκδηλωθεί η εκάστοτε δυνητική αστοχία που πληροί τις προαναφερθείσες γεωμετρικές απαιτήσεις, εξαρτάται από τον λόγο όλων των δυνάμεων που ευνοούν την αστοχία προς το σύνολο των δυνάμεων με διάνυσμα αντίθετο προς τη φορά κίνησης του τεμάχους. Ο λόγος αυτός ονομάζεται συντελεστής ασφάλειας (Safety Factor - SF) και η τιμή του είναι αυτή που καθορίζει τον σχεδιασμό των κατάλληλων μέτρων αντιστήριξης στη συνέχεια.

2.2.2 Γενικά στοιχεία της τροχιάς

Όταν ένα τέμαχος βράχου αποσπαστεί από την υπόλοιπη βραχομάζα, στα πρώτα στάδια της κίνησης και όσο βρίσκεται σε ελεύθερη πτώση, η κίνηση του εξαρτάται αποκλειστικά από την βαρύτητα. Συνεπώς, πρόκειται για μια κίνηση συνεχώς επιταχυνόμενη μέχρι την στιγμή που θα προσκρούσει στην επιφάνεια του πρανούς από τα ανώτερα τμήματα του οποίου αποκολλήθηκε. Η κρούση του τεμάχους με την επιφάνεια του πρανούς έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή της κίνησης από ελεύθερη πτώση σε αναπήδηση (bounce), κύλιση (roll), ολίσθηση ή σε νέα «ελεύθερη πτώση» έπειτα από αναπήδηση.

Ο Ritchie (1963) πρότεινε μια συσχέτιση της κίνησης με την γωνία κλίσης του πρανούς, η οποία παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 2.8. Η θεώρηση αυτή λέει ότι στα τμήματα όπου η κλίση είναι μικρότερη από 45° η κίνηση του τεμάχους θα έχει την μορφή κύλισης, στα τμήματα με κλίση μεταξύ 45°-60° η κίνηση προσομοιάζεται ως αναπήδηση και σε αυτά που οι κλίση ξεπερνάει τις 60° πραγματοποιείται «ελεύθερη πτώση».



Εικόνα 2.8 Σύνδεση της κλίσης του πρανούς με τον τύπο κίνησης αποσπώμενου βραχώδους τεμάχους (Πηγή: Ritchie, 1963)

Όμως, η εκτίμηση της τροχιάς απαιτεί μια πολυπαραγοντική προσέγγιση καθώς εκτός από την γεωμετρία του πρανούς, σημαντικό ρόλο παίζουν και άλλα χαρακτηριστικά τόσο της επιφάνειας του πρανούς όσο και του ίδιου του τεμάχους. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι: η αντοχή, η ελαστικότητα, η τραχύτητα, το μέγεθος και το σχήμα. Επίσης, πολύ σημαντικός είναι και ο ρόλος των συντελεστών κύλισης-ολίσθησης (μ₀) και αναπήδησης (Coefficient Of Restitution - COR). Οι συντελεστές αυτοί αποτελούν ξεχωριστό χαρακτηριστικό του εκάστοτε υλικού πάνω στο οποίο γίνεται η πρόσκρουση του τεμάχους και ο καθορισμός τους είναι μείζονος σημασίας για τους υπολογισμούς εκτίμησης της τροχιάς μέσα από μαθηματικά μοντέλα εξειδικευμένων λογισμικών. Στον Πίνακας 2.1 παρατίθενται εμπειρικές εκτιμήσεις των συντελεστών για διαφορετικά υλικά με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία.

Υλικό	Συντελεστής κύλισης- ολίσθησης (μ₀)	Συντελεστής αναπήδησης (COR)
Ασβεστόλιθος	0.40	0.85
Καλά συγκολλημένα κορήματα	0.55	0.60
Χαλαρά κορήματα	0.75	0.40
Μέτρια συγκολλημένα κορήματα με τεμάχη βράχου	0.60	0.55
Μαλακά κορήματα με τεμάχη βράχου	0.60	0.45
Λάσπη	0.85	< 0.20
Τεχνητές επιχώσεις	0.60	0.50-0.65

Πίνακας 2.1 Ενδεικτικές τιμές των συντελεστών κύλισης-ολίσθησης (μ_o) και αναπήδησης (COR) για διαφορετικά γεω-υλικά (Πηγή: Azzoni and de Freitas, 1995)

2.2.3 Μέτρα αντιμετώπισης-αντιστήριζης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ϜʹϽϭϷϫϚͳ

Τα μέτρα αντιμετώπισης-αντιστήριξης βραχοκαταπτώσεων διακρίνονται σε δύο (2) κατηγορίες ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους. Οι κατηγοριοποίηση γίνεται ανάμεσα σε ενεργητικά και παθητικά μέτρα. Τα ενεργητικά μέτρα είναι αυτά τα οποία εφαρμόζουν αντίθετου διανύσματος τάση στο επισφαλές τέμαχος και δεν του επιτρέπουν να αναπτύξει κινητική ενέργεια και κατά συνέπεια να εκδηλωθεί το φαινόμενο ή μειώνουν τις ήδη υπάρχουσες δυσμενείς τάσεις. Αντίθετα, τα παθητικά μέτρα επιτρέπουν στο φαινόμενο να εκδηλωθεί, όμως είναι σχεδιασμένα κατάλληλα ώστε να συλλέγουν τα αποκολλημένα τεμάχη ή να περιορίζουν την ενέργειά τους πριν αυτά γίνουν απειλητικά για οποιοδήποτε υφιστάμενο τεχνικό έργο, οικισμό, ανθρώπινη ζωή. Τέλος, ειδική περίπτωση που υπάγεται στα ενεργητικά μέτρα αποτελούν οι εργασίες μεταβολής της γεωμετρίας των πρανών. Κι αυτό διότι δεν επιβάλλουν κάποια αντίθετης διεύθυνσης τάση ούτε απομειώνουν ήδη υπάρχουσες. Αυτό που κάνουν είναι να μην επιτρέπουν την ικανοποίηση των γεωμετρικών απαιτήσεων, που αναλύθηκαν στην παράγραφο 2.2.1, που αποτελούν προϋπόθεση για την εκδήλωση του φαινομένου.

Παρακάτω διαχωρίζονται τα ενεργητικά και τα παθητικά μέτρα και παρουσιάζεται ενδεικτικό φωτογραφικό υλικό.

Ενεργητικά μέτρα αντιμετώπισης-αντιστήριξης:

- Εφαρμογή εκτοξευμένου σκυροδέματος
- Διαμόρφωση ευνοϊκότερης γεωμετρίας πρανούς
- Καθαίρεση επισφαλών τεμαχών
- Αποστραγγιστικά έργα (οπές, τάφροι)
- Αγκυρώσεις
- Αγκυρωμένα μεταλλικά πλέγματα

Παθητικά μέτρα αντιμετώπισης-αντιστήριξης:

- Μεταλλικά πλέγματα
- Φράχτες ανάσχεσης (geobrugg)
- Βραχοπαγίδες
- Οπλισμένα επιχώματα
- > Στέγαστρα



Εικόνα 2.9 Ενεματωμένο αγκύριο σε βράχο, που συγκρατεί καλώδια (Πηγή: Hoek, 2006)



Εικόνα 2.10 Φράχτης ανάσχεσης (τύπου geobrugg) σε λειτουργεία αναχαίτισης βραχοκατάπτωσης (Πηγή: Hoek, 2006)

2.3 Επιδεκτικότητα (susceptibility)

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Με τον όρο επιδεκτικότητα για κατολισθήσεις, σύμφωνα με τους Reichenbach *et al.* (2018), περιγράφεται η χωρική πιθανότητα να εκδηλωθεί κάποια αστοχία πρανούς για δεδομένες τοπικές συνθήκες. Τις συνθήκες αυτές αντιπροσωπεύει ένας συνδυασμός γεωλογικών, τεχνικογεωλογικών, γεωτεχνικών και περιβαλλοντικών παραγόντων ελέγχου του φαινομένου. Είναι δηλαδή η πρόβλεψη της τοποθεσίας στην οποία πρόκειται να λάβει χώρα το γεγονός και υπολογίζει τον βαθμό κατά τον οποίο θα επηρεαστεί μια περιοχή από ενδεχόμενες μετακινήσεις.

Η άποψη αυτή υποστηρίζει ότι η έννοια της επιδεκτικότητας δεν λαμβάνει υπόψη της τις διαστάσεις, το εμβαδόν ή τον όγκο της αστοχούσας μάζας, αλλά μπορεί να συσχετίσει, σε όρους επιδεκτικότητας, διαφορετικών μεγεθών και τύπων αστογίες. Επιπλέον, σύμφωνα με αυτή την μέγεθος/όγκος της κατολίσθησης ή των τεμαχών είναι παράγοντας άποψη, το συμπεριλαμβανόμενος στην επικινδυνότητα (hazard). Ωστόσο, οι Fell et al. (2008), αναφέρουν ότι στη διαδικασία εκτίμησης της επιδεκτικότητας έναντι κατολισθήσεων για μια περιοχή πρέπει να γίνεται διαχωρισμός της επιδεκτικότητας για τους διαφορετικούς τύπους κατολισθήσεων και να προετοιμάζονται ξεγωριστοί χάρτες για τον καθένα τους. Επίσης, υποστηρίζουν ότι η εκτίμηση της επιδεκτικότητας μπορεί να περιλαμβάνει πληροφορίες όπως η τροχιά και ο όγκος της κατολισθήσας μάζας ή τεμαγών και οι πληροφορίες αυτές δεν αποτελούν παράγοντες αμιγώς συνυφασμένους με την έννοια της επικινδυνότητας (hazard). Όμως, και οι δύο απόψεις (Fell et al., 2008; Reichenbach et al., 2018) συμφωνούν πως ο όρος της επιδεκτικότητας δεν συνδέεται ούτε με το χρονικό πλαίσιο της εκδήλωσης του φαινομένου, ούτε με την συχνότητα εκδήλωσής του και πως η επιδεκτικότητα (susceptibility) αποτελεί ένα συστατικό στη διαδικασία εκτίμησης της επικινδυνότητας (hazard).

Οι μέθοδοι προσέγγισης της επιδεκτικότητας μπορεί να οδηγούν, έμμεσα ή άμεσα, σε ποιοτικές ή ποσοτικές εκτιμήσεις. Οι ποιοτικές προσεγγίσεις (qualitative approach) ενέχουν τον παράγοντα της υποκειμενικότητας και εκφράζουν την επιδεκτικότητα με περιγραφικό τρόπο. Αντίθετα, οι ποσοτικές προσεγγίσεις (quantitative approach) παρέχουν την μαθηματική πιθανότητα εκδήλωσης κατολισθητικού φαινομένου που προκύπτει από αριθμητικά μοντέλα. Όλες οι μέθοδοι προσέγγισης που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα για την κατολισθητική επιδεκτικότητα συνοψίζονται στις εξής πέντε (5) κατηγορίες:

- i. Γεωμορφολογικής αποτύπωσης
- ii. Ανάλυσης των ιστορικών καταγραφών του φαινομένου (inventory)
- iii. Ερμηνείας συγκεκριμένων δεικτών
- iv. Προσομοίωσης του μηχανισμού και της διαδικασίας ή ντετερμινιστικές (deterministic)
- v. Στατιστικές ή πιθανολογικές (probabilistic)

Για την εκτίμηση και την προσομοίωση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας μιας περιοχής είναι απαραίτητο να προκαθοριστεί μια χαρτογραφική μονάδα (terrain/mapping unit). Η μονάδα αυτή, ή ομάδες αυτών, θα αντιπροσωπεύει έναν τμήμα της περιοχής που θα χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο παραγόντων που ελέγχουν το φαινόμενο, οι οποίοι θα διαφέρουν μεταξύ των διαφορετικών χαρτογραφικών μονάδων με σαφή όρια. Τέτοιες χαρτογραφικές μονάδες μπορεί να είναι τα εικονοστοιχεία (pixels) μια φωτογραφίας ή τα σημεία (points) ενός νέφους σημείων (point cloud) (Reichenbach et al., 2018).

2.3.1 Ζωνοποίηση κατολισθητικής επιδεκτικότητας (landslide susceptibility zoning)

Όπως προαναφέρθηκε, η ζωνοποίηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας είναι ο συνδυασμός της χωρικής κατανομής και των τιμών των επιμέρους χαρτογραφικών μονάδων. Οι χαρτογραφικές μονάδες λαμβάνουν τιμές σύμφωνα με την δυνατότητα, της περιοχής που εκπροσωπούν, να παράγει κατολίσθηση και είναι άμεσα εξαρτημένες από παράγοντες όπως η τοπογραφία, η γεωλογία, τα τεχνικογεωλογικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, το κλίμα, η βλάστηση και η ανθρώπινη δραστηριότητα. Πρέπει να συναξιολογούνται οι παραπάνω παράγοντες για ολόκληρη την περιοχή μελέτης καθώς και για περιοχές που βρίσκονται εκτός αυτής αλλά μπορούν να την επηρεάσουν.

Στους επιμέρους πρώιμους θεματικούς χάρτες για κάθε παράμετρο που ελέγχει το φαινόμενο, ο ερευνητής οφείλει να επιλέξει όλους αυτούς τους κρίσιμους για την ευστάθεια παράγοντες και να αποδώσει σε έκαστον κάποιο συντελεστή βαρύτητας που πιθανώς να εκφράζεται αναλογικά της συνολικής συγκέντρωσης στην περιοχή. Πρέπει λοιπόν να διεξαχθούν οι παρακάτω ενέργειες:

- Υποδιαίρεση κάθε παραμέτρου σε σχετικές κλάσεις
- Απόδοση συντελεστή βαρύτητας σε κάθε κλάση

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη ΕΟδΡΔΣΤ

- Απόδοση συντελεστή βαρύτητας για κάθε θεματικό χάρτη παραμέτρων
- Επικάλυψη των επιμέρους πρώιμων θεματικών χαρτών και υπολογισμός του αποτελέσματος (σκορ) για κάθε χαρτογραφική μονάδα
- Κατάταξη των αποτελεσμάτων σε κλάσεις επιδεκτικότητας (πχ. υψηλή, μέτρια, χαμηλή)

Ωστόσο, μπορεί να επιτευχθεί και πιο απόλυτη προσέγγιση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας μέσα από ντετερμινιστικές μεθόδους όπως είναι οι αναλύσεις ευστάθειας πρανών, οι οποίες προϋποθέτουν την εισαγωγή παραμέτρων γεωμετρίας, αντοχής και καθεστώτος υπόγειου νερού. Σε αυτή την περίπτωση, ο Συντελεστής Ασφάλειας αποτελεί τον απόλυτο δείκτη της επιδεκτικότητας για τις υφιστάμενες συνθήκες και η τιμή του μπορεί να ταξινομηθεί στις επιμέρους κλάσεις επιδεκτικότητας (Fell et al., 2008).

2.3.2 Χρησιμότητα στον σχεδιασμό χρήσης γης

Σύμφωνα με τους Fell *et al.* (2008) δίνονται οι εξής πέντε (5) κατηγορίες όπου η εκτίμηση και ζωνοποίηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας είναι χρήσιμη να τον σχεδιασμό της χρήσης γης:

- Σε περιοχές όπου υπάρχει ιστορικό εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων.
 Αυτή η κατηγορία αποτελεί τον πιο συχνό λόγο για την διεξαγωγή εργασιών εκτίμησης και ζωνοποίησης της κατολισθητικής επιδεκτικότητας.
- Σε περιοχές όπου δεν υπάρχει ιστορικό αλλά η τοπογραφία υποδεικνύει δυνητικές αστάθειες.

Τέτοιες περιοχές είναι ως επί το πλείστον αυτές που χαρακτηρίζονται από απότομα πρανή.

 Σε περιοχές που δεν υπάρχει ιστορικό αλλά οι γεωλογικοί και γεωμορφολογικοί παράγοντες υποδεικνύουν πιθανές αστάθειες. Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται περιοχές για τις οποίες δεν είναι ικανοποιητικά γνωστές οι υφιστάμενες συνθήκες, όμως, είναι γνωστό ότι στην ευρύτερη περιοχή με τα παρόμοια χαρακτηριστικά έχουν σημειωθεί κατολισθητικά γεγονότα.

- iv. Σε περιοχές όπου υπάρχει έντονη κατασκευαστική δραστηριότητα η οποία λειτουργεί ανασταλτικά στις συνθήκες ευστάθειας.
- Σε περιοχές όπου πραγματοποιούνται δασικές εργασίες και αποψιλώσεις.
 Οι επεμβάσεις αυτές ζημιώνουν το περιβάλλον και επηρεάζουν τον παράγοντα του νερού που είναι καθοριστικός για την ευστάθεια.

Η τελευταία κατηγορία είναι επί της ουσίας ανεξάρτητη και δίνει έμφαση στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

2.3.3 Κλίμακες ζωνοποίησης της κατολισθητικής επιδεκτικότητας

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

σρασ

Η επιλογή της κλίμακας στην οποία πρέπει και μπορεί να πραγματοποιηθεί η ζωνοποίηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας μιας περιοχής καθορίζεται σύμφωνα με τις τέσσερις (4) συνθήκες (Fell et al., 2008) που παρουσιάζονται παρακάτω:

- i. Τα δεδομένα εισαγωγής που θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της επιδεκτικότητας πρέπει να ικανοποιούν συγκεκριμένη ανάλυση (resolution) και ποιότητα. Δηλαδή, τα δεδομένα εισαγωγής θα πρέπει να είναι μεγαλύτερης κλίμακας απ' ότι ο χάρτης. Δεν μπορεί να υπάρξει ουσιώδης ζωνοποίηση αν ο χάρτης επιδεκτικότητας είναι σε κλίμακα 1:5000 και τα δεδομένα στα οποία στηρίχτηκε η κατασκευή του προέρχονται από κάποια πηγή πληροφορίας κλίμακας 1:25000.
- Οι μεγάλης κλίμακας χάρτες θα πρέπει να συνοδεύονται από δεδομένα αρκετά μεγαλύτερης λεπτομέρειας καθώς και από την σαφή κατανόηση των διεργασιών και μηχανισμών που δρουν στο πρανές.
- iii. Στους μικρής, μέσης, ακόμη και μεγάλης κλίμακας χάρτες μπορεί να αποτυπωθεί περιορισμένη λεπτομέρεια. Γι αυτό και πολλοί ερευνητές προτείνουν να γίνεται πολύ λεπτομερείς και σε μεγάλη κλίμακα αποτύπωση, όμως από την άλλη μεριά, αρκετοί υποστηρίζουν ότι πρέπει οι εκτιμήσεις να γίνονται σε κλίμακα δήμου, επαρχίας, πόλης ή κράτους ώστε να είναι εύκολα διαχειρίσιμοι και αξιοποιήσιμοι.
- iv. Η χρησιμότητα και αντιπροσωπευτικότητα των χαρτών μικρής κλίμακας αποτελεί για πολλούς ερωτηματικό.

2.3.4 Μέθοδοι ζωνοποίησης της κατολισθητικής επιδεκτικότητας

Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να τονιστεί και να γίνει κατανοητό ότι η ζωνοποίηση της κατολισθητικής επιδεκτικότητας είναι μια πολυπαραγοντική άσκηση. Αυτό έχει ως συνέπεια, όταν διεξάγεται από ανθρώπους που δεν έχουν την απαιτούμενη γνώση και βασίζονται σε ελλιπείς τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές έρευνες, να είναι σχεδόν βέβαιο πως θα είναι ανακριβής και εντελώς ανεπαρκής.

Αφού λοιπόν εξασφαλιστεί η επάρκεια των τεχνικογεωλογικών και γεωτεχνικών στοιχείων καθώς και η γνώση για την ουσιαστική ερμηνεία τους, τότε μπορεί να αναπτυχθεί μια σειρά από μεθόδους ώστε να πραγματοποιηθεί η ζωνοποίηση και να εξαχθούν οι κατάλληλοι χάρτες. Τα τελευταία χρόνια είναι πολύ διαδεδομένη και αποτελεσματική η αξιοποίηση τεχνικών και μεθόδων βασισμένων στα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS). Τα GIS μπορούν να εκμαιεύσουν σημαντικές πληροφορίες από τα Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (DEM), στις οποίες μπορεί να στηριχθεί η διαδικασία ζωνοποίησης της κατολισθητικής επιδεκτικότητας μιας περιοχής.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Ακόμη, αυτό που αποτελεί το βασικό εργαλείο της διαδικασίας που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.3.1 είναι η δυνατότητα που έχουν τα μοντέλα GIS να συνδυάζουν και να συγκρίνουν τους πρώιμους χάρτες εισαγωγής μεταξύ τους αλλα και με άλλους παράγοντες. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μία συνάρτηση με βάση την οποία παράγεται ο τελικός χάρτης εκτίμησης της κατολισθητικής επιδεκτικότητας (landslide susceptibility map). Η συνάρτηση που θα χρησιμοποιηθεί είναι στην διακριτική ευχέρεια του ερευνητή-χρήστη και μπορεί να περιέχει οποιαδήποτε μαθηματική έκφραση ή συνδυασμούς.

Οι μέθοδοι προσέγγισης που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν τόσο ποιοτικές όσο και ποσοτικές προσομοιώσεις και τεχνικές (Fell et al., 2008), δύο (2) από τις οποίες παρουσιάζονται παρακάτω:

Πιθανολογική προσέγγιση (probabilistic approach): Η πιθανολογική προσέγγιση είναι μια στατιστικά εξαρτώμενη διαδικασία και βασική αρχή της λειτουργείας της είναι ο εντοπισμός των σχέσεων συσχέτισης μεταξύ των παραγόντων που ελέγχουν το φαινόμενο των κατολισθήσεων και των καταγεγραμμένων κατολισθητικών γεγονότων. Κατά συνέπεια, αυτού του είδους η προσέγγιση περιλαμβάνει την αποτύπωση των προϋπαρχουσών εκδηλώσεων του φαινομένου, των παραγόντων που ελέγχουν το του είδους η προσέγγιση περιλαμβάνει την αποτύπωση των προϋπαρχουσών εκδηλώσεων του φαινομένου, των παραγόντων που ελέγχουν την ευστάθεια και τον καθορισμό στατιστικών συσχετίσεων μεταξύ αυτών και της εκδήλωσης της αστοχίας. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μεγάλου βαθμού αντικειμενικότητα στις τελικές εκτιμήσεις της επιδεκτικότητας καθώς οι εμπλεκόμενοι παράγοντες και οι μεταξύ τους σχέσεις ελέγχονται στατιστικά.

Διάφορες μέθοδοι υπάρχουν για τον καθορισμό των κανόνων των μεταβλητών και των μεταξύ τους σχέσεων. Τέτοιες μέθοδοι είναι η διμερής (bi-variate) και η πολυπαραγοντική (multi-variate) ανάλυση καθώς και τα νευραλγικά δίκτυα (neural networks).

Ντετερμινιστική προσέγγιση (deterministic approach): Η αρχή λειτουργείας της συγκεκριμένης προσέγγισης είναι η κλασσική ανάλυση ευστάθειας πρανών και οι μέθοδοι της οριακής ισορροπίας και των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method). Απαραίτητοι παράμετροι για την εφαρμογή της ντετερμινιστικής προσέγγισης είναι οι παράμετροι γεωμετρίας και αντοχής των εδαφικών ή βραχωδών σχηματισμών και το καθεστώς του υπόγειου νερού. Το τελικό αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι ο μέσος Συντελεστής Ασφάλειας (Safety Factor) και τα χωρικά όρια για τα οποία η τιμή του κυμαίνεται εντός συγκεκριμένου εύρους (πχ. ασταθές < 1.0, οριακά ευσταθές 1.0 – 1.1 κ.ο.κ).

Η παραγωγή χαρτών κατολισθητικής επιδεκτικότητας με αυτή τη μέθοδο προϋποθέτει ξεχωριστούς θεματικούς χάρτες με την χωρική κατανομή των δεδομένων εισαγωγής. Κάποια από τα δεδομένα εισαγωγής μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε επόμενο στάδιο (hazard assessment) για την εκτίμηση της χρονικής πιθανότητας της αστοχίας λαμβάνοντας υπόψη την περίοδο επανάληψής τους.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ο σράς

Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η υπεραπλούστευση της γεωλογικής, τεχνικογεωλογικής και γεωτεχνικής πληροφορίας, η οποία στην πραγματικότητα είναι πολύ πιο πολύπλοκη και ποικιλοτρόπως μεταβαλλόμενη, καθώς και η πρόβλεψη των πιέσεων του νερού και το πώς αυτές επηρεάζονται από τη βροχή και την τήξη του χιονιού.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται μερικές ερευνητικές εργασίες που αποφέρουν στοιχεία τοπογραφίας, γεωμετρίας, γεωμορφολογίας και γεωλογίας με βάση τα οποία μπορεί να γίνει ο χαρακτηρισμός και η εκτίμηση της χωρικής κατανομής των πιθανών κατολισθητικών φαινομένων και συγκεκριμένα των βραχοκαταπτώσεων (rock falls) που αποτελούν αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 2.2 Τα επίπεδα χαρακτηρισμού και οι εργασίες που περιλαμβάνουν ώστε να εξαχθούν τα απαραίτητα δεδομένα για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων (Τροποποιημένο από: Fell *et al.*, 2008)

Επίπεδο χαρακτηρισμού	Ερευνητική εργασία
Βασικό (Basic)	Χαρτογράφηση ιστορικών βραχοκαταπτώσεων και καταγραφή του αριθμού, της χωρικής κατανομής, και του
	όγκου των τεμαχών κατάντι της πηγής
	Συσχέτιση της ύπαρξης βραχοκαταπτώσεων με τις αποθέσεις στον πόδα του πρανούς
Mέσo (Intermediate)	Οι ίδιες εργασίες με το Βασικό επίπεδο συν
	Χαρτογράφηση χαρακτηριστικών γεωμορφών (ρωγμές, μερικώς αποκολλημένα τεμάχη)
	Ανάπτυξη σχέσεων συχνότητας – μεγέθους από τα ιστορικά δεδομένα
	Συσχέτιση της βραχοκαταπτωτικής δραστηριότητας με την αντοχή της βραχομάζας
	Προετοιμασία νέων σχέσεων συχνότητας – μεγέθους για κατολισθήσεις
Εξειδικευμένο (Advanced)	Οι ίδιες εργασίες με το Μέσο επίπεδο συν
	Αναλυτική χαρτογράφηση της γεωλογικής δομής (πχ. με τη χρήση σαρωτών laser) και χρησιμοποίηση της για την ανάλυση ευστάθειας έναντι επίπεδων ολισθήσεων, σφηνών και ανατροπών

Σύμφωνα με τον Πίνακας 2.2, η μέθοδος που χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη εργασία έγκειται στο εξειδικευμένο (Advanced) επίπεδο ερευνητικών εργασιών για την απόκτηση των απαραίτητων δεδομένων εισαγωγής στα μοντέλα εκτίμησης της επιδεκτικότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων.

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Η ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ιήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η γεωλογία της ευρύτερης περιοχής στην οποία υπάγεται η νήσος της Θήρας. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται το ελληνικό ηφαιστειακό τόξο και η εξέλιξή του, το προηφαιστειακό αλπικό υπόβαθρο της συγκεκριμένης γεωτεκτονικής ζώνης, η νεότερη ηφαιστειακή δραστηριότητα με τα αντίστοιχα ιζήματα καθώς και στοιχεία σεισμικότητας και κλιματικών συνθηκών.

Αναφέρονται γενικά στοιχεία της γεωτεκτονικής εξέλιξης και των γεωλογικών συνθηκών της Αττικοκυκλαδικής ζώνης, στην οποία ανήκει η Θήρα, και εστιάζεται στις γεωλογικές δομές που συναντώνται στο νησί και συγκεκριμένα στην περιοχή μελέτης.

Η νήσος Θήρα μαζί με τις νήσους Θηρασία, Ασπρονήσι, Παλαιά και Νέα Καμένη συνθέτουν το νησιωτικό σύμπλεγμα της Σαντορίνης (Εικόνα 3.1) που αποτελείται από πέντε νησιά συνολικής έκτασης 75,8 km². Η Σαντορίνη αποτελεί μέρος του ευρύτερου συμπλέγματος των Κυκλάδων που βρίσκονται στο Αιγαίο Πέλαγος. Έχει γίνει αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας εξαιτίας του ενδιαφέροντος που υπάρχει για την παροξυσμική ηφαιστειακή της δραστηριότητα, που σύμφωνα με κάποιους είχε δραματική επίδραση στον Μινωικό πολιτισμό. Απόρροια του ενδιαφέροντος που υπάρχει για τη λεπτομερής γεωλογική, πετρολογική και ηφαιστειολογική πληροφορία που υπάρχει γύρω από αυτόν τον τόπο (Dominey-Howes & Minos-Minopoulos, 2004).

3.2 Ελληνικό ηφαιστειακό τόξο

Το ελληνικό τόξο αποτελεί την πιο αξιοσημείωτη τεκτονική δομή του Αιγαίου Πελάγους και συγκεκριμένα του νοτίου Αιγαίου. Αποτελείται από το εξωτερικό ιζηματογενές τόξο (forearc) Πελοπόννησος – Κύθηρα – Κρήτη – Κάρπαθος - Ρόδος και από το εσωτερικό ηφαιστειακό Μέθανα – Μήλος – Σαντορίνη - Νίσυρος - Κως. Η δημιουργία όλης της δομής του ελληνικού τόξου συνδέεται με την υποβύθιση της αφρικανικής πλάκας κάτω από την μικροπλάκα του Αιγαίου (Εικόνα 3.2) που σε συνδυασμό με μεταγενέστερα ρήγματα αποκόλλησης αποκάλυψαν πετρώματα υψηλής πίεσης και χαμηλής θερμοκρασίας (HP/LT), όπως αναλύεται στην συνέχεια (Marsellos et al., 2013).

Το σύμπλεγμα της Σαντορίνης και κατά συνέπεια η νήσος Θήρα, όπου ανήκει η περιοχή μελέτης αυτής της εργασίας, βρίσκεται στο πιο νότιο σημείο του ηφαιστειακού τόξου. Το μεταμορφωμένο υπόβαθρο της Σαντορίνης συνθέτουν κυρίως σχιστόλιθοι, μεταψαμμίτες και χαλαζίτες καθώς και μετακροκαλοπαγή, μάρμαρα, ανακρυσταλλωμένοι ασβεστόλιθοι και μεταηφαιστειακά υλικά.

Βιβλιοθήκη ͽϼϼϫ Στο νησί της Θήρας το υπόβαθρο εμφανίζεται πολύ περιορισμένα στην περιοχή της Περίσσας στο νότιο άκρο του νησιού, όπου βρίσκεται και ο ασβεστόλιθος που μελετάται, και στην περιοχή του όρμου του Αθινιού (Marsellos et al., 2013).

Ψηφιακή συλλογή



Εικόνα 3.1 Χάρτης της Σαντορίνης (Πηγή: Antoniou and Lekkas, 2010)



Εικόνα 3.2 Τυπικό μοντέλο δημιουργίας ηφαιστειακού τόξου (Πηγή: Papazachos et al., 2005)

Το ελληνικό ηφαιστειακό τόξο χαρακτηρίζεται από μια έντονη σεισμική και ηφαιστειακή δραστηριότητα που ξεκινάει από το Τριτογενές και εξελίσσεται μέχρι και σήμερα. Διάφορα ηφαιστειακά κέντρα υπάρχουν κατά μήκος του τόξου, ωστόσο, η Σαντορίνη αποτελεί το πιο ενεργό με την τελευταία έκρηξη να χρονολογείται το 1950. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα οφείλεται στην υποβύθιση που αναφέρθηκε προηγουμένως, η οποία έχει διεύθυνση προς BA με κλίση περίπου 13° και σύμφωνα με τους Huchon *et al.*, το 1982, ξεκίνησε 13 Myr πριν. Επίσης, η ζώνη Benioff του τόξου εκτιμάται ότι βρίσκεται σε βάθος 130 – 150 km. Όμως, από νεότερες έρευνες, η άποψη που υπάρχει είναι πως ξεκίνησε πριν από 26 Myr και φτάνει σε βάθος που ξεπερνάει τα 600 km (Perissoratis, 1995).

Είναι σαφής η διαφοροποίηση αυτού του νησιωτικού ηφαιστειακού τόξου με τα ευρέως γνωστά νησιωτικά τόξα του Ειρηνικού Ωκεανού καθώς εδώ και οι δύο τεκτονικές πλάκες που έρχονται σε σύγκρουση είναι ηπειρωτικές και το ηφαιστειακό τόξο είναι άμεσα συνδεδεμένο με το εξωτερικό ιζηματογενές τόξο. Ακόμη, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι δεν έχει βρεθεί καθόλου ωκεάνιος φλοιός στα νότια ή τα δυτικά του εξωτερικού ιζηματογενούς τόξο δεν είναι τόσο καλά ανεπτυγμένο σε σχέση με τα τόξα του Ειρηνικού Ωκεανού. Αυτές οι διαφοροποιήσεις είναι που οδήγησαν πολλούς ερευνητές να θεωρήσουν ότι ίσως δεν υπάρχει σαφής ζώνη Benioff κάτω από όλο το μήκος ανάπτυξης του τόξου, εκτός από το τμήμα που βρίσκεται μεταξύ Κρήτης και Πελοποννήσου (Perissoratis, 1995).

Το ελληνικό ηφαιστειακό τόξο περιλαμβάνει πολλά νησιά, μεταξύ των οποίων η Αμοργός, η Φολέγανδρος η Σίκινος, η Ίος και το σύμπλεγμα της Σαντορίνης με τη νήσο Θήρα. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί αυτών των νησιών είναι μεταμορφωμένα πετρώματα, ηφαιστειακά υλικά και Νεογενή–Τεταρτογενή ιζήματα (Perissoratis, 1995) (Εικόνα 3.3). Τα πετρώματα του υποβάθρου καθώς και τα νεότερα ηφαιστειακά θα αναλυθούν σε επόμενες παραγράφους, ωστόσο, εδώ γίνεται μια συνοπτική περιγραφή της φύσεώς τους.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Οι μεταμορφωμένοι σχηματισμοί ανήκουν στην Αττικοκυκλαδική γεωτεκτονική ζώνη της Ελλάδας και αποτελούνται από γνεύσιους, σχιστόλιθους, μάρμαρα και ασβεστόλιθους (ασβεστόλιθος μελέτης στην περιοχή της Περίσσας). Αυτοί οι σχηματισμοί συνθέτουν το μεγαλύτερο μέρος των νησιών Αμοργός, Ίος, Σίκινος και Φολέγανδρος. Στην Σαντορίνη εμφανίζονται πολύ τοπικά στα νότια του νησιού της Θήρας στη περιοχή του Προφήτη Ηλία καθώς και στα κατώτερα των πρανών της καλδέρας στην περιοχή του Αθινιού (Perissoratis, 1995).

Τα ηφαιστειακά πετρώματα που βρίσκονται στο νησιωτικό σύμπλεγμα της Σαντορίνης, είναι αυτά που κυριαρχούν σε εξάπλωση και αποτελούνται από τόφφους, κίσσηρη και βασάλτες του Ανώτερου Πλειόκαινου και Τεταρτογενούς (Perissoratis, 1995). Αναλυτικά παρουσιάζονται αργότερα οι διάφορες φάσεις απόθεσης ηφαιστειακών υλικών σε συνδυασμό με τις διαφορετικές φάσεις ηφαιστειακών εκρήξεων.



Εικόνα 3.3 Η τεκτονική δομή του ηφαιστειακού πεδίου της Σαντορίνης (Πηγή: Kilias et al., 2013)



Σύμφωνα με δεδομένα από έρευνα του Perissoratis το 1995, προκύπτει ότι το βάθος του θαλάσσιου πυθμένα στη συγκεκριμένη περιοχή είναι το πολύ 600 m και η ισοβαθής καμπύλη των 100 m βρίσκεται πολύ κοντά στις ακτές. Τα νησιά του ηφαιστειακού τόξου είναι συνδεδεμένα με υποθαλάσσιες ράχες που οριοθετούν υποθαλάσσιες λεκάνες. Τέτοιες ράχες είναι αυτές μεταξύ Σαντορίνης–Αμοργού και Σαντορίνης–Ιου που οριοθετούν τις λεκάνες Σαντορίνης–Ανάφης και της Ανύδρου (Εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.4 Βαθομετρικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής (Πηγή: Perissoratis, 1995)
Στην περιοχή του συμπλέγματος της Σαντορίνης, τα νησιά της Θήρας και Θηρασίας δημιουργούν έναν δακτύλιο περιμετρικά της βαθιάς καλδέρας του ηφαιστείου της Σαντορίνης. Στο κεντρικό τμήμα της καλδέρας υπάρχουν τα νησιά της Παλαιάς και Νέας Καμένης που είναι αποτέλεσμα των εκρήξεων που συνέβησαν στην ήδη διαμορφωθείσα, μέχρι τότε, καλδέρα. Τα τοιχώματα της καλδέρας παρουσιάζουν απότομες κλίσεις φτάνοντας σε έναν σχεδόν επίπεδο πυθμένα που βρίσκεται μεταξύ 300 και 400 m βάθος. Τα νησιά αυτά διαχωρίζουν την καλδέρα σε ένα βόρειο τμήμα βάθους περίπου 400 m και ένα νότιο με επιμέρους τμήματα με βάθη που ποικίλουν από 290 μέχρι 320 m.

Επιπρόσθετα, στα εξωτερικά της καλδέρας, σε απόσταση 7 km προς BA βρίσκεται το κωνικό ηφαίστειο Κολούμπο με τον υποθαλάσσιο κρατήρα του. Το Κολούμπο πιστεύεται ότι ευθύνεται για οποιαδήποτε ηφαιστειότητα παρατηρείται εξωτερικά της καλδέρας της Σαντορίνης μέχρι και την Μινωική έκρηξη του 1650.

Τέλος, στην περιοχή κυριαρχούν εφελκυστικά ρήγματα διεύθυνσης BA–NΔ που σχημάτισαν τις προαναφερθείσες υποθαλάσσιες λεκάνες Σαντορίνης–Ανάφης και Άνυδρου καθώς και την ράχη Σαντορίνης - Αμοργού . Τα ρήγματα αυτά αντικατέστησαν προηγούμενα ρήγματα διαφορετικής διεύθυνσης (A–Δ και B–N) που είχαν διαμορφώσει τις υποθαλάσσιες ράχες Σαντορίνης–Ανάφης και Σαντορίνης–Ίου (Perissoratis, 1995).

3.2.2 Η εξέλιξη του ηφαιστειακού τόξου

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Κατά το Άνω Μειόκαινο έλαβε χώρα το ξεκίνημα της υποβύθισης της αφρικανικής πλάκας και οι σχηματισμοί του νοτίου τμήματος των Κυκλάδων ανυψώθηκαν και διαβρώθηκαν. Την ίδια περίοδο, ένας οπισθοτόξιος εφελκυσμός διεύθυνσης Β–Ν συνέβαινε στην Κρητική τάφρο με αποτέλεσμα την δημιουργία ρηγμάτων διεύθυνσης Α–Δ που οδήγησαν στην δημιουργία λεκανών απόθεσης.

Λίγο αργότερα, κατά το Κάτω Πλειόκαινο, στην περιοχή του ηφαιστειακού τόξου άρχισε να δρα θραυσιγενής τεκτονική που έπληξε το Αλπικό υπόβαθρο. Αυτή η τεκτονική αποτυπώνεται στο υπόβαθρο από τα ευδιάκριτα Α-Δ κανονικά ρήγματα που διαμόρφωσαν τις δομές της γεωμορφολογίας που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Μέχρι το Ανώτερο Πλειόκαινο, δεν υπάρχει ένδειξη της σύντομης συμπιεστικής τεκτονικής που πολλοί ερευνητές υποστηρίζουν ότι έδρασε στην περιοχή αμέσως μετά την έκταση του Άνω Μειόκαινου. Έτσι, πιστεύεται ότι το καθεστώς των τάσεων δεν μεταβλήθηκε, ωστόσο άλλαξε η διεύθυνση των ρηγμάτων σε BA-NΔ με δημιουργία των υπολοίπων δομών της γεωμορφολογίας που αναφέρθηκε.

Συνεχιζόμενης της εφελκυστικής τεκτονικής και λέπτυνσης του φλοιού, έλαβε χώρα ηφαιστειακή δραστηριότητα στον σύμπλεγμα της Σαντορίνης που είχε ως αποτέλεσμα να δημιουργηθεί η «Γραμμή της Καμένης» κατά το Κάτω Πλειστόκαινο. Στη συνέχεια, η ηφαιστειότητα της Σαντορίνης με τη Μινωική έκρηξη στο Ολόκαινο δημιούργησε την καλδέρα, το Κολούμπο και τα νησιά Παλαιά και Νέα Καμένη στο εσωτερικό της καλδέρας με την σημερινή εικόνα (Perissoratis, 1995).

3.3 Αλπικό υπόβαθρο Σαντορίνης - Αττικοκυκλαδική ζώνη

Το υπόβαθρο του συμπλέγματος της Σαντορίνης ανήκει στην Αττικοκυκλαδική γεωτεκτονική ζώνη της Ελλάδας, η οποία περιλαμβάνει όλα τα νησιά των Κυκλάδων, την Ικαρία, τη Σάμο και μεγάλο τμήμα της Αττικής και Νότιας Εύβοιας. Αποτελεί μια ξεχωριστή ζώνη παρόλο που πολλοί επιστήμονες τη θεωρούν συνέχεια της Πελαγονικής ζώνης. Οι σχηματισμοί της Αττικοκυκλαδικής διαχωρίζονται με τεκτονικές επαφές από τη δράση τεκτονικής επωθήσεων τεκτονικών καλυμμάτων κατά την συμπίεση του Τριτογενούς και ετσι διακρίνονται διαφορετικές ενότητες εντός της ζώνης. Στη συνέχεια, ακολούθησε εφελκυστική δράση που αποκάλυψε τους σχηματισμούς των κατώτερων ενοτήτων υπό μορφή απομονωμένων μεταμορφωμένων πυρήνων (core complex), όπως συμβαίνει και στην περιοχή μελέτης όπου εμφανίζεται ο ασβεστόλιθος στην Περίσσα της Νότιας Θήρας. Έτσι, σήμερα στην περιοχή των Κυκλάδων και της Αττικής διακρίνονται οι εξής ενότητες:

Ενότητα Αττικής

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Ενότητα Βορείων Κυκλάδων
- Ενότητα Νοτίων Κυκλάδων

Στην περιοχή μελέτης και γενικότερα στο νησιωτικό σύμπλεγμα της Σαντορίνης συναντάται η ενότητα των Νοτίων Κυκλάδων που αναλύεται στη συνέχεια (Μουντράκης, 2010).

3.3.1 Ενότητα Νοτίων Κυκλάδων

Η λιθολογική σύσταση της ενότητας των Νοτίων Κυκλάδων (Εικόνα 3.5) συνίσταται από:

- Το μεταμορφωμένο υπόβαθρο, το οποίο συνθέτουν γνεύσιοι, αμφιβολίτες και σχιστόλιθοι.
 Τα πετρώματα αυτά χρονολογούνται στο Παλαιοζωικό και μοιάζουν πολύ με αυτά του αντίστοιχου υποβάθρου της Πελαγονικής ζώνης.
- Σχιστόλιθους σε εναλλαγές με μάρμαρα, ηλικίας Περμοτριαδικού, που αποτελούν ξεχωριστό ορίζοντα.
- Έναν παχύ ορίζοντα ανθρακικών πετρωμάτων μεταμορφωμένων ή ημιμεταμορφωμένων που χρονολογείται από το Άνω Τριαδικό μέχρι το Κάτω Κρητιδικό. Στον ορίζοντα αυτόν παρατηρούνται και κάποιες παρεμβολές σχιστολίθων
- Τριτογενή μεταφλύσχη.

Συγκεκριμένα, στην περιοχή της Θήρας, παρατηρείται τμήμα του υποβάθρου στο νότιο μέρος του νησιού σε δύο σημεία καθώς το υπόλοιπο καλύπτεται από τα προϊόντα της μεταλπικής ηφαιστειακής δράσης, όπως αναφέρεται και σε προηγούμενη παράγραφο. Οι εμφανίσεις αυτές είναι, α) σχιστόλιθοι, γνεύσιοι, φυλλίτες και μεταβασάλτες στην περιοχή του Όρμου Αθινιού, μεταμόρφωσης HP/LT και β) οι Άνω Τριαδικοί-Ιουρασικοί ανακρυσταλλωμένοι ασβεστόλιθοιμάρμαρα του Προφήτη Ηλία (περιοχή Περίσσας), που αντιπροσωπεύουν αυτόχθονη σειρά επάνω στην οποία πραγματοποιήθηκε η επώθηση των σχηματισμών του Αθινιού. Ωστόσο, ένα νεότερο κανονικό ρήγμα μεγάλης εξάπλωσης, μετατόπισε τους σχηματισμούς του Αθινιού χαμηλότερα από τα ανθρακικά του Προφήτη Ηλία (Μουντράκης, 2010).





3.3.2 Τεκτονοστρωματογραφία

Από άποψη τεκτονοστρωματογραφίας στην Αττικοκυκλαδική συναντώνται τρεις (3) ακολουθίες σε όλη την έκταση της ζώνης (Μουντράκης, 2010).

<u>Ι^η Τεκτονική ακολουθία</u>: Αποτελεί τη βασική τεκτονική ακολουθία της ζώνης και συνίσταται από πετρώματα μεταμορφωμένα σε συνθήκες HP/LT του Ηωκαίνου, τα οποία υπέστησαν στο Άνω Ολιγόκαινο-Κάτω Μειόκαινο την πρασινοσχιστολιθική μεταμόρφωση. Οι σχηματισμοί αυτοί είναι ανθρακικοί ηλικίας Άνω Τριαδικού-Κάτω Ιουρασικού και εμφανίζονται ως τεκτονικά παράθυρα (βλ. Προφήτης Ηλίας, Περίσσα) κάτω από επωθημένα καλύμματα.

<u>2^η Τεκτονική ακολουθία</u>: Η ακολουθία αυτή αποτελείται από γλαυκοφανητικούς σχιστόλιθους, μεταηφαιστειοϊζηματογενή και γνεύσιους και βρίσκεται τοποθετημένη πάνω στους σχηματισμούς της 1^{ης} ακολουθίας. Στα πετρώματά της έχει επιδράσει μεταμόρφωση HP έως γλαυκοφανητική κατά το Κρητιδικό μέχρι το Ηώκαινο.

<u>3^η Τεκτονική ακολουθία</u>: Βρίσκεται υπό μορφή τεκτονικού καλύμματος τοποθετημένη επάνω στην 2^η ακολουθία. Τα υλικά που την συνθέτουν είναι ηφαιστειοκλαστικά του Περμοτριαδικού, ανθρακικά Άνω Τριαδικού-Ιουρασικού, γνεύσιοι και αμφιβολίτες του υποβάθρου. Πιστεύεται ότι το συγκεκριμένο κάλυμμα προέρχεται από την Πελαγονική ή τη ζώνη Αξιού.

3.3.3 Τεκτοορογενετική εξέλιζη Τα τεκτονικά παράθυρα των μαρμάρων του Άνω Τριαδικού-Ιουρασικού που προαναφέρθηκε ότι αποτελούν την αυτόχθονη σειρά, σύμφωνα με πολλές επιστημονικές απόψεις, σχετίζονται με τα ανθρακικά πετρώματα των Εξωτερικών Ελληνίδων. Δηλαδή, είναι ένα μέρος της Απούλιας που υποβυθίστηκε κατά το Άνω Κρητιδικό-Ηώκαινο και μεταμορφώθηκαν σε συνθήκες HP/HT αρχικά και HP/LT στη συνέχεια. Αυτή η τεκτονική που έδρασε προκάλεσε συμμεταμορφικές ισοκλινείς πτυχές και την κύρια σχιστότητα των μεταμορφωμένων σωμάτων.

Η συμπίεση συνεχίστηκε στο Ολιγόκαινο και κατά το Ανώτερο Ολιγόκαινο-Κάτω Μειόκαινο έλαβε χώρα πρασινοσχιστολιθικής φάσης μεταμόρφωση μέχρι να αρχίσει ο εφελκυσμός του Κάτω Μειόκαινου. Αυτός ο εφελκυσμός οδήγησε στη εμφάνιση των μεταμορφωμένων πυρήνων με μεγάλα κανονικά ρήγματα.

Ο εφελκυσμός συνεχίζει να υφίσταται από το Μειόκαινο και είναι αυτός που οδήγησε στην λέπτυνση του φλοιού και στην μαγματική άνοδο μέσα από παρακατακόρυφα κανονικά ρήγματα. Έτσι, έλαβε χώρα στο Άνω Μειόκαινο η πρόσφατη ηφαιστειότητα της Σαντορίνης και άλλων νησιών που αναλύεται στην αμέσως επόμενη παράγραφο (Μουντράκης, 2010).

3.4 Ηφαιστειακή δράση και αποθέσεις

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ϿϷϪͻ

Στην περιοχή της Σαντορίνης η έναρξη της ηφαιστειακής δράσης τοποθετείται χρονικά πριν από 5 Ma. Η δράση αυτή συνεχίζεται μέχρι σήμερα με παρεμβάλουσες περιόδους ηρεμίας. Η πιο σημαντική ηφαιστειακή δραστηριότητα της Σαντορίνης πραγματοποιήθηκε περί τα 1600 π.Χ. και ονομάζεται «Μινωική έκρηξη» καθώς σχετίζεται με την παρακμή του Μινωικού πολιτισμού στην Κρήτη. Τα προϊόντα της Μινωικής έκρηξης κάλυψαν σχεδόν όλη τη σημερινή Θήρα με πυροκλαστικά υλικά μεγάλου πάχους τα οποία περιγράφονται παρακάτω σε αυτή τη παράγραφο. Επίσης, από την πιο πρόσφατη δραστηριότητα, το 1947, παρατηρούνται «φρέσκες» λάβες στη Νέα Καμένη. Ωστόσο, το υποθαλάσσιο ηφαιστειακό κέντρο Κολούμπο στα ΒΑ της Σαντορίνης είναι αυτή τη στιγμή το πιο ενεργό της ευρύτερης περιοχής (Μουντράκης, 2010).

3.4.1 Το χρονικό και τα προϊόντα της ηφαιστειακής δράσης

Πριν από τη Μινωική ηφαιστειακή δραστηριότητα, το σύμπλεγμα της Σαντορίνης αποτελούνταν από τρία νησιά: τη Θήρα, τη Θηρασία και το Ασπρονήσι. Τα νησιά αυτά δομούνταν από ηφαιστειακές αποθέσεις, διαφορετικών εκρήξεων, που επικάθησαν επάνω στο προ-ηφαιστειακό υπόβαθρο.

Η πρώτη ηφαιστειακή δραστηριότητα της Σαντορίνης ήταν ρυοδακιτικής σύστασης, μεταξύ 1.6 Μα και 500 ka στην περιοχή του Ακρωτηρίου στη νήσο Θήρα. Τα επόμενα 500 ka η ηφαιστειότητα περιορίζεται στο βόρειο τμήμα του συμπλέγματος και εμφανίζεται με την μορφή διαδοχικών στρωμάτων και κώνων. Ο σχηματισμός του Σκάρου κάλυπτε το μεγαλύτερο τμήμα της βόρειας Θήρας, στη προ-Μινωική καλδέρα, ενώ στο νότιο τμήμα κυριαρχεί ο πάχους 200 m σχηματισμός των πυροκλαστικών της Θήρας που επικάθεται των σχηματισμών του υποβάθρου και των Πλειστοκαινικών ηφαιστειακών προϊόντων του Ακρωτηρίου. Τα τελευταία 200 ka σημειώθηκαν τουλάχιστον 12 εκρηξιγενή ηφαιστειακά γεγονότα τα οποία απελευθέρωσαν αρκετά τετραγωνικά χιλιόμετρα (km³) μάγματος (Druitt & Francaviglia, 1992).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ΦΡΔΣ

Οι μεταγενέστερες εκρήξεις του Ρίβα καθώς και η Μινωική είναι αυτές που οδήγησαν στις καταρρεύσεις που διαμόρφωσαν τη σημερινή μορφή τη Καλδέρας στη Σαντορίνη (Druitt & Francaviglia, 1992). Ωστόσο, στην καλδέρα της Σαντορίνης συνέβησαν τουλάχιστον τέσσερις (4) μεγάλες καταρρεύσεις των τοιχωμάτων της και το χρονικό της συνολικής πορείας της ηφαιστειακής δραστηριότητας και των διεργασιών που έλαβαν χώρα στην καλδέρα της Σαντορίνης παρουσιάζεται συνοπτικά στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 3.1).

Ηλικία (ka)	Συμβάν
<3.6	Έκχυση των δακιτικών λαβών των νησιών της Καμένης
	Κατάρρευση της Μινωικής καλδέρας
3.6	Μινωική έκρηξη (ρυοδακιτικής σύστασης)
	Κατάρρευση της καλδέρας του Ρίβα (αποκάλυψη τμημάτων της καλδέρας
	του Σκάρου)
21	Έκρηξη του Ρίβα (δακιτικής σύστασης)
	Έκχυση των δακιτικών λαβών του συμπλέγματος Σκάρου-Θηρασίας
	Έκρηξη ανδεσιτικών λαβών στην περιοχή της Οίας
	Έκρηξη του δεύτερου ανώτερου ορίζοντα σκωριών (ανδεσιτικής σύστασης)
	Δημιουργία της ασπίδας λάβας του Σκάρου
	Κατάρρευση της καλδέρας του Σκάρου
	Έκρηξη του πρώτου ανώτερου ορίζοντα σκωριών (ανδεσιτικής σύστασης
	Έκρηξη του Βούρβουλου (δακιτικής έως ανδεσιτικής σύστασης)
	Έκρηξη μεσαίου ορίζοντα κίσσηρης (δακιτικής έως ανδεσιτικής σύστασης)
	Έκρηξη Θήρας (ανδεσιτικής σύστασης)
	Έκχυση ανδεσιτικών λαβών στη νήσο Θηρασία,
	δημιουργία του κώνου του Μικρού Προφήτη Ηλία
	Κατάρρευση της καλδέρας του κατώτερου ορίζοντα κίσσηρης
~100	Έκρηξη του δεύτερου κατώτερου ορίζοντα κίσσηρης (ρυοδακιτικής
	σύστασης)
	Έκρηξη του πρώτου κατώτερου ορίζοντα κίσσηρης (ρυοδακιτικής έως
	ανδεσιτικής σύστασης)
	Τρίτη έκρηξη Θερμών (ρυοδακιτικής σύστασης)
	Έκχυση δακιτικής λάβας κοντά στο ακρωτήριο Αλονάκι
	Δεύτερη έκρηξη Θερμών (ρυοδακιτικής σύστασης)
<200?	Πρώτη έκρηξη Θερμών (ανδεσιτικής σύστασης)
	Δημιουργία της ασπίδας λάβας του Μεγάλου Βουνού
	Άνοδος βασαλτών και ανδεσιτών στην περιοχή Ακρωτήρι
630-1590?	Έκρηξη ρυοδακιτικής σύστασης στην περιοχή Ακρωτήρι

Πίνακας 3.1 Η συνολική πορεία της ηφαιστειακής δράσης στη Σαντορίνη (Τροποποιημένο από: Druitt and Francaviglia, 1992) Η Μινωική έκρηξη, που χρονολογείται περί τα 1390 π.Χ. είναι η πιο σημαντική ηφαιστειακή δραστηριότητα για την περιοχή της Σαντορίνης. Αποτελείται από τέσσερις (4) διαδοχικές φάσεις που είναι εύκολα διακριτές στα τοιχώματα της καλδέρας και σε πολλές περιοχές της Θήρας καθώς καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος του νησιού. Τα προϊόντα της Μινωικής δράσης εμφανίζουν, κατά τόπους, πάχη που φτάνουν τα 50 m και αποτελούνται συνολικά από κίσσηρη, πυροκλαστικά υλικά ρυοδακιτικής σύστασης, ιγκνιμβρίτη και λίθινα τεμάχη (Mccoy, 1984; Gertisser, Preece and Keller, 2009)

3.5 Σεισμικότητα της περιοχής

^{Ψηφιακή} συλλογή Βιβλιοθήκη

Σχετικά με την σεισμικότητα στην περιοχή του συμπλέγματος της Σαντορίνης, είναι σαφές ότι παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς όπως προαναφέρθηκε τοποθετείται σε ζώνη υποβύθισης. Η υποβυθιζόμενη λοιπόν Μεσογειακή πλάκα βυθίζεται κάτω από την μικροπλάκα του Αιγαίου με μια μέση γωνία της τάξεως των 25° σύμφωνα με τους Papazachos *et al.* (2005), έχει πάχος περίπου 80 km και ωκεάνιο φλοιό περίπου 7 km.

Το ενεργό σεισμικά τμήμα της υποβυθιζόμενης Μεσογειακής πλάκας βρίσκεται στο ανώτερο τμήμα της και σε βάθος που φτάνει τα 180 km, όμως, υπάρχει ένα τμήμα μεταξύ 110 και 140 km βάθους που χαρακτηρίζεται ως χαμηλής σεισμικότητας λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας του σε εκείνα τα βάθη. Οι σεισμοί που προκαλούνται από το ενεργό αυτό τμήμα της υποβυθιζόμενης Μεσογειακής πλάκας ξεπερνάνε σε μέγεθος το $M \ge 4$. Οι επιφανειακοί σεισμοί στη ζώνη σύγκλισης, του ανατολικού τμήματος της Μεσογειακής πλάκας με την μικροπλάκα του Αιγαίου, προκαλούνται από την ενεργοποίηση μικρής γωνίας ανάστροφων ρηγμάτων με διεύθυνση $B\Delta$ – NA και φορά προς BA. Αντίθετα, οι επιφανειακοί σεισμοί στο ηφαιστειακό τόξο του νοτίου Αιγαίου, που αποτελεί την περιοχή ενδιαφέροντος της συγκεκριμένης εργασίας, οφείλονται σε κανονικά εφελκυστικά ρήγματα με διεύθυνση BA – NΔ (Papazachos et al., 2005).

Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 3.6) απεικονίζονται τα επίκεντρα των σεισμών ενδιάμεσου εστιακού βάθους και μεγέθους $7.5 \ge M \ge 5.6$ που σημειώθηκαν στο διάστημα μεταξύ 1911 και 1965. Ωστόσο, υπάρχει και νεότερη σεισμική δράση στην περιοχή έκτοτε, η οποία όμως δεν έχει φιλοξενήσει κάποιο σεισμικό γεγονός μεγαλύτερου μεγέθους. Πρόκειται γενικώς για μια έντονα ενεργή σεισμικά περιοχή με εγκατεστημένο ένα πολύ μεγάλο και σύγχρονο δίκτυο σεισμολογικών σταθμών υπό παρακολούθηση.

Επίσης, στην Εικόνα 3.7, παρουσιάζονται και πιο πρόσφατα επίκεντρα σεισμών μεγέθους > 2.0 στο σύμπλεγμα της Σαντορίνης, την περίοδο 2010 – 2012 καθώς και οι σεισμολογικοί σταθμοί. Όπως φαίνεται από την εικόνα, επιβεβαιώνεται ότι η περιοχή συνεχίζει να έχει έντονη σεισμική δράστηριότητα με έμφαση στην περιοχή των νήσων Παλαιά και Νέα Καμένη στο κέντρο της καλδέρας. Η δραστηριότητα αυτή προκαλεί επίσης μικρές μετατοπίσεις σε όλα τα νησιά του συμπλέγματος (Parks et al., 2015).



Εικόνα 3.6 Τα επίκεντρα των σεισμών ενδιαμέσου βάθους για την περιοχή του ελληνικού ηφαιστειακού τόζου στο διάστημα 1911 – 1965 (Πηγή: Papazachos *et al.*, 2005)



Εικόνα 3.7 Τα επίκεντρα των σεισμών μεγέθους > 2.0 στο σύμπλεγμα της Σαντορίνης, την περίοδο μεταξύ Οκτωβρίου 2010 – Σεπτεμβρίου 2012 (Πηγή: Parks et al., 2015)



Τα κλιματικά δεδομένα για την περιοχή της Σαντορίνης ελήφθησαν από τα διαθέσιμα στοιχεία του κλιματικού άτλαντα της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (EMY) από το 1971 μέχρι το 2000. Χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα θερμοκρασίας και υετού από τους σταθμούς της Νάξου που ήταν η κοντινότερη πηγή δεδομένων για την περιοχή. Έτσι λοιπόν στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται πληροφορίες για τη μέση μηνιαία θερμοκρασία (Διάγραμμα 3.1), το μέσο μηνιαίο ύψος υετού (Διάγραμμα 3.2) καθώς και για το ετήσιο ύψος υετού (Διάγραμμα 3.3).



Διάγραμμα 3.1 Μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα (Πηγή: http://climatlas.hnms.gr/)



Διάγραμμα 3.2 Μέσο μηνιαίο ύψος υετού (Πηγή: http://climatlas.hnms.gr)



Διάγραμμα 3.3 Ετήσιο ύψος υετού (Πηγή: <u>http://climatlas.hnms.gr</u>)

3.7 Η περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης για την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είναι η περιοχή της Περίσσας στο ΝΑ τμήμα του νησιού Θήρα. Συγκεκριμένα πρόκειται για τα ασβεστολιθικά πρανή στην παραλία της Περίσσας, που ανήκουν στον ευρύτερο ανθρακικό σχηματισμό του Προφήτη Ηλία.

Το όρος του Προφήτη Ηλία είναι το ψηλότερο σημείο του συμπλέγματος της Σαντορίνης και αποτελεί το ανθρακικό προαλπικό υπόβαθρο της περιοχής. Διακόπτεται από αρκετά κανονικά ρήγματα ΔBΔ – ANA και BA – NΔ διευθύνσεων. Τα ρήγματα διευθύνσεως ΔBΔ – ANA αποτελούν την τεκτονική επαφή μεταξύ του υποβάθρου και τον ηφαιστειακών αποθέσεων καθώς είναι αυτά που αποκάλυψαν το υπόβαθρο, ενώ εκείνα της BA – NΔ διεύθυνσης απλώς έχουν δράσει επάνω στην ανθρακική βραχομάζα του Προφήτη Ηλία (Casale, Fytikas, Sigvaldasson, & Vougioukalakis, 1998).

Από γεωλογική άποψης ο σχηματισμός του Προφήτη Ηλία δομείται από κρυσταλλικούς ασβεστολίθους Κάτω Κρητιδικής ηλικίας που αποτελούν το ημιμεταμορφωμένο προαλπικό υπόβαθρο της Αττικοκυκλαδικής γεωτεκτονικής ζώνης και συγκεκριμένα της ενότητας των Νοτίων Κυκλάδων.

Τα απότομα πρανή που διαμορφώνονται στην παραλία της Περίσσας είναι ύψους πάνω από 50 m και διεύθυνσης ΝΔ και ΝΝΔ. Στους παρακάτω θεματικούς χάρτες παρουσιάζονται όλα τα προαναφερθέντα στοιχεία για την περιοχή μελέτης (Εικόνα 3.9, Εικόνα 3.10 και Εικόνα 3.11).



Εικόνα 3.8 Ο ασβεστόλιθος του Προφήτη Ηλία στην περιοχή της Περίσσας. Λήψη κατά τη διαδικασία της σάρωσης





Εικόνα 3.9 Γεωλογικός χάρτης του νότιου τμήματος της νήσου Θήρα. Σε κόκκινο πλαίσιο η περιοχή μελέτης (Τροποποιημένο από: ΙΓΜΕ, Φύλλο Θήρα)





Εικόνα 3.10 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) του νότιου τμήματος της νήσου Θήρα. Σε κόκκινο πλαίσιο η περιοχή μελέτης





Εικόνα 3.11 Χάρτης προσανατολισμού κλιτύων του νότιου τμήματος της νήσου Θήρα. Σε κόκκινο πλαίσιο η περιοχή μελέτης

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

<u>TEXNOΛOΓIA LiDAR</u> (Light Detection and Ranging)

4.1 Εισαγωγή

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ιήμα Γεωλογίας

Α.Π.Θ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η τεχνολογία LiDAR (Light Detection and Ranging) και γενικότερα των σαρωτών laser (Laser Scanners), χωρίς να γίνεται ειδική αναφορά σε εξειδικευμένο αντικείμενο εφαρμογής.

Ειδικότερα, περιγράφονται θεμελιώδεις έννοιες και φιλοσοφίες στις οποίες βασίζεται η τεχνολογία LiDAR (Light Detection and Ranging) ενώ επεξηγούνται αναλυτικά οι βασικές αρχές πάνω στις οποίες στηρίζεται η λειτουργία αυτών των σαρωτών. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα διαφορετικά είδη σαρωτών LiDAR που υπάρχουν στη βιομηχανία και οι περιπτώσεις τις οποίες εξυπηρετεί καλύτερα το καθένα εξ αυτών.

Επιπρόσθετα, δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στη φύση των δεδομένων που παράγει το LiDAR καθώς η κατάλληλη επεξεργασία τους, που θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο, παρέχει τις απαραίτητες για τα διάφορα πεδία εφαρμογών πληροφορίες. Συνεπώς, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να γίνουν κατανοητοί οι διαφορετικοί τύποι δεδομένων που παράγονται και οι πληροφορίες που τα συνοδεύουν.

Τέλος, γίνεται μια συνοπτική αναφορά στα οφέλη τα οποία παρέχει η ανάπτυξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας καθώς και στους περιορισμούς που διέπουν τη χρήση της και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε κάθε εφαρμογή.

4.2 Η φιλοσοφία της λειτουργίας

Η τεχνολογία LiDAR είναι σε θέση να παράγει 3D μοντέλα φυσικών δομών σε πολύ σύντομο χρόνο, βασιζόμενη στην εμβέλεια της εικόνας. Βασικός παράγοντας στη διαδικασία αυτή είναι η απόσταση που χωρίζει τον σαρωτή από τον στόχο. Η απόσταση αυτή υπολογίζεται από τον χρόνο που απαιτείται ώστε ένας συγκεκριμένος παλμός της ακτίνας laser να επιστρέψει πίσω στην πηγή (Εικόνα 4.1), με βάση τη σχέση:

$$d = \frac{(Et \times c)}{2} \tag{1}$$

Όπου,

d: η απόσταση σαρωτή - στόχου Et: ο χρόνος επιστροφής ενός συγκεκριμένου παλμού c: η ταχύτητα διάδοσης του φωτός



d = (Et x c)/2where c = speed of light

Εικόνα 4.1 Σχηματική απεικόνιση της σχέσης υπολογισμού της απόστασης μεταξύ σαρωτή και στόχου (Πηγή: Lato, 2010)

Η θέση στην οποία βρίσκεται το σημείο του στόχου, το οποίο δέχεται τον συγκεκριμένο παλμό, προσδιορίζεται με βάση τη γεωμετρία του σαρωτή και την απόσταση του από τον σαρωτή όπως αυτή υπολογίστηκε προηγουμένως. Στη συνέχεια, η διεύθυνση διάδοσης της ακτίνας μεταβάλλεται και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία για διαφορετικό πλέον σημείο και με διαφορετική γεωμετρία σαρωτή. Έτσι, το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα σύνολο από εκατομμύρια ή ακόμη και δισεκατομμύρια σημεία (point cloud) τα οποία είναι ορισμένα σε ένα XYZ σύστημα συντεταγμένων το οποίο μπορεί να μετασχηματιστεί σε γεωγραφικό σύστημα όπως είναι η Εγκάρσια Μερκατορική Προβολή (UTM). Η μετατροπή αυτή επιτρέπει στα δεδομένα να μπορούν να αλληλοεπιδράσουν με άλλης φύσεων χωρικά δεδομένα. Ακόμη, το καθένα από αυτά τα σημεία φέρει και «χρωματική» πληροφορία σε όρους έντασης (intensity) του ανακλώμενου παλμού που επιστρέφει στον σαρωτή ή σε όρους RGB (Red Green Blue) που αντιπροσωπεύουν το ρεαλιστικό χρώμα το οποίο προσδίδεται από αντίστοιχη ομοαξονική φωτογραφία που συνοδεύει τα δεδομένα (Lato, 2010; Lato *et al.*, 2011).

Ακόμη, κάθε στόχος χαρακτηρίζεται από κάποιες τιμές ανακλαστικότητας που σχετίζονται με το υλικό από το οποίο συνίσταται καθώς και από τα επίπεδα υγρασίας της επιφάνειάς του. Συνεπώς, η δυνατότητα του κάθε σαρωτή να «αντιλαμβάνεται» και να υπολογίζει τον χρόνο επιστροφής του κάθε παλμού, ελέγχεται από τα επίπεδα ανακλαστικότητας του στόχου αλλά και από τη γωνία με την οποία προσπίπτει η δέσμη της ακτίνας επάνω στον στόχο. Η γωνία αυτή είναι η μοναδική παράμετρος που μπορεί να επηρεαστεί και να τροποποιηθεί από τον χρήστη-ερευνητή κατά τη σάρωση, απλά μεταβάλλοντας τη θέση ή/και την κλίση του σαρωτή. Συνεπώς, αυτοί οι δύο περιορισμοί, οδηγούν στην παραγωγή τελικών νεφών σημείων (point cloud) που περιέχουν τμήματα διαφορετικής πυκνότητας σημείων (Από: Vazaios *et al.*, 2014).

4.3 Τα είδη των σαρωτών LiDAR

Οι σαρωτές LiDAR που υπάρχουν στη βιομηχανία είναι είτε επίγειοι (Terrestrial Laser Scanner) είτε ιπτάμενοι (Airborne Laser Scanner). Οι επίγειοι σαρωτές χωρίζονται σε στατικούς και κινητούς, ενώ οι ιπτάμενοι είναι μόνο κινητού τύπου. Ανεξάρτητα από τα είδη που αναφέρθηκαν, οι σαρωτές LiDAR διαφέρουν και σε τεχνικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες. Τέτοιες είναι α) η απόσταση μέχρι την οποία είναι ικανοί να λαμβάνουν την επιστροφή του παλμού, β) ο ρυθμός συλλογής σημείων (pts/sec), γ) η ακρίβεια και δ) η ανάλυση. Αυτά όμως είναι χαρακτηριστικά που συνοδεύουν το εκάστοτε μηχάνημα από τον κατασκευαστή του και εξαρτώνται μόνο από την τεχνολογία που αυτός παρέχει στο προϊόν του. Επομένως, δεν γίνεται περεταίρω αναφορά σε αυτά στην παρούσα εργασία.

Παρακάτω επεξηγούνται πιο αναλυτικά οι διαφορές με βάση τη διάκριση σε στατικούς (static) και κινητούς (mobile) σαρωτές.

4.3.1 Στατικοί σαρωτές LiDAR

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Αυτός ο τύπος σαρωτών LiDAR είναι συνήθως τοποθετημένος σε κάποιον τρίποδα και προεπιλέγεται η θέση που θα εγκατασταθεί πριν από τη σάρωση. Ο σαρωτής παραμένει σταθερός στη συγκεκριμένη θέση μέχρι να ολοκληρωθεί η σάρωση. Στη συνέχεια μπορεί να μεταφερθεί σε διαφορετική θέση και να επαναληφθεί η ίδια διαδικασία από άλλη οπτική γωνία. Αυτός ο τρόπος σάρωσης ενδείκνυται για την απόκτηση δεδομένων πολύ υψηλής ανάλυσης και την απεικόνιση φυσικών επιφανειών όπως είναι τα βραχώδη πρανή (M. J. Lato, Diederichs, & Hutchinson, 2010).



Εικόνα 4.2 Στατικός επίγειος σαρωτής LiDAR (Optech 3-D ILRIS)

4.3.2 Κινητοί σαρωτές LiDAR

Οι κινητοί σαρωτές LiDAR είναι αρκετά διαφορετικοί από του στατικούς. Αποτελούνται από ένα όχημα, ένα δίκτυο αισθητήρων LiDAR, ένα δίκτυο GPS και ένα σύστημα πλοήγησης (INS) (Εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.3 Σχηματική αναπαράσταση όλων συστημάτων που αποτελούν ένα κινητό σαρωτή LiDAR (Πηγή: Lato *et al.*, 2011)

Το σύστημα GPS που συμμετέχει σε μια τέτοια διάταξη, αποτελείται από έναν δέκτη που βρίσκεται στον σαρωτή, έναν άλλον στατικό που βρίσκεται περίπου στο κέντρο της περιοχής σάρωσης και ακόμα δύο (2) στατικούς δέκτες που είναι εγκατεστημένοι σε άλλα σημεία αναφοράς. Με αυτόν τον τρόπο, ο σαρωτής είναι αναφερμένος σε κάποιο σύστημα συντεταγμένων και έτσι το σύστημα πλοήγησης (INS) μπορεί να κάνει την συσχέτιση μεταξύ των διαδοχικών μετρήσεων που καταγράφει το GPS καθώς το όχημα κινείται. Έτσι, το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα νέφος σημείων (point cloud) γεωαναφερμένο σε κάποιο γεωγραφικό σύστημα (Lato *et al.*, 2011).

4.4 Δεδομένα LiDAR

Τα δεδομένα που παράγονται από τους σαρωτές laser και συγκεκριμένα από το LiDAR, αποτελούν στοιχεία συμβατά με λογισμικά σε CAD και GIS περιβάλλον. Τα δεδομένα αυτά είναι μια πρόκληση για τους χρήστες τέτοιου είδους λογισμικών, ως προς το πως θα τα διαχειριστούν με στόχο την εξαγωγή όσο τον δυνατόν περισσότερων πληροφοριών. Επιπλέον, συνήθως συνιστούν σύνολο δεδομένων πολύ μεγάλου όγκου, σε κλίμακα gigabyte, που σε συνδυασμό με την πολυπλοκότητα της δομής ενός νέφους σημείων (point cloud) χρήζουν οργανωμένης διαχείρισης και αυστηρής οργάνωσης των διαδικασιών επεξεργασίας. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση εξειδικευμένων λογισμικών και την ανάπτυξη εφαρμοσμένων εργαλείων (Lato *et al.*, 2011).

Η φύση των δεδομένων που συλλέγει το LiDAR εξαρτάται από τον κατασκευαστικό σχεδιασμό του εκάστοτε μηχανήματος καθώς και από τα συστατικά του μέρη. Αντιθέτως, οι διαδικασίες

επεξεργασίας και διαχείρισης των δεδομένων είναι οι παράγοντες που καθορίζουν την πληροφορία που τελικώς θα εξαχθεί (Μ. J. Lato, 2010).

Οι τρεις (3) κύριοι τύποι δεδομένων LiDAR είναι οι ακόλουθοι:

Σημειακά δεδομένα (XYZ)

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Σημειακά δεδομένα με καταγραφή της έντασης επιστροφής (XYZI)
- Σημειακά δεδομένα σε συνδυασμό με τιμές χρωματισμού (XYZRGB)

4.4.1 Δεδομένα XYZ

Αυτός ο τύπος δεδομένων, που αποτελούνται μόνο από σημειακή πληροφορία, αποτελεί τον πιο απλό τύπο δεδομένων που μπορεί να παράγει το LiDAR και δεν ευνοεί στην εξαγωγή πολλών πληροφοριών καθώς δεν είναι εύκολο να διακριθούν δομές. Επίσης, είναι ο λιγότερο απαιτητικός τύπος δεδομένων ως προς τις διαδικασίες υπολογισμού παραμέτρων και τον χώρο αποθήκευσης.

Για την συλλογή τέτοιων δεδομένων, το LiDAR υπολογίζει την απόσταση μεταξύ σαρωτή και στόχου και παρουσιάζει τα δεδομένα με την χωρική μορφή XYZ λαμβάνοντας ως σημείο αναφοράς την τοποθεσία του σαρωτή που έχει γνωστές τιμές (0,0,0). Στη συνέχεια, αν κρίνεται αναγκαίο για την εκάστοτε εφαρμογή, αυτός ο σχετικός προσανατολισμός μπορεί να αναχθεί σε κάποιο σύστημα γεωγραφικών συντεταγμένων και τα δεδομένα να είναι γεωναφερμένα και επεξεργάσιμα σε αλληλεπίδραση με δεδομένα της ίδιας χωρικής κατανομής.

4.4.2 Δεδομένα XYZI

Στον συγκεκριμένο τύπο δεδομένων υπάρχει το επιπλέον χαρακτηριστικό την έντασης (intensity). Η παράμετρος της έντασης συνοδεύει τον συνδυασμό XYZ κάθε ξεχωριστού σημείου και η τιμή που παίρνει είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ανακλαστικότητα (reflectivity) της αντίστοιχης περιοχής επάνω στον στόχο. Έτσι, οι περιοχές με υψηλή ανακλαστικότητα επιστρέφουν σήμα υψηλής έντασης (high intensity return) και αντιστρόφως οι περιοχές χαμηλής ανακλαστικότητας επιστρέφουν σήμα χαμηλής έντασης (low intensity return).

Η ποσοτικοποίηση της παραμέτρου της έντασης γίνεται με βάση την δύναμη της δέσμης φωτός που εκπέμπεται από τον σαρωτή. Η τιμή αυτή είναι γνωστή και εξαρτάται από την ενέργεια και το μήκος κύματος της δέσμης. Συνεπώς, η τιμή της μεταβλητής «Ι» που αντιπροσωπεύει την ένταση (intensity), υπολογίζεται ως το ποσοστό του παραγόμενου φωτός που επιστρέφει στον σαρωτή και κατά συνέπεια είναι καθαρός αριθμός που παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1.

4.4.3 Δεδομένα XYZRGB

Πολλοί σαρωτές LiDAR διαθέτουν ενσωματωμένη ή εξωτερική ψηφιακή κάμερα. Αυτή η επιπλέον δυνατότητα βοηθάει στην παραγωγή ψευδό-χρωματισμένων νεφών σημείων (point cloud) προσδίδοντας τιμές από 0 έως 255 στις παραμέτρους Red, Green, Blue (RGB). Κάθε ξεχωριστό σημείο επάνω στο νέφος, χαρακτηρίζεται από τις τιμές χρωματισμού του κοντινότερου

σε αυτό εικονοστοιχείου (pixel) της εικόνας που λαμβάνεται από την κάμερα. Αν η κάμερα είναι ενσωματωμένη στον σαρωτή, τότε αυτομάτως η εικόνα ενσωματώνεται στο νέφος σημείων και αντιστοιχίζονται οι χρωματισμοί των εικονοστοιχείων με τα σημεία του νέφους. Αντίθετα, αν η κάμερα είναι εξωτερική, τότε θα πρέπει πρώτα η εικόνα να συσχετιστεί χωρικά με το νέφος σημείων.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

<u> ΘΕΌΦΡΑΣ</u>

Τα δεδομένα που συλλέγονται με αυτόν τον τρόπο συνθέτουν νέφη σημείων στα οποία είναι εύκολο να αναγνωριστούν δομές και να διευκρινιστούν γεωμετρικά στοιχεία. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 4.4) παρουσιάζονται οι οπτικές διαφορές μεταξύ των τρίων αυτών διαφορετικών τύπων δεδομένων LiDAR.



Εικόνα 4.4 Νέφη σημείων (point cloud) της ίδιας περιοχής, που αποτελούνται από XYZ, XYZI και XYZRGB τύπους δεδομένων αντίστοιχα (Πηγή: Lato, 2010).

4.5 Οφέλη και περιορισμοί

έλαδη

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας LiDAR και γενικότερα των σαρωτών laser παρέχει σημαντικά οφέλη για τα πάσης φύσεως αντικείμενα στα οποία βρίσκει εφαρμογή (πχ. βραχώδη πρανή). Τα περισσότερα από αυτά τα οφέλη εξαρτώνται από τον τρόπο αξιοποίησης της τεχνολογίας για τις επιμέρους εφαρμογές, όμως, τα γενικότερα οφέλη που παρέχει αυτή η τεχνολογία είναι αυτά τα οποία αξιοποιούνται από όλους τους χρήστες και κατά τους Abellán *et al.* (2014) συνοψίζονται ως εξής:

- Δυνατότητα υψηλής χωρικής ανάλυσης στις μετρήσεις. Φτάνει μέχρι 1 σημείο κάθε 2-3 cm
- Ικανοποιητικό εύρος οπτικής γωνίας και έκτασης κάλυψης σε σχέση με άλλες μεθόδους τηλεπισκόπησης
- Παραγωγή δεδομένων με ακρίβεια επιπέδου χιλιοστού (mm)
- > Ευκολία στη μεταφορά, εγκατάσταση, χρήση και λήψη δεδομένων

Πλην των αξιοσημείωτων οφελών, η τεχνική χαρακτηρίζεται και από κάποιους περιορισμούς, τη δεδομένη χρονική στιγμή, που δεν αποκλείεται να εξαλειφθούν στο μέλλον με την πρόοδο της τεχνολογίας. Αυτοί οι περιορισμοί είναι:

- Η μέγιστη εμβέλεια ενός σαρωτή, που δεν ξεπερνάει τα 3 km
- Η εναρμόνιση της μέγιστης εμβέλειας με την ακρίβεια και την διακριτική ικανότητα του σαρωτή. Μπορεί να έχει μία τυπική απόκλιση της τάξης του 1 cm σε απόσταση 100 m και 2 cm σε απόσταση 2 cm, όπως περίπου ισχύει για τις προδιαγραφές του σαρωτή IRLIS-3D της Optech.
- Χαμηλή δυνατότητα επαναληψιμότητας για μία συγκεκριμένη μέτρηση (έως και μερικά cm)
- Απαίτηση για ισχυρή υπολογιστική δύναμη καθώς πολλές φορές τα δεδομένα που προκύπτουν είναι πολύ μεγάλου όγκου
- Η παρουσία σκιασμένων περιοχών, για σάρωση από μία δεδομένη θέση

Το τελευταίο είναι γνωστό ως το φαινόμενο της «έμφραξης» (occlusion) και αποτελεί θέμα που θα συζητηθεί στο επόμενο κεφάλαιο καθώς απασχολεί έντονα τις εφαρμογές σε βραχώδη πρανή και έχουν προταθεί τόσο τεχνικές περιορισμού όσο και αποφυγής του (Lato, Diederichs and Hutchinson, 2010; Lato *et al.*, 2009).



LIDAR ΚΑΙ ΒΡΑΧΩΔΗ ΠΡΑΝΗ

5.1 Εισαγωγή

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ιήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

Είναι γνωστό πως για την ομαλή διεκπεραίωση πολλών τεχνικών έργων σε βραχώδεις σχηματισμούς, όπως οι υπόγειες εκσκαφές και η ευστάθεια των πρανών, είναι απαραίτητη η γνώση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών και διαφόρων άλλων τεχνικογεωλογικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τη βραχομάζα. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι ο προσανατολισμός των επιφανειών των ασυνεχειών, η μεταξύ τους απόσταση (spacing), η εμμονή (persistence), το άνοιγμα (aperture) αλλά και οι όγκοι των τεμαχών που διαμορφώνονται.

Στην περίπτωση των βραχωδών πρανών, που αποτελούν αντικείμενο μελέτης αυτής της εργασίας, είναι πολλές φορές ιδιαίτερα δύσκολο να αποκτηθεί άμεσα η πληροφορία που σχετίζεται με τις προαναφερθείσες παραμέτρους. Οι δυσκολίες έγκεινται κυρίως σε πρακτικά ζητήματα όπως η προσβασιμότητα, η ασφάλεια του ερευνητή και ο διαθέσιμος χρόνος. Όμως, υπάρχουν και πιο τεχνικές δυσκολίες . Συγκεκριμένα, η εκτίμηση της παραμέτρου της εμμονής αλλά και των όγκων των τεμαχών προϋποθέτουν την απόκτηση τρισδιάστατης (3-D) πληροφορίας που είναι σχεδόν απίθανο να αποκτηθεί με απευθείας μέτρηση. Στη κατεύθυνση της επίλυσης αυτών των δυσκολιών αναπτύσσεται και εξελίσσεται η τεχνολογία LiDAR και συγκεκριμένα η ανάπτυξη εφαρμογών και μεθόδων για την συμβολή στη μελέτη ευστάθειας βραχωδών πρανών (Bolkas, Vazaios, Peidou, & Vlachopoulos, 2018).

Τις προηγούμενες δεκαετίες, οι μετρήσεις των ασυνεχειών προϋπέθεταν άμεση οπτική παρατήρηση και επιτόπου χαρτογράφηση του πρανούς με στόχο την εξαγωγή των επιθυμητών πληροφοριών. Αυτή είναι μια διαδικασία που απαιτεί πολύ διαθέσιμο χρόνο στο πεδίο αλλά μπορεί να γίνει και επικίνδυνη από πλευράς πρόσβασης, πολύωρης έκθεσης σε περιβαλλοντικούς παράγοντες (πχ. κατακρημνίσματα) αλλά και της ίδιας της ευστάθειας του πρανούς. Επιπλέον, η αξιοπιστία των δεδομένων είναι υποκειμενική και εξαρτάται από την ερμηνεία και την εμπειρία του ερευνητή. Τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη της τεχνολογίας των σαρωτών LiDAR προσφέρει τη δυνατότητα απόκτησης μοντέλων των βραχωδών πρανών που παρέχουν τρισδιάστατη πληροφορία των γεωμετρικών δομών σε σύντομο χρονικό διάστημα και από απόσταση (μπορεί να ξεπερνάει και τα 1000 m).

Έτσι, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο περιγράφονται τα πλεονεκτήματα που προσφέρει το LiDAR στην μελέτη των βραχωδών πρανών συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους τεχνικογεωλογικής χαρτογράφησης· αναφέρονται στοιχεία της ιδιαιτερότητας που έχει η εφαρμογή της τεχνολογίας στα βραχώδη πρανή και τέλος περιγράφονται οι παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την εγκατάσταση του εκάστοτε προγράμματος σάρωσης.

5.2 Χαρακτηρισμός βραχωδών πρανών με τη χρήση LiDAR

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η συχνότητα εφαρμογής της τεχνολογίας LiDAR για τον χαρακτηρισμό βραχωδών πρανών ολοένα και αυξάνεται. Με αυτόν τον τρόπο, η χαρτογράφηση που γίνεται με στόχο την περιγραφή της γεωμετρίας φυσικών ή τεχνητών βραχωδών πρανών προσφέρεται τρισδιάστατα. Τα κύρια πλεονεκτήματα της χρήσης LiDAR σε βραχώδη πρανή είναι τα ακόλουθα:

- Δυνατότητα απόκτησης πολύ πιο αντιπροσωπευτικών μετρήσεων από όλη την επιφάνεια του πρανούς χωρίς να περιορίζονται μόνο στη βάση του
- Δυνατότητα απόκτησης δεδομένων από απότομες και δυσπρόσιτες περιοχές όπου θα ήταν αδύνατο με συμβατικές μεθόδους
- Δραματική απομείωση της διακινδύνευσης έναντι διερχόμενων οχημάτων και κατολισθήσεων για τους ερευνητές καθώς η σάρωση μπορεί να διεξαχθεί από ασφαλή περιοχή
- Δημιουργία μιας μόνιμης αποτύπωσης του βραχώδους πρανούς σε δεδομένη χρονική στιγμή
- Οι μετρήσεις προσανατολισμού δεν επηρεάζονται από το μαγνητικό πεδίο όπως συμβαίνει με τη βελόνα της συμβατικής πυξίδας

Όλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα κάνουν την τεχνολογία LiDAR πιο ελκυστική για τους ερευνητές μέρα με τη μέρα. Ωστόσο, πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψη και οι περιορισμοί αλλά και οι διορθώσεις που επιδέχονται τα δεδομένα μιας σάρωσης σε βραχώδες πρανές. Για παράδειγμα μπορεί να υπάρξει σφάλμα στη δειγματοληψία που να οδηγήσει σε κενό πληροφορίας για συγκεκριμένη θέση (sampling bias) ή εξωγενής θόρυβος. Επίσης, πρέπει να δοθεί σημασία στην αλλοίωση των δεδομένων λόγω του προσανατολισμού της δέσμης (orientation bias) καθώς και στο φαινόμενο της έμφραξης (occlusion) που περιγράφεται παρακάτω (Sturzenegger & Stead, 2009).

Η τεχνολογία LiDAR και οι μέθοδοι επεξεργασίας των δεδομένων της αποτελούν χρήσιμα εργαλεία στην λεπτομερέστερη καταγραφή των χαρατηριστικών (κυρίως γεωμετρικών) που είναι απαραίτητα για την ανάλυση ευστάθειας, την εκτίμηση της επιδεκτικότητας, επικινδυνότητας και διακινδύνευσης έναντι των βραχοκαταπτώσεων. Όμως, για την βέλτιστη και ρεαλιστική εφαρμοφή των μεθόδων, κρίνεται απαραίτητη η απόκτηση επιτόπου μετρήσεων και η τεχνικογεωλογική αξιολόγηση των επιτόπου συνθηκών που θα επαληθεύουν τα επεξεργασμένα δεδομένα LiDAR.

5.3 Σφάλμα προσανατολισμού και έμφραξη (orientation bias and occlusion)

Ένα σύνηθες πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπίζεται στις εφαρμογές LiDAR σε βραχώδη πρανή είναι η επίλυση του σφάλματος προσανατολισμού. Ο σχετικός προσανατολισμός του σαρωτή ως προς τον προσανατολισμού της επιφάνειας του πρανούς επηρεάζει την αξιοπιστία των δεδομένων.

Η σχέση προσανατολισμού μεταξύ της διεύθυνσης της σάρωσης και της εκάστοτε επιφάνειας επηρεάζει την απόκτηση αντιπροσωπευτικής πληροφορίας για τον προσανατολισμό της επιφάνειας. Όπως αναφέρουν οι Lato *et al.* (2009), οι επιφάνειες που είναι υποπαράλληλες στο

επίπεδο διεύθυνσης της σάρωσης υποεκτιμώνται. Όμως, αυτό είναι ένα σφάλμα που διορθώνεται εύκολα με την εφαρμογή της κλασσικής τριγωνομετρικής διόρθωσης Terzaghi (1965).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

έλδραστ

Επίσης, ένα δεύτερο πρόβλημα που απαιτεί προσοχή είναι το φαινόμενο της έμφραξης (occlusion). Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται σε επιφάνειες οι οποίες είναι σχεδόν ή απολύτως παράλληλες προς το επίπεδο διεύθυνσης της σάρωσης. Το αποτέλεσμα του φαινομένου είναι εκείνες οι περιοχές να εμφανίζονται ως σκιερές ζώνες (Εικόνα 5.1) και κατά συνέπεια να μην λαμβάνονται σημεία που αντιστοιχούν σε αυτές. Δηλαδή, προκύπτει απώλεια πληροφορίας.



Εικόνα 5.1 Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου της έμφραξης (Πηγή: Abellán et al., 2014)

Εν τούτοις, το φαινόμενο μπορεί να αντιμετωπιστεί με απλές γεωμετρικές διορθώσεις βασισμένες στην διόρθωση Terzaghi (1965) αλλά ο κύριος τρόπος αποφυγής του είναι η σάρωση του ίδιου στόχου από διαφορετικές θέσεις ή ο συνδυασμός δεδομένων από επίγειους και ιπτάμενους σαρωτές. Αυτό συμβαίνει γιατί, όπως αποδείχθηκε από τους Lato *et al.* (2009), το φαινόμενο της έμφραξης αφορά αποκλειστικά συγκεκριμένη διεύθυνση σάρωσης κάθε φορά. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε θέση σάρωσης η έμφραξη είναι διαφορετική. Ως εκ τούτου, εάν δεν υπάρχει η δυνατότητα πολλαπλών σαρώσεων, πρέπει να επιλέγεται η κατά το δυνατόν πιο κάθετη στις επιφάνειες διεύθυνση σάρωσης. Στα παρακάτω στερεοδιαγράμματα (Εικόνα 5.2) παρουσιάζονται οι προβολές των πόλων των επιφανειών που προέκυψαν από σάρωση που πραγματοποιήθηκε στο ίδιο πρανές από τρεις (3) διαφορετικές θέσεις. Όπως εύκολα παρατηρείται, μια οικογένεια ασυνεχειών απουσιάζει σχεδόν ολοκληρωτικά από το στερεοδιάγραμμα λόγω έμφραξης.



Εικόνα 5.2 Στερεοδιαγράμματα προβολής των πόλων των επιφανειών του ίδιου πρανούς από διαφορετικές θέσεις σάρωσης (Πηγή: Lato *et al.*, 2009)

5.4 Οργάνωση του προγράμματος σάρωσης (survey planning)

Η οργάνωση του προγράμματος σάρωσης είναι μια διαδικασία που απαιτεί συστηματικότητα και μεθοδικότητα. Απαραίτητο στοιχείο για την άρτια οργάνωση και εγκατάσταση του προγράμματος σάρωσης είναι η πολύ καλή κατανόηση του προβλήματος που ερευνάται αλλά και η σαφής θέσπιση των αναζητούμενων πληροφοριών. Συνεπώς, χρειάζεται να προηγηθεί πολύ προσεκτικός συντονισμός πριν την επίσκεψη στο πεδίο.

Τα θέματα που πρέπει να έχουν προκαθοριστεί πριν από τη μετάβαση στο πεδίο είναι κυρίως τεχνικής αλλά και πρακτικής φύσεως. Τα περισσότερα από αυτά διαφέρουν από πρανές σε πρανές και εξαρτώνται από την πολυπλοκότητας της γεωμετρίας της περιοχής και την προσβασιμότητα. Τέτοια είναι η επιλογή της κατάλληλης ανάλυσης με την οποία θα γίνει η σάρωση και η επιλογή των θέσεων από τις οποίες θα πραγματοποιηθούν σαρώσεις προκειμένου να αποφευχθούν τα προβλήματα σφάλματος προσανατολισμού και έμφραξης που περιγράφηκαν σε προηγούμενη παράγραφο. Επιβεβαίωση αποτελούν οι αναφορές διαφόρων συγγραφέων (Sturzenegger and Stead, 2009; Lato, Diederichs and Hutchinson, 2010) πως η εμφάνιση του φαινομένου της έμφραξης παρατηρείται συνήθως σε προγράμματα σάρωσης όπου δεν έχει προηγηθεί η κατάλληλη οργάνωση ή σε εκείνα που δεν έχουν στη διάθεσή τους τον απαιτούμενο χρόνο, χώρο και ορατότητα (Abellán et al., 2014).

5.4.1 Τεχνικογεωλογικές θεωρήσεις

Όπως προαναφέρθηκε, το πρόγραμμα σάρωσης για βραχώδη πρανή πρέπει να οργανώνεται με τέτοιον τρόπο ώστε να μειώνονται τα σφάλματα στα δεδομένα και να αυξάνεται η χωρική κάλυψη και η λεπτομέρεια της πληροφορίας. Υπάρχουν όμως επιπρόσθετες θεωρήσεις που είναι χρήσιμες στην οργάνωση ενός προγράμματος σάρωσης που είναι προσανατολισμένο στην απόκτηση τεχνικογεωλογικής πληροφορίας. Οι θεωρήσεις αυτές απαιτούν γεωλογική γνώση και βασίζονται στην ικανότητα κρίσης του εκάστοτε ερευνητή.

Η ήδη γνώση του αναμενόμενου μηχανισμού αστοχίας (επίπεδη ολίσθηση, σφηνοειδής ολίσθηση, ανατροπή) που κυριαρχεί στο πρανές μπορεί να έχει καθοριστική συμβολή στον τρόπο εγκατάστασης του προγράμματος σάρωσης. Επιπλέον, τα βραχώδη πρανή μπορούν να διαχωριστούν αδρώς σε τρείς (3) μεγάλες κατηγορίες:

- Ελαφρώς ανισότροπα (κυρίως πυριγενή πετρώματα και κάποια μεταμορφωμένα)
- Εξαιρετικά ανισότροπα (κυρίως μεταμορφωμένα πετρώματα)
- Στρωματώδη ιζήματα

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Σε αυτόν τον γενικό διαχωρισμό, μπορούν να στηριχτεί μια πρώτη προσέγγιση ανάλογα με τη φύση του γεωυλικού από το οποίο αποτελείται το εκάστοτε πρανές. Ως συνέπεια, θα είναι και διαφορετικός ο τρόπος οργάνωσης και εγκατάστασης του προγράμματος της σάρωσης. Για παράδειγμα, όταν η έρευνα έχει ως στόχο τη εξαγωγή των γεωμετρικών στοιχείων των ασυνεχειών σε πυριγενές ή μεταμορφωμένο πέτρωμα, τότε είναι απαραίτητο το πρόγραμμα σάρωσης να στοχεύει στην όσο το δυνατόν μεγαλύτερη καθετότητα προς τις επιφάνειες των ασυνεχειών. Αυτό συμβαίνει γιατι συνήθως σε αυτά τα μαζώδη πετρώματα συναντώνται διαφορετικά συστήματα ασυνεχειών και το πρόγραμμα πιθανώς να απαιτεί περισσότερες από μία θέσεις σάρωσης ώστε να θεωρηθεί πλήρες. Αντίθετα, σε περίπτωση όπου το πρανές αποτελείται από στρωματωμένα ιζήματα, υπάρχει το σύστημα ασυνεχειών της στρώσης (bedding) που κυριαρχεί έναντι των άλλων συστημάτων. Έτσι, όταν συμβεί να αντιμετωπίζεται η κατάσταση οριζόντιας στρωμάτωσης όπου ο κυρίαρχος μηχανισμός αστοχίας είναι η εφελκυστικές ανατροπές λόγω υποσκαφών, το πρόγραμμα σάρωσης είναι προτιμότερο να αποτελείται από διαφορετικές θέσεις κατά την κατακόρυφη διάσταση ώστε να είναι δυνατόν να αποτελείται από διαφορετικές θέσεις κατά την κατακόρυφη διάσταση ώστε να είναι δυνατόν να αποτελείται από διαφορετικές θέσεις κατά την κατακόρυφη διάσταση ώστε να είναι δυνατόν να αποτελείται από διαφορετικές θέσεις κατά την κατακόρυφη διάσταση ώστε να είναι δυνατόν να αποτελείται από διαφορετικές θέσεις κατά την κατακόρυφη διάσταση ώστε να είναι δυνατόν να αποτελείται από διαφορετικές θέσεις κατά την κατακόρυφη διάσταση ώστε να είναι δυνατόν να αποτελείται από διαφορετικές θέσεις κατά την



ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

6.1 Εισαγωγή

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ύἡμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

Η συλλογή των δεδομένων LiDAR, όπως και η επεξεργασία αυτών, αποτελούν εργασίες που απαιτούν αυστηρό και μεθοδευμένο σχεδιασμό. Η επιλογή και εγκατάσταση του προγράμματος σάρωσης εξαρτάται κάθε φορά από τις επιτόπου συνθήκες και το αντικείμενο μελέτης, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στόχος του προγράμματος σάρωσης είναι η απόκτηση των κατάλληλων δεδομένων ώστε να εξαχθούν οι επιθυμητές πληροφορίες κατά το επικείμενο στάδιο της επεξεργασίας. Από την άλλη, ο τρόπος προσέγγισης των δεδομένων κατά το στάδιο της επεξεργασίας εξαρτάται μόνο από την ζητούμενη πληροφορία.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία συλλογής των δεδομένων LiDAR και συμβατικών μετρήσεων στο πεδίο καθώς και οι προσεγγίσεις και μέθοδοι επεξεργασίας αυτών με σκοπό την εξαγωγή των επιθυμητών πληροφορίων για τη συγκεκριμένη εργασία. Η εγκατάσταση του προγράμματος σάρωσης καθώς και η μεθολογία επεξεργασίας των νεφών σημείων (point clouds) αποσκοπούν στην εξαγωγή των απαραίτητων στοιχείων προσανατολισμού των ασυνεχειών κάθε οικογένειας (spacing), πυκνότητας των ρωγμώσεων και προσδιορισμού των όγκων των τεμαχών.

Συγκεκριμένα, περιγράφεται το πρόγραμμα σάρωσης που ακολουθήθηκε και δίνονται τα γεωμετρικά και τεχνικά χαρακτηριστικά του επίγειου σαρωτή για την κάθε θέση σάρωσης. Επίσης, παρατίθενται και μετρήσεις ασυνεχειών που αποκτήθηκαν με τις συμβατικές μεθόδους πεδίου προκειμένου να επαληθευτούν τα επεξεργασμένα δεδομένα LiDAR και να εξασφαλιστεί η αντιπροσωπευτική αποτύπωση της περιοχής. Στη συνέχεια, γίνεται λεπτομερής επεξήγηση των μεθόδων που εφαρμόστηκαν κατά την επεξεργασία των δεδομένων LiDAR μέσα από την περιγραφή των αρχών λειτουργείας των εκάστοτε αλγορίθμων.

6.2 Πρόγραμμα σάρωσης και συμβατικές μετρήσεις

Το πρόγραμμα σάρωσης στην περιοχή της Περίσσας είχε ως στόχο την απόκτηση δεδομένων μεγάλης λεπτομέρειας και υψηλής ανάλυσης ώστε να εξαχθούν όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων.

Έτσι, το πρόγραμμα στήθηκε με τέτοιον τρόπο ώστε να επικαλύπτονται από διαφορετικές γωνίες όλα τα επιμέρους πρανή που διαμορφώνονται στην ασβεστολιθική μάζα και να αποφευχθεί το φαινόμενο της έμφραξης (occlusion). Επιπρόσθετα, επιλέχθηκε υψηλή ανάλυση (resolution) ώστε να αποκτηθεί πληροφορία ακόμη και για τις πολύ μικρές δομές. Πολλές φορές, όπως και σε αυτή την περίπτωση, είναι δύσκολο σε κατοικημένες περιοχές να βρεθούν οι ιδανικές θέσεις που παρέχουν την απαραίτητη ορατότητα στον σαρωτή λόγω της ύπαρξης των κτισμάτων. Για τον

λόγο αυτό, όπως και έγινε, είναι αναγκαία η λεπτομερής μελέτη της περιοχής πριν την επίσκεψη ώστε να διασωθεί πολύτιμος χρόνος εργασίας στο πεδίο. Επίσης, αποκτήθηκαν και μετρήσεις με τη συμβατική μέθοδο της γεωλογικής πυξίδας για την ταυτοποίηση των αποτελεσμάτων.

Για την υλοποίηση του προγράμματος χρησιμοποιήθηκε ο επίγειος σαρωτής ILRIS-3D (Optech) που παρέχει δεδομένα XYZRGB.

6.2.1 Θέσεις σάρωσης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στην περιοχή της Περίσσας εκτελέστηκε σάρωση από πέντε (5) θέσεις οι οποίες παρουσιάζονται στην ορθοφωτογραφία που προέκυψε έπειτα από πτήση UAV (Εικόνα 6.1). Η μέση απόσταση μεταξύ σαρωτή και περιοχής ενδιαφέροντος κυμαίνεται μεταξύ 45 και 70 m ενώ η ανάλυση της σάρωσης ήταν της τάξεως των 20 mm (Πίνακας 6.1).



Εικόνα 6.1 Οι θέσεις σάρωσης με την αντίστοιχη περιοχή ενδιαφέροντος (ROI), αποτυπωμένες σε ορθοφωτογραφία που προέκυψε από πτήση UAV (Unmanned Aerial Vehicle)

Οι θέσεις επιλέχθηκαν με κριτήρια την καθετότητα της δέσμης ως προς την περιοχή ενδιαφέροντος αλλά και την όσο το δυνατόν καλύτερη ορατότητα και μεταξύ τους αλληλοεπικάλυψη. Η καλή ορατότητα εξασφαλίστηκε κυρίως από τις θέσεις 1, 2 και 3 όπου η

σάρωση πραγματοποιήθηκε από τις οροφές κτισμάτων και έτσι δεν μεσολαβούσαν ως εμπόδιο άλλες κατασκευές.

Επιπλέον, και οι θέσεις 1 και 2 επικάλυψαν κοινή περιοχή ενδιαφέροντος προσφέροντας πληροφορίες η μία στην άλλη αντίστοιχα για τις περιοχές όπου παρουσιαζόταν έμφραξη (occlusion). Το ίδιο συνέβη και στις θέσεις 3, 4 και 5 για διαφορετική περιοχή ενδιαφέροντος. Η σάρωση από τη θέση 5 είχε πολύ μικρής έκτασης περιοχή ενδιαφέροντος, ωστόσο ήταν πολύ σημαντική διότι πραγματοποιήθηκε συμπληρωματικά για το μικρό πρανές που διαμορφώνεται στο μέσο της συνολικής περιοχής μελέτης καθώς μόνο από εκείνο το σημείο ήταν δυνατόν να επιτευχθεί καθετότητα στη σάρωση.

5 70 1	<u> </u>						
	ΘΕΣΗ 1	ΘΕΣΗ 2	ΘΕΣΗ 3	ΘΕΣΗ 4	ΘΕΣΗ 5		
Κλίση Σαρωτή	7	12	13	17	10		
Απόσταση (m)	70	50	45	64.4	55		
Ανάλυση (mm)	21	20	20.7	22.4	19.8		
Πλάτος Δέσμης (mm)	14	14	14	14	14		

Πίνακας 6.1 Τα χαρακτηριστικά της σάρωσης για τις επιμέρους θέσεις

6.2.2 Τα παραχθέντα δεδομένα

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

σρασ

Από το πρόγραμμα σάρωσης που περιγράφηκε προηγουμένως προέκυψαν πέντε (5) διαφορετικά νέφη σημείων (point clouds) υψηλής ανάλυσης που καλύπτουν ολόκληρη την περιοχή μελέτης. Τα διαφορετικά νέφη σημείων ενώθηκαν και δημιούργησαν ένα σύνολο δεδομένων (dataset) για την περιοχή (Εικόνα 6.2), το οποίο έχει συνολικό όγκο 15.130.969 σημεία με χωρική (XYZ) και χρωματική (RGB) πληροφορία.



Εικόνα 6.2 Το νέφος σημείων (point cloud) 15.130.969 σημείων για ολόκληρη την περιοχή ενδιαφέροντος σε χρωματική κλίμακα του γκρι (grey scale)

Στη συνέχεια, το συνολικό νέφος σημείων χωρίστηκε σε πέντε (5) επιμέρους νέφη τα οποία αντιπροσωπεύουν τα διαφορετικά πρανή τα οποία διαμορφώνει η επιφάνεια του συνολικού πρανούς λόγω της καμπυλότητας που εμφανίζει. Αυτός ο τρόπος προσέγγισης των δεδομένων επιλέχθηκε για να παραχθεί ξεχωριστή πληροφορία για κάθε επιμέρους πρανές καθώς λόγω του διαφορετικού προσανατολισμού του θα απαιτεί και διαφορετικό μοντέλο ανάλυσης της ευστάθειας, βασισμένο στα αποτελέσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία.

6.2.3 Συμβατικές μετρήσεις ασυνεχειών

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

δρασ

Για την επαλήθευση των εξαγόμενων δεδομένων, από την τεχνολογία LiDAR, αποκτήθηκαν χειρωνακτικά μετρήσεις προσανατολισμού των ασυνεχειών με την συμβατική μέθοδο της γεωλογικής πυξίδας. Συνολικά ελήφθησαν 110 μετρήσεις σε όλο το μήκος της βραχομάζας και δημιουργήθηκε το στερεοδιάγραμμα προβολής των πόλων ως αντιπροσωπευτικό ολόκληρης της περιοχής μελέτης. Το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων χρησιμοποιείται αργότερα ως μέτρο σύγκρισης των επιμέρους στερεοδιαγραμμάτων που εξήχθησαν από την ημί-αυτοματοποιημένη διαδικασία για κάθε πρανές. Στην Εικόνα 6.3 παρουσιάζεται η πυκνότητα των πόλων των μετρήσεων και στο Πίνακας 6.2 τα στοιχεία όλων των μετρήσεων.



Εικόνα 6.3 Στερεοδιάγραμμα προβολής της πυκνότητας των πόλων των 110 μετρήσεων που ελήφθησαν με τη χρήση γεωλογικής πυξίδας

(internet	ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"												
) h	Πινακας 6. Dip	<u>2 Οι 110 μετρ</u> Dip Dir	οησεις προσ Dip	σανατολισμού Dip Dir	των ασυνε Dip	χειών με τη χρ Dip Dir	νήση γεωλο Dip	γικής πυξίδαα Dip Dir					
0	54	182	35	. 64	87	89	15	204					
	52	165	40	172	85	116	85	153					
	56	183	51	327	20	70	53	90					
	51	117	87	304	18	91	47	156					
	76	145	56	319	16	90	55	92					
	31	122	53	185	21	34	25	130					
	74	153	38	162	35	35	87	300					
	86	85	41	116	68	33	63	232					
	58	80	85	179	57	223	37	224					
	18	321	52	128	59	124	33	241					
	63	145	37	53	74	221	34	234					
	43	309	26	194	79	96	36	235					
	57	38	25	186	83	162	64	290					
	90	222	48	191	48	223	67	280					
	13	247	60	215	84	151	59	73					
	45	50	57	212	41	69	71	324					
	60	25	55	206	33	86	56	115					
	41	52	74	209	87	154	55	33					
	50	51	65	220	79	228	44	235					
	43	288	63	227	38	84	82	121					
	48	210	59	191	42	202							
	89	223	64	201	71	90							
	85	144	64	212	53	52							
	40	190	76	232	52	219							
	27	102	88	84	14	237							
	74	201	83	262	16	249							
	41	217	88	313	67	7							
	35	192	82	108	81	138							
	58	352	78	130	70	226							
	89	67	64	130	75	113							

6.3 Μεθοδολογία επεξεργασίας των δεδομένων

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των δεδομένων είναι προς την κατεύθυνση της εξαγωγής των απαραίτητων παραμέτρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων. Έτσι, αποσκοπεί αρχικά στην εκτίμηση του προσανατολισμού των επιμέρους πρανών που συνθέτουν την ασβεστολιθική βραχομάζα της Περίσσας καθώς και των οικογενειών των ασυνεχειών που απαντώνται σε αυτά.

Στη συνέχεια, για κάθε οικογένεια ασυνεχειών εκτιμάται η απόσταση μεταξύ των επιφανειών που την απαρτίζουν (spacing) και με βάση αυτές τις γεωμετρικές παραμέτρους υπολογίζεται η κατανομή των όγκων των τεμαχών που διαμορφώνονται. Για καθεμία από τις παραπάνω παραμέτρους κατασκευάζεται χάρτης της χωρικής κατανομής της επάνω στη βραχομάζα, προσδίδοντας έτσι την χωρική πληροφορία στην οποία μπορούν να βασιστούν οι μετέπειτα εκτιμήσεις και αναλύσεις ώστε να παρέχουν χωρικά στοχευμένο αποτέλεσμα και όχι απλά μια εκτίμηση της επιδεκτικότητας για το κάθε πρανές σαν ενιαία μονάδα.

Η υλοποίηση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας έγινε στα περιβάλλοντα των λογισμικών CloudCompare και ArcMap καθώς και μέσω ειδικά σχεδιασμένων αλγορίθμων σε περιβάλλον Matlab.

6.3.1 Καθαρισμός (filtering)

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Για την ακριβέστερη επεξεργασία ενός νέφους σημείων (point cloud) είναι απαραίτητο να προηγηθεί το στάδιο του καθαρισμού. Με την διαδικασία αυτή απομακρύνονται τυχόν θόρυβοι που μπορεί να έχουν καταγραφεί από τη σάρωση. Τέτοιες πηγές θορύβου είναι η σκόνη στην ατμόσφαιρα, η υγρασία, η βλάστηση, τα αυτοκίνητα, τα σπίτια, οι άνθρωποι κ.α.

Στην συγκεκριμένη περιοχή μελέτης το πρανές εμφανίζεται σχεδόν ολοκληρωτικά απαλλαγμένο από βλάστηση, ενώ δεν παρατηρήθηκε άλλη πηγή θορύβου στα δεδομένα. Έτσι, το στάδιο του καθαρισμού περιλάμβανε την χειροκίνητη αποκοπή των περιβαλλόντων δομών, απομονώνοντας εύκολα και γρήγορα μόνο την ασβεστολιθική βραχομάζα. Από το στάδιο αυτό προέκυψε το νέφος σημείων της Εικόνα 6.2.

6.3.2 Γεωαναφορά (registration)

Ένα από τα πιο βασικά στάδια της επεξεργασίας ενός νέφους σημείων είναι η γεωαναφορά του. Όποια αποτελέσματα, που αφορούν σε προσανατολισμό δομών, προκύψουν σε επόμενα στάδια θα είναι στηριγμένα στην αρχική γεωαναφορά του συνόλου των δεδομένων. Σε αρκετές περιπτώσεις οι σαρωτές LiDAR είναι εφοδιασμένοι με σύστημα GPS και τα δεδομένα που παρέχουν είναι από την αρχή εντεταγμένα σε κάποιο γεωγραφικό σύστημα συντεταγμένων.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση ο σαρωτής δεν παρέχει τέτοια πληροφορία και έτσι η γεωαναφορά βασίζεται σε τοπογραφικούς στόχους που τοποθετήθηκαν σε διάφορα σημεία επάνω στο πρανές και υπολογίστηκαν οι απόλυτες συντεταγμένες τους από γεωδαιτικό σταθμό. Οι στόχοι ήταν ευδιάκριτοι στα νέφη σημείων λόγω της μεγάλης ανάλυσης της σάρωσης και έτσι εντοπίστηκαν και γεωαναφέρθηκαν με τις γνωστές πλέον συντεταγμένες.

Στην Εικόνα 6.4 παρουσιάζεται το συνολικό νέφος σημείων που παράχθηκε για την περιοχή μετά το στάδιο της γεωαναφοράς. Επιπλέον, στην Εικόνα 1.1**Error! Reference source not found.** απεικονίζεται ακριβώς η ίδια περιοχή από λήψη Google Earth και εύκολα διαπιστώνεται η πολύ καλή γεωαναφορά των δεδομένων μέσα από την σύγκριση των δύο εικόνων, με τα πρανή να έχουν γενική διεύθυνση προς NΔ – NNΔ.



Εικόνα 6.4 Το γεωαναφερμένο συνολικό νέφος σημείων

6.3.3 Υπολογισμός προσανατολισμού πρανών και ασυνεχειών

Στο σημείο αυτο, το συνολικό νέφος σημείων χωρίστηκε σε πέντε (5) επιμέρους νέφη σημείων αντίστοιχα για τα επιμέρους πρανή που διαμορφώνονται κατά μήκος της πλαγιάς (Εικόνα 6.4). Επομένως, για κάθε ξεχωριστό νέφος υπολογίστηκε ο προσανατολισμός, ως ο προσανατολισμός του επιπέδου ελαχίστων τετραγώνων που υπολογίστηκε για το εκάστοτε νέφος σημείων.

Για τον εκτίμηση των οικογενειών των ασυνεχειών και τον υπολογισμό του προσανατολισμού τους ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που προτείνεται από τους Riquelme *et al.* (2014). Αναλυτικά, για κάθε σημείο εντοπίζονται τα k κοντινότερα γειτονικά του σημεία (knn nearest neighbors) για καθορισμένη τιμή αναζητούμενων σημείων. Η διαδικασία αναζήτησης των κοντινότερων γειτονικών σημείων μπορεί να πραγματοποιηθεί και με καθορισμένη απόσταση αναζήτησης, ωστόσο έχει αποδειχθεί (M. J. Lato et al., 2010) ότι αυτή η προσέγγιση οδηγεί σε κάποια αμφιλεγόμενα συμπεράσματα λόγω της ετερογένειας στην πυκνότητα των σημείων κατά μήκος του νέφους. Έτσι, έχουν πλέον δημιουργηθεί, για κάθε σημείο, σύνολα των k κοντινότερων γειτονικών σημείων.

Το επόμενο βήμα είναι να πραγματοποιηθεί έλεγχος συνεπιπεδότητας (coplanarity test) για κάθε σύνολο γειτονικών σημείων ως προς το αρχικό σημείο από το οποίο προέκυψαν. Ο έλεγχος στηρίζεται στις αρχές της Principal Component Analysis (PCA) και τα σύνολα που αποδεικνύονται συνεπίπεδα συνεχίζουν στη διαδικασία ενώ τα υπόλοιπα αγνοούνται. Συνεπώς, από το βήμα αυτό έχουν εντοπιστεί τα σημεία εκείνα που είναι συνεπίπεδα με τα k γειτονικά τους.

Στο τρίτο βήμα, υπολογίζεται ο προσανατολισμός των συνόλων σημείων που έχουν προχωρήσει από τον έλεγχο συνεπιπεδότητας του προηγούμενου βήματος. Αυτό επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό του κανονικού διανύσματος (normal vector) του επιπέδου που αντιπροσωπεύει το κάθε σύνολο σημείων. Έτσι, για το καθένα από τα συνεπίπεδα σύνολα σημείων υπολογίζεται πρώτα το βέλτιστο επίπεδο, από την εξίσωση:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \tag{2}$$

Οι συντελεστές A, B και C ορίζουν το κανονικό διάνυσμα του επιπέδου στον χώρο ενώ ο D αντιπροσωπεύει την κατακόρυφη απόσταση από την αρχή των αξόνων, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι το σημείο αναφοράς του γεωγραφικού συστήματος αναφοράς του νέφους σημείων και θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό άλλης γεωμετρικής παραμέτρου σε επόμενο βήμα.

Επομένως, οι προσανατολισμοί των επιπέδων που προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία αντιπροσωπεύουν μετρήσεις ασυνεχειών που, σε ιδανικές συνθήκες, θα μπορούσαν να έχουν αποκτηθεί με γεωλογική πυξίδα. Η προσέγγιση λοιπόν που ακολουθεί είναι η προβολή των επιπέδων σε στερεοδιάγραμμα και η εκτίμηση της πυκνότητας των πόλων των επιπέδων κατά KDE (Kernel Density Estimation) ώστε να προκύψουν οι κύριες οικογένειες ασυνεχειών.

Το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτού του βήματος είναι η δημιουργία ενός νέου νέφους σημείων (point cloud) με επιπρόσθετο χαρακτηριστικό για κάθε σημείο τον δείκτη της οικογένειας ασυνεχειών (Js) στην οποία ανήκει. Δηλαδή, δεδομένα της μορφής XYZRGBJs πλέον. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τα πέντε (5) επιμέρους πρανή.

6.3.4 Υπολογισμός της απόστασης των ασυνεχειών (spacing)

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Για τον υπολογισμό της απόστασης των ασυνεχειών, είναι απαραίτητο να εντοπιστούν οι διαφορετικές επιφάνειες που συνθέτουν τη κάθε οικογένεια ασυνεχειών. Ο υπολογισμός αυτός επιτυγχάνεται με τη διεξαγωγή ανάλυσης κατά συστάδες (Cluster Analysis) στα σημεία που συνθέτουν κάθε οικογένεια ασυνεχειών. Δηλαδή, η ανάλυση στηρίζεται στο χαρακτηριστικό Js που προστέθηκε σε κάθε σημείο από προηγούμενο στάδιο επεξεργασίας.

Η ανάλυση κατά συστάδες (Cluster Analysis) είναι πολύ πιθανό να εντοπίσει και συστάδες (clusters) που αντιστοιχούν σε πολύ μικρές επιφάνειες και επομένως απαρτίζονται από πολύ λιγότερα σημεία συγκριτικά με τις υπόλοιπες συστάδες του νέφους σημείων. Έτσι, εφαρμόζεται ένα φίλτρο στο αποτέλεσμα της ανάλυσης που ορίζεται από τον χρήστη ο ελάχιστος αριθμός σημείων για τον οποίο θα γίνεται αποδεκτή μια συστάδα και θα συνεχίζει στη διαδικασία. Με το πέρας της διαδικασίας προκύπτει ένα νέο νέφος σημείων το οποίο αποτελείτε από όλα τα σημεία που αντιστοιχούν σε συστάδα και κατά συνέπεια σε επιφάνεια. Το αρχείο αυτό παρέχει δεδομένα της μορφής XYZRGBJsJc, όπου Jc είναι ο δείκτης της συστάδας (cluster) στην οποία ανήκει το σημείο.

Για την μαθηματική αποτύπωση της κάθε συστάδας – επιφάνειας, ώστε να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της απόστασης των ασυνεχειών, υπολογίζεται το βέλτιστο επίπεδο σύμφωνα με την εξίσωση (2). Σε αυτό το στάδιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως παράμετροι Α, Β και C, της

εξίσωσης του επιπέδου, οι τιμές που αντιστοιχούν στο επίπεδο της οικογένειας στην οποία ανήκουν και προέκυψαν από το στάδιο υπολογισμού του προσανατολισμού των οικογενειών των ασυνεχειών στη παράγραφο 6.3.3. Ως αποτέλεσμα προκύπτει ακόμα ένα νέο νέφος σημείων με επιπρόσθετες πληροφορίες, για κάθε σημείο, τους παράγοντες A, B, C και D της εξίσωσης του επιπέδου της συστάδας στην οποία ανήκουν. Δεδομένου όμως ότι έχει χρησιμοποιηθεί το κανονικό διάνυσμα της οικογένειας ασυνεχειών, οι τιμές A, B και C είναι κοινές για τα σημεία της ίδιας οικογένειας τα οποία όμως ανήκουν σε διαφορετικές συστάδες. Η τιμή που διακρίνει γεωμετρικά τις επιμέρους συστάδες – επιφάνειες είναι ο παράγοντας D.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τα δεδομένα είναι πλέον κατάλληλα διαμορφωμένα ώστε να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της απόστασης των ασυνεχειών. Στη συνέχεια της διαδικασίας, απομονώνονται τα σημεία που ανήκουν σε κάθε οικογένεια ασυνεχειών με βάση τον δείκτη της οικογένειας (Js) και ακολουθείται, ξεχωριστά για κάθε οικογένεια ασυνεχειών, η μεθοδολογία που ακολουθεί τις προσεγγίσεις των Slob *et al.* (2010) και Riquelme, Abellán and Tomás (2015) για εμμένουσες ασυνέχειες. Επομένως, για κάθε νέο σύνολο σημείων, εντοπίζονται οι μοναδικές τιμές του παράγοντα D και ταξινομούνται σε αύξουσα ή φθίνουσα σειρά. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η απόλυτη διαφορά στην τιμή D μεταξύ διαδοχικών σημείων καθώς η τιμή D αντιπροσωπεύει την απόσταση της συστάδας (cluster) από το σημείο αναφοράς του γεωγραφικού συστήματος συντεταγμένων (Εικόνα 6.5). Έτσι οι απόλυτες διαφορές που προκύπτουν αποτελούν τη κατανομή της απόστασης των ασυνεχειών (spacing) στην οικογένεια που εκπροσωπεί το εκάστοτε σύνολο δεδομένων και μπορεί να επεξεργαστεί στατιστικά με οποιοδήποτε τρόπο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τα πέντε (5) επιμέρους πρανή και αφού ενωθούν ξανά με κοινό στοιχείο τις τιμές D, στο νέο νέφος σημείων, υπάρχει πλέον πληροφορία spacing για κάθε σημείο.



Εικόνα 6.5 Σχηματική απεικόνιση της σύνδεσης μεταξύ της θέσης των συστάδων (clusters) και της απόστασης των ασυνεχειών (spacing) για εμμένουσες ασυνέχειες (Πηγή: Riquelme, Abellán and Tomás, 2015)

6.3.5 Κατασκευή χάρτη πυκνότητας των ρωγμώσεων (fracture density)

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

δράς

Για την κατασκευή του συγκεκριμένου χάρτη χρησιμοποιούνται τα νέφη σημείων που δημιουργήθηκαν μετά την ανάλυση κατά συστάδες (Cluster Analysis) στη παράγραφο 6.3.4. Πρέπει να αναφερθεί ότι τα πέντε (5) επιμέρους νέφη σημείων ενώνονται σε ένα ενιαίο για το συγκεκριμένο στάδιο της επεξεργασίας. Εν συνεχεία, δημιουργείται ένας κάναβος με διαστάσεις 1x1 m και χωρική αναφορά ίδια με το ενιαίο νέφος σημείων. Για κάθε κελί του κανάβου εντοπίζονται τα σημεία τα οποία αντιστοιχούν χωρικά σε εκείνο και κατόπιν βρίσκονται οι μοναδικές τιμές των δεικτών των συστάδων (Jc) που περιέχει κάθε κελί σύμφωνα με τα σημεία που του αναλογούν. Υπολογίζεται το πλήθος των μοναδικών τιμών που αντιστοιχεί σε κάθε κελί και έτσι, από το βήμα αυτό προκύπτει ένας χάρτης που εξάγει ως πληροφορία το πλήθος των διαφορετικών τεκτονικών δομών που απαντώνται ανά τετραγωνικό μέτρο κατά μήκος ολόκληρης της πλαγιάς.

6.3.6 Κατασκευή χαρτών της απόστασης των ασυνεχειών (spacing)

Προκειμένου να κατασκευαστούν αυτοί οι χάρτες, τα τελικά νέφη σημείων που παράχθηκαν, για κάθε οικογένεια ασυνεχειών, από το στάδιο επεξεργασίας της παραγράφου 6.3.4, ενώνονται σε ενιαία νέφη και έτσι δημιουργούνται νέα σύνολα δεδομένων (ένα για κάθε οικογένεια ασυνεχειών). Για καθένα από αυτά δημιουργείται ένα κάναβος διαστάσεων 0.25x0.25 m και χωρική αναφορά ίδια με τα ενιαία νέφη σημείων. Κάθε κελί του κανάβου παίρνει την τιμή της απόστασης των ασυνεχειών (spacing) που αντιστοιχεί στο κοντινότερό του σημείο, μεταξύ μιας ακτίνας αναζήτησης ίσης με την μέγιστη τιμή spacing που εντοπίζεται στην συγκεκριμένη οικογένεια ασυνεχειών. Με την επιλογή αυτής της τιμής στην ακτίνα αναζήτησης, αποφεύγονται ακραίες τιμές στα περιθώρια των χαρτών, καθώς κρίνεται προτιμότερη τυχόν έλλειψη πληροφορίας στα όρια από την απόκτηση λανθασμένης ακραίας πληροφορίας.

Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η παραγωγή χαρτών που εξάγουν την πληροφορία της χωρικής κατανομής και μεταβολής της απόστασης των ασυνεχειών κατά μήκος της συνολικής πλαγιάς για κάθε οικογένεια ασυνεχειών ξεχωριστά.

6.3.7 Εκτίμηση των όγκων των τεμαχών και κατασκευή χάρτη χωρικής κατανομής

Ο υπολογισμός των όγκων των τεμαχών, που διαμορφώνονται από τις οικογένειες των ασυνεχειών που απαντώνται στη βραχομάζα, βασίζεται στους χάρτες κατανομής της απόστασης των ασυνεχειών που δημιουργήθηκαν στο στάδιο επεξεργασίας της παραγράφου 6.3.6. Συγκεκριμένα, οι επιμέρους χάρτες συσχετίζονται χωρικά μεταξύ τους και πλέον σε κάθε κελί του κανάβου αντιστοιχεί ξεχωριστή πληροφορία spacing για κάθε οικογένεια. Δεδομένου ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση εντοπίστηκαν τρία (3) συστήματα ασυνεχειών, ο όγκος υπολογίστηκε κατά Cai *et al.* (2004) σύμφωνα με την εξίσωση:

$$V = \frac{Sa * Sb * Sc}{\sin(N a - b) * \sin(N a - c) * \sin(N b - c)}$$
(3)

όπου, οι μεταβλητές Sa, Sb και Sc αντιπροσωπεύουν την τιμή της απόστασης των ασυνεχειών (spacing) κάθε οικογένειας για το εκάστοτε κελί και οι μεταβλητές N a-b, N a-c και N b-c αντιπροσωπεύουν τις γωνίες μεταξύ των κανονικών διανυσμάτων των επιμέρους οικογενειών.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τα κανονικά διανύσματα των διαφορετικών οικογενειών βρέθηκαν σε προηγούμενο βήμα (Παράγραφος 6.3.3) και οι γωνίες που σχηματίζουν μεταξύ τους υπολογίζονται εύκολα από κοινές εξισώσεις αναλυτικής γεωμετρίας χώρου.

Τελικό αποτέλεσμα της επεξεργασίας των συγκεκριμένων δεδομένων LiDAR είναι η εκτίμηση των όγκων που διαμορφώνονται στην βραχομάζα και η κατασκευή χάρτη χωρικής κατανομής και μεταβολής των επιτόπου όγκων.


7 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

7.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από όλα τα στάδια της επεξεργασίας των δεδομένων LiDAR, όπως αυτά περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, με στόχο τον χαρακτηρισμό της βραχομάζας σύμφωνα με βασικές παραμέτρους που συντελούν στην εκτίμηση της επιδεκτικότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων.

Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα κύρια συστήματα ασυνεχειών που εντοπίστηκαν από την ημίαυτοματοποιημένη μεθοδολογία επεξεργασίας των νεφών σημείων (point cloud) και συγκρίνονται με συμβατικές μετρήσεις που λήφθηκαν στο πεδίο. Επίσης, παρατίθενται στατιστικά στοιχεία της κατανομής της απόστασης των ασυνεχειών κάθε οικογένειας κατά μήκος της πλαγιάς αλλά και οι σχετικοί χάρτες. Έπειτα, ακολουθεί η χωρική κατανομή των διαμορφωθέντων όγκων από το τελευταίο βήμα της επεξεργασίας, η οποία παρουσιάζεται στον αντίστοιχο χάρτη και σε στατιστικά διαγράμματα.

Τέλος, αυτό που έχει ιδιαίτερη σημασία για τον γενικότερο χαρακτηρισμό της βραχομάζας, είναι η ταξινόμηση κατά το σύστημα GSI (Marinos, Marinos, & Hoek, 2005) σύμφωνα με τις προσεγγίσεις των Hoek, Carter and Diederichs (2013). Η ταξινόμηση πραγματοποιήθηκε με την αξιοποίηση του χάρτη πυκνότητας των ρωγμώσεων (fracture density) που προέκυψε από την επεξεργασία.

7.2 Κύριες οικογένειες ασυνεχειών

Από το στάδιο επεξεργασίας της παραγράφου 6.3.3 εντοπίστηκαν τρία (3) κύρια συστήματα ασυνεχειών να διατρέχουν τα πρανή (Πίνακας 7.1). Και στα πέντε (5) επιμέρους πρανή είναι σαφές ότι αυτά είναι τα κυρίαρχα συστήματα, ωστόσο παρατηρούνται μεταβολές ως προς το μεταξύ τους επικρατέστερο ανάλογα με τη διεύθυνση κλίσης του πρανούς. Αυτό συμβαίνει γιατί στις διαφορετικές διευθύνσεις των πρανών, όπως είναι λογικό, είναι διαφορετικές οι επιφάνειες που προσφέρουν μεγαλύτερο επίπεδο στόχου στην φωτεινή δέσμη του σαρωτή. Στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 7.1 και Εικόνα 7.2) παρουσιάζονται τα κύρια συστήματα ασυνεχειών όπως εντοπίζονται στο νέφος σημείων και στα παραχθέντα στερεοδιαγράμματα διαδοχικά. Είναι εύκολα αντιληπτό ότι και τα τρία (3) συστήματα ασυνεχειών εμφανίζουν σταθερά παρόμοιο προσανατολισμό μεταξύ των διαφορετικών πρανών αλλά και των συνολικών μετρήσεων με τη γεωλογική πυξίδα. Οι διαφοροποιήσεις στο μέσο επίπεδο που υπάργουν ανάμεσα στην ίδια οικογένεια οφείλονται στην πυκνότητα των μετρήσεων για την συγκεκριμένη οικογένεια, ανάλογα με το ποιούς προσανατολισμούς αποκαλύπτει κάθε φορά περισσότερο ο προσανατολισμός του εκάστοτε πρανούς. Για παράδειγμα, στα πρανή Α και C που κλίνουν προς νότο, αποκαλύπτονται περισσότερο οι επιφάνειες της οικογένειας 3 που κλινει γενικά προς το ΝΑ τεταρτημόριο του στερεοδιργάμματος. Το ίδιο συμβαίνει και με τις επιμέρους επιφάνειες κάθε οικογένειας.





Εικόνα 7.1 Τα κύρια συστήματα ασυνεχειών όπως εντοπίζονται στο νέφος σημείων. Με μπλε χρώμα απεικονίζεται το Set 1, με πράσινο το Set 2 και με κόκκινο το Set 3



Εικόνα 7.2 Στερεοδιαγράμματα προβολής των κύριων οικογενειών ασυνεχειών για κάθε επιμέρους πρανές με βάση τα δεδομένα LiDAR και τις συμβατικές μετρήσεις (πυξίδα) για το συνολικό πρανές

7.3 Απόσταση των ασυνεχειών (spacing)

Σύμφωνα με την μεθοδολογία που περιγράφεται στην παράγραφο 6.3.4, υπολογίστηκε η απόσταση των ασυνεχειών για όλα τα συστήματα που συναντώνται στο πρανές. Όπως φαίνεται στα παρακάτω ιστογράμματα σχετικής συχνότητας (Διάγραμμα 7.1, Διάγραμμα 7.2 και Διάγραμμα 7.3), οι τιμές που κυριαρχούν δεν υπερβαίνουν τα 0.5 m ενώ ακολουθούν αυτές μεταξύ 0.5 και 1 m με αρκετή διαφορά στη σχετική συχνότητα εμφάνισής τους. Οι τιμές γενικά δεν ξεπερνάνε τα 3 m, πλην κάποιον εξαιρέσεων με πολύ μικρή εμφάνιση στις οικογένειες 2 και 3.

Συγκεκριμένα, για την οικογένεια 1 (Set 1), πρώτη σε σχετική συχνότητα εμφάνισης είναι η κατηγορία τιμών έως 0.5 m με ποσοστό 59.6%, ακολουθούν οι τιμές 0.5 – 1 m με ποσοστό 24.7% και κάτω από το 10% είναι οι κατηγορίες 1 – 1.5 και 1.5 – 2 m. Στην οικογένεια 2 (Set 2)

υπερτερούν σαφώς οι τιμές έως 0.5 m με ποσοστό 76%, ακολουθούν με 17.4% οι τιμές 0.5 - 1 m, κάτω από το 5% βρίσκονται αυτές μέχρι και τα 3 m ενώ αμελητέα είναι η εμφάνιση τιμών από 3 μέχρι 5 m. Τέλος, στην οικογένεια 3 (Set 3), με σχετική συχνότητα εμφάνισης 49.6% παρατηρούνται αποστάσεις ασυνεχειών το πολύ 0.5 m και με 31.5% από 0.5 έως 1 m. Οι υπόλοιπες τιμές μέχρι τα 5 m αντιστοιχούν συνολικά σε ποσοστό κάτω από 20% και αυτές της κατηγορίας 5 - 6 m έχουν ανεπαίσθητη παρουσία.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

δρασ

Χωρικά, η οικογένεια 1 παρουσιάζει σχεδόν ισόποση κατανομή της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών με τιμές μεταξύ < 0.5 - 2 m με μία μόνο περιοχή στο μέσο του πρανούς Ε να έχει τιμές 2 – 3 m. Η οικογένεια 2 παρουσιάζει σε όλη την έκταση των πρανών τιμές < 0.5 - 1.5 m, με εξαίρεση μια διαγώνια ζώνη με τιμές 1.5 - 2 m στο πρανές D και δύο πολύ μικρές κατανομές 3 – 4 m και 5 – 6 m στα ανώτερα του πρανούς B. Την μεγαλύτερη ποικιλία παρουσιάζει η οικογένεια 3, με σημαντικές συγκεντρώσεις τιμών 3 – 5 m σε τμήματα των πρανών D και Ε αλλά και μία της τάξεως των 5 – 6 m στο μέσο του πρανούς Ε. Ακόμη, στο πρανές A υπάρχει μια κατακόρυφη ζώνη με τιμές 2 – 3 m ενώ οι υπόλοιπες τιμές στο σύνολο των πανών είναι ισόποσα κατανεμημένες μεταξύ των τιμών < 0.5 - 1 m. Γενικώς, τα πρανή D και Ε παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών κάθε οικογένειας σε σχέση με τα πρανή A, B και C.

-			N N			
	Set 1		Set 2		Set 3	
Πρανές	Κλίση /	Μέση απόσταση	Κλίση /	Μέση απόσταση	Κλίση /	Μέση απόσταση
	Διεύθυνση κλίσης	ασυνεχειών (m)	Διεύθυνση κλίσης	ασυνεχειών (m)	Διεύθυνση κλίσης	ασυνεχειών (m)
A : 52/187	34 / 183	0.91	87 / 022	0.68	71 / 154	0.65
B : 66/259	61/238	0.73	79 / 056	0.41	71 / 166	0.85
C : 76/157	76 / 215	0.36	49 / 062	0.51	74 / 155	0.64
D : 72/202	70 / 182	1.23	83 / 034	0.6	69 / 096	0.93
E : 71/191	50 189	0.82	75 / 045	0.52	57 / 131	1.26
Πυξίδα	55 / 213	-	45 / 060	-	74 / 133	-

Πίνακας 7.1 Κύρια συστήματα ασυνεχειών και μέση απόσταση (spacing)



Διάγραμμα 7.1 Ιστόγραμμα σχετικής συχνότητας εμφάνισης της απόστασης των ασυνεχειών της οικογένειας 1 (Set 1)



Διάγραμμα 7.2 Ιστόγραμμα σχετικής συχνότητας εμφάνισης της απόστασης των ασυνεχειών της οικογένειας 2 (Set 2)



Διάγραμμα 7.3 Ιστόγραμμα σχετικής συχνότητας εμφάνισης της απόστασης των ασυνεχειών της οικογένειας 3 (Set 3)







Επειτα από τον υπολογισμό της χωρικής κατανομής των όγκων, σύμφωνα με τη μεθοδολογία της παραγράφου 6.3.7, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα: Από τα τρία (3) κύρια συστήματα ασυνεχειών διαμορφώνονται τεμάχη της τάξεως των 2 έως 4 m³ κατά κύριο λόγο, ενώ τοπικά στα πρανή Α και D εντοπίζονται και τιμές που προσεγγίζουν τα 10 m³ (Εικόνα 7.5). Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο αν αναλογιστεί κανείς τις τιμές της απόστασης των ασυνεχειών που παρουσιάστηκαν προηγουμένως και είναι εύκολα αντιληπτό στην Εικόνα 7.4 συγκριτικά με το μέγεθος του ανθρώπου. Όμως, σε συγκεκριμένα σημεία, κυρίως στις περιοχές όπου αυξάνονται σημαντικά σχηματίζοντας τεμάχη μεγαλύτερα των 15 m³.



Εικόνα 7.4 Αποτύπωση περιοχής στη βάση του πρανούς D. Απόσπασμα κατά την υπαίθρια συλλογή στοιχείων

Τέλος, εντύπωση προκαλούν δύο μεμονωμένες τιμές όγκων, που ξεπερνούν τα 20 m³, στα πρανή D και E, οι οποίες πιθανώς οφείλονται σε σκιασμένες ή υγρές περιοχές του πρανούς όπου δεν πραγματοποιήθηκε επιστροφή του εκπεμπόμενου παλμού από τον σαρωτή και έτσι δεν υπήρχε καταγραφή κάποιας επιφάνειας που να οριοθετεί επιμέρους το τέμαχος.



Block volume (cub. m)





Εικόνα 7.5 Χάρτης χωρικής κατανομής των όγκων

Χαρακτηριστικό είναι το ιστόγραμμα σχετικής συχνότητας εμφάνισης των όγκων (Διάγραμμα 7.4) όπου φαίνεται ξεκάθαρα να κυριαρχούν οι τιμές μέχρι 4 m³ συνθέτοντας σχεδόν το 80% των συνολικών εμφανίσεων. Επιμέρους, η μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης ανήκει στην κατηγορία 1 -2 m³ με ποσοστό 34.3% ενώ πάνω από τα 8 m³ η ποσότητες είναι αμελητέες και έχουν ενδιαφέρον μόνο για τοπική αντιμετώπιση μεμονωμένων τεμαχών (βλ. Εικόνα 7.5) και όχι της πλαγιάς ως σύνολο.



Διάγραμμα 7.4 Ιστόγραμμα σχετικής συχνότητας εμφάνισης των διαμορφωθέντων όγκων

7.5 Χαρακτηρισμός της βραχομάζας

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Ο χαρακτηρισμός της βραχομάζας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του ποσοτικοποιημένου διαγράμματος GSI (Hoek et al., 2013) . Για την εκτίμηση της παραμέτρου RQD (Rock Quality Degree) χρησιμοποιήθηκε η συσχέτιση της με την πυκνότητα των ασυνεχειών που προτείνεται στο σύστημα ταξινόμησης Q (Nick Barton & Grimstad, 2014) και στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ο χάρτης πυκνότητας των ρωγμώσεων (fracture density map) (Εικόνα 7.6) που κατασκευάστηκε στο βήμα επεξεργασίας της παραγράφου 6.3.5. Επιπλέον, η εκτίμηση της παραμέτρου JCond₈₉ έγινε σύμφωνα με το σύστημα RMR (Bieniawski, 1973) και η τιμή που επιλέχθηκε είναι 25 σύμφωνα με τις επιτόπου παρατηρήσεις και μετρήσεις τραχύτητας (Εικόνα 7.9).







0 5 10 20 Meters

Εικόνα 7.6 Χάρτης πυκνότητας των ρωγμώσεων (fracture density)





RQD value

RQD 90-100 %
RQD 80-90 %
RQD 70-80 %
RQD 60-70 %
RQD 50-60 %

Scale 1:800

Εικόνα 7.7 Χάρτης χωρικής κατανομής της παραμέτρου RQD

Όπως φαίνεται στον χάρτη χωρικής κατανομής της ποσότητας RQD, οι τιμές είναι υψηλές και πολύ σπάνια πέφτουν κάτω από το 70% ενώ κυρίως είναι της τάξεως του 90%. Αυτό είναι απολύτως λογικό και αντιπροσωπευτικό για την συγκεκριμένη βραχομάζα καθώς δεν παρατηρήθηκαν σχεδόν καθόλου τιμές απόστασης των ασυνεχειών (spacing) κάτω από 10 cm.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Ο τελικός χαρακτηρισμός της βραχομάζας με το σύστημα GSI έδειξε πως πρόκειται για βραχομάζα αρκετά καλής ποιότητας καθώς η συχνότερα παρατηρούμενη και πιο αντιπροσωπευτική για το σύνολο της τιμή ανέρχεται στο 70 – 80. Η τιμή αυτή χαρακτηρίζει την βραχομάζα ως τεμαχώδη με καλή έως πολύ καλή ποιότητα ασυνεχειών. Όμως, λαμβάνοντας υπόψη της ελάχιστες τιμές RQD που σημειώνονται στο καθένα από τα πέντε (5) επιμέρους πρανή, φαίνεται ότι υπάρχει κάποιο εύρος των τιμών του GSI στο κάθε πρανές, του οποίου η χωρική κατανομή είναι ανάλογη αυτής του RQD. Έτσι, στα πρανή B και E υπάρχουν περιοχές με τιμή GSI 65 – 70, στα πρανή A και D 60 – 65 και στο πρανές C 55 – 65.

Στην Εικόνα 7.8 φαίνεται η προβολή των τιμών στο ποσοτικοποιημένο διάγραμμα GSI (Hoek et al., 2013). Με το μπλε χρώμα απεικονίζονται οι ελάχιστες τιμές που απαντώνται τοπικά στα επιμέρους πρανή ενώ με το πορτοκαλί χρώμα σημειώνεται η επικρατέστερη και αντιπροσωπευτική τιμή χαρακτηρισμού της βραχομάζας στο σύνολό της.



Εικόνα 7.8 Ταξινόμηση της βραχομάζας κατά GSI (Πηγή: Hoek et al., 2013). Με μπλε χρώμα απεικονίζονται οι ελάχιστες τιμές για τα επιμέρους πρανές και με πορτοκαλί η μέση γενική τιμή χαρακτηρισμού της βραχομάζας στο σύνολο

7.6 Δυνητικές αστοχίες

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Από τα στοιχεία προσανατολισμού όλων των κύριων συστημάτων ασυνεχειών που εντοπίστηκαν στα νέφη σημείων (point clouds) και από τον προσανατολισμό των πέντε (5) επιμέρους πρανών, εκτιμήθηκαν οι δυνητικές αστοχίες για το καθένα. Η γωνία τριβής με την οποία πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος προήλθε από την επίλυση του κριτηρίου Barton – Bantis με τις εξής παραμέτρους:

JRC	JCS (MPa)	ф ь (°)	
8	115	30	

Όπου, οι παράμετροι JRC και JCS υπολογίστηκαν έπειτα από δεδομένα που αποκτήθηκαν από την υπαίθρια επιτόπου εργασία με τη χρήση σφύρας Schmidt και προφιλόμετρων (Εικόνα 7.9). Ενώ η γωνία εσωτερικής τριβής φ_b λήφθηκε βιβλιογραφικά 30° από τους Perazzelli, Rotonda and Graziani (2009).

Αναλυτικά, από τις μετρήσεις με τη σφύρα Schmidt, αφαιρώντας τις δυο μικρότερες, προέκυψε μέσος όρος 43 κτύποι που αντιστοιχούν σε 115 MPa αντοχής των τοιχωμάτων των ασυνεχειών, ενώ τα προφίλ τραχύτητας της Εικόνα 7.9 αντιστοιχούν στην κατηγορία 8 – 10 όπως φαίνεται στα Διάγραμμα 7.5 και Διάγραμμα 7.6, αντίστοιχα. Για τον συντελεστή JRC επιλέχθηκε η τιμή 8 καθώς κρίθηκε πως τα προφίλ που αποκτήθηκαν από την επιτόπου εργασία πεδίου αντιστοιχούν στην χαμηλότερη τιμή του συγκεκριμένου εύρους.



Εικόνα 7.9 Ενδεικτικά προφίλ τραχύτητας των ασυνεχειών από την επιτόπου έρευνα, κλίμακας 10 cm



Διάγραμμα 7.5 Διάγραμμα υπολογισμού της αντοχής των τοιχωμάτων των ασυνεχειών με βάση τους χτύπους της σφύρας Schmidt (N. Barton & Choubey, 1977)



Διάγραμμα 7.6 Προφίλ τραχύτητας και αντίστοιχες τιμές του συντελεστή JRC σε κλίμακα δείγματος εργαστηρίου (N. Barton & Choubey, 1977)

Από την επίλυση του κριτηρίου προέκυψε γωνία τριβής των ασυνεχειών 49°, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 7.7.



Διάγραμμα 7.7 Επίλυση του κριτηρίου Barton – Bantis

Έτσι, έπειτα από την κινηματική ανάλυση προέκυψαν οι εξής δυνητικές αστοχίες (Εικόνα 7.10):

Ανατροπές τεμάχους στης οικογένειας 2 στο πρανές Α

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Σφηνοειδείς ολισθήσεις μεταξύ των οικογενειών 1 3 στο πρανές Β, αλλά και εφελκυστικές ανατροπές στην οικογένεια 2
- Επίπεδες ολισθήσεις κατά μήκος της οικογένειας 3 στο πρανές C
- Επίπεδες ολισθήσεις, στο πρανές D, κατά μήκος της οικογένειας 1 με τεμάχη που σχηματίζονται από την τομή της με την οικογένεια 2 που μπορεί να λειτουργήσει ως εφελκυστική ρωγμή στην εκδήλωση της αστοχίας
- Επίπεδες ολισθήσεις κατά μήκος της οικογένειας 1 στο πρανές Ε



Εικόνα 7.10 Δυνητικές αστοχίες στα ασβεστολιθικά πρανή της Περίσσας

Οι παραπάνω αστοχίες αλλά και οι όγκοι, τόσο ποσοτικά όσο και χωρικά, που παρουσιάστηκαν προηγούμενα, επιβεβαιώνονται από τις παρακάτω τρεις (3) περιπτώσεις πρόσφατων αποκολλήσεων ορισμένων τεμαχών που εντοπίστηκαν στα δεδομένα. Στις ΕικόνεςΕικόνα 7.11,Εικόνα 7.12 και Εικόνα 7.13 παρουσιάζονται οι οικογένειες ασυνεχειών που συμμετέχουν στη διαμόρφωση του τεμάχους καθώς και οι διαστάσεις που μετρήθηκαν χειροκίνητα στο νέφος (point cloud) ώστε να μπορεί εύκολα να γίνει η εκτίμηση του όγκου. Η οικογένεια 1 αντιστοιχεί στο μπλέ χρώμα, η οικογένεια 2 στο πράσινο και η οικογένεια 3 στο κόκκινο ενώ στην Εικόνα 7.14 παρουσιάζονται οι περιοχές στις οποίες εντοπίστηκαν οι αποκολλημένοι όγκοι που χρησιμοποιούνται ως παράδειγμα για να μπορούν να συσχετιστούν με τον χάρτη χωρικής κατανομής των όγκων (Εικόνα 7.5)



Εικόνα 7.11 Τέμαχος που αποκολλήθηκε σε περιοχή του πρανούς D



Εικόνα 7.12 Τέμαχος που αποκολλήθηκε σε περιοχή του πρανούς Ε



Εικόνα 7.13 Τέμαχος που αποκολλήθηκε σε περιοχή του πρανούς Α



Εικόνα 7.14 Οι περιοχές όπου εντοπίστηκαν οι πρόσφατα αποκολλημένοι όγκοι



8 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ολοκλήρωση της συγκεκριμένης εργασίας καταλήγει στην εξαγωγή όλων των απαραίτητων πληροφοριών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της επιδεκτικότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων σε ένα πρανές και συγκεκριμένα στα ασβεστολιθικά πρανή της Περίσσας, με τη χρήση LiDAR. Η συγκεκριμένη τεχνολογία παρέχει τη δυνατότητα απόκτησης πληροφοριών από ολόκληρη την έκταση των πρανών, σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα και από απόσταση χωρίς να εκθέτει τον ερευνητή ενάντια στον κίνδυνο του ίδιου του φαινομένου μελέτης του. Αποτέλεσμα που δεν θα ήταν εφικτό διαφορετικά λόγο της απότομης κλίσης των πρανών και του μεγάλου ύψους. Βασική προϋπόθεση για την απόκτηση των κατάλληλων και ρεαλιστικών πληροφοριών αποτελεί το άρτια οργανωμένο πρόγραμμα σάρωσης και γενικότερης εργασίας πεδίου, όπως περιγράφεται.

Τις πληροφορίες αυτές αποτελούν οι γεωμετρικοί παράμετροι προσανατολισμού των ασυνεχειών και πρανών καθώς και η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών κάθε οικογένειας. Από την αξιοποίηση αυτών των παραμέτρων, με τη χρήση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας, που παρουσιάζεται αναλυτικά στην εργασία, προκύπτει ο τελικός προσδιορισμός των όγκων των τεμαχών. Οι όγκοι που διαμορφώνονται στα πρανή αποτελούν την πιο κρίσιμη παράμετρο για την εκίμηση της επιδεκτικότητας και των περαιτέρω αναλύσεων ευστάθειας για τις επιδεκτικές περιοχές μέσα από χάρτες χωρικής κατανομής των μεγεθών στο σύνολο των πρανών της περιοχής. Επιπλέον, από τα στοιχεία προσανατολισμού που εξάγονται με τη χρήση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας.

Οι παράμετροι που εξάγονται, με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία επεξεργασίας των δεδομένων LiDAR, είναι χωρικά εξαρτώμενοι και παρουσιάζουν διακυμάνσεις κατά μήκος των πρανών, όπως συνέβη και με τα πρανή της Περίσσας. Έτσι, το κύριο συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως οι βραχομάζες δεν προσεγγίζονται ρεαλιστικά ως ομογενείς και ισότροπες προς τις παραμέτρους όπως η απόσταση των ασυνεχειών ή οι όγκοι των τεμαχών. Επομένως, με αυτόν τον τρόπο, η επιδεκτικότητα δεν θα πάρει συγκεκριμένη τιμή για ένα πρανές ή έναν σχηματισμό ως ενιαία μονάδα αλλά μπορεί να μεταβάλλεται ορίζοντας συγκεκριμένες περιοχές ως περισσότερο επιδεκτικές. Αυτό μπορεί να συμβάλει στην επικέντρωση του ενδιαφέροντος για περαιτέρω ανάλυση μόνο στις συγκεκριμένες περιοχές χωρίς να καταναλώνεται περιττός χρόνος και χρήμα για την επιπρόσθετη διερεύνηση ολόκληρης της ενιαίας μονάδας.

Δευτερευόντως, αυτή η εργασία αποτελεί μία ακόμα εφαρμογή που επαληθεύει την εγκυρότητα της εξαγωγής γεωμετρικών στοιχείων της βραχομάζας με την αξιοποίηση των δεδομένων LiDAR καθώς τα αποτελέσματα επαληθεύονται από τις επιτόπου μετρήσεις ασυνεχειών και την τεχνικογεωλογική αξιολόγηση. Φυσικά, καθοριστικός παράγοντας για την επιτυχία τέτοιων μεθόδων είναι η άρτια εφαρμογή των βημάτων επεξεργασίας και κυρίως της ακριβής γεωαναφοράς των δεδομένων.

Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε χαρακτηρισμός της βραχομάζας μέσω του ποσοτικοποιημένου πίνακα GSI, λαμβάνοντας υπόψην της ποιότητα των ασυνεχειών, με βάση τις επιτόπου παρατηρήσεις, και τις τιμές RQD για κάθε πρανές, με βάση τον χάρτη πυκνότητας των ρωγμώσεων που δημιουργείται από την συγκεκριμένη μεθοδολογία επεξεργασίας των δεδομένων LiDAR. Ο χαρακτηρισμός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα πρανή της Περίσσας δομούνται από τεμαχώδη βραχομάζα με καλής έως πολύ καλής ποιότητας επιφάνειες ασυνεχειών. Ο χάρτης πυκνότητας των ρωγμώσεων αποτελεί μεν στοιχείο με βάση το οποίο γίνεται η συγκεκριμένη ταξινόμηση, συσχετιζόμενος με την χωρική κατανομή της τιμής RQD αλλά μπορεί να συσχετιστεί και με την τιμή RMR.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τέλος, ο εντοπισμός προϋπαρχόντων αποκολλήσεων τεμαχών, επάνω στα πρανή, και η εκτίμηση των όγκων τους αλλά και των μηχανισμών αστοχίας με τα εμπλεκόμενα συστήματα ασυνεχειών σε καθένα από αυτούς, επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα της ημί-αυτοματοποιημένης διαδικασίας που χρησιμοποιήθηκε καθώς βρίσκονται σε πλήρη ταύτιση.



Διεθνής βιβλιογραφία

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Γμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

- Abellán, A., Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Rosser, N. J., Lim, M., & Lato, M. J. (2014). Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(1), 80–97. https://doi.org/10.1002/esp.3493
- Antoniou, A. A., & Lekkas, E. (2010). Rockfall susceptibility map for Athinios port, Santorini Island, Greece. *Geomorphology*, *118*(1–2), 152–166. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.12.015
- Azzoni, A., & de Freitas, M. H. (1995). Experimentally gained parameters, decisive for rock fall analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 28(2), 111–124. https://doi.org/10.1007/BF01020064
- Barton, N., & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in Theory and Practice. *Rock Mechanics*, 10.
- Barton, N., & Grimstad, E. (2014). Forty Years With the Q-System in Norway and Abroad. *Fjellsprengningsteknikk Bergmekanikk/Geoteknikk*, (1970), 4.1-4.25.
- Bieniawski. (1973). Short on the RMR (Rock Mass Rating) system, 1–3.
- Bolkas, D., Vazaios, I., Peidou, A., & Vlachopoulos, N. (2018). Detection of Rock Discontinuity Traces Using Terrestrial LiDAR Data and Space-Frequency Transforms. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(3), 1745–1765. https://doi.org/10.1007/s10706-017-0430-6
- Cai, M., Kaiser, P. K., Uno, H., Tasaka, Y., & Minami, M. (2004). Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(1), 3–19. https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00025-X
- Casale, R., Fytikas, M., Sigvaldasson, G., & Vougioukalakis, G. (1998). European Commission Volcanic risk The European laboratory volcanoes Proceedings o / the second workshop 1998.
- Dominey-Howes, D., & Minos-Minopoulos, D. (2004). Perceptions of hazard and risk on Santorini. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *137*(4), 285–310. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.06.002
- Druitt, T. H., & Francaviglia, V. (1992). Caldera formation on Santorini and the physiography of the islands in the late Bronze Age. *Bulletin of Volcanology*, *54*(6), 484–493. https://doi.org/10.1007/BF00301394
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology*, 102(3–4), 99–111. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.014
- Gertisser, R., Preece, K., & Keller, J. (2009). The Plinian Lower Pumice 2 eruption, Santorini, Greece: Magma evolution and volatile behaviour. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *186*(3–4), 387–406. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.07.015

Hoek, E. (2006). Analysis of rockfall hazards. Rock Engineering, (1989), 1–25.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη

τζοδράγτ

- Hoek, E., Carter, T. G., & Diederichs, M. S. (2013). Quantification of the Geological Strength Index Chart. 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium Held in San Francisco, CA, USA June 23-26, 2013, 9.
 - Huchon, P., Lybéris, N., Angelier, J., Le Pichon, X., & Renard, V. (1982). Tectonics of the hellenic trench: A synthesis of sea-beam and submersible observations. *Tectonophysics*, 86(1–3). https://doi.org/10.1016/0040-1951(82)90062-2
 - Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, *11*(2), 167–194. https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y
 - Kilias, S. P., Nomikou, P., Papanikolaou, D., Polymenakou, P. N., Godelitsas, A., Argyraki, A., ... Scoullos, M. (2013). New insights into hydrothermal vent processes in the unique shallowsubmarine arc-volcano, Kolumbo (Santorini), Greece. *Scientific Reports*, 3, 1–13. https://doi.org/10.1038/srep02421
 - Lato, M., Diederichs, M. S., Hutchinson, D. J., & Harrap, R. (2009). Optimization of LiDAR scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rockmasses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(1), 194–199. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.04.007
 - Lato, M. J. (2010). GEOTECHNICAL APPLICATIONS OF LIDAR PERTAINING TO GEOMECHANICAL EVALUATION AND HAZARD by.
 - Lato, M. J., Diederichs, M. S., & Hutchinson, D. J. (2010). Bias correction for view-limited lidar scanning of rock outcrops for structural characterization. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43(5), 615–625. https://doi.org/10.1007/s00603-010-0086-5
 - Lato, M. J., Harrap, R., Hutchinson, J., Diederichs, M., & Martin, D. (n.d.). Assessing Geometry of Rock Masses using Static and Mobile LiDAR Scanning. *Network*.
 - Marinos, V., Marinos, P., & Hoek, E. (2005). The geological strength index: Applications and limitations. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 64(1), 55–65. https://doi.org/10.1007/s10064-004-0270-5
 - Marsellos, A. E., Foster, D. A., Min, K., Kidd, W. S. F., Garver, J., & Kyriakopoulos, K. (2013). AN APPLICATION OF GIS ANALYSIS ON STRUCTURAL DATA FROM METAMORPHIC ROCKS IN SANTORINI ISLAND, *XLVII*(3), 1479–1488.
 - Mccoy, F. (1984). Aegean, Sea _ C \, 89(4), 8441-8462.
 - Papazachos, B. C., Dimitriadis, S. T., Panagiotopoulos, D. G., Papazachos, C. B., & Papadimitriou,
 E. E. (2005). Deep structure and active tectonics of the southern Aegean volcanic arc. *Developments in Volcanology*, 7(C), 47–64. https://doi.org/10.1016/S1871-644X(05)80032-4
 - Parks, M. M., Moore, J. D. P., Papanikolaou, X., Biggs, J., Mather, T. A., Pyle, D. M., ... Nomikou, P. (2015). From quiescence to unrest: 20 years of satellite geodetic measurements at Santorini volcano, Greece. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(2), 1309–1328. https://doi.org/10.1002/2014JB011540

Perazzelli, P., Rotonda, T., & Graziani, A. (2009). Stability analysis of an active marble quarry by DEM modeling. *Proceedings of the International Conference on Rock Joints and Jointed Rock Masses*, 1035. https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-010816773

- Perissoratis, C. (1995). The Santorini volcanic complex and its relation to the stratigraphy and structure of the Aegean arc, Greece. *Marine Geology*, *128*(1–2). https://doi.org/10.1016/0025-3227(95)00090-L
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 180(November 2017), 60–91. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001
- Riquelme, A. J., Abellán, A., & Tomás, R. (2015). Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds. *Engineering Geology*, 195, 185–195. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.06.009
- Riquelme, A. J., Abellán, A., Tomás, R., & Jaboyedoff, M. (2014). A new approach for semiautomatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Computers and Geosciences*, 68, 38–52. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.03.014
- Ritchie, A. M. (1963). Evaluation of rockfall and its control. *Highway Research Record*, *17*(17), 13–28.
- Slob, S., Turner, A. k., Bruining, J., & Hack, H. R. G. K. (2010). Automated rock mass characterisation using 3-D terrestrial laser scanning. https://doi.org/0166077
- Sturzenegger, M., & Stead, D. (2009). Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*, 106(3–4), 163–182. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.03.004
- Varnes, D. J. (1978). Slope Movement Types and Processes. *Transportation Research Board Special Report*, (176), 11–33. https://doi.org/In Special report 176: Landslides: Analysis and Control, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Vazaios, I., Vlachopoulos, N., Lato, M. J., & Diederichs, M. S. (2014). LiDAR as input for Discrete Fracture Networks: A comparison of automated manual joint mapping using scanned surface models. *Geo Regina*, (September).

Ελληνική βιβλιογραφία

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

έωσρας

Μουντράκης, Δ.Μ. (2010) 'Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας', Θεσσαλονίκη: UNIVERSITY STUDIO PRESS