



**[ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ  
ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΓΕΙΟΥ  
ΣΑΡΩΤΗ LIDAR. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΚΑΣΤΡΟ ΤΗΣ  
ΜΟΝΕΜΒΑΣΙΑΣ ]**

**ΦΑΡΜΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

Επιβλέπων Καθηγητής  
Βασίλειος Μαρίνος  
Επ. Καθηγητής ΑΠΘ

**ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2017**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....                                                                                                                                                                                   | 3  |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....                                                                                                                                                                                      | 4  |
| 1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ .....                                                                                                                                                                                    | 7  |
| ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ.....                                                                                                                                                                            | 7  |
| 1.1 Εισαγωγή .....                                                                                                                                                                                  | 7  |
| 1.2 Βραχοκατάπτωση .....                                                                                                                                                                            | 7  |
| 1.3 Επιδεκτικότητα, επικινδυνότητα, διακινδύνευση .....                                                                                                                                             | 12 |
| 1.3.1 Εισαγωγή .....                                                                                                                                                                                | 12 |
| 1.3.2 Επιδεκτικότητα .....                                                                                                                                                                          | 12 |
| 1.3.3 Επικινδυνότητα .....                                                                                                                                                                          | 13 |
| 1.3.4 Διακινδύνευση .....                                                                                                                                                                           | 14 |
| 1.4 Χρήση και χρησιμότητα του LiDAR.....                                                                                                                                                            | 14 |
| 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ .....                                                                                                                                                                                    | 18 |
| Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΜΟΝΕΜΒΑΣΙΑΣ .....                                                                                                                                                                     | 18 |
| 2.1 Εισαγωγή .....                                                                                                                                                                                  | 18 |
| 2.2 Η Μονεμβασία ως αρχαιολογικός χώρος .....                                                                                                                                                       | 19 |
| 2.3 Η γεωλογία της περιοχής .....                                                                                                                                                                   | 20 |
| 2.4 Η σεισμικότητα της περιοχής.....                                                                                                                                                                | 23 |
| 2.5 Ιστορικό βραχοκαταπτώσεων .....                                                                                                                                                                 | 24 |
| 2.6 Κλιματικές συνθήκες της περιοχής .....                                                                                                                                                          | 25 |
| 3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ .....                                                                                                                                                                                    | 26 |
| ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ<br>ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ .....                                                                                                    | 26 |
| 3.1 Εισαγωγή .....                                                                                                                                                                                  | 26 |
| 3.2 Rockfall hazard and risk assessment (Saroglou et al., 2012).....                                                                                                                                | 26 |
| 3.3 The Modified Colorado Rockfall Hazard Rating System (Santi et al., 2009).....                                                                                                                   | 32 |
| 3.4 Three Gorges' Rockfall Risk Assessment System (Bolin et al., 2010) .....                                                                                                                        | 34 |
| 3.5 Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area<br>(Corominas et al., 2005) .....                                                                                     | 37 |
| 3.5.1 Διακινδύνευση για την ακίνητη περιουσία.....                                                                                                                                                  | 38 |
| 3.5.2 Διακινδύνευση για τους ανθρώπους .....                                                                                                                                                        | 38 |
| 4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ .....                                                                                                                                                                                    | 42 |
| ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΧΡΗΣΗΣ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΑΡΩΤΗ LiDAR ΓΙΑ ΕΞΑΓΩΓΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ<br>ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ.....                                                                                                 | 42 |
| 4.1 Εισαγωγή .....                                                                                                                                                                                  | 42 |
| 4.2 Εφαρμογή σε πρανές από έντονα κερματισμένο γρανοδιόριτη στις περιοχές Forat<br>Negre και Borrassirca της Δημοκρατίας της Ανδόρα (Santana, Corominas, Mavrouli, &<br>Garcia-Sellés, 2012). ..... | 42 |
| 4.3 Εφαρμογή σε βραχώδη πρανή στις περιοχές British Columbia και Alberta, του<br>Καναδά (Sturzenegger & Stead, 2009).....                                                                           | 45 |

|     |                                                                                                                          |    |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.4 | Εφαρμογή σε ασβεστολιθικό πρανές για τον υπολογισμό της απόστασης των ασυνεχειών (Riquelme, Abellán, & Tomás, 2015)..... | 47 |
| 5   | ΚΕΦΑΛΑΙΟ .....                                                                                                           | 50 |
|     | ΧΡΗΣΗ LiDAR ΣΤΟΝ ΒΡΑΧΟ ΤΗΣ ΜΟΝΕΜΒΑΣΙΑΣ .....                                                                             | 50 |
| 5.1 | Εισαγωγή .....                                                                                                           | 50 |
| 5.2 | Στόχοι και θέσεις σάρωσης .....                                                                                          | 51 |
| 5.3 | Επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων του LiDAR .....                                                                    | 53 |
| 5.4 | Αποτελέσματα .....                                                                                                       | 69 |
| 6   | ΚΕΦΑΛΑΙΟ .....                                                                                                           | 70 |
|     | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....                                                                                                       | 70 |
| 7   | ΚΕΦΑΛΑΙΟ .....                                                                                                           | 71 |
|     | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....                                                                                                       | 71 |



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της πτυχιακής μου εργασίας, κ. Βασίλειο Μαρίνο, Επ. 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 και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά την διάρκεια των σπουδών μου. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την στήριξη και την εμπιστοσύνη τους σε μένα μέχρι σήμερα.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι βραχοκαταπτώσεις αποτελούν ένα σύνηθες γεωλογικό φαινόμενο, το οποίο μπορεί να αποβεί καταστροφικό όταν λάβει χώρα σε ανθρωπογενές περιβάλλον. Οι συνέπειες της εκδήλωσης μιας βραχοκατάπτωσης μπορούν να είναι άμεσες, όπως η καταστροφή κάποιου κτίσματος, η καταστροφή πολιτιστικής κληρονομιάς και κάποιος θάνατος ή έμμεσες, όπως η απώλεια εισοδήματος εργαζομένου που δεν μπορεί να μεταβεί στον χώρο εργασίας του εξαιτίας φραγμένου οδικού δικτύου. Η πόλη της Μονεμβασιάς μαζί με το κάστρο είναι ένας ιστορικός οικισμός στην νοτιοανατολική Πελοπόννησο που έχει πληγεί κατά το παρελθόν από βραχοκαταπτώσεις, καθώς είναι κτισμένη στους πρόποδες απότομου ασβεστολιθικού πρανούς ύψους περίπου 60 μέτρων.

Στην παρούσα εργασία γίνεται ποσοτικός προσδιορισμός των τεχνικογεωλογικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ασβεστολιθικού πρανούς, ώστε να εισαχθούν στο κατάλληλο σύστημα αξιολόγησης της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης και να οδηγήσουν στην ακριβή εκτίμηση των δύο εννοιών. Οι μέθοδοι τηλεπισκόπησης, με τον κατάλληλο εξοπλισμό, συνεισφέρουν στην ταχύτερη, πληρέστερη και ασφαλέστερη, για τον ερευνητή, συλλογή των απαραίτητων στοιχείων μέσα από τα παραγόμενα τρισδιάστατα μοντέλα. Στη συνέχεια, με τη χρήση κατάλληλων λογισμικών, αναλύονται τα δεδομένα που συλλέχθηκαν και εξάγονται τα απαραίτητα στοιχεία που αφορούν στα γεωμετρικά και τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας. Το LiDAR (Light Detection and Ranging) αποτελεί τέτοιου είδους εξοπλισμό και έτσι τα στοιχεία που παρήχθησαν από την επεξεργασία των δεδομένων της σάρωσης που πραγματοποιήθηκε στο πρανές της Μονεμβασιάς, εισήχθησαν στο κατάλληλο σύστημα αξιολόγησης της επικινδυνότητας και διακινδύνευσης. Κατόπιν, από το σύστημα αξιολόγησης, προέκυψε η ποσοτική εκτίμηση της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης έναντι βραχοκαταπτώσεων για το συγκεκριμένο πρανές.

Στην αρχή της εργασίας αποσαφηνίζονται σημαντικές έννοιες όπως η επικινδυνότητα και η διακινδύνευση καθώς και ο τρόπος λειτουργίας του LiDAR. Στη συνέχεια, γίνεται παρουσίαση των γεωλογικών στοιχείων της περιοχής, της σεισμικότητας, του ιστορικού βραχοκαταπτώσεων καθώς και της αρχαιολογικής σημασίας της περιοχής. Έπειτα, αναλύονται κάποια πιθανά συστήματα αξιολόγησης επικινδυνότητας και διακινδύνευσης και παρουσιάζονται οι θέσεις σάρωσης και οι λόγοι επιλογής τους. Επίσης, παρουσιάζονται αναλυτικά τα δεδομένα από κάθε θέση, η σειρά εργασιών για την ενοποίηση των επιμέρους δεδομένων καθώς και η μέθοδος επεξεργασίας τους με τα παραγόμενα αποτελέσματα που αφορούν στα τεχνικογεωλογικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πρανούς. Τέλος, τα αποτελέσματα της εφαρμογής του LiDAR, σε συνδυασμό με επί τόπου

*ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ  
ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΑΡΩΤΗ LIDAR. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ  
ΚΑΣΤΡΟ ΤΗΣ ΜΟΝΕΜΒΑΣΙΑΣ*

---

παρατηρήσεις και γνωστά στοιχεία από προηγούμενη έρευνα, εισάγονται σε σύστημα αξιολόγησης της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης για την περιοχή και πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων.

## ABSTRACT

Rockfalls is a usual geological phenomenon, able to turn catastrophic when place on anthropogenic environment. The consequences of a rockfall event can be direct, as is the destruction of a building, the destruction of cultural heritage even a death or indirect, as the salary loss of an employee who has no access to his workplace due to a blocked road. Monemvasia is a historical town, in southwestern Peloponnese, in which many rockfall events have occurred during the past as it is built on the foot of a 60-meter-high limestone slope.

In this study, a quantitative determination of engineering geological as well as geometrical characteristics of this limestone slope is carried out in order to be imported in the suitable hazard and risk rating system and export the exact estimation of the value of these two meanings. Remote sensing techniques, along with the suitable equipment, contribute in user's faster, more complete and safer collection of the necessary data, via generated 3D models. Subsequently, using certain softwares, collected data were analyzed and the necessary elements of the rock mass geometrical as well as engineering geological characteristics were exported. LiDAR (Light Detection and Ranging) is such an equipment tool and in situ scanning process data were imported in the suitable hazard and risk rating system. Then, a quantitative estimation of rockfall hazard and risk has emerged for the specific slope.

At the beginning of this study, important meanings as is hazard and risk are clarified, even modus operandi of LiDAR. Subsequently, preview of area's geology, seismicity, history of rockfalls and the archaeological importance of the area are presented. then, some possible rockfall hazard and risk rating systems, scanning positions and the reasons of their choice are presented. Furthermore, exported data from each scanning position, aligning work order, as well as the processing of the generated results concerning engineering geological and geometrical characteristics of the slope are presented. Finally, the results of LiDAR application, combined with in situ observations and already known by previous research data, are imported in a rockfall hazard and risk rating system for the region, and a comparison of the final results is carried out.



## 1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

#### 1.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται και αναλύονται οι έννοιες της βραχοκατάπτωσης, της επιδεκτικότητας, της επικινδυνότητας, της διακινδύνευσης και γίνεται επεξήγηση της χρήσης και χρησιμότητας του LiDAR. Σε κάθε περίπτωση δίνεται ο ορισμός της έννοιας και παρουσιάζονται επιμέρους ταξινομήσεις και παράγοντες που οδηγούν σε αυτές.

Οι βραχοκαταπτώσεις αποτελούν πολύ σημαντικό κίνδυνο σε ορεινές περιοχές οι οποίες διασχίζονται από οδικό ή σιδηροδρομικό δίκτυο ή περιέχουν κάποιον οικισμό. Παρόλο που οι βραχοκαταπτώσεις δεν προκαλούν τις ίδιες οικονομικές επιπτώσεις με άλλες, μεγαλύτερης κλίμακας, αστοχίες οι οποίες είναι σε θέση να αποκλείσουν έναν οδικό άξονα για κάποιο χρονικό διάστημα, εν τούτοις ο αριθμός των ανθρώπων που έχασαν τη ζωή τους από βραχοκαταπτώσεις είναι σχεδόν ο ίδιος με αυτών που έχασαν τη ζωή τους από όλες τις άλλες μορφές εκδήλωσης αστάθειας πρανούς συνολικά (Hoek, 2006). Γι αυτόν το λόγο εξετάζονται οι έννοιες της επιδεκτικότητας, της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης, με τη βοήθεια διαφόρων μέσων και εργαλείων όπως είναι το LiDAR.

#### 1.2 Βραχοκατάπτωση

Με τον όρο βραχοκατάπτωση, εννοείται η ακαριαία κίνηση ενός ή περισσότερων βραχωδών όγκων, οποιουδήποτε μεγέθους, προς τα κατόντη του πρανούς ως ελεύθερη πτώση, αναπήδηση ή κύλιση. Η κίνηση πραγματοποιείται κατά μήκος των επιφανειών των ασυνεχειών και επηρεάζεται άμεσα από τη βαρύτητα, την μηχανική αποσάθρωση και την παρουσία νερού (από Novotný, 2013). Κατά τον Hoek (2006) οι βραχοκαταπτώσεις οφείλουν τη γένεση τους σε κάποιο κλιματικό ή βιολογικό γεγονός το οποίο επιφέρει αλλαγές στις δυνάμεις που δρουν πάνω στον βράχο. Ειδικότερα, οι αλλαγές αυτές μπορεί να είναι αποτέλεσμα της αύξησης της πίεσης των πόρων λόγω της διείσδυσης νερού από βροχόπτωση, διάβρωση των γειτονικών υλικών λόγω καταιγίδας, διεργασιών ψύξης-απόψυξης, χημικής αποσάθρωσης του βράχου ή ανάπτυξης ριζικού συστήματος. Σε μία ενεργή κατασκευαστικά περιοχή, η δυναμική για εκδήλωση μηχανισμού βραχοκαταπτώσεων είναι πολύ μεγαλύτερη από την περίπτωση των κλιματικών ή βιολογικών παραγόντων που αναφέρθηκαν παραπάνω.

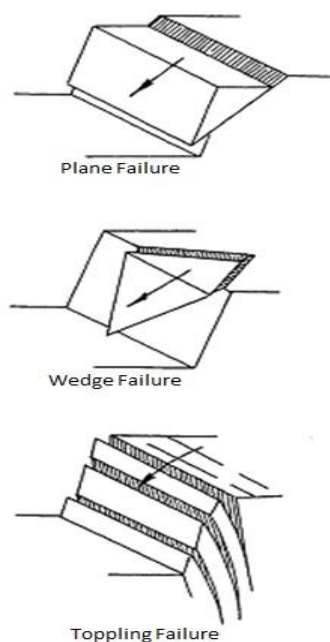


Μόλις ένα τεμάχος βράχου ξεκινήσει να κινείται από τα ανάντη ενός πρानούς, ο κυριότερος παράγοντας που καθορίζει την τροχιά που θα διαγράψει είναι η γεωμετρία του ίδιου του πρानούς. Οι καθαρές επιφάνειες ενός υγιούς βράχου είναι οι πιο επικίνδυνες, επειδή δεν προκαλούν σημαντική επιβράδυνση στην κίνηση του αποκολλημένου τεμάχους. Αντιθέτως, οι επιφάνειες που καλύπτονται από βλάστηση μειώνουν την κινητική ενέργεια του τεμάχους και κάποιες φορές σταματούν την κίνησή του. Η ικανότητα που έχει η επιφάνεια του βράχου να ελαττώνει την κινητική ενέργεια του αποκολλημένου τεμάχους ονομάζεται συντελεστής αποκατάστασης. Το υλικό της επιφάνειας πάνω στην οποία θα προσκρούσει ο βράχος, καθορίζει την τιμή του συντελεστή αποκατάστασης. Οι επιφάνειες που είναι καθαρές και μη αποσαθρωμένες παίρνουν μεγάλες τιμές ενώ αυτές που καλύπτονται από βλάστηση ή υλικό αποσάθρωσης παίρνουν μικρότερες τιμές. Κατά συνέπεια μπορεί να προβλεφθεί με σχετικά μεγάλη ακρίβεια η τροχιά που θα διαγράψει ο αποκολλημένος βράχος (Hoek, 2006).

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι αστοχίας κατά τους οποίους μπορεί να συμβεί βραχοκατάπτωση (Εικόνα 1.1), με την προϋπόθεση ότι ικανοποιούνται συγκεκριμένα κριτήρια για τον καθένα ώστε να δράσει.

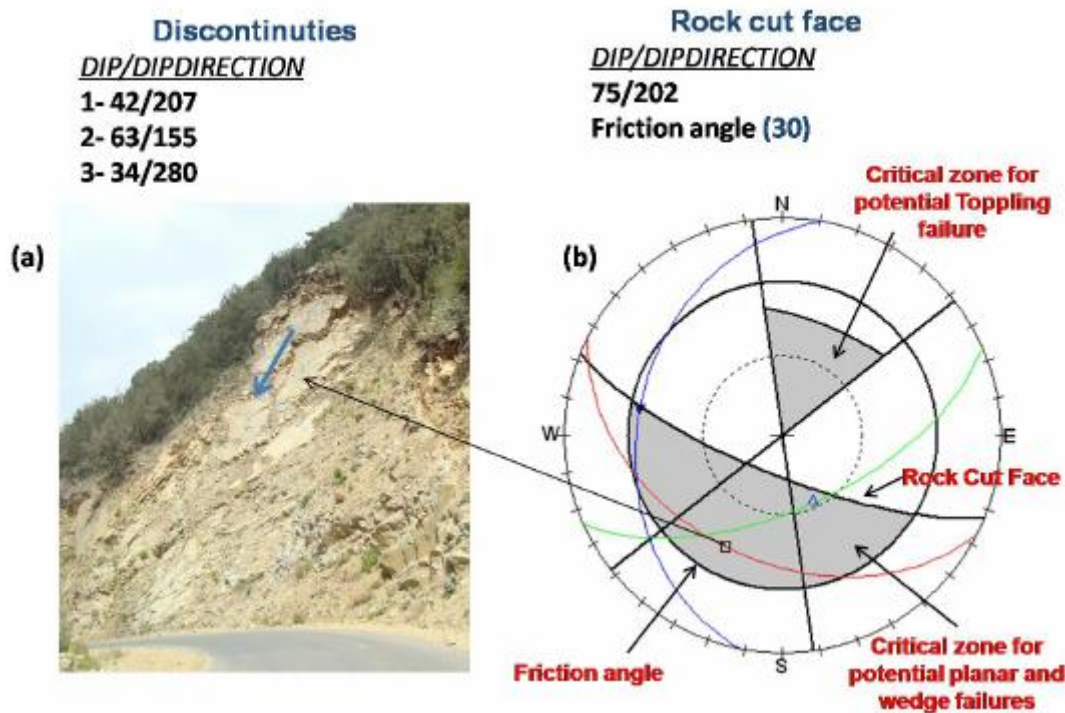
Αυτοί είναι:

- I. Επίπεδη ολίσθηση (Plane Failure)
- II. Σφηνοειδής ολίσθηση (Wedge Failure)
- III. Ανατροπή τεμάχους (Toppling Failure)



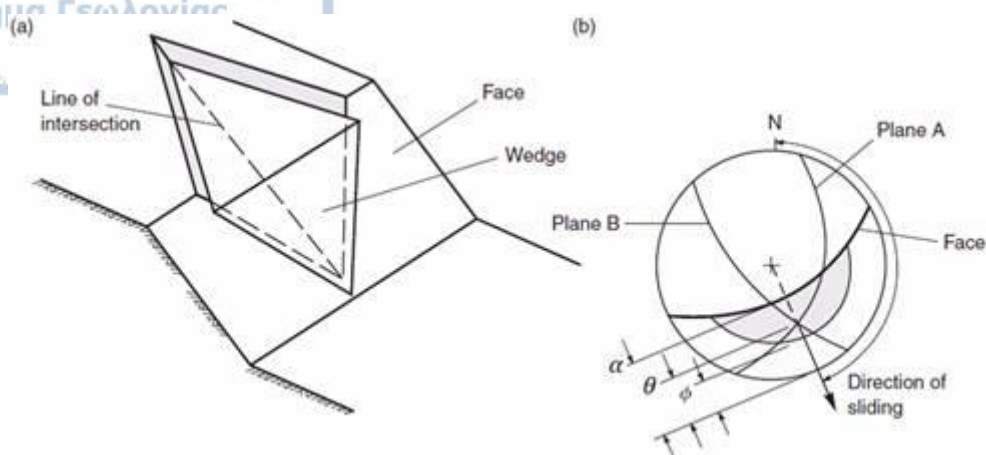
Εικόνα 1.1. Οι τρεις κύριοι τύποι αστοχίας για βραχοκαταπτώσεις (Πηγή:  
<http://dipanalyst.com>)

**Επίπεδη ολίσθηση:** Η ολίσθηση πραγματοποιείται κατά μήκος μιας επιφάνειας η οποία είναι παράλληλη ως προς το πρηνές, με απόκλιση έως  $20^\circ$ . Για να εκδηλωθεί αστοχία θα πρέπει επίσης, η γωνία κλίσης του πρηνούς να είναι μεγαλύτερη από τη γωνία κλίσης της επιφάνειας ολίσθησης, η οποία θα είναι μεγαλύτερη από τη γωνία τριβής της βραχομάζας (Εικόνα 1.2, από Youssef, Maerz, & Al-Otaibi, 2012).



Εικόνα 1.2. Ανάλυση ευστάθειας του πρηνούς κατά μήκος του δρόμου Raidah, Asir Area, Kindom of Saoudi Arabia. (a) φωτογραφία περδίου που απεικονίζει ένα συστημα ασυνεχειών που προβάλλουν προς τον δρόμο, καθώς και άλλα δύο συστήματα ασυνεχειών. (b) Markland Test

**Σφηνοειδής ολίσθηση:** Η ολίσθηση ενός τεμάχους της βραχομάζας που διαμορφώνεται από δύο επιφάνειες ασυνεχειών που τέμνονται κατά μία γραμμή με κατηφορική κλίση προς το μέτωπο του πρηνούς. Η ολίσθηση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε κατά μήκος της γραμμής τομής των δύο τεμνόμενων ασυνεχειών, είτε κατά μήκος της επιφάνειας ενός εκ των δύο ασυνεχειών. Για να πραγματοποιηθεί η ολίσθηση θα πρέπει επίσης, η γωνία κλίσης του πρηνούς να είναι μεγαλύτερη από την γωνία κλίσης της γραμμής τομής των δύο ασυνεχειών, η οποία θα είναι μεγαλύτερη από την γωνία τριβής της βραχομάζας (Εικόνα 1.3).



Εικόνα 1.3. Γεωμετρικές συνθήκες σφηνοειδούς ολίσθησης. (α) εικονογραφική άποψη της σφηνοειδούς ολίσθησης. (β) στερεογραφική απεικόνιση της γραμμής τομής των δύο ασυνεχειών. (Πηγή: <http://www.iitbhu.ac.in>)

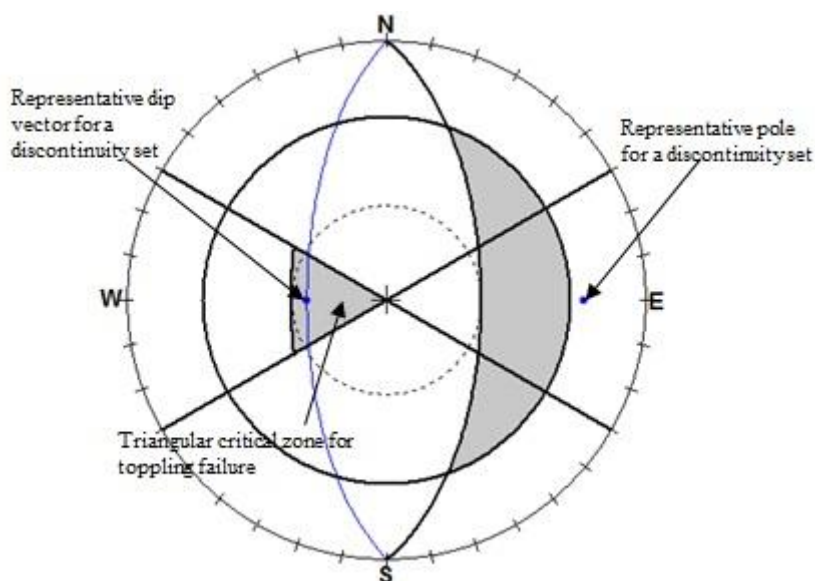


Εικόνα 1.4. Σφηνοειδής ολίσθηση, State Route 2, West Virginia (Πηγή: <http://dipanalyst.com>)

**Ανατροπή τεμάχους:** Η αστοχούσα μάζα είναι μια κολώνα βράχου που οριοθετείται από ασυνέχειες αντίρροπες ως προς το πρηνές, με απόκλιση έως  $20^\circ$ . Για να



πραγματοποιηθεί η αστοχία θα πρέπει η κλίση των ασυνεχειών να είναι μεγαλύτερη από 70°.



Εικόνα 1.5. Στερεογραφική προβολή δυνητικής αστοχίας ανατροπής τεμάχους. (Πηγή: <http://dipanalyst.com>)



Εικόνα 1.6. Αστοχία από ανατροπή τεμάχους, Clark county, Ohio. (Πηγή: <http://dipanalyst.com>)

Διάφοροι παράγοντες όπως ο βαθμός κερματισμού της βραχομάζας, οι καιρικές συνθήκες και η σεισμική δράση της περιοχής μπορούν να οδηγήσουν στην εκδήλωση ενός τέτοιου φαινομένου που ενδεχομένως να προκαλέσει αξιοσημείωτες καταστροφές όταν συμβεί κοντά σε μια αστική περιοχή, ιστορικό-αρχαιολογικό χώρο ή σε περιοχή δημοσίου ενδιαφέροντος (οδικό δίκτυο) (Torral, Akin, & Akin, 2012).

### 1.3 Επιδεκτικότητα, επικινδυνότητα, διακινδύνευση

#### 1.3.1 Εισαγωγή

Η διερεύνηση της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης είναι άμεσα συνδεδεμένη με την επιδεκτικότητα. Ο χωρισμός σε ζώνες, μιας περιοχής, με βάση τις τρεις παραπάνω έννοιες μπορεί να γίνει σε περιφερειακό, τοπικό και πιο προσαρμοσμένο σε μία περιοχή επίπεδο ανάλογα με τον σκοπό για τον οποίο πραγματοποιείται η ζωνοποίηση. Η διαδικασία αυτή μπορεί να εξυπηρετήσει τα σχέδια της κυβέρνησης ή της τοπικής αυτοδιοίκησης για την ανάπτυξη εγκαταστάσεων (νοσοκομεία, σχολεία, γήπεδα, εμπορικά κέντρα κ.α.), οδικών ή σιδηροδρομικών δικτύων, προστασία αρχαιολογικών και ιστορικών χώρων. Σε μία πλήρη αναφορά χωρισμού σε ζώνες μιας περιοχής, για βραχοκαταπτώσεις, παρουσιάζονται:

- Η γεωλογική και μορφολογική περιγραφή της περιοχής μελέτης
- Η καταγραφή των βραχοκαταπτωτικών γεγονότων του παρελθόντος και των αναμενόμενων να συμβούν
- Η χαρτογράφηση με βάση την επιδεκτικότητα
- Η χαρτογράφηση με βάση την επικινδυνότητα
- Η χαρτογράφηση με βάση την διακινδύνευση και τα εκτιμώμενα στοιχεία που ενδέχεται να πληγούν (ανθρωπινές ζωές, περιουσία)

#### 1.3.2 Επιδεκτικότητα

Με τον όρο επιδεκτικότητα, για βραχοκαταπτώσεις, εννοείται η τάση που έχει μια περιοχή να παράγει καταπτώσεις, χωρίς να υπολογίζεται η συχνότητα. Η τάση αυτή καθορίζεται από τη επίδραση διαφόρων παραγόντων, όπως η τοπογραφία, η γεωλογία, οι τεχνικογεωλογικοί παράμετροι και οι κλιματικές συνθήκες. Για

παράδειγμα, ένα πρανές με απότομη κλίση, αποτελούμενο από πολύ κερματισμένο βράχο και σε περιοχή με έντονες βροχοπτώσεις, είναι πολύ πιο επιδεκτικό σε βραχοκαταπτώσεις από ένα πρανές με υγιές υλικό και ήπιες κλίσεις, που βρίσκεται σε περιοχή με χαμηλές βροχοπτώσεις. Η επιδεκτικότητα μπορεί να περιγραφεί τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Ποιοτικά η περιγραφή περιορίζεται στη γεωμορφολογική ανάλυση, δηλαδή στην αναφορά της παρουσίας ή απουσίας πιθανών παραγόντων αστάθειας. Ποσοτικά η περιγραφή γίνεται μέσω της ανάλυσης ευστάθειας του πρανούς και η εκτίμηση της επιδεκτικότητας βασίζεται στην τιμή του συντελεστή ασφαλείας που προκύπτει από την ανάλυση. Στη μελέτη επιδεκτικότητας σε βραχοκαταπτώσεις για μια συγκεκριμένη περιοχή πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν όλες οι πιθανές βραχοκαταπτώσεις που μπορούν να την επηρεάσουν ακόμη και αν η πηγή τους βρίσκεται εκτός αυτής της περιοχής, όμως μπορούν να μετακινηθούν, εντός της περιοχής μελέτης, τα προϊόντα τους (Fell et al., 2008).

### 1.3.3 Επικινδυνότητα

Ως επικινδυνότητα, σε μια επιδεκτική περιοχή, ορίζεται η δυνατότητα εκδήλωσης μιας δυσμενούς συνέπειας μέσα σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα (συχνότητα). Κατά τον Fell (2008), για βραχοκαταπτώσεις σε μια συγκεκριμένη περιοχή μελέτης, ο βαθμός επικινδυνότητας αποτυπώνεται ως ο αριθμός των βράχων για συγκεκριμένο όγκο/ετησίως, που θα φτάσουν στην περιοχή. Για την περιγραφή της επικινδυνότητας, για βραχοκαταπτώσεις, πρέπει επίσης να συμπεριληφθεί η τοποθεσία του γεγονότος, ο όγκος των αποκολλημένων τεμαχίων καθώς και η ταχύτητα με την οποία θα διανύσουν την προβλεπόμενη διαδρομή.

Σύμφωνα με τους Valagussa, Frattini, & Crosta (2014), η επικινδυνότητα έναντι βραχοκαταπτώσεων σε μια συγκεκριμένη περιοχή κάποιου επιδεκτικού πρανούς, εκτιμάται ως συνάρτηση της ετήσιας συχνότητας εκδήλωσης βραχοκαταπτώσεων, της μέγιστης κινητικής ενέργειας των τεμαχίων και του μέγιστου ύψους διαδρομής που δύνανται να διανύσουν τα τεμάχια.

Έτσι, η εκτίμηση της επικινδυνότητας έναντι βραχοκαταπτώσεων είναι γενικά αποδεκτό ότι εξαρτάται από τρεις (3) παράγοντες:

- Την πιθανότητα της εκδήλωσης μιας αστοχίας. Της αποκόλλησης, δηλαδή, κάποιου τεμάχους από ένα βραχώδες πρανές.
- Την διάδοση/διασπορά των τεμαχίων κάτω από το πρανές. Τροχιά και μέγιστη απόσταση διαφυγής των τεμαχίων.

- Την ένταση του επεισοδίου (κινητική ενέργεια). (Ferrari, Giacomini, & Thoeni, 2016)

#### 1.3.4 Διακινδύνευση

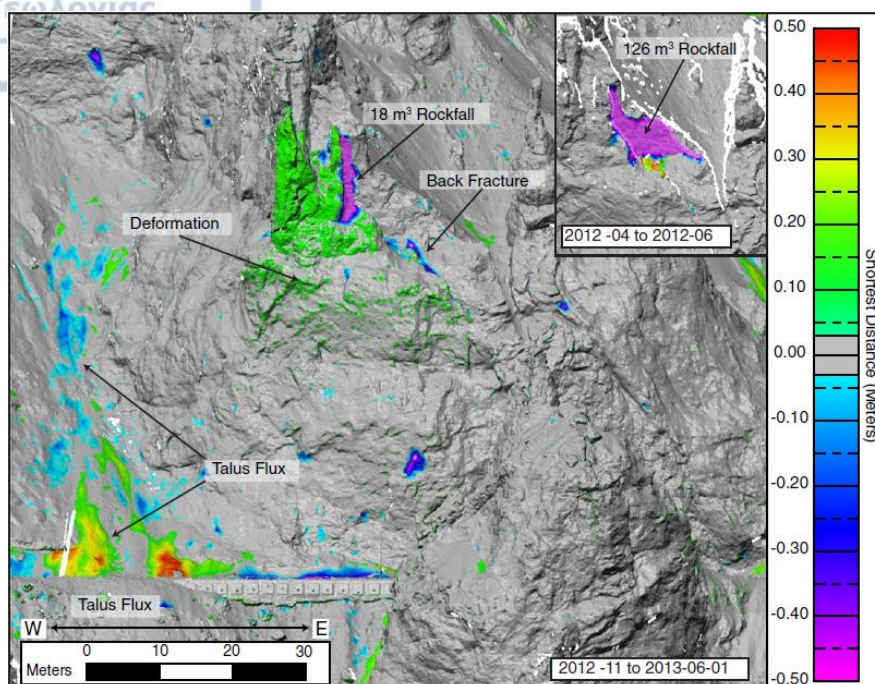
Κατά τον Fell (2008), υπάρχει μια άμεση εξάρτηση της διακινδύνευσης με την επικινδυνότητα, τα στοιχεία τα οποία διατρέχουν τον κίνδυνο να πληγούν και τους διαφόρους παράγοντες που μπορούν να ελέγξουν τον κίνδυνο. Η διακινδύνευση ορίζεται ως η πιθανότητα και η κρισιμότητα μιας δυσμενούς επίπτωσης. Στην περίπτωση των βραχοκαταπτώσεων, είναι απαραίτητο να εκτιμάται η ένταση του γεγονότος ενώ τα στοιχεία που διατρέχουν κίνδυνο μπορεί να είναι δύο ειδών: α) Ανθρώπινες ζωές (πληθυσμός) και β) δημόσια ή ιδιωτική περιουσία (κτήρια, οδικοί και σιδηροδρομικοί άξονες, δημόσιες εγκαταστάσεις και υποδομές, περιβαλλοντικές και ιστορικο-αρχαιολογικές αξίες), και για κάθε κατηγορία η διακινδύνευση εκφράζεται διαφορετικά. Στην περίπτωση ανθρώπινης ζωής αποτυπώνεται ατομικά, δηλαδή είναι η ετήσια πιθανότητα να χάσει ένας άνθρωπος τη ζωή του. Για την απώλεια ιδιωτικής ή δημόσιας περιουσίας εκφράζεται σε ζεύγη ετήσιας απώλειας και αξίας (πχ. 0,001/10€).

### 1.4 Χρήση και χρησιμότητα του LiDAR

Η εξέλιξη και η εφαρμογή των τεχνολογιών της τηλεπισκόπησης έχει βοηθήσει πολύ την διερεύνηση της επικινδυνότητας στην περίπτωση των βραχοκαταπτώσεων. Τέτοιου είδους τεχνολογία είναι και το LiDAR (Εικόνα 1.8), το οποίο προσφέρει 3D απεικόνιση ενός πρανούς, με μεγάλη ακρίβεια και εικόνα υψηλής ανάλυσης.

Επίσης, οι πληροφορίες που συλλέγονται δεν απαιτούν πλέον από τους εργαζόμενους να θέσουν τον εαυτό τους σε κίνδυνο για να προσεγγίσουν την περιοχή όπου βρίσκεται η πληροφορία (Από: Kromer, Hutchinson, Lato, Gauthier, & Edwards, 2015).



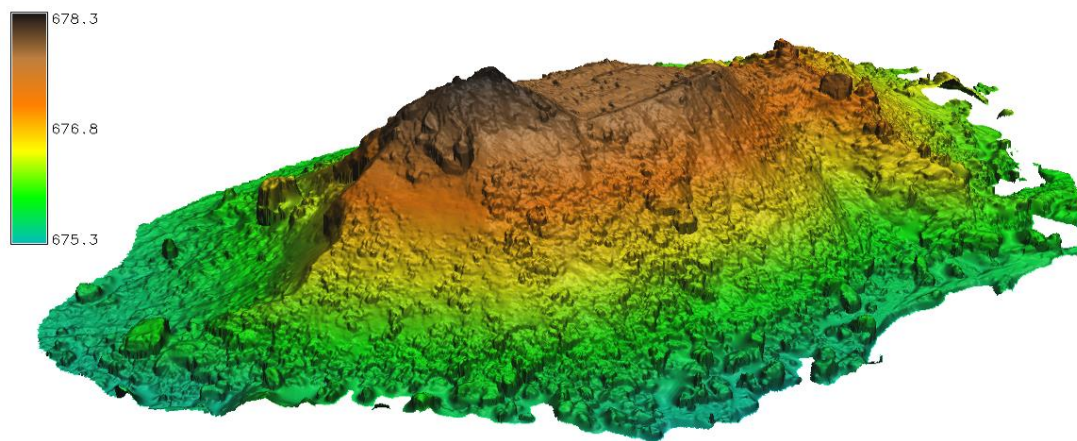


Εικόνα 1.7. Απεικόνιση γεωλογικού σχηματισμού από σάρωση LiDAR (Kromer, Hutchinson, Lato, Gauthier, & Edwards, 2015)



Εικόνα 1.8. Το LiDAR (Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Lidar#General\\_description](https://en.wikipedia.org/wiki/Lidar#General_description))

Αυτή την εξέλιξη των τεχνολογιών συλλογής δεδομένων, ακολούθησαν και οι μέθοδοι διερεύνησης της επιδεκτικότητας και της επικινδυνότητας, για βραχοκαταπτώσεις, που βασίζονται στα δεδομένα υψηλής ανάλυσης που προκύπτουν από την τηλεπισκόπηση. Αρχικό στάδιο της εκμετάλλευσης αυτών των δεδομένων είναι η δημιουργία του ψηφιακού υψομετρικού μοντέλου (Digital Elevation Model)(Εικόνα 1.9).



Εικόνα 1.9. Digital Elevation Model - DEM (Πηγή: <http://terrapixsurveys.com>)

Από την εκμετάλλευση των δεδομένων επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός όλων των οικογενειών ασυνεχειών, εντοπισμός ουλών που μαρτυρούν βραχοκατάπτωση καθώς και των πιθανώς κινούμενων βραχομαζών (Από: Mavrouli, Corominas, & Jaboyedoff, 2015). Ακόμη, συγκρίνοντας της πληροφορίες του LiDAR από διαδοχικές μετρήσεις, εξάγονται συμπεράσματα που οδηγούν στην ποσοτικοποίηση παραμέτρων όπως ο αριθμός των αποκολλημένων βράχων και το ιστορικό βραχοκαταπτώσεων μιας συγκεκριμένης περιοχής μελέτης. Επιπλέον, συντελούν στην παρακολούθηση των παραμορφώσεων που προηγούνται ενός βραχοκαταπτωτικού γεγονότος (Από: Kromer et al., 2015).

Η χρήση του LiDAR απαιτεί μεγάλη πυκνότητα σημείων και όσο το δυνατόν πιο σταθερή. Ωστόσο, περιορίζεται από την απόσταση από την οποία βρίσκεται σε σχέση με το πρανές, την παρουσία ή όχι βλάστησης στην επιφάνεια του πρανούς, τη γεωμετρία του, την ανακλαστικότητα της επιφάνειας του βράχου και τη γωνία προσβολής. Οι περιορισμοί αυτοί όμως μπορούν να απομειωθούν στα πλαίσια μιας σωστά δομημένης έρευνας και μιας αναλυτικής επεξεργασίας των δεδομένων που θα ακολουθήσει (Από: Kromer et al., 2015). Η χρήση των δεδομένων του LiDAR έχει και πολλά πλεονεκτήματα, γι αυτό και παρουσιάζει ευρεία εφαρμογή. Μερικά εξ αυτών είναι: η ευκολία στη χρήση του οργάνου, η υψηλή ταχύτητα συλλογής των

πληροφοριών, η μεγάλη ακρίβεια των πληροφοριών, η ψηφιακή μορφή με την οποία εξάγονται οι πληροφορίες η οποία δίνει τη δυνατότητα για γρήγορη επεξεργασία όλων των δεδομένων συνολικά (Από: Mavrouli et al., 2015).



## 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΜΟΝΕΜΒΑΣΙΑΣ

#### 2.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο εξετάζεται η περιοχή της Μονεμβασίας, η οποία αποτελεί την περιοχή ενδιαφέροντος αυτής της διπλωματικής εργασίας. Γίνεται αναφορά στην τοποθεσία, τις γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν και στη γεωλογική ιστορία της περιοχής, σε τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά, στη σεισμικότητα, στις κλιματικές συνθήκες αλλά και στην αρχαιολογική της σημασία.

Η πόλη της Μονεμβασιάς βρίσκεται στην Νότια Ελλάδα και συγκεκριμένα στην Νοτιοανατολική Πελοπόννησο και τις ανατολικές ακτές της χερσονήσου της Λακωνίας. Η περιοχή όπου είναι χτισμένη η πόλη με τον ιστορικό της χώρο είναι ένα ακρωτήριο που δομείται από ασβεστόλιθους ύψους περίπου 60 m. Ο ασβεστολιθικός βράχος που φιλοξενεί την ιστορική πόλη της Μονεμβασιάς δημιουργήθηκε από ένα σφοδρό σεισμικό γεγονός το 375 μ.Χ. Στους πρόποδες του βράχου βρίσκονται η παλιά και η νέα πόλη ενώ το κάστρο δεσπόζει στην κορυφή του φυσικού πρανούς. Η περιοχή της Μονεμβασιάς είναι ένα τυπικό παράδειγμα περιοχής όπου λαμβάνουν χώρα βραχοκαταπτώσεις, μολονότι την επισκέπτεται κάθε χρόνο, ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες, πολύ μεγάλος αριθμός τουριστών. Το φαινόμενο αυτό υπάρχει από την αρχαιότητα, αρκετά πριν πάρει η πόλη την μορφή που έχει σήμερα. αυτό γίνεται αντιληπτό από την παρουσία αρχαίων δομών που αποτελούνται από τα προϊόντα παλαιών βραχοκαταπτωτικών γεγονότων. Στο πρόσφατο παρελθόν έχουν επίσης παρατηρηθεί αρκετά αξιοσημείωτα περιστατικά εκ των οποίων τα πιο πρόσφατα ήταν το 2003 και το 2010 με όγκο μεταξύ 1 και 2 m<sup>3</sup> (Saroglou, Marinos, Marinos, & Tsiambaos, 2012).



Εικόνα 2.1. Η γεωγραφική θέση της Μονεμβασιάς (Πηγή: <http://www.monemvassia.gr>)



Εικόνα 2.2. Ο βράχος της Μονεμβασιάς με τον ιστορικό χώρο και το κάστρο (Saroglou et al., 2012)

## 2.2 Η Μονεμβασιά ως αρχαιολογικός χώρος

Πρόκειται για το μοναδικό Βυζαντινό κάστρο στην Ευρώπη που κατοικείται μέχρι σήμερα.

Η Μονεμβασιά είναι μια μεσαιωνική καστροπολιτεία με σαράντα (40) βυζαντινές εκκλησίες και δαιδαλώδη καλντερίμια. Κατοικήθηκε από Βυζαντινούς, Φράγκους, Ενετούς και Οθωμανούς. Η ίδρυση του οικισμού έγινε από τους Λακεδαιμόνιους τον 6<sup>ο</sup> μ.Χ. αιώνα. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε και ένας οικισμός στα χαμηλότερα του βράχου και σταδιακά η πόλη αναπτύχθηκε και απέκτησε μεγάλη στρατηγική σημασία. Μετά την σύντομη παπική κατοχή, η πόλη περιήλθε στην Ενετική κυριαρχία το 1464 ενώ το 1540 άρχισε η πρώτη περίοδος Τουρκοκρατίας. Το 1690 η πόλη παραδίδεται στους Ενετούς για να την ανακαταλάβουν οι Τούρκοι το 1715 και να απελευθερωθεί πρώτη από τις οχυρές πόλεις της Πελοποννήσου το 1821.



Η Άνω Πόλη, στην κορυφή του βράχου, ήταν το μέρος όπου κατοικούσαν οι άρχοντες και λάμβαναν χώρα τα διοικητικά συμβούλια. Σήμερα είναι σχεδόν ερημωμένη, όμως δεσπόζει σε αυτή ο ναός της Αγίας Σοφίας που είναι μικρογραφία της Αγίας Σοφίας της Κωνσταντινούπολης.

Στην κάτω πόλη, που είναι χτισμένη δίπλα στη θάλασσα, βρίσκεται ο ναός του Ελκόμενου Ιησού με σημαντικές εικόνες μεταβυζαντινών χρόνων να κοσμούν το εσωτερικό του (Πηγή: <http://odysseus.culture.gr> – Υπουργείο Πολιτισμού).

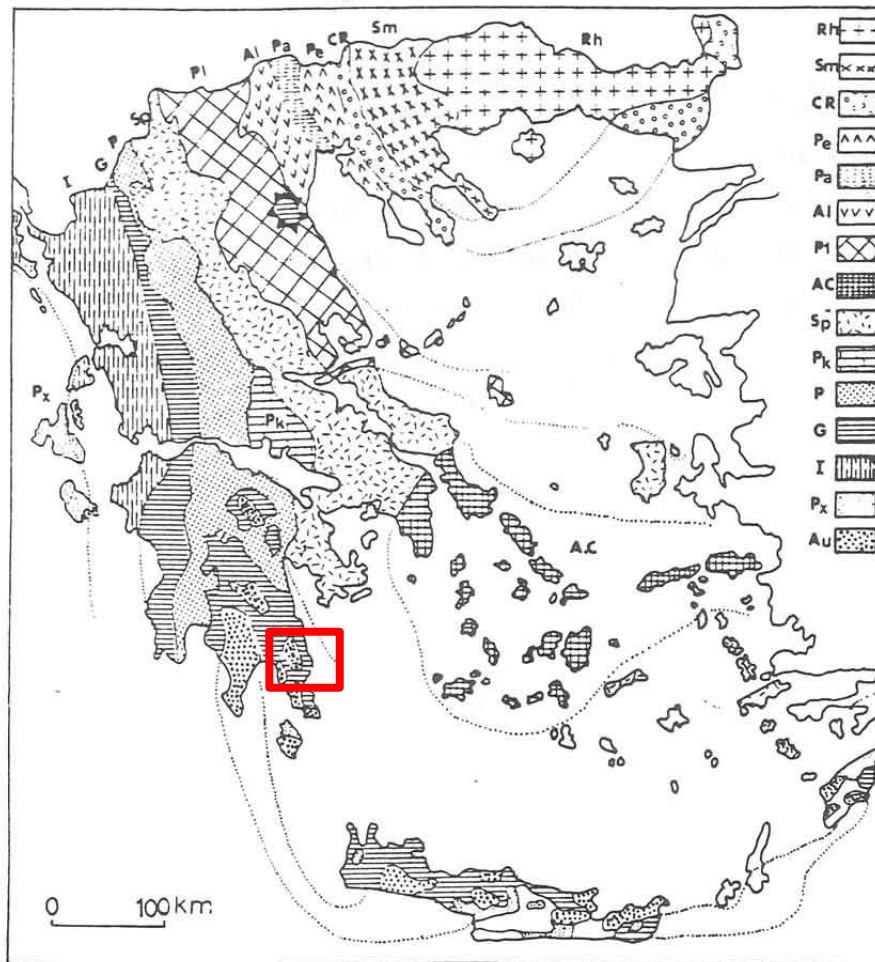


Εικόνα 2.3. Άποψη της καστροπολιτείας της Μονεμβασιάς από τη θάλασσα (Πηγή: Αρχαιολογική Εταιρεία Δυτικής Στερεάς Ελλάδας).

## 2.3 Η γεωλογία της περιοχής

Η περιοχή της Μονεμβασιάς αποτελεί τμήμα της ζώνης Γαβρόβου – Τριπόλεως που βρίσκεται δυτικά της ζώνης Ωλονού – Πίνδου και ανατολικά της Ιονίου ζώνης. Η ζώνη Τριπόλεως έχει διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ και εκτείνεται από την Ήπειρο έως και την Πελοπόννησο όπου παρατηρούνται και οι μεγαλύτερες εμφανίσεις της. Στο τμήμα της Πελοποννήσου εμφανίζεται να περιβάλλεται, με τεκτονικές επαφές, από τη ζώνη της Πίνδου. Έτσι λοιπόν οι εμφανίσεις της ζώνης Τριπόλεως στην Πελοπόννησο, αποτελούν τεκτονικά παράθυρα που ξεπροβάλουν κάτω από την επωθημένη, σε αυτή, ζώνη της Πίνδου. Η ζώνη Τριπόλεως βρίσκεται και αυτή επωθημένη στην Ιόνιο ζώνη. Θεωρείται ότι αποτελεί τμήμα της Απουλίας πλάκας

που αποσπάστηκε από τη Γκοτβάνα και στη συνέχεια αποτέθηκαν σε αυτή νηριτικά ιζήματα.



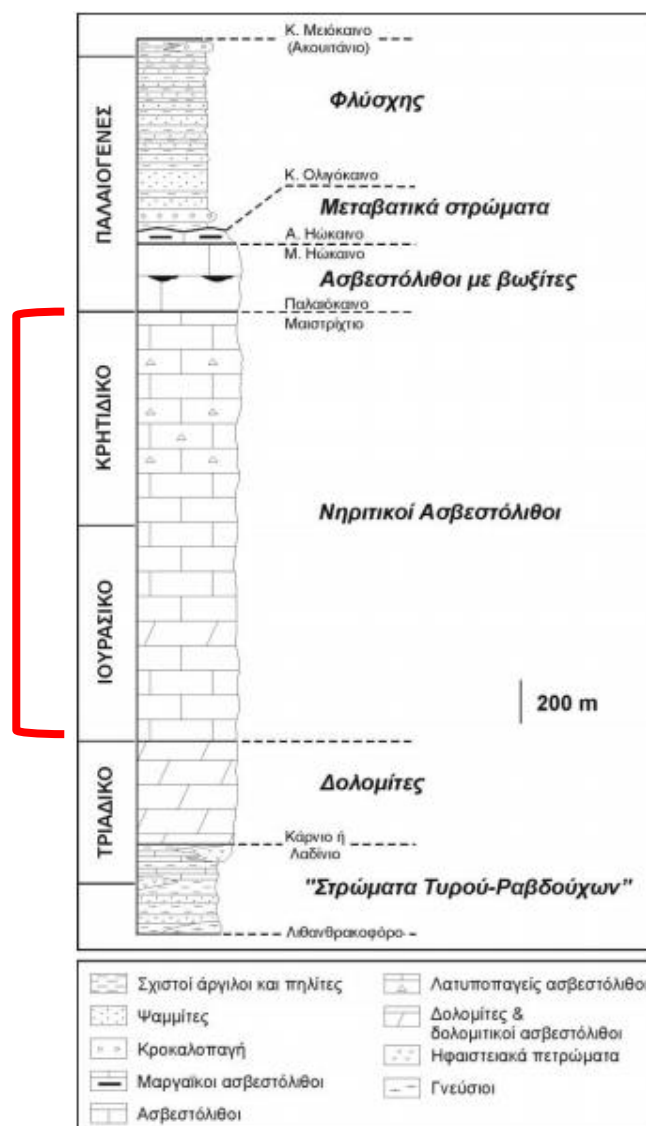
Εικόνα 2.4. Γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδας, με "G" συμβολίζεται η ζώνη Γραβρόβου - Τριπόλεως στο υπόμνημα. (Πηγή: «Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας», Μουντράκης, 2010)

Κατά την αλπική ορογένεση η ζώνη της Τρίπολης δέχθηκε μία συνεχή νηριτική ιζηματογένεση που κράτησε από Τριαδικό μέχρι το Ολιγόκαινο. Η ιζηματογένεση αυτή δημιούργησε ένα σύνολο ανθρακικών πετρωμάτων που το πάχος τους φτάνει τα 1800 m. Η απόθεση ξεκίνησε στο Άνω Τριαδικό με δολομίτες ενώ κατά τη διάρκεια όλου του Μεσοζοϊκού και Τριτογενούς αποτίθενται μόνο ασβεστολιθικοί σχηματισμοί. Κατά το Άνω Ηώκαινο αποτίθεται φλύσχης μέχρι και τη λήξη του Ολιγοκαίνου όπου λαμβάνει χώρα η πτύχωση και η τελική ανάδυση της ζώνης Γαβρόβου - Τριπόλεως (Μουντράκης, 2010).

Συγκεκριμένα, η περιοχή της Μονεμβασιάς με την ιστορική πόλη αποτελείται από ιουραικής ηλικίας στρωματώδεις ασβεστόλιθους και δολομίτες και κρητιδικούς ασβεστόλιθους χωρίς στρώση. Ο βράχος που δημιουργεί το πρανές, στους πρόποδες του οποίου βρίσκεται η ιστορική πόλη είναι κρητιδικός ασβεστόλιθος που

τέμνεται από δύο κύριες ζώνες ρηγμάτων, μία ΒΑ-ΝΔ και μία Α-Δ, είναι μέτρια διατμημένος με μερικά κατακόρυφα σπασίματα. Κατά τόπους εμφανίζεται καρστικοποιημένος δημιουργώντας μεγάλα έγκουλα που τον υποσκάπτουν.

Στο πρηνές απαντώνται τρεις με πέντε κύριες οικογένειες ασυνεχειών με αρκετά μεγάλες κλίσεις. Η απόσταση μεταξύ των διαφορετικών ασυνεχειών δεν μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια λόγω της διαφοροποίησης που υπάρχει ανάλογα με τον βαθμό κερματισμού του πετρώματος από σημείο σε σημείο. Γενικά όμως είναι μεγάλη η απόσταση και αυτό συνεπάγεται τη δημιουργία μεγάλων μπλοκ. Όσο πλησιάζουν στην κορυφή του πρηνούς το μέγεθος των μπλοκ μειώνεται λόγω της αποτόνωσης που υφίσταται το πέτρωμα και οι ασυνέχειες βρίσκονται πιο πυκνές σε εκείνο το σημείο, όπου είναι χτισμένο και το τοίχος της ιστορικής πόλης (Saroglou et al., 2012).



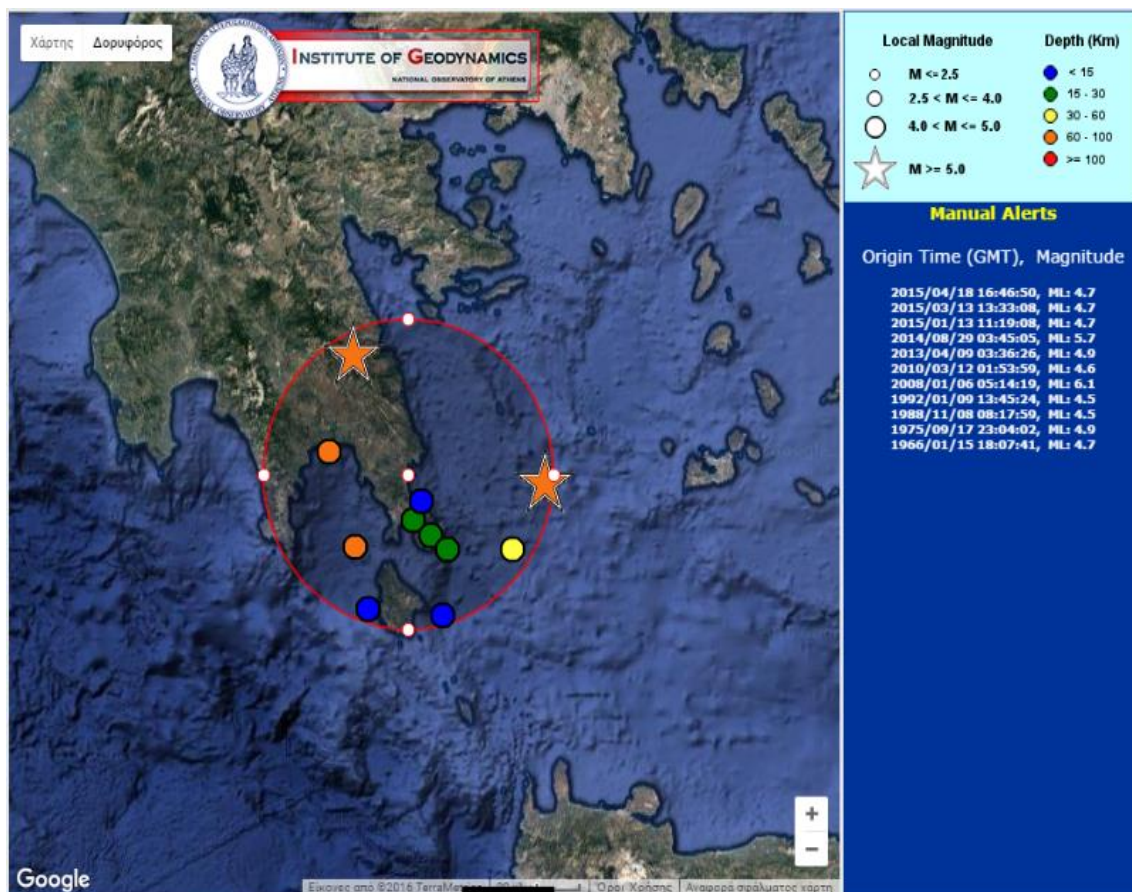
Εικόνα 2.5. Στρωματογραφική στήλη της ζώνης Γαβρόβου – Τριπόλεως. (Πηγή: «Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας», Μουντράκης, 2010)



## 2.4 Η σεισμικότητα της περιοχής

Τα τελευταία 50 χρόνια περίπου, από το 1964 μέχρι και το 2016, έχουν καταγραφεί, σε ακτίνα 60 χιλιομέτρων από την ιστορική πόλη της Μονεμβασίας, 11 σεισμικά γεγονότα μεγέθους σεισμικής ροπής μεγαλύτερο από 4,5. Το μεγαλύτερο γεγονός συνέβη στις 6 Ιανουαρίου του 2008 με μέγεθος σεισμικής ροπής ίσο με 6,1.

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2.6) φαίνονται, σε ακτίνα 60 χιλιομέτρων από τη Μονεμβασία, τα επίκεντρα των σεισμών με μέγεθος μεγαλύτερο του 4,5 από το 1964 μέχρι και το 2016, καθώς και ο σχετικός πίνακας με τις ημερομηνίες και την ακριβή γεωγραφική θέση του κάθε συμβάντος.



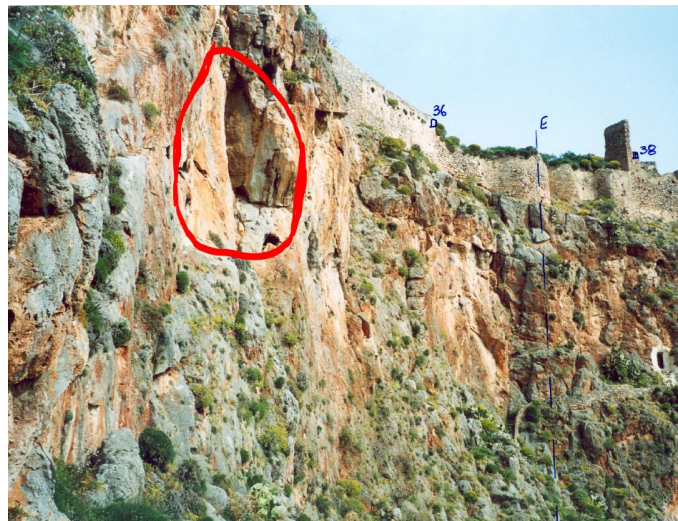
Εικόνα 2.6. Επίκεντρα σεισμών μεγέθους μεγαλύτερου του 4,5 σε ακτίνα 60 km τα τελευταία 50 χρόνια. (Πηγή: [www.gein.noa.gr](http://www.gein.noa.gr))

## 2.5 Ιστορικό βραχοκαταπτώσεων

Κατά το παρελθόν αρκετά επεισόδια βραχοκαταπτώσεων έχουν συμβεί στην περιοχή της Μονεμβασιάς (Εικόνα 2.8) και συνεχίζουν να συμβαίνουν, γεγονός που μαρτυρούν τα πολλά πεσμένα βραχώδη μπλοκ που συναντώνται στον δρόμο που οδηγεί στο κάστρο. Δύο πρόσφατα επεισόδια έλαβαν χώρα στην περιοχή το 2003 και 2010 με τα προϊόντα τους να φτάνουν στα σπίτια (Εικόνα 2.7) που υπάρχουν στους πρόποδες του πρανού. Εκτός από αυτά, πεσμένα μπλοκ του ασβεστόλιθου υπάρχουν μεμονωμένα σχεδόν παντού περιμετρικά της ιστορικής πόλης και του κάστρου.



Εικόνα 2.7. Αποκολλημένο μπλοκ ασβεστόλιθου που έχει σταματήσει πάνω σε τοίχο σπιτιού (Saroglou et al., 2012)



Εικόνα 2.8. Ένδειξη ιστορικού βραχοκατάπτωσης επάνω στο πρανές. Μπλοκ που απουσιάζει. (Πηγή: «Γεωλογική – Γεωτεχνική έρευνα και διατύπωση μέτρων στερέωσης υψηλών βραχοδών πρανών και υπερκείμενων τείχων κάστρων και προστασίας υποκείμενων ιστορικών μνημείων, με εφαρμογή στο κάστρο της Μονεμβασιάς. Ερευνητικό πρόγραμμα ΕΜΠ)



## 2.6 Κλιματικές συνθήκες της περιοχής

Τα κλιματικά στοιχεία για την περιοχή της Μονεμβασιάς, που είναι καταγεγραμμένα στο αρχείο του μετεωρολογικού σταθμού που υπάρχει στην περιοχή, αντιπροσωπεύουν το χρονικό διάστημα από το 2007 μέχρι και σήμερα. Όμως, για μία πλήρη κλιματική μελέτη απαιτούνται τουλάχιστον τριάντα χρόνων στοιχεία. Στην συγκεκριμένη περίπτωση παρόλα αυτά, θα θεωρηθούν ως αντιπροσωπευτικά τα υπάρχοντα κλιματικά στοιχεία.

Σύμφωνα με τον κλιματικό άτλαντα της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, η περιοχή της Μονεμβασιάς έχει μια μέση ετήσια θερμοκρασία 17°C. Ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες η θερμοκρασία φτάνει ακόμη και τους 40 βαθμούς Κελσίου. Σχετικά με τον υετό στην συγκεκριμένη περιοχή, οι μετρήσεις δείχνουν ότι το ετήσιο ύψος του υετού είναι τα 600 mm. (Πηγή: <http://climatlas.hnms.gr/>)

### 3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

#### ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΕΩΝ

##### 3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο της εργασίας παρατίθενται 5 συστήματα αξιολόγησης της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Το κάθε σύστημα αναλύεται ξεχωριστά με σκοπό να γίνει κατανοητή η μέθοδος μέσα από την οποία προκύπτουν τα αποτελέσματα που αφορούν στην επικινδυνότητα και τη διακινδύνευση στην περίπτωση της μελέτης του φαινομένου των βραχοκαταπτώσεων.

Τα συστήματα που αναλύονται παρακάτω είναι τα εξής:

1. Rockfall hazard and risk assessment (Saroglou et al., 2012) Το σύστημα αυτό προέκυψε από εργασία στον υπό μελέτη χώρο της Μονεμβασιάς.
2. The Modified Colorado Rockfall Hazard Rating System (CRHRS) (Santi, Russell, Higgins, & Spriet, 2009)
3. Three Gorges' Rockfall Risk Assessment System (ASRFR) (Bolin et al., 2010)
4. Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area (Corominas et al., 2005)

##### 3.2 Rockfall hazard and risk assessment (Saroglou et al., 2012)

Το συγκεκριμένο σύστημα εφαρμόζεται σε φυσικά και τεχνητά πρηνή και αποσκοπεί στον υπολογισμό της διακινδύνευσης στο φαινόμενο των βραχοκαταπτώσεων. Συγκεκριμένα, για πρηνή που θέτουν σε κίνδυνο, λόγω βραχοκαταπτώσεων, ανθρωπογενείς δομές και λειτουργίες.

Αποτελείται από είκοσι (20) παραμέτρους που ταξινομούνται σε τέσσερις (4) κατηγορίες με βάση την επικινδυνότητα και τις συνέπειες της εκδήλωσης του φαινομένου. Η βαρύτητα κάθε κατηγορίας στην τελική τιμή διαφέρει ανάλογα με την σπουδαιότητα των παραμέτρων που την απαρτίζουν.

Αναλυτικά οι τέσσερις (4) κατηγορίες:

Κατηγορία Α: Είναι κατηγορία που αφορά στην επικινδυνότητα. Περιέχει παραμέτρους που περιγράφουν τη γεωμετρία του πρηνούς. Κάθε παράμετρος έχει

δικό της συντελεστή βαρύτητας στην τελική τιμή και το σύνολο των παραμέτρων αυτής της κατηγορίας συνθέτει το 25% του τελικού αποτελέσματος. Οι παράμετροι που την αποτελούν είναι:

- Κλίση πρανούς
- Ύψος πρανούς
- Ύψος της περιοχής προέλευσης των βραχοκαταπτώσεων
- Τραχύτητα
- Βλάστηση στο πρανές

Κατηγορία Β: Περιλαμβάνει παραμέτρους που περιγράφουν την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το πρανές από γεωλογικής και τεχνικογεωλογικής άποψης. Το σύνολο των συντελεστών βαρύτητας όλων των παραμέτρων της, αποτελούν το 25% του τελικού αποτελέσματος. Αποτελείται από τις εξής παραμέτρους:

- Τραχύτητα ασυνεχειών/υλικό πλήρωσης/άνοιγμα ασυνεχειών
- Προσανατολισμός των ασυνεχειών
- Εμμονή των ασυνεχειών
- Θλιπτική αντοχή των ασυνεχειών
- Θλιπτική αντοχή του άρρηκτου βράχου
- Κερματισμός της βραχομάζας/όγκος τεμαχών
- Εκτιμώμενος αριθμός τεμαχών
- Καρστικοποίηση

Κατηγορία Γ: Από αυτή την κατηγορία προκύπτει το 10% του τελικού αποτελέσματος. Αναφέρεται στους παράγοντες ενεργοποίησης του φαινομένου, όπως είναι η βροχή, η σεισμικότητα, η επίδραση του υπόγειου νερού, και αποτελείται από τις παρακάτω παραμέτρους:

- Καθεστώς βροχοπτώσεων και ένταση
- Διαπερατότητα
- Συντελεστής επιτάχυνσης σεισμού ( $\alpha$ )

Κατηγορία Δ: Σχετίζεται με τις επιπτώσεις του φαινομένου στις κατασκευές και σε άλλα άμεσα επηρεαζόμενα στοιχεία. Το άθροισμα των συντελεστών βαρύτητας αποτελούν το 40% του συνολικού αποτελέσματος. Οι παράμετροι που την αποτελούν είναι:

- Πλάτος ζώνης ανάσχεσης

- Ιστορικό βραχοκαταπτώσεων
- Προσιτότητα του πρανούς
- Πιθανές επιπτώσεις και αξία των κατασκευών

Πίνακας 3.1. Παράμετροι και βαθμολόγηση (Saroglou et al., 2012)

| Παράμετροι                                                                                                               | Κατηγορία/<br>συντελεστής<br>βαρύτητας | Αξιολόγηση παραμέτρων                   |                                                |                                                                         |                                                | Βαθμός<br>(Πολλαπλασι-<br>ασμένος με<br>τον<br>συντελεστή<br>βαρύτητας) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 1. Κλίση<br>πρανούς (°)                                                                                                  | A/7%                                   | 25-40                                   | Μέτρια 40-50                                   | Μεγάλη<br>50-60                                                         | Πολύ<br>μεγάλη<br>>60                          |                                                                         |
| Εκτίμηση                                                                                                                 |                                        | 10                                      | 30                                             | 60                                                                      | 100                                            |                                                                         |
| 2. Ύψος<br>πρανούς (m)                                                                                                   | A/4%                                   | <15                                     | 15-30                                          | 30-60                                                                   | >60                                            |                                                                         |
| Εκτίμηση                                                                                                                 |                                        | 10                                      | 30                                             | 60                                                                      | 100                                            |                                                                         |
| 3. Ύψος της<br>περιοχής<br>προέλευσης<br>των<br>βραχοκατα-<br>πτώσεων (H<br>είναι το<br>συνολικό<br>ύψος του<br>πρανούς) | A/7%                                   | Κατώτερες περιοχές<br>του πρανούς (H/4) | Ενδιάμεσες<br>περιοχές του<br>πρανούς<br>(H/2) | Ενδιάμεσ-<br>ες έως<br>ανώτερες<br>περιοχές<br>του<br>πρανούς<br>(3H/2) | Ολόκληρο<br>το πρανές<br>(H)                   |                                                                         |
| Εκτίμηση                                                                                                                 |                                        | 10                                      | 30                                             | 60                                                                      | 100                                            |                                                                         |
| 4. Τραχύτητα<br>πρανούς                                                                                                  | A/3%                                   | Τραχύ, επίπεδο                          | Επίπεδο<br>ομαλό                               | Τραχύ,<br>παρουσία<br>στενών<br>πάγκων                                  | Πολύ<br>τραχύ,<br>παρουσία<br>στενών<br>πάγκων |                                                                         |
| Εκτίμηση                                                                                                                 |                                        | 10                                      | 30                                             | 60                                                                      | 100                                            |                                                                         |
| 5. Βλάστηση                                                                                                              | A/4%                                   | Πυκνή, ψηλά δέντρα                      | Χαμηλή,<br>θάμνοι                              | Αραιή<br>βλάστηση                                                       | Καθόλου<br>βλάστηση                            |                                                                         |
| Εκτίμηση                                                                                                                 |                                        | 10                                      | 30                                             | 60                                                                      | 100                                            |                                                                         |



|                                                                            |      |                        |             |                                                                                                |                                                                                                                             |                                                                                                                      |  |
|----------------------------------------------------------------------------|------|------------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 6. Τραχύτητα<br>ασυνεχειών/<br>υλικό<br>πλήρωσης/<br>άνοιγμα<br>ασυνεχειών | B/6% | Τραχείες               | Ομαλές      | Κυματιστές<br>ή πληρωμέ-<br>νες με<br>γωνιώδη<br>θραύσματα.<br>Μέτριο<br>άνοιγμα 2,5-<br>10 mm | Ελαφρώς<br>τραχείες<br>επίπεδες ή<br>πληρωμέ-<br>νες με<br>στιφρή<br>άργιλο >5<br>mm. Πολύ<br>ευρύ<br>άνοιγμα 10-<br>100 mm | Ομαλές<br>επίπεδες ή<br>πληρωμέ-<br>νες με<br>μαλακή<br>άργιλο >5<br>mm.<br>Εξαιρετικά<br>ευρύ<br>άνοιγμα<br>>100 mm |  |
| Εκτίμηση                                                                   |      | 10                     | 15          | 30                                                                                             | 60                                                                                                                          | 100                                                                                                                  |  |
| 7. Προσανα-<br>τολισμός<br>ασυνεχειών                                      | B/5% | Ευνοϊκός για ευστάθεια |             | Μέτριος                                                                                        | Δυσμενής                                                                                                                    | Πολύ<br>δυσμενής                                                                                                     |  |
| Εκτίμηση                                                                   |      | 10                     |             | 30                                                                                             | 60                                                                                                                          | 100                                                                                                                  |  |
| 8. Εμμονή (m)                                                              | B/4% | Πολύ μικρή<br><1 m     | Μικρή 1-2 m | Μέτρια 2-5<br>m                                                                                | Μεγάλη 5-<br>10 m                                                                                                           | Πολύ<br>μεγάλη<br>>10 m                                                                                              |  |
| Εκτίμηση                                                                   |      | 10                     | 15          | 30                                                                                             | 60                                                                                                                          | 100                                                                                                                  |  |
| 9. Θλιπτική<br>αντοχή των<br>ασυνεχειών<br>(JRC, MPa)                      | B/1% | >30                    |             | 20-30                                                                                          | 5-20                                                                                                                        | <5<br>αποσαθρω<br>μένες                                                                                              |  |
| Εκτίμηση                                                                   |      | 10                     |             | 30                                                                                             | 60                                                                                                                          | 100                                                                                                                  |  |
| 10. Θλιπτική<br>αντοχή του<br>άρρηκτου<br>βράχου (MPa)                     | B/1% | <10                    |             | 10-30                                                                                          | 30-60                                                                                                                       | >60                                                                                                                  |  |
| Εκτίμηση                                                                   |      | 10                     |             | 30                                                                                             | 60                                                                                                                          | 100                                                                                                                  |  |
| 11. Κερματι-<br>σμός της<br>βραχομάζας/<br>όγκος<br>τεμαχίων (m³)          | B/4% | <1                     | 1-2,5       | 2,5-4,0                                                                                        | 4,0-8,0                                                                                                                     | >8,0                                                                                                                 |  |
| Εκτίμηση                                                                   |      | 10                     | 15          | 30                                                                                             | 60                                                                                                                          | 100                                                                                                                  |  |

|                                                  |       |                                            |                                                    |                                            |                                            |                             |  |
|--------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------|--|
| 12. Εκτιμώμενος αριθμός τεμαχών                  | B/2%  | Μηδέν                                      |                                                    | 1-5                                        | 5-10                                       | >10                         |  |
| Εκτίμηση                                         |       | 10                                         |                                                    | 30                                         | 60                                         | 100                         |  |
| 13. Καρστικοποίηση                               | B/2%  | Καθόλου                                    |                                                    | Αραιή                                      | Μέτρια                                     | Συχνή                       |  |
| Εκτίμηση                                         |       | 10                                         |                                                    | 30                                         | 60                                         | 100                         |  |
| 14. Βροχοπτώσεις και ένταση                      | Γ/3%  | Σπάνιες                                    | Αραιές                                             | Εποχιακές                                  | Συχνές                                     | Πολύ συχνές, σε όλο το έτος |  |
| Εκτίμηση                                         |       | 10                                         | 15                                                 | 30                                         | 60                                         | 100                         |  |
| 15. Διαπερατότητα                                | Γ/3%  | Πολύ μεγάλη                                | Μεγάλη                                             | Μέτρια                                     | Μικρή                                      | Πολύ μικρή                  |  |
| Εκτίμηση                                         |       | 10                                         | 15                                                 | 30                                         | 60                                         | 100                         |  |
| 16. Συντελεστής επιτάχυνσης σεισμού ( $\alpha$ ) | Γ/4%  | $\alpha < 0,16$                            |                                                    | $0,16 < \alpha < 0,24$                     | $0,24 < \alpha < 0,36$                     | $\alpha > 0,36$             |  |
| Εκτίμηση                                         |       | 10                                         |                                                    | 30                                         | 60                                         | 100                         |  |
| 17. Πλάτος ζώνης ανάσχεσης (m)                   | Δ/10% | >20                                        | 10-20                                              | 5-10                                       | 2-5                                        | Δεν υπάρχει                 |  |
| Εκτίμηση                                         |       | 10                                         | 15                                                 | 30                                         | 60                                         | 100                         |  |
| 18. Ιστορικό βραχοκαταπτώσεων                    | Δ/5%  | Καθόλου έως μερικές                        | Περιστασιακά                                       | Πολυάριθμες                                | Συχνές                                     | Συνεχείς                    |  |
| Εκτίμηση                                         |       | 10                                         | 15                                                 | 30                                         | 60                                         | 100                         |  |
| 19. Προσιτότητα του πρανούς                      | Δ/5%  | Όλοι οι τύποι σταθεροποίησης είναι δυνατοί | Οι περισσότεροι τύποι σταθεροποίησης είναι δυνατοί | Αρκετοί τύποι σταθεροποίησης είναι δυνατοί | Μερικοί τύποι σταθεροποίησης είναι δυνατοί | Πολύ δύσκολη πρόσβαση       |  |
| Εκτίμηση                                         |       | 10                                         | 15                                                 | 30                                         | 60                                         | 100                         |  |

|                                                |       |                                                    |                                                  |                                                     |                                                        |                                                                   |  |
|------------------------------------------------|-------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--|
| 20. Πιθανές επιπτώσεις και αξία των κατασκευών | Δ/20% | Αμελητέες. Όχι κατασκευές και μόνιμη δραστηριότητα | Μικρές. Περιοχή με λίγη ανθρώπιν ή δραστηριότητα | Μέτρια ανθρώπιν ή παρουσία. Μικρή συχνότητα σπιτιών | Μεγάλες. Συχνή ανθρώπιν παρουσία και πολυάριθμα σπίτια | Πολύ μεγάλες. Συνεχής ανθρώπιν παρουσία. Πυκνοκατοικημένη περιοχή |  |
| Εκτίμηση                                       |       | 10                                                 | 15                                               | 30                                                  | 60                                                     | 100                                                               |  |
| Τελικό αποτέλεσμα (Μέγιστο 100)                |       |                                                    |                                                  |                                                     |                                                        |                                                                   |  |

Ανάλογα με το τελικό αποτέλεσμα που θα προκύψει από την εφαρμογή του συστήματος βαθμολόγησης της διακινδύνευσης, υπάρχει σχετικός, συμπληρωματικός, πίνακας που κάνει ερμηνεία του αριθμητικού αποτελέσματος και εκτιμά την αναγκαιότητα εφαρμογής μέτρων προστασίας. Ο συγκεκριμένος πίνακας παρατίθεται παρακάτω.

Πίνακας 3.2. Κατηγορία διακινδύνευσης και μέτρα υποστήριξης (Saroglou et al., 2012)

| Κατηγορία | Τελικό αποτέλεσμα | Διακινδύνευση | Αναγκαιότητα μέτρων υποστήριξης                                                                                                                  |
|-----------|-------------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I         | <20               | Πολύ μικρή    | Δεν είναι απαραίτητα                                                                                                                             |
| II        | 21-40             | Μικρή         | Χρήση μέτρων υποστήριξης σε περιορισμένη έκταση                                                                                                  |
| III       | 41-60             | Μέτρια        | Απαιτούνται ελαφριά μέτρα υποστήριξης                                                                                                            |
| IV        | 61-80             | Μεγάλη        | Απαιτείται συνδιασμός ενεργητικών και παθητικών μέτρων υποστήριξης                                                                               |
| V         | 81-100            | Πολύ μεγάλη   | Κρίσιμη κατάσταση. Απαιτούνται δυνατά ενεργητικά και παθητικά μετρα υποστήριξης. Το ενδεχόμενο υπολειματικού κινδύνου θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν |

### 3.3 The Modified Colorado Rockfall Hazard Rating System (Santi et al., 2009)

Το σύστημα του Κολοράντο περιλαμβάνει τέσσερις (4) ανεξάρτητες κατηγορίες παραμέτρων που αφορούν στην εκτίμηση της επικινδυνότητας εκδήλωσης βραχοκαταπτώσεων. Επίσης εμπεριέχει και μία ακόμη κατηγορία που εξετάζεται ξεχωριστά για την εκτίμηση της διακινδύνευσης, καθώς εξετάζει τις συνθήκες της κυκλοφορίας στην περιοχή. Οι πρώτες τέσσερις (4) κατηγορίες που σχετίζονται με την επικινδυνότητα είναι οι εξής:

- Συνθήκες του πρανούς
- Κλιματικές συνθήκες
- Γεωλογικές συνθήκες
- Κατάσταση των ασυνεχειών

Το σύστημα αυτό αποτελείται από διάφορες παραμέτρους που αφορούν γεωλογικές συνθήκες και κατάσταση ασυνεχειών, ώστε να ταξινομηθούν κατάλληλα σε συνδυασμό με τις συνθήκες του πρανούς και τις κλιματικές συνθήκες. Για τον λόγο αυτό, τρία (3) γεωλογικά υλικά εξετάζονται ανεξάρτητα στην κατηγορία των γεωλογικών συνθηκών. Αυτά είναι:

- Ιζηματογενή πετρώματα
- Κρυσταλλικά πετρώματα
- Block-in-matrix

Τα υλικά block-in-matrix μπορεί να περιλαμβάνουν είτε κολλουβιακές αποθέσεις είτε αποθέσεις από λασποροές ή παγετώνες.

Αναλυτικά, παρουσιάζονται παρακάτω όλες οι κατηγορίες με τις παραμέτρους ταξινόμησης που περιλαμβάνει η καθεμία.

- Συνθήκες του πρανούς
  1. Ύψος πρανούς
  2. Συχνότητα βραχοκαταπτώσεων
  3. Μέση κλίση πρανούς
  4. Παράγοντες ενεργοποίησης του φαινομένου
  5. Ζώνη ανάσχεσης



➤ Κλιματικές συνθήκες

1. Ετήσια κατακρημνίσματα
2. Ετήσιος κύκλος ψύξης / απόψυξης
3. Στάλαγμα / Νερό
4. Διεύθυνση πρηνούς

➤ Γεωλογικές συνθήκες

- Ιζηματογενή πετρώματα
  1. Βαθμός ταπείνωσης
  2. Αποσάθρωση
  3. Βαθμός στρωμάτωσης
- Κρυσταλλικά πετρώματα
  1. Χαρακτηρισμός της βραχομάζας
  2. Βαθμός προεξοχής
  3. Διάβρωση
- Block-in-matrix
  1. Μέγεθος τεμάχους
  2. Σχήμα τεμάχους
  3. Βλάστηση

➤ Κατάσταση των ασυνεχειών

1. Μέγεθος τεμάχους / Όγκος
2. Αριθμός συστημάτων ασυνεχειών
3. Εμμόνη, προσανατολισμός
4. Άνοιγμα
5. Αποσάθρωση
6. Τριβή

➤ Συνθήκες κυκλοφορίας της περιοχής

1. Ορατότητα
2. Μέση διακινδύνευση ανά όχημα
3. Αριθμός ατυχημάτων

Κάθε παράμετρος βαθμολογείται σε τέσσερις (4) κατηγορίες και παίρνει τον βαθμό της κατηγορίας στην οποία θα ταξινομηθεί. Οι κατηγορίες έχουν βαθμούς 3, 9, 27 και 81 αντίστοιχα. Η τελική επικινδυνότητα του πρηνούς, σύμφωνα με τη συνολική του βαθμολογία, προκύπτει ανάλογα με το είδος του πετρώματος από το οποίο αποτελείται (από Santi et al., 2009).

### 3.4 Three Gorges' Rockfall Risk Assessment System (Bolin et al., 2010)

Το συγκεκριμένο σύστημα εκτίμησης της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης, (ASRFR), απαρτίζεται από δεκαπέντε (15) παράγοντες εκ των οποίων οι επτά (7) αφορούν την επικινδυνότητα και χωρίζονται σε δομικούς και δυναμικούς και οι υπόλοιποι οκτώ (8) τις συνέπειες ενός βραχοκαταπτωτικού γεγονότος. Αναλυτικά:

- Επικινδυνότητα
  - A. Παράγοντες δομής της βραχομάζας
    - 1. Μέγεθος τεμάχους
    - 2. Κατάσταση ορίων
    - 3. Θλιπτική αντοχή του άρρηκτου βράχου
    - 4. Δομή
  - B. Παράγοντες δυναμικής της βραχομάζας
    - 1. Νερό στην επιφάνεια
    - 2. Κατάσταση αποσάθρωσης
    - 3. Ανθρώπινη δραστηριότητα
- Συνέπειες
  - 1. Συχνότητα διέλευσης πλοίων και αποβάθρες
  - 2. Μέγεθος τεμάχους
  - 3. Σχήμα τεμάχους
  - 4. Υψόμετρο πτώσης τεμάχους
  - 5. Απόσταση όρασης – απόφασης
  - 6. Διανομή τεμαχών
  - 7. Κατανομή τεμαχών
  - 8. Εμπόδιο στο πρανές

Κάθε παράγοντας έχει διαφορετική βαρύτητα στη διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος. Ο προσδιορισμός της βαρύτητας κάθε παράγοντα προσδιορίστηκε με βάση Αναλυτική Διαδικασία Ιεραρχίας (AHP) του Thomas L. Saaty. Η AHP είναι μια τεχνική που συμβάλει στην λήψη πολύπλοκων αποφάσεων. Η διαδικασία αυτή είναι βασισμένη σε μαθηματικά μοντέλα και στην ψυχολογία του ανθρώπου (Saaty, 1990).

Αφού υπολογιστούν οι συντελεστές βαρύτητας για κάθε παράγοντα, προστίθενται ξεχωριστά όλοι οι συντελεστές βαρύτητας των παραγόντων που αφορούν στην επικινδυνότητα και των παραγόντων που αφορούν στις συνέπειες. Έτσι προκύπτει η πραγματική τιμή επικινδυνότητας και συνεπειών αντίστοιχα. Έπειτα οι δύο αυτές

τιμές ομαλοποιούνται σε τιμές μεταξύ 0 και 1. Έτσι αναφέρονται ως σχετική πιθανότητα επικινδυνότητας (H) και σχετική πιθανότητα συνεπειών (C). Τέλος, η τελική τιμή διακινδύνευσης (R) προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό των δύο σχετικών πιθανοτήτων H και C (από Bolin et al., 2010).

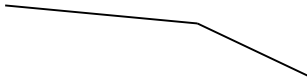
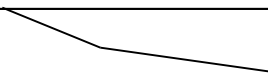
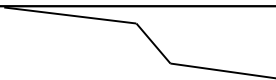
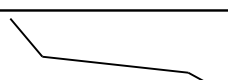
Παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικά τι σύστημα εκτίμησης της επικινδυνότητας και διακινδύνευσης ASRFR, με όλους του παράγοντες και τους συντελεστές βαρύτητας ομαδοποιημένους:

Πίνακας 3.3. Παράγοντες εκτίμησης της επικινδυνότητας, ASRFR (Bolin et al., 2010)

| ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ (H)  |                                                       |                       |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------|
| Παράγοντας                      | Ταξινόμηση / Περιγραφή                                | Συντελεστής βαρύτητας |
| Μέγεθος τεμάχους                | Μεγάλο & μεταξύ τους κενό >1,5 m                      | 0,25                  |
|                                 | Μέτριο & μεταξύ τους κενό περίπου 0,8 m               | 0,5                   |
|                                 | Μικρό & μεταξύ τους κενό περίπου 0,3 m                | 0,75                  |
|                                 | Μεταξύ τους κενό περίπου 0,15 m                       | 1                     |
| Κατάσταση ορίων                 | 3D κοπής διαμόρφωση ορίου, ενεργότητα                 | 1                     |
|                                 | 3D κοπής διαμόρφωση ορίου, ανενεργότητα               | 0,8                   |
|                                 | Σχηματίζεται τετραπλής κοπής επιφάνεια                | 0,6                   |
|                                 | Σχηματίζεται τριπλής κοπής επιφάνεια                  | 0,4                   |
|                                 | Σχηματίζεται διπλής κοπής επιφάνεια                   | 0,2                   |
| Ανθρώπινη δραστηριότητα         | Έντονη (εκσκαφή πρανών, υπόγεια εκσκαφή)              | 1                     |
|                                 | Μέτρια (αφαίρεση τρημάτων)                            | 0,75                  |
|                                 | Μικρή (άρδευση)                                       | 0,5                   |
|                                 | Όχι                                                   | 0,25                  |
| Κατάσταση αποσάθρωσης           | Εντελώς αποσαθρωμένο, ισχυρότερη χημική αποσάθρωση    | 1                     |
|                                 | Έντονα αποσαθρωμένο, παρουσία χημικής αποσάθρωσης     | 0,75                  |
|                                 | Μέτρια αποσαθρωμένο, λίγη χημική αποσάθρωση           | 0,5                   |
|                                 | Λίγη αποσάθρωση, ο βαθμός διάβρωσης είναι πολύ μικρός | 0,25                  |
| Θλιπτική αντοχή άρρηκτου βράχου | 50                                                    | 0,2                   |
|                                 | 40                                                    | 0,4                   |
|                                 | 30                                                    | 0,6                   |
|                                 | 20                                                    | 0,8                   |
|                                 | 10                                                    | 1                     |
| Δομή βραχομάζας                 | Πυκνά στρωματώδης                                     | 0,25                  |
|                                 | Στρωματώδης                                           | 0,5                   |
|                                 | Αραιά στρωματώδης                                     | 0,75                  |
|                                 | Ταινιωτή                                              | 1                     |

|                     |         |     |
|---------------------|---------|-----|
| Νερό στην επιφάνεια | Στεγνή  | 0,2 |
|                     | Υγρασία | 0,4 |
|                     | Υγρή    | 0,6 |
|                     | Στάγδην | 0,8 |
|                     | Ροή     | 1   |

Πίνακας 3.4. Παράγοντες των συνεπειών, ASRFR (Bolin et al., 2010)

| ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΣΥΝΕΠΕΙΩΝ (C)                 |                                                                                    |                                                                                      |                       |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Παράγοντας                               | Ταξινόμηση / Περιγραφή                                                             |                                                                                      | Συντελεστής βαρύτητας |
| Συχνότητα διέλευσης πλοίων και αποβάθρες | Αποβάθρα                                                                           |                                                                                      | 1                     |
|                                          | Προσωρινή αποβάθρα                                                                 |                                                                                      | 0,75                  |
|                                          | 6 min/πλοίο                                                                        |                                                                                      | 0,5                   |
|                                          | 12 min/πλοίο                                                                       |                                                                                      | 0,25                  |
| Διαδρομή τεμάχους                        | Γραμμική τροχιά (°)                                                                | 20                                                                                   | 0,2                   |
|                                          |                                                                                    | 40                                                                                   | 0,4                   |
|                                          |                                                                                    | 60                                                                                   | 0,8                   |
|                                          |                                                                                    | 80                                                                                   | 1                     |
|                                          | Αναδιπλούμενη τροχιά                                                               |  | 0,8                   |
|                                          |                                                                                    |  | 0,6                   |
|                                          |                                                                                    |  | 0,4                   |
|                                          |                                                                                    |  | 0,2                   |
| Απόσταση όρασης - απόφασης               | Πολύ περιορισμένη. Η πλαγιά ή κάποιο φυτό εμποδίζει το οπτικό πεδίο                |                                                                                      | 1                     |
|                                          | Περιορισμένη. Φαίνεται μόνο ένα μέρος της βραχοκατάπτωσης                          |                                                                                      | 0,75                  |
|                                          | Ο κόσμος μπορεί να δει ολόκληρα τα τεμάχια, όχι όμως τον πιθανό τρόπο κίνησής τους |                                                                                      | 0,5                   |
|                                          | Καθόλου εμπόδια. Ο οδηγός έχει την πλήρη εικόνα                                    |                                                                                      | 0,25                  |
| Μέγεθος τεμάχους                         | Μεγάλο & μεταξύ τους κενό >1,5 m                                                   |                                                                                      | 1                     |
|                                          | Μέτριο & μεταξύ τους κενό περίπου 0,8 m                                            |                                                                                      | 0,75                  |
|                                          | Μικρό & μεταξύ τους κενό περίπου 0,3 m                                             |                                                                                      | 0,5                   |
|                                          | Μεταξύ τους κενό περίπου 0,15 m                                                    |                                                                                      | 0,25                  |



|                                    |                                    |     |
|------------------------------------|------------------------------------|-----|
| Πιθανό υψόμετρο<br>πτώσεις τεμαχών | 10                                 | 0,2 |
|                                    | 30                                 | 0,4 |
|                                    | 60                                 | 0,6 |
|                                    | 90                                 | 0,8 |
|                                    | >120                               | 1   |
| Κατανομή τεμαχών                   | Συγκεντρωμένα                      | 0,3 |
|                                    | Σκορπισμένα                        | 0,6 |
|                                    | Χωρίς κατανομή                     | 1   |
| Σχήμα τεμάχους                     | Πλακώδες                           | 0,3 |
|                                    | Κυβικό                             | 0,6 |
|                                    | Σφαιρικό                           | 1   |
| Εμπόδιο στο πρηνές                 | Τεράστιοι βράχοι και μεγάλα δέντρα | 0,2 |
|                                    | Δέντρα                             | 0,4 |
|                                    | Θάμνοι                             | 0,6 |
|                                    | Γρασίδι                            | 0,8 |
|                                    | Κανένα                             | 1   |

### 3.5 Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area (Corominas et al., 2005)

Το συγκεκριμένο σύστημα (QRA) αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε στην Ανδόρα. Η διαδικασία που περιγράφει, αποτελείται από τέσσερα (4) διαδοχικά στάδια, τα οποία είναι τα εξής:

- 1) Η δημιουργία μιας συσχέτισης μεταξύ συχνότητας και μεγέθους βραχοκαταπτώσεων στην περιοχή μελέτης
- 2) Η όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστη προσέγγιση της πιθανότητας, οι βράχοι της κατολίσθησης, να πέσουν στα κτήρια και στους ανθρώπους που βρίσκονται κατάντη του πρηνούς
- 3) Καθορισμός της τρωτότητας των στοιχείων που βρίσκονται εκτεθειμένα ενάντια στο βραχοκαταπτωτικό φαινόμενο
- 4) Προσδιορισμός της αποτελεσματικότητας της εφαρμογής των τεχνητών φραγμών ενάντια στη βραχοκατάπτωση και εκτίμηση του υπολειπόμενου κινδύνου, λόγω της ικανότητας κάποιων τεμαχών να εξουδετερώσουν τους τεχνητούς φραγμούς.

Η αξία της ετήσιας απώλειας ακίνητης περιουσίας,  $R_{(prop)}$ , και η ετήσια πιθανότητα να χάσει τη ζωή του κάποιος άνθρωπος,  $P_{(LOL)}$ , εκφράζονται μέσα από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$R_{(prop)} = P_{(L)} \times P_{(T:L)} \times P_{(S:T)} \times V_{(prop:S)} \times E$$

Όπου  $P_{(L)}$  παρουσιάζεται η συχνότητα εκδήλωσης βραχοκαταπτωτικών γεγονότων συγκεκριμένου μεγέθους,  $P_{(T:L)}$  είναι η πιθανότητα που υπάρχει να φτάσουν βράχοι στα στοιχεία που βρίσκονται σε κίνδυνο,  $P_{(S:T)}$  η χωρική – χρονική πιθανότητα κάποιου εβρισκόμενου σε κίνδυνο στοιχείου,  $V_{(prop:S)}$  είναι η τρωτότητα των εβρισκόμενων σε κίνδυνων στοιχείων ενάντια στο φαινόμενο της βραχοκατάπτωσης, και  $E$  τα στοιχεία που είναι σε κίνδυνο.

$$P_{(LOL)} = P_{(L)} \times P_{(T:L)} \times P_{(S:T)} \times V_{(D:T)}$$

Όπου  $V_{(D:T)}$  εμφανίζεται η τρωτότητα ενός ανθρώπου ενάντια στο φαινόμενο της βραχοκατάπτωσης και οι μεταβλητές  $P_{(L)}$ ,  $P_{(T:L)}$  και  $P_{(S:T)}$  διατηρούν τις έννοιες που ορίστηκαν παραπάνω (Από Corominas et al., 2005).

### 3.5.1 Διακινδύνευση για την ακίνητη περιουσία

Αναφέρεται στη διακινδύνευση που υφίσταται πριν από την εφαρμογή οποιουδήποτε προστατευτικού μέτρου και εκφράζεται ως  $R_{(U)}$ , με την ακόλουθη σχέση:

$$R_{(U)} = P_{(R)} \times P_{(T:R)} \times P_{(S:T)} \times V_{(prop:S)}$$

Όπου  $P_{(R)}$  αναφέρεται η συχνότητα βραχοκατάπτωσης τεμάχους ορισμένου όγκου,  $P_{(T:R)}$  η πιθανότητα να φτάσουν οι βράχοι στο όριο κατοικημένης περιοχής,  $P_{(S:T)}$  είναι η χρονική πιθανότητα των κτισμάτων που βρίσκονται εκτεθειμένα ενάντια στο βραχοκαταπτωτικό φαινόμενο, και  $V_{(prop:S)}$  είναι η τρωτότητα των κτισμάτων που βρίσκονται εκτεθειμένα ενάντια στο φαινόμενο (Από Corominas et al., 2005).

### 3.5.2 Διακινδύνευση για τους ανθρώπους

Για να υπάρξει η περίπτωση να πληγεί ένας άνθρωπος από βραχοκατάπτωση, θα πρέπει να συμπέσουν, χωρικά και χρονικά, ο άνθρωπος με τον βράχο. Υπάρχουν

δύο διαφορετικοί τύποι διακινδύνευσης για ανθρώπους. Ο πρώτος είναι η ατομική διακινδύνευση, που περιγράφεται με την ετήσια πιθανότητα που έχει ένας άνθρωπος να χάσει τη ζωή του από βραχοκαταπτώσεις. Ενώ ο δεύτερος είναι οι κοινωνική διακινδύνευση, που παρουσιάζεται μέσα από την ετήσια πιθανότητα που υπάρχει να χάσει τη ζωή του, λόγω βραχοκαταπτώσεων, ένα σύνολο ανθρώπων.

**Ατομική διακινδύνευση:** Αναφέρεται σε έναν άνθρωπο, εντός κάποιου κτηρίου, που βρίσκεται υπό τον κίνδυνο ενός τεμάχους που αποτελεί προϊόν βραχοκατάπτωσης.

$$P_{(ILOL)} = P_{(R)} \times P_{(T:R)} \times P_{(S:T)} \times P_{(T:P)} \times P_{(S:P)} \times V_{(D:T)}$$

Όπου  $P_{(S:T)}$  ορίζεται η χωρική – χρονική πιθανότητα των κτισμάτων που βρίσκονται εκτεθειμένα ενάντια στο βραχοκαταπτωτικό φαινόμενο,  $P_{(T:P)}$  είναι η χρονική πιθανότητα που έχει ένας άνθρωπος να βρίσκεται μέσα σε κτήριο τη στιγμή εκδήλωσης του φαινομένου,  $P_{(S:P)}$  είναι η χωρική πιθανότητα που έχει ένας άνθρωπος να βρίσκεται πάνω στη διαδρομή του ριφθέντος τεμάχους την ώρα που αυτό συγκρούεται στο κτήριο, και  $V_{(D:T)}$  είναι η τρωτότητα του ανθρώπου που βρίσκεται εκτεθειμένος ενάντια στο βραχοκαταπτωτικό φαινόμενο.

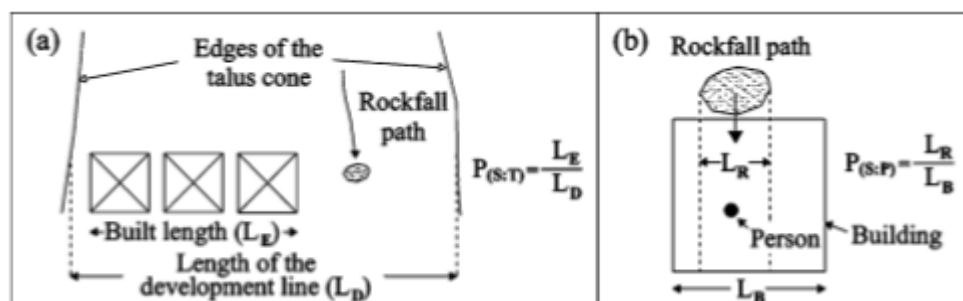


Figure 3.1 (a,b). Γεωμετρική απεικόνιση των παραμέτρων  $P_{(S:T)}$  και  $P_{(S:P)}$  (Corominas et al., 2005)

Η παράμετρος  $P_{(S:T)}$  εκφράζει το μήκος του κτηρίου ( $L_B$ ) ως προς το μήκος ολόκληρης της γραμμή μετώπου του οικισμού έναντι του πρανούς ( $L_D$ ) (βλ. Figure 3.1a).

$$P_{(S:T)} = L_B / L_D$$

Η ατομική διακινδύνευση επηρεάζεται άμεσα από το μέγεθος των τεμαχών. Όταν είναι μεγάλο το τέμαχος τότε είναι μεγαλύτερη και η πιθανότητα να συμβεί η

πρόσκρουση, σε αντίθεση με την περίπτωση που είναι μικρό το τέμαχος. Όταν ο άνθρωπος βρίσκεται στην τροχιά που διαγράφει το τέμαχος επιφάνειας  $L_R$  μετά την πτώση του, τότε συμβαίνει η πρόσκρουση τους. Επίσης, πρέπει ο άνθρωπος να βρίσκεται στην πλευρά ( $L_B$ ) του κτηρίου που είναι εκτεθειμένη ενάντια στη βραχοκατάπτωση (βλ. Figure 3.1b). Συνεπώς:

$$P_{(S:P)} = L_R/L_B$$

Σχετικά με την παράμετρο  $P_{(T:P)}$  υπάρχουν δύο διαφοροποιήσεις. Η πρώτη αναφέρεται στους ανθρώπους που περνούν την ώρα τους στον εργασιακό τους χώρο, και η δεύτερη στους ανθρώπους που βρίσκονται στο σπίτι τους. Η επικινδυνότητα και για τις δύο περιπτώσεις υπολογίζεται για τον άνθρωπο που έχει τη μέση έκθεση στο φαινόμενο αλλά και για εκείνον που έχει τη μέγιστη έκθεση. Αναλυτικά:

Για ανθρώπους που περνούν την ώρα τους στον εργασιακό τους χώρο

- Μέση έκθεση

$$\frac{8 \text{ h work/day} \times 5 \text{ days/week} \times 48 \text{ weeks/year}}{24 \times 365 \text{ h/year}} = 0.22$$

- Μέγιστη έκθεση

$$\frac{12 \text{ h work/day} \times 5 \text{ days/week} \times 48 \text{ weeks/year}}{24 \times 365 \text{ h/year}} = 0.33$$

Για ανθρώπους που βρίσκονται στο σπίτι τους

- Μέση έκθεση

$$14\text{h}/24\text{h} = 0,58$$

- Μέγιστη έκθεση

$$20\text{h}/24\text{h} = 0,83$$

**Κοινωνική διακινδύνευση:** Εκφράζεται από την ετήσια πιθανότητα που υπάρχει να χάσει τη ζωή του, λόγω βραχοκαταπτώσεων, ένα σύνολο ανθρώπων ή ένας μόνο άνθρωπος. Είναι δηλαδή η εκτίμηση της πιθανότητας να χάσουν τη ζωή τους κάποιοι άνθρωποι που βρίσκονται εντός ενός κτηρίου ( $P_{(LOL:B)}$ ). Η εκτίμηση αυτή επιτυγχάνεται μετρώντας την πιθανότητα να προσκρούσουν οι βράχοι πάνω στο κτήριο, με την προϋπόθεση ότι έχει ληφθεί υπόψιν ο αριθμός των ανθρώπων που ζουν σε αυτό.

Σε ένα κτήριο, όπου βρίσκονται μέσα ένας, δύο ή τρεις άνθρωποι, ένα τέμαχος προσκρούει με διαφορετικούς πιθανούς συνδυασμούς (βλ. Figure 3.2). Έτσι με την παραδοχή ότι το κτήριο δεν θα κατεδαφιστεί από την πρόσκρουση, προκύπτει ότι:

$$P_{(LOL:B)} = (3 \times P_{(K)} \times (1 - P_{(K)}^2)^2) + (3 \times P_{(K)}^2 \times (1 - P_{(K)}) + P_{(K)}^3)$$

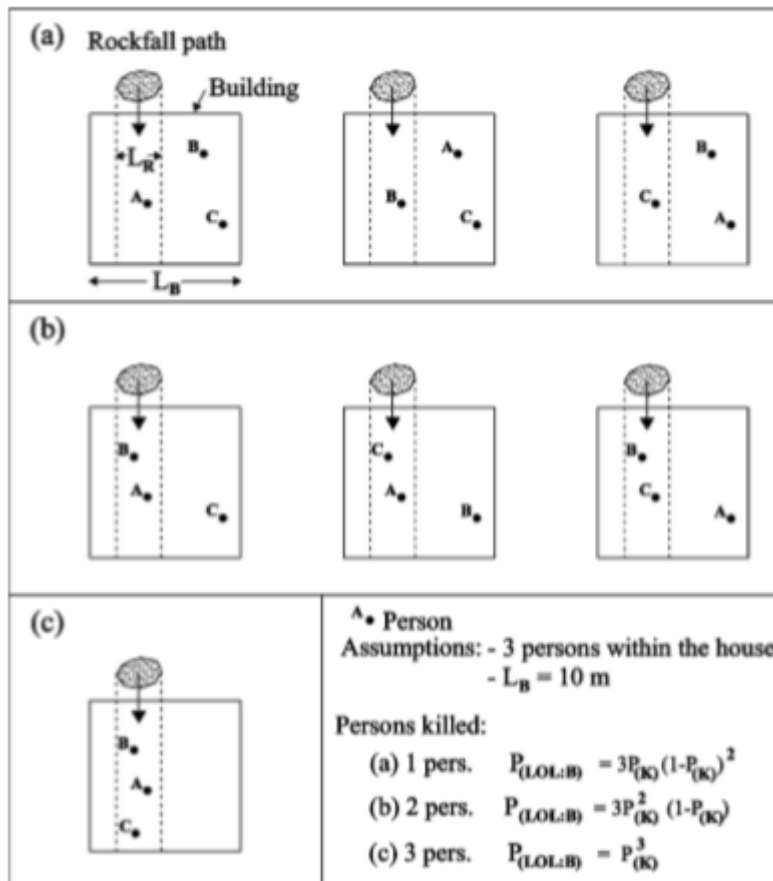


Figure 3.2. Οι πιθανοί συνδυασμοί με τους οποίους μπορεί ένα τέμαχος να προσκρούσει σε ένα κτήριο μέσα στο οποίο βρίσκονται τρεις άνθρωποι (Corominas et al., 2005)

Όπου  $P_{(K)}$  είναι το αποτέλεσμα του παράγοντα  $P_{(T:P)}$  με τον  $P_{(S:P)}$  και τον  $V_{(D:T)}$ , που συμπεριλαμβάνεται στην πιθανότητα μια τέτοια πρόσκρουση να οδηγήσει σε θάνατο ενός ανθρώπου που βρίσκεται μέσα στο κτήριο στο οποίο θα προσκρούσει ο βράχος.



## 4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΧΡΗΣΗΣ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΑΡΩΤΗ LIDAR ΓΙΑ ΕΞΑΓΩΓΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

#### 4.1 Εισαγωγή

Η μέχρι τώρα έρευνα για την εξαγωγή στοιχείων που οδηγούν στον χαρακτηρισμό μιας βραχομάζας όπως οι επιφάνειες ασυνεχειών, ο προσανατολισμός τους, η εμμονή και η απόστασή τους, γίνεται με την επιτόπου παρατήρηση του ερευνητή και την χαρτογράφηση αυτής. Η διαδικασία της χειρονακτικής έρευνας πεδίου είναι χρονοβόρα και πολλές φορές δεν μπορεί να καλύψει ολόκληρη τη περιοχή ενδιαφέροντος ώστε να ληφθεί μεγάλο πλήθος δεδομένων, λόγω περιορισμένης προσβασιμότητας. Επίσης, σε περιοχές με απότομες κλίσεις και πολύ ψηλά και ασταθή πρανή, είναι περιορισμένη η ορατότητα και ο ερευνητής θέτει σε κίνδυνο την σωματική του ακεραιότητα. Για τον λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια, η διεξαγωγή έρευνας για τον χαρακτηρισμό βραχομάζας με την εφαρμογή επίγειου σαρωτή LiDAR έχει γίνει συχνή.

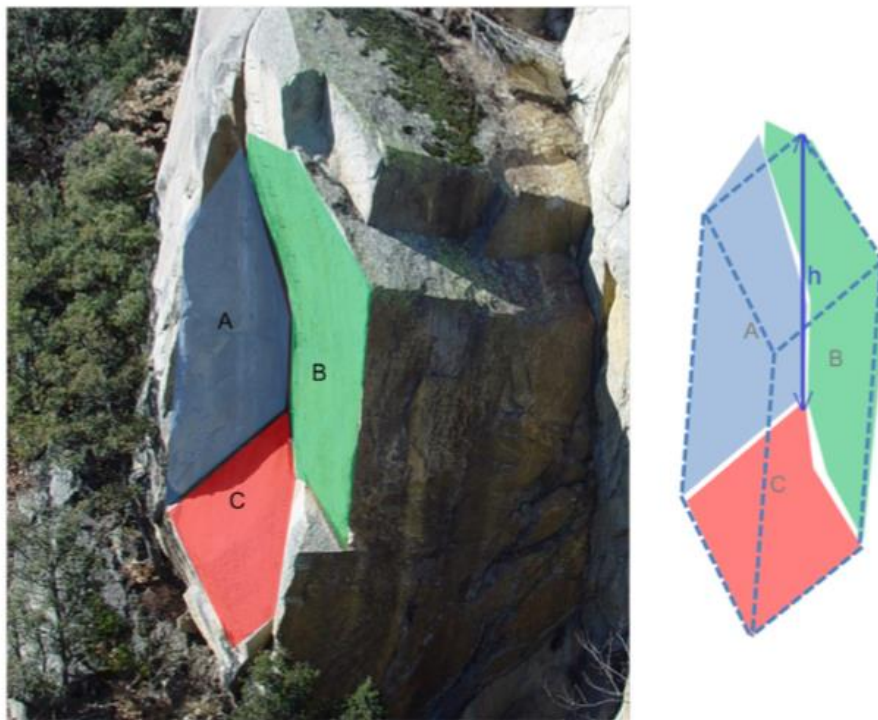
Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται κάποιες περιπτώσεις, από τη βιβλιογραφία, όπου εφαρμόστηκε η χρήση επίγειου σαρωτή LiDAR για την εξαγωγή στοιχείων χαρακτηρισμού σε βραχώδη πρανή.

#### 4.2 Εφαρμογή σε πρανές από έντονα κερματισμένο γρανодиρίτη στις περιοχές Forat Negre και Borrassirca της Δημοκρατίας της Ανδόρα (Santana, Corominas, Mavrouli, & Garcia-Sellés, 2012).

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, ο στόχος ήταν η συσχέτιση μεγέθους – συχνότητας για τις ουλές που δημιουργούν στο πρανές οι βραχοκαταπτώσεις. Η γεωμετρία των ουλών παρέχει σημαντικά στοιχεία για την κατανόηση του μηχανισμού αστοχίας και για την συχνότητα εμφάνισης του βραχοκαταπτωτικού φαινομένου. Απαραίτητη είναι η αναγνώριση των ασυνεχειών και το ύψος των ουλών.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο επίγειος σαρωτής ILRIS – 3D (OPTTECH). Πραγματοποιήθηκαν 15 σαρώσεις από 5 διαφορετικές θέσεις που κάλυψαν μια περιοχή 22000 m<sup>2</sup> αποτελούμενη από έντονα ρωγματομένο γρανодиρίτη. Η ένωση (align) των παραγόμενων νεφών σημείων (point clouds) έγινε με τη χρήση του αλγορίθμου ImAlign του λογισμικού Polyworks (Innovometric).

Παρακάτω γίνεται παρουσίαση της μεθοδολογίας ώστε να παραχθεί η στατιστική κατανομή των όγκων των ουλών χρησιμοποιώντας νέφη σημείων. Ο όγκος αυτός υπολογίζεται από τον όγκο ενός υποθετικού πρίσματος που έχει για πλευρές του την βασική ασυνέχεια της ουλής και δύο άλλες ασυνέχειες που τέμνονται μεταξύ τους (Εικόνα 4.1) και συχνά συμπεριφέρονται σαν ρωγμές εφελκυσμού. Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε αποτελείται από έξι (6) βήματα, τα οποία περιγράφονται παρακάτω.

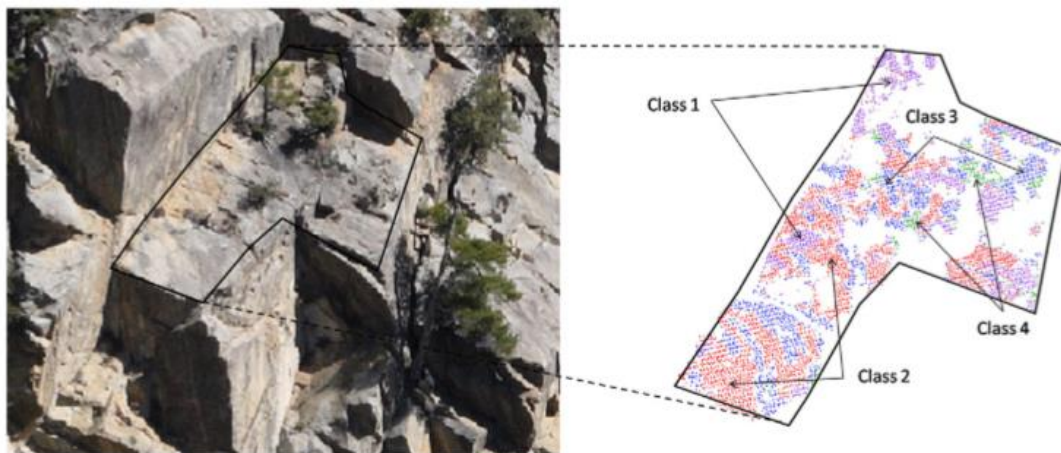


Εικόνα 4.1. Ουλή βραχοκατάπτωσης που οριοθετείται από τρεις τεμνόμενες επιφάνειες ασυνεχειών. C η κύρια και A,B οι ασυνέχειες που λειτουργούν ως ρωγμές εφελκυσμού (Santana et al., 2012)

Αρχικά, αφού ληφθεί το νέφος σημείων από τον επίγειο σαρωτή, το πρώτο βήμα έχει ως στόχο την απεικόνιση και την λήψη των πληροφοριών που απαιτούνται για τον προσδιορισμό της γωνίας και της διεύθυνσης κλίσης της επιφάνειας σε κάθε σημείο.

Σε δεύτερο επίπεδο βρίσκεται ο προσδιορισμός των οικογενειών των ασυνεχειών. Η διαδικασία αυτή προϋποθέτει την κατάταξη των σημείων του νέφους σε επιμέρους κλάσεις και έπειτα ομαδοποίηση τους για τη σύνθεση των οικογενειών των ασυνεχειών. Κάθε ξεχωριστή κλάση περιλαμβάνει τα σημεία των οποίων τα κανονικά διανύσματα έχουν τη μέγιστη γωνιακή απόκλιση μεταξύ τους, έτσι ώστε να μοιράζονται την ίδια επιφάνεια. Η κατηγοριοποίηση στο συγκεκριμένο βήμα

έγινε χρησιμοποιώντας το λογισμικό Gocad. Τα σημεία που αναφέρονται στη βλάστηση καθώς και σε άλλες ανεπιθύμητες δομές δεν ανήκουν σε καμία κλάση. Επειδή οι επιφάνειες των ασυνεχειών διαφέρουν ως προς την τραχύτητα, η κάθε οικογένεια ασυνεχειών αποτελείται από διάφορες κλάσεις σημείων (Εικόνα 4.2). Για να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών πρέπει να προσδιοριστούν οι κλάσεις που αντιστοιχούν σε κάθε οικογένεια.



Εικόνα 4.2. Επιφάνεια ασυνέχειας που αποτελείται από διαφορετικές κλάσεις σημείων ανάλογα με την τραχύτητά τους (Santana et al., 2012)

Το τρίτο βήμα αποτελεί η δημιουργία των επιπέδων των ασυνεχειών. Αυτό επιτυγχάνεται από τα δεδομένα του νέφους σημείων ξεχωριστά για κάθε ομάδα κλάσεων που ανήκει σε μία συγκεκριμένη οικογένεια ασυνεχειών. Η διαδικασία πραγματοποιείται με τη χρήση συγκεκριμένων αλγορίθμων. Με τον τρόπο αυτό εξάγεται η πληροφορία της απόστασης των ασυνεχειών.

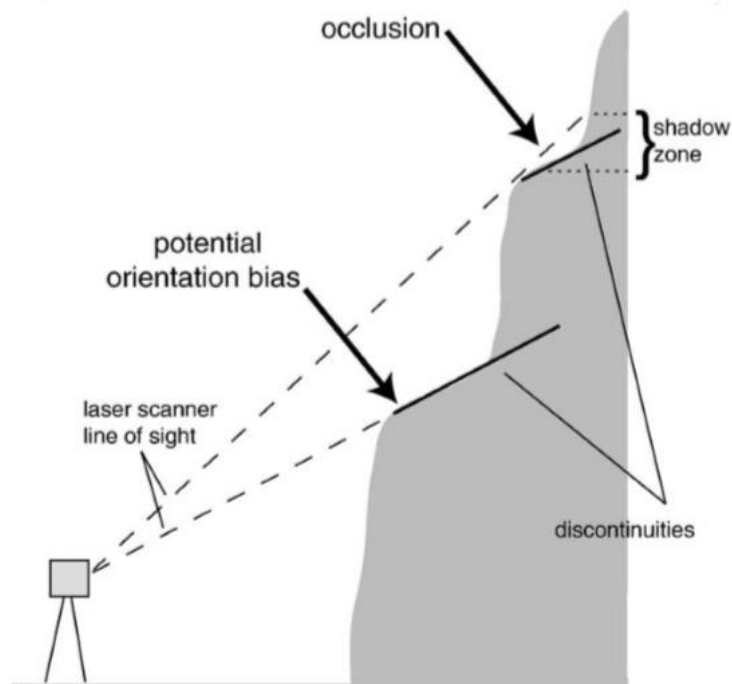
Στη συνέχεια υπολογίζονται τα ύψη των ουλών, τα οποία δίνονται από το μήκος της γραμμής τομής των δύο ασυνεχειών Α,Β (Εικόνα 4.1) και στο πέμπτο βήμα γίνεται η εξακρίβωση αν αυτές οι τοπικές παρατηρήσεις είναι αντιπροσωπευτικές του πρανούς. Αν η συγχώνευση δύο (2) ή περισσότερων κλάσεων σημείων είναι σωστή, συγκρίνοντας το μέγεθος των επιφανειών πριν και μετά την ένωση, ο αριθμός των μικρών επιφανειών πρέπει να μειώνεται ενώ των μεγάλων να αυξάνεται

Τέλος, υπολογίζονται οι όγκοι των ουλών λαμβάνοντας υπόψιν της βασική επιφάνεια και το ύψος της ουλής. Ο υπολογισμός δεν γίνεται ξεχωριστά για κάθε μία, αλλά συνολικά για το πρανές λόγω της μεγάλης ποσότητας των ουλών στο συγκεκριμένο πρανές. Για τη στατιστική επεξεργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό EasyFit από Mathware (Santana et al., 2012).

#### 4.3 Εφαρμογή σε βραχώδη πρανή στις περιοχές British Columbia και Alberta, του Καναδά (Sturzenegger & Stead, 2009).

Τα πρανή που εξετάστηκαν για τη συγκεκριμένη περίπτωση βρίσκονται στις περιοχές British Columbia και Alberta του Καναδά και αποτελούνται από διάφορα είδη πετρωμάτων όπως γρανοδιορίτες, χαλαζιακούς διορίτες, σχιστόλιθους, ψαμμίτες και ανθρακικά ιζηματογενή πετρώματα. Το ύψος τους δεν ξεπερνάει τα 40m και το μήκος τους είναι μεταξύ 40 και 150m. Ο στόχος ήταν να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων από τα τρισδιάστατα μοντέλα των επίγειων σαρώτων με εκείνων που προέρχονται από τη συμβατική μέθοδο χαρτογράφησης.

Για να αποφευχθεί το φαινόμενο της σκίασης, πραγματοποιήθηκαν σαρώσεις από διαφορετικές θέσεις και η ένωση όλων των λήψεων έγινε μέσω του αλγορίθμου ImAlign του Polyworks (Innovometric). Στην Εικόνα 4.3 παρουσιάζεται το φαινόμενο της σκίασης σε επιφάνειες ασυνεχειών που είναι παράλληλες ή υπο-παράλληλες με τη δέσμη της ακτίνας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρουσιάζονται σκιασμένες και να μην διακρίνονται.

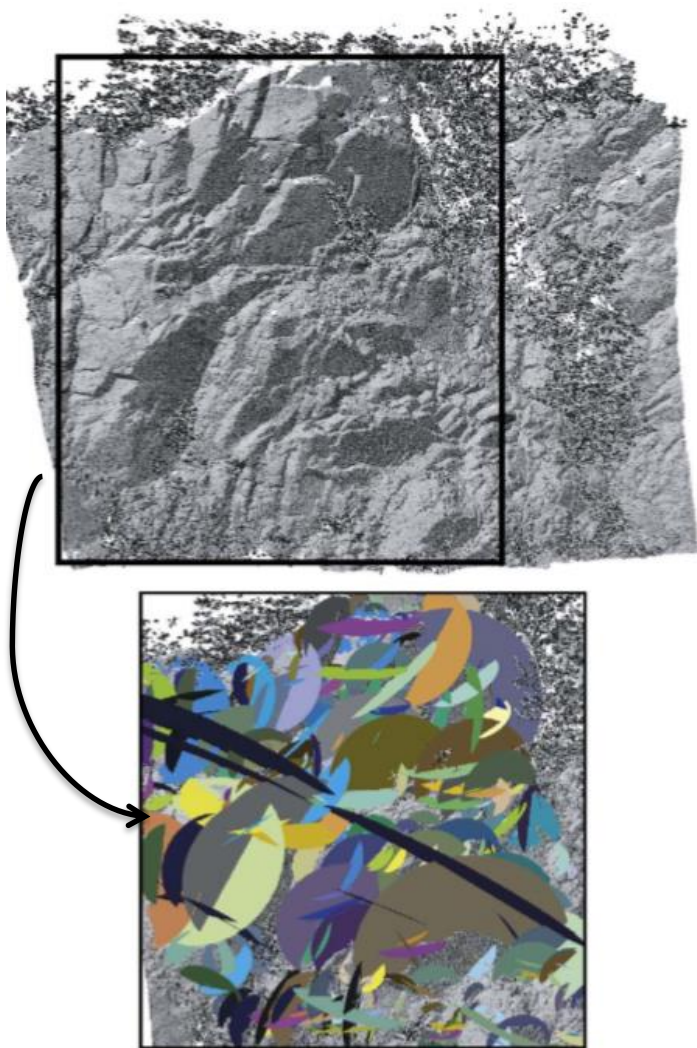


Εικόνα 4.3. Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου της σκίασης (Sturzenegger & Stead, 2009)

Ο χαρακτηρισμός των επιφανειών των ασυνεχειών στα τρισδιάστατα μοντέλα έγινε με χειροκίνητα τοποθετημένα επίπεδα πάνω στις αναγνωρισμένες επιφάνειες, με τη χρήση των λογισμικών Polyworks και 3DM Analyst. Και στα δύο λογισμικά



θεωρήθηκε ότι οι επιφάνειες των ασυνεχειών είναι κυκλικές (Εικόνα 4.4). Η γωνία κλίσης και η διεύθυνση κλίσης, για κάθε επιφάνεια, εξήχθησαν από τα συνημίτονα των κανονικών διανυσμάτων των επιπέδων και η εμμονή μετρήθηκε ως η επιφανειακή έκταση κάθε ασυνέχειας. Απαραίτητη προϋπόθεση ήταν η επιλογή της κατάλληλης ανάλυσης της εικόνας καθώς και οι αντιπροσωπευτικές θέσεις από τις οποίες θα γινόταν η σάρωση έτσι ώστε να καλύπτουν ολόκληρο το πραινές και να μην περιορίζονται μόνο στη βάση. Επίσης είναι σημαντικό να οριστεί η θέση της επιφάνειας στον χώρο είτε σε Χ,Υ,Ζ είτε σε σύστημα συντεταγμένων.



Εικόνα 4.4. Ο εντοπισμός και διαχωρισμός των επιφανειών των ασυνεχειών μέσω software (Sturzenegger & Stead, 2009)

Η τραχύτητα είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος για τον χαρακτηρισμό των επιφανειών των ασυνεχειών. Για τη μέτρηση της τραχύτητας από ένα τρισδιάστατο μοντέλο επίγειου σαρωτή χρησιμοποιούνται δύο τρόποι. Ο πρώτος είναι να οριστεί ένα μέσο επίπεδο με βάση τα σημεία που συνθέτουν την επιφάνεια της ασυνέχειας

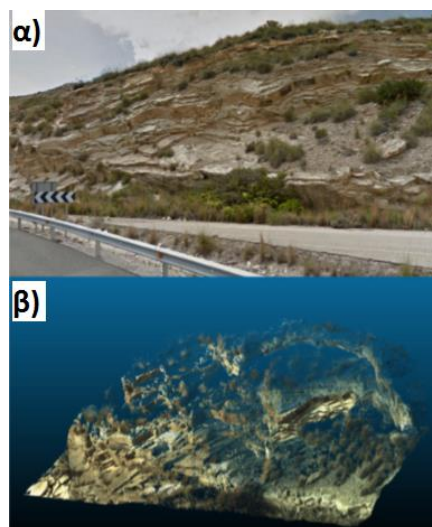


στο νέφος σημείων και στη συνέχεια να υπολογιστεί η κάθετη απόσταση μεταξύ του επιπέδου και της τοπογραφίας. Ο δεύτερος είναι να επιλεγούν τμήματα σημείων μιας επιφάνειας, με αυξανόμενο μέγεθος, και στη συνέχεια να υπολογιστεί ο προσανατολισμός σε κάθε σημείο πάνω στην επιφάνεια.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων έδειξε διαφορές 4° στη γωνία κλίσης και 8° στη διεύθυνση κλίσης των επιφανειών των ασυνεχειών. Με τις τιμές που προέρχονται από τα τρισδιάστατα μοντέλα να θεωρούνται πιο αντιπροσωπευτικές επειδή αναφέρονται σε ολόκληρα το πρηνή σε αντίθεση με τη συμβατική μέθοδο που περιορίστηκε μόνο στη βάση των πρηνών. Επίσης παρατηρήθηκε σε δύο περιπτώσεις πολύ τεμαχώδους μονζονίτη και φυλλοποιημένου ιλυόλιθου, βραχομαζών με χαμηλές τιμές GSI (Marinos & Hoek, n.d.), πως η μέθοδος του επίγειου σαρωτή ήταν κάπως αναποτελεσματική επειδή δεν ήταν σαφής ο προσδιορισμός των επιφανειών των ασυνεχειών στα τρισδιάστατα μοντέλα (Sturzenegger & Stead, 2009).

#### 4.4 Εφαρμογή σε ασβεστολιθικό πρηνές για τον υπολογισμό της απόστασης των ασυνεχειών (Riquelme, Abellán, & Tomás, 2015).

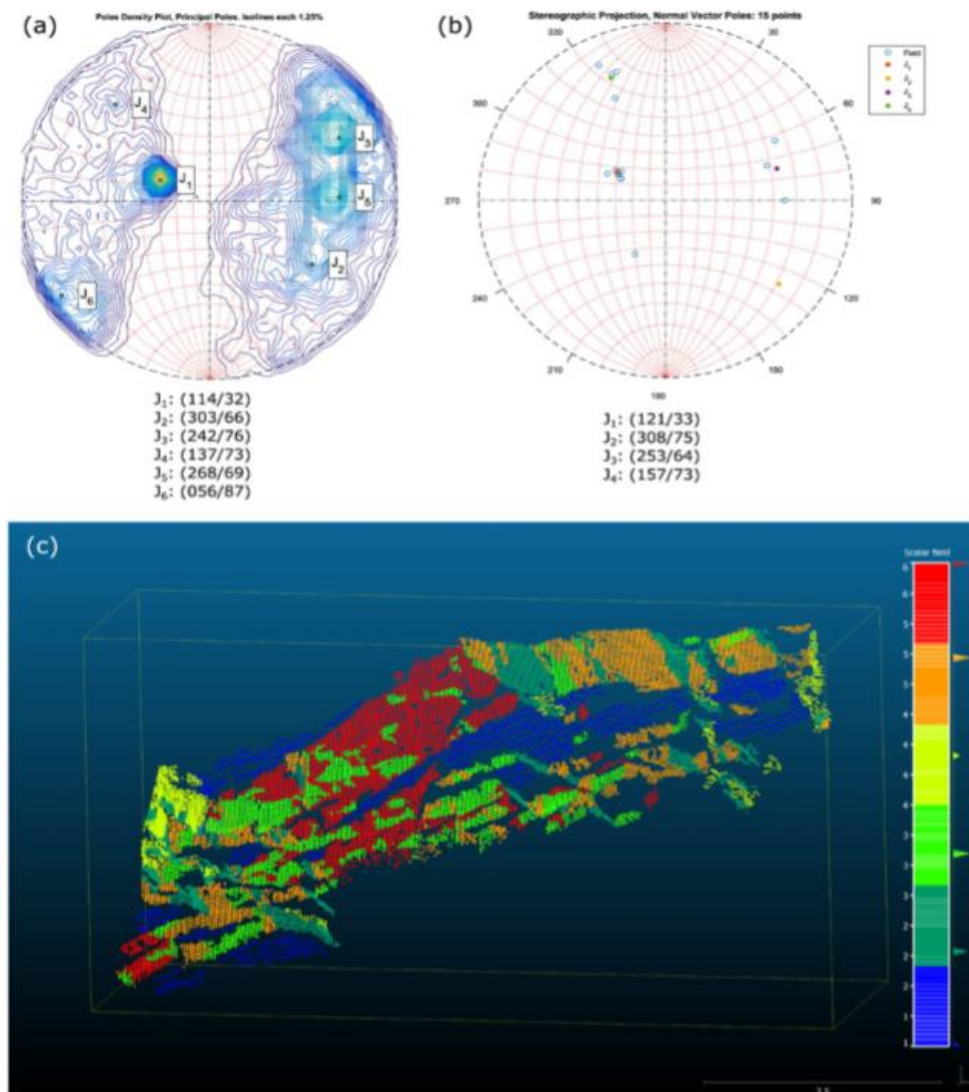
Η σάρωση πραγματοποιήθηκε σε ασβεστολιθικό πρηνές στην περιοχή El Campello της Ισπανίας (Εικόνα 4.5α). Για να αποφευχθούν οι σκιασμένες περιοχές επιλέχθηκαν τρεις (3) διαφορετικές θέσεις σάρωσης χρησιμοποιώντας επίπεδους στόχους ως σημεία αναφοράς. Με τη λήψη του νέφους σημείων (Εικόνα 4.5β) και την επεξεργασία του εξήχθησαν τα στοιχεία που αφορούν στον προσανατολισμό των επιφανειών των ασυνεχειών.



Εικόνα 4.5. Το ασβεστολιθικό πρηνές (α) με το παραγόμενο νέφος σημείων (β) (Riquelme et al., 2015)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.6α, εντοπίστηκαν έξι (6) οικογένειες ασυνεχειών. Η J1 αντιπροσωπεύει τη στρώση του ασβεστόλιθου, ενώ οι J1, J2, J3, J4 και J5 αναπαριστούν δευτερεύουσες δομές. Με διαφορετικό χρώμα, στο νέφος σημείων, φαίνονται οι διαφορετικές οικογένειες ασυνεχειών (Εικόνα 4.6γ).

Η ανάλυση της περιοχής πραγματοποιήθηκε με λήψη επί τόπου μετρήσεων πεδίου, η οποίες συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της επεξεργασίας του νέφους σημείων. Οι μετρήσεις πεδίου έδειξαν τέσσερις (4) οικογένειες ασυνεχειών (Εικόνα 4.6β). Η J1 αντιπροσωπεύει τη στρώση του ασβεστόλιθου, ενώ οι J2, J3 και J4 δευτερεύουσες δομές. Με βάση την επί τόπου μέτρηση η J3 δείχνει σαν ξεχωριστή οικογένεια όμως στο τρισδιάστατο μοντέλο κάτι τέτοιο δεν φαίνεται. Με βάση το τρισδιάστατο μοντέλο υπάρχουν δύο οικογένειες ασυνεχειών με παρόμοια γωνία και διεύθυνση κλίσης καθώς και η J6 η οποία ανταποκρίνεται στην J3.



Εικόνα 4.6. Οι διαφορετικές οικογένειες ασυνεχειών από τη σάρωση (α,γ) και από τις επί τόπου μετρήσεις (β) (Riquelme et al., 2015)

Στη συνέχεια μετρήθηκε η απόσταση των επιφανειών για κάθε οικογένεια ασυνεχειών ξεχωριστά. Ο υπολογισμός έγινε με τη χρήση ειδικά σχεδιασμένου αλγορίθμου, του οποίου η χρήση και η αποτελεσματικότητα αναλύονται λεπτομερώς από τους Riquelme, Abellan και Tomas (Riquelme et al., 2015).

## 5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΧΡΗΣΗ LiDAR ΣΤΟΝ ΒΡΑΧΟ ΤΗΣ ΜΟΝΕΜΒΑΣΙΑΣ

#### 5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι περιοχές του βράχου που επελέγησαν ως στόχοι, οι θέσεις από τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι σαρώσεις, τα χαρακτηριστικά της σάρωσης για κάθε επιμέρους θέση καθώς και τα κριτήρια που οδήγησαν σε αυτές τις επιλογές. Για τη σάρωση χρησιμοποιήθηκε ο επίγειος σαρωτής 3D-ILRIS Laser Scanner της Ortech (Εικόνα 5.1).

Επίσης, περιγράφεται η μεθοδολογία επεξεργασίας των στοιχείων που προέκυψαν από την διαδικασία της σάρωσης και από επί τόπου παρατηρήσεις στον βράχο. Από την επεξεργασία εξήχθησαν πληροφορίες που αφορούν στα χαρακτηριστικά των επιφανειών των ασυνχειών και τον όγκο των επισφαλών τεμαχών, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης εκδήλωσης βραχοκαταπτώσεων στο κάστρο της Μονεμβασίας με βάση το σύστημα αξιολόγησης από Saroglou et al.



Εικόνα 5.1. Ο σαρωτής 3-D ILRIS Laser Scanner της Ortech κατά τη διαδικασία σάρωσης του βράχου της Μονεμβασίας



## 5.2 Στόχοι και θέσεις σάρωσης

Η σάρωση πραγματοποιήθηκε στο νοτιοανατολικό τμήμα του ασβεστολιθικού βράχου που δεσπόζει πάνω από τη νέα πόλη. Επιλέχθηκαν τέσσερεις (4) θέσεις για την εγκατάσταση του σαρωτή (Εικόνα 5.2), τέτοιες ώστε να εξασφαλίζεται η όσο το δυνατόν καλύτερη καθετότητα της δέσμης ως προς το πρανές, λόγω της καμπυλότητας που παρουσιάζει η όψη του πρανούς και αλλαγή της διεύθυνσης. Επίσης, κριτήριο για την επιλογή των θέσεων της σάρωσης αποτέλεσε και η ορατότητα, λόγω της ύπαρξης των κτισμάτων που την εμποδίζουν σε συνδυασμό με τον περιορισμό της απόστασης που χωρίζει το πρανές από τη θάλασσα. Έτσι, οι θέσεις που επιλέχθηκαν είναι αυτές που προσφέρουν τον καλύτερο συνδυασμό ορατότητας και καθετότητας προς τα επιμέρους τμήματα του πρανούς. Οι σαρώσεις συνολικά και από τις τέσσερεις (4) θέσεις καλύπτουν όλο το πρανές που οριοθετείται από το τείχος που περιβάλλει την πόλη.



Εικόνα 5.2. Πανοραμική άποψη της Μονεμβασίας και των θέσεων εγκατάστασης του επίγειου σαρωτή. Από δεξιά προς αριστερά οι Θέσεις 1 έως 4 (Λήψη από Google Earth)

Τα χαρακτηριστικά της σάρωσης για κάθε επιμέρους θέση παρατίθενται παρακάτω σε ανάλογο πίνακα (Πίνακας 5.1), καθώς και φωτογραφικό υλικό της ορατότητας που προσέφερε η κάθε θέση μαζί με την αντίστοιχη περιοχή σάρωσης του πρανούς (Εικόνα 5.3, Εικόνα 5.4, Εικόνα 5.5, Εικόνα 5.6).



Πίνακας 5.1. Τα χαρακτηριστικά της σάρωσης κάθε επιμέρους θέσης

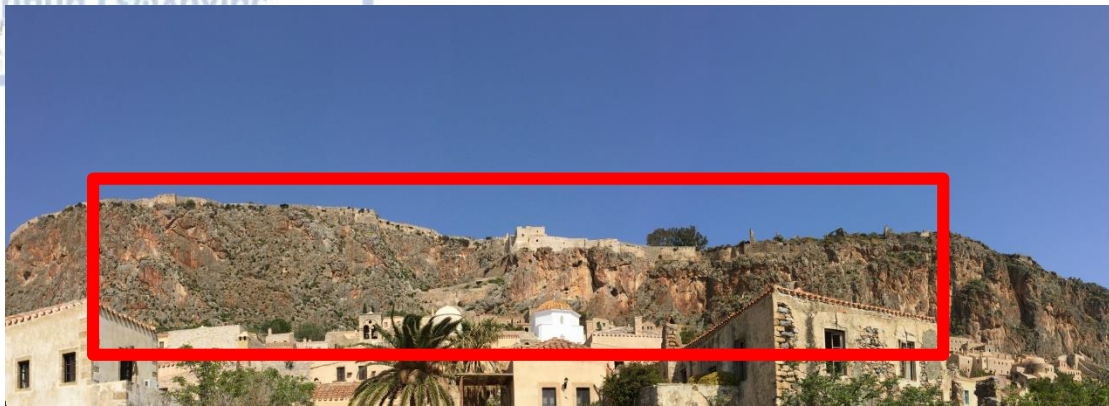
|                    | ΘΕΣΗ 1   | ΘΕΣΗ 2   | ΘΕΣΗ 3   | ΘΕΣΗ 4   |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|
| Γεωγραφικό Πλάτος  | 36,68827 | 36,68734 | 36,68694 | 36,68669 |
| Γεωγραφικό Μήκος   | 23,05755 | 23,05691 | 23,05607 | 23,05549 |
| Κλίση              | 24,9829  | 21,9946  | 28,0151  | 31,0034  |
| Απόσταση (m)       | 90,6874  | 122,123  | 122,123  | 110      |
| Ανάλυση (mm)       | 92,5     | 90,4     | 90,4     | 90,2     |
| Πλάτος Δέσμης (mm) | 14       | 14       | 14       | 14       |



Εικόνα 5.3. Ορατότητα από τη Θέση 1 με επιλεγμένη την περιοχή σάρωσης



Εικόνα 5.4. Ορατότητα από τη Θέση 2 με επιλεγμένη την περιοχή σάρωσης



Εικόνα 5.5. Ορατότητα από τη Θέση 3 με επιλεγμένη την περιοχή σάρωσης



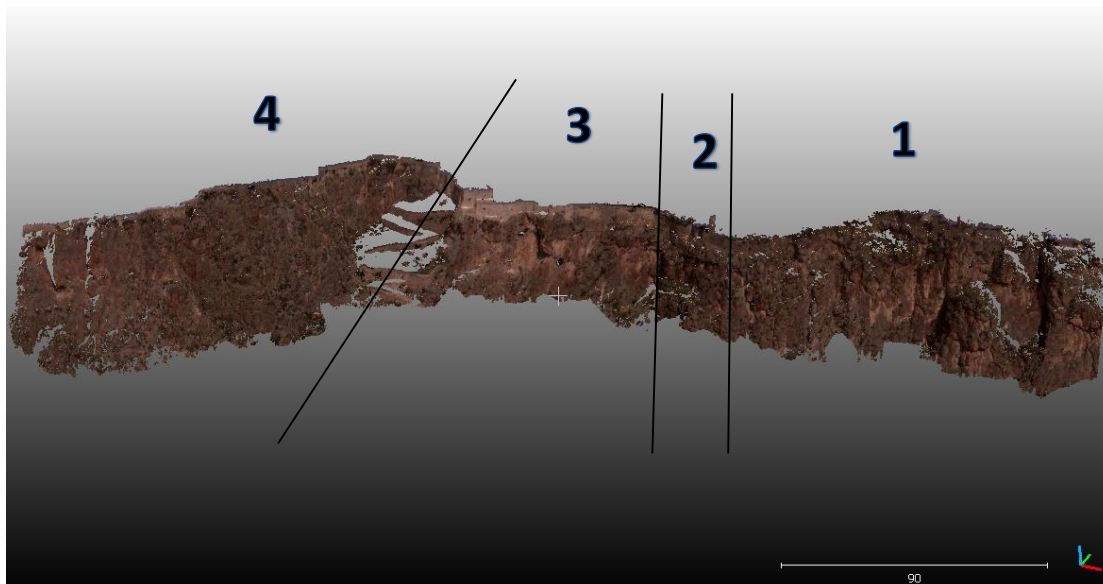
Εικόνα 5.6. Ορατότητα από τη Θέση 4 με επιλεγμένη την περιοχή σάρωσης

### 5.3 Επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων του LiDAR

Για την επεξεργασία των δεδομένων του LiDAR χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό CloudCompare. Από κάθε θέση σάρωσης λήφθηκε και ένα νέφος σημείων. Τα τέσσερα (4) αυτά νέφη σημείων ενώθηκαν με βάση τις κοινές περιοχές αλληλοεπικάλυψης που είχαν μεταξύ τους (align) και έτσι παράχθηκε ένα ενιαίο νέφος σημείων που απεικονίζει ολόκληρη την περιοχή ενδιαφέροντος.

Το συγκεκριμένο νέφος σημείων χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των διευθύνσεων κλίσης και γωνιών κλίσης των επιμέρους πρανών που διαμορφώνονται στον βράχο καθώς και όλων των επιφανειών που εμφανίζονται σε αυτά, λαμβάνοντας υπόψιν την κλίση του επίγειου σαρωτή, ώστε να γίνει ο έλεγχος έναντι δυνητικών αστοχιών. Η εξαγωγή των στοιχείων προσανατολισμού των επιφανειών έγινε με τη χρήση του αλγορίθμου facets (Dewez, Girardeau-montaut, Allanic, & Rohmer, 2016) στο περιβάλλον του CloudCompare. Αυτή η διαδικασία προϋποθέτει να οριστούν στην αρχή κάποιες παράμετροι που βασίζονται στην

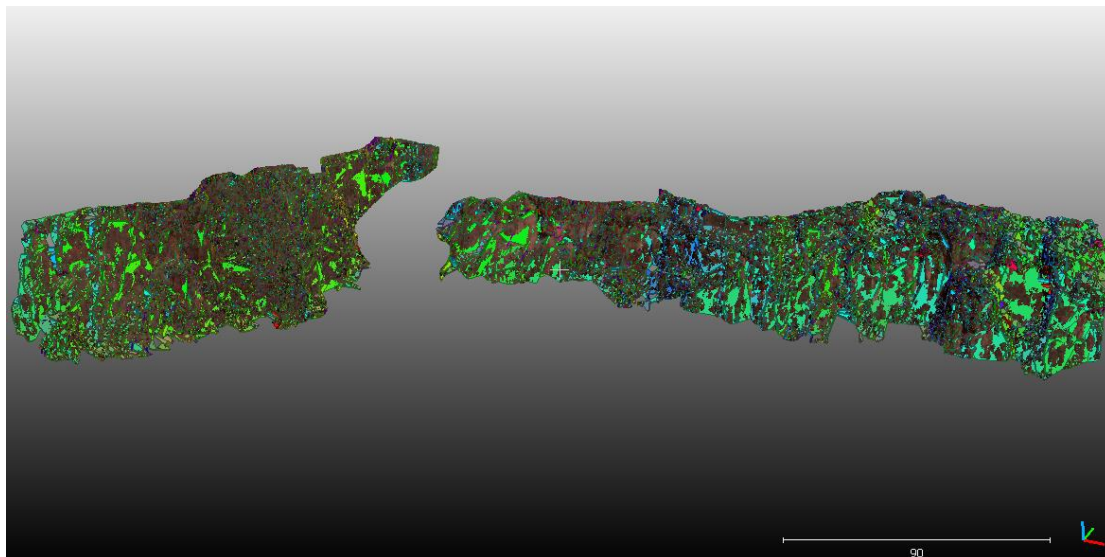
ανάλυση της σάρωσης και στην εκτίμηση του χρήστη ως προς τις διαστάσεις των δομών που εμφανίζονται στον βράχο. Τέτοιες παράμετροι είναι ο ελάχιστος αριθμός σημείων που απαρτίζουν μια επιφάνεια καθώς και το μέγιστο μήκος της ακμής της. Στη συνέχεια, επαληθεύτηκαν τα αποτελέσματα με παλαιότερες μετρήσεις που είχαν γίνει με πυξίδα στην περιοχή. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του LiDAR με τα αποτελέσματα της μέτρησης με το χέρι (Εικόνα 5.10), έδειξαν να συμφωνούν. Φυσικά ο πολύ μεγαλύτερος αριθμός μετρήσεων που λαμβάνονται από το LiDAR προσφέρει μεγαλύτερη λεπτομέρεια και έτσι παρουσιάστηκαν κάποιες διαφορές στον προσανατολισμό των επιφανειών, οι οποίες όμως βρίσκονται εντός λογικού εύρους. Έτσι, μετά την σύγκριση, συμπεραίνεται ότι οι μετρήσεις είναι αντιπροσωπευτικές για την περιοχή.



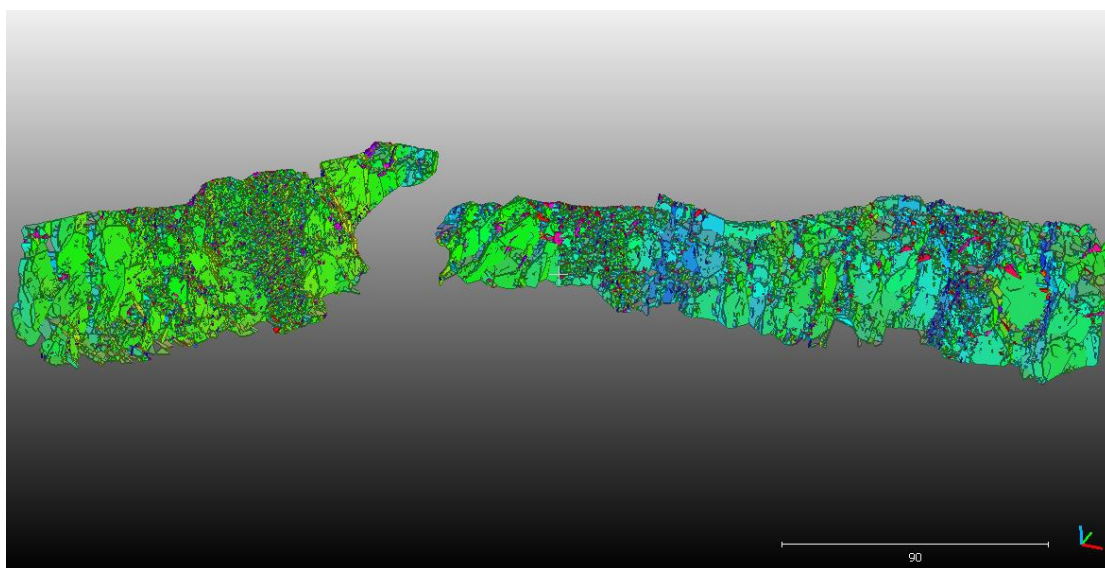
Εικόνα 5.7. Το ενιαίο νέφος σημείων της περιοχής ενδιαφέροντος

Στον βράχο διαμορφώνονται τέσσερα (4) επιμέρους πρανή (Εικόνα 5.7) με στοιχεία προσανατολισμού 56/155 για το Πρανές 1, 58/186 για το Πρανές 2, 65/138 για το Πρανές 3 και 64/101 για το Πρανές 4. Ενώ με την εφαρμογή του αλγορίθμου facets εντοπίστηκαν συνολικά 12507 επιφάνειες (Εικόνα 5.8- Εικόνα 5.9) που με την χρήση του λογισμικού Dips της Rocscience έδειξαν πως υπάρχουν έξι (6) οικογένειες ασυνεχειών. Η γωνία τριβής των επιφανειών των ασυνεχειών ( $\phi$ ) θεωρήθηκε  $38^\circ$  με βάση προηγούμενη μελέτη (Saroglou et al., 2012) και έτσι προέκυψε πως ο κύριος μηχανισμός αστοχίας είναι οι ανατροπές τεμαχών ενώ παρουσιάζονται τοπικά και κάποιες σφηνοειδείς και επίπεδες ολισθήσεις.



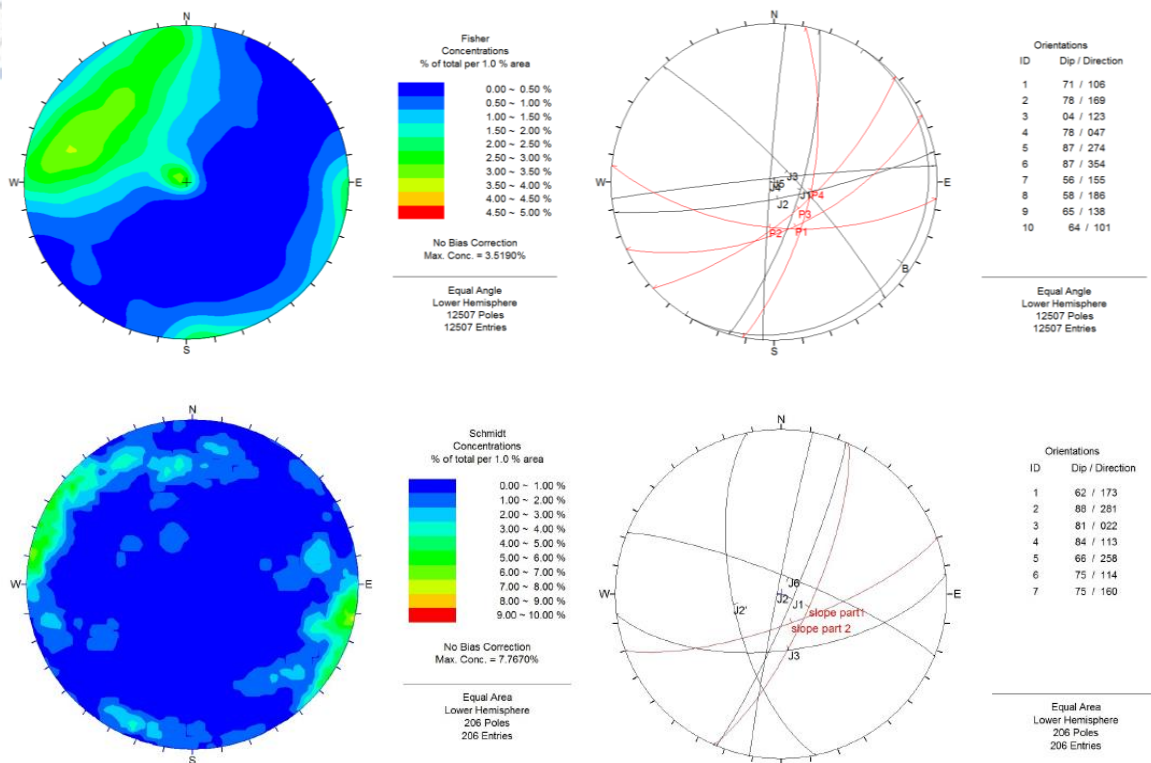


Εικόνα 5.8. Όλες οι επιφάνειες μαζί με το νέφος σημείων



Εικόνα 5.9. Όλες οι επιφάνειες που εντοπίστηκαν στο νέφος σημείων



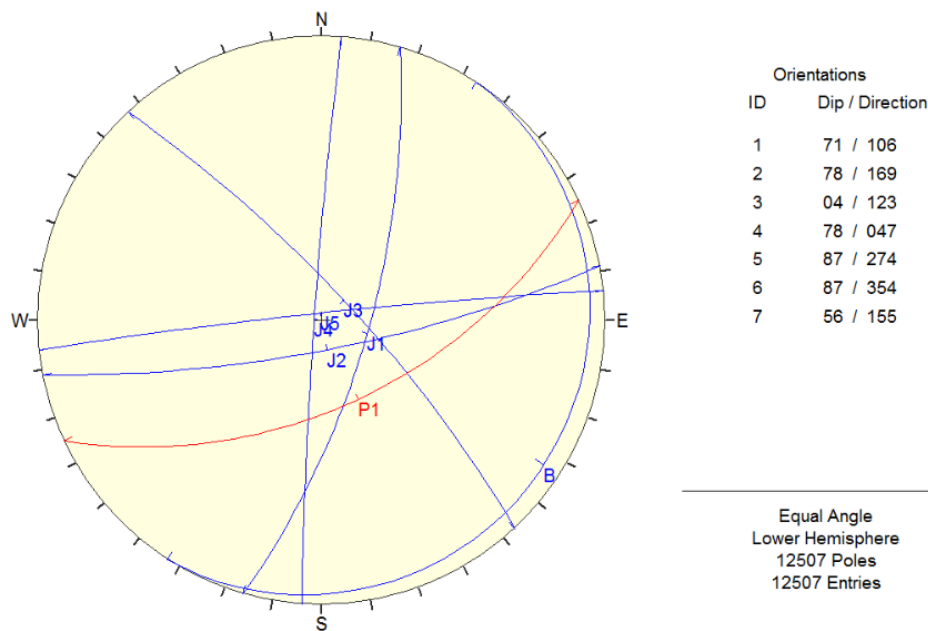


Εικόνα 5.10. Σύγκριση LiDAR – μέτρησεις με πυξίδα, για ολόκληρη την περιχή ρηνδιαφέροντος. Στα επάνω στερεοδιαγράμματα Schmidt παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από το LiDAR ενώ κάτω με πυξίδα.

Εκτός από τους προσανατολισμούς των επιφανειών των ασυνεχειών και τον προσδιορισμών των δυνητικών αστοχιών, για κάθε επιμέρους πρανές, έγινε μέτρηση των όγκων των επισφαλών τεμαχών με τη χρήση των εξαγόμενων νεφών σημείων από το LiDAR. Τα αποτελέσματα όλων των διαδικασιών επεξεργασίας των δεδομένων του LiDAR παρουσιάζονται παρακάτω αναλυτικά για κάθε επιμέρους πρανές.

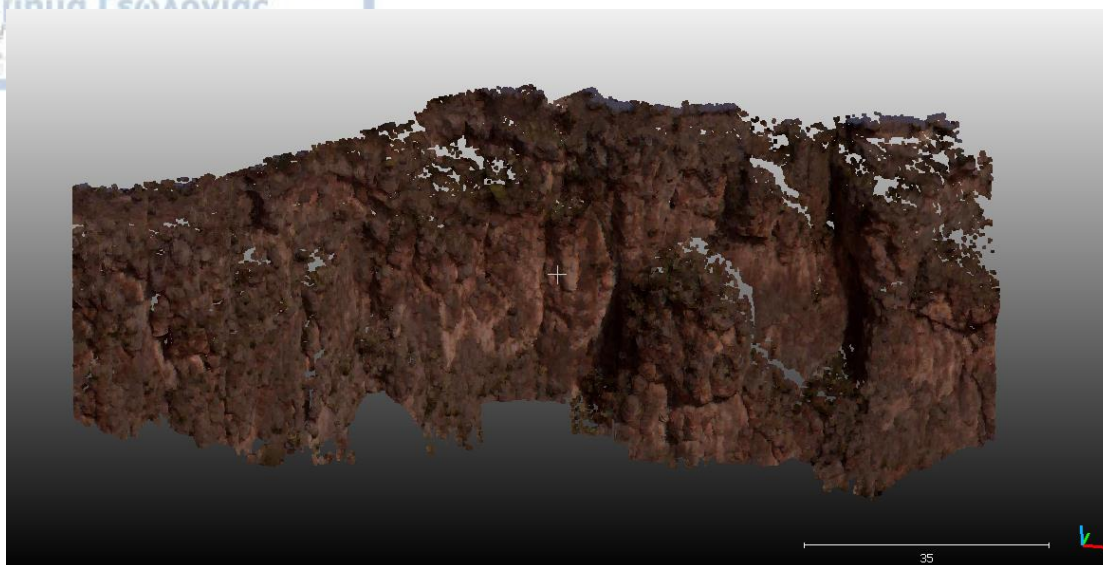
### Πρανές 1

Το συγκεκριμένο πρανές βρίσκεται στο πιο ανατολικό σημείο του βράχου που περιβάλλεται από το κάστρο, και τα στοιχεία προσανατολισμού του είναι 56/155. Οι τύποι δυνητικής αστοχίας που εμφανίζονται είναι οι ανατροπές και οι σφηνοειδείς ολισθήσεις, όπως φαίνεται από το στερεοδιάγραμμα στην Εικόνα 5.11.

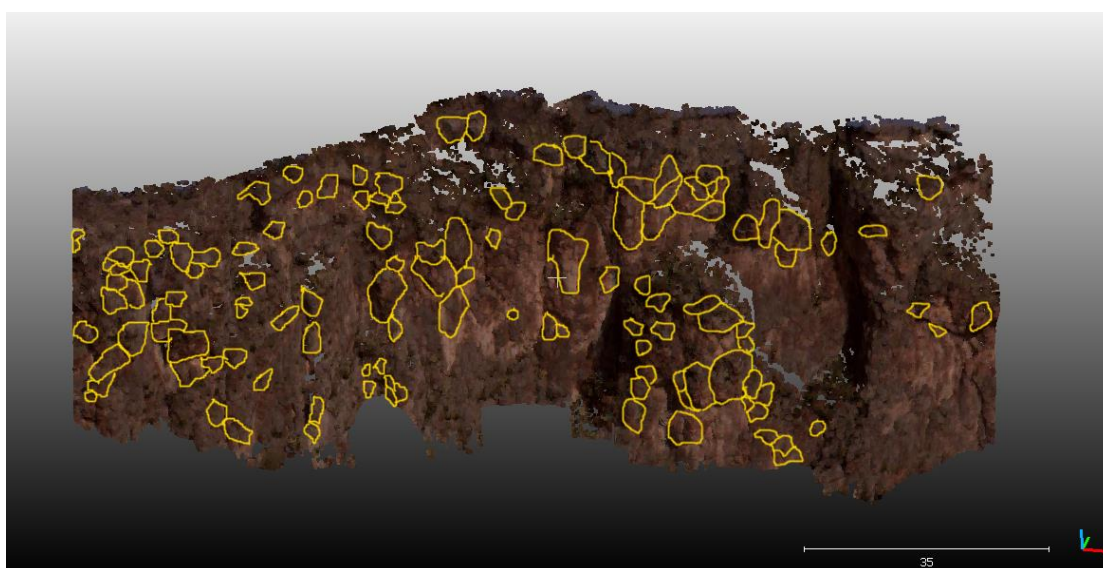


Εικόνα 5.11. Στερεοδιάγραμμα για το πρανές 1

Με βάση την παρατήρηση από το νέφος σημείων για το πρανές 1 (Εικόνα 5.12), εντοπίστηκαν εβδομήντα οκτώ (78) επισφαλή τεμάχια των οποίων επισημάνθηκε η θέση τους στο πρανές (Εικόνα 5.12) και υπολογίστηκε ο όγκος τους. Τα τεμάχια που εντοπίστηκαν είναι διαφόρων όγκων όμως επικρατούν αυτά που ο όγκος τους κυμαίνεται μεταξύ 1 και 4 m<sup>3</sup> ενώ υπάρχουν και κάποια που ξεπερνούν τα 20 m<sup>3</sup>. Για τον προσδιορισμό των όγκων έγινε η παραδοχή, όπως και για τα επόμενα πρανή, τετραγωνικών επιφανειών και χρησιμοποιήθηκε τιμή εμμονής 1m με βάση τις μετρήσεις στα νέφη σημείων σε περιοχές που απουσιάζουν τεμάχια από προηγούμενα βραχοκαταπτωτικά γεγονότα. Στην Εικόνα 5.13 και στο Figure 5.1 φαίνονται τα επισφαλή τεμάχια και παρουσιάζεται η σχετική συχνότητα εμφάνισης των υπολογισθέντων όγκων στο πρανές.



Εικόνα 5.12. Το νέφος σημείων για το πρανές 1



Εικόνα 5.13. Το νέφος σημείων για το πρανές 1 και τα επισημασμένα επισφαλή τεμάχια που εντοπίστηκαν σε αυτό

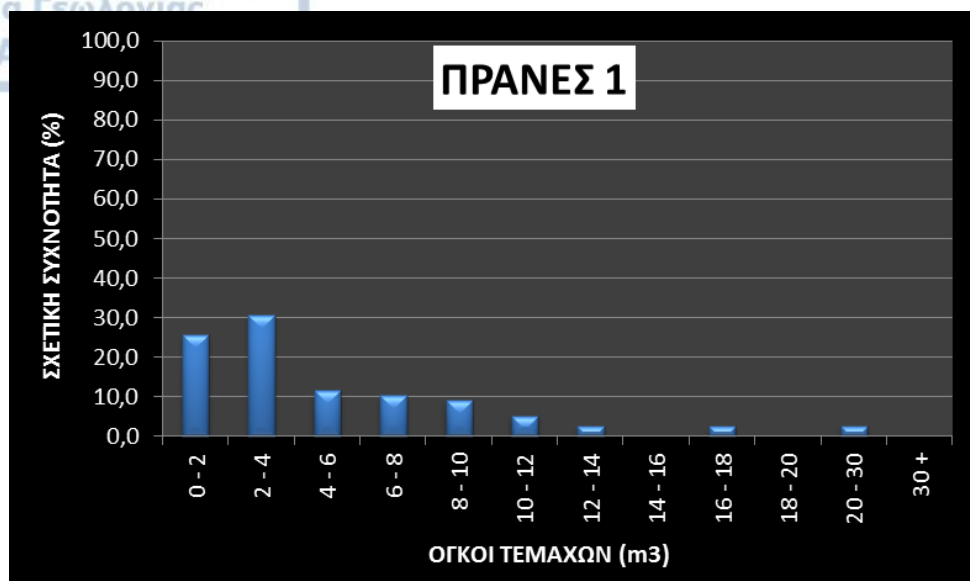


Figure 5.1. Σχετική συχνότητα εμφάνισης των υπολογισθέντων όγκων στο πρανές 1

Το 25% των επισφαλών τεμαχών που εντοπίστηκαν στο πρανές 1 είναι μέχρι  $2 \text{ m}^3$  και το 30% μεταξύ 2 και  $4 \text{ m}^3$ . Εμφανίζονται και τεμάχη με μεγαλύτερους όγκους (Εικόνα 5.14) αλλά με συχνότητα εμφάνισης μικρότερη ή ίση του 10%. Ενώ κάποια πολύ μεγαλύτερα τεμάχη με όγκο μεγαλύτερο από  $20 \text{ m}^3$  έχουν συχνότητα εμφάνισης της τάξης του 1-2%. Συνεπώς, τα επισφαλή τεμάχη που κυριαρχούν στο πρανές 1 είναι της τάξης από 1 έως  $4 \text{ m}^3$ .



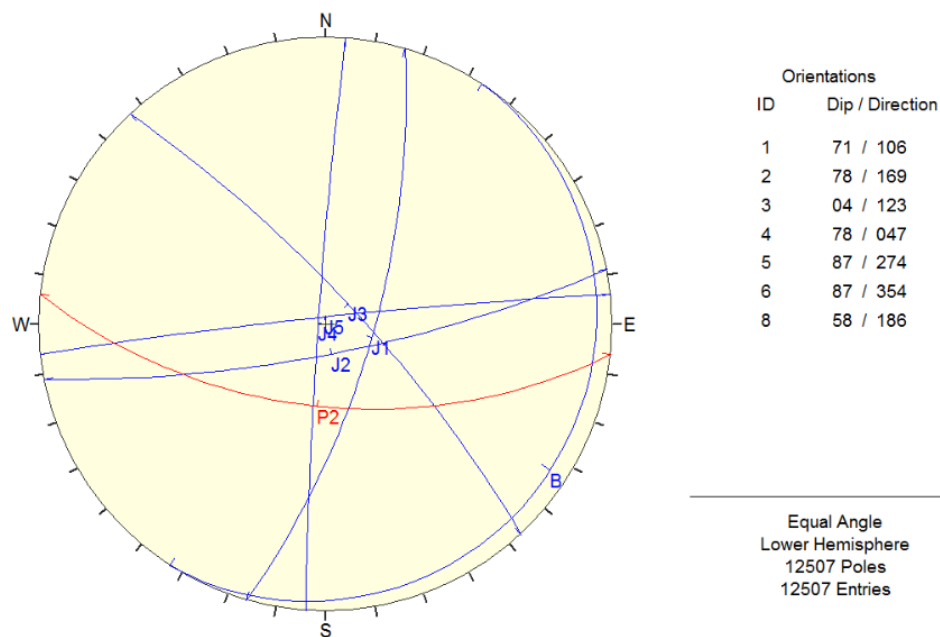
Εικόνα 5.14. Μεγάλα επισφαλή τεμάχη στο πρανές 1



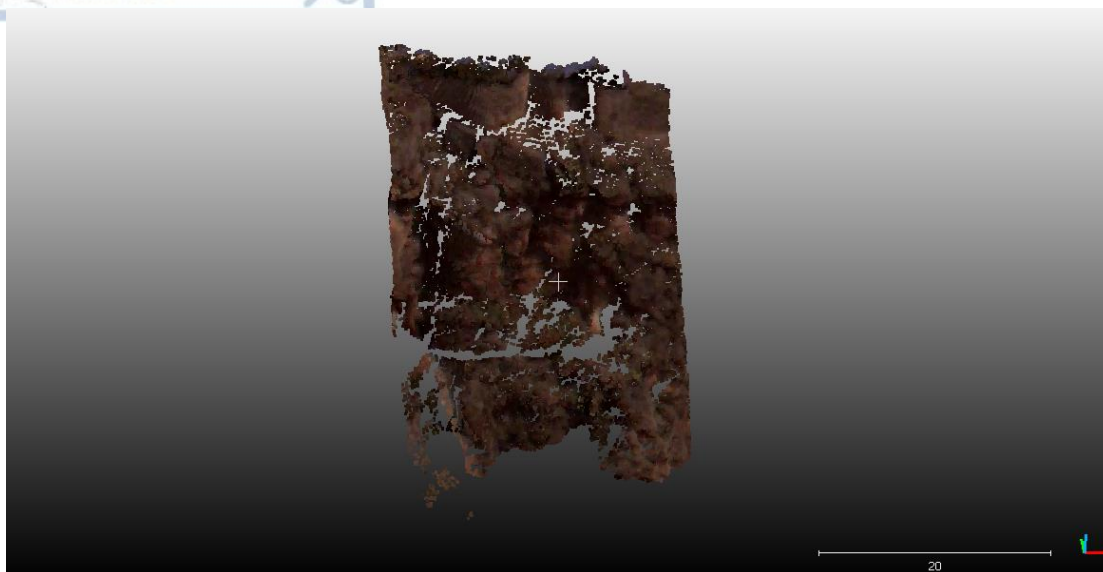
## Πρανές 2

Το συγκεκριμένο πρανές αποτελεί ένα πολύ μικρό τμήμα του βράχου που οριοθετείται από το κάστρο, εξετάζεται όμως ξεχωριστά λόγω του εντελώς διαφορετικού προσανατολισμού του σε σχέση με τα υπόλοιπα πρανή που διαμορφώνονται στον βράχο. Τα στοιχεία προσανατολισμού του είναι 58/186. Οι τύποι δυνητικής αστοχίας που εμφανίζονται στο πρανές είναι ανατροπές και σφηνοειδείς ολισθήσεις όπως φαίνεται και στο στερεοδιάγραμμα στην Εικόνα 5.15.

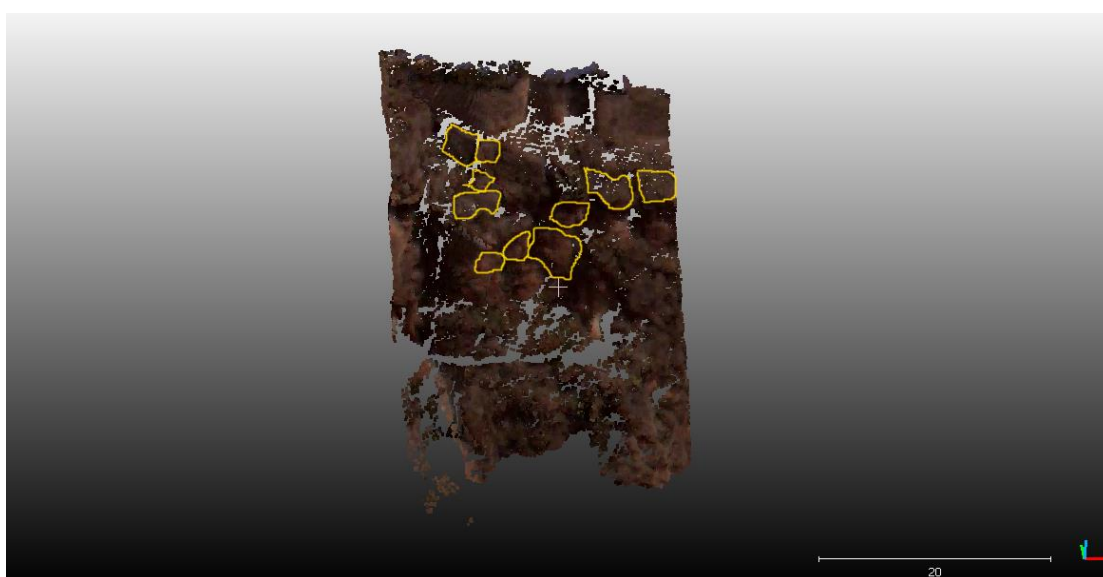
Κατά μήκος του πρανούς εντοπίστηκαν μέσω του νέφους σημείων (Εικόνα 5.16) δέκα (10) επισφαλή τεμάχια τα οποία παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.17. Οι όγκοι αυτών των τεμαχίων, προέκυψε μετά από μετρήσεις στο νέφος σημείων ότι, κυμαίνονται σχεδόν ισόποσα μεταξύ 0,5 και 8 m<sup>3</sup> ως προς τη συχνότητα εμφάνισής τους στο πρανές. Η σχετική συχνότητα εμφάνισης των όγκων των επισφαλών τεμαχίων παρουσιάζονται παρακάτω στο Figure 5.2.



Εικόνα 5.15. Στερεοδιάγραμμα για το πρανές 2



Εικόνα 5.16. Το νέφος σημείων για το πρανές 2



Εικόνα 5.17. Το νέφος σημείων για το πρανές 2 και τα επισημασμένα επισφαλή τεμάχια που εντοπίστηκαν σε αυτό

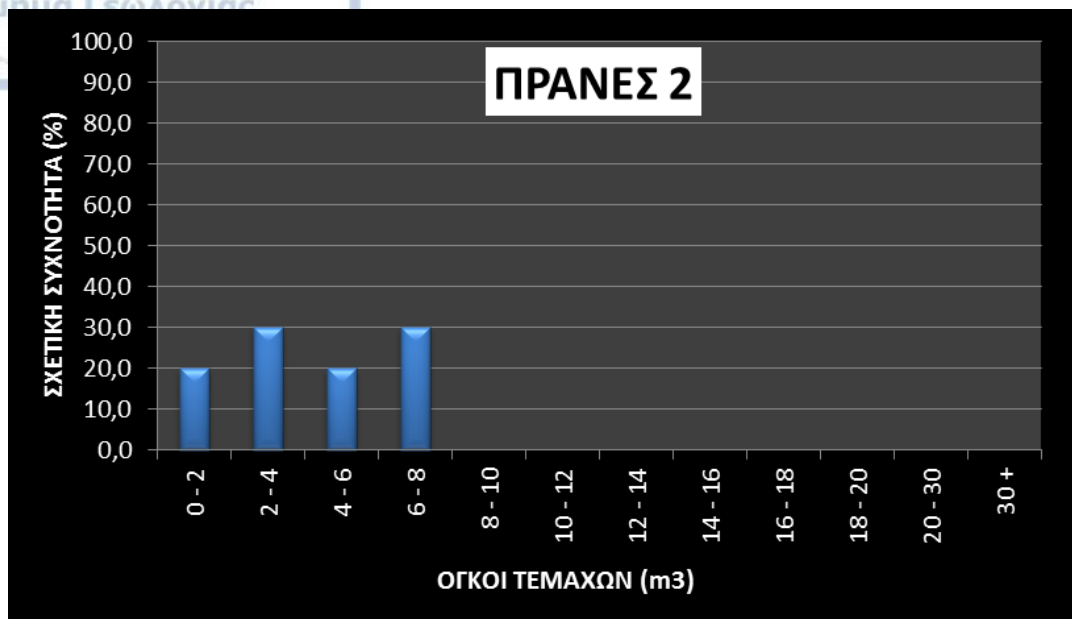
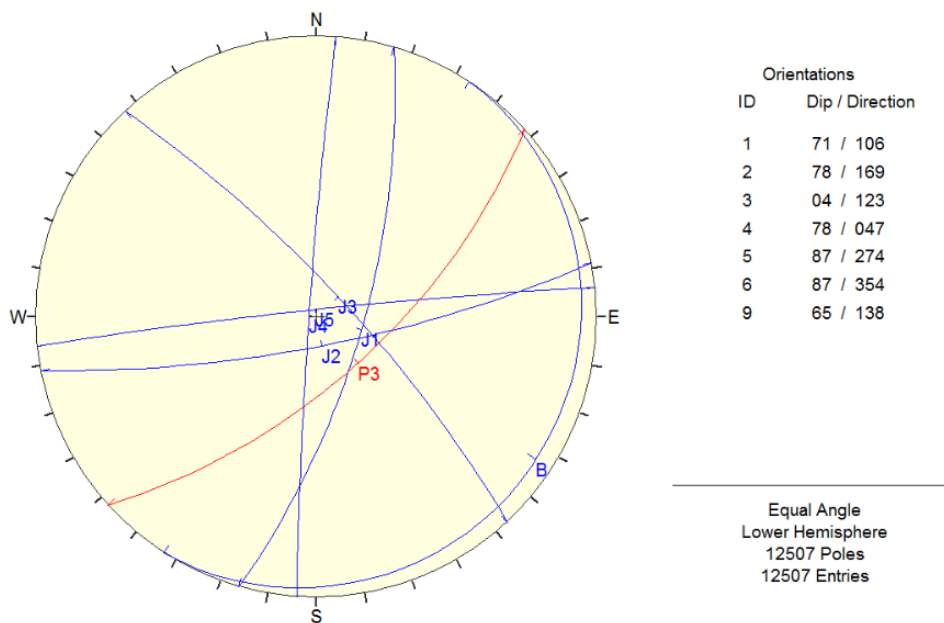


Figure 5.2. Σχετική συχνότητα εμφάνισης των υπολογισθέντων όγκων στο πρανές 2

Το 20% των επισφαλών τεμαχών που εντοπίστηκαν στο πρανές είναι της τάξης μεταξύ 0,5 και 2 m<sup>3</sup> ενώ άλλο ένα 20% βρίσκεται μεταξύ 4 και 6 m<sup>3</sup>. Ελαφρώς μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης έχουν τα τεμάχια με όγκους μεταξύ 2-4 m<sup>3</sup> και 6-8 m<sup>3</sup> με τιμή 30% του συνολικού αριθμού επισφαλών τεμαχών. Γενικά όμως στο συγκεκριμένο πρανές παρουσιάζεται μία ομοιόμορφη κατανομή της συχνότητας εμφάνισης των όγκων των επισφαλών τεμαχών μεταξύ 0,5 και 8 m<sup>3</sup>.

### Πρανές 3

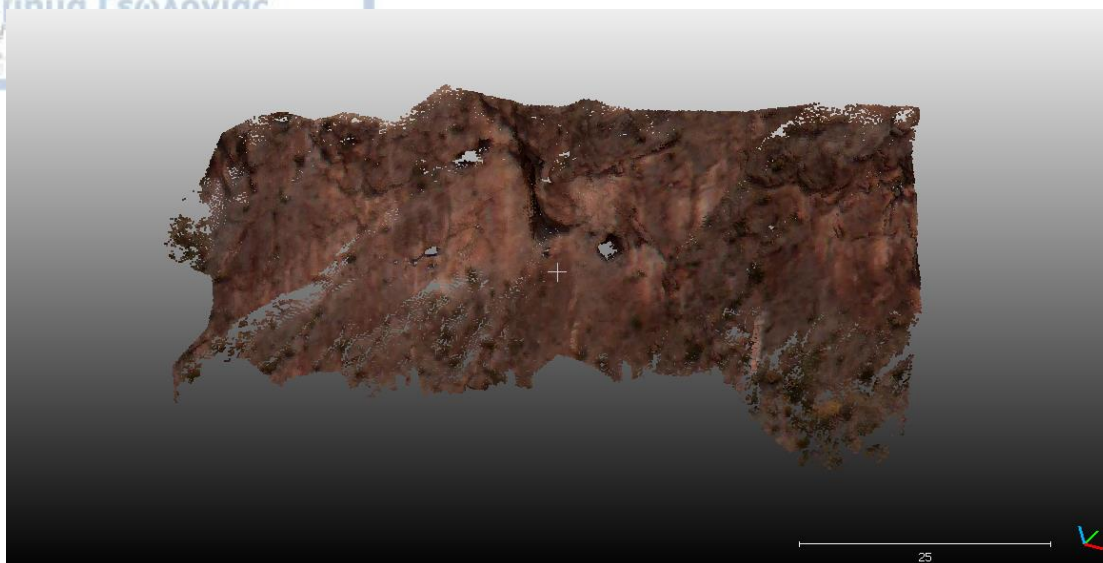
Το πρανές 3 αποτελεί το τμήμα του βράχου που βρίσκεται αμέσως μετά από τη σκάλα που οδηγεί στην παλιά πόλη, προς τα ανατολικά. Τα στοιχεία προσανατολισμού του συγκεκριμένου πρανούς είναι 65/138 και ο κύριος μηχανισμός δυνητικής αστοχίας που εμφανίζεται είναι οι σφηνοειδείς ολισθήσεις καθώς και κάποιες επίπεδες ολισθήσεις πάνω στην επιφάνεια της ψευδοστρώσης που παρατηρήθηκε επί τόπου και εντοπίστηκε και με την επεξεργασία των δεδομένων του LiDAR (Εικόνα 5.18).



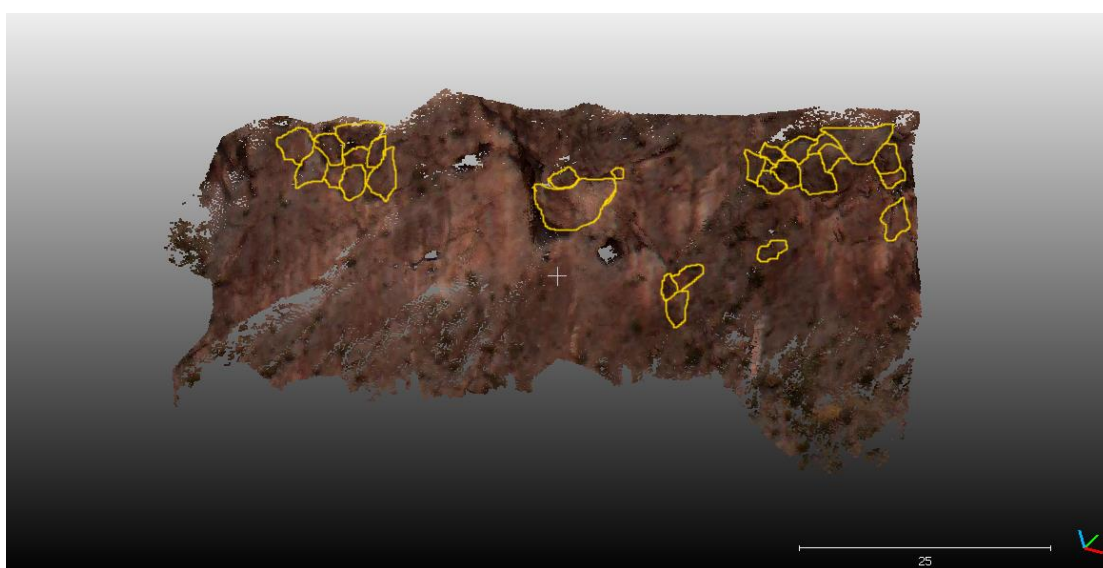
Εικόνα 5.18. Στερεοδιάγραμμα για το πρανές 3

Από την παρατήρηση στο νέφος σημείων για το πρανές 3 (Εικόνα 5.19) εντοπίστηκαν είκοσι τρία (23) επισφαλή τεμάχια των οποίων επισημάνθηκε η θέση τους στο πρανές (Εικόνα 5.20) και υπολογίστηκε ο όγκος τους. Ανάμεσα στα επισφαλή τεμάχια που εντοπίστηκαν επικρατούν αυτά με όγκο μεταξύ 0,5 και 2 m<sup>3</sup>. Γενικά στο συγκεκριμένο τμήμα του βράχου σχηματίζονται σχετικά μικρού όγκου τεμάχια ενώ σε συγκεκριμένες θέσεις εμφανίζονται και κάποια μεγαλύτερα. Πιο αναλυτικά, οι σχετική συχνότητα εμφάνισης των όγκων των επισφαλών τεμαχίων για το πρανές 3 παρουσιάζεται στο Figure 5.3.





Εικόνα 5.19. Το νέφος σημείων για το πρανές 3



Εικόνα 5.20. Το νέφος σημείων για το πρανές 3 και τα επισημασμένα επισφαλή τεμάχια που εντοπίστηκαν σε αυτό

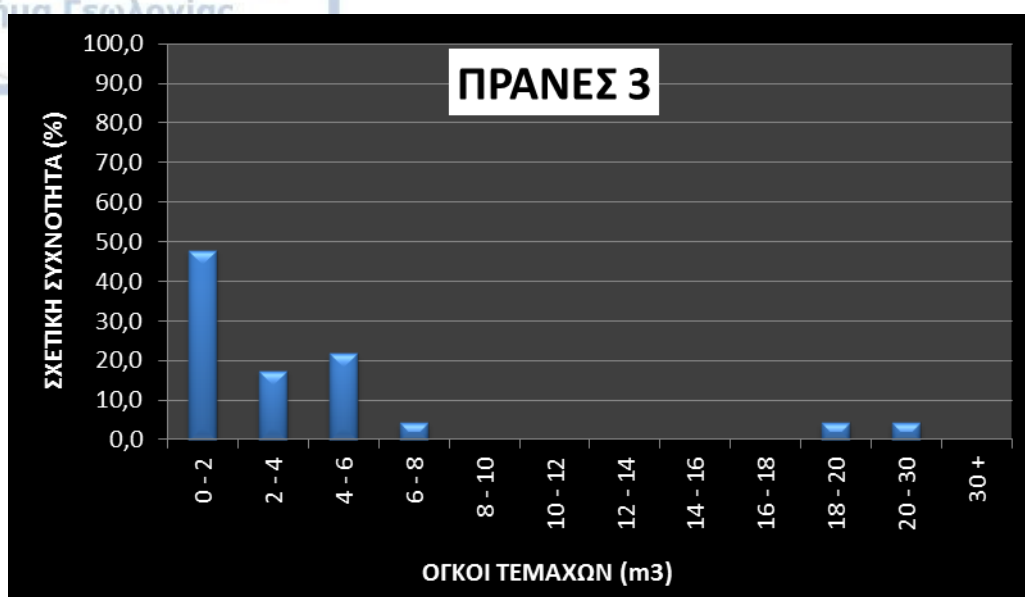
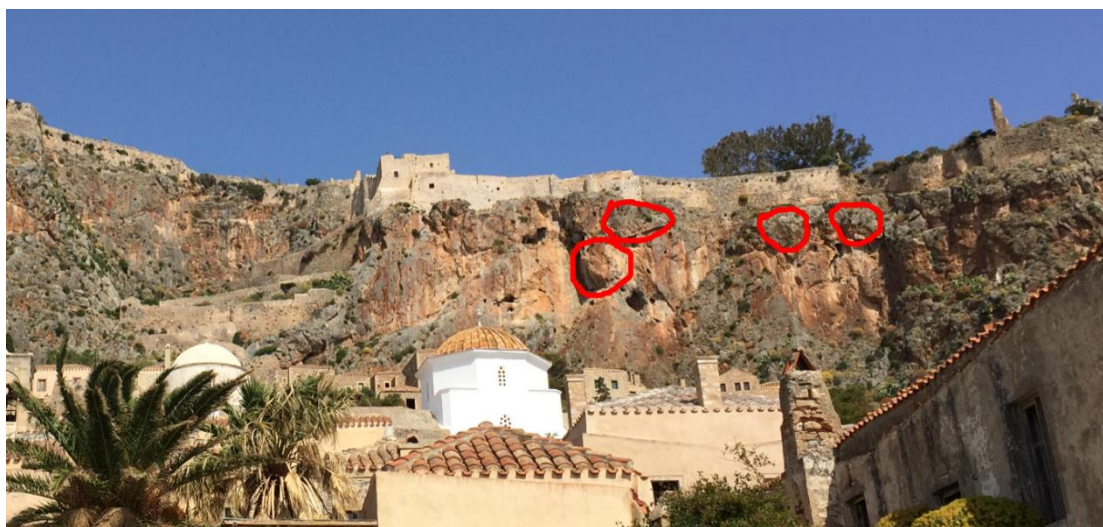


Figure 5.3. Σχετική συχνότητα εμφάνισης των υπολογισθέντων όγκων στο πρανές 3

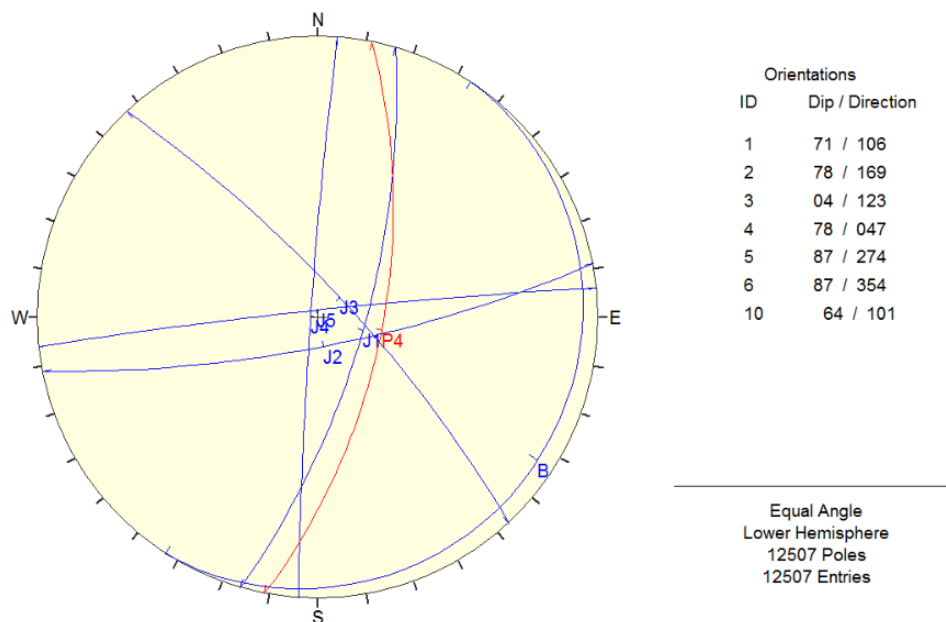
Στο πρανές 3, τα επισφαλή τεμάχια που κυριαρχούν έχουν όγκο της τάξης από 0,5 έως 2 m<sup>3</sup> κατά ποσοστό σχεδόν 50%. Με ποσοστό συνολικά 40% ακολουθούν τεμάχια από 2 έως 6 m<sup>3</sup> ενώ σχηματίζονται και κάποια μεγαλύτερα τεμάχια με μικρή εξάπλωση (Εικόνα 5.21).



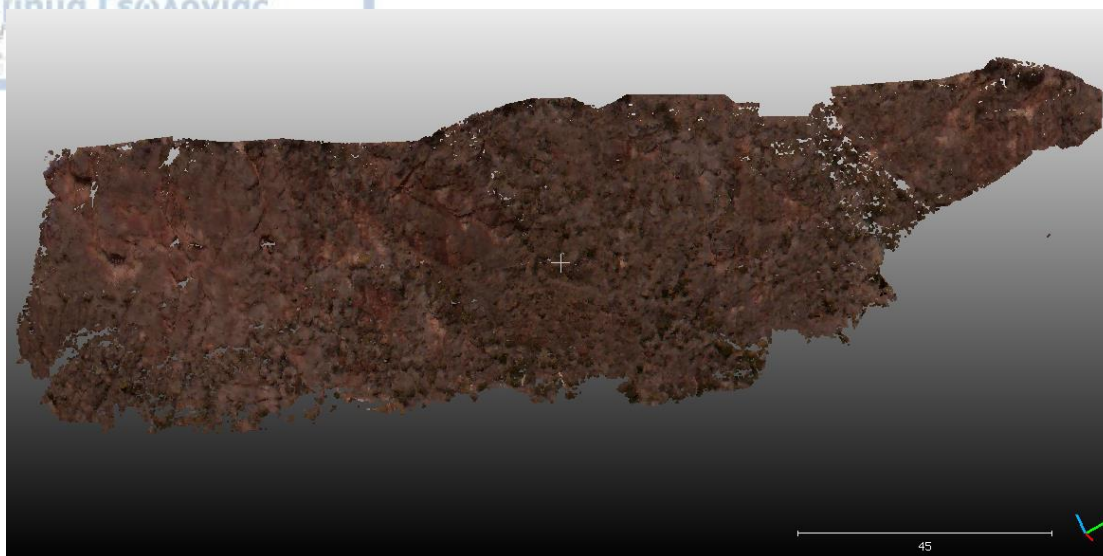
Εικόνα 5.21. Μεγάλα επισφαλή τεμάχια στο πρανές 3

#### Πρανές 4

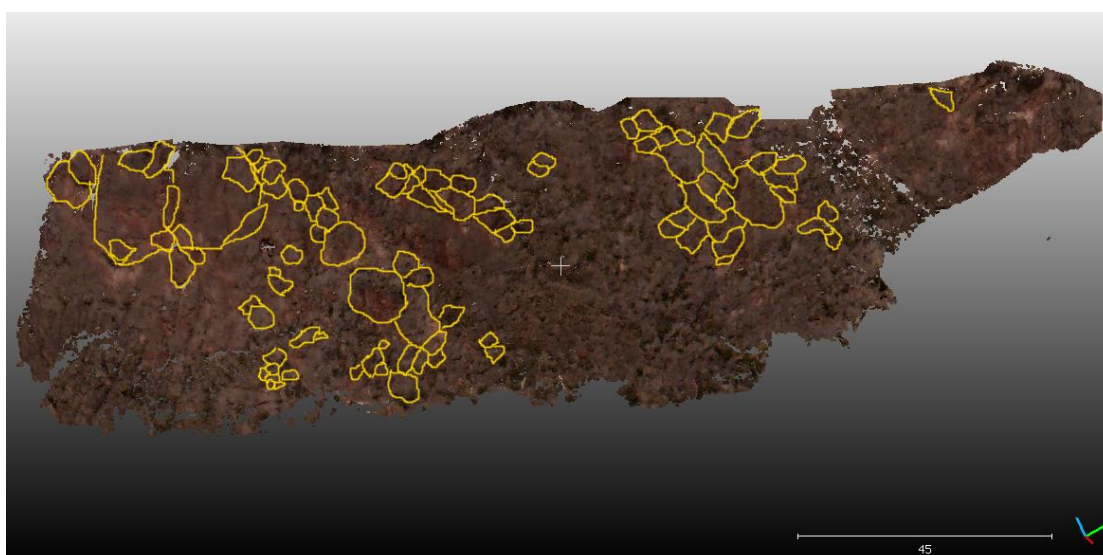
Το συγκεκριμένο πρανές αποτελεί το δυτικό τμήμα του βράχου που περιβάλλεται από το κάστρο. Είναι το τμήμα που βρίσκεται στην είσοδο της πόλης της Μονεμβασίας, με στοιχεία προσανατολισμού 64/101. Ο κύριος μηχανισμός δυνητικής αστοχίας που εμφανίζεται στο πρανές 4 είναι οι ανατροπές (Εικόνα 5.22). Από την παρατήρηση του νέφους σημείων για το πρανές 4 (Εικόνα 5.23) εντοπίστηκαν εβδομήντα τέσσερα (74) επισφαλή τεμάχια των οποίων επισημάνθηκε η θέση τους στο πρανές (Εικόνα 5.24) και υπολογίστηκαν οι όγκοι τους. Από τον υπολογισμό προέκυψε ότι οι όγκοι των επισφαλών τεμαχίων ποικίλουν από 1 έως και 50 m<sup>3</sup>, χωρίς να επικρατεί αισθητά μία κατηγορία όγκων. Το πρανές 4 είναι το τμήμα του βράχου στο οποίο σχηματίζονται τα μεγαλύτερα επισφαλή τεμάχια. Αναλυτικά παρουσιάζεται η σχετική συχνότητα εμφάνισης των όγκων των επισφαλών τεμαχίων του πρανούς 4 στο Figure 5.4.



Εικόνα 5.22. Στερεοδιάγραμμα για το πρανές 4



Εικόνα 5.23. Το νέφος σημείων για το πρανές 4



Εικόνα 5.24. Το νέφος σημείων για το πρανές 4 και τα επισημασμένα επισφαλή τεμάχια που εντοπίστηκαν σε αυτό



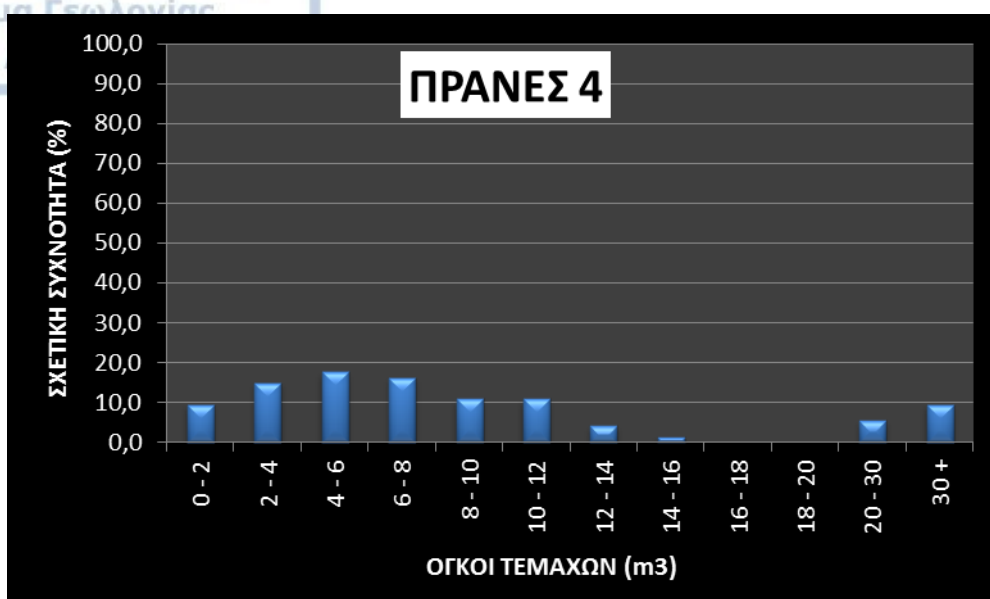


Figure 5.4. Σχετική συχνότητα εμφάνισης των υπολογισθέντων όγκων στο πρανές 4

Στο πρανές 4 σχηματίζονται τεμάχια διαφόρων όγκων. Σχεδόν όλες οι κατηγορίες όγκων καταλαμβάνουν από 10% του συνολικού αριθμού επισφαλών τεμαχίων. Το σημαντικό είναι το μεταξύ των όγκων αυτών βρίσκονται και τεμάχια που ξεπερνούν τα 30 m<sup>3</sup> με ποσοστό σχετικής συχνότητας εμφάνισης στο 10% (Εικόνα 5.25).



Εικόνα 5.25. Μεγάλα επισφαλή τεμάχια στο πρανές 4

## 5.4 Αποτελέσματα

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το ίδιο σύστημα αξιολόγησης που χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν για την αξιολόγηση της επικινδυνότητας και διακινδύνευσης εκδήλωσης βραχοκαταπτώσεων στο κάστρο της Μονεμβασιάς (Saroglou et al., 2012). Παράμετροι τραχύτητας, JRC, και αντοχής των τοιχωμάτων των ασυνεχειών, JCS, θεωρήθηκαν ίδιες με την προηγούμενη έρευνα με τιμές 6 και 70 MPa αντίστοιχα. Άλλες παράμετροι του συστήματος αξιολόγησης όπως η βλάστηση του βράχου, το ύψος του, το πλάτος των ζωνών ανάσχεσης κατά μήκος του βράχου, το ιστορικό βραχοκαταπτώσεων, ο συντελεστής σεισμικής επιτάχυνσης της περιοχής, το καθεστώς των βροχοπτώσεων και ο βαθμός καρστικοποίησης ελήφθησαν και πάλι ίδιες με την προηγούμενη έρευνα είτε επειδή είναι στοιχεία που δεν μεταβάλλονται είτε επειδή δεν μεταβάλλονται μέσα σε ένα τόσο σύντομο χρονικό διάστημα.

Οι παράμετροι που εκτιμήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι ο προσανατολισμός των επιμέρους εξεταζόμενων πρανών, ο προσανατολισμός των επιφανειών των ασυνεχειών, η εμμονή των ασυνεχειών, η απόσταση των ασυνεχειών και οι όγκοι των σχηματιζόμενων επισφαλών τεμαχών, όπως παρουσιάστηκαν αναλυτικά σε προηγούμενα κεφάλαια. Επίσης, κατά την επίσκεψη στην περιοχή για την πραγματοποίηση της σάρωσης καλύφθηκε και μία ακόμη παράμετρος, αυτή της παρουσίας ή όχι υλικού πλήρωσης στα τοιχώματα των ασυνεχειών, από επί τόπου παρατήρηση.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των παραμέτρων που εξήχθησαν από την επεξεργασία των δεδομένων του LiDAR με αυτά που προέκυψαν από την προηγούμενη έρευνα στο κάστρο της Μονεμβασιάς, προκύπτει ότι πρόκειται για παρόμοια αποτελέσματα που δεν δίνουν σημαντικές διαφορές με την εφαρμογή τους στο σύστημα αξιολόγησης.

Συνεπώς, όπως προκύπτει από το σύστημα αξιολόγησης, ο βράχος της Μονεμβασιάς που οριοθετείται από το κάστρο αποτελεί μια περιοχή με επιμέρους τμήματα μέτριας και υψηλής διακινδύνευσης.

Πιο αναλυτικά, τα Πρανή 2,3 και 4 χαρακτηρίζονται από το σύστημα αξιολόγησης ως περιοχές υψηλής διακινδύνευσης και το Πρανές 1 ως περιοχή μέτριας διακινδύνευσης.

## 6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, συμπεραίνεται πως η χρήση και η εφαρμογή των μεθόδων της τηλεπισκόπησης, όπως είναι το LiDAR, είναι πλέον βασικό εργαλείο σε θέματα ευστάθειας βραχωδών πρανών.

Για την εκτίμηση της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης έναντι βραχοκαπτώσεων στο πρανές της Μονεμβασίας, ήταν απαραίτητο να προσδιοριστούν τα γεωμετρικά και τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας. Με τη χρήση του LiDAR συγκεντρώθηκαν τα απαραίτητα στοιχεία (νέφη σημείων) ώστε να γίνει ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών αυτών, εξοικονομώντας σημαντικό χρόνο σε σχέση με την συλλογή μετρήσεων με το χέρι. Επίσης εξασφαλίστηκαν μετρήσεις από όλα τα σημεία του πρανούς, κάτι που δεν θα ήταν δυνατόν να συμβεί διαφορετικά λόγω της απότομης κλίσης και του μεγάλου ύψους του.

Η διαδικασία της επεξεργασίας και ερμηνείας των δεδομένων του LiDAR, που παρουσιάζεται αναλυτικά στην εργασία, οδήγησε στην εξαγωγή των απαραίτητων στοιχείων όπως είναι ο εντοπισμός όλων των επιφανειών ασυνεχειών που απαντώνται στον βράχο με την κλίση και την φορά μέγιστης κλίσης, για κάθε μία από αυτές. Έτσι, δημιουργηθούν τα σχετικά στερεοδιαγράμματα και εντοπίστηκαν οι πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας. Ακόμη, εντοπίστηκαν τα επισφαλή τεμάχια και υπολογίστηκε ο όγκος τους μετρώντας τις αποστάσεις μεταξύ των τεκτονικών δομών, κάτι που δείχνεται μέσα από πλούσιο φωτογραφικό υλικό από την περιοχή όσο και με τα παραγόμενα, από τα δεδομένα του LiDAR, τρισδιάστατα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των ανωτέρω πληροφοριών.

Τέλος, στα στοιχεία αυτά προστέθηκαν και στοιχεία που αφορούν στις κλιματικές, σεισμολογικές και γεωλογικές συνθήκες της περιοχής και έτσι όλα μαζί εισήχθησαν σε κατάλληλο σύστημα αξιολόγησης της επικινδυνότητας και διακινδύνευσης. Προέκυψε λοιπόν μια ποσοτική εκτίμηση της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης έναντι βραχοκαταπτώσεων κατά μήκος όλου του πρανούς και συγκεκριμένα για όλα τα επιμέρους πρανή που αυτό διαμορφώνει. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με εκείνα που είχαν προκύψει από παλαιότερη έρευνα που είχε πραγματοποιηθεί για την περιοχή με επιτόπου μετρήσεις με τη χρήση πυξίδας στον βράχο. Αυτό που προέκυψε από την σύγκριση ήταν ότι τα αποτελέσματα είναι παρόμοια, με το LiDAR να προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια, εξοικονόμηση χρόνου και ευκολία στην πρόσβαση.

## 7 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bolin, H., Lide, C., Xuanming, P., Guanning, L., Xiaoting, C., Haogang, D., & Tianci, L. (2010). Assessment of the risk of rockfalls in Wu Gorge, Three Gorges, China. *Landslides*, 7(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0170-7>
- Corominas, J., Copons, R., Moya, J., Vilaplana, J. M., Altimir, J., & Amigó, J. (2005). Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area. *Landslides*, 2(4), 343–357. <https://doi.org/10.1007/s10346-005-0022-z>
- Dewez, T. J. B., Girardeau-montaut, D., Allanic, C., & Rohmer, J. (2016). FACETS : A CLOUDCOMPARE PLUGIN TO EXTRACT GEOLOGICAL PLANES FROM UNSTRUCTURED 3D POINT CLOUDS, *XLI*(July), 799–804. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-799-2016>
- 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), 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022>
- Ferrari, F., Giacomini, A., & Thoeni, K. (2016). Qualitative Rockfall Hazard Assessment: A Comprehensive Review of Current Practices. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(7), 2865–2922. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0918-z>
- Hoek, E. (2006). Analysis of rockfall hazards. *Rock Engineering*, (1989), 1–25.
- Kromer, R. A., Hutchinson, D. J., Lato, M. J., Gauthier, D., & Edwards, T. (2015). Identifying rock slope failure precursors using LiDAR for transportation corridor hazard management. *Engineering Geology*, 195, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.05.012>
- Marinos, P., & Hoek, E. (n.d.). GSI : A GEOLOGICALLY FRIENDLY TOOL FOR ROCK MASS STRENGTH ESTIMATION.
- Mavrouli, O., Corominas, J., & Jaboyedoff, M. (2015). Size Distribution for Potentially Unstable Rock Masses and In Situ Rock Blocks Using LIDAR-Generated Digital Elevation Models. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(4), 1589–1604. <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0647-0>
- Novotný, J. (2013). Varnes Landslide Classification (1978). *Charles University in Prague, Faculty of Science, Czech Republic*, (November), 25 p. Retrieved from [http://www.geology.cz/projekt681900/vyukove-materialy/2\\_Varnes\\_landslide\\_classification.pdf](http://www.geology.cz/projekt681900/vyukove-materialy/2_Varnes_landslide_classification.pdf)
- 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>
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision : The Analytic Hierarchy Process, 48.
- Santana, D., Corominas, J., Mavrouli, O., & Garcia-Sellés, D. (2012). Magnitude-frequency relation for rockfall scars using a Terrestrial Laser Scanner. *Engineering Geology*, 144–145, 50–64.



- <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.07.001>
- Santi, P. M., Russell, C. P., Higgins, J. D., & Spriet, J. I. (2009). Modification and statistical analysis of the Colorado Rockfall Hazard Rating System. *Engineering Geology*, 104(1–2), 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.08.009>
- Saroglou, H., Marinos, V., Marinos, P., & Tsiambaos, G. (2012). Rockfall hazard and risk assessment: An example from a high promontory at the historical site of Monemvasia, Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(6), 1823–1836. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-1823-2012>
- 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>
- Topal, T., Akin, M. K., & Akin, M. (2012). Rockfall hazard analysis for an historical Castle in Kastamonu (Turkey). *Natural Hazards*, 62(2), 255–274. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9995-1>
- Valagussa, A., Frattini, P., & Crosta, G. B. (2014). Earthquake-induced rockfall hazard zoning. *Engineering Geology*, 182(PB), 213–225. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.07.009>
- Youssef, A. M., Maerz, N. H., & Al-Otaibi, A. a. (2012). Stability of Rock Slopes along Raidah Escarpment Road, Asir Area, Kingdom of Saudi Arabia. *Journal of Geography and Geology*, 4(2), 48–70. <https://doi.org/10.5539/jgg.v4n2p48>
- Μουντράκης, Δ.Μ. (2010). Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας, Θεσσαλονίκη: UNIVERSITY STUDIO PRESS