



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΜΑΡΙΝΑ Γ. ΤΣΙΑΝΤΟΥΚΑ  
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΥΨΗΛΟΥ  
ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΑΡΩΤΗ LiDAR  
ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΤΡΩΝ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ  
ΣΥΜΠΑΓΩΝ ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΩΝ ΣΤΟΝ ΟΔΙΚΟ ΑΞΟΝΑ ΕΠΤΑΧΩΡΙΟΥ  
– ΚΟΝΙΤΣΑΣ

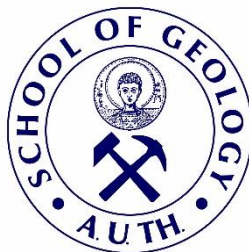
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ 'ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΟΝΤΙΚΗ  
ΓΕΩΛΟΓΙΑ',  
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: 'ΤΕΧΝΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ'*

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ  
2019



ARISTOTLE UNIVERSITY OF THESSALONIKI  
SCHOOL OF GEOLOGY  
DEPARTMENT OF GEOLOGY



MARINA G. TSANTOUKA  
Geologist

STUDY OF SLOPE STABILITY USING LIDAR TECHNOLOGY IN  
MASSIVE CONGLOMERATE ENVIRONMENT AND SUGGESTIONS  
OF SUPPORT MEASURES ALONG THE EPTACHORI-KONITSA  
NATIONAL ROAD

MASTER THESIS

*POSTGRADUATE STUDIES PROGRAMME 'APPLIED AND ENVIRONMENTAL GEOLOGY',  
DIRECTION: 'ENGINEERING GEOLOGY'*

THESSALONIKI  
2019





ΜΑΡΙΝΑ Γ. ΤΣΙΑΝΤΟΥΚΑ  
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΥΨΗΛΟΥ ΤΕΧΝΗΤΟΥ  
ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΑΡΩΤΗ LiDAR ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΤΡΩΝ  
ΑΝΤΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΣΥΜΠΑΓΩΝ ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΩΝ ΣΤΟΝ ΟΔΙΚΟ  
ΑΞΟΝΑ ΕΠΤΑΧΩΡΙΟΥ – ΚΟΝΙΤΣΑΣ

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

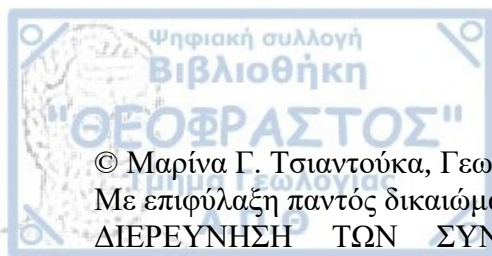
Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 13/06/2019

### **Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή**

Βασίλειος Μαρίνος, Αν.Καθηγητής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,  
Επιβλέπων

Μακεδών Θωμάς, ΕΔΙΠ, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Κακλής Τριαντάφυλλος, ΕΔΙΠ, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής



© Μαρίνα Γ. Τσιαντούκα, Γεωλόγος, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΥΨΗΛΟΥ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΟΡΥΓΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΑΡΩΤΗ LiDAR ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΤΡΩΝ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΣΥΜΠΑΓΩΝ ΚΡΟΚΑΛΟΠΑΓΩΝ ΣΤΟΝ ΟΔΙΚΟ ΑΞΟΝΑ ΕΠΤΑΧΩΡΙΟΥ – ΚΟΝΙΤΣΑΣ– *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*

© Marina G. Tsiantouka, Geologist, 2019

All rights reserved.

STUDY OF SLOPE STABILITY USING LIDAR TECHNOLOGY IN MASSIVE CONGLOMERATE ENVIRONMENT AND SUGGESTIONS OF SUPPORT MEASURES ALONG THE EPTACHORI-KONITSA NATIONAL ROAD– *Master Thesis*

#### Citation:

Τσιαντούκα Γ. Μ., 2019. – Διερεύνηση των συνθήκων ευστάθειας υψηλού τεχνητού ορύγματος με χρήση επίγειου σαρωτή LiDAR και προτάσεις μέτρων αντιστήριξης σε περιβάλλον συμπαγών κροκαλοπαγών στον οδικό άξονα Επταχωρίου – Κόνιτσας. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., 100 σελ.

Tsiantouka G. M., 2019. –Study of slope stability using LiDAR technology in massive conglomerate environment and suggestions of support measures along the Eptachori-Konitsa national road. Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 100 pp.

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

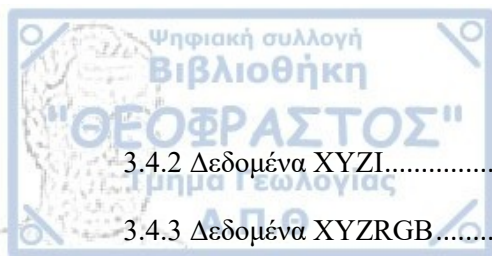
Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



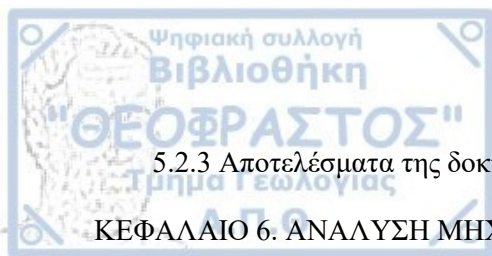
*Στους γονείς μου,*



|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....                                        | 1  |
| ABSTRACT .....                                        | 2  |
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....                                     | 3  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....                            | 4  |
| 1.1 ΣΚΟΠΟΣ.....                                       | 4  |
| 1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ-ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ .....                     | 4  |
| 1.3 ΔΟΜΗ .....                                        | 8  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΟΡΙΣΜΟΙ .....                             | 9  |
| 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....                                     | 9  |
| 2.2 ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΗ (ROCKFALL) .....                   | 9  |
| 2.3 ΑΙΤΙΑ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΗΣ.....                        | 11 |
| 2.4 ΤΡΟΧΙΑ ΚΙΝΗΣΗΣ.....                               | 12 |
| 2.5 ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ .....                          | 13 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΑΡΩΤΗ LiDAR..... | 15 |
| 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....                                     | 15 |
| 3.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ .....                            | 15 |
| 3.3 ΕΙΔΗ ΣΑΡΩΤΩΝ .....                                | 16 |
| 3.3.1 Στατικού τύπου σαρωτές .....                    | 17 |
| 3.3.2 Κινητού τύπου σαρωτές.....                      | 17 |
| .....                                                 | 18 |
| 3.4 ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....                                     | 18 |
| 3.4.1 Δεδομένα XYZ.....                               | 19 |



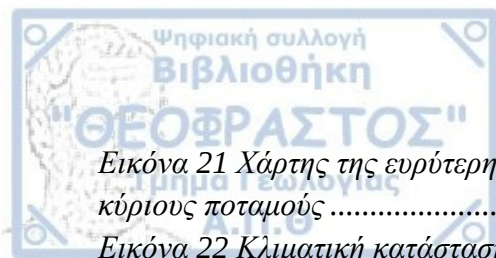
|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| 3.4.2 Δεδομένα XYZI.....                                   | 19 |
| 3.4.3 Δεδομένα XYZRGB.....                                 | 19 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ..... | 20 |
| 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....                                          | 20 |
| 4.3 ΖΩΝΗ ΩΛΟΝΟΥ-ΠΙΝΔΟΥ.....                                | 20 |
| 4.3.1 Λιθοστρωματογραφική εξέλιξη.....                     | 23 |
| 4.3.2 Τεκτονική εξέλιξη .....                              | 27 |
| 4.6 Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....                                 | 29 |
| 4.6.1 Εισαγωγή .....                                       | 29 |
| 4.6.2 Λιθολογία .....                                      | 29 |
| 4.6.3 Υδρογεωλογικές συνθήκες .....                        | 34 |
| 4.6.5 Κλιματικά στοιχεία περιοχής.....                     | 34 |
| 4.6.6 Στοιχεία σεισμικότητας .....                         | 38 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΡΑΝΟΥΣ .....       | 41 |
| 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....                                          | 41 |
| 5.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ.....                             | 41 |
| 5.2.1 Ποιότητα βραχόμαζας .....                            | 41 |
| 5.2.2 TE1.Κροκαλοπαγές ελαφρά αποσπασμένο.....             | 42 |
| 5.2.2 Μικροτεκτονική ανάλυση του πρανούς .....             | 44 |
| 5.3 ΜΕΘΟΛΟΓΙΑ .....                                        | 48 |
| 5.3.1 CloudCompare.....                                    | 49 |
| 5.3.2 DSE .....                                            | 51 |
| 5.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ- ΚΥΡΙΕΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ.....                   | 53 |
| 5.3 ΕΥΡΕΣΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ .....                       | 57 |
| 5.2.2 Διαδικασία εύρεσης διατμητικής αντοχής.....          | 62 |



|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 5.2.3 Αποτελέσματα της δοκιμής άμεσης διάτμησης.....         | 66 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΑΣΤΟΧΙΑΣ .....                | 70 |
| 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....                                            | 70 |
| 6.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ.....                                 | 70 |
| 6.1 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ.....                      | 74 |
| 6.3.1 Διερεύνηση του συντελεστή ασφαλείας στον τομέα Α.....  | 75 |
| .....                                                        | 77 |
| 6.3.2 Διερεύνηση του συντελεστή ασφαλείας στον τομέα Β ..... | 78 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΑ ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ .....              | 80 |
| 7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....                                            | 80 |
| 7.2 ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ .....           | 80 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....                                | 82 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....                                            | 84 |

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 1 Εξεταζόμενο πρανές μέσου ύψους 25m και μέγιστος όγκος κατάπτωσης $14,1 \text{ m}^3$                                                                                                                                                                                     | 6  |
| Εικόνα 2 Περιοχή μελέτης από Google Earth. ....                                                                                                                                                                                                                                  | 7  |
| Εικόνα 3 Απεικόνιση της εξελικτικής πορείας της μορφολογίας του πρανούς. ....                                                                                                                                                                                                    | 7  |
| Εικόνα 4 Τρισδιάστατη σκαριφματική απεικόνιση της<br>βραχοκατάπτωσης ( <a href="http://www.geocaching.com">www.geocaching.com</a> ).....                                                                                                                                         | 10 |
| Εικόνα 5 Διακοπή λειτουργίας του οδικού άξονα Zion Scenic εξαιτίας βραχοκατάπτωσης,<br>US( <a href="http://www.nationalparkstraveler.org">www.nationalparkstraveler.org</a> ).....                                                                                               | 10 |
| Εικόνα 6 Απεικόνιση ορισμένων γεωμηχανικών ιδιοτήτων που καθορίζουν την μηχανική<br>συμπεριφορά της βραχώμαζας σε ασβεστολιθικό πρανές στο φράγμα Vajont, Ιταλία .....                                                                                                           | 11 |
| Εικόνα 7 Πιθανές μορφές μετακινήσεις της αποκολλημένης μάζας κατα το φαινόμενο της<br>βραχοκατάπτωσης (τροποποιημένο από Ritchie, 1963) .....                                                                                                                                    | 12 |
| Εικόνα 8 Αντιστήριξη ασβεστολιθικής βραχώμαζας στην περιοχή του φράγματος Vajont,<br>Ιταλία με χρήση αγκυριών. (Ενεργητικά μέτρα αντιστηρίξης) .....                                                                                                                             | 14 |
| Εικόνα 9 Αντιστήριξη βραχώμαζας στο δρόμο που οδηγεί στον Άγιο Νικήτα, στα<br>Πευκούλια. (Παθητικά μέτρα αντιστηρίξης, ( <a href="http://aromalefkadas.gr">http://aromalefkadas.gr</a> )).....                                                                                   | 14 |
| Εικόνα 10 Απεικόνιση της διαδρομής του σήματος από το LiDAR στον στόχο καθώς και<br>του επιστρεφόμενου παλμού (Lato, 2011).....                                                                                                                                                  | 16 |
| Εικόνα 11 Επίγειος στατικός σαρωτής LiDAR που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα<br>διπλωματική εργασία .....                                                                                                                                                                          | 17 |
| Εικόνα 12 Απεικόνιση των συστημάτων που συμμετέχουν στους κινητού τύπου σαρωτές<br>( <a href="http://desktop.arcgis.com">http://desktop.arcgis.com</a> ) .....                                                                                                                   | 18 |
| Εικόνα 13 Χάρτης που δείχνει το χώρο επέκτασης του τεκτονικού καλύμματος της Πίνδου<br>στην ηπειρωτική Ελλάδα, ενώ αναφέρονται και τα κύρια βουνά της οροσειράς της Πίνδου<br>(Μουντράκης 2010) .....                                                                            | 21 |
| Εικόνα 14 Γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης (IGME, Φύλλο Κόνιτσας).....                                                                                                                                                                                                     | 24 |
| Εικόνα 15 Στρωματογραφική στήλη όπου απεικονίζεται οι σχηματισμοί της γεωτεκτονικής<br>ζώνης Ωλονού- Πίνδου (Κουκουβέλας, 2014).....                                                                                                                                             | 25 |
| Εικόνα 16 Μοντέλο απεικόνισης της ζώνης της Πίνδου επωθημένη στην Αδριατικοίονιο<br>ζώνη. <a href="http://old.ntua.gr/">http://old.ntua.gr/</a> .....                                                                                                                            | 30 |
| Εικόνα 17 Πολύμεικτο κροκαλοπαγές καλά συγκολλημένο .....                                                                                                                                                                                                                        | 30 |
| Εικόνα 18 Γεωλογία της περιοχής μελέτης (πηγή : Φύλλο Κόνιτσας IGME ) και<br>αεροφωτογραφία της περιοχής μελέτης (πηγή : Google Earth ). Αριστερά το πρανές ύψους<br>??? κροκαλοπαγούς σύστασης όπου πραγματοποιήθηκε η σάρωση με το LiDAR , UAV και<br>οι μετρήσεις πεδίου..... | 31 |
| Εικόνα 19 Το πρανές κροκαλοπαγούς συστάσεως στην περιοχή μελέτης στην παλαιά εθνική<br>οδό Κοζάνης- Ιωαννίνων .....                                                                                                                                                              | 32 |
| Εικόνα 20 Λήψη πεσμένων τεμαχών παλαιάς κατολίσθησης στην περιοχή μελέτης μεγέθους<br>(α) $14,1 \text{ m}^3$ (b) $8.82 \text{ m}^3$ (c) $2.15 \text{ m}^3$ .....                                                                                                                 | 33 |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 21 Χάρτης της ευρύτερης περιοχής μελέτης με το υδρογραφικό δίκτυο και του κύριους ποταμούς .....                                                                                                                                                                                                                         | 34 |
| Εικόνα 22 Κλιματική κατάσταση κατά Koppen στην Ελλάδα. C=θαλάσσιο κλίμα, D =ηπειρωτικό κλίμα, ( <a href="http://www.meteoclub.gr">http://www.meteoclub.gr</a> ) .....                                                                                                                                                           | 35 |
| Εικόνα 23 Δεδομένα μέσο ετήσιου νετού για την περιοχή των Ιωαννίνων ( <a href="http://www.emy.gr">http://www.emy.gr</a> ) .....                                                                                                                                                                                                 | 36 |
| Εικόνα 24 Δεδομένα μηνιαίας θερμοκρασίας αέρα για την περιοχή των Ιωαννίνων ( <a href="http://www.emy.gr">http://www.emy.gr</a> ) .....                                                                                                                                                                                         | 36 |
| Εικόνα 25 Ετήσιο ύψος βροχόπτωσης Κόνιτσας από το 2013-2017 .....                                                                                                                                                                                                                                                               | 37 |
| Εικόνα 26 Μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης κατά το υδρολογικό έτος 2016-2017 .....                                                                                                                                                                                                                                                      | 38 |
| Εικόνα 27 Απεικόνιση σεισμικών δονήσεων σε απόσταση 100 km από την περιοχή μελέτης μεγέθους $M_w \geq 4$ κατά την διάρκεια των τελευταίων 50 χρόνων. Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο κέντρο του κύκλου. ( <a href="http://www.gein.noa.gr">http://www.gein.noa.gr</a> ) .....                                                   | 39 |
| Εικόνα 28 Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας, με κόκκινο απεικονίζεται η περιοχή μελέτης. <a href="https://web.tee.gr/">https://web.tee.gr/</a> .....                                                                                                                                                                             | 42 |
| Εικόνα 29 Το πρανές ως μια τεχνικογεωλογική ενότητα με επισήμανση τα σημεία όπου εμφανίζεται ελαφρά αποσαθρωμένο .....                                                                                                                                                                                                          | 42 |
| Εικόνα 30 Ταξινόμηση της βραχομάζας κατά GSI (Marinos, 2014). Με κόκκινο χρόνο απεικονίζεται η τιμή χαρακτηρισμού της βραχομάζας .....                                                                                                                                                                                          | 43 |
| Εικόνα 31 Απεικόνιση τριών συστημάτων ασυνεχειών.....                                                                                                                                                                                                                                                                           | 44 |
| Εικόνα 32 Διάγραμμα πυκνότητας πόλων ασυνεχειών τεκτονικών μετρήσεων πεδίου .....                                                                                                                                                                                                                                               | 45 |
| Εικόνα 33 Στερεοδιάγραμμα μετρήσεων πεδίου .....                                                                                                                                                                                                                                                                                | 46 |
| Εικόνα 34 Η θέση σάρωσης στην περιοχή ενδιαφέροντος με χρήση επίγειου σαρωτή LiDAR .....                                                                                                                                                                                                                                        | 49 |
| Εικόνα 35 Εξεταζόμενο πρανές. Λήψη από UAV .....                                                                                                                                                                                                                                                                                | 49 |
| Εικόνα 36 Το νέφος σημείων για ολόκληρη την περιοχή ενδιαφέροντος σε γκρι κλίμακα. 50                                                                                                                                                                                                                                           |    |
| Εικόνα 37 Το γεωαναφερμένο και καθαρισμένο νέφος σημείων .....                                                                                                                                                                                                                                                                  | 50 |
| Εικόνα 38 Στερεοδιάγραμμα πυκνότητας πόλων όπως προκύπτουν από τον επίγειο σαρωτή LiDAR με χρήση δύο διαφορετικών αλγορίθμων (α) Πυκνότητα πόλων όπως προκύπτει από την μέθοδο του λογισμικού DSE (b) Πυκνότητα πόλων από το λογισμικό CloudCompare (c) Πυκνότητα πόλων όπως προκύπτουν από μετρήσεις στο πεδίο με πυξίδα ..... | 53 |
| Εικόνα 39 Τα κύρια συστήματα ασυνεχειών όπως εντοπίζονται στο νέφος σημείων σε κλίμακα RGB. Με μπλε χρώμα απεικονίζεται η στρώση B, με πράσινο το σύστημα J1 και με κίτρινο και πράσινο το σύστημα J2 .....                                                                                                                     | 54 |
| Εικόνα 40 Θέσεις μέτρησης με την σφύρα Schmidt σε υγιές και αποσαθρωμένο κροκαλοπαγές .....                                                                                                                                                                                                                                     | 55 |
| Εικόνα 41 Συσχέτιση τιμών αναπήδησης σφύρας Schmidt και αντοχής σε μονοαξονική θλίψη UCS (MPa) σύμφωνα με το ειδικό βάρος του πετρώματος ( $kN/m^3$ ) (Deere & Miller, 1996) .....                                                                                                                                              | 55 |

|                                                                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Εικόνα 42 Περιβάλλουσες διατμητικές αντοχές σύμφωνα με το κριτήριο Papaliangas ( Papaliangas, 1995) .....                                                                              | 59  |
| Εικόνα 43 Εφελκυστική διάρρηξη με τη χρήση δυο γωνιακών ελασμάτων μέσω των οποίων εφαρμόστηκε το απαιτούμενο γραμμικό φορτίο σε προ-διαμορφωμένη εγκοπή κατά πλάτος του δοκιμίου ..... | 62  |
| Εικόνα 44 Γραμμές αποτύπωσης τραχύτητας με την χρήση προφυλλόμετρον. Αριστερά φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο σημειώνεται η τραχύτητα και δεξιά παρατίθεται το προφυλλόμετρο. ....      | 63  |
| Εικόνα 45 Εγκιβωτισμός του πάνω μέρους δοκιμίου. ....                                                                                                                                  | 63  |
| Εικόνα 46 Διάταξη συσκευής άμεσης διάτμησης ασυνειχών βράχου .....                                                                                                                     | 65  |
| Εικόνα 47 Διάγραμμα διατμητικής αντοχής σε συνάρτηση με την ορθή τάση .....                                                                                                            | 68  |
| Εικόνα 48 Φωτογραφίες του δείγματος πριν και μετά από κάθε στάδιο φόρτισης με την εφαρμογή του κριτηρίου Papaliangas .....                                                             | 69  |
| Εικόνα 49 Τεκτονικό διάγραμμα όπου παρουσιάζονται οι πιθανές αστοχίες .....                                                                                                            | 70  |
| Εικόνα 50 Εξέταση επίπεδης ολίσθησης.....                                                                                                                                              | 71  |
| Εικόνα 51 Μοντέλο όπως προκύπτει από την πτήση μη-επανδρωμένου αεροσκάφους, UAV .....                                                                                                  | 75  |
| Εικόνα 52 Οι τομές του πρανούς με βάση την διαφορά ύψους κατά μήκος του πρανούς .                                                                                                      | 75  |
| Εικόνα 53 Συντελεστής ασφαλείας σε υγρές συνθήκες.....                                                                                                                                 | 76  |
| Εικόνα 54 Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρές συνθήκες .....                                                                                                                                | 76  |
| Εικόνα 55 Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρές συνθήκες .....                                                                                                                                | 769 |
| Εικόνα 56 Συντελεστής ασφαλείας σε υγρές συνθήκες. Η ασυνέχεια έχει πληρωθεί 100% με νερό .....                                                                                        | 77  |
| Εικόνα 57 Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρές συνθήκες .....                                                                                                                                | 77  |
| Εικόνα 58 Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρές συνθήκες .....                                                                                                                                | 78  |
| Εικόνα 59 Συντελεστής ασφαλείας σε υγρές συνθήκες με 19% πλήρωση της ασυνέχειας με νερό .....                                                                                          | 78  |
| Εικόνα 60 Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρές συνθήκες .....                                                                                                                                | 79  |
| Εικόνα 61 Συντελεστής ασφαλείας σε υγρές συνθήκες. Η ασυνέχεια έχει πληρωθεί 100% με νερό .....                                                                                        | 79  |



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

|                                                                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Πίνακας 1 Τεκτονικά στοιχεία μετρήσεων πεδίου .....</i>                                                  | <i>45</i> |
| <i>Πίνακας 2 Μέσες τιμές αναπήδησης της σφύρας Schmidt στα συστήματα ασυνεχειών.....</i>                    | <i>56</i> |
| <i>Πίνακας 3 Αποτελέσματα από την επί τόπου δοκιμή κρουσιμέτρησης με τη χρήση της σφύρας Schmidt .....</i>  | <i>56</i> |
| <i>Πίνακας 4 Αποτελέσματα από την επί τόπου δοκιμή για την εκτίμηση της τραχύτητας των ασυνεχειών .....</i> | <i>57</i> |
| <i>Πίνακας 5 Αποτελέσματα από την δοκιμή άμεσης διάτμησης .....</i>                                         | <i>67</i> |
| <i>Πίνακας 6 Τα κύρια συστήματα ασυνεχειών όπως προκύπτουν από την ανάλυση.....</i>                         | <i>54</i> |
| <i>Πίνακας 7 Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την διερεύνηση του συντελεστή ασφαλείας .....</i>          | <i>54</i> |
| <i>Πίνακας 8 Συντελεστής ασφαλείας για την επίπεδη ολίσθηση σε υγρές και ξηρές συνθήκες .....</i>           | <i>75</i> |

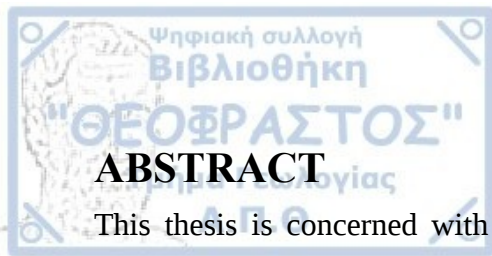


Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό την ανάλυση βραχώδους πρηνούς με την χρήση επίγειου σαρωτή LiDAR (Light Detection And Ranging) σε απότομο πρηνές στον επαρχιακό άξονα Επταχωρίου –Κόνιτσας. Στην περιοχή μελέτης παρατηρήθηκαν φαινόμενα βραχοκαταπτώσεων. Η περιοχή μελέτης αποτελείται από το κροκαλοπαγές του φλύσχη της Πίνδου. Η βραχώμαζα θεωρήθηκε ως τεμαχώδης δομή με 3 συστήματα ασυνεχειών. Επιπλέον στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται το γεωλογικό περιβάλλον, η σεισμικότητα καθώς και οι κλιματικές συνθήκες,.

Η ανάλυση του μηχανισμού αστοχίας, στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με την χρήση του επίγειου σαρωτή LiDAR. Από την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψε ο προσανατολισμός των ασυνεχειών καθώς και οι πιθανές αστοχίες που θα προκύψουν. Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη του τεχνικογεωλογικού μοντέλου καθώς και η σχεδίαση των μέτρων προστασίας έναντι των αστοχιών που προκύπτουν. Για την εκπόνηση της εργασίας πραγματοποιήθηκε γεωλογική και τεχνικογεωλογική έρευνα στην περιοχή μελέτης κατά το διάστημα Ιουλίου-Αυγούστου 2018 με μετρήσεις πεδίου και επιτόπου δοκιμές. Επιπρόσθετα, για την πληρότητας της μελέτης πραγματοποιήθηκαν πτήσεις με μη-επανδρωμένο όχημα UAV στην περιοχή μελέτης.

Για την εξαγωγή των στοιχείων του προσανατολισμού των ασυνεχειών έγινε σύγκριση δύο λογισμικών με την χρήση διαφορετικής μεθόδου ταξινόμησης, της k-d tree και της KDE (Kernel density estimation). Σύμφωνα με την k-d το νέφος σημείων υποδιαιρείται σε τεταρτημόρια έως ότου όλα τα σημεία που βρίσκονται στο τεταρτημόριο να ταιριάζουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο σε ένα επίπεδο, με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η δεύτερη μέθοδος ταξινόμησης βασίζεται στην μέθοδο των γειτονικών σημείων που ανήκουν στο ίδιο επίπεδο.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την συγκεκριμένη μεθοδολογία συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που προέκυψαν και την εργασία στο πεδίο με σκοπό την εξαγωγή παραμέτρων όπου ανταποκρίνονται καλύτερα στην πραγματικότητα.



## ABSTRACT

This thesis is concerned with slope stability analysis using LiDAR technology (Light Detection and Ranging) in steep slope at Eptachori-Konitsa motorway, Greece. Along the face log of the examined slope, rockfall events were observed. The geological setting of the study area consists of conglomerate units of Pindos flysch. The formations of the area present blocky structure developed by the bedding and 2 other joints, the geological setting, the seismicity and the climatic conditions of the study area is presented.

In the current study, LiDAR technology was implemented to extract the appropriate parameters can be used for the slope stability analysis. After data processing, joint orientation parameters and volume measurements of hanging blocks were extracted. The objective of this thesis is to develop engineering geological interpretation of rockfall events and design the reinforcement measurements of the residential zone downstream the slope. A detailed field survey of the geological and engineering geological condition were conducted during July- August 2018 along with field measurements. Moreover, through scanning of the face log of the slope carried out using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) above the study area.

Slope stability analysis along the slope on the study area conducted by using two different algorithms, Kd – Tree approach and KDE (Kernel density estimation) for joint orientation parameters. According to the the Kd-Tree approach subdivided the point cloud into quarter cells until all the points that contained in the cell fit the best –fitting plane given the root-mean-square threshold. In the other hand the second algorithm based on neighboring points coplanarity test, finding principal orientation by KDE.

The results produced by the current methodology are validates and interpreted according to in-situ records and measurements. Those logarithms are used in order to extract the best joints orientation for kinematic analysis.



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας κ. Βασίλειο Μαρίνο, Αν. Καθηγητή του Α.Π.Θ για την καθοδήγηση του τόσο κατά την διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος όσο και για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Ήταν πάντα διαθέσιμος, κατά την διάρκεια των προπτυχιακών αλλά και των μεταπτυχιακών σπουδών μου, να μου προσφέρει τις γνώσεις του και την εμπειρία του. Κυρίως τον ευχαριστώ διότι μέσα από την επιστημονική του σκέψη εμπλούτισε τις γνώσεις μου και την αντίληψη μου σε τεχνικά ζητήματα. Κρίνω απαραίτητο να εκφράσω την εκτίμηση μου προς τα υπόλοιπα μέλη της επιτροπής για τις υποδείξεις και τις παρατηρήσεις στο σύνολο της παρούσας εργασίας.

Επιπρόσθετα , θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ευστράτιο Καραντανέλλη, υποψήφιο διδάκτορα του εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Περιβαλλοντικής Υδρογεωλογίας για την πολύτιμη και καθοριστική βοήθεια του κατά την διάρκεια της επεξεργασίας των δεδομένων καθώς και τον Αναστάσιο Τσακίρη, υποψήφιο διδάκτορα του εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Περιβαλλοντικής Υδρογεωλογίας για την βοήθειά του στην διεξαγωγή των εργαστηριακών δοκιμών.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και την αδελφή μου για την πίστη, την στήριξη και την επιμονή που επέδειξαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου. Η συμβολή τους σε κάθε επιθυμία μου και προσπάθεια παρά τις δυσκολίες είχε ως αποτέλεσμα να φτάσω στο σημείο που είμαι σήμερα. Η ευγνωμοσύνη είναι το λιγότερο που μπορώ να τους προσφέρω καθώς στέκονται πάντα δίπλα μου τόσο στις επιτυχίες όσο και στις αποτυχίες μου, δίνοντας μου ελπίδα και δύναμη να συνεχίσω να προσπαθώ για το καλύτερο.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές και συναδέλφους μου Ιωάννη Φαρμάκη και Πελαγία Αυγερινού για τις επισημάνσεις τους και το ενδιαφέρον τους για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 ΣΚΟΠΟΣ**

Η παρούσα εργασία υποβλήθηκε στα πλαίσια του ΠΜΣ Εφαρμοσμένη Γεωλογία με κατεύθυνση Τεχνική Γεωλογία του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης καθώς αποτελεί μέρος των υποχρεωτικών μαθημάτων για την τελική διεκπεραίωση των μεταπτυχιακών σπουδών. Η περίοδο της έρευνας για την τελική συγγραφή, διεξήχθη κατά την διάρκεια των μηνών Ιουλίου-Δεκεμβρίου 2018. Σκοπός της εργασίας είναι η κατανόηση και η αξιολόγηση των τεχνικογεωλογικών συνθηκών της περιοχής μελέτης (Εικόνα 1 & 2) την ανάπτυξη ενός τελικού μοντέλου για την ερμηνεία του μηχανισμού αστοχίας του πρανούς καθώς και η πρόταση και ο σχεδιασμός μέτρων αντιστήριξης για την προστασία του επαρχιακού δρόμου Επταχωρίου –Κόνιτσας με την χρήση αυτοματοποιημένων και μη-αυτοματοποιημένων μεθόδων. Σύμφωνα με την εξελικτική πορεία της μορφολογίας του πρανούς η κατολίσθηση έλαβε χώρα στο διάστημα Ιουνίου 2016-Ιουνίου 2017 (Εικόνα 3). Οι παράγοντες που οδήγησαν στην αστοχία αναλύονται σε παρακάτω κεφάλαιο.

### **1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ-ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ**

Η κατάπτωση των βραχωδών τεμαχών σε περιοχές όπου υπάρχει η ανθρώπινη δραστηριότητα έχει τόσο οικονομικές όσο και κοινωνικές επιπτώσεις καθώς ελλοχεύει ο κίνδυνος σημαντικών καταστροφών και ανθρώπινων θυμάτων. Το φαινόμενο των βραχοκαταπτώσεων στον ελλαδικό χώρο λαμβάνει χώρα κυρίως σε περιοχές με έντονη μορφολογία και τεκτονική καταπόνηση των σχηματισμών. Συνεπώς, το παραπάνω πρόβλημα συναντάται κυρίως σε ορεινές χαράξεις συγκοινωνιακών έργων ή σε ορεινούς οικισμούς.



Εικόνα 1 Εξεταζόμενο πρανές μέσου ύψους 25m και μέγιστος όγκος κατάπτωσης 14.1 m<sup>3</sup>



Εικόνα 2 Περιοχή μελέτης από Google Earth

6



2012



2014



2015



2017

Εικόνα 3 Απεικόνιση της εξελικτικής πορείας της μορφολογίας του πρανοός.



Στο πλαίσιο αυτό, η μεθοδολογία της έρευνας αποτελείται από τα παρακάτω στάδια

- Βιβλιογραφική έρευνα όσον αφορά την λειτουργία και την θεωρία του επίγειου σαρωτή LiDAR καθώς και των μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων
- Στην κατασκευή πειραματικών διαγραμμάτων πυκνότητας με την χρήση δύο διαφορετικών προγραμμάτων για τον ακριβέστερο προσανατολισμό των οικογενειών ασυνεχειών από το νέφος σημείων από τον επίγειο σαρωτή LiDAR
- Στην ανάλυση και στον προσδιορισμό του μηχανισμού αστοχίας του βραχώδους πρηνούς καθώς και
- Στην πρόταση μέτρων αντιστήριξης για την προστασία του επαρχιακού δρόμου Επταχωρίου-Κόνιτσας.

### **1.3 ΔΟΜΗ**

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται γενικές έννοιες σχετικά με τους μηχανισμούς αστοχίας των βραχωδών πρηνών, τα αίτια που προκαλούν τις αστοχίες αυτές καθώς και μέτρα προστασίας έναντι αυτών.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας της τεχνολογίας του επίγειου σαρωτή LiDAR καθώς και το είδος των δεδομένων που εξάγονται από αυτό.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται λεπτομερής βιβλιογραφική ανασκόπηση που αφορά την γεωλογία, την τεκτονική, την σεισμικότητα, τις υδρογεωλογικές και κλιματικές συνθήκες τόσο της ευρύτερης περιοχής όσο και της περιοχής μελέτης

Στο κεφάλαιο 5 εκτιμώνται οι τεχνικογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή μελέτης όπως προέκυψαν από λεπτομερή παρατήρηση στο πεδίο καθώς και από επί τόπου δοκιμές.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα συνολικά δεδομένα που εξήχθησαν τόσο από τον επίγειο σαρωτή LiDAR όσο και από το UAV καθώς και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά την επεξεργασία αυτών.

Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα μέτρα αντιστήριξης, τόσο παθητικά όσο και ενεργητικά για την προστασία του οδικού επαρχιακού άξονα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΟΡΙΣΜΟΙ

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

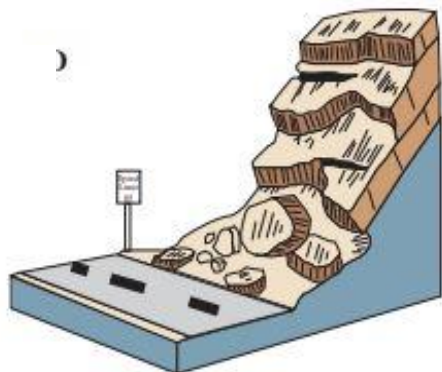
Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται βασικές έννοιες οι οποίες αποτελούν το κύριο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα γίνεται λεπτομερής περιγραφή της βραχοκατάπτωσης, των αιτιών που οδηγούν στην παραπάνω αστοχία καθώς και τα μέτρα υποστήριξης που είναι δυνατόν να υλοποιηθούν για την αποφυγή της αστοχίας.

Οι κατολισθήσεις των βραχιδών πρανών είναι ο κύριος γεωλογικός κίνδυνος παγκοσμίως και ευθύνονται για μερικές από τις μεγαλύτερες φυσικές καταστροφές της σύγχρονης ιστορίας. Το φαινόμενο βραχοκατάπτωσης είναι ένας φυσικός κίνδυνος, όπου συνήθως λαμβάνει χώρα σε ορεινές περιοχές. Οι συνέπειες αυτού του φαινομένου μπορεί είναι σοβαρές τόσο για την ομαλή λειτουργία της περιοχής (βλάβες σε οδικά δίκτυα, καταστροφές κ.τ.λ.) όσο και για τον ίδιο τον άνθρωπο (τραυματισμοί, δυστυχήματα κ.τ.λ.) (Volkwein et al., 2011).

### 2.2 ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΗ (ROCKFALL)

Σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης κατολισθήσεων που προτάθηκε από τον Varnes (1978) ως βραχοκατάπτωση (Εικόνα 4 & 5) ορίζεται η απότομη απόσπαση μια μάζας βραχιδούς πρανούς κατά μήκος μια επιφάνειας, χωρίς ή με ελάχιστη διατμητική μετατόπιση και η πτώση γίνεται ελεύθερα με αναπήδηση ή κύλιση στην επιφάνεια του πρανού. Το φαινόμενο της βραχοκατάπτωσης είναι συνηθισμένο σε ορεινές περιοχές με απότομα πρανή.

Σε απότομα πρανή με κλίση μεγαλύτερη από 4:1 εκδηλώνονται αστοχίες με ελεύθερη πτώση που αποκόπτονται από το πρανές. Σε πρανή με ηπιότερη κλίση παρατηρείται αναπήδηση της μάζας πάνω στο πρανές και θραύση σε μικρότερα τεμάχια το μέγεθος των οποίων εξαρτάται από είδος του υλικού και την γωνία πρόσπτωσης. Σε πρανή με κλίση μικρότερη των 45° η κύρια κίνηση που εκδηλώνονται είναι η κύλιση.



Εικόνα 4 Τρισδιάστατη σκαριφιματική απεικόνιση της βραχοκατάπτωσης  
([www.geocaching.com](http://www.geocaching.com))



Εικόνα 5 Διακοπή λειτουργίας του οδικού άξονα Zion Scenic εξαιτίας βραχοκατάπτωσης, US([www.nationalparkstraveler.org](http://www.nationalparkstraveler.org))

Σύμφωνα με τον Lato (2010) οι καταπτώσεις διακρίνονται σε πρωτογενείς καταπτώσεις, πτώσεις υλικών απευθείας από το μητρικό πέτρωμα και δευτερογενείς καταπτώσεις οι οποίες είναι πτώσεις μεταφερθέντων χαλαρών υλικών. Οι δευτερογενείς καταπτώσεις διακρίνονται ανάλογα με το μέγεθος των κορημάτων σε:

- Πτώσεις χαλικιών ( μέγεθος <75mm)
- Πτώσεις κροκαλών ( 75mm< μέγεθος<300mm)
- Πτώσεις τεμαχών (μέγεθος >300mm)

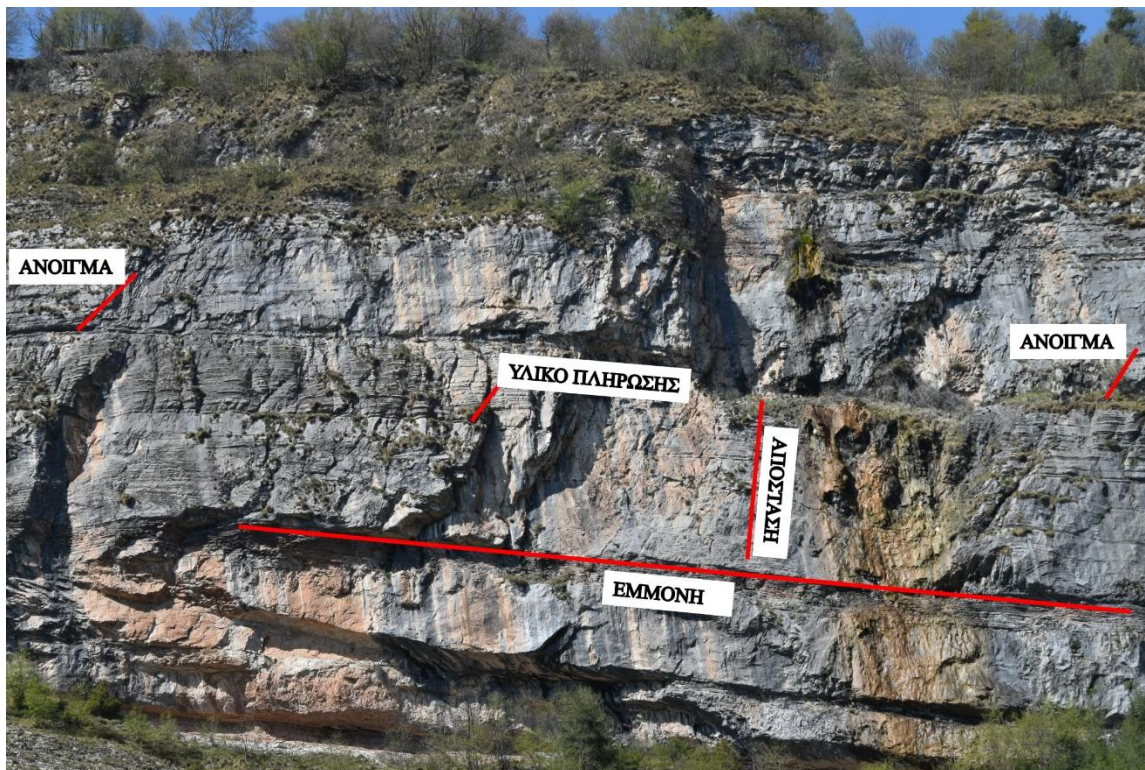
Για την μελέτη αυτής της αστοχίας είναι αναγκαίο να :

- προσδιοριστούν τα αιτία που οδήγησαν στην εκδήλωση της
- να υπολογιστεί η τροχιά κίνησης της μάζας
- να προταθούν μέτρα υποστήριξης

### 2.3 ΑΙΤΙΑ ΒΡΑΧΟΚΑΤΑΠΤΩΣΗΣ

Το φαινόμενο της βραχοκατάπτωσης αρχίζει με την αποκόλληση μίας μάζας από το βραχώδες πρηνές, η οποία έχει την δυνατότητα να κινηθεί σε χαμηλότερα υψομετρικά σημεία. Η αστοχία αυτή ελέγχεται κυρίως από περιβαλλοντικούς παράγοντες, οι οποίοι προκαλούν φυσική και χημική αποσάθρωση και από το είδος του πετρώματος (Dorren, 2003). Επιπλέον, το φαινόμενο της βραχοκατάπτωσης ελέγχεται από την γεωμετρία του πρηνούς και την κατάσταση των ασυνεχειών καθώς πρόκειται για ανισότροπη αστοχία.

Σύμφωνα με τον Barton (1977) οι πιο σημαντικές γεωμηχανικές ιδιότητες που καθορίζουν την μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας είναι ο προσανατολισμός, η μεταξύ τους απόσταση, η εμμόνη, η τραχύτητα των ασυνεχειών, το άνοιγμα και το υλικό πλήρωσης. Οι ιδιότητες αυτές συχνά αναφέρονται ως παράμετροι στις γεωτεχνικές ταξινομήσεις της βραχομάζας (Εικόνα 6)

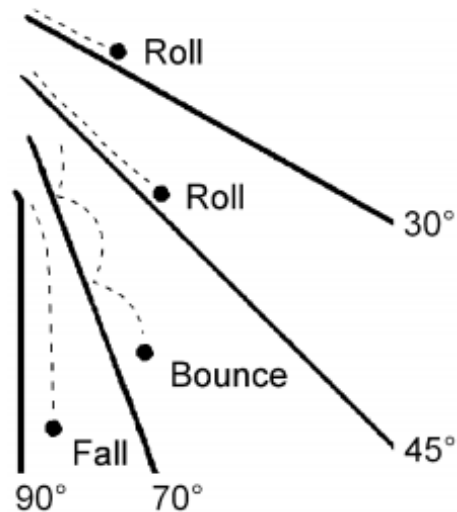


Εικόνα 6 Απεικόνιση ορισμένων γεωμηχανικών ιδιοτήτων που καθορίζουν την μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας σε ασβεστολιθικό πρηνές στο φράγμα Vajont, Ιταλία

## 2.4 ΤΡΟΧΙΑ ΚΙΝΗΣΗΣ

Η τροχιά κίνησης της αποκολλημένης μάζας εξαρτάται από ένα μεγάλο εύρος παραγόντων όπως το μέγεθος και το σχήμα της ίδιας της αποκολλημένης μάζας, τα γεωμετρικά στοιχεία του πρανού (γωνία κλίσης, ύψος κ.τ.λ.), τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας ολίσθησης καθώς και από το είδος του πετρώματος. Στην συγκεκριμένη μορφή αστοχίας η αποκολλημένη μάζα ξεκινάει από μια στατική θέση και είναι δυνατόν να μετακινηθεί με ολίσθηση, αναπήδηση ή κατακόρυφη πτώση (Ritchie, 1963)

Σύμφωνα με τον Ritchie (1963) η τροχιά κίνησης εξαρτάται κυρίως από την μέση κλίση του πρανού. Η κατακόρυφη πτώση παρουσιάζεται σε πολύ απότομα πρανή όπου η κλίση τους ξεπερνά τις  $76^\circ$ . Κατά την κατακόρυφη πτώση το κέντρο βάρους της αποκολλημένης μάζας μπορεί να μεταφερθεί ή η αποκολλημένη μάζα είναι δυνατόν να περιστραφεί γύρω από το κέντρο βάρους της κατά την πτώση (Azzoni, 1995). Όταν η μέση κλίση της επιφάνειας του πρανού είναι μικρότερη των  $70^\circ$  αλλά μεγαλύτερη των  $45^\circ$  η τροχιά κίνησης της μάζας γίνεται με την μορφή της αναπήδησης (Broilli, 1974). Η μάζα ολισθαίνει όταν η μέση κλίση του πρανού είναι περίπου μικρότερη των  $45^\circ$  (Εικόνα 7). Σύμφωνα με τον Erismann (1986) κατά την ολίσθηση η μάζα περιστρέφεται πολύ γρήγορα με αποτέλεσμα το κέντρο βάρους της να κινείται κατά μήκος μια νοητής ευθείας διαδρομής κατά την οποία λαμβάνει χώρα η ελάχιστη απώλεια ενέργειας.



Εικόνα 7 Πιθανές μορφές μετακίνησης της αποκολλημένης μάζας κατά το φαινόμενο της βραχοκατάπτωσης (τροποποιημένο από Ritchie, 1963)

## **2.5 ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ**

Τα μέτρα αντιστήριξης των βραχωδών πρανών διακρίνονται σε παθητικά μέτρα αντιστήριξης τα οποία εμποδίζουν τα τεμάχια της βραχώμαζας που έχουν μετακινηθεί να προκαλέσουν καταστροφές και ενεργητικά μέτρα αντιστήριξης τα οποία μειώνουν τις δυνάμεις που προκαλούν την αστοχία ή αυξάνουν τις δυνάμεις που αντιτίθενται σε αυτήν και μέτρα με τα οποία ενισχύεται η ποιότητα της βραχώμαζας (Εικόνα 8&9).

Παρακάτω διακρίνονται τα παθητικά και τα ενεργητικά μέτρα αντιστήριξης.

### Παθητικά μέτρα αντιστήριξης :

- Καθαίρεση των κομματιών που είναι ελεύθερα
- Κατασκευή τάφρων
- Κατασκευή τοίχων που λειτουργούν σαν φράγματα (βραχοπαγίδες)
- Μεταλλικά πλαίσια

### Ενεργητικά μέτρα αντιστήριξης :

- Αγκύρια
- Εκτοξευμένο Σκυρόδεμα
- Αποστραγγιστικές Οπές
- Τοίχοι αντιστήριξης



Εικόνα 8 Αντιστήριξη ασβεστολιθικής βραχώμαζας στην περιοχή του φράγματος Vajont, Ιταλία με χρήση αγκυριών. (Ενεργητικά μέτρα αντιστηρίξης)



Εικόνα 9 Αντιστήριξη βραχώμαζας στο δρόμο που οδηγεί στον Άγιο Νικήτα, Λευκάδας. (Παθητικά μέτρα αντιστηρίξης, (<http://aromalefkadas.gr> )

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΣΑΡΩΤΗ

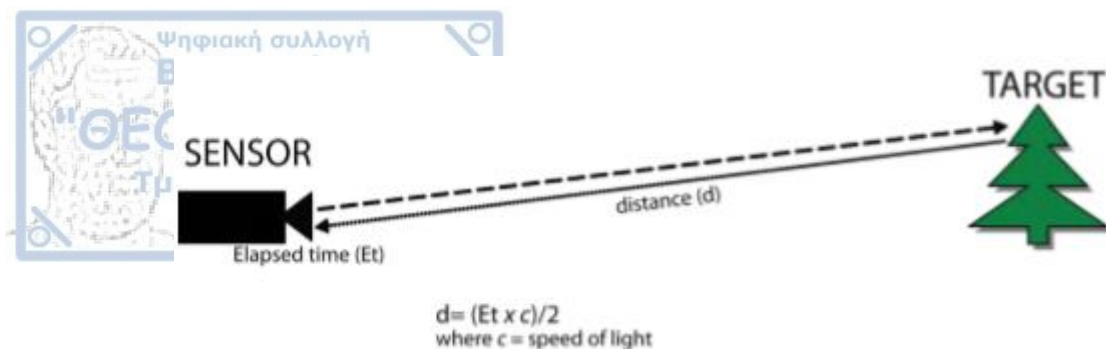
### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται οι βασικές έννοιες στις οποίες στηρίζεται η λειτουργία του σαρωτή LiDAR. Συγκεκριμένα, το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στην φιλοσοφία σύμφωνα με την οποία λειτουργεί το LiDAR καθώς και γενικότερα οι σαρωτές laser. Στην συνέχεια αναφέρονται τα είδη των σαρωτών που υπάρχουν στην βιομηχανία καθώς και οι συνθήκες τις οποίες εξυπηρετεί ο καθένας καλύτερα. Τέλος, γίνεται μια λεπτομερής αναφορά στα δεδομένα που παράγονται από το LiDAR καθώς και ο τρόπος επεξεργασίας τους.

Οι σαρωτές LiDAR χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή μεγάλης ακρίβειας τοπογραφικών, γεωμορφολογικών, γεωλογικών καθώς και δομικών (ασυνέχειες) δεδομένων. Οι κύριες εφαρμογές τους, στην επιστήμη της γεωλογίας, είναι για τον χαρακτηρισμό της βραχώμαζας, την αξιολόγηση της επικινδυνότητας καθώς και της επιδεκτικότητας του πρανούς με στόχο την μοντελοποίηση αυτών των συμπερασμάτων. Η υψηλή χωρική (τάξης 15-50m) και χρονικής (τάξης 1-15 min) ακρίβεια των δεδομένων ανέδειξαν την τεχνική της μοντελοποίησης με την χρήση του σαρωτή LiDAR ως πρωτοποριακή (Weitcamp, 2005).

### 3.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Το LiDAR (Light Detection and Ranging) (Εικόνα 10) βασίζεται στην τεχνολογία της οπτικής τηλεπισκόπησης. Η απόσταση από τον στόχο υπολογίζεται σύμφωνα με το χρονικό διάστημα μεταξύ της εκπομπής του σήματος από το laser μέχρι την επιστροφή του σήματος (επιστρεφόμενος παλμός). Η ακριβής θέση του στόχου υπολογίζεται από την γνωστή γεωμετρία του αισθητήρα και την απόσταση του στόχου όπως αυτή έχει προσδιοριστεί. (Lato, 2011). Τα χωρικά δεδομένα που συλλέγονται από το LiDAR κυμαίνονται μεταξύ 2.500 έως 1.000.000 σημεία ανά δευτερόλεπτο και η απόσταση του εξοπλισμού τυπικά είναι 70m - 1.500m ανάλογα με τον τύπο του LiDAR. (Lato, 2011)



Εικόνα 10 Απεικόνιση της διαδρομής του σήματος από το LiDAR στον στόχο καθώς και του επιστρεφόμενου παλμού (Lato, 2011 )

Ο προσδιορισμός των οπτικών ιδιοτήτων βασίζεται στην επίλυση δυο εξισώσεων, οι οποίες δεν θα αναλυθούν λεπτομερώς διότι δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας:

Η εξίσωση 2.1 αναφέρεται στο επιστρεφόμενο σήμα εξαιτίας της ελαστικής οπισθοσκέδασης (Fernald et al., 1972) ενώ η εξίσωση 2.2 περιγράφει το επιστρεφόμενο σήμα εξαιτίας της ανελαστικής σκέδασης (Ansmann et al., 1992).

$$P(\lambda_1, z) = c_o o(z, \lambda_o) \frac{\beta_{par}(\lambda_1, z) + \beta_{mol}(\lambda_1, z)}{z^2} * \exp\{-2 \int_0^z [a_{par}(\lambda_1, \zeta) + \alpha_{mol}(\lambda_1, \zeta) d\zeta]\} \quad (2.1)$$

$$P(\lambda_R, z) = \frac{c_o}{z^2} O(z, \lambda_R) N_R(z) \frac{d\sigma_R(\pi)}{d\Omega} \exp\{- \int_0^z [a_{par}(\lambda_1, \zeta) + \alpha_{mol}(\lambda_1, \zeta) + \alpha_{par}(\lambda_R, z) + \alpha_{mol}(\lambda_R, z) d\zeta]\} \quad (2.2)$$

### 3.3 ΕΙΔΗ ΣΑΡΩΤΩΝ

Οι δύο κυριότεροι τύποι σαρωτών laser που χρησιμοποιούνται στην εφαρμοσμένη γεωλογία είναι επίγειοι (Terrestrial Laser Scanner) και ιπτάμενοι (Airbone Laser Scanner). Οι επίγειοι σαρωτές είναι στατικοί ή κινητοί ενώ οι ιπτάμενοι μόνο κινητού τύπου. Οι σαρωτές διαφέρουν σε χαρακτηριστικά όπως η απόσταση που είναι ικανοί να λαμβάνουν τον επιστρεφόμενο παλμό, τον βαθμό συλλογής δεδομένων καθώς και την ευαισθησία της ανάλυσης. Τα παραπάνω είναι χαρακτηριστικά που δεν αφορούν την δομή της παρούσας εργασίας επομένως δεν θα αναλυθούν λεπτομερώς. Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά οι διαφορές μεταξύ των στατικών και κινητών σαρωτών.

### 3.3.1 Στατικού τύπου σαρωτές

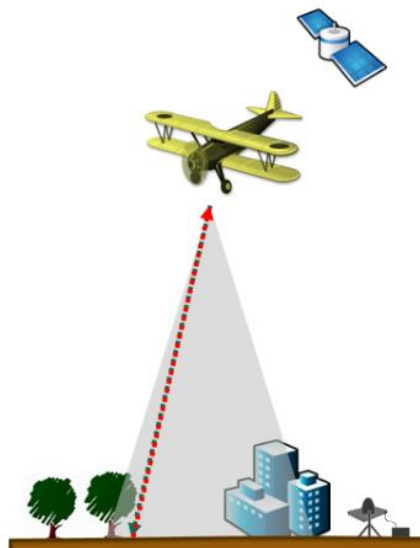
Οι στατικού τύπου σαρωτές LiDAR (Εικόνα 11) που χρησιμοποιούνται στην εφαρμοσμένη γεωλογία για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών της βραχώμαζας είναι συνήθως τοποθετημένοι σε τρίποδα και παραμένουν σε συγκεκριμένη θέση καθ' όλη την διάρκεια της σάρωσης. Η μέθοδος αυτή της σάρωσης επιτρέπει την ανάπτυξη δεδομένων υψηλής ακρίβειας για την δομή της βραχώμαζας. Στη συνέχεια, μετά το πέρας της σάρωσης ο εξοπλισμός μπορεί να μετακινηθεί και να τοποθετηθεί σε διαφορετική θέση με σκοπό την δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων (Lato et al. 2011).



Εικόνα 11 Επίγειος στατικός σαρωτής LiDAR (Ortech) που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία

### 3.3.2 Κινητού τύπου σαρωτές

Οι κινητού τύπου επίγειοι σαρωτές (Εικόνα 12) αποτελούνται από ένα όχημα, ένα δίκτυο αισθητήρων LiDAR, ένα δίκτυο GPS και ένα σύστημα πλοήγησης INS. Το δίκτυο GPS που χρησιμοποιείται αποτελείται από έναν δέκτη που βρίσκεται στον σαρωτή έναν άλλο στατικό δέκτη ο οποίος βρίσκεται περίπου στο κέντρο της περιοχής σάρωσης καθώς και δυο στατικούς δέκτες σε διαφορετικά σημεία αναφοράς. Ο σαρωτής έχει γεωαναφερθεί σε κάποιο τοπικό σύστημα συντεταγμένων και με αυτό τον τρόπο το σύστημα πλοήγησης INS μπορεί να συσχετίζει την θέση των μετρήσεων καθώς το όχημα βρίσκεται εν κινήσει (Lato et al., 2011).



Εικόνα 12 Απεικόνιση των συστημάτων που συμμετέχουν στους κινητού τύπου σαρωτές (<http://desktop.arcgis.com>)

### 3.4 ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Τα δεδομένα του LiDAR, είτε συλλέχθηκαν από κινητού τύπου σαρωτή είτε από στατικού τύπου σαρωτή, είναι συμβατά με το περιβάλλον των λογισμικών CAD και GIS. Ο όγκος των δεδομένων είναι της τάξης των Gigabyte και σε συνδυασμό με την πολυπλοκότητα του point cloud απαιτούν αυστηρή διαχείριση με τα εξειδικευμένα εργαλεία επεξεργασίας.

Τα δεδομένα του LiDAR εξάγονται μόνο σε ASCII μορφή αρχείων. Εξαιτίας του μεγάλου όγκου δεδομένων υιοθετήθηκε ένα δυαδικό σύστημα για τη διαχείριση των πληροφοριών που εξάγονται από το LiDAR, το LAS, το οποίο είναι η πιο αποδεκτή μορφή αρχείων καθώς περιέχει περισσότερες πληροφορίες οι οποίες διαβάζονται αποτελεσματικότερα.

Κάθε αρχείο LAS περιέχει τα δεδομένα της σάρωσης, με ένα αρχικό σημείο το οποίο ακολουθείται από τις μεμονωμένες εγγραφές. Το αρχικό σημείο περιλαμβάνει χαρακτηριστικές πληροφορίες όπως, την ημερομηνία και την ώρα της σάρωσης και τον αριθμό των σημείων εγγραφής (points records). Για κάθε αρχείο LAS διατηρούνται τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: x,y,z πληροφορίες θέσης, γωνία σάρωσης, κατεύθυνση της κλίμακας, τιμές της χρωματικής κλίμακας RGB και πληροφορίες για την ένταση της κυματομορφής (<http://desktop.arcgis.com>)



Τα δεδομένα που εξάγονται από το LiDAR είναι κυρίως :

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

### **3.4.1 Δεδομένα XYZ**

Ο συγκεκριμένος τύπος αρχείων αποτελεί σημειακή πληροφορία και είναι η πιο απλή μορφή δεδομένων που μπορούν να εξαχθούν από το LiDAR. Ο τύπος αυτός των δεδομένων δεν ευνοεί την εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν την δομή της βραχώμαζας και αποτελεί τον λιγότερο απαιτητικό τύπο όσον αφορά στις διαδικασίες υπολογισμού παραμέτρων και αποθήκευσης. (Lato, Diederichs, & Hutchinson, 2010)

### **3.4.2 Δεδομένα XYZI**

Ο τύπος αυτών των δεδομένων αφορά την ισχύ του φωτός που εκπέμπεται από τον αισθητήρα LiDAR. Όταν μια δέσμη από το LiDAR ανακλάται πίσω στον αισθητήρα ο αριθμός επιστρεφόμενου φωτός, που υπολογίζεται ως ποσοστό εκπεμπόμενου φωτός, ορίζεται ως ένταση. Οι τιμές της έντασης σχετίζονται άμεσα με την ανακλαστικότητα του φυσικού αντικειμένου σάρωσης. Τα υψηλά ανακλαστικά χρώματα επιστρέφουν σήματα υψηλής έντασης, ενώ τα σκούρα χρώματα επιστρέφουν χαμηλής έντασης σήματα (Lato et al., 2010)

### **3.4.3 Δεδομένα XYZRGB**

Πολλοί σαρωτές LiDAR διαθέτουν εσωτερικές ή εξωτερικές ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, με την οποία είναι δυνατή η παραγωγή ψευδό-χρωματισμένων νεφών της κλίμακας RGB( Red, Green, Blue). Εάν η κάμερα είναι εσωτερική τότε είναι αυτόματα ευθυγραμμισμένη με το σύστημα του LiDAR ενώ εάν είναι εξωτερική οι πληροφορίες από την φωτογραφία είναι αναγκαίο να συσχετίζονται με το νέφος των σημείων. (Lato et al., 2010)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

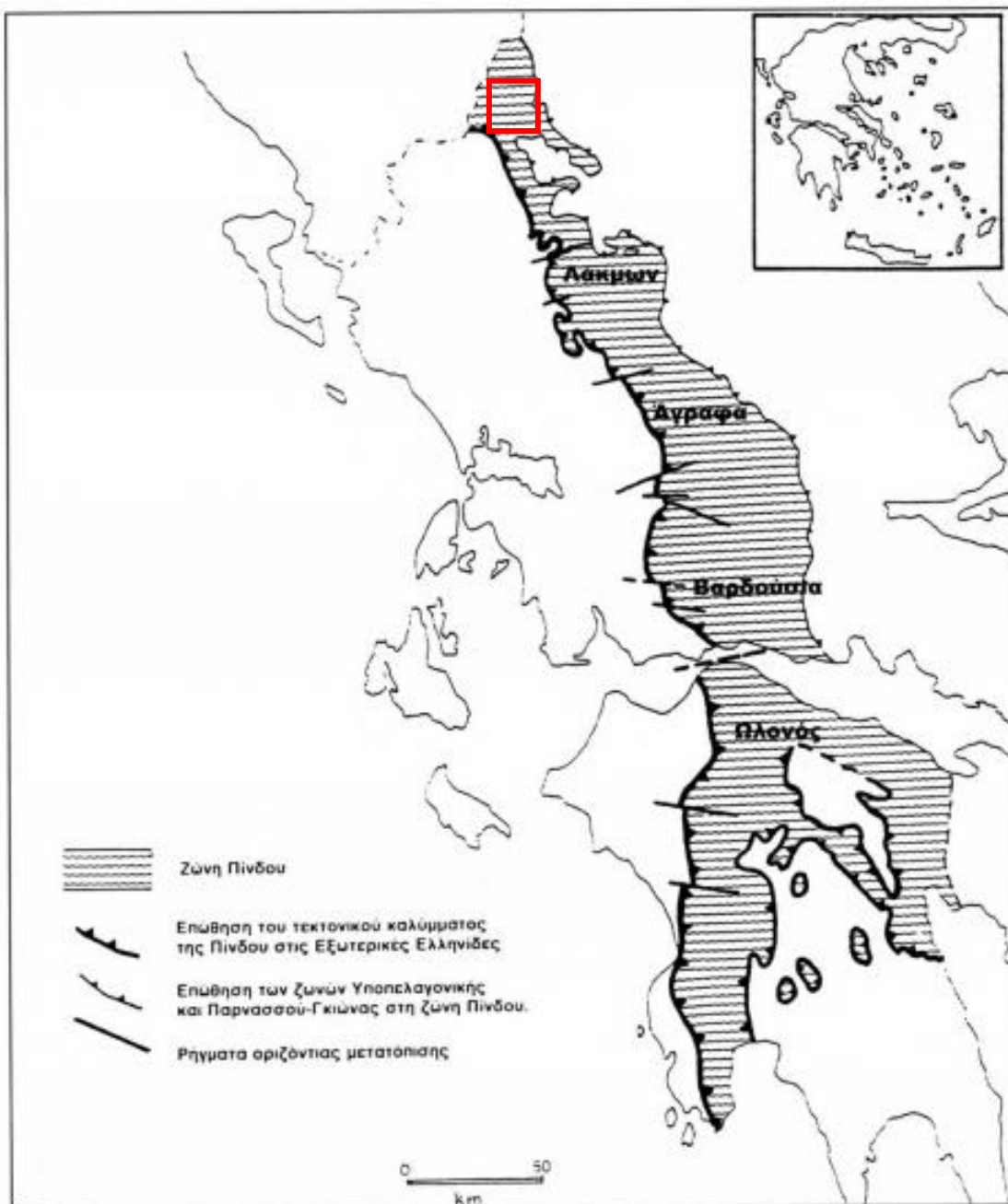
Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται οι γεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής καθώς και της περιοχής μελέτης. Επιπρόσθετα, αναφέρονται στοιχεία για την γεωτεκτονική εξέλιξη της περιοχής, το υδρογεωλογικό καθεστώς καθώς και η σεισμικότητα της περιοχής. Η περιοχή μελέτης ανήκει στην γεωτεκτονική ζώνη της Πίνδου, στα όρια της με την Μεσοελληνική αύλακα.

### 4.3 ΖΩΝΗ ΩΛΟΝΟΥ-ΠΙΝΔΟΥ

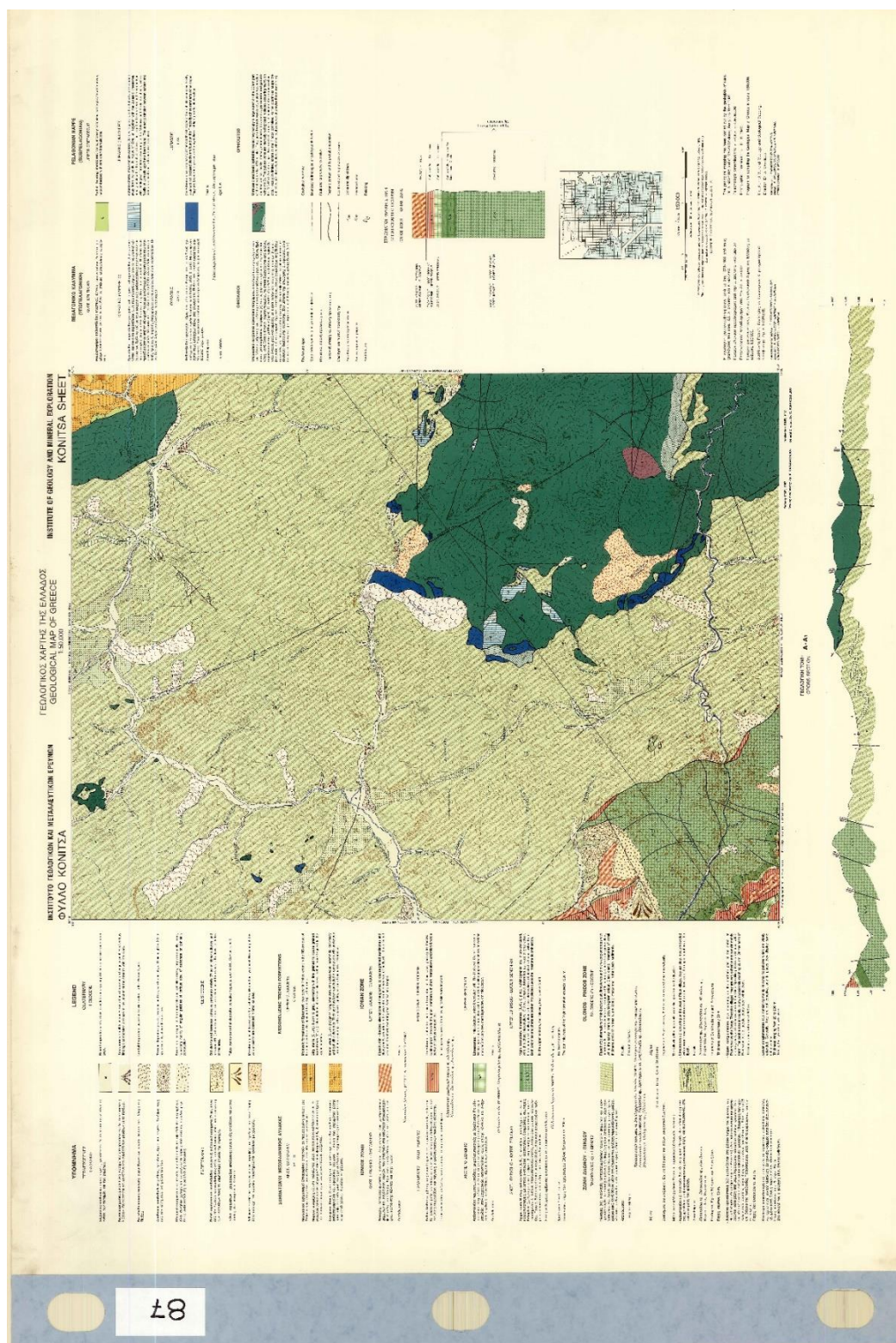
Η γεωτεκτονική ζώνη της Ωλονού-Πίνδου (Εικόνα 13), ανήκει στις εξωτερικές Ελληνίδες, σχηματίστηκε στον ελλαδικό χώρο κατά την διάρκεια του Μεσοζωικού και τοποθετείται από τα Ελληνοαλβανικά σύνορα προς τον κορμό της ηπειρωτικής Ελλάδας, στην οροσειρά της Πίνδου. Εμφανίσεις της ζώνης υπάρχουν και στα νησιά Κρήτη και Ρόδο (Μουντράκης, 2010). Η ζώνη Ωλονού –Πίνδου θεωρείται η πιο βαθιά αύλακα μεταξύ της Πελαγονικής και της ζώνης Παρνασσού –Γκιώνας ανατολικά και της ζώνης Γαβρόβου-Τρίπολης από δυτικά (Brunn, 1956).

Οι πρώτοι ιζηματογενείς σχηματισμοί που επικρατούν στην ζώνη της Πίνδου είναι ασβεστόλιθοι, ψαμμίτες, πυριτιόλιθοι, οι οποίοι αποτελούν την κλαστική ιζηματογένεση του Μέσου Τριαδικού. Ο παλαιότερος σχηματισμός είναι οι μέσο τριαδικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες με εναλλαγές κερατολίθου. Κατά την διάρκεια του Ιουρασικού έλαβε χώρα μια συνεχής ιζηματογένεση, ιζημάτων βαθιάς θάλασσας, η σχιστοκερατολιθική διάπλαση, όπου αποτελείται από κερατόλιθους αργίλους, ψαμμίτες, καθώς και πελαγικούς ασβεστόλιθους. Η σχιστοκερατολιθική διάπλαση εξελίσσεται στα ανώτερα στρώματα σε μια σειρά ρυθμικών εναλλαγών, όπως πελίτες, μάργες, ψαμμίτες και αποτελεί τον πρώτο φλύσχη της Πίνδου. Κατά την διάρκεια του Κάτω Κρητιδικού η ιζηματογένεση γίνεται περισσότερο ασβεστομαργαϊκή μεταβατική προς τον φλύσχη, γνωστός ως ο δεύτερος φλύσχη της Πίνδου (Μουντράκης, 2010). Στην εικόνα 11 παρουσιάζεται η θέση της περιοχής μελέτη στον χώρο επέκτασης του τεκτονικού καλύμματος της Πίνδου στην

ηπειρωτική Ελλάδα, ενώ αναφέρονται και τα κύρια βουνά της οροσειράς της Πίνδου  
(Εικόνα 14).



Εικόνα 13 Χάρτης που δείχνει το χώρο επέκτασης του τεκτονικού καλύμματος της Πίνδου στην ηπειρωτική Ελλάδα, ενώ αναφέρονται και τα κύρια βουνά της οροσειράς της Πίνδου (Μουντράκης 2010)



Εικόνα 14 Γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης ( ΠΜΕ, Φύλλο Κόνιτσα)

#### 4.3.1 Λιθοστρωματογραφική εξέλιξη

Η ζώνη της Πίνδου αποτελείται από ανθρακικά και πυριτικά ιζήματα βαθιάς θάλασσας Μεσοζωικής ηλικίας και το πάχος τους ανέρχεται στα 1050 m. Ο πινδικός φλύσχος αναπτύσσεται επί της μεσοζωικής ακολουθίας με ηλικία Παλαιόκαινο έως και Ολιγοκαίνο. Στην συνέχεια διακρίνονται οι σχηματισμοί της ζώνης από τους κατώτερους προς τους ανώτερους (Κουκουβελας, 2014). Στην εικόνα 15 παρουσιάζεται μια ενδεικτική στρωματογραφική στήλη των σχηματισμών της ζώνης.

##### Σχηματισμός κλαστικού Τριαδικού

Ο σχηματισμός αυτός αποτελεί την παλαιότερη ακολουθία ιζημάτων στην ζώνη και αποτελείται από λεπτό-μεσοκοκκώδης ψαμμίτες με πηλινικές και αργιλικές παρεμβολές καθώς παρουσιάζει ενδεικτικές τουρβιδιτικές αποθέσεις. Η ηλικία του σχηματισμού υπολογίζεται ως Μέσο Τριαδική και το μέγιστο ορατό πάχος των πετρωμάτων ανέρχεται στα 100m.

##### Σχηματισμός Ασβεστολίθων Δρύμου

Ο σχηματισμός αυτός αποτελείται κυρίως από τουρβιδιτικούς και ημιπελαγικούς ασβεστόλιθους με κερατολιθικές και πηλινικές παρεμβολές. Η ηλικία του σχηματισμού υπολογίζεται Ανώτερο Τριαδικό- Κατώτερο Ιουρασικό εξαιτίας της παρουσίας πελαγικών διθύρων και κωνοδόντων . Ο σχηματισμός έχει μέγιστο πάχος 300m.

##### Σχηματισμός Ραδιολαριτών

Στην Μεσοζωική ακολουθία της ζώνης ο πιο χαρακτηριστικός ορίζοντας είναι αυτός των ραδιολαριτών. Την κατώτερη στρωματογραφικά θέση στον σχηματισμό την καταλαμβάνουν οι Πηλίτες Καστελίου όπου δομούνται απο ποικιλόχρωμους πηλινικούς ορίζοντες με κερατολιθικές παρεμβολές. Υπερκείμενα των Πηλιτών Καστελίου τοποθετούνται οι κερατόλιθοι όπου συνιστώνται από διάφορες κερατολιθικές φάσεις ερυθρών και γκριζών υαλώδων, αργιλικών και μαγγανιούχων κερατολίθων που συνοδεύονται από ασβεστολιθικές και πυριτιούχες φάσεις. Τέλος, οι ασβεστόλιθοι με *Calpionella* αποτελούν τον ανώτερο στρωματογραφικό ορίζοντα του σχηματισμού. Η



ηλικία του προσδιορίζεται στο Μέσο Ιουρασικό- Κάτω Κρητιδικό και το συνολικό του πάχος ανέρχεται στα 350m.

#### Σχηματισμός Πρώτου Φλύσχη

Ο σχηματισμός αυτός δομείται από ψαμμιτικές και αργιλικές εναλλαγές με παρεμβολές μαργαικών, ωολιθικών, ασβεστόλιθων και κερατολίθων. Ο σχηματισμός χρονολογείται στο Κάτω Κρητιδικό με πάχος να μην ξεπερνάει τα 100m.

#### Σχηματισμός Λεπτοπλακώδων Ασβεστολίθων

Ο σχηματισμός αυτός αποτελείται από ασβεστόλιθους πελαγικής φάσης με κονδύλους και ενδιαστρώσεις. Η ηλικία του τοποθετείται στο Άνω Κρητιδικό εξαιτίας της πλούσιας μικροπανίδας που εντοπίστηκε σε αυτόν. Το πάχος του σχηματισμού ανέρχεται περίπου στα 400m.

#### Σχηματισμός μεταβατικών στρωμάτων

Αυτός ο σχηματισμός δομείται από εναλλαγές μαργαικών ασβεστόλιθων, μικρολατυποπαγών ασβεστόλιθων μαργών και ψαμμιτών με παρεμβολές κερατολίθων πλούσιων σε οργανικά υλικά. Ο σχηματισμός χρονολογείται μεταξύ του Άνω Κρητιδικού- Παλαιόκαινου με πάχος να ξεπερνά τα 100m.

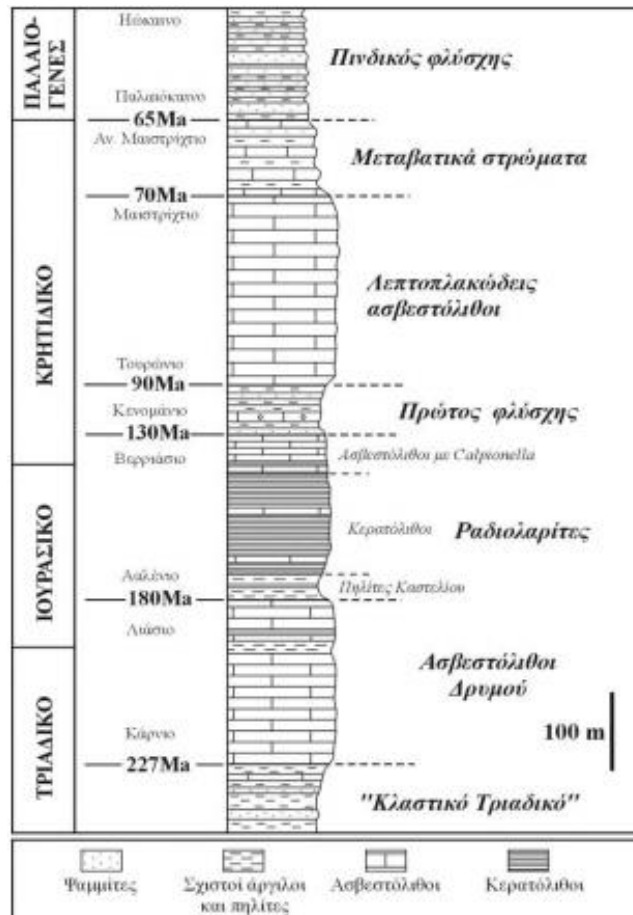
#### Σχηματισμός Πινδικού Φλύσχη

Ο σχηματισμός αυτός αποτελεί τον πιο τυπικό και αντιπροσωπευτικό φλύσχη του Ελληνικού χώρου. Αποτελείται από εναλλαγές ψαμμιτών και μαργών που περιέχουν ενστρώσεις και ορίζοντες κροκαλοπαγών και διαχωρίζεται σε τρεις ορίζοντες. Στα δυτικά της ζώνης εμφανίζεται ο κατώτερος στρωματογραφικά ορίζοντας με παχυστρωματώδεις ορίζοντες ψαμμιτών με εναλλαγές λεπτοστρωματώδων αργίλων και πηλιτών. Ο υπερκείμενος αυτού του ορίζοντα αποτελείται από λεπτοστρωματώδεις μαύρους αργίλους και με πηλίτες με ενδιαστρώσεις ψαμμιτών. Ο ορίζοντας αυτός εμφανίζεται κυρίως στα κεντρικά της ζώνης. Ο ανώτερος ορίζοντας αποτελείται από εναλλαγή λεπτοστρωματώδων αργίλων, πηλιτών και ψαμμιτών με εμφανίσεις κυρίως στα ανατολικά

της ζώνης. Ο φλύσχος έχει ηλικία Κρητιδικό – Ολιγόκαινο . Το πάχος κυμαίνεται από λίγες δεκάδες μέτρα δυτικά έως 3-4 km ανατολικά.

Τα πολύμεικτα κροκαλοπαγή του Πινδικού φλύσχη εμφανίζονται καλά συγκολλημένα και αποτελούνται κυρίως από οφειολιθικά και ανθρακικά ιζήματα του αλπικού υποβάθρου. Τα κροκαλοπαγή αυτά παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον στην παρούσα εργασία καθώς η κατολίσθηση έλαβε χώρα σε αυτά.

Στην διάρκεια του Ιουρασικού η απόθεση των ιζημάτων βαθιάς θάλασσας ήταν συνεχής δηλαδή των ραδιολαριτών κερατόλιθων, αργίλων, ψαμμιτών και πελαγικών ασβεστόλιθων. Τα ιζήματα αυτά συνιστούν την σχιστοκερατολιθική διάπλαση με τα εντυπωσιακά κοκκινοπράσινα χρώματα (Μουντράκης ,2010).



Εικόνα 15 Στρωματογραφική στήλη όπου απεικονίζεται οι σχηματισμοί της γεωτεκτονικής ζώνης Ωλονού- Πίνδου (Κουκουβέλας, 2014)

#### 4.3.1.1 Η προορογενετική Μεσοζωική ακολουθία

Η προορογενετική ακολουθία συνήθως παρουσιάζει την παρακάτω διάθρωση:

Το κλαστικό Τριαδικό είναι η παλαιότερη ακολουθία ιζημάτων της προορογενετικής ακολουθίας το οποίο αποτελείται από λεπτούς έως μεσοκοκκώδεις ψαμμίτες με πηλτικές και αργίλικές εναλλαγές. Επιπρόσθετα, παρατηρούνται παρεμβολές ασβεστόλιθων και κροκαλοπαγών (Degnan & Robertson, 1998). Η ηλικία των ιζημάτων προσδιορίστηκε ως Μέσο-Άνω Τριαδική ενώ το περιβάλλον απόθεσης είναι βαθιάς θάλασσας με μέγιστο ορατό πάχος 100m (Flament 1973). Η απόθεση των ιζημάτων της συγκεκριμένης ακολουθίας σχετίζεται με την εκλέπτυνση του ηπειρωτικού φλοιού της Απούλιας πλάκας (Robertson, 1991).

Το ανώτερο στρωματογραφικά στρώμα από το κλαστικό Τριαδικό είναι ο σχηματισμός του Δρυμού στον οποίο επικρατούν οι ασβεστόλιθοι βαθιάς θάλασσας με ενστρώσεις κερατόλιθων και πράσινων πηλινών. Η ηλικία του σχηματισμού είναι Άνω Τριαδική-Κάτω-Μέσο Ιουρασική και το μέγιστο πάχος του σχηματισμού είναι περίπου 300m (Flament 1973).

Ο σχηματισμός του πρώτου φλύσχη αποτελείται από εναλλαγές ψαμμιτών τουρβιδιτικής προελεύσεως και αργίλων με παρεμβολές μαργαϊκών, ωολιθικών ασβεστόλιθων και κερατόλιθων (Degnan & Robertson, 1998). Η ηλικία του είναι Κάτω Κρητιδική και τα ιζήματα που δομούν τον σχηματισμό είναι προϊόντα διάβρωσης των πετρωμάτων των Εσωτερικών Ελληνίδων με μέγιστο ορατό πάχος 100m (Μουντρακης, 2010).

Κατά την διάρκεια του Κρητιδικού αποτέθηκε ο σχηματισμός των λεπτοπλακώδων ασβεστόλιθων πελαγικής φάσης με κονδύλους και διαστρώσεις πυριτόλιθων. Το μέγιστο πάχος του σχηματισμού είναι 300m και η απόθεση του έλαβε χώρα μέσα σε ένα τμήμα του ωκεανού της Πίνδου, το οποίο παραμένει ανοιχτό έως το τέλος της Παλαιο-Ελληνικής ορογενετικής φάσης (Roberson et al., 1991).

Τέλος, κατά το Άνω Κρητιδικό έως το Παλαιόκαινο έλαβε χώρα η απόθεση του σχηματισμού των μεταβατικών προς το φλύσχη στρωμάτων. Η απόθεση του χαρακτηρίζεται ως το όριο της προ-ορογενετικής φάσης με την συνορογενετική φάση. Αποτελείται από εναλλασσόμενα στρώματα λεπτοπλακώδων ασβεστόλιθων , μαργών μαργαϊκών ασβεστόλιθων αργίλων και ψαμμιτών (Fleury 1980).

#### **4.3.1.2 Συνορογενετική κλαστική ακολουθία**

Η συνορογενετική κλαστική ακολουθία αποτελεί μια τυπική κλαστική ακολουθία τουρβιδιτών με εναλλαγές ψαμμιτών, αργίλων και πηλιτών, η οποία είναι ο δεύτερος φλύσχη της Πίνδου, ο πιο τυπικός και αντιπροσωπευτικός του Ελλαδικού χώρου. Η τουρβιδιτική ακολουθία διαχωρίζεται σε τρεις ενότητες. Η κατώτερη ενότητα αποτελείται από παχυ-στρωματώδεις ψαμμίτες και γραουβάκες οι οποίοι εναλλάσσονται με λεπτοστρωματώδεις αργίλους και πηλίτες και εμφανίζεται στα δυτικά τμήματα της ζώνης. Μέσα σε αυτή την ενότητα παρατηρούνται μεγάλων διαστάσεων ολισθαίνουσες μάζες Μεσοζωικών ασβεστόλιθων της ζώνης. Η μεσαία ζώνη της ακολουθίας του Πινδικού φλύσχη θεωρείται η επικρατούσα και εμφανίζεται στα κεντρικά τμήματα της λεκάνης του φλύσχη. Αποτελείται από λεπτοστρωματώδεις μαύρους αργίλους και πηλίτες με ενστρώσεις ψαμμιτών και τοπικά κροκαλοπαγών. Η ανώτερη ενότητα εμφανίζεται ανατολικά της λεκάνης του φλύσχη και αποτελείται από εναλλαγή λεπτοστρωματωδών αργίλων, πηλιτών και ψαμμιτών με σποραδικούς ορίζοντες κροκαλοπαγών (Fleury 1980, Μουντράκης 2010).

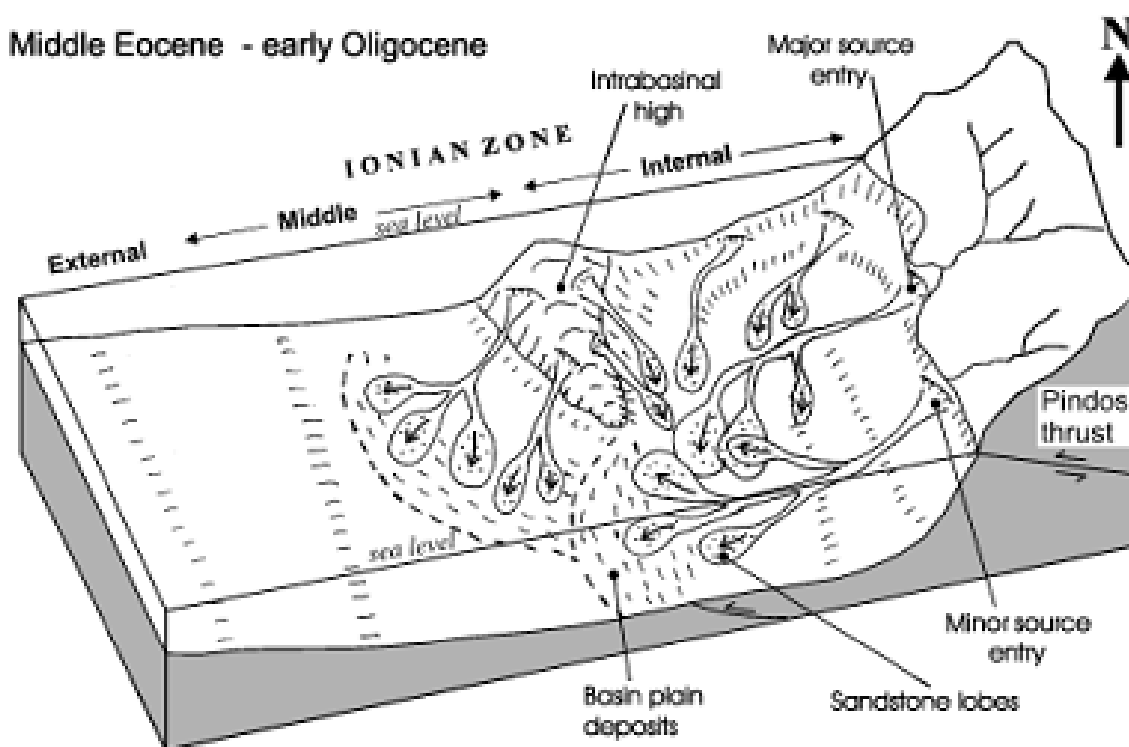
Η ηλικία και το πάχος του σχηματισμού δεν παραμένει σταθερό μέσα στην ζώνη της Πίνδου. Η απόθεση έλαβε χώρα στο όριο Κρητιδικού-Παλαιοκαίνου έως Ολιγοκαίνου γι αυτό η ακολουθία αυτή είναι γνωστή ως Τριτογενής φλύσχη και το πάχος τους εκτείνεται από λίγες δεκάδες μέτρα έως 6km (Degnan & Robertson 1998).

#### **4.3.2 Τεκτονική εξέλιξη**

Κατά την διάρκεια του Ανώτερου Ηωκαίνου- Κάτω Ολιγοκαίνου έλαβε χώρα η τελική ορογένεση και ανάδυση των στρωμάτων της ζώνης Ωλονού-Πίνδου με την σύγκρουση της Απούλιας πλάκας με την Ευρασία , η οποία οδήγησε στην δημιουργία μεγάλων επωθήσεων

και πτυχών (Εικόνα 16). Η ζώνη, σύμφωνα με τα παραπάνω, αποτελεί ένα τεκτονικό κάλυμμα που έχει επωθηθεί από τα ανατολικά προς δυτικά πάνω στην γεωτεκτονική ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης ενώ σε ορισμένες περιοχές η ζώνη της Πίνδου εμφανίζεται επωθημένη πάνω στη Αδριατικοϊόνιο ζώνη (Μουντράκης 2010)

Οι άξονες των πτυχών έχουν διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ και τα αξονικά τους επίπεδα έχουν διεύθυνση προς ΑΒΑ όμοια με τα επίπεδα των μεγάλων επωθήσεων. Η κίνηση της ζώνης της Πίνδου είναι από ανατολικά προς δυτικά επομένως οι διευθύνσεις των πτυχών είναι κάθετες προς αυτήν. Στο βόρειο τμήμα της γεωτεκτονικής ζώνης της Πίνδου οι άξονες των πτυχών και οι μεγάλες επωθήσεις έχουν διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ ενώ στα νοτιότερα τμήματα αυτή μεταβάλλεται σε σχεδόν Β-Ν. Επιπρόσθετα, κατά την διάρκεια της συμπίεστικής τεκτονικής δημιουργήθηκαν εγκάρσια ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης τα οποία διακόπτουν τα τεκτονικά λέπια.



Εικόνα 16 Μοντέλο απεικόνισης της ζώνης της Πίνδου επωθημένη στην Αδριατικοϊόνιο ζώνη. <http://old.ntua.gr/>

## **4.6 Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ**

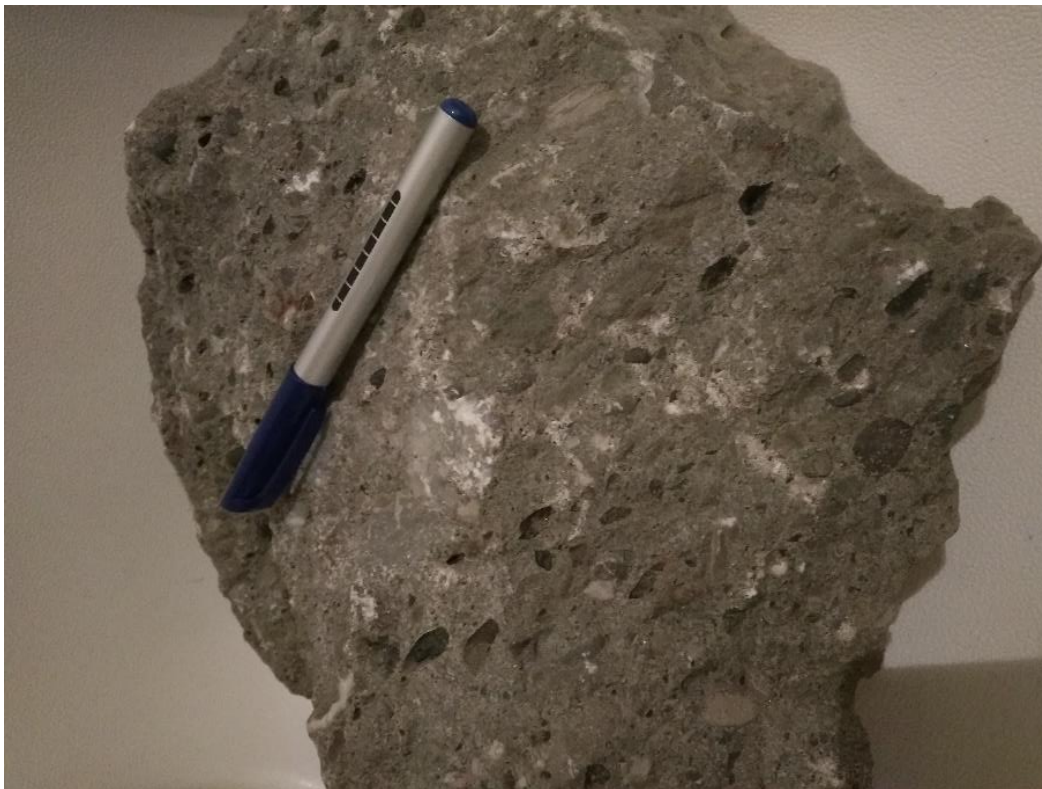
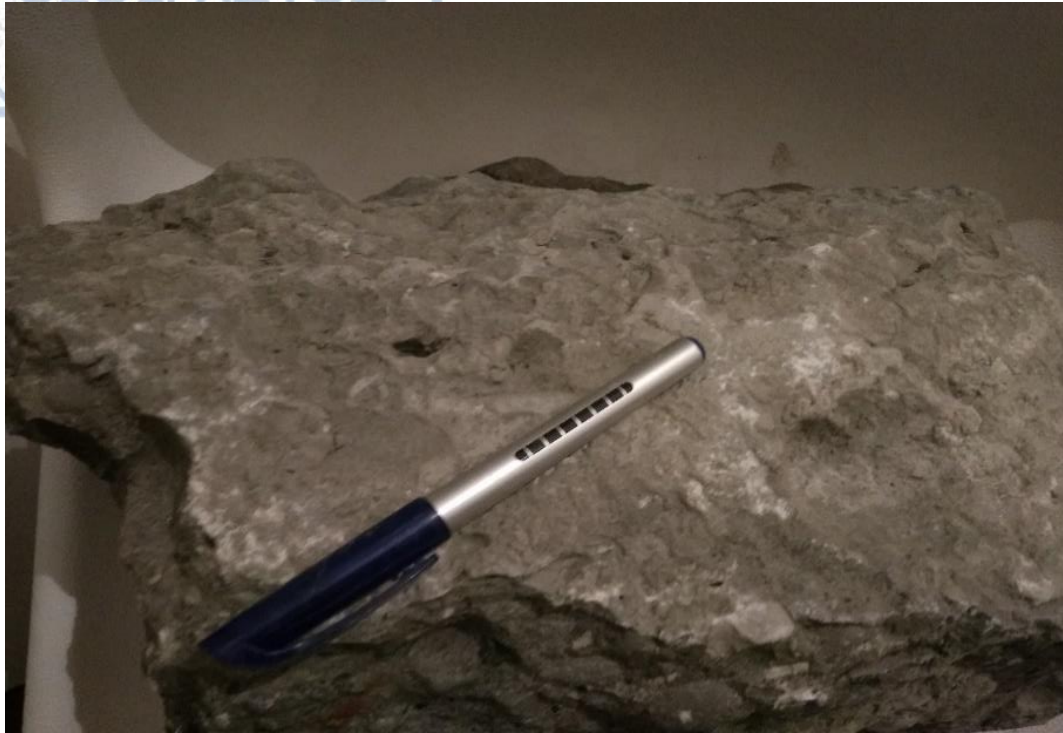
### **4.6.1 Εισαγωγή**

Η περιοχή βρίσκεται στον επαρχιακό άξονα Επαχωρίου-Κόνιτσας, ο οποίος ανήκει στην παλαιά εθνική οδό Κοζάνης- Ιωαννίνων που διασχίζει την Δυτική Μακεδονία και την Ήπειρο. Ο συγκεκριμένος οδικός άξονας ανήκει στο μεγαλύτερο μέρος στην Ευρωπαϊκής Οδού 853 και πριν την διάνοιξη της Εγνατίας οδού αποτελούσε την πιο γρήγορη σύνδεση των Ιωαννίνων με τη Βόρεια Ελλάδα. Η περιοχή ανήκει στα όρια της Ηπείρου με την Μακεδονία, βρίσκεται βορειοανατολικά του νομού Ιωαννίνων, απέχει 50km από την πόλη της Καστοριάς και 35 km από την Κόνιτσα. Βρίσκεται στο 98<sup>ο</sup> km της παλαιάς εθνικής οδού Κοζάνης- Ιωαννίνων. Η περιοχή μελέτης περικλείεται από τα βουνά του Γράμμου και του Σμόλικα και διαρρέεται από τον Σαραντάπορο ποταμό.

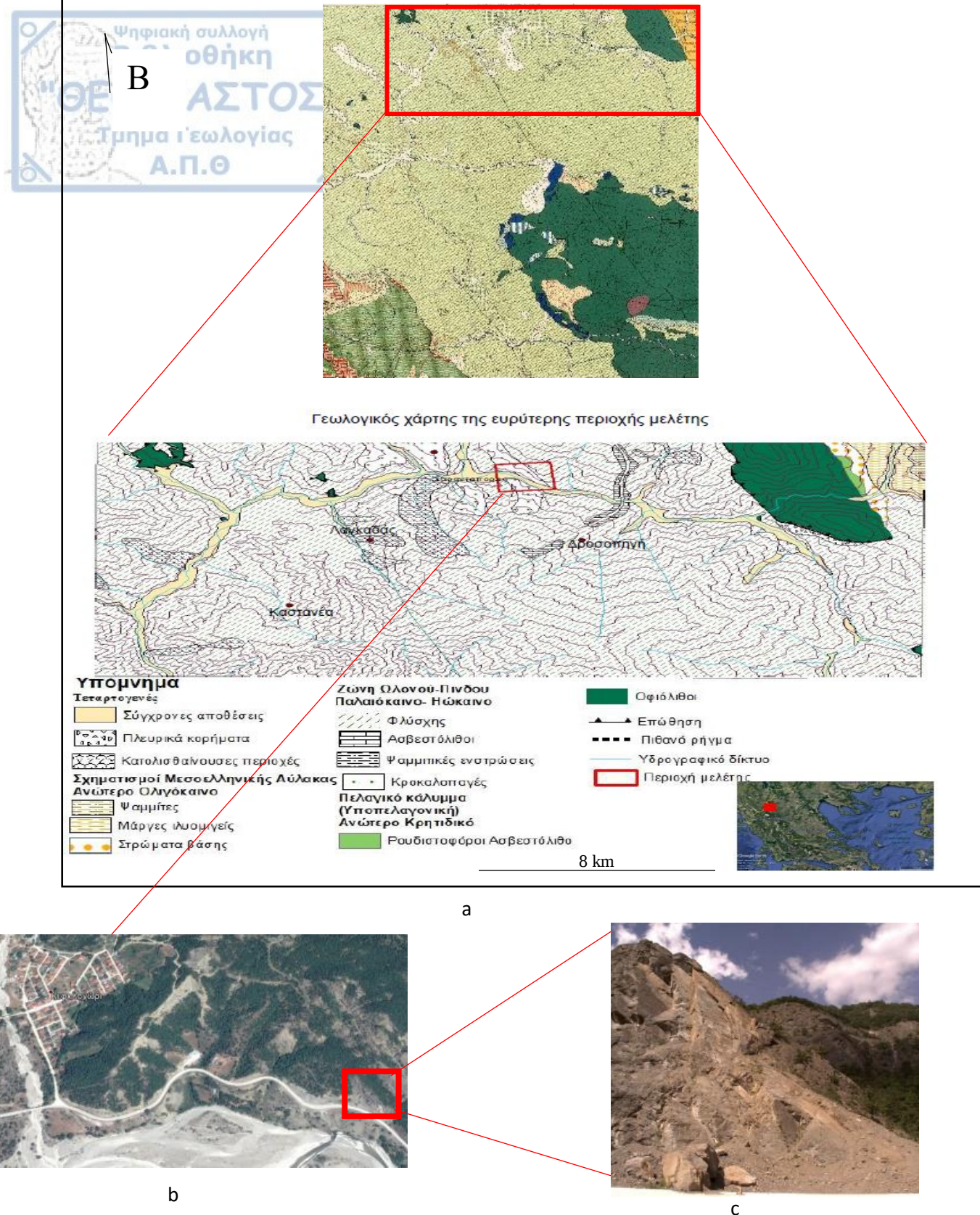
Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται οι γεωμορφολογικές, γεωλογικές, υδρογεωλογικές και κλιματικές συνθήκες οι οποίες επικρατούν στην περιοχή μελέτης . Η περιοχή γεωλογικά δομείται από πολύμεικτα κροκαλοπαγή του Πινδικού φλύσχη τα οποία εμφανίζονται καλά συγκολλημένα και αποτελούνται κυρίως από οφειολιθικά σώματα και από ανθρακικά ιζήματα του αλπικού υποβάθρου.

### **4.6.2 Λιθολογία**

Σύμφωνα με γεωλογικές παρατηρήσεις και την αναγνώριση του σχηματισμού στο πεδίο, τα κροκαλοπαγή εμφανίζονται να είναι πολύ συνεκτικά με ασβεστίτικο συνδετικό υλικό και αποτελούνται κατά βάση από ψαμμιμαργαϊκές, ασβεστολιθικές κροκάλες και σπάνια εμφάνιση οφειολιθικών κροκάλων σε αυτά. Τα κροκαλοπαγή εμφανίζονται ελαφρά αποσαθρωμένα κυρίως σε επιφάνειες ανοιχτές όπου επιδρούν έντονα οι ατμοσφαιρικοί παράγοντες (Εικόνα 17,18,19 & 20).



*Εικόνα 17 Πολύμεικτο κροκαλοπαγές καλά συγκολλημένο*



Εικόνα 18 (α) Γεωλογία της περιοχής μελέτης (πηγή : Φύλλο Κόνιτσας ΙΓΜΕ ) και αεροφωτογραφία της περιοχής μελέτης (πηγή : Google Earth ). (b)&(c) Το πρανές μέσου ύψους 25 m κροκαλοπαγούς σύστασης όπου πραγματοποιήθηκε η σάρωση με το LiDAR , UAV και οι μετρήσεις πεδίου



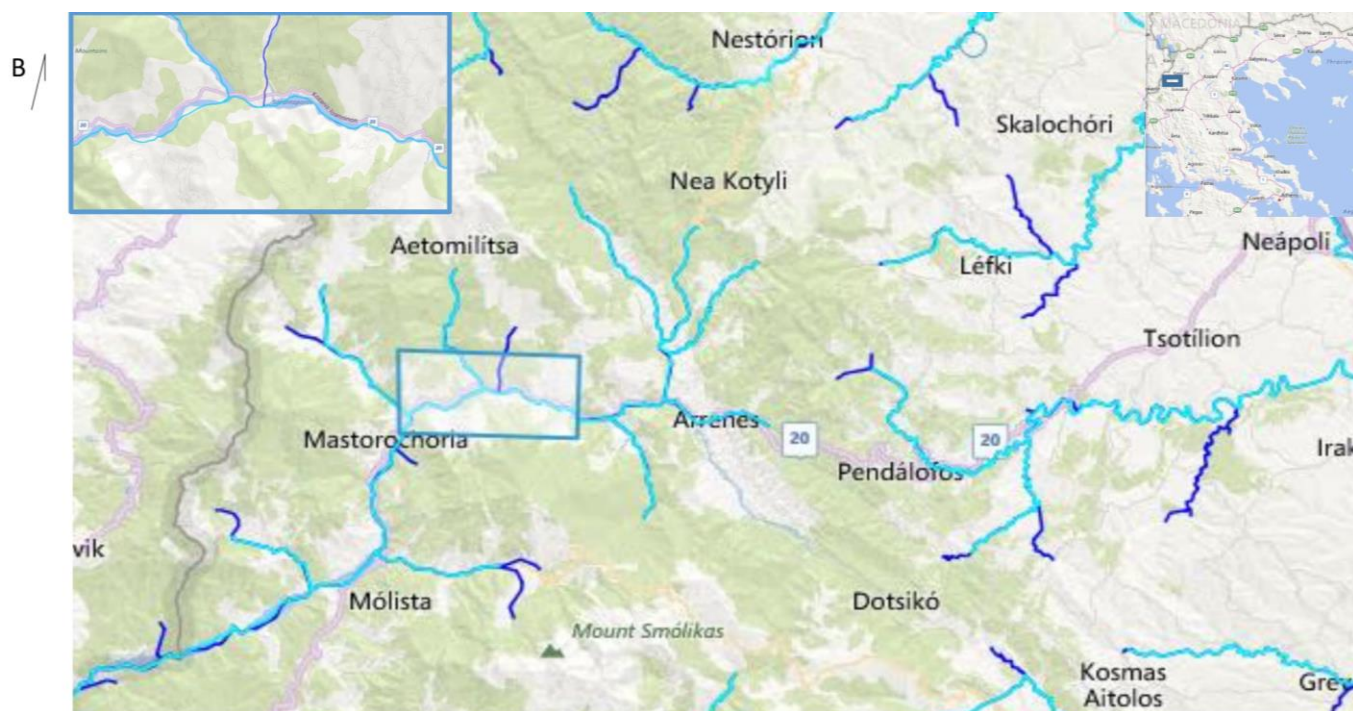
Εικόνα 19 Το πρανές κροκαλοπαγούς συστάσεως στην περιοχή μελέτης στην παλαιά εθνική οδό Κοζάνης-Ιωαννίνων



Εικόνα 20 Λήψη πεσμένων τεμαχίων παλαιάς κατολίσθησης στην περιοχή μελέτης μεγέθους (a)  $14.1 \text{ m}^3$  (b)  $8.82 \text{ m}^3$  (c)  $2.15 \text{ m}^3$

#### 4.6.3 Υδρογεωλογικές συνθήκες

Στην περιοχή μελέτης δεν είναι εφικτός ο προσδιορισμός των υδραυλικών παραμέτρων του σχηματισμού εξαιτίας έλλειψης υδρογεωτρήσεων. Το κροκαλοπαγές που συναντάται στην περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται μέτριας υδροπερατότητας εξαιτίας του ασβεστιτικού συνδετικού υλικού του (matrix).



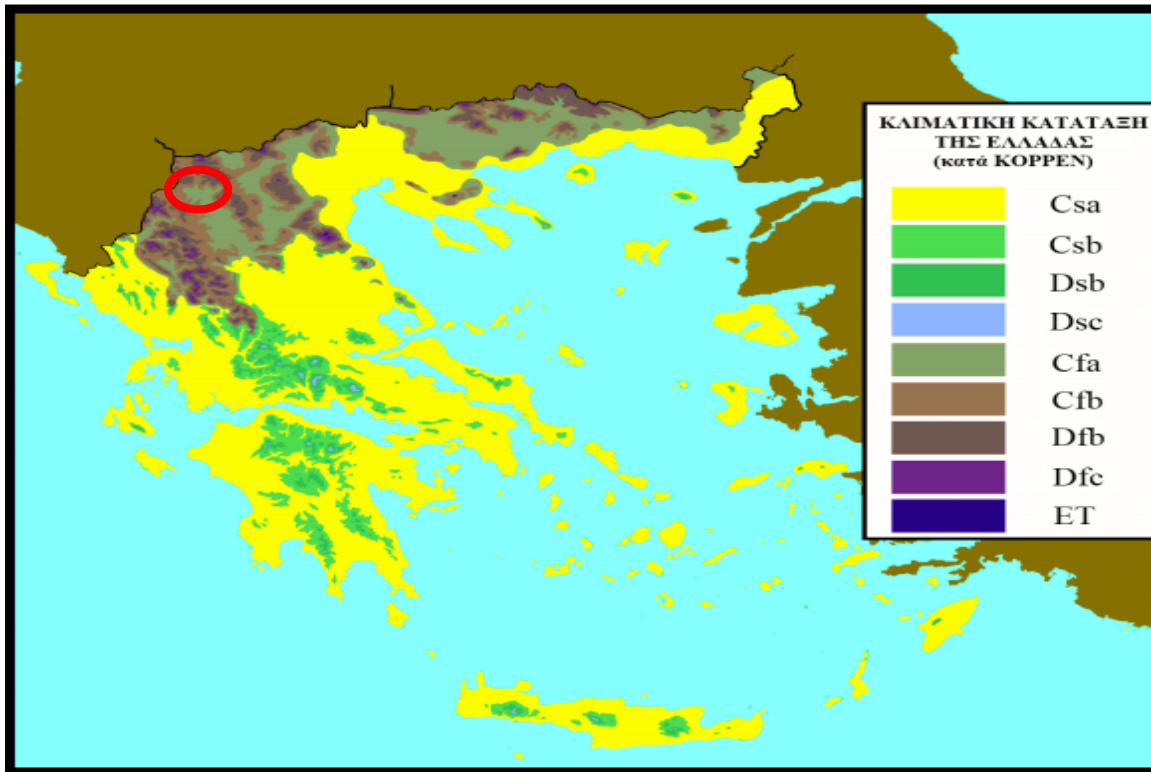
Εικόνα 21 Χάρτης της ευρύτερης περιοχής μελέτης με το υδρογραφικό δίκτυο και του κύριους ποταμούς

Η περιοχή διαρρέεται από τον ποταμό Σαραντάπορο (Epirus) ο οποίος ανήκει στην Μακεδονία και την Ήπειρο, στους νομούς Καστοριάς και Ιωαννίνων. Οι πηγές του Σαραντάπορου είναι στο όρος Μαύρη Πέτρα του Γράμμου σε υψόμετρο 2169m και εκβάλει στον ποταμό Αώο σε υψόμετρο 400. Ο Σαραντάπορος έχει μήκος 50km και η λεκάνη απορροής καλύπτει έκταση 870 km<sup>2</sup> με ετήσια παροχή (Q) 6,93 m<sup>3</sup>/sec (web.archive.org ) (Εικόνα 21).

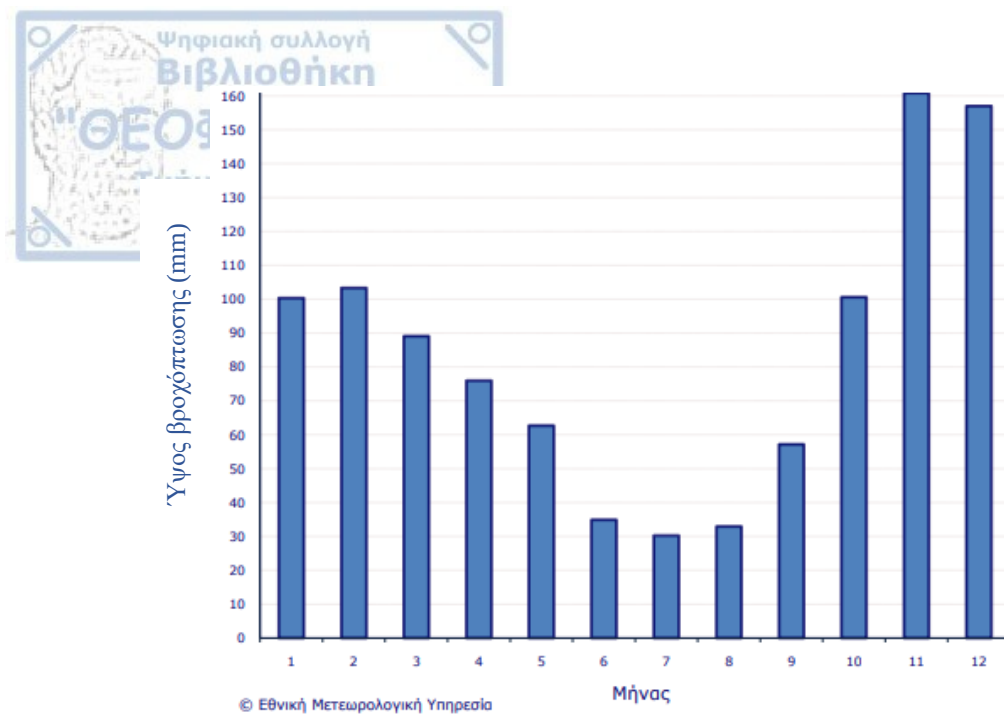
#### 4.6.5 Κλιματικά στοιχεία περιοχής

Το κλίμα που επικρατεί στην περιοχή μελέτης είναι ηπειρωτικό (Εικόνα 22). Το κλίμα αυτό χαρακτηρίζεται από τις υψηλές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας ,τον χειμώνα

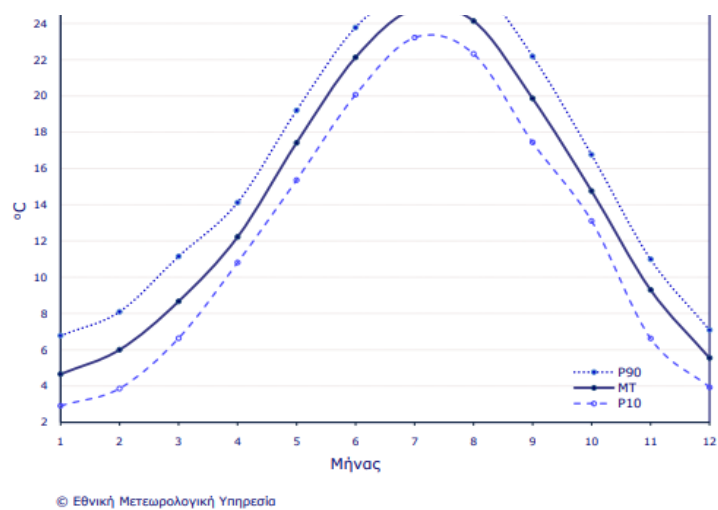
σημειώνονται αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες και χιονοπτώσεις (Μέση θερμοκρασία ψυχρότερου μήνα:  $<0^{\circ}\text{C}$  ) ενώ τα καλοκαίρια χαρακτηρίζονται από μέτριες ως υψηλές σχετικά θερμοκρασίες και βροχοπτώσεις ( <http://www.meteoclub.gr> ). Τα κλιματικά δεδομένα που παρουσιάζονται αντλήθηκαν από την Εθνική Μετεωρολογική υπηρεσία και αφορούν την περιοχή των Ιωαννίνων κατά την διάρκεια του 1971-2000 ,ως την πλησιέστερη περιοχή στην περιοχή μελέτης με κλιματικά δεδομένα (Εικόνα 23 & 24).



Εικόνα 22 Κλιματική κατάσταση κατά Koppen στην Ελλάδα. C=θαλάσσιο κλίμα, D=ηπειρωτικό κλίμα, (<http://www.meteoclub.gr> )

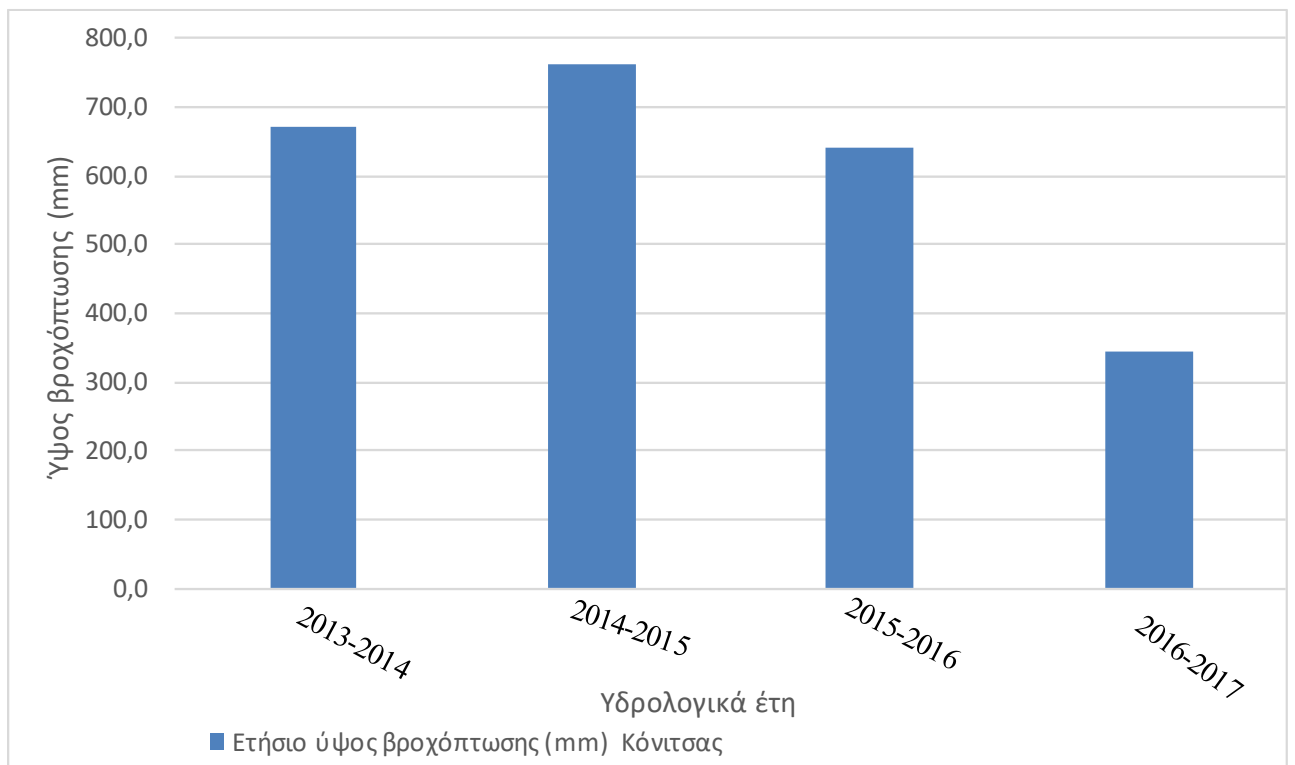


Εικόνα 23 Δεδομένα μέσο ετήσιου νετού για την περιοχή των Ιωαννίνων( <http://www.emy.gr> )

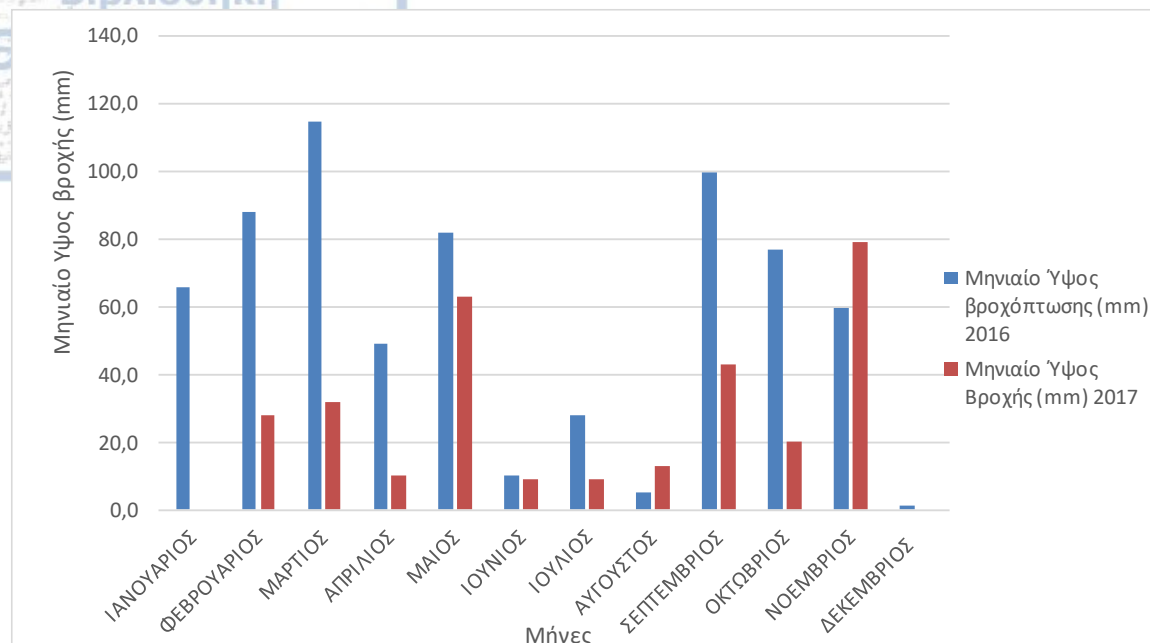


Εικόνα 24 Δεδομένα μηνιαίας θερμοκρασίας αέρα για την περιοχή των Ιωαννίνων ( <http://www.emy.gr> )

Για τον ακριβή προσδιορισμό του όγκου βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης συλλέχθηκαν τα μηνιαία ύψη βροχόπτωσης από τον σταθμό της Κόνιτσας της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (Εικόνα 25&26). Τα στοιχεία που συλλέχθηκαν αφορούν το μηνιαίο ύψος ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων μετρημένων σε χιλιοστά βροχής του βροχομετρικού σταθμού της Κόνιτσας, το υψόμετρο του σταθμού είναι 465 m, για τα υδρολογικά έτη 2013-2017. Η επιλογή των συγκεκριμένων υδρολογικών ετών βασίστηκε στην θεώρηση ότι η αστοχία έλαβε χώρα μεταξύ του Μαΐου 2016-Μαΐου 2017.



Εικόνα 25 Ετήσιο ύψος βροχόπτωσης Κόνιτσας από το 2013-2017



Εικόνα 26 Μηνιαίο υψος βροχόπτωσης κατά το υδρολογικό έτος 2016-2017

#### 4.6.6 Στοιχεία σεισμικότητας

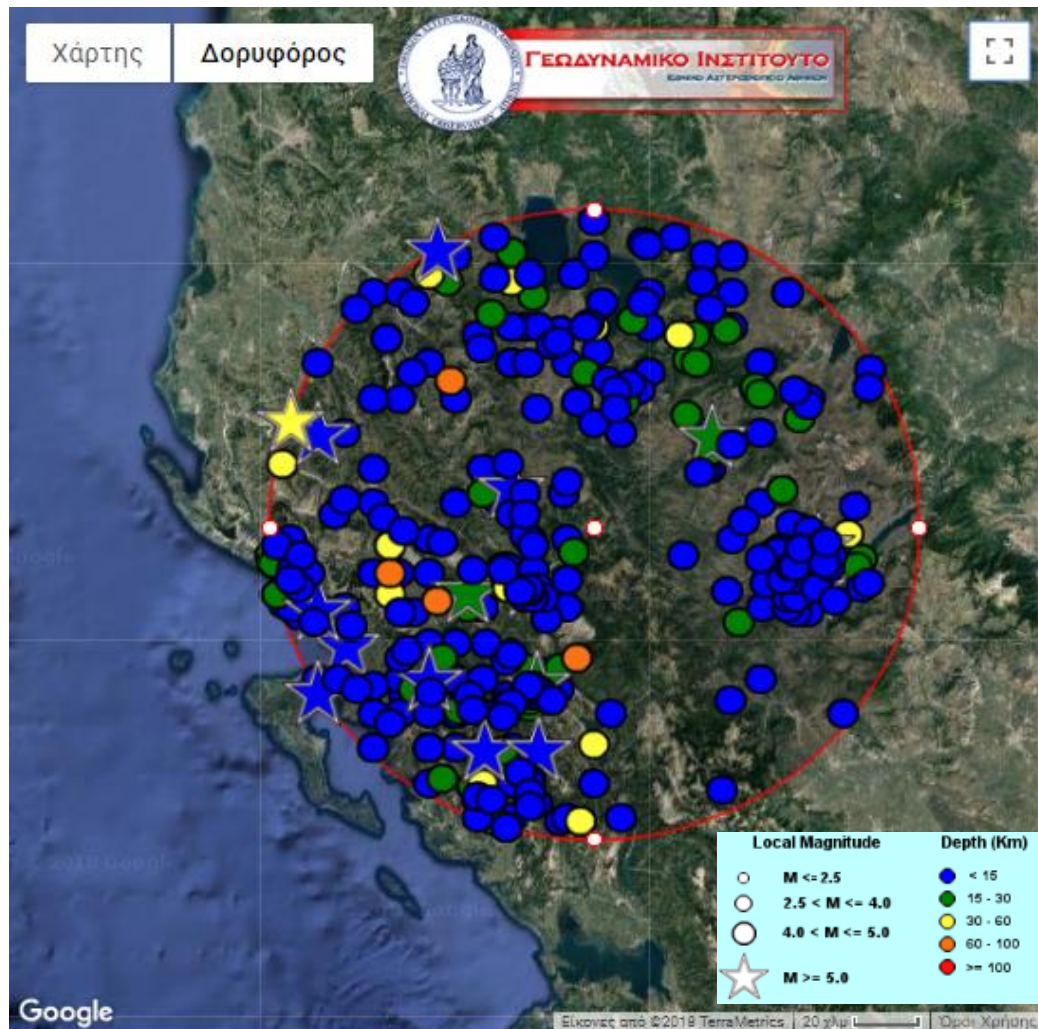
Η περιοχή μελέτης ανήκει στην Δυτική Μακεδονία, η οποία τοποθετείται δυτικά των οροσειρών του Βόρρα και του Βερμίου. Η περιοχή σεισμικά διαφέρει από την Κεντρική Μακεδονία και την Θράκη καθώς αποτελείται κυρίως από ρήγματα με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ προς ΑΒΑ-ΔΝΔ. Τα οριζόντιας μετατόπισης αυτά ρήγματα του ανώτερου Τριτογενούς επανενεργοποιήθηκαν κατά το Τεταρτογενές ως κανονικά ρήγματα.

Τα πιο διαδεδομένα συμπλέγματα ρηγμάτων δυτικά της περιοχής μελέτης είναι : α) Το ΑΒΑ-ΔΝΔ ρήγμα του Αλιάκμονα μήκους 70 km το οποίο αποτελείται από παράλληλα προς τον ποταμό Αλιάκμονα ρήγματα. Τα ρήγματα διασχίζουν τις οροσειρές του Βορινού και του Βερμίου και επεκτείνονται στην κεντρική Μακεδονία. Το μεγάλο αυτό ρήγμα συνδέεται με την σεισμική δόνηση μεγέθους  $M=6.6$  το 1995 στην Κοζάνη. β) Το ρήγμα της λίμνης Βεγορίτιδας-Πτολεμαΐδας μήκους 40 km και διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ ( $40-60^\circ$ ). γ) Το ανατολικό ρήγμα του Αγ. Δημητρίου (Κοιλάδα-Κρεμαστή-Καπνοχώρι) μήκους 12 km.

Στην ανατολική πλευρά της περιοχής μελέτης είναι το ρήγμα της Κόνιτσας μήκους 25 km με ΒΔ διεύθυνση. Οι πρόσφατες σεισμικές δονήσεις περιορίζονται στα 11 km του ρήγματος βόρεια της λεκάνης του Αώου. Το ρήγμα της Κόνιτσας συνδέεται με την

σεισμική δόνηση το 1996, μεγέθους  $M_w = 5.3$  με μέση μετακίνηση 0.40 m. (Tranos, et al. 2017)

Στον παρακάτω χάρτη( Εικόνα 27) απεικονίζονται οι σεισμικές δονήσεις σε απόσταση 100 km από την περιοχή μελέτης μεγέθους  $M_w \geq 4$  κατά την διάρκεια των τελευταίων 50 χρόνων από το 1968-2018.



Εικόνα 27 Απεικόνιση σεισμικών δονήσεων σε απόσταση 100 km από την περιοχή μελέτης μεγέθους  $M_w \geq 4$  κατά την διάρκεια των τελευταίων 50 χρόνων. Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο κέντρο του κύκλου. (<http://www.gein.noa.gr>)

Η περιοχή μελέτης ανήκει σύμφωνα με τον ισχύοντα Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN1998-1:2004 – Ευρωκώδικας 8) στην Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας I (Εικόνα 28)



Εικόνα 28 Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας, με κόκκινο απεικονίζεται η περιοχή μελέτης. <https://web.tee.gr/>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΡΑΝΟΥΣ

### 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται οι παράμετροι που είναι δυνατόν να επηρεάσουν την μηχανική συμπεριφορά της βραχόμαζας όπως η μελέτη του βαθμού αποσάθρωσης, ο βαθμός κερματισμού, ο προσανατολισμός των ασυνεχειών καθώς και το υλικό πλήρωσης του.

Η συμπεριφορά της βραχόμαζας χαρακτηρίζεται ως ανισότροπη καθώς τα 3 συστήματα ασυνεχειών ελέγχουν τον μηχανισμό αστοχίας αυτής προκαλώντας δομικές αστοχίες (επίπεδη ολίσθηση, σφηνοειδή κατάπτωση). Στην παρούσα εργασία για την περιγραφή της δομής καθώς και για την πληρότητα της μελέτης πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση της βραχόμαζας με την χρήση του ποσοτικοποιημένου διαγράμματος GSI (Hoek & Marinos, 2000). Επιπλέον για την εκτίμηση του μηχανισμού αστοχίας αυτής πραγματοποιήθηκε εκτέλεση δοκιμών άμεσης διάτμησης σε τεχνητή ασυνέχεια. Τέλος, στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κύρια συστήματα ασυνεχειών τα οποία προέκυψαν από τις συμβατικές μετρήσεις που λήφθηκαν από το πεδίο.

### 5.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Για την εκτίμηση των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων του πρανούς, την αξιολόγηση της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς και την ανάλυση του μηχανισμού αστοχίας λήφθηκαν υπόψιν οι παρακάτω παράγοντες :

- Βαθμός κερματισμού
- Βαθμός αποσάθρωσης
- Υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών

#### 5.2.1 Ποιότητα βραχόμαζας

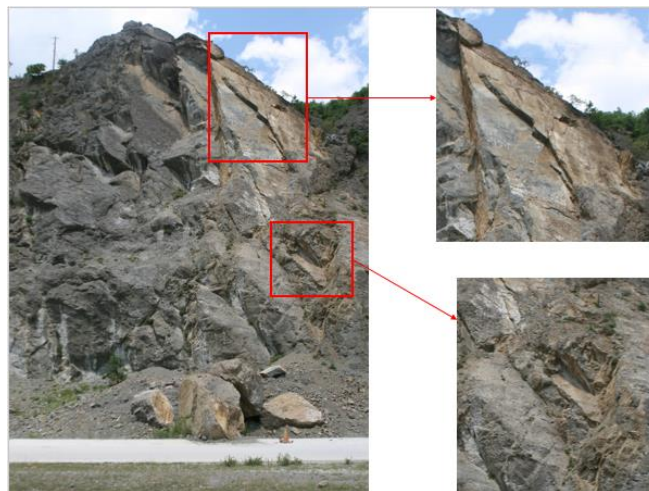
Η περιοχή αποτελείται γεωλογικά από πολύμικτα κροκαλοπαγή ελαφρά αποσαθρωμένα σε ανοιχτές επιφάνειες. Η επιφάνεια της στρώσης (B) αποτελεί την εμμένουσα ασυνέχεια της βραχόμαζας, η οποία παρουσιάζει διεύθυνση κλίσης ομόρροπη του μετώπου του

πρανούς. Κατά μήκος της βραχόμαζας εντοπίζονται μια ασυνέχεια αντίρροπη της κλίσης του πρανούς (J1) και μια δεύτερη οικογένεια ασυνεχειών (J2). Κατά μήκος της στρώσης παρατηρούνται επίπεδες ολισθήσεις, ενώ η ευνοϊκή γεωμετρία των τριών συστημάτων ασυνεχειών οδηγούν στην δημιουργία σφηνοειδών καταπτώσεων. Το υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών κατά μήκος του πρανούς είναι ασβεστικό υλικό.

Το εξεταζόμενο πρανές σε όλη την έκταση του παρουσιάζει ομοιομορφία τόσο ως προς την σύσταση του, το βαθμό αποσάθρωσης του καθώς και το υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών. Εξαιτίας αυτού, το πρανές θεωρήθηκε ως μια τεχνικογεωλογική ενότητα η περιγραφή της οποίας παρατίθεται παρακάτω (TE1).

### 5.2.2 TE1.Κροκαλοπαγές ελαφρά αποσαθρωμένο

Πρόκειται για τεφρό έως τεφροκάστανο κροκαλοπαγές μέτριας έως μεγάλης αντοχής με παρουσία φλεβών ασβεστιτικού υλικού. Το κροκαλοπαγές αποτελείται κατά βάση από ψαμμιτομαργαϊκές, ασβεστολιθικές κροκάλες με σπάνια εμφάνιση οφειολιθικών κροκαλών και το συνδετικό υλικού αυτού είναι ασβεστιτικό. Η βραχόμαζα εμφανίζει τεμαχώδη δομή καθώς διακρίνεται από τρία κύρια συστήματα τραχειών έως ελαφρά αποσαθρωμένων ασυνεχειών με  $GSI = 65-75$ . Η βραχόμαζα είναι ελαφρά αποσαθρωμένη, κυρίως κατά μήκος των ανοιχτών επιφανειών της (Εικόνα 29). Υδρογεωλογικά ο σχηματισμός χαρακτηρίζεται ως μέτριας υδροπερατότητας.



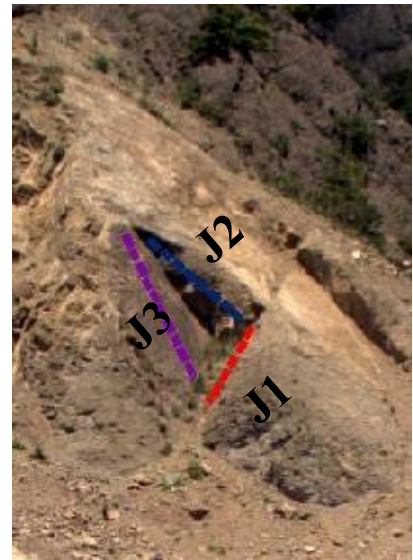
Εικόνα 29 Το πρανές ως μια τεχνικογεωλογική ενότητα με επισήμανση τα σημεία όπου εμφανίζεται ελαφρά αποσαθρωμένο

| GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                  | SURFACE CONDITIONS                                  |                                                          |                                                           |                                                                                                        |                                                                                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis. |                                                                                                                                                  | VERY GOOD<br>Very rough, fresh unweathered surfaces | GOOD<br>Rough, slightly weathered, iron stained surfaces | FAIR<br>Smooth, moderately weathered and altered surfaces | POOR<br>Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments | VERY POOR<br>Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings |
| STRUCTURE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                  | DECREASING SURFACE QUALITY →                        |                                                          |                                                           |                                                                                                        |                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities                                         | 90                                                  | 80                                                       | 70                                                        | 60                                                                                                     | N/A                                                                                      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets                     |                                                     |                                                          |                                                           |                                                                                                        | N/A                                                                                      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets                             |                                                     |                                                          |                                                           |                                                                                                        |                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity |                                                     |                                                          |                                                           |                                                                                                        |                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces                                     |                                                     |                                                          |                                                           |                                                                                                        |                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes                                                  |                                                     |                                                          |                                                           |                                                                                                        |                                                                                          |

Εικόνα 30 Ταξινόμηση της βραχομάζας κατά GSI (Hoek & Marinos, 2000). Με κόκκινο χρώνο απεικονίζεται η τιμή χαρακτηρισμού της βραχομάζας

### 5.2.2 Μικροτεκτονική ανάλυση του πρανούς

Για τον προσδιορισμό της τεκτονικής κατάστασης της βραχόμαζας και την ανάλυση έναντι αστοχιών του εξεταζόμενου πρανούς πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ασυνεχειών στο πεδίο με χρήση γεωλογικής πυξίδας. Σύμφωνα με μετρήσεις και με λεπτομερή παρατήρηση της βραχόμαζας στο πεδίο διακρίνονται τρία (3) κύρια συστήματα ασυνεχειών. Το πρώτο σύστημα ασυνεχειών J3 αποτελώντας την εμμένουσα ασυνέχεια με βύθιση ομόρροπη του πρανούς. Το δεύτερο σύστημα ασυνεχειών (J1) βυθίζεται αντίρροπα με την κλίση του πρανούς και η τρίτη οικογένεια ασυνεχειών έχει αρνητική γωνία κλίσης. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι 3 κύριες ασυνέχειες στο μέτωπο του πρανούς (Εικόνα 31).

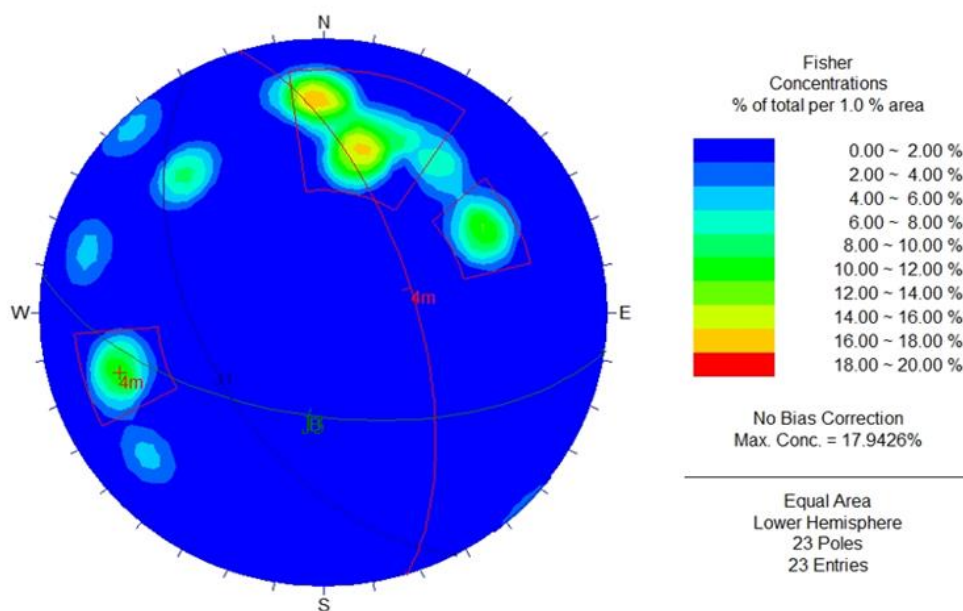


Εικόνα 31 Απεικόνιση τριών συστημάτων ασυνεχειών

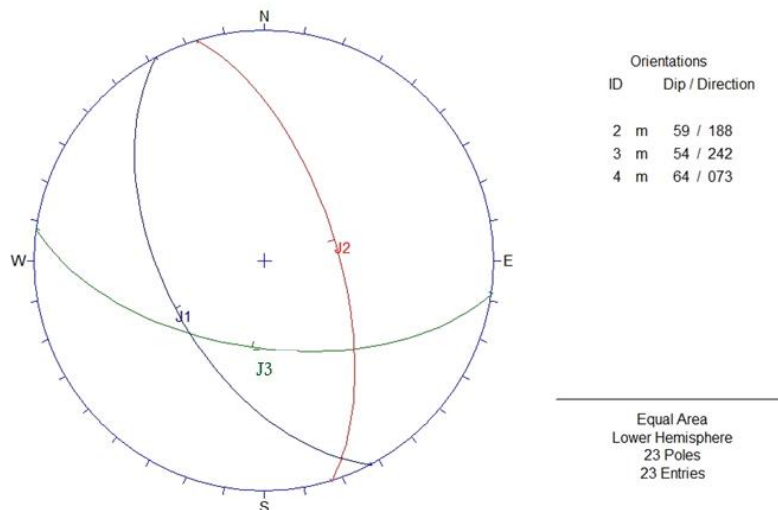
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα στοιχεία προσανατολισμού των τριών ασυνεχειών. Στην Εικόνα 32 παρουσιάζεται το διάγραμμα της πυκνότητας πόλων ασυνεχειών των μετρήσεων πεδίου στην περιοχή ενώ στην Εικόνα 33 παρουσιάζεται το τεκτονικό διάγραμμα των μετρήσεων όπως αυτά επεξεργάστηκαν από το πρόγραμμα Dips (RocScience Inc.).

Πίνακας 1 Τεκτονικά στοιχεία μετρήσεων πεδίου

| ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ | ΚΛΙΣΗ (°) | ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ<br>ΚΛΙΣΗΣ (°) |
|-----------|-----------|-------------------------|
| J3        | 59        | 188                     |
| J1        | 54        | 242                     |
| J2        | 64        | 073                     |



Εικόνα 32 Διάγραμμα πυκνότητας πόλων ασυνεχειών τεκτονικών μετρήσεων πεδίου



Εικόνα 33 Στερεοδιάγραμμα μετρήσεων πεδίου

#### 5.2.2.1 Θέσεις σάρωσεις-παραχθέντα δεδομένα

Στην παρούσα εργασία η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με χρήση επίγειου σαρωτή LiDAR ,τύπου IRLRIS-3D(Optech) που παρέχει δεδομένα XYZRGB. Για την πληρότητα της μελέτης πραγματοποιήθηκαν πτήσεις και με μη –επανδρωμένο ιπτάμενο οχήμα UAV (Unmanned Aerial Vehicle) εξαιτίας της αυτονομίας που παρουσιάζει η μέθοδος καθώς οι πτήσεις πραγματοποιήθηκαν πάνω από δυσπρόσιτη περιοχή.

Τα UAV είναι εξοπλισμένα με φωτογραφική μηχανή υψηλών αναλύσεων για την λήψη εναέριων φωτογραφιών, ένα GPS και ένα αδρανειακό σύστημα πλοήγησης ( INS,Inertial Navigation System) το οποίο καταγράφει τρισδιάστατες χωροταξικές πληροφορίες. Τα δεδομένα που παράγονται με την συγκεκριμένη μέθοδο φωτογραμμετρίας είναι αεροφωτογραφίες γεωαναφερμένες στον χώρο οι οποίες με την επεξεργασία με κατάλληλα λογισμικά μπορούν να παράγουν ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας, νέφος σημείων(point cloud) καθώς και τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής.

Στην περιοχή μελέτης εκτελέστηκε μια σάρωση (Εικόνα 34&35) με την χρήση του σαρωτή LiDAR σε απόσταση 60m μεταξύ σαρωτή και βάση του πρανούς με ανάλυση σάρωσης 20mm καθώς και πτήσεις με UAV με ύψος πάνω από την περιοχή μελέτης 30-45m και κατά μέσο όρο 20m απόσταση από το πρανός. Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζονται η θέση σάρωσης.



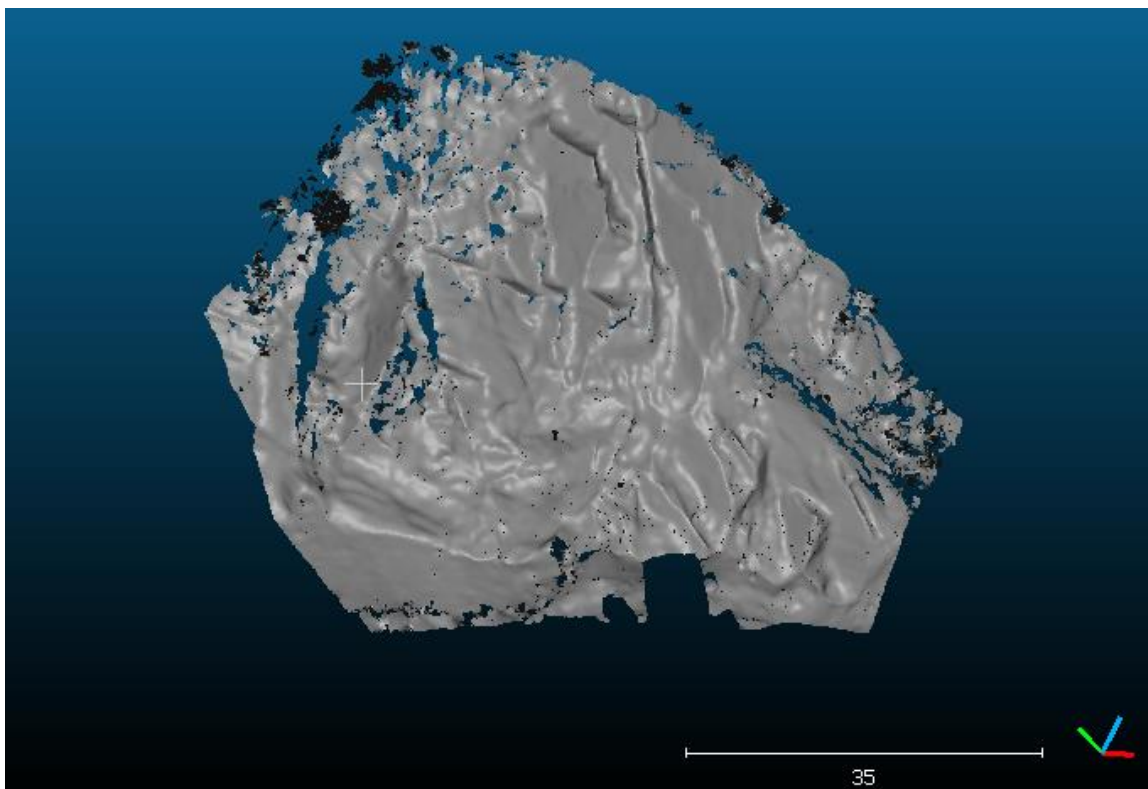
Εικόνα 34 Η θέση σάρωσης στην περιοχή ενδιαφέροντος με χρήση επίγειου σαρωτή LiDAR



Εικόνα 35 Εξεταζόμενο πρανές. Λήψη από UAV

#### 5.2.2.2 Αποτελέσματα του προγράμματος σάρωσης

Από το πρόγραμμα σάρωσης προέκυψαν ένα νέφος σημείων (point cloud) υψηλής ανάλυσης το οποίο καλύπτει ολόκληρη την περιοχή του εξεταζόμενου πρανούς (Εικόνα 36). Ο συνολικός όγκος 2.500.11 σημεία είναι με χωρική και χρωματική πληροφορία.



Εικόνα 36 Το νέφος σημείων για ολόκληρη την περιοχή ενδιαφέροντος σε γκρι κλίμακα

### 5.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η επεξεργασία των δεδομένων βασίστηκε σε δύο λογισμικά, το CloudCompare και το DSE (Discontinuity Set Extractor). Τελικός σκοπός της επεξεργασίας είναι η αξιοπιστία και η απόκλιση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων από τα διαφορετικά αυτά λογισμικά. Ο λεπτομερής τρόπος λειτουργίας των παραπάνω λογισμικών δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Συνεπώς, στην συνέχεια παρουσιάζονται οι γενικές προσεγγίσεις της λειτουργίας των δύο λογισμικών καθώς και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή των συμπερασμάτων.

### 5.3.1 CloudCompare

Το CloudCompare είναι ένα ανοιχτού κώδικα εξειδικευμένο λογισμικό τρισδιάστατης επεξεργασίας σημείων νέφους και τριγωνικών πλεγμάτων, το οποίο είναι ανεπτυγμένο σε C++. Το λογισμικό επιτρέπει την χειροκίνητη επεξεργασία των σημείων νεφών με μια σειρά βασικών εργαλείων καθώς προσφέρει και προηγμένους αλγόριθμους επεξεργασίας. Στην επιστήμη της γεωλογίας το λογισμικό προσφέρει την δυνατότητα εξαγωγής πιθανών επιφανειών (facets) από τρισδιάστατα σημεία νέφη. Η εξαγωγή αυτών των συμπερασμάτων είναι δυνατόν να υλοποιηθεί με δύο διαφορετικούς αλγόριθμους, καθένας από τους οποίους έχει έναν ελάχιστο αριθμό παραμέτρων (Dewez et al.,2016). Η γενική προσέγγιση στην εξαγωγή πιθανών ασυνεχειών βασίζεται στην διαίρεση ενός σημείου νέφους σε γειτονικά σημεία τα οποία επαληθεύουν την ίδια εξίσωση συνεπιπεδότητας. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με δύο διαφορετικές μέθόδους ταξινόμησης, την k-d α και την μέθοδο ταξινόμησης γρήγορης προσέγγισης. Στην συνέχεια αναφέρονται τα βήματα επεξεργασίας (Dewez et al.,2015)

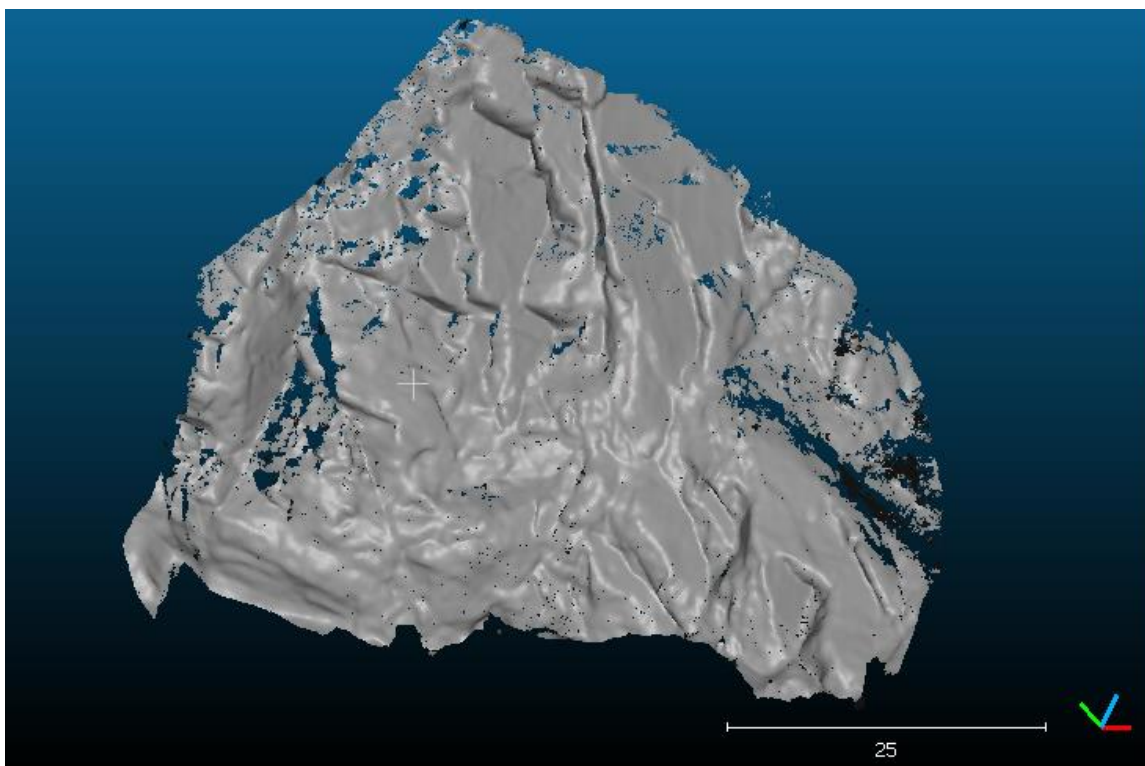
#### Καθαρισμός(filtering)

Αρχικό στάδιο στην επεξεργασία ενός νέφους σημείων είναι το στάδιο το καθαρισμού. Σε αυτό απομακρύνονται χειροκίνητα οι διάφορες πηγές θορύβου όπως βλάστηση, αμάξια, σπίτια, άνθρωποι, υγρασία κ.τ.λ . Στην περιοχή μελέτης κύρια πηγή θορύβου αποτελεί, τόσο για το νέφος σημείων που προέκυψε από τον σαρωτή LiDAR όσο και από το νέφος σημείων από το UAV είναι η βλάστηση, η οποία αφαιρέθηκε από το πρανές με αποτέλεσμα να προκύψουν τα παρακάτω πρανή

#### Γεωαναφορά

Κατά την επεξεργασία του νέφους σημείων βασικό στάδιο είναι η γεωαναφορά του νέφους. Αρκετοί σαρωτές LiDAR διαθέτουν ενσωματωμένο σύστημα GPS, ωστόσο ο συγκεκριμένος σαρωτής δεν παρέχει αυτή την πληροφορία. Έτσι η γεωαναφορά του παραγόμενο από τον σαρωτή LiDAR νέφους σημείων βασίστηκε στο ήδη γεωναφερμένο

νέφος σημείων που προέκυψε από το UAV, το οποίο είναι εφοδιασμένο με GPS, βάσει παγκόσμιου συστήματος συντεταγμένων UTM (WGS84-34N) (Εικόνα 37).



Εικόνα 37 Το γεωαναφερμένο και καθαρισμένο νέφος σημείων

### Υπολογισμός ασυνεχειών

Για τον υπολογισμό των κύριων οικογενειών ασυνεχειών έγινε χρήση του k-d αλγορίθμου. Ο αλγόριθμος αυτός εντοπίζει τα k γειτονικά σημεία με την μικρότερη απόσταση για μια καθορισμένη τιμή των σημείων που αναζητούνται. Επομένως για κάθε σημείο δημιουργείται ένα σύνολο k κοντινότερων σημείων τα οποία ελέγχονται με το κριτήριο της συνεπιπεδότητας σε σχέση με το αρχικό σημείο. Η διαδικασία συνεχίζεται με τον υπολογισμό των σημείων που επαληθεύουν το κριτήριο της συνεπιπεδότητας. Ο υπολογισμός του προσανατολισμού επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό του κάθετου

διανύσματος του επιπέδου το οποίο αντιπροσωπεύει το σύνολο των σημείων. Επομένως για τα σύνολα σημείων υπολογίζεται το βέλτιστο επίπεδο με την εξίσωση :

$$Ax+By+Cz+D=0 \quad (5.1)$$

Όπου: A,B,C= διανύσματα επιπέδου στο χώρο

D= κατακόρυφη απόσταση από την αρχή των αξόνων δηλαδή το σημείο αναφοράς το γεωγραφικό συστήματος αναφοράς του νέφους σημείων.

Όπως προαναφέρθηκε ο αλγόριθμος απαιτεί την χρήση ορισμένων παραμέτρων για την εκτίμηση των επιπέδων. Οι παράμετροι αυτοί ποσοτικοποιήθηκαν με βάσει δοκιμών, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε συγκεκριμένες γνωστές επιφάνειες ασυνεχειών στα δύο νέφη σημείων ( sensitivity analysis). Επομένως προέκυψαν δύο νέφη σημείων με μετρήσεις ασυνεχειών, οι οποίες θα μπορούσαν να αντιπροσωπεύουν μετρήσεις με γεωλογική πυξίδα. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα δυο νέφη σημεία με τα επίπεδα που προέκυψαν από την διαδικασία καθώς και τα απομονωμένα τμήματα στα οποία πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος των παραμέτρων.

### 5.3.2 DSE

Το DSE είναι ένα ανοιχτού τύπου εξιδανικευμένο πρόγραμμα του οποίου ο αλγόριθμος αναπτύχθηκε από τους Riquelme, Tomás, Cano, & Abellán, 2016 με σκοπό τον εντοπισμό των κύριων ασυνεχειών σε ένα 3D νέφος σημείων με ημιαυτόματη μέθοδο σε περιβάλλον Matlab. Ο χρήστης καθορίζει ένα πλήθος παραμέτρων όπως, των αριθμό των πλησιέστερων γειτονικών σημείων που θα χρησιμοποιηθούν στο κανονικό διάνυσμα για κάποιο κεντρικό σημείο του νέφους σημείων (κνη παράμετρος), μια τιμή απόκλισης για τα σημεία απο τα επίπεδα που πρόκειται να δημιουργηθούν, μια ελάχιστη γωνία διαχωρισμού μεταξύ των ασυνεχειών και των μέγιστο αριθμό ασυνεχειών που επιθυμεί να εξαχθεί. Το πρόγραμμα καθορίζει τα πιθανά επίπεδα με βάση την παράμετρο κνη εκτελώντας μια δοκιμή συνεπιπεδότητας χρησιμοποιώντας την τιμή της απόκλισης με σκοπό να επαληθεύσει εάν τα σημεία που περιβάλλουν κάθε κεντρικό σημείο σχηματίζουν ένα επίπεδο. Στη συνέχεια, για τα επίπεδα που έχουν ελεγχθεί από το κριτήριο της

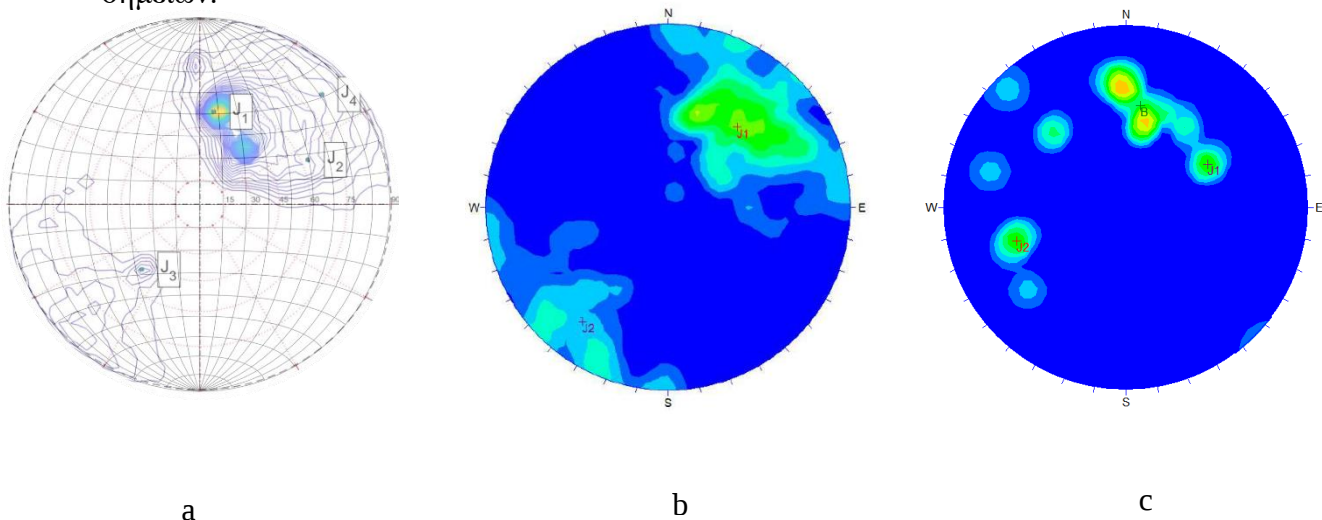
συνεπιπεδότητας το πρόγραμμα εκτελεί μια συνάρτηση εκτίμησης της πυκνότητας των πόλων (KDE:Kermel Density Estimation) προκειμένου να καθοριστούν οι σχετικές πυκνότητες των προσανατολισμών των επιπέδων αυτών. Με την εφαρμογή των περιορισμών που ορίστηκαν από τον χρήστη όπως η ελάχιστη γωνία διαχωρισμού και ο μέγιστος αριθμών ασυνεχειών καθορίζονται οι κύριες οικογένειες ασυνεχειών. (Rowe, 2017)

Για τον σκοπό της συγκεκριμένης εργασίας εφαρμόστηκε πρόγραμμα σάρωσης μοναδικής θέσης εγκατάστασης του σαρωτή λόγω περιορισμών προσβασιμότητας. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ύπαρξη συστηματικού σφάλματος (Abellan et al., 2014) στα παραγόμενα από το DSE (Riquelme et al., 2014) στερεοδιαγράμματα Schmidt και της αυτοματοποιημένης στατιστικής τους ανάλυσης. Το γεγονός αυτό κατέστησε αδύνατη την ερμηνεία των αποτελεσμάτων καθώς διαπιστώθηκε σημαντική απόκλιση από τις συμβατικές μετρήσεις πυξίδας που πραγματοποιήθηκαν επιτόπου. Τελικά, για την αποτελεσματική ερμηνεία των ψηφιακών μετρήσεων προσανατολισμού των ασυνεχειών, χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία χρήσης του DSE για νέφη σημείων από μοναδική θέση σάρωσης που προτείνεται από τους Farmakis and Hutchinson (2019). Ως αποτέλεσμα της μοναδικής θέσης σάρωσης, επιφάνειες που κλίνουν σε διεύθυνση υπό-παράλληλη της διεύθυνσης της δέσμης φωτός του σαρωτή κυριαρχούν στο στερεοδιάγραμμα με αποτέλεσμα να «επισκιάζουν» τις λιγότερο εκτεθειμένες στη σάρωση επιφάνειες. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε μη ρεαλιστικά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας την Εκτίμηση Πυκνότητας Πυρήνων (Kernel Density Estimation) και τις αρχές του DSE όπως ορίζονται από τους δημιουργούς. Η προαναφερθείσα προσαρμοσμένη μεθοδολογία πετυχαίνει να αποκαλύψει τις «επισκιασμένες» πυκνότητες παρέχοντας στον χρήστη στερεοδιαγράμματα εύκολα προς ερμηνεία.

#### 5.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ- ΚΥΡΙΕΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ

Από τα στάδιο επεξεργασίας εντοπίστηκαν να διατρέχουν το πρυνές τα εξής κύρια συστήματα ασυνεχειών. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα διαγράμματα πυκνότητας πόλων ασυνεχειών του νέφους σημείων καθώς και τα κύρια συστήματα ασυνεχειών όπως αυτά προέκυψαν από την χρήση των δύο διαφορετικών αλγορίθμων. Η μέθοδος εξαγωγής των πιθανών επιφανειών αστοχίας με την χρήση του προγράμματος DSE ,αντιπροσωπεύει με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματικότητα σε αντίθεση με τον αλγόριθμο του προγράμματος CloudCompare, όπως παρατηρείται και στα παρακάτω στερεοδιαγράμματα. Συνεπώς για την ανάλυση του μηχανισμού αστοχίας χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία ασυνεχειών που προέκυψαν από την χρήση του λογισμικού DSE.

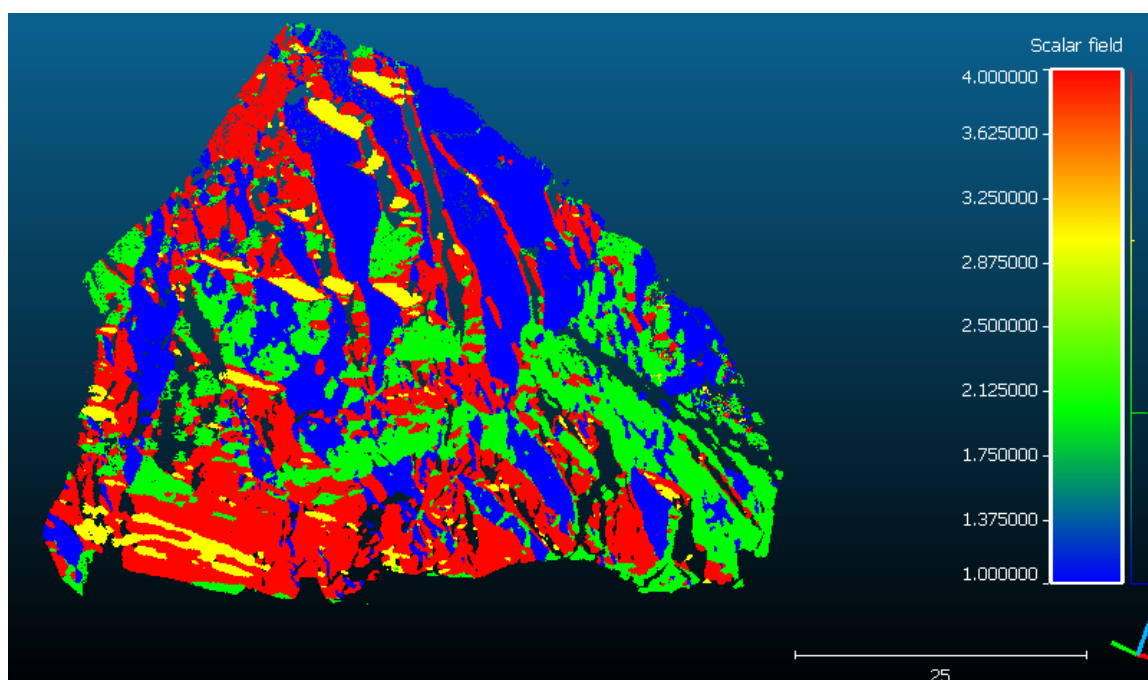
Σύμφωνα με τα παραπάνω τα συστήματα κύριων ασυνεχειών όπου ανταποκρίνονται καλύτερα στις πραγματικές συνθήκες είναι τα παρακάτω. Οι πόλοι  $J_4$  και  $J_3$  θεωρήθηκε ότι ανήκουν στο ίδιο σύστημα ασυνεχειών για αυτό χρησιμοποιήθηκε μία τιμή για τον πόλο αυτής της ασυνέχειας όπου να ανταποκρίνεται καλύτερα στην πραγματικότητα. Στην Εικόνα 38 παρουσιάζονται τα κύρια συστήματα ασυνεχειών όπως εντοπίζονται στο νέφος σημείων.



Εικόνα 38 Στερεοδιάγραμμα πυκνότητας πόλων όπως προκύπτουν από τον επίγειο σαρωτή LiDAR με χρήση δύο διαφορετικών αλγορίθμων (α) Πυκνότητα πόλων όπως προκύπτει από την μέθοδο του λογισμικού DSE (b) Πυκνότητα πόλων από το λογισμικό CloudCompare (c) Πυκνότητα πόλων όπως προκύπτουν από μετρήσεις στο πεδίο με πυξίδα

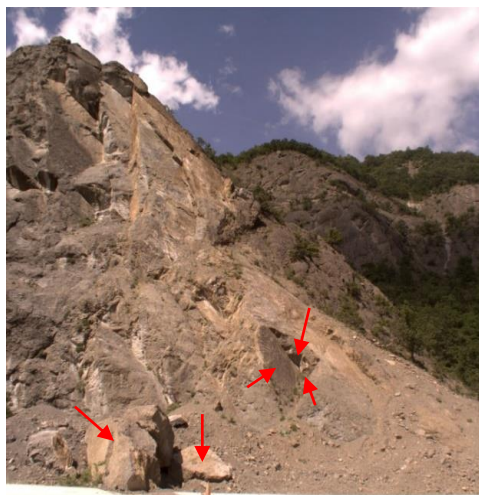
Πίνακας 2 Τα κύρια συστήματα ασυνεχειών όπως προκύπτουν από την ανάλυση

| ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ | ΚΛΙΣΗ (°) | ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ<br>ΚΛΙΣΗΣ (°) |
|-----------|-----------|-------------------------|
| J3        | 53        | 188                     |
| J1        | 63        | 247                     |
| J2        | 66        | 045                     |

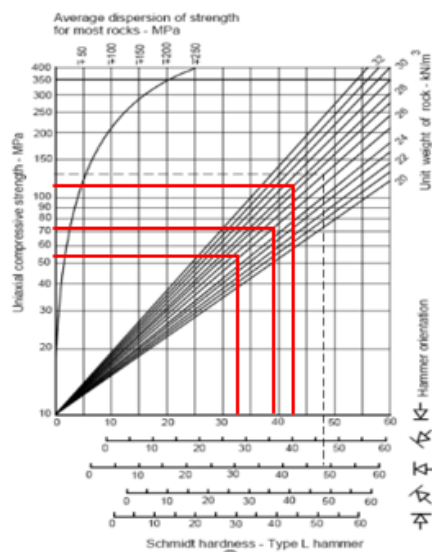


Εικόνα 39 Τα κύρια συστήματα ασυνεχειών όπως εντοπίζονται στο νέφος σημείων σε κλίμακα RGB. Με μπλε χρώμα απεικονίζεται η J3, με πράσινο το σύστημα J1 και με κίτρινο και πράσινο το σύστημα J2

Για την μελέτη του μηχανισμού αστοχίας του πρανούς είναι απαραίτητο να προσδιορισθεί η αντοχή των τοιχωμάτων των ασυνεχειών. Θα πρέπει να τονιστεί ότι σημαντικό ρόλο στην αντοχή αυτή διαδραματίζει ο βαθμός αποσάθρωσης της εκάστοτε ασυνέχειας. Για την εκτίμηση της πραγματοποιήθηκε η επιτόπου δοκιμή κρουσιμέτρησης με τη χρήση της σφύρας Schmidt. Στην Εικόνα 40 παρουσιάζονται τα σημεία στα οποία πραγματοποιήθηκε η επιτόπου δοκιμή.



Εικόνα 40 Θέσεις μέτρησης με την σφύρα Schmidt σε υγιές και αποσαθρωμένο κροκαλοπαγές



Εικόνα 41 Συσχέτιση τιμών αναπήδησης σφύρας Schmidt και αντοχής σε μονοαξονική θλίψη UCS (MPa) σύμφωνα με το ειδικό βάρος του πετρώματος ( $kN/m^3$ ) (Deere & Miller, 1996)

Πίνακας 3 Μέσες τιμές αναπήδησης της σφύρας Schmidt στα συστήματα ασυνεχειών

| Ασυνέχεια | Τιμή αναπήδης σφύρας Schmidt (-) |
|-----------|----------------------------------|
| J3        | 33                               |
| J1        | 39                               |
| J2        | 43                               |

Οι τιμές παρουσιάζουν εύρος από 30-45 ,όπου οι μικρότερες τιμές θεωρήθηκε ότι αντιστοιχούν σε αποσαθρωμένο τμήμα των τοιχωμάτων των ασυνεχειών του κροκαλοπαγούς. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν και στα τρία συστήματα ασυνεχειών. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μέσες τιμές αναπήδησης της σφύρας Schmidt στο εκάστοτε σύστημα ασυνεχειών όπως αυτά προέκυψαν από επιτόπου μετρήσεις στο πεδίο.

Από τις τιμές που προέκυψαν από τη σφύρα Schmidt προσδιορίστηκε η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη UCS (MPa) σύμφωνα με το φαινόμενο ή μοναδιαίο βάρος ( $\gamma$ ) του κροκαλοπαγούς το οποίο θεωρήθηκε 28 kN/m<sup>3</sup>. Τα αποτελέσματα της δοκιμής παρουσιάζονται στον πίνακα 4.

Πίνακας 4 Αποτελέσματα από την επί τόπου δοκιμή κρουσιμέτρησης με τη χρήση της σφύρας Schmidt

| Ασυνέχεια | Τιμή αναπήδης σφύρας Schmidt (-) | Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa) |
|-----------|----------------------------------|-----------------------------------|
| J3        | 33                               | 55                                |
| J1        | 39                               | 72                                |
| J2        | 43                               | 110                               |

Η εκτίμηση της τραχύτητας των ασυνεχειών του κροκαλοπαγούς πραγματοποιήθηκε επί τόπου με τη χρήση προφίλομέτρου. Ο ποσοτικός υπολογισμός της τραχύτητας των

ασυνεχειών γίνεται με τον δείκτη JRC ( Joint Roughness Coefficient) με την οπτική σύγκριση των δέκα προφίλ της ISRM και του εξεταζόμενου ίχνους όπως αυτό προέκυψε από το προφίλομετρο. Στο εξεταζόμενο πρανές πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με την χρήση προφίλομετρου στα τρία (3) συστήματα ασυνεχειών και τα παραχθέντα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα.

*Πίνακας 5 Αποτελέσματα από την επί τόπου δοκιμή για την εκτίμηση της τραχύτητας των ασυνεχειων*  
*Σύστημα Ασυνεχειών Δεικτης JRC*

|           |     |
|-----------|-----|
| <b>J3</b> | 2-4 |
| <b>J1</b> | 4-6 |
| <b>J2</b> | 4-6 |

### **5.3 ΕΥΡΕΣΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ**

Σημαντικό ρόλο στην συμπεριφορά της βραχώμαζας και κατ' επέκταση στον προσδιορισμό του μηχανισμού αστοχίας διαδραματίζουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών της βραχώμαζας. Στην παρούσα μελέτη, για τον προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς των ασυνεχειών πραγματοποιήθηκε δοκιμή άμεσης διάτμησης σε τραχεία τεχνητή ασυνέχεια της βραχώμαζας, που αξιολογήθηκε με το κριτήριο Papaliangas (1995). Η δοκιμή άμεσης διάτμησης που πραγματοποιήθηκε σε 5 στάδια ορθής τάσης , οι οποίες επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να καλυφθεί το εύρος 0-1 MPa.

#### Κριτήριο Papaliangas

Σύμφωνα με το θεωρητικό κριτήριο Papaliangas (1995), όταν σε μια ασυνέχεια εφαρμοστεί ορθή τάση, τα τοιχώματα αυτής έρχονται σε επαφή μόνο σε ορισμένες περιοχές οι οποίες αποτελούν ένα μικρό ποσοστό της συνολικής επιφάνειας. Η τιμή της ορθής τάσης σε αυτές τις περιοχές είναι τόσο υψηλή που προκαλούν πλαστική συγκόλληση των δύο περιοχών της ασυνέχειας , όπως γίνεται κα στην περίπτωση των μετάλλων ( Terzaghi, 1925). Προκύπτει ότι η μικρότερη τιμή της ορθής τάσης που μπορεί να προκαλέσει πλαστική συμπεριφορά αντιστοιχεί στη μετάβαση από ψαθυρή σε πλαστική

συμπεριφορά του βραχώδους υλικού. Στο τέλος της διατμητικής μετατόπισης, σύμφωνα με το κριτήριο, παρατηρούνται "κόμβοι επαφής" όπου έχουν δημιουργηθεί από τον παραπάνω μηχανισμό και κατανέμονται στο σύνολο της επιφάνειας της ασυνέχειας με διαφορετική κλίση από το μέσο επίπεδο της.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής διατμητικής δύναμης είναι η σχετική ολίσθηση των δύο τμημάτων κατά μήκος ενός κεκλιμένου πεδίου, η διεύθυνση του οποίου εξαρτάται από την μέση κλίση των κόμβων επαφής. Η διατμητική αντίσταση σε οποιαδήποτε τιμή ορθής τάσης είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι προέρχεται από απότμηση των πλαστικών κόμβων επαφής και εξαιτίας αυτού να προκαλείται διαστολή που αποτελείται από δυο επιμέρους συνιστώσες. Η πρώτη οφείλεται στην διατμητική αντοχή του υλικού των τοιχωμάτων σε κατάσταση υψηλών τάσεων ενώ η δεύτερη είναι η γεωμετρική συνιστώσα που οφείλεται στη μέση κλίση των περιοχών επαφής. Αν θεωρηθεί αποδεκτό ότι οι κόμβοι επαφής βρίσκονται στο όριο ψαθυρής – πλαστικής συμπεριφοράς, η διατμητική αντίσταση θεωρείται ίση με την αντίσταση τριβής ενώ η πρώτη συνιστώσα είναι ανάλογη της ορθής τάσης και ανεξάρτητη της τραχύτητας και της κλίμακας. Επομένως, το μέγεθος της συνιστώσας τριβής προσδιορίζεται από τη γωνία τριβής του υλικού των τοιχωμάτων ενώ για τον προσδιορισμό του μεγέθους της γεωμετρικής συνιστώσας εφαρμόζονται οι αρχές της «θεωρίας ορθής επαφής» των Greenwood & Williamson (1966), με αξιοποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας.

Με βάση όλα τα παραπάνω σχετικά με την περιγραφή του μηχανισμού διάτμησης το κριτήριο Papaliangas αποκτά την απλή μορφή :

$$\tau_p = \sigma_n \varepsilon \varphi(\varphi_m + \psi) \quad (5.2)$$

Όπου,

$\tau_p$ = η μέγιστη διατμητική αντοχή

$\sigma_n$ =η ορθή τάση

$\varphi_m$ = η γωνία τριβής του υλικού των τοιχωμάτων αυτής ασυνέχειας και

$\psi$  = η γωνία διαστολής που αντιστοιχεί στη μέγιστη διατμητική αντοχή

Η τιμή της γωνίας μεταβάλλεται λογαριθμικά σε συνάρτηση με την ορθή τάση και δίνεται από την σχέση (Papaliangas, 1995)

$$\varepsilon\phi\psi = \varepsilon\phi\psi_o \log_{10} \frac{\sigma_{nT}}{\sigma_n} / \log_{10} \frac{\sigma_{nT}}{\sigma_{no}} \quad (5.3)$$

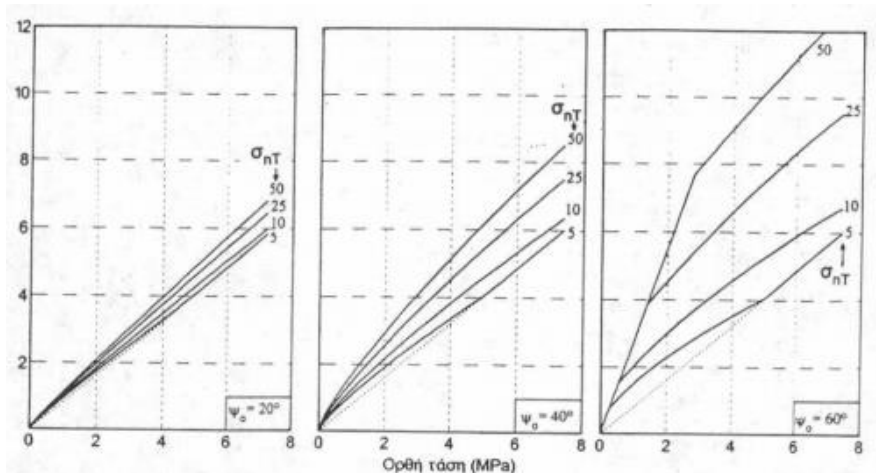
Όπου,

$\psi_o$  = η μέγιστη γωνία κλίσης των μικροεξοχών της επιφάνειας

$\sigma_{nT}$  = η ορθή τάση η οποία εμποδίζει πλήρως την ασυνέχεια να διασταλεί

$\sigma_{no}$  = εκφράζει μια μικρή τιμή της ορθής τάσης η οποία προκαλεί μηδενική παραμόρφωση στην επιφάνεια της ασυνέχειας και μπορεί να ληφθεί π.χ. 1 kPa

Η Εικόνα 42 αναπαριστά τρεις οικογένειες περιβαλλουσών διατμητικής αντοχής, σύμφωνα με το παραπάνω κριτήριο, οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές της γωνίας  $\psi_o$  καθώς σε κάθε καμπύλη δίνεται η αντίστοιχη τιμή της παραμέτρου  $\sigma_{nT}$ . Για λόγους απλούστευσης της χρήσης του κριτηρίου θεωρήθηκε ότι σε όλες τις περιπτώσεις η τιμή της γωνίας τριβής  $\phi_m$  είναι ίση με  $39^\circ$  και η τιμή της μέγιστης γωνίας τριβής δεν μπορεί να ξεπεράσει τις  $70^\circ$ . Εξαιτίας αυτής της θεώρησης στο δεξιό διάγραμμα το αρχικό τμήμα της καμπύλης έχει αντικατασταθεί από την ευθεία  $\tau = \sigma \tan 70^\circ$ .



Εικόνα 42 Περιβάλλουσες διατμητικές αντοχές σύμφωνα με το κριτήριο Papaliangas ( 1995)

Ο προσδιορισμός των τριών βασικών παραμέτρων του παραπάνω κριτηρίου , της γωνίας τριβής του υλικού ( $\phi_m$ ) , της ορθής τάσης  $\sigma_{nT}$  και της μέγιστης γωνίας κλίσης των μικροεξοχών της επιφάνειας ( $\psi_0$ ) γίνεται με τις παρακάτω μεθόδους:

Η γωνία τριβής του υλικού  $\phi_m$  προσδιορίζεται:

- ο με τριαξονικές δοκιμές σε άρρηκτο δοκίμιο υπο υψηλή πλευρική πίεση τέτοια ώστε να προσεγγιστεί το όριο ψαθυρής – πλαστικής συμπεριφοράς ( Papaliangas, 1997)
- ο με δοκιμές άμεσης διάτμησης σε ασυνέχειες πετρωμάτων, αν από τη μέγιστη διατμητική αντοχή αφαιρεθεί η γεωμετρική συνιστώσα ( διαστολή)

Η μέγιστη γωνία κλίσης των μικροεξοχών της επιφάνειας  $\psi_0$  προσδιορίζεται :

- ο άμεσα με τη πραγματοποίηση μετρήσεων της επιφανειακής τραχύτητας.

Η γωνία αυτή είναι ισοδύναμη με τη γωνία διαστολής, εφόσον ενεργοποιείται όλη η τραχύτητα (αμελητέα επιφανειακή φθορά).

Η γωνία διαστολής προσδιορίζεται :

- ο εργαστηριακά από δοκιμές διάτμησης υπό ορθή τάση που προέρχεται μόνο από το ίδιο βάρος του δοκιμίου (νεκρό φορτίο).
- ο Στο πεδίο, η γωνία αυτή προσδιορίζεται με φωτογραμμετρικές ή προφίλομετρικές μεθόδους

Η ορθή τάση  $\sigma_{nT}$  εκφράζει τη μετάβαση από διάτμηση με δυνατότητα διαστολής σε διάτμηση χωρίς διαστολή και προσδιορίζεται :

- ο πειραματικά με τη χρήση ενός διαγράμματος διαστολής - ορθής τάσης ( $\tan\psi - \log\sigma_n$ ) το οποίο προκύπτει από την ίδια σειρά δοκιμών άμεσης διάτμησης, το οποίο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της γωνίας  $\phi_m$ .

Η τιμή της γωνίας  $\psi_0$  για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά λαμβάνεται από μια δοκιμή άμεσης διάτμησης υπό την επίδραση του ιδίου βάρους. Η δοκιμή αυτή πραγματοποιείται πριν από την κύρια δοκιμή στην οποία υποβάλλεται το συγκεκριμένο δοκίμιο. Για τιμές ορθής τάσης μεγαλύτερες της  $\sigma_{nT}$  η τραχύτητα δεν παίζει κανένα ρόλο, ενώ η διατμητική αντοχή είναι ανάλογη της ορθής τάσης. Η αναλογία αυτή ισχύει έως ότου

η διατμητική αντοχή της ασυνέχειας να είναι ίση με τη διατμητική αντοχή του συμπαγούς πετρώματος. Αν ξεπεραστεί η τιμή, τότε η διατμητική αντοχή ισούται με αυτή του συμπαγούς βραχώδους υλικού. Για φυσικές ασυνέχειες η  $\sigma_{nT}$  είναι σαφώς μικρότερη τόσο από τη θλιπτική αντοχή όσο και από την τάση που προκαλεί την αλλαγή της συμπεριφοράς του υλικού από ψαθυρή σε πλαστική. Αν θεωρηθούν σαν τυπικές τιμές  $\sigma_{nT} = 10\text{MPa}$ . και  $\sigma_{n0} = 1\text{kPa}$ , η παραπάνω σχέση δίνει:

$$\varepsilon\varphi\psi = \frac{\varepsilon\varphi\psi_0}{4} \log_{10} \frac{\sigma_{nT}}{\sigma_n} \quad (5.4)$$

Η σημασία των δύο σχέσεων είναι μεγάλη, με την χρήση μια απλής φυσικής παραμέτρου η οποία μπορεί να μετρηθεί άμεσα, της μέγιστης κλίσης των μικροεξοχών. Η τάση  $\sigma_{nT}$  προσδιορίζεται από μια σειρά δοκιμών σε δείγματα φυσικής ασυνέχειας, χωρίς να απαιτείται οποιαδήποτε ειδική προετοιμασία των επιφανειών τους.

Στους περισσότερους τύπους υγιών πετρωμάτων η τιμή της γωνίας τριβής  $\varphi_m$  σύμφωνα με τριαξονικές δοκιμές κυμαίνεται μεταξύ  $33^\circ$  και  $43^\circ$ . Οι μικρότερες τιμές αντιστοιχούν σε τύπους βράχων χαλαζιακής σύστασης ενώ οι μεγαλύτερες σε βράχους ασβεστιτικής σύστασης (Papaliangas, 1996). Υπάρχει η πιθανότητα να υπάρξουν περιπτώσεις με αισθητά χαμηλότερες τιμές σε περιπτώσεις πετρωμάτων όπως οι σχιστόλιθοι, φυλλίτες και γενικά πετρώματα που περιέχουν ορυκτά χαμηλής διατμητικής αντοχής ή όταν τα τοιχώματα εμφανίζουν αποσάθρωση ή είναι καλυμμένα με επιστρώσεις εδαφικών υλικών ή ορυκτών χαμηλής γωνίας τριβής.

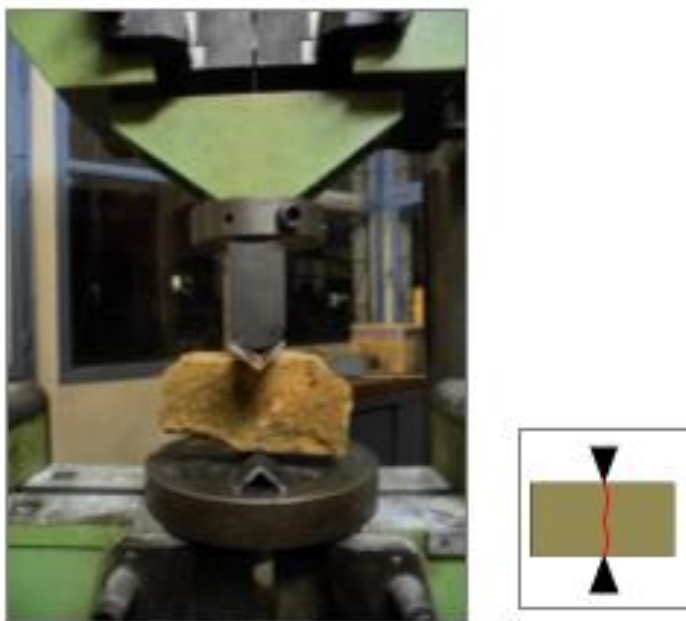
Επίσης, μικρές τιμές γωνιών τριβής, ιδιαίτερα σε χαμηλές ορθές τάσεις προκύπτουν σε περιπτώσεις που η επιφάνεια μιας ασυνέχειας έχει λειανθεί λόγω κάποιας φυσικής ή τεχνικής διεργασίας. Σε αυτές τις περιπτώσεις η τιμή της γωνίας  $\varphi_m$  προσδιορίζεται μόνο από δοκιμές άμεσης διάτμησης, γιατί οι τριαξονικές δοκιμές δεν είναι ικανές και δεν "αντιλαμβάνονται" πλήρως τα διαφοροποιημένα επιφανειακά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών.

Τέλος είναι αναγκαίο να τονιστεί ότι το κριτήριο Papaliangas δεν μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση ασυνεχειών με υλικό πληρώσεως, για τις οποίες άλλα κριτήρια είναι ποιο ενδεδειγμένα (Papaliangas 1993 και 1995)

### 5.2.2 Διαδικασία εύρεσης διατμητικής αντοχής

Το δοκίμιο της μελέτης διαμορφώθηκε με κατάλληλο εργαστήριο εξοπλισμό και εκτελέστηκε η δοκιμή της άμεσης διάτμησης στο Εργαστήριο Γεωμηχανικής του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε του Αλεξάνδρειου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Θεσσαλονίκης.

Η δημιουργία των ασυνεχειών πραγματοποιήθηκε με υποβολή πρισμάτων πετρώματος σε κάμψη και με εφελκυστική διάρρηξη (Εικόνα 43) με τη χρήση δύο γωνιακών ελασμάτων μέσω των οποίων εφαρμόστηκε το απαιτούμενο γραμμικό φορτίο σε προ διαμορφωμένη εγκοπή κατά πλάτος του δοκιμίου. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας ήταν οι αναπτυσσόμενες ασυνέχειες να είναι πολύ τραχείες και να αντιπροσωπεύουν το άνω όριο της τραχύτητας που είναι δυνατό να απαντηθούν στην φύση.

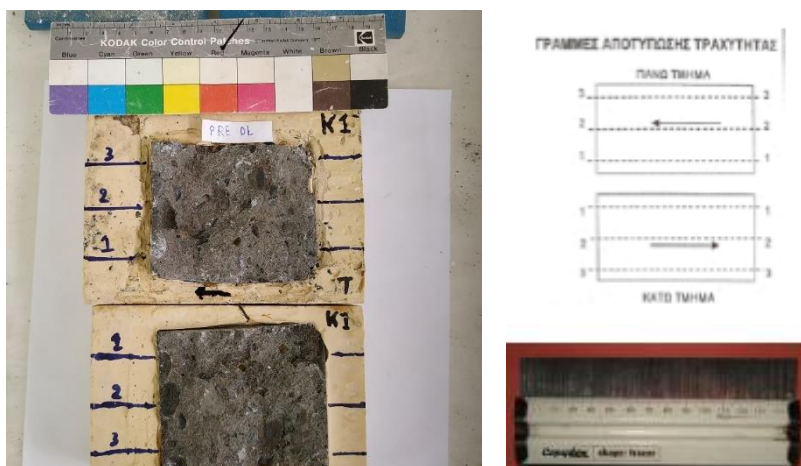


Εικόνα 43 Εφελκυστική διάρρηξη με τη χρήση δυο γωνιακών ελασμάτων μέσω των οποίων εφαρμόστηκε το απαιτούμενο γραμμικό φορτίο σε προ-διαμορφωμένη εγκοπή κατά πλάτος του δοκιμίου

Αρχικά το δείγμα εγκιβωτίζεται σε ειδικά καλούπια πλήρως οριζοντιωμένα και κεντραρισμένα ώστε να υφίσταται ομοιόμορφα την τάση όταν τοποθετηθεί στην πρέσα διάτμησης. Για την επίτευξη της παραπάνω διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε οδοντιατρικής γύψος ταχείας πήξεως και αντοχής μεγαλύτερης από 30 MPa με αυστηρά καθορισμένες αναλογίες νερού και κονίας. Στην συνέχεια, με την χρήση δύο καλουπιών πραγματοποιήθηκε ο εγκιβωτισμός του κάτω τμήματος και του άνω τμήματος της ασυνέχειας. Με την δημιουργία του δοκιμίου χαράσσονται 3 γραμμές με σκοπό την αποτύπωση της τραχύτητας με την χρήση προφιλόμετρου. Η τραχύτητα αποτυπώνεται πριν και μετά την εκτέλεση της δοκιμής άμεσης διάτμησης σημειώνοντας κάθε φορά την ορθή τάση που ασκήθηκε. Στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 44 & 45) παρουσιάζεται η διαδικασία του εγκιβωτισμού του δοκιμίου καθώς και αυτή της αποτύπωσης της τραχύτητας.



Εικόνα 44 Γραμμές αποτύπωσης τραχύτητας με την χρήση προφιλόμετρου. Αριστερά φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο σημειώνεται η τραχύτητα και δεξιά παρατίθεται το προφιλόμετρο.



Εικόνα 45 Εγκιβωτισμός του πάνω μέρους δοκιμίου.

Η εκτέλεση της δοκιμής της άμεσης διάτμησης βραχώδους υλικού συνίσταται από την διάταξη των παρακάτω οργάνων:

- ο Δυναμοδακτύλιος (των 2,10 ή 30kN), ο οποίος έρχεται σε επαφή μέσω χαλύβδινης σφαίρας με το άνω μεταλλικό πλαίσιο του δοκιμίου και καταγράφει την διατμητική παραμόρφωση μέσω ενός οριζόντιου μηχανοσυστήματος.
- ο Οριζόντιο μηχανοσυστήματος το οποίο έρχεται σε επαφή με το κάτω μεταλλικό πλαίσιο του δοκιμίου και καταγράφει την οριζόντια-διατμητική μετατόπιση.
- ο Το έμβολο της μηχανής TRISCAN 100 που επιβάλλει την διατμητική με σταθερή επιλεγόμενη ταχύτητα.
- ο Δύο κατακόρυφα μηχανοσυστήματα αντί διαμετρικά στο κέντρο του δοκιμίου, πάνω σε ειδικά σχεδιασμένο κάναβο.

Κατά την έναρξη της διαδικασίας της πρώτης δοκιμής άμεσης διάτμησης (Εικόνα 46) λειαίνεται η επιφάνεια της γύψου του πάνω μέρους του δοκιμίου με την χρήση σπάτουλας ώστε η επιφάνεια να είναι όσο το δυνατόν πιο επίπεδη. Έπειτα ο διανομέας τοποθετείται στο κέντρο του πάνω μέρους του υλικού εγκιβωτισμού του δοκιμίου και σχεδιάζεται το περίγραμμα του. Σημειώνονται δυο σημεία εκατέρωθεν και σε απόσταση 1 cm από τα άκρα του πάνω μέρους υλικού εγκιβωτισμού του δοκιμίου, στα οποία θα έρθουν σε επαφή τα δύο μηχανοσυστήματα ώστε σε κάθε δοκιμή τα μηχανοσυστήματα να τοποθετούνται στην ίδια θέση. Αφού πραγματοποιηθεί η δοκιμή με το πρώτο στάδιο ορθής τάσης (ίδιο βάρος), ασκείται στη συνέχεια η επόμενη ορθή τάση, η οποία ανάλογα με την τιμή της διακρίνεται σε δυο διαφορετικές διαδικασίες:

- ο Για τάση  $\leq 100$  KPa:

Ο διανομέας τοποθετείται εντός του περιγράμματος που είχε σχεδιαστεί κατά την προετοιμασία του δοκιμίου. Στην συνέχεια τοποθετείται το πλαίσιο που στο κάτω μέρος του τοποθετούνται τα ανάλογα βάρη για να επιτευχθεί η αντίστοιχη τάση.

- ο Για τάση  $> 100$  KPa:

Το κεντράρισμα του δοκιμίου γίνεται ως προ το έμβολο της ορθής τάσης και μετά γίνεται η επιβολή της ορθής τάσης με τη βοήθεια της ανάλογης αντλίας σταθερής πίεσης (3,5 MPa -controls ή 70 MPa - ELE).

Τέλος, είναι απαραίτητο να κεντράρεται το δοκίμιο ως προς την οριζόντια διεύθυνση με άξονα αυτόν που δημιουργείται από το έμβολο του πλαισίου φόρτισης και από το δυναμοδακτύλιο. Για την εξασφάλιση της οριζόντιας διεύθυνσης τοποθετούνται παράλληλα του άξονα του δοκιμίου δύο μεταλλικές μπάρες πρισματικές ράβδοι χαμηλής τριβής.



Εικόνα 46 Διάταξη συσκευής άμεσης διάτμησης ασυνεχών βράχου

Όλες οι τιμές συλλέγονται μέσω του καταγραφικού MPX 3000, οι οποίες παρουσιάζονται με την μορφή διαγραμμάτων με το πρόγραμμα WINHOST. V 4.34 της Datalogic η οποία χρησιμοποιεί το λειτουργικό περιβάλλον των WINDOWS. Οι τιμές των δοκιμών λαμβάνονται από την ψηφιοποίηση μέσω του επεξεργαστή MPX 3000 ο οποίος είναι συνδεδεμένος στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με την μορφή διαγραμμάτων. Με αυτό τον τρόπο πραγματοποιείται η παρακολούθηση και ο έλεγχος της πορείας της δοκιμής.

Για την εφαρμογή του κριτηρίου Papaliangas , όπως αναφέρθηκε προηγουμένως , απαιτείται ο προσδιορισμός τριών βασικών παραμέτρων:

- Η γωνία τριβής των τοιχωμάτων των ασυνεχειών  $\phi_m$
- Η μέγιστη γωνία κλίσης της επιφάνειας  $\psi_o$
- Η τιμή της τάσης  $\sigma_{nT}$  για την οποία η διάτμηση καθίσταται αδιάστατη, δηλαδή η διαστολή μηδενίζεται.

Στο πρώτο στάδιο τα δοκίμια υποβάλλονται σε άμεση διάτμηση μόνο με την επίδραση του ιδίου τους βάρους, από τις οποίες προσδιορίζεται η τιμή της μέγιστης γωνίας

διαστολής που είναι πρακτικά ίση με την γωνία κλίσης  $\psi$ . Στο επόμενο στάδιο τα δοκίμια υποβάλλονται σε δοκιμές άμεσης διάτμησης σε προκαθορισμένο εύρος ορθών τάσεων. Στις δοκιμές αυτές καταγράφονται η διατμητική και ορθή μετατόπιση καθώς και η διατμητική δύναμη.

$$\sigma_1 = (\sigma \cos \psi - \tau \sin \psi) \cos \psi \quad (5.5)$$

$$\tau_1 = (\tau \cos \psi - \sigma \sin \psi) \cos \psi \quad (5.6)$$

Όπου ορίζεται ως

$\psi$  = η στιγμιαία γωνία διαστολής

$\tau$  = η τιμή της διατμητικής αντοχής που μετρήθηκε

$\sigma$  = η ορθή τάση

$\tau_1$  = διατμητική τάση κατά μήκος κεκλιμένου επιπέδου που αντιστοιχεί σε κατάσταση μηδενικής διαστολής

$\sigma_1$  = ορθή τάση κατά μήκος κεκλιμένου επιπέδου που αντιστοιχεί σε κατάσταση μηδενικής διαστολής

Η γωνία  $\phi_m$  είναι η γωνία κλίσης της βέλτιστης ευθείας γραμμής που προσαρμόζεται στα δεδομένα ενός διαγράμματος  $\sigma$ - $\tau$  (ορθή-διατμητική τάση) στο οποίο αναπαρίστανται οι τιμές της διατμητικής τάσης  $\tau_1$  και της ορθής τάσης  $\sigma_1$  για κάθε στάδιο.

Για την εύρεση της  $\sigma_{HT}$  αναπαρίστανται τα δεδομένα από μια απλή σειρά δοκιμών άμεσης διάτμησης σε ένα ημι-λογαριθμικό διάγραμμα ορθής τάσης-ρυθμού διαστολής ( $\log \sigma$ - $\tan \psi$ ) και προσαρμόζεται η βέλτιστη ευθεία στα δεδομένα. Το σημείο που τέμνει τον άξονα της ορθής τάσης δίνει την τιμή για την οποία η διαστολή μηδενίζεται.

### 5.2.3 Αποτελέσματα της δοκιμής άμεσης διάτμησης

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα όπως αυτά προέκυψαν από την εκτέλεση της δοκιμής άμεσης διάτμησης. Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι τα παρακάτω αποτελέσματα αφορούν την εκτέλεση της δοκιμής σε ένα μόνο δείγμα



καθώς η συλλογή περισσότερων δειγμάτων για την μεγαλύτερη αξιοπιστία της δοκιμής δεν κατέστη δυνατή.

Η δοκιμή άμεσης διάτμησης πραγματοποιήθηκε σε 5 στάδια ορθής τάσης από 0-1 MPa με σκοπό την προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών . Στην συνέχεια παρατίθεται συνοπτικός πίνακας των τιμών που χρησιμοποιούνται στην κινηματική ανάλυση του εξεταζόμενου πρανούς.

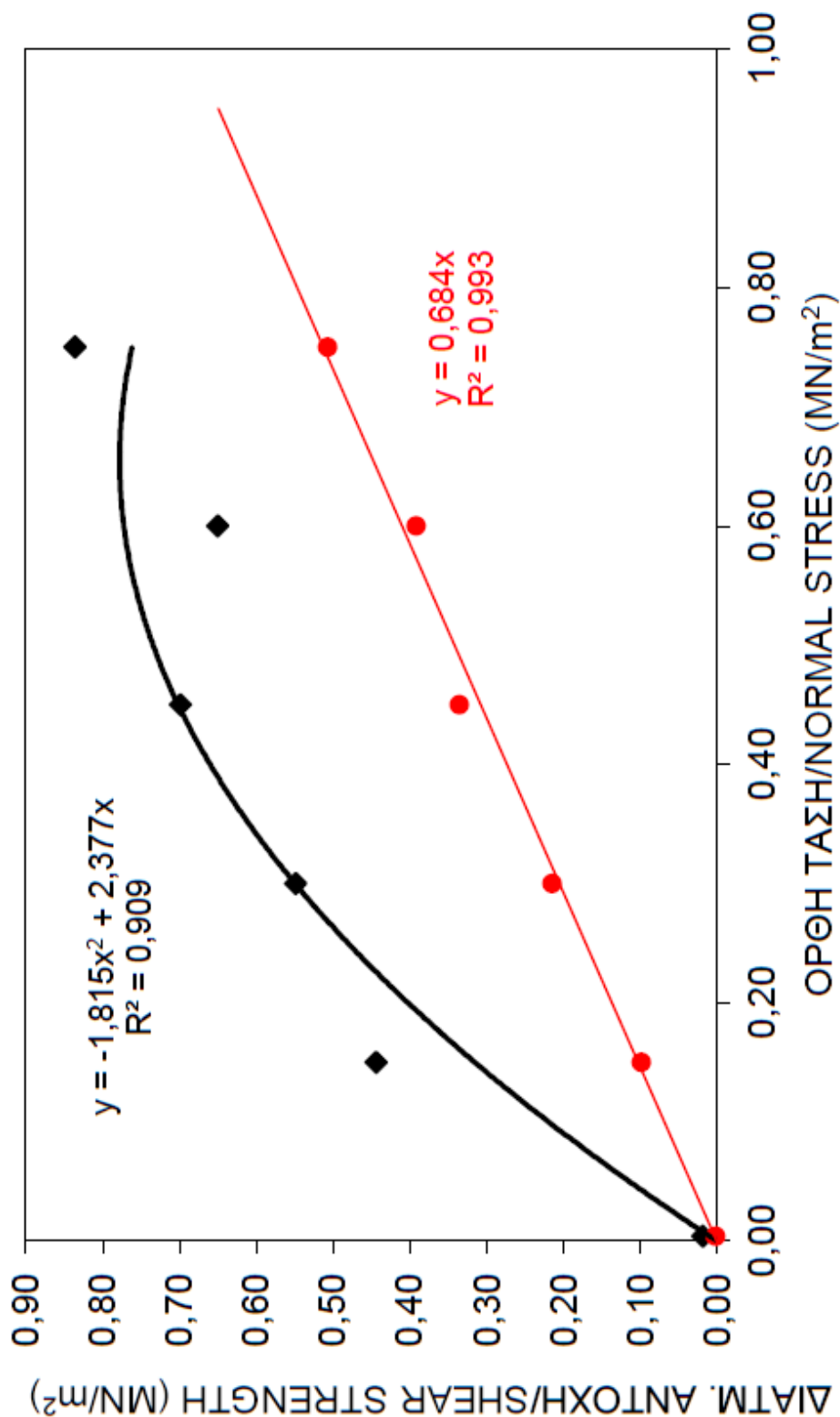
Η τιμή Χωρίς Διαστολή εκφράζει την συνιστώσα τριβής του υλικού των τοιχωμάτων της ασυνέχειας και είναι ανεξάρτητη της τραχύτητας και της κλίμακας. Η τιμή με Διαστολή (Μέγιστη) του υλικού των τοιχωμάτων της ασυνέχειας εκφράζει την συνιστώσα τριβής του υλικού των τοιχωμάτων της ασυνέχειας καθώς εμπεριέχει και την γεωμετρική συνιστώσα δηλαδή την επίδραση της τραχύτητας. Για την εξέταση της κινηματικής ανάλυσης του υλικού θα χρησιμοποιηθούν οι παράμετροι της Μέγιστης Διατμητικής αντοχής στην οποία συμπεριλαμβάνεται και η επίδραση της τραχύτητας γιατί από την επιτόπου παρατήρηση στο πεδίο θεωρήθηκε ότι ο μηχανισμός αστοχίας εξαρτάται από την τραχύτητα των ασυνεχειών.

Πίνακας 6 Αποτελέσματα από την δοκιμή άμεσης διάτμησης

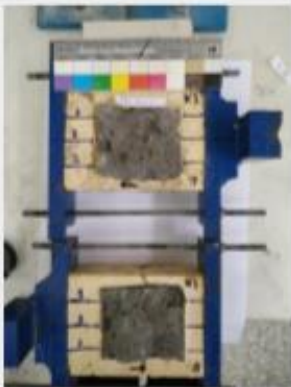
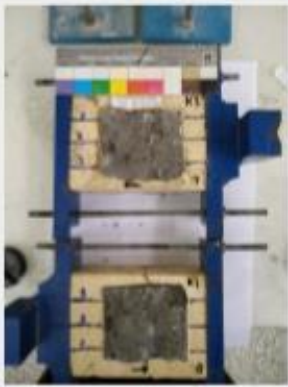
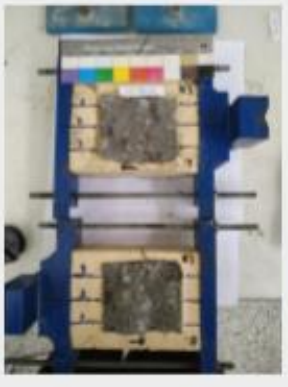
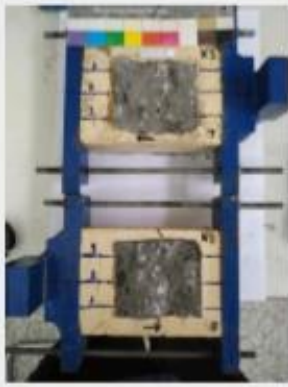
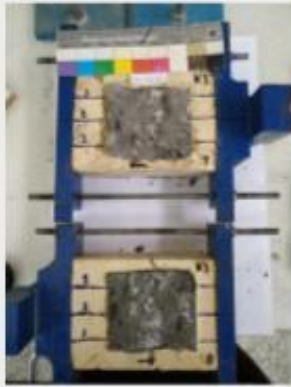
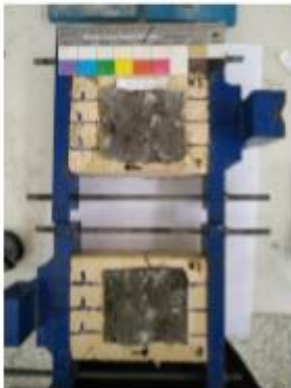
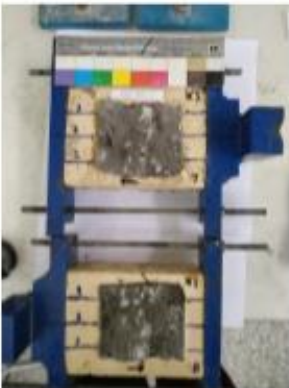
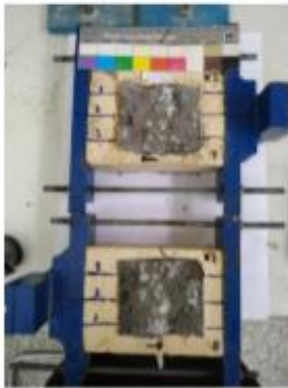
#### ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

|                             | ΜΕΓΙΣΤΗ | ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗ |
|-----------------------------|---------|----------------|
| Γωνία τριβής / $\phi$ ( ° ) | 42,8    | 34,4           |
| Συνοχή / $c$ (kPa)          | 184,4   | 0,0            |

# ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΤΜ. ΑΝΤΟΧΗΣ - ΟΡΘΗΣ ΤΑΣΗΣ SHEAR STRENGTH - NORMAL STRESS DIAGRAM



Εικόνα 47 Διάγραμμα διατμητικής αντοχής σε συνάρτηση με την ορθή τάση

|           | Stage 1                                                                            | Stage 2                                                                             | Stage 3                                                                              | Stage 4                                                                              | Stage 5                                                                              |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Pre-test  |   |   |   |   |   |
| Post-test |  |  |  |  |  |
|           | 150kPa                                                                             | 300kPa                                                                              | 450kPa                                                                               | 600kPa                                                                               | 750kPa                                                                               |

Εικόνα 48 Φωτογραφίες του δείγματος πριν και μετά από κάθε στάδιο φόρτισης με την εφαρμογή του κριτηρίου Papaliangas

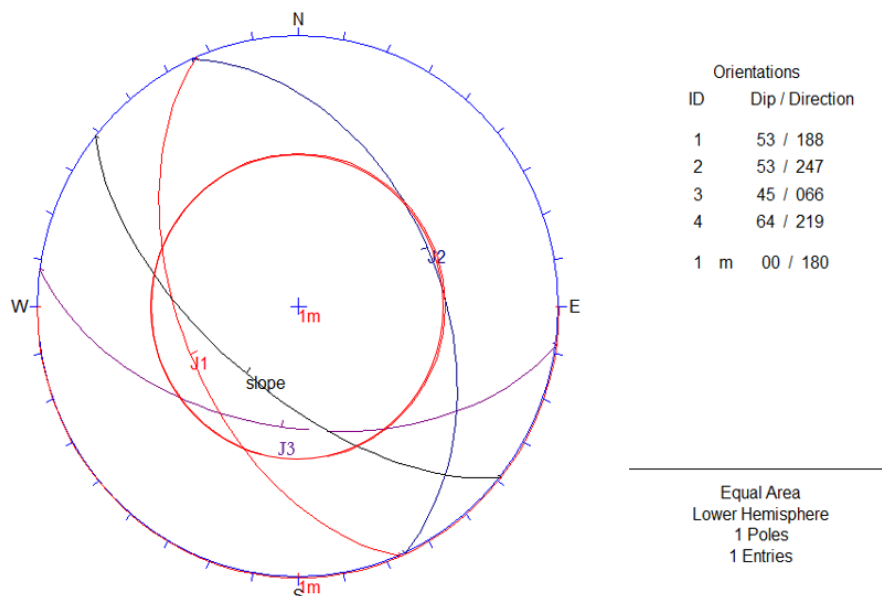
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

### 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ο μηχανισμός αστοχίας του πρανούς καθώς και ο συντελεστής ασφαλείας. Στο εξεταζόμενο πρανές, η κινηματική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με βάση τα στοιχεία προσανατολισμού των κύριων συστημάτων ασυνεχειών όπως αυτά προέκυψαν από το νέφος σημείου. Η γωνία τριβής, με την οποία πραγματοποιήθηκε έλεγχος, προήλθε από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών και συγκεκριμένα από το κριτήριο Papaliangas, η οποία αξιολογήθηκε  $\phi = 42,8^\circ$ . Σύμφωνα με τα παρακάτω προκύπτει το παρακάτω τεκτονικό διάγραμμα.

### 6.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

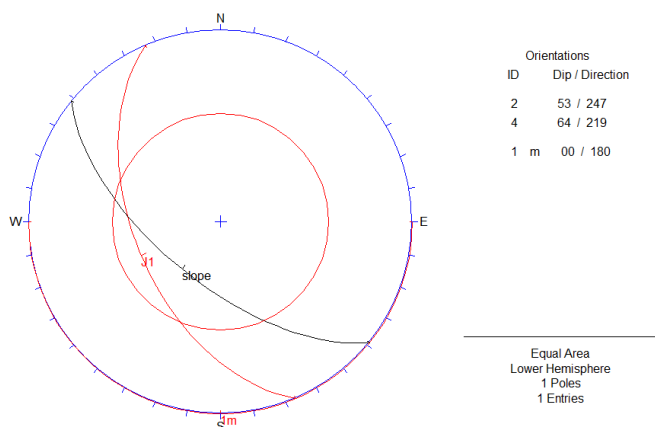
Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα αποτελέσματα (Εικόνα 49) που προέκυψαν με την χρήση του λογισμικού Rockscience Dips 5.0 για την εκάστοτε αστοχία ξεχωριστά. Ο κύκλος τριβής θεωρήθηκε  $47^\circ$  και το πρανές έχει στοιχεία  $64^\circ/224^\circ$ .



Εικόνα 49 Τεκτονικό διάγραμμα όπου παρουσιάζονται οι πιθανές αστοχίες.

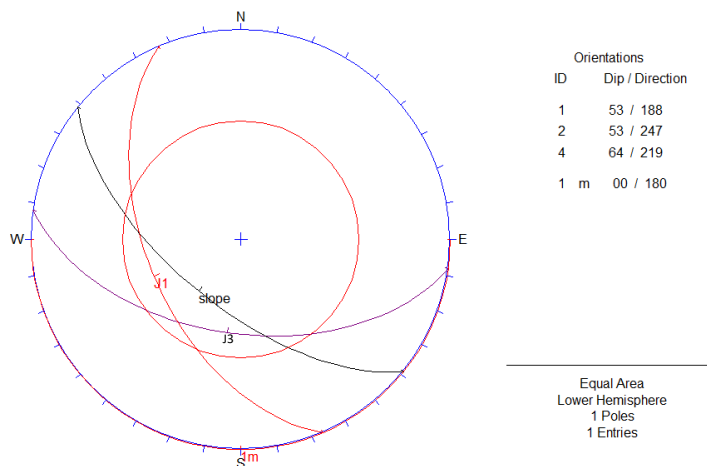
Από την προβολή όλων των παραπάνω στοιχείων στο τεκτονικό διάγραμμα προκύπτει επίπεδη ολίσθηση επί το σύστημα ασυνεχειών J1 (Εικόνα 50). Οι κύριες προϋποθέσεις της επίπεδης ολίσθησης είναι το επίπεδο αστοχίας να έχει διεύθυνση παράλληλη προς το

επίπεδο του πρανούς και διαφορά στη μέγιστη γωνία κλίσης  $\pm 20^\circ$ . Επιπρόσθετα, η κλίση του πρανούς πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την κλίση του επιπέδου ολίσθησης και μεγαλύτερη από τη γωνία τριβής καθώς και η ασυνέχεια να “ξεμυτίζει” στην επιφάνεια του πρανούς.



Εικόνα 50 Εξέταση επίπεδης ολίσθησης

Από την προβολή όλων των παραπάνω στοιχείων στο τεκτονικό διάγραμμα προκύπτει σφηνοειδής ολίσθηση επί των συστημάτων ασυνεχειών J1-J3 (Εικόνα 51). Οι κύριες προϋποθέσεις εκδήλωσης σφηνοειδούς ολίσθησης είναι η δημιουργία δίδρου από τον συνδυασμό 2 ασυνεχειών το οποίο ολισθαίνει κατά την ακμή του. Η γωνία του πρανούς πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ακμή (φτ) και οι δύο μεγαλύτερες από την γωνία τριβής της ασυνέχειας. Τέλος η τομή είναι αναγκαίο να “ξεμυτίζει” στην επιφάνεια του πρανούς.



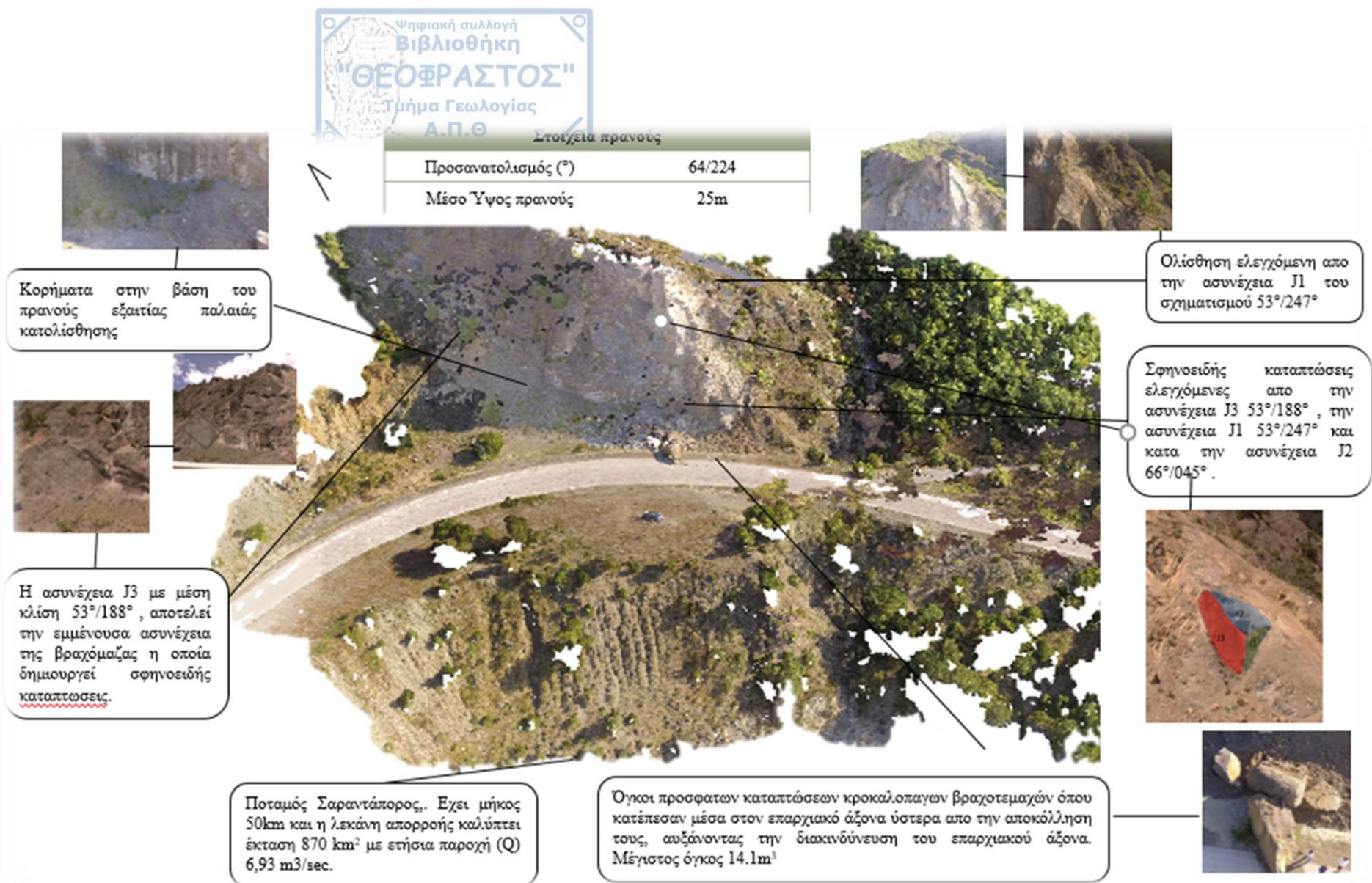
Εικόνα 51 Εξέταση σφηνοειδούς ολίσθησης



Συνοψίζοντας, έπειτα από κινηματική ανάλυση προέκυψαν οι παρακάτω δυνητικές αστοχίες:

- Επίπεδη ολίσθηση κατά μήκος του συστήματος οικογενειών J1 από τεμάχη που σχηματίζονται από την τομή τους με την στρώση
- Σφηνοειδής ολίσθηση μεταξύ των συστημάτων J3-J1

Ο παραπάνω μηχανισμός αστοχίας αποδίδεται σχηματικά στο παρακάτω μοντέλο προσομοίωσης των συνθηκών αστοχίας που επικρατούν στην περιοχή μελέτης (conceptual model) (Εικόνα 52)



Εικόνα 52 Μοντέλο όπως προκύπτει από την πτήση μη-επανδρωμένου αεροσκάφους UAV

## 6.1 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

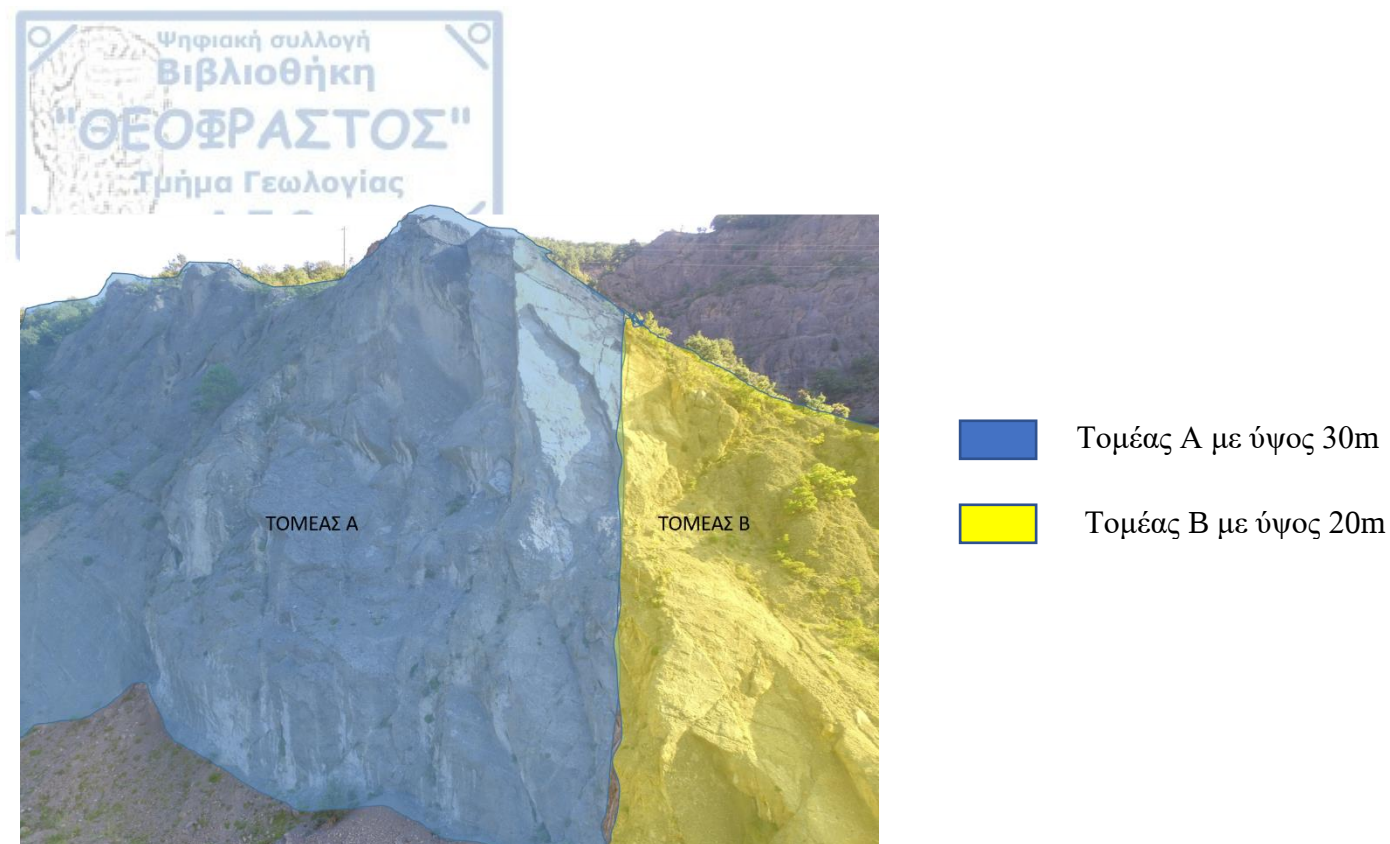
Η ανάλυση του μηχανισμού αστοχίας του εξεταζόμενου πρανούς στοχεύει στον υπολογισμό του Συντελεστή Ασφαλείας (SF=Safety Factory) για τις δυνητικές αστοχίες. Ο υπολογισμός του Συντελεστή Ασφαλείας είναι αναγκαίος για τον υπολογισμό των καλύτερων δυνατών μέτρων προστασίας του βραχώδους πρανούς, όπως θα συζητηθεί σε παρακάτω κεφάλαιο.

Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας πραγματοποιείται με την χρήση των εμπορικών προγραμμάτων της RockScience. Όπως διαπιστώθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο οι υψηλές βροχοπτώσεις ευνοούν την δημιουργία κατολισθητικών φαινομένων στο εξεταζόμενο πρανές. Εξαιτίας αυτού ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας εκτιμάται σε ξηρές και υγρές συνθήκες. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την διερεύνηση του συντελεστή ασφαλείας

Πίνακας 7 Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την διερεύνηση του συντελεστή ασφαλείας

|                                   | <i>RocPlane</i> |                              | <i>Swedge</i> |
|-----------------------------------|-----------------|------------------------------|---------------|
| <i>Γωνία κλίσης πρανούς</i>       | 64°             | <b>J1</b>                    | 63°/247°      |
| <i>Γωνία κλίσης ασυνέχειας J1</i> | 63°             | <b>J2</b>                    | 55°/188°      |
| <i>JRC</i>                        | 10              | <b>Πρανές</b>                | 64°/224°      |
| <i>JCS</i>                        | 55 MPa          | <b>Εφελκυστική<br/>ρωγμή</b> | 66°/045°      |
| <i>φ<sub>b</sub></i>              | 35°             |                              |               |

Το πρανές δεν παρουσιάζει ένα ενιαίο ύψος κατά μήκος της περιοχής μελέτης. Εξαιτίας αυτού το εξεταζόμενο πρανές θεωρήθηκε ότι αποτελείται από δύο τομείς με βάση το ύψος του με σκοπό την καλύτερη δυνατή προσέγγιση των πραγματικών συνθηκών. Στην Εικόνα 53 παρουσιάζονται οι δύο τομείς του πρανούς με βάση του οποίου έγινε η διερεύνηση του συντελεστή ασφαλείας



Εικόνα 53 Οι τομείς του πρανού με βάση την διαφορά ύψους κατά μήκος του πρανού

### 6.3.1 Διερεύνηση του συντελεστή ασφαλείας στον τομέα Α

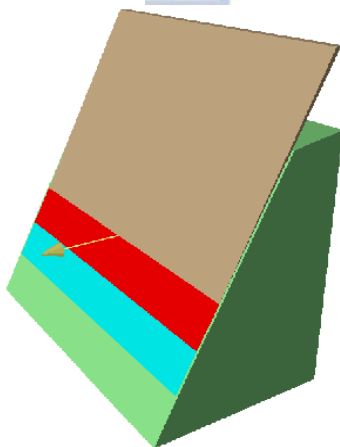
#### Επίπεδη ολίσθηση

Στον παρακάτω πίνακα ακολουθεί ο συντελεστής ασφαλείας τόσο σε ξηρές όσο και σε υγρές συνθήκες. Παρατηρείται ότι σε ξηρές συνθήκες ο συντελεστής ασφαλείας είναι 1.14. Συνεπώς η επίπεδη ολίσθηση δυνητικά θα συμβεί μόνο στην περίπτωση όπου η ασυνέχεια πληρώνεται με νερό, όπως είναι δυνατόν να συμβεί στην περίπτωση έντονης βροχόπτωσης.

Πίνακας 8 Συντελεστής ασφαλείας για την επίπεδη ολίσθηση σε υγρές και ξηρές συνθήκες

|                                      | Υγρές συνθήκες | Ξηρές συνθήκες |
|--------------------------------------|----------------|----------------|
| Συντελεστής ασφαλείας ( <i>S.F</i> ) | 0.15           | 1.14           |

Στις εικόνες 54&55 παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία που προέκυψαν από τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας τόσο σε υγρές όσο και σε ξηρές συνθήκες.

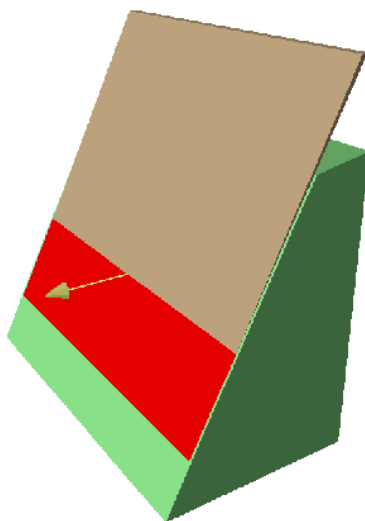


|                              |                       |
|------------------------------|-----------------------|
| Factor of Safety             | 0.15                  |
| Driving Force                | 24.66t/m              |
| Resisting Force              | 3.58t/m               |
| Wedge Weight                 | 26.59t/m              |
| Wedge Volume                 | 9.85m <sup>3</sup> /m |
| Shear Strength               | 2.41t/m <sup>2</sup>  |
| Normal Force                 | 0.98t/m               |
| Seismic Force                | 2.13t                 |
| Plane Waviness               | 50.0°                 |
| Water Force on Failure Plane | 9.19t/m               |

Εικόνα 54 Συντελεστής ασφαλείας σε υγρές συνθήκες

### RocPlane Analysis

Document Name: RocPlaneNew.pln  
Job Title: RocPlane - Planar Wedge Stability Analysis  
View: PERSPECTIVE  
Safety Factor: 1.14262



|                  |                       |
|------------------|-----------------------|
| Factor of Safety | 1.14                  |
| Driving Force    | 24.66t/m              |
| Resisting Force  | 28.17t/m              |
| Wedge Weight     | 26.59t/m              |
| Wedge Volume     | 9.85m <sup>3</sup> /m |
| Shear Strength   | 16.05t/m <sup>2</sup> |
| Normal Force     | 10.18t/m              |
| Seismic Force    | 2.13t                 |
| Plane Waviness   | 50.0°                 |

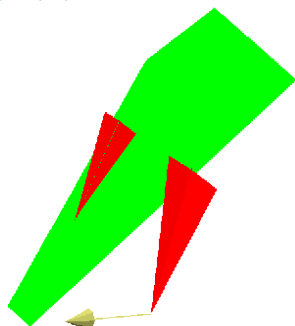
Εικόνα 55 Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρές συνθήκες

### Σφηνοειδής ολίσθηση

Στον παρακάτω πίνακα ακολουθεί ο συντελεστής ασφαλείας τόσο σε ξηρές όσο και σε υγρές συνθήκες ( Εικόνα 56 & 57). Παρατηρείται ότι σε ξηρές και υγρές συνθήκες ο συντελεστής ασφαλείας είναι 0.58. Συνεπώς η σφηνοειδής ολίσθηση δυνητικά θα συμβεί και στην περίπτωση όπου η ασυνέχεια δεν πληρώνεται με νερό.

#### Swedge Analysis

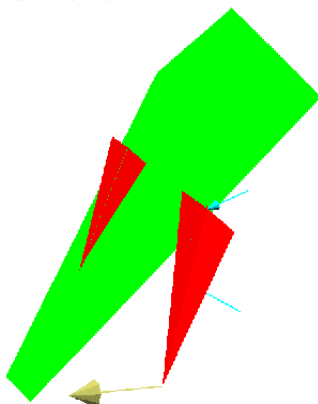
Document Name: Swedgenew.swd  
Job Title: SWEDGE - Surface Wedge Stability Analysis  
View: PERSPECTIVE  
Safety Factor: 0.58608



Analysis type=Deterministic  
Safety Factor=0.58608  
Wedge height(on slope)=30 m  
Wedge width(on upper face)=6.76729 m  
Wedge volume=11.5172 m3  
Wedge weight=29.9448 tonnes  
Wedge area (joint1)=31.298 m2  
Wedge area (joint2)=4.66318 m2  
Wedge area (slope)=27.4881 m2  
Wedge area (upper face)=114.424 m2  
Wedge area (tension crack)=3.19695 m2  
Normal force (joint1)=12.7369 tonnes  
Normal force (joint2)=3.98254 tonnes  
Driving force=25.6863 tonnes  
Resisting force=15.0542 tonnes

Εικόνα 56 Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρές συνθήκες

Document Name: Swedgenew.swd  
Job Title: SWEDGE - Surface Wedge Stability Analysis  
View: PERSPECTIVE  
Safety Factor: 0.102725



Analysis type=Deterministic  
Safety Factor=0.582071  
Wedge height(on slope)=30 m  
Wedge width(on upper face)=6.76729 m  
Wedge volume=11.5172 m3  
Wedge weight=29.9448 tonnes  
Wedge area (joint1)=31.298 m2  
Wedge area (joint2)=4.66318 m2  
Wedge area (slope)=27.4881 m2  
Wedge area (upper face)=114.424 m2  
Wedge area (tension crack)=3.19695 m2  
Normal force (joint1)=12.6462 tonnes  
Normal force (joint2)=3.96377 tonnes  
Driving force=25.6939 tonnes  
Resisting force=14.9557 tonnes

Water Pressures/Forces:  
Average pressure on fissures=0.00289634 tonnes/m2  
Water force on joint1=0.0906498 tonnes  
Water force on joint2=0.0135062 tonnes  
Water force on tension crack=0.00925945 tonnes

Εικόνα 57 Συντελεστής ασφαλείας σε υγρές συνθήκες. Η ασυνέχεια έχει πληρωθεί 20% με νερό

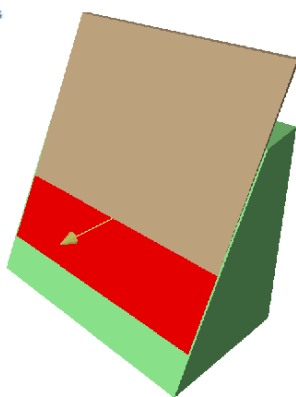
### 6.3.2 Διερεύνηση του συντελεστή ασφαλείας στον τομέα Β

#### Επίπεδη ολίσθηση

Στον παρακάτω πίνακα ακολουθεί ο συντελεστής ασφαλείας τόσο σε ξηρές όσο και σε υγρές συνθήκες ( Εικόνα 58 & 59). Παρατηρείται ότι σε ξηρές συνθήκες ο συντελεστής ασφαλείας είναι 1.19. Συνεπώς η επίπεδη ολίσθηση δυνητικά θα συμβεί μόνο στην περίπτωση όπου η ασυνέχεια πληρώνεται με νερό , όπως είναι δυνατόν να συμβεί στην περίπτωση έντονης βροχόπτωσης.

#### RocPlane Analysis

Document Name: RocPlaneNew.pln  
Job Title: RocPlane - Planar Wedge Stability Analysis  
View: PERSPECTIVE  
Safety Factor: 1.18911

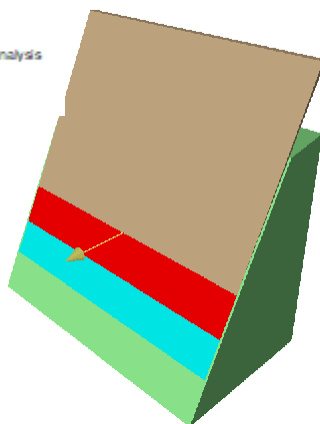


|                  |                       |
|------------------|-----------------------|
| Factor of Safety | 1.19                  |
| Driving Force    | 10.96t/m              |
| Resisting Force  | 13.03t/m              |
| Wedge Weight     | 11.82t/m              |
| Wedge Volume     | 4.38m <sup>3</sup> /m |
| Shear Strength   | 7.64t/m <sup>2</sup>  |
| Normal Force     | 4.52t/m               |
| Seismic Force    | 0.95t                 |
| Plane Waviness   | 50.0°                 |

Εικόνα 58 Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρές συνθήκες

#### RocPlane Analysis

Document Name: RocPlaneNew.pln  
Job Title: RocPlane - Planar Wedge Stability Analysis  
View: PERSPECTIVE  
Safety Factor: 0.154314



|                              |                       |
|------------------------------|-----------------------|
| Factor of Safety             | 0.15                  |
| Driving Force                | 10.96t/m              |
| Resisting Force              | 1.69t/m               |
| Wedge Weight                 | 11.82t/m              |
| Wedge Volume                 | 4.38m <sup>3</sup> /m |
| Shear Strength               | 1.17t/m <sup>2</sup>  |
| Normal Force                 | 0.44t/m               |
| Seismic Force                | 0.95t                 |
| Plane Waviness               | 50.0°                 |
| Water Force on Failure Plane | 4.09t/m               |

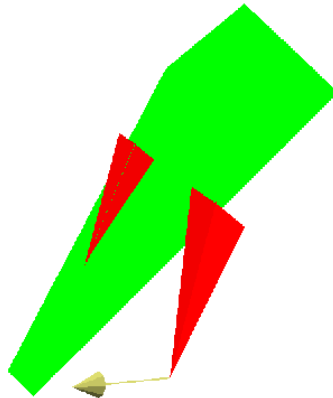
Εικόνα 59 Συντελεστής ασφαλείας σε υγρές συνθήκες με 19% πλήρωση της ασυνέχειας με νερό

### Σφηνοειδής ολίσθηση

Στον παρακάτω πίνακα ακολουθεί ο συντελεστής ασφαλείας τόσο σε ξηρές όσο και σε υγρές συνθήκες (Εικόνα 60 & 61). Παρατηρείται ότι σε ξηρές συνθήκες ο συντελεστής ασφαλείας είναι 0.58. Συνεπώς η σφηνοειδής ολίσθηση δυνητικά θα συμβεί και στην περίπτωση όπου η ασυνέχεια δεν πληρώνεται με νερό.

### Swedge Analysis

Document Name: Swedge.new.swd  
Job Title: SWEDGE - Surface Wedge Stability Analysis  
View: PERSPECTIVE  
Safety Factor: 0.58608

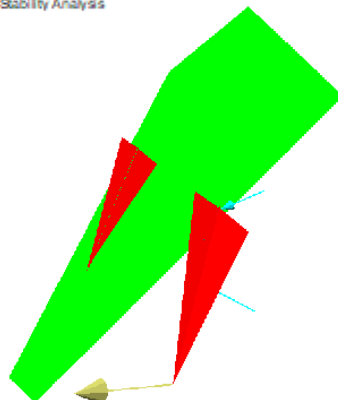


Analysis type=Deterministic  
Safety Factor=0.58608  
Wedge height(on slope)=20 m  
Wedge width(on upper face)=4.45937 m  
Wedge volume=3.6546 m<sup>3</sup>  
Wedge weight=9.50196 tonnes  
Wedge area (joint1)=15.1257 m<sup>2</sup>  
Wedge area (joint2)=2.18251 m<sup>2</sup>  
Wedge area (slope)=12.2169 m<sup>2</sup>  
Wedge area (upper face)=49.7292 m<sup>2</sup>  
Wedge area (tension crack)=1.346 m<sup>2</sup>  
Normal force (joint1)=4.04162 tonnes  
Normal force (joint2)=1.26372 tonnes  
Driving force=8.15068 tonnes  
Resisting force=4.77695 tonnes

Εικόνα 60 Συντελεστής ασφαλείας σε ξηρές συνθήκες

### Swedge Analysis

Document Name: Swedge.new.swd  
Job Title: SWEDGE - Surface Wedge Stability Analysis  
View: PERSPECTIVE  
Safety Factor: 0.11335



Analysis type=Deterministic  
Safety Factor=0.11335  
Wedge height(on slope)=20 m  
Wedge width(on upper face)=4.45937 m  
Wedge volume=3.6546 m<sup>3</sup>  
Wedge weight=9.50196 tonnes  
Wedge area (joint1)=15.1257 m<sup>2</sup>  
Wedge area (joint2)=2.18251 m<sup>2</sup>  
Wedge area (slope)=12.2169 m<sup>2</sup>  
Wedge area (upper face)=49.7292 m<sup>2</sup>  
Wedge area (tension crack)=1.346 m<sup>2</sup>  
Normal force (joint1)=0.487469 tonnes  
Normal force (joint2)=0.571312 tonnes  
Driving force=8.41047 tonnes  
Resisting force=0.953331 tonnes

Water Pressures/Forces:  
Average pressure on fissures=0.234917 tonnes/m<sup>2</sup>  
Water force on joint1=3.55329 tonnes  
Water force on joint2=0.512709 tonnes  
Water force on tension crack=0.316199 tonnes

Εικόνα 61 Συντελεστής ασφαλείας σε υγρές συνθήκες. Η ασυνέχεια έχει πληρωθεί 100% με νερό

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΑ ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

### 7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάλυση των συνθηκών αστοχίας κατά μήκος του πρανούς αποσκοπούν στην εκτίμηση της επικινδυνότητας και της διακινδύνευσης με σκοπό την μείωση των συνεπειών και την προστασία του εθνικού δρόμου για την αποφυγή ατυχήματος. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω κρίνεται απαραίτητο να προταθούν μέτρα προστασίας έναντι του πολύπλοκου μηχανισμού αστοχίας κατά μήκος του πρανούς για τον περιορισμό της επικινδυνότητας σε όσο το δυνατό χαμηλότερο επίπεδο.

Στο παρόν κεφάλαιο αναφέρονται τα προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης του πρανούς βασιζόμενα σε κριτήρια όπως ο συντελεστής ασφαλείας, η αποτελεσματικότητα, ο τρόπος εφαρμογής καθώς και η προστασία του φυσικού πλούτου. Τα προτεινόμενα μέτρα προστασίας αποσκοπούν στη μείωση και σταθεροποίηση της αστοχίας ( ενεργητικά μέτρα προστασίας) καθώς και στην αποτροπή της αστοχίας ( παθητικά μέτρα προστασίας).

### 7.2 ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Τα παθητικά μέτρα αντιστήριξης έχουν ως σκοπό την ελάττωση των συνεπειών της αστοχίας. Η αποτελεσματικότερη και οικονομικότερη μέθοδος, η οποία προτείνεται, είναι η απομάκρυνση του δυνητικού προς κατάπτωση βραχώδους υλικού ( ξεσκάρωμα) από το πρανές με χειροκίνητα ή μηχανικά μέσα με στόχο την ασφάλεια του οδοστρώματος από καταπτώσεις.

#### Παθητικά μέτρα προστασίας

- Προτείνεται η κατασκευή περιμετρικών τάφρων αποστράγγισης με στόχο την επιφανειακή απορροή των υδάτων και την αποφυγή της κατεΐσδυσης του νερού από τις ανοιχτές ασυνέχειες. Η μέθοδος των αποστραγγιστικών οπών δεν προτείνεται διότι ελλοχεύει ο κίνδυνος διατάραξης της βραχώμαζας και πρόκλησης καταπτώσεων.



- Προτείνεται η κατασκευή φράχτη ανάσχεσης εφαρμογή εκτοξευμένου σκυροδέματος κατά μήκος του πρανούς με σκοπό την μείωση της πιθανότητας της κίνησης των δυνητικών τεμαχών προς κατάπτωση της βραχόμαζας

#### Ενεργητικά μέτρα προστασίας

Προτείνεται τοποθέτηση αγκυρίων κατά μήκος του εξεταζόμενου πρανούς με σκοπό την επίτευξη  $>1.2$  συντελεστή ασφαλείας έναντι των βραχοκαταπτώσεων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό την ανάλυση του μηχανισμού αστοχίας καθώς και εφαρμογή κατάλληλων μέτρων προστασίας του βραχώδους πρσανούς, από στοιχεία που εξάγονται από τον επίγειο σαρωτή LiDAR σε βραχώδεις πρανές κροκαλοπαγούς σύστασης. Η κατολίσθηση έλαβε χώρα μεταξύ του διαστήματος Ιούνιος 2016-Μαιος 2017 σύμφωνα με προσωπική παρατήρηση το διάστημα αυτό. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η επαλήθευση της εγκυρότητας της εξαγωγής γεωμετρικών στοιχείων της βραχώμαζας με την χρήση των δεδομένων που παράγονται από τον επίγειο σαρωτή LiDAR.

Η εφαρμογή του επίγειου σαρωτή LiDAR ανέδειξε τα οφέλη της συγκεκριμένης τεχνολογίας όπως την δυνατότητα υψηλής χωρικής ανάλυσης σε περιοχές όπου η πρόφαση για την χρήση των συμβατικών μεθόδων (μέτρηση με πυξίδα) καθιστάτε δύσκολη έως αδύνατη. Στην συγκεκριμένη έρευνα εξαιτίας του ύψους και της απότομης κλίσης του πρσανούς η λήψη μετρήσεων με την πυξίδα ήταν ιδιαίτερα δύσκολη.

Για την εξαγωγή των στοιχείων προσανατολισμού των συστημάτων ασυνεχειών χρησιμοποιήθηκαν δύο αλγόριθμοι διαφορετικών λογισμικών, ο αλγόριθμος του λογισμικού CloudCompare και τα πακέτα αλγόριθμων του λογισμικού DSE. Μετά από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, τα στοιχεία του προσανατολισμού των συστημάτων των ασυνεχειών που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση βασίζονται στα αποτελέσματα που προέκυψαν από την χρήση του δεύτερου λογισμικού καθώς αυτό ανταποκρίνεται καλύτερα στην πραγματικότητα

Σύμφωνα με την ανάλυση το βραχώδες πρανές αστόχησε ανισότροπα. Συγκεκριμένα, η βραχώμαζα στην περιοχή μελέτης είναι επιδεκτική έναντι επίπεδης ολίσθησης στην στρώση οικογένεια ασυνεχειών J1  $63^{\circ}/247^{\circ}$  και σφηνοειδούς αστοχίας μεταξύ της J3 και της αντίρροπης σε αυτήν οικογένεια ασυνεχειών J1  $63^{\circ}/247^{\circ}$ . Από την ανάλυση προκύπτει ότι το σύστημα ασυνεχειών J2 με προσανατολισμό  $66/045$  λειτουργεί ως εφελκυστική ρωγμή κατά την εκδήλωση της σφηνοειδούς αστοχίας.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του μηχανισμού αστοχίας προτείνεται η κατασκευή αποστραγγιστικών τάφρων περιμετρικά του πρσανούς και την



αποστράγγιση του επιφανειακού νερού καθώς και την κατασκευή φράχτη ανάσχεσης. Τέλος, προτείνεται η εφαρμογή αγκυριών με σκοπό την αποτροπή επανάληψης των αστοχιών στο μέλλον.



Ansmann, A.(1992) Combined raman elastic-backscatter LIDAR for vertical profiling of moisture, aerosol extinction, backscatter, and LIDAR ratio.*Applied Physics B.* 55(1), 18-28

Azzoni, A (1995). Experimentally gained parameters, decisive for rock fall analysis.*Rock mechanics and Rock Engineering*,28(2),111-124

AW, R., AF, M., & JB, W. (1991). Ecology of a coastal lagoon to dune forest sequence, South Westland, New Zealand. *New Zealand Journal of Botany*, 29(October 1990), 17–30.

Brunn, J. (1956) Contribution à l'étude du Pinde septentrional et d'une partie de la Macédoine occidentale. *Annales Géologiques du Pays Helléniques*, 7, 358.

Broilli, L. 1974: Ein Felssturz in Großversuch. *Rock Mechanics Suppl.* 3, 69–78

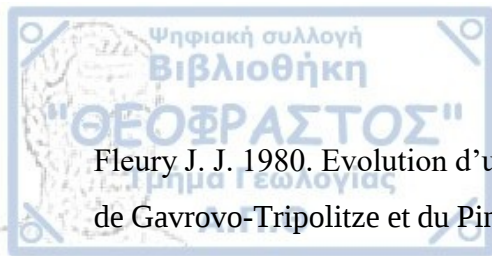
Carter, T. G., & Marinos, V. (2014). Use of GSI for Rock Engineering Design. *1st International Conference on Applied Empirical Design Methods in Mining*.

Dorren, L. K. A. (2003). A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography*, 27(1), 69–87.

Dewez, T.J.B., Stewart, I.S., 2015, From Digital Elevation Models to 3-D deformation fields: a semi-automated analysis of uplifted coastal terraces on the Kamena Vourla Fault, central Greece, in Dykes, A.P., Mulligan, M., Wainwright, J. (eds.),*Monitoring and modelling Dynamic Environments*, Wiley Blackwell, London, 226-247.

Deere D. and Miller R. (1966): “Engineering classification and index properties for intact rock” *Tech. Report No AFWL - TR-65-116*, Air Force Weapons Lab., Kirtland Air Base, New Mexico

Dips, Version 4.0, Rocscience Inc.



Fleury J. J. 1980. Evolution d'une plateforme et d'un bassin dans leur cadre alpin : les zones de Gavrovo-Tripolitze et du Pinde-Olonos, *Soc. Géol. du Nord, Special Publication 4*, 651

Flament J. 1973. De Γ Olonos au Chelmos: étude géologique d' un secteur de la nappe du Pinde - Olonos, *Thèse 3e cycle Lille*, 206p

**Google Earth**, Google Earth Pro.

Lato, M. J. (2010). Geotechnical applications of LiDAR pertaining to geomechanical evaluation and hazard identification.

Lato, M. J., Diederichs, M. S., & Hutchinson, D. J. (2010). Bias correction for view-limited lidar scanning of rock outcrops for structural characterization. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43(5), 615–625. <https://doi.org/10.1007/s00603-010-0086-5>

Lato, M. J., Harrap, R., Hutchinson, J., Diederichs, M., & Martin, D. (n.d.). *Assessing Geometry of Rock Masses using Static and Mobile LiDAR Scanning*.

Novotný, J. (2013). Varnes Landslide Classification (1978) (powerpoint). *Charles University in Prague, Faculty of Science, Czech Republic*, (November), 25 p.

Papaliangas t. Hencher s. & lumsden a. (1995). A comprehensive peak shear strength criterion for rock joints. *Proc. 8th Int. Congress ISRM, Tokyo*, 1,359-366

Papaliangas t. Lumsden a. & hencher s. (1996). Prediction of in situ peak shear strength of rock joints. *EUROCK' 96 Proc. Int. Symp on Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering. Barla G(ed.)*, 1 ,143-149. Rotterdam : Balkema.

Papaliangas t. (1997) Origin and Magnitude of Shear Resistance of Rocks. *3rd Hellenic conference on geotechnical engineering*. 1, 145-152

Papaliangas t. (1997) A New Peak Shear Strength Criterion for Rock Joints. *3rd Hellenic conference on geotechnical engineering*, 1, 153-159

Papaliangas t. Manolopoulou s. Lumsden a. Hencher s. (1997) Applications of a New Peak Shear Strength Criterion for Rock Joints. *3rd Hellenic conference on geotechnical*

R., B. N., & V., C. (1977). Barton , N . R . and Choubey , V . 1977 . *The shear strength of rock joints in theory*. 10.

Riquelme, A., Tomás, R., Cano, M., & Abellán, A. (2016). *Using open-source software for extracting geomechanical parameters of a rock mass from 3D point clouds: Discontinuity set extractor and SMRTTool*. 1091–1096.

Ritchie, A. M. (1963). Evaluation of Rockfall and Its Control. *In Highway Research Record 17, Stability of Rock Slopes, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C.*, 13–28.

Rowe, E. M. (2017). *An examination of structural constraints on rockfall behaviour using LiDAR data*. 157.

Terzaghi k. (1925). The physical causes of proportionality between pressure and frictional resistance, from *Erdbaumechanic* transl. by A. Casagrande in: *From theory to practice in soil mechanics*. Wiley and Sons.

Tranos, M. D., Mountrakis, D. M., Papazachos, C. B., Karagianni, E., & Vamvakaris, D. (2017). Faulting Deformation of the Mesohellenic Trough in the Kastoria-Nestorion Region (Western Macedonia, Greece). *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 43(1), 495. <https://doi.org/10.12681/bgsg.11200>

Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., ... Jaboyedoff, M. (2011). Rockfall characterisation and structural protection - A review. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(9), 2617–2651. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2617-2011>

Γεωδυναμικό Ινστιτούτο Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. <http://www.gein.noa.gr/el/>

Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, (Ε.Μ.Υ.).

ΙΓΜΕ ,ΦΥΛΛΟ ΚΟΝΙΤΣΑΣ



Ιωάννης Κουκουβέλας (2014) Γεωλογία Ελλάδος, Πάτρα, Πανεπιστήμιο Πατρών

Μουντράκης, Δ. (2010). Γεωλογία και Γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδος. Θεσσαλονίκη:  
University Studio Press.